



中国人工智能系列白皮书

智能系统工程

中国人工智能学会
二〇二四年十二月

《中国人工智能系列白皮书》编委会

主任：戴琼海

执行主任：王国胤

副主任：陈杰 何友 刘成林 刘宏 孙富春 王恩东

王文博 赵春江 周志华 郑庆华

委员：班晓娟 曹鹏 陈纯 陈松灿 邓伟文 董振江

杜军平 付宜利 古天龙 桂卫华 何清 胡国平

黄河燕 季向阳 贾英民 焦李成 李斌 刘民

刘庆峰 刘增良 鲁华祥 马华东 苗夺谦 潘纲

朴松昊 钱锋 乔俊飞 孙长银 孙茂松 陶建华

王卫宁 王熙照 王轩 王蕴红 吾守尔·斯拉木

吴晓蓓 杨放春 于剑 岳东 张小川 张学工

张毅 章毅 周国栋 周鸿祎 周建设 周杰

祝烈煌 庄越挺

《中国人工智能系列白皮书——智能系统工程》编写组

刘增良 陈杰 王宇宁 辛斌 陈毅红 梁传圣

唐平 卢凡 彭彦平 杨斌 罗远哲 邓练兵

吕川 谷云东 王祥宗 杨武威 彭志红 王晴

李洪兴 杨天梁 张安安 张友春 刘知贵 刘瑞景

何恩培 何华 汪敏 吕向群 魏建让 曹谢东

孙宇 张学林 张洁 吴扬 张化照 章国栋

董常舟 何千里 李理 解春雷 柯小飞 汪德刚

陈佳琳 王睿星 李山 王倩 邓涛 安文河

侯哲威 张津荣 周传刚 王烨 汤建军 杨恩辉

张永刚 侯占宇 杨俊杰 卢宇 宋雅文 刘路路

何征宇 石鑫 高英凯 陶源 谭学元 曹捷

邓力嘉 任昱衡

目 录

前 言	11
第一部分 智能系统工程概述	13
第一章 智能系统工程的概念与内涵	13
1.1 智能系统工程的定义	13
1.2 智能系统工程的目标	15
1.3 智能系统工程的实现范式	15
1.4 智能系统工程的实现手段	18
1.5 智能系统工程发展历史	19
1.6 小结	20
第二章 智能系统工程的难点问题和解决方法	21
2.1 智能系统工程面临的挑战	21
2.2 智能系统工程的方法	23
2.3 小结	33
第二部分 领域智能系统工程	34
第三章 智能机器人系统工程	34
3.1 智能机器人系统概述	34
3.2 智能机器人系统工程的关键技术	35
3.3 智能机器人系统国内外发展现状	36
3.4 代表性智能机器人系统	38
3.5 小结	39
第四章 智能石油系统工程	39
4.1 智能石油系统概述	39
4.2 智能石油系统工程关键技术	40
4.3 智能石油系统国内外发展情况	41
4.4 代表性智能石油系统	43

4.5 小结	44
第五章 智能制造系统工程	44
5.1 智能制造系统概述	44
5.2 智能制造系统工程关键技术	45
5.3 智能制造系统国内外发展情况	47
5.4 代表性智能制造系统	49
5.5 小结	50
第六章 智慧物流系统工程	50
6.1 智慧物流系统概述	50
6.2 智慧物流系统工程关键技术	51
6.3 智慧物流系统国内外发展情况	53
6.4 代表性智慧物流系统	55
6.5 小结	56
第七章 智慧能源系统工程	57
7.1 智慧能源系统概述	57
7.2 智慧能源系统工程关键技术	59
7.3 智慧能源系统国内外发展情况	61
7.4 代表性智慧能源系统	63
7.5 小结	65
第八章 智慧城市系统工程	66
8.1 智慧城市系统概述	66
8.2 智慧城市系统工程关键技术	69
8.3 智慧城市系统国内外发展情况	71
8.4 代表性智慧城市系统	75
8.5 小结	77
第九章 智能军事系统工程	78
9.1 智能军事系统概述	78

9.2 智能军事系统工程关键技术	79
9.3 智能军事系统发展现状	80
9.4 典型智能军事系统	82
9.5 小结	83
第十章 智能教育系统工程	84
10.1 智能教育系统概述	84
10.2 智能教育系统工程关键技术	85
10.3 智能教育系统发展现状	86
10.4 典型智能教育系统	88
10.5 小结	89
第十一章 智慧医疗系统工程	90
11.1 智慧医疗系统概述	90
11.2 智慧医疗系统工程关键技术	91
11.3 智慧医疗系统发展现状	93
11.4 典型智慧医疗系统	96
11.5 小结	98
第十二章 智能航天系统工程	99
12.1 智能航天系统概述	99
12.2 智能航天系统工程关键技术	100
12.3 智能航天系统发展现状	101
12.4 典型智能航天系统	103
12.5 小结	105
第三部分 典型智能系统工程案例剖析	106
第十三章 南充市电梯智慧物联网系统剖析	107
13.1 引言	107
13.2 系统架构	107
13.3 关键技术	109

13.4 实施过程	110
13.5 应用成效	111
13.6 经验总结	112
第十四章 智能物流系统京东无人仓剖析	113
14.1 引言	113
14.2 系统架构	113
14.3 关键技术	115
14.4 建设过程	115
14.5 应用价值	116
14.6 经验借鉴	116
第十五章 华为智能工厂的数字孪生系统剖析	117
15.1 引言	117
15.2 系统架构	117
15.3 关键技术	118
15.4 应用场景	119
15.5 实施效果	120
15.6 经验启示	120
15.7 结语	120
第十六章 传神智能化多语信息挖掘系统剖析	121
16.1 引言	121
16.2 系统架构	121
16.3 关键技术	123
16.4 应用实践	124
16.5 经验借鉴	125
16.6 结语	126
第十七章 国家电网泛在电力物联网系统剖析	126
17.1 引言	126

17.2 系统架构	127
17.3 关键技术	128
17.4 建设实践	129
17.5 实施成效	130
17.7 结语	131
第十八章 时代星光电子对抗智能无人机系统剖析	131
18.1 引言	131
18.2 系统组成	132
18.3 关键技术	134
18.4 应用场景	137
18.5 实战效能	139
18.6 经验启示	140
18.7 结语	140
第十九章 典型自适应教育学习智能系统剖析	141
19.1 Squirrel AI 自适应学习智能系统	141
19.1.1 引言	141
19.1.2 系统架构	141
19.1.3 关键技术	142
19.1.4 应用效果	143
19.1.5 经验借鉴	143
19.1.6 结语	144
19.2 Knewton 高等教育智能自适应学习系统	144
19.2.1 引言	144
19.2.2 系统架构	144
19.2.3 关键技术	145
19.2.4 应用成效	146
19.2.5 经验启示	146

19.2.6 结语	147
第二十章 典型智能辅助诊疗系统剖析	148
20.1 IBM 沃森 AI 辅助肿瘤诊疗系统	148
20.1.1 引言	148
20.1.2 系统架构	148
20.1.3 关键技术	149
20.1.4 应用效果	150
20.1.5 经验借鉴	151
20.1.6 结语	151
20.2 谷歌 DeepMind 智能眼疾诊断系统	152
20.2.1 引言	152
20.2.2 系统架构	152
20.2.3 关键技术	153
20.2.4 典型应用	154
20.2.5 经验启示	155
20.2.6 结语	156
20.3 腾讯觅影 AI 辅助诊断系统	156
20.3.1 引言	156
20.3.2 系统架构	156
20.3.3 关键技术	158
20.3.4 应用成效	159
20.3.5 经验启示	159
20.3.6 结语	160
20.4 阿里健康 ET 医疗大脑	161
20.4.1 引言	161
20.4.2 系统架构	161
20.4.3 关键技术	162

20.4.4 应用实践	164
20.4.5 经验借鉴	164
20.4.6 结语	165
20.5 海杰亚 HyVision 肿瘤消融辅助决策系统	165
20.5.1 引言	165
20.5.2 系统架构	166
20.5.3 关键技术	167
20.5.4 应用成效	168
20.5.5 经验借鉴	169
20.5.6 结语	170
20.6 东方棱镜中医人工智能辅助诊疗决策系统	171
20.6.1 引言	171
20.6.2 系统架构	171
20.6.3 关键技术	171
20.6.4 应用实践	172
20.6.5 经验借鉴	173
20.6.6 结语	174
第二十一章 中超伟业智能化整体数据安全防护系统剖析	175
21.1 引言	175
21.2 系统架构	175
21.3 关键技术	176
21.4 实施过程	177
21.5 应用成效	178
21.6 经验总结	178
第二十二章 格理特石油化工智慧安全应急系统剖析	179
22.1 引言	179
22.2 系统架构	179

22.3 关键技术	181
22.4 应用实践	189
22.5 经验启示	191
22.6 结语	192
第二十三章 金牌大规模柔性智能制造系统剖析	192
23.1 引言	192
23.2 系统架构	193
23.3 关键技术	194
23.4 应用实践	195
23.5 经验启示	196
第四部分 智能系统工程未来展望	198
第二十四章 智能系统工程发展的总体趋势	198
24.1 人工智能将成为智能系统发展的核心驱动力	198
24.2 系统工程将迎来从信息化、数字化到智能化的跨越式发展	198
24.3 智能系统发展重心将从局部走向整体、从单系统走向体系化	199
24.4 智能系统工程将成为多学科高度交叉融合的前沿阵地 ...	200
24.5 智能系统发展路径将从单纯技术驱动转向需求牵引与制度保障并重	200
第二十五章 智能系统工程的发展重点	201
25.1 瞄准"卡脖子"科学难题,突破理论基础	201
25.2 聚焦产业"卡脖子"技术,突破发展瓶颈	201
25.3 深耕行业场景,打造标杆性示范应用	202
25.4 锻造多学科融通的复合型人才队伍	202
25.5 统筹国内外创新资源,塑造开放发展新格局	203
参考文献	204
后记	212

前 言

本书的撰写得到了众多专家、学者和机构的大力支持。在此,谨对中国人工智能学会的悉心指导表示衷心感谢!对清华大学、北京航空航天大学、国防大学、中科院大学、国防科技大学、空军指挥学院、哈尔滨工业大学、北京理工大学、北京科技大学、北京交通大学、华北电力大学、大连理工大学、西南科技大学、西南石油大学、西华大学等高校专家学者,以及中国航天科技集团航天创新研究院、中国电子科技集团、华为公司、北京中超伟业信息安全技术有限公司、北京东方棱镜科技有限公司、成都时代星光技术有限公司、成都格理特科技有限公司、传神语联网网络科技股份有限公司、广东琴智科技研究院、粤澳先进智能计算联合实验室、西安欣创电子技术有限公司等的大力支持表示诚挚谢意!您们的智慧贡献是本书得以顺利完成的重要保障。

1994 年 9 月,中国军事系统工程委员会在宣化炮兵指挥学院召开了“深化军事系统工程研究与应用学术研讨会”,涂序彦教授应中国军事系统工程委员会主任委员孙柏林将军的邀请参加研讨会,作了关于“人工智能研究、应用与发展”的报告,提出了“智能系统工程”(ISE)的新概念。2007 年,中国人工智能学会设立了智能系统工程专业委员会,旨在促进智能系统工程学科及相关领域的研究和应用推广工作。涂序彦教授是智能系统工程专业委员会的名誉主任,长期以来为智能系统工程学科的发展发挥了系统性的指导作用。智能系统工程学科在中国的发展深深得益于涂先生的开创性贡献。2023 年,涂先生不幸辞世,中国人工智能领域损失了一位令人敬仰的先驱和导师,谨以此书缅怀为智能系统工程学科发展做出了杰出贡献的涂序彦先生。书中关于智能系统工程的大量分析和认识源自涂序彦教授和马忠贵教授的合著《智能系统工程》,在此表示诚挚的敬意。

当前,人工智能技术飞速发展,不断催生出新的应用场景和解决方案,深刻影响和重塑着人类社会的方方面面。将人工智能与系统工程理论方法深度融合,构建智能系统,正成为工程领域的重要创新方向。本书围绕智能系统工程这一前沿课题,系统阐述其基本概念、理论基础、关键技术、方法体系,剖析了智能系统工程在机器人、能源、制造、交通等重点领域的应用实践,分享了一批成功案例,展望了其未来发展方向,旨在为相关领域的科研人员、工程技术人员、管理人员提供有益的参考和启示,以推动智能系统工程创新发展。

第一部分 智能系统工程概述

智能系统工程作为一门新兴交叉学科,正处于蓬勃发展的起步阶段。本部分将从智能系统工程的内涵出发,阐述其目标、手段和实现范式,梳理其发展历程与演进路径,分析当前发展所面临的机遇与挑战。通过对智能系统工程基本理论框架、关键技术路线、方法体系的系统阐述,将为把握这一前沿交叉领域的发展脉络提供参考。站在新的历史起点,如何推动人工智能与系统工程的深度融合,构建支撑智能时代高质量发展的智能系统新业态,是本部分探讨的核心议题。

第一章 智能系统工程的概念与内涵

1.1 智能系统工程的定义

智能系统工程 (Intelligent Systems Engineering, 简称 ISE) 的概念由涂序彦教授最早提出^[1]。他从学科交叉角度将智能系统工程定义为人工智能与系统工程相结合的新学科, 其概念涵义可用下式表示: $AI + SE \rightarrow ISE$ 式中, AI 代表“人工智能”, $+$ 表示“学科交叉”, SE 代表“系统工程”, \rightarrow 表示“产生”, ISE 代表“智能系统工程”。

智能系统工程学科的科学内涵可从多方面理解, 由于包含智能、系统、工程三个主题词, 因此既有智能科学的性质, 又有系统科学的属性, 同时兼有工程技术的特点。

智能系统工程 (ISE) 、系统工程 (SE) 和人工智能 (AI) 虽然有重叠之处, 但各自具有独特的定义、目标和应用领域。

① 系统工程 (SE)^[2]是一种确保系统及其组件以高效、可靠和有效方式满足用户需求的学科。它涉及需求分析、系统设计、实现、验证和维护的全过程。其领域涵盖大型复杂系统的整合、需求管理、验证与测试、项目和质量管理。系统工程的目标在于确保跨学科项目的协调一致, 控制项目风险保证项目按时按质完成并优化资源分配和管

理。

②人工智能(AI)是计算机科学的一个分支,它使机器能够执行通常需要人类智能的任务,如视觉感知、语言理解、决策和翻译等。其领域涵盖机器学习、深度学习、自然语言处理、计算机视觉等,人工智能的目标在于实现复杂任务的自动化,提高任务执行效率,通过更自然的人机交互改进用户体验,并为决策提供数据支持和智能分析。

③智能系统工程(ISE)是一个跨学科的领域,集成了人工智能、机器学习、数据科学和控制系统等技术,以设计和开发可以模拟、增强或扩展人类智能功能的系统。其领域范畴涵盖自动化与机器人技术、人机交互系统、智能数据分析和决策支持系统、智能监控和维护系统。智能系统工程的目标在于提升系统的自动化和效率,使决策过程更多呈现出数据驱动特征和更加精确化,增强系统的适应性和灵活性。

智能系统工程是系统工程和人工智能交叉的产物。它利用人工智能技术来增强和扩展系统工程传统方法,使系统不仅能满足复杂的功能和性能需求,还能具备学习和自适应能力。同时,智能系统工程关注如何将这些技术整合到具体系统中,使它们能够在现实世界中有效运作。因此,智能系统工程的“智能”特征具有如下双重含义:

①它的产品应当具备“智能”从而更好地服务于人类的复杂需求,即系统工程的结果(智能系统)具有智能,这里的“智能”是一种目标特征^[3] (“第一特征”);

②从需求分析、系统设计、生产制造到运行维护的系统产出全过程,应充分地采用人工智能技术提升系统工程的水平,即系统工程的过程(智能工程)具有智能,这里的“智能”是一种手段特征(“第二特征”)。

第一特征决定了智能系统工程与传统系统工程的实质差别。由于系统使用者对系统工程产品的“智能水平”提出了更高的要求,系统设计与开发原理、方法和过程都产生了实质变化。围绕系统功能和性

能设计要求显著地向智能要素倾斜，计算能力、模型、数据、算法这些与智能信息处理有关的核心要素配置和设计将主导智能系统工程整个过程。智能水平要求越高，智能要素的设计越复杂。第二特征强调了人工智能技术在设计和开发智能系统过程中的重要促进作用，即充分运用人工智能技术提高面向智能系统的需求分析、系统设计、实现、验证、维护能力和水平。

智能系统工程的重要价值在于其能够创建出能自我优化、预测未来状态并智能响应外部变化的系统。这种能力在许多行业都具有革命性意义，特别是在那些需要高度自动化和精确决策的领域，如制造业、自动驾驶汽车、医疗设备和智慧城市等。

1.2 智能系统工程的目标

智能系统工程学科的主要目标和任务可以归纳为以下三个重要方面^[4]。

①系统工程智能化：系统工程与人工智能相结合可以提高现有系统工程的智能化水平，主要研究解决系统工程所面临问题的智能化方法和技术，实现系统工程的智能化。典型问题包括数学模型的局限性、优化方法的矛盾性、定量分析的片面性、原始数据的粗糙性、自然信息的多样性等。

②智能系统工程化：在研究开发智能系统理论方法与实现技术的基础上，加强智能系统的工程化、实用化、应用化，提供工程化、应用化、实用化的智能系统工程化方法和技术，实现智能系统工程化。

③工程系统智能化：随着系统工程的理论方法和实现技术的广泛应用，在工程技术、社会经济、生物生态等各领域形成了各种工程系统。将人工智能的理论方法和实现技术应用于各种工程系统，提供工程系统的智慧化解决方案，实现工程系统智能化。

1.3 智能系统工程的实现范式

从智能系统工程的学科定义看，智能系统工程范畴由系统工程和

人工智能共同界定。系统工程本身聚焦复杂工程系统的设计与开发，通过对系统生命周期不同阶段问题的分析、建模、仿真与优化求解，寻求最佳解决方案，以满足系统的功能需求和性能要求。系统工程涉及的共性理论方法包括系统论、控制论、信息论、运筹学、计算科学与技术等，同时结合具体系统对象的领域范畴往往还涉及机械、电子、人机工效学、经济学、社会学、心理学等不同学科。

人工智能涉及思维、感知、行为三个层次，通常采用功能模拟、结构模拟、行为模拟三类方法。人工智能是通过模拟、延伸、扩展人的智能，研究开发人工智能理论方法、实现技术、应用系统的一门技术科学。

人工智能研究领域从研究方法和技术路线的角度可分为三大学派，即功能模拟学派、结构模拟学派和行为模拟学派。关于如何发展人工智能，历史上三个学派的学者们持有不同观点和主张。

①功能模拟学派^[5]：又称为符号主义或逻辑主义学派，是一种基于逻辑推理的智能模拟方法。主张从功能方面模拟、延伸、扩展人的智能，认为人脑和电脑都是物理符号系统，其代表性研究成果有启发式程序、专家系统、知识工程等。

②结构模拟学派：又称为联结主义学派，是一种基于神经网络和网络间的连接机制与学习算法的智能模拟方法。主张从结构方面模拟、延伸、扩展人的智能，用电脑模拟人脑神经系统的联结机制。其代表性成果有 M-P 神经细胞模型、BP 神经网络模型、Hopfield 神经网络模型等。

③行为模拟学派：又称为行为主义学派，是一种基于“感知-行动”的行为智能模拟方法。主张从行为方面模拟、延伸、扩展人的智能，认为智能无需知识表示和推理，其代表性成果如麻省理工学院的 Brooks 研制的智能机器人、六足行走机器人、波士顿动力机器人。

上述三大学派从不同的观点出发，在不同层次上、采用不同方法，

对人的智能进行了研究和模拟。三类思想方法相互结合、取长补短，可以从功能、结构、行为多方面、多层次，对人的智能进行全面、综合研究，有助于人工智能学科的发展。

从智能系统工程的双重智能特征看，人工智能技术引入到系统工程中需要基于准智能系统功能特征和性能特点，结合系统工程的原理和方法，赋予系统在感知、执行、计算与通信等方面的物理域功能，并在此基础上聚焦系统智能信息处理能力（即计算智能）的开发和测试。

从智能系统的信息处理角度看，第一特征的呈现主要涉及三个关键方面——智能感知、智能决策与智能控制，这三个方面也是构成智能系统核心功能，每个方面对系统智能实现都具有重要作用。以下是对三种核心功能的说明^[6]：

①智能感知：指系统能够通过传感器、摄像头或其他数据输入方式来获取其自身状态和环境的信息，并能对这些信息进行处理和理解。其涉及传感器技术、计算机视觉、自然语言处理等多种技术，常见于各种智能系统的前端应用，例如自动驾驶汽车使用摄像头和雷达系统感知周围环境，工业机器人使用视觉系统识别组件和操作路径等。

②智能决策：指系统基于感知到的信息和预定目标，利用算法和模型生成行动计划和做出选择的能力，涉及任务规划、逻辑推理等关键技术，可采用机器学习、优化算法、专家系统等不同类型的人工智能方法来支撑实现。这一核心功能常体现在各种智能系统的策略生成阶段，例如电商平台推荐系统根据获取的用户行为数据智能推荐产品，智能电网系统基于消费数据和天气预测调整能源分配等。

③智能控制：指系统执行决策产生的控制指令，以动态调整其操作以达到最优或期望的性能，涉及自适应控制、模糊逻辑控制、神经网络控制、专家系统控制等技术，常见于执行操作任务的各种智能系统后端应用，例如飞行控制系统根据飞行条件自动调节姿态、智能制

造系统中的机器人根据实时反馈调整其在产线上操作。

上述三个方面共同定义了智能系统的核心能力，使其能够自主操作并适应复杂多变的环境和任务要求。通过集成感知、决策和控制能力，智能系统能够提高效率、减少人工干预，并在许多领域内实现创新应用，从而为用户提供显著的经济和社会价值。这些技术的发展和应用不仅推动了工业自动化，还促进了城市、医疗、教育等领域的智慧化进步。

从智能系统工程的执行过程看，第二特征的实现可以通过综合运用各种人工智能技术，充分发挥模型、数据、算法等关键要素的增效作用，高效解决智能系统工程的需求分析、系统设计、实现、验证和维护等各阶段面临的问题，其中典型问题包括系统和过程建模、分析、仿真与优化求解等。

1.4 智能系统工程的实现手段

从系统工程到智能系统工程的转换涉及将传统的系统设计、实施和管理方法与人工智能技术融合集成。在构建目标系统过程中，这种整合需要在系统规划、设计、实施和维护的每一阶段考虑人工智能技术应用。下面是智能系统工程构建目标系统的一般步骤^[7]：

①需求分析：在系统工程的任何项目中，首先需要明确系统的需求和目标。这涉及到与利益相关者的沟通，明确他们的需求和预期，以及系统应该实现的功能和性能标准。为了提高系统智能水平，需要确定哪些功能可以通过 AI 技术增强，例如智能感知与识别、智能推理与决策、智能控制等。

②系统设计：明确需求后，设计者进行系统的概念设计和详细设计，包括选择合适的技术、功能设计、架构设计和接口设计。从智能系统的角度出发，设计过程应该考虑数据的流向、处理和存储，以及如何集成机器学习模型或 AI 代理。例如，考虑使用哪种类型的传感器、如何集成数据湖或实时数据处理平台等。

③系统开发与实施: 系统开发包括编写代码、集成各个系统组件以及进行初步测试。这一阶段通常需要软件工程和硬件工程的密切合作。开发中需要考虑模型的训练和验证，确保 AI 组件能够在实际环境中有效运行。此外，还需要考虑系统可扩展性和安全性，尤其是数据安全和隐私保护。

□**验证与测试:** 系统开发完成后，需要进行全面测试来验证系统是否满足设计规格和用户需求。这包括功能测试、性能测试、安全测试等。智能系统需要额外的测试，如模型的泛化能力测试、不同场景下的自适应能力测试以及持续学习能力评估。

□**部署与维护:** 系统部署后，进行实际运行和监控，确保系统稳定运行，并根据需要进行调整和优化。对于智能系统，重要的是监控其性能和学习进度，以及定期更新 AI 模型以适应新的数据和环境变化。维护阶段还包括对 AI 决策逻辑审核，确保其遵守伦理和法规要求。

在从系统工程到智能系统工程的过渡中，关键是理解如何将智能技术融入传统的工程实践中，以提升系统的性能和灵活性。这通常要求跨学科的知识和团队合作，包括数据科学家、软件工程师、系统分析师和领域专家的共同努力。通过这种合作，可以构建出能够自主学习和适应的高效智能系统。

1.5 智能系统工程发展历史

智能系统工程的发展历史涉及多个领域的融合，主要包括人工智能、机器学习、控制理论、计算机科学和其他相关技术。下面是智能系统工程的几个关键发展阶段的简要概述^[8]。

①初始阶段（1950~1970）

1956 年，达特茅斯会议标志着现代人工智能研究的正式开始，会议中讨论了机器学习、自动推理和语言处理等概念。在 20 世纪 50 年代到 70 年代，控制理论尤其是自动控制技术得到迅速发展，为后来

的智能系统工程奠定了基础。

②技术整合与实用化（1980~1990）

随着计算机技术的进步，尤其是处理速度和存储能力的提高，更复杂的算法和模型开始实用化，计算能力得到飞跃式提升：1980年代，反向传播算法的重新发现使得神经网络研究再次兴起，机器学习开始作为一个独立领域发展。

③智能化与网络化（2000~2010）

数据科学的兴起以及更高级的机器学习技术（如支持向量机、随机森林等）的开发，使得智能系统可以处理和分析前所未有的数据量。随着物联网技术的发展，智能系统开始在更广泛的环境中部署，包括工业自动化、智能家居和城市管理。

④深度学习革命与当前趋势（2010~现在）

2012年，AlexNet在ImageNet挑战赛中的成功标志着深度学习在视觉识别任务中的重大突破。此后，深度学习在语音识别、自然语言处理等多个领域取得了显著成就。随后，人工智能开始广泛应用于汽车、医疗、金融服务等多个行业，智能系统工程成为关键技术。

从智能系统工程有关学科的发展过程来看，智能系统工程的发展是技术进步、学术研究和行业需求三者相互作用的结果，不断地推动着边界的拓展。今天，这一领域仍在快速进化中，持续为我们的生活和工作方式带来变革。

1.6 小结

本章从概念内涵、目标手段、范畴边界、发展历程等方面，对智能系统工程这一新兴交叉学科进行了系统阐述。智能系统工程的本质，是系统工程与人工智能的交叉融合，核心目标是构建智能化的复杂系统。一方面要继承和发展系统工程的理论方法，另一方面要充分运用人工智能技术进行赋能，使二者达到“1+1>2”的聚合效应。作为复杂性科学的新疆域，智能系统工程正处于蓬勃兴起阶段，有望成为引领未来

系统创新重要力量。当然,智能系统工程要真正实现蓬勃发展,尚需在基础理论、关键技术、支撑工具等方面取得更多突破,这正是本书后续各章要重点探讨的。

第二章 智能系统工程的难点问题和解决方法

作为一门新兴交叉学科,智能系统工程在蓬勃发展的同时,也面临诸多挑战和难题。本章将分析智能系统工程关键科学问题,梳理其主要技术方法,为后续章节的深入探讨做好铺垫。

2.1 智能系统工程面临的挑战

通常系统工程的理论方法以运筹学为主要基础,包括规划论、对策论、决策论、博弈论、库存论、排队论等,它采用的数学模型是以优化方法为中心的,侧重于定量的、稳态系统分析的理论方法。当前,智能系统工程面临着诸多难点问题和新的挑战。

①数学模型的局限性

系统工程常用的数学模型有代数方程、微分方程、差分方程等,这类系统描述方法有很大程度的局限性,主要表现在许多实际的系统不能或难以建立数学模型。例如,如何建立人的数学模型?如何定量地描述人的思维语言、知识、经验和行为?然而,人是系统工程中的主导因素,是系统模型化中必须考虑的描述对象,是系统分析、系统设计中的关键问题。忽视或轻视人的因素,可能是导致系统工程理论方法在应用中失败的重要原因。

②优化方法的矛盾性

最优化通常是系统工程的追求目标和中心任务。但是,基于数学模型的优化方法在理论应用上都存在问题。因为只有线性代数方程、线性微分方程在数学上才有通用的解析方法,所以只有线性系统的优化问题存在有效、通用的优化方法。然而,实际系统的数学模型往往是非线性的,缺乏通用的、有效的解析方法。为了便于求解,将数学

模型简化为线性方程，但模型与实际系统的误差太大，可能使优化解无法实用。这里，存在方法有效性与模型准确性之间的矛盾。

③定量分析的片面性

系统工程采用定量分析是必要的，然而现实问题往往仅通过定量分析是解决不了的，缺少定性分析的系统工程方案存在片面性。从认识论观点来看，人们对客观世界的全面、正确认识，来自定性与定量相结合、宏观与微观相结合、动态与稳态相结合、长远与近期相结合的分析。如果在系统工程分析中，忽视必要的定性分析，例如，缺少基于专业知识和专家经验的关于人的因素、物理规律、经验法则、社会关系、生态环境等方面系统特性的定性分析，可能导致原则性错误。系统模型、系统设计、系统评价，都需要基于合理的、可靠性的系统定性分析，否则，即使采用最先进的计算机，进行精确的定量分析也难以见效。

□原始数据的粗糙性

为了进行系统的定量分析，需要精确的、可信的原始数据，但是，在实际系统的数据信息采集过程中，存在各种观测误差。例如，由于观测装置精度和范围观测与环境条件、观测人员与观测能力、观测时间与统计过程、数据处理与统计方法等各种因素引起的误差。因此，系统分析的原始数据往往是不精确的、不完整的，甚至是虚假的。在这种情况下，即使系统分析方法是正确的，定量分析结果也是不精确的，甚至是错误的。理论上计算出的最优解，实际上只是近似最优解或次优解，甚至是不可行解。

□自然信息的多样性

在实际系统工程中，人们之间的信息交互是通过文字、图形、图像、语言、声音姿态表情等多种信息媒体传递的，即多媒体的自然信息，而不仅是数字形式的数据信息。例如，某些管理机构信息流量的统计结果表明，定性的文字型信息约为 80%~70%，而定量的数据信

息只为 20%~30%。而且，随着电话、传真、电视、通信、多媒体计算机技术的普及与发展，人与人之间、人机之间的多媒体信息交互方式也处于不断增长与扩展中。因此，系统工程面临多媒体自然信息的采集、传递处理和利用问题。

2.2 智能系统工程的方法

2.2.1 智能系统工程设计

智能系统工程设计需要将智能技术应用集成到系统各个部分，以增强系统功能并实现自动化和优化。这个设计过程不仅包括了传统系统工程的要素，还增加了智能功能的设计和实现。

①需求定义

在设计开始之前，必须清晰地定义系统需求和目标。这包括与利益相关者协商，了解他们已有基础、期望系统实现的功能、性能和界面需求。

智能特性：定义智能系统应具备的能力，如数据处理、学习、适应性和预测功能。

②系统架构设计

根据定义的需求，设计系统的整体架构，包括确定系统的组件、如何交互以及数据如何流动。遵循模块化设计原则，设计模块化的系统，使系统具有易于扩展和维护的优良性质，每个模块都应有明确的功能和接口。在数据架构方面，考虑数据采集、处理和存储的需求，包括实时数据处理和长期数据存储。

系统架构设计时，涉及系统各个侧面的多种因素，问题纷繁复杂，为简化问题，可采用架构视图方式标识每个侧面解决方案。一个典型的系统架构视图通常包括：逻辑视图、运行视图、数据视图、开发视图、部署视图和场景视图^[9]。

③智能技术的选择与集成

选择适合的智能技术来实现设计目标。这可能包括机器学习模型、

人工智能算法、自动化工具等。为了实现技术适配，根据系统需求选择最合适的技术，如深度学习、强化学习或传统机器学习技术。为了实现软硬件协同，应确保选用的技术与系统的硬件配置相兼容，并能高效运行。

④ 接口与交互设计

设计系统的用户界面和用户交互方式，确保它们既直观又能有效支持用户操作。根据人机交互需求，应考虑如何设计接口以提高用户体验，包括语音识别、触控界面或其他自然语言处理技术。根据系统反馈需求，应设计系统向用户提供反馈的机制和方法，包括成功执行任务的确认、错误消息和系统状态更新等。

⑤ 验证与测试

设计阶段完成后，需要进行系统的验证和测试，确保每个组件都能按预期工作，并且整个系统能够稳定运行。在功能测试阶段，测试系统功能是否符合需求规格。在性能测试阶段，应确保系统在各种条件下都能保持良好性能。在安全性测试阶段，应特别重视系统的数据安全和隐私保护。

⑥ 迭代与优化

智能系统设计往往需要多次迭代和持续优化，特别是智能组件可能需要根据新数据或用户反馈进行调整。考虑到对智能系统的持续学习能力要求，系统应能根据新数据和环境变化进行学习和适应。从系统的更新与维护角度出发，应定期更新系统以修复漏洞、改进性能和添加新功能。

智能系统工程设计的目标是创造出能够自主操作并适应复杂多变环境的系统。这要求设计者具备跨学科知识和技能，同时需要在整个设计和开发过程中密切关注技术进展和市场需求。通过这种综合方法，可以构建出高效、可靠且用户友好的智能系统。

2.2.2 智能系统工程建模

系统模型是系统分析、系统设计、系统仿真的依据和工具，是系统工程的基础。涂序彦教授针对大系统的建模，提出了一套综合多种不同方法的广义模型^[1]。针对智能系统的建模，应考虑多种模型的综合运用，具体包括：

①智能化模型——智能化模型包括自适应模型、自学习模型、自组织模型等^[10]，其中，自适应模型可以自动地或交互式调整模型结构或参数，适应系统结构、系统性能的多变性。自学习模型可用自学式或示教式学习或训练方法，在模型运行过程中，不断获取知识、积累经验，对模型进行修正或改进。自组织模型可利用模型库及其管理系统，进行模型的组装、构造，自动生成面向用户需求的系统模型。

②控制论模型——“控制论模型”包括控制者模型、控制对象模型。从控制论观点来看，各种系统都是由控制者与控制对象组成的。通常，在系统工程的模型化工作中，较注重控制对象的建模问题，而对于控制者的模型研究较少。如果控制者是人或人的群体，那么，建立控制者模型有困难。在《控制论》中，控制的概念是广义的，包括控制、调节、管理，指挥、决策等。人工智能(AI)、专家系统(ES)、模糊逻辑(FS)等，为建立人的模型提供了新方法，可以用于建立控制者、调节者、管理者、指挥者、决策者的广义模型，从而为系统建模开拓了新途径。

③集成化模型——集成化模型包括知识模型、网络模型、数学模型等。其中，知识模型是指基于专家系统与知识工程的知识表达方法，如产生式规则，语义网络，框架等的文字信息模型。网络模型是指人工神经网络与分布式计算机网络所采用的各种图论模型，如赋值有向图或无向图、树图或网络图等。数学模型是指系统工程中常用的代数方程、微分方程、差分方程等。由知识模型、网络模型、数学模型相结合的集成化模型，如多层次状态空间模型，多重广义算子模型等，可用于进行各种复杂大系统的定性和定量描述。

2.2.3 智能系统工程分析

系统分析是对客观世界的认识过程，是对已有系统进行定性或定量、宏观或微观、动态或稳态、长远或近期分析的智能活动^[11]，从而对系统当前的运行状态进行剖析，对系统过去的历史进程进行总结，对系统未来的发展前景进行预测，对系统的整体性能进行全面评估，如技术性能、经济指标、社会效益、生态影响、军事意义等，为系统的进化与发展提供科学依据。

智能系统分析方法是人工智能与系统分析方法相结合的、基于广义模型的、具有人工智能的系统分析方法。人们对客观世界的全面认识过程应当是定性与定量、客观与微观、稳态与动态、近期与长远相结合的认识过程，而不是相分离的认识过程。当然，这种结合并不一定要求是时间同步的，而且，人们通常采取先定性、后定量，先宏观、后微观，先稳态、后动态，先近期、后长远的认识过程，以便对客观世界进行由表及里、由此及彼、去粗取精、去伪存真的、从感性认识到理性认识。因此，具有人工智能的系统分析方法首先应当具有拟人认识过程的智能特性。

人工智能学科对人的认知过程的智能特性进行模拟和研究，如专家系统可以模拟各行各业的专家，运用专业知识和专门经验，进行智能活动过程分析^[12]。模式识别模拟人们对文字、图像、声音等自然信息模式的识别过程与感知能力。人工神经网络可以模拟人们通过学习和训练增长认知能力的智能活动等。因此，人工智能与常规系统分析方法相结合，可以提高系统分析的人工智能水平，有助于应用知识工程技术、多媒体技术、分布式网络并行处理技术等现代化先进技术工具，进行复杂系统分析，提高系统分析的效率与快速性，便于形成人机多媒体信息交互的软硬件环境，进行人机合理分工，实现人机智能结合，构成人机协调系统。

为了进行智能化系统分析，不能单纯依靠数学模型，而需要采用

广义模型。例如，采用知识模型表达专家的知识和经验，进行知识推理，逻辑判断，建立系统分析专家系统，对专门问题进行系统分析；采用网络模型，通过人工神经网络学习和训练，不断提高系统分析能力和水平；建立具有模型组装、构造功能的模型库及其管理系统，自动生成、自行组织面向用户的系统分析广义模型。

2.3.4 智能系统工程综合

系统综合是对客观世界的改造过程，是对待建的系统进行规划、设计、控制、管理、指挥、决策的智能活动。在系统分析的基础上进行系统综合，其任务是对新建或改建的系统进行合理规划与设计，高效控制与管理，正确指挥与决策。其中心问题是实现系统的最优化，包括最优规划、最优设计、最优控制、最优管理、最优指挥、最优决策等^[13]。其目的是建造最优化系统，实现系统最优化运行。但是，由于实际系统工程中数学模型的局限性、优化方法的矛盾性、原始数据的粗糙性、自然信息的多样性、定量分析的片面性等问题，数学上严格的最优化系统，实际上往往难以实现，或者缺乏实用价值。

智能系统综合方法是基于广义模型、人工智能与优化方法相结合的具有人工智能特性的系统综合方法。采用广义模型，在人工智能与优化方法相结合的基础上，发展智能优化方法^[14]。例如，人工智能的启发式知识推理与运筹学的动态规划相结合，发展启发式动态规划方法；人工神经网络的学习算法与非线性规划相结合，发展自学习非线性规划方法；模式识别的特征抽取与线性规划方法相结合，发展大规模线性规划方法等。智能优化方法追求的是满意解、协调解，或近似的实用优化解，而不是严格的理论最优解。这样，有助于适应实际系统原始数据的粗糙性，自然信息的多样性，突破单纯数学模型的局限性，解决优化方法的矛盾性，避免定量分析的片面性。同时，人工智能的有关方法和技术，如专家系统与知识工程，人工神经网络与分布式并行处理、模式识别与多媒体技术等，与相应的计算机辅助规划、

设计、指挥、决策技术相结合^[15]，可发展智能规划、智能 CAD、智能指挥、智能决策的方法和技术，与自动控制、管理科学通信技术相结合，可发展智能控制、智能管理、智能通信技术，从而为智能系统工程提供智能化的系统综合新方法和新技术，以建造满意的系统，实现系统协调运行。

2.3.5 智能系统工程仿真

系统仿真或系统模拟是利用系统模型对真实系统进行系统分析与系统综合的现代化系统工程技术，用于对系统运行状态、决策方案、发展前景进行仿真研究。同时，结合数字孪生技术还可以为系统运行和维护提供重要分析和预测手段^[16]。

根据仿真模型、方法、设备、性能的不同，仿真技术可分为数学模拟、物理模拟，离散仿真、连续仿真，实时仿真、非实时仿真，在线仿真、离线仿真等，仿真技术已广泛地应用于军事训练与武器操作系统、航天航空人员培训系统、作战指挥模拟系统、交通管理调度系统、电力网调度控制系统、工业生产过程仿真系统等各个领域。但是，还存在一些有待解决的问题，如模型与方法的局限性，人机界面的单调性，建模与仿真结果解释等，有待进一步研究开发。

在智能系统工程的仿真环节，可通过人工智能与仿真技术的综合运用，实现面向复杂对象和过程的高效仿真^[1]。

① 广义仿真模型：采用广义模型进行系统仿真，如集成模型、智能模型、控制论模型等，扩展仿真模型的适用范围，提高仿真模型的智能水平。

② 仿真信息预处理：采用计算机进行仿真信息预处理，如原始数据的智能滤波，知识信息的编辑整理等，提高输入信息的效率与可信度。

③ 仿真模型生成：研究与开发仿真模型库及生成系统，利用仿真建模专业知识、典型仿真模型模块，组装、拼接、生成面向用户的

仿真模型。

- 智能仿真算法：在人工智能与仿真算法相结合的基础上，开发智能仿真算法，如基于知识推理的仿真专家系统，采用神经网络的并行仿真算法等。
- 多库仿真软件：开发由知识库、数据库、模型库、方法库、图形库、音素库、语料库等构成的多库协同的仿真软件系统，建造多媒体仿真综合信息库。
- 智能仿真界面：多媒体智能接口技术与仿真技术相结合，开发“声图文”并茂的、动画显示的、人机自然信息交互的、多媒体人机智能仿真界面。
- 综合仿真语言：开发通用与专用仿真语言相结合的综合仿真语言，采用人工智能启发式程序设计方法，进行智能仿真软件设计。
- 仿真结果分析：根据仿真对象有关知识、初始参数、边界条件、仿真模型、仿真方法，对仿真结果的合理性、可信度、灵敏度、实际意义和应用价值进行分析与评价。

2.3.6 智能系统工程推理

在智能系统工程中，推理是一个关键的过程，用于实现系统的智能决策功能。智能推理可以使系统通过逻辑和数据分析从给定的信息中得出结论或决策，模仿人类的思考过程。智能系统推理能力通常基于以下几种方法^[17]：

① 基于规则的推理（Rule-based reasoning）：依赖于预定义的规则集来模拟决策过程。这些规则是“如果-那么”语句，指导系统如何根据特定的输入做出响应。其优点是易于理解和实现，可以精确控制系统行为。主要缺点是不适用于复杂或未知的问题，需要人工维护和更新规则集。

② 基于模型的推理（Model-based reasoning）：使用数学模型或物理模型来模拟现实世界的行为。系统根据模型预测结果并进行决

策。其优点是可以处理更复杂的动态系统，适用于工程和科学问题。主要缺点是需要精确的模型和大量的计算资源。

③基于案例的推理 (Case-based reasoning) : 通过查找历史案例库中与当前问题相似的案例来做出决策。系统学习和适应新情况，通过不断更新案例库增强其决策能力。其优点是适应性强，能够通过经验学习和改进。主要缺点是对案例库的质量和覆盖度要求高，处理速度受限于案例检索和匹配过程。

□ **统计推理:** 利用概率模型和统计方法来估计不同决策的可能结果，基于这些估计做出最优选择。其优点是能够处理不确定性和模糊信息，适用于数据驱动的决策。主要缺点是需要大量数据支持，对数据质量和分布敏感。

□ **逻辑推理:** 逻辑推理使用形式逻辑(例如命题逻辑、谓词逻辑)来推导结论。这种方法在需要严格证明和验证的场景(例如安全系统设计)中特别有用。其优点是可以提供严格的推理和验证过程。主要缺点是对实际应用的复杂性和多变性有限制。

□ **深度学习推理:** 深度学习推理利用深度神经网络从大量数据中学习复杂的模式，并用于推理和预测。其优点是能够处理高度非线性和复杂的关系，适用于图像、语音和自然语言等数据。主要缺点是需要大量的训练数据，模型解释性较差。

智能系统工程中的推理能力是实现自动化决策和适应环境变化的关键。选择合适的推理方法取决于应用的具体需求、可用数据类型和数量、以及系统性能要求。通过合理设计和集成，这些推理方法可以使智能系统在各种情况下都表现出高效和智能行为。

2.3.7 智能系统工程决策

智能系统工程中的决策是关于如何设计和实现使系统能够自动执行选择最优解决方案的过程。这些决策能力是系统能够自我管理、适应环境变化，并在没有人类直接干预情况下处理复杂问题的关键。

以下是智能系统工程决策的几个主要方面和相关技术：

① 数据驱动的决策

数据是智能系统决策的基础。通过收集和分析来自传感器、用户输入、网络数据流等的信息，系统能够理解环境状态和用户需求。涉及的主要技术包括大数据分析、实时数据处理、数据挖掘等。一些典型应用如：智能交通系统分析交通流量数据来优化信号灯控制、智能电网系统根据能源使用数据来调整电力分配。

② 机器学习与模式识别

机器学习使系统能够从数据中学习和识别模式，无需事先编程决策逻辑。涉及的主要技术包括监督学习、无监督学习、强化学习等。典型应用如：电商推荐系统通过用户购买行为学习用户偏好、自动驾驶车辆通过学习驾驶行为模式进行决策。

③ 优化算法

智能系统使用数学模型和算法来确定执行任务的最优方式。涉及主要技术包括线性规划、整数规划、遗传算法和粒子群优化等智能优化算法等^[18]。典型应用如：物流公司使用路径优化算法来最小化配送时间和成本、生产线使用调度算法来优化生产效率。

□ 自适应与反馈机制

通过反馈机制，智能系统可以根据之前的决策结果和环境反馈进行自我调整。涉及的主要技术包括自适应控制、闭环控制、学习控制等。典型应用如：智能家居系统根据室内环境参数自动调节空调和照明、工业机器人根据生产质量反馈调整操作。

□ 多准则决策支持

在面对需要权衡多种因素的决策时，系统需要使用多准则决策支持技术来找到最佳平衡点。涉及的主要技术包括多属性决策分析、决策树、贝叶斯网络等。典型应用如：健康护理系统在多种治疗方案之间做出选择、企业风险管理系统评估和平衡不同风险。

□ 道德与法律考量 [19]

智能系统在作出决策时，还必须考虑道德和法律约束，确保决策符合社会规范和法律要求。涉及的典型应用如：自动驾驶汽车在紧急情况下的决策、人工智能系统在保护个人隐私和数据安全方面的决策。

智能系统工程决策的关键在于将这些技术有效地整合到系统设计中，以确保系统不仅能够做出有效和高效的决策，还能适应变化，处理不确定性，并符合伦理和法律要求。这些决策能力使得智能系统能够在广泛的应用领域中发挥重要作用，从提高工业自动化的效率到改善人们的生活质量等。

2.3.8 智能系统工程控制

智能系统工程中的控制是指使用各种技术和方法来指导系统的行为，使其能够自动化地执行任务，响应环境变化，并保持系统性能在预期范围内。智能控制系统结合了传统控制理论与现代智能技术，如机器学习和人工智能，以提高系统的自适应性、效率和智能性。以下是智能系统工程控制的几个关键方面^[20]：

① 自适应控制

自适应控制允许系统根据环境变化和系统性能自动调整控制参数。这种类型的控制特别适用于参数随时间变化或先前未知的环境中。

涉及的技术包括参数自适应控制、模型参考自适应控制等^[21]。典型应用如：航空控制系统可以根据不同飞行条件自动调整其控制策略、工业过程控制中调整参数以应对原材料质量波动。

② 鲁棒控制

鲁棒控制设计用于保证在面对广泛的模型不确定性和外部扰动时系统的稳定性和性能。涉及技术包括 H^∞ 控制、滑模控制等。典型应用如：电力系统和通信网络使用鲁棒控制技术以确保在不确定条件下的性能稳定。

③ 智能预测控制

智能预测控制是一种基于模型的控制策略，利用对未来的预测信息来优化当前的控制动作。涉及技术包括模型预测控制等。典型应用如：化工生产中的过程控制，通过预测未来可能的生产条件，实时优化控制策略。

□ 优化控制

优化控制通过定义一个性能指标，设计控制策略以最大化或最小化这一指标。涉及技术包括动态规划、线性和非线性规划等。典型应用如：自动化仓库中的机器人路径规划，优化路径以减少时间和能耗。

□ 神经网络控制

神经网络控制使用神经网络来模拟控制系统的动态行为，可以处理非线性、复杂的系统控制问题。涉及技术包括前馈神经网络、递归神经网络等。典型应用如：自动驾驶车辆使用神经网络控制算法来处理复杂的驾驶环境。

□ 模糊逻辑控制

模糊逻辑控制利用模糊逻辑来处理系统中的不确定性和模糊性，适用于难以用传统方法建模的系统^[22]。涉及技术包括模糊规则集、模糊推理系统等。典型应用：家用电器如空调和洗衣机使用模糊逻辑控制来优化其操作，适应用户的偏好和外部条件。

智能系统工程中的控制技术是多样化的，选择合适的控制策略依赖于具体应用需求、系统特性要求以及环境条件。通过集成这些先进的控制技术，智能系统能够实现更高的自动化水平和更好的性能表现，从而在工业自动化、运输、能源管理等多个领域发挥重要作用。这些控制系统的工作原理和设计，要求系统工程师具备跨学科的知识和技能，以确保系统的可靠性和效率。

2.3 小结

本章分析了智能系统工程面临的关键科学问题，梳理了其主要技术方法。智能系统工程要赋予系统以自主性、进化性、涌现性等智能，

必须攻克智能建模、不确定性分析、涌现机制、人机协同、安全伦理等一系列复杂性难题。同时,智能系统工程方法正在传统系统工程基础上,吸收人工智能、运筹优化、复杂性科学等领域的的新理论新技术,日臻完善。随着智能系统应用不断深化,智能系统工程理论和方法必将实现更大突破。展望未来,坚持目标与手段并重,坚持理论与实践互促,将是智能系统工程不断发展壮大根本保证。

第二部分 领域智能系统工程

随着新一轮科技革命和产业变革的深入推进,以人工智能为代表的新兴技术正在加速与实体经济融合,催生智能制造、智慧交通、智慧医疗、智慧城市等新业态新模式。面向不同行业领域智能化转型的现实需求,亟需加快构建新型智能系统解决方案。本部分聚焦若干关键领域,系统阐述智能机器人、智能制造、智慧能源、智慧城市等领域智能系统的发展现状、关键技术、应用实践和发展趋势,剖析不同领域智能系统建设的共性规律和个性特征,提炼可供借鉴的实践样本,为加快培育经济发展新动能提供有益参考。

第三章 智能机器人系统工程

机器人是智能系统的经典代表,集成了环境感知、自主决策、规划控制、执行动作等多种人工智能技术。将系统工程方法应用于机器人研发,可极大提升其智能化水平,催生出新一代智能机器人系统。

3.1 智能机器人系统概述

智能机器人是一类能够感知环境、自主完成特定任务的智能化机电系统。不同于传统工业机器人只能按照预定轨迹、程序操作,智能机器人具有感知、决策、学习、进化等智能属性,能够自主适应不确定环境,完成非结构化任务。

从系统架构看,典型的智能机器人系统包括感知、决策、规划、控制、执行等层级:

-
- 感知层负责获取环境信息,融合视觉、触觉、听觉等多源异构传感器数据,构建环境和任务的内部表征;
 - 决策层负责根据感知信息和任务目标进行推理判断,制定行动策略,进行任务规划;
 - 规划层负责生成无碰撞、最优的运动轨迹,满足运动学、动力学约束,实现目标位置姿态;
 - 控制层负责跟踪规划轨迹,实时调节机器人关节,补偿建模误差和外部干扰;
 - 执行层负责驱动电机或液压缸等执行器,控制机器人本体,完成目标动作。

智能机器人必须在上述层级之间实现顺畅的信息流动和紧密协同。同时,智能机器人还需具备自主学习能力,在执行任务过程中不断积累经验,持续优化性能。此外,人机交互也是智能机器人的重要属性,它们需要与人自然顺畅地进行信息交换和任务协同。可以看出,构建大规模智能机器人系统是一个复杂系统工程,需要人工智能、机器人学、自动控制等多学科知识的交叉融合。

3.2 智能机器人系统工程的关键技术

智能机器人系统工程涉及环境建模与感知、运动规划与控制、任务推理与决策、人机协同与交互等诸多关键技术。这些技术很多源自人工智能尤其是机器学习领域的最新进展,并结合机器人特定需求加以改进提升。典型的关键技术包括:

(1)机器人环境建模与感知。机器人感知是构建环境内部表征的基础。主要涉及视觉、触觉、力觉等多模态感知,点云配准、SLAM、深度学习目标检测等数据融合方法,以及场景重建、语义分割、物体识别等环境理解技术。一个重要发展方向是从传统的被动感知,向主动探索环境的主动感知发展。

(2)机器人运动规划与控制。如何在复杂约束条件下,实时规划最

优无碰撞轨迹,是智能机器人的核心问题。主要涉及采样搜索、图搜索、优化方法等运动规划算法;阻抗控制、自适应控制、鲁棒控制等轨迹跟踪控制方法;以及强化学习、模仿学习等轨迹优化技术。目前向着多机器人协同、人机协同的运动规划演进。

(3)机器人任务推理与决策。面对非结构化任务,机器人需要像人一样进行推理判断、自主决策。主要涉及基于规则、基于样例、基于知识的推理决策方法,马尔可夫决策过程、部分观察马尔可夫决策过程等数学模型,以及面向任务的层次化学习与规划架构[19]。智能机器人推理决策正从确定性环境向不确定动态环境拓展。

(4)机器人人机协同与交互。未来机器人将广泛参与人类生活,人机协同交互至关重要。主要涉及自然语言理解、手势识别、情感计算、意图推理等认知交互技术,以及虚拟现实、脑机接口等新型人机界面技术。一个重要趋势是情感智能和社交智能,使机器人更懂人心、更近人性。

总体而言,构建大规模智能机器人系统需要上述技术的无缝集成。目前各项技术都取得长足进步,但尚未形成体系化的智能机器人系统工程方法。如何运用智能系统工程的理念,从整体上把握机器人的智能化,是一个亟待深入研究的课题。下一节将分析国内外智能机器人系统的发展现状。

3.3 智能机器人系统国内外发展现状

作为人工智能商业化落地的重要方向,智能机器人近年来得到蓬勃发展。据国际机器人联合会(IFR)统计,2019 年全球机器人市场规模达 294 亿美元,同比增长 12%。预计 2024 年,全球机器人市场规模将突破 660 亿美元,短短 5 年市场规模翻倍有余,年均增长 18%。从应用领域看,目前工业制造、商业服务、特种服务、医疗康复、智慧家庭等成为智能机器人应用的主要领域。

在工业制造领域,以自主移动机器人(AMR)、人机协作机器人(Co-

bot)为代表的新一代智能机器人方兴未艾。AMR 通过自主感知、路径规划等人工智能技术,实现灵活的物料配送、智能仓储等功能,显著提升制造效率。国外企业如美国亚马逊 Kiva、Fetch 等在 AMR 领域处于引领地位。国内京东、新松、极智嘉等企业的 AMR 产品和集成应用也日趋成熟。

人机协作机器人方面,通过力控(力扭矩、碰撞)、视觉(二维、三维)等传感技术与人工智能相结合,协作机器人可以与人在同一工作空间内安全互动,极大拓展机器人应用场景。全球四大机器人巨头发那科(Fanuc)、安川(Yaskawa)、库卡(KUKA)、ABB 均推出了协作机器人产品。国内埃夫特、达明机器人、遨博智能的协作机器人也具有较强竞争力。

在商业服务领域,餐饮配送、前台迎宾、导览讲解等服务机器人渐成热点。美国 Savioke 公司开发的 Relay 机器人已在全球数百家酒店部署;日本软银 Pepper 迎宾机器人也广泛应用于商场、餐厅等场合。国内高仙机器人、普渡科技、擎朗智能等企业的餐饮配送机器人进入商用阶段。阿里、商汤等巨头也纷纷布局服务机器人赛道。

医疗康复是智能机器人的重要应用领域。手术机器人通过高精度感知、精准操控,辅助医生开展微创手术。以直觉 Davinci 为代表的手术机器人已在全球应用于 500 多万台手术。康复机器人通过柔顺控制、主动交互,为老年人、残障人士提供康复训练。加拿大 Kinova、日本丰田等公司的康复机器人技术先进、应用广泛。国内哈工大、东南大学、河工大等高校持续攻关手术机器人与康复机器人。

在智慧家庭领域,扫地机器人、陪护机器人、教育机器人等智能助理设备层出不穷。扫地机器人通过视觉 SLAM 构建家庭地图,实现全屋清扫。以 iRobot 为代表的欧美品牌占据高端市场,国内石头、科沃斯、小米等品牌异军突起。陪护机器人集智能交互、远程看护、健康监测于一体,日本软银 Pepper、富士康 Hoaloha 等产品走在前列。国内

智臻智能、360 等公司也探索个人助理机器人。

总体看,智能机器人系统正从工业向非工业快速渗透,从结构化环境向非结构化环境延伸。人工智能技术的快速发展和硬件成本下降,是推动智能机器人跨界融合的主要驱动力。同时,智能机器人系统工程方法有望进一步突破感知、决策、控制、交互等方面的技术瓶颈,加速新一代机器人研发落地。本章最后列举几个代表性的智能机器人系统应用案例。

3.4 代表性智能机器人系统

(1)波士顿动力公司 Spot 四足机器人。Spot 采用多关节柔顺腿式结构,集成了激光雷达、深度相机等多源传感器,可在崎岖地形环境下灵活运动。通过强化学习算法,Spot 能自主规划路径、跨越障碍。同时 Spot 开放了 API,支持二次开发部署。目前已在建筑巡检、工厂安防、公共安全等领域得到应用。

(2)旷视科技河图智能仓储机器人。河图 AMR 采用视觉 SLAM 定位导航,结合专利算法实现毫米级定位。通过分层规划算法,可在狭窄通道内灵活调度避障。河图支持货架四面取货,提升立库空间利用率。据悉,河图已服务京东、顺丰等知名客户,日处理货物超 10 万件。

(3)微创医疗腔镜手术机器人。该机器人包括主从式操控手、高清 3D 内窥镜、多自由度柔性臂等硬件,以及手眼标定、运动补偿、力触觉反馈等算法。通过主从操控,医生可精准控制手术器械进行手术。目前已应用 1000 余台手术,术后恢复周期比传统腹腔镜缩短 30%。

(4)高仙机器人悟空餐饮配送机器人。悟空采用多传感器融合实现精准室内定位,通过深度学习算法进行语义理解和环境感知。支持自主避障、多点配送、梯控联动等。同时具备人性化交互功能,如情绪识别、多轮对话、程序化表情等。已在海底捞、呷哺呷哺等数百家门店投用。

3.5 小结

本章对智能机器人系统工程进行了概述。智能机器人集成了感知、决策、规划、控制等多种人工智能技术,代表了智能系统的最新发展方向。目前智能机器人系统工程涉及环境建模、运动规划、任务推理、人机交互等多个关键技术,正朝着多机协同、人机协同的方向演进。从国内外发展现状看,各类新型智能机器人不断涌现,正从工业制造向商业服务、医疗康复、智慧家庭等非制造领域加速渗透。未来,智能机器人有望在更广泛场景发挥重要作用,成为人类生活和工作不可或缺的智能助手。当然,这有赖于智能机器人系统工程理论方法的持续创新,需要产学研各界的共同努力。

第四章 智能石油系统工程

石油工业作为关系国计民生的支柱产业,一直是系统工程的重要应用领域。近年来,人工智能、大数据、云计算等新一代信息技术的发展,正在推动传统石油工业向智能化转型升级。将人工智能技术与传统石油系统工程理论方法相结合,构建智能石油系统,是石油工业可持续发展的重要途径。

4.1 智能石油系统概述

智能石油是指运用人工智能等新一代信息技术,在勘探开发、钻采集输、炼化销售等石油全产业链环节,实现油气藏精细刻画、钻井过程优化、油藏开采智能决策、管道设施健康管理、炼化生产智能调度、成品油智能配送的新型石油工业形态。

从系统架构看,智能石油系统可分为感知层、网络层、平台层、应用层四个层次:

- 感知层利用物联网技术,通过压力、温度、流量、图像等各类传感器,实时采集油气井、管道、油库等石油设施的实时数据。
- 网络层利用工业以太网、移动通信等技术,构建灵活可靠的数

据传输网络,实现海量油气数据的低延时、高可靠传输。

- 平台层基于云计算技术搭建大数据平台,对异构海量数据进行清洗,存储与计算,并建立所需数据驱动模型,为上层智能应用提供数据支撑。
- 应用层综合运用机器学习、知识图谱、大数据分析等人工智能技术,构建智能钻井、智能采油、智能管道、智慧炼化、智慧加油站等行业应用。

通过上述层次化架构,智能石油系统能够打通数据链、创新应用链、重塑价值链,推动石油工业数字化、网络化、智能化转型。从信息流看,智能石油系统实现了勘探、开发、生产、销售等环节数据的纵向贯通;从控制流看,实现了设备层、过程层、决策层的端到端闭环优化;从商业流看,有望带来运营效率、经营水平、客户体验等方面的系统性提升。推进智能石油系统工程,必将催生石油工业新业态、新模式、新价值。

4.2 智能石油系统工程关键技术

智能石油系统工程涉及大数据处理、机器学习建模、工业知识图谱、数字孪生等多项关键共性技术,以及智能钻井、智能采油、智能管道、智慧炼化等石油领域专用技术。

在共性技术方面,一是海量油气数据的采集、传输、存储与管理技术。石油系统涉及的数据包括结构化、半结构化、非结构化数据,需要分布式存储、边缘计算、数据湖等大数据基础架构,以及数据治理、数据安全、数据挖掘等数据管理技术。二是油气专业领域知识的表示、获取与推理技术。该技术需要本体构建、知识提取、知识推理等方法,构建覆盖石油全领域的工业知识图谱,用于指导生产优化决策。三是油气生产系统的建模、仿真、优化与控制技术。需要多学习范式融合的机器学习、多学科耦合的数值仿真、数字孪生等建模仿真优化技术,实现油气生产全流程的精准管控。

在专用技术方面,主要包括:

(1)智能钻井技术。利用机器学习建模、优化算法,结合地质、测井等多源数据,实现钻井工艺参数优化、钻具状态识别、钻井故障预警等,提高钻井效率。

(2)智能采油技术。利用油藏工程与人工智能的交叉融合,构建智能油藏地质数据驱动模型,优化注采方案,实现油藏动态分析与产能预测,提高采收率。

(3)智能管道技术。利用分布式光纤传感、管道数字孪生等技术,实现管道泄漏诊断、管道泄漏风险评估、管道健康状态实时监测,最大限度保障管道输送安全。

(4)智慧炼化技术。利用工业大数据、知识图谱、强化学习等技术,优化炼厂生产调度,实现设备预测性维护、能源优化管理等,提升炼化装置综合效率。

总体看,智能石油是传统石油工程与人工智能的交叉融合领域,涉及海量异构数据处理、基于数据驱动技术的复杂系统建模、行业知识应用等诸多技术挑战。推进智能石油系统工程,需要从顶层设计、创新机制、标准规范、人才培养等方面系统谋划,打造石油行业创新发展的新引擎。

4.3 智能石油系统国内外发展情况

近年来,国际石油巨头和国内石油企业纷纷提出智能油田、智能管道、智慧炼化等发展战略,积极推进智能石油系统建设,取得了一批有影响力成果。

国际方面,以斯伦贝谢、哈里伯顿等为代表的国际油服公司,基于传感器、物联网、大数据分析等技术,提供从钻井、测井、录井到油藏描述、生产优化的全链条智能化解决方案。其中斯伦贝谢 DrillOps 自动钻井平台已在全球 2000 多口油气井投用,钻井效率提升 30%以上 [32]。哈里伯顿 Landmark DecisionSpace 油藏管理平台集成了油藏工

程、地质建模、生产模拟等功能,在全球 60 多个国家部署应用。

BP、埃克森美孚等国际石油公司则主要聚焦于油田开发、生产管理、炼化优化等业务场景。BP 与 Beyond Limits 公司合作,利用认知型人工智能技术开发了油藏生产优化平台,通过对地质、工程等跨领域知识的推理,优化采油方案,在美国、阿曼等油田应用后产量增幅达 20%[34]。埃克森美孚与微软合作,构建了炼化智慧云平台,运用机器学习、数字孪生等技术优化生产工艺,每年节约运营成本千万美元。

国内方面,三大石油公司高度重视智能石油发展,将其作为数字化转型的重要方向,纷纷制定智能油田、智慧管道、智慧炼化等专项规划,积极开展关键技术攻关和示范工程建设。

中石油提出智能油气田建设规划,以大庆、长庆等数字化示范区为试点,构建了钻井、采油、地面建成区块。其中大庆油田利用机器学习、大数据分析等技术,建成了智能钻井、智能采油、智能集输等系统,油田开发综合效益提高 12%以上。

中石化提出智慧炼化建设方案,在茂名、镇海、青岛等大型炼化企业开展智能工厂试点。通过工业大数据分析、生产过程智能优化等,实现生产装置自动控制水平和联合优化水平显著提升,炼油综合能耗降低 6%以上。

中海油提出智能深海油气开发战略,突破了复杂油藏智能解释、深海钻井智能控制、海底生产系统远程监控等关键技术。渤海油田利用智能完井、智能井下作业等技术,实现了海上平台无人化生产。

在具体领域,国内外还涌现出一批有特色的智能石油系统解决方案。如美国伍德集团推出了 ExpressFiber 光纤复合材料智能管道系统,通过分布式光纤传感、大数据分析,实现管道健康状态实时监测,泄漏检测灵敏度达 0.5%。中石化石科院自主研发了炼厂设备预测性维护系统,通过设备异常诊断、剩余寿命预测等,实现了关键设备故障预警和维修决策优化。

总体看,国内外石油行业对智能石油系统的战略价值形成广泛共识,纷纷加大研发投入,构筑智能化竞争新优势。未来,智能石油系统工程理论方法的持续创新,特别是多学科交叉融合的系统集成创新,将有力推动智能油气藏精细开发、智能油气管道安全运行、智慧炼化提质增效,助推石油工业高质量可持续发展。

4.4 代表性智能石油系统

(1) 斯伦贝谢 DrillOps 自动钻井平台。DrillOps 采用物联网技术、大数据分析方法、机器学习算法等,通过钻头、钻具等智能硬件实时感知井场状态;利用专家知识库、优化算法,在线优化钻井工艺参数;结合故障诊断、健康评估模型,实现异常工况智能预警,并通过自动化钻机执行优化钻井作业。目前已在美国、中东等 2000 多口井推广应用,单井平均钻进率提高 30%以上,平均钻井周期缩短 25%左右。

(2) 哈里伯顿智能油藏管理平台。该平台融合地震、测井、钻井等跨领域数据,利用岩石物理、流体力学、机器学习等多学科理论,构建了全生命周期智能化油藏管理解决方案。通过构建油藏智能地质模型和动态数值模型,优化注采井网部署,预测产能动态变化,支持油藏优化开发决策。已在全球 20 多个国家 60 多个油藏应用,采收率普遍提高 10%以上。

(3) 中海油深海智能生产平台。该平台利用水下机器人、水下生产控制系统等智能设备,建立了全天候、无人值守的深海油气生产体系。采用大数据分析、故障诊断等人工智能技术,实现设备工况智能感知、产量优化控制、设备健康管理等。目前已在南海、渤海等海域 10 多个平台应用,平均生产效率提升 8%,检修成本降低 15%。

(4) 中石化炼厂智能运行优化系统。该系统建立了跨装置、全流程炼油生产过程模型,在数据分析的基础上,利用多目标优化、强化学习等算法,优化原料组合、操作参数、运行方案。同时构建了炼厂设备全生命周期管理模型,实现设备状态实时监测、故障预警、寿命预

测、维修决策优化。目前已在茂名、镇海等 10 多家大型炼化企业应用，综合商品率提高 2 个百分点以上。

4.5 小结

本章分析了智能石油系统的发展现状与趋势。智能石油系统工程的本质，是运用人工智能与石油工程的交叉融合，推动石油工业的数字化、网络化、智能化转型。目前国内外石油企业都高度重视智能化发展，在智能钻井、智能采油、智能管道、智慧炼化等方面开展了广泛的技术攻关和应用实践，取得了显著的经济和社会效益。不断突破的大数据处理、机器学习建模、工业知识图谱、数字孪生等技术突破，必将进一步拓展智能石油系统工程的应用广度和深度，成为保障油气资源安全、推动行业转型升级的新引擎。目前，智能石油系统工程仍处于起步探索阶段，还需在基础理论、核心技术、标准规范、创新机制等方面持续发力，加速人工智能与石油行业的深度融合。

第五章 智能制造系统工程

制造业是国民经济的主体,是立国之本、兴国之器、强国之基。近年来,以人工智能为代表的新一代信息技术与制造业加速融合,正在催生新一轮工业革命。加快发展智能制造,推进制造业数字化、网络化、智能化,是我国抢占新一轮科技革命和产业变革制高点的战略选择。将人工智能技术与先进制造技术相结合,运用智能系统工程理论方法,是构建智能制造体系,实现制造业高质量发展的必由之路。

5.1 智能制造系统概述

智能制造是基于新一代人工智能技术,贯穿设计、生产、管理、服务等制造活动全过程,具有自感知、自学习、自决策、自执行、自适应等功能的新型生产方式。智能制造通过软件定义、数据驱动、平台支撑、服务增值等新模式,实现泛在感知、信息互联、自主决策的智能化制造系统,促进产品、生产、服务的智能化,最终实现提质增效、节能

降耗、绿色发展的目标。

从系统架构看,智能制造系统主要包括设备层、控制层、MES 层、ERP 层四个层级:

- 设备层包括各种智能装备、工业机器人、智能产线,以及相应的传感器、执行器、嵌入式控制器等,是实现生产过程智能化的基础。
- 控制层主要由数控系统、PLC、DCS 等工业控制系统构成,负责对生产设备进行精准控制,实现制造过程的自动化。
- MES 层作为车间的制造执行系统,负责对制造资源进行调度和优化,实现制造过程的精益化和敏捷化。
- ERP 层作为企业资源计划系统的上层应用,负责计划、采购、财务、销售等管理职能,实现企业经营的信息化。

在上述四层架构中,设备层、控制层聚焦于生产制造过程,侧重物理属性和控制逻辑; MES 层、ERP 层聚焦于资源计划管理,侧重信息流和业务流。智能制造系统通过纵向集成,实现信息流在四层之间的无缝流动;通过横向集成,实现产品全生命周期各环节的无缝协同,打造智能化的端到端价值链网络。

从技术视角看,智能制造系统需要深度应用大数据、物联网、人工智能等新一代信息技术,对设计、生产、供应、销售等环节进行全面赋能:在设计环节,利用仿真、优化、知识工程等技术,实现智能设计;在生产环节,利用机器视觉、自然语言理解等技术,实现智能装配、智能检测;在供应环节,利用大数据分析、语义推理等技术,实现供应链智能决策;在销售环节,利用大数据分析、知识图谱等技术,实现个性化定制、智能服务等。可见,智能制造系统是融合了信息技术、制造技术、管理技术的复杂系统工程,对提升制造业发展质量、推动我国制造强国建设具有重要意义。

5.2 智能制造系统工程关键技术

智能制造系统工程涵盖感知、分析、决策、控制、执行等诸多环

节,涉及工业大数据、智能工厂、智能设计、智能生产、智能物流等诸多领域。其中,有以下几类关键共性技术:

(1)制造大数据技术。利用大数据采集、集成、治理、分析等技术,对产品、设备、工艺、能耗、质量等制造数据进行全生命周期管理,挖掘数据资产价值,为智能决策提供支撑。主要包括工业数据采集、边缘计算、分布式存储、流式计算、数据挖掘等。

(2)机理-数据融合建模技术。综合利用机理建模和数据驱动建模,构建制造系统的多学科、多尺度高保真数字孪生模型,实现制造对象、制造过程、制造系统的全息化映射,用于仿真优化和智能决策。主要包括 CAD/CAE/CAM、多学科耦合仿真、数字孪生等。

(3)工业知识图谱技术。利用知识表示、本体构建、知识抽取等技术,构建涵盖产品、工艺、设备、供应链等制造领域的工业知识图谱,用于指导智能化设计、生产、管理。主要包括制造领域本体、语义链接、知识推理等。

(4)人机协同增强技术。利用自然交互、虚拟现实、脑机接口等技术,增强人机交互的自然性和沉浸感,实现人机混合增强智能,提升制造系统人机协同水平。主要包括工业可视化、虚拟装配、协作机器人等。

(5)智能优化决策技术。利用多目标优化、强化学习、对抗搜索等人工智能算法,在产品设计、工艺规划、生产调度、设备维护等环节实现智能化优化决策,提升制造系统的柔性、敏捷性和智能化水平。

围绕上述共性技术,智能制造系统在不同的应用场景下还需要一些专用技术,主要包括:

- 面向产品设计的仿生优化、进化设计、智能仿真等技术;
- 面向生产制造的机器视觉质检、自然语言装配指导、故障诊断等技术;
- 面向供应物流的需求预测、智能库存管理、无人驾驶运输工

具等技术；

通过利用先进的预测分析和人工智能算法，智能制造系统可以更准确地预测物料需求，优化库存水平，减少过剩或短缺情况，同时实现物料配送的自动化和无人化操作。

面向服务支持的远程监控、预测维护、智能诊断技术；这些技术通过远程监测设备状态，利用数据分析预测设备的潜在故障，从而提前进行维护，减少停机时间，提高生产效率。

通过这些关键技术的应用，智能制造系统能够实现更高的生产效率和更低的运营成本，同时提升产品质量和系统的可持续性。未来的发展方向还将包括更加深入的人工智能应用，以及与物联网、5G 通信技术的更紧密整合，进一步推动制造业的智能化和数字化转型。

5.3 智能制造系统国内外发展情况

随着新一代人工智能技术的蓬勃发展，以智能制造为主要特征的第四次工业革命正在全球范围内广泛兴起。美国、德国、日本等制造强国纷纷把智能制造作为抢占新一轮科技和产业革命制高点的重大战略，加紧布局人工智能、工业互联网等新兴技术，推动制造业的数字化、网络化、智能化转型。

美国政府先后发布了"先进制造伙伴计划"、"国家战略计划"等，支持工业互联网等智能制造关键技术研发，推动制造业与人工智能融合发展。通用电气公司提出"智能工厂"概念，研发了 **Predix** 工业互联网平台，面向航空、医疗、新能源等行业提供大数据分析、远程监控、预测性维护等智能化解决方案。特斯拉公司建成全球最大的智能化电动汽车制造工厂，大规模应用机器人、大数据、人工智能等技术，生产效率是传统汽车工厂的 3 倍。

德国政府相继推出"工业 4.0"、"人工智能战略"等规划，以智能工厂为主攻方向，积极布局 CPS、工业大数据等新兴产业，抢占智能制造技术制高点。西门子公司构建了 **MindSphere** 工业物联网平台，利用边

缘计算、数字孪生等技术优化产品设计、生产制造、运营维护全流程,已在 1500 多家工厂部署应用。博世公司在德国斯图加特建成博世 4.0 智能互联工厂,利用人工智能、增强现实等技术辅助装配、检测,生产效率提高 25%。

日本政府 2017 年提出"智能社会 5.0"愿景,制定了"互联工业"行动计划,重点发展机器人、人工智能等前沿技术,全面提升制造业的数字化、智能化水平。三菱重工研发了 ENERGY CLOUD 工业互联网平台,利用大数据、人工智能优化风机、燃机等产品的全生命周期管理 [56]。松下公司在大阪建成"未来工厂",利用人机协作、数字孪生、3D 打印等先进技术,将生产准备周期缩短 50%,不良率降低 80%。

我国政府高度重视智能制造发展。2015 年提出"中国制造 2025",部署了智能制造、工业互联网等十大重点领域;2019 年印发"工业互联网创新发展行动计划",支持工业 APP、边缘计算、数字孪生等关键技术研发与产业化。近年来,各行业智能制造水平明显提升,一批制造业与人工智能深度融合的标杆企业和示范项目不断涌现。

在流程工业,宝武钢铁构建了工业大脑"雄鹰"平台,利用机器学习优化炼钢工艺参数,成品率提高 3 个百分点。新疆天业利用大数据分析预测设备故障,检修工作量降低 18%。

在离散制造业,格力"零库存"智能工厂实现产品下线 45 秒内发货,运营成本降低 20%。TCL" T.CF"智慧工厂利用视觉检测、自动化装配等技术,产品一次性合格率达 99.8%。

在装备制造业,中国商飞自主研制的 C919 大型客机,利用虚拟装配、数字化制造等技术,研制周期比国际同类飞机缩短三分之一。徐工集团 XR1200 旋挖钻机,通过智能调度、远程运维等,使施工效率提升 50%。

总体看,我国制造业数字化、网络化、智能化正处于起步阶段,与发达国家还存在较大差距。未来,随着 5G、人工智能、大数据等新一

代信息技术加速渗透,智能制造系统建设必将全面提速。同时,机理-数据融合建模、工业知识图谱、人机协同增强等智能制造系统工程理论方法也将取得更大突破,加速形成新的制造范式和产业生态,为我国制造强国建设提供有力支撑。

5.4 代表性智能制造系统

(1)海尔 COSMOPlat 大规模定制平台。平台整合用户、设计、供应链、制造、物流等全流程业务,利用大数据分析、机器学习等技术,以用户需求为牵引优化资源配置。用户可参与产品设计,并实时跟踪订单状态。制造端可根据用户订单进行柔性生产,7 天内完成单件订单交付。目前平台已覆盖衣联网、车联网、食联网等 15 大行业生态。

(2)华为智能手机智慧工厂。工厂自主研发了基于 AI 的智能制造平台 FusionPlant,通过离散制造数字孪生、视觉质检、自动化装配、AGV 智能物流等技术,打造了行业领先的智能生产线。从投料、组装、测试到包装,全流程实现了自动化和信息化。产品不良率降低 50%,人均产值提高 28%,新产品导入周期缩短 30%。

(3)远东智慧能源咨询云平台。平台利用大数据、机器学习等技术,分析电站发电量、用电量等能源数据,优化光伏、风电、储能等新能源系统配置,并为用户提供能源优化咨询。通过将能源设备与云平台互联,可实现新能源发电预测、故障诊断、远程运维等智慧运营。平台已接入 5 大区域电网,年配售电量超 500 亿度。

(4)三一重工 18 号智能工厂。工厂引入机器人自动焊接、AGV 柔性物流、数字化装配等技术,建成挖掘机、混凝土机械等 13 条柔性生产线,生产的产品型号可多达 1000 种。通过 5G 网络,可实现设计、工艺、制造、物流等环节的全流程数据融合贯通。生产效率较传统工厂提升 28%,运营成本降低 18%。

(5)金牌厨柜成都生产基地大规模定制柔性智能制造平台,已实现单班产能 2 万片以上,可进行大小板件混线多花色生产,大幅度

减少了车间人员投入,相对行业最高水平提升 10%以上;坪效提升相对行业最高水平提升 13.3%以上,每年减少人员成本 450 万以上;通过线体自动控制板件生产过程不落地,减少人为转运导致的质量异常 30%以上,减少生产过程中各类数据排查时间 50%以上。

5.5 小结

本章分析了智能制造系统的发展态势与工程方法。智能制造是信息技术、制造技术、人工智能的深度融合,代表了新一轮工业革命的发展方向。推进智能制造,需要从感知、分析、决策、控制、执行等方面入手,突破制造大数据、机理-数据融合建模、工业知识图谱、人机协同增强、智能优化决策等关键技术。纵观国内外发展现状,智能制造正成为各国抢占制造业竞争制高点的焦点。以海尔、华为、三一重工为代表的一批制造企业,通过数字化转型实现了运营效率和产品质量的全面提升。未来,智能制造系统工程理论方法的持续创新,必将进一步推动制造模式、技术范式、商业逻辑的系统性重构,成为产业变革的核心驱动力。当然,智能制造是一个复杂的系统工程,仍面临诸多挑战,需要产学研用协同攻关,打造支撑中国制造向中国智造转变的新引擎。

第六章 智慧物流系统工程

物流是国民经济的基础性、战略性产业,是现代经济活动的大动脉。近年来,以人工智能、大数据、物联网、空间信息 (GIS、BIM) 为代表的新一代信息技术与物流业深度融合,正在催生新一轮物流变革。传统物流正加速向智慧物流演进,物流系统的敏捷化、网络化、智能化水平不断提升。将人工智能、运筹优化等方法与物流系统工程理论相结合,推动物流系统的智慧升级,已成为新形势下物流业发展的关键所在。

6.1 智慧物流系统概述

智慧物流是以物联网、大数据、人工智能等新一代信息技术为支

撑,对物流系统各要素、各环节、各流程进行全面感知、互联、分析、优化和控制,实现物流活动的自动化、网络化、智能化。智慧物流能够对海量物流数据进行实时采集、动态分析、优化决策,最终达到降本增效、提质增速的目标。

从组成看,智慧物流系统涵盖感知层、网络层、平台层、应用层等主要部分:

- 感知层由RFID电子标签、摄像头、传感器等物联网感知设备组成,可实现对车辆、货物、设施、人员等物流要素的智能感知和数据采集。
- 网络层主要由窄带物联网(NB-IoT)、5G、北斗导航等通信网络构成,负责实现感知数据的快速、可靠传输。
- 平台层以大数据、人工智能、空间信息、机器人等新兴技术为支撑,构建智慧物流数据管理与应用平台,实现海量异构物流数据的存储、计算、分析与应用。
- 应用层面向物流规划、运输、仓储、配送等各环节提供智能化、可视化应用,如智能调度、智能仓储、智能配送、供应链优化等。

智慧物流系统利用新一代信息技术,打通物流数据流、信息流与实物流,实现物流系统的横向集成和纵向贯通。通过数据融合与智能分析,不仅显著提高了物流运作效率,也使得物流由成本中心向价值中心、由支撑服务向引领发展转变。在需求日趋个性化、供应日益分散化的新形势下,构建敏捷高效的智慧物流体系,对畅通国民经济循环、助推产业转型升级具有重要意义。

6.2 智慧物流系统工程关键技术

智慧物流系统工程涉及需求感知、网络互联、数据处理、资源优化、智能决策等诸多关键技术。其中,典型的共性技术包括:

(1) 物联感知技术。是指利用各种传感器、通信技术和数据处理技术,通过互联网将物体互相连接起来,实现对物理世界的感知、识别和

理解的技术，具有多源异构、实时动态、智能自主、安全可靠等特点，是物联网的基础和核心，也是智慧物流的重要支撑。物流系统传感技术包括 **rfid**、红外、激光、图像识别、环境检测等。

(2) 智能仓储技术。仓储是物流管理的核心环节，几乎集聚了物流系统工程中的所有难题，包括实物与信息精准关联、库存透明实时掌控、物料进出流动高效等，这些问题加速了仓储管理与包括人工智能在内的新一代信息技术的深度融合，实现了仓储的智能化管理和自动化操作。智能仓储技术基于 **RFID**、智能货柜、仓储机器人（搬运、上架、拣货）、**AGV** 智能调度、智能分拣、语音拣选、视觉包装等应用技术等实现仓储无人化搬运、上架、拣货、盘点、巡检、自动出入库管理，实现仓储智能化管控和高效管理。

(3) 物流空间信息服务技术。借助于“数字地球”、“数字空间”理论，基于遥感、**GIS**、**BIM**、数字通信、**VR/AR** 及多媒体等关键技术，深度开发和利用空间信息，建设服务于物流管理的信息基础设施和信息系统。是物流系统智能化、可视化管理的基础支撑技术之一，可以实现物流路径规划、实时可视指挥、仓储虚拟仿真、远程操作等的智能化管控。

(4) 物流大数据技术。利用大数据采集、存储、分析等技术，对分散在物流系统各节点的多源异构数据进行集成融合，并通过数据挖掘实现物流需求预测、风险预警等，为智慧决策提供数据支撑。主要包括 **Hadoop**、**Spark** 等大数据基础架构，以及物流数据挖掘、知识发现等智能分析技术。

(5) 物流区块链技术。利用区块链的去中心化、防篡改、可追溯等特性，构建可信、透明、高效的物流信用体系，降低物流交易成本。主要包括智能合约、共识机制、非对称加密等基础架构，以及溯源、跟踪、清关等应用场景。

(6) 物流网络通信技术。综合运用图论、复杂网络、元胞自动机

等理论,建立多层级、动态适应的物流网络模型,并利用人工智能优化算法设计高鲁棒、低冗余的物流网络拓扑,提升网络韧性。主要包括物流枢纽布局优化、线路选择优化、运力调配优化等。

(7) 供应链智能协同技术。利用大数据感知、区块链溯源、人工智能分析等技术,实现供应链上下游多方协同,并通过算法优化平衡各方利益,提升供应链整体效能。主要包括供应链可视化、供需协同、风险预警、利益分配等应用技术。

在智慧物流不同领域和环节,还需一些专用技术支撑,如:

- 面向智慧仓储的货位优化、库存预测、AGV调度等技术;
- 面向智慧配送的线路规划、智能调度、无人配送等技术;
- 面向供应链金融的物流业务,区块链、大数据分析等技术;

通过优化资金流和信息流的管理,提高资金使用效率和透明度。具体技术应用包括供应链融资、支付与结算、信用管理等方面,能够有效减少供应链中的信任成本,加速资金流转,提升整体供应链的财务健康度和响应速度。

- 供应链融资:通过智能合约自动执行融资协议,利用实时数据分析进行信用评估,为供应链各方提供更加精准和高效的融资服务。
- 支付与结算:实现自动化的支付和结算流程,通过区块链技术确保交易记录的不可篡改性和可追溯性,减少交易争议和审计成本。
- 信用管理:利用大数据分析供应链各方的历史交易数据和行为模式,建立动态信用评分体系,为风险管理提供支持。

智慧物流系统在供应链金融领域的应用,不仅提升了物流效率和财务透明度,还为供应链的稳定性和可持续发展提供了强有力的技术支持。这种深度融合的智慧物流金融解决方案,是推动现代供应链创新和优化的关键力量。

6.3 智慧物流系统国内外发展情况

近年来,物流业数字化、网络化、智能化转型明显提速,以智慧物

流为代表的新业态、新模式不断涌现。美国、德国、日本等发达国家将智慧物流作为经济转型和产业升级的重要方向,加快布局自动化立体仓、机器人分拣、无人配送等智慧物流新技术和新场景,引领全球物流产业变革。

美国是最早探索智慧物流的国家之一。亚马逊公司在全球建立了 175 个智能配送中心,广泛应用 Kiva 机器人拣选系统,Kiva 机器人数量已超过 20 万台,日处理货物达到 1300 万件。谷歌、联邦快递等公司积极布局无人机、无人驾驶配送。2016 年,美国交通部发布《超越交通:自动化技术带来的机遇》报告,部署自动驾驶、无人机配送等智慧物流关键技术。

德国高度重视智慧物流发展。大陆集团在德国汉诺威投资建成全球最大的智能轮胎物流中心,利用大数据、机器人、AGV 等技术实现智能存储、分拣、装车,每天可处理 7.2 万个轮胎。奔驰在德国不来梅建成全球首个无人驾驶卡车物流中心,利用 5G 通信和 L4 级自动驾驶技术,实现 7×24 小时无人值守运输,运输效率提高 30%。

日本积极推动物流业的数字化、智能化变革。日本邮政在埼玉县建成亚洲最大的智能物流中心,利用机器人自动分拣系统,日分拣能力达到 90 万件,是传统物流中心的 3 倍。日本电商乐天引入自动化立体仓,单日发货能力较常规仓库提高 10 倍。日本国土交通省制定《综合物流施策大纲》,聚焦无人配送、共同配送等物流新模式。

我国高度重视智慧物流发展。2017 年,国务院印发《新一代人工智能发展规划》,明确提出智慧物流等智能化应用。近年来,智慧物流新技术、新设施、新场景加速落地,涌现出一批引领行业的标杆企业。

在智能仓储方面,京东"亚洲一号"是目前亚洲最大的智能物流中心,拥有流水线机器人、AGV 搬运机器人等上万台智能设备,日分拣处理能力达到 160 万单,是常规物流中心的 10 倍。苏宁"云仓"引入货到人拣选、机器人码垛、视觉分拣等技术,日处理货物可达 120 万件。

在运输配送方面,菜鸟联合北汽福田研发的 L4 级无人驾驶物流车,实现了城区 24 小时配送。京东建成全球首个无人机配送中心,日配送能力可达 20 万件。顺丰在北京、广州等地开通无人配送专线,日处理订单达到 10 万单。

在供应链协同方面,菜鸟 ET 大脑可实现供销预测、智能选品、柔性定价等,帮助商家提升 18% 的销量。海尔 COSMOPlat 平台可跨部门、跨区域对设计、供应、制造等环节进行协同优化,将供应链响应时间缩短了 50%。

从全球看,发达国家智慧物流体系已初具雏形,整体进入智慧升级期;我国智慧物流虽起步较晚,但后发优势明显,在某些领域已实现弯道超车。未来,随着人工智能、5G、物联网等颠覆性技术加速渗透,以及智能化基础设施进一步完善,智慧物流发展必将驶入快车道。同时,智慧物流系统工程理论和方法的突破,也将加速形成支撑高效便捷、绿色低碳物流发展的新模式新业态,为构建现代化经济体系注入新动能。

6.4 代表性智慧物流系统

(1) 京东智能物流。京东物流构建了全国最大的智能物流基础网络,在全国建有 25 个大型智能物流中心、7000 多个配送站、25000 多个自提点。其中"亚洲一号"物流中心是目前全球最大的智能物流工厂,引入了 AGV、机器人、视觉分拣、AR 捆货等上百项人工智能技术,日分拣能力超 160 万件,运营效率是传统模式的 10 倍。京东还自主研发了无人机、无人车等智能配送装备,年投递量超过 10 亿件。

(2) DHL 智能物流中心。DHL 在德国建成占地 13.5 万平米的智能物流中心,部署了机器视觉、机器人拣选、AGV、AR 眼镜等智能化设备 1000 多台。利用大数据算法进行需求预测、网络优化,并通过控制塔系统进行全局调度,运输时效提升 25%。此外,DHL 还在物流各环节广泛应用区块链技术,用于跨境清关、冷链溯源、快递保价等场景,

年交易量超过 5000 亿美元。

(3) 日立智慧物流。日立开发了智能物流系统 e-3PL, 基于大数据、人工智能、机器人等技术, 为企业提供智能化的第三方物流服务。e-3PL 可根据客户需求, 优化仓储布局、库存策略、运输路径等, 并利用 digital twin 等技术进行实时仿真, 使物流成本降低 20%。此外, 日立还与日本邮政等开展无人配送合作, 利用无人车进行干线运输, 年货运量可达 1000 万吨。

(4) 顺丰丰桥系统。顺丰自主研发了全球领先的智慧物流平台丰桥系统, 汇聚了海量的客户、运力、路径等数据, 利用大数据分析、机器学习等技术, 可实现精准定价、智能调度、实时跟踪等功能。目前, 丰桥日均配送单量超 2000 万, 仓储作业效率提升 30%, 运输时效提升 15%。顺丰还积极开展无人机、无人车配送, 探索建立 5G 车联网, 推动物流向智能化、无人化方向演进。

6.5 小结

本章分析了智慧物流系统的发展现状与工程方法。智慧物流是物联网、大数据、人工智能等新一代信息技术与现代物流业深度融合的产物, 代表了新时期物流变革的主要方向。推进智慧物流发展, 需要物流感知、网络互联、大数据处理、网络优化、供应链协同等多领域技术的协同创新。从国内外发展态势看, 智慧物流新技术新模式正加速落地, 京东、DHL、日立、顺丰等物流企业引领行业数字化智能化变革。未来, 智慧物流系统工程理论和方法的进一步发展, 必将重塑物流形态、优化资源配置、变革组织方式, 成为现代经济体系的关键支撑。当然, 智慧物流发展仍面临基础设施不足、技术创新乏力、人才短缺等诸多挑战, 需要政产学研多方协同, 完善顶层设计, 健全标准规范, 加快人才培养, 打造引领全球的智慧物流新高地。

第七章 智慧能源系统工程

能源是国民经济的重要物质基础,事关国计民生和国家安全。随着全球能源革命和数字化转型不断深入,能源系统正从化石能源为主体向风电、光伏等清洁低碳绿色新能源为主体加速演进,电网从单一集中式架构向多元分布式架构升级换代,能源生产、输配、消费各环节智慧化水平持续提升。将人工智能、大数据等现代信息技术与能源系统工程理论方法深度融合,构建智慧能源系统,已成为保障能源安全、推动能源革命的关键所在。

7.1 智慧能源系统概述

智慧能源是以新一代信息技术为支撑,通过能源产输配用各环节的自动化、智能化、网络化和数字化,构建高效、清洁、经济、安全的现代能源体系。智慧能源系统利用物联网、大数据、人工智能等技术,实现能源全生命周期的实时感知、动态分析、智能决策和协同优化,是实现以信息流引领能源流、物质流的现代能源系统。



图 7-1 智慧能源系统组成结构示意图

从构成看,智慧能源系统包括发电侧、输电侧、配电侧、用电侧和调度侧五大核心板块:

- **发电侧:** 利用大数据、机器学习等技术,优化火电、水电、风电、光伏等各类电源的运行和调度,提高发电效率、设备可靠性和清洁

能源消纳能力。

- 输电侧：利用状态感知、智能诊断等技术，对输电网络进行全面监测，实现输电线路的故障预警和智能运维，提高电网输送能力和供电可靠性。
- 配电侧：利用自动化配电和基于需求响应的协同优化等技术，实现配电网的故障自愈和负荷调控，提高供电质量和用户交互水平，支撑分布式能源并网。
- 调度侧：利用人工智能决策、能源区块链等技术，构建覆盖发、输、配、用各环节的智慧调度控制体系，实现源-网-荷-储协调优化。
- 用电侧：利用智能电表、能效管理等技术，优化工业、建筑、交通等领域用能，实现电力需求侧智能响应和能效提升。

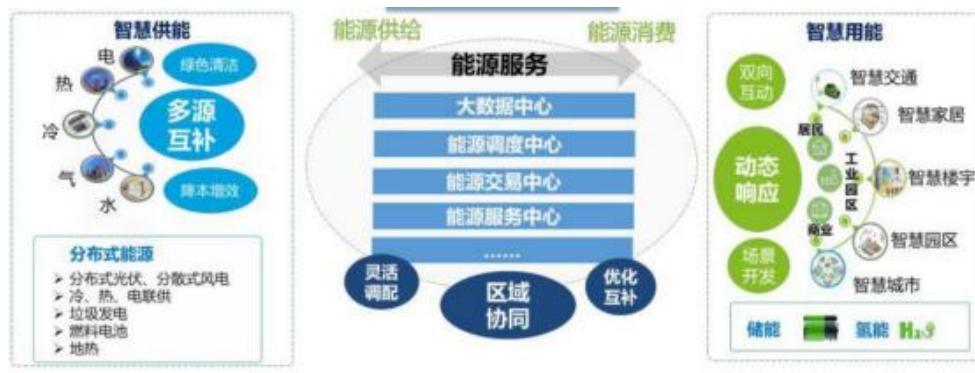


图 7-2 智慧能源系统服务架构示意图

如图 7-2 所示，区域智慧能源综合服务，以能源物联网为基础，统筹能源供需时空信息并利用大数据技术等先进信息技术对能源供需时空信息进行深入分析为核心，为政府、能源消费者、能源运营商、能源产品与服务商等能源领域用户，提供绿色、安全、经济、高效、增值的综合能源信息化智慧服务，构建共赢、共享的能源生态圈，提高能源管理效率，降低用能成本。

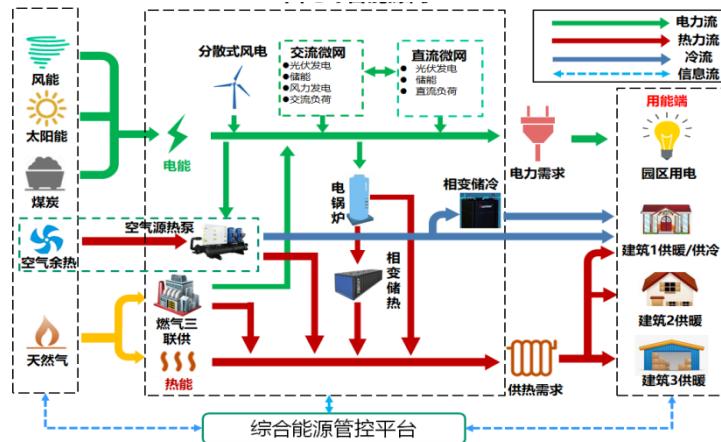


图 7-3 智慧能源系统多流互通示意图

如图 7-3 所示, 通过物联网、大数据和人工智能等新一代信息技术与能源电力技术的深度融合, 智慧能源系统打通了能源数据流与物理流, 使得能源系统具备自我感知、自我学习、自我优化、自我修复等智慧属性, 有望全面提升能源利用效率、供应质量和服务水平。在双碳目标和数字化转型的驱动下, 加快构建清洁低碳、安全高效的智慧能源体系, 对推动能源生产和消费革命、保障国家能源安全具有重大意义。

7.2 智慧能源系统工程关键技术

智慧能源系统工程涉及能源状态感知、网络通信、大数据分析、人工智能优化、智慧运维等诸多关键技术。其中, 典型共性技术包括:

(1) 能源物联网技术。利用 RFID、传感器、智能电表等感知设备和 NB-IoT、5G 等通信技术, 实现能源系统全方位、全过程的状态感知与信息交互, 为智慧能源应用提供数据支撑。主要包括能源数据采集、边缘计算、能源通信网关等。

(2) 能源大数据技术。运用大数据采集、存储、分析等技术, 对能源生产、输配、消费各环节海量多源异构数据进行融合处理, 实现能源系统多场景大数据应用。主要包括能源数据湖、能源知识图谱、能源数据挖掘等。

(3) 能源人工智能技术。综合运用机器学习、知识推理、智能优化

等人工智能方法,为能源系统调度控制、故障诊断、需求预测、交易优化等场景提供智能解决方案。主要包括电力负荷预测、新能源功率预测、配电网自愈控制等。

(4)能源区块链技术。利用区块链分布式账本、智能合约、共识机制等特性,为能源互联网交易结算、碳排放权管理、电动汽车充电结算等场景提供可信可证的技术支撑。主要包括能源交易平台、碳账户平台等。

(5)综合能源系统集成优化技术。运用多能流耦合建模、多目标优化、大系统分解等方法,实现电、热、气、水等多种能源形式的协同规划、互补调度与综合优化利用,构建安全高效经济的区域综合能源系统。

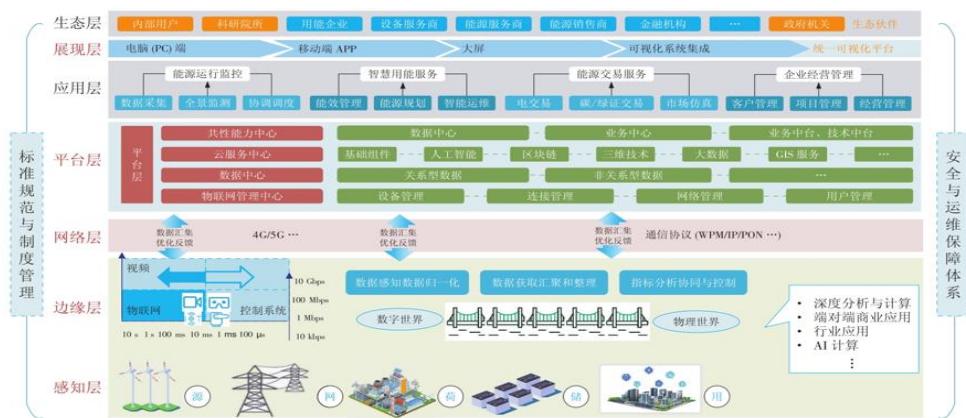


图 7-4 智慧能源服务示意图

围绕智慧能源不同领域,还需一些专用技术支撑,如:

- 面向智慧发电的发电资源优化调度、新能源接入控制、机组智能运维等技术;
- 面向智慧电网的配电自动化、输电线路状态监测、需求侧智能响应等技术;
- 面向综合能源的多能互补优化调度、能源梯级利用、冷热电联供和源荷网储一体化综合利用技术等。



图 7-5 智慧能源服务体系示意图

智慧能源系统工程是一个多学科交叉的复杂系统工程,对能源领域和信息领域的协同创新提出了更高要求。未来,能源大数据、能源人工智能等关键共性技术的持续突破,必将进一步拓展智慧能源在发电、配电、输电、用电等环节的应用广度和深度,助推能源体系高效化、清洁化、智能化和数字化发展。

7.3 智慧能源系统国内外发展情况

智慧能源是全球能源变革和数字化转型大背景下的必然选择。美国、欧盟、日本等发达经济体高度重视智慧能源发展,将其作为推进能源革命、应对气候变化的战略举措,加快在智慧电厂、智能电网、智慧园区和能源数字化等方面的部署,抢占智慧能源产业发展制高点。

美国是智慧能源系统领域的先行者之一。2007 年,美国能源部发布"智能电网"国家愿景与发展路线图。截止 2020 年,联邦和地方政府对智能电网投资超过 1000 亿美元。近年来,美国加速推进发电、输电、配电、用电各环节的数字化改造,建成了一批具有全球影响力的示范项目。如夏威夷智能电网示范项目,通过储能优化、需求响应等措施,可再生能源渗透率超过 35%。又如纽约智慧能源园区,建立了楼宇-园区-城市三级能源管理平台,实现了多能互补与智慧节能。

欧盟高度重视智慧能源发展。2015年,欧盟发布"数字单一市场战略",将智慧能源列为五大重点领域之一。德国在"工业4.0"框架下,大力发展战略性新兴产业、智能微网等智慧能源新模式。虚拟电厂通过云计算、大数据等技术,对分布式光伏、储能、电动汽车等资源进行聚合优化调度,提升电网灵活性。德国已建成1.5万余座虚拟电厂,年发电量超300亿度。智能微网通过就地平衡、自主控制等,实现社区级的供需平衡,可再生能源利用率达70%以上。德国已建成30余座智能微网示范项目。

日本积极探索智慧能源新业态。2010年,日本提出"智能社区"建设构想,开展了横滨、丰田、北九州等多个智慧能源示范项目。其中最具代表性的当属柳岛智能电网示范项目,通过能源管理系统(EMS)对分布式光伏、燃料电池、储能等多元能源设施进行统筹优化,并引入需求侧管理措施,负荷尖峰降低15%,可再生能源消纳能力提升20%。日本还积极推行虚拟电厂,中部电力、关西电力等能源巨头纷纷开展虚拟电厂试点,年参与需求响应负荷超过500万千瓦。

我国高度重视智慧能源发展。2016年,国家发改委、能源局印发《关于推进"互联网+"智慧能源发展的指导意见》,对智慧能源顶层设计、重点任务等进行了系统部署。2021年,国务院发布《数字经济发展"十四五"规划》,进一步强调发展智慧能源,提出打造全国统一电力市场体系、构建多能互补的智慧能源系统等举措。在政策引导下,国家能源集团、国家电网、南方电网等骨干能源企业纷纷制定智慧能源规划,开展了一批有影响力的示范工程。在特高压输电领域,国家电网建成"两交三直"特高压工程,实现"西电东送、北电南供"的跨区跨省清洁能源输送。同时,全面应用状态监测、智能巡检、移动作业等智能运维技术,输电线路运维效率提升80%。在配电自动化领域,国网浙江电力自主研发配电物联网系统,实现配电设备的全息感知、故障自愈、智慧调控,供电可靠性达99.999%,居世界领先水平。国网上海电力在世博

园等开展智能配电网示范,可再生能源渗透率超 50%。在综合能源领域,国家能源集团建成雄安、苏州等 30 余个智慧能源示范项目,建筑能耗降低 30%,可再生能源利用率提高 25%。三峡集团在三峡、溪洛渡等水电站应用智能调度技术,发电量增加 2 亿度。

总体看,我国智慧能源产业近年来保持高速增长态势,初步建立了设备、系统、平台、生态等产业体系,技术创新能力显著增强。同时也应看到,与发达国家相比,我国在基础理论、核心技术、创新机制等方面仍存在不小差距。未来,随着以信息技术为主导的第四次工业革命不断演进,数字化将成为能源发展的主旋律。亟需完善智慧能源发展的政策体系,强化智慧能源领域原始创新,加快培育智慧能源产业生态,推动能源系统向清洁化、电气化、智能化方向升级换代。

7.4 代表性智慧能源系统

(1)国家电网:从泛在电力物联网到"三型两网、世界一流"的能源互联网项目。项目通过在发电、输电、变电、配电、用电等环节全面部署智能传感和边缘计算设备,构建了全息感知、泛在互联、开放共享的能源互联网体系。利用人工智能、区块链等技术,可实现电网调度自主决策、输电线路故障自愈、需求侧资源自动响应等。到 2024 年,初步建成世界领先的智慧能源系统,清洁能源占比达 50%,用户参与需求响应负荷 1.8 亿千瓦。



图 7-6 泛在电力物联网支撑智慧能源服务

(2)南方电网数字新基建项目。南方电网以 5G 通信技术、人工智能技术和大数据分析技术为核心,构建了覆盖发、输、配、用、云的智

慧能源新型基础设施。自主研发了配电自动化、用电信息采集等设备和系统,在数字孪生、配电故障自愈等方面达到国际先进水平。建成广东、海南、云南 3 个千万级智能电表省,采集数据年均增长 200%。未来 5 年数字化转型投入超 1300 亿元,到 2025 年将建成 6 个智慧能源示范城市。

(3) 华为智能光伏云项目。项目利用人工智能、云计算等技术,对光伏发电各环节进行优化,可实现功率预测、智能调度、远程运维等。自动诊断故障 1 万余起,发电量提升 2%,日处理数据量超 2PB。目前已接入光伏电站 1300 余座,装机容量超过 50 吉瓦,成为全球最大的智能光伏管理平台。华为还与国网、南网等联合开展虚拟电厂试点,为分布式能源提供智慧运营服务。

(4) 国家能源集团综合智慧能源项目。项目以能源物联网、能源大脑为支撑,打造了源-网-荷-储一体化的区域智慧能源系统。建成雄安、苏州等 30 余个示范项目,通过冷热电三联供、梯级用能等,能源综合利用效率超 70%。其中雄安智慧能源项目通过 150 余项数字化应用,可再生能源占比达 40%,年节约运行费用 5000 万元。

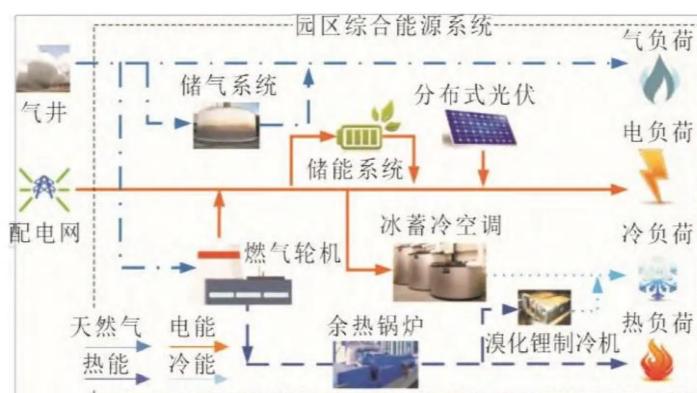


图 7-7 园区综合能源系统示意图

(5) 胜利油田的“源网荷储”一体化智慧能源系统项目。2023 年 9 月 23 日,中国石化胜利油田自主研发建成国内油气领域首个拥有自主知识产权的大型“源网荷储”一体化智慧能源系统。该系统集成各方资源数据和实时状态,构建了“源网荷储”智慧能源管控平台,

结合外购电、煤电和绿电成本，构建一体化经济决策模型，实现了发供用一体化经济运行，确保“煤电、绿电、网电”灵活经济安全互济。目前其光伏发电装机规模达 411 兆瓦，年发用绿电超过 4.8 亿千瓦时，240 座光伏电站全部可靠并网，自发绿电全量消纳。

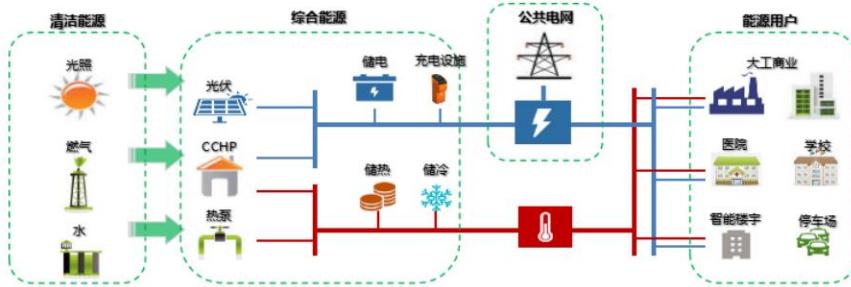


图 7-8 区域源网荷储一体化综合能源服务示意图

7.5 小结

本章分析了智慧能源系统的发展现状和工程方法。全球能源数字化转型和低碳化发展的双重趋势，正在重塑能源产业形态和商业模式。智慧能源代表了能源电力与信息通信技术深度融合的发展方向，是建设清洁低碳、安全高效能源体系的关键支撑。面向智慧能源系统的设计、建设与运营，需要能源感知、大数据分析、人工智能决策、多能互补等多领域关键技术的协同攻关。纵观国内外发展态势，智慧能源新技术新模式已进入加速落地期，全球能源企业竞相布局。未来，智慧能源系统工程理论体系将进一步完善，支撑能源生产、传输、消费各环节形成全新的技术路线和商业逻辑，成为保障能源安全、推动能源革命的“新引擎”。源网荷储一体化智慧能源系统不仅有利于提升电力系统运行效率和电源开发综合效益，促进能源转型和绿色发展，同时也有助于发挥跨区源网荷储协调互济作用，扩大电力资源配置规模，推进区域协调发展。智慧能源发展仍面临基础理论薄弱、核心技术受制、复合型人才匮乏等诸多挑战。需要以开放创新理念打破学科壁垒，促进能源学科与信息学科的交叉融合，完善智慧能源发展的制度环境和

生态体系,为加快构建清洁低碳、安全高效的现代能源体系提供强大科技支撑。

第八章 智慧城市系统工程

未来的智慧城市是满足市民日益增长需求的关键。随着以大数据、人工智能、5G 等为代表的新一轮科技革命蓬勃兴起, 全球城市发展进入数字化、网络化、智能化的新阶段。将现代信息技术广泛应用于城市规划、建设、管理、服务等各领域, 塑造数字孪生城市、构建智慧城市已成为全球城市发展和治理的普遍趋势。因此, 运用系统工程理论方法统筹设计智慧城市的技术架构、应用场景、实施路径, 是实现城市可持续发展的关键所在。本文研究了智慧城市的概念, 分析了国内外智慧城市的架构和关键技术, 总结了国内外智慧城市的发展情况。

8.1 智慧城市系统概述

智慧城市是运用物联网、大数据、人工智能等新一代信息技术, 实现城市智慧化的新型城市形态^[1]。通过全面感知、宽带互联和智能计算等手段, 智慧城市推动信息资源在城市各系统和各领域的深度应用, 为市民提供更加精准、高效、人性化的公共服务, 最终实现以人为本、绿色低碳、创新驱动的可持续发展目标^[2,3]。智慧城市依托现代通信技术, 汇聚人的智慧, 赋予物的智能, 实现物与人之间的智能互动和协同互助, 从而优化社会活动的构建, 展现城市发展的全新形态。这一进步标志着在数字化城市建设之后, 城市管理和服务能力的全面提升, 进一步推动了社会的创新和可持续发展。图 8-1 展示了智慧城市的架构, 智慧城市可分为感知层、网络层、平台层、应用层四个层次。



图 8-1 智慧城市的架构

(1) 感知层是智慧城市架构的基础，负责从各种物理环境中收集和处理数据^[5]。智慧城市的数据来源多样，包括环境数据、交通数据和公共设施数据等。由于这些数据种类繁多，城市运行所产生的数据差异很大。感知层通过智能设备和无线传感网络（WSNs）收集湿度、温度、重量、光照和GPS位置信息等数据。这些设备和传感器能够捕捉广泛的信息，并通过感知模型将操作与传感器或物体连接起来，以减少数据收集中的不确定性。感知层不仅提高了信息收集的效率，还通过最大化网络连接，促进无处不在的访问和智能化。感知层为智慧城市的决策和运营提供了坚实的数据基础，支持多种应用场景，包括交通管理、能源优化、公共健康与安全管理等。

(2) 网络层根据覆盖的范围可以分为短距离接入网络技术和广域网络技术^[6]。短距离接入网络技术包括蓝牙、Zigbee、NFC、M2M、RFID 和 Z-Wave 等，它们能够在较小的范围内进行低功耗通信和设备间的近距离通信。短距离接入网络技术常用于智能家居、物联网设备和移动支付等场景。而广域传输网络技术则包括 3G、4G (LTE)、5G、Wi-Fi 和 LP-WAN 等，它们提供了更广泛的覆盖范围和更高的传输速度，适合大规模数据传输和长距离通信。广域传输网络技术常用于移动通信、互联网接入和物联网连接等场景。这些网络技术共同构成了智能城市中数据的传输和通信基础，支持着智能设备和系统之间

的高效、可靠的数据交流，推动着智慧城市的发展和运行。

(3) 平台层充当智能城市的“大脑”。这一层完成多种关键任务，包括数据关联、分析、存储和动态任务管理^[7]。智能城市的管理依赖于高效的信息管理，这对于实现可持续的智慧城市至关重要。信息管理的核心任务是保持数据的动态性，包括清理、修复、整合和更新数据。具体来说，信息管理可以分为信息整合、信息准备、存储以及事件和决策管理。信息整合通过结合不同来源的数据，提高准确性并生成清晰的决策；信息过滤则去除冗余信息提高数据处理效率。当前文献中采用了多种策略和方法来执行信息整合，如卡尔曼滤波技术和数据挖掘技术，以揭示隐藏的重要信息。平台层通过高效的信息管理和处理，支持应用层做出准确的决策，从而实现智能城市的各项功能和服务，是智慧城市成功的关键。

(4) 应用层是连接城市居民与数据管理之间的桥梁，也是架构中的最高层。应用层的性能直接影响着公众的体验和操作人员对智慧城市运营的满意度。市民特别关注城市提供的智能服务，比如智能天气预报等，希望这些服务能够更加智能化。应用层由多个学科的不同组件构成，包括网络优化、网络供应、智能交通和气候评估等关键服务。应用层通过处理和存储信息来提升整个城市的运行表现。由于市民无法理解数据管理层的复杂性，因此他们对性能提升的感知主要依赖于应用层的结果。因此，在保持不同智能应用之间的互操作性的同时，高层智能系统必须分析市民的需求，并以最高精度满足这些需求。

通过构建感知层、网络层、平台层和应用层的架构，智慧城市实现了信息流、资金流、物质流、能量流的高度协同与优化配置，显著提升了城市的运行效率和服务水平。智慧城市借助物联网、数字孪生、虚实交互等新技术，从静态向动态、从数字化向智能化不断升级，新型智慧城市建设已经成为全球城市竞相追逐的新标杆。在新型城镇化和数字中国战略的驱动下，加快发展以人工智能为引领的新型智慧城市

市，不仅能够塑造高品质的美好城市生活，还将显著提升国家的软实力和核心竞争力，为实现可持续发展提供坚实支撑。

8.2 智慧城市系统工程关键技术

智慧城市建设涉及顶层规划、基础设施、数据资源、智慧应用等多个层面，是一项复杂的系统工程，需要物联网、大数据、人工智能、云计算等多种关键技术的集成应用。图 2 展示了智慧城市中的一些典型的共性技术。



图 8-2 智慧城市中的典型共性技术

(1) 城市物联网技术是指利用一系列物联网感知设备如 RFID、智能传感器、执行器等，结合低功耗广域网通信技术例如 NB-IoT、LoRa、Sigfox 等，构建了城市信息的神经末梢系统^[8]。这种技术能够实现对城市运行的全要素、全过程、全天候的感知和互联。例如，智能传感器可以实时监测城市交通、环境、能源消耗等各个方面的数据，而 RFID 技术则可以用于智能城市中的物品识别与管理^[9]。通过这些物联网设备和通信技术的集成，城市管理者可以更加智能、高效地监控和管理城市运行，为居民提供更优质、便捷的生活环境。

(2) 智慧城市大数据技术利用大数据采集、存储、处理和分析等技术，对城市管理、交通、能源、环保等领域的多源异构海量数据

进行汇聚融合和关联分析，形成城市数字底座，为上层的智慧应用提供强大支持和赋能^[10]。这项技术能够帮助城市管理者更加科学地制定政策和决策，提高城市运行的效率和智能化水平，为居民创造更便利、舒适的生活环境。通过分析大数据，城市可以更好地了解市民需求，优化公共服务，改善交通拥堵，节能减排，提升环境保护水平，促进城市可持续发展。

(3) 城市人工智能技术融合了机器学习、知识推理、自然语言理解和智能优化等方法，为城市管理、公共服务和产业发展提供智能化解决方案，形成了智慧城市的“城市大脑”^[11]。这项技术使得城市管理者能够更加有效地分析和利用大量数据，以优化城市规划和资源配置。通过智能化决策和预测分析，城市能够提升公共服务水平，改善交通流量管理、环境监测和治理等方面。此外，城市人工智能技术也促进了产业的创新发展，为企业提供智能化的生产和服务方案，推动了城市产业的升级和转型。

(4) 数字孪生城市技术利用时空大数据、物联网、人工智能以及增强/虚拟现实等新技术，对城市的地理空间、自然资源、基础设施以及经济社会等要素进行全息映射，构建了与实际物理环境同步的数字孪生城市^[12]。这种技术实现了智慧城市管理从静态到动态、从宏观到微观的数字化和智能化运营。数字孪生城市技术能够为城市决策者提供更全面、精准的数据支持，帮助他们深入理解城市运行的状态和发展趋势。通过模拟和预测城市各种情景，该技术还能优化城市规划、资源配置和应急响应，提高城市的运行效率和智能化水平。

(5) 云计算在智慧城市中发挥着至关重要的作用。首先，它提供了高效、安全的数据存储和管理平台，能够应对智慧城市大量的数据需求，包括交通、环境、能源等多个领域的数据。其次，云计算具有强大的数据处理和分析能力，可以对大规模数据进行实时分析和挖掘，帮助城市管理者洞察数据背后的规律性和关联性，为决策提供数

据支持。在智能决策支持方面，云计算基于数据分析结果，实现智能化的决策支持系统，为城市管理者制定更加科学、有效的决策提供帮助。此外，云计算还可以支持资源的优化和节约，通过数据分析和智能控制，实现能源、交通、水资源等方面的合理利用，降低城市运行成本。最后，云计算促进了智慧城市服务的普及和便捷化，如智能交通系统、智慧医疗服务等，为市民提供更高效的公共服务，提升了城市生活质量。

在智慧城市的不同领域，还需要一些专用技术的支撑。例如，面向政务服务，自然语言处理^[13]、知识图谱^[14]、电子证照等技术能够提高政务服务的智能化水平，简化市民办理事务的流程，提升政府服务的效率和透明度。面向交通管理，车路协同、智能信号控制、自适应调度等技术通过实时监控和动态调度交通流量，减少拥堵，提高通行效率，增强交通安全性^[15]。面向能源管理，多能流耦合、需求侧响应、区块链交易等技术实现能源的高效分配和利用，降低能耗，促进可再生能源的应用，提升能源管理的智能化和可持续性。面向环境监测，传感器网络、大数据分析和人工智能技术可以实时监测空气质量、水质、噪音等环境参数，为城市环境保护和治理提供科学依据。面向公共安全，物联网、视频监控和人脸识别技术则可以提升城市的安防水平，保障市民的生命财产安全^[16,17]。

这些技术的集成应用，不仅能够提升智慧城市的管理效率和服务水平，还能够满足城市居民多样化、个性化的需求，推动智慧城市向更高层次发展。未来，随着类脑智能、区块链、第三代半导体等颠覆性技术的加速突破，智慧城市的应用场景和解决方案将持续拓展，形成全领域、宽场景、多模态的智慧城市新业态，为城市的可持续发展提供源源不断的新动能。

8.3 智慧城市系统国内外发展情况

智慧城市已成为全球城市发展和治理的新趋势。美国、新加坡、

日本、欧盟等发达国家和地区率先开展智慧城市顶层规划和系统布局,通过新一代信息基础设施建设和数字技术创新应用,加快推动城市从数字化向智慧化升级,引领全球智慧城市发展潮流^[18,19]。

美国高度重视智慧城市的发展。2015年,美国交通部发起了“智慧城市挑战”计划,在全美范围内遴选了七座城市开展智慧交通示范,旨在利用数据驱动的创新解决方案改善交通拥堵问题^[20]。2016年,美国国家科技委员会发布了《技术和未来城市》报告,提出利用物联网、大数据分析和自动驾驶等技术来提升城市管理和服务水平。近年来,纽约、波士顿、芝加哥等城市纷纷制定了智慧城市规划,并开展了一系列有影响力的示范项目。纽约的LinkNYC智慧公共设施项目将旧有的电话亭改造成高速Wi-Fi热点,为市民提供免费的互联网接入服务,同时具备充电站和信息查询功能,提高了城市公共设施的智能化水平。芝加哥的“阵线”城市感知网络通过部署大量传感器实时监测城市环境和基础设施状况,收集的数据用于改进城市管理和服务,提升了城市的应急响应能力和管理效率。波士顿也积极推进智慧城市建设,开展了智能停车、智慧街道照明和垃圾管理等项目,通过先进的传感和数据分析技术,不仅提高了城市资源的利用效率,还改善了市民的生活质量。美国的智慧城市建设以技术创新为驱动、以提升城市管理和服务水平为目标,取得了显著成效,为全球智慧城市建设提供了宝贵的经验和参考。

新加坡是世界公认的智慧城市典范。早在2014年,该国发布了“智慧国家2025”总体规划,以数字技术为驱动力,致力于打造领先全球的智慧国家。通过建立覆盖全岛的传感网络,包括各类传感设备和感知技术,实现了对城市环境、交通状况和能耗数据等信息的实时监测和动态调整。在交通领域,新加坡率先应用了电子不停车收费(ERP)、智能公交系统和自动驾驶技术,构建了全球领先的智慧交通系统,高峰时段的交通拥堵指数不到1.2,大大提升了通行效率和交通安全性。

同时，新加坡在社区治理领域建设了"智慧国家传感器平台"，通过视频分析、环境监测等技术，能够及时感知社区状态，预警并处置城市运行风险，有效提升了城市治理的响应能力和效率。这些智慧城市建设举措不仅仅是技术的应用，更是为了提升城市居民的生活质量和城市运行的整体效率，为其他城市提供了可借鉴的经验和示范。

日本将智慧城市视为解决社会问题的重要途径。早在 2010 年，日本就提出了面向 2020 年的"智慧社区"建设构想，主要着眼于环保节能和应对高龄化等社会挑战。2018 年，日本进一步深化这一理念，通过"超智慧社会(Society 5.0)"国家战略，强调了利用物联网、大数据和人工智能等数字技术来创新城市基础设施和公共服务。特别是东京都提出了建设"世界最智慧城市"的远景，重点关注防灾减灾、交通拥堵治理和高龄化应对等方面，积极应用新技术和新方案解决现实问题。同时，横滨市也展开了智慧能源社区、自动驾驶出租车等多个智慧城市示范项目，这些项目在新技术创新应用方面走在了全球的前列。这些举措不仅为日本的城市管理和公共服务注入了新动力，也为全球智慧城市建设提供了有益经验和启示。

欧盟对智慧城市的发展给予了高度重视。2012 年，欧盟启动了"智慧城市和社区欧洲创新伙伴关系计划" (EIP-SCC)，并资助开展能源、交通、信息通信等领域的智慧城市试点示范项目。这一举措旨在推动欧洲各地区在智慧城市方面的创新实践和经验分享。2016 年，欧盟进一步提出了"智慧城市灯塔"计划，从中遴选了 9 个城市作为智慧城市的标杆。其中，荷兰的阿姆斯特丹在智能照明、智慧交通等方面取得了全球领先水平，因此被评为欧洲最智慧的城市之一。另外，西班牙的巴塞罗那则通过智慧停车引导、智能垃圾桶等新技术，优化了城市管理，成为公认的智慧城市典范，为其他城市提供了有益的借鉴和启示。这些成功的案例表明，欧盟在智慧城市领域的努力取得了显著成果，为城市的可持续发展和智能化管理提供了有力支持。

我国对新型智慧城市建设非常重视。早在 2012 年，住建部首次提出了"智慧城市"概念，并启动了 3 批次共 290 个国家智慧城市试点项目。随后，2014 年国务院发布了《关于促进智慧城市健康发展的指导意见》，全面部署了智慧城市的顶层设计和重点任务。进入"十三五"时期，发改委、科技部、工信部、自然资源部等多个部门相继出台了智慧城市相关政策，从建设指南到评价指标进行了专项规划。在国家战略的引领下，北京、上海、深圳、杭州、广州等城市纷纷制定了新型智慧城市的行动方案，并实施了一系列示范性项目。以北京为例，该城市重点打造了城市大脑"首都之心"，建成了全球最大的城市政务服务平台，接入市民超过 1300 万人次，年服务量达到了 3.6 亿次。上海则着力打造全球领先的智慧城市典范，展开了包括智慧交通、智慧医疗等在内的 200 余个应用创新项目，覆盖了城市运行管理的各个领域。杭州建成了"城市大脑"平台，引领了"数字治堵"的发展，使得高峰时段的拥堵指数下降了 10%。广州发布了全国首个城市级人工智能发展规划，成功建成了羊城慧眼、穗康助手等 30 余个人工智能应用平台。深圳则实现了国内首个全市统一的数字孪生城市平台，真实地再现了 1340 平方公里深圳的地理空间。这些举措和项目的实施，标志着我国在智慧城市领域取得了令人瞩目的进展，并为未来智慧城市的建设奠定了坚实基础。

智慧城市建设已成为城市竞相发展数字经济、塑造核心竞争力的新引擎，展现出从顶层设计到技术创新、从通用平台到行业应用的蓬勃发展趋势。我国虽然在智慧城市发展上起步较晚，但近年来呈现出跨越式发展的势头，涌现出一批具有世界影响力的标杆城市。随着第五代移动通信（5G）、人工智能、区块链等新技术加速渗透，以及空天地一体化、云边端协同的新型基础设施进一步完善，新型智慧城市建设将加速驶入快车道。与此同时，随着智慧城市系统工程理论和方法的不断突破，必将重塑城市发展理念、优化城市治理模式、变革城

市产业结构，成为城市高质量可持续发展的新引擎。这种发展趋势不仅将带动城市经济、社会、环境的全面提升，也将为城市居民提供更便捷、智能、可持续的生活方式，推动城市向着更加智能、宜居、绿色的方向迈进。

8.4 代表性智慧城市系统

(1) 北京亦庄新城智慧城市大脑。项目以人工智能为核心,构建了感知、认知、决策"三位一体"的智慧城市操作系统。通过 1.8 万个智能感知终端,实现对城市运行的全天候实时监测;利用知识图谱、数字孪生等技术,建立城市运行事件的智慧应对机制;运用人工智能算法,优化调度 200 万平方米的公共设施资源。项目荣获 2020 智慧城市创新应用大赛数字孪生城市领域唯一金奖。

(2) 杭州作为中国数字经济的领军城市之一，一直致力于建设智慧城市，通过数字化改革和创新应用，为市民创造更便捷、高效、安全的生活环境。近年来，杭州市委改革办带头，各地各部门积极融入数字化改革的大潮中。通过借鉴浙江省“152”工作体系，杭州以“三张清单”为核心，坚持“小切口大场景”的原则，致力于将数字化与城市管理相结合，形成了多个具有影响力和实用性的数字化应用成果。在城市管理方面，杭州市综合行政执法局等部门采用数字化手段，提升了综合执法效能。例如，滨江区综合行政执法局大胆尝试无人机技术进行高空巡查和信息采集，构建了地空一体巡逻执法网，有效提高了城市管理的精细化和智能化水平。同时，钱塘区综合行政执法局打造了统一的数字执法平台，通过对讲机、高清监控等设备的全面应用，提升了执法的准确性和效率，为城市治理提供了更强有力的支持。在智慧城市建设方面，杭州充分利用物联网、云计算等前沿技术，不断提升城市智慧化管理水平。例如，在湖滨商圈，通过湖滨在线数字驾驶舱，实现了对人流量、风险指数等数据的实时监测和分析，能够及时触发应急响应，确保了商圈的安全与秩序。同时，西湖区推进智慧

监管系统“三件套”安装使用工作，进一步加强了区域的安全防范和管控能力。这些数字化改革和智慧城市建设的举措，使得杭州成为一座充满活力和智慧的城市。

(3) 成都市在智慧城市建设方面取得了显著进展，涵盖顶层规划、制度规范、基础支撑、管理中枢、数据赋能、智慧应用、公共服务、数字产业发展及城市网络安全等多个领域。成都市通过发布《成都市“互联网+城市”行动方案（2017-2020）》等文件，完善智慧城市架构体系，并通过《成都市公共数据管理应用规定》等规范公共数据管理和政务信息系统整合，提升了制度规范性。在基础设施上，成都市建成统一的政务云平台和电子政务外网，提升了城市智能感知能力，且成都超算中心和智算中心已投入运行。在管理中枢方面，市网络理政中心开发的“城市大脑”系统接入了 16 万路视频和物联感知设备，实现了智能化城市治理。数据赋能成效显著，统一的政务信息资源共享平台和公共数据开放平台广泛汇聚数据，支撑多个市级应用场景构建。智慧应用方面，成都市建设了“天府蓉易办”“天府蓉易享”等平台，形成覆盖政务服务、城市运行、社会诉求的体系，提升了政务服务和城市管理效率。公共服务方面，“天府市民云”平台集成大量市级和区（市）县特色服务，注册用户突破 1100 万，在线教育和远程诊疗等服务也取得进展。在数字产业发展上，成都市推动会展新经济产业基地建设，促进大数据和人工智能产业发展，电子商务和电子信息产业规模位居全国前列。城市网络安全方面，成都市形成了网信部门统筹协调的工作格局，建设了高标准的网络安全基础设施，并开展了多次网络安全应急演练，网络安全产业规模位居全国第一梯队。通过多方面的努力和成就，成都市已成为全国智慧城市建设的典范。

(4) 广州南沙新区 5G 自动驾驶开放测试。南沙新区是全国首批 5G 自动驾驶测试示范区，通过部署 5G 网络、激光雷达等车路协同设

施,开放约 100 平方公里范围作为 L4 级自动驾驶测试场景。吸引百度、小马智行、文远知行等 30 余家头部企业开展路测,测试里程超 30 万公里,形成完整的自动驾驶产业链。2022 年全国两会期间,实现 5G 自动驾驶接驳近百名全国人大代表。

(5) 青岛正在以惊人的速度崛起为智慧城市的数据引擎,以“算力青岛”为主题,探索数字时代下的无限生机与活力。数据在城市中无处不在,而算力则是城市数字化转型的强力引擎。在青岛,云计算、大数据、人工智能等前沿技术正在蓬勃发展,智能工厂、智慧社区、智能交通系统等一系列智能化项目崭露头角,城市的算力中心也如雨后春笋般涌现,引领着数字时代的新浪潮。青岛作为智慧城市的崛起者,致力于为各行各业注入智慧和动力。中国移动智算中心的投入使用为城市数字经济发展注入了强劲动力,助力数字生活迈向新篇章。青岛的算力赋能,正驱动着城市数字经济的快速发展。“算网协同”是青岛广电正在推动的新方向,将传统文化赋能数字化,构建一体化算力服务体系。同时,《山东一体化算力网络建设行动方案(2022-2025)》的实施将使全省算力网络发展更加均衡合理,为数字经济增长提供可靠保障。近期,青岛发布了 2024 年“双千兆”升级行动方案,旨在进一步提升城市 5G、千兆光网的深度覆盖能力,支持城市数字化转型和高质量发展。这些举措将为青岛打造更加智慧、充满活力的未来城市铺平道路。青岛西海岸新区城市大脑。平台汇聚了 13 个委办局的数据,利用视频识别、自然语言理解、知识图谱等人工智能技术,建成覆盖 12 大领域的“1+4+N”智慧应用体系。在公共安全领域,15 秒可精准识别火情;在社区治理领域,对居民关切自动分析、分类、流转,响应时间缩短 83%。平台获评全国数字化城市管理优秀案例,入选全球智慧城市 500 强。

8.5 小结

本章分析了智慧城市系统的发展趋势和系统工程方法。以大数据、

人工智能为引领的智慧城市新发展阶段,正在成为全球城市发展的主旋律。面向新型智慧城市的规划、建设与运营,需要从城市物联、数据融合、平台支撑、智慧应用等方面入手,打造全栈全域的智慧城市解决方案。纵观全球发展态势,智慧城市已进入技术创新和融合应用的新阶段,各国城市竞相布局数字孪生、人工智能、区块链等颠覆性技术,推动城市治理和公共服务的全面升级。我国新型智慧城市建设驶入快车道,北京、上海、杭州、广州、深圳等一批超大城市走在全球前列。未来,智慧城市系统工程理论与方法的持续创新,将有力支撑城市发展理念、空间形态、治理模式的系统性重构,成为城市可持续发展的"新动力"。当然也应看到,智慧城市作为技术密集型的复杂巨系统,对现代信息技术的融合应用提出了前所未有的挑战。从顶层规划到场景落地,从关键技术到产业生态,智慧城市发展的深度和广度仍有待进一步拓展。需要坚持系统思维,发挥制度优势,打通部门壁垒,健全标准规范,加快核心技术攻关,加速构筑经得起未来考验的智慧城市"中国方案"。

第九章 智能军事系统工程

智能军事系统是以人工智能、大数据、云计算等新一代信息技术为支撑,实现指挥控制、侦察预警、武器装备、后勤保障等军事活动全流程、全要素的智能化的新型作战体系。智能军事系统通过体系各层级、各单元的广泛互联和协同,形成系统,最终实现军事行动的高效、精准、自主和智能。

9.1 智能军事系统概述

智能军事系统从构成看,主要包括感知层、网络层、平台层和应用层四个层次:感知层:包括雷达、声纳、红外、光电等各类传感器以及无人侦察装备,负责战场态势感知和数据采集。

网络层:由卫星通信、数据链、战术互联网等组成,负责各作战单元间的信息传输和共享。

平台层：基于云计算、大数据、人工智能平台,对海量军事数据进行存储、计算、挖掘,为智能决策提供支撑。

应用层：面向指挥控制、情报侦察、精确打击、综合保障等提供智能化的功能应用和解决方案。

通过上述架构,智能军事系统实现从数据到决策、从感知到执行的端到端闭环,赋予作战体系智能属性。智能化水平的提升,将显著增强军事力量的整体效能,引领未来战争形态向智能化、无人化方向演进。在世界新军事革命的大背景下,加快发展智能化作战力量,已成为我军实现跨越发展、赢得战略主动的迫切要求。

9.2 智能军事系统工程关键技术

智能军事系统工程涵盖从体系架构、关键技术、作战应用到组织实施等诸多方面,需要前沿交叉技术与军事领域应用的深度融合。其中,典型的关键技术包括:

(1) 军事大数据技术

利用大数据采集、存储、计算、分析等技术,对作战各领域海量异构数据进行汇聚融合,挖掘数据背后的关联规律,形成战场态势洞察、辅助指挥决策。主要包括军事数据共享、联合数据处理、态势智能分析等。

(2) 军事人工智能技术

综合运用机器学习、知识推理、人机混合增强等智能计算方法,实现指挥控制、战场感知、辅助决策、自主作战等军事活动的智能化,形成人机协同、体系对抗的智能作战能力。主要包括智能指挥、智能侦察、自主无人系统等。

(3) 作战体系建模仿真技术

利用仿真建模、联合仿真、虚拟样机等技术,在计算机上构建作战对象和过程的数字孪生,实现作战实验、方案论证、效能评估、训练演习等。主要包括联合仿真、分布交互仿真、智能博弈推演等。

(4) 体系结构设计与优化技术

利用体系工程、智能计算等方法,对作战体系的组成要素、功能结构进行建模分析和动态优化,使体系具备快速重构、柔性适变的特点。主要包括体系架构建模、体系效能评估、进化优化设计等。

(5) 军民融合的新型基础设施

统筹军地频谱、轨道和通信等资源,加快建设天地一体、弹性智能、高效安全的新型信息基础设施,为智能作战体系发展提供支撑。主要包括空天地海一体化网络、智能超算平台、先进电子制造等。

智能军事系统是信息技术与作战体系深度融合的产物,对现代科技的应用提出了更高要求。未来,量子信息、类脑智能、区块链等颠覆性技术突破,将进一步重塑智能作战的技术范式,催生出智能化、无人化的新型作战样式,引领未来智能化战争变革。

9.3 智能军事系统发展现状

智能化正成为各国军事变革的核心驱动力。美国、以色列、俄罗斯等军事强国高度重视智能技术在军事领域的创新应用,将其作为抢占未来战争制高点的战略选择,纷纷制定智能化军事发展规划,加紧布局战略性前沿技术,抢占智能化战争的主导权。

美国在智能军事系统领域处于全球领先地位。早在 2014 年,美军就启动"第三次抵消"战略,目标建立以人工智能为核心的全域作战体系。近年来,美军深入实施国防创新倡议,加速自主无人系统、人机混合智能、军事物联网、量子感知等颠覆性技术在作战各领域渗透。如在无人作战方面,研制了具备群集智能的无人集群作战系统,实现无人机、无人车、无人艇的自主协同;在智能指挥方面,研制了多域作战管理系统(CJADC2),可实现跨域感知、指挥、打击的一体化智能调度;在智能训练方面,建立了全球分布的合成训练环境,可支持上千人在虚拟战场同步演练。

俄罗斯高度重视以人工智能为代表的尖端技术军事应用。2017 年,

普京提出要实现军队人工智能化,高度智能化武器装备的装备率要达到 30%。目前,俄军正在大力推进"综合作战自动化指挥系统"建设,该系统可对战区、战役、战术三级作战行动进行统一指挥控制和实时决策。在各类智能化武器方面,如超视距自主攻击无人机"猎人"、自主潜航无人潜艇"波塞冬"陆续列装,有效增强了对手的不对称威慑。

以色列是又一个智能军事的积极推动者。以色列军方实行"智能国防"战略,以人工智能赋能军事变革。其中最引人瞩目的是以色列国防军的"数字地面军"项目(Digital Land Army)。该项目利用大数据、人工智能等先进技术,对战场要素进行数字孪生,并基于此开展态势分析、辅助决策、精确打击、自主无人作战等功能应用,使地面部队作战效能大为提升。以色列还积极布局"铁穹"反导系统的智能化升级,利用人工智能算法缩短反应时间,对高速飞行目标的拦截率高达 90%。

我国高度重视智能化作战力量建设。党的十九大报告提出,加快军事智能化发展,提高基于网络信息体系的联合作战能力、全域作战能力。近年来,我军大力实施科技兴军战略,推动人工智能、云计算、大数据等前沿技术与作战力量建设深度融合,全面提高智能化作战水平。无人作战领域取得突破,察打一体无人机、智能小型无人潜艇、集群无人艇等实现成建制应用;在指挥信息领域,基于云架构的联合作战指挥平台建成应用,实现了体系各层级、各要素的横向联通、纵向贯通;在保障训练领域,智能物流配送、自主维修等广泛应用,综合保障效率大幅提高;智能化演训、测评手段加速发展,训练模式向虚实结合、智能对抗方向演进。

总的来看,智能化正引领世界新军事变革向纵深迈进。作为我军现代化建设的战略机遇期,必须加快推进军事智能化发展,统筹谋划智能化军事变革,在前沿理念、体系设计、关键技术等方面超前布局,加速形成引领未来战争制胜的新优势。可以预见,随着智能军事系统工程理论与实践的不断发展创新,必将推动战争形态加速向信息主导、

体系对抗、智能主战的方向演进,谱写智能化战争的崭新篇章。

9.4 典型智能军事系统

(1) 美军第五代作战管理系统(5COMM)

第五代作战管理系统是美空军旗下的下一代智能指挥系统,旨在实现跨域、跨军种的实时态势感知和智能化指挥控制。系统通过高通量卫星通信和自组网技术,可对分布在全球的侦察卫星、预警雷达、电子侦察等传感器进行互联互通,实现战场态势的实时共享。利用人工智能、大数据分析等技术,系统可动态生成威胁评估、资源调度、打击方案,极大提高指挥决策的时效性和智能化水平。5COMM 系统已开始试用,计划 2035 年形成作战能力。

(2) 俄罗斯核潜艇自主作战系统

俄海军"北风之神"级战略核潜艇装备了最新型自主作战系统。该系统采用人工智能、大数据挖掘等前沿信息技术,可对海量水声数据进行智能分析,对目标进行自动识别、跟踪和威胁评估,形成态势感知图景。基于态势分析结果,系统可自主规划最佳航路、速度,并自主决策反潜、反舰、战略打击等作战行动,使潜艇具备独立执行战略威慑任务的能力。与传统有人潜艇相比,自主作战系统可使潜艇在水下持续不间断执行任务,在隐蔽性和生存能力方面占据明显优势。"北风之神"级核潜艇服役后,将显著增强俄海军的远程打击和海上威慑能力。

(3) 以色列铁穹反导系统

铁穹系统是以色列研制的新一代反导拦截系统,主要应对短程火箭弹等不对称威胁。系统由多功能雷达、指挥控制中心和拦截导弹组成,利用人工智能算法实现对来袭目标的实时识别、威胁评估和拦截引导,大大缩短了反应时间。据称,铁穹系统对短程火箭弹的拦截率高达 90%。2021 年 5 月,以巴冲突期间,铁穹系统仅用 10 天就拦截 1500 多枚火箭弹,充分展现了其卓越性能。作为以军多层反导的重要组成,铁穹系统极大提升了以色列应对不对称威胁的能力。

(4) 我军多域融合训练系统

多域融合训练是我军创新发展的战训耦合新模式。基于云计算、人工智能、VR等新技术,对陆海空天电网各作战单元进行数字孪生和虚拟化重构,在统一的虚拟空间开展跨域立体作战训练。利用智能博弈算法设计对抗想定,结合人工智能操控的智能对抗部队,可实现高度拟真的体系对抗。同时,利用大数据分析、机器学习等手段,可实时评估部队训练水平,形成针对性训练改进方案。该系统已在战区层面开展试点应用。未来,随着系统的进一步完善,将极大提升军事训练的针对性、对抗性和智能化水平,有力推动我军战斗力生成模式的转变。

9.5 小结

本章分析了智能军事系统的内涵特征和系统框架。智能化作战是以人工智能为主导的智能技术与作战体系深度融合的产物,代表了世界新军事变革的发展方向。加快推进智能军事系统建设,需从顶层规划设计到关键技术攻关、从体系架构完善到组织编制优化,全面系统地谋划推进。

从发展趋势看,智能化作战正加速向纵深推进,无人化、模块化、自主化、体系化成为新的发展亮点。跨域多维感知、人机混合智能、自主协同控制等前沿技术不断突破,为智能化作战提供源源不断的新动能。未来,随着智能技术特别是通用人工智能的快速发展,以及军事创新的系统布局,智能化作战必将呈现出万物互联、体系互补、人机共融、自主进化的新特点,有力支撑国防和军队现代化迈上新台阶。

当然,智能作战作为重大的军事变革,仍存在观念更新滞后、技术基础薄弱、体系统筹不够等问题。亟需转变思维理念,加强军民融合,注重体系谋划,加快人才集聚,推动智能军事发展由局部应用向体系突破、由初级智能向高级智能跃升,加速构筑智能化作战的制胜优势。相信在全军官兵的共同努力下,智能化将成为我军加快机械化信息化智能化融合发展的强大引擎,必将开启国防和军队现代化建设的崭新篇

章。

第十章 智能教育系统工程

智能教育是人工智能、大数据、云计算等现代信息技术与教育的深度融合,通过学习全过程、教育全要素的数字化、网络化、智能化,构建高度个性化、精准化、自适应的新型教育形态。智能教育系统利用智能技术赋能教、学、评、管各环节,实现因材施教、因需学习,最终达到提高教育质量、促进教育公平的目标。

10.1 智能教育系统概述

智能教育系统从构成看,主要包括环境层、平台层、资源层、应用层和服务层五个层次:

环境层:由智慧教室、智慧校园等数字化教学环境组成,通过物联网技术实现教学过程透明化和数据化采集。

平台层:基于云计算、大数据搭建教育大脑和数据共享交换平台,支撑上层智慧应用。

资源层:整合优质教学资源,建设国家级智慧教育资源公共服务体系,促进优质资源共建共享。

应用层:面向教学、管理、评价等提供智能化的教育应用,实现个性化学习和精准化教学。

服务层:面向政府、学校、教师、学生、家长等提供全方位智慧教育服务,构建开放、协同、共生的智慧教育生态。

智能教育是教育领域的一场深刻变革,通过重塑人才培养模式、学习组织形式、教育治理方式,有望实现从"以教为主"到"以学为主"、从"以分数为导向"到"以能力为导向"、从"刚性化供给"到"精准化服务"的系统性转变。在新一轮科技革命和产业变革的大背景下,顺应智能时代教育发展新需求,加快发展面向人人、众创、终身的智能教育新业态,对于提升国民素质、厚植人力资本、赢得国际竞争主动具有重要意义。

义。

10.2 智能教育系统工程关键技术

智能教育系统工程涵盖智能环境建设、平台工具开发、资源内容生成、应用模式创新等诸多方面,需要前沿交叉技术与教育领域深度融合。其中,典型的关键技术包括:

(1) 智慧学习环境建设技术

运用物联网、人工智能、VR/AR 等技术,通过智能感知、情境感知、沉浸交互,构建智能教室、智慧校园、虚拟仿真实训等数字化学习环境,支持多元、开放、持续的智慧学习新生态。主要包括教室物联、校园物联、虚拟仿真等技术。

(2) 智能教育平台工具技术

基于大数据、人工智能等新一代信息技术,开发智能学习平台、智慧教学平台、智能管理平台,形成支撑智慧教育创新发展的新型基础设施。主要包括智能学习引擎、智慧教学系统、全生命周期数据管理等。

(3) 智能学习资源内容技术

利用大数据分析、知识图谱、内容生成等人工智能技术,汇聚优质学习资源,建设国家级智慧教育资源公共服务体系,促进优质资源共建共享。主要包括知识图谱构建、学习资源智能生成、资源推荐技术等。

(4) 自适应学习模型技术

运用机器学习、深度学习、迁移学习等智能计算方法,通过学情诊断、学习路径优化,构建因材施教的个性化自适应学习模型。主要包括学情智能诊断、个性化学习资源推荐、学习效果评估等。

(5) 群体协作学习支持技术

基于群体智能、协同学习等理论,利用社交网络分析、协同过滤推荐等技术,支持小组协作、师生互动、跨校协同等群体化学习,促进学习者间智慧创生。主要包括协作学习平台、探究式学习支持、群体智

慧涌现等。

智能教育代表了未来教育的发展方向,但同时对现代信息技术与教育理论的融合提出了更高要求。未来,类脑智能芯片、沉浸式交互、区块链等颠覆性技术进一步突破,将激发智慧学习的无限可能,人才培养模式将发生革命性变革。

10.3 智能教育系统发展现状

智能教育是全球教育变革的大势所趋。以美国、英国为代表的发达国家高度重视智能教育发展,将其作为抢占未来人才竞争制高点的国家战略,纷纷制定教育信息化、智慧教育行动计划,加大在教育大数据、智能学习工具等方面的投入布局,引领全球智慧教育发展潮流。

美国是全球智能教育的领跑者。2010 年,美国启动国家教育技术计划(National Education Technology Plan),明确提出利用大数据、人工智能促进教育变革。近年来,美国加快推进教育大数据基础设施、开放教育资源、智慧学习系统等建设,涌现出一批代表性智慧教育平台和解决方案。如 Knewton 公司开发的自适应学习平台,通过机器学习和认知诊断模型,为每个学生设计最优学习路径,使学生学习效率提升 47%。再如 Coursera、edX、Udacity 等慕课平台,通过大规模开放在线课程,已成为全球知名高校布局智慧教育的重要阵地。

新加坡是亚洲智慧教育的典型代表。2015 年,新加坡启动"智慧国家 2025"总体规划,将教育列为六大智慧领域之一。新加坡教育部发布智慧国民计划(Smart Nation)、未来学校计划(FutureSchools@Singapore)等,明确提出发展个性化自适应学习,推动从以教为中心向以学为中心转变。新加坡中小学广泛应用自适应数学学习系统,可根据每个学生的认知水平生成个性化学习内容。南洋理工大学成立了国家教育科技学院,与 IBM、惠普等合作建设智慧校园,通过沉浸式虚拟教室、智能学习助手等创新应用,极大提升了教学效果。

英国政府高度重视人工智能在教育领域的应用。2017 年,英国发

布国家人工智能战略,将教育列为重点领域。英国教育部还专门发布《利用教育技术实现更智能的教学和学习》白皮书,系统阐述教育领域人工智能应用的发展路径。英国高校积极开展智慧教育探索实践,如伦敦大学学院(UCL)的 EDUCATE 项目,为教育机构和企业搭建智慧教育创新研发平台,加速人工智能教育应用转化;牛津大学建立了全球首个人工智能+教育研究中心,深入开展自适应学习、智能教育评价、人机协同教学等前沿交叉研究。

我国高度重视智慧教育创新发展。近年来,教育部等相继出台教育信息化、“互联网+教育”行动计划,推动“三通两平台”建设,加快发展智慧教育。各地教育主管部门结合区域特点,制定智慧教育建设规划,北京、上海、广东、浙江等建成国家级智慧教育示范区。在政策引导下,清华大学、北京师范大学等高校加大智慧教育战略布局,涌现出一批有影响力的系统解决方案。

北京师范大学基于大数据、人工智能构建的“智慧学伴”平台,通过多模态学情感知、认知计算建模,实现了学生的情感关怀和个性化学习辅导,目前已在全国 30 个省份的中小学推广应用。此外,北师大还与科大讯飞联合成立人工智能学院,深化语音识别、自然语言理解等人工智能技术在教育领域的应用。华中师范大学开发的国家智慧教育平台,汇聚智慧学习工具、名师名课、智慧教研等优质资源,面向全国中小学提供在线学习、在线教研、资源共享服务,有效缓解了优质教育资源不平衡的问题。目前该平台注册用户超过 6000 万,已成为全国中小学教师学习培训和区域教学的重要载体。

清华大学发布智慧教育 2035 行动计划,提出建设“智能+教育”创新示范区,面向未来塑造智慧教育中国方案。清华大学教育研究院开发的自适应学习平台“学习磨课”(Learning Mill),利用知识图谱、认知诊断等模型,为中小学生提供个性化数学学习服务,广泛应用于全国各地。

总体看,智能教育无疑代表了未来教育的发展方向,各国纷纷加大战略谋划和资源投入。从国内看,在政策引导和产学研合作下,涌现出一批示范性智慧教育项目,积累了丰富的实践经验。但同时也要看到,当前智能教育还处于起步探索阶段,在基础理论、关键技术、应用生态等方面仍不成熟,亟待加大基础性、战略性研究,加快核心技术原始创新,完善多方协同的创新机制。可以预见,随着智能教育系统工程理论和方法的不断突破创新,未来教育模式将发生革命性变革,个性化、智能化、终身化、泛在化学习将成为常态,一个崭新的教育生态正在加速形成。

10.4 典型智能教育系统

(1) Squirrel AI 自适应学习智能系统

Squirrel AI 是全球知名的 K12 智能自适应学习平台,致力于为每个学生提供定制化学习解决方案。系统通过知识图谱、认知诊断、强化学习等前沿人工智能技术,对学生学情进行精准诊断,并动态生成个性化学习路径。系统已积累上亿条学生学习数据,可实现对学生知识掌握情况的精准预测。2018 年,Squirrel AI 在全球医学会考 MCAT 的模拟试题测试中,取得了全球第一的成绩,充分证明了其智能化水平。目前,Squirrel AI 已为全球 47 个国家的 100 多万学生提供个性化辅导服务(详见第十九章)。

(2) Knewton 高等教育智能自适应学习系统

Knewton 公司开发的 Alta 智慧教育平台,面向高等教育提供自适应学习解决方案。通过机器学习、知识图谱等算法,Alta 可精准分析每个学生的知识结构,并匹配个性化的学习内容、学习节奏。与传统教学相比,学生的平均学习效率提升了 47%,通过率提升 25%。Alta 平台支持与主流高校在线课程系统无缝对接,目前全球 1000 多所高校的 300 多万学生正在使用 Alta 进行自适应学习。作为全球智慧教育的标杆,Alta 平台充分展现了智能技术重塑高等教育人才培养的巨大潜力

(详见第十九章)。

(3) 英国 Century 智能教学系统

Century 是英国开发的新一代人工智能教学系统,面向中小学提供在线智能教学和自适应学习服务。基于认知科学和人工智能,Century 可对每个学生建立"学习人格"画像,并智能推荐个性化学习内容。对于教师,Century 可提供课堂管理、作业批改、教学诊断等智能辅助服务,使得因材施教成为可能。Century 采用了自然语言处理算法,学生可与系统进行自由对话交流。Century 在英国已有 1400 多所中小学使用,覆盖 45 万名师生。疫情期间,Century 为英国中小学生提供在线教学服务,有力保障了"停课不停学"。

(4) 清华大学智慧学伴项目

智慧学伴是清华大学自主研发的智能教育助理系统。基于大数据、认知计算、情感交互等人工智能技术,智慧学伴可广泛应用于教学诊断、作业批改、答疑辅导等教学环节,为教师和学生提供有针对性的辅助服务。在作业批改环节,智慧学伴可自动评阅开放性作业,批改准确率达 97%,并可根据学生表现及时反馈教学建议。在学习辅导环节,智慧学伴可通过深度学习模型分析学生认知状态,并恰如其分地给予鼓励和提醒,实现情感上的关怀。智慧学伴于 2018 年在清华大学计算机系开始试用,有效提高了教学效率和学习体验。目前,智慧学伴已推广至清华大学近 30 个院系和研究所,辅助教师开展混合式教学。未来,智慧学伴有望进一步拓展至中小学教育,为更多学校的智慧教学提供有力支撑。

10.5 小结

本章分析了智能教育系统的内涵特征和系统框架。智能教育是人工智能、大数据、认知科学与教育深度融合的结果,代表了第四次工业革命背景下教育的发展方向。推进智能教育系统设计、建设与应用,需要从顶层框架设计到关键支撑技术、从技术工具开发到教育应用模式

创新,全面系统地谋划推进。

从发展趋势看,智能教育正加速向纵深演进,个性化、沉浸化、终身化、泛在化成为新的发展亮点。人工智能、虚拟现实、脑机接口等前沿技术不断突破,有望深刻重塑未来人才培养模式。同时,智能教育技术与教育理论的交叉融合不断深入,智能教育生态体系加速构建,为推动教育现代化和学习型社会建设提供强大科技支撑。

当然,智慧教育作为一项复杂的系统工程,仍面临技术与教育深度融合不够、缺乏领军型企业、开放共享机制不健全等诸多挑战。必须加强顶层设计,加大资源整合,突破关键核心技术,优化产业布局,构建开放共享、协同创新的智慧教育发展生态。相信通过社会各界的共同努力,未来教育将实现从工业时代向智能时代的质的飞跃,教育现代化将迎来崭新的发展图景。

第十一章 智慧医疗系统工程

智慧医疗是以新一代信息技术为支撑,通过医疗健康数据的汇聚共享和深度应用,建立覆盖诊前、诊中、诊后全流程的新型医疗服务与管理模式。智慧医疗系统利用物联网、大数据、人工智能、5G 等技术手段,推动医疗服务、医学研究、公共卫生、医疗保险等环节的智能化,最终实现以健康为中心的整合型智慧健康服务体系。

11.1 智慧医疗系统概述

智慧医疗系统从构成看,主要包括四大核心板块:

感知层:通过智能可穿戴设备、家庭健康监测仪器、无线医疗传感网等,实现个人健康数据的连续采集。

数据层:依托医疗健康大数据平台,整合医疗机构、医保、科研等各渠道数据,建立全民健康信息数据库。

智能层:运用人工智能、深度学习等技术,开发智能诊断、智能临床决策支持、智能影像等智慧应用。

服务层:基于智能应用为大众提供健康管理、疾病预警、慢病管理等个性化智慧健康服务。

智慧医疗通过打通院前院后、医疗健康一体的服务闭环,推动医疗卫生服务模式从"以疾病为中心"向"以健康为中心"、从"以治病为主"向"治病与养生并重"转变,有望从源头上提升民众健康水平。在健康中国战略和数字中国建设的大背景下,顺应个性化、精准化、便捷化医疗服务需求,加快发展以大数据、人工智能为引领的新一代智慧医疗系统,对于推进健康中国建设、提高人民健康福祉具有重要意义。

11.2 智慧医疗系统工程关键技术

智慧医疗系统工程涉及医学、信息学、工程科学等多学科领域,对信息技术与医疗行业应用的深度融合提出了更高要求。从医疗健康数据汇聚到智慧应用开发、从医学知识沉淀到新型服务供给,需要新一代信息技术与医学交叉创新。其中,典型的关键共性技术包括:

(1) 医疗物联网技术

基于 NB-IoT、5G、LoRa 等信息通信技术,利用智能可穿戴、家庭自检仪器、院内监护仪等医疗物联网感知设备,对个人生理健康信号、院内诊疗过程数据进行连续采集,形成医疗全场景动态数据汇聚能力。主要包括健康智能终端、穿戴式医疗监测、院内物联网等。

(2) 医疗大数据技术

基于云计算、分布式存储等大数据架构,完成对病历信息、临床医疗、医学影像、基因组学等多源异构数据的标准化采集、存储、管理与共享,建立覆盖全生命周期的医疗健康大数据中心。主要包括医疗数据集成共享、分布式存储、并行计算、大数据治理等。

(3) 医学人工智能技术

综合运用机器学习、深度学习、知识图谱、自然语言处理等人工智能方法,实现从医学数据中自动提取隐含的医学规律和诊疗知识,开发智能诊断、智能影像、智能临床辅助决策等系统,提升医疗服务的智

能化水平。主要包括医学知识图谱、医学影像智能分析、智能诊疗决策支持等。

(4) 智慧医疗信息安全技术

针对医疗健康数据具有隐私性强、关联性高的特点,从数据采集、传输、存储、共享、销毁等全生命周期入手,构建多层次纵深防御体系,研究医疗大数据脱敏、同态加密、细粒度访问控制、区块链溯源等安全防护技术,有效保障医疗数据的隐私与安全。

(5) 医疗健康智能可视化技术

通过构建医疗健康知识图谱,开发疾病全景图、用药地图等医疗知识可视化工具,直观呈现病患全周期的诊疗轨迹;利用 VR/AR 等交互技术,开展术前规划、手术导航等人机协同应用,助力提升诊疗效果;研发个人健康态势可视化系统,支持全民健康自我管理。主要包括医学知识图谱、医疗 VR/AR、个人健康可视化管理等。

(6) 医疗远程智能交互技术

远程医疗是利用信息和通信技术 (ICT) 在不同地点之间进行医疗信息的传输和医疗服务的提供。医疗远程智能交互技术综合利用医疗物联网、大数据、人工智能、信息安全、可视化、手术导航、手术机器人等技术, 通过跨地域的患者病历数据, 远程智能交互系统可以辅助临床进行数据分析, 并通过远程医疗平台提供诊断和治疗建议。依托 5G 及新一代通信技术, 远程手术机器人可以为医生提供远距离手术支持。结合人工智能技术, 可以实现术野智能化分析和手术操作自动化引导, 提升手术的安全性和准确性。

上述关键技术已成为构建新一代智慧医疗系统不可或缺的支撑, 将驱动医疗服务模式的变革性重构。但同时, 智慧医疗涉及人的生命健康, 对技术的安全性、可靠性、伦理性也提出了更高要求。未来, 随着 AI 芯片、区块链、第三代基因测序等技术的进一步突破, 结合 5G、AI 等新型基础设施的加快布局, 智慧医疗有望加速走向规模化应用,

为全人群、全周期健康管理提供精准化、个性化、连续化的整体解决方案。

11.3 智慧医疗系统发展现状

智慧医疗正成为推动全球医疗健康服务变革的新动能。美国、英国等发达国家纷纷将智慧医疗上升为国家战略,通过制定顶层规划,加大资金投入和政策扶持,大力推动人工智能、大数据等新兴技术在医疗服务、医学研究、公共卫生等领域的创新应用,加速医疗卫生体系的数字化、智能化转型升级。

美国在智慧医疗领域处于全球领先地位。早在 2004 年,美国就启动了国家医疗信息化战略规划,大力推动电子病历、医疗影像存储与传输等信息化基础设施建设。2016 年,美国国家卫生研究院发布"精准医学计划",旨在利用大数据、人工智能等先进技术实现疾病的精准预防、诊断和治疗。在政策推动下,IBM 沃森、谷歌 DeepMind 等巨头纷纷布局人工智能医疗。如 IBM 沃森与纪念斯隆-凯特琳癌症中心合作开发的 AI 辅助肿瘤诊疗系统,可为癌症患者提供个性化诊疗方案,与医生诊断准确率相当,但诊断速度缩短 2 分钟。再如谷歌 DeepMind 开发的人工智能系统,在皮肤癌早期筛查的准确率已超过皮肤科医生。

日本将智慧医疗作为超智慧社会(社会 5.0)的重要内容,在人工智能辅助诊断、可穿戴设备监测等方面处于全球领先水平。日本较早开展了全国医疗信息化规划,是最早实现电子病历全覆盖的国家。近年来,日本将医疗列为人机智能发展的四大重点领域之一。日本多家公立医院与富士通、NEC 等开展人工智能辅助诊断合作,AI 诊断结直肠癌的准确率达到了 90%。日本厚生劳动省还宣布成立医疗人工智能开发指导委员会,将陆续发布医疗人工智能开发、应用、法规、商业化等细则,积极扶持智慧医疗产业发展。

英国国家医疗服务体系(NHS)是全球最大的单一医疗服务机构,其数字化转型进程对全球有示范意义。2017 年,英国 NHS 发布"未来

医疗愿景",确定了创建数字化 NHS、利用创新改善健康和护理、建立医疗大数据和人工智能生态系统等战略目标。英国政府还成立了专门的 NHS 数字化转型机构(NHSX),负责推动人工智能、大数据在医疗系统的规模应用。目前,谷歌 DeepMind 正与 NHS 合作开展急性肾损伤、眼疾智能诊断等试点项目,AI 辅助诊断的准确率达到 94%。微软、亚马逊等科技巨头也纷纷与 NHS 达成战略合作,推进智慧医疗系统与服务模式创新。

我国高度重视新一代智慧医疗系统建设。"健康中国 2030"、新一代人工智能发展等国家战略明确支持发展智慧医疗。2018 年,国家卫健委联合 14 部门印发《关于促进"互联网+医疗健康"发展的意见》,系统部署智慧医疗发展举措。各地纷纷制定了区域性智慧医疗规划,北京、上海、广东等地在人工智能辅助诊断、互联网医院等方面开展了积极探索。在政策引导下,百度、阿里、腾讯、华为等科技巨头加速布局,推动人工智能、5G 等新兴技术在医疗服务、医学研究、公共卫生等领域广泛应用,涌现出一批创新示范项目。

阿里健康自主研发的阿里健康 ET 医疗大脑,已在 6 大类 40 余种常见病 intelligent 诊断中取得突破,准确率达到 95%以上,诊断用时比医生缩短 60%。EWELL 目前已在四川、浙江等 20 个省市的三甲医院落地应用。

腾讯觅影推出的 AI 辅助诊断系统,基于深度学习技术,对食管癌、肺结节等疾病的影像诊断准确率达到 95%以上,可大幅提升基层医院的诊断水平。目前腾讯觅影已与全国 700 多家医疗机构建立合作,服务患者超过 1000 万人次。

百度与中日友好医院开展基于人工智能的智慧医疗试点,通过 DuerOS 对话式人工智能平台,实现了智能导诊、智能随访等创新应用。围绕中风、糖尿病等重大慢病,百度与 130 多家医疗机构开展疾病风险预测、智能管理与随访等人工智能合作。

平安好医生打造了集预诊、诊中、诊后于一体的"AI+医疗"服务闭环。通过大数据和人工智能技术,平安好医生可实现疾病智能诊断、用药智能推荐、健康智能管理等功能,相较人工诊疗可将费用降低30%。截至2021年底,平安好医生注册用户已达4.2亿,合作医疗机构超过3500家。

除辅助诊断以外,人工智能在辅助治疗决策领域也有了巨大的发展。例如北京海杰亚医疗公司推出的 HyVision 肿瘤消融辅助决策系统,使用人工智能技术实现了肿瘤病灶自动识别、穿刺路径自动规划及导航、消融区域可视化、消融效果评估等功能,截止到2024年6月,海杰亚消融系列产品已在全球200多家医院开展应用,服务患者数万人。

智慧医疗在远程外科手术中的应用也正逐步从实验室研究走向临床应用。许多大型医疗机构和专业医院已经开始使用远程手术机器人进行实际手术操作,并取得了良好的效果。如中国人民解放军总医院第三医学中心泌尿外科团队于2024年6月完成全球首次跨洲际超远程人体手术直播。此次手术从罗马到北京,跨越直线距离近8100公里,双向通讯距离超过2万公里,标志着国产手术机器人和远程通讯技术为基础的中国远程外科技术已取得重大突破。

未来,随着医疗健康大数据体系的逐步完善,以及人工智能、区块链等新兴技术的持续突破,智慧医疗将从"智能+"单点应用加速向全流程、全场景、全周期升级,为患者提供端到端的智慧医疗健康服务。但同时也应看到,当前智慧医疗总体处于起步阶段,在数据标准、隐私安全、质量监管等方面仍不成熟,距离真正大规模应用还有不小差距。此外,智慧医疗在远程手术的广泛推广仍面临一系列技术和管理方面的挑战,如数据安全、法律法规和操作规范等。对此,亟需深化医工融合,加强原始创新,突破核心算法,完善质量监管,推动智慧医疗系统从感知到认知、从认知到决策、从院内到院外的系统化演进,携手共建共享

互信的智慧医疗生态体系,为健康中国建设提供强大科技支撑。

11.4 典型智慧医疗系统

(1) IBM 沃森 AI 辅助肿瘤诊疗系统

IBM 沃森 AI 辅助肿瘤诊疗系统目前处于全球领先地位。沃森通过自然语言处理、机器学习等技术,从海量医学文献、临床指南、病例数据中学习专家诊疗经验,可协助医生制定个性化诊疗决策。沃森基于患者病历、影像、基因等数据,在数秒内给出分级的治疗方案,与医生诊断的一致性高达 96%。目前沃森已在中国、美国、印度、泰国等多个国家的几百家医院落地应用,辅助诊疗 5 万余例癌症患者,极大提升了诊疗效率。IBM 正进一步扩展沃森的应用领域,预计未来 80% 的医学影像数据、50% 的护理数据将由沃森等认知智能系统分析处理(详见第二十章)。

(2) 谷歌 DeepMind 智能眼疾诊断系统

谷歌 DeepMind 开发的智能眼疾诊断系统,可通过分析视网膜扫描图像,对葡萄膜炎、黄斑变性等 50 多种眼部疾病进行早期筛查。该系统基于深度学习技术对眼部 OCT 图像进行特征提取,准确率达 94%,超过了人类眼科医生。DeepMind 团队还开源了该眼疾诊断算法,以加速推动其临床应用。目前,DeepMind 智能眼疾诊断已在英国 Moorfields 眼科医院开展临床试验,为每年超过 30 万患者提供辅助诊断服务(详见第二十章)。未来 DeepMind 智能诊断平台有望扩展到皮肤癌、心脏病等更多疾病领域,成为基层医疗机构的得力助手。

(3) 腾讯觅影 AI 辅助诊断系统

腾讯觅影 AI 辅助诊断系统是国内领先的医学影像 AI 开放平台。觅影汇聚了国内外众多算法团队,围绕肺部、骨科、神经、心血管、眼科等领域,开发出 100 多个 AI 辅助诊断和研究工具。例如,肺结节智能诊断模型可对低剂量肺部 CT 影像进行实时分析,5 秒内标记出可疑肺结节,结节检出率达 96% 以上。目前,觅影开放平台已与 700 多家医院

建立合作,每天分析的医学影像达 3 万余例,有效缓解了基层影像科医生数量短缺、诊断水平不均衡等问题。未来,腾讯觅影将进一步开放创新,深化与医疗机构、科研院所、创业公司的合作,打造医学影像领域的行业智能引擎(详见第二十章)。

(4) 阿里健康 ET 医疗大脑

阿里健康自主研发的 ET 医疗大脑,是集医学知识库、医疗 AI 工具、数据中台于一体的智慧医疗操作系统。ET 大脑拥有上百个医学 AI 模型,可广泛应用于疾病预测、智能诊断、智慧药房、智能保险等医疗健康服务各环节。在辅助诊断方面,ET 大脑可识别 X 光、CT、核磁等多种医学影像,对肺癌、食管癌、乳腺癌等疾病诊断准确率超过 95%;在用药环节,ET 大脑通过智能处方审核,5 秒内即可发现处方中的重复用药、药物禁忌等问题,有效保障患者用药安全。ET 大脑目前已在 200 多家三甲医院部署应用,日均服务量超过 100 万人次。未来,阿里健康还将联合更多生态伙伴,在医保控费、分级诊疗等领域深入开展创新应用,打造全流程智慧医疗闭环(详见第二十章)。

(5) 海杰亚 HyVision 肿瘤消融辅助决策系统

海杰亚医疗是国内领先的肿瘤微创治疗平台型企业,其自主研发的 HyVision 系统解决了肿瘤精准适形治疗难题。HyVision 系统集成了多个 AI 驱动的核心模块,包括肿瘤自动检出、组织器官自动勾画重建、进针方案自动规划、消融效果精准评估等。系统面对复杂多变的肿瘤,可根据肿瘤形态和周围解剖结构在 10 秒内提供最优进针路径和多种个性化消融方案。不仅缩短了手术规划时间,还极大的提高了手术消融精度,同时显著降低了对周围健康组织的损伤风险。目前,HyVision 系统已在多家三甲医院的肿瘤介入科室应用,为数百名患者提供精准、高效、低创伤的肿瘤治疗方案。未来,海杰亚医疗计划将 HyVision 系统与导航和手术机器人技术相结合,进一步提高消融手术的自动化、智能化和远程化水平,与更多的医疗机构合作,推动国内

肿瘤微创治疗技术的普及（详见第二十章）。

（6）东方棱镜中医人工智能辅助诊疗决策系统

北京东方棱镜科技有限公司（简称“东方棱镜”）核心研发团队联合中国中医科学院、清华大学深耕研究近 8 年，共同研发了“中医人工智能辅助诊疗决策”信息化系统及智慧中医辅助诊断设备，该成果以中医大数据和 AI 技术为核心，可涵盖中医多诊合参的标准化信息采集、定量化数据分析、中医智能辨证开方、慢病防治、远程会诊、临床辅助决策、智慧共享中药房等一体化解决方案，可为广大基层中医师或临床经验尚浅的中医师们提供了一个堪比“老中医”的强大助手，让新时代中医大夫们站在“巨人”的肩膀上进行有效决策，大力发扬中医的特色优势，为国人的健康保驾护航，并实现中医药资源的最优化配置（详见第二十章）。

11.5 小结

本章分析了智慧医疗系统的发展图景与系统框架。智慧医疗通过将新一代信息技术深度融合于医疗服务、医学研究、公共卫生等环节，正推动传统医疗服务模式走向信息化、数字化、智能化，代表了新时期医疗服务与健康管理的发展方向。但同时也应看到，智慧医疗作为一项复杂庞大的系统工程，技术创新、标准制定、监管政策等尚不成熟，要真正实现规模化应用、惠及广大民众，还任重道远。

从发展趋势看，智慧医疗正从数字化、信息化向智能化全面演进。大数据、人工智能、5G 等新兴技术加速与医疗行业深度融合，有望在疾病预测预警、智能辅助诊疗、智慧慢病管理、智慧公共卫生等领域取得更大突破，推动“智慧医院”向“智慧健康”延伸升级。同时，智慧医疗产业生态将日臻完善，医疗机构、科技企业、政府监管等多方通力合作，建立数据共享、质量控制、商业运营良性循环新机制，为智慧医疗持续健康发展注入澎湃动力。

当然，智慧医疗的广泛应用也面临信息孤岛、数据安全、监管政策

等诸多挑战。要充分发挥政府引导作用,完善顶层设计,健全法律法规,加强行业监管,保护患者隐私,营造良好的发展环境。还要强化创新发展,聚焦核心技术,从医疗健康大数据采集、存储到开发利用,全流程构建智慧医疗创新链。更要遵循医疗服务规律,尊重患者意愿,确保智慧医疗应用安全、有序、规范。只有多措并举、标本兼治,智慧医疗才能行稳致远,最终实现增进人民健康福祉的根本目的。

第十二章 智能航天系统工程

航天系统是国家安全和经济社会发展的战略性基础设施,涉及运载火箭、航天器等要素,是典型的复杂系统工程。近年来,以人工智能为代表的新一代信息技术与航天系统深度融合,正在催生新一轮航天技术革命。将人工智能技术与系统工程理论方法相结合,构建智能航天系统,已成为航天强国建设的战略选择。

12.1 智能航天系统概述

智能航天系统是以新一代人工智能技术为支撑,实现航天运载、通信、导航、遥感、探测、防卫等环节的自主感知、智能决策及自适应控制,形成安全可靠、智能高效的新型航天系统。智能航天系统通过体系各层级、各单元的广泛互联和智能协同,最终实现航天任务的自主规划、自适应控制和智能管理。

从系统架构看,智能航天系统主要包括感知层、网络层、平台层、应用层四个层次:

- (1)感知层包括火箭发动机智能传感器、航天器智能光学/微波成像载荷等,负责航天系统全过程、多参数的状态感知。
- (2)网络层包括天基信息网络(如星链星座)、天地一体化网络(如深空探测网络)等,负责各航天单元间的互联互通和信息共享。
- (3)平台层基于云计算、大数据等,构建运载火箭、单星/星群/巨星座等智能仿真平台、智能决策平台等,为智能化应用提供支撑。

(4) 应用层面向运载火箭、航天器等提供智能健康管理、智能任务规划、星座自主管理及弹性重构等功能应用。

通过上述层次化架构,智能航天系统可实现运载火箭、航天器从设计、生产、测试、发射到在轨运行的全生命周期智能管控,显著提升航天系统的安全性、可靠性和任务效能。在智能化设计与虚拟试验方面,基于模型的系统工程(MBSE)与大模型^[23]、数字孪生技术的融合^[24],可实现飞行器设计到仿真验证的数字化闭环与智能化优化,大幅缩短研制周期。在加工生产方面,基于深度学习和计算机视觉技术,可实现制造过程的质量监测与控制、识别次品,提高生产效率和减少成本。在可重复使用运载器方面,智能故障诊断^[25]、自主飞行控制^[26]等技术可显著提升其可靠性与经济性。在在轨服务方面,基于空间智能机器人的在轨加注、维修维护等新模式将延长卫星使用寿命,大幅提升空间资产使用效率。

从智能航天的发展意义看,智能化、自主化已成为航天系统的核心竞争力,是航天强国建设的战略突破口。通过体系化发展智能航天,可实现运载能力的跨越提升、航天器性能的倍增改进、空间信息获取的智能增效,为国家安全、经济建设、社会发展和科技进步提供强大支撑。在航天强国战略的引领下,加快智能航天系统工程创新,对于提升国家航天实力、保障国家利益具有重大意义。

12.2 智能航天系统工程关键技术

智能航天系统工程涵盖运载火箭智能、航天器智能、空间信息智能等诸多方面,需要人工智能等现代信息技术与航天系统工程深度融合。其中,典型的关键技术包括:

(1) 航天智能感知技术。利用智能传感器、智能载荷等,实现运载火箭、航天器全状态参数,以及周围环境态势的实时感知与信息融合,为智能分析决策提供数据输入。如液体火箭发动机的故障诊断、卫星智能探测等。

(2)航天智能决策技术。运用人工智能规划、大数据分析、智能博弈等,实现航天任务自主决策。如运载火箭智能发射、巨星座自主管理与重构等。

(3)航天智能控制技术。综合智能优化控制、自学习控制等,实现运载火箭、航天器的全程自适应控制,确保高精度入轨、在轨维修升级等。如运载火箭智能变轨控制、空间机器人自主作业等。

(4)空间信息智能技术。利用智能信息处理、知识自动提取等,对遥感图像、卫星导航等空间信息进行智能解译与大数据分析,提升空间信息的应用效能。如智能遥感影像解译、北斗时空智能服务等。

(5)航天智能仿真技术。综合运用物理建模、数据驱动建模等方法,构建运载火箭、航天器的高保真数字孪生体,实现全虚拟优化设计、测试验证、仿真运行、性能评估等。如基于知识的航天智能仿真、分布式联合仿真等。

从发展趋势看,随着认知智能、自主智能、群体智能等新一代人工智能技术加速突破,智能航天系统的自主化、智能化、网络化水平将不断提升,有望在航天运输系统、空间基础设施、行星探测等领域实现变革性重构。同时,天基物联网、天基互联网等新型航天信息基础设施加速构建,也将为智能航天系统发展提供更广阔的应用空间。

12.3 智能航天系统发展现状

近年来,世界主要航天大国高度重视智能技术在航天领域的创新应用,纷纷将智能航天上升为国家战略,全面布局航天智能专项计划和工程,抢占新一轮航天技术竞争制高点。

美国国家航空航天局(NASA)制定了"2018-2022 航天技术路线图",将人工智能列为四大关键技术之一。NASA 成立智能航天系统项目(Intelligent Systems Project),重点开展航天自主智能系统、空间机器人等研究。在火星 2020 项目中,NASA 首次在毅力号火星车上搭载了人工智能芯片,实现了火星车的自主导航与避障,着陆精度小于 100 米。

同时,NASA 还联合谷歌开发了利用人工智能优化空间通信网络的技术,实现了通信效率的显著提升^{[27]-[29]}。

欧洲航天局(ESA)发布"2030 航天智能化愿景",聚焦空间自主智能系统,加快推进智能深空探测、在轨智能服务、空间状态感知等应用。ESA 牵头实施 PERASPERA 项目,旨在提升空间机器人自主能力;启动 AI4EO 计划,利用人工智能提升对地观测数据的分析应用能力。此外,ESA 还与英国萨里航天中心共建了航天人工智能应用中心(ARIA),专注于推动人工智能在航天工程设计、验证、飞行控制等领域应用。

中国高度重视智能航天发展。《"十四五"国家信息化规划》明确提出,加强人工智能在航天领域应用。近年来,智能技术在运载火箭、航天器等环节加速渗透,涌现出一批创新项目和示范应用。

在运载火箭领域,中国航天科技集团提出了“智慧火箭”概念^{[29]-[35]}。智慧火箭指的是通过人工智能技术赋能,在发射和飞行过程中,具备自主感知自身状态和外部环境、自主应对和持续学习能力,并实现自主性和学习性不断提升的运载火箭。智慧火箭能够自主完成发射准备并应对不确定性,飞行过程可根据对自身及外部环境智能感知的结果,具备对环境变化及故障的自主适应和应变能力,实现更加高效和可靠地进出空间。智慧火箭的内涵包括智能发射、智能飞行与智能进化三大方面,智能化自主控制、智能化信息传输、智能化测试、可重复使用是其主要特征。为了促进“智慧火箭”相关技术的快速发展,长 3B 搭载验证了末修发动机与姿控喷管的故障辨识与制导控制重构技术,长 6 改在芯级液体发动机上特别设置了“智能”健康诊断系统,长征 7 号正在推进故障诊断、任务重规划等智慧火箭相关技术研究。长征 8 号面向可重复使用积极开展故障在线辨识、控制重构等技术攻关,以使火箭更加智慧、聪明。未来,在新一代载人登月火箭长征十号等新型运载火箭将拥有“智慧大脑”,实现面向任务全流程的智慧飞行。

在航天器领域,面向智能遥感、导航定位、通信广播等需求,我国加快布局新一代智能卫星系统。“吉林一号”商业遥感卫星采用了机器学习等算法,可实现遥感图像的智能压缩和相关目标识别,大幅提升卫星数据的使用效率^[37]。“通导一体”新一代导航卫星将通信与导航功能一体化设计,并引入自主智能导航技术,进一步提升北斗导航的服务能力^[38-39]。“千帆星座”是目前正在建设的大型互联网星座,将通过人工智能和深度学习对星座采集的海量数据进行分析处理,为智慧城市、智慧交通、智慧能源等领域提供高效的网络支撑和数据解决方案^[40]。

在商业航天领域,海南国际商业航天发射有限公司致力于打造智能化、国际化的商业航天发射服务。该公司建设了智能化航天发射场,采用 5G、人工智能等技术对箭体总装、发射试验等关键环节进行智能监控,实现了 4 天一箭的高密度发射能力。同时,该公司还自主研发了基于人工智能的箭上自主导航与控制系统,显著提升了运载火箭的自主能力。

总体看,我国智能航天发展已取得长足进步,但在基础理论、核心技术、应用生态等方面与航天强国还存在不小差距。未来,智能航天系统工程理论方法的突破创新,将进一步推动智能技术与航天工程的深度融合,加速智能航天关键技术研发与应用示范,为建设航天强国提供坚实支撑。但同时也要看到,智能航天系统作为典型的复杂系统工程,对现代信息技术与航天工程的交叉融合提出了更高要求。需要加强顶层设计,完善创新体系,突破卡脖子难题,打造自主可控的智能航天产业生态,筑牢建设航天强国的科技根基。

12.4 典型智能航天系统

(1)SpaceX 智能化可重复使用火箭

美国 SpaceX 公司研制的“猎鹰 9 号”火箭,是全球首款实现商业化运营的部分可重复使用运载火箭。“猎鹰 9 号”采用了垂直回收技术,搭载自主导航与控制系统,通过智能决策规划、精确轨迹控制实现一级

火箭的自主回收。同时,得益于模块化设计、3D 打印制造等新技术应用,"猎鹰 9 号"的制造和发射流程实现了高度自动化、智能化,显著降低了发射成本。目前,"猎鹰 9 号"已成功实施 100 余次发射任务,其一级火箭回收成功率达 80% 以上,平均每具一级火箭可重复使用 5 次以上。SpaceX 正在研制的"超重-星舰"空天运输系统,将进一步提升智能化水平,实现整流程无人自主运行,发射成本有望降至每公斤载荷 200 美元以下。这些突破性进展标志着,智能化正在成为提升运载火箭经济性、可靠性的关键推动力。

(2)NASA"毅力号"火星车

2021 年 2 月,美国 NASA 的"毅力号"火星车成功登陆火星,搭载了包括 7 台科学仪器、23 个摄像头在内的先进载荷,以寻找古代微生物生命、收集岩石和土壤样本为目标展开探测。与此前的"机遇号""好奇号"相比,"毅力号"最大亮点在于首次搭载了专用人工智能芯片,使其具备了更强的自主能力。利用计算机视觉、机器学习等技术,火星车可以自主识别科学目标,并规划到达路径;还可自主避开沙丘、悬崖等危险地形,选择最优行驶线路。凭借这些智能化技术,"毅力号"的科学数据传输效率是"好奇号"的 3 倍,"巡航里程"也有望达到"机遇号"的数倍。可以预见,随着人工智能、自主控制等技术的进一步发展,未来深空探测器的智能化水平将持续提升,有望实现全自主的火星巡视和采样返回。

(3)欧空局 AIDAN 智能飞行控制平台

AIDAN(AI for Decision-making in Autonomous Navigation)是欧空局开发的新一代智能飞行控制平台,旨在通过引入人工智能技术,提升航天器自主决策与控制水平。传统的飞控系统主要依赖地面操控人员,存在反应延迟、处置效率低等问题。AIDAN 则可在地面指令中断时,自主评估态势,制定飞行策略,持续执行既定任务。该平台基于深度学习算法,通过海量仿真训练数据学习航天器操控策略;并将策略封装为

控制模块,由航天器自主调用。AIDAN 首次应用于"哨兵"系列地球观测卫星,使其在日凌、月食等特殊轨道事件中均能自主应对,显著提升了任务成功率。未来,类似 AIDAN 这样的智能飞控系统有望在更多航天器上得到应用,实现航天器全生命周期的智能化管理。

(4)OneWeb 智能化卫星互联网星座

OneWeb 是由英国 OneWeb 公司提出的新一代全球卫星互联网星座计划。该星座由近 900 颗低轨卫星组成,可提供覆盖全球的高速互联网接入服务。OneWeb 星座最大特色在于,首次将人工智能技术引入卫星设计制造和管控全流程,通过"软件定义卫星"实现星座的智能化运行。具体而言,OneWeb 卫星采用了基于 AI 芯片的分布式处理架构,可实现卫星载荷的智能重构与在轨升级;并利用深度强化学习、群智感知等技术实现卫星编队的自主管控,提升星座抗毁性与鲁棒性。在地面运营方面,OneWeb 还建立了智能运维平台,通过大数据分析、智能预测等提升网络管理水平。截至 2024 年 8 月, OneWeb 共发射了 721 颗卫星,在轨正常运行的数量达到 631 颗,能够实现全球的商用服务。该项目代表了智能航天赋能卫星互联网的发展方向,为全球数字鸿沟地区提供可负担的宽带接入开辟了新路径^[40]。

12.5 小结

本章探讨了智能航天系统工程的内涵特征、关键技术、发展现状及典型案例。智能航天代表了人工智能与航天系统深度融合的发展方向,正成为新一轮全球航天竞争的制高点。

从智能航天系统的内涵看,其本质是以人工智能为核心,实现航天系统全生命周期的智能感知、智能决策和智能控制,通过体系各层级、各单元的广泛互联和协同,最终实现复杂航天任务的自主规划、自适应控制。从关键技术看,智能航天涵盖航天智能感知、仿真、决策、控制等诸多方面,呈现技术体系化、能力智能化的发展趋势。

从全球发展态势看,美欧等航天强国高度重视智能航天,制定了系

统的发展规划,加速推进智能技术在航天领域的创新应用。我国高度重视,正加快推进智能航天工程,在智慧运载火箭、智能航天器等方面涌现一批创新项目。典型案例如 SpaceX"猎鹰 9 号"、NASA"毅力号"、欧空局 AIDAN 平台、OneWeb 星座等,代表了航天智能化的前沿方向。

展望未来,智能航天将成为全球新一轮航天革命的核心驱动力。随着人工智能新范式的加速突破,以及航天与信息技术的进一步交叉融合,未来航天系统的形态和运行模式将发生深刻变革。一方面,全面感知、智能决策、自主协同将成为运载火箭、航天器的关键特征,航天系统的自主化、智能化、网络化水平将显著提升。另一方面,天基互联网、天基物联网等新型航天信息基础设施将加速构建,进一步拓展智能航天的应用空间。

可以预见,智能航天系统工程将成为我国航天强国建设的战略制高点。但也要看到,作为典型的复杂系统工程,其对现代信息技术与航天工程的交叉融合提出了更高要求,在理论基础、关键技术、产业生态等方面还存在诸多短板。未来,要进一步加强智能航天的战略谋划和体系布局,强化智能航天关键核心技术攻关,打造自主可控的智能航天产业生态,在服务国家重大战略需求中彰显价值、贡献智慧。要发挥新型举国体制优势,实施国家重大科技项目,加速智能航天创新成果的应用转化,抢占新一轮航天竞争制高点。要坚持开放创新理念,深化国际交流合作,主动参与全球航天治理,为构建人类命运共同体贡献智慧和力量。

第三部分 典型智能系统工程案例剖析

智能系统建设是一项复杂的系统工程,对多学科交叉融合、多领域协同创新提出了更高要求。成功的智能系统必须立足实际需求,遵循系统工程规律,打通数据链、应用链、创新链、价值链。本部分精选

了电梯物联网、智能物流、大规模柔性制造、智慧能源、智慧医疗、智慧城市等领域的典型智能系统案例,从应用背景、系统架构、关键技术、实施过程、应用效果等维度进行剖析,充分展现了新一代信息技术与行业应用深度融合的生动实践,凝练了智能系统建设过程中的经验教训,为未来更多智能系统的规划设计、组织实施提供了可资借鉴的样板。

第十三章 南充市电梯智慧物联网系统剖析

13.1 引言

电梯是现代城市的重要基础设施。我国已成为全球电梯保有量最大的国家,截至 2020 年底,电梯在用数量达 786.55 万台,并以每年 10% 的速度持续增长。然而在电梯总量快速增长的同时,电梯安全风险不容忽视。其中电梯故障、困人等突发事件备受公众关注,单凭传统的电梯定期检验和年检模式已难以满足安全监管需求。

在此背景下,西华师范大学物联网感知与大数据分析南充市重点实验室陈毅红教授联合四川雄俊电梯有限公司,创新性地提出了智慧电梯物联网这一解决方案。该系统基于物联网、云计算等新一代信息技术,利用各类传感器全面感知电梯的运行状态,利用大数据分析实现电梯故障诊断和预测性维护,并结合一键故障报警、可视化远程监控等应用,打造贯穿电梯生命周期管理的一体化智慧服务体系。

13.2 系统架构

南充市电梯智慧物联网系统围绕"全感知、广联接、泛在智能"的总体思路进行顶层设计。系统架构可分为感知层、网络层、云平台层、应用层四个层次。

感知层(传感器硬件层),涵盖丰富的物联网设备:一是分布于机房、轿厢等部位的专业传感器,包括水平/垂直振动、声音、温度、位置、门锁状态等;二是机房服务终端、一键呼救对讲装置、AI智能摄像头等复合型感知设备。这些设备从机械、电气和环境等多个维度采集电梯静、动态全生命周期数据。

图 13-1 电梯智慧物联网系统架构



网络层以有线、无线相结合的混合传输网为基础,实现感知数据的低时延、高可靠接入,并与电梯专业通信网络无缝对接。此外,还利用分布式边缘计算网络在电梯本地进行初步数据汇聚和分析,大幅降低后端平台压力。

云平台层以电梯物联网管理平台为核心,整合大数据中心、智能

分析引擎、可视化展示终端,实现海量异构电梯数据的接入、治理、分析和服务,并为上层应用提供丰富的数据支撑和算法支持。

应用层面向电梯生命周期各环节提供智能化工具,直接为部门、公司和用户服务。一方面建设在线监测、故障预警、智能诊断等运维管理应用,实时掌控电梯健康状况;另一方面构建电梯注册、使用登记、年检管理等"一站式"政务服务,提升电梯安全监管的信息化水平和服务效率。

13.3 关键技术

(一)多源电梯数据融合

融合结构化、半结构化、非结构化等多源异构数据,建立统一的电梯主数据管理系统。一是制定电梯领域数据标准,建立数据模型;二是采用 Extract-Transform-Load 技术汇聚各类数据,进行清洗和脱敏处理;三是运用 MySQL、Redis 等数据库分层管理不同类型数据。

(二)电梯知识图谱构建

基于本体构建技术将电梯领域知识抽象为概念、实例、关系等形式化表示,构建覆盖电梯设备、零部件、故障模式、检修方法等核心要素的电梯领域本体和知识图谱,赋予数据以语义关联,促进多源数据的关联分析。

(三)电梯故障诊断与预测

一是利用机器学习算法建立电梯故障诊断模型,实现对门系统故障、曳引系统故障等常见电梯故障的自动诊断,准确率达 95%以上;二是开发基于大数据的故障预测模型,记录故障发生前的电梯运行状态,

提前 15 天预警电梯故障风险,对症下药指导预防性维修。

(四)电梯远程可视化监控

结合 GIS 平台、数字孪生等技术,构建高度还原电梯机房实况的三维可视化场景。对全市电梯进行统一建模,制定统一的设备编码,实现电梯实时运行状态、重点参数的直观呈现,便于管理者直观掌控电梯全局。



图 13-2 电梯安全监管系统主监控界面

13.4 实施过程

南充市智慧电梯物联网建设历经三个主要阶段:规划论证阶段、试点示范阶段和推广应用阶段。项目实施中注重多方协同,建立了以政府主导、企业参与的创新机制。

(一)规划阶段(2017.6-2018.6)

成立了由电梯主管部门牵头,电梯生产、维保企业,技术咨询机构共同参与的项目组。在充分调研全市电梯安全管理现状的基础上,制

定了总体规划方案。该阶段的成果主要包括完成顶层设计、明确建设目标、确定实施路径。

(二)试点阶段(2018.7-2019.12)

选择南充市顺庆区作为试点,率先开展电梯物联网平台和智能感知设备的研发与安装调试工作。在 100 部电梯上进行概念验证,实现电梯远程监控、故障智能诊断等功能。试点工程成效显著,实时监测率、故障预警准确率均超 95%,为全面推广积累了宝贵经验。

(三)推广阶段(2020.1-至今)

在试点基础上,加速推进全市范围内智慧电梯物联网系统建设。截至 2021 年底,已有 3000 余部电梯接入系统,基本实现南充主城区电梯的全覆盖。同时不断完善电梯安全监管、应急处置、维保管理等业务应用,初步形成"管-防-维-治"一体化的电梯安全智慧监管体系。

13.5 应用成效

(一)电梯安全监管更加高效、精准。主管部门通过系统实时感知电梯状态,变"事后年检"为"全程管控",将电梯安全隐患消除在萌芽阶段。电梯困人故障率下降 57%,平均处置时间压缩到 20 分钟以内。

(二)电梯维保管理更加规范、高效。依托系统的预警诊断能力,维保单位实现由事后维修到预测性维护的跨越,大幅延长电梯使用寿命,降低维保成本。系统上线后电梯平均停用时间降低 70%。

(三)应急处置更加迅速、有序。电梯发生故障或困人后,系统自动联动 119 指挥中心,多方快速联动,提高救援效率。困人事件 17 分钟内必到、27 分钟内处置完毕,公众获得感、安全感大幅提升。

(四)政务服务更加便捷、高效。依托物联网数据,电梯从出厂到报废的全生命周期管理实现"一张网",改变多头管理局面,让数据多跑路,企业和群众少跑腿。

13.6 经验总结

(一)规划先行,体系化设计。南充市智慧电梯物联网坚持规划引领,在顶层设计阶段即统筹考虑感知、网络、平台、应用、标准、安全等要素,力求系统各模块分工明晰、紧密耦合,避免了信息孤岛和烟囱式发展。

(二)创新机制,多方协同共建。在项目全过程中,政府和企业形成紧密合作,发挥各自优势。在政府主导下,行业主管部门制定标准规范,电梯运营和维保单位积极配合,技术服务企业提供专业支撑,最终形成了多方共建共治共享的电梯安全发展新格局。

(三)问题导向,试点先行突破。南充市智慧电梯项目从解决电梯安全这一现实痛点出发,秉持开放、创新的态度,鼓励先行先试,在全面推广前设置试点验证阶段,通过小步快跑、快速迭代完善,最终实现由量变到质变的突破。

(四)数字赋能,提升监管效能。得益于实时在线的物联网数据,南充市智慧电梯项目实现了对电梯安全的全面感知、动态管控、科学决策,极大提升监管效率和精准度。这是数字政府、智慧城市建设的生动缩影,为新型智慧城市的基层治理变革提供了样板。

第十四章 智能物流系统京东无人仓剖析

14.1 引言

在新零售业态的激烈竞争中,智能物流成为电商巨头的必争之地。作为国内电商龙头,京东率先提出了无人仓的概念,即利用人工智能、物联网、自动化等前沿技术,实现仓储作业的全流程无人化,将传统的人工仓储作业替换为机器人、自动化设备、人工智能的有机组合。京东的这一颠覆性创新,引领了行业内掀起的智慧物流变革浪潮。

14.2 系统架构

智能物流系统京东无人仓在架构上分为三个层级:设备、控制、仓管。设备层以 AGV 机器人为基础,同时辅以自动分拣、智能搬运等一系列自动化装备;控制层由仓库控制系统(WCS)构成,负责设备层的实时调度和底层控制;仓库管理系统(WMS)聚焦业务层面,负责订单处理、库存管理、物流规划等核心业务。

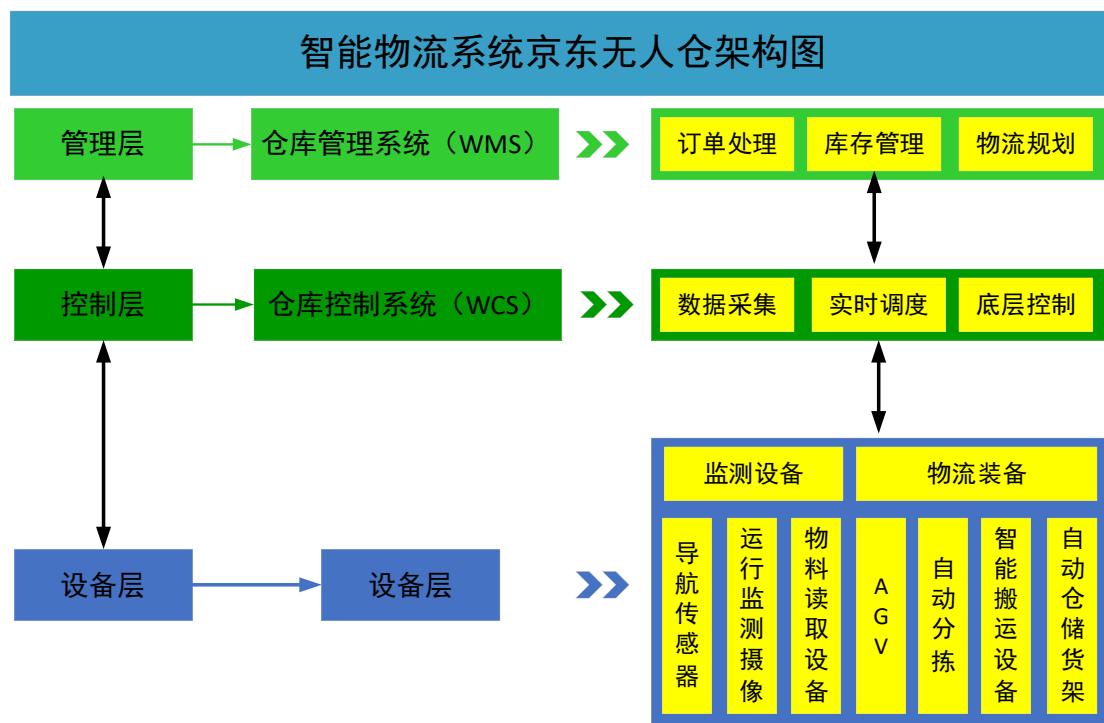


图 14-1 京东无人仓系统架构

整个系统的工作流程如图 14-2。WMS 接收销售订单,生成拣货计

划和波次,传送给 WCS。WCS 分解拣货任务,规划拣货路径,产生 AGV 调度指令。AGV 接收指令,携带货箱前往指定拣货货位,配合机械手或自动化设备完成拣货。拣货完成后,AGV 协同输送线将货物传送至打包区,由自动打包设备打包装箱。打包完毕,AGV 再次接力,将打包好的货物送至发货平台。打单、装车、配送,智能物流链路随之延伸。

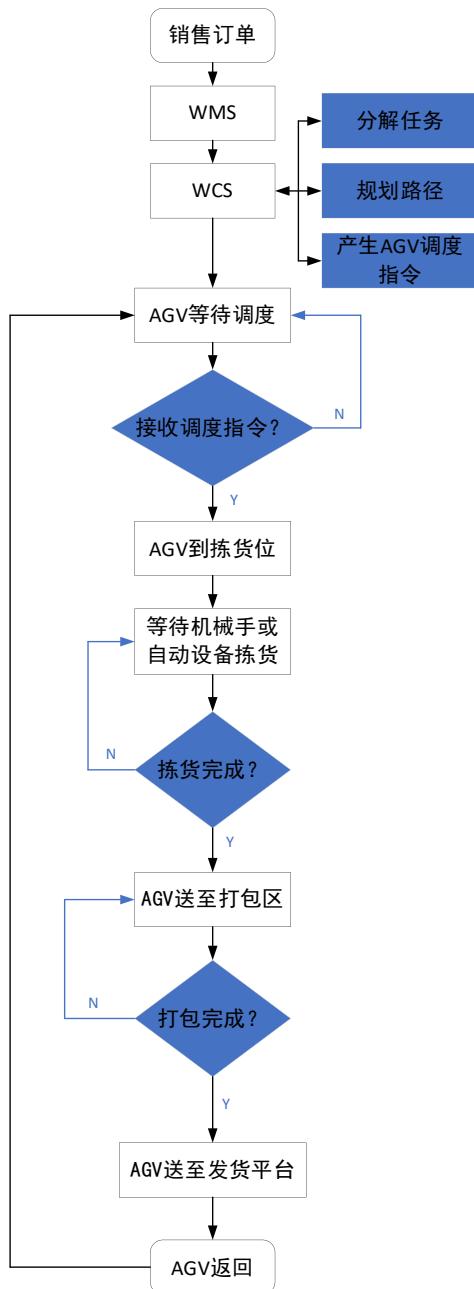


图 14-2 京东无人仓工作流程图

14.3 关键技术

京东无人仓是前沿科技的综合运用。其中,以下关键技术发挥了支撑作用:

(1) AGV 智能调度算法

京东自主研发的 AGV 调度系统,融入了深度强化学习、多智能体协同等算法,可高效协调上千台机器人的实时调度。系统根据 AGV 所在位置、电量状态、路径规划等因素动态生成最优调度策略,整体效率较传统算法提升 60%以上。

(2) 异形商品智能分拣

为应对异形包裹所带来的分拣难题,京东研发了基于深度学习的异形视觉分拣系统。该系统集成了三维视觉成像、目标识别与定位、机器人实时跟踪等技术,在对异形商品识别准确率可达 98%以上,每小时分拣效率可达上万件。

(3) 智能仓储决策优化

京东无人仓广泛应用运筹优化算法提升仓储管理水平。在库存管理上,自主开发的采购预测和补货优化系统,基于销售大数据训练机器学习模型,实现精准的需求预测和自动补货,降低缺货率的同时最小化库存成本。在拣选策略上,融合遗传算法、蚁群算法等智能优化技术,对拣货路径进行实时规划,有效降低时间和路程成本。

14.4 建设过程

京东无人仓的智慧物流体系经历了从概念探索到规模化推广的过程。2012 年,京东开始内部孵化自动化仓储项目;2014 年,首个商用化 AGV 机器人在京东亚洲一号智能仓投入使用;2018 年,京东又推出全球首个全流程无人仓。目前,京东已在全国布局 30 余个大型自动化智能仓,AGV 机器人日均行驶里程超 100 万公里。

值得一提的是,京东无人仓的建设始终坚持自主创新。在 AGV 智能调度、异形分拣、人机协同等环节,京东均自主掌握了核心技术。在

人才建设上,京东成立 X 事业部专注无人技术研发,并与高校合作设立 AI 智能产学研基地,为智能物流储备人才。此外,京东还积极推动行业标准制定,主导了 AGV 机器人等多项国家标准的编制工作。

14.5 应用价值

京东无人仓的建成投用,为现代电商物流树立了全新标杆。其应用价值主要体现在三方面:

(1) 大幅提升物流时效。在人工仓储模式下,日均处理 10 万个订单就需投入上千名员工。而京东亚洲一号无人仓日均处理能力超 200 万单,人均效率是传统模式的 10 倍。单件商品出库时间由此前 1 小时压缩至 10 分钟。

(2) 显著降低运营成本。通过减少 50% 的人工,无人仓的人力成本节约高达 70%。同时机器替代人工作业也大幅减少差错,每百万件的差错率降低 90%。此外,智能算法驱动下的自动化立库比常规货架的空间利用率高出 80%,降低了库存和场地成本。

(3) 加速柔性供应链建设。传统制造业讲究规模化生产,很难满足定制化、小批量生产等柔性制造需求。而智能物流以智能机器人为载体,以智能算法为大脑,可以更加便捷高效地实现柔性生产、按需配送,助力企业应对市场变化。

14.6 经验借鉴

京东无人仓为智能系统工程的发展提供了诸多启示:

(1) 以需求和问题为导向,技术创新服务实际应用。京东无人仓立足物流时效和成本的现实痛点,以需求倒逼技术突破。这种需求牵引型创新路径,让技术创新始终聚焦主航道,避免闭门造车。

(2) 坚持自主可控,实现关键核心技术突破。京东无人仓在 AGV 调度、机器视觉等核心技术上实现了自主研发,努力实现智能物流的自主可控。这为我国从制造大国迈向智造强国树立了标杆。

(3) 注重人才培养,打造跨界融合的复合型人才队伍。京东在人才

建设上强调产学研用一体化,培养懂技术、懂业务、懂管理的复合型人才。这为智能物流乃至各领域智能化发展积累了宝贵人才资源。

(4) 积极创新机制体制,推动智能化变革。在智能化变革中,京东积极创新组织架构和运作模式,成立智能技术专门部门,探索前端智能与中后台融合的新型运作机制。这是顺应新一轮科技革命的必然选择。

纵观京东无人仓的发展历程,我们可以看到各种前沿技术在实际应用中的磨合过程。未来,随着 5G、人工智能等新兴技术的进一步发展,智能物流的应用场景必将不断拓展,发展空间广阔。这对各行业数字化、智能化变革具有重要的借鉴意义。

第十五章 华为智能工厂的数字孪生系统剖析

15.1 引言

制造业数字化、网络化、智能化是新一轮科技革命和产业变革的主要标志。其中,数字孪生作为智能制造的核心使能技术,通过在虚拟空间中构建和物理世界同步的数字镜像,为设计、生产、管理等环节的数字化重构提供了基础支撑。在这场智能化变革中,华为松山湖智能工厂以数字孪生为牵引,以 5G 为赋能,探索"数字化设计、智能化制造、个性化定制、服务化延伸"的智能制造新模式,树立了行业标杆。

15.2 系统架构

华为松山湖智能工厂将数字孪生贯穿设计、生产、服务的全流程,精准刻画从产品、资源到过程的数字模型,再现工厂中人、机、料、法、环各要素的相互作用。系统架构分为感知层、网络层、数字层、应用层、安全层五部分。

感知层通过 RFID、传感器、机器视觉等物联网技术,采集设备、产品、环境的海量实时状态数据,奠定数字孪生的数据基础。网络层以 5G 为骨干网,TSN 为确定性网络,实现生产数据的低时延传输,满足数字孪生的实时性要求。数字层以预定义模型库为基础,通过知识图谱、

三维建模等技术,构筑产品、设备、工艺等核心要素的数字镜像。应用层集成虚拟装配、仿真优化、三维可视等工具,赋能研发、制造、服务等业务创新。安全层覆盖整个架构,利用区块链等技术,确保系统韧性。

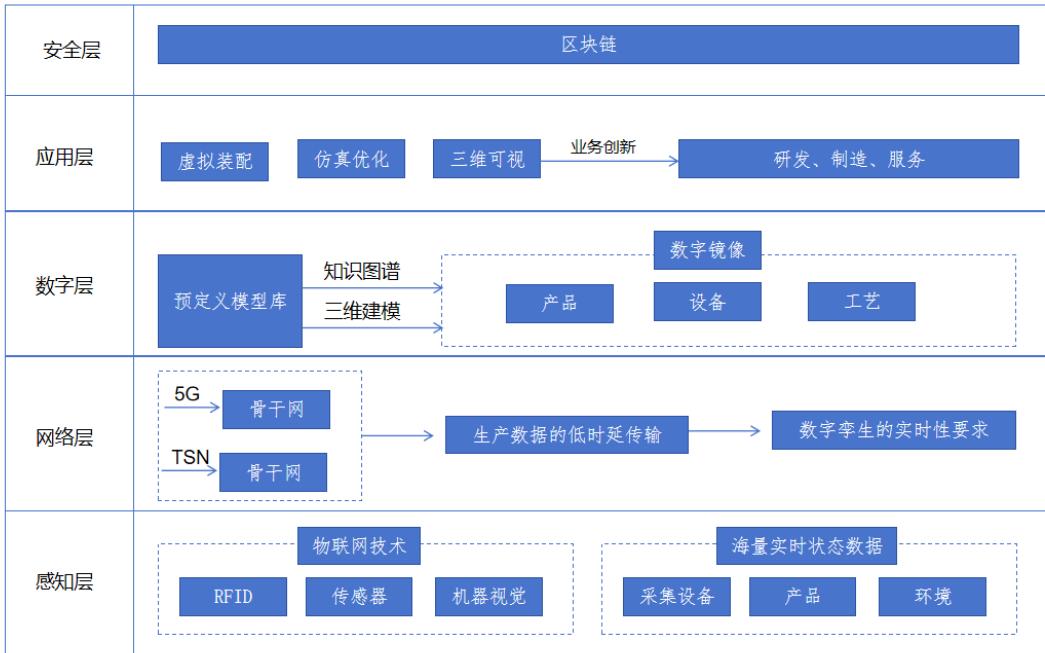


图 1511 华为松山湖工厂数字孪生系统架构示意图

15.3 关键技术

数字孪生是多种新兴技术的集成应用。华为松山湖智能工厂重点围绕物联网、5G、人工智能、区块链等,实现了一系列技术突破。

(1) 端边融合的工业物联网

工厂内分布 5 万余个智能传感终端,毫秒级、微秒级地采集各参数。700 余个边缘计算节点就近处理海量数据,削峰填谷,大幅降低云端压力。边缘节点还内置算法模型,在端侧实现设备故障诊断、产品质量检测等实时智能。

(2) 5G+TSN 确定性网络

5G 凭借大带宽、低时延等特性,为数字孪生实施提供了网络保障。工厂在 5G 网络基础上,进一步部署 TSN 以太网,通过时间同步、流量整形等机制,实现亚毫秒级确定性传输。5G+TSN 网络让数字孪生如同工厂的“中枢神经”,实现生产要素的精准协同。

(3) 知识驱动的智能建模

工厂构建了涵盖产品、工艺、设备、质量等全要素的工业知识图谱,已积累工规、工艺规则 18 万条,成为智能建模的知识引擎。各业务系统调用知识图谱智能感知,产品设计时自动关联工艺,排程优化时动态适配设备。知识驱动让数字孪生更加智慧、高效。

(4) 分布式协同的区块链

区块链技术用于打造分布式协同的安全防护体系。一方面,区块链与物联网相结合,物联网设备作为区块链节点就地存储、共识交互,构建不可篡改、可追溯的数据链;另一方面,区块链实现供应链上下游的协同,打通数据孤岛,建立共享机制,实现互信。

15.4 应用场景

数字孪生在工厂的设计、制造、服务等环节实现了全面应用。

(1) 研发设计

基于三维设计工具,工程师在虚拟空间拖拽装配产品,系统自动校验工艺规则,优化生产路径。仿真分析可提前发现 80%以上设计问题,新品研发周期减少 50%。

(2) 生产制造

利用实时采集的设备参数动态校准数字模型,当实际产能偏离预期时,系统自动预警并诊断根因。质量管理方面,机器视觉与数字孪生结合,不良品检出率提升至 99%以上。

(3) 设备运维

工业 APP 集成设备运行数据和 VR 场景,运维人员利用 AR 眼镜开展设备巡检,将设备信息与现场实景叠加,提高巡检效率 3 倍。预测性维护可提前 15 天识别设备退化趋势。

(4) 经营决策

领导驾驶舱汇聚各业务系统数据,利用仿真推演辅助经营决策。通过实施数字化精益生产,产能规划准确率提高 30%,设备综合效率提

升 18%,产品交付周期缩短 25%。

15.5 实施效果

以数字孪生为核心,华为松山湖智能工厂的各项指标均处于行业领先:生产效率:自动化率超 85%,单产线产能是传统模式的 2.5 倍。产品品质:不良品率低于 10PPM,远优于行业平均的 1000PPM。柔性制造:支持多品类混线生产,订单响应时间缩短 75%。节能减排:能耗较行业基准下降 20%,碳排放降低 18%。

15.6 经验启示

(1)智能制造须统筹规划、分步实施。华为历时 3 年打造松山湖智能工厂,2016 年提出规划,2017 年率先在产线级应用,2019 年扩展到工厂级规模化部署。这种由点及面、由局部到整体的实施路径,在降低风险的同时快速见效。

(2)数据驱动是数字孪生的灵魂。华为格外重视数据在数字孪生中的核心地位。一方面,工厂遍布物联网终端,形成完备的数据采集体系;另一方面,AI 中台为各业务系统提供统一的算法服务,最大化释放数据价值。未来,随着 5G、边缘计算的进一步发展,数字孪生将进入全新的感知维度和决策阶段。

(3)构建开放融合的产业生态。华为聚焦 ICT 底座能力,在工业 APP 开发、系统集成服务等环节广泛开展产业合作。通过产教融合,携手高校院所共建联合实验室,为智能制造培养多学科交叉型人才。通过竞合发展,建立产业联盟,与上下游伙伴共享数据、模型和算法,打造面向未来的协同制造网络。

15.7 结语

华为松山湖智能工厂是制造业数字化转型的缩影。它昭示着,数字孪生将成为未来工厂的标准配置。随着 5G、人工智能等技术的快速演进,数字孪生系统将进一步发展,成为支撑企业降本增效、产业变革创新的新型数字基础设施。这对新时代制造业高质量发展具有深远

意义。

第十六章 传神智能化多语信息挖掘系统剖析

16.1 引言

多语信息挖掘是企业了解市场动态、掌握客户需求以及识别潜在风险的重要手段，通过深度分析挖掘企业的业务数据、商业数据和舆论信息，使其能够更精准地制定战略决策、优化产品和服务。然而，传统的信息分析挖掘方法主要依赖规则匹配和关键词检索，存在数据处理效率低、语义理解能力不足以及分析结果不够精准的问题，尤其在面对非结构化文本时，难以有效捕捉信息的情感倾向和潜在关联，限制了企业对数据信息的全面把握。当引入大语言模型技术后，能够显著提升多语信息挖掘的能力。其强大的自然语言理解和生成能力可以精准识别复杂语义、理解上下文关系，并从海量非结构化数据中提取高价值信息，同时通过实时更新知识库，更快速地响应市场变化和热点话题，使得多语信息挖掘更具深度和灵活性，为企业提供前瞻性的市场洞察和决策支持。

16.2 系统架构

智能化多语信息挖掘系统以传神任度大语言模型技术为核心，通过整合多语数据采集、智能指令配置及多语数据分析等关键子系统，为用户提供高效、智能的信息分析挖掘解决方案。系统通过对非结构化数据的精准处理和语义理解，结合低代码配置和自动化流程，全面提升数据采集、分析及报告生成的效率和质量。其架构设计以模块化、灵活性为特点，确保能够快速适应不同业务场景需求。

(1) 多语数据采集子系统

多语数据采集子系统负责从多渠道获取数据，并对数据进行高效管理与初步处理，为后续分析提供高质量输入。通过结合多语数据管理、文件管理及大语言模型的自然语言处理能力，实现数据从收集到

初步语义分析的全流程自动化。

多语数据管理：负责从多种渠道（如企业的非结构数据库、关系型数据库、API 数据源、互联网等）获取数据，支持多线程并发、动态反爬技术及定制化规则配置，确保数据源的广覆盖性和时效性。

多语文件管理：对采集到的原始数据进行存储、分类及清洗，支持多格式文件的解析及结构化处理，为后续分析奠定基础。

摘要生成：利用大语言模型对多语文本进行自动摘要，提炼长文本中的关键信息，提升数据处理效率。

标签提取：基于预训练模型对文本进行实体识别与主题分析，生成多维度标签，为数据分析挖掘提供丰富的数据维度。

核心观点提取：通过深度语义理解，从多语文本中提取核心观点与关键句，确保能够快速定位数据中的重要信息。

(2) 智能指令子系统

智能指令子系统提供用户友好的低代码配置能力，支持通过可视化界面快速设置大模型的工作流与智能体参数，实现复杂信息分析挖掘任务的自动化与模块化。

低代码配置界面：提供直观的拖拽式界面，支持用户以最少的编程知识设计和配置信息分析挖掘任务，降低技术门槛。

大模型工作流管理：允许用户通过低代码方式定义模型的工作步骤（如数据预处理、跨语言语义分析、报告生成等），并对各环节参数进行精细化调整。

智能体设置：支持多种预定义智能体模板，用户可根据分析场景选择合适的模型，并对其逻辑和行为进行个性化定制，如对特定关键词的优先级分析或情感倾向性判断。

(3) 多语数据分析子系统

多语数据分析子系统通过设置信息分析挖掘报告的标题及章节结构，并结合智能指令子系统中配置的大模型工作流与智能体，对采

集到的数据进行深度分析与报告生成。

报告模板管理：提供多种信息分析挖掘报告模板，用户可根据需求自定义标题、章节结构、排版样式，确保输出结果的专业性与规范性。

多语数据分析：利用智能指令子系统配置的大模型工作流，针对不同多语数据进行多维度分析，包括情感分析、趋势预测、关联关系挖掘等，为决策提供数据支持。

报告生成与输出：基于分析结果自动生成信息分析挖掘报告，支持多格式导出（如 PDF、Word），并结合图表和可视化数据展示，提升报告的易读性和说服力。

传神智能化多语信息挖掘系统通过大语言模型技术的深度应用，解决了传统信息分析挖掘的效率和质量问题。多语数据采集子系统实现了多源数据的高效收集与初步处理；智能指令子系统提供灵活的低代码配置能力，降低用户操作难度；多语数据分析子系统则充分利用模型工作流完成数据的深度挖掘与报告输出。整体系统功能强大、易用性高，为企业的信息分析挖掘提供了全新的智能化解决方案。

16.3 关键技术

(1) 传神任度大模型的数据推分离技术

任度大模型采用全自研的 zANN 框架进行开发，基于 Transformer 的底层原理，重新研究并创造性地研发了 moH 神经网络框架，实现了大语言模型推理网络和客户数据学习网络的分离，能够对客户数据进行实时学习达到继续预训练的效果，并在推理过程实现了推理网络与压缩网络的联动方式完成生成过程。使得在信息分析挖掘的过程中，能够将获取到的数据直接以“知识”的方式压缩到任度大模型的数据网络中，进行全面多维度的分析、理解、提取和生成，大幅减少了关键信息的遗漏概率。

(2) 多模态信息联合分析

传神自主研发的任度大模型是一款集多模态信息综合分析能力于一体的技术产品。该模型能够同时处理文本、图像、音频等多种信息形式，通过深度学习和人工智能算法的协同工作，对不同模态的数据进行智能融合与深度挖掘。任度大模型不仅可以更高效地提取和处理从各类数据源获取的信息，还能够在不同模态数据之间建立关联，揭示隐藏的关系与价值。

通过这一创新技术，企业和机构能够从多角度洞察数据的全貌，发掘数据背后更深层次的商业价值。例如，在智能客服、精准营销、智能监控和数据可视化等领域，该模型展现了强大的应用潜力。它不仅提升了对数据的利用效率，也为用户提供了更加全面、细致和科学的数据分析解决方案，助力决策效率和业务成果的双重提升。

16.4 应用实践

目前，传神智能化多语信息挖掘系统已在多个企业和研究机构进行了部署和应用。

以某大型电子商务企业为例，该企业拥有海量用户数据和多样化的业务场景，对信息分析挖掘的实时性与精准性有极高的要求。2023年，该企业全面部署了传神智能化多语信息挖掘系统，通过整合多语数据管理、语义分析与多模态信息处理技术，实现了从数据采集到分析报告生成的全流程自动化。

部署初期，系统从互联网、企业文件数据库、企业业务数据库等多个渠道实时获取数据，每天处理约 5TB 的非结构化文本和多模态信息，累计生成超过 300 万条情感分析与关联关系挖掘结果。系统基于传神任度大模型的深度语义理解能力，快速提取数据中的核心观点与关键趋势，生成高价值的信息分析挖掘报告，报告准确率和时效性均较传统方法提升了 50% 以上。

在实际应用中，该系统能够有效帮助企业识别潜在危机，避免多起品牌公关事件的恶化。例如，某产品因用户反馈不佳而引发社交媒体

体热议时，系统可以第一时间捕捉到相关信息，并通过情感分析准确预测事件的发展趋势。企业根据信息分析挖掘的报告随即调整公关策略，将潜在损失降至最低。此外，快速生成的市场热点分析报告为企业精准营销提供了数据支持，使新产品推广的转化率提升了约 30%。

传神系统还通过低代码配置界面大幅降低了技术门槛，使企业内部市场与公关团队无需依赖专业技术人员即可完成复杂的分析任务。团队成员利用系统内置的智能指令模板，快速搭建分析工作流并生成可视化报告，节省了近 40% 的人工成本。

该系统的成功应用为企业在激烈的市场竞争中提供了强大的决策支持，也为智慧商业治理树立了新标杆。未来，传神智能化多语信息挖掘系统将进一步拓展多模态数据的深度挖掘能力，助力企业在复杂多变的市场环境中抢占先机。

16.5 经验借鉴

传神智能化多语信息挖掘系统以创新性技术和智能化设计，为企业在复杂多变的市场环境中提供了高效、精准的信息分析挖掘工具。其实施经验为智慧商业治理提供了重要参考。

(1) 数据质量与语义理解是信息分析挖掘的基础

精准的数据采集和深度语义理解能力是信息分析挖掘系统高效运作的基石。传神系统依托自主研发的大语言模型技术，不仅实现了对海量非结构化数据的高效采集与处理，还通过情感分析与语义提取深挖数据潜力。

(2) 灵活易用的低代码设计降低技术门槛

传统信息分析挖掘系统操作复杂，限制了非技术人员的使用效率。传神系统通过基于智能体技术的指令子系统，实现了高度模块化与自动化和智能化。低代码配置界面让用户无需编程即可轻松设计复杂的分析任务，快速响应业务需求。工作流与智能体管理支持多维度参数优化和任务定制，确保分析结果符合业务场景要求。这种灵活性极大

降低了企业在部署和使用过程中的技术门槛，提升了操作便捷性与效率。

(3) 多模态信息融合开启深度商业洞察

多语信息挖掘不仅需要处理海量文本数据，还需结合多模态数据（如图像、音频）揭示深层次关联。传神系统凭借多模态大模型技术，成功实现了不同数据模态的智能融合与深度挖掘，并精准捕捉了隐藏关联及情感趋势，为企业提供全景式商业洞察。这种多模态融合技术不仅拓展了信息分析挖掘的应用边界，也为精准营销、智能监控等场景提供了高价值解决方案。

16.6 结语

传神智能化多语信息挖掘系统通过创新性的大语言模型、多模态信息融合技术，以及灵活的低代码设计，为多语信息挖掘提供了全新的智能化解决方案。该系统在多语数据管理、语义分析和多维度信息挖掘方面表现出强大的能力，不仅显著提升了信息分析挖掘的效率和精准度，也为企业提供了深度的商业洞察和决策支持。未来，随着技术的持续优化，传神系统有望在更多领域中实现应用推广，进一步推动信息分析挖掘向智能化、高效化和多维度分析的方向发展，为企业应对复杂市场环境提供更全面、更前瞻的支持。

第十七章 国家电网泛在电力物联网系统剖析

17.1 引言

电网是关系国计民生的重要基础设施。随着新能源发展和用电需求升级，电网呈现出多元化、分布式、高比例可再生能源接入等新特征，传统电网在支撑能源革命、服务数字经济等方面面临新挑战。国家电网公司顺应大势，提出建设“三型两网”的战略目标，其中泛在电力物联网是发展的关键内容。通过全面感知、广泛互联、开放共享，泛在电力物联网将重塑能源流、业务流、数据流，使电网更加高效、灵活、智能、

开放,为构建清洁低碳、安全高效的现代能源体系提供有力支撑。

17.2 系统架构

泛在电力物联网采用"云-管-边-端"的体系架构,分为感知层、网络层、平台层、应用层四级。

感知层以各类物联网传感设备为主体,实现电网的全面感知。通过布设智能电表、微型 PMU、智能变压器等,采集电、热、气等能源数据和负荷分布、设备状态等电网数据,为电网的全景洞察夯实数据基础。

网络层主要由骨干通信网、配电通信网和用电通信网组成。骨干网基于电力光纤专网,配电网采用机架式边缘计算服务器和工业以太网,用电侧利用 NB-IoT 和 HPLC 技术,共同构建了覆盖发、输、变、配、用全链条的通信网络。

平台层的核心是云网融合的大数据中心。云端提供通用 PaaS 服务和行业 SaaS 应用。边缘侧构建分布协同的边缘计算平台,整合分析功能下沉到网络边缘,实现数据就地汇聚、处理和应用。平台层还整合了人工智能、区块链、GIS 等新技术平台,支撑丰富的上层应用创新。

应用层面向电网生产、经营、管理各领域,利用大数据、物联网等新技术创新应用。在发用电协同方面,构建"源-网-荷-储"协调运行的新机制。在综合能源服务方面,建成集供电、供热、供冷、供气为一体的智慧能源平台。在电费服务方面,实现"一户一表"精准计量、快速结算等功能。

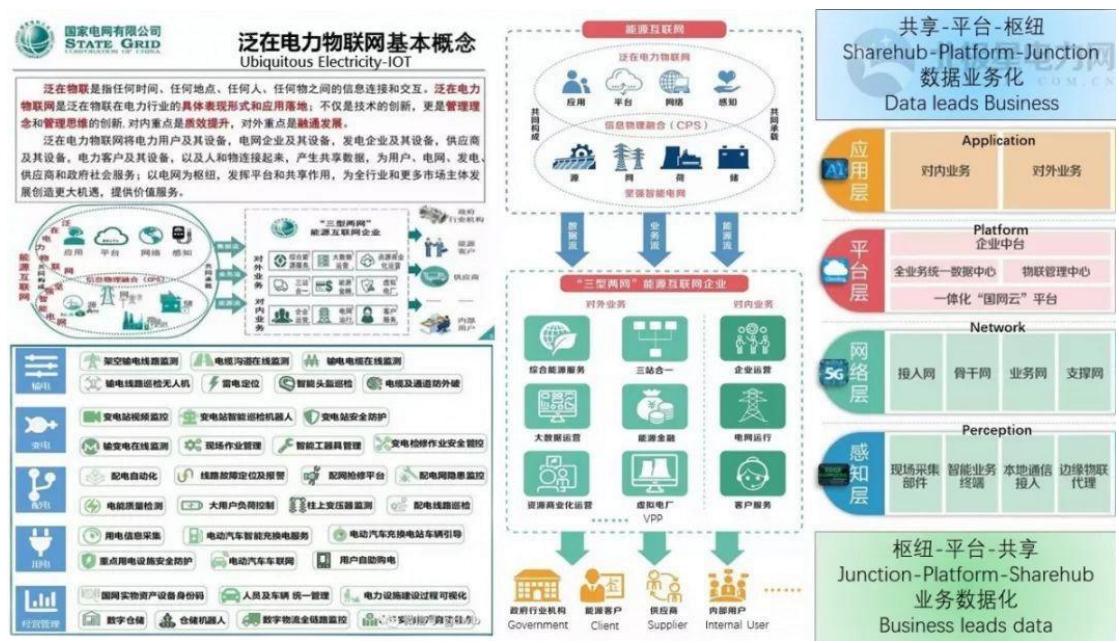


图 17-1 泛在电力物联网体系架构图

17.3 关键技术

泛在电力物联网作为电网的数字化底座,需攻克一系列关键技术。

(1) 物联网泛在感知

泛在感知是实现数字孪生电网的重要基础。泛在电力物联网具备跨电压等级、跨设备类型、跨场景应用的泛在感知能力。通过部署智能传感器,构建基于 IP 技术的电力专用传感网,实现电网的全面感知和数据共享,为建立完善、实时、易于扩展的感知系统奠定了基础。

(2) 多模态异构数据管理

泛在电力物联网需管理来自海量 IoT 设备的异构数据。通过时空数据一体化管理,将分散在各业务信息孤岛的数据全面汇聚,利用元数据驱动技术对多源异构数据进行统一建模和标识,构建统一数据资源池,打破跨专业、跨系统、跨层级的数据壁垒。

(3) 边缘计算与智能

鉴于电力物联网终端数量众多、类型多样,云端集中处理模式面临时延大、压力大等难题。泛在电力物联网广泛应用边缘计算,在网络边缘完成数据的实时处理和行动分析。边缘计算与云端AI协同,实现

算力下沉、数据下沉、应用下沉,大大提升物联网业务的实时性和智能化水平。

(4) 区块链可信交互

纳入电力物联网的海量终端涉及电网、售电、终端等多元参与主体,需要新机制来保障数据共享交互的安全可信。泛在电力物联网通过区块链技术,构建分布式的多方安全计算协议,为设备管理、数据共享、交易结算等应用提供可信环境,实现电力物联网数据的可信共享与可追溯验证。

17.4 建设实践

自 2019 年启动建设以来,泛在电力物联网已形成国网统一规划、省网分域建设、地市县级落地应用的推进格局。目前建设进展如下:

感知层,建成"全覆盖、广接入"的物联网。已建成 670 余万智能配变终端,感知全量配变数据。1.8 亿户智能电表接入系统,户户互联互通。14 万余套输变电在线监测装置全面部署,实现设备状态实时感知。

网络层,初步构建起"多网融合、广域互联"的新一代电力通信网络。省级骨干网在建设,地市级配电通信网全面铺开。用电通信网已覆盖城市核心区域,NB-IoT 网络覆盖率超 95%。多种通信方式在管理、业务上实现融合,支持跨网、跨区域、跨业务的互联互通。

平台层,建成面向泛在物联网的"云网边端"协同的大数据平台。36 个省级电网公司建成大数据中心,具备 PB 级数据存储和处理能力。在 110 余个地市部署大数据平台,实现数据就近接入和共享。中心与省、地市三级平台互联互通,数据共享交换总量突破 107 亿条。

应用层,电力物联网应用全面开花。在生产侧,源网荷储协同、输变电设备智能运维等应用广泛开展,电网调度、运行、检修等核心业务流程加速优化重塑。在用户侧,电 e 宝、网上国网等众多创新应用不断涌现,客户服务水平持续提升。截至目前,泛在电力物联网已在 17 个重点领域形成 34 个创新应用,初步实现"业务+数据+应用"的融合闭环。

17.5 实施成效

泛在电力物联网建设有力支撑了"三型两网"战略落地,电网发展由以电网为中心向以客户为中心转变,由被动服务向主动服务转变,由独立发展向融合创新转变。

(1) 换道领跑能源革命。泛在电力物联网实现电、热、气、冷等多种能源的协同互动,助推能源生产和消费模式变革。初步测算,到 2025 年泛在电力物联网可带动清洁能源消纳量增加 1.5 万亿千瓦时、电能替代规模扩大 1 亿吨标准煤。

(2) 推动电网数字化转型。泛在电力物联网以数字化贯穿电网全业务链条,加速推进电网规划、建设、运行、检修的数字化和智能化。预计到 2025 年,配电自动化覆盖率达 90%,输变电设备故障预警率达 90%,智能运维比例超 50%。

(3) 全面提升客户体验。泛在电力物联网创新多种互动服务模式,推出共享储能、车网融合等差异化服务。实现"一户一表、结算快速、故障不停"的客户服务新水平。到 2025 年,可实现 95%以上用户"一次都不跑",平均停电时间控制在 60 分钟以内。

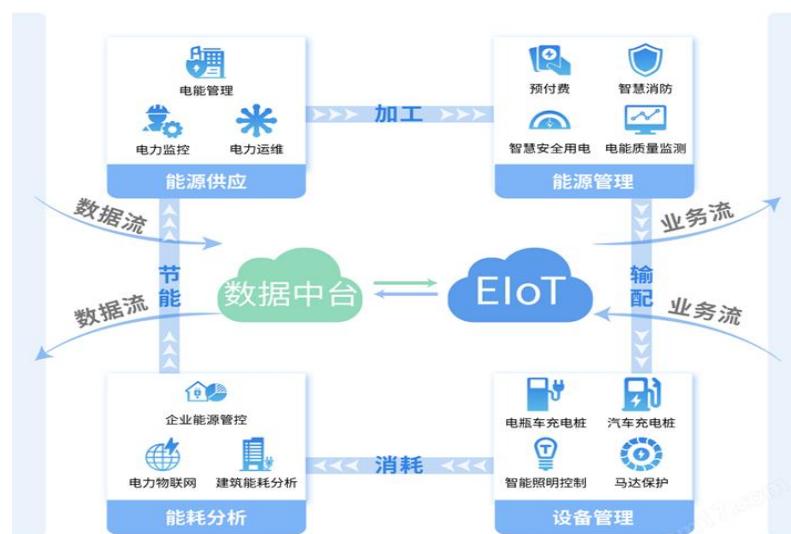


图 17-2 泛在电力物联网典型应用场景

17.6 经验启示

国家电网泛在电力物联网的探索实践,为智能物联网时代的数字化转型提供了有益经验:

(1) 顶层设计要超前。泛在电力物联网站位高远,在规划设计之初即秉持互联网思维,从智能化发展大势出发,对物联网、大数据等新技术超前布局。高起点的顶层设计为后续建设指明了方向。

(2) 数据要唯一权威。数据管理是物联网的核心。国网公司高度重视数据治理,从数据采集、传输、存储到应用实现全生命周期管理,建立数据资源唯一权威,为上层应用提供了高质量的数据支撑。

(3) 生态要开放融合。物联网发展需要通力协作。国网公司积极构建产业生态,联合产学研用各界广泛开展协同攻关、合创新,有效整合各方资源,加速了关键技术研发和成果转化进程。

(4) 实施要快速迭代。泛在电力物联网采用小步快跑、快速迭代的建设策略。通过搭建数字化平台,开展数字化应用试点,及时总结经验,形成可复制推广的数字化转型样板,成为新一轮电网发展的"火车头"。

17.7 结语

泛在电力物联网是"三型两网、世界一流"战略目标的关键支点,是新时代能源电力高质量发展的重要基础设施。国网泛在电力物联网从感知、网络、平台到应用进行了全方位探索,形成了完整的体系架构。随着建设的纵深推进,必将进一步激发数据要素潜力,催生跨界融合应用,加速形成共建共治共享的能源互联网生态圈,为国家能源革命和数字中国建设作出更大贡献。

第十八章 时代星光电子对抗智能无人机系统剖析

18.1 引言

随着无人机技术的迅猛发展,无人机系统在军事领域的应用日趋广泛。其中,电子对抗智能无人机系统集成了无线电侦察、定位、干扰

等功能,在复杂电磁环境下实现对敌通信、雷达等系统的压制,为部队实施作战提供强大的电子战支援。成都时代星光科技有限公司联合相关单位研制了一款电子对抗智能无人机系统,为电子战装备智能化升级树立了标杆。

18.2 系统组成

时代星光电子对抗智能无人机系统组成主要是由 2 部分构成: 战狼多旋翼智能无人机飞行平台及电子对抗设备(模拟电台), 由成都时代星光科技有限公司生产制造的 TIM-W60 大载重多旋翼无人机, 可实现完全国产化, 材质采用高强度碳纤维材料一体成型, 具备重量轻、强度高、防腐蚀能力强等特点。采用电动六旋翼布局, 可实现 10kg-30kg 载重飞行能力, 具有飞行时间长, 覆盖距离远特点, 同时满足雨中飞行技术要求, 具有智能算法模块, 可广泛应用于挂载军方电子对抗设备(模拟电台)、进行电子对抗模拟训练, 模拟主要作战对手通信组网、物资运输等领域。TIM-W60 六旋翼飞行器由旋翼、电机、电子调速器、电池组等组成。折叠方式: 采用插拔式设计。旋翼设计经过长时间测试, 优化改进, 气动特性符合空气动力学原理, 可满足复杂气象条件下的飞行。TIM-W60 对称轴距 2000mm, 最大载重 30kg, 电气接口、机械接口完全适配电子对抗设备(模拟电台), 采用一体式设计结构方便拆装电子对抗设备(模拟电台), 支持即插即用快速插拔方式, 可定制挂载不同数据类型的数据链模拟电台及标靶电台。



图 18-1 TIM-W60 多旋翼无人机平台

电子对抗设备（模拟电台）-蓝军多种体制数据链模拟电台主要编配陆军电子对抗旅，包括：Link16 数据链模拟电台、Link4A/ 11 数据链模拟电台、全国产化 Link 16 数据链模拟电台、全国产化 Link4A/11 数据链模拟电台。数据链模拟电台对标外军数据链端机，通过模拟作战对手数据链电台的信号样式、工作模式和组网业务，为试验室、试验场和训练场搭建真实的战时外军数据链环境。数据链模拟电台能够接收干扰信号，模拟数据链电台受干扰条件下的工作状态，显示评估干扰效果。电台包括机载端机、地面端机和便携式端机三种型号，可在不同使用环境下提供最优的解决方案。



图 18-2 Link16 数据链模拟电台



图 18-3 Link4A/11 数据链模拟电台

电子对抗设备（模拟电台）-设备软件定义蓝军标靶电台包括：短波标靶电台和超短波标靶电台，并可实现全国产化，主要可供陆军、空军、海军勤务支援旅电子对抗营，合成旅（合成师，警卫师）电子对抗连及试验、训练基地等，使用通过等效模拟主要作战对手超短波

战术通信、短波通信及组网应用场景，为战术通信对抗训练提供贴近实战条件下的训练目标。

- (1) 能够模拟主要作战对手典型超短波战术通信设备、短波战术通信设备的信号样式、工作模式和组网业务；
- (2) 能够接收干扰信号，模拟战术通信设备受干扰条件下的工作状态，显示评估干扰效果。



图 18-4 短波标靶电台



图 18-5 超短波标靶电台

18.3 关键技术

时代星光电子对抗无人机系统的研制涉及飞行器设计、信号处理、人工智能等诸多关键技术：

(1) 无人机设计

无人机电子对抗平台的设计需要考虑到电子设备的搭载能力、续航能力、飞行性能等因素。

这包括采用轻量化设计、优化气动布局、提高能源效率等，确保无人机能够在复杂的电子对抗环境中稳定飞行，并长时间执行任务。

(2) 自主飞行控制

无人机电子对抗平台需要具备自主飞行控制能力，能够在没有人工干预的情况下完成任务。

这包括采用先进的导航技术、飞行控制算法等，提高无人机的自主飞行能力和精度。同时，还需要具备故障诊断和容错能力，确保无人机在出现故障时能够安全返回。

（3）协同作战

无人机电子对抗平台可以与其他无人机或地面部队进行协同作战，提高作战效能。这包括采用协同控制技术、数据共享技术等，实现无人机之间的信息交互和协同作战。例如，多架无人机可以组成编队，共同执行电子侦察和干扰任务，提高作战效率和覆盖范围。

（4）抗干扰通信

在电子对抗环境中，通信信号容易受到敌方的干扰。因此，无人机电子对抗平台需要具备抗干扰通信能力。这可以通过采用扩频通信、跳频通信等技术来实现。扩频通信将信号扩展到较宽的频带上，降低了被敌方干扰的概率。跳频通信则通过不断改变通信频率，使敌方难以跟踪和干扰。

（5）压制干扰

压制干扰是无人机电子对抗平台的主要干扰手段之一。通过发射大功率的干扰信号，压制敌方的电子设备，使其无法正常工作。这包括采用噪声干扰、阻塞干扰等技术。噪声干扰通过发射随机噪声信号，淹没敌方的有用信号。阻塞干扰则通过发射连续的大功率信号，阻塞敌方的通信频段或雷达频段。

（6）欺骗干扰

欺骗干扰是一种更加高级的干扰手段。通过发射与敌方信号相似的假信号，误导敌方的电子设备，使其产生错误的判断和决策。这包括采用假目标干扰、诱饵干扰等技术。假目标干扰通过发射模拟敌方目标的信号，使敌方雷达产生虚假目标。诱饵干扰则通过发射与己方无人机相似的信号，吸引敌方的火力，保护己方无人机的安全。

（7）智能干扰

随着人工智能技术的发展，智能干扰成为无人机电子对抗平台的一个重要发展方向。智能干扰可以通过对敌方电子信号的分析和学习，自动调整干扰策略，提高干扰效果。例如，采用深度学习算法对敌方雷达信号进行分析，识别其工作模式和参数，然后自动生成相应的干扰信号。

18.4 应用场景

应用组网模式：

机载数据链端机可以按照训练要求，通过 2 架 TIM-W60 多旋翼无人机携带数据链端机与地面控制设备进行组网通信，构建通信链路，如下图所示。

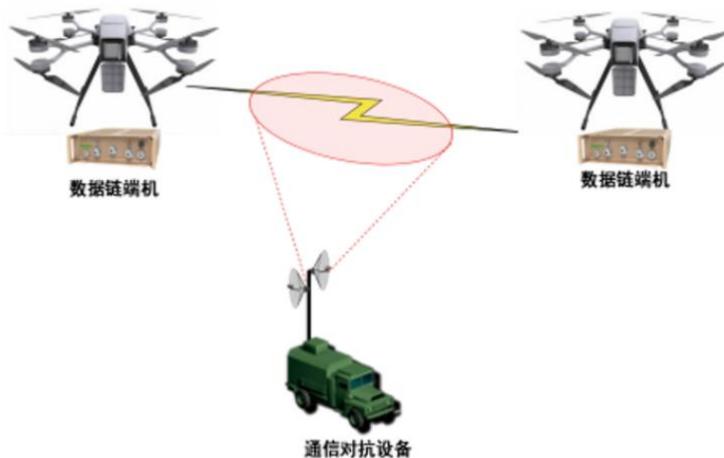


图 18-6 机载数据链端机对抗训练组网图

可实现应用功能：波形模拟功能：根据演习训练要求，能够模拟外军数据链信号；组网功能：能够模拟主要作战对手数据链通信组网模式；

干扰评估功能：能够接收干扰信号，评估靶标受干扰情况；消息传输功能：实现 Link16 的 J 序列(含自由报文信息)、Link4A 的 R/V 消息、Link11 的 M 消息标准传输；训练任务规划与数据处理能力：支持训练任务的规划、加载和运行，以及训练过程中数据适配和数据处理功能；训练信息接收上报功能：可扩展接入训练管理系统、基地导调系统或蓝军电子系统，根据训练需要上报设备工作状态、工作参数、被干扰情况、训练结果等信息并对干扰效果进行评估。

应用优势：高附加值：部署易窗-智能可重构操作系统，完全的软无平台，支持软件升级、波形扩展；业务驱动任务：产品完全模拟外军业务开发，便于操作和控制，适合士兵操作；仿真度高达 95%以上；

轻巧方便部署：轻巧便携，支持车载、机载、悬挂和手持等多种使用方式及应用场景。

应用组网模式：

短波、超短波标靶电台支持地地和地空部署两种方式，具备地地传播链路和地空传播链路模拟功能。

地地部署时，根据训练要求，靶标设备以车载或便携方式部署于满足通视条件的地面上，构建地地通信链路，如下图所示。



图 18-7 地空传输链路

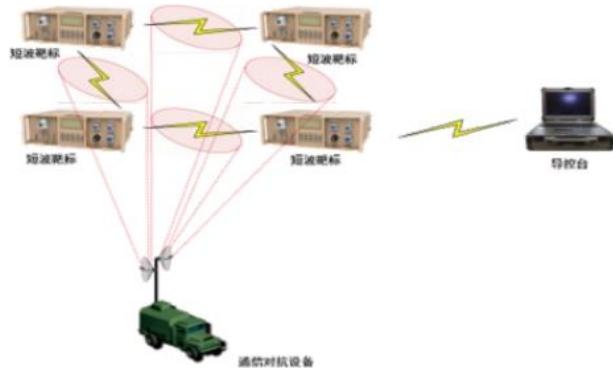


图 18-8 通信对抗训练靶标组网图

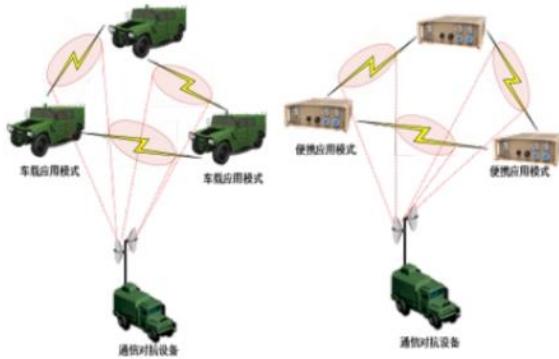


图 18-9 地地传输链路

可实现应用功能：波形模拟功能：根据演习训练要求能够模拟 SINCGARS、PR4G、EPLRS、HAVEQUICKII 等多种超短波通信信号波形；根据演习训练要求，能够模拟 MIL-STD-188-110A/B/C、MIL-STD-188-141 A/B/C、Link4A、Link11 等多种短波通信信号波形；组网功能：能够模拟主要作战对手超短波通信组网模式；干扰评估功能：能够接收干扰信号，评估靶标受干扰情况，同时可设置初、中、高 3 级抗干扰等级，可以应对不同程度的抗干扰通信，提升干扰训练条件；训练任务规划与数据处理能力：支持训练任务的规划、加载和运行，以及训练过程中数据适配和数据处理功能；训练信息接收上报功能：可扩展接入训练管理系统、基地导调系统或蓝军电子系统，根据训练需要上报设备工作状态、工作参数、被干扰情况训练结果等信息。

应用优势：高附加值：部署煩窗-智能可重构操作系统，完全的软无平台，支持软件升级、波形扩展；业务驱动任务：产品完全模拟外军业务开发，便于操作和控制，适合士兵操作；仿真度高达 95%以上。

18.5 实战效能

时代星光电子对抗智能无人机系统的整体性能优异，主要体现在：

- (1) 响应速度快。无人机起飞准备仅需 5 分钟，10 分钟内可抵达 30 公里外的预定空域，快速形成对敌压制。
- (2) 打击精度高。得益于高精度定位与瞄准技术，无人机对敌关键

节点实施点对点"金钱战",最大程度消耗敌有生力量。

(3) 作战半径大。在不依赖卫星导航的情况下,无人机仍可利用惯导等自主导航手段,最大作战半径达 30 公里,满足纵深作战需求。

(4) 生存能力强。凭借出色的隐身能力和灵活的机动性能,无人机能有效规避敌防空火力,在复杂战场环境中安全执行任务。

某次演习中,时代星光电子对抗无人机充分展示出其智能作战能力。两架无人机协同出击,仅用时 5 分钟就探测到敌方雷达方位并实施精确干扰,致其战场感知能力骤降 80%以上。随后,无人机根据敌部署变化自主调整干扰策略,连续 6 小时对敌雷达实施有效压制,最终助力红方遂行战斗任务,创造了无人参与环境下的优异战绩。

18.6 经验启示

时代星光电子对抗智能无人机系统的成功研制,为智能装备走向战场提供了宝贵经验:

(1) 体系化设计至关重要。作为一个涉及复杂技术的系统工程,电子对抗无人机必须坚持体系化设计思路,统筹各单项技术发展,最大限度发挥整体效能。

(2) 实战化是根本要求。电子对抗无人机从设计之初就聚焦实战需求,针对作战样式和环境开展针对性研究,在逼近实战的环境中打磨提升,确保在真正的战场发挥作用。

(3) 智能化是大势所趋。人工智能技术深度嵌入无人机平台、电子对抗设备乃至整个作战体系,成为提升作战效能的有力抓手,标志着电子战装备进入智能时代。

(4) 产学研用一体化是重要路径。电子对抗无人机集成了机、电、算、控等多学科尖端技术,必须依靠产学研用紧密结合,加速技术成果转化,形成设计、试验、应用的协同创新闭环。

18.7 结语

电子对抗无人机作为未来战场的"智能利器",代表了电子战装备

发展的重要方向。时代星光结合无人机与人工智能技术,实现了电子战从单一装备、手工操控向智能协同作战的跨越式发展。随着系统不断迭代升级,未来有望在信息化战争中发挥更大作用,成为制胜战场的决定性力量。这对各军兵种加速向智能化作战力量转型具有重要启示意义。

第十九章 典型自适应教育学习智能系统剖析

19.1 Squirrel AI 自适应学习智能系统

19.1.1 引言

随着在线教育的快速发展,自适应学习迎来了新的机遇。Squirrel AI 是由联想与华渔教育合力打造的新一代 K12 智能教育平台,旨在利用人工智能技术实现精准教学和个性化学习,让每个学生都能获得最适合的学习内容和学习节奏,最大限度发挥学习潜力。

19.1.2 系统架构

Squirrel AI 自适应学习智能系统采用模块化架构设计,主要由学习环境、知识图谱、学生模型、教学引擎、内容资源库五大模块组成。

学习环境基于联想智能终端和智能教室等软硬件,为师生构建沉浸式、交互式的学习空间。学生可通过平板电脑等移动终端访问在线学习系统,教师则利用大屏幕、电子白板等设备实施教学管理。

知识图谱是整个系统的核心,对学科知识进行本体化表示和语义化组织。通过知识点拆分、先导后继关系定义等,将知识体系形成规范化、结构化的有向图谱,并不断更新优化。

学生模型动态建立学生的多维画像,涵盖知识掌握水平、学习风格、认知特征等关键要素。系统通过分析学生行为数据不断修正、细化学生模型,使之成为自适应学习的重要依据。

教学引擎是自适应学习的大脑,集成了深度知识追踪、强化学习、优化算法等多种 AI 技术。系统根据学生模型和教学目标,结合知识图

谱中的约束规则,自动规划个性化学习路径,实时推荐最优学习资源。

内容资源库涵盖海量优质的学习资源,包括微课视频、习题试卷、虚拟实验、评估测试等多种类型。所有资源均进行了知识图谱映射和语义标注,支持灵活的组织调用。



图 19-1 Squirrel AI 自适应学习智能系统架构图

19.1.3 关键技术

(1) 知识图谱构建

Squirrel AI 系统构建了覆盖 K12 主要学科的知识图谱,目前规模已超过 3 万个知识点,50 万条知识关联。知识点按照一定的颗粒度进行划分,并定义知识点间的先导后继、同义互斥等逻辑关系。知识点与具体的教学资源相关联,形成配套的习题、微课等。

(2) 深度知识追踪

针对每个学生的知识掌握情况,Squirrel AI 应用深度知识追踪(Deep Knowledge Tracing)算法,对其知识状态进行实时诊断。该算法基于深度学习,通过分析学生答题序列预测其对特定知识点的掌握概率。与传统知识追踪相比,DKT 能建立学生知识状态的长期依赖,大幅提升了预测精度。

(3) 强化学习路径优化

为给每位学生规划出最优学习路径,Squirrel AI 将其建模为一个序贯决策问题,引入强化学习范式求解。系统通过与学生的长期互动,根据学生反馈动态调整推荐策略,在海量的学习路径组合中搜索出最优策略函数,使学生的整体学习效果最大化。

(4) 学习行为挖掘分析

Squirrel AI 全程采集学生的行为数据,包括答题用时、答题轨迹、视频观看时长等,形成学习行为的多维数字描述。通过聚类、关联、异常检测等数据挖掘技术,系统从行为数据中发现学生的学习特点,并据此优化教学决策,实现因材施教。

19.1.4 应用效果

自 2014 年上线以来,Squirrel AI 已服务数百万中小学生,积累了 10 亿+条学习行为数据。实证研究表明,得益于精准的学情诊断和个性化教学,使用 Squirrel AI 系统的学生学习效率平均提升了 3 倍。

以北京师范大学附属小学的应用为例,该校引入 Squirrel AI 后,小学数学平均成绩提高了 11%,优秀率从 48% 升至 78%。学生的学习兴趣也明显提升,主动学习时间延长 50%。对教师而言,Squirrel AI 极大减轻了备课压力,单节课备课时间从 1.5 小时降至 0.5 小时。

19.1.5 经验借鉴

Squirrel AI 自适应学习系统的实践为智能教育的发展提供了有益启示:

(1) 坚持需求导向,聚焦学生个性化学习诉求。Squirrel AI 立足"因材施教"的教育理念,利用智能技术满足学生个性化、精细化的学习需求,为自适应学习树立了标杆。

(2) 构建知识图谱,夯实智能教学的语义基础。知识图谱是 Squirrel AI 的核心资源,有效支撑了知识诊断、资源调度、路径规划等关键环节。这为智能教育系统的知识建模提供了样板。

(3) 发挥人机协同,提升教与学整体效能。Squirrel AI 并非简单替代教师,而是通过可视化分析、行为建议等赋能教师因材施教。这种"AI+教师"的协同范式值得借鉴。

(4) 注重应用创新,拓展智能教育生态。在夯实技术基础的同时,Squirrel AI 还积极探索商业模式创新,面向 K12 教育机构、在线教育平台等提供 SaaS 服务,有力拓展了智能教育应用场景和产业边界。

19.1.6 结语

随着人工智能和教育的加速融合,智能自适应学习系统正成为教育变革的新引擎。Squirrel AI 依托前沿 AI 技术重塑学习方式,以知识图谱、学生画像、智能决策为支柱,构建了全流程个性化学习闭环。展望未来,Squirrel AI 将进一步完善自适应学习模型,聚焦培养创新性、开放性思维能力,助力因材施教向纵深发展,让每个学生都能成为更好的自己。这为我国教育现代化转型升级提供了一种智能化的路径参考。

19.2 Knewton 高等教育智能自适应学习系统

19.2.1 引言

高等教育是培养创新人才的关键阶段。然而,传统的"一刀切"教学模式难以适应学生日益多样化的学习需求。美国教育科技公司 Knewton 创新性地提出智适应学习理念,利用大数据和人工智能技术,为每个大学生提供个性化、精准化的智能教学服务,引领了智慧教育变革的新潮流。

19.2.2 系统架构

Knewton 智能自适应学习系统采用面向服务的分层架构,主要由数据层、分析层、推荐层、应用层构成。

数据层负责多源异构教育数据的采集、清洗和管理,涵盖学生档案、教学资源、学习行为、考试成绩等各类数据。通过将数据汇聚到统一的教育数据仓库,为数据的关联分析奠定了基础。

分析层利用机器学习、教育数据挖掘等技术,深入分析学生学情和认知特征。一方面,通过知识组件分析将学科知识解构为独立单元;另一方面,通过学习认知诊断对学生知识掌握水平进行多维评估。由此形成动态更新的学生学习画像。

推荐层基于学生模型和领域知识,应用协同过滤、优化算法等方法,为学生智能推荐个性化的学习内容。系统全面考虑学生的先备知识、学习风格、认知水平等因素,制定匹配度最高的学习路径和进度。

应用层通过 Open API 等开放接口,支撑各类应用的灵活开发。典型应用包括自适应练习、自适应考试、智能导师等。应用数据又返回数据层,用于持续优化学生模型和推荐策略,由此形成智适应学习的闭环。

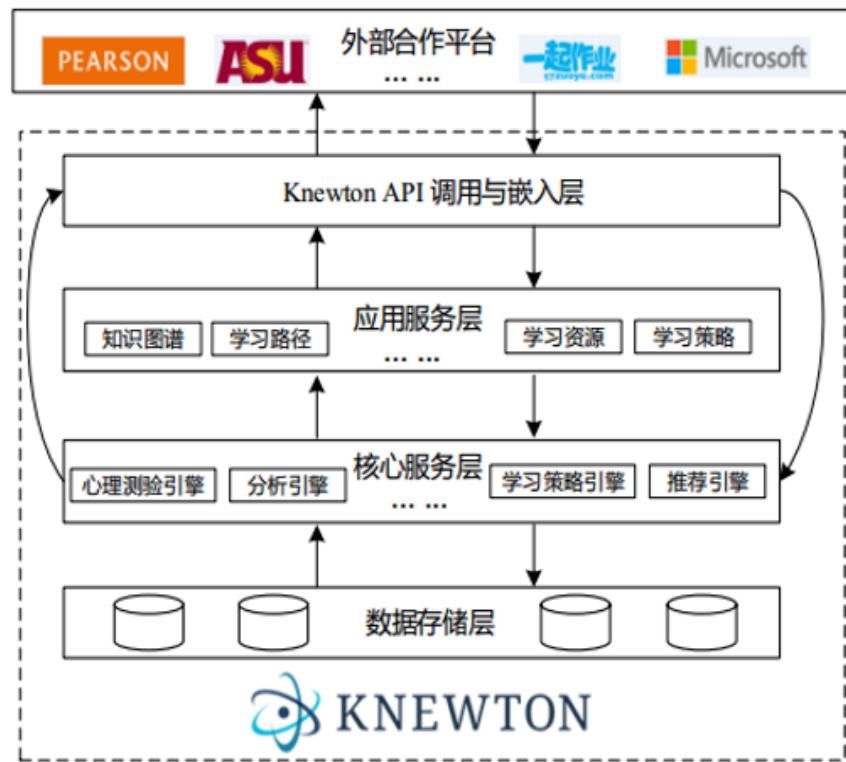


图 19-2 Knewton 高等教育智能自适应学习系统架构图

19.2.3 关键技术

(1) 知识图谱构建

Knewton 智能自适应学习系统针对每门课程构建知识图谱,对知识点进行语义化、结构化表示。通过语义分析技术,平台可自动将教材、课件、试题等教学资源映射到知识图谱,并不断更新扩充知识图谱。在此基础上,平台还能推理知识点之间的关联,并据此优化学习路径。

(2) 学情诊断与建模

Knewton 智能自适应学习系统应用贝叶斯知识追踪、多维项目反应理论等方法,对学生的知识掌握水平进行精准诊断。在对学生答题行为进行追踪的同时,平台还整合其他维度的学习数据,构建涵盖认知

能力、元认知策略、非认知因素的多维学生模型,实现全面刻画学生学情。

(3) 推荐优化算法

Knewton 智能自适应学习系统采用启发式搜索和优化组合相结合的方法,在海量学习资源中实时推荐最佳学习路径。系统先用蒙特卡洛树搜索等启发式算法生成候选路径集,然后用整数规划进行组合优化,同时考虑学习收益、时间成本、认知负荷等多种目标,最终规划出整体最优的个性化学习方案。

(4) 交互式可视化分析

为增强教学智能的可解释性,**Knewton** 智能自适应学习系统提供各类交互式可视分析工具。比如通过知识树图展示学科知识结构,通过认知雷达图反映学生知识掌握情况,通过学情进阶曲线比较学习进程差异。教师可据此洞察学情,改进教学;学生也能自我监控,调整策略。可视化极大增强了智适应学习的效果。

19.2.4 应用成效

Knewton 智能自适应学习系统目前已与全球 1000 多所高校合作,积累了超过 250 门课程资源。以亚利桑那州立大学为例,2011 年该校引入 **Knewton** 平台助力数学教学。数据显示,使用平台的学生通过率比未使用的学生高出 18%,且学习时间缩短 25%。墨西哥国立理工大学应用 **Knewton** 后,学生的平均学习效率提高了 17%,师生互动频次增加 24%。这些都有力印证了智适应学习的显著成效。

19.2.5 经验启示

Knewton 智能自适应学习系统的发展历程揭示了高等教育智能化变革的特点和规律:

(1) 坚持以学生为中心,着眼提升个性化学习体验。**Knewton** 平台充分尊重学生的个体差异,利用智能技术精准画像,为每个学生提供量身定制的教学服务,促进学生的个性化发展。这是智慧教育的题中应有

之义。

(2)注重多元数据整合,提升全流程育人数字化水平。**Knewton** 智能自适应学习系统广泛采集校园全场景数据,从选课、教学、作业、考试、评价各环节多维度分析学情,构建起完整的数字化教学闭环,为智慧校园建设树立了标杆。

(3)发挥人机智能协同,提高教学智能在真实场景中的适用性。**Knewton** 智能自适应学习系统注重发挥人机互补优势,通过可视化分析、教学辅助决策等赋能教师因材施教,既利用 AI 把握学生的共性规律,又发挥教师应对学生个体差异的独特作用。

(4)打造开放教育生态,拓展智能教育服务的广度和深度。**Knewton** 智能自适应学习系统坚持开放架构,为高校、内容提供商等提供智能教育服务,并与学习管理系统无缝对接,有效拓展了智能自适应学习在高校教学各场景的渗透,加快了智慧校园建设进程。

19.2.6 结语

在人工智能加速教育变革的大潮中,**Knewton** 智能自适应学习系统引领了高等教育的个性化学习浪潮,为推进信息技术与教育教学深度融合提供了可资借鉴的范式。**Knewton** 智能自适应学习系统用知识图谱构建智能教学的语义基础,用多模态学情诊断模型匹配差异化学习需求,用智能优化算法精准推送个性化学习资源,由此形成以学习者为中心的智适应教学新生态。未来,随着认知智能、情感计算等前沿技术的进一步发展,**Knewton** 智能自适应学习系统有望实现从智能教学到智慧教育的跨越,培养具有创新精神和实践能力的高素质人才,为高等教育现代化注入新动能。这为推进我国高等教育变革创新提供了有益启示。

第二十章 典型智能辅助诊疗系统剖析

20.1 IBM 沃森 AI 辅助肿瘤诊疗系统

20.1.1 引言

肿瘤已成为危害人类健康的头号杀手。但肿瘤诊治水平参差不齐,优质医疗资源严重短缺,成为制约肿瘤防控成效的瓶颈。IBM 沃森作为认知计算领域的先行者,创新性地将人工智能技术引入肿瘤诊疗,研发出一款辅助医生精准诊治癌症的智能系统。沃森系统汇聚全球顶尖肿瘤中心的医疗大数据和诊疗知识,通过深度学习、自然语言处理等技术,协助医生快速找到个体化的最佳治疗方案,大幅提升肿瘤诊疗效率和质量。

20.1.2 系统架构

IBM 沃森辅助肿瘤诊疗系统采用以认知计算为核心的分层架构,主要由基础层、数据层、认知层、应用层组成。

基础层包括服务器、存储、网络等 IT 基础设施,以及支撑认知计算的 Hadoop、Spark 等大数据平台。系统采用混合云架构,既能利用公有云的弹性资源,又能确保医疗数据的隐私安全。

数据层汇聚来自医院信息系统、临床试验、医学文献、药物说明书等海量异构数据。通过数据采集、清洗、存储、共享等过程,构建高质量的肿瘤大数据资源池,为认知分析提供数据支撑。

认知层以 DeepQA 认知计算引擎为核心,融合机器学习、自然语言处理、知识表示等技术,从医疗大数据中理解、关联、推理,形成接近人类医生的认知能力。在此基础上,系统构建起覆盖诊断、治疗、用药、随访全流程的肿瘤诊疗知识图谱。

应用层面向患者全周期管理,提供智能导诊、诊断推荐、治疗方案优选、预后评估等一系列智能应用。医生通过人机对话界面与沃森进行智能交互,系统根据患者的基因、病理、影像、用药等信息,给出个性化诊疗方案,并呈现循证医学证据。

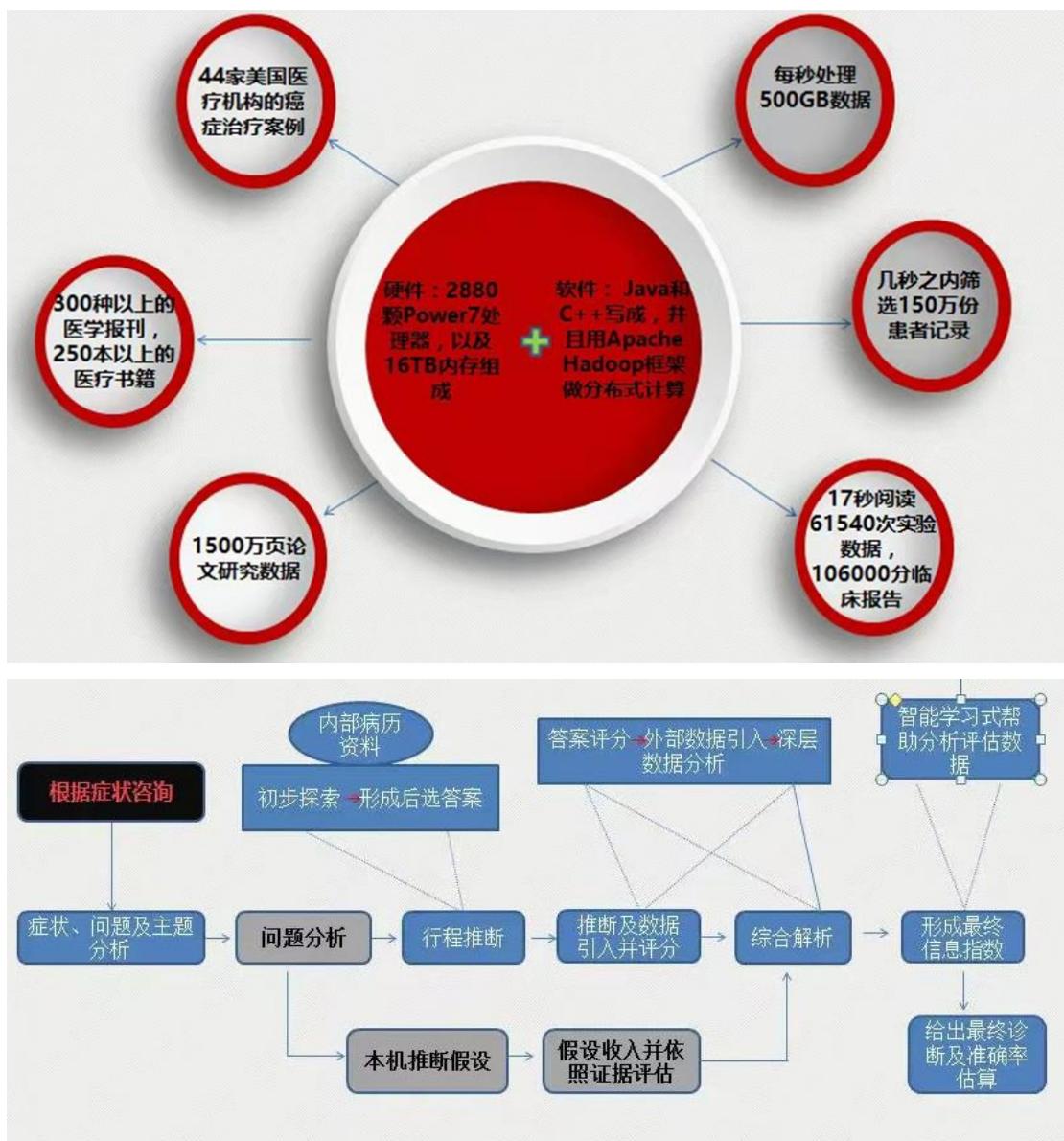


图 20-1 沃森辅助诊疗系统架构图

20.1.3 关键技术

(1) 医疗知识图谱构建

沃森系统利用自然语言处理和机器学习技术,从医学教材、诊疗指南、临床病例、学术文献等非结构化文本中提取医学概念、实体和语义关系,构建起涵盖疾病、药物、检查、手术、临床试验等类型的医疗领域本体和知识图谱,奠定智能诊疗的知识基础。

(2) 患者画像分析

针对每个患者的多源异构医疗数据,沃森系统应用语义映射、深

度表示等技术,提取患者的临床表型、基因组特征、生活方式等关键信息,构建全维度患者画像。在此基础上,系统将患者特征与知识库进行语义关联、相似度分析,快速锁定疾病分型,为诊疗决策提供精准输入。

(3) 循证医学推理决策

沃森系统整合患者自身信息和医学证据知识,应用基于实例和规则的推理、深度强化学习等人工智能技术,优化诊疗决策。系统首先从相似病例和循证指南中生成备选治疗方案,并根据药物适应症、禁忌症等过滤掉不合适方案。然后对候选方案进行利弊权衡,预测疗效、风险和成本,给出个性化诊疗建议。

(4) 自然语言人机交互

为方便医生使用,沃森系统支持自然语言交互。医生可用提问的方式录入患者信息,描述症状体征。基于医疗语义分析和意图识别,系统理解医生表达的真正诊疗需求。诊疗方案推荐后,医生还可就系统给出的循证医学证据提出质疑,沃森则对证据溯源作出解释说明,增强决策透明度。

20.1.4 应用效果

IBM 沃森目前已在全球范围内的数百家医疗机构投入使用,临床应用效果显著。

以印度马尼帕尔肿瘤中心为例,引入沃森系统后,该院医生处理单个病例的平均时间从 20 分钟缩短至 5 分钟,诊断准确率从 79% 提高到 96%。对 7000 余份病历进行回溯性验证,沃森给出的治疗方案与肿瘤专家达到了 93% 的一致性。通过应用沃森,该院不仅显著提升了诊疗效率,降低了医疗成本,而且打破了地域限制,让更多患者获得了优质诊疗服务。

在辅助药物研发方面,沃森通过文献挖掘、药物重定位等,协助医药企业发现潜在的药物治疗新适应症和新作用机制,研发周期缩短近 40%。此外,沃森还助力多家制药公司开展 I 期临床试验受试者招募,

招募效率提高 50%。

20.1.5 经验借鉴

IBM 沃森辅助诊疗系统开创了人工智能助力肿瘤精准医疗的新模式,其发展经验值得借鉴:

(1) 聚焦临床需求,创新智能诊疗应用场景。沃森瞄准肿瘤诊疗面临的痛点难点,针对筛查、诊断、治疗、药物研发等环节开展智能化创新应用,以需求为牵引推动新兴技术在医疗领域的落地。

(2) 汇聚优质数据,夯实智能诊断的大数据基础。沃森积极与权威医疗机构合作,获得高质量的临床数据、循证指南等资源,形成了辅助诊疗的核心数据资产,为发挥人工智能的威力提供了前提。

(3) 增强人机协同,提升智能系统的可用性。沃森注重发挥人机互补优势,辅助而非取代医生。通过自然语言交互、可视化结果呈现等方式,有效融入医生工作流程,将智能嵌入诊断决策全过程,形成医生与 AI 协同诊疗的新范式。

(4) 开放创新机制,构筑智慧医疗产业生态。沃森采用开放式架构,面向医院、药企、科研机构等提供 API 接口,助力智慧医疗产业链协同创新。由点及面的生态化发展路径,加速人工智能在医疗健康各领域的渗透。

20.1.6 结语

IBM 沃森辅助诊疗系统充分展现了认知计算引领医疗变革的巨大潜力。未来,随着认知智能、精准医疗、智慧医院等新兴理念和技术的快速发展,沃森有望进一步突破人机壁垒,成为提高诊断效率、优化治疗方案、助力药物研发、创新医疗服务的得力助手。这不仅为提升我国肿瘤诊疗水平、打造智慧医疗标杆应用提供了路径借鉴,更为人工智能赋能医药产业变革创新指明了方向,对于推进健康中国建设、满足人民日益增长的优质医疗服务需求,具有十分重要的现实意义。

20.2 谷歌 DeepMind 智能眼疾诊断系统

20.2.1 引言

眼科疾病是威胁人类健康的常见病和多发病。但由于眼科医生资源短缺,优质眼科诊疗服务可及性不足。DeepMind 公司作为全球人工智能领军企业,创新性地将深度学习技术引入眼疾诊断,研发出一套智能辅助诊断系统。该系统可自动分析眼底照片,快速、准确地识别出糖尿病视网膜病变、青光眼、老年性黄斑变性等数十种常见眼病,诊断效率和准确率均优于人类眼科专家,有望缓解眼科诊疗资源短缺难题,推动眼疾防控水平的整体提升。

20.2.2 系统架构

DeepMind 眼疾智能诊断系统遵循端到端学习理念,以深度神经网络为核心,通过特征提取、分类诊断、解释说明等环节,实现眼疾的自动化、智能化诊断。其系统架构如下:

首先,利用光学相干断层扫描(OCT)设备采集视网膜横截面图像,获得反映视网膜形态结构的高分辨率数据。OCT 图像经过标准化预处理后,输入深度学习网络。

深度学习网络由两级级联网络构成,实现眼部器官定位与眼疾分类诊断。第一级网络采用编码器-解码器架构的全卷积网络进行语义分割,从 OCT 图像中自动勾勒出视网膜、视盘、黄斑等解剖结构。第二级网络采用 Inception-v3 等深度卷积网络进行疾病分类,给出糖网、青光眼等疾病诊断结果。

为增强诊断可解释性,系统进一步对深度学习网络的决策过程和依据进行可视化。利用类激活图(CAM)等方法,系统生成热图直观呈现疾病相关的显著区域,还原网络诊断推理的思路。基于自然语言处理技术,系统结合诊断证据自动生成诊断报告,供医生和患者参考。

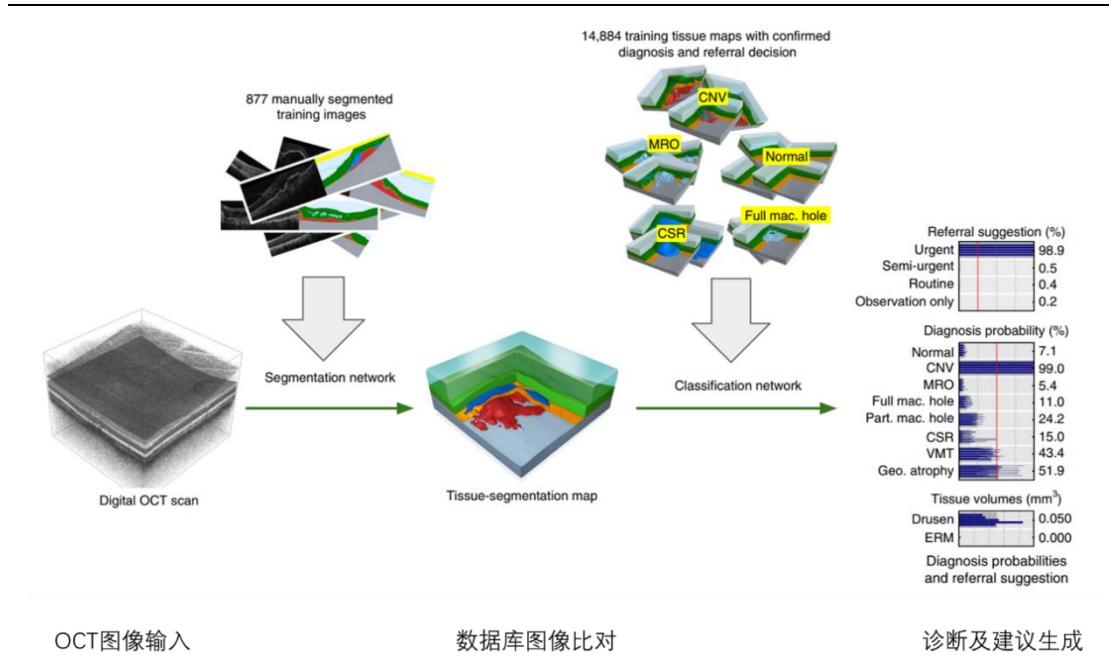


图 20-2 眼疾智能诊断系统架构图

20.2.3 关键技术

(1) 眼疾知识库构建

医学知识库的质量直接决定智能诊断的上限。DeepMind 系统采用知识驱动与数据驱动相结合的方法,构建眼科疾病诊断领域知识库。一方面,通过自然语言处理技术从权威的眼科教科书、诊疗指南中提炼诊断规则;另一方面,利用机器学习从临床病例数据中自动习得诊断经验。知识库涵盖病理、药理、影像、流行病学等多维度医学知识,为眼疾智能诊断提供了坚实的知识基础。

(2) 眼底图像语义分割

精准识别出 OCT 图像中的视网膜、视盘、黄斑、视神经等解剖结构,是实现眼疾定位诊断的前提。DeepMind 系统创新性地采用 U-Net 等编码器-解码器架构的全卷积网络,端到端学习解剖结构的形态、位置、边界等空间特征,实现像素级语义分割。相比传统方法,该网络避免了手工设计特征,可自动学习更加丰富、鲁棒的视网膜解剖表示。此外,还引入对抗生成网络(GAN),从有限的标注样本中自动生成训练数据,提升分割模型的泛化性能。

(3) 眼疾分层诊断

眼疾诊断需要在眼底图像海量的视觉特征中快速筛选出疾病相关的关键特征。DeepMind 系统采用迁移学习方法,将在 ImageNet 等大型视觉数据集上预训练的 Inception-v3 等深度卷积网络,迁移到眼疾 OCT 图像分类任务。相比从头训练,迁移学习可显著加速模型优化速度,提高诊断准确率。此外,系统还创新性地提出分层诊断策略,借鉴医生诊断思路,先识别出疾病大类,再进一步细分疾病亚型,既降低了模型复杂度,又与临床诊断逻辑相符。

(4) 临床辅助决策

诊断效率和准确率固然重要,但要让 AI 系统真正融入临床诊疗全流程,还需要赋予其可解释、可交互的智能。DeepMind 系统采用 Grad-CAM 等可视化算法,直观呈现疾病相关的显著区域,还原网络诊断推理过程,使诊断结果更加透明可信。此外,系统还支持医生通过人机对话调整推理过程,引入医生经验知识,并及时提供诊断依据,增强人机互动与协同。最后,系统可自动生成规范化诊断报告,为临床诊疗全流程提供智能化辅助。

20.2.4 典型应用

DeepMind 眼疾智能诊断系统目前已在英国 Moorfields 眼科医院等机构开展了大规模应用验证,诊断效果优于人类眼科专家。

以 Moorfields 眼科医院的应用为例,该院拥有欧洲最大的眼科医疗数据集,包含近 15000 名患者的 OCT 图像。实验表明,DeepMind 系统对视网膜病变的诊断敏感度达到 98.7%,特异度达到 99.3%,而人类专家组最佳成绩为敏感度 96.6%、特异度 97.5%。此外,针对青光眼、黄斑变性等疾病的诊断,DeepMind 系统的整体诊断准确率也远超眼科专家组 10 个百分点以上。这些结果有力证明了该系统在眼疾诊断领域的巨大应用前景。

除了诊断效能,在提升诊断效率方面 DeepMind 系统也表现抢眼。

在 Moorfields 眼科医院应用过程中,系统在 10 秒内即可完成单个病例的诊断。相比之下,若由眼科医生诊断,平均每个病例需耗时 15 分钟。借助该系统,医生日均诊断病例数由 100 提升到 800,有效缓解了眼科医疗服务供需矛盾。

20.2.5 经验启示

DeepMind 眼疾智能诊断系统代表了"AI+医疗影像"赋能疾病诊断的技术前沿,其发展经验值得广泛借鉴:

(1) 聚焦诊断,打造智能医疗垂直领域应用标杆。DeepMind 系统聚焦眼科疾病的智能诊断,充分考虑垂直领域的特点和诊疗需求,优化网络架构和算法策略,使系统与临床诊疗实践深度融合,提供精准、高效的诊断服务,树立了智能医疗垂直应用标杆。

(2) 联合权威医疗机构,构建高质量的医学知识与数据资源。

DeepMind 与 Moorfields 等顶级眼科医院开展深度合作,获得了丰富、完备的临床数据资源。在专家知识指导下进行数据标注,进一步提升数据质量。优质的医学知识与数据,为深度学习系统性能的提升和应用转化提供了坚实基础。

(3) 重视人机协同,将诊断智能嵌入医疗全流程。DeepMind 系统并非孤立的诊断工具,而是通过诊断可视化、人机对话、诊断报告生成等,与医生形成交互闭环,实现诊断全流程智能辅助。系统在发挥人工智能优势的同时,也重视医生专业判断,注重人机互补,打造协同诊疗新模式。

(4) 拥抱前沿,加速人工智能创新成果向临床应用转化。DeepMind 充分运用深度学习、迁移学习、知识图谱等前沿人工智能技术,并根据眼科诊断特点进行针对性改进,加速技术从实验室走向医院。同时,通过开展多中心临床试验,系统验证智能诊断系统安全性和有效性。这为其他智能诊断系统的应用推广提供了路径参考。

20.2.6 结语

谷歌 DeepMind 眼疾智能诊断系统是计算机视觉和医学影像 AI 跨界融合的典范。该系统利用深度学习等前沿技术,使计算机像人类医生一样"看懂"医学影像,从海量复杂的视觉信息中准确识别出疾病特征,并可视化诊断推理过程,极大拓展了人类医生的诊断视野和效率。可以预见,随着医学影像大数据的进一步积累,以及计算机视觉等技术的日益精进,DeepMind 系统有望在更广泛的眼科疾病诊断中得到应用,并扩展到放射、病理等医学影像大数据驱动的其他临床科室。这不仅为缓解我国优质医疗资源总量不足、区域分布不均的矛盾提供了新思路,也为提升医疗服务的可及性、普惠性贡献了"AI 力量",对于推进健康中国建设意义重大。

20.3 腾讯觅影 AI 辅助诊断系统

20.3.1 引言

近年来,随着人口老龄化加剧,恶性肿瘤、心脑血管疾病等慢病发病率持续攀升。面对医学影像数据井喷式增长,传统的手工诊断方式效率低下、准确率不高,医疗资源严重短缺与患者就诊需求不断增长之间的矛盾日益突出。腾讯公司旗下的觅影 AI 辅助诊断系统,以医学人工智能技术为支撑,可对 CT、X 光、超声、病理切片等各类医学影像进行快速、精准的智能诊断分析,为放射科、超声科、病理科等影像科室诊断效率和质量的整体提升提供有力支撑。

20.3.2 系统架构

腾讯觅影采用模块化架构设计,主要由影像数据处理、智能分析、知识积累、应用服务四大模块构成。

影像数据处理模块负责多源异构影像数据的标准化、结构化处理,并进行数据清洗、脱敏、标注等预处理,形成高质量的学习样本集。同时,该模块还支持对典型病例的挖掘和筛选,为深度学习模型训练提供优质数据。

智能分析模块以深度学习为核心,集成图像分割、目标检测、语义分类等算法模型,可实现病灶的自动定位、分割、分类和分期诊断。针对不同的器官和疾病,平台分别构建了器官解剖、病灶识别等细分模型,可实现肺、肝、乳腺、甲状腺、前列腺等器官 60 余种常见病种的精准诊断。

知识积累模块基于自然语言处理、知识图谱等技术,从医学教材、诊疗指南、权威文献等汲取诊疗专家知识,建立起覆盖疾病、症状、药品、治疗等维度的医疗知识库。并将知识库进一步优化为人机易读的知识图谱,为智能诊断的可解释性提供支撑。同时,平台还支持专家反馈新知识、新经验,持续更新迭代。

应用服务模块面向医院、体检机构等提供 SaaS 化智能诊断服务。医生可通过统一的 Web 界面,一站式完成病例上传、诊断分析、报告生成等诊断流程,并可与 PACS 等医院信息系统无缝对接。该模块还集成了新病例自动标注、模型在线更新等诊断闭环机制,可持续提升系统性能。

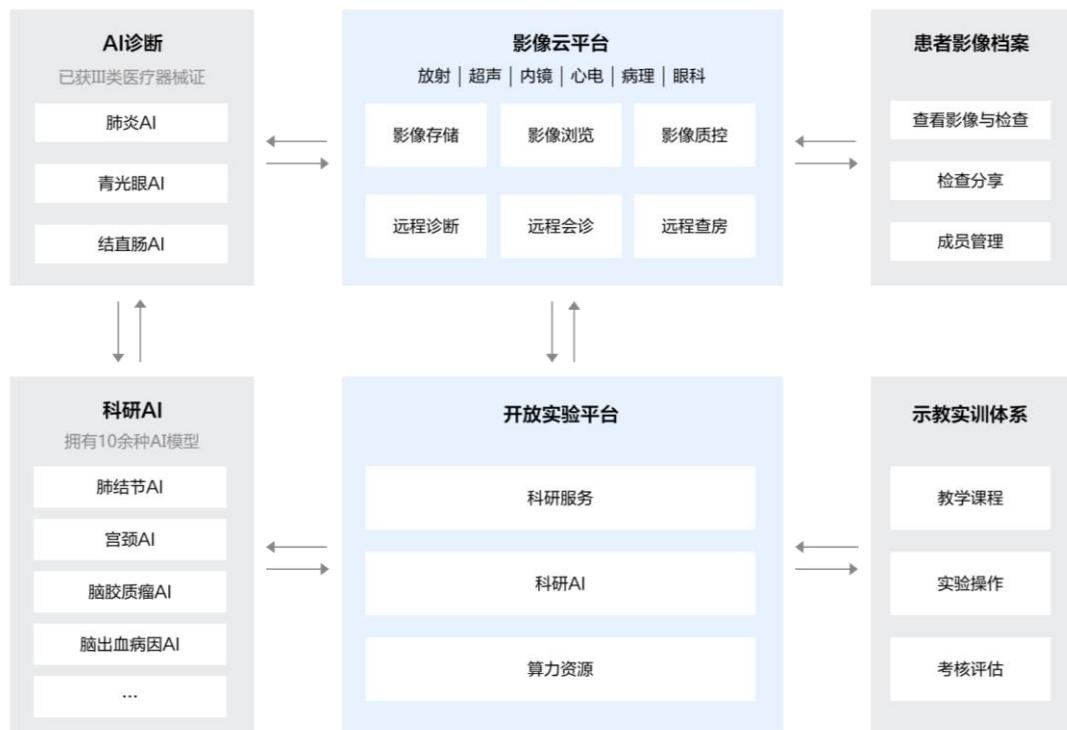


图 20-3 腾讯觅影 AI 辅助诊断系统架构图

20.3.3 关键技术

(1) 弱监督学习

医学影像数据获取成本高、专家标注工作量大,是制约影像 AI 发展的瓶颈。针对小样本学习难题,觅影平台创新采用了弱监督学习方法。该方法利用弱标注信息(如病例文本)自动生成伪标签,再利用少量专家精标注数据进行微调,从而大幅降低了对标注数据的依赖,加速了 AI 模型的开发迭代。

(2) 器官解剖与病灶检测

觅影平台采用 Mask R-CNN、YOLOv3 等目标检测算法,实现病灶准确定位。针对肺部等器官的解剖特点,平台还创新性地提出了融合解剖先验知识的多任务学习网络,端到端联合学习器官定位、分割、分类,在提升检测精度的同时,大幅降低了计算开销。

(3) 疾病分层诊断

觅影平台模仿医生诊断思路,采用分层诊断策略。首先利用 DenseNet、Xception 等深度卷积网络,对病灶的恶性、良性进行粗粒度分类;针对恶性病灶,再进一步采用 EfficientNet 等轻量级网络,结合病理分级、临床分期知识,对恶性程度进行细粒度分类,从而在准确性与计算效率之间达成平衡。

(4) 医学知识图谱

觅影平台构建了涵盖疾病、症状、体征、检查、治疗、用药等多维度的医学知识图谱。图谱节点通过医学概念链接,边则表示概念间的语义关联。系统诊断推理过程可映射到图谱上的因果推理,使诊断逻辑清晰透明,具备可解释、可追溯、可质疑的能力。同时,图谱不断吸纳专家反馈,持续进化。

(5) 人机协同诊断

觅影平台探索形成了"机器初筛、医生复核"的人机协同诊断模式。

系统通过自然语言处理实现病例自动标注、质控审核,通过医学影像分析给出初筛结果,再由医生复核修订,形成最终诊断。该模式发挥了AI的计算优势和医生的专业经验,实现机器智能与人类智慧的互补。

20.3.4 应用成效

觅影平台目前已在国内 100 余家三甲医院落地应用,并在肺结节、肺炎、乳腺癌、脑卒中、前列腺癌等疾病智能诊断领域取得了显著成效。

以肺结节诊断为例,觅影平台对恶性结节的检出率高达 97%,优于医生平均水平 8 个百分点。在某三甲医院 6000 余例低剂量肺部 CT 筛查中,觅影比医生多检出 140 例肺结节病例,有效降低漏诊。同时,借助该平台,医生日均诊断病例数从 300 例提升到 3000 例,阳性检出率从 1%提升到 3%以上,诊断效率提升近 10 倍。

在新冠肺炎疫情防控中,觅影发挥智能影像诊断优势,协助湖北、广东等地 140 余家医院开展病毒性肺炎与细菌性肺炎智能鉴别,单病例诊断仅需 2-3 秒,准确率达 96%,有力提升了核酸检测等临床诊断效率。疫情期间,觅影诊断报告累计调用量突破 100 万。

此外,在精准诊断前列腺癌方面,觅影对 MRI 图像的敏感度和特异度均达 95%以上,而人类医生的平均诊断敏感度为 87%。在乳腺 X 线智能筛查中,觅影对乳腺癌的检出率比医生提升 5 个百分点。这些应用实践有力印证了觅影智能诊断技术的先进性、有效性和应用价值。

20.3.5 经验启示

觅影 AI 辅助诊断系统的发展历程,为推动人工智能与医疗产业融合发展提供了有益借鉴:

(1) 聚焦应用,打造面向临床诊疗全流程的智能化解决方案。觅影平台聚焦医学影像诊断这一核心场景,针对诊断业务痛点,提供智能化、全流程的解决方案。从数据采集、影像分析到报告生成,平台对诊断业务形成全链条赋能,真正助力诊断效率与质量的提升。

(2) 协同创新,构建政产学研医多方合力的发展生态。在发展过程中,觅影主动联合政府、医院、高校、企业等多方力量,围绕数据共享、技术攻关、标准制定、人才培养等方面广泛开展合作,加速技术成果的转化落地,打造可持续发展的良性生态。

(3) 融合发展,将人工智能创新成果与传统医疗体系深度整合。觅影系统并非简单替代医生,而是与医生形成智能交互,将诊断经验知识与机器学习相融合,建立人机协同的诊疗新模式。同时,平台与医院信息系统、医保支付体系等深度对接,服务于分级诊疗、医联体建设,助力医疗服务供给侧改革。

(4) 开放共享,依托开放式 AI 平台汇聚全行业创新资源。腾讯觅影采用开放共享的发展理念,向医院、高校、创业公司等开放数据与模型,并在云端提供 SaaS 化智能诊断服务,让行业创新主体共同参与智能诊断模型的开发优化,携手医疗 AI 产品的落地推广,实现合作共赢。

20.3.6 结语

腾讯觅影 AI 辅助诊断系统开创了"AI+医学影像"融合创新的新局面,展现了人工智能提升医疗诊断效率与质量的巨大潜力。未来,随着 5G、大数据、云计算等新兴技术与智能诊断技术的进一步融合,觅影有望在更广泛的医学影像应用场景发挥更大价值,成为放射科、超声科、病理科等影像科室的"智慧大脑",为百姓提供更加高效、精准、普惠的智能诊断服务。同时,觅影积极布局基层医疗,让基层患者也能及时获得优质诊断,助力分级诊疗与医联体建设,为健康中国建设注入"AI 动能"。展望未来,智能影像诊断平台将成为医疗服务体系变革的重要突破口和原动力,驱动诊断新模式、新业态的持续涌现,为智慧医疗高质量发展开辟新蓝海。这对于推动我国医疗服务供给侧结构性改革,满足人民群众日益增长的多层次、个性化健康需求,意义深远。

20.4 阿里健康 ET 医疗大脑

20.4.1 引言

随着人口老龄化加剧,医疗资源供需矛盾突出,亟需创新服务模式,提升医疗服务的效率与公平性。阿里健康 ET 医疗大脑作为阿里巴巴布局医疗人工智能的旗舰产品,旨在利用数字化技术和人工智能手段,打造覆盖诊前、诊中、诊后全流程的智慧医疗服务体系,为大众提供可及、普惠的全生命周期健康管理智能系统。ET 大脑的推出,引领了"互联网+医疗健康"智能化升级的新路径,为促进医改持续深化、推动健康中国战略实施提供了新动力。

20.4.2 系统架构

阿里健康 ET 医疗大脑采用开放融合的分层架构,主要由感知层、数据层、模型层、服务层和应用层组成。

感知层汇聚来自医院 HIS、PACS 等业务系统和互联网终端的多源异构医疗数据,形成对医患全流程,覆盖问诊、检验、检查、诊断、治疗、随访等环节的全域数字化感知。感知层还整合可穿戴设备,采集患者的生理、行为数据,实现对个体健康状态的实时感知。

数据层在阿里云上构建医疗健康大数据平台,对异构数据进行采集、清洗、存储、治理,建立涵盖电子病历、医学影像、基因组学等数据类型的数据湖。平台采用国密算法、多方安全计算等技术,确保数据全生命周期安全。数据层同时支持第三方数据引入,形成行业数据共享机制。

模型层以 ET 大脑自研的医疗知识图谱为核心,通过自然语言理解与知识抽取,将诊疗规范、临床指南、病历等医学文本转化为结构化、语义化的知识单元,映射到图谱中,形成高度关联的医学知识网络。模型层还集成深度学习、强化学习、迁移学习等算法,构建智能问诊、智能诊断等 AI 模型。

服务层通过微服务化架构将 ET 大脑的智能服务能力进行封装,

向内支撑上层应用开发,向外以 Open API 方式向合作伙伴开放。服务层的核心包括智能导诊、智能分诊、智能预问诊等面向诊前的智能服务,以及智能医控控费、智能审方、智能临床辅助决策等面向诊中诊后的智能服务。

应用层围绕智慧医院、智慧药房、互联网医院、健康管理等场景构建丰富多样的智慧医疗应用。如面向智慧医院的导诊分诊、智能问诊、病历质控等应用;面向智慧药房的智能审方、用药提醒等应用;面向个人的 AI 健康管家、智能健康评估等应用。应用层还积极融合支付宝、淘宝等阿里巴巴核心业务,构建线上线下一体化服务闭环。

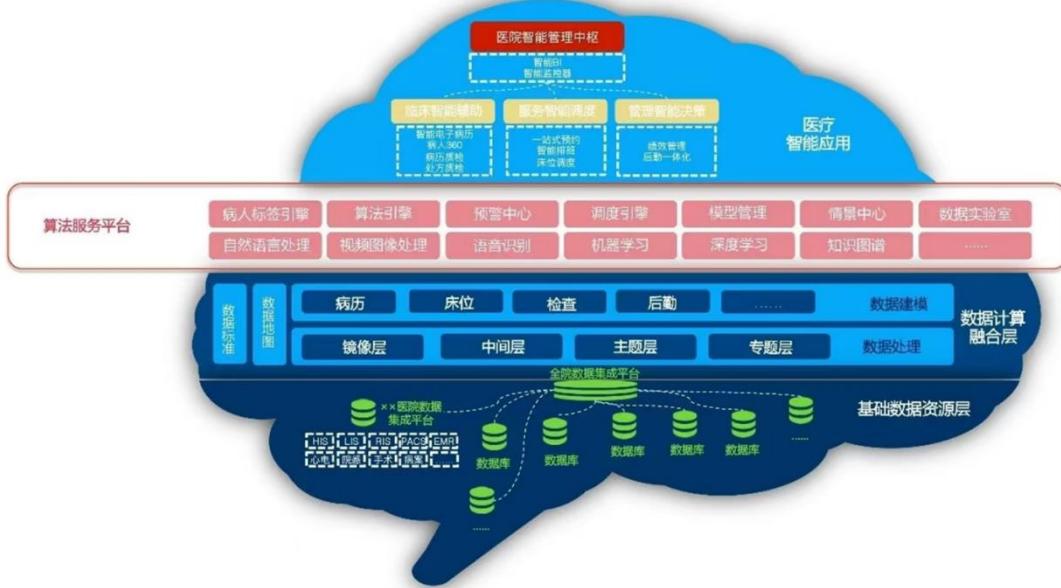


图 20-4 阿里健康 ET 医疗大脑架构图

20.4.3 关键技术

(1) 医疗知识图谱

ET 大脑构建了全球规模最大的中文医疗知识图谱,涵盖疾病、药品、治疗、检查、手术等十余万核心医学概念,概念关系超千万。图谱融合临床指南、专家共识、教科书、病历等权威知识来源,利用自然语言处理、知识推理等人工智能技术,形成高度结构化、语义化的医学知识网络,奠定智慧医疗应用创新的知识基础。

(2) 智能问诊

ET 大脑可实现智能导诊、自助问诊、AI 问诊等多种形态。ET 大脑先利用医疗知识图谱,通过语义理解将患者主诉分解为症状、体征、疾病等结构化信息;再基于贝叶斯网络、决策树等推理模型,从知识图谱链接症状、体征与疾病,形成鉴别诊断;最后对疾病进行风险评估,给出导诊建议。在此基础上,ET 大脑还能根据患者病情轻重缓急,进行智能分诊、预约挂号,优化诊疗流程。

(3) 临床辅助决策

ET 大脑利用深度学习算法,整合患者的多模态数据,包括影像、病理、基因、电子病历等,对患者进行全面画像。在此基础上,系统匹配知识图谱中相似病例,给出循证医学证据支持的诊疗方案,并预测不同方案的疗效和风险。ET 大脑还可对患者整个诊疗过程的数据进行关联分析,对诊断结果、诊疗效果进行评估,对医生诊疗行为提供智能质控。

(4) 智能药事管理

ET 大脑面向处方全流程提供智能化支持。在处方开具环节,ET 大脑基于药品知识图谱与患者电子病历实现处方的智能生成和审核,提示药品禁忌症、不良反应等,杜绝不合理用药。在药品调剂环节,ET 大脑对接医保目录、临床路径等,提供处方的智能审核,为药师提供智能化辅助。在用药环节,ET 大脑还能进行用药提醒,实现对患者全程的安全用药管理。

(5) 智能健康管理

ET 大脑以医疗知识图谱为基础,汇聚个人的问诊、检验、检查、治疗等医疗数据,并关联家庭病史,生活习惯等数据,构建个人全生命周期的动态健康档案。基于档案数据,ET 大脑可对个人进行健康风险评估、预测预警。ET 大脑还能针对性地提供饮食运动、疾病预防等健康管理方案,持续优化迭代,帮助个人建立健康生活方式。

20.4.4 应用实践

阿里健康 ET 医疗大脑目前已在医疗健康领域得到广泛应用,涵盖智慧医院、智慧药店、互联网医院等典型场景。

在智慧医院领域,ET 大脑在浙江大学医学院附属邵逸夫医院、四川大学华西医院等知名三甲医院落地应用。通过导诊分诊、智能预问诊、诊间辅助等功能,ET 大脑帮助优化就诊流程,提高诊疗效率。以华西医院为例,引入 ET 大脑后,门诊患者平均就诊时间缩短 36%,住院患者平均住院日缩短 1.2 天,医生工作效率提升 30% 以上。

在智慧药店领域,ET 大脑与国大药房、大参林等知名连锁药房合作,构建"AI 药师+执业药师"的智能药事服务模式。ET 大脑辅助药师进行处方审核,提示超常剂量、药物拮抗等 300 余种用药风险隐患。截至目前,ET 大脑已为 3 万余家药店提供智能审方服务,日均审方量超 100 万张,通过审方的处方占比高达 99.8%。

在互联网医院领域,阿里健康推出了"码上放心"处方流转平台,打通医、药、险、患全流程。患者通过支付宝小程序在线复诊、开具处方,处方流转至线下药店或第三方物流配送到家,实现"一站式"诊疗闭环。依托 ET 大脑的智能健康管理能力,阿里健康还为慢病管理开辟了创新路径,为高血压、糖尿病等慢病患者提供个性化、全流程的健康管理服务。

20.4.5 经验借鉴

阿里健康 ET 医疗大脑的发展路径,为推动"互联网+医疗健康"转型升级提供了实践样本。

(1) 数字驱动,以数据为纽带打通医疗服务全流程。ET 大脑以患者为中心,通过数字化手段打通诊前、诊中、诊后各个环节的数据,实现信息共享和业务协同,形成覆盖全生命周期的线上线下一体化服务闭环,突破传统医疗服务碎片化瓶颈。

(2) 智能赋能,以人工智能为引擎驱动医疗服务创新。ET 大脑遵

循应用牵引、技术引领的发展路径,源发于阿里健康在医疗服务实践中的需求痛点,又高度融合人工智能、大数据等前沿技术,通过模型算法等形式广泛赋能医疗健康行业,推动传统医疗服务流程的优化重塑。

(3) 生态协同,以开放融合理念汇聚行业合力。ET 大脑始终秉持开放融合的发展理念,积极携手政府、医疗机构、药企、保险等合作伙伴,共建基于医疗知识图谱的行业数据底座,打造智慧医疗创新应用的开放生态,实现多方共建共治共享。

(4) 服务至上,以以人为本的价值导向助推健康中国建设。ET 大脑坚持以人民健康为中心的发展思路,利用智能化手段让优质医疗资源惠及大众,提升医疗服务的可及性、普惠性,为人民群众提供全方位、全周期的健康服务,有力推动健康中国战略实施。

20.4.6 结语

阿里健康 ET 医疗大脑的发展实践,生动诠释了新一代人工智能技术驱动医疗健康产业变革的巨大潜力。未来,随着人工智能、大数据、5G、物联网等技术的深度融合,ET 大脑有望进一步拓展应用场景,为院前急救、远程医疗、康复管理等领域带来赋能。基于 ET 大脑建立政府监管、行业自律、企业履责的协同发展新模式,将加速形成全民共建共享的智慧健康服务新格局。展望未来,智慧医疗将成为新时代技术创新与健康中国深度融合的典型代表,驱动医药卫生体系变革,带来管理模式、服务业态的深刻重塑,为健康中国建设注入强大动力。这对于优化资源配置、缓解看病难看病贵、满足人民群众多层次多样化健康需求具有重要意义,也为推进国家治理体系和治理能力现代化提供了生动实践。。

20.5 海杰亚 HyVision 肿瘤消融辅助决策系统

20.5.1 引言

随着人口老龄化加剧,恶性肿瘤已成为危害人类健康的"头号杀手"。微创消融疗法作为肿瘤根治与姑息治疗的新选择,以其高效、微创、

并发症少等优势,在肿瘤综合治疗体系中的地位日益凸显。然而,由于人体解剖结构错综复杂,个体化差异显著,专家经验难以复制,传统消融疗法在疗效和安全性方面仍面临诸多挑战。海杰亚 HyVision 肿瘤消融智能辅助决策系统应运而生。该系统以人工智能技术为支撑,集成三维重建、智能规划、精准导航等核心功能,为肿瘤消融手术提供全流程智能化决策支持,是微创消融领域的一次跨越式创新。

20.5.2 系统架构

HyVision 肿瘤消融辅助决策系统基于模块化设计理念,由医学影像处理、穿刺路径规划、消融参数计划、三维可视化四大功能模块组成。

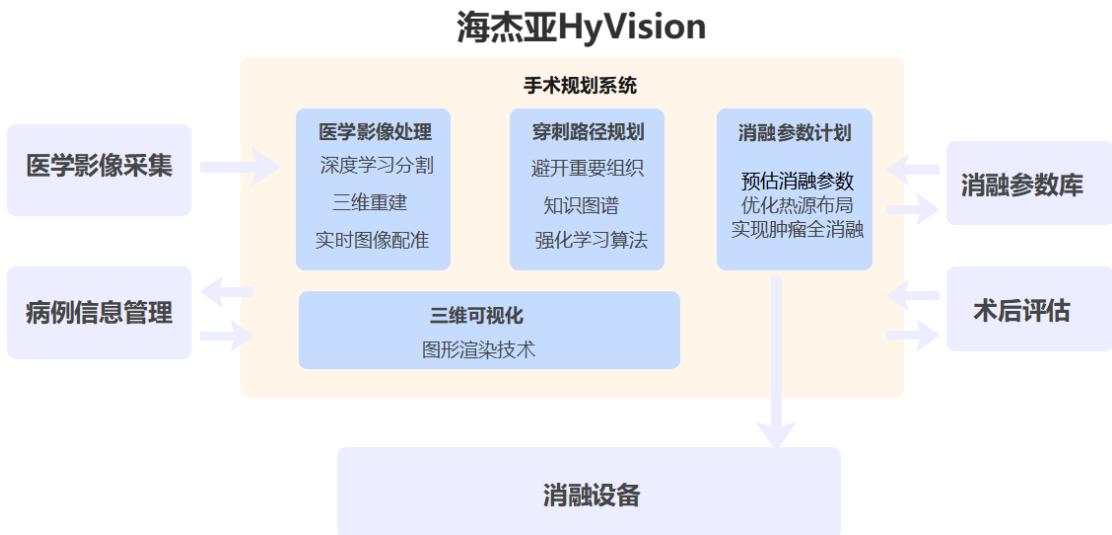
医学影像处理模块负责术前 CT、MRI 等影像数据的采集与处理。首先利用图像配准算法实现多模态医学影像的空间对齐;然后采用深度学习图像分割技术,自动勾画肿瘤、血管、骨骼等解剖结构的精细轮廓;最后进行三维重建,为患者构建细粒度、个性化的人体数字模型。

手术方案规划模块基于数字化的人体模型,为外科医生提供手术方案设计工具。该模块融合医学人工智能技术,通过知识图谱、优化算法等,自动推荐最佳进针路径,规避周围重要器官。

消融参数计划模块估算消融范围与时间,兼顾疗效和安全性;优化热源布局,实现肿瘤全消融。医生可在三维场景中实时修改评估,制定精准个性化手术方案。

三维可视化模块通过图形渲染技术将患者人体模型、手术方案呈现为逼真的三维场景。术中采用实时图像配准,将术前规划与术中患者解剖结构匹配,为外科医生提供沉浸式手术导航。医生未来可借助虚拟现实头盔,在三维虚拟手术场景中实时查看局部解剖和热场分布,提高手术精准度。未来还可以加入精准导航模块融合光学跟踪、电磁跟踪等实时导航技术,实现手术器械在患者体内的实时定位和跟踪。结合医学影像处理和手术规划功能,可实时呈现手术器械与病灶、危

险区域的空间位置关系,对外科医生的手术操作进行实时引导,实现精准、微创的手术路径。



海杰亚 HyVision 系统架构图

20.5.3 关键技术

(1) 深度学习医学影像组织分割与识别

HyVision 系统采用深度卷积神经网络,实现 CT 影像中肿瘤、器官、血管等解剖结构的自动分割。相比传统的阈值分割、区域生长等方法,深度学习分割可自动提取图像的层次化、语义化特征,具有分割精度高、泛化性能好等优势。该系统应用了 SwinUNetR 等深度学习算法,在肿瘤、器官和血管等结构分割精度和泛化能力方面达到 SOTA (State-of-the-Art) 水平。该技术奠定了后续三维建模、手术规划的基础。

(2) 穿刺路径智能规划

消融手术设计需兼顾疗效和安全性,这对外科医生的经验和技能提出了很高要求。HyVision 系统基于危及器官规避临床准则和多目标优化智能进针算法,构建了一套智能化的进针方案。系统通过结合 NSGAII 和 TOPSIS 等优化算法,自动推理并生成包括针型匹配、进针深度、进针角度等关键要素在内的进针路径。在此基础上,该系统还创新性地应用了多目标优化和决策算法,利用大量临床数据实现进

针方案的持续优化。这一技术不仅为医生提供了全面而精准的决策支持，还有效弥补了医生经验不足的短板，大大提高了手术规划效率。

(3) 消融参数优化

消融手术需要根据待消融区域的组织特性和位置，精确设定消融参数，以确保避免残留病灶，并减少对周围健康组织的损伤。HyVision 系统可以快速计算出完全消融肿瘤所需的时长、消融坏死范围、等温曲线等关键参数。系统考虑到不同组织的热传导特性和血流量对温度分布的影响，通过先进的热传导模型和数值仿真技术，对消融过程中的温度分布和组织响应进行精确模拟。这一技术不仅确保了治疗效果的最大化，还为临床医生提供了科学而高效的决策依据。

(4) 术后评估功能

HyVision 系统不仅在手术规划阶段提供了支持，还集成了术后评估功能，以确保治疗效果的最大化。在术后评估过程中，系统采用无监督配准技术，将术前和术后的医学影像进行精确对比。这种配准技术不依赖于标记点或人工干预，而是通过自动对齐影像数据，识别出术前病灶和术后消融区域的对应关系。通过这种对比，医生可以直观地评估肿瘤的完全消融情况，检测是否存在残留病灶或意外损伤。这不仅帮助医生验证手术是否达到了预期的治疗目标，还为后续治疗方案的调整提供了可靠的依据，提高了整体治疗的精准度和安全性。

20.5.4 应用成效

HyVision 肿瘤消融辅助决策系统获批上市后，迄今已在国内外 30 余家医院开展临床应用，并取得了良好成效。

HyVision 系统的性能已通过多家医院 200 多例研究得到初步验证。研究结果显示，系统在肿瘤和多器官分割重建方面表现出色，Dice 系数分别达到 0.8 和 0.9，接近专业医生的水平。系统生成的进针方案专家采纳率达 90% 以上，充分证明了其方案的可靠性和实用性。系统高度精确的分割重建能力和极高的进针方案采纳率，共同凸显了

HyVision 在提升肿瘤微创治疗精准度和效率方面的显著优势。这些数据为 HyVision 在临床应用中的潜力提供了有力支撑。

在安全性方面,HyVision 系统能精确分析肿瘤的大小、形状和位置,同时考虑周围重要器官和血管的分布,自动规划出最安全有效的消融路径。智能进针算法不仅提高了手术精度,还显著降低了对周围健康组织的损伤风险。在 HyVision 系统辅助下,一次性定位准确率可提升至 95%,大大降低了并发症风险。在复杂病例如肝肺肿瘤紧邻心脏的情况下,系统规划路径避开心脏,并实时监控热场分布,有效规避了心脏损伤风险。

此外,临床数据还表明,HyVision 系统使术前规划时间缩短 80%,手术操作时间平均缩短 35 分钟,大幅提升了手术效率。HyVision 系统的规划方案也为低年资医生提供了学习样本,有助于经验传承和人才培养。

总体而言,HyVision 系统实现了影像采集、手术规划、消融计划、术后评估的无缝衔接,将人工智能嵌入手术全流程,有效提升了肿瘤消融手术的精准性、微创性和安全性,树立了智能辅助手术的行业标杆。未来,随着精准导航技术、5G、机器人等技术与该系统的进一步融合,有望带来远程手术、自动手术等更多创新应用,让更多患者获益。

20.5.5 经验借鉴

海杰亚 HyVision 肿瘤消融辅助决策系统的发展历程,为人工智能赋能智慧医疗实践提供了诸多启示:

(1) 聚焦临床痛点,用创新回应医疗难题。HyVision 系统立足肿瘤消融领域的技术瓶颈,以精准性和安全性为突破口,依托人工智能实现个体化三维重建、智能化手术规划、可视化精准导航,用创新成果回应临床难题,彰显了智慧医疗内生动力。

(2) 强化协同创新,打通"产学研用"全链条。HyVision 系统研发过程中,海杰亚广泛联合高校、医院、企业等各方力量,打通从应用场景

发现、关键技术攻关、标准规范制定、成果转化应用的全链条,形成了政产学研用一体化创新范式,为智慧医疗注入强大合力。

(3) 注重模块集成,提供全流程系统解决方案。HyVision 系统并非单一的人工智能技术,而是集成医学影像处理、三维可视化、手术规划、消融计划、术后评估等多项前沿技术,形成手术全流程智能辅助解决方案。这种系统化设计理念,保证了临床应用需求与技术创新的精准对接。

(4) 助力能力提升,为医疗高质量发展赋能。HyVision 系统让人工智能深度参与临床决策,辅助医生制定个性化诊疗方案,规范诊疗行为;通过远程会诊、手术直播等,让基层医疗机构和低年资医生共享优质医疗资源。这为缓解医疗资源不平衡、助推分级诊疗提供了 AI 路径。

20.5.6 结语

海杰亚 HyVision 肿瘤消融辅助决策系统的问世,开启了人工智能精准引领微创手术变革的新篇章。这一创新实践充分体现了新一代人工智能技术与医学深度融合的广阔前景。未来,随着多学科交叉不断深入,智能手术必将迎来爆发式增长。一方面,医学影像、机器人、人机交互等学科与人工智能的结合将不断拓宽智能手术的认知边界;另一方面,5G、区块链等新兴技术与智能手术的融合,将开辟远程手术、手术机器人等全新应用场景。可以预见,智能手术系统的应用将从单一的手术辅助延伸至术前规划、术中导航、术后康复的全周期管理,并在临床路径优化、手术量化评估等方面发挥更大价值,驱动手术治疗模式的系统性、革命性重塑。展望未来,智能手术有望成为智慧医疗发展的“新蓝海”,为智慧医疗高质量发展注入新动能,让亿万患者真正享受到智能技术带来的健康福祉。这对于推进健康中国和创新驱动发展战略,意义深远。

20.6 东方棱镜中医人工智能辅助诊疗决策系统

20.6.1 引言

北京东方棱镜科技有限公司（简称“东方棱镜”）核心研发团队联合中国中医科学院、清华大学深耕研究近 8 年，根据国家中长期《中医药创新发展规划纲要（2006-2020 年）》^[43]《中共中央国务院关于促进中医药传承创新发展的意见》^[44]《“健康中国 2030”规划纲要》^[45]以及《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要》^[46]，共同研发了“中医人工智能辅助诊疗决策”信息化系统。

20.6.2 系统架构

“中医人工智能辅助诊疗决策”系统是基于中医辅助诊疗的海量诊疗数据、算法模型、名老中医知识库闭环，构建中医药人工智能辅助诊疗决策大模型算法（图 20-1）。

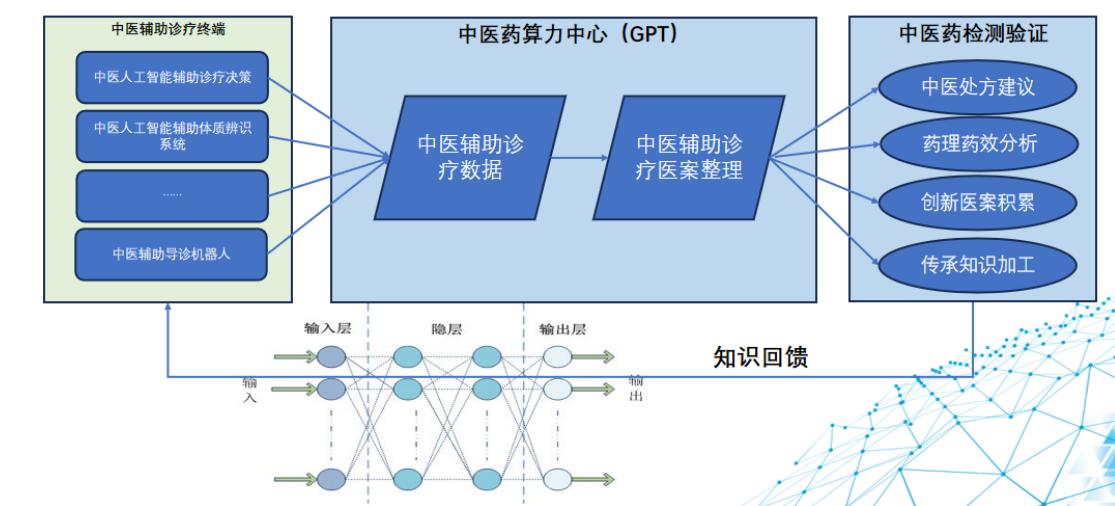


图 20-1 中医人工智能辅助诊疗决策系统架构

20.6.3 关键技术

（1）中医药知识图谱构建

系统构建了目前全球规模最大的中医药知识图谱，涵盖中医证候、病因、治法、方剂、药材等 20 余万核心概念，50 余万概念关系。知识图谱融合中医古籍、当代文献、名家医案等权威资源，利用自然语

言处理、知识推理等技术，将非结构化中医药知识形式化、结构化，形成高度关联的语义网络。图谱嵌入医政管理、临床诊疗、药学研究等业务场景，为中医智能化应用提供知识底座。

(2) 多模态中医智能诊断

中医诊断需综合望闻问切多诊合参，判断复杂，经验要求高。系统充分利用多模态深度学习技术，对患者的面部、舌象图像进行分析，结合语音问诊对话、脉象脉图等信息，多维度感知患者身心状况。在此基础上，利用迁移学习、强化学习等算法，融合中医知识图谱，形成从症状到证候的推理路径，给出辨证论治智能诊断结果。

(3) 个性化智能组方

组方遣药是中医诊疗的核心环节，对医者水平要求很高。系统基于知识图谱嵌入表示学习技术，智能诊断，自动匹配经典名方。在此基础上，利用强化学习、多目标优化等算法，融合患者年龄、性别、体质、过敏史等个体化因素，对药物进行加减权衡，给出个性化治疗方案。临床验证表明，系统组方可达到名老中医 80%以上的水平，有效弥补当前中医师经验不足的短板。

(4) 中医药智能质控

当前，中医临床普遍存在诊疗流程不规范、处方使用不合理等诊疗隐患。系统基于规则引擎技术，将中医诊疗指南、临床路径嵌入质控规则库。对接医院 His 系统，实时获取门诊、住院诊疗数据，利用语义分析、流程挖掘等技术，对失范行为进行自动审核，并提供整改建议。同时，系统还可对医案数据进行深度挖掘，发现群体共性规律和个体特殊性，对中医药研究、医保政策制定形成数据支撑。

20.6.4 应用实践

中医人工智能辅助诊疗决策系统，主要服务于覆盖县-乡-村三级的智慧中医一体化项目中，已在辽宁省、河北省、河南省、山东省等十几个县级区域落地。具体应用模式以辽宁省阜新蒙古族自治县（以

下简称“阜新县”）为例来做详细介绍：项目以阜新县卫健局为牵头单位，协调组织建设一个智慧审方中心、一个共享中药房中心和一个运营中心，以四套信息化系统为基础，即中医人工智能辅助诊疗决策系统（核心）、智慧中医管理中台系统、共享中药房管理系统、远程治疗及教育宣教系统，建设形成三级（县/区、乡/镇、村）的信息互通、人员互动、中医药资源优化配置、统一管理的智慧中医一体化项目管理平台。通过该平台，可以向上运用国医大师/名老中医资源平台、省中医院优质中医药资源，向下覆盖至县级中医院、社区医疗服务中心、乡镇卫生院/村卫生室，建立县域智能诊疗数据服务平台，实现覆盖县-乡-村三级的中医诊疗个人健康数据全过程管理和溯源，最终全面提升基层中医药服务能力。

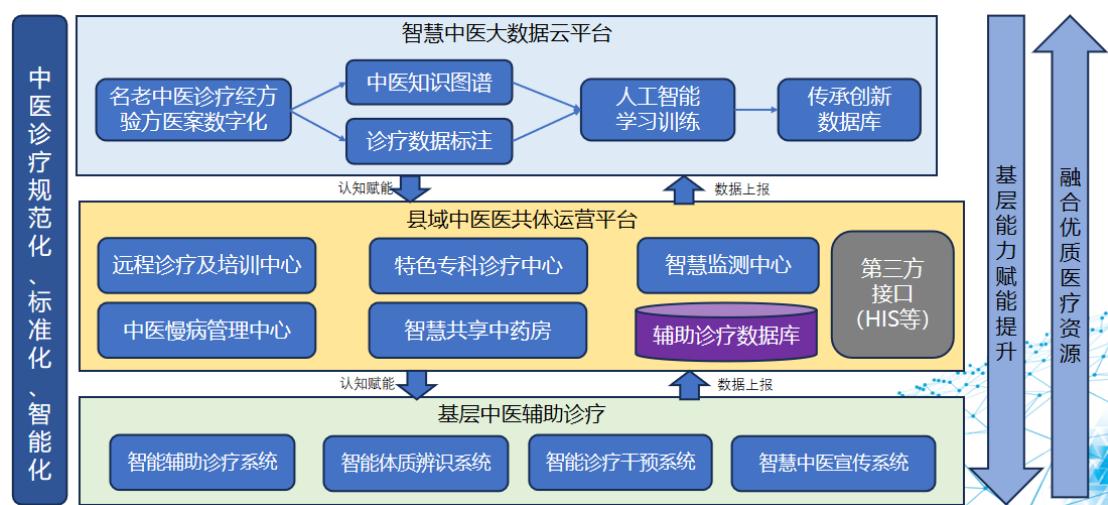


图 20-2 应用模式全景图

20.6.5 经验借鉴

东方棱镜中医智能辅助诊疗决策系统的创新实践，为新时代中医药传承创新提供了诸多有益启示：

(1) 传承精华，以信息化、智能化手段激活中医药瑰宝。东方棱镜系统利用人工智能盘活中医药经典医案、文献古籍，通过知识图谱串联中医理论与临床实践，既保留了中医药原汁原味，又赋予其新时

代内涵，为中医药创造性转化、创新性发展开辟新路。

(2) 问诊于民，以数字化应用扩大优质中医药资源覆盖面。东方棱镜系统利用远程医疗、互联网诊疗等新模式，将中医诊疗与移动医疗、可穿戴设备等创新应用结合，突破了中医药资源配置的时空限制，使偏远农村、基层社区百姓足不出户享受到优质中医药服务。

(3) 润泽当下，以智能辅助决策提升中医药服务效率与质量。东方棱镜系统利用多模态数据感知、知识推理等技术，发挥人工智能快速计算的优势，为中医师提供精准高效的智能化决策支持，规范诊疗行为，提高中医药临床疗效，为患者带来看得好、看得起、看得懂的中医药服务。

(4) 利泽百代，以人工智能赋能破解中医药传承发展难题。东方棱镜系统将人工智能深度嵌入中医药人才培养、质量管理、产业发展等全链条，以智能化手段破解中医药面临的诊疗经验传承难、诊疗过程规范难、产业升级发展难等问题，为中医药事业可持续发展提供新动能。

20.6.6 结语

东方棱镜以“中医人工智能辅助诊疗决策系统”为核心的覆盖县-乡-村三级的智慧中医一体化管理平台，通过人工智能技术将历代医家、名医大师的诊疗思路、处方经验，建成基于“云计算和大数据分析”的诊疗平台，把祖国历代医学名家、名医专家的经验变得可复制、易学习，把专家的产能放大，这对于基层医生而言，可以有效提升基层医生的中医诊疗水平，助力基层中医师开出高质量的、疗效可靠的处方。对于基层居民而言，可突破地域限制，让基层居民就近享受到全方位、全周期、高质量的健康保障。对当地政府而言，这种新型的中医诊疗辅助手段及应用模式，一方面可以显著带动基层中医药服务水平的提升，助力基层中医人才培养，解决基层缺乏优质医疗资源问题^[47]；另一方面可以有效降低基层居民舍近求远就医产生的不必要的

医疗支出，有效节约医保资金^[48]；还可以有效提升区域中医产能。综上所述，“中医人工智能辅助诊疗决策”的应用，可以为基层带来巨大社会效益和经济效益，最终助力全国中医药资源优化配置，以及中医药在广大基层的伟大复兴。

第二十一章 中超伟业智能化整体数据安全防护系统剖析

21.1 引言

随着各行业数字化、网络化、智能化建设的不断深入，网络信息安全面临的问题日益突出。近年来，以 SQL 注入、蠕虫、冲击波、震荡波、勒索病毒、APT 攻击等各类未知威胁的攻击手段造成网络泄密、窃密和受破坏事件频发，给各行业网络信息安全造成了严重的危害。因此，提高网络内部的安全性，构筑完善的网络信息安全体系成为当务之急。北京中超伟业信息安全技术股份有限公司，作为国内领先的信息安全一体化解决方案服务商，审时度势，积极顺应智能化变革趋势，以人工智能、大数据、物联网、区块链等新一代信息技术为支撑，构建了全新的智能化整体数据安全防护系统。

21.2 系统架构

智能化整体数据安全防护系统的架构如图 21-1 所示，该系统主要用于单位机要部门的物理基础设施和敏感要害部位，借助综合安全管控系统，运用物联网、数据可视化、视频图像监控、报警事件智能响应和集成控制等技术，再通过对数据的综合分析处理和联动告警、图形化展示及控制，保障机要部门密码设备以及环境安全可靠，构建全时段、全方位、多层次、多角度的密码安全综合防护体系，实现“风险能预防、动用能感知、事后能追查”的安全防护目标。

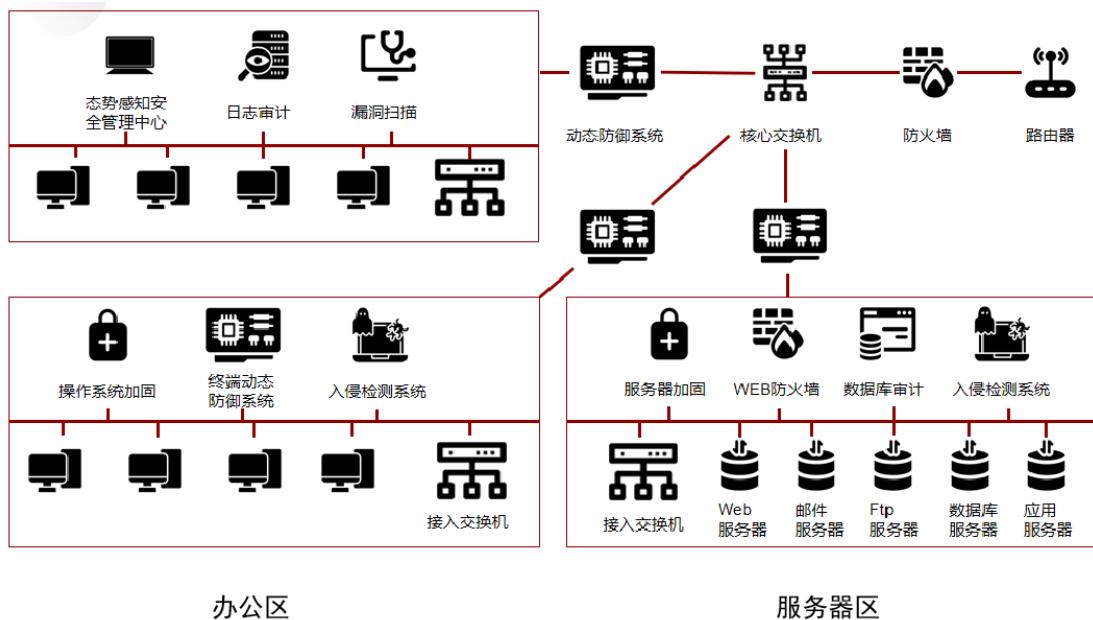


图 21-1 智能化整体数据安全防护系统架构

21.3 关键技术

依托整体数据安全防护系统，以动态防御技术为根本，做到内网网络态势的掌控、应用层的威胁感知阻断及终端模块级别的可信管控等，弥补传统防御体系难以抵御未知威胁部分的缺陷，通过主动式变换及诱捕及时发现网络中存在的攻击威胁进行阻断，为信息化网络彻底打造真正“防得住”的安全防御体系。有外部入侵时，由防火墙进行阻拦，并将数据传输给动态防御终端。

数据加密与密钥管理：采用先进的加密算法保护数据在传输和存储过程中的安全性，同时实施严格的密钥管理策略，防止密钥泄露。

访问控制与权限管理：建立细粒度的访问控制机制，限制用户对数据的访问权限，确保只有授权用户才能访问敏感数据。

安全审计与监控：实施全面的安全审计和监控策略，记录系统活动，及时发现并应对潜在的安全威胁。

智能防御技术：利用人工智能技术对海量数据进行实时分析，快速识别并应对未知威胁，提升安全防护的智能化水平。

防篡改功能：能够实时监测阻断针对网页的篡改，能够监测阻断

网站文件创建、修改、重命名、删除等操作，相关告警可以邮件发送。

防勒索功能：能够实时监测阻断针对特定文件的勒索，能够限制特定文件类型的可信访问程序，未知程序无法对特定文件进行访问，相关告警可以邮件发送。

21.4 实施过程

通过动态防御系统接收信息，对入侵者进行诱捕，并加以分析。动态防御系统分析完毕后，将信息传输给核心交换机与相关系统进行联动，形成紧急闭环。管理区域实时扫描、记录其他区域情况，以便发现情况及时处理。综合运用物联网、数据可视化、视频图像监控、报警事件智能响应和集成控制等技术，通过对数据的综合分析处理和联动告警、图形化展示及控制，保障机要部门密码设备以及环境安全可靠，构建全时段、全方位、多层次、多角度的密码安全综合防护体系，实现“风险能预防、动用能感知、事后能追查”的安全防护目标。

整体数据智能安全防护工程的实施过程主要包括以下几个步骤：

需求分析与规划：明确数据安全防护的目标和需求，制定详细的安全防护规划。

技术选型与方案设计：根据需求选择合适的技术手段，设计整体安全防护方案，包括数据加密、访问控制、安全审计等。

系统部署与集成：按照设计方案部署相关安全设备和系统，并进行集成测试，确保各组件协同工作。

人员培训与意识提升：对相关人员进行安全培训，提升他们的安全意识和操作技能。

持续监控与优化：建立安全监控机制，对系统进行持续监控，并根据监控结果不断优化安全防护策略。

应急响应与处置：制定应急预案，确保在发生安全事件时能够迅速响应并有效处置。

21.5 应用成效

提升安全防护能力：通过智能感知、实时监测和预警，有效识别和应对潜在的安全威胁，提升整体安全防护水平。

优化资源配置：利用大数据分析，精准定位安全漏洞和风险点，优化安全资源的配置和使用效率。

降低安全风险：通过自动化和智能化的安全防护手段，减少人为错误和疏忽导致的安全风险。提高应急响应速度：建立快速响应机制，确保在发生安全事件时能够迅速定位问题、采取措施并恢复系统正常运行。

这些成效为企业和组织提供了更加安全、可靠的数据环境，保障了业务的连续性和稳定性。

21.6 经验总结

明确安全目标与需求，确保符合法律法规，为后续制定针对性的安全策略和措施提供方向。制定详细的安全规划，全面考虑潜在威胁和风险，确保防护措施的全面性和有效性。采用大数据、人工智能等先进技术，提升安全防护的智能化水平。建立完善的安全管理体系，明确责任划分，制定应急预案，确保在发生安全事件时能够迅速响应和处理。注重员工安全意识和技能培训，提高员工对数据安全的重视程度。持续监控与优化，及时发现并修复安全漏洞，适应网络安全威胁的变化。加强与外部合作伙伴的协同防护，签订安全协议，加强数据交互的安全管理。

通过智能技术手段，有效保护个人、企业及国家重要数据的安全，减少数据泄露风险，维护社会稳定和国家安全。为各行各业提供坚实的数据安全保障，助力企业数字化转型，推动经济高质量发展。关注新技术趋势，研究并应用新的防护手段，促进数据安全领域的技术创新，提升国家整体科技实力。这不仅有助于构建更加安全、可信的数字环境，也为社会的可持续发展奠定了坚实基础。

第二十二章 格理特石油化工智慧安全应急系统剖析

22.1 引言

石油化工行业的安全生产一直以来都是一个热点问题。如何监测生产过程避免安全事故发生，和在事故已发生的情况下如何做出正确的处置措施避免危险扩大，是安全问题的两个方面，即安全监测和应急处置。做好安全应急，既涉及到管理，也涉及到技术。石油化工安全应急系统正是在技术层面上实现“第一时间发现问题，第一时间处置问题”，从而为安全管控和应急处置提供有力支撑。系统的工作过程除了信息化和标准化，更要智能化，这正是人工智能技术的宽阔舞台。成都格理特电子技术有限公司，长期致力于石油化工行业安全监测和应急处置相关技术和系统的研发与应用，所研制的智慧石油化工安全应急系统，应用到了福建古雷等数十个石油化工项目上，系统多次及时发现风险隐患，在告警的同时给出正确的处置措施建议，确保了相关石油化工企业的长期安全运行。

22.2 系统架构

成都格理特智慧安全应急系统的设计依据主要有：中央办公厅、国务院办公厅发布的《关于全面加强危险化学品安全生产工作的意见》；国家应急管理部发布的《化工园区安全风险排查治理导则》、《危险化学品企业安全风险隐患排查治理导则》、《“工业互联网+安全生产”行动计划》；工业和信息化部更是在其发布的石油化工行业标准《石油化工电信设计规范》中明确了安全管理控制指挥系统的整体技术性能。基于这些指导意见和行业规范，构建出安全、安防、环保、健康全方位综合性的“智慧大安全”系统，构建出应急和消防相结合的“智慧大应急”系统，将两者整合形成一套完整的石油化工安全应急综合系统的体系架构。体系架构各组成部分和相互关系如图1所示。智慧大安全聚焦感知和防治，智慧大应急聚焦快速和正确的响应。

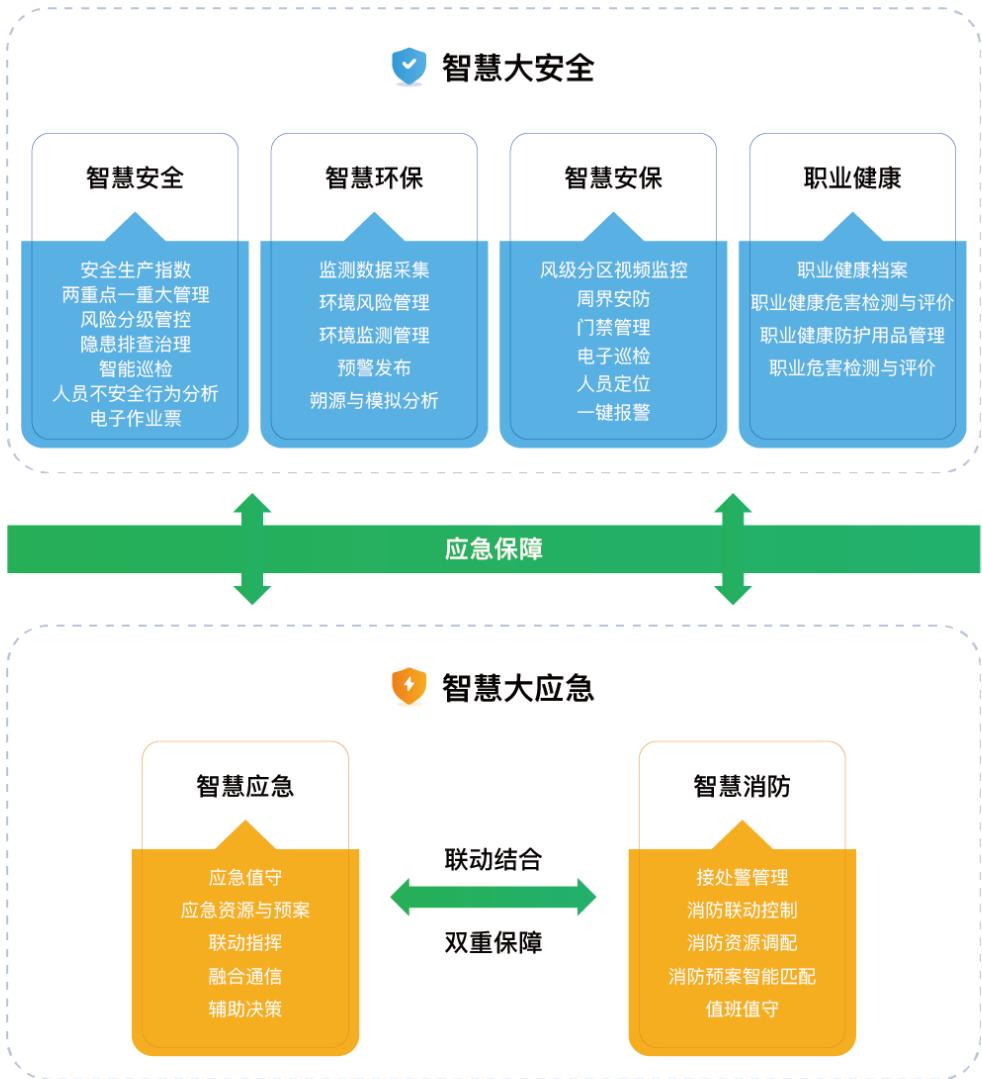


图 22-1 大安全应急的体系架构

石油化工行业设备种类繁多，数据多样，这给数据管理和分析带来了困难。做好智能化的重要基础之一是接引好数据，要打破不同厂家、不同设备、不同协议、不同结构数据之间的隔离，为智能分析建立统一良好的数据通道。因此，围绕体系架构，以工业物联网标准为引领，遵循平台化、模块化的思想，采用统一的数据交换、统一的标准接口、统一的安全保障，建立详细的技术架构图 2 所示。技术架构底层聚焦数据通道，把不同的设备和不同数据进行统一管理；上层则

围绕安全和应急的各个主题，通过智能分析手段实现多场景下的实时监控、态势分析、趋势预测和精准管控，实现企业安全生产全过程、全要素的连接和优化，从而提升安全风险管控和处置能力，服务好“大安全”和“大应急”。

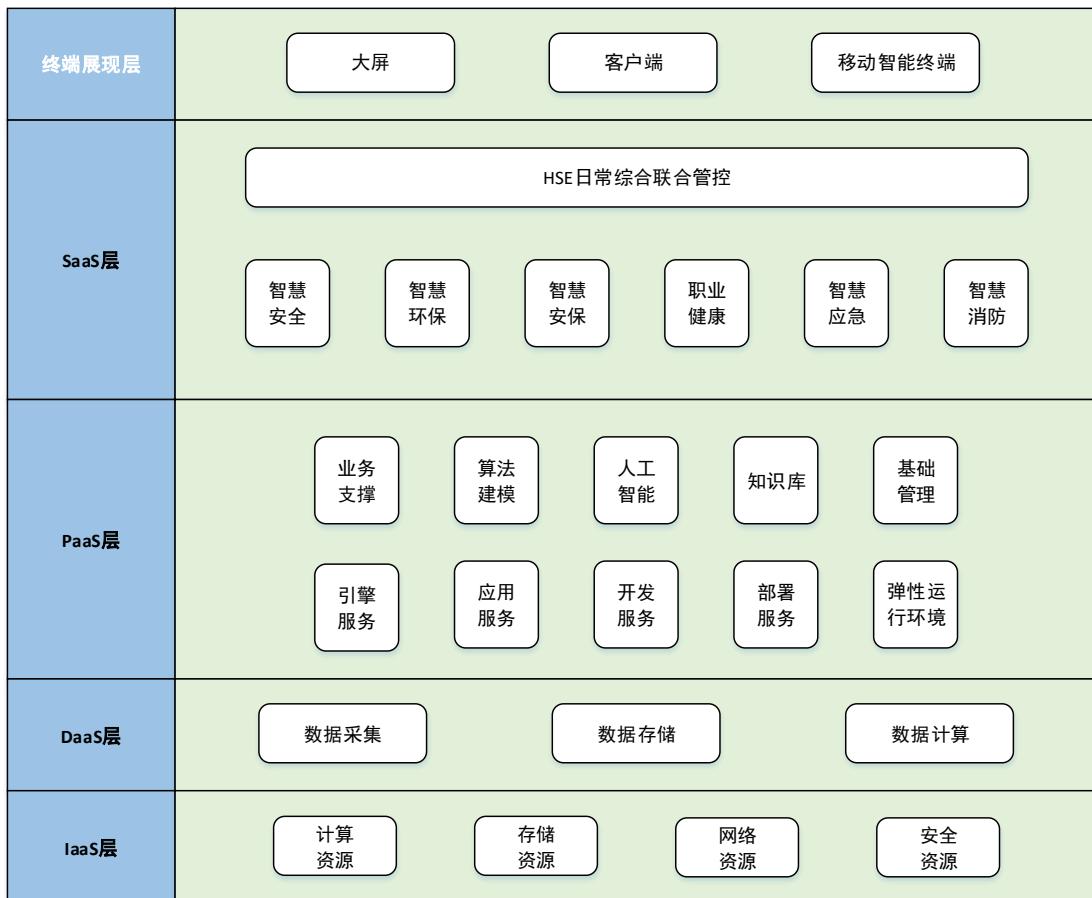


图 22-2 安全应急系统的技术架构

22.3 关键技术

(1) 智慧大安全数据分析

“人、物、环、管”是石油化工生产安全的核心要素。从这四个单元出发，对安全生产中存在的各种风险进行辨识，评估和预防，确保人身安全和设备安全，做到安全生产的全方位、全过程、全员、全天候的立体管控。

通过多源数据采集网关接入火灾报警、可燃气体报警、有毒有害物质泄漏报警、视频监视报警、周界报警、关键设备运行报警、关键

工艺参数报警和施工作业异常等各监测点的安全数据，构建多维安全分析模型，基于二维/三维 GIS 地图展示，实现企业“安全生产一张图”。

建立多系统相互联动的安全防范综合管理平台，通过对安防设备的统一管理和运行维护，对整合的信息进行深度处理和分析，充分提高数据利用率，大幅提升安防管控水平。将先进的智能视频监控设备集成于石油化工智慧大安全监测系统中，运用对人、车、物信息的分析技术，实现人员排查、物料跟踪，并生成时间轨迹图。对于突发事件的发生位置，进行地图标定，并联动视频图像实时展示现场动态。对重点防护区域、重点防护时段、重点防护对象，在态势智能识别的基础上，对安防资源和力量进行智能调配，实现日常巡检和重点防范的统一，最终实现智能的“统一监控、多系统联动、一体化调度”。

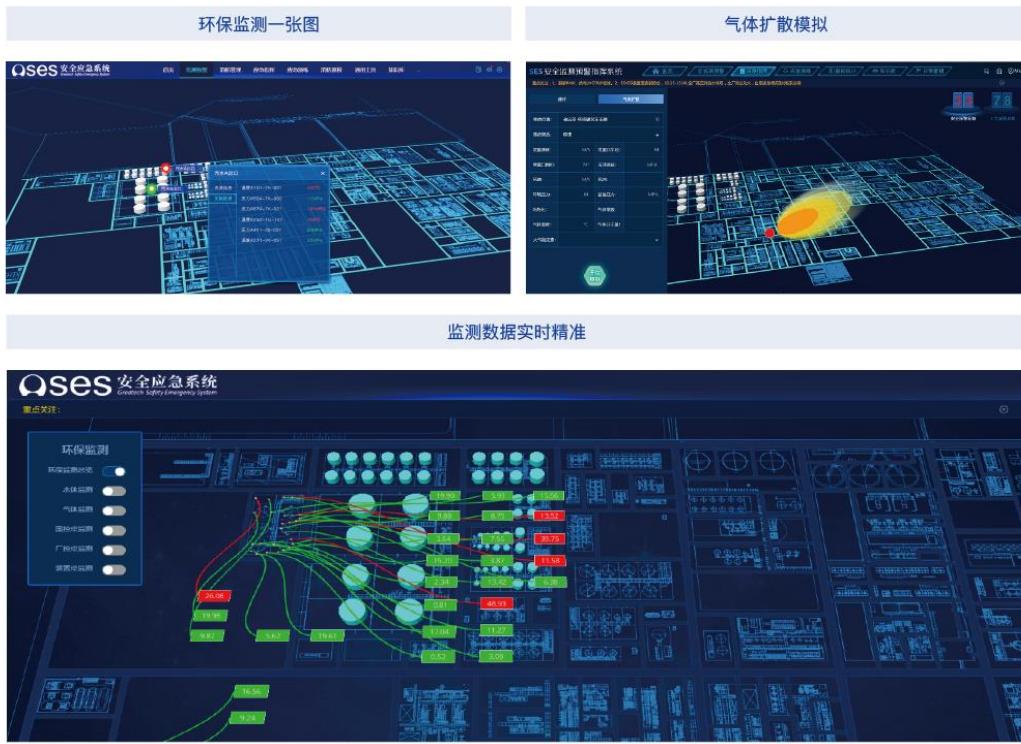


图 22-3 安全监测

建立智能化系统，对石油化工生产作业的过程进行有效监测和智能分析。对和人员安全相关的要素进行监测分析，内容包括但不限于：

监测现场作业人数，人员工作服、安全帽、安全带、防护面罩穿戴情况；监测现场的标识牌、防坠器、硬隔离物件是否正确放置；监测现场的火花、气瓶等是否对人员安全构成影响。对和物体安全相关的要素进行监测分析，内容包括但不限于：大型压力容器、塔、罐、管道、压缩机、泵、轴承，以及发电机、发动机等其它部件的安全；对工作环境，特别是高温高压等极端的运行参数要严密监测；对生产过程中相关设备发生的危害物质泄漏、腐蚀等危险情况进行监测，确保生产过程中的工艺安全、设备安全和人员安全。所有这些监测和分析中，涉及各种专家系统、模糊逻辑、神经网络、机器学习等典型的人工智能技术。通过这些技术对安全风险进行在线监测、分析、评估和辅助决策；通过数据可视化手段来动态实时地呈现安全风险和态势；利用分析结果对生产过程进行持续优化，迭代并提高石油化工生产的安全性。

在环境安全监测上，通过多源数据采集网关接入大气、水体、土壤等各监测点的环保数据，构建生产、储存、运输、销售、使用、处置化学物品的全过程环保信息集成模型，通过物联网网关接入的各监测点环保实时数据，在线动态监测监控数据，发布预警动态，及时洞察企业安全风险；结合二维/三维 GIS 地图的显示综合信息，直观展示环保监测点分布地图和风险预警云图，把控环保风险演变趋势，实现“环保一张图”。进一步地，打造基于 AI+数字孪生技术的化工园区，建立物理世界和虚拟世界的映射，动态监测、分析和显示园区的人员态势、车辆态势、环境态势和能耗态势。

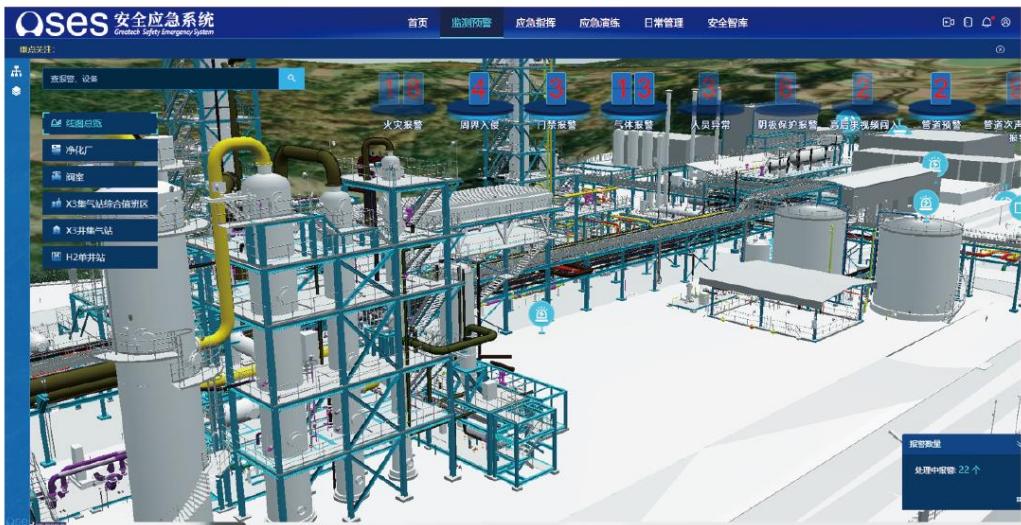


图 22-4 智慧工厂数字孪生

石油化工企业的工作环境也可能对员工身体健康带来隐患。因此，职业健康监测也是智慧大安全中不可忽视的一部分。职业健康管理系统依据国家相关法律法规，要求覆盖职业健康要素，实现职业健康数据的收集、加工、维护和利用。从职工参加工作起，全程记录职工所接触的职业病危害因素、健康体检记录等，全过程管理职工整个工作阶段的职业健康情况；实现职业健康档案和各类职业卫生信息的电子化与信息化管理，辅以智能提醒、统计分析等功能；进行工作岗位-个人健康的关联分析，及时发现潜在高危人群；通过企业平面图、GIS地图定位企业职业危害场所监测监控点，实现企业职业健康危害因素动态可视化监管，为企业自身管理与决策提供依据和支持。

图 22-5 作业危害的过程记录和健康档案记录

(2) 智慧大应急数据分析

火灾是危害石化企业安全的重大隐患。系统创新搭建了集视频监控、红外热成像、烟雾探测为一体的智能火灾预警平台。平台采用深度学习算法,对可燃气体云团分布、明火区域进行实时检测,结合火灾蔓延模型,对重点防火区域进行火情预判,平均预警时间提前 2-3 分钟。同时,平台还可智能优选最佳灭火方案,最大限度减少事故损失。

基于“平战结合”的理念,实现监测、预警、判决、处置和应急指挥等多维度可视化、智能化应用。这里的“平”是指日常监控与调度,“战”是指应急指挥。平时任务包括日常管理、日常预警、生产调度和应急演练;战时任务包括信息接报、判断决策、应急响应、指挥控制、事态跟踪、扩大应急、应急恢复、后期评估。通过日常监控、事前预警、事中处置、事后评估来实现安全生产日常管理与报警事件应急处置的“平战结合”平台;通过统一的平台,实现由被动应对报警事件向主动智能监测、预警和处置的转变,促进企业安全平稳高效

生产和可持续发展。通过信息化技术实现应急指挥调度联动、事件处置流程的可视化，通过预案的精准设计和预案的智能匹配实现处置的快捷和准确。

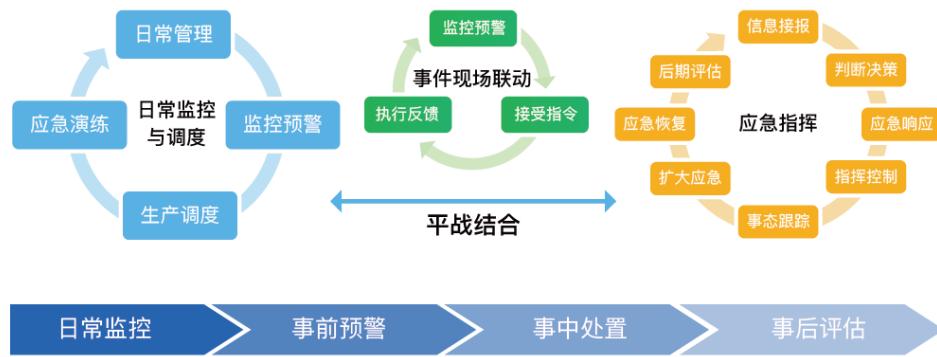


图 22-6 “平战结合”的应急指挥

消防是石油化工突发情况处理中一个重要环节。为提高消防报警受理和接警处置能力，改变传统、单一的电话报警受理和接警处置模式，综合平台将日常的消防安全管理和各种报警事件的应急指挥相结合，实现消防安全“平战结合”的一体化，真正做到“平战结合”。在平时，重点进行对消防设施的远程监测、消防风险隐患排查和消防日常巡更巡检；在战时，重点进行对应急资源的智能化调用，集成融合通信的一键群呼，及时发布信息，实现有机联动的智能化应急指挥。

把人工智能技术应用于消防，提升消防监测和处置的效果。具体的工作可以包括：通过人工智能技术实现准确的火源识别与报警，辅助制定决策灭火方案，规划合理的疏散通道与救援路径，准确定位和搜救被困人员，联动和共享救援数据，正确评估灾后损失，给出准确合理的重建建议。在战时根据实际情况确定合理的救援方案是一个关键点：为此，利用数据和人工智能等技术进行参战单位分析、作战车辆分析、现场信息分析、环境检测和危险评估分析、救援能力分析、指挥作战辅助分析和消防文书支持，把预案和实际场景条件相结合并进行合理的辅助决策，结合实际条件和态势感知对方案进行动态适时

调整。在不适合人员到达的场所，利用 AI 机器人技术，构建“平行战场”、“智慧战场”和“无人战场”。在平时加强训练，战时怎么打仗，平时就怎么演练，这时利用人工智能相关技术辅助进行应急演练，演练模式根据实际条件有多种模式可供选择，包括桌面式软硬件结合的多人协同模式、VR 沉浸模式、VR 与琢磨交互融合的演练模式和 MR 混合式虚拟现实演练模式等。

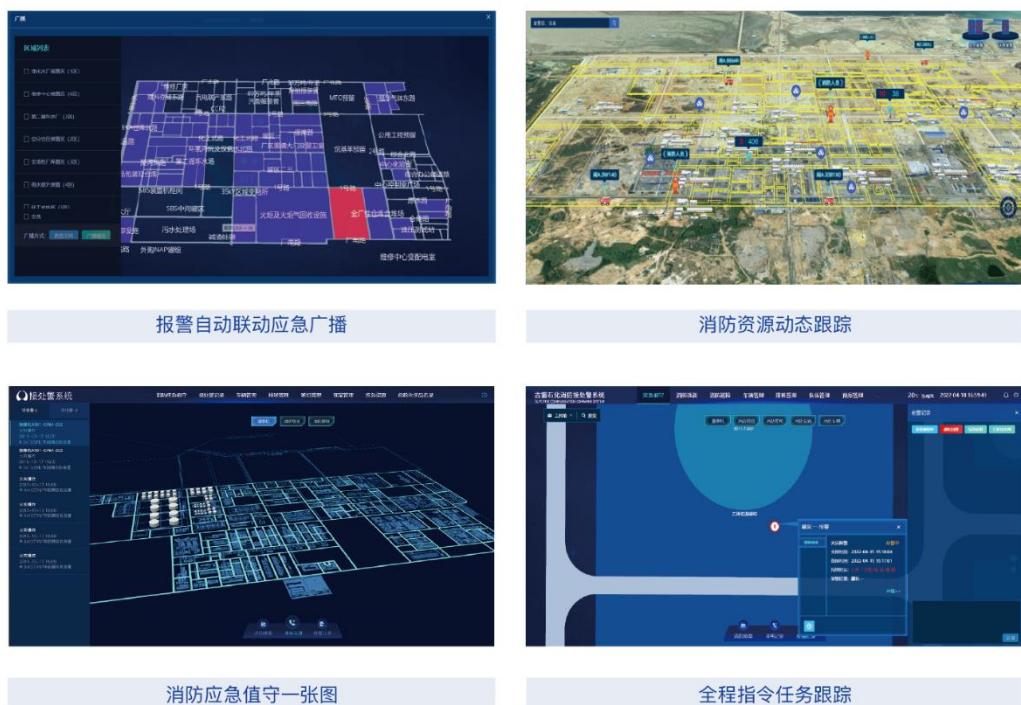


图 22-7 智慧化应急指挥

(3) 数据分析中的智能算法

石油化工行业中智慧大安全和智慧大应急涉及大量的智能问题，涉及的人工智能技术和方法非常丰富，难以一一列举。这里只对系统涉及的人工智能技术和方法、可以解决的安全应急问题梳理归纳如下。

虽然人工智能技术有多个分支，但是经典的机器学习技术仍然被广泛使用，它们具备技术成熟的优势。基于集合论分类，可以分为 K-Means 算法、K-NN 算法、Apriori 算法等。K-Means 和 K-NN 通常用于聚类问题，例如对安全监测数据作归纳，通过类别中心归纳各类数

据的特征，特别是异常数据类型的特征；Apriori 通常用于关联分析问题，例如发现监测数据的异常变化和安全风险后果之间的关联关系。基于概率的统计分类，可以分为朴素贝叶斯算法、最大熵模型算法、最大期望值算法、逻辑回归算法和隐式马尔科夫模型算法等。这些算法旨在解决有监督学习下的分类问题，常见与风险判别和故障诊断，例如在已经充分收集故障参数和故障列表的条件下，利用上述算法诊断实时监测参数有无异常，如存在异常则进一步分析异常的种类。特别地，马尔科夫模型在石化设备可修复条件下的故障诊断和预测较好。此外，还有基于图论的决策树分类算法、随机森林分类算法和基于几何空间分类的支持向量机分类算法，它们对于非线性模型的分类问题较为合适，而石油化工中大量的分类问题属于非线性模型的分类问题。此外，还有遗传算法、蚁群算法等，它们用于机器人巡检时的路径规划和控制问题。

在新技术应用上，把深度学习技术、强化学习、迁移学习技术同视频技术相结合，提升视频监测能力，涉及的主要技术包括：图像特征提取、图像定位与分割、目标跟踪、图像理解等。图像特征提取，可以作为一个独立的任务单元形成结果，也可以作为后续其它处理的预处理环节，为后续分析提供必要的信息支撑，前者的典型应用如安全帽检测、火焰检测等，旨在从视频图像画面中提取安全帽或火焰的特征；后者的典型应用如为人员危险行为分析提取必要的行为特征。图像定位与分割的应用包括：警戒区域的人员检测、异常入侵检测、危害物泄露检测等，并在视频中分割出目标。目标跟踪，即保持对检测出目标的锁定状态，通常跟踪是检测任务的后续。图像理解，属于机器视觉中的高级技术，解决的典型问题是在图像中找到某种特定的异常，较为简单的任务如人员的不安全作业，复杂的任务如基于图像的安全态势分析等。

近年来，大模型相关技术的飞速发展也引起了各行各业的关注。

在石油化工领域安全应急应用也同样如此。就技术层面而言，自然语言引领大模型基础通用理论，为对话系统、文本生成、多模态处理和知识推理等任务提供了关键的支持技术。大模型理论的持续发展，也为从通用型大模型到专用型大模型创造了条件。就具体到石油化工领域安全应急，在安全监测应用技术上，大模型技术与石油化工经典的 HAZOP/SDG-HAZOP/LOAP/SIL 模型及分析技术、Bowtie 模型及分析技术、故障树模型及分析技术、情景网络模型及分析技术、泄露与爆炸模型分析技术相融合，通过大模型整个传统分析方法，从而拓展安全问题的解析和解答能力；在应急处置和应急指挥上，通过 AI 运维平台对运维指令进行自然语言分析处理，提供基于自然语言的描述式操作界面，甚至进一步提供语音指令操作，从而提升应急指挥的快捷性、易用性和友好性；在预案制作上，根据安全态势的实际情况，对事前预案进行必要的改造，快速且智能地生成处置预研，更好地满足实际异常处置要求。

22.4 应用实践

本系统在石油化工多个项目上有应用，如福建古雷炼化一体化项目、中科广东炼化一体化项目、中石化普光气田天然气净化厂项目、中韩武汉石化安全生产项目、中石化元坝气田天然气净化厂项目和西南油气剑阁区块礁滩气藏试采工程等数十个项目上有应用。



图 22-8 在石油化工多个项目上的应用

古雷项目是本系统的典型案例。系统上线后，在日常的值守过程中，系统接收厂区前端感知设备的信息，并对实时变化数据自定义设置预警和报警阈值，并同时也接收前端设备自生发出的报警信息。系统内置报警判断分级模型，能将同一时段发生具有相关性的报警合并升级。从而在平时构建起全厂生产、消防、气防、安防、环保、人员、作业等全方位、全天候、全链条的实时监控。除了日常监控之外，系统将安全和应急相结合，实现“平战结合”。为此，一是本系统支持完整的预案管理，在日常演练中能通过本系统功能支持预案演练，支持在演练过程中完善预案，最终形成晚上合理的结构化预案，以便系统在事件发生时能通过预案系统辅助和引导事件的处置过程；二是支持调度人员在协助各装置调度各生产资源的同时，能通过系统的监测

预警功能第一时间获取全厂安全预警及报警信息、重点区域和装置的安全态势、应急物资储备情况，保障生产调度正常运行的同时，如遇应急事件则立刻可以根据系统智能匹配的预案，结合系统在平时应急演练中形成的对预案处置的流程和功能支持，在第一时间立即采取正确规范的处置措施。系统上线后古雷石化每年通过本系统进行2次公司级演练和若干次部门级和装置级演练，通过演练准确评估应急组织机构的科学性、应急流程的合理性、各应急职能小组的专业性，以及应急预案的完整性和可行性。通过演练不断的优化组织机构和应急流程，不断的完善预案，使得安全应急系统更好地保障大型炼化企业的生产安全，充分发挥其重要价值。

系统在不同用户的不同项目中，均保持长期稳定运行。系统多次及时发现风险隐患，在告警的同时给出正确的处置措施建议，把风险消灭在萌芽状态，从而确保了石油化工企业长期安全的运行。石油化工行业中广大的用户群体和安全风险控制效果，均有力地验证了智慧安全应急系统的有效性。

22.5 经验启示

成都格理特石油化工智慧安全应急系统的实践，为新时代安全生产治理和应急管理现代化提供了诸多有益启示。

一是以体系思维统筹安全发展。该系统坚持系统观念，综合运用多种新兴技术手段，有机串联事前预防、事中监管、事后处置各环节，构建起全时空域、全生命周期的一体化安全应急防控体系，实现本质安全、综合防控。这种体系化设计理念，是应对新时期复杂风险挑战的必然选择。

二是用新技术重塑安全管理。人工智能、大数据等现代信息技术是安全领域的变革力量。该系统充分发挥新技术在感知预警、辅助决策等环节的独特优势，大幅强化了对风险的源头管控和过程管理，推动安全管理从静态化向动态化、从粗放型向精细化的智能转型，为传统

石化产业插上"智慧的翅膀"。

三是靠机理模型和数据驱动相结合的智慧决策。海量真实完备的数据,是安全管理智能化的生命线。该系统聚焦业务需求,从生产过程、管理活动等环节充分汲取数据资源,并通过数据融合、知识发现等,形成底层逻辑清晰、上层应用丰富的石化安全知识图谱,为智慧应用创新奠定基石。

22.6 结语

石油化工行业大安全和大应急应用涉及的业务类型、数据类型、技术类型不仅多,而且也复杂,对信号、数据、信息处理的准确性和可靠性都要求高。这既为人工智能技术提供了宽阔的舞台,也提出了较高的要求。本章首先阐述了对石油化工智慧大安全和智慧大应急的指导思想、系统架构;接着,本章重点阐述了智慧大安全和智慧大应急在数据智能分析方面涉及的主要任务,以及这些任务背后的智能算法支撑;最后,本章汇报了智慧安全应急系统在石油化工行业中的应用情况。

第二十三章 金牌大规模柔性智能制造系统剖析

23.1 引言

泛家居行业是我国国民经济和社会发展的支柱型产业,具有典型的大行业小企业的特点,为满足消费者对于装修产品的个性化需求,生产企业迫切需要提升生产制造柔性化能力。板式家居制造企业面临个性化订单的快速交付难题,而车间生产物料和信息流不同步,管理系统互联互通差,导致生产模式、生产效能受限。金牌家居集团作为行业智能制造标杆企业,与鲲鹭物联网研究院深度合作,重点研究工业实时数据处理技术、异构设备数据标准化、异构系统数据融合等关键技术,研发全国产化定制家居连线智能中控管理系统、定制家居数字化生产管理系统及数实一体化智能制造系统等,并基于AI大模型打

造从设计、制造、交付的一体化数字业务支撑能力，成功打造了位于成都具有国际领先水平的西部物联网智造基地，并向美国、泰国、马来西亚、澳大利亚等海外生产基地输出。

23.2 系统架构

从系统架构看，该平台研究如何解决定制家居智能制造的三个“异构问题”，打造大规模定制家居高度柔性智能制造平台，实现定制家居生产模式升级。通过结合金牌厨柜“1+5+1”数字化服务体系，从营销获客、智能设计、转化下单、智能制造、仓储物流到安装交付业务流程打通，实现工业物联、工业互联、消费物联、消费互联的四网融合，最终搭建面向泛家居行业的产业互联网平台。

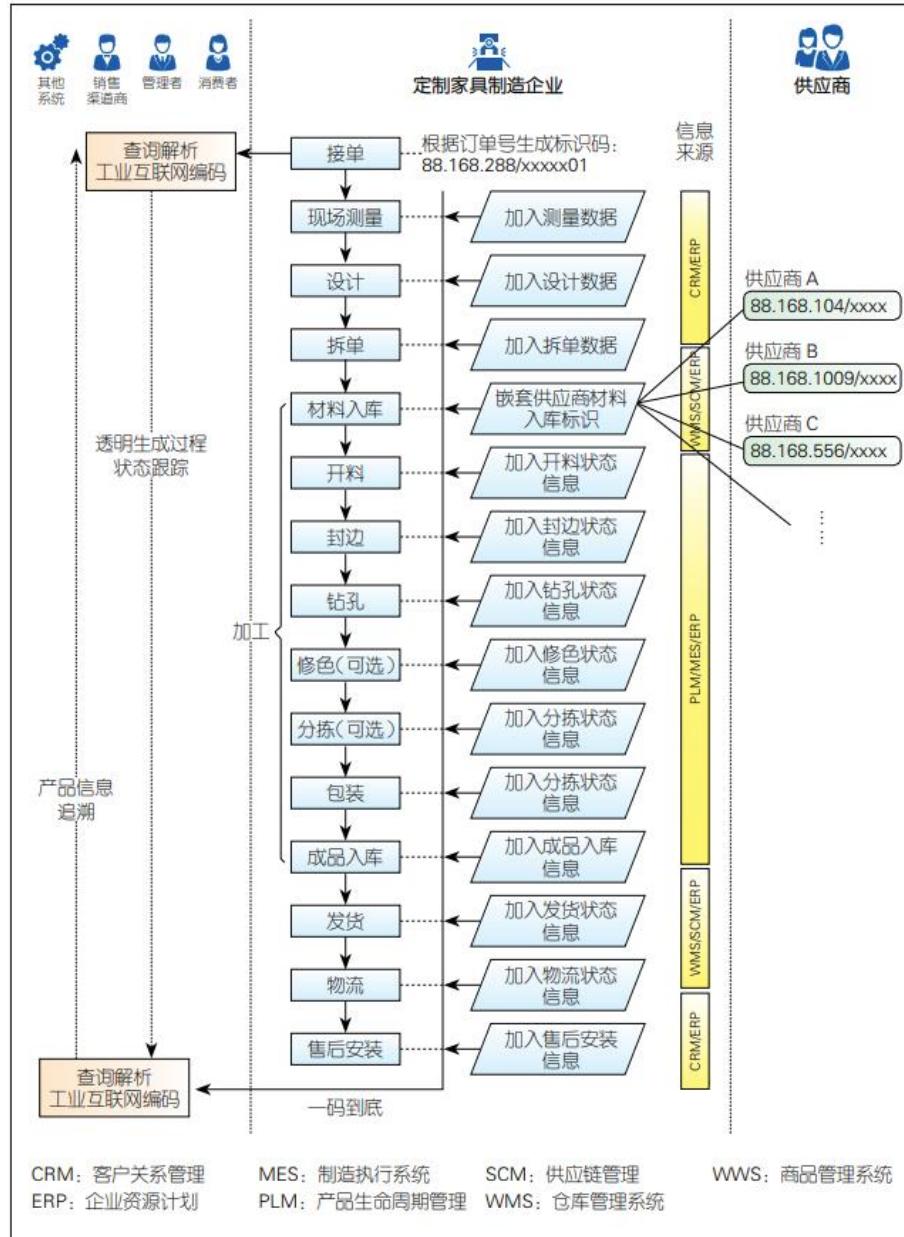


图 23-1 金牌大规模柔性智能制造系统架构图

23.3 关键技术

从关键技术看，大规模定制家居高度柔性智能制造平台应用了工业实时数据处理技术、基于边缘网关的异构设备数据标准化技术、标识解析、数字孪生等关键技术。在已建立的标准化产品设计、工艺规范技术、零部件工艺成组技术、工业模块库等柔性生产技术基础上，就如何提升定制家居生产管控能力、柔性化水平、生产效能及经营生产融合能力等问题，研发定制家居连线智能中控管理系统、定制家居

数字化生产管理系统及数实一体化智能制造系统等，打造面向定制家居的大规模高柔性数实一体化智能制造系统。并在此基础上，打造金牌厨柜成都基地大规模高度柔性智能制造产线，突破定制家居生产制造模式及效能限制。

23.4 应用实践

大规模定制家居高度柔性智能制造平台以研发面向定制家居的大规模高柔性数实一体化智能制造系统为目标，对金牌厨柜的家具生产线进行了改造升级。目前行业内最先进水平的代表金牌成都生产基地柜体车间，已实现单班产能 2 万片以上，相对金牌既往最高水平实现设备稼动率及生产产能提升 23%；大幅度减少了车间人员投入，相对行业最高水平提升 10%以上，相对金牌厦门二期坪效提升 41.7% 以上、相对金牌四期人效提升 41.7% 以上、相对行业最高水平提升 13.3% 以上，预估每年减少人员成本 450 万以上。同时，通过线体自动控制板件生产过程不落地，减少人为转运导致的质量异常 30% 以上，减少生产过程中各类数据排查时间 50% 以上。

综上所述，该项目从技术上突破定制家居智能制造 IT&OT 融合技术壁垒，真正实现研、产、供、销、运营全方位数字化驱动。在实际应用中，突破定制家居行业生产壁垒，大幅提升产线柔性化水平及生产效率，帮助企业降本、增效。

表 23-1 金牌成都产线与行业其他产线性能对比

对比项/指标	成都基地	厦门四期	厦门二期	行业最高水平
产能人效	33pcs/人.H	25pcs/人.H	16pcs/人.H	30pcs/人.H
产能坪效	85pcs/.月	60pcs/.月	60pcs/.月	75pcs/.月
产能人耗	30 人/季	35 人/季	50 人/季	30 人/季
连续封边板件流转效率	25pcs/min	23pcs/min	20pcs/min	23pcs/min

订单齐套时间	8 小时	1.5 天	1.5 天	1 天
产线硬件设备国产化程度	100% 主机设备国产化	100% 主机设备国产化	开料、封边均为进口设备；推钻部分 30% 国产设备	封边机为进口设备
大小板件异型板件在同一产业链生产	实现大、小板件、异型板件在同一产业链生产	未实现	未实现	未实现
连线生产板件最小宽度	50mm	180mm	250mm	180mm
多花色板件自动换带加工	用国产设备实现 12 种花色板件自动换带加工	未实现	未实现	用进口设备实现
产线布局	板件流转路径最优化布局提高空间使用率	S 型布局	S 型布局	S 型布局

23.5 经验启示

(1) 国产化是我国制造业数字化转型的坚固基石。

项目所有主要生产设备及控制软件均实现完全国产化和自主化。关键技术的国产化能够减少对外部的技术依赖，避免了被国外厂商卡脖子的隐患，保障空间系统、数据、设备的基本安全，对未来加入可信计算安全技术，打造主动免疫系统提供基础。

(2) IT&OT 融合实现定制家居企业运营及制造数字化的必由之路。

基于标识解析引擎构建定制家居企业数据融合体系，解决了异构设备、异构数据、异构系统标准化集成的业界难题。“三个异构”从此具备了“统一的语言”，实现定制家居的透明生产过程状态的跟踪和信息追溯，同时打通经营、生产链路，实现异构系统数据、业务融

合。

(3) 数实一体化是智能制造的核心成果。

通过数字孪生平台构建产线数字孪生系统，提升车间生产可视化运营能力，实时把控生产进度信息、设备运行状态，同时实现生产要素配置、生产计划优化配置、平行控制。此外基于数字孪生仿真模型，突破时空限制，实现虚拟生产调度、设备预测性维护、产线升级实验、人员操作实训，真正做到集“实用、实验、实训”于一体。

第四部分 智能系统工程未来展望

纵观全书的分析梳理,智能系统工程正处于从理论探索到工程实践的关键转折期。一方面,新一轮科技革命和产业变革正在向纵深演进,人工智能、大数据、云计算、5G 等新一代信息技术加速渗透,正重塑传统行业的发展路径,催生众多智能化场景和应用。另一方面,我国正处于转变发展方式、优化经济结构、转换增长动力的攻关期,必须抢抓新一轮科技革命和产业变革机遇,加快培育新动能,塑造发展新优势。在此背景下,统筹推进智能系统发展,打造经济社会发展新引擎,既是顺应时代潮流、把握历史机遇的迫切要求,也是破解当前复杂系统工程"卡脖子"难题、实现高质量发展的必然选择。第四部分在总结全书的基础上,围绕智能系统工程发展的总体趋势、智能系统工程的发展重点进行展望。

第二十四章 智能系统工程发展的总体趋势

24.1 人工智能将成为智能系统发展的核心驱动力

当前,新一代人工智能技术迎来爆发式增长,并与实体经济深度融合,呈现渗透性、融合性、引领性的发展特征。从 Google AlphaGo 战胜人类围棋冠军,到自动驾驶汽车在复杂城市道路的规模化测试,再到智能客服、智能助理广泛应用,人工智能正在以学习能力、推理能力、感知能力等方面不断突破,加速向通用人工智能演进。在此趋势下,未来 5-10 年将成为智能系统发展的黄金期。一方面,在智能制造、智慧交通、智慧医疗、智慧能源等重点领域,智能化改造将全面提速。另一方面,工业互联网、车联网、能源互联网等新型基础设施建设将加快推进。人工智能作为新一轮产业变革的核心驱动力,将赋能传统行业转型升级和新兴行业加速成长,打造新的经济增长点。

24.2 系统工程将迎来从信息化、数字化到智能化的跨越式发展

在人工智能、大数据、5G 等新一代信息技术浪潮的推动下,系统

工程正在从 1.0 时代迈向 3.0 时代。回顾系统工程发展历程:1.0 时代以自动化、信息化为标志,实现了自动流水线生产、信息集成管控等;2.0 时代以网络化、数字化为标志,实现了系统的互联互通、数字孪生。当前,智能时代的曙光已现。系统正在从单纯的物理系统走向信息物理融合的智能化系统;从静态、被动的信息交互,走向动态实时优化决策;从经验驱动,走向大数据驱动、知识引导;从孤立发展,走向开放协同、多系统集成。这是一次全方位、深层次、革命性的变革。智能系统工程作为引领变革的新兴学科,正在重塑传统系统的架构形态、演化路径和方法论,催生新的增长模式和发展范式。站在新的历史起点,智能系统工程将推动系统工程实现升维换挡、跨越发展。

24.3 智能系统发展重心将从局部走向整体、从单系统走向体系化

过去,受限于建模、计算、优化等手段,系统工程往往聚焦局部、单一系统的性能提升,对全局性、关联性缺乏统筹兼顾。如今,随着大数据揭示内在联系、人工智能增强分析能力、复杂网络刻画动态演化,以及量子计算、类脑计算等新型计算范式的出现,智能系统工程正在重塑"化繁为简"的传统思维,开启"以简驭繁"的新路径。智能系统工程通过构建跨领域、跨系统的大数据平台,挖掘多源异构数据中蕴含的关联规律和演化模式,刻画复杂系统的行为特征。同时,运用人工智能技术对海量数据和复杂模型进行学习、推理,揭示涌现规律,实现从微观个体行为到宏观群体效应的一体化表征。在此基础上,智能系统工程采用因果推理、分层优化、自适应进化等方法,实现局部与整体的动态协同。多智能体群智涌现、分布式自主协同等也成为智能系统的新能力。总之,站在更高维度重新审视系统内在规律,通过构建宏微一体、虚实融合的智能分析优化体系,实现从局部到整体、从单系统到体系化的飞跃,将是智能系统工程的重要使命。

24.4 智能系统工程将成为多学科高度交叉融合的前沿阵地

系统科学、人工智能、运筹优化、管理科学等支撑智能系统发展的学科,过去存在专业分野、壁垒森严的现象。而如今,智能系统所面临的现实问题,往往具备综合集成化、动态演化性、非结构化、不完全信息等新特征,单一学科视角难以完整观照。加之,大数据、人工智能、区块链等新技术的出现,进一步推动了学科交叉融合趋势。智能系统工程作为一门新兴交叉学科,正在成为多学科协同创新的前沿阵地。从复杂性基础理论看,迫切需要系统科学、人工智能、数据科学、认知科学、社会科学等多学科联合攻关,在复杂性建模、演化机理、涌现行为等方面取得新认识新突破,为复杂系统的智能化升级奠定理论基础。从智能系统工程实践看,面对不同行业领域的实际需求,需要人工智能、控制科学、优化决策、领域知识等多维视角协同求解,打造跨界融合的系统解决方案。总之,面向未来,打破学科藩篱,加速多学科交叉融合,形成智能系统独特的理论体系、技术方法和应用范式,是大势所趋。

24.5 智能系统发展路径将从单纯技术驱动转向需求牵引与制度保障并重

过去,新技术的出现往往是系统变革的原动力。智能系统的发展,很大程度上也是由大数据、人工智能、区块链等颠覆性技术驱动的结果。然而,当智能系统日益成为国家关键基础设施、经济社会发展的新型底座,单纯依靠技术驱动显然是不够的。未来,智能系统工程要更加注重顶层设计,从国家重大需求和民生福祉改善的战略高度,前瞻谋划智能系统的功能定位、建设路线和关键布局,以需求牵引倒逼核心技术研发方向,做到关键技术"无缝对接"需求场景、创新成果"面向"国家战略。同时,智能系统作为新生事物,在发展中不可避免会遇到伦理、道德、社会影响等诸多挑战。因此,必须加快法律、标准、评估等配套保障机制建设,完善个人隐私保护、数据安全共享、算法应用监管等政策制度,加强智能系统潜在风险的评估和防控,为新兴智能系统营造包

容审慎的发展环境。

第二十五章 智能系统工程的发展重点

25.1 瞄准"卡脖子"科学难题,突破理论基础

当前,我国智能系统发展整体上还处于跟跑阶段。从基础理论看,对诸多本质性难题尚缺乏深入系统的研究。在复杂性建模方面,如何刻画开放环境下的动态性、涌现性、突变性等内在特征,提出普适性的复杂系统基础理论框架,是亟待破解的难题。在类人认知智能方面,如何通过小样本快速学习、因果推理、主动知识探索,使机器获得连续学习、主动认知的新能力,是挑战之一。在人机混合智能方面,亟需探索人机协同的认知计算新模型,实现人类经验知识与机器学习能力的优势互补。在群体智能涌现方面,如何在智能体相互博弈中实现个体与群体效用的均衡,是关键科学问题。破解上述理论难题,需要从数学、物理、认知等基础学科抽象出普适性的模型,并与人工智能、复杂网络等新兴学科深度融合,构建支撑智能系统分析、设计、优化、控制的理论新体系、方法新范式。要充分发挥我国制度优势,通过国家重点研发计划等稳定支持,组织全国优势力量协同攻关,力争在智能系统基础理论研究上取得原创性突破,引领国际智能系统发展潮流。

25.2 聚焦产业"卡脖子"技术,突破发展瓶颈

面向智能系统在感知认知、分析决策、执行控制等环节的迫切需求,亟需突破一批"卡脖子"的关键核心技术。在智能计算芯片方面,针对智能系统在复杂场景下的低时延、低功耗、高性能计算需求,研发具备认知智能、自主学习能力的类脑芯片,在计算密度、能效比、集成度等方面取得新突破,打破传统冯·诺依曼架构桎梏。在工业级智能传感器方面,攻关极端工况适应、多模态异构集成、自诊断自校准等新技术,大幅提升传感器可靠性、灵敏度、测量精度。在智能中间件平台方面,开发安全可信、服务智能化、应用便捷化的新型操作系统和数据库系

统,为行业应用提供可复用、易组合的通用智能服务和开发工具。要进一步完善产学研一体化创新机制,加强龙头企业、科研院所、高校的资源整合和目标协同,聚焦产业链供应链安全、自主可控的薄弱环节和关键领域,持续开展关键核心技术攻关,力争在若干领域率先实现"0到1"的突破,早日摆脱受制于人的被动局面。

25.3 深耕行业场景,打造标杆性示范应用

大规模工程实践是检验智能系统发展水平的试金石。当前,我国智能系统产业化、规模化应用还相对滞后,成功经验不多。下一步,要立足我国经济社会发展的迫切需求,聚焦智能制造、智慧交通、智慧能源、智慧医疗、智慧城市等重点领域,加快打造覆盖全生命周期的示范应用,提炼可复制可推广的成功模式。比如,在智能制造领域,选择机械、汽车、电子等优势产业,加快构建设计仿真、生产制造、经营管理、售后服务等全流程贯通的智能工厂,带动千行百业实现"换道超车"。在智慧交通领域,建设新一代智慧化交通基础设施,推进城市级自动驾驶、无人配送、智能调度等规模化应用,打造安全、通畅、共享的现代化立体交通网络,为建设"交通强国"注入新动能。同时,要高度重视智能系统的标准、测试验证和评估认证体系建设,研究建立覆盖感知层、网络层、平台层、应用层的标准规范,提供算法安全、系统安全、功能安全、网络安全等多维度的测试验证手段,加强对智能系统建设全过程的质量认证和安全监管,确保智能系统稳定、可靠、安全运行。

25.4 锻造多学科融通的复合型人才队伍

人才优势是赢得智能时代发展先机的制胜法宝。当前,既懂人工智能、大数据等前沿技术,又具备行业知识背景和过硬工程实践能力的高层次复合型人才十分稀缺。培养一支多学科交叉融合的高素质智能系统工程师队伍,是未来发展的迫切需要。要进一步完善智能系统相关学科专业体系,加快推动人工智能、大数据等新兴学科与控制科学、管理科学等传统学科的交叉融合,优化人才培养方案。探索"产学

研用"深度融合的协同育人新机制,鼓励科研院所、行业骨干企业与高校共建联合实验室、创新基地,为学生提供更多动手实践机会。支持高校聚焦行业应用一线,开设智能系统工程特色专业,因材施教,突出复合培养。同时,面向在职工程技术和管理人员,分领域分层次开展智能系统技术培训,建立与智能系统项目建设同步的人才培养机制。组织开展智能系统应用设计大赛、职业技能竞赛等,为各类人才脱颖而出、展现才华搭建舞台。加大智能系统领域创新创业扶持力度,完善科技成果转化机制,打通人才发展通道。要充分发挥国家高层次人才引进计划的示范带动作用,广纳全球智能系统领域的高端人才,为我国智能系统发展注入"源头活水"。

25.5 统筹国内外创新资源,塑造开放发展新格局

创新无国界,开放促发展。当前,智能系统发展已成为全球科技创新的战略必争之地。我国要以更加开放包容的姿态,积极融入全球创新网络,参与国际科技合作与竞争。一方面,支持国内高校、科研机构、行业组织主动参与或发起智能系统国际大科学计划,在全球智能系统创新版图中争取更多主导权、话语权。鼓励龙头企业、科研院所牵头承担或参与国际标准制定,提升我国智能系统领域的国际规则制定能力。另一方面,进一步完善海外人才、技术引进机制,加大力度引进智能系统领域的顶尖科学家、工程师,吸引海外高层次人才来华创新创业。支持国内外科研机构开展智能系统联合研发,打造一批国际化、高水平的智能系统创新平台。同时,要更好发挥自身优势,主动服务国家总体外交,依托"一带一路"倡议等重大平台,加强与沿线国家在智能系统领域的创新合作,推动中国智能系统走向世界,让全球共享中国智能化发展红利。

参考文献

- [1]涂序彦.智能系统工程[J].军事系统工程, 1994,30(4):34-40.
- [2]成思危.复杂科学与系统工程[J].管理科学学报,1999,(02):3-9.
- [3]徐杰.人工智能刑法主体资格之检思——以“主体说”为检思对象[J].湘江青年法学,2018,4(01):51-67.
- [4]刘增良.关于智能系统工程科学技术体系的思考[J].智能系统学报,2009,4(01):12-15.
- [5]戴国强,高芳,徐峰.人工智能在实际应用中的瓶颈及未来研究展望[J].情报工程,2018,4(01):4-12.
- [6]向锦武,董希旺,丁文锐,等.复杂环境下无人集群系统自主协同关键技术[J].航空学报,2022,43(10):333-365.
- [7]涂序彦.大系统控制论[M].北京:国防工业出版社, 1994.
- [8]崔雍浩,商聪,陈锶奇,等.人工智能综述:AI 的发展[J].无线电通信技术,2019,45(03):225-231.
- [9]何明昕.关注点分离在计算思维和软件工程中的方法论意义[J].计算机科学,2009,36(04):60-63.
- [10]涂序彦.“大系统控制论”的创立及其应用[J].控制理论与应用,2014,31(12):1613-1615.
- [11]刘峰涛.从意向性到映射:系统复杂性测度的理论架构[J].科学学研究,2009,27(07):968-975.
- [12]钟义信.人工智能的突破与科学方法的创新[J].模式识别与人工智能,2012,25(03):456-461.
- [13]吴斌,涂序彦, 吴亚东.最经济智能控制系统研究及应用[M].北京:科学出版社, 2009.
- [14]TuXuyan, Generalized Intelligent Systems Engineering[R]. Proceedings of “ Sino - - Ko- rea” Symposium on Intelligent Systems, Guang Zhou , 2003.

-
- [15]王越超,刘金国.无人系统的自主性评价方法[J].科学通报,2012,57(15):1290-1299.
- [16]李伯虎,柴旭东,朱文海,等.现代建模与仿真技术发展中的几个焦点[J].系统仿真学报,2004,(09):1871-1878.
- [17]吴丹,孙国烨.迈向可解释的交互式人工智能:动因、途径及研究趋势[J].武汉大学学报(哲学社会科学版),2021,74(05):16-28.
- [18]李岩,袁弘宇,于佳乔,等.遗传算法在优化问题中的应用综述[J].山东工业技术,2019,(12):242-243+180.
- [19]朱振.生命的衡量——自动驾驶汽车如何破解“电车难题”[J].华东政法大学学报,2020,23(06):20-34.
- [20]涂序彦,王枞,刘建毅.智能控制论[M].北京:科学出版社, 2010.
- [21]刘楚辉.自适应控制的应用研究综述[J].组合机床与自动化加工技术,2007,(01):1-4.
- [22]王永富,柴天佑.自适应模糊控制理论的研究综述[J].控制工程,2006,(03):193-198.
- [23]张柏楠,戚发轫,邢涛,等.基于模型的载人航天器研制方法研究与实践[J].航空学报, 2020, 41(7): 72-80.
- [24]黄文恺,梁智洪,王明华,等.数字孪生在航空航天结构设计、制造和运维中的应用与展望[J].图学学报, 2024, 45(2): 241-249.
- [25]秦晓成.航天器姿态控制系统智能故障诊断研究[D].沈阳:沈阳理工大学, 2019.
- [26]杨弘枨,刘山,焦玮玮,等.智能控制在航天推力矢量伺服系统中的应用及展望[J].航天控制, 2020, 38(3): 3-9.
- [27]Verma, Vandi, et al. Enabling Long & Precise Drives for The Perseverance Mars Rover via Onboard Global Localization[C]. 2024 IEEE Aerospace Conference. 2024: 1-18.

-
- [28] Ehrenfried, M. D. Perseverance's design. In Perseverance and the Mars 2020 Mission: Follow the Science to Jezero Crater[C]. Cham: Springer International Publishing. 2022: 27-74.
- [29] 王帅,李鹏等. 美国毅力号火星车成功着陆火星[J]. 国际太空. 2021, 3:1-15.
- [30] 李洪. 智慧火箭发展路线思考[J]. 宇航总体技术, 2017,1(1): 1-7.
- [31] 王刚, 樊忠泽, 刘岳国, 等. 关于我国智慧火箭技术的发展与思考[J]. 国际太空, 2021(5): 20-25.
- [32] 宋征宇, 吴义田, 徐珊姝, 等. 长征八号:长征火箭系列商业化与智慧化的先行者[J]. 深空探测学报(中英文), 2021, 8(1): 3-16.
- [33] 郑卓, 禹春梅, 程晓明, 等. 运载火箭智能控制的能力特征与关键技术[J]. 上海航天(中英文), 2022, 39(4): 52-58.
- [34] 王小锭, 董晓琳, 高朝辉, 等. 智慧火箭技术发展与智能等级分级设想[J]. 中国航天, 2022(5): 22-28.
- [35] 张霞, 焉宁, 郝宇星, 等. 智慧火箭数据获取技术探索与展望[J]. 宇航计测技术, 2023, 43(2): 64-70.
- [36] 何巍, 朱海洋, 刘凯, 等. 运载火箭智慧设计发展思考[J]. 宇航总体技术, 2024, 8(5): 46-56.
- [37] 网站: <http://www.jl1.cn>.
- [38] 张锐,邹蒙蒙,等. 通导遥一体化技术在生态环境保护中的应用初探[J].卫星应用. 2021, 000(006):52-55.
- [39] 谢浩然,詹亚锋,等. 卫星通导一体化技术及其在探月中的应用[J]. 深空探测学报.2021, 8(2):154-162.
- [40] 千帆星座:中国卫星互联网-未来通信的星辰大海. 新华网, 2024.09.03.
- [41] 网站: <http://celestrak.org>.
- [42] 李倬, 周一鸣. 美国 OneWeb 空间互联网星座的发展分析[J]. 通

-
- 信世界. 2018, 10:52-55.
- [43]科技部,卫生部,国家中医药管理局等.关于印发《中医药创新发展规划纲要（2006-2020 年）》的通知[EB/OL].(2007-01-11)[2024-11-21].https://www.gov.cn/zwgk/2007-03/22/content_557466.htm.
- [44]中共中央,国务院.中共中央 国务院关于促进中医药传承创新发展的意见[S].2019 年第 31 号国务院公报.北京:中国政府网,2019-10-20.[2024-11-21].https://www.gov.cn/gongbao/content/2019/content_5449644.htm
- [45]中共中央, 国务院. “健康中国 2030” 规划纲要[Z/OL].(2016-10-25)[2024-08-28]. https://www.gov.cn/zhengce/2016-10/25/content_5124174.htm
- [46]中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要[Z].北京:中国政府网,2021-03-12.[2024-08-28].https://www.gov.cn/xinwen/2021-03/13/content_5592681.htm
- [47]蔡端颖.我国基层中医卫生资源及服务能力现况研究与建议[J].中国农村卫生,2024,16(05):29-32.DOI:10.20126/j.cnki.1674-361X.2403-006.
- [48]董朝晖. “十三五” 医保基金压力不可小觑 [J]. 中国社会保障,2015,(11):70-72.
- [49]UYANIK, TAYFUN, KARATUG, CAGLAR, ARSLANOGLU, YASIN. Machine learning approach to ship fuel consumption: A case of container vessel[J]. Transportation research, Part D. Transport and environment,2020,84(Jul.):102389.1-102389.14. DOI:10.1016/j.trd.2020.102389.
- [50]Chryssolouris G, Alexopoulos K, Arkouli Z. Artificial intelligence in manufacturing systems[M]//A perspective on artificial intelligence in manufacturing. Cham: Springer International Publishing,

-
- 2023: 79-135.
- [51]Ren L, Dong J, Liu S, et al. Embodied Intelligence Toward Future Smart Manufacturing in the Era of AI Foundation Model[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2024.
- [52]Hopgood A A. Intelligent systems for engineers and scientists: a practical guide to artificial intelligence[M]. CRC press, 2021.
- [53]Valavanis K P, Saridis G N. Intelligent robotic systems: theory, design and applications[M]. Springer Science & Business Media, 2012.
- [54]Rigatos G G. Modelling and control for intelligent industrial systems[J]. adaptive algorithms in robotics and industrial engineering, 2011.
- [55]Valavanis K P, Saridis G N. Information-theoretic modeling of intelligent robotic systems[J]. IEEE transactions on systems, man, and cybernetics, 1988, 18(6): 852-872.
- [56]Tian Y, Chen C, Sagoe-Crentsil K, et al. Intelligent robotic systems for structural health monitoring: Applications and future trends[J]. Automation in construction, 2022, 139: 104273.
- [57]Mirza M A, Ghoroori M, Chen Z. Intelligent petroleum engineering[J]. Engineering, 2022, 18: 27-32.
- [58]Lei N. Intelligent logistics scheduling model and algorithm based on Internet of Things technology[J]. Alexandria Engineering Journal, 2022, 61(1): 893-903.
- [59]Issaoui Y, Khiat A, Bahnasse A, et al. Toward smart logistics: Engineering insights and emerging trends[J]. Archives of Computational Methods in Engineering, 2021, 28: 3183-3210.
- [60]Bu S. Logistics engineering optimization based on machine learn

-
- ning and artificial intelligence technology[J]. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 2021, 40(2): 2505-2516.
- [61]Lund H, Østergaard P A, Connolly D, et al. Smart energy and smart energy systems[J]. *Energy*, 2017, 137: 556-565.
- [62]Xu Y, Yan C, Liu H, et al. Smart energy systems: A critical review on design and operation optimization[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2020, 62: 102369.
- [63]Delsing J. Smart city solution engineering[J]. *Smart Cities*, 2021, 4(2): 643-661.
- [64]Muvuna J, Boutaleb T, Baker K J, et al. A methodology to model integrated smart city system from the information perspective [J]. *Smart Cities*, 2019, 2(4): 496-511.
- [65]Nanayakkara T, Sahin F, Jamshidi M. Intelligent control systems with an introduction to system of systems engineering[M]. Crc Press, 2018.
- [66]Bistron M, Piotrowski Z. Artificial intelligence applications in military systems and their influence on sense of security of citizens[J]. *Electronics*, 2021, 10(7): 871.
- [67]Chmyr V, Bhinder N. AI in the Higher Military Institutions: Challenges and Perspectives for Military Engineering Training[J]. 2023.
- [68]Madni A M. Augmented intelligence: a human productivity and performance amplifier in systems engineering and engineered human - machine systems[J]. *Systems engineering for the digital age: practitioner perspectives*, 2023: 375-391.
- [69]Pasdar A, Koroniotis N, Keshk M, et al. Cybersecurity Solutions and Techniques for Internet of Things Integration in Combat S

-
- ystems[J]. IEEE Transactions on Sustainable Computing, 2024.
- [70]Mayer M. Trusting machine intelligence: artificial intelligence and human-autonomy teaming in military operations[J]. Defense & Security Analysis, 2023, 39(4): 521-538.
- [71]Dragos V. Developing a core ontology to improve military intelligence analysis[J]. International Journal of Knowledge-based and Intelligent Engineering Systems, 2013, 17(1): 29-36.
- [72]Xu X, Li D, Sun M, et al. Research on key technologies of smart campus teaching platform based on 5G network[J]. IEEE Access, 2019, 7: 20664-20675.
- [73]Rao B P, Singh R K. Disruptive intelligent system in engineering education for sustainable development[J]. Procedia Computer Science, 2020, 172: 1059-1065.
- [74]Cheng Y, Zhao X, Wu J, et al. Research on the Smart Medical System Based on NB - IoT Technology[J]. Mobile Information Systems, 2021, 2021(1): 7801365.
- [75]Kanchana V, Nath S, Singh M K. A study of internet of things oriented smart medical systems[J]. Materials Today: Proceedings, 2022, 51: 961-964.
- [76]Raz A K, Blasch E P, Guariniello C, et al. An overview of systems engineering challenges for designing AI-enabled aerospace systems[C]//AIAA Scitech 2021 Forum. 2021: 0564.
- [77]Zheng Z, Shafique M, Luo X, et al. A systematic review towards integrative energy management of smart grids and urban energy systems[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2024, 189: 114023.
- [78]CH H B, Dhanamjayulu C, Kamwa I, et al. A novel on intellig

-
- ent energy control strategy for micro grids with renewables and EVs[J]. Energy Strategy Reviews, 2024, 52: 101306.
- [79]AI and IoT Technology and Applications for Smart Healthcare Systems[M]. CRC Press, 2024.
- [80]Gou F, Liu J, Xiao C, et al. Research on artificial-intelligence-assisted medicine: a survey on medical artificial intelligence[J]. Diagnostics, 2024, 14(14): 1472.
- [81]Li M, Jiang Y, Zhang Y, et al. Medical image analysis using deep learning algorithms[J]. Frontiers in Public Health, 2023, 11: 1273253.

后记

回顾智能系统工程白皮书的编写历程,可以说是一次对智能系统工程发展规律的探索之旅,更是一次学科交叉融合创新的心智之旅。衷心希望本书能抛砖引玉,引发学界对智能系统科学内涵、规律、方法的深入思考,推动系统科学、人工智能、行业知识的进一步交叉融合,为智能系统工程的理论创新和应用实践提供些许参考。

本书的写作除了得到了前言中提到的众多专家学者和行业机构的大力支持外,还特别得到了中国人工智能学会《中国人工智能系列白皮书》编委会主任戴琼海院士、执行主任王国胤教授等全体编委,中国人工智能学会秘书长王卫宁研究员,办公室贾晓丽、邹亚如、刘小晶等老师,组织工作专委会赵丽欣、于乃功等老师的悉心指导,在此,表示衷心感谢!正是在各界智慧和汗水的悉心灌溉下,本书的内容才日臻饱满、最终付梓。

未来,智能系统工程学科建设仍大有可为。为通用的工程化落地,它代表了人工智能技术体系化、行业化、市场化的核心方向。面向未来,要推动智能系统在制造、能源、交通、城市等重点领域形成创新突破,支撑传统行业加速实现数字化、网络化、智能化转型。要充分发挥企业主体作用,完善政产学研多方协同的创新机制,加速科技成果转化应用。要坚持开放包容、互利共赢,在国际科技合作中体现大国担当,为应对全球性挑战、构建人类命运共同体贡献智能系统方案。

最后,编写组全体成员,作为从事智能系统工程研究、实践、创新的科技工作者,要立足岗位、不负韶华,在基础理论、核心技术、工程方法等方面持续发力。要坚持战略引领、需求导向,聚焦"卡脖子"难题,加快关键核心技术攻关突破。要践行协同创新,在开放融通中激发创新活力,加速科技成果转化应用。要坚守价值理念、坚持人本情怀,确保智能系统发展行稳致远、造福人民。只要我们心无旁骛、脚踏实地,必将在民族复兴、国家富强的伟大实践中,谱写无愧于时代、无愧于人

民的崭新篇章！