



中华人民共和国国家标准

GB/T 39225.1—2020

托卡马克聚变堆遥操作部件兼容性设计与 评估技术指南 第1部分：设计技术指南

Guidance for compatibility design and assessment for remotely-handled components
of Tokamak fusion reactor—Part 1: Guidance for compatibility design

2020-11-19 发布

2021-06-01 实施

国家市场监督管理总局
国家标准化管理委员会 发布

目 次

前言 III

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 遥操作系统任务 2

5 遥操作部件的等级划分 3

6 遥操作部件兼容性设计的建议 3



前 言

GB/T 39225《托卡马克聚变堆遥控操作部件兼容性设计与评估技术指南》分为两个部分：

——第1部分：设计技术指南；

——第2部分：评估技术指南。

本部分为GB/T 39225的第1部分。

本部分按照GB/T 1.1—2009给出的规则起草。

本部分由全国核能标准化技术委员会(SAC/TC 58)提出并归口。

本部分起草单位：中国科学院等离子体物理研究所。

本部分主要起草人：宋云涛、程勇、陆坤、李阳、赵文龙、杨洋、潘洪涛、黄素贞、方秀芬。



托卡马克聚变堆遥操作部件兼容性设计与 评估技术指南 第1部分：设计技术指南

1 范围

GB/T 39225 的本部分提供了核聚变托卡马克堆遥操作系统任务、遥操作部件的等级划分以及遥操作部件兼容性设计的建议。

本部分适用于遥操作维护设备与核聚变托卡马克堆部件之间的兼容性设计与评估阶段。

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/T 4960.3—2010 核科学技术术语 第3部分:核燃料与核燃料循环

GB/T 4960.9—2013 核科学技术术语 第9部分:磁约束核聚变

3 术语和定义

GB/T 4960.3—2010 和 GB/T 4960.9—2013 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。为了便于使用,以下重复列出了 GB/T 4960.9—2013 中的某些术语和定义。

3.1

聚变堆遥操作部件 remotely-handled components of fusion reactor

由于聚变堆特殊服役环境,需使用遥操作机具进行检测、原位修复、更换,以及损坏后转运至指定地点进行后续处理的部件。

注1:简称“遥操作部件”。

注2:例如:真空室内活化部件(含包层模块、偏滤器模块、真空室内诊断仪器及加热/电流驱动系统的室内部件等)和其他受可接近性条件限制的部件。

3.2

托卡马克 Tokamak

环形真空磁室,托卡马克一词来自俄语的单词缩写。

注:其磁场是由环形面上的螺旋形力线构成的,由外部场线圈和等离子体自身电流产生。迄今是在等离子体的磁约束研究中最成功的装置类型。

[GB/T 4960.9—2013,定义 2.1.284]

3.3

聚变堆 fusion reactor

利用可控聚变反应产生聚变能的装置。

[GB/T 4960.9—2013,定义 2.4.44]

3.4

真空室 vacuum vessel; VV

在聚变装置中为获得等离子体而提供的高真空容器。

[GB/T 4960.9—2013, 定义 2.4.72]

3.5

真空室内部件 in-vessel component

直接安装于托卡马克真空室内的部件,如包层、偏滤器、部分加料系统、内部抽气系统、诊断传感器等。

[GB/T 4960.9—2013, 定义 2.2.63]

3.6

包层 blanket

在聚变堆堆芯周围将聚变能转变成热能和生产氦的结构。

[GB/T 4960.9—2013, 定义 2.4.10]

3.7

偏滤器 divertor

磁约束聚变装置中,为分散热功率、排除燃料及 He 灰、消除或减少杂质、隔离边界产生和分开系统特意加入的杂质等而设置的装置。

[GB/T 4960.9—2013, 定义 2.2.25]

3.8

热室 hot cell

工作人员通过窥视窗并借助远距离工具(如机械手)对强放射性物进行操作的具有厚屏蔽层的封闭室。

3.9

遥操作 remote handling; RH

通过控制机电设备对损坏后的部件进行远距离操作的活动。

3.10

遥操作等级 remote handling class

为确保遥操作安装维护对象的维护周期满足装置运行要求,对聚变堆装置可靠运行和安装维护效率有重要影响的遥操作部件根据安装维护频率和维护周期进行的等级划分。

3.11

部件兼容性 component compatibility

部件与部件之间相互协调工作的程度。

注:具体为工作时部件之间能够相互配合、稳定可靠地工作,功能上以及相关接口的兼容性等。

4 遥操作系统任务

4.1 部件更换

通过遥操作系统将需要维护更换的托卡马克聚变堆内部部件(如包层、偏滤器等)从真空室拆卸并移至热室,同时将新的部件送入真空室相应位置并安装的过程。

4.2 部件维修

聚变堆堆芯部件在寿命周期内发生局部损伤时,通过相应的遥操作设备进行修复的过程。

4.3 废弃的活化材料处理

对聚变堆内部所有废弃的活化材料以及聚变反应产物,通过遥操作将其移出真空室并分类存放。

4.4 环境检测与三维重构

对聚变堆堆芯内部空间环境进行检测与三维轮廓重建,为遥操作维护提供必要的、真实可靠的环境信息。

5 遥操作部件的等级划分

5.1 分级

根据遥操作部件的维护要求和兼容性设计要求,将遥操作部件的等级划分为 1 级~3 级,其中最高为 1 级,最低为 3 级。

5.2 分级原则

5.2.1 聚变堆遥操作部件按照其遥操作需求划分相应的遥操作等级。

5.2.2 对于阻碍其他部件维护通道的部件,其遥操作等级与遥操作部件一致。

5.2.3 部件的遥操作等级确认后,才可确定遥操作设备类型及部件兼容性设计的方法。

5.3 等级划分

遥操作部件的等级划分见表 1。

表 1 遥操作部件的等级划分

遥操作等级	兼容性设计	维护
1	<ul style="list-style-type: none">需进行兼容性设计(部件预留足够的安全操作空间);通过优化部件结构、遥操作设备及维护流程确保较高维护效率;设计完成后,用虚拟模型预演所有维护任务;投入使用前,先加工好维护设备及实体模型,细化操作步骤并模拟验证	定期维护或更换
2	<ul style="list-style-type: none">需进行兼容性设计(部件预留足够的操作安全空间);设计完成后,用虚拟模型预演维护任务中较困难部分;投入使用前,先加工好维护设备及实体模型,制定操作步骤	不定期维护或更换
3	<ul style="list-style-type: none">需进行兼容性设计(提供遥操作接口、预留操作空间);设计时强调可靠性;设计时采用高于常规部件的设计标准	一般不需要维护,但该部件一旦失效,则会引起聚变堆运行中断,需要维护或更换

6 遥操作部件兼容性设计的建议

6.1 应用范围

遥操作等级为 1、2、3 的部件都需进行兼容性设计。

6.2 设计目标

实现的目标包括但不限于：

- a) 在预留的操作空间内使用尽量少的工具完成部件装配；
- b) 在遥操作设备及可实现的操作精度和载荷范围内完成部件拆卸及装配；
- c) 使用遥操作设备及工具对聚变堆部件准确对接和维护；
- d) 能满足在规定的时间内完成部件装配的要求。

6.3 适用阶段

6.3.1 兼容性涉及的主要阶段

各阶段兼容性设计和管理文件见表 2。

表 2 各阶段兼容性设计和管理文件

涉及阶段	设计	输出文件
部件概念设计	<ul style="list-style-type: none"> 采用标准尺寸、子部件、结构、工艺等满足可靠性设计要求、人工检修设计要求、遥操作维修装置机械接口标准化要求； 与遥操作设备概念设计、遥操作流程同步进行 	部件定义表、兼容性评估表
遥操作设备概念设计	<ul style="list-style-type: none"> 采用标准尺寸、子部件、结构、工艺等满足可靠性设计要求、人工检修设计要求、遥操作维修装置机械接口标准化要求； 与聚变堆概念设计、遥操作流程同步进行 	遥操作设备系统需求文件
遥操作流程设计	与聚变堆概念设计、遥操作设备概念设计同步进行	遥操作流程说明文件
聚变堆部件初步设计	<ul style="list-style-type: none"> 采用标准尺寸、子部件、结构、工艺等满足可靠性设计要求、人工检修设计要求、遥操作维修装置机械接口标准化要求； 在聚变堆及遥操作设备概念设计结束后才可进行 	聚变堆系统需求文件、初步设计文件、设计图纸、产品结构树等
遥操作设备初步设计	<ul style="list-style-type: none"> 采用标准尺寸、子部件、结构、工艺及技术； 在聚变堆及遥操作设备概念设计结束后才可进行 	遥操作设备系统需求文件、初步设计文件、设计图纸、产品结构树等
聚变堆部件工程设计	<ul style="list-style-type: none"> 遵循设计文件要求； 聚变堆部件与遥操作设备接口标准化； 评估聚变堆部件完工状态下的兼容性 	聚变堆部件接口文件和支持文件、兼容性设计文件、工程设计文件及图纸、产品结构树等
遥操作设备工程设计	<ul style="list-style-type: none"> 遵循设计文件要求； 评估遥操作设备与聚变堆部件遥操作需求的兼容性 	最终版遥操作设备接口文件和支持文件、兼容性设计文件、工程设计文件及图纸、产品结构树等

6.3.2 遥操作部件布局的设计

遥操作部件在聚变堆堆芯内部的布局需考虑内部形状、窗口位置及遥操作设备的负载能力，以便其维护简单高效。

6.3.3 模块化的设计

- 6.3.3.1 遥操作部件根据遥操作等级和遥操作设备的能力,设计成具有高效维护性的模块。
- 6.3.3.2 螺栓、螺母、垫圈、连接头、线缆等宜设计在部件模块内,同时考虑标准件的可更换性。
- 6.3.3.3 模块化遥操作部件需适合部件转运车的内部尺寸及载重能力。
- 6.3.3.4 模块化遥操作部件需适合相关进出窗口的尺寸、形状。

6.3.4 安全抓取的设计

- 6.3.4.1 保证遥操作设备抓取机构咬合和解锁简单、安全可靠。
- 6.3.4.2 聚变堆部件与遥操作设备的抓取机构连接件及抓取特征一一对应。
- 6.3.4.3 抓取机构设置自锁结构,防止在抓取流程完成之前,部件与抓取机构分离。

6.3.5 载荷传递的设计

- 6.3.5.1 遥操作部件支撑或吊点在满足部件的定位和连接强度要求的前提下尽量控制局部尺寸。
- 6.3.5.2 遥操作部件安装时优先采用垂直和长直路线传递载荷。

6.3.6 遥操作部件自定位的设计

- 6.3.6.1 考虑部件安装和拆卸过程中的自啮合和自定位,部件与安装位置、遥操作设备接口均有自定位结构。
- 6.3.6.2 定位不宜过约束,并能适当弥补安装过程中的变形和制造偏差。
- 6.3.6.3 部件自定位设计时,需留有适当的啮合裕度,避免装配中的干涉和卡死。
- 6.3.6.4 定位特征上有视觉标识。

6.3.7 部件位置识别的设计

- 6.3.7.1 保证所有的部件和相关的安装位置都能被遥操作设备上的拍摄系统识别。
- 6.3.7.2 为保证部件正确安装,可通过 2~3 个独立的识别特征获得清晰的部件定位指示。
- 6.3.7.3 部件需有足够的视觉标识,其设置参考以下原则:
 - a) 部件正确安装时,有明确的判断标识;
 - b) 标识不布置在高反射性的表面;
 - c) 两个配合的部件标识有明显的反差;
 - d) 能简单地靠视觉识别区分部件和遥操作设备;
 - e) 每个部件都有唯一的特征标识,特别是连接头、线缆;
 - f) 标识宜使用定位激光或其他定位光源以协助定位配合部件;
 - g) 需要测量尺寸的部件还需集成合适的测量基准和参考点。

6.3.8 焊接

- 6.3.8.1 对部分遥操作部件等级为 1、2、3 的部件,如只能采用焊接方式装配,需选择经过理论和实验验证后满足兼容性和可靠性要求的焊接工艺进行焊接。
- 6.3.8.2 非标准焊接接头,需遵循以下几点来评估其适用性:
 - a) 切割
 - 切割工具的定位精确度;

- 高效高质量二次焊接的可能性；
- 切割期间焊接件的位置约束(适应焊接应变能)；
- 切割深度与进度满足可检测要求；
- 切割工具安装空间、焊接空间与真空检漏空间的需求。

b) 焊接

- 焊接件的定位措施；
- 定位及焊接期间的支撑力；
- 焊接工具的定位精度；
- 焊接期间焊缝背部的气体清洁；
- 焊接残留物的远程处理；
- 焊接质量检测(无损检测、真空检漏)。

c) 其他

- 残留物清理、清洗的措施；
- 设计管路焊接时避免交叉焊缝；
- 设计合理结构补偿切割后的材料损失。

6.3.9 维护时间与风险的设计

6.3.9.1 遥操作部件宜采用简单的遥操作流程。

6.3.9.2 遥操作部件宜采用整体更换部件模块。

6.3.9.3 遥操作部件宜避免维护通道受其他部件的阻碍。

6.3.9.4 遥操作部件单个部件维修尽可能使用一套遥操作设备。

6.3.9.5 遥操作设备优化设计宜减少标准件的类型、规格,简化维护机构设计。

6.3.10 标准件的选型

6.3.10.1 通则

遥操作部件兼容性设计中常见的标准件包括定位销、导向销、螺栓、螺钉及螺母等在内的紧固件,电气连接头和流体连接头。设计中除满足国家标准的标准件要求,还需满足兼容性设计要求。

6.3.10.2 紧固件

在满足国家标准要求的同时,紧固件还需考虑以下因素:

- a) 紧固件在进入真空室之前进行符合真空要求的清洗并保持干净,避免对真空室的污染;
- b) 紧固件使用前经过装配测试,以验证在真空室内的可用性;
- c) 在紧固件选型时,考虑咬死的恢复方法,并将此方法纳入到最终的设计中;
- d) 拧入、拧出螺栓需要的预紧力小于遥操作工具的最大力矩;
- e) 机械紧固件能从配合部件中自由取出,宜采用弹出的方式;
- f) 遥操作紧固件宜采用平行轴以简化接口和安装难度,同时考虑遥操作工具需要的空间尺寸;
- g) 两个相互配合紧固件尽量采用不同的材料以防止螺纹咬合,同时考虑到相关的膨胀系数和材料强度;若使用相同材料,其中一个紧固件表面镀膜处理。

6.3.10.3 定位销

在满足国家标准要求的同时,定位销还需考虑以下因素:

- a) 设计定位销的长度和直径时考虑遥操作方法和预期载荷；
- b) 降低在安装和工作过程中侧向力对机械定位销的影响；
- c) 优先设计在被安装的部件上，以作为视觉识别；
- d) 在满足定位和强度要求的基础上，尽量缩短定位销尺寸；
- e) 宜采用成对的平行定位销来完全约束两个配合面，其中一个销插在安装孔内，可以减少两个平移自由度，另一个销插在一个短槽内，减少安装孔的一个转动自由度；
- f) 电气件定位销采用紧凑、可控的球头销；
- g) 电气件定位销在球头销和圆柱销安装完成后，再安装电气触针；
- h) 电气件定位销定位接头的固定点与触针靠近，触针尽量分布在一个中央卡扣的周围。

6.3.10.4 导向销

导向销需考虑以下因素：

- a) 采用导向销以降低定位销初始定位的不准确性；
- b) 根据设计需求不同，导向销宜安装在部件或者配合部件上；
- c) 导向销的长度决定于接口的性质和装配期间的可视性，可视性差时采用长导向销。

6.3.10.5 螺栓

螺栓需考虑以下因素：

- a) 螺栓优先选择符合国家标准的内六角沉头螺栓，内六角槽采用铣或者锻造加工；当不能使用内六角螺栓时，宜采用标准尺寸的外六角螺栓或十二角螺栓；
- b) 在远程装配期间，采用大公差的外螺纹以便于定位；
- c) 螺纹有良好的表面粗糙度，没有裂纹和碎屑，便于安装和拆卸。

6.3.10.6 螺钉及螺母

在满足国家标准要求的同时，螺钉及螺母还需考虑以下因素：

- a) 螺钉宜采用末端设计为 60° 夹角的锥形螺钉，便于安装和定位；
- b) 螺钉和螺母配合尽量采用粗牙间隙配合，防止热胀冷缩咬合。

6.3.10.7 电气连接头

电气连接头需考虑以下因素：

- a) 电气连接头能被远程插入和取出，并且可以被维护设备轻松地取出；
- b) 电气连接头的安装位置避免在移除部件时发生碰撞；
- c) 电气连接头之间有足够的间隙，以便维护设备能远程操作电气连接头；
- d) 电气连接头及安装插座沿槽远程安装，在安装之前，将其安全固定；
- e) 电气连接头采用模块化设计，每个连接针头之间间隔 8 mm，末端采用玻璃绝缘屏蔽线缆包裹；
- f) 电气连接头采用两组定位销以实现逐步定位连接头，防止针头因定位不准而受损失。

6.3.10.8 流体连接头

包括水路连接头及用于维护时吹扫气体的气路连接头，流体连接头在满足国家标准要求的同时，还需考虑以下因素：

- a) 水管采用有密封要求的快换接头,该接头选设计有供维护设备拆除的凸起按钮,以便于维护和更换;
- b) 快换接头宜采用双节流阀(插头和插座),建议插头设计为固定部分,以便于维护设备在抓取连接头的同时按下取出按钮;
- c) 两个相邻接头之间的最小距离为 40 mm,以便于维护设备可以直接操作连接头;
- d) 为协助远程装配和拆卸连接头和软管,可设计统一的抓取结构,实现维护设备在抓取连接头的同时按下取出按钮,便于遥操作维护操作;
- e) 所有设备与跨接线和跨接管之间的连接头垂直安装,且宜向下安装,与垂直轴的夹角不超过 30° ,否则,需采用额外的支撑结构以防止连接头线缆和管路缠绕造成事故。

