ICS 21.020

CCS F 63

|  |
| --- |
|  |

T/CNS

中国核学会团体标准

T/CNS XXXXX—XXXX

|  |
| --- |
|  |

高温气冷堆核动力厂就地设备可维修性人因工程设计指南

Design guidelines for on-site equipment maintainability incorporating human factors engineering in HTGR nuclear power plants

|  |
| --- |
|  |
| 本稿完成日期：2025年7月 |

XXXX - XX - XX发布

XXXX - XX - XX实施

中国核学会   发布

目  次

[前  言 III](#_Toc204086982)

[1 范围 1](#_Toc204086983)

[2 规范性引用文件 1](#_Toc204086984)

[3 术语和定义 1](#_Toc204086985)

[4 总则 1](#_Toc204086987)

[5 就地设备布置设计中需考虑的因素表 1](#_Toc204086988)

[5.1 简介 1](#_Toc204086989)

[5.2 表格内容 2](#_Toc204086990)

[6 工作环境 2](#_Toc204086991)

[6.1 气候环境 2](#_Toc204086992)

[6.2 视觉环境 3](#_Toc204086993)

[6.3 听觉环境 3](#_Toc204086994)

[6.4 防误碰 3](#_Toc204086995)

[7 可达性 3](#_Toc204086996)

[7.1 物理可达性 3](#_Toc204086997)

[7.2 视觉可达性 4](#_Toc204086998)

[7.3 手臂可达性 4](#_Toc204086999)

[7.4 人员和设备的移动 5](#_Toc204087000)

[8 可操作性 5](#_Toc204087001)

[8.1 阀门布置 5](#_Toc204087002)

[8.2 辅助工器具 5](#_Toc204087003)

[8.3 操作过程 6](#_Toc204087004)

[8.4 维修过程 6](#_Toc204087005)

[9 危害防护 7](#_Toc204087006)

[9.1 通则 7](#_Toc204087007)

[9.2 设备的可隔离性 7](#_Toc204087008)

[9.3 辐射防护 7](#_Toc204087009)

[10 符合人的能力 7](#_Toc204087010)

[11 人因陷阱 8](#_Toc204087011)

[11.1 标识 8](#_Toc204087012)

[11.2 颜色编码 8](#_Toc204087013)

[11.3 报警器 9](#_Toc204087014)

[11.4 通用习惯 9](#_Toc204087015)

[参 考 文 献 11](#_Toc204087016)

[表1 就地布置设计中需考虑的因素表 2](#_Toc204085002)

[表2 不可视的条件下，手臂进入检修口的最小数据 3](#_Toc204085003)

[表3 地面到指尖的可达距离 4](#_Toc204085004)

[表4 地面可达抓取距离 4](#_Toc204085005)

[表5 地面可达捏取物距离 5](#_Toc204085006)

[表6 肩部可达捏取物距离 5](#_Toc204085007)

[表7 肩部高度估计值 6](#_Toc204085008)

前  言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国核学会提出。

本文件由核工业标准化研究所归口。

本文件起草单位：中核能源科技有限公司、清华大学核能与新能源技术研究院。

本文件主要起草人：袁睿、吴昊、田秀峰、张艳辉、张立伟、赵怀永、蔡艺伟。

高温气冷堆核动力厂就地设备可维修性人因工程设计指南

1. 范围

本文件提供了高温气冷堆核动力厂就地设备人因工程布置设计中需考虑因素的指南。

本文件适用于高温气冷堆的就地设备布置设计工作，其他堆型可参考执行。

1. 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅所注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB18871-2002 电离辐射防护与辐射源安全基本标准

GB/T4025-2010 人-机界面标志标识的基本和安全规则—指示器和操作器的编码规则

NB/T20061-2012 人因工程在核电厂系统、设备和设施中的应用

1. 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。



就地设备 on-site equipment

在设备安装的现场或附近进行操作和控制的设备，其允许操作人员在设备安装的现场直接进行操作。

1. 总则

核动力厂就地设备的运行和维护工作是是影响核动力厂安全的关键因素，同时也对事故的响应和缓解具有至关重要的作用。在对就地控制站、设备及厂房进行设计建造时，如果未能考虑人因工程问题，例如操作设备不可达、视觉障碍等各种人因陷阱，这将极大增加设备误操作的可能，继而造成重大安全危害和经济损失。因此，有必要在核动力厂设计建造时对就地设备进行人因工程设计并验证，来保障核动力厂的安全运行及经济效益。

1. 就地设备布置设计中需考虑的因素表
   1. 简介

表1给出了帮助就地设备布置设计者确定就地设备的诸因素信息，宜注意就地设备的布置设计考虑人因因素，以确保操作安全、设备可用性和人员舒适性。一级标题履行NB/T20061-2012第5章确立的人因工程的基本考虑进行分类。

* 1. 表格内容

表1确定了就地设备布置设计中需考虑的因素：

表1 就地布置设计中需考虑的因素表

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 一级标题 | 二级标题 | 三级标题 |
| 工作环境 | 气候环境 | 温度 |
| 湿度 |
| 通风 |
| 视觉环境 | 照明 |
| 防眩光 |
| 听觉环境 | / |
| 防误碰 | / |
| 可达性 | 物理可达性 | / |
| 视觉可达性 | / |
| 手臂可达性 | / |
| 人员和设备的移动 | / |
| 可操作性 | 阀门布置 | / |
| 辅助工器具 | / |
| 操作过程 | / |
| 维修过程 | / |
| 危害防护 | 通则 | / |
| 设备的可隔离性 | / |
| 辐射防护 | / |
| 符合人的能力 | / | / |
| 人因陷阱 | 标识 | 标识内容 |
| 标识分界线 |
| 标识布置 |
| 颜色编码 | / |
| 报警器 | 报警器设计 |
| 报警器布置 |
| 声报警信号 |
| 通用习惯 | / |

1. 工作环境
   1. 气候环境

温度

就地工作区域的温度宜在18-26℃（64-79°F）之间。与操作人员有接触的设备宜避免过冷或过热。

* + 1. 湿度

就地工作区域的湿度宜为30%-70%之间。

* + 1. 通风

空气流动的速度小于15米/分（每分钟50英尺）。

每小时进行至少3次至多6次换气。

工作区域没有令人不舒适的气味。

* 1. 视觉环境
     1. 照明

照明系统宜在工作区域各处提供统一的亮度水平，一般维修区域应≥300lux，关键操作区域（如控制面板、阀门操作点、仪表读数处）的照度应≥500lux。光源宜进行遮罩，以满足相应的用光需求。

* + 1. 防眩光

电厂就地运行区域的照明系统宜减少眩光。避免直射操作人员眼睛或关键设备表面，可通过漫反射设计或调整安装角度实现。

照明设备与操作人员的正常视线之间宜至少为30°角，以便操作人员能看清楚显示信息或完成操作。

* 1. 听觉环境

电厂工作人员宜避免承受过度的噪声。

电厂就地工作区域的固定背景噪声水平不宜超过65dBA。

在维修工作相对较少的区域内，固定背景噪声水平不宜超过80dBA。

间歇性的环境噪声水平超过85dBA的地方，应对人员提供保护。

操作人员不能承受超过115dBA的背景噪声，即使是短暂的也不可以。

* 1. 防误碰

就地工作环境距离是否足够大以防止临近的控制器被误触发，否则需考虑设计防误碰设施。

1. 可达性
   1. 物理可达性

如果一个设备不可接近，则需提供一种临时接近的手段（例如，脚手架或移动平台）。

用于进入设备内部的检修口，其位置和大小能保证所需作业的实施、调节或操作。在需要用手进入操作的情况，维修通道需足以容纳手及手持物。表2是检修口不小于的尺寸。中国成年人人体尺寸信息见GB/T 10000-2023[1]。

表2 不可视的条件下，手臂进入检修口的最小数据

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 接近类型 | 宽度mm（英寸） | 高度mm（英寸） |
| 到肘部，两只胳膊 | 200（8.0） | 125（5.0） |
| 到肩部，两只胳膊 | 500（20.0） | 125（5.0） |
| 到肘部，一只胳膊 | 125（5.0） | 110（4.5） |

需全身进入时，正方形入口尺寸宽不小于520mm，圆形入口尺寸直径不小于560mm,矩形入口尺寸宽不小于560mm高不小于330mm。

* 1. 视觉可达性

观察口足够大且可供双眼观察（例如双目镜观察）。

显示仪表（如刻度盘和VDU屏幕）的推荐观察距离为500mm-1000mm。

最大可接受观察距离取决于仪表、显示器的可读性（例如：字体大小、对比度、灯光照明等）。

就地操作人员能看到所有的与任务相关的信息，如手动阀门安装在与其相关的仪表附近，便于观察仪表读数。

就地操作人员的视线不被永久或临时的设备遮挡。

保证操作人员不用从倾斜方向来观察盘、显示等。

* 1. 手臂可达性

本节考虑无需身体过度伸展或踮脚尖的可达性的情况。本节提供的数据仅作指导之用。从地面到指尖的最大垂直距离基于表3提供的信息。

表3 地面到指尖的可达距离

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 百分比 | 男性mm（英寸） | 女性mm（英寸） |
| 5% | 200（8.0） | 125（5.0） |
| 50% | 500（20.0） | 125（5.0） |
| 95% | 125（5.0） | 110（4.5） |

从地面到抓取物的最大垂直距离基于表4提供的信息。

表4 地面可达抓取距离

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 百分比 | 男性mm（英寸） | 女性mm（英寸） |
| 5% | 1987（78.0） | 1829（72.0） |
| 50% | 2108（83.0） | 1956（77.0） |
| 95% | 2235（88.0） | 2070（81.5） |

从地面到捏取物（例如：小旋钮、按钮）的最大垂直距离基于表5提供的信息。

表5 地面可达捏取物距离

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 百分比 | 男性mm（英寸） | 女性mm（英寸） |
| 5% | 2019（79.5） | 1867（73.5） |
| 50% | 2146（84.5） | 1981（78.0） |
| 95% | 2273（89.5） | 2108（83.0） |

从肩后部到抓取物体中心间的最大水平距离基于表6提供的信息。

表6 肩部可达捏取物距离

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 百分比 | 男性mm（英寸） | 女性mm（英寸） |
| 5% | 610（24.0） | 559（22.0） |
| 50% | 686（27.0） | 610（24.0） |
| 95% | 724（28.5） | 660（26.0） |

* 1. 人员和设备的移动

通道有足够的宽度使人员能够安全方便地通过，对于维修通道，单人通道宽度不宜小于660mm（26英寸），双人通道宽度不宜小于1400mm（4英尺7英寸）。

不宜让人员搬运、推动或拉动重物上下楼梯或斜面。

不宜让人员长距离地搬运、推动或拉动重物。注：可接受的距离因货物的重量、尺寸、硬度、形状、类型、位置，以及货物被搬运/推/拉的高度不同而异。超过12m（40英尺）被认为是长距离。

人员通道宜避开危险区域，诸如机器移动、起重设备、起重设备运动路径或叉/铲车操作区域。

在设备移动的场合宜提供足够的空间以避免人员被挤住。

人员搬运、推动或拉动重物时宜能够看到其前进的方向并能够预知其方向上可能遇到的风险。

1. 可操作性
   1. 阀门布置

阀门的位置宜便于在操作平台或地面上进行操作与维修。阀门手轮中心标高（距操作面宜为1.1～1.3m，不宜超过1.8m）便于手动操作，如阀门手轮从最近的空地垂直上去以后还应进行一定距离的侧移，还应考虑侧移距离。阀门手轮距离操作人员不宜超过500mm（20英寸），可接受的最大距离宜为680mm（27英寸）。

阀门与阀门净距宜≥100mm，阀门外缘与土建墙、柱、梁等的净距离不宜小于200mm。

阀门手柄前宜提供足够的操作空间，宽度宜至少为610mm（24.0英寸），深度宜至少为840mm（33.0英寸）。

可考虑阀门增加伸长杆（DN40及以下手动阀不宜采用伸长杆，以免力矩过大损坏）或链轮（适用于1.8m以上阀杆方向水平，DN40以下手动阀不宜采用链轮，链距地800mm为宜）。

需要检修的阀门或设备、需要人员操作的阀门、需要近距离观测的仪表等，若不可达，需考虑设置钢平台。

* 1. 辅助工器具

系统和设备宜应设计成可使用通用维修测试设备和工具进行维护。

设计宜减少用于设备维护的辅助工器具的数量和类型。

如果设备通过螺栓连接，则需考虑螺栓拆除及所用工器具的空间。

在妨碍人员检修通行的通道上设置钢平台。

如考虑采用临时装置（如梯子、移动平台、升降车等），则应考虑相关设备的可通过性。

需考虑阀门是否被管道、保温、风道等堵住无法使用工具辅助操作。

设备的布置宜保证该设备在拆除和更换过程中不影响其它设备并且不需要移动其它设备。

* 1. 操作过程

需提供机械手段以最小化手动操作的需要。

超过20kg（44磅）的物品宜提供把手。

体力的任务不超过肩膀高度（见表7肩膀高度估计值）。

表7 肩部高度估计值

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 百分比 | 男性mm | 女性mm |
| 5% | 1285 | 1199 |
| 50% | 1372 | 1276 |
| 95% | 1464 | 1353 |

可以近身提起、降低或搬运的物品重量不宜超过25kg（55磅），超过此重量的物品需明确标明其需要两个人来提起和搬运。

当物品需离开身体持有，则其重量不宜超过15kg（33磅），超过此重量的物品需明确标明其需要两个人来提起和搬运。

靠近身体持有的物品，高于肩部或低于膝盖的最大物品重量宜不超过10kg（22磅），若离开身体持有，则此重量宜不超过5kg（11磅）。超过此重量的物品需明确标明其需要两个人来提起和搬运。

超过60kg（132磅）的重物需提供机械的辅助提升工具。

物品不宜从地面高度被提起，如果不可避免，则提起高度不超过腰部。

物品不宜提起或降低较大的垂直距离（例如从膝盖到肩膀高度）。

任务不宜超过操作人员最大体能的60%。

大部分正常的健康员工能够没有危险地完成操作或工作。

* 1. 维修过程

设备设计宜减少设备维修时间。尤其是当设备的不可用会影响安全或者需要维修人员暴露于放射性环境或可能的危险环境中的时候。

宜减少设备之间无必要的相互关联，这样在某个设备的维修过程中可以宜减少对其它设备的影响。

设备的设计满足便于快速检测、隔离故障设备。

在现场环境比较恶劣的情况下，为了减少可能的人为失误，设计中考虑标准模块在现场的简单更换，以及到维修车间进行维修。

设备的设计具有灵活性并且模块化，便于在将来对设备安装和维修。

对于需就地解体维修的设备，需要考虑设备解体操作的空间。

需考虑设备内件的抽出空间。如转动设备抽转子等。

需考虑检修操作所需的可拆卸设计（如卡箍连接的管道需设置活接头、螺纹连接的安全阀需设法兰短管）。

1. 危害防护
   1. 通则

当维修人员按照维修程序进行设备维护时，设备不应对人员造成危险。

设备的维修或操作不应导致人员沾污、污染扩散、不必要的放射性接触、防护服损坏、手指夹伤、有毒/有害物质释放或化学品接触。

应使用橡胶或其它合适的材料覆盖设备上的凸出和尖角等人员可能接触到的地方。

机器上所有活动的部分应具备足够的防护。

在工作面、行走地面、梯子或楼梯等处以采取适当的措施避免滑倒、绊倒和跌落。

吊车、起重设备或铲车操作区域的布置应避免工作人员遭遇其荷载的冲撞、限制。

对于具有危险能量等级（高电压或高温）的设备或其部件，应配备相应的方法以便在维修之前能释放这些能量。

在维修过程中，应将具有危险能量等级（高电压或高温）的设备或部件放置在维修人员不能接触的位置，或为设备/部件添加防护。

作业位置应避免人员接触有毒/有害、过热/过冷物质，以及移动中的设备。

应对设备采取防护措施，以免受人员行为造成的可能的外部影响（例如：外力、污染、灰尘、静电，等）。

设备的不规则突出部分应易于移除，以避免安装和维修期间被人员损坏。

* 1. 设备的可隔离性

对于需拆卸和打开系统设备进行维修，或维修工作有可能被系统、设备中的工作源造成伤害时，均应设计可靠维修隔离的手段，并提供工作区域内残存介质或能量的排空手段。

如在泵的进出口管线上需要设置闸阀（隔离阀），以方便检修。

常用的机械设备隔离边界为能可靠锁闭的手动阀门，常用的电气隔离边界为能可靠上锁的断路器或隔离开关。

应考虑设备维修隔离边界范围的合理性，应设置最小维修隔离边界，以减少对系统运行的影响。

对于执行关键安全功能的设备，应考虑设计冗余列，确保设备维修时，不影响关键安全功能的执行。

* 1. 辐射防护

辐射防护要求应符合GB/T 18871（所有部分）中的规定。

应将经常进行维护或手动操作的设备，布置在剂量率较低的区域，以减少对工作人员的照射。

需要维修人员暴露于放射性环境或可能的危险环境中的时候，设备设计宜减少设备维修时间。

具有高辐射场的设备应通过屏蔽或远距离放置的手段与其它设备相隔离。同时，设备现场应提供快速屏蔽装置安装空间和运输通道。

核电站的布置宜减少运行人员在正常运行、维修和检查时的辐照剂量。因此在设计上应充分考虑提供专用工具的必要性。

应为运行人员和核电站设备提供合适的去污设施。

1. 符合人的能力

设备的设计宜减少对维修人员的特殊技能需求。如经授权的操作人员的知识/经验/技能水平是否足以完成操作、操作是否对人员的身体条件/精神状态等。

开展维修工作所需人员数量及必要时间分析，在高辐射及环境恶劣环境，宜减少需要现场维修人员的数量及时间。

物体应能够使操作人员持有时接近其身体的中心，应避免极端或异常的身体姿势。

不应需要频繁或持续的体力（例如，高频度的短时间加力，持续地长时间加力，或快速地重复移动）

1. 人因陷阱
   1. 标识
      1. 标识内容

所有设备、部件、控制器等均应有标识，标识的设计应符合GB/T 4025（所有部分）中的规定。

所有标识均应完整、正确、意义明确地描述出物项、工况、功能或动作，设备标识的命名、标签、描述规则应该保持一致。

设备上应该提供警告标识以标明决不允许执行的危险动作。

应利用标识内容或格式区分控制器动作和状态信息（例如，某控制器标有“开启阀门”，其相应的指示灯为“阀门开启”）。

应采用分层次的标识系统，区分主系统、子系统（功能组）、部件、指示灯及按钮等，且标识上应标明设备所属的功能组。

所有文字均宜是竖直向上的。

应避免邻近标识的相似与混淆（例如，可以使用颜色或粗体文字以突出相似标识中的不同）。

标识中宜采用大写字母，测量单位除外。

标识中每一行的文字宜居中。

字符的最小高度宜为3mm（0.125英寸）。

* + 1. 标识分界线

应使用分界线将处于不同系统或功能组的控制器和显示器组合起来。

应使用分界线及有颜色的控制盘背景突出表示重要的控制器与显示器组。

分界线应在视觉上明显区别于控制盘背景。

分界线应能长久保持。

* + 1. 标识布置

所有标牌均应被安全地固定在设备上，且应持久耐用。

所有标识均宜水平放置。

控制器、仪表、显示器上的标识、刻度、指针应便于操作人员在工位上清晰辨别。

如果环境灯光非常弱，则标识应该采用带磷光的颜色进行标记。

每一个标识距离它所标识的控制器、控制位置、显示器、部件或者仪表都应该是最近的。

控制器的标识应置于控制器上（首选），或置于控制器正上方。

标识不应被其它设备遮挡。

相邻的标识之间应该有足够的间隔以防止它们被视作同一连续的标识。

部件上或者盘柜内设置的标识应该使得操作人员无需移动任何东西就可以看到。

盘柜的前侧、后侧和内侧均应设置标识以防止维修错误。

* 1. 颜色编码

全厂各类人机接口中，相同类别（如设备状态类别、报警类别、工艺介质类别、电气单线图类别等）的显示中颜色编码应一致。

同一种颜色可以用于不同类别（如不同介质的工艺管线、不同电压等级的线路）的显示，在不同类别的显示中可以有不同的含义。但在同一类别的显示中，颜色的含义应全厂统一。

不能仅用颜色编码作为标识的唯一方法。颜色编码需要与其它方法配合使用，如标识、符号变化、闪烁等。

用于显示电厂、过程及部件状态的颜色编码及用于控制的颜色编码宜在各工程《人机接口设计导则》及《操作按钮、指示灯颜色的使用规定》中确定。

* 1. 报警器
     1. 报警器设计

报警信号只能被用于需要操作人员、维修试验人员执行某个动作或者紧急关注某项状态显著变化的情况。

报警器的优先级不应多于三个。

报警器应该按功能进行分组。

在“正常”的情况下报警器应该维持在熄灭状态。

在故障排除之前，报警器指示不得被清除或取消。

当故障排除或者工况恢复正常时，声报警器应该自动复位。

如果报警发生而工况在报警得到确认之前恢复正常，则报警信号应该继续维持在点亮状态并且持续闪烁直到得到确认为止。

报警器应该有足够的尺寸以容纳所需的标识文字。

应配有报警器测试设备。

如果某一部件是冗余系统的一部分，且该部件无法运行，则应该提供报警信号以显示该冗余的失效。

* + 1. 报警器布置

报警信号应该被布置于使用者可能出现的所有区域。

重要的、高优先级的警报应该被布置于操作区域的中间位置。

所有报警器均应该位于操作人员的视野范围内。

如果可行，所有报警器都应该首先采用颜色编码及空间分组。

* + 1. 声报警信号

声报警信号只能被用于需要操作人员执行某个动作或者紧急关注某项状态显著变化的情况。

声报警信号的强度应该比正常环境噪声高10dB左右，但不应超过正常环境噪声水平15dB以上。

在相对较大的电厂就地操作区域内，每一个控制盘均应该备有自己的声源。

声报警信号声音频率应该在500-3000Hz范围内。

应配有声报警信号测试设备。

声报警信号不应多于6种。

声报警的音调应该为调制或间断音调。

声报警的音调应该易于从其它非报警声信号中区分开来。

铲车、起重机、运输机，以及其它处于有人员出没区域的大型移动设备均应设置声报警以警示设备即将启动或正在运行。

* 1. 通用习惯

现场设备布置、阀门指示、颜色代码使用应符合常规习惯，如红色代表开启，绿色代表关闭，反之则违背传统习惯；阀门指示方向与管道流向垂直为关，与管道流向平行为开等。

参 考 文 献

|  |  |
| --- | --- |
| [1]GB/T 10000-2023 | 中国成年人人体尺寸 |

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_