ICS 点击此处添加ICS号

点击此处添加中国标准文献分类号

|  |
| --- |
|  |

T/CNS

中国核学会团体标准

T/CNSXXXXX—XXXX

|  |
| --- |
|  |

高温气冷堆核动力厂

控制棒驱动机构设计制造规范

Design and manufacture specification of control rod drive mechanism of high temperature gas cooled reactor nuclear power plant

|  |
| --- |
| （征求意见稿） |
| 本稿完成日期：2025年7月 |

中国核学会   发布

XXXX - XX - XX发布

XXXX - XX – XX 实施

目  次

[目  次 I](#_Toc18671)

[前  言 III](#_Toc30371)

[高温气冷堆核动力厂控制棒驱动机构设计制造规范 1](#_Toc27752)

[1 范围 1](#_Toc25126)

[2 规范性引用文件 1](#_Toc16568)

[3 术语和定义 1](#_Toc22226)

[4 设计依据 2](#_Toc10304)

[5 设计要求 4](#_Toc6748)

[6 结构强度要求 6](#_Toc20359)

[7 材料要求 6](#_Toc11743)

[8 制造要求 7](#_Toc8341)

[9 装配要求 9](#_Toc23680)

[10 出厂试验要求 10](#_Toc10857)

[11 在役检查和定期试验要求 10](#_Toc16466)

前  言

本标准按照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》给出的规则起草。

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：清华大学核能与新能源技术研究院

本标准主要起草人：闫贺，李天津，刁兴中

高温气冷堆核动力厂控制棒驱动机构设计制造规范

1. 范围

本标准规定了高温气冷堆核动力厂控制棒驱动机构的设计、材料、制造、验收等方面要求。

本标准适用于球床模块式高温气冷堆核动力厂电机驱动链条起重式控制棒驱动机构。

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。

GB 50267-2019 核电厂抗震设计标准

NB/T 20036.1-2011 核电厂能动机械设备鉴定 第1部分：通用要求

NB/T 20036.2-2011 核电厂能动机械设备鉴定 第2部分：抗震鉴定

GB/T 36044-2018核电厂安全重要电气设备鉴定规程

T/CNS 25-2020 高温气冷堆核动力厂控制棒驱动机构设计准则

GB/T 20947-2007 起重用短环链 T级(T、DAT和DT型)高精度葫芦链

GB/T 13913-2008金属履盖层化学镀镍

1. 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。



控制棒系统 control rod system

为实现反应性控制，驱动中子吸收材料制成的控制棒在其孔道内竖直方向运动和保持的系统。

包括控制棒驱动机构、控制棒、及其相关仪控设备。



控制棒驱动机构 control rod drive mechanism

在控制系统指令下，通过电机驱动控制棒实现对反应堆反应性控制的机电装置。实现反应堆的启动、功率调节、功率保持、正常停堆和事故停堆。

控制棒驱动机构分为直通式和外置式两种结构形式，一个反应堆模块，使用12套直通式和12套外置式控制棒驱动机构。



承压壳 pressure boundary

控制棒驱动机构的上密封筒、屏蔽密封筒、转向件为钢制压力容器，统称为承压壳，与电气贯穿件一起构成一回路压力边界的一部分。



环链机构 chain-sprocket unit

包括链轮和传动链条，以及相关导向、保护等机械部件，其中链条的一端与控制棒的顶部连接，在链轮的带动下，实现对控制棒的提升和下降，链条的长度与控制棒的行程匹配。



限位装置 limit protection unit

控制棒达到上、下行程终端时给出信号指示的部件，信号指示包括上限位开关和下限位开关。



磁阻尼器 magnetic damper unit

涡流盘在磁场中旋转，利用涡流效应产生阻尼力矩的部件，用于限制控制棒落棒速度。



碟簧减震器 spring shock absorber unit

链条的另一端连接着碟簧缓冲器，控制棒下落至孔道最底部时，链条被完全拉出，控制棒的冲击力和重力将压缩碟簧，落棒动能被缓冲器吸收。



电机motor

三相混合式步进电机，提供控制棒提升、下降的动力，和控制棒保持时的保持力。



棒位指示器 rod positionunit

采用旋转变压器将控制棒的直线运动转换为旋转角度实现棒位测量。

1. 设计依据
   1. 功能要求

直通式驱动机构用于驱动安全棒和调节棒，外置式控制棒驱动机构用于驱动补偿棒。

控制棒驱动机构应与高温气冷堆安全特性及堆本体设计相适应，安装于反应堆压力容器顶盖上，能够按照反应堆功率控制系统指令带动控制棒在反应堆侧反射层孔道内上下移动或在指定位置保持，实现反应堆的启动、功率调节、功率保持和正常停堆。

断电后，直通式驱动机构应在控制棒及链条重力驱动下落棒，在阻尼器或电机阻尼作用下使控制棒缓速下降至指定位置，实现事故停堆。

控制棒驱动机构承压壳及电气贯穿件应具有保持一回路压力边界完整性及密封性的功能，泄露率在一回路总体密封要求范围内。

* 1. 设备组成和分级

驱动机构压力边界部件包括：电气贯穿件、承压壳及相应紧固件（螺栓/螺母/垫片）、密封件。承压边界是安全1级，抗震I类部件。

驱动机构执行落棒停堆安全功能，是安全级、核抗震类设备。

两种驱动机构的内部件基本相同，包括：限位装置、联轴器、驱动机构电机、主减速器、涡流限速器、棒位指示器、环链机构、碟簧减震器、支承筒、转向件（仅外置式）部件。

控制棒驱动机构的部件分级见表1。

表1 驱动机构主要部件及安全分级

|  |  |
| --- | --- |
| 物项 | 安全分级 |
| 控制棒驱动机构承压边界（含承压壳、紧固件等） | 安全1级 |
| 控制棒驱动机构电气贯穿件 | 安全1E级 |
| 环链机构 | 安全级 |
| 主减速器 | 安全级 |
| 磁阻尼器 | 安全级 |
| 驱动机构电机 | 非安全级 |
| 棒位指示器 | 非安全级 |
| 其它 | 非安全级 |

* 1. 使用温度和压力

两种控制棒驱动机构都安装于反应堆压力容器顶盖上，位于反应堆舱室顶部。

* + 1. 安装工况下的环境条件

环境介质：空气环境

环境温度：室温

环境压力：常压

相对湿度：0%~90%RH

* + 1. 调试工况下的环境条件

环境介质：空气或氦气环境

介质温度：≤150℃

介质压力：50Pa~9.0MPa（绝对压力）

* + 1. 正常运行工况下的环境条件

环境介质：氦气

介质温度：≤150℃

介质压力：7.0 MPa（绝对压力）

60年累积辐照剂量：≤8.4×105 Gy

* + 1. 事故工况下的环境条件：

介质：氦气

温度：≤250℃（≤100h，要求至少保持结构完整）

* 1. 寿命要求

控制棒驱动机构设计寿命：在4.3.3环境条件下，易损件（电气部件）不小于12年，其余不小于60年。

1. 设计要求
   1. 设计温度

设计温度为150℃。

* 1. 设计压力

承压壳和电气贯穿件的设计压力为8.1MPa。

* 1. 控制棒行程

控制棒行程应依据反应堆物理设计确定，覆盖反应堆~11米活性区高度，并考虑适当的设计余量。

上限位开关、下限位开关应包络控制棒行程，触发精度应满足反应性控制要求。

* 1. 控制棒速度

控制棒驱动机构带动控制棒的移动速度应满足反应性控制和保护系统的要求。

* 1. 棒位测量

棒位指示器应能在全行程范围内动态跟随给出控制棒在堆内实际位置。棒位测量精度应满足反应性控制的要求。

* 1. 电气部件设计要求

电气部件应设计成便于检查和更换的单一完整结构。更换时间间隔必须小于其所用绝缘材料的老化周期，有设计寿期的电气部件按设计寿期进行更换，设计寿期应不少于两个反应堆大修周期。

电气部件采用的金属材料、绝缘材料和密封材料应有适当的耐高温、耐腐蚀、耐辐照性能，并考虑高温、高压、氦气环境下的特殊性及石墨粉尘的可能影响。

电机、棒位指示器、限位装置等一回路内电气部件宜考虑冗余设计。

电气部件的电源电压、频率、功率等应与供电系统相适应。

电气部件应满足电磁兼容要求。

非标电气部件应通过型式试验或鉴定。

* 1. 设计寿命

驱动机构设计寿命要求如下：

1. 驱动机构承压壳设计寿命与反应堆压力容器设计寿命相同。
2. 驱动机构运行寿命是指电站寿期内驱动机构功能不丧失所应达到的控制棒的累积行程及落棒次数，以设计验证试验的方法确定，其设计验证值应不少于电站寿期内控制棒累积行程和落棒次数预期值的两倍，否则允许在实际堆上累计运行行程达到设计验证值一半即应予以更换；电站寿期内控制棒累积行程和落棒次数的预期值应依据电站的可利用率、功率调节范围、控制棒行程及反应堆各类事故频率等进行保守估算。
3. 对于热老化或辐照老化寿命难以达到电站寿期的电气部件，可以作为易损件进行定期更换，但其寿期应不小于两次反应堆大修周期。电气部件的热老化和辐照老化寿命，参考GB/T 36044-2018，同样以设计验证试验的方法进行。
   1. 机械结构设计要求
      1. 一般要求

控制棒驱动机构应运行平稳，无异常噪声，执行提棒、降棒和保持动作时应准确无误，不允许有提不起、降不下或卡棒等异常现象；当控制棒保持在指定位置时，不应因外力扰动或重力作用而滑动；在反应堆事故工况下应能断电下降控制棒；控制棒驱动机构应具有在预计寿期内长期连续运转的能力。

控制棒驱动机构应设计紧凑，布置满足反应堆总体设计要求。

控制棒驱动机构应设计成在给定空间内可以单台拆装，便于成套检修、更换。

控制棒和驱动机构应采用可靠的可拆连接，连接和脱开应操作方便。

* + 1. 失电安全

须采用故障（失电）安全设计原则，控制棒以能动手段保持在堆芯上方，在能动保持手段失去动力供应时，控制棒在重力的驱动下带动控制棒驱动机构降棒，落入堆芯，完成事故停堆等功能。

落棒时间应满足反应性控制和保护系统的要求。

* + 1. 缓冲设计

控制棒驱动机构应进行可靠的缓冲设计，以有效吸收事故落棒动能，在满足事故停堆的前提下，对事故落棒最高速度应做限制，减轻对驱动机构的冲击。

* + 1. 抗震能力

在运行安全地震动[GB 50267-2019，定义2.1.5]期间，控制棒驱动机构应能正常运行，包括控制棒提升、下降、保持，和执行停堆功能。

在极限安全地震动[GB 50267-2019，定义2.1.4]期间，控制棒驱动机构应能执行规定的停堆功能。

驱动机构在运行安全地震动和极限安全地震动工况后均应保持结构完整。

* 1. 环境条件要求

控制棒驱动机构的设计需要考虑工作温度、压力、介质、辐照等因素。

控制棒驱动机构承压边界内部件，处于高温高压的高纯氦气介质中，并需考虑石墨粉尘的影响。

辐照剂量应参照反应堆正常运行工况控制棒驱动机构设计寿期累积辐照剂量。

* 1. 经济性要求

控制棒驱动机构设计应考虑经济性要求。

设计宜采用成熟、标准化的产品；经设备鉴定或工程验证后的非标设备应标准化。

* 1. 设计验证

控制棒驱动机构应通过鉴定，鉴定项目应不少于以下内容：

a）对于承压部件安全可靠性及寿期可通过计算分析评定。

b）对于零部件的鉴定，如电机、减速器、轴承、以及材料等，可执行适当的型式试验大纲开展加速老化试验，以验证该部件、材料在规定的环境条件下长期工作的可靠性。

c）控制棒驱动机构样机应通过冷态性能试验、热态性能试验、热态寿命试验和抗震试验。

1. 结构强度要求
   1. 承压壳设计准则

承压壳为承压部件，其结构设计分析方法与压力容器分析方法一致。

* 1. 非承压部件设计准则

控制棒驱动机构非承压部件，如链条等，最大许用应力值不超过设计温度下屈服强度的2/3。

长期工作在高温环境的非承压部件，应考虑高温蠕变的影响，其变形不应影响安全落棒，不允许有断裂性损坏。

正常运行、预计运行事件、设计基准事故(含稀有事故和极限事故)的电厂状态分类与ASME规范中的工况分类(A、B、C、D类工况)相对应。

A级使用载荷包括反应堆正常启动、停闭时的控制棒正常提升和插入，反应堆功率运行时的控制棒保持，反应堆功率调整或补偿瞬态反应性变化时的控制棒位置的改变等。

B级使用载荷对应的预计运行事件，由中等频度（频率大于10-2次/堆年）事故引起，在反应堆寿期内有可能发生，比如一根控制棒在功率运行工况下失控提升，运行安全地震，失去厂外电源而导致的瞬态等。在B级工况下需保证控制棒系统的可运行性和结构完整性。

C级使用载荷对应于设计基准事故，稀有事故（10-2~10-4次/堆年）的典型例子有：反应堆冷却剂一根仪表测量管（≤DN10mm）断裂，蒸汽发生器一根换热管双端断裂，安全停堆地震等。

D级使用载荷对应于极限事故（10-4~10-6次/堆年），预期在反应堆寿期内不会发生，典型例子有：一根控制棒在功率运行下失控提升同时发生运行基准地震，主蒸汽管道破裂，给水管道大破口，与压力容器相连的一根大管道（≤DN65mm）断裂，各种未能紧急停堆的预计瞬态（ATWS）等。这类事故后允许停堆后修复控制棒系统，但应该保证结构完整性。

1. 材料要求
   1. 金属材料

控制棒驱动机构中所用的金属材料应考虑反应堆冷却剂腐蚀、高温、机械和辐照等方面的影响，应限制钴等易活化长半衰期元素的含量，除钴基合金外其他所用材料中最大钴含量应小于0.10%。

控制棒驱动机构所用金属材料主要是铸造箱体、轴、齿轮等，主要包括40CrNiMoA、38CrSi、20Cr13、06Cr19Ni10等，按相应国标和技术文件要求进行材料的订货、制造、化学成分、力学性能、制造质量、检验和试验。

表9-2 控制棒驱动机构主要材料

| 部件名称 | 材料牌号 |
| --- | --- |
| 主减速器 | ZG32MnMo  20CrNi2Mo  38CrSi  40CrNiMoA |
| 涡流限速器 | Nd2Fe14B  20Cr13  06Cr19Ni10 |
| 环链机构 | 38CrSi  链条(SB-446) |
| 贮链筒及其他支撑件 | 06Cr19Ni10  40CrNiMoA |
| 步进电机 | 20Cr13(机壳)  Sm2Co17(钐钴磁钢) |
| 限位装置 | 38CrSi  20CrNi2Mo  06Cr19Ni10 |
| 棒位指示器 | 42CrMo  40CrNiMoA  20Cr13  06Cr19Ni10 |
| 碟簧减震器 | 50CrVA  06Cr19Ni10 |

* 1. 其它材料

电气部件材料的绝缘性能、耐温性能和耐辐照性能应与电气部件的设计相适应。

控制棒驱动机构各摩擦副之间应采用无油润滑技术，不得玷污堆内氦气环境；摩擦副的磨损在氦气环境和预计寿期内必须满足一合理限值。

1. 制造要求
   1. 主减速器、限位装置、棒位指示器和联轴器

控制棒驱动机构主减速器作用是将电机输出的扭矩转换为环链机构提升控制棒的动力，由多级齿轮组成。

限位装置是控制棒达到上、下行程终端时给出信号指示的部件，信号指示包括上限开关和下限开关，限位装置与电机通过联轴器连接。

棒位测量装置是将链轮旋转角度转换为控制棒棒位的部件。

主减速器、限位装置、棒位指示器是传递动力或运动的装置，含齿轮或蜗轮等减速零件，加工制造工艺相似，其选材和齿轮表面工艺需能满足无油润滑、高温条件下的长期可靠性，

* 1. 环链机构制造要求

驱动机构环链机构包括链轮和传动链条，以及相关导向、护链等机械部件，其中链条的一端与控制棒的顶部连接，在链轮的带动下，实现对控制棒的提升和下降，链条的长度与控制棒的行程匹配；链条的另一端与碟簧减震器相连。

环链机构还包括与链条配合的链轮、分链板、导链板等部件，链轮、分链板、导链板的制造要求与链条制造相适配，材料、表面处理等工艺需要考虑控制棒驱动机构设计寿期内的磨损耐受性。

* 1. 涡流限速器、碟簧减震器和薄壁壳式缓冲器制造要求

涡流限速器（即磁阻尼器），是涡流盘在磁场中旋转，利用涡流效应产生阻尼力矩的部件。涡流限速器阻尼力矩具有速度跟随特性，在控制棒正常提升或下降时其阻尼很小，当控制棒快速落棒时提供足够阻尼，限制控制棒的落棒速度，避免落棒速度过快导致的冲击。

涡流限速器的阻尼调整需满足在高温下提供足够阻尼避免落棒过快造成过大冲击，同时需满足在低温下阻尼不过大导致落棒过慢而超时，不同批次涡流限速器在相同环境条件及转速下的阻尼力矩应基本一致。

碟簧减震器连接着链条，当控制棒运行至行程终点时拉直链条，碟簧减震器可以缓冲、吸收落棒结束时控制棒的动能。

薄壁壳式缓冲器的作用是假设链条断裂、控制棒跌落时，缓冲控制棒动能，保护石墨堆内构件不被损坏。

* 1. 支承筒组件制造要求

支承筒组件主要包括支撑柱、支撑板、过链管、屏蔽层板、屏蔽层、贮链筒等组成，作为驱动机构各部件的安装基础，另外对堆芯辐射起屏蔽作用。

* 1. 驱动机构轴承制造要求

驱动机构电机、主减速器、限位装置、棒位指示器、涡流限速器、转向件等部件中所用轴承均为耐高温固体润滑轴承。

轴承需要通过设计载荷及寿期下的型式试验。

* 1. 驱动机构电机制造要求

控制棒驱动机构电机是控制棒驱动机构的动力源，正常情况下，电机处于连续工作状态，其在氦气气氛下长期连续工作，执行控制棒提升、插入和保持动作。电机必须具有在高温氦气气氛下、在设计寿期内长期连续运转的能力，运行应平稳，无异常噪声，执行控制棒提升、插入和保持动作时应准确无误，不允许有打滑、提不起棒等异常现象。

当控制棒保持在指定位置时，电机应具有足够的保持力矩，不应因外力扰动或重力作用而使控制棒滑动。

在紧急停堆工况下电机失电后应能快速落棒停堆，落棒时间均应满足控制棒系统设计要求，因此电机失去电源时应具有较小的定位力矩，以保证控制棒的下落。

* 1. 固体润滑及防锈处理

在高温和氦气气氛下，需要考虑运动副表面之间摩擦磨损及防粘问题，对于控制棒驱动机构中的所有轴承、限位装置中的导程螺杆等运动副表面必须实施固体润滑表面处理。

固体润滑工艺应通过评定。

所有紧固件在加工完成后，应实行防锈处理。

1. 装配要求

总装前应根据设计图纸对所有零部件的接口尺寸进行检查和记录；检查所有零部件是否有油污，若内部有油污应拆解清洁；手动试转可旋转部件，确定这类部件无卡涩和异响；用适当的溶剂清洁各零部件外表面，并使之干燥备装。若有需要进行安装调整的零部件应在完全达到安装调整要求后再进行总装。

驱动机构的重心较高，总装时首先应将过渡件外壳或转向件外壳可靠固定于操作台上，然后逐件安装驱动机构承压边界内各部件。

电气部件安装过程中需注意不被磕碰，线缆不发生卷绕、破损。

* 1. 机电联调

机电联调在驱动机构总装过程中开展，是检验总装质量、发现装配缺陷的重要步骤。驱动机构机电联调采用的电机驱动器、棒位变送器等仪控部件需与工程产品一致。通过机电联调能够及时检验设备的功能是否正常（包括提棒/插棒/保持/落棒）；若发现驱动机构存在功能缺陷需查找原因，更换或修复有缺陷的部件，重新开展机电联调试验。每套驱动机构机电联调试验结果在相同的环境条件下应具有一致性。

* 1. 总成试验

在机电联调试验完成后，连接配套的驱动机构电机驱动器、棒位变送器等仪控部件，开展驱动机构的运行和落棒总成试验，注意观察有无异响或卡涩。总成试验是承压壳边界封闭前的重要环节，该阶段可以直接观察、诊断部件的运行状态，应开展尽量详实的试验，以充分验证零部件的运行性能和设备整体的装配质量。

1. 出厂试验要求
   1. 试验环境

所有驱动机构都需逐一进行冷态试验。冷态试验环境条件为：常温、常压、空气环境。

* 1. 试验内容

1. 按照指令控制电机实现控制棒载荷的提升、下插或保持；
2. 棒位测量验证；
3. 限位装置限位功能验证；
4. 温度传感器（如有）验证。
5. 失电快速落棒验证试验：控制棒下落速度和下落时间的测量。
   1. 出厂热态试验要求

对通过冷态试验的控制棒驱动机构采用抽样方式进行150℃氦气环境热态试验，抽样比例应具有代表性。

1. 在役检查和定期试验要求

控制棒驱动机构设计需满足定期试验和在役检查要求。

需对定期试验和在役检查设置检查指标，如棒位、落棒时间、电气绝缘等，并规定各项定期试验，以保证控制棒驱动机构在其寿期内能满足预期的功能要求。承压壳在役检查应与一回路压力边界在役检查相匹配。

功率运行（模式1）：按相应规程，操作控制棒，实现反应堆功率运行。

启动（模式2）：按相应规程，操作控制棒，实现反应堆启动。

停堆（模式3）：按相应规程，降下控制棒（调节棒和安全棒），实现正常停堆。

冷停堆（模式4）：按相应规程，在停堆后降下补偿棒，实现冷停堆。

维修停堆（模式5）：按相应规程，在冷停堆后，落下吸收球，实现维修停堆。

控制棒系统的定期试验包括：

1. 棒位指示合理性

在模式1、模式2下，可间隔(如8h)检查棒位指示合理性，无操作时控制棒棒位指示漂移应符合限值。

1. 控制棒部分行程可运行性检查

在模式1、模式2下，可间隔(如1个月)微动控制棒，要求：

方向正确、动作顺利无卡涩；

棒位指示正确，每根棒指示棒位处于要求棒位的±50mm以内。

1. 全行程可运行性检查

在模式4、模式5下，运行控制棒（需对提棒数量合理限制），要求：

方向正确、动作顺利无卡涩；

棒位指示正确，每根棒指示棒位处于要求棒位的±50mm以内；

限位信号正确，限位信号触发位置符合要求。

1. 落棒试验

在模式4、模式5下，进行落棒试验（需对试验数量合理限制），要求落棒时间、落棒速度符合限值。