

DOI:10.16356/j.1005-2615.2025.01.017

基于 Isight 的磁悬浮永磁电机风冷流道优化设计

郑安, 周瑾, 金超武, 徐园平, 凌阳熠

(南京航空航天大学机电学院, 南京 210016)

摘要: 为分析磁悬浮永磁电机风冷冷却介质的流动特性, 利用 Fluent 软件对其进行流场分析, 将入口静压的实验与仿真结果进行对比分析, 误差小于 5.5%, 验证了仿真模型的准确性。为进一步合理分配并联风冷流道的冷却流量并降低系统入口静压, 提出基于 Isight 的磁悬浮永磁电机风冷流道优化设计方法。首先以达到理论风量分配比例和冷却入口静压最小为优化目标, 进行实验设计和参数灵敏度分析; 然后, 基于径向基神经网络算法构建了流场仿真的近似模型; 最后, 采用多岛遗传算法对该近似模型进行多目标优化设计, 得到了最佳的结构参数, 优化后的冷却入口静压降低了 25.2%, 主流道和内流道的风量占比均达到了设计要求。

关键词: 磁悬浮; 永磁电机; Isight; 风冷; 优化设计

中图分类号: TM351

文献标志码: A

文章编号: 1005-2615(2025)01-0169-07

Optimal Design of Air-Cooled Flow Paths of Maglev Permanent Magnet Machine Based on Isight

ZHENG An, ZHOU Jin, JIN Chaowu, XU Yuanping, LING Yangyi

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: To analyze the flow characteristics of the air-cooled cooling medium of the system, the flow field analysis is carried out by the Fluent software. The simulation of the inlet static pressure is compared with the experimental results. The error between the test and simulation results is less than 5.5%. The accuracy of the simulation model is verified. Further, an optimal design method of air-cooled flow paths of the system based on Isight is proposed to rationally distribute the cooling flow of parallel air-cooled paths and reduce the static pressure of the system inlet. Firstly, the optimization objective is determined to achieve the theoretical air volume distribution ratio and the minimum static pressure of the cooling inlet, and the experimental design and parameter sensitivity analysis are carried out. Secondly, the approximate model of flow simulation is constructed based on radial basis neural network algorithm. Finally, the multi-objective optimization design of the approximation model is carried out by multi-island genetic algorithm, and the optimal structural parameters are obtained. Results show that the static pressure of the cooling inlet is reduced by 25.2%, and both the main channel and the inner channel reach the theoretical design goal.

Key words: maglev; permanent magnet machine; Isight; air cooling; optimal design

磁悬浮永磁电机系统由于具有转子无摩擦、无磨损且整机高效节能等优势, 被广泛应用于大功率空气压缩机、储能飞轮和涡轮分子泵等应用领

域^[1]。然而, 随着功率等级和设备集成度的提升, 整机系统的冷却与散热问题逐渐突出, 磁悬浮轴承以及永磁电机的局部过热现象均会造成系统失稳,

基金项目: 国家自然科学基金(52075239, 52475060)。

收稿日期: 2024-10-31; **修订日期:** 2025-01-06

通信作者: 周瑾, 女, 教授, 博士生导师, E-mail: zhj@nuaa.edu.cn。

引用格式: 郑安, 周瑾, 金超武, 等. 基于 Isight 的磁悬浮永磁电机风冷流道优化设计[J]. 南京航空航天大学学报(自然科学版), 2025, 57(1): 169-175. ZHENG An, ZHOU Jin, JIN Chaowu, et al. Optimal design of air-cooled flow paths of maglev permanent magnet machine based on Isight[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics (Natural Science Edition), 2025, 57(1): 169-175.

工程实践中往往采用主动式强迫风冷的散热方案^[2-4]。因此,风冷流道设计的合理性间接决定了系统的稳定性和可靠性,同时优化风道结构尺寸在冷却设计过程中也至关重要。

对于冷却系统的优化设计问题,文献[5]对民用直升机的冷却进气孔开展了优化设计研究,比较分析了3种气道构型的进气性能,为气道优化设计指明了方向。对于电机风冷流道的结构优化设计问题,文献[6]采用有限体积法对汽轮发电机多风路通风系统进行了流场分析,对其优化设计具有重要的借鉴意义;文献[7]通过对永磁风力发电机的不同结构方案的通风冷却性能进行仿真对比,得出了优化后的结构方案;文献[8]同样基于有限元仿真模型对大功率高速永磁电机的温升与冷却效果进行分析,对不同结构参数和冷却方案仿真结果进行对比,得到了最优的冷却方案。对于磁悬浮永磁电机系统的优化设计问题,文献[9]提出了基于多场耦合的高速磁悬浮电机转子的损耗优化设计方法,并基于试验验证了方法的合理性;文献[10]基于Isight软件对磁悬浮涡轮发电机的定子和转子采用了基于近似模型的综合优化设计方法,大幅提升了设计及仿真分析的效率。综上所述,目前针对电机冷却流道结构优化的研究往往采用大量仿真

对比分析的方法完成,但采用该方法计算效率低、计算流程繁琐且研发周期长,而磁悬浮永磁电机系统并联冷却风道多且结构复杂,对其结构参数进行优化设计的研究相对较少,因此,有必要开展对其风冷流道优化设计的研究,以改善冷却性能并提高设计及分析效率。

本文首先对磁悬浮永磁电机的风冷系统进行流场分析,并基于试验数据验证仿真模型的准确性;其次,基于Isight优化设计软件,集成参数化建模模块和流场分析模块,以合理分配并联风道流量和最小化入口静压为目标,对风冷流道结构参数进行尺寸优化,最终达到优化设计目标。

1 磁悬浮永磁电机风冷散热系统

磁悬浮永磁电机系统主要由轴向磁悬浮轴承(Axial magnetic bearing, AMB)、径向磁悬浮轴承(Radial magnetic bearing, RMB)、永磁同步电机(Permanent magnet synchronous motor, PMSM)、转子等组成,其中两个径向磁悬浮轴承分别处在电机的两侧,因此需设计并联风路进行强迫风冷。常见的风冷方案如图1所示,其中共布置了3条并联风道,以兼顾磁悬浮轴承、电机以及转子的冷却效果。

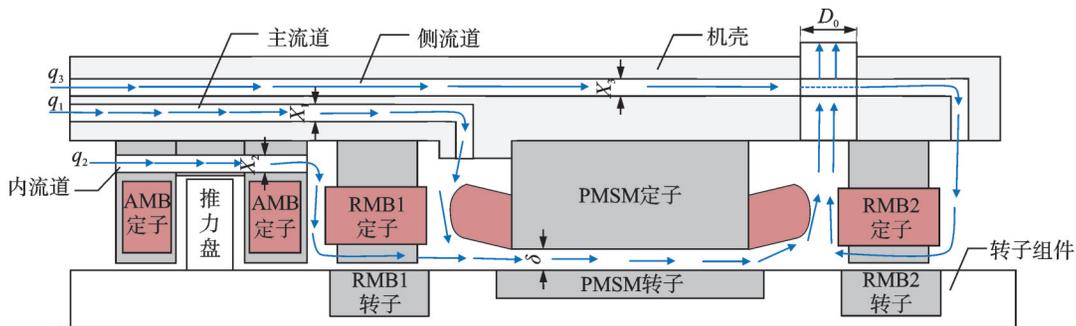


图1 磁悬浮永磁电机风冷系统结构示意图

Fig.1 Structure diagram of air cooling system of maglev permanent magnet machine

各冷却位置与冷却风量的对应关系,如表1所示。其中,主流道宽度 X_1 ,内流道宽度 X_2 ,侧流道直径 X_3 的结构参数决定了并联风路的风阻大小,将对流量分配产生直接影响。电机的机械气隙宽度 δ 是电机定转子的主要冷却路径,而出风孔直径 D_0 决定了出口面积,两者对整机系统风阻的影响较大。

表1 冷却位置与冷却风量的对应关系

Table 1 Corresponding relationship between cooling position and cooling air volume

冷却位置	PMSM	AMB, RMB1	RMB2
风量大小	$q_1 + q_2 + q_3$	q_2	q_3

2 磁悬浮永磁电机风冷流场分析模型

2.1 数学模型

本文所研究的磁悬浮永磁同步电机冷却介质为空气,系统中空气流速均小于120 m/s,均小于声速,可视空气为不可压缩流体;其次,空气所受离心力等远大于重力和浮力作用,故忽略重力及浮力对流动的影响;此外,在转子高速转动作用下,部分位置的空气 Re 远大于2 300,处于湍流状态,故采用基于剪切应力输运(Shear stress transport, SST)模型的 $k-\omega$ 标准湍流模型^[11]进行求解。

采用基于有限体积法的 Fluent 软件对磁悬浮永磁电机风冷流场进行稳态数值计算,而有限体积法则将求解区域划分为一系列的控制体积,所有控制体积需满足质量、动量以及能量守恒方程,在固定坐标系下其控制方程的通用形式为

$$\operatorname{div}(\rho\phi\mathbf{u})=\operatorname{div}(\Gamma\operatorname{grad}\phi)+S \quad (1)$$

式中: ρ 为流体密度; \mathbf{u} 为流速矢量; ϕ 为通用变量,取 1 时表示质量守恒,取流速分量时表示动量守恒,取温度 T 时表示能量守恒; Γ 表示广义扩散系数,取黏度系数 μ 时表示动量守恒,取热导率与比热容之比时表示能量守恒; S 为广义源项^[11]。

磁悬浮永磁电机系统的风冷传热分析过程中,往往忽略热辐射,仅考虑热传导和热对流两种传热形式。而对于所采用的封闭式强迫风冷方案,当电机温度达到稳态后,基于能量守恒的基本原理可知,此时散热量与发热量达到平衡状态。

$$Q_{\text{loss}}=cm\Delta T \quad (2)$$

式中: Q_{loss} 为研究对象的总损耗量; c 为空气比热容大小; ΔT 为出口与入口空气温度的温度差; m 为单位时间内流出系统的空气质量,计算式如下

$$m=q_x\rho_a \quad (3)$$

式中: q_x 为冷却空气的体积流量; ρ_a 为空气密度。

根据式(2,3)可知,在忽略温度对空气物理特性影响的条件下,风路的风量大小与所冷却部件的损耗呈近似线性关系。因此,本文并联风路的风量分配应近似满足

$$\frac{Q_{\text{PMSM}}}{q_1+q_2+q_3}=\frac{Q_{\text{RMB1}}+Q_{\text{AMB}}}{q_2}=\frac{Q_{\text{RMB2}}}{q_3} \quad (4)$$

式中: Q_{PMSM} 、 Q_{RMB1} 、 Q_{RMB2} 和 Q_{AMB} 分别代表永磁同步电机、径向磁悬浮轴承 1、径向磁悬浮轴承 2 和轴向磁悬浮轴承的总损耗大小。各组件的总损耗包括铜耗、铁耗及对应转子段的风摩擦损耗,其中风摩擦损耗采用计算流体动力学(Computational fluid dynamics, CFD)法进行计算^[12],绕组铜耗为

$$P_{\text{Cu}}=m_1K_fI_{\text{rms}}^2R_c \quad (5)$$

式中: m_1 取电机相数或磁悬浮轴承极数; K_f 表示高频下的交流铜耗修正系数,常取 1.1; I_{rms} 为绕组电流的有效值; R_c 为绕组电阻。

系统各组件的交流铁芯损耗常采用 Bertotti 铁耗分离理论进行计算,表达式如下^[13]

$$P_{\text{Fe}}=(K_h f_x B_m^\alpha + K_c f_x^2 B_m^2 + K_e f_x^{1.5} B_m^{1.5})\rho_{\text{Fe}}V_x \quad (6)$$

式中: K_h 为磁滞损耗系数; K_c 为涡流损耗系数; K_e 为附加损耗系数; α 为斯坦梅茨系数; B_m 为磁密变化幅值; ρ_{Fe} 为铁芯材料的密度; V_x 表示铁芯体积; f_x 为铁芯磁场的交变频率。

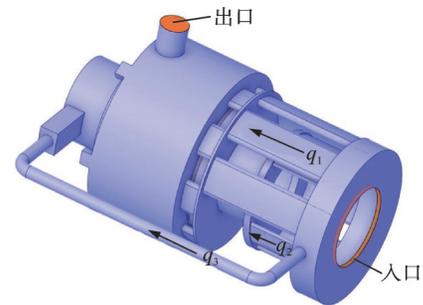
通过对系统进行损耗理论计算,可得到各组件的总损耗量,如表 2 所示。

表 2 系统损耗分布
Table 2 Loss distribution of the system kW

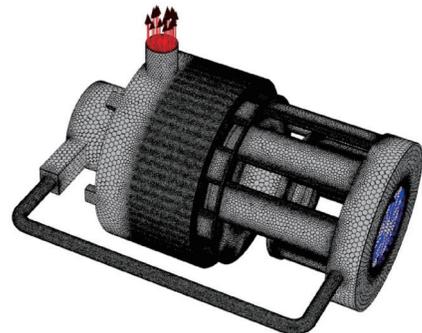
Q_{PMSM}	Q_{RMB1}	Q_{RMB2}	Q_{AMB}
3.65	0.48	0.26	0.62

2.2 物理模型

本文以一款额定功率为 150 kW、额定转速为 24 000 r/min 的自扇风冷式磁悬浮鼓风机为例,对系统内部的冷却流场进行分析,构建了如图 2(a)所示的流体求解域。为保证求解结果的收敛性和准确性,对物理模型采用 Poly 纯多面体网格划分,体网格最大逆正交质量因子低于 0.8,满足软件计算要求,划分结果如图 2(b)所示。



(a) Fluid solution region



(b) Meshing result

图 2 磁悬浮永磁电机冷却流体物理模型

Fig.2 Physical model of cooling fluid for maglev permanent magnet machine

2.3 求解条件

(1) 质量入口:由实际工况下的入口风量决定。

(2) 压力出口:标准大气压,设为 0 Pa。

(3) 转子表面转动边界条件:表面粗糙度为 0.8 μm ,转速设为实际工况下的电机转速,单位 r/min。

2.4 计算结果分析

图 3 展示了在额定工况下冷却空气静压在系统内的变化规律,可知入口静压约为 8.3 kPa。从图 3 可以看出,流线从入口侧分叉成 3 路,对应了前

述的 3 条风路,同时由于转子表面的高速转动,转子表面的流线呈现螺旋式分布。

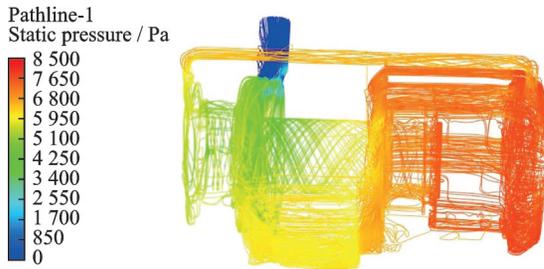


图3 静压-流线图

Fig.3 Static pressure-flow diagram

3 试验验证

3.1 试验条件及方法

为验证上述流场数值分析方法的准确性,对磁悬浮永磁电机冷却系统的流动特性参数进行测试,试验平台如图 4 所示,在入口位置插入皮托管,通过风压计测试入口静压;在出口位置安装风量计测试冷却风量。通过设定与样机一致的冷却风量边界条件,比较入口静压的计算与试验结果,以此验证流场仿真模型的准确性。

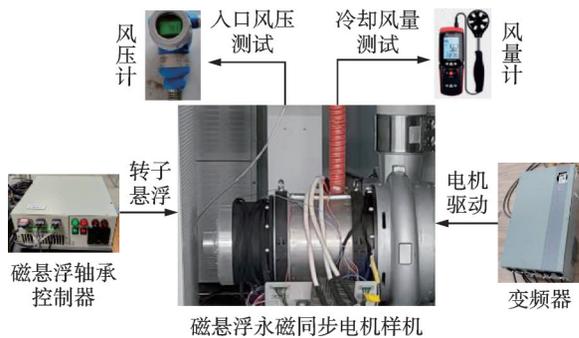


图4 磁悬浮永磁电机冷却参数测试平台

Fig.4 Maglev permanent magnet machine cooling parameter test platform

3.2 试验结果

图 5 给出了在不同转速下,仿真与试验得到的入口静压的数据对比结果,两者的相对误差不超过

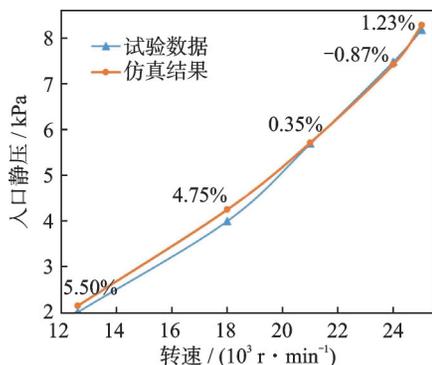


图5 入口静压试验与仿真结果对比

Fig.5 Comparison between test and simulation results of inlet static pressure

5.5%,主要误差来源为建模误差以及试验测试位置偏差,总体误差在可接受的范围内,验证了仿真模型对其冷却流场特性分析的准确性。

4 磁悬浮永磁电机风冷流道结构优化设计

基于上述的流场仿真分析模型,本文借助 Isight 优化设计软件,集成 Solidworks 和 Fluent 模块,分别进行参数化建模和流场参数计算,并构建不同软件间数据流的映射关系,以实现冷却风道结构参数优化设计,总体优化流程和思路如图 6 所示。

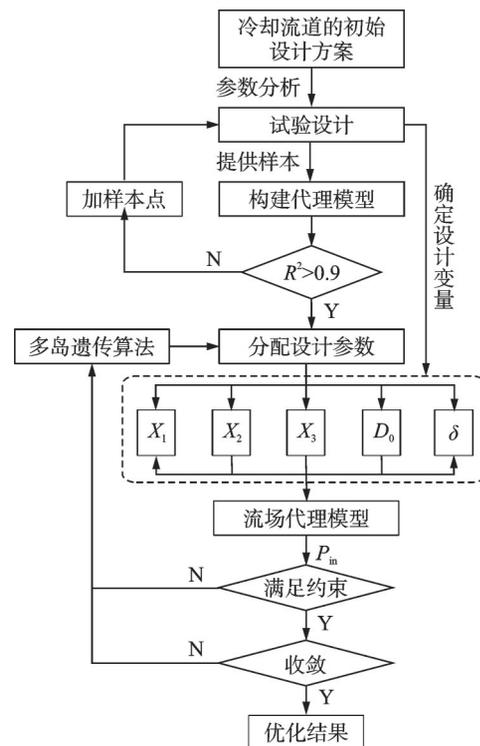


图6 风冷流道优化设计流程图

Fig.6 Flow chart of air-cooled flow path optimization design

本文首先通过试验对参数进行分析,并将试验设计中的样本点用于构建代理模型,最后基于代理模型进行结构参数优化设计。其中优化设计的数学描述如下。

设计变量

$$x = (X_1, X_2, X_3, D_0, \delta) \quad (7)$$

设计空间

$$\begin{cases} 6 \leq X_1 \leq 12 \\ 3 \leq X_2 \leq 8 \\ 20 \leq X_3 \leq 32 \\ 55 \leq D_0 \leq 70 \\ 1.5 \leq \delta \leq 4 \end{cases} \quad (8)$$

目标函数

$$\begin{cases} \min \{ P_{in} \} \\ \text{target} \{ q_1/q_a = 0.61 \} \\ \text{target} \{ q_2/q_a = 0.32 \} \end{cases} \quad (9)$$

约束条件

$$6 \text{ kPa} \leq P_{in} \leq 8 \text{ kPa} \quad (10)$$

式中: P_{in} 表示入口静压, 由于风扇的最高效率在最大风量的一半附近^[14], 系统额定工作点的入口静压应限制在 6~8 kPa; q_a 表示冷却总风量大小; q_1/q_a 和 q_2/q_a 分别表示主流道和内流道占总风量的比例。

4.1 试验设计与参数分析

在优化设计的过程中, 通过试验设计结果对设计变量进行灵敏度分析等, 不仅可以探明设计变量对目标函数的影响程度, 还能够为近似模型提供样本点并减小设计空间的维度^[15]。本文采用拉丁超立方方法对磁悬浮永磁电机系统的冷却流场进行试验设计, 结合后续构建代理模型精度校验, 最终选取样本点数为 63, 灵敏度分析结果如图 7 所示。从图 7(a) 可以看出, D_0 对 P_{in} 起主导负效应作用, 适当增大出口直径可有效降低入口静压, 减小系统风阻。

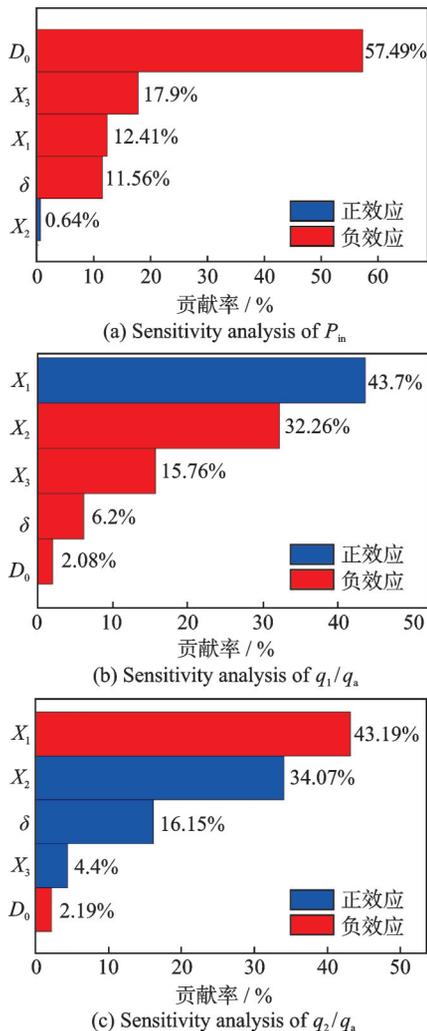


图 7 设计变量对目标函数的灵敏度分析

Fig.7 Sensitivity analysis of design variables to objective function

结合图 7(b, c) 的分析结果可知, 随管道直径大小 X_1 的增大, q_1 风量占比提高, 同时 q_2 占比减小, 而增大 X_2 则效果相反, 但由于 X_1 的贡献率更高, 变化幅度更为明显。两者在取值范围内对流量分配的影响如图 8 所示。

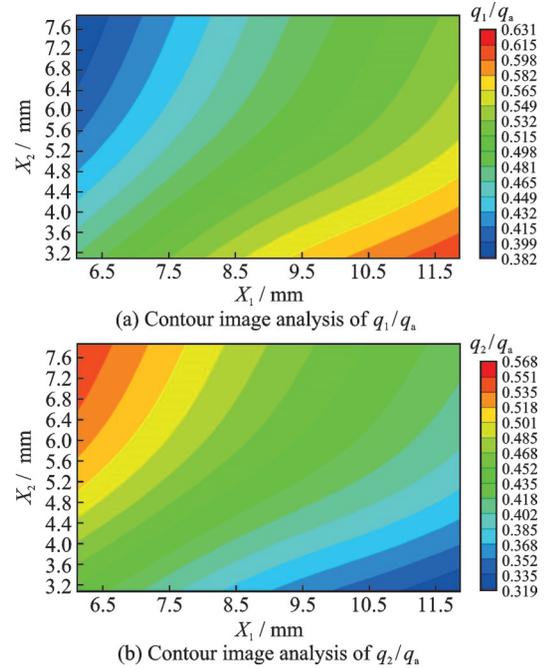


图 8 流场参数的等值线图分析结果

Fig.8 Analysis results of contour images of flow field parameters

4.2 构建近似模型

神经网络模型具有强非线性逼近能力、学习速度快且泛化能力强等优势, 广泛应用于人工智能、组合优化等领域。为节省优化设计的时间成本并避免重复调用有限元计算软件的繁琐流程, 本文采用径向基函数 (Radial basis functions, RBF) 神经网络算法建立流道结构参数对优化目标变量的近似模型。

所构建的近似模型需符合拟合精度检验的标准。本文通过新增 31 个误差分析样本点进行精度校核, 采用误差平方 R^2 大于 0.9 的检验标准对近似模型的可信度进行评价, 精度检验结果如图 9 所示, R^2 值均达到 0.98 以上, 可知该 RBF 近似模型具有较高的拟合精度, 可表征流场参数随设计变量的变化规律。

4.3 优化设计

基于前述构建的近似模型, 本文利用多岛遗传算法在设计空间内求得多目标优化的 Pareto 最优解, 如图 10 所示。图 10 中绿色点为最优解, 蓝色点为最优解集内的解, 红色表示不满足约束条件的解。

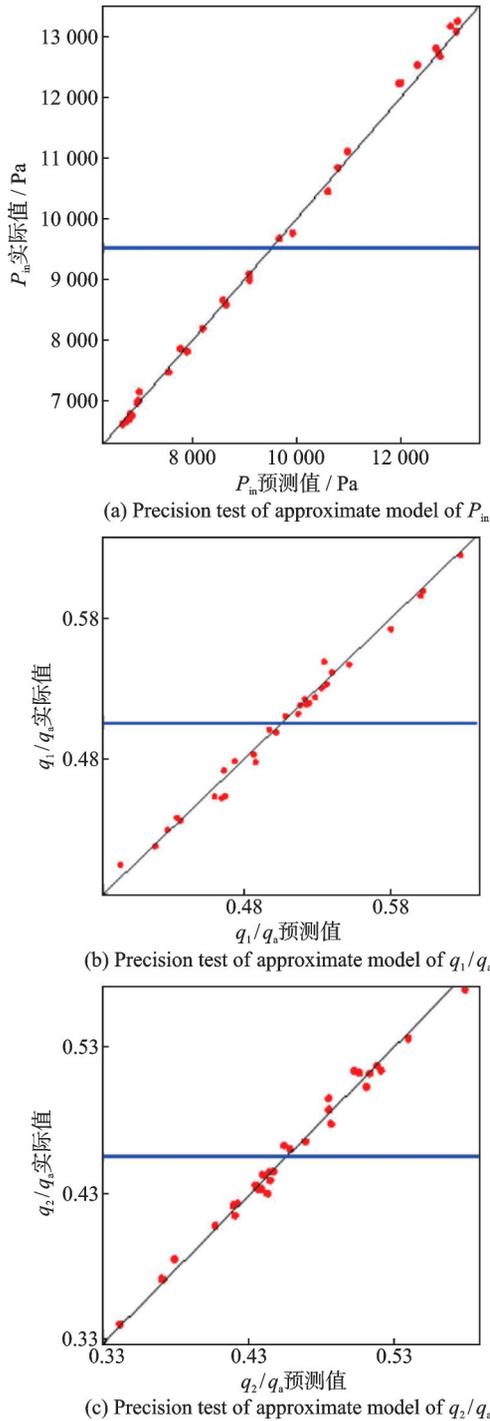


图9 流场参数近似模型拟合精度检验

Fig.9 Verification of fitting accuracy of the approximation model of flow field parameters

在整个优化分析过程中,总计优化迭代1 001次,其中满足约束条件的次数为906次,最优结果在第329次达到,总计算时长为15 s。表3对比了基于近似模型和基于有限元模型的优化设计耗时,可见基于近似模型的流道结构优化设计方法能够提升优化设计的效率,缩短设计研发周期。

优化前后的参数对比如表4所示,在设计空间内增大了对 P_{in} 影响最大的 D_0 ,并增大了 δ 、 X_1 、 X_2 ,同时减小了 X_3 。经过优化设计,风冷系统入口静压降低了25.2%;主管道风量 q_1 占比达到0.6,提升

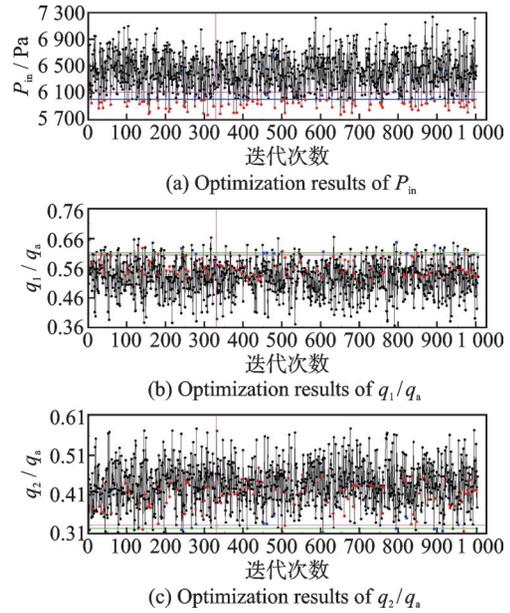


图10 流道结构参数优化收敛结果

Fig.10 Convergence results of optimization of flow path structure parameters

表3 不同优化方法的计算时长对比

Table 3 Comparison of calculation time of different optimization methods

优化方法	单个样本点的求解时长
近似模型法	0.015 s
有限元模型法	7.6 min

表4 优化前后参数对比

Table 4 Comparison of parameters before and after optimization

参数	优化前	优化后
D_0 /mm	60	65.4
δ /mm	2.0	3.5
X_1 /mm	7.5	9.2
X_2 /mm	4.0	7.1
X_3 /mm	26.0	23.8
P_{in} /Pa	8 301	6 207
q_1/q_a	0.49	0.6
q_2/q_a	0.45	0.33
q_3/q_a	0.06	0.07

了22.4%;内管道风量 q_2 占比达到0.33,降低了26.67%。并联风路的风量占比关系与设计目标基本一致,达到了设计要求。

5 结 论

(1) 基于Fluent软件建立了磁悬浮永磁电机风冷系统流场仿真模型,入口静压参数的仿真与试验数据的相对误差不超过5.5%,表明该模型能够有效预测系统内冷却空气的流动特性。

(2) 对系统冷却风道结构参数进行了试验设计,通过灵敏度和等值线图分析可知, D_0 对 P_{in} 起主

导负效应作用, X_1 和 X_2 对 q_1 和 q_2 的分配比例贡献度较高。

(3) 对磁悬浮永磁电机风冷流道进行优化设计, 优化后 P_m 降低了 25.2%, 且并联风路的冷却风量分配关系与理论设计目标基本一致; 该方法提高了优化设计效率, 为冷却风道的结构优化设计问题提供了一套高效且准确的借鉴方法。

参考文献:

- [1] REN X J, LE Y, HAN B C. System electromagnetic loss analysis and temperature field estimate of a magnetically suspended motor[J]. Progress in Electromagnetics Research M, 2017, 55: 51-61.
- [2] 刘斌, 余中军, 付佳. 径-轴向磁轴承冷却设计温度场分析[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(12): 4945-4955.
LIU Bin, YU Zhongjun, FU Jia. Cooling design and temperature field analysis of radial-axial magnetic bearings[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(12): 4945-4955.
- [3] HU X L, SHI G B, LAI Y F, et al. Temperature rise calculation of the high speed magnetic suspension motor based on bidirectional electromagnetic-thermal-fluid coupling analysis[J]. Machines, 2023, 11(3): 364-380.
- [4] DONG B T, WANG K, HAN B C, et al. Thermal analysis and experimental validation of a 30 kW 60 000 r/min high-speed permanent magnet motor with magnetic bearings[J]. IEEE Access, 2019, 7: 92184-92192.
- [5] 石嵩, 吕晓锋, 张贺. 直升机动力舱冷却系统冷却孔进气优化设计[J]. 南京航空航天大学学报, 2020, 52(2): 264-269.
SHI Song, LYU Xiaofeng, ZHANG He. Optimal design on aerodynamic performance of cooling hole intakes in engine bay cooling system of helicopter[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2020, 52(2): 264-269.
- [6] 李伟力, 杨雪峰, 顾德宝, 等. 多风路空冷汽轮发电机定子内流体流动与传热耦合计算与分析[J]. 电工技术学报, 2009, 24(12): 24-31.
LI Weili, YANG Xuefeng, GU Debao, et al. Calculation and analysis of fluid flow and heat transfer of air-cooled turbo-generator with multipath ventilation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(12): 24-31.
- [7] 丁树业, 郭保成, 孙兆琼. 永磁风力发电机通风结构优化及性能分析[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(9): 122-128.
DING Shuye, GUO Baocheng, SUN Zhaoqiong. Ventilation structure optimization and performance analyses of permanent magnet wind generators[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(9): 122-128.
- [8] DU G, XU W, ZHU J, et al. Power loss and thermal analysis for high-power high-speed permanent magnet machines[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 67(4): 2722-2733.
- [9] 韩邦成, 薛庆昊, 刘旭. 高速磁悬浮永磁电机多物理场分析及转子损耗优化[J]. 光学精密工程, 2017, 25(3): 680-688.
HAN Bangcheng, XUE Qinghao, LIU Xu. Multi-physics analysis and rotor loss optimization of high-speed magnetic suspension PM machine[J]. Optics and Precision Engineering, 2017, 25(3): 680-688.
- [10] GAO T Y, ZHOU J, ZHENG Y W, et al. Rotor loss optimization and comprehensive analysis of high-speed magnetic levitation turbine generator[J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2020, 63(1): 63-79.
- [11] 王福军. 计算流体力学分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
WANG Fujun. Computational fluid dynamics analysis: Principles and applications of CFD software[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004.
- [12] 邢军强, 王凤翔, 张殿海, 等. 高速永磁电机转子空气摩擦损耗研究[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(27): 14-19.
XING Junqiang, WANG Fengxiang, ZHANG Dianhai, et al. Research on rotor air friction loss of high-speed permanent magnet machines[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(27): 14-19.
- [13] HAN B C, LIU X, HUANG Z Y, et al. Loss calculation, thermal analysis, and measurement of magnetically suspended PM machine[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(6): 4514-4523.
- [14] 陈世坤. 电机设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.
CHEN Shikun. Motor design[M]. Beijing: China Machine Press, 2000.
- [15] 谢冰川, 张岳, 徐振耀, 等. 基于代理模型的电机多学科优化关键技术综述[J]. 电工技术学报, 2022, 37(20): 5117-5143.
XIE Bingchuan, ZHANG Yue, XU Zhenyao, et al. Review on multidisciplinary optimization key technology of electrical machine based on surrogate models[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(20): 5117-5143.