

研究论文

DOI: 10.11949/0438-1157.

基于液氢冷却的高性能永磁电机设计与性能验证

张嘉毅¹, 蒋煜东², 王倩¹, 张峰¹, 李岸然¹, 闫鹏举¹, 阳辉林¹, 张恒², 阮金港²(¹ 中山先进低温技术研究院, 广东 中山 528400; ² 湖南国磁动力科技有限公司, 湖南 株洲 412007)

摘要: 高功率密度永磁电机在大负载连续运行时面临显著的温升控制问题, 传统水冷方式对进一步提高功率输出的支撑能力有限。针对这一问题, 本文以一台 80 kW 商用水冷永磁电机为研究对象, 提出一种机壳式液氢冷却结构, 建立液氢/低温氢气冷却电机传热模型, 并结合样机试制开展实验验证。基于数值模拟对轴向型、周向型和柱状型流道进行对比分析, 结果表明轴向型流道在冷却效果、压降和加工可行性方面具有较优综合性能。依据该结果研制液氢冷却永磁电机样机, 并在 64 ~ 100 kW 范围内开展稳态工况测试。实验结果表明, 液氢冷却可将电机绕组最高温度稳定控制在约 78 °C, 显著低于 180 °C 设计温度上限; 在电机本体质量基本不变的条件下, 原 80 kW 电机可稳定运行至 100 kW 量级, 比功率提升约 30%。研究结果表明, 液氢冷却能够有效提高永磁电机高负载工况下的温度裕量和持续输出能力, 为液氢能源系统中电驱动设备冷能梯级利用与高功率密度设计提供了可行技术路径。

关键词: 氢; 永磁电机; 热管理; 优化设计; 实验验证

中图分类号: TM 351

文献标志码: A

文章编号: 0438-1157 (XXXX) XX-0001-11

Design and performance verification of a high-performance permanent magnet motor based on liquid hydrogen cooling

ZHANG Jiayi¹, JIANG Yudong², WANG Qian¹, ZHANG Feng¹, LI Anran¹, YAN Pengju¹, YANG Huilin¹,
ZHANG Heng², RUAN Jingang²

(¹ Zhongshan Institute of Advanced Cryogenic Technology, Zhongshan 528400, Guangdong, China; ² Hunan Guoci Power Technology Co., Ltd., Zhuzhou 412007, Hunan, China)

Abstract: High-power-density permanent magnet motors face pronounced temperature-rise constraints during continuous operation under high load, while conventional water cooling provides limited support for further power enhancement. To address this issue, a shell-type liquid hydrogen (LH₂) cooling structure was proposed for an 80 kW commercial water-cooled permanent magnet motor. A heat-transfer model of the motor cooled by LH₂/cryogenic hydrogen was established, and prototype fabrication and experimental validation were conducted. Axial, circumferential, and columnar flow channels were compared by numerical simulation. The results show that the axial channel provides the best overall performance in terms of cooling effectiveness, pressure drop, and manufacturability. Based on the optimized design, an LH₂-cooled permanent magnet motor prototype was developed and tested under steady operating conditions from 64 kW to 100 kW. The experimental results indicate that LH₂

收稿日期: 2026-02-10 修回日期: 2026-07-14

通信作者: 王倩(1991—), 女, 博士, 副教授, wangqian@ziac.com

第一作者: 张嘉毅(1994—), 男, 硕士, 工程师, guyzhang@foxmail.com

基金项目: 中山市创新团队项目(CXTD2024008)

引用本文: 张嘉毅, 蒋煜东, 王倩, 张峰, 李岸然, 闫鹏举, 阳辉林, 张恒, 阮金港. 基于液氢冷却的高性能永磁电机设计与性能验证[J]. 化工学报, XXXX, XX(XX): 1–11

Citation: ZHANG Jiayi, JIANG Yudong, WANG Qian, ZHANG Feng, LI Anran, YAN Pengju, YANG Huilin, ZHANG Heng, RUAN Jingang. Design and performance verification of a high-performance permanent magnet motor based on liquid hydrogen cooling[J]. CIESC Journal, XXXX, XX(XX): 1–11

cooling maintains the maximum winding temperature at approximately 78 °C, far below the design temperature limit of 180 °C. With nearly unchanged motor mass, the original 80 kW motor can operate stably at the 100 kW level, increasing the specific power by approximately 30%. These results demonstrate that LH₂ cooling can effectively improve the temperature margin and continuous output capability of permanent magnet motors under high-load conditions, providing a feasible technical route for cascade cold-energy utilization and high-power-density motor design in LH₂ energy systems.

Keywords: hydrogen; permanent magnet motor; thermal management; optimal design; experimental validation

引 言

近年来,全球气候变化与清洁能源转型加速推进,节能高效技术在装备制造领域的重要性日益凸显。围绕“碳达峰、碳中和”战略目标,我国相继出台多项政策推动重点用能设备能效提升。《2030年前碳达峰行动方案》明确将电机、风机、泵、压缩机等列为节能改造重点对象,要求全面提升高耗能设备运行效率^[1];《电机能效提升计划(2021—2023年)》进一步提出加快高效节能电机研发与产业化推广,为工业领域节能降碳提供重要支撑^[2]。在各类电机中,永磁电机依托稀土永磁材料实现无励磁损耗,具有高效率、高功率密度、结构紧凑和维护简便等优势,是提升工业驱动系统能效的重要技术路径,其应用可降低系统整体能耗5%~10%^[3-8]。然而,随着风电、光伏配套装备、电动航空及氢能交通等新兴领域快速发展,电机在小型化、轻量化条件下实现更高功率输出和长期稳定运行的需求日益迫切,高功率密度带来的温升控制问题已成为制约电机性能进一步提升的关键瓶颈^[9-12]。传统风冷、水冷和油冷等方式在高热流密度场景下面临换热能力、系统质量及结构布置等方面的限制,亟须发展更高效、轻量化的先进冷却技术^[13-15]。

液氢(LH₂)作为温度低至-253 °C的超低温能源介质,具有较高的冷能密度和良好的传热潜力,其单位质量可释放的冷量超过水的三倍^[16-17]。在永磁电机热管理中引入液氢,可降低绕组温度并改善高负载下的温度稳定性,从而提升电机持续功率输出能力。此外,在液氢动力系统中,液氢完成电机散热后可直接复温并作为燃料供给燃料电池或燃烧系统,实现冷能与化学能的梯级耦合利用,提高能源综合利用效率^[18-19]。与液氮和传统水冷相比,液氢对安全管理和系统集成提出了更高要求,因此其并不适合作为通用冷却介质直接替代液氮或水冷,而需要进一步系统地展开研究。尽管水冷及液

氮冷却在经济性和技术成熟度方面更具优势,但其冷能释放后难以直接接入氢能供能链路,且需配置额外的水冷设备,从而增加系统负载。因此,本文选择液氢作为冷却介质开展探索,旨在实现电机热管理与液氢能源利用的深度耦合,为高性能永磁电机在交通运输、航空航天及大型能源装备等领域的系统级应用提供新的技术路径^[20-22]。

目前,面向液氢或低温环境的电机冷却研究主要集中于高温超导电机及航空电推进系统方向。例如,Zheng等报道了面向未来液氢-超导电推进场景的千瓦级高温超导电机及飞行验证研究^[21]。然而,现有研究多围绕半超导或全超导电机、航空超导推进系统展开,针对常规永磁电机采用液氢冷却时的冷却结构设计、传热仿真及样机测试验证仍相对有限。基于此,本文以一台额定功率为80 kW的商用水冷永磁电机为研究对象,结合液氢超低温冷却特性及低温氢气热物性参数,建立液氢/低温氢气冷却电机传热仿真模型,并进一步完成液氢冷却结构与样机研制。同时,本文开发了小规模液氢制备与储存系统,并依托该系统搭建液氢冷却电机实验平台,开展多工况性能测试,重点验证液氢冷却在提升电机散热能力、抑制温升及提高持续功率输出方面的工程可行性。

1 液氢冷却电机传热模型

1.1 研究对象

本文以一台额定功率为80 kW的现有水冷永磁电机(图1)为基础,开展液氢冷却电机的研制与性能研究。该电机原采用典型水套冷却结构,其热量主要由绕组、铁心等发热部件经机壳传导至冷却水,并通过冷却水循环带走,从而实现整机降温。电机主要参数及工作温度上限如表1所示。基于上述结构和性能边界,本文进一步开展液氢冷却结构设计、热管理性能分析及实验验证,以提升电机持续功率输出能力和比功率。

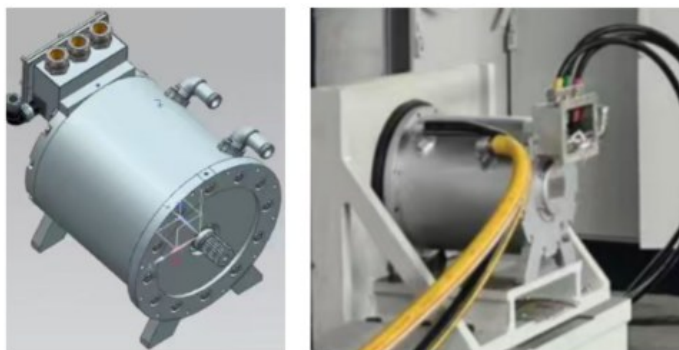


图1 研究对象-80 kW 水冷电机

Fig. 1 Research object-80 kW water-cooled motor

表1 研究对象主要参数

Table 1 Main parameters of the research object

参数类别	主要参数
额定功率	80 kW
额定电压	245 V AC
额定电流	218 A
额定转速	3183 r/min
冷却方式	水冷
绕组(含绝缘)温度上限	$\leq 180\text{ }^{\circ}\text{C}$
定子铁芯温度上限	$\leq 150\text{ }^{\circ}\text{C}$
永磁体温度上限	$\leq 150\text{ }^{\circ}\text{C}$
重量	$72 \pm 5\text{ kg}$

1.2 电机传热仿真模型

基于现有 80 kW 水冷电机的结构参数与几何模型,建立了电机三维传热仿真模型,以分析不同运行工况下的温度场分布。该模型在充分保留原电机结构特征的基础上,对绕组、定子铁心、转子铁心及机壳等关键部件进行了精细化建模,并结合其材质特性赋予相应的物性参数和热源边界条件,从而确保计算结果的准确性和工程可用性。对于冷却介质液氢,考虑其从液态升温至常温氢气过程中汽化潜热在总吸热量中的占比不足 10%^[17,22],对整体换热贡献有限,因此在建模过程中将液氢等效为低温氢气,并采用单相流体传热方式进行数值模拟。所建立的电机传热仿真模型如图2所示。

1.3 边界条件及数学模型

该模型考虑电机发热部件的固体热传导以及电机与冷却氢气之间的对流换热。具体而言,绕组、定子铁心和转子铁心等作为主要热源,分别赋予密度、定压比热容和导热系数等热物性参数,并依据不同工况设定内部发热量(见表2)。由表2分析可知,随着电机功率由 80 kW 提升至 120 kW,绕

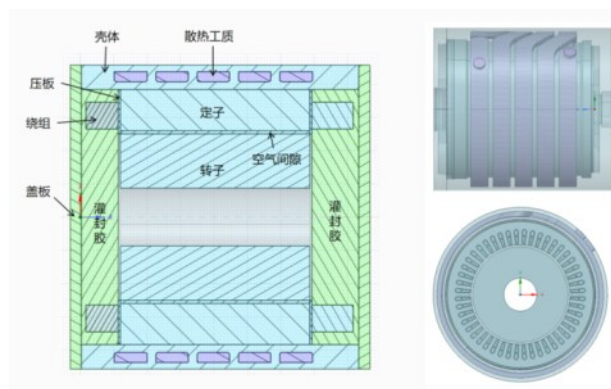


图2 电机传热仿真模型

Fig. 2 Motor heat transfer simulation model

组铜耗占比由约 61.6% 增加至约 71.7%。基于热阻网络分析,绕组与冷源之间的传热路径最长,热阻相对较大,是电机热设计中的关键温升控制部位。由于绕组通常是永磁电机中温升最为显著且对运行可靠性影响最大的部件,本文在结构设计与仿真分析中主要关注绕组最高温度。除特别说明外,后续所述“电机最高温度”均指电机绕组最高温度。电机传热模型中涉及的温度相关物性参数主要包括铜绕组、硅钢片、铝合金机壳、永磁体及绝缘材料等固体域的导热系数、密度和定压比热容,以及氢气流体的密度、定压比热容、导热系数和动力黏度。对于冷却介质氢气,仿真中采用理想气体模型,其入口质量流量根据不同工况下所需液氢流量进行等质量流量换算,入口温度设为 $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$;出口设置为常压出口边界。同时,模型考虑电机机壳与外部环境之间的自然对流换热,环境温度设为 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

选取 CFD 软件中的 Realizable $k-\varepsilon$ 湍流模型(k 为湍动能, ε 为湍动能耗散率)进行液氢/低温氢气冷却电机模拟,数值计算中所需的数学模型方程

表2 不同电机工况仿真条件
Table 2 Simulation conditions for different motor operating conditions

电机工况	绕组铜耗	定子铁耗	转子铁耗	液氢流量需求
80 kW	2039 W	1040 W	232 W	1.2 L/min
100 kW	3167 W	1373 W	301 W	1.5 L/min
120 kW	4629 W	1464 W	366 W	1.8 L/min

主要包括能量守恒方程、流体连续性方程、动量守恒方程及湍流模型方程。具体数学模型如下：

(1)能量守恒方程：

$$\rho(T) \cdot c_p(T) \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla T \right) = \nabla \cdot (k(T) \cdot \nabla T) + Q \quad (1)$$

其中,氢气密度 ρ 、定压比热容 c_p 及导热系数 k 均取温度依赖形式, Q 为热源项, u 为速度矢量。

(2)连续性方程：

$$\nabla \cdot (\rho(T)\vec{u}) = 0 \quad (2)$$

(3)动量守恒方程：

$$\rho(T) \cdot \left(\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u} \right) = -\nabla p + \mu(T) \cdot \nabla^2 \vec{u} + \vec{F} \quad (3)$$

其中, μ 为氢气动力黏度, F 为体力矢量。

(4)k- ε 湍流模型方程：

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho k \vec{u}) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + G_k - \rho \varepsilon \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \varepsilon \vec{u}) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (5)$$

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (6)$$

其中, μ_t 为涡流运动黏滞系数; G_k 为速度梯度产生的湍动能项; $C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$ 为经验常数; σ_k 、 σ_ε 分别为湍动能 k 和耗散率 ε 的湍流普朗特数。对于经验常数的值, $C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$ 分别为1.44和1.92; σ_k 、 σ_ε 分别为1.0和1.3, C_μ 为0.09^[23-24]。

1.4 网格划分及无关性分析

模型采用六面体与四面体相结合的混合网格划分方式,并对绕组、流体通道等关键区域进行局部加密,以提高计算精度。模型的网格划分情况如图3所示。通过建立不同网格数量的仿真模型,在相同边界条件下进行80 kW电机工况的传热分析,并对比计算结果(见图4)。分析表明,当网格数量超过600万时,仿真结果基本不随网格数量变化,表明该网格划分精度已满足计算需求。

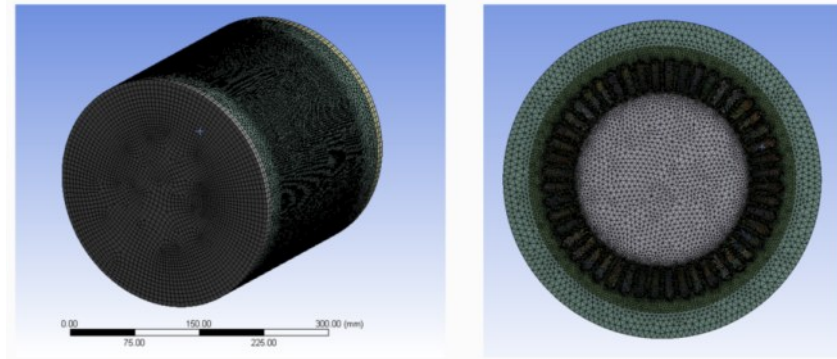


图3 电机传热仿真模型网格

Fig. 3 Meshing of motor heat transfer simulation model

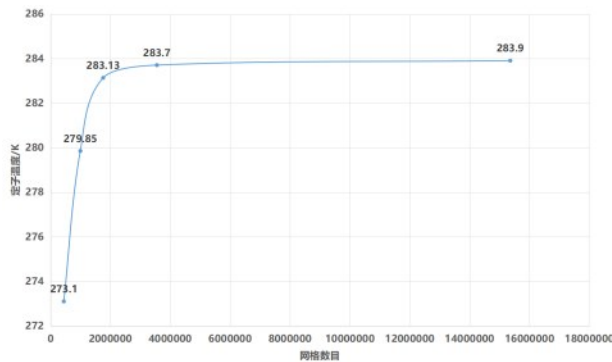


图4 网格无关性分析

Fig. 4 Grid independence analysis

2 液氢冷却电机流道设计

2.1 冷却形式设计

目前,业界尚无专用于电机冷却的液氢冷却结构。鉴于此,本文参考现有水冷及油冷电机中常用的冷却形式,分别设计了直通式、绕管式和机壳式三种液氢冷却系统方案,如图5所示。在此基础上,建立了对应的电机稳态传热仿真模型,并在80 kW电机工况条件下对三种结构方案进行了冷却性能的对比分析,其仿真结果如表3所示。

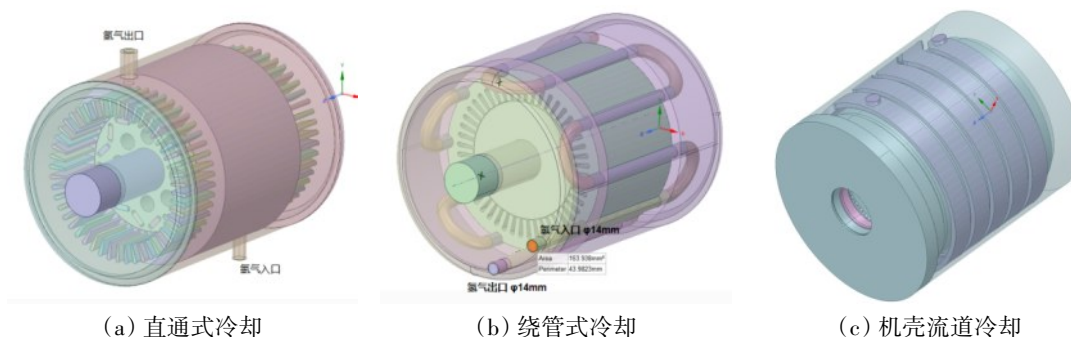


图5 电机常用冷却形式示意图

Fig. 5 Schematic diagram of common cooling methods for motors

表3 不同电机冷却形式传热仿真对比

Table 3 Comparison of heat transfer simulation for different motor cooling methods

冷却形式	仿真电机 工况	液氢流量	绕组最低温 度	绕组最高 温度
直通式冷却	80 kW	1.2 L/min	-186 °C	1 °C
绕管式冷却	80 kW	1.2 L/min	27 °C	59 °C
机壳流道冷却	80 kW	1.2 L/min	-22 °C	12 °C

结果表明,直通式冷却方案通过将液氢直接导入电机机壳内部,使液氢或低温氢气与热源直接接触进行换热,从结果上看可获得最佳冷却效果,但其结构密封要求极高,对于电机内部涉及动密封设计,设计难度大,易造成氢气泄漏,且液氢直接与绕组绝缘体接触,温度极低易造成其绝缘失效,该方案工程应用风险较大。绕管式冷却方案采用将液氢管路缠绕于电机定子外部的方式进行冷却,受限於传热面积及布置空间,其换热效率较低,且存在局部流速偏高的安全风险。相比之下,机壳式冷却方案通过在电机外部设置环形冷却夹套,使液氢与

电机外壳形成大面积换热接触,该结构冷却效率较高,密封可靠性好,加工及装配工艺简便,综合性能优于前两种方案。因此,本文确定机壳式冷却结构为液氢冷却电机的推荐设计方案。

2.2 流道形式设计

在确定采用机壳式冷却结构作为电机外部冷却形式后,本文进一步对其内部液氢流道进行了优化设计。考虑到液氢温度极低,与电机换热部件存在较大的温差,若设计单一流道,会造成进出口温差较大,液氢冷能利用率较低。因此针对液氢冷却中冷却介质与热源温差较大的情况,采用对称式进出口结构可以改善流场与温度均匀性,提高系统冷却效率^[25-27]。同时在既定电机结构约束下,尽可能增加冷却介质的流动路径和换热面积,以充分利用液氢的冷能潜力,提升系统整体冷却效率。参考水冷电机及低温换热器设计经验,常见的流道结构主要包括轴向型、周向型和柱状型三种典型形式,如图6所示^[28-29]。

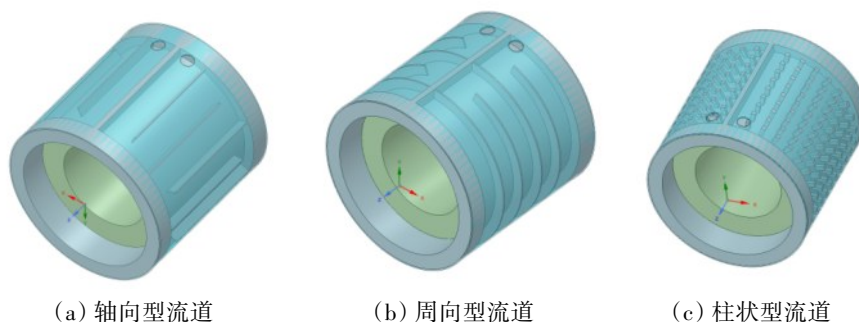


图6 不同的氢冷电机流道

Fig. 6 Different flow channels of hydrogen-cooled motors

为比较不同流道热性能与流动特性,本文分别建立了三种流道结构的稳态传热仿真模型,并在

相同工况条件下开展数值对比分析,其结果如图7所示,以80 kW电机工况为例,温度云图如图8所

示。仿真结果表明,轴向型与周向型流道的温度分布基本一致,冷却性能相近,且均优于柱状型流道。在压降方面,周向型略优于轴向型,但二者差异较小,对系统性能影响可忽略。综合考虑加工工艺与结构可靠性,轴向型流道因加工路径简单、精度易控且有利于后续焊接密封,而周向型加工复杂、精度控制难度较大。基于冷却性能、制造可行性及安全性等因素,最终确定轴向型流道作为本课题液氢冷却电机机壳式冷却结构的内部流道设计方案。

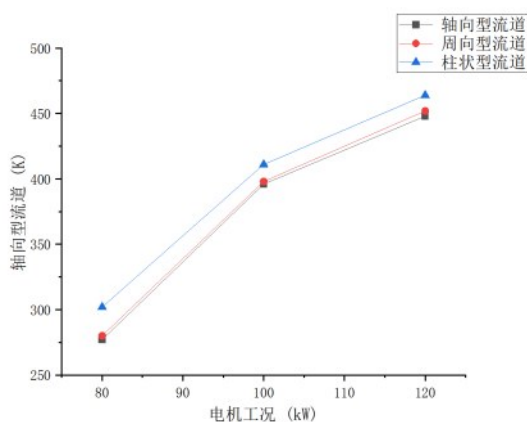


图7 不同流道形式传热仿真分析对比

Fig. 7 Comparison of heat transfer simulation analysis for different flow channel forms

2.3 尺寸参数设计

在前期确定铝合金机壳冷却结构与轴向型流道方案的基础上,本文进一步开展液氢冷却系统整体结构参数的优化研究。电机机壳的主要尺寸参数包括内径、外径及长度,其中内径与长度由电机定子结构限定,因此重点分析机壳外径及流道周期数对冷却性能的影响。机壳外径主要由冷却流道高度决定。流道过低会导致截面积减小、氢气流速过快,降低冷能利用率并带来安全隐患;而过高则增大氢气与热源间距及外壁散热面积,造成冷能浪费并降低换热效率。为分析流道高度对冷却性能

通过前述仿真与结构分析,确定了本课题液氢冷却电机的总体设计方案。依据前期优化确定的设计参数,对电机模型进行细化与完善,形成了完整的液氢冷却电机结构,其总体示意如图10所示。为验证该方案的冷却性能与工程适用性,基于建立的电机稳态热仿真模型,对液氢冷却与传统水冷两种冷却方式在80 kW与100 kW工况下进行了对比仿真分析,其中水冷方案的仿真结果作为基准进行对照。不同工况下的温度分布结果如图11a所示。

的影响,建立电机稳态传热仿真模型,在80 kW电机工况下进行对比分析,结果如图9a所示。机壳尺寸确定后,流道周期数成为影响流道总长度与宽度的关键参数。周期数过少将导致液氢换热不足,过多则使流道过窄、流速过高,增加流动阻力及安全风险。本文对不同周期数的冷却性能与流速进行了仿真对比,结果如图9b所示。综合冷却性能与安全性,结合液氢系统推荐流速不超过25 m/s^[30],最终确定本课题液氢冷却结构的最优参数为流道周期9、流道高度25 mm。

结果表明,在100 kW工况下,液氢冷却方案的电机最高温度为114.6 °C(温度云图见图11b),远低于水冷方案在相同工况下的温升水平,且温度分布更加均匀,满足设计温度要求。本文将比功率作为电机性能的评价指标,其定义为电机输出功率与电机本体质量之比,即 $Sp=P/m$;比功率提升率为 $\eta Sp=(Sp_{LH2}-Sp_0)/Sp_0 \times 100\%$ 。本方案电机质量与水冷电机质量相近,稳定输出功率由80 kW提升至100 kW,则比功率由1.11 kW/kg提高至1.39 kW/kg,提升

25%。

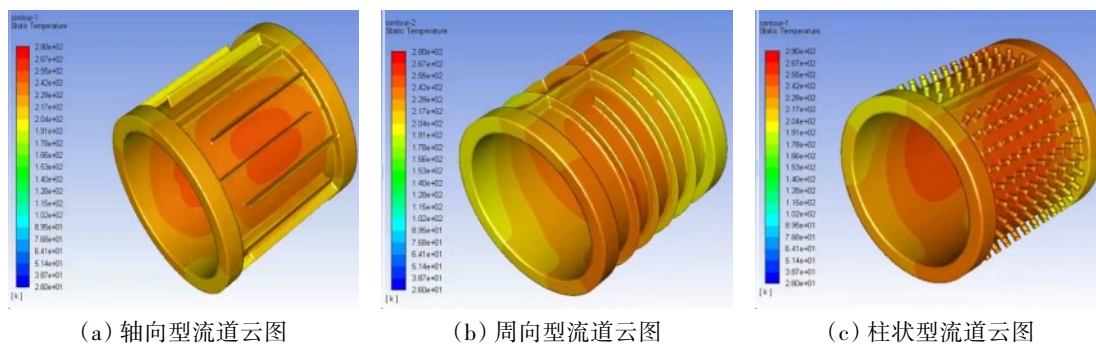


图8 80 kW 电机工况不同流道热仿真温度云图

Fig. 8 Temperature cloud map of thermal simulation of different flow channels for 80 kW motor

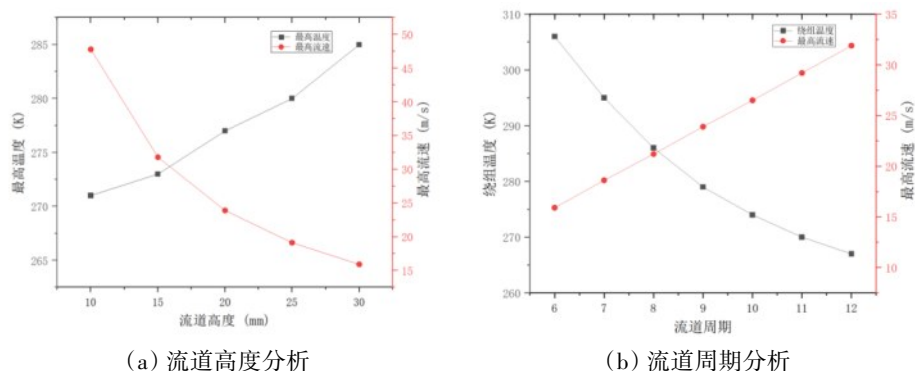


图9 80 kW 电机工况流道主要尺寸参数对比分析

Fig. 9 Effect of main flow-channel dimensions under 80 kW operating conditions

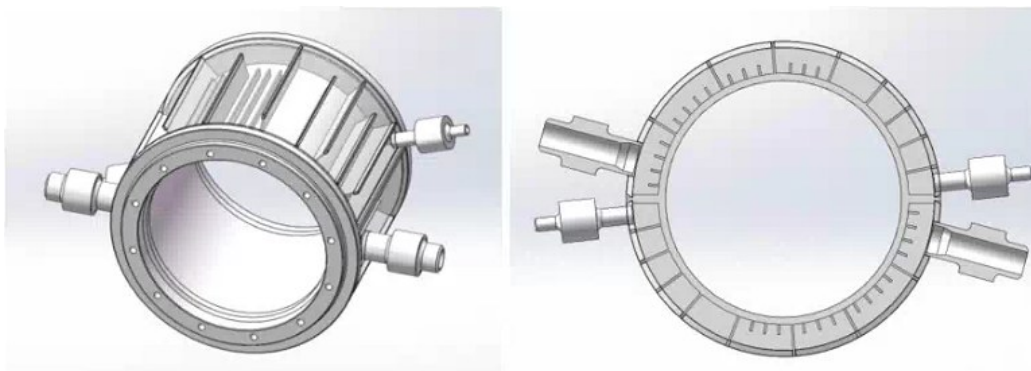


图10 液氢冷却电机机壳方案

Fig. 10 Schematic of the liquid-hydrogen-cooled motor casing

3 实验验证

3.1 液氢冷却电机实验平台

为验证液氢冷却结构的设计合理性与冷却性能,本文基于一台15 L/d 氢液化系统,在中山先进低温技术研究院涉氢实验楼搭建了液氢冷却电机实验平台,用于开展液氢流动、传热及电机温升特

性等实验研究。实验平台的总体布局如图12所示,主要由进气端阀架、15 L/d 氢液化器撬装、电机测试平台、排气端阀架及氢气浓度监测系统组成。其中,进气端与排气端阀架主要用于实验前期系统置气及实验过程中氢气的安全排放。液化系统采用基于一台GM 制冷机的氢液化撬装装置,额定液化率15 L/d,并配备100 L 液氢杜瓦用于低温液氢的储

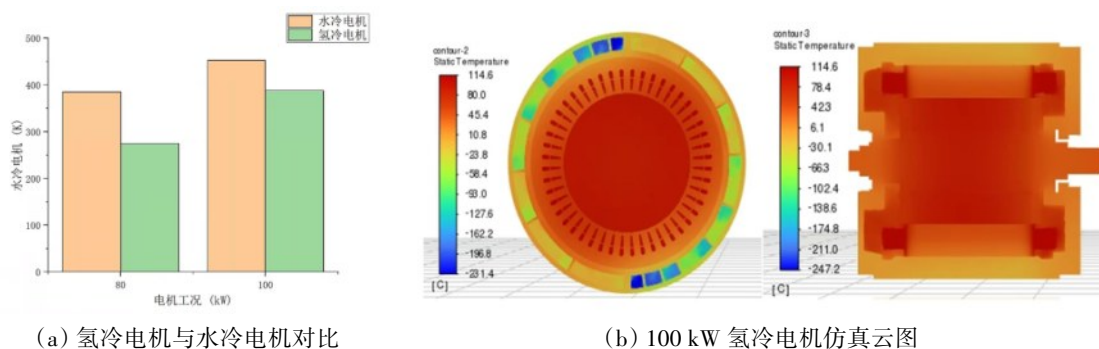


图 11 氢冷电机热仿真评估结果

Fig. 11 Thermal simulation evaluation results of hydrogen-cooled motor

存。系统气动阀可根据实验需求调节液氢流量,实现液氢稳定供给与动态控制。

电机测试平台(见图 13a)主要由氢冷电机、水冷电机、对拖装置及氮气保护罩组成。其中,氢冷电机依据第2章设计方案加工成型,完成机壳氢检以确认氢气流道气密性,并完成首台液氢冷却电机的组装(见图 13b)。水冷电机为额定功率 80 kW 的标准样机,用作陪试电机,可模拟不同转速和负载工况。由于两台电机均为非防爆型,为确保涉氢实验安全,测试平台外部设置氮气保护罩,实验过程中向罩内持续通入微正压干燥氮气,以隔绝空气、防止形成爆炸性混合气体,同时有效避免氢冷电机的结霜与结露现象。测试平台配备的测控系统采用多通道数据采集仪,实现冷却回路进出口温度、

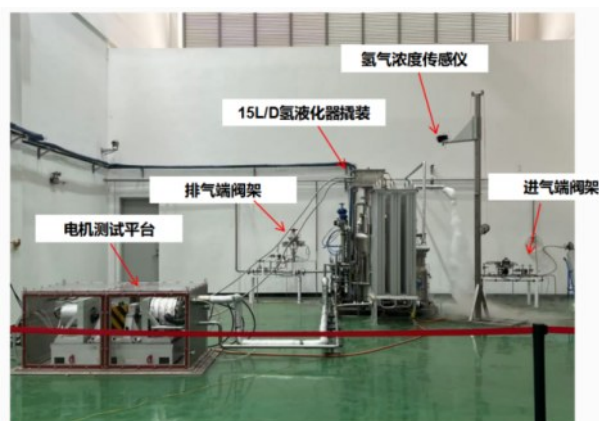


图 12 液氢冷却电机实验平台

Fig. 12 Experimental platform for liquid hydrogen cooled motor

流量及电机定子、绕组关键点温度的实时记录。

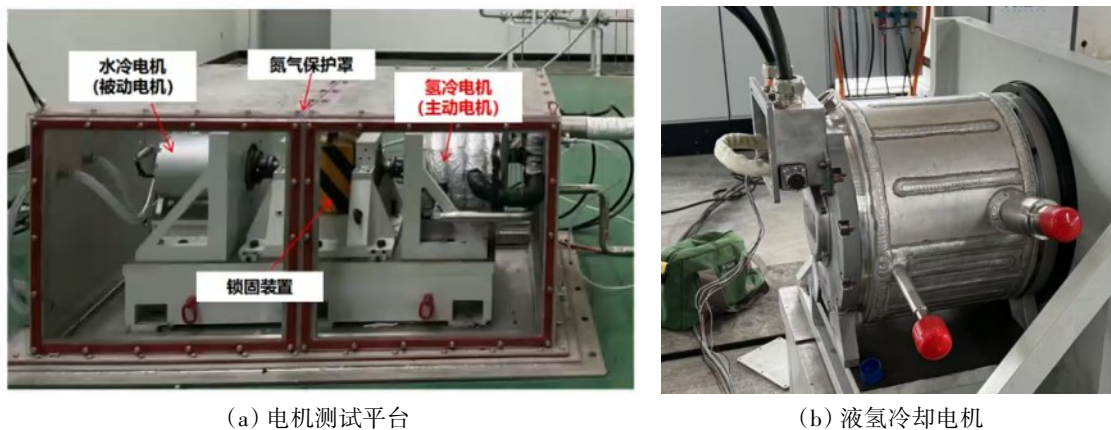


图 13 电机对拖测试平台和液氢冷却电机

Fig. 13 Motor test platform and liquid-hydrogen-cooled motor

该液氢冷却电机实验平台能够在可控安全环境下实现液氢的制备、供给、冷却及汽化复温过程的全流程测试,具备温度、压力、流量等多参数实时监测与记录功能,为液氢冷却电机性能验证提供了

可靠的实验条件。

3.2 实验结果及数据分析

基于自主搭建的液氢冷却电机实验平台,开展了输出功率分别为 64 kW、80 kW 及 100 kW 的三种

典型稳态工况性能测试。实验环境温度为 35 ℃,电机转速保持在 3183 rpm。作为对比,水冷电机采用冷却水流量 15 L/min、进水温度 32 ℃ 的工况;液氢

冷却电机的冷却流量分别为 0.6 L/min (64 kW)、1.0 L/min (80 kW) 和 1.3 L/min (100 kW)。测试结果见表 4。

表 4 液氢冷却电机实验结果

Table 4 Experimental results of liquid hydrogen cooled motor

实验序号	氢冷电机 工况	氢冷电机 绕组温度	液氢流量	流量要求	水冷电机 工况	水冷电机 绕组温度	冷却水流量
1	64.3 kW	77.8 ℃	0.6 L/min	≤1 L/min	57.3 kW	82.9 ℃	15 L/min
2	80.5 kW	77.0 ℃	1.0 L/min	≤1.2 L/min	70.6 kW	112.6 ℃	15 L/min
3	101.3 kW	77.6 ℃	1.3 L/min	≤1.5 L/min	87.0 kW	137.6 ℃	15 L/min

结果表明,液氢冷却结构显著改善了电机的热管理性能。液氢冷却电机在各工况下的温升均远低于 180 ℃ 的设计上限,具有较大的温度裕量;与传统水冷方案相比,在更高功率输出条件下电机温度更低,冷却效率更高。进一步分析 100 kW 工况下的实验结果可知,在限定液氢流量条件下,液氢冷却可使原额定功率为 80 kW 的电机在 101.3 kW 负载下稳定运行,且最高温度较限值低 100 ℃ 以上。受限于实验平台功率输出能力,未进行更高功率测试,但结果表明液氢冷却电机的比功率较水冷方案提升约 30%,且随着功率上升,比功率仍有较大的提升空间。该实验结果与仿真预测结果一致,验证了本文提出的液氢冷却结构设计的合理性与性能优势。

3.3 数值模型初步验证

为检验数值模型对样机温度水平的预测能力,选取输出功率和转速相同的 100 kW 工况进行比较。仿真采用 1.5 L/min 设计流量,所得最高绕组温度为 114.6 ℃ (387.8 K);试验实际流量为 1.3 L/min,测得最高绕组温度为 77.6 ℃ (350.8 K)。两者绝对偏差为 37.0 K,按 $\delta = |T_{sim} - T_{exp}| / T_{exp} \times 100\%$ 计算,相对偏差为 10.6%。且仿真温度高于试验值,说明该模型对电机温升给出了相对保守的预测。造成偏差的原因主要包括:仿真中采用液氢单相等效处理,未充分考虑液氢汽化潜热及两相换热过程;材料接触热阻、损耗分配等参数存在一定简化;同时,仿真边界条件与试验中的实际流量、测温位置之间也存在差异。尽管存在一定定量偏差,仿真与试验结果均表明,在 100 kW 工况下,电机最高绕组温度低于 180 ℃ 的设计上限。因此,该模型可用于冷却结构的相对比较及温度安全性判断,但其绝对温度预测精度仍需通过引入相变传热模型,并结合更多相同边界条件下的试验数据进一步校核。

4 总结与展望

本文针对高功率密度永磁电机的热管理瓶颈问题,提出并验证了一种基于液氢冷却的创新型电机冷却技术方案。主要结论如下:

基于一台额定功率 80 kW 的商用水冷电机建立传热仿真模型,系统对比分析了直通式、绕管式与机壳式三种冷却结构,并进一步优化设计了轴向往型液氢流道结构。仿真结果表明,液氢冷却结构在散热性能、温度均匀性及结构可制造性方面均优于传统水冷方案,能够显著降低绕组及定子区域的温升。

依据仿真优化结果完成液氢冷却电机样机设计与制造,并依托自主搭建的液氢制备与测试平台,开展了 64 kW、80 kW 及 100 kW 三种工况下的液氢冷却性能测试。实验结果表明,电机最高温度分别为 77.8 ℃、77.0 ℃ 和 77.6 ℃,均显著低于 180 ℃ 的设计上限,温度裕量超过 90 ℃;液氢冷却可使原额定功率为 80 kW 的电机稳定运行于 100 kW 工况,比功率较传统水冷方案提升约 30%。在 100 kW 工况下,仿真预测最高绕组温度为 114.6 ℃,高于试验测得的 77.6 ℃,相对偏差为 10.6%,表明该模型能够对电机温升进行偏保守预测,可为液氢冷却结构设计提供参考。上述结果验证了液氢冷却结构应用于高热流密度电机的工程可行性与性能优势,为高功率密度电机热管理提供了新的技术路径。

展望未来,液氢冷却电机技术仍需在更大功率等级、系统动态特性及多能耦合利用等方面进一步开展研究。首先,应面向更大功率等级电机开展液氢冷却实验,进一步评估液氢冷却对电机持续功率输出和比功率提升的作用边界,明确制约性能提升的关键因素,并据此优化冷却结构与运行参数。其

次,应针对液氢冷却系统的动态响应、安全控制及长期稳定运行特性开展深入研究,提高系统在复杂工况下的可靠性和工程适用性。最后,可结合燃料电池、液氢储供一体化系统及低温冷能利用需求,探索液氢冷能、电机热管理与氢能供能之间的多能耦合利用方式。通过上述研究,可进一步完善液氢冷却电机技术体系,为其在航空航天、电动交通及大型能源装备等高端领域的工程化应用奠定基础。

符 号 说 明

- C_μ ——湍流黏度模型常数,无量纲
 $C_{I\varepsilon}, C_{2\varepsilon}$ ——均为 ε 方程中湍动能生成项经验常数,无量纲
 c_p ——定压比热容, $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
 F ——体力矢量, $\text{N}\cdot\text{m}^{-3}$
 G_k ——湍动能产生项, $\text{W}\cdot\text{m}^{-3}$
 k ——湍动能, $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-2}$
 $k(T)$ ——导热系数, $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
 m ——质量, kg
 P ——功率, W
 p ——压力, Pa
 Q ——体积热源项, $\text{W}\cdot\text{m}^{-3}$
 Sp ——比功率, $\text{W}\cdot\text{kg}^{-1}$
 Sp_0 ——原电机比功率, $\text{W}\cdot\text{kg}^{-1}$
 Sp_{LM2} ——氢冷电机比功率, $\text{W}\cdot\text{kg}^{-1}$
 T ——温度, K
 T_{sim} ——仿真温度, K
 T_{exp} ——实验温度, K
 t ——时间, s
 u ——速度矢量, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
 ε ——湍动能耗散率, $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-3}$
 μ ——动力黏度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$
 μ_t ——湍流黏度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$
 ρ ——密度, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
 σ_k ——湍动能 k 的湍流普朗特数,无量纲
 σ_ε ——湍动能耗散率 ε 的湍流普朗特数,无量纲

参 考 文 献

- [1] 国务院. 国务院关于印发2030年前碳达峰行动方案的通知[EB/OL]. (2021-10-26) [2026-07-10]. https://www.gov.cn/zhengce/content/2021-10/26/content_5644984.htm.
State Council of the People's Republic of China. Notice of the State Council on issuing the action plan for carbon dioxide peaking before 2030[EB/OL]. (2021-10-26)[2026-07-10]. https://www.gov.cn/zhengce/content/2021-10/26/content_5644984.htm.
- [2] 工业和信息化部办公厅, 市场监管总局办公厅. 两部门关于印发《电机能效提升计划(2021-2023年)》的通知[EB/OL]. (2021-11-22)[2026-07-10]. https://wap.miit.gov.cn/zwgk/zcwj/wjfb/tz/art/2021/art_76228b2294a14e168c94a9a3db77fc40.html.
General Office of the Ministry of Industry and Information Technology, General Office of the State Administration for Market Regulation. Notice on issuing the Motor Energy Efficiency Improvement Plan (2021-2023)[EB/OL]. (2021-11-22)[2026-07-10]. https://wap.miit.gov.cn/zwgk/zcwj/wjfb/tz/art/2021/art_76228b2294a14e168c94a9a3db77fc40.html.
- [3] Hanejko F. Induction vs. permanent magnet motor efficiency: auto electrification[EB/OL]. (2020-04-23)[2026-07-11]. <https://www.horizontechnology.biz/blog/induction-vs-permanent-magnet-motor-efficiency-auto-electrification>.
- [4] Saxena R, Ugale R T. Comparative study of induction motor, permanent magnet synchronous motor and line start permanent magnet synchronous motor using finite element analysis[C]//2024 IEEE 11th Power India International Conference (PIICON). Jaipur, India, December 10-12, 2024. IEEE, 2024: 1-5. DOI: 10.1109/PIICON63519.2024.10995051.
- [5] 陈前, 赵美玲, 廖继红, 等. 轻量化高效率永磁电机及其控制技术综述[J]. 电气工程学报, 2023, 18(4): 3-19.
Chen Q, Zhao M L, Liao J H, et al. Review on lightweight and high efficiency permanent magnet motor and its control techniques[J]. Journal of Electrical Engineering, 2023, 18(4): 3-19.
- [6] Isfahani A H, Vaezi M, Faraji F. Line-start permanent magnet synchronous motors: Performance and advantages over induction motors[J]. Electric Power Systems Research, 2009, 79(6): 850-856.
- [7] Sun W, Si H, Qiu J, et al. Research on efficiency of permanent-magnet synchronous motor based on adaptive algorithm of fuzzy control[J]. Sustainability, 2024, 16(3): 1253. DOI: 10.3390/su16031253.
- [8] 中国电器工业协会. 高效节能电机技术发展白皮书[R]. 北京: 中国机械工业出版社, 2016.
China Electrical Equipment Industrial Association. White paper on technology development of high-efficiency energy-saving motors[R]. Beijing: China Machine Press, 2016.
- [9] Zhang Z R, Zhang J, Hu G Y, et al. Thermal management technologies of high-power-density high-efficiency electric machine systems for more electric aircraft[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2025, 46(6): 531380.
- [10] Deisenroth D C, Ohadi M. Thermal management of high-power density electric motors for electrification of aviation and beyond[J]. Energies, 2019, 12(19): 3594.
- [11] 尚巍, 狄松茂, 黄富平, 等. 新能源汽车高功率密度动力总成研究[J]. 电子元器件与信息技术, 2020, 4(11): 85-86.
Shang W, Di S M, Huang F P, et al. Research on high power density powertrain of new energy vehicle[J]. Electronic Component and Information Technology, 2020, 4(11): 85-86.
- [12] 李成功, 杨建玺, 赵远方, 等. 高功率密度电机冷却流道的研究[J]. 机械设计与制造, 2022(10): 129-133, 138.
Li C G, Yang J X, Zhao Y F, et al. Research on cooling channel of high power density motor[J]. Machinery Design & Manufacture, 2022(10): 129-133, 138.
- [13] Wang X, Li B, Gerada D, et al. A critical review on thermal management technologies for motors in electric cars[J]. Applied Thermal Engineering, 2022, 201: 117758.
- [14] Tikadar A, Johnston D, Kumar N, et al. Comparison of electro-

- thermal performance of advanced cooling techniques for electric vehicle motors[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2021, **183**: 116182.
- [15] Li X Y, Sun T F, Huang S J, et al. Review and perspectives on thermal management methods for permanent magnet synchronous motors[J]. *Journal of Electrical Engineering*, 2023(4): 20–34.
- [16] Barron R F. *Cryogenic Systems*[M]. 2nd ed. New York: Oxford University Press, 1985.
- [17] Zhang T T, Uratani J, Huang Y X, et al. Hydrogen liquefaction and storage: Recent progress and perspectives[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2023, **176**: 113204.
- [18] Yang M Y, Hu S, Yang F Y, et al. On-board liquid hydrogen cold energy utilization system for a heavy-duty fuel cell hybrid truck [J]. *World Electric Vehicle Journal*, 2021, **12**(3): 136.
- [19] Jiang S F, Ren Z Z, Gong Y, et al. A new cold energy utilization system for liquid hydrogen heavy-duty trucks using bi-cooling circuits[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2025, **138**: 151–164.
- [20] Bai M L, Yang W J, Yan J Z, et al. Cryogenic turbo-electric hybrid propulsion system with liquid hydrogen cooling for a regional aircraft[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2024, **71**: 541–561.
- [21] Zheng Z, Ma J, Hou J, et al. Liquid hydrogen application for aero-engine more-electrical system: current status, challenges and future prospects[J]. *Cryo*, 2025, **1**(1): 5.
- [22] Aziz M. Liquid hydrogen: A review on liquefaction, storage, transportation, and safety[J]. *Energies*, 2021, **14**(18): 5917.
- [23] Xu Y Y, Tan L B, Yuan Y J, et al. Numerical simulation on flow field and design optimization of a generator unit based on computational fluid dynamics analysis[J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2021, **2021**: 3350867.
- [24] ANSYS Inc. *ANSYS Fluent Theory Guide*[M]. Canonsburg: ANSYS Inc., 2023.
- [25] 王立森, 夏加宽, 朱启生, 等. 50 kW 车用永磁电机冷却结构优化与温度场分析[J]. *船电技术*, 2024, **44**(4): 65–69.
Wang L S, Xia J K, Zhu Q S, et al. Optimization of cooling structure and temperature field analysis of a 50 kW vehicle permanent magnet motor[J]. *Marine Electric & Electronic Engineering*, 2024, **44**(4): 65–69.
- [26] Yin L, Zhang H Q, Ding J, et al. A numerical study of fluid velocity and temperature distribution in regenerative cooling channels for liquid rocket engines[J]. *Fluid Dynamics & Materials Processing*, 2025, **21**(8): 1861–1873.
- [27] Saleh Z M, Jaffal H M. Investigating the influence of inlet/outlet arrangements and flow direction on the hydro-thermal performance of a multi-minichannel cold plate[J]. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2024, **110**: 109647.
- [28] Zhang K, Qi Y Y, Le B, et al. Design and experimental study of water cooling system for external rotor permanent magnet synchronous motor[J]. *IEEE Access*, 2024, **12**: 88034–88047.
- [29] Wang L Z, Wu Y F, Guo Y, et al. Analysis of the cooling performance based on the three-dimensional magnetic-thermal coupling in high-speed permanent magnet synchronous motor[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 2025, **12**(5): 1397–1414.
- [30] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 中华人民共和国国家标准 GB 50177–2005: 氢气站设计规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2005.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. GB 50177–2005: Design code for hydrogen station[S]. Beijing: China Planning Press, 2005.