

doi:10.16576/j.ISSN.1007-4414.2024.01.049

电机损耗研究综述及展望*

李明辉¹,张涛¹,郑涛¹,霍俊阳¹,李国和¹,韩林²

(1.天津职业技术师范大学汽车模具智能制造技术国家地方联合工程实验室,天津 300222;

2.天津职业技术师范大学机械工程学院,天津 300222)

摘要:电机在运行过程中产生大量的热量会导致电机温升过高,从而影响电机正常运行。导致温升的重要原因是来自于电机内部的损耗问题,电机中的损耗主要包括铜损、铁损、机械损耗和杂散损耗四种类型。首先,根据四种损耗类型,从损耗产生原因、损耗计算、损耗影响、降耗方法等方面进行分析,并对四种损耗的计算方法进行研究,其中重点介绍电机铁耗计算分析方法。其次,基于损耗影响因素对电机结构进行优化设计,以通过实例验证降耗方法的可行性。对电机损耗的准确分析,有利于分析电机温升问题,这对设计低损耗、高效率电机有着重要的意义。

关键词:电机;铜耗;铁耗;机械损耗;杂散损耗;损耗分析

中图分类号:TM301

文献标识码:A

文章编号:1007-4414(2024)01-0182-05

Review and Prospect of Motor Loss Research

LI Ming-hui¹, ZHANG Tao¹, ZHENG Tao¹, HUO Jun-yang¹, LI Guo-he¹, HAN Lin²

(1. National-Local Joint Engineering Laboratory of Intelligent Manufacturing Oriented Automobile Die and Mould,

Tianjin University of Technology and Education, Tianjin 300222, China; 2. School of Mechanical Engineering,

Tianjin University of Technology and Education, Tianjin 300222, China)

Abstract: During the operation process of the motor, a large amount of heat is generated, leading to excessive temperature rise. The internal loss problem is an important factor affecting the temperature rise of the motor. The losses in the motor mainly include four types: copper loss, iron loss, mechanical loss, and stray loss. Firstly, based on the four types of losses, analysis is conducted from the aspects of loss causes, loss calculation, loss impact, and consumption reduction methods. The calculation methods for the four types of losses are studied, with focus on introducing the calculation and analysis methods for motor iron loss. Secondly, based on the factors affecting losses, the feasibility of the consumption reduction method is determined by optimizing design of the motor structure. The accurate analysis of motor losses is of great significance for analyzing motor temperature rise issues and designing low loss and high-efficiency motors.

Key words: motor; copper loss; iron loss; mechanical loss; stray loss; loss analysis

0 引言

电机广泛应用于机械制造、冶金、电力、石化等领域,具有体积小、功率密度大、可直接驱动、传动效率高等优点。引起电机发热的主要影响因素为电机的铜耗、铁耗、机械损耗、杂散损耗^[1]。电机损耗过高可能导致电机绕组温度过高,造成绝缘材料受到影响,从而影响电机性能。笔者对国内外有关电机损耗的研究内容进行分析讨论,并对其研究方法进行了归纳总结,分析了电机损耗的影响因素、降耗措施,对电机损耗的计算方法进行了综述,重点对电机铁耗计算方法进行了分析研究。电机损耗研究是电机领域的一个重要研究方向,深入探索电机损耗机理,对提升电机的性能至关重要。

1 电机铜耗分析

电机铜耗是指电流通过电机绕组时,在导线电阻

上产生的损耗。根据欧姆定律,绕组铜损表达式为:

$$P_{Cu} = qI_{rms}^2 R \quad (1)$$

式中: q 为相数; I_{rms} 为相绕组电流的有效值; R 为绕组电阻。

传统的铜耗计算方法没有考虑绕组分布及饱和等因素导致的谐波电流产生的损耗,因此对基本铜耗的计算分析比较适用。但是对于高速感应电机而言,在电机进行 PWM 调速时,由于定子绕组中的高次谐波电影响,电枢电流值与母线电流会存在差异,仅根据欧姆定律计算得到的铜耗值与实际值会存在偏差。随着计算机的发展,人们发现采用有限元分析模型可以使铜耗计算更加准确。Du 等^[2]全面分析了高速永磁电机的铜耗,并基于高速永磁电机的结构参数建立了二维有限元模型,分析了不同频率下定子绕组的电流密度和交流铜耗的变化趋势,结果表明,随

* 收稿日期:2023-05-21

基金项目:天津市人社局“项目+团队”培养专项项目:高效高精加工机理及工艺创新团队(编号:XC202051)。

作者简介:李明辉(1997-),男,河南商丘人,硕士研究生,研究方向:高速电主轴技术。

着频率的增加交流损耗增加显著。Gonzalez等^[3]研究了高速永磁电机的铜耗分布,将电机测试的数据与有限元模拟结合,计算出了铜损耗的分量,其研究结果也表明,转子中也存在转子铜耗。赵海森等^[4]利用场-路耦合时步有限元法分析了感应电机在谐波电流影响下的定转子铜耗,并得出相应的计算方法。

定子铜耗计算公式为:

$$P_{\text{scu}} = \frac{1}{T} \sum_v \int_0^T R_s (i_{vA}^2 + i_{vB}^2 + i_{vC}^2) dt \quad (2)$$

式中: P_{scu} 为定子总损耗; R_s 为定子相电阻; i_{vA} 、 i_{vB} 、 i_{vC} 分别为定子每相绕组中包括基波和各高频次电流,其中: $v=2k+1(k=0,1,2,3,\dots)$ 。

转子铜耗计算公式为:

$$P_{\text{rcu}} = \sum_{\Delta} \sum_v \frac{1}{\sigma} L_{\text{ef}} S_{\Delta} J_{\Delta v}^2 \quad (3)$$

式中: P_{rcu} 为转子总铜耗; S_{Δ} 转子导条单元面积; $J_{\Delta v}$ 转子导条单元内各次谐波电流密度有效值; σ 导条电导率; v 与定子铜耗中的谐波次数含义相同,但是转子基波频率为 sf_1 (s 为转差率, f_1 为基波频率)。

上述方法计算铜耗时,需要考虑到各次谐波电流影响,计算比较繁琐,所以简化电机定转子铜耗计算过程对定转子铜耗计算分析具有重要意义。胡笕等^[5]利用有限元方法研究电机铜耗时,提出了分区域循环引用最优离散点方法,该方法可实现不同离散密度下的误差计算预测,并在相同计算精度下能够得出最优离散方案,使得计算量大幅减小。

电机的铜耗是由导体中的电流以及导体的电阻共同决定的。为了降低电机铜耗,赵海森^[6-7]利用有限元方法分析了不同定子槽形对电机铜耗的影响,结果表明:当定子槽口宽度和槽半径在较小范围(0.1~0.2 mm)内变化时,随着槽口宽度和槽半径增大,损耗也会增加。因此,可通过选择合适的槽口宽度和半径来降低损耗。

2 电机铁耗分析

2.1 传统铁耗计算方法

电机铁耗是指电机铁心中由于交变磁场引起的损耗。目前大多数研究采用的是 Bertotti 于 1988 年提出的常系数三项式铁耗计算模型,即:

$$P_{\text{Fe}} = P_h + P_c + P_e = k_h f B_p^x + k_c f^2 B_p^2 + k_e f^{1.5} B_p^{1.5} \quad (4)$$

式中: P_{Fe} 、 P_h 、 P_c 、 P_e 分别为铁耗、磁滞损耗、涡流损耗、异常损耗; B_p 为磁通密度幅值; f 为交变磁场频率; k_c 为经典涡流损耗系数; k_e 为异常损耗系数, k_h 、 x 均为磁滞损耗系数,这些系数可通过硅钢片制造商提供的铁耗曲线进行曲线拟合得到^[8]。李丹丹等^[9]提出了一种改进的 Bertotti 损耗分离模型,通过对硅钢

片的损耗计算发现,改进的 Bertotti 损耗模型提高了铁心损耗的计算精度。然而传统的计算模型只适合于正弦交变磁场,电机在运行过程中为非正弦波形。张冬冬等^[10]提出一种分段变系数铁耗模型,该模型能够很好地反映非线性因素及谐波磁场对铁耗的影响,但忽略了旋转磁场的影响。戈宝军等^[11]在分析电机铁耗时,考虑了旋转磁场和谐波分量对电机铁耗的影响,定子铁心损耗的大小明显高于仅考虑交变磁场影响时的损耗,且计算结果更接近有限元结果。Xue等^[12]研究了不同温度对无取向硅钢片铁耗的影响,提出了一种可以考虑温度影响的铁耗模型,并通过电机实验验证了模型的准确性。

随着不断改进铁心损耗的分离模型,变系数铁耗模型成为重点关注对象。此类模型能够根据电机实际运行状态来分析铁心损耗,并考虑到损耗参数随磁密和磁场频率变化的情况。除此之外,该模型还考虑到了高次谐波和旋转磁场等因素对电机损耗的影响。变系数铁耗模型在工程实践中能够更准确地分析铁心损耗,提高计算精度,这是未来铁耗分析和计算的重要发展方向。

2.2 有限元法

在电机铁损分析中,有限元法能够处理电机内部复杂的磁场分布。精确的磁场和磁密度的分布可将复杂的研究对象分离成有限个单元,通过对个体单元的假设求解,最后整合成为对真实物理系统的仿真模拟。在有限元分析中,首先将电机的铁芯几何结构离散化为许多小的有限元单元。然后,在每个有限元单元内,通过求解麦克斯韦方程组来计算磁场分布。这样可以得到每个有限元单元内的磁通密度分布。然后结合损耗分离模型即可分析出电机内部铁耗。

龚宇等^[13]基于有限元的方法,通过用于机械应力应变迟滞计算的雨点计数法详细计算了电机样机对应的局部磁滞损耗,该方法具有高效快捷的特点。朱龙飞等^[14]针对有限元计算永磁电机永磁体涡流损耗耗时的问题,提出了一种气隙磁导谐波引起的永磁体涡流损耗的简化解析计算模型,该模型计算误差约 7.3%,极大缩短了计算时间。胡笕等^[15]利用时步有限元的方法分析了不同电压及负载条件下的铁耗。通过对电机的建模及各部分损耗密度的计算,并运用麦克斯韦方程组得到电磁场求解区域(图1)的基本方程,即:

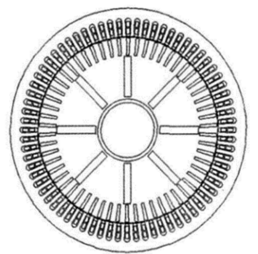


图1 电机求解区域界面图

$$\begin{cases} \Omega: \frac{\partial \left(\nu \frac{\partial A}{\partial x} \right)}{\partial x} + \frac{\partial \left(\nu \frac{\partial A}{\partial y} \right)}{\partial y} = -J \\ \Gamma_1: A = 0 \\ \Gamma_2: \nu_1 \frac{\partial A}{\partial n} + \nu_2 \frac{\partial A}{\partial n} = J_m \end{cases} \quad (5)$$

式中: Ω 为求解区域; Γ_1 为电机定子外圆边界; Γ_2 为永磁体边界; A 为矢量磁位轴向分量; J 为总电流密度; J_m 为永磁体边界等效面电流密度。

通过求解麦克斯韦方程组来计算磁场分布后,结合每个有限元单元内的磁通密度分布及损耗分离模型即可分析出电机内部铁耗。

利用有限元方法分析电机内部铁耗也是工程中常使用的一种方法,但是有限元分析依赖于所建立的几何模型和材料参数的准确性。如果模型的几何参数或材料参数存在误差或不精确,将会导致分析结果产生一定的误差。因此,需要经过仔细的建模和材料参数估计才能获得准确的结果。

2.3 谐波分析法

电机内部电磁场求解复杂,因此可将磁通密度和电压联系起来进行分析以降低计算的复杂性。谐波分析法是将非正弦激励时的求解转化为不同频率的正弦信号激励求解问题,再结合任意频率下硅钢片材料特性的预测模型进行分析计算。感应电机 T 型等效电路如图 2、3 所示。

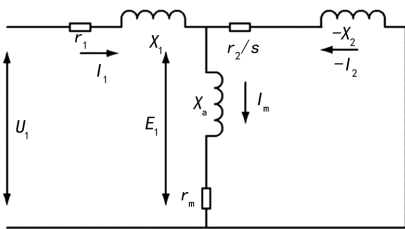


图 2 基波等效电路

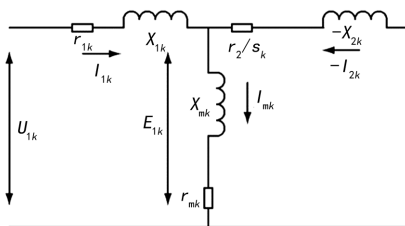


图 3 谐波等效电路

图中, $r_1、r_{1k}$ 为定子侧基波和 k 次谐波等效电阻; $x_1、x_{1k}$ 为定子侧基波和 k 次谐波漏抗; $r_2、r_{2k}$ 为转子侧基波和 k 次谐波等效电阻(已归算到定子侧); $x_2、x_{2k}$ 为转子侧基波和 k 次谐波等效漏抗(已归算到定子侧); $r_m、r_{mk}$ 为基波和 k 次谐波激磁等效电阻; $x_m、x_{mk}$

为基波和 k 次谐波激磁等效电抗; $s_1、s_k$ 为基波转差率和 k 次谐波转差率; u_1 和 u_{1k} 为基波和 k 次谐波输入电压。通过求取各次谐波分别作用时电机的电流大小、损耗等性能,进行叠加后可得出电机的铁耗,采用谐波分析法电机铁损可表示为:

$$P_{Fe} = \sum_{k=1}^{\infty} P_{Fek}(f_k, B_{mk}) \quad (6)$$

忽略绕组本身的损耗,加在线圈上的电压近似等于感应电势,即:

$$u(t) = NS \frac{dB(t)}{d(t)} \quad (7)$$

式中: N 为线圈匝数; S 为定子铁心截面积。将电压进行 Fuire 变换得到:

$$u(t) = \sum_1^{\infty} U_k \sin(k\omega t + \varphi_k) \quad (8)$$

式中: ω 为基波角频率; U_k 为 k 次谐波电压; φ_k 为相角。通过对电机内磁密进行 Fuire 分解得到:

$$B(t) = - \sum_1^{\infty} B_k \cos(k\omega t + \varphi_k) \quad (9)$$

$$B_k = \frac{U_k}{NSk\omega}$$

式中: B_k 为 k 次谐波磁密幅值。

电机总铁耗 P_{Fe} 为:

$$P_{Fe} = \sum_{k=1}^{\infty} P_{Fek}(f_k, B_{pk}) = \sum_{k=1}^{\infty} \left[k_h \left(\frac{k\omega}{2\pi} \right) \left(\frac{U_k}{NSk\omega} \right)^x + k_e \left(\frac{k\omega}{2\pi} \right)^2 \left(\frac{U_k}{NSk\omega} \right)^2 + k_c \left(\frac{k\omega}{2\pi} \right)^{1.5} \left(\frac{U_k}{NSk\omega} \right)^{1.5} \right] \quad (10)$$

从上式可知电机的谐波电压对电机铁耗影响很大。当已知各次谐波大小便可以计算电机中的铁耗。但是经验系数的引入以及谐波分析法只分析对电机铁耗影响较大的谐波分量,忽略了其它高次谐波分量的影响,因此,此方法的计算准确性不能够确定。

影响铁耗的因素繁多,定子转子结构、转子套筒材料、开槽方向、定转子气隙偏心以及供电方式等都会影响到电机铁耗^[16-20]。Plotnikov^[21]推导了电机铁耗中的磁滞分量和涡流分量的计算公式,该公式中包含了两种不同磁化反转频率、在开路试验测试的总铁耗水平以及这两种频率的比值,结果表明,磁化反转频率的最佳比值为 1.2,总铁耗最低。由于电机磁路的复杂性,电机受变频器供电产生的空间谐波的影响,电机铁耗中的涡流损耗在高速电机中的影响尤为突出。Shen 等^[22]通过有限元软件分析电机中磁铁电阻率的大小、磁体分段方式、转子套筒开槽方式对电

机涡流损耗的影响得出,适当降低磁铁电阻率、将磁铁进行轴向分割、转子套筒环向开槽可降低电机铁耗中的涡流损耗。

3 电机机械损耗分析

电机机械损耗包括风转子与空气产生的摩擦损耗以及转子与轴承之间的摩擦损耗。机械损耗中的通风损耗和轴承摩擦损耗计算如下。

(1) 通风损耗

$$P_{fw} = k_{rc} C_f \pi \rho_{air} \omega^3 r^4 l_{ef} \quad (11)$$

式中: k_{rc} 转子表面粗糙度系数,转子表面光滑为1; ρ_{air} 为空气密度; r 为转子半径; C_f 为空气摩擦系数

(2) 轴承摩擦损耗

$$P_f = 0.15 \frac{F}{d} v \times 10^{-5} \quad (12)$$

式中: F 为轴承载荷; d 滚轴中心直径; v 滚轴中心角速度。

邢军强等^[23]基于3D流体场模型,对高速永磁电机空气摩擦损耗与电机转子转速、表面粗糙度及轴向风速关系进行了分析,并且通过电机空载实验将空气摩擦损耗从总损耗中分离出来,所得实验值与计算值相吻合。Guo等^[24]验证了在电机工作时,由于转子和润滑油的关系,定转子之间形成一个边界层,且边界层越厚摩擦越大,机械损耗就越大。

综上所述,电机的机械损耗与电机转速、转子表面的粗糙度以及半径等有关。可通过减小转子和轴承之间的摩擦,比如提高其之间的润滑等措施来改善电机的机械损耗。

4 电机杂散损耗分析

杂散损耗是电机绕组中大量谐波分量产生谐波漏磁磁场而引起的损耗。其主要包括转子笼的谐波损耗和定、转子中的谐波损耗^[25]。电机杂散损耗的计算比较复杂,目前还没有特定的计算公式,电机杂散损耗是电机所有损耗中除去其它损耗剩下的一部分损耗。国际 IEC 60034-2-1 标准给出了电机杂散损耗的推荐值,即:

$$\begin{aligned} P_s &= 0.025 \times P_1 (P_2 \leq 1 \text{ kW}) \\ P_s &= P_1 \times (0.025 - 0.005 \times \log P_2) \\ 1 \text{ kW} &\leq P_2 \leq 1 \text{ 000 kW} \end{aligned} \quad (13)$$

式中: P_s 为杂散损耗; P_1 输入功率; P_2 为输出功率。

Pillay等^[26]为中小型感应电机(输出功率小于1kW)提出了一种新的杂散负载损耗公式,即:

$$P_s = 0.011 P_1 \quad (14)$$

经过电机测试可知,所提出来的公式的精度比 IEC 60034-2-1 所给的标准更高。Kumar等^[27]提出了利用等效电路参数估算感应电机杂散负载损耗的新模型,并且通过实验验证了所提出模型的有效性和

准确性。

宁榕等^[28]研究了正弦绕组、槽配合、气隙长度、铸铝工艺的设计参数选择对电机杂散损耗的影响并分析了降低杂散损耗的措施。Hiramatsu等^[29]提出了一种新的绕组方法“新型穿插绕组”和“扩展组绕组”,以减少分数和偶数阶磁通谐波对杂散损耗的影响。

5 结 论

电机损耗界定了电机温升和效率,电机温升过高会给电机带来不可逆的损害。文中分析了影响电机温升的损耗问题,并对电机损耗的计算方法和影响因素和降耗方法进行梳理和总结,介绍了电机损耗的计算分析方法,通过准确计算不同损耗的大小,可以找到降低损耗和提高效率的方法,从而设计出更高效、更可靠的电机,其中重点分析了电机铁耗的计算方法。

(1) 在损耗计算方面:传统解析法对电机内部电磁场的求解分析比较麻烦;有限元法计算时间长并且依赖于建立几何模型和材料参数的准确性;谐波分析法由于磁滞和涡流损耗经验系数的引入,也可能导致计算的准确性不能够确定。因此,预测准确性需要进一步提高,以准确分析电机铁耗系数,提高铁耗计算精度。

(2) 在损耗影响方面:铜耗主要受通电流大小和铸转子里的材料影响;铁耗主要受磁场频率、定转子、套筒结构和材料影响;机械损耗主要受转速、负载、转子表面粗糙度、定转子结合处润滑程度的影响;杂散损耗则主要受电机谐波磁场影响。

(3) 降耗方法方面:可根据损耗影响因素对电机定转子材料、结构以及套筒结构进行优化,以降低损耗。但是,影响电机损耗的因素繁多,并且这些因素之间还可能相互影响,在研究电机降耗措施并进行电机结构优化时,需要综合考虑各个因素之间对电机性能的影响。

参考文献:

- [1] 杜国华,房建成,刘西全,等.高速永磁无刷直流电机的热分析[J].北京航空航天大学学报,2012,38(8):1101-1105.
- [2] Du G H, Ye W L, Zhang Y F. Comprehensive Analysis of Influencing Factors of AC Copper Loss for High-Speed Permanent Magnet Machine with Round Copper Wire Windings[J].Machines,2022,10(9):731.
- [3] GONZALE D A, SABAND M. Study of the copper losses in a high-speed permanent-magnet machine with form-wound windings[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 61(6):3038-3045.
- [4] 赵海森,刘晓芳,罗应立,等.电压偏差条件下笼型感应电机的损耗特性[J].电机与控制学报,2010,14(5):13-19.

- [5] 胡 筋,谷 君,奚林根,等.自启动永磁同步电机转子铜耗分析的时步有限元优化离散策略[J].电机与控制学报,2017,21(5):81-88.
- [6] 赵海森,罗应立,刘晓芳.中小型电机定子侧结构件对损耗影响的时步有限元分析及降耗措施[J].中国电机工程学报,2011,31(36):116-123.
- [7] 赵海森,顾德军.采用铸铝转子和铸铜转子时鼠笼式异步电机的损耗特性对比[J].陕西电力,2011,39(2):5-8.
- [8] 莫会成,闵 琳,于志刚,等.电机用硅钢片铁耗研究[J].微电机,2008,41(11):5-7.
- [9] 李丹丹,朱聪聪,乔振阳,等.基于改进的 Bertotti 损耗分离模型的铁心损耗计算[J].实验室研究与探索,2021,40(4):19-23.
- [10] 张冬冬,赵海森,王义龙,等.用于电机损耗精细化分析的分段变系数铁耗计算模型[J].电工技术学报,2016,31(15):16-24.
- [11] 戈宝军,罗前通,王立坤,等.高速永磁同步电动机铁耗分析[J].电机与控制学报,2020,24(4):32-39.
- [12] XUE S, FENG J, GUO S, et al. A New Iron Loss Model for Temperature Dependencies of Hysteresis and Eddy Current Losses in Electrical Machines [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2017, 54(1):1-10.
- [13] 龚 宇,崔 巍,章跃进.考虑局部磁滞损耗的复合电机铁耗计算[J].中国电机工程学报,2014,34(30):5395-5400.
- [14] 朱龙飞,祝天利,于慎波,等.一种气隙磁导谐波引起的永磁体涡流损耗的解析计算方法[J].电机与控制学报,2020,24(5):10-16.
- [15] 胡 筋,罗应立,李志强,等.永磁电动机不同运行条件下的损耗研究[J].电机与控制学报,2009,13(1):11-16.
- [16] 佟文明,朱晓锋,朱龙飞,等.不同供电方式对非晶合金永磁同步电机铁耗的影响[J].电工技术学报,2015,30(10):115-122.
- [17] Zhao N, Zhu Z Q, Liu W. Rotor eddy current loss calculation and thermal analysis of permanent magnet motor and generator [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2011, 47(10):4199-4202.
- [18] Chen Y, Zhu Z Q, HOWE D, et al. Rotor eddy current loss in single-phase permanent magnet brushless DC motor [C]. 2007 IEEE Industry Applications Annual Meeting. New Orleans, LA, USA, 2007.
- [19] 赵海森,罗应立,刘晓芳.中小型电机定子侧结构件对损耗影响的时步有限元分析及降耗措施[J].中国电机工程学报,2011,31(36):116-123.
- [20] JEONG S I. Practical calculation of iron loss for cylindrical linear machine [J]. Journal of Electrical Engineering and Technology, 2018, 13(5):1901-1907.
- [21] PLOTNIKOV S M. Determination of Eddy-Current and Hysteresis Losses in the Magnetic Circuits of Electrical Machines [J]. Measurement Techniques, 2021, 63(11):904-909.
- [22] Shen J X, Han T, Yao L, et al. Is higher resistivity of magnet beneficial to reduce rotor eddy current loss in high-speed permanent magnets AC machines [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(9):2074-2078.
- [23] 邢军强,王凤翔,张殿海.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.
- [24] GUO Y G, ZHU J G, WU W. Thermal analysis of soft magnetic composite motors using a hybrid model with distributed heat sources [J]. IEEE transactions on Magnetics, 2005, 41(6):2124-2128.
- [25] YAMAZAKI K, HARUISHI Y. Stray load loss analysis of induction motor-comparison of measurement due to IEEE standard 112 and direct calculation by finite-element method [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2004, 40(2):543-549.
- [26] PILLAY P, Al BADRI M, ANGERS P, et al. A new stray-load loss formula for small and medium-sized induction motors [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2016, 31(3):1221-1227.
- [27] KUMAR R, KUMAR P, KANEKAWA T, et al. Stray loss model for induction motors with using equivalent circuit parameters [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2020, 35(2):1036-1045.
- [28] 宁 榕,李巧莲,黄 坚.三相异步电动机的杂散损耗研究[J].电机与控制应用,2014,41(5):14-18.
- [29] HIRAMATSU D, SUTRISNAK F, ISHIZUKA H, et al. Study of winding method to reduce stray loss and stator core vibration of synchronous machine [C]. 2013 International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS). Busan, Korea (South), 2013.