

### 聚变堆遥操作维护系统设计准则 第1部分：整体维护要求及分析

Design criteria for remote handling maintenance system in fusion reactor  
Part 1: Overall maintenance requirement and analysis

2018 - 08 - 08 发布

2018 - 09 - 08 实施

## 前 言

DB34/T 3186 《聚变堆遥操作维护系统设计准则》分为如下 7 个部分：

- 第 1 部分：整体维护要求及分析；
- 第 2 部分：遥操作协同控制系统；
- 第 3 部分：转运车系统；
- 第 4 部分：偏滤器遥操作维护系统；
- 第 5 部分：包层遥操作维护系统；
- 第 6 部分：第一壁部件远程监控及测量系统；
- 第 7 部分：多功能机械臂系统。

本部分为第 1 部分。

本部分按照 GB/T 1.1-2009 给出的规则起草。

本部分由中国科学院等离子体物理研究所提出。

本部分由安徽省核聚变工程技术及应用标准化技术委员会并归口。

本部分起草单位：中国科学院等离子体物理研究所、安徽省质量和标准化研究院，合肥中科艾帝尔机器人技术有限公司。

本部分主要起草人：程勇、宋云涛、陆坤、潘志远、张俊、王祺、李碧、史善爽、赵文龙、潘洪涛、李阳、孙拥军、郝志伟。

# 聚变堆遥操作维护系统设计准则 第1部分：整体维护要求及分析

## 1 范围

DB34/T 3186 的本部分规定了聚变堆遥操作维护系统的术语和定义、聚变堆遥操作维护系统组成、整体维护要求、RAMI 要求和安全要求。

本部分适用于聚变堆遥操作维护系统设计的所有阶段，是遥操作维护子系统设计的重要依据。

## 2 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。

GB 4208 外壳防护等级(IP代码)

GB/T 50064 交流电气装置的过电压保护和绝缘配合

GB/T 50065 交流电气装置的接地设计规范

DB34/T 2734.1 托卡马克聚变堆部件 兼容性设计与评估技术指南 第1部分：设计

## 3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

### 3.1

**聚变堆** fusion reactor

利用可控聚变反应产生聚变能的装置。

[GB/T 4690.9-2013, 定义2.4.44]

### 3.2

**遥操作** remote handling (RH)

通过机电设备控制在聚变堆中远距离操作的活动，又称遥操作操作。

### 3.3

**遥操作维护** remote handling maintenance

使用遥操作方式对聚变堆中的放射性单元和部件进行维护与改造。

### 3.4

**遥操作协同控制系统** remote handling cooperative control system

借助计算机技术对各个遥操作子维护系统实施协同控制，以满足遥操作维护要求而构成的系统。

3.5

**热室 hot cell**

用于聚变堆部件维修与测试的场所。

3.6

**转运车系统 transfer cask system**

实现真空室内部部件以及遥操作设备在热室与真空室之间遥控转运的系统。

3.7

**偏滤器遥操作维护系统 divertor remote maintenance system**

用于维护偏滤器及其相关部件的一套遥操作系统。该系统可以拆除真空室内大型偏滤器部件，然后转移至热室进行维修、更换和废弃处理等维护操作。

3.8

**包层遥操作维护系统 blanket remote maintenance system**

维护包层及其相关部件的一套系统。该系统可以拆除真空室内各种尺寸包层，然后转移至热室进行维修、更换和废弃处理等维护操作。

3.9

**第一壁部件远程监控及测量系统 remote monitoring and measuring system for plasma facing components**

一种能在装置等离子体放电间隙对第一壁进行近距离观测和测量的一种多关节铰链式机械臂，借助前端执行器可实现对真空室内第一壁的检测和测量任务。

3.10

**多功能机械臂系统 multi-purpose robot system**

通过机械臂在真空室内部部署和操作维护工具或者内部部件实现对活化灰和氚存量控制、维护过程的检测、检漏以及真空室内部诊断；同时具备将真空室内部维护工具或者内部部件从真空室内部运输到停靠在水平窗口的转运车系统，并运输到热室内部的功能。

3.11

**运行安全地震震动 operational safety ground motion**

在设计基准期中年超越概率为 2% 的地震震动，其峰值加速度不小于 0.075 g。通常为核电厂能正常运行的地震震动。

3.12

**极限安全地震震动 ultimate safety ground motion**

在设计基准期中年超越概率为 0.1% 的地震震动，其峰值加速度不小于 0.15 g。通常为核电厂区可能遭遇的最大地震震动。

### 3.13

#### RAMI 分析 RAMI analysis

RAMI 分析是由可靠性 (reliability)、可用性 (availability)、可维护性 (maintainability)、可检测性分析 (inspectability) 四个单词的首字母组成，是一种托卡马克聚变堆在可靠性 (持续正常的运行)、可用性 (随时都可以正常运行)、可维护性 (可以进行维修和更换) 和可检测性 (可以进行检测和控制) 上具有更换保证的技术风险控制方法。

## 4 聚变堆遥操作维护系统组成

聚变堆遥操作维护系统主要由遥操作协同控制系统、转运车系统、偏滤器遥操作维护系统、包层遥操作维护系统、第一壁部件远程监控及测量系统和多功能机械臂系统等组成，各系统的维护策略见 DB34/T 3186.2-3186.7。

## 5 整体维护要求

### 5.1 标准化、模块化

- 5.1.1 应采用统一的尺寸系列，如水管尺寸等。
- 5.1.2 应采用统一规格的标准件，如电连接器、法兰、水管接头、紧固件等。
- 5.1.3 应采用易于装配的结构，如倒角对准，便于抓取的特征面、视觉定位点等。
- 5.1.4 应采用统一规定的处理方法，如焊接或切割方法。
- 5.1.5 应采用标准的质量管理准则，如螺纹的尺寸公差、配合面的表面质量和尺寸公差。

### 5.2 实用性要求

- 5.2.1 各部件结构的设计应结构简单，便于安装、维护。
- 5.2.2 应具有满足遥操作维护所需要的维护空间。
- 5.2.3 应规定适合观察和测量的间隙值，便于遥操作设备感知维护对象。
- 5.2.4 应对远程维护中容易损坏部件的设置保护措施。

### 5.3 抗震要求

- 5.3.1 系统应能承受运行安全地震震动，并应针对该类地震对系统可能造成的最大损伤，设计相应的修复和恢复运行的解决方案。
- 5.3.2 应评估极限安全地震震动对遥操作维护系统造成的损伤程度；地震发生时，系统对装置其他核心部件造成损伤的程度应最小。

### 5.4 防火要求

- 5.4.1 对于有较大火灾风险的区域，应配备火灾检测和灭火设施。
- 5.4.2 宜选择低可燃性，低烟的材料。
- 5.4.3 应避免因真空室内局部粉尘聚集引起的粉尘爆炸。

## 5.5 抗辐照要求

系统所有部件均应具有一定耐辐照能力，并在投入使用前得到验证。总耐辐照剂量应不小于 20 kGy，即相当于在 20 Gy/h 的辐照环境下能够连续运行 1000 小时。

## 5.6 接地与绝缘要求

- 5.6.1 系统控制器应符合 GB/T 50064 和 GB/T 50065 规定的接地和绝缘要求。
- 5.6.2 传感器信号线应在单独屏蔽的双绞线上进行整体电缆屏蔽。
- 5.6.3 电源线应按照国家相应标准进行屏蔽。
- 5.6.4 电源线和信号线布局宜分离。

## 5.7 仪器与控制要求

- 5.7.1 应配置控制柜以遥操作控制各个系统、设备和工具。
- 5.7.2 机柜应与聚变堆基础设施相结合，并提供用于执行指定维护任务的操作功能。
- 5.7.3 控制柜应至少提供以下两种控制模式：基于集成控制软件平台的遥操作自动控制和基于遥操作设备底层控制器的手动控制。

## 5.8 真空及洁净度要求

- 5.8.1 遥操作设备在真空室内部工作时，其材料应满足真空洁净要求，不应有碎片或微粒脱落。
- 5.8.2 系统不宜使用易脱落的油漆或表面涂层。
- 5.8.3 所有不锈钢部件应进行酸洗和钝化。
- 5.8.4 所有铝合金部件应进行阳极氧化处理。
- 5.8.5 齿轮箱和内部轴承组件可以采用润滑脂润滑，并应参照 GB 4208 规定的 IP65 标准进行密封。

## 5.9 材料要求

- 5.9.1 所有材料应与真空室内部环境兼容，不应污染真空室。
- 5.9.2 材料的选择应考虑降低氙摄取以及易于去污。
- 5.9.3 氙去除系统区域应避免使用卤化材料，如绝缘材料等。
- 5.9.4 应用于设备的材料应该满足其生命周期的要求。

## 5.10 操作和维护要求

针对不同类型的事件，遥操作维护应采用不同的应对措施。几种常见事件的应对措施见表 1。

表1 聚变堆遥操作维护事件及措施

触发事件	应对操作	维护类别	举例
装置无法继续运行	立即执行维修和更换	计划外停机维护	真空系统出现大的泄漏 第一壁结构大面损坏
装置出现了小范围损毁影响运行性能	按计划进行维修和更换	计划内停机维护	关键诊断或加热系统故障 第一壁部件局部损坏
装置运行性能按照已知的速率逐渐降低，需要定期维护	执行停机维护以预防可能出现的部件失效	计划内停机维护	更换包层部件 更换偏滤器部件
装置为达到某种实验目的而进行的升级改造	执行部件更换升级	计划内停机维护	更换某些测试模块

## 5.11 救援要求

- 5.11.1 当维护系统在真空室内部或者转运车内部发生故障时，应具有一定的自修复能力，超出自修复能力的，应设计有检修和救援方案。
- 5.11.2 紧急情况下，系统或设备应能被直接访问控制。
- 5.11.3 救援系统应确保 2 周内完成部署。
- 5.11.4 所有的多功能执行器、环向驱动器、前端执行器的主要接口应配置一个冗余的位置传感器，以便传感器失效时提供恢复备份。

## 5.12 兼容性要求

- 5.12.1 系统与真空室、内部部件及热室等对接部分应保证机械和电气等物理接口的一致性。
- 5.12.2 维护系统设计应与托卡马克聚变堆其它系统在尺寸、布局、维护流程等方面保持兼容，详细兼容性要求可参考 DB34/T 2734.1 执行。

## 6 RAMI 要求

### 6.1 可靠性要求

- 6.1.1 应建立经过可靠性验证的元器件数据库，供设计时选用。
- 6.1.2 数据库中没的元器件，应根据潜在运行极端工况进行严格的可靠性测试，通过测试后，可更新至数据库。

### 6.2 可用性要求

系统的可用性应满足装置整体维护计划要求，其中参与聚变堆装配的子系统应在装配期间就具有可用性。

### 6.3 可维护性要求

元器件（如电机，传感器和电缆）、常用备件（如螺栓，连接器）和耗材等，宜采用标准化设计。

### 6.4 可检测性要求

系统应具备可检测性，系统的检测和保养应在热室中进行。

## 7 安全要求

- 7.1 系统设计应考虑潜在的安全风险。
- 7.2 系统设计应使维护人员能够安全方便的进行系统维护。
- 7.3 系统设计应考虑氙及放射性尘埃扩散和停机后的衰变余热。
- 7.4 在突然断电时，系统不应存在任何安全影响。
- 7.5 系统设计应考虑涉及安全性能组件的测试和检查。
- 7.6 在测试及调试中应有符合相关安全要求的警示标识。
- 7.7 与装置主真空室直接相连的部件，其安全性应优于该类部件的所有安全要求，不应影响真空室壁上连续焊缝，不对双层真空室结构上所有真空边界密封性造成影响，系统自身所有真空边界应设计真空密封接口，所有密封法兰及真空接口均应进行压力评估。

7.8 被污染的部件应在热室中维修，维护之前应进行真空清洗并检测氙放气率、辐射等级，辐射污染等级超出维修范围的部件，应通过遥操作在热室中拆卸并更换。

7.9 失效模式、影响级别和应对措施见表 2。

表2 失效模式、影响级别和应对措施

序号	失效形式	影响级别	应急措施
1	机械臂在真空室内运行时运动控制及锁死机构失效，导致机械臂自由落下砸伤真空室内部部件	A	启动急停，关闭主机系统进行内部维修
2	机械臂在真空室内运行时运动控制失效，导致机械臂无法从主机真空室退回机械臂储藏真空室	B	启动急停，根据是否需要破坏真空，采取手动回收机械臂或维修机器人进入真空室方法，将机械臂退回至储藏室内
3	内窥系统与真空室连接颈管连接处，真空阀门失效，导致主机真空破坏	B	启动急停，释放真空，维修阀门
4	机械臂在真空室内运行时前端执行器冷却管路破裂	B	启动急停，断开冷却回路，退回机械臂进储藏室，进行维修，真空室需重新恢复真空
5	非运行状态下，内窥系统自身真空边界泄露，储藏室真空室内部部件功能失效	C	关闭系统，闭合主真空室连接阀门，启用内窥系统维护程序
6	非运行状态下，内窥系统自身外围设备失效，如真空、烘烤系统以及外部传感器，控制单元等	D	关闭系统，进行维修
7	其他机械臂在真空室内运行时出现的非运动控制功能的失效，如冷却、传感、监控等失效，但并不影响系统整体运行	D	及时将机械臂退回至储藏室内，关闭系统，关闭主真空室连接阀门，进行维修
<p>注1：影响级别：A-非常严重，会导致真空室内部部件损伤或损失；B-严重，系统造成严重损伤或损失，修复需破坏主机真空；C-普通，对系统本身造成损伤或损失，修复需破坏内窥系统自身真空室真空；D-轻微，外围设备故障，修复不需要破坏任何真空环境。</p> <p>注2：所有失效模式需要评定其发生概率等级，并根据其影响级别高低指导设计，设定不同的安全系数，以保证系统正常运行。</p>			