

永磁电机定子过盈量的优化设计研究

李国洪¹, 郝满满^{1*}, 王 乾²

(1. 天津理工大学 天津市复杂系统控制理论及应用重点实验室, 天津 300384;

2. 卧龙电气南阳防爆集团股份有限公司, 河南 南阳 473008)

Research on Optimal Control Design of Stator Interference of Permanent Magnet Motor

LI Guohong¹, HAO Manman^{1*}, WANG Qian²

(1. Tianjin Key Laboratory of Complex Systems Control Theory and Application,

Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China;

2. Wolong Electric Nanyang Explosion Protection Group Co., Ltd., Nanyang 473008, China)

Abstract: The change of the main magnetic field caused by the interference of the permanent magnet motor stator will cause the performance of the actual motor to deviate from the design value. The influence of interference on the stress and strain of stator core is studied according to the ferromagnetism theory and magnetic circuit law to optimize the design. The solution model is established and the simulation calculation and experiment are carried out based on a 560 kW motor. The analysis results in this paper can be used for reference in the optimization design of permanent magnet motor.

Key words: permanent magnet motor; optimization design; interference; magnetic circuit

摘 要: 永磁电机定子装压过盈量会造成电机主磁场变化,使实际电机的性能偏离设计值。为了优化设计,依据铁磁学理论和磁路定律,研究过盈量对定子铁心产生应力、应变的影响,提出定子磁压降与过盈量的解析方程。以一台 560 kW 电机为研究对象,建立求解模型并进行仿真运算和试验,证实了求取最优过盈量的有效性。本文的分析结果对永磁电机优化设计提供了一定的借鉴意义。

关键词: 永磁电机; 优化设计; 过盈量; 磁路

0 引言

实现“碳达峰”和“碳中和”愿景是我国生态

基金项目: 天津市科委重点研发计划项目
(18YFFCTG00040)

Tianjin Science and Technology Commission Key Research
Program(18YFFCTG00040)

文明体系建设的目标之一,随着“双碳”目标的推进,电力行业逐步向低碳转型,并将会面临许多机遇和挑战^[1]。在此过程中,电力设备将逐步进行优化更新,这就对高品质电机提出更广泛的需求,同时也对电机的设计和制造提出更严苛的要求^[2]。

电机设计时通常关注名义尺寸,因此容易忽略加工制造中工艺尺寸的影响^[3],例如定子铁心的装压过盈量会在铁心上产生应力和应变,导致实际电机的性能偏离设计值^[4-6]。电机生产商在对过盈量的选择上,通常仅从机械强度、热传导等方面考虑^[7-9],而忽略了过盈量对主磁场的影响,导致电机的性能波动较大,对电机产业向高端方向发展造成影响。依据材料物理理论的观点,弹性应力和应变是相互耦合的^[10-11],两者不会单独存在,在过盈量的最优控制中,必须同时考虑应力和应变产生的作用与效果。

文献[12-13]利用铁心磁特性试验平台实现了应力作用下的磁特性测量,指出铁心应力对磁特性的影响;文献[14]利用软磁材料综合磁性能测量平台,研究了应力和不同激励共同影响下硅钢片综合磁性能的变化趋势,并阐述了内在规律;文献[15-16]论述了气隙磁场调制原理,同时肯定了气隙磁场研究工作对永磁电机性能提升方面的积极意义。根据已有文献的分析可知,较大的应力会增大磁压降,压应力产生的径向位移对气隙磁路又会带来有益的影响,而对于这一对耦合变量之间定量关系的研究,在国内外文献中尚没有

相关报道。本文针对永磁电机搭建主磁路模型,分别就永磁电机过盈量对轭部磁场和气隙磁场的影响进行理论分析、数值仿真和试验验证,研究结果具有一定的理论价值和实际意义。

1 电机定子铁心的过盈配合

电机定子铁心和机壳之间采用的过盈配合是指机壳内孔的尺寸减去定子铁心外径的尺寸之差为负。两者之间的圆柱形接合面采用过盈配合尺寸,使接触表面间产生弹性压应力,从而获得坚固的连接,同时保持一定过盈量也有利于热传递效应。

1.1 过盈量压应力最小值的确定

铁心与机壳的表面的粗糙度一般为 Ra3.2。过盈量产生的压力通过静摩擦力约束铁心的旋转,以便使电机平稳的输出功率和转矩。传递额定功率和转矩所需的反作用力矩 T 可由下式确定:

$$T = \frac{9\ 550P_N}{n} \quad (1)$$

式中: P_N 为额定功率; n 为额定转速。

由力矩确定的压应力 σ 的最小值可由下式确定:

$$\sigma = \frac{1\ 000T}{\pi kLD^2} \quad (2)$$

式中: k 为静摩擦系数; D 为定子铁心外径; L 为定子铁心轴向长度。

以铁心外径 780 mm、560 kW 的永磁电机为例,计算可得铁心应力为 3.2 MPa。

1.2 过盈量压应力最大值的确定

由铁心材料的屈服强度确定过盈量压应力的最大值,一般硅钢片的屈服强度 σ_s 取值为 223 MPa。由此,可以确定铁心受力的约束范围为 3.2~235 MPa,根据电机制造商在长期生产过程中的工艺记录,初步估计铁心和机壳间过盈量 Δ 的范围为 0.3~1.2 mm。为了在该范围内取得最优值,需要继续对过盈量引起的主磁场变化进行分析和计算。

2 过盈量的应力和应变分析

定子铁心过盈量的应力和应变可以采用厚壁圆筒分析模型^[17],采用圆柱坐标系对其进行受力分析,按径向位移 u 、周向位移 v 、轴向位移 w 和应

变量 ε 的几何关系描述如下:

$$u = u(r), \quad v = u(\theta), \quad w = u(z) \quad (3)$$

$$\varepsilon_r = \frac{du}{dr}, \quad \varepsilon_\theta = \frac{u}{r}, \quad \varepsilon_z = \frac{dw}{dz} \quad (4)$$

式中: ε_r 为径向应变变量; ε_θ 为周向应变变量; ε_z 为轴向应变变量。

由定子铁心几何形状的轴对称性可知,横截面上的任意微元体都在径向上发生位移,径向应变与周向应变的相互关系需满足变形协调方程:

$$\frac{d\varepsilon_\theta}{dr} = \frac{1}{r}(\varepsilon_r - \varepsilon_\theta) \quad (5)$$

定子铁心的每个微元体处于弹性形变、静力平衡状态,其微元体的平衡方程如下:

$$r \frac{d\sigma_r}{dr} - \sigma_\theta + \sigma_r = 0 \quad (6)$$

式中: σ_r 为径向应力; σ_θ 为周向应力。

由材料力学胡克定理可得,微元体的本构方程为

$$\varepsilon_r = \frac{1}{E}[\sigma_r - \lambda(\sigma_\theta + \sigma_z)] \quad (7)$$

$$\varepsilon_\theta = \frac{1}{E}[\sigma_\theta - \lambda(\sigma_r + \sigma_z)] \quad (8)$$

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E}[\sigma_z - \lambda(\sigma_\theta + \sigma_r)] \quad (9)$$

式中: σ_z 为轴向应力; E 为弹性模量; λ 为硅钢片的泊松比。

结合式(5)~(9)解微分方程组可得:

$$\sigma_r = A + \frac{B}{r^2} \quad (10)$$

$$\sigma_\theta = A - \frac{B}{r^2} \quad (11)$$

$$u_r = \frac{(1-\lambda)pD^2}{E(D^2-d^2)}r + \frac{(1+\lambda)pd^2D^2}{E(D^2-d^2)}\frac{1}{r} \quad (12)$$

式中: A 、 B 为积分常数。

根据铁心和机壳配合情况可知,铁心内表面、外表面处均有径向位移,无周向位移,两端面处有轴向位移;铁心内表面应力为 0,定子铁心外表面过盈产生压应力大小为 p ,铁心两端面处存在轴向应力。根据该模型情况可得,装配过盈量与接触面压应力的关系如下:

$$\Delta = pD\left(\frac{C1}{E} + \frac{C2}{E}\right) \quad (13)$$

$$C1 = \frac{1 + (d/D)^2}{1 - (d/D)^2} - \lambda \quad (14)$$

$$C2 = \frac{1 + (D/D1)^2}{1 - (D/D1)^2} + \lambda \quad (15)$$

式中: $C1$ 、 $C2$ 为铁心和机座形状有关的常数; d 为铁心轭部内径; $D1$ 为机座的外径。

由此根据铁心受力和形变的全部边界条件, 解微分方程组的待定系数如下:

$$A = -\frac{pD^2}{D^2 - d^2} \quad (16)$$

$$B = -\frac{pd^2D^2}{D^2 - d^2} \quad (17)$$

将式(16)、(17)带入(10)~(12)可得:

$$\sigma_r = -\frac{pD^2}{D^2 - d^2} + \frac{pd^2D^2}{D^2 - d^2} \frac{1}{4r^2} \quad (18)$$

$$\sigma_\theta = -\frac{pD^2}{D^2 - d^2} - \frac{pd^2D^2}{D^2 - d^2} \frac{1}{4r^2} \quad (19)$$

$$u(r = d/2) = \frac{pdD^2}{E(D^2 - d^2)} \quad (20)$$

式中: r 为半径; 应力为负值时表示材料受压。

以 560 kW 永磁电机过盈量 1.5 mm 的数据为例, 周向应力的分布如图 1 所示, 压应力的绝对值沿着径向方向呈递减趋势。

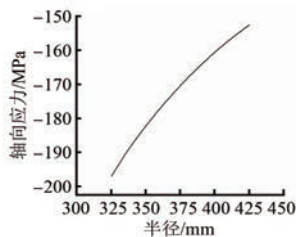


图 1 周向应力随半径变化

Fig. 1 The circumferential stress varies with radius

3 应力与主磁场的关系

3.1 应力对磁性能影响

弹性应力对铁磁材料磁化有显著影响, 当应力方向与磁致伸缩系数为同号时, 应力对磁化起促进作用, 反号时则阻碍磁化^[10]。电工钢在外加应力条件下会产生应力退磁现象, 退磁场随应力的增大而上升, 而在施加拉应力的条件下退磁场变化不大。对电工钢在 -160 ~ 160 MPa 应力范围内的磁特性和损耗进行了测试, 如图 2 所示^[5]。

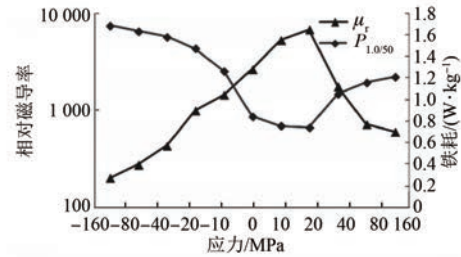


图 2 铁心性能随应力变化

Fig. 2 Core properties vary with stress

由测试结果可知, 在压应力 -160 ~ 0 MPa 范围内, 压应力和相对磁导率 μ_r 的函数曲线表达式为

$$\mu_r = 1995.3 \times 10^{\sigma/56.3} \quad (21)$$

3.2 主磁场磁压降的解析表达式

定子主磁场磁路由三部分构成, 轭部、齿部和气隙^[18]。三者过盈量产生的应力和应变作用下呈现出不同的响应结果, 根据各自的特点分别讨论。

3.2.1 轭部的磁场

轭部的磁场随着外径变化呈不均匀分布, 电机采用齿联轭, 一个极距内的磁通量 Φ 分散地进入齿部, 使齿联轭各个截面穿过的磁通量不同。在不承受外界应力时, 靠近铁心内圆的磁路较短、磁密比较集中; 靠近铁心外圆的磁路较长、磁密相对比较发散。当承受外界压应力时, 铁心周向压应力沿半径方向呈递减趋势, 相应的磁导率呈递增, 使得轭部磁通量分布趋于平均。一般计算轭部磁压降时要进行适当简化, 只计算轭部平均弧长上的磁压降, 并认为轭部截面上各点磁密均匀分布。轭部磁密 B_j 和磁压降 F_j 计算如下^[19]:

$$B_j = \frac{\Phi/2}{L(D-d)/2} = \frac{\Phi}{L(D-d)} \quad (22)$$

$$F_j = \frac{\pi\Phi(D+d)}{4\mu_0\mu_r PL(D-d)} \quad (23)$$

式中: Φ 为磁通量; P 为永磁电机的极对数; μ_0 为真空磁导率。

3.2.2 齿部的磁场

齿部有空隙, 故不承受应力, 齿部的磁场不受过盈量影响, 齿部磁密 B_t 和磁压降 F_t 计算如下^[19]:

$$B_t = \frac{2P\Phi}{\pi dLK} \quad (24)$$

$$F_t = \frac{B_t}{\mu_0 \mu_r} 2l = \frac{4P\Phi l}{\pi \mu_0 \mu_r K d L} \quad (25)$$

式中: K 为定子齿槽比。

3.2.3 气隙磁场

气隙的磁场主要受径向位移 u_r 影响。一般电机的气隙约为 1 mm 左右, 径向位移可以达到气隙的 10% 左右, 对气隙磁场的影响比较大。气隙磁密 B_δ 和磁压降 F_δ 计算如下^[19]:

$$B_\delta = \frac{2P\Phi}{\pi d L K} \quad (26)$$

$$F_\delta = \frac{B_t}{\mu_0} (\delta - u) = \frac{2P\Phi (\delta - u)}{\pi \mu_0 d L} \quad (27)$$

式中: δ 为气隙长度。

总的磁压降 F 的表达式为

$$F = F_j + F_t + F_\delta \quad (28)$$

4 过盈量的最优值

在磁压降与过盈量的函数关系式(28)中, 需要指出与过盈量相独立的量, 其中与电机结构有关的参数为铁心的直径 D 、铁心的轴向长度 L 、电机的极对数 P 以及每极磁通量 Φ ; 与电机材料有关的参数为弹性模量 E 和真空磁导率 μ_0 。在过盈量最优值求解中, 可以认为这些量为常数。

根据磁压降表达式可以求出其对过盈量 Δ 的一阶导数, 根据极小值原理得到约束方程如下:

$$\frac{\partial F}{\partial \Delta} = 0 \quad (29)$$

$$\frac{\partial F_t}{\partial \Delta} = 0 \quad (30)$$

$$\frac{\partial F_j}{\partial \Delta} = \frac{5.095 \Phi D E \times 10^5}{P L (D - d)^2 (C1 + C2)} \quad (31)$$

$$\frac{\partial F_\delta}{\partial \Delta} = \frac{-1.011 \Phi P D E \times 10^6}{L (D^2 - d^2) (C1 + C2)} \quad (32)$$

由式(29)~(32)联立可求得 μ_r :

$$\mu_r = \frac{0.05 E (D + d)}{P^2 (D - d)} \quad (33)$$

结合式(13)、(21)可得到最优过盈量 Δ 。最优过盈量 Δ 与电机的材料特性和结构尺寸密切相关。材料特性上的影响主要由定子铁心的弹性模量 E 来体现; 结构上的影响主要由铁心的内径和外径、机壳的外径体现, 这些参数在电机设计时是可以确定的, 因而过盈量的最优控制是可以实现的。

5 仿真验证

以 560 kW 永磁电机为例, 建立数值仿真模型, 该永磁电机的主要参数值如下表所示:

表 1 电机参数

Tab. 1 The parameters of motor

参数名称	参数值
额定功率/kW	560
额定电压/kV	10
机座外径/mm	860
定子外径/mm	780
铁心槽底/mm	700
定子内径/mm	530
铁心长度/mm	650
气隙长度/mm	1.5
槽数	24
极对数	2

按照磁压降模型, 进行仿真计算, 得到磁压降随过盈量的变化曲线如图 3, 可以取得其极小值, 对应该模型的过盈量为 0.68 mm, 电机制造中过盈量可按照 0.65~0.70 mm 控制。

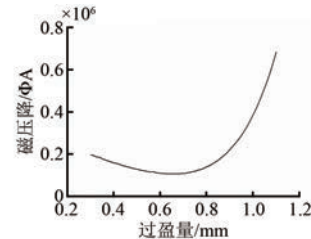


图 3 磁压降随过盈量变化

Fig. 3 Magnetic pressure drop varies with interference

选同样参数 560 kW 的永磁电机采取不同过盈量进行装配后, 分别在试验平台进行空载试验。不同过盈量下样机空载电流如表 2 所示。

电机在空载运行时磁动势正比于空载电流^[20], 由此可知空载电流极小值处就对应了最优过盈量, 电机试验结果与仿真计算结果相符合, 验证了定子过盈量优化设计的有效性。

需要补充的是, 在特殊结构的电机设计中, 按照电机的结构参数和材料性能参数代入进行计算时, 会出现最优值超出合理范围情况。例如在轭部较薄的电机磁压降随着过盈量的变化呈单调变化, 这时需要直接根据单调性在过盈量的约束范围边界取值。

表 2 不同过盈量时空载电流
Tab. 2 No-load current with different
interference quantities

过盈量/mm	空载电流/A
0.45	12.84
0.50	11.50
0.55	10.35
0.60	9.28
0.65	8.79
0.70	8.61
0.75	8.76
0.80	9.59
0.85	11.07

6 结语

本文通过对永磁电机铁心应力和应变分析、主磁路分析和实例计算,证明了可以通过数值计算得到过盈量的最优值。证实了铁心径向应变位移可以弥补主磁路的磁压降,进而补偿了铁心应力造成的磁导率衰减。由此可见,提高电机制造工艺参数的精度,能够改善电机性能。

在电机设计初步,求取一个最优过盈量,同时可以从仿真曲线中得到主磁场的变化趋势,对于确定永磁电机最终装压过盈量提供依据。

本文的分析结果可以为永磁电机以及具有类似定子结构电机设计及工艺方案提供一定的参考。

参考文献

- [1] 喻小宝,郑丹丹,杨康,等. “双碳”目标下能源电力行业的机遇与挑战[J]. 华电技术, 2021, 43(6): 21-32.
- YU X B, ZHENG D D, YANG K, et al. Opportunities and challenges faced by energy and power industry with the goal of carbon neutrality and carbon peak [J]. Huadian Technology, 2021, 43(6): 21-32.
- [2] 董瑞,高林,何松,等. CCUS 技术对我国电力行业低碳转型的意义与挑战[J]. 发电技术, 2022, 43(4): 523-532.
- DONG R, GAO L, HE S, et al. Significance and challenges of CCUS technology for low-carbon transformation of China's power industry [J]. Power Generation Technology, 2022, 43(4): 523-532.
- [3] KANG J, KIM J, AHN J, et al. A study on the

design of novel slotless motor considering winding manufacture process for a collaborative robot [J]. Actuators, 2023, 23(4): 523-532.

- [4] 尧磊,秦雪飞,蔡顺,等. 内置式永磁电机转子硅钢片叠装错位对气隙磁场的影响[J]. 电工技术学报, 2019, 36(5): 1096-1100.
- YAO L, QIN X F, CAI S, et al. Influence of rotor lamination stacking misalignment on airgap field in interior permanent magnet motors [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 36(5): 1096-1100.
- [5] 曹海东,石文敏,黄苏融,等. 铁心应力对永磁电机性能的影响[J]. 电机与控制学报, 2019, 23(3): 88-96.
- CAO H D, SHI W M, HUANG S R, et al. Core stress influence on permanent magnetic motor performance [J]. Electric Machines and Control, 2019, 23(3): 88-96.
- [6] 刘海龙,谢峰. 内置式永磁电机碳纤维护套转子强度及过盈量分析[J]. 电机与控制应用, 2023, 50(2): 20-23+35.
- LIU H L, XIE F. Strength and interference analysis of carbon fiber sleeve rotor for interior permanent magnet motor [J]. Electric Machines & Control Application, 2023, 50(2): 20-23+35.
- [7] 李华胜,吴顺海,王虎,等. 大型异步电机焊筋轴与转子铁心过盈配合的计算[J]. 现代制造技术与装备, 2022, 58(5): 64-68.
- LI H S, WU S H, WANG H, et al. Calculation of the interference fit between the welding rib shaft and the rotor core of a large asynchronous motor [J]. Modern Manufacturing Technology and Equipment, 2022, 58(5): 64-68.
- [8] 夏东宇,李健,孙宇,等. 定子与电机机壳配合的过盈量对止口直径的影响[J]. 科学技术创新, 2021(5): 168-169.
- XIA D Y, LI J, SUN Y, et al. The influence of interference between stator and motor housing on the diameter of stop [J]. Scientific and Technological Innovation, 2021(5): 168-169.
- [9] 杨振中,许欣,段宗玉,等. 表贴式永磁电机碳纤维护套转子强度及过盈量分析[J]. 电机与控制应用, 2019, 46(10): 6-13.
- YANG Z Z, XU X, DUAN Z Y, et al. Rotor strength and interference analysis of surface-mounted permanent magnet motor with carbon fiber sleeve rotor

- [J]. Electric Machines & Control Application, 2019, 46(10): 6-13.
- [10] 邱成军,王元化,王义杰. 材料物理性能[M]. 3 版. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2003.
- QIU C J, WANG Y H, WANG Y J. Physical properties of materials [M]. 3rd ed. Harbin: The Harbin Institute of Technology Press, 2003.
- [11] 李福宝,李勤. 压力容器及过程设备设计[M]. 2 版. 北京:化学工业出版社,2010.
- LI F B, LI Q. Design of pressure vessel and process equipment[M]. 2nd ed. Beijing: Chemical Industry Press, 2010.
- [12] 祝丽花,石永恒,杨庆新. 夹紧力对非晶合金磁特性及铁心振动的影响研究[J]. 中国电机工程学报,2020,40(24): 8155-8164+8252.
- ZHU L H, SHI Y H, YANG Q X. Effect of clamping force on magnetic properties and core vibration of amorphous alloys [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(24): 8155-8164+8252.
- [13] MIZUTA T, TANI Y, FUJIWARA K. Magnetic property of amorphous magnetic thin ribbon and its laminated bulk under tensile and compressive stresses [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2018, 54 (11): 1-5.
- [14] 赵小军,张凌云,刘洋,等. 机械应力对取向硅钢片综合磁性能影响的实验研究[J]. 电工技术学报, 2022,37(22): 5776-5787.
- ZHAO X J, ZHANG L Y, LIU Y, et al. Experimental study on the effect of mechanical stress on the comprehensive magnetic properties of the grain-oriented silicon steel [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37 (22): 5776-5787.
- [15] CHENG M, HAN P, HUA W. General airgap field modulation theory for electrical machines [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64 (8): 6063-6074.
- [16] 程明,文宏辉,花为,等. 电机气隙磁场调制统一理论及其典型应用[J]. 中国电机工程学报,2021,41 (24): 8261-8283.
- CHENG M, WEN H, HUA W, et al. General airgap field modulation theory for electrical machines and Its typical applications [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(24): 8261-8283.
- [17] 孙国刚. 压力容器及过程设备设计[M]. 2 版. 北京:中国石化出版社,2016.
- SUN G G. Design of pressure vessel and process equipment [M]. 2nd ed. Beijing: China Petrochemical Press, 2016.
- [18] 邢庆利,王玉彬,杜锌成. 考虑铁心饱和的内置式永磁同步电机气隙磁场解析计算[J]. 电机与控制应用,2022,49(1): 39-48.
- XING Q L, WANG Y B, DU X C, et al. Analytical calculation of air-gap magnetic field of built-in permanent magnet synchronous motor considering core saturation [J]. Electric Machines & Control Application, 2022, 49(1): 39-48.
- [19] 陈世坤. 电机设计[M]. 2 版. 北京:机械工业出版社,2004.
- CHEN S K. Electric machinery [M]. 2nd ed. Beijing: China Machine Press, 2004.
- [20] 汤蕴璆. 电机学[M]. 4 版. 北京:机械工业出版社, 2011.
- TANG Y M. Electric machinery [M]. 4th ed. Beijing: China Machine Press, 2011.

收稿日期:2023-07-07

收到修改稿日期:2023-09-07

作者简介:

李国洪(1968-),男,博士,副教授,研究方向为电机设计、电力电子,liguohong@tjut.edu.cn;

* 通信作者:郝满满(1989-),男,硕士研究生,研究方向为电机设计,15236073397@126.com。

Research on Optimal Control Design of Stator Interference of Permanent Magnet Motor

LI Guohong¹, HAO Manman^{1*}, WANG Qian²

(1. Tianjin Key Laboratory of Complex Systems Control Theory and Application,
Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China;

2. Wolong Electric Nanyang Explosion Protection Group Co., Ltd., Nanyang 473008, China)

Key words: permanent magnet motor; optimization design; interference; magnetic circuit

In the context of the carbon peak and carbon neutrality, the power industry will face many opportunities and challenges. Power equipment will be gradually optimized and updated, which puts forward a broader demand for high-quality motors and also puts more stringent requirements on the design and manufacturing of motors.

Motors are designed usually focuses on nominal size, so it is easy to ignore the influence of process size in processing and manufacturing. The load interference of the stator core will produce stress and strain on the core, which will cause the actual motor performance to deviate from the design value. According to the theory of material physics, elastic stress and deformation are coupled with each other, and they do not exist alone. In the optimal control of interference, the effects of stress and strain must be considered simultaneously.

This paper constructs a series of analytic equations, and proposes a precise method for motor optimization design that realizes the optimal value of interference. Firstly, the permissible range of interference is determined according to the constraints of motor operation and the relationship between interference and internal stress and variable can be derived from the theory of elastic mechanics. Secondly, according to the analysis of the magnetic

circuit model of the motor, the expression of stress on magnetic pressure drop is obtained.

The relationship between interference and stress is shown in Fig.1.

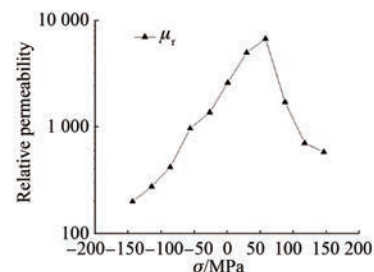


Fig. 1 Core properties vary with stress

Since the first derivative with respect to interference can be obtained from the expression of magnetic pressure drop, and the constraint equation of interference can be calculated quantitatively according to the minimum principle.

Finally, the solution model is established and the simulation calculation and experiment are carried out based on a 560 kW motor. The simulation results and experiment both show that the proposed method for the motor optimization design that realizes the optimal value of interference. The analysis results in this paper can provide some references and insights used in the optimization design of permanent magnet motor.