

# 冷却剂热启动对核主泵屏蔽电机温度场影响

韩庆麟<sup>1</sup>, 谢增林<sup>2</sup>, 黄秀波<sup>2</sup>, 路义萍<sup>2,3</sup>, 吕向平<sup>2</sup>

(1. 江苏科技大学 材料科学与工程学院, 江苏 镇江 212100; 2. 哈尔滨电气动力装备有限公司, 黑龙江 哈尔滨 150040;  
3. 哈尔滨理工大学 机械动力工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150080)

**摘要:**为了评估核主泵屏蔽电机隔热结构在冷却剂热启动过程中的隔热效果,根据计算流体力学与流固耦合传热理论,建立包含电机固体部件、内部流道、外绕螺旋管换热器及冷却剂泵壳的完整耦合传热数值模拟模型。针对冷却剂由50℃升温至303℃的全过程,基于该模型模拟分析核主泵屏蔽电机的温度场,阐明定子绕组绝缘、定子屏蔽套、机壳等关键部件以及一次轴承润滑水的温度与温升速率的变化规律。结果表明:隔热结构能够有效抑制冷却剂向电机主要固体部件的热量传递,其中定子绕组绝缘峰值温度仅升高3.4%;飞轮至冷却剂间的一次水温度与温升速率显著高于电机内部,此处为核主泵屏蔽电机的热管理重点关注位置。该研究可为核主泵屏蔽电机的热应力分析与隔热设计提供定量依据。

**关键词:**计算流体力学;核主泵;屏蔽电机;温度场;冷却剂热启动;绕组绝缘温升;机壳

**DOI:**10.15938/j.emc.2026.02.013

中图分类号:TM311;TK124

文献标志码:A

文章编号:1007-449X(2026)02-0145-08

## Influence of coolant hot start on temperature field of nuclear main pump canned motor

HAN Qinglin<sup>1</sup>, XIE Zenglin<sup>2</sup>, HUANG Xiubo<sup>2</sup>, LU Yiping<sup>2,3</sup>, LÜ Xiangping<sup>2</sup>

(1. School of Materials Science and Engineering, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212100, China;  
2. Harbin Electric and Power Equipment Co., Ltd., Harbin 150040, China; 3. School of Mechanical and Power Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China)

**Abstract:** To evaluate the thermal insulation performance of the canned motor for the nuclear main pump during the coolant hot-start process, a comprehensive coupled heat transfer numerical model was established based on the computational fluid dynamics and fluid-solid coupling heat transfer theories. In the model the motor's solid components, internal flow ducts, externally wound helical tube heat exchanger, and the coolant pump casing were integrated. Using this model, the temperature field of the nuclear main pump canned motor was simulated for the entire process in which the coolant temperature increases from 50℃ to 303℃. The evolution patterns of temperature and temperature rise rate for key components, such as the stator winding insulation, stator shielding sleeve, and casing, as well as the primary water, were clarified. The results indicate that the insulation structure can effectively suppress the heat transfer

收稿日期: 2024-12-16

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(52305367); 国家科技重大专项(2019ZX06002009); 江苏省高等学校基础科学(自然科学)研究面上项目(23KJB430014)

作者简介: 韩庆麟(1991—), 男, 博士, 讲师, 研究方向为材料中的温度场流场模拟;

谢增林(1989—), 女, 博士研究生, 工程师, 研究方向为核主泵电机设计与电磁场、温度场计算;

黄秀波(1970—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电机热设计等;

路义萍(1965—), 女, 博士, 教授, 研究方向为电机热设计与热管理;

吕向平(1970—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电机热设计等。

通信作者: 路义萍

from the coolant to the main solid components of the motor, with the peak temperature of the stator winding insulation increasing by only 3.4%. The temperature and the temperature rise rate of the primary water between the flywheel and the coolant are significantly higher than those inside the motor, identifying this region as a critical focus for thermal management in the canned motor of the nuclear main pump. This study provides a quantitative basis for the thermal stress analysis and insulation design of the nuclear main pump canned motor.

**Keywords:** computational fluid dynamics; nuclear main pump; canned motor; temperature field; coolant hot start; temperature rise of winding insulation; casing

## 0 引言

核能属于绿色洁净能源,在核岛中,屏蔽电机是驱动核主泵中来自反应堆内一回路中带有放射性的冷却剂实现连续循环的重要设备,属于核岛“心脏”,也是2030年前我国碳达峰行动的基础设备。本项目研究的小堆用核主泵屏蔽电机采用立式布置,在屏蔽电机的机壳外缠绕双层螺旋管换热器,螺旋管外为二次冷却水,用于冷却屏蔽电机下方流出进入螺旋管内的高温一次水;电机下方定子法兰通过螺栓连接同轴上被驱动的核主泵,因核主泵中含有冷却剂,核主泵亦称为冷却剂泵,3种重要装置相互紧密接触成一体,彼此间因温度不同相互传热。此外,国内外大功率兆瓦级的核主泵与屏蔽电机也是同轴布置,只是冷却剂泵位于电机上方。截止目前,在科学层面还没有厘清冷却剂热启动温升对同轴上屏蔽电机部件及转子动力系统与定子间的一次冷却水温度场的影响,其温度的变化规律还不清楚,因此,该研究可丰富电机冷却的基本理论,具有科学价值。此外,小堆允许靠近城市建造,可替代燃煤电站,碳减排社会效益巨大。

近十多年来,国内学者已开展了较为完善的核主泵屏蔽电机转子动力系统研究,如轴承和飞轮间隙流动、传热特点及摩擦损耗研究等<sup>[1-2]</sup>,还开展了大量的屏蔽电机电磁损耗计算方法研究<sup>[3]</sup>,因为部件温升的高低主要由电磁损耗大小决定。鉴于定子绝缘温度是否超标直接决定设备能否安全运行<sup>[4]</sup>,数十年来学者均围绕各种电机,如永磁电机<sup>[5]</sup>、油冷式扁线电机<sup>[6]</sup>、核主泵电机<sup>[7-11]</sup>稳态温度场、定子绕组绝缘峰值温度及其众多的影响因素进行研究,其中文献<sup>[7-9]</sup>研究了核主泵屏蔽电机稳态额定工况绝缘与铁心叠片导热系数值的不确定性、高压情况下一/二次水热物性参数、外部环境温度、外

壁面复合换热系数取值大小、二次水温度及流量变化等多种因素对电机部件温度影响,文献<sup>[10]</sup>研究了电机内描述泰勒-库特流动的湍流模型选取不同对电机峰值温度的影响,发现采用SST  $k-\omega$  两方程模型比采用其他两方程模型预测温度值误差更小。上述研究采用的方法多数为基于计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)的有限体积法,该方法适合开展额定工况冷热态参数下的稳态<sup>[11]</sup>或二次水瞬态故障时速度场、压力场及温度场的分布特点研究<sup>[12]</sup>。关于电机温度场的研究方法还包括等效热路法<sup>[13]</sup>、有限元法等。

为达到核电站稳定运行60年目标,近年来还陆续开展了核电站一回路中核主泵的泵壳内冷却剂泄露<sup>[14]</sup>、电源丧失等<sup>[15]</sup>故障工况瞬态流动特性研究。对于核电站的屏蔽电机同样需要开展上述各种工况及其启停工况下的温度场及流场特性研究,如核岛主泵中冷却剂热启动升温工况,因核主泵与电机紧密连接,冷却剂额定温度远高于电机绝缘许用温度,为削弱高温冷却剂向电机绕组绝缘等部件、一次水的传热,虽然冷却剂上方已设计布置了环形空气隔热屏、双环形汇流腔水冷室,但至今还未开展该过程温度场演变科学规律及隔热设计效果评估研究。

本研究采用有限体积法,进行核主泵屏蔽电机已进入额定工况、冷却剂由冷态向热态参数转变时的三维传热及湍流流动的流固耦合模拟。其创新在于:发现小堆用核主泵屏蔽电机中因冷却剂热启动升温导致的电机易变形部件如屏蔽套、定子铁心、机壳以及一/二次冷却水温度的变化规律,评估隔热设计的效果,为后续部件热应力计算提供基础数据;对同类核主泵电机产品的隔热设计具有参考价值,丰富电机热管理的基本内容。

## 1 物理模型及冷却回路简介

该屏蔽电机计算域模型如图1所示,一次冷却

水路、隔热屏、电机下方法兰连接主泵泵壳中的冷却剂,详见图 1、图 2。两图中从上到下采用圆圈依次标注出了推力轴承上部水、上与下端腔中定子绕组绝缘、汇流腔中水温度试验测点位置。图 2 中还标注了一/二次水入、出口及其他边界条件。

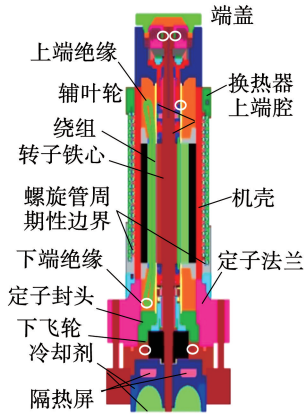


图 1 电机模型

Fig. 1 Model of motor

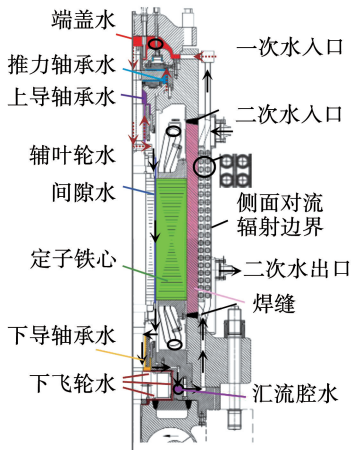


图 2 一次冷却水路

Fig. 2 Primary water circuit

在图 2 中,采用带箭头的线条表征电机内部一次冷却水流动方向与路径,并根据所在位置的部件名称定义一次水名称,如端盖内部的水称为端盖水。一次水属于 A 类水,不会对电机部件产生任何腐蚀等问题,初始由电机上方注入,转子动力系统均采用一次水润滑轴承,因此,一次水也称为润滑水,兼有润滑作用,运行时为封闭循环。电机启动后,依靠辅叶轮旋转对一次水产生驱动压头。图 2 中虚线箭头标注的是上部轴承润滑水循环,实线箭头标注中部电机冷却与下导轴承润滑水吸热及换热器一次水放热主循环。由图 2 可知,经下方汇流腔流出的水,进

入外绕在电机机壳外的换热器双层 4 根螺旋管中,自下而上冷却后重新返回到一次水入口,形成主循环封闭回路。换热器布置在定子上下端腔间的主要发热部件所在位置,二次水与一次水逆流布置,同时吸收高温一次水和机壳放出的热量。转子动力系统飞轮上部与电机一次冷却水通过 8 个孔隙连通,飞轮底部水通过轴间隙与主泵反应堆冷却剂相连通,见图 2 及图 6(b) 局部放大。考虑结构、水路布置特点,计算域选整机四分之一。该屏蔽电机定子选用双层短距绕组,主要参数如表 1 所示。

表 1 核主泵屏蔽电机主要参数

Table 1 Main parameters of nuclear main pump canned motor

参数	数值	参数	数值
额定电流/A	78.3	转子槽数	22
额定功率/MW	0.24	间隙水厚度/mm	2
额定频率/Hz	50	定子直径/mm	529
定子槽数	30	转子直径/mm	218.8

## 2 数学描述及求解条件

在核主泵中冷却剂热启动升温操作前,驱动泵的屏蔽电机已处于稳态,转速固定不变,冷却剂处于额定冷态参数工况,升温开始后,其温度由初始冷态 50 °C 经 20 小时阶跃加热升高到额定热态参数,如图 3 所示,其不同于电机暂态升温工况。

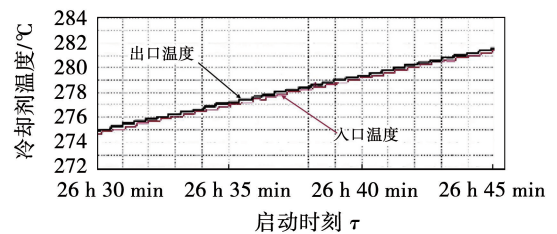


图 3 冷却剂温度随时间变化试验曲线片段

Fig. 3 Test curve segment of coolant temperature variation over time

为简化求解,假设:1) 内外冷却水、隔热屏中空气及冷却剂流动的  $Ma$  数值均远小于 0.3,计算域内流体均为不可压缩黏性流体。2) 各接触热阻均可忽略不计。浸渍漆、槽绝缘和铜线的漆膜近似为等效绝缘体,绝缘均匀分布,等效绝缘材料的热物性相同。根据定子绕组展开图,端部模型也进行了等效

简化<sup>[16]</sup>。3) 定子上下氮气端腔按绝热处理, 原因为绕组缠绕的大量绑绳绑环及氮气的导热系数均很小。4) 各发热部件中, 电磁损耗均匀分布。5) 由图3中记录的冷却剂入、出口温度曲线可知, 冷却剂热启动缓慢升温过程为无数小温差作用下的阶跃稳态热传递过程。

## 2.1 数学描述

在屏蔽电机与换热器中, 通常情况下, 分别采用旋转雷诺数  $Re_\Omega$  与轴向流动雷诺数  $Re_z$  判别电机中的旋转泰勒-库特流与轴向流动的流态, 算得  $Re_\Omega = 9.3 \times 10^4$ 、 $Re_z = 5.6 \times 10^3$ , 螺旋管内外入口雷诺数  $Re$  分别为  $5.3 \times 10^4$ 、 $4.3 \times 10^4$ , 均远超过临界雷诺数, 说明额定工况下流动均处于高雷诺数湍流状态。计算域内多种流体均遵守三维稳态湍流雷诺时均 RANS 质量、动量及能量守恒方程, 表达式<sup>[11]</sup>为:

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0; \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho \overline{u_i u_j} \right); \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho u_i T)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{\lambda}{c_p} \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + S_T. \quad (3)$$

式中: 下角标  $i, j$  数值等于 1、2、3 时,  $x_i, x_j$  分别表示  $x, y$  和  $z$  3 个坐标分量;  $\rho, \mu, c_p, \lambda$  分别表示密度、动力黏度、定压比热、导热系数;  $P, T$  及  $S_T$  分别表示作用在微元上的压力、温度及热源项。对于固体温升, 流速为 0, 遵守能量守恒方程。

式(2)中湍流脉动乘积项选择 SST  $k-\omega$  两方程描述。流体与固体壁面之间局部表面传热系数  $h_x$  按换热微分方程计算, 表达式为

$$h_x = - \frac{\lambda}{|T_w - T_f|_x} \frac{\partial T_f}{\partial y} \Big|_{y=0}. \quad (4)$$

式中:  $\partial T_f / \partial y|_{y=0}$  为贴壁处壁面流体第一个网格单元法线方向上温度变化率;  $|T_w - T_f|_x$  表示换热面局部位置处固体与流体间平均温差绝对值。

## 2.2 计算与求解条件

### 2.2.1 主要部件损耗及导热系数确定

电磁损耗是固体部件温升的重要因素, 核主泵热启动时, 电机已处于额定稳态工况, 各部件电磁损耗按照额定工况计算, 算法可参阅文献[3]。本电机除定转子铁心叠片为各向异性, 其他材料均为各向同性, 主要发热部件电磁损耗即热源值及部件导热系数如表2所示。

表2 主要部件热源与导热系数值

Table 2 Values of heat source and thermal conductive for main solid components

部件	损耗/kW	导热系数/(W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )
定子绕组	6.17	$\lambda = 400.99 - 0.08T$
定子铁心齿/轭部	0.216 7/0.691 5	$\lambda_{\text{径,切}} = 23.6, \lambda_{\text{轴向}} = 2.6$
转子铜条	10.32	$\lambda = 0.147T + 115.16$
定/转子屏蔽套	29.27/8.308	$\lambda = 0.0157T + 9.697$
绝缘	—	0.18

### 2.2.2 边界条件

- 1) 主轴转速  $n = 2\ 922$  r/min, 保持不变。
- 2) 一/二次水入口流量分别为  $10$  m<sup>3</sup>/h、 $13.5$  m<sup>3</sup>/h。
- 3) 一/二次水的出口均设为压力出口边界。
- 4) 与环境接触的机壳、换热器及泵壳的外壁面, 自然对流传热系数  $h$  取值为  $10$  W/(m<sup>2</sup>·K)<sup>[8]</sup>, 见图1, 同时考虑辐射换热边界条件, 材料表面发射率为  $0.8$ 。

5) 机壳外环境空气温度、二次冷却水温度四季、每天周期性的变化, 导致电机内封闭循环的一次冷却水温度跟随变化。一次水温度在一定数值范围内随二次水、冷却剂温度波动, 其影响因素众多, 需经多次热平衡迭代试算得到, 最终一次水入口处温度与换热器冷却后的一次水出口位置温度相对误差小于  $1 \times 10^{-3}$ , 达到封闭循环属性, 才可判定该位置的内循环迭代计算终止。

6) 根据核电站设备运行规程, 主泵冷却剂必须由  $50$  °C 冷态参数热启动升温到热态额定运行参数, 根据甲方核研究院提供的数据, 主泵冷却剂热启动升温工况由无数阶跃稳态工况(第一段  $0 \sim 22.5$  h, 从  $50$  °C 升高到  $275$  °C; 第二段  $26.5 \sim 29.3$  h, 共  $2.8$  h, 由  $275$  °C 升高到  $303$  °C) 和中间与最后两个长久稳态( $22.5 \sim 26.5$  h 保持  $275$  °C;  $29.3 \sim 35$  h 保持  $303$  °C) 交叉变化过程组成; 另外, 热启动第一、二段内冷却剂温升速率分别为  $0.002\ 8$  °C/s 和  $0.002\ 4$  °C/s。根据上述特点赋值泵壳中冷却剂处边界条件。

### 2.2.3 网格划分及求解方法

网格划分时采用多种方案, 见文献[11], 考虑计算耗时等因素, 最终采用网格数为  $3.54 \times 10^6$ , 多数采用高质量的六面体网格。计算域所有节点离散后的代数方程组中压力与速度耦合采用 SIMPLE 算

法,方程组整体采用分离、隐式求解方法,此外,跟踪定子绕组峰值温度以及残差,直到模拟值不随迭代次数变化等指标满足要求。采用工作站中的20核并行计算,同时求解上述方程连同边界条件组成的方程组。经过多次对比输入值、输出值,调试与核对数据,最终实现了电机一次水进出口、外绕螺旋管换热器及泵壳三者间流体场、温度场耦合预测研究的网格独立解。

### 3 结果及分析

#### 3.1 整体温升演变分析

图4给出了在热启动过程中整体及部件的温度分布随主泵泵壳中冷却剂温度 $t_c$ 变化云图。由图4(a)可知,计算域内最下方主泵内冷却剂温度初始冷态参数值为 $50\text{ }^\circ\text{C}$ 时,靠近下部的定子下端腔绕组绝缘鼻端中间位置温度 $t_{jy\max}$ 最高,为系统峰值温度所在位置,数值为 $129.8\text{ }^\circ\text{C}$ 。虽然表2中转子铜损比定子铜损数值大,但其热源密度远小于定子绕组,因此,转子温升低于定子绕组。上端腔靠近入口,由于一次水及周围部件温度较低原因,定子上端腔绕组绝缘温度低于下端腔;电机中部定转子屏蔽套、定转子铁心绕组同时存在位置为高温区域,采用机壳外侧螺旋通道中低温二次水冷却电机通过机壳传递出的热量,计算域整体靠外侧的固体壁面温度较低,此时电机中部发热部件的温度高于下方主泵区域温度,说明绕组及其绝缘等固体部件温度、一次水温度的主要影响因素为电机发热部件的电磁损耗、一二次冷却水流速等。图4(b)中,当 $t_c$ 升高到 $303\text{ }^\circ\text{C}$ 时,电机 $t_{jy\max}$ 升高至 $134.3\text{ }^\circ\text{C}$ ,最高温度位置不变,定子封头下部的飞轮与主泵部件及冷却剂温度明显高于电机温度;说明随启动时间增加,在大温差作用下,热量将会向温度较低的上方传递,但由于在电机和泵壳间设计并加装隔热屏,核主泵内冷却剂启动升温对电机部件及 $t_{jy\max}$ 随冷却剂温度升高而增大;冷却剂热启动温升单因素变化导致的 $t_{jy\max}$ 温升 $4.5\text{ }^\circ\text{C}$ ,温升百分比约为 $3.4\%$ ( $4.5/134.3$ ),数值小于 $10\%$ ,说明隔热结构设计合理。

图4(c)为从图4(b)中抽取的 $t_c = 303\text{ }^\circ\text{C}$ 时电机定子绕组绝缘温度分布云图。由图可知,冷却条件差的定子上下端腔中绝缘温度较高,位于铁心

段且得到换热器中二次水冷却的绕组中间段的温度低些,靠近下方高温冷却剂的下端腔绝缘温度高于上端腔绝缘温度,该特点与理论预期及冷态额定工况下试验测得数据规律一致<sup>[9-11]</sup>。计算还发现,热启动约7 h以后,下部主泵向上方电机传热增加明显,热启动8.1 h对应 $t_c = 130.2\text{ }^\circ\text{C}$ 时,定子下部端腔中位于两侧边界面上,定子绕组绝缘温度数值为 $130.2\text{ }^\circ\text{C}$ ,与下方主泵中冷却剂的温度相同,见图4(d);大约7 h后,冷却剂成为计算域内峰值温度所在位置。

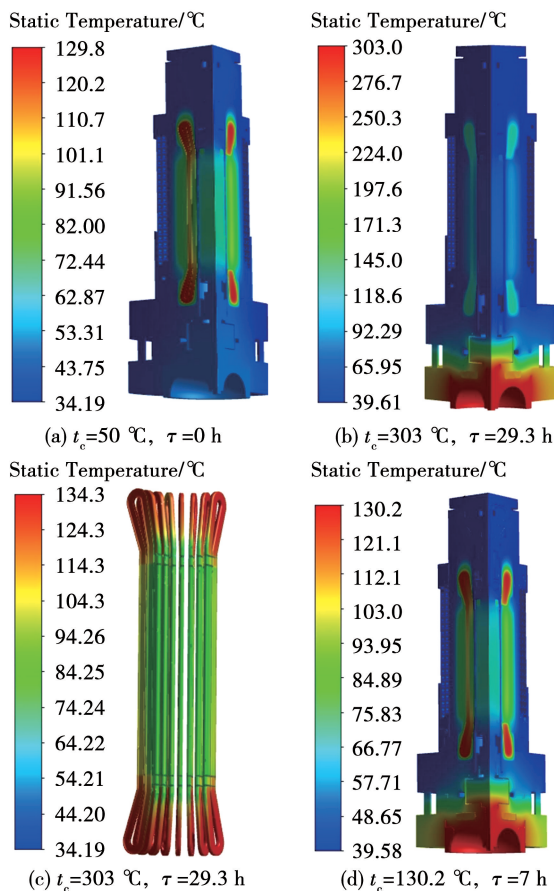


图4 计算域温度随冷却剂热启动温度变化云图

Fig. 4 Temperature contour of domain with time of coolant hot start

#### 3.2 主要监测部件温升演变分析

图5给出了冷却剂热启动升温时,电机重点监测固体部件定子绕组绝缘、铁心齿部及轭部、定子屏蔽套、机壳(见图1与图2)体平均温度 $T$ 随冷却剂升温的温度数值 $t_c$ 及对应的映射时间 $\tau$ 变化曲线。

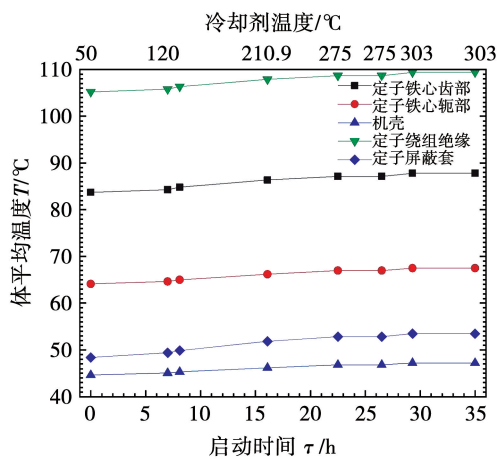


图5 电机主要部件温度随冷却剂热启动时间变化曲线  
Fig. 5 Volume average temperature of motor components with time of coolant hot start

由图5可知,随时间增加,各固体部件的体平均温度均升高,且升温速率不同;根据升温速率变化,热启动可分为两个阶段,明显可见,7 h之后冷却剂温度达到120 °C,核主泵泵壳开始向上方传递热量明显增加,图中各曲线斜率,即温升速率变大,定子封头以下一次水、飞轮及其中的间隙水同时接收下方冷却剂和上方电机高温流固体传递出的热量,发现该阶段在总加热时间中占比72.3%,其温升占整个阶段总温升百分比均超过83%;说明定子铁心齿部与轭部、定子绕组绝缘与屏蔽套、机壳随冷却剂温升非线性变化,而非简单线性累加;其中,机壳的温升速率最小,定子屏蔽套在7~22.5 h期间温升速率最大,为0.223 2 °C/h,约为机壳的2倍,铁心齿部与定子绕组绝缘温升速率基本相同。

### 3.3 流体温升演变分析

为了说明核主泵屏蔽电机系统中流体温度随冷却剂升温变化特点,图6给出了冷却剂温度分别为50 °C和303 °C计算域流体的温度、速度分布云图。图6(a)表明,冷却剂刚热启动初始时刻,主泵冷却剂温度比电机一次水最低温度高10.2 °C,主泵冷却剂是由下向上一直传递热量给与之接触的下端轴隙中一次水;当电机冷却剂温度升高达到最大值303 °C时,下飞轮附近的汇流腔水温较电机下导轴承上部的一次水温度高,下导轴承以下至飞轮上表面位置一次水温度梯度很大,见图6(b)中椭圆所示位置流体局部放大速度矢量图6(c)。原因是在下

导轴承下方间隔45°角的孔隙中,低温一次冷却水与飞轮上部连通,连通处孔径较小,少量一次水与飞轮上表面温度高且密度小的部分水彼此掺混,目的是维持飞轮中一次水在一定的安全高温范围内,流体黏度与摩擦损耗变小。这种巧妙的设计是冷却剂热启动对电机部件及其一次水温升影响较小的原因之一。

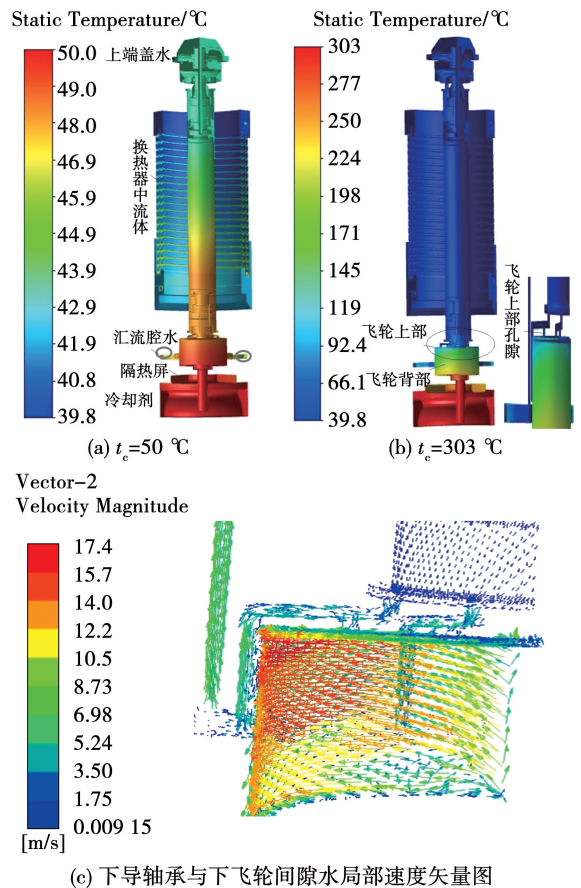


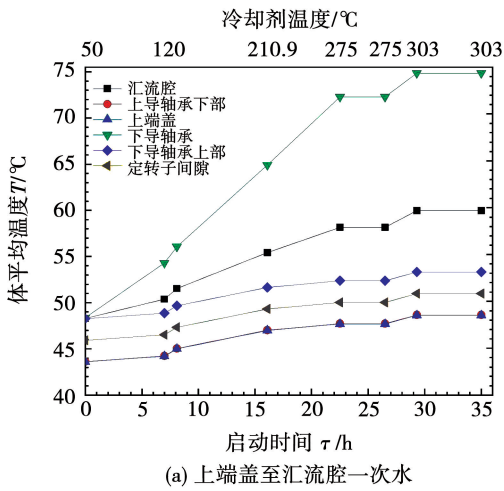
图6 流体温度及局部速度云图

Fig. 6 Fluid temperature contour and velocity vector

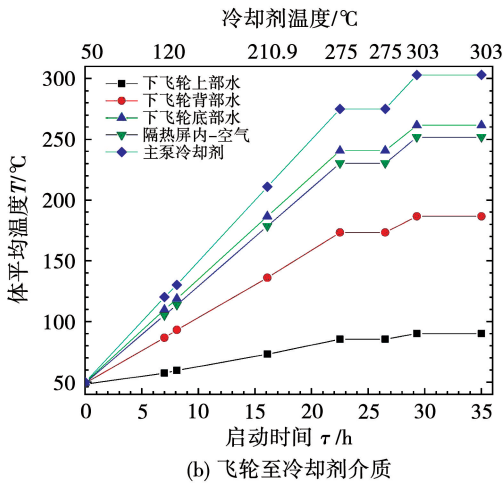
为分析及方便观察,利用图7(a)与图7(b)分别展示电机上端盖至汇流腔位置内的一次水和飞轮至冷却剂介质温度变化规律曲线。可以看出,总体而言,升温过程中随底部冷却剂温度逐渐升高,电机中封闭循环的不同位置处一次水温度升温速率不同。

图7(a)中,定转子间隙水、上导轴承水及端盖水升温速率基本相同,一次水温升数值均在5.05 °C左右,这些位置水温受端盖处入口水温影响较大;然而下导轴承的下部水位于与下飞轮上部水接触处,因而随时间增加,下导轴承水整体及汇流腔中水的

体平均温升速率增大非常明显,其中下导轴承水体平均温升达到 26.5 °C,数值相对较大。



(a) 上端盖至汇流腔一次水



(b) 飞轮至冷却剂介质

图7 流体温度随冷却剂热启动时间变化曲线

Fig. 7 Fluid temperature variation graph with time of coolant hot start

由图7(b)可知,下飞轮下部水温升速率最大,然后下飞轮背部水、上部水、下导轴承水、汇流腔水升温速率依次减小,总体规律为离冷却剂距离越近,温升速率越大,旋转壁面带动黏性流体旋转,导致流体间产生剪切加热、导热与部分对流混合热交换较强。启动 29.3 h 后为稳态,飞轮上下部温差数值 171.6 °C,相比之下,下飞轮以下位置一次水体温度的温升幅度及速率大于主要监测的固体部件温升。图7(b)中 7 h 左右流体温升速率变化不明显,基本不存在阶段性特征。图中还给出了隔热屏封闭腔中的空气温度随时间变化曲线,空气温度与相邻下飞轮底部水温较接近,因为隔热屏采用焊接工艺,其中的空气不能抽真空,隔热屏中空气导热系数很

低,数值在  $10^{-2}$  数量级,起到良好的阻隔热量向上传递的作用。此外,其上方飞轮中部的汇流腔所在位置类似环形汇流水路,也有效将下方传递上来的热量以对流换热方式及时带走,阻隔了下方冷却剂向上方电机传热,这是冷却剂热启动对上方电机绕组绝缘影响不显著的另一主要原因。

### 3.4 结果准确性验证

制造厂内设计并创建了国内唯一小堆核主泵屏蔽电机样机和产品综合性能测试试验台,并完成样机、产品多次试验。试验仪器仪表均新购置并事前标定,数据不确定度较小。为便于本研究结果与试验数据比较,利用冷态额定试验时参数进行模拟计算,验证本文中上述提及问题的准确性<sup>[9-12]</sup>。冷态计算条件:一/二次冷却水操作表压力及入口体积流量与热态时完全相同;一/二次水的入口温度为 32.6 °C/19.7 °C,明显低于热态工况,下部冷却剂温度数值 287.3 °C,以上参数为试验测量值<sup>[9-12]</sup>。样机试验时,泵中“冷却剂”采用 A 类水陶瓷电加热替代,并设计了冷却塔装置,为封闭循环回路,试验时安装了各种水温度、绕组绝缘温度、转速、压力、流量等数据实时记录仪表,并显示曲线,同时,连接陪试回路。为避免重复及知识产权等原因,具体图例可查阅文献[9-12]。表3给出本文预测得到的同样测量位置处温度预测结果与试验测得数据的最大与最小误差。

表3 监测点温度模拟值与试验值比较

Table 3 Temperature value comparison of simulation and test at positions of monitor

测点	$T_{\text{推力轴承上}}/^{\circ}\text{C}$	$T_{\text{汇流腔}}/^{\circ}\text{C}$	$T_{\text{绝缘-上端腔}}/^{\circ}\text{C}$	$T_{\text{绝缘-下端腔}}/^{\circ}\text{C}$
1	35.89	41.91	112.64	115.73
2	35.89	41.91	111.49	113.72
3	35.84	43.35	112.54	115.11
4	36.01	42.06	—	—
模拟均值/ $^{\circ}\text{C}$	32.65	43.68	115.83	118.68
最小误差/%	8.90	0.76	2.83	2.55
最大误差/%	9.33	4.22	3.89	4.36

由表3可知,最大误差数值为 9.33%,出现在推力轴承上部水的温度监测点位置,产生误差的主要原因为:4 个测量水温用热电偶传感器套筒在端盖位置插入后,占据了流道位置,推力轴承上部测量处的局部流阻增加显著<sup>[11]</sup>,实际一次水流量减小显

著,而物理建模及模拟预测时没考虑插入的套筒;定子上下端腔中,绕组鼻端中间位置绝缘外表面布置多个温度测点,采用四线制 PT100 铂热电阻温度传感器测量,见图 1 和图 2,试验过程详见文献[11],最大误差不超过 5%,以上证明:采用本文方法得到的冷却剂热启动温升工况时的温度场计算结果准确。

## 4 结论

采用 CFD 方法得到核主泵冷却剂热启动时系统中电机主要部件如定子绝缘、定子屏蔽套、机壳及一次润滑水的温度、温升速率的变化规律,结论如下:

1) 鉴于隔热屏等设计结构具有良好的阻止传热效果,冷却剂温升单因素使定子绕组绝缘峰值温度升高约 3.4%。

2) 核主泵屏蔽电机的热管理需重点关注位置在飞轮至冷却剂之间,该处一次水的温升幅度及速率远高于其上方屏蔽电机内主要部件及一次水的温升幅度及速率。薄壁定子屏蔽套的温升速率为机壳的 2 倍。

3) 冷却剂热启动可分为两个阶段,第一阶段占总时间的 27.3%,屏蔽电机定子绕组绝缘、铁心、屏蔽套、机壳及内部一次水温升速率小,定子绕组绝缘温度最高;之后 72.3% 时间内,冷却剂温度超过绕组绝缘,其温升导致的电机固体部件温升在总温升中占比达 83% 以上。

以上结论为后期热应力计算提供基础数据或理论参考,对核主泵屏蔽电机的热分析、设计具有参考价值。

### 参考文献:

- [1] XIE Z, SONG P, HAO L, et al. Investigation on effects of fluid-structure-interaction (FSI) on the lubrication performances of water lubricated bearing in primary circuit loop system of nuclear power plant[J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2020, 141: 107355.
- [2] XU R, SONG Y, GU X, et al. Research on the flywheel clearance flow in canned motor RCP[J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2021, 150: 107816.
- [3] 李进才,李涵琪,张卓然,等. 航空油冷三级式无刷发电机流固耦合传热研究及散热优化[J]. *电工技术学报*, 2024, 39(22): 7030.
- LI Jincai, LI Hanqi, ZHANG Zhuoran, et al. Research on fluid-

solid coupling heat transfer and optimization of heat dissipation in the aircraft oil-cooled wound rotor synchronous generator [J].

*Transactions of China Electrotechnical Society*, 2024, 39(22): 7030.

- [4] 陈鹏,谢颖,李道璐. 感应电机定子匝间短路故障温升特性研究[J]. *电工技术学报*, 2023, 38(18): 4875.
- CHEN Peng, XIE Ying, LI Daolu. Research on the temperature rise characteristics of induction motors with stator inter-turn fault [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2023, 38(18): 4875.
- [5] 蔡蔚,牛金花,唐跃. 兆瓦级高速永磁电机新型转子冷却结构研究[J]. *电机与控制学报*, 2024, 28(5): 38.
- CAI Wei, NIU Jinhua, TANG Yue. Investigation of new rotor cooling structure optimization in MW high-speed permanent magnet motor[J]. *Electric Machines and Control*, 2024, 28(5): 38.
- [6] 谢颖,范伊杰,蔡蔚,等. 油冷式扁线电机油路结构优化设计及温度场计算[J]. *电机与控制学报*, 2023, 27(5): 37.
- XIE Ying, FAN Yijie, CAI Wei, et al. Oil circuit structure optimization design and temperature field calculation of oil cooled motor with hairpin winding [J]. *Electric Machines and Control*, 2023, 27(5): 37.
- [7] 丁树业,孟繁东,葛云中. 核主泵屏蔽电机温度场研究[J]. *中国电机工程学报*, 2012, 32(36): 149.
- DING Shuye, MENG Fandong, GE Yunzhong. Temperature field investigation of canned primary pump motors in nuclear power stations [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2012, 32(36): 149.
- [8] 李藏雪,任智达,路义萍. 一种屏蔽电动机的三维温度场及影响因素研究[J]. *电机与控制学报*, 2015, 19(8): 15.
- LI Cangxue, REN Zhida, LU Yiping. Influence factors research on three dimensional temperature field of the canned motor [J]. *Electric Machines and Control*, 2015, 19(8): 15.
- [9] 路义萍,艾丽昆,韩家德,等. 非确定因素对小堆用核主泵电机温升敏感性研究[J]. *中国电机工程学报*, 2023, 43(11): 4434.
- LU Yiping, AI Likun, HAN Jiade, et al. Sensitivity investigation of uncertainty factors to temperature rise of nuclear main pump motor for small peactor [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2023, 43(11): 4434.
- [10] AI Likun, LU Yiping, HAN Jiade, et al. Simulation of the temperature of a shielding induction motor of the nuclear main pump under different turbulence models [J]. *Energies*, 2023, 16(6): 2792.
- [11] 艾丽昆,路义萍,索文旭,等. 小堆核主泵屏蔽电机热态额定工况热流场分析[J]. *电机与控制学报*, 2022, 26(6): 83.
- AI Likun, LU Yiping, SUO Wenxu, et al. Analysis of thermal and flow field of a canned motor for small nuclear reaction main pump at thermal rated condition [J]. *Electric Machines and Control*, 2022, 26(6): 83.

- 机匝间短路故障诊断方法[J]. 电机与控制学报, 2020, 24(9): 173.
- LI Yuanjiang, ZHANG Zhoulei, LI Menghan, et al. Fault diagnosis of inter-turn short circuit of permanent magnet synchronous motor based on deep learning[J]. Electric Machines and Control, 2020, 24(9): 173.
- [24] LI H, SHI T. Diagnosis of inter-turn short-circuit incipient fault in permanent magnet synchronous motors using input current on the power side[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2024, 20(12): 13741.
- [25] 李俊卿, 陈雅婷. LSTM-CNN 网络在同步电机励磁绕组匝间短路故障预警中的应用[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2020, 47(4): 61.
- LI Junqing, CHEN Yating. Application of LSTM-CNN network in fault warning of inter-turn short circuit in field windings of synchronous generator[J]. Journal of North China Electric Power University(Natural Science Edition), 2020, 47(4): 61.
- [26] 党月懋, 张睿成, 吴立建, 等. 五相鼠笼异步电机定子匝间短路诊断方法[J]. 电机与控制学报, 2025, 29(1): 1.
- DANG Yuemao, ZHANG Ruicheng, WU Lijian, et al. Diagnosis method of stator inter-turn short circuit for five-phase squirrel-cage induction motor[J]. Electric Machines and Control, 2025, 29(1): 1.

(编辑:邱赫男)

## (上接第 152 页)

- [12] 路义萍, 艾丽昆, 孙海锋, 等. 二次水断供核主泵屏蔽电机冷却水瞬态热分析[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(14): 5756.
- LU Yiping, AI Likun, SUN Haifeng, et al. Transient thermal analysis of cooling water of a canned motor for the nuclear main pump under secondary water supply outage condition[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(14): 5756.
- [13] WANG D, LIANG Y, LI C, et al. Thermal equivalent network method for calculating stator temperature of a shielding induction motor[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2020, 147: 106149.
- [14] YU Q L, HUA J C, ZI S Y, et al. Analyses of ACME integral test results on CAP 1400 small-break loss-of-coolant-accident transient[J]. Progress in Nuclear Energy, 2016, 88:375.
- [15] YE D X, LAI X D, LUO Y I, et al. Diagnostics of unclear reactor coolant pump in transition process on performance and vortex dynamics under station blackout accident[J]. Nuclear Engineering and Technology, 2020, 52(10): 2183.
- [16] SIMPSON N, WROBEL R, MELLOR P H. An accurate mesh-based equivalent circuit approach to thermal modeling[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2014, 50(2): 269.

(编辑:邱赫男)