

某内潜水式永磁电机三维流场与温度场仿真分析与优化

邓 彬, 周杏军, 王长江, 李会兰
(中车株洲电机有限公司, 湖南 株洲 412001)

摘 要: 不同于常规自然散热或机壳水冷电机, 内潜水式电机直接采用水对电机内部进行冷却, 因此存在整机流固共轭传热的强耦合。为提高电机的可靠性与安全性, 流场与温度场耦合传热分析十分必要。针对某船用气隙水冷方式的内潜水式永磁电机, 基于计算流体力学(CFD)原理, 对该电机三维流场与温度场进行数值仿真分析与几何结构改进, 消除了电机内部流场出现的逆流现象, 提高了整机的散热效率, 优化了电机的流场与温升。所得结果对该型内潜水式电机的几何结构设计具有一定的参考意义。

关键词: 永磁电机; 气隙水冷; 数值模拟; 流场与温升优化

中图分类号: TM301.4 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2022)04-0060-06

doi: 10.12177/emca.2021.212

Simulation Analysis and Optimization of Three-Dimensional Flow and Temperature Fields of an Internal Submersible Permanent Magnet Motor

DENG Bin, ZHOU Xingjun, WANG Changjiang, LI Huilan
(CRRC Zhuzhou Electric Co., Ltd., Zhuzhou 412001, China)

Abstract: Different from conventional natural cooling or housing water cooling motor, water is directly used by the internal submersible motor to cool the inside of the motor, which leads to the strong coupling of fluid-solid conjugate heat transfer of the whole machine. In order to improve the reliability and safety of the motor, the coupled heat transfer analysis of flow and temperature fields is very necessary. For a marine air-gap water cooling internal submersible permanent magnet motor, based on the principle of computational fluid dynamics (CFD), the three-dimensional flow and temperature fields are numerically simulated and the geometric structure is improved, eliminating the countercurrent phenomenon of the internal flow field of the motor, improving the heat dissipation efficiency of the whole machine, and optimizing the flow field and temperature rise of the motor. The result has a certain reference significance for the geometric structure design of the internal submersible motor.

Key words: permanent magnet motor; air-gap water cooling; numerical simulation; optimization of flow field and temperature rise

0 引 言

随着电机向高效率、小型化发展, 电机的发热问题成为单机容量增长的主要障碍, 是电机设计需要解决的关键技术问题之一^[1]。永磁电机具有较高的功率密度, 且散热问题较为突出。电机内

温度过高会影响绝缘材料的寿命, 严重时还可能造成永磁体不可逆退磁, 直接关系着电机的使用寿命和运行可靠性, 因而电机的温升是电机性能考核的关键指标之一, 研究电机冷却方式和温升优化设计对电机的安全评估具有重要意义。

近年来, 针对不同冷却类型的电机流场与温

收稿日期: 2021-11-11; 收到修改稿日期: 2022-02-28

作者简介: 邓 彬(1995—), 男, 硕士, 研究方向为电机冷却设计。

升已有较多研究。周茜茜等^[2]对一种油冷电机进行淋油冷却方案设计并分析了电机温度分布规律。张维伟等^[3]数值模拟了电机外风路流场,研究了定子轴向通风孔对绕组温升的影响。陈丽香等^[4]基于某电动汽车用永磁电机,对螺旋与 Z 形水道结构下电机的流场与温度场进行了对比分析。不同于常规自然散热与机壳水冷电机,内潜水式电机直接采用水对电机内部进行冷却,因而温升问题没有封闭式电机显著,相关温升研究也较少。

本文的研究对象为某款船用内潜水式永磁电机,该电机是一种采用气隙水冷方式的新型电机,冷却水由轴承与转轴之间的间隙进入电机内部。由于热路法^[5]不能反映电机旋转自吸入的水量对电机散热的影响,且为了获得电机各部位精细的流场与温度场结果,本文采用 CFD 程序 Fluent 对该电机进行三维流场与温度场仿真计算,通过理论分析与几何结构改进,消除了电机内部流场出现的逆流现象,提高了整机的散热效率,优化了电机的流场与温升。

1 计算模型和方法

1.1 物理模型

某船用内潜水式永磁电机(以下简称“电机”)的安装示意图与设计方案图分别如图 1 和图 2 所示,在螺旋桨的推动下,水流过电机空心轴,其中一部分水会通过轴承间隙进入到电机内部,对电机内部进行冷却。空心轴螺旋桨推动的水流量为 200 L/min,该电机基本性能参数如表 1 所示,电机轴承的材质为某复合材料,其温度限制为 60 ℃。

表 1 电机基本参数

参数名称	参数值
电机额定功率/kW	140
定子槽数	216
电机极数	36
额定转速/(r·min ⁻¹)	300
空心轴水流量/(L·min ⁻¹)	200
冷却水入口温度/℃	45
轴承温度限值/℃	60

由于该电机几何结构具有周期对称性,为最

大化节约计算资源与缩短计算周期,本文取最小周期单元 1/36 模型进行仿真计算。仿真计算网格采用六面体结构化网格和非结构化四面体网格结合的方式对整体计算域进行划分,网格总数量为 11 264 193,网格最大的歪斜度约为 0.756,网格质量满足工程计算要求。

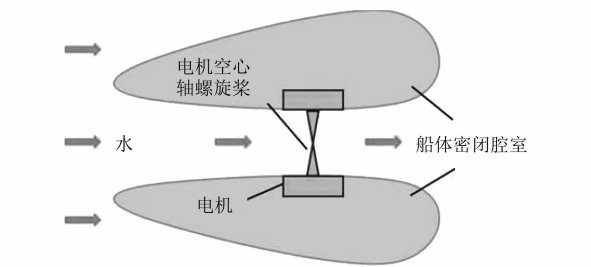


图 1 电机安装示意图

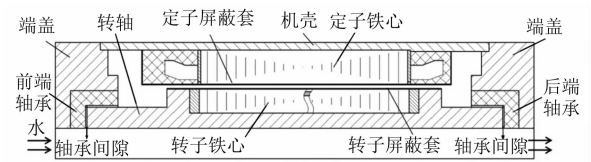


图 2 电机设计方案图

1.2 数学模型

Fluent 是基于有限体积法的 CFD 软件^[6],其基本原理是将描述流动与传热的一系列偏微分方程,通过离散方法变成有限个控制体积离散点上定义的代数方程问题,最后通过数值方法求解代数方程即可得到偏微分方程的近似解^[7]。本文研究对象是一个流固共轭传热问题,对于机壳、端盖等所有固体区域,Fluent 在求解时采用三维热传导模型进行求解,其能量方程为

$$\nabla \lambda_s \nabla T_s + Q_s - Q_h = 0 \tag{1}$$

式中: λ_s 、 T_s 和 Q_s 分别为固体材料的导热系数、温度和内热源。

对于机壳、端盖等非发热的固体,内热源 Q_s 的值为 0。 Q_h 为流体与固体壁面的换热量,用方程可表示为

$$Q_h = h(T_s - T_h) \tag{2}$$

式中: h 为流体与固体之间的对流换热系数。

本文计算模型的冷却水可认为是不可压缩流体,流动状态为湍流流动,因此本文采用三维不可压缩湍流模型进行求解。对于不可压缩流体,密度 ρ 认为是常数,则流体的连续方程、动量方程与

能量方程以及湍流动能 k 与耗散率 ε 的方程^[8]可表示为

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (3)$$

$$\nabla \cdot (\mathbf{u}\mathbf{u}) = -\nabla \cdot \left(p\mathbf{I} + \frac{2}{3}k\mathbf{I} \right) + \nabla \cdot \{ (\nu + \nu_t) [\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T] \} \quad (4)$$

$$\nabla \cdot (\mathbf{u}T_f) = \nabla \cdot \left[\left(\frac{\nu}{Pr} + \frac{\nu_t}{Pr_t} \right) \nabla T_f \right] + \frac{Q_h}{\rho C_p} \quad (5)$$

$$\mathbf{u} \cdot \nabla k = \nabla \cdot \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + G - \varepsilon \quad (6)$$

$$\mathbf{u} \cdot \nabla \varepsilon = \nabla \cdot \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \nabla \varepsilon \right] + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} G - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (7)$$

其中,

$$\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}, G = \frac{1}{2} \nu_t [\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T]^2,$$

$$C_\mu = 0.09, \sigma_k = 1.0, \sigma_\varepsilon = 1.3,$$

$$C_{\varepsilon 1} = 1.44, C_{\varepsilon 2} = 1.92。$$

式中: $\mathbf{u}$ 为流体速度矢量; p 为除以流体密度之后的压强; $\mathbf{I}$ 为单位矩阵; ν 为流体的运动学黏性系数; T_f 为流体温度; Pr 是流体的层流普朗特数; Pr_t 是流体的湍流普朗特数; C_p 为流体的比热。

1.3 损耗加载与边界条件

电机各部件材料的热物理属性如表 2 所示, 对于发热部件, 在计算时需要加载热源。温度场计算所加载的热源是基于电磁方案计算的损耗值结果, 表 3 给出了电机各发热部件所加载的损耗情况。

表 2 电机部件材料属性

部件	导热系数/ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	定压比热/ ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
轴承	0.25	1 500	1 160
机壳/端盖/转轴	30	460	7 650
定转子屏蔽套	20	520	4 500
永磁体	7.6	460	7 500
定转子铁心	径向/切向 30 切向 30 轴向 1.128	460	7 650
定子绕组	401	385	8 933
灌封胶	0.22	1 500	1 200
定子槽楔绝缘	0.14	1 450	1 500

本文仿真计算的边界条件设置如表 4 所示。

对于建立的 1/36 电机模型的周期面, 在 Fluent 程序中设置成周期边界条件。电机安装在船体的密闭腔室内, 散热条件很差, 本文在仿真计算时忽略机壳等外表面在船体密闭腔室内的自然散热, 认为电机的热量仅通过气隙水流带出, 因而设置电机外表面为绝热的边界条件。轴承间隙进出水量由程序自动计算, 因此本文在仿真时仅需给定空心轴入口的边界条件。

表 3 电机损耗加载方案

发热部件	损耗值	1/36 模型损耗值
定子绕组	3 094.50	85.958
定子铁心	2 352.75	65.354
转子铁心	373.75	10.382
定子屏蔽套	373.75	10.382

表 4 仿真计算边界条件

空心轴入口流量/($\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$)	入口水温/ $^{\circ}\text{C}$	电机外表面	周期面
200	45	绝热	周期边界

2 计算结果与分析

2.1 电机温度场结果分析

根据空心轴入口流量 200 L/min (对应 1/36 模型流量约为 5.56 L/min) 进行仿真计算, 所得 1/36 模型轴承间隙进水流率为 0.8 L/min (换算成整机为 28.8 L/min), 电机相关温度场云图结果如图 3 所示, 关键部件的温度结果统计如表 5 所示。其中, 图 3(c) 和图 3(d) 在后处理时采用镜像功能, 显示了定子铁心与绕组整周的温度分布。研究结果显示, 额定工况下, 电机内最高温度为 72.2 $^{\circ}\text{C}$, 轴承最高温度为 53.3 $^{\circ}\text{C}$, 温升均满足设计要求。但轴承最高温度与其温度限值 (60 $^{\circ}\text{C}$) 仅相差 6.7 K, 考虑到仿真的误差与特殊工况, 轴承安全裕度不够。

表 5 电机关键部件温度结果

部件名称	平均温度	最高温度
绕组	69.6	72.2
定子铁心	61.1	69.9
定子屏蔽套	52.1	62.0
转子屏蔽套	49.9	53.0
磁钢	49.1	51.4
前端轴承	50.4	53.3
后端轴承	47.8	51.4

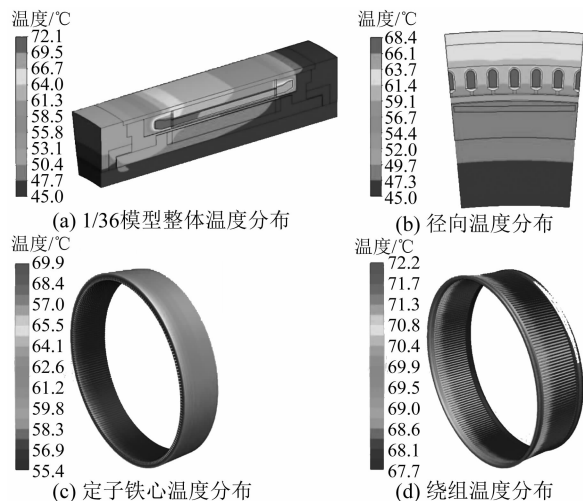


图3 电机温度场云图

结合图3和表5的结果可知,电机最高温度位置主要分布在定子绕组上面,电机靠近空心轴入口端(以下简称“前端”)的温度反而高于空心轴出口端(以下简称“后端”),究其原因,冷却水的速度矢量图显示水流整体趋势从后端轴承间隙进入,从前端轴承间隙流出,气隙内水的流动方向为由后端流向前端。冷却水流动过程中吸热升温,冷却能力下降,因而电机部件的后端温度较低,前端温度较高。

图4给出了仿真电机转速为0的整体温度场云图,可以看到,电机温度分布为前端温度较低,后端温度较高,说明冷却水在气隙水道内的流动方向为从前端流向后端。因而电机气隙水道内逆流现象与电机旋转有关,在下文中将对该现象做进一步分析。

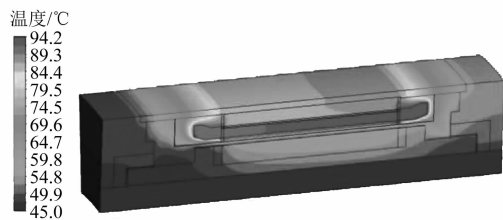


图4 电机不旋转时温度场云图

2.2 气隙水道逆流现象分析与优化

当电机旋转时,在旋转部件周向上存在一个线速度,驱动空心轴内的水经前后两端轴承间隙流入气隙水道,气隙水道呈现“吸水”现象。电机旋转时冷却水整体趋势从后端轴承间隙进入,从

前端轴承间隙流出,说明后端轴承间隙吸水能力强于前端。

为分析该现象,本文首先对可能影响计算结果的边界条件进行验证。修改仿真计算的相关边界条件(如将出口边界条件由 outflow 修改为压力出口、旋转方向由顺时针变为逆时针等),发现数值模拟结果仍然是电机前端温度高,后端温度低,气隙水道内水流趋势仍然是由后端流向前端,由此表明气隙水道回流现象与边界条件设置无关。

逐一排除了边界条件、计算网格等其他可能影响计算结果的因素,可以初步推断气隙水道回流现象是模型本身几何结构的原因所致。图5给出了气隙水道内压强分布云图,可以看出,气隙水道后端空腔内的压强大于前端。仔细观察计算的几何模型,可以发现,气隙水道前端空腔宽而长,后端空腔窄而短,前端空腔体积大于后端。在前后两端轴承间隙同时吸水的情况下,后端空腔体积较前端小,因而压强较前端大,最终导致冷却水由压强大的一侧(后端)流向压强小的一侧(前端),造成逆流现象。

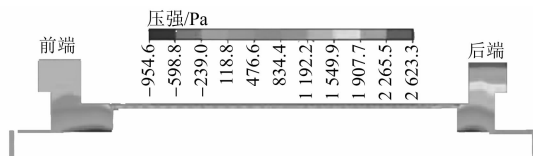


图5 气隙水道压强分布

为消除气隙水道内的逆流现象,本文对计算的几何模型进行如图6所示的优化。图6在原始的几何模型(图2)基础上对气隙水道前端空腔使用灌封胶进行填充,同时加长转轴前端长度来进一步减小气隙水道前端空腔的体积。

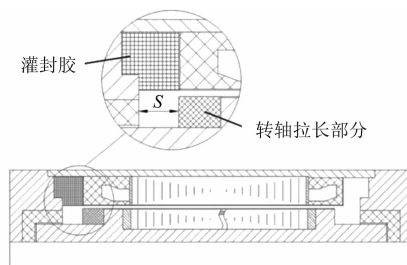


图6 电机几何结构优化示意图

图6中优化结构通过拉长转轴前端长度,前端空腔剩余轴向长度为 S 。为细致讨论前端空腔

变化对电机气隙水流与温升的影响,本文建立了5个不同的前端空腔轴向长度的流体区域计算模型,探讨了 S 分别为10、20、30、40、50 mm情况下的气隙水流情况。图7展示了不同 S 长度的气隙水道流率情况,气隙水流率随着前端空腔轴向长的增大显示出先增大后减小的结果。究其原因,在前端空腔很小时,增大轴向长 S ,前端空腔体积增大,便于气隙水流进入,但同时前端空腔压强也随之减小,因此当气隙水道前端空腔体积大到一定程度时,迫于后端空腔的更大压强,气隙水道流率出现不增反减的现象。从图7可以看出,当气隙前端空腔轴向长 S 取30 mm左右时,气隙水道内可以获得最大的流率。

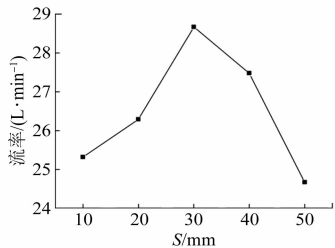


图7 不同 S 长度的气隙水道流率变化曲线

气隙水道流率越大,电机内被带出的热量也会越多。经过上文分析,本文最后优化后的几何模型取 $S=32$ mm(该值使转轴拉长的平面和绕组端部长对齐,便于划分结构化网格)。图8展示了电机几何模型优化后的温度场云图结果,从图8中可以看出,电机呈现前端温度低,后端温度高的结果。结合图9压强分布云图的结果来看,几何结构优化后,气隙水道前端空腔的总体平均压强大于后端,逆流现象被抑制,气隙水道内的冷却水将会形成由前端流向后端的趋势。上述结果表明,本文通过对气隙水道几何结构优化,减小了气隙水道前端的空腔体积,可以消除气隙水道冷却水逆流现象。

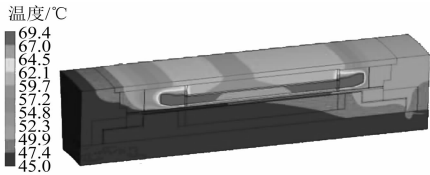


图8 电机几何结构优化示意图

电机几何结构优化后,气隙水道内整机冷却水的流率为36.7 L/min,比原始模型增加了

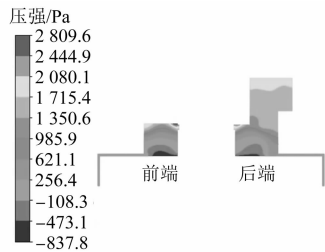


图9 优化后气隙水道前端与后端空腔压强分布

7.9 L/min,意味着电机内的热量能够更好地被气隙水道内的水流带走。表6给出了模型优化后电机关键部件温度结果统计,可以看到,与原始模型相比,电机整体温升有所降低,轴承温升安全裕度得到提高。由于模型优化后气隙水道的冷却水流动方向由从后向前变为从前向后,因而前端轴承温升降低最明显,最高温度可降低6.3 K。后端轴承平均温度虽然略有升高,但其最高温度仍有减小。上述结果表明,通过减小气隙通道内前端空腔体积可优化本文电机的温升情况。在电机几何结构设计时,应充分考虑气隙水道前后端的空腔结构,避免后端空腔内的压强大于前端而出现逆流现象。

表6 模型优化前后电机温度结果对比

部件名称	平均温度/℃	与原始模型对比/K	最高温度/℃	与原始模型对比/K
绕组	68.1	-1.5	69.6	-2.6
定子铁心	59.4	-1.7	67.1	-2.8
定子屏蔽套	50.8	-1.3	59.4	-2.6
转子屏蔽套	47.8	-2.1	50.6	-2.4
磁钢	47.3	-1.8	49.3	-2.1
前端轴承	45.9	-4.5	47.0	-6.3
后端轴承	50.0	2.2	50.6	-0.8

3 结 语

本文基于CFD软件Fluent对某内潜水式永磁电机进行了三维流场与温度场仿真分析,研究发现该电机气隙水道内出现逆流现象,导致电机前端温度高于后端。本文对该电机气隙水道逆流现象进行了系统深入的分析,发现逆流是由气隙水道后端空腔压强大于前端空腔所致。为消除逆流现象,本文对模型几何结构进行优化,提高了轴承温升安全裕度,电机温升得到进一步改善。研究表明,在电机几何结构设计时,应充分考虑气隙

水道前后端的空腔结构,避免出现逆流现象而导致系统散热效率降低。

【参考文献】

- [1] 曹飞,郑国丽,周黎明,等.三相异步风力发电机通风散热分析[J].电机与控制应用,2014,41(12): 39.
- [2] 周茜茜,黄勇.一种润滑油冷却永磁同步电机温度场研究[J].微特电机,2020,48(11): 5.
- [3] 张维伟,丰帆,郑国丽,等.定子轴向通风孔对永磁同步牵引电机绕组温升的影响[J].电机与控制应用,2020,47(11): 51.

- [4] 陈丽香,付佳玉,张超,等.电动汽车用永磁电机温升及冷却的研究[J].微电机,2020,53(6): 13.
- [5] DAVE S, DOUGLAS H, MIRCEA P. Motor-CAD software for thermal analysis of electrical motors-links to electromagnetic and drive simulation models[C]// CWIEME, 2010.
- [6] 郑力铭. ANSYS Fluent 15.0 流体计算从入门到精通[M].北京:电子工业出版社,2015.
- [7] 吴清松.计算热物理引论[M].合肥:中国科学技术大学出版社,2009.
- [8] 陈义良,朱旻明.物理流体力学[M].合肥:中国科学技术大学出版社,2008.

(上接第 38 页)

【参考文献】

- [1] 袁庆伟,赵荣祥.考虑死区的三相 PWM 逆变器共模电压抑制技术[J].浙江大学学报:工学版,2017,51(11): 2276.
- [2] 周娟,魏琛,杨宇,等.逆变器简化 PWM 算法及抑制共模电压策略[J].电工技术学报,2014,29(8): 158.
- [3] HAN D, MORRIS C T, SARLIOGLU B. Common-mode voltage cancellation in PWM motor drives with balanced inverter topology[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(4): 2683.
- [4] HOU C, SHIH C, CHENG P, et al. Common-mode voltage reduction pulsewidth modulation techniques for

three-phase grid connected converters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(4): 1971.

- [5] 郭磊磊,金楠,申永鹏.一种基于优化电压矢量选择的电压源逆变器模型预测共模电压抑制方法[J].电工技术学报,2018,33(6): 1347.
- [6] 郭磊磊,金楠,李琰琰,等.电压源逆变器虚拟矢量模型预测共模电压抑制方法[J].电工技术学报,2020,35(4): 839.
- [7] GUO L, JIN N, GAN C, et al. An improved model predictive control strategy to reduce common-mode voltage for two-level voltage source inverters considering dead-time effects[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(5): 3561.

(上接第 44 页)

- [5] TSAO P, SENESKY M, SANDERS S R. An integrated flywheel energy storage system with homopolar inductor motor/generator and high-frequency drive [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2003, 39(6): 1710.
- [6] 张娟.飞轮储能系统用感应子电机的研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2010.
- [7] 付兴贺.永磁-感应子式混合励磁发电机电磁场计算及运行特性分析[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2011.
- [8] YE C, YU K, XU W, et al. Optimal design and experimental research of a capacitor-charging pulsed alternator [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2015, 30(3): 948.
- [9] WANG Q, LIU C, ZOU J, et al. Numerical analysis and design optimization of a homopolar inductor machine used for flywheel energy storage [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2013, 41(5): 1290.

- [10] YANG J, YE C, LIANG X, et al. Investigation of a 2-D analytical model of the homopolar inductor alternator [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2018, 28(3): 5205205.
- [11] LOU Z, CHENG Y, HE Y, et al. Analytical calculation of synchronous reactances of homopolar inductor alternator [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2015, 43(5): 1462.
- [12] YANG J, YE C, HUANG S, et al. Analysis of the electromagnetic performance of homopolar inductor machine through nonlinear magnetic equivalent circuit and air-gap permeance function [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2019, 56(1): 267.
- [13] YANG J, YE C, LIU G, et al. Research on the no-load rotor eddy loss of a high-speed pulsed alternator [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2017, 45(7): 1213.