

doi: 10.7690/bgzdh.2014.06.009

CPR1000 核反应堆冷却泵电机的特殊性

何沛霖¹, 王昕²

(1. 东方电机有限公司设备中心, 四川 德阳 618000; 2. 东方阿海珉核泵有限责任公司技术部, 四川 德阳 618000)

摘要: 为确保冷却泵驱动电机的安全性和稳定性, 对 CPR1000 型核反应堆冷却剂泵的安全保护设计进行研究。结合其主要组成及功能, 阐述了驱动电机设计制造过程中的安全性和稳定性设计进行, 分析了冷却泵材料、设计和工艺上的独特性。该研究使核电机组在各类复杂工况下运行的安全性更加有保障。

关键词: 核岛一回路; 冷却泵驱动电机; 安全性; 稳定性

中图分类号: TJ917.0.5 **文献标志码:** A

Characteristic of CPR1000 Nuclear Coolant Pump Motor

He Peilin¹, Wang Xin²

(1. Equipment Center, Dongfang Electric Machinery Co., Ltd., Deyang 618000, China;

2. Technology Department, AREVA DONGFANG Reactor Coolant Pumps Co., Ltd., Deyang 618000, China)

Abstract: For ensuring safety and stability of coolant pump motor, research on safety protection design of CPR1000 nuclear coolant pump motor. Combine with its main constitute and functions, introduce safety and stability design of drive motor design manufacture process, analyze characteristics of coolant pump material, design and technology. The research provides nuclear motor with more safety under complex working situation.

Keywords: a loop of nuclear island; coolant pump motor; safety; stability

0 引言

东方电气集团和法国阿海珉集团合资的东方阿海珉核泵有限责任公司引进法国阿海珉集团技术, 制造了 CPR1000 型核反应堆冷却剂泵, 并装备在岭澳、红沿河、宁德等核电站的 16 台核反应堆(以下简称冷却泵)。

冷却泵在高温高压下运行, 冷却剂最高温度 320 °C, 最高压力 15.2 MPa。作为核岛一回路的重要设备, 其安全性和稳定性能关乎整个核电站的安全。冷却泵驱动电机的设计和制造过程中有诸多特殊设计和工艺, 是冷却泵安全、稳定运行的保障, 基于此, 笔者对冷却泵电机的安全保护设计进行探讨。

1 主要组成和参数

冷却泵原理如图 1, 压水反应堆①受控链式反应产生的热量不断通过冷却泵⑥(3 台冷却泵并联)的运转将热量带出堆芯, 送至蒸发器⑤。一回路冷却剂将其热量传递至二回路产生高温蒸汽, 驱动汽轮机⑧转动, 汽轮机又拖动发电机⑨转动产生电能。

冷却泵由下部的水力部件和上部的电机 2 大部分组成, 冷却泵电机为三相异步交流电动机, 电压 6 600 V, 额定功率 6 500 kW, 工频下工作, 额定电流 666 A, 转速 1 500 r/min, 总重量 49 t。

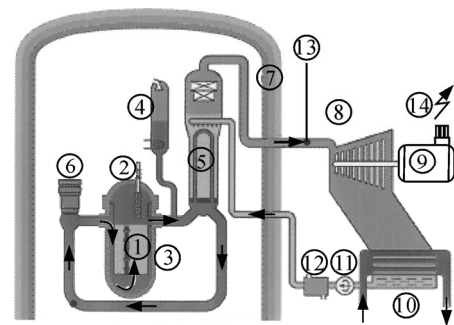


图 1 冷却泵原理

电机主要由定子、转子、上下机架、径向和推力轴承、防逆转机构、惰轮机构、检测装置、定子空气冷却器和油冷却器、辅助装置等组成。

2 冷却泵电机的特殊性

CPR1000 型冷却泵电机的定转子、冷却系统的结构和性能指标与民用电机区别不大(主要在于线圈绝缘试验要求较高), 特殊性主要在于以下几点。

2.1 冷却泵电机的惰轮机构

在发生反应堆冷却剂断电情况下, 停堆后短时间内必须保持足够的流量流过堆芯, 惰轮提供的惯性流量不仅在断电短时间内提供足够的排热能力, 还有利于建立后续的自然循环^[1-2]。为此, 冷却泵电机设计配置了惰轮机构以增加转子的转动惯量, 主

收稿日期: 2014-01-15; 修回日期: 2014-02-13

作者简介: 何沛霖(1971—), 男, 四川人, 工学硕士, 高级工程师, 从事机械设备及其自动控制技术、数控技术研究。

要由装配在转子上部的飞轮、飞轮密封装置等组成，飞轮由上下两层组成(见图 2 上方)。

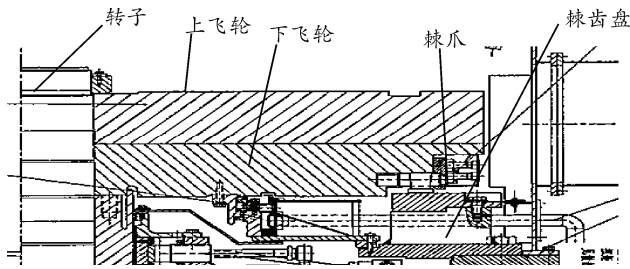


图 2 惰轮机构

飞轮直径 $\phi 1\ 850\ \text{mm}$ ，总厚度 $303\ \text{mm}$ ，质量 $5\ 810\ \text{kg}$ ，通过加热套在转子最上部轴颈位置，随转子一起旋转。

冷却泵的惰转时间表示为

$$I = CPtn / [(n_0 - 1)n_0^2]$$

C 为常数； P 为额定工况下泵轴功率； t 为断电开始计算时间； n 为 t 时刻转速； n_0 为额定工况下转速。

飞轮镍铬钼低合金钢锻件的有常温拉伸和 KCV 冲击试验^[3]($0\ ^\circ\text{C}$ 和 $-40\ ^\circ\text{C}$ 下要求值分别为 $13\ \text{daJ/cm}^2$ 和 $7\ \text{daJ/cm}^2$)，无损检验包括超声^[4]和渗透探伤，目的在于机组运行期间和极端工况下保证材料不产生裂纹等缺陷。此外，制造中上下飞轮有超声探伤工艺孔，在机组运行期间每年对上下飞轮贴合面进行超声探伤检查，因为该面最易在运行中产生缺陷；制造工艺上飞轮与转子采用 3 个等分的键过定位联接，两层飞轮之间的联接面平面度都小于 $0.01\ \text{mm}$ ，尽量消除因震动对飞轮带来的冲击等损害。此外，由于飞轮直径较大易造成轴系不平衡，飞轮上方有平衡块用以调整整个轴系的平衡。

2.2 冷却泵电机的防逆转机构

每个压水堆芯周围有 3 个并联的冷却泵，如果 1 台冷却泵停运，其他环路上的冷却泵还在运行，停运的冷却泵上的冷却剂将发生逆向流动，于堆芯无益；这时若启动该泵，会产生过大的启动电流，导致电机过热或其他损坏^[1]。因此冷却泵电机设计了防逆转机构，它是整个核岛一回路的重要保护。

该装置利用单向离合器原理工作，包括 5 个位于飞轮外圆下方的棘爪、棘齿盘、棘齿盘支撑等(见图 2 飞轮下方)，棘齿盘由周向均布的 72 个等分端面齿组成，棘齿盘支撑固定在定子上方的上部机架内。在电机停止运转的时候，他们会落在带有油压弹簧减震器的棘齿盘的齿槽里。在正常工作状态下，以及转速超过 $150\ \text{r/min}$ 时，受离心力作用，棘爪保持在升起的位置。在静止时，若棘爪落在棘齿盘上，

当有反转力矩产生时，其中 1 个棘爪落入棘齿盘的齿槽里产生阻尼作用，防止转子反转(见图 3)。反转时冲击力由棘爪传递到棘齿盘，棘齿盘在棘齿盘支撑上转动，棘齿盘支撑内设计有液压缓冲器和压缩弹簧减震器承受冲击力，并传递到棘齿盘下方的上机架焊接构件。

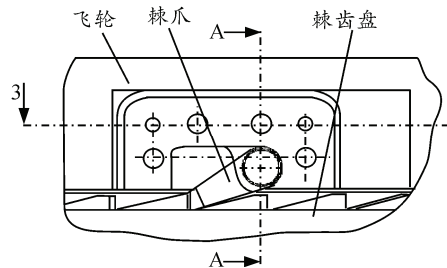


图 3 防逆转机构

综合上述，棘爪不仅承受防反转的冲击力，还需要一定的表面硬度。作为防逆转机构中要求最高的零件，棘爪采用铬钼低合金钢锻件材料^[5]，锻造后正火硬度 $\text{HB}180\sim\text{HB}240$ ，磁粉探伤检查^[6]，粗加工后淬火+回火，表面硬度 $\text{HB}300\sim\text{HB}350$ ^[7]，并以超声探伤^[4]，精加工后渗透探伤。

2.3 冷却泵电机的推力轴承

推力头位于上、下推力轴承之间，随转子一起旋转，液压系统压力 $12\ \text{MPa}$ 。泵静止时，下推力轴承承受轴系自重；泵运转时，上推力轴承承载来自反应堆冷却剂系统的压力和泵的动态力^[1]，电机工作时，轴向力通过上推力轴承传至机架内的抗震盘。上、下推力轴承结构完全相同。推力轴承的采用可以较好地减弱电机运行过程中的振动。

由于电机运行时对振动的要求很高，而振动主要来自轴系，因此轴系的平衡和推力轴承的结构设计对振动起到决定性作用。

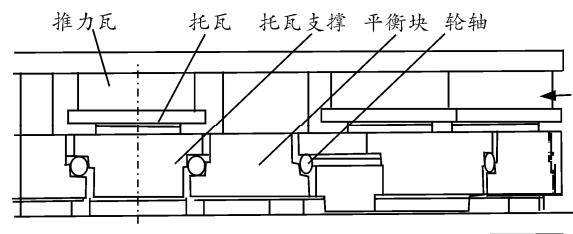


图 4 推力轴承

推力轴承从上至下由推力瓦、托瓦、托瓦支撑、平衡块等组成(见图 4)。每个推力轴承包括上部 and 下部各 8 块巴氏合金推力瓦，用作承受轴向的推力。所有的瓦安装在托瓦上，可以将推力负荷均布到每块瓦上。轴承采用油润滑，由安装在电机侧边的油冷却器对润滑油进行冷却。