ICS 27.120.01

CCS F65

**T/CNS**

中国核学会团体标准

T/CNS XXXX—XXXX

|  |
| --- |
|  |

高温气冷堆核动力厂核能供热装置可靠性分析实施程序

Reliability Analysis Implementation Procedure for Nuclear Heating Facilities in High-Temperature Gas-cooled Reactor 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 3](#_Toc200355585)

[高温气冷堆供热装置可靠性分析实施程序 4](#_Toc200355586)

[1 范围 4](#_Toc200355587)

[2 规范性引用文件 4](#_Toc200355588)

[3 术语和定义 4](#_Toc200355589)

[4 分析原则 5](#_Toc200355590)

[5 分析输入 5](#_Toc200355591)

[5.1 供热系统设计方案 5](#_Toc200355592)

[5.2 供热运行工况 6](#_Toc200355593)

[5.3 机组大修计划 6](#_Toc200355594)

[6 供热可靠性目标及指标 6](#_Toc200355595)

[6.1 供热可靠性目标 6](#_Toc200355596)

[6.2 供热可靠性指标 6](#_Toc200355597)

[7 供热工况分析 6](#_Toc200355598)

[8 系统分析 7](#_Toc200355599)

[8.1 资料收集 7](#_Toc200355600)

[8.2 功能分析 7](#_Toc200355601)

[8.3 FMEA分析 7](#_Toc200355602)

[9 供热可靠性模型建模 7](#_Toc200355603)

[9.1 确定顶事件 7](#_Toc200355604)

[9.2 简化流程图 7](#_Toc200355605)

[9.3 明确建模假设 7](#_Toc200355606)

[9.4 数据分析 8](#_Toc200355607)

[9.5 故障树构建 8](#_Toc200355608)

[10 供热可靠性模型定量化 8](#_Toc200355609)

[参 考 文 献 9](#_Toc200355610)

1. 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。

本标准由中国核学会提出。

本标准由核工业标准化研究所归口。

本标准起草单位：中核能源科技有限公司

本标准主要起草人：郝天一、张科科。

高温气冷堆核动力厂供热装置可靠性分析实施程序

* 1. 范围

本文件规定了针对高温气冷堆供热装置开展可靠性分析的基本原则、分析方法、实施程序、技术要求。

本文件适用于高温气冷堆核能供热装置的可靠性分析活动，其它类似装置的可靠性分析工作也可参考本文件。

* 1. 规范性引用文件

本文件无规范性引用文件。

* 1. 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

可靠性 Realibility

系统或设备在规定条件下和时间内完成预期功能的概率。

3.2

可用性 Availability

系统在需要时处于可运行状态的概率。

3.3

平均故障间隔 Mean Time Between Failure（MTBF）

系统或设备连续两次故障之间的平均时间。

3.4

平均修复时间 Mean Time to Run（MTTR）

系统或设备从故障发生到恢复运行的平均时间。

3.5

故障率 Failure Rate

设备单位时间内发生故障的概率，用λ表示。

3.6

故障模式与影响分析 Failure Mode and Effictive Analysis

识别潜在故障模式及其对系统影响的系统化方法。

3.7

故障树分析 Fault Tree Analysis

通过逻辑门分析系统故障原因的定量方法。

3.8

供热装置 Heat Facility

供热厂房范围内包括除盐水预热器、除盐水除氧器、除盐水泵、蒸发器、过热器等在内的用于生产工业蒸汽的所有设备。

3.9

共因失效 common cause failure

由于共同原因导致的多个部件或系统的失效。

3.10

重要度 importance

衡量系统或设备对整体可靠性贡献大小的指标。

* 1. 分析原则

供热可靠性分析工作总体上遵循以下几个原则：

1. 系统性原则：供热可靠性分析应覆盖供热装置的所有关键系统和组件，考虑其相互作用和外部环境影响。
2. 定量与定性相结合：在分析中应综合运用定量和定性分析方法，以全面评估系统可靠性。
3. 可追溯性原则：所有分析输入、假设、计算过程和结果都应该留存记录，确保分析过程的可追溯性。
4. 持续改进原则：供热可靠性分析是一个迭代的过程，应根据设计进展、经验反馈等信息持续更新和完善。
5. 保守性原则：在可靠性定量评估中，对于不确定性因素应采取保守估计，以确保分析结果留有充分的裕量。
   1. 分析输入
      1. 基本要求

开展供热可靠性分析需要以下资料作为输入，分析时应确保其及时性、准确性和完整性。

* + 1. 供热系统设计方案

开展供热可靠性分析需要明确系统工艺流程图、设备技术规格书、电气系统图、控制逻辑等设计资料，具体内容和范围包括：

1. **系统工艺流程图**：包括从除盐水生产系统到工业蒸汽离开厂区边界内的所有与工业蒸汽生产相关的系统及其支持系统；
2. **设备技术规格书：**供热系统内重要设备的选型信息、设计参数等；
3. **电气系统图：**包括电气系统主接线图、一次接线图、二次接线图等；
4. **控制逻辑：**供热系统的运行控制策略**。**
   * 1. 供热运行工况

应明确供热系统包含的运行工况，明确不同运行工况下的系统配置情况及工况的持续时间。

* + 1. 机组大修计划

应明确高温气冷堆核岛、常规岛、华龙一号、供热装置等的大修计划，包括大修周期、大修时间、大修顺序以及大修内容等。

* 1. 供热可靠性目标及指标
     1. 供热可靠性目标

供热可靠性目标至少应明确以下内容：

1. 基本供热需求：在正常运行和故障工况下，供热蒸汽的温度、压力等品质要求；
2. 供热负荷要求：为了保障工业用户的基本生产需求，系统应满足的最小供热负荷能力；
3. 供热连续性要求：在寿期内，供热装置应尽可能连续供热，最大限度减少非计划停止供汽的时间；
   * 1. 供热可靠性指标

应根据供热目标，通过定量或定性方法定义可靠性指标，确保指标的可测量性和可验证性。主要指标包括：

1. 系统失效率：单位时间内供热失效的概率；
2. 系统可用性：系统在任意给定时间内处于可用状态的概率；
3. 平均无故障时间：衡量系统在连续两次故障之间的平均间隔；
4. 平均修复时间：衡量系统从故障发生到恢复运行所消耗的时间；
5. 风险重要度：如FV重要、RRW重要度等，用于识别系统或设备对可靠性的贡献程度。
   1. 供热工况分析

应对影响高温气冷堆供热装置可靠性的关键工况进行失效情景分析，为此首先明确存在的基本工况，例如：高温堆单模组核岛大修、常规岛大修、华龙一号大修、供热装置定期维修等。

应针对以上工况存在的所有可能组合开展失效情景分析。对于每一种工况，明确供热装置的成功准则和失败准则，根据每一种工况下系统可运行性，进行系统级FMEA分析，得到每一种工况下对系统可靠性的要求。

* 1. 系统分析
     1. 资料收集

确认已收集到第5节中列出的所有必要设计资料，对资料进行审查，确认其版本最新、内容完整且内容一致。

* + 1. 功能分析

明确供热装置的整体性能，以及各子系统的主要功能和性能要求。识别系统在不同运行模式下的边界条件和关键性能参数。通过功能框图或功能流图等形式，清晰展示系统各模块间的逻辑关系和数据流。

* + 1. FMEA分析

FMEA分析是针对高温气冷堆供热装置开展可靠性评估的核心方法，其核心目标是通过系统性识别所有潜在失效模式及其影响，确定每种可能的失效模式造成的后果。

具体实施时，需明确分析的具体对象及其与外部系统的接口和边界条件，包括装置的热工参数、运行工况、关键设备（如蒸汽发生器、热交换器等）的相互作用关系，以及外部环境对系统的影响。

分析过程中，应基于多专业方向，结合设计图纸、操作规程、历史故障数据等资料，系统梳理各子系统及组件可能存在的失效模式，对每种失效模式，分析其可能的原因。

评估每种失效模式对局部系统、整个供热装置乃至电厂的影响，包括对供热负荷能力、蒸汽品质、运行稳定性的影响。

* 1. 供热可靠性模型建模
     1. 确定顶事件

根据工况分析的结果和可靠性目标，明确故障树的顶事件。顶事件应是供热系统无法满足供热目标的具体失效事件，例如供热负荷能力不满足最小热负荷需求。

应清晰定义顶事件的失效准则，顶事件的失效准则从工况分析的成功准则转化，并取决于不同工况下对系统的要求。

* + 1. 简化流程图

简化流程图是从故障树分析的角度对某个系统的管道工艺流程图或电气图进行简化后形成的，简化流程图有助于故障树分析工作，同时也反应了故障树分析的一些思路和过程。

在绘制简化流程图时，可以进行一些必要且合理的假设，例如：FMEA分析中部件失效不会直接或间接导致顶事件发生的设备在简化流程图中可以不考虑。

简化流程图应清晰展示系统内的主设备、关键路径、逻辑关系等。

* + 1. 明确建模假设

为了简化故障树，减小模型的规模，需要作些合理的假设。应根据分析时的设计阶段和资料齐全程度，明确分析深度以及分析的假设。假设内容至少应涵盖：

1. 建模范围，例如是否包含电气仪控系统等；
2. 数据来源与处理；
3. 人因处理；
4. 试验维修相关处理；
5. 是否考虑管道破裂。
   * 1. 数据分析

供热可靠性模型中需要的数据包括设备可靠性数据、共因失效数据、试验维修周期、非计划停堆频率、外电网丧失频率等。针对以上数据应明确引用的数据源及选择依据，并且应尽可能根据项目特征对数据进行更新。

* + 1. 故障树构建

从顶事件开始，自上而下逐层分解，将复杂的系统分解为更小的系统和基本组件，直至无法再分解的基本事件，并使用逻辑门表示事件之间的逻辑关系。底事件应是已知或可获取失效率数据的基本元件失效、人因失误、外部事件等。

* 1. 供热可靠性模型定量化

定量分析的目的为：

1. 计算每个最小割集发生的概率
2. 利用最小割集的概率，计算顶事件的发生概率，从而确定系统的可靠性
3. 确定每个底事件对顶事件的重要程度

在针对可靠性指标定量计算时，应开展重要度、敏感性和不确定性分析，说明结果中不确定性的主要来源和关键假设，并了解它们对结果的可能影响。

参 考 文 献

[1] HAF102 核动力厂设计安全规定

[2] HAD102/01 核电厂设计总的安全原则

[3] HAD102/17 核动力厂安全评价与验证

[4] GB/T7163-2021 核电厂安全系统可靠性分析要求

[5] IEEE-353-2016 核电站系统和其它核设施可靠性分析指南