

文章编号 1004-924X(2017)03-0680-09

# 高速磁悬浮永磁电机多物理场分析及转子损耗优化

韩邦成<sup>1,2,3\*</sup>, 薛庆昊<sup>1,2,3</sup>, 刘旭<sup>1,2,3</sup>

(1. 北京航空航天大学 惯性技术重点实验室, 北京 100191;

2. 北京航空航天大学 新型惯性仪表与导航系统技术国防重点学科实验室, 北京 100191;

3. 北京市高速磁悬浮电机技术及应用工程技术研究中心, 北京 100191)

**摘要:**为提高高速磁悬浮永磁电机的综合性能,得到最优的设计参数,针对一台 30 kW, 48 000 rpm 的磁悬浮电机进行了电磁场、转子动力学以及转子强度分析,提出一种基于多物理场分析结果的电机尺寸优化方法。使用 ANSYS 以及 ANSOFT 对电机进行建模和有限元分析,并用 ISIGHT 软件进行集成优化设计。以转子损耗最小为优化目标,电机几何尺寸为设计变量,在优化过程中考虑尺寸变化对电机转子模态以及强度的影响,以尺寸、电机电磁性能、力学性能等为约束条件。经过优化后,电机的转子损耗减小 16.7%,其余性能均符合设计要求。根据优化设计结果加工了样机并进行电机对拖与温升实验,结果证明了优化设计的合理性,验证了本文提出方法的正确性。

**关键词:**电磁分析;多物理场;高速磁悬浮电机;永磁电机;有限元

**中图分类号:**TB853.29 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20172503.0680

## Multi-physics analysis and rotor loss optimization of high-speed magnetic suspension PM machine

HAN Bang-Cheng<sup>1,2,3\*</sup>, XUE Qing-Hao<sup>1,2,3</sup>, LIU Xu<sup>1,2,3</sup>

(1. *Science and Technology on Inertial Laboratory, Beihang University, Haidian District, Beijing 100191, China;*

2. *Fundamental Science on Novel Inertial Instrument & Navigation System Technology Laboratory, Beihang University, Haidian District, Beijing 100191, China;*

3. *Beijing Engineering Research Center of High-Speed Magnetically Suspended Motor Technology and Application, Beijing 100191, China)*

\* *Corresponding author, E-mail: hanbangcheng@buaa.edu.cn*

**Abstract:** To improve the overall performance of high-speed magnetic suspension PM machine and obtain the optimal design parameters, an electromagnetic field, rotor dynamics and rotor strength analysis was conducted on a magnetic suspension machine (30 kW, 48 000 rpm), and a size optimization method based on such multi-physics analysis was put forward. Used ANSYS and ANSOFT to carry out modeling and finite element analysis on the motor, and then completed the integrated optimization designed by adopting the ISIGHT software, taking the impact of dimensional

**收稿日期:**2016-10-11; **修订日期:**2016-11-17.

**基金项目:**国家重大科学仪器设备开发专项资助项目(No. 2012YQ040235);国家自然科学基金资助项目(No. 61573032)

change on the rotor model and rotor strength into consideration, with the minimum rotor loss as the optimization goal, geometric dimension of the motor as the design variable, and dimension, magnetic performance and mechanical performance as the constraint conditions. After such optimization, rotor loss of the motor was decreased by 16.7%, with other performances in compliance with the design requirements. Then a back-to-back test and temperature rise test were carried out in the model machine based on the optimization design results. The test results verify the reasonability of such optimization design and correctness of the method put forward in this paper.

**Key words:** electromagnetic analysis; multi-physics analysis; high-speed machine; PM machine; FEM

## 1 引言

随着现代工业的发展,对高速永磁电机的应用越来越多,在国防领域有飞轮、控制力矩陀螺,民用领域有空调压缩机<sup>[1]</sup>、数控机床和高速离心设备等。高速电机的转速为常规电机的十几倍甚至几十倍,由此会引发如电磁损耗,转子强度和动力学等方面的问题,需要在设计时加以考虑。高速电机内部磁场变化频率较高,会引起较大的电磁损耗,同时转子表面也会产生风磨损,损耗的分析是电磁设计的重点之一。永磁无刷电机的转子永磁体通常采用烧结的永磁材料,抗拉性能差<sup>[2]</sup>,必须采取保护措施。高速电机转子多为细长型,为避免在高转速下发生共振,需要准确计算转子固有频率,防止超过临界转速。高速电机转子需要使用高速轴承支承,使用磁轴承支承的磁悬浮转子系统具有寿命长、无磨损和无需润滑等优点<sup>[3]</sup>,是高速电机理想的支承方式。由于无接触的特点,磁悬浮电机转子的散热能力较差,因此在设计时应尽量减小转子损耗生热,避免永磁体因过热而失磁。

国内外学者对高速永磁电机的分析与优化进行了相关研究。文献[4-5]对高速永磁电机的损耗进行了分析和有限元计算。文献[6]使用解析方法对采用合金钢护套的高速永磁电机转子进行了强度分析,并进行了有限元验证。文献[7]对非线性接触下的柔性转子系统进行了解析分析和有限元计算。文献[8]对高速磁悬浮转子进行了静力学和转子动力学优化设计。文献[9]针对电机的电磁性能,以电机损耗、体积和成本最小化为目标,使用解析模型和遗传算法进行了多目标优化

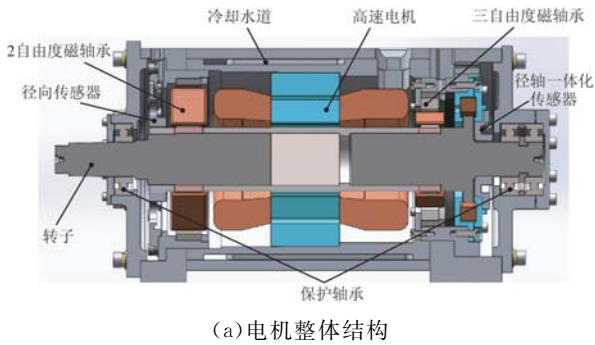
设计。文献[10]使用多物理场分析方法对高速同步磁阻电机进行了优化。在高速永磁电机优化方面,多数文献侧重于电磁或力学其中一个方面的研究,综合考虑电机尺寸变化对电磁和力学两方面性能影响的文献较少。

本文针对高速磁悬浮永磁电机进行了多物理场分析;并以转子损耗最小为目标,电机主要电磁和力学性能为约束,进行了高速电机的尺寸优化。优化过程中综合考虑尺寸变化对电机瞬态电磁场、转子动力学以及护套应力场的影响。根据优化设计结果,制作了样机进行对拖试验以及温升试验,结果证明了设计的合理性,为高速磁悬浮永磁电机的设计提供了参考。

## 2 高速磁悬浮永磁电机结构

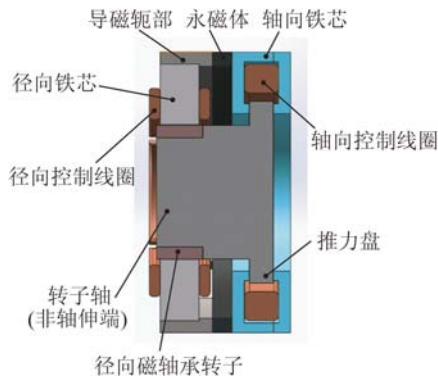
### 2.1 整体结构

高速磁悬浮永磁电机的结构如图1(a)所示。使用2个磁轴承为转子提供5个自由度的支撑,其中轴伸端为纯电磁轴承,可提供2个径向自由度的支撑;非轴伸端为三自由度永磁偏置轴承,可提供2个径向自由度和1个周向自由度的支撑。三自由度磁轴承的结构如图1(b)所示,永磁体为径向和轴向磁炉提供偏置磁通,径向和轴向控制线圈分别产生控制磁通。转子轴本身以及径向磁轴承转子均采用导磁材料制作,推力盘是转子轴的一部分,两侧磁极产生的电磁力作用在其上,为整个转子提供可控制的轴向力。电机使用3个机械轴承作为保护轴承,以防止磁轴承失稳情况下定转子之间发生碰撞。为提高散热能力,在高速电机定子机壳上布有水道,工作时可通入冷却液进行循环冷却。



(a) 电机整体结构

(a) Structure of high-speed magnetic levitation PM machine



(b) 三自由度磁轴承结构

(b) Structure of 3-DOF magnetic bearing

图 1 高速磁悬浮永磁电机结构

Fig. 1 Configuration of high-speed magnetic levitation PM machine

## 2.2 转子结构

电机的转子结构如图 2 所示。圆柱型永磁体外侧为护套,由合金钢制成;两个轴段上分别装有磁轴承转子,并以过盈配合的方式与护套连接,组成一个完整的转子;非轴伸端上有推力盘,可提供轴向力,在轴伸端装有螺纹环,可提供轴向预紧力。

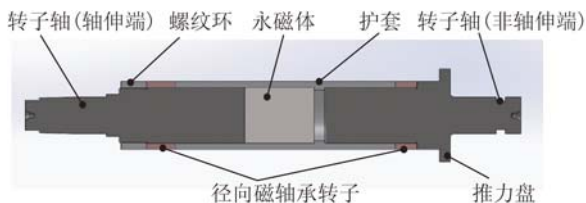


图 2 磁悬浮电机转子结构

Fig. 2 Structure of rotor assembly

## 2.3 高速电机拓扑结构

对于高速永磁电机,为防止高转速带来的电磁损耗,极对数不宜过大,通常为 2 或 4。本文将极对数取为 2,永磁体可以采用整体结构,有利于

提高转子的强度和稳定性,便于加工和装配。

高速电机的损耗远大于常规电机,因此,转子永磁体需要长期在高温下工作而不退磁。钕钴永磁体具有高的剩余磁通密度和矫顽力,且温度稳定性好,适合于制作高速电机的转子永磁体。

高速电机的拓扑结构如图 3 所示。电机定子采用半闭口槽(以减少槽开口带来的额外损耗),槽数为 24,嵌有双层分布式整距绕组。

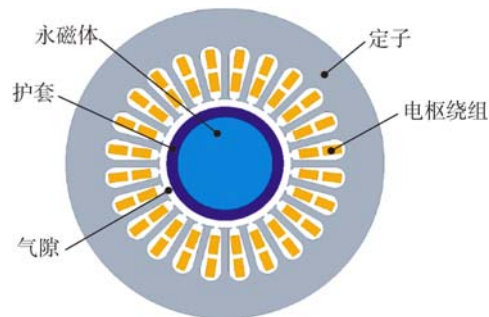


图 3 高速永磁电机拓扑结构

Fig. 3 Topology of high-speed PM machine

## 3 高速永磁电机多物理场分析方法

### 3.1 转子涡流损耗计算

高速电机的转子涡流损耗是转子发热的主要因素,影响因素包括磁通的空间谐波、时间谐波,定子槽开口。高速电机的气隙通常比较大,因此空间谐波的影响较小。计算转子的涡流损耗可以采用 2D 瞬态有限元分析方法。在 Maxwell 软件中,磁矢势  $A$  满足:

$$\nabla \times v \nabla \times A = J_s - \sigma \frac{\partial A}{\partial t} - \sigma \nabla v - \nabla \times H_c + \sigma v \times \nabla \times A, \quad (1)$$

式中:  $v$  为物体运动速度,  $J_s$  为源电流密度,  $\sigma$  为电导率,  $H_c$  为永磁体矫顽力。

可根据式(1)计算出模型中各节点的磁矢势  $A$ ,进而得到电流密度  $J$ ,涡流损耗  $P_{\text{eddy}}$  为:

$$P_{\text{eddy}} = \frac{1}{\sigma} \int_{\text{vol}} J^2 dV. \quad (2)$$

用于计算转子涡流损耗的 1/2 有限元模型如图 4 所示。电机三相绕组外接控制电路,设定负载为 30 kW,由于电机使用磁悬浮轴承支撑,可忽略轴承的摩擦损耗。电机定子采用叠片结构,仿真时忽略定子的涡流效应,只考虑转子护套及永磁体的涡流效应。

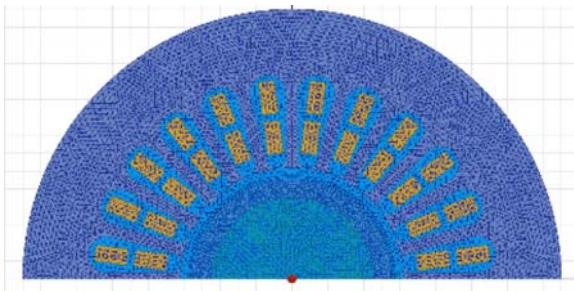


图 4 高速永磁电机 1/2 模型

Fig. 4 1/2 FE model of high-speed PM machine

### 3.2 转子风磨耗计算

在高转速下,电机转子的风磨耗不能忽略,其值主要受到转子外径、表面粗糙度以及转速的影响。转子圆周面的风磨耗  $P_{air}$  为<sup>[11]</sup>:

$$P_{air} = k C_f \rho \pi \omega^3 r^4 l, \quad (3)$$

式中: $k$ 为转子表面粗糙度系数(对于光滑表面,取为 1.0), $\rho$ 为空气密度, $\omega$ 为转子角速度, $r$ 为转子半径, $l$ 为转子长度。摩擦系数  $C_f$  可以根据转子半径  $r$ ,气隙的径向长度  $\delta$  和雷诺数  $Re_\delta$  计算:

$$\begin{cases} C_f = 0.515 \frac{\left(\frac{\delta}{r}\right)^{0.3}}{Re_\delta^{0.5}}, & (500 < Re_\delta < 10^4) \\ C_f = 0.0325 \frac{\left(\frac{\delta}{r}\right)^{0.3}}{Re_\delta^{0.2}}, & (10^4 < Re_\delta) \end{cases} \quad (4)$$

雷诺数的计算公式为:

$$Re_\delta = \frac{\rho \omega r \delta}{\mu}, \quad (5)$$

式中: $\mu$ 为空气的动力黏度系数。

只针对电机部分的转子损耗进行分析,转子其余部分的风磨耗不予考虑。

### 3.3 转子模态分析

为便于磁悬浮轴承控制系统的设计和电机的长期稳定运行,要求电机转子为刚性转子,即在额定转速下满足<sup>[12]</sup>:

$$f_1 \geq 1.43 f_n, \quad (6)$$

式中: $f_1$ 为转子的一阶固有频率, $f_n$ 为转子的额定转速对应的频率。

因此,在设计时有必要对电机转子进行动力学分析,得到准确的一阶固有频率。根据弹性力学有限元理论,转子组件的模型满足:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{u}(t) = \mathbf{Q}(t), \quad (7)$$

式中: $\mathbf{M}$ 为质量矩阵, $\mathbf{C}$ 为阻尼矩阵, $\mathbf{K}$ 为刚度矩

阵, $\mathbf{u}(t)$ 为位移向量, $\mathbf{Q}(t)$ 为结构激振力向量。

在计算自然频率时,可认为结构激振力向量  $\mathbf{Q}(t)$  为零,得到无阻尼自由振动方程:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{K}\mathbf{u} = 0. \quad (8)$$

其简谐运动形式为:

$$\mathbf{u} = \mathbf{U} \exp(j\omega t). \quad (9)$$

将式(9)代入式(8)后得到:

$$(\mathbf{K} - \omega^2 \mathbf{M}) \mathbf{X} = 0. \quad (10)$$

式(10)具有非零解的唯一条件是矩阵  $(\mathbf{K} - \omega^2 \mathbf{M})$  的行列式等于零:

$$|\mathbf{K} - \omega^2 \mathbf{M}| = 0. \quad (11)$$

将式(11)展开后即可得到  $n$  个特征值  $\omega_k^2$  ( $k=1, 2, \dots, n$ ),则  $\omega_k$  为转子的第  $k$  阶固有频率。

根据上述理论,采用三角形网格进行均匀剖分,建立转子装配体的 3D 有限元模型(见图 5)。

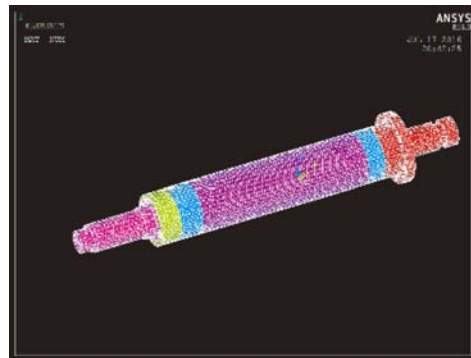


图 5 电机转子装配体 3D 有限元模型

Fig. 5 3D FE model of rotor assembly

### 3.4 转子护套强度分析

永磁体本身的机械性能较差,无法承受高转速带来的巨大离心力,因此高速电机永磁体过盈装配有高强度合金钢制成的护套,防止永磁体在额定转速下发生破坏。转子护套的分析可简化为平面轴对称变形问题<sup>[13]</sup>,使用二维有限元接触模型对转子受力情况进行分析,设定额定转速为 48 000 rpm,转子与永磁体之间的装配过盈量设为 0.1 mm,有限元分析模型如图 6 所示。通过二维有限元接触分析方法可以得到转子护套在额定工作条件下的等效力、转子永磁体的第一主应力以及二者之间的接触应力分布。

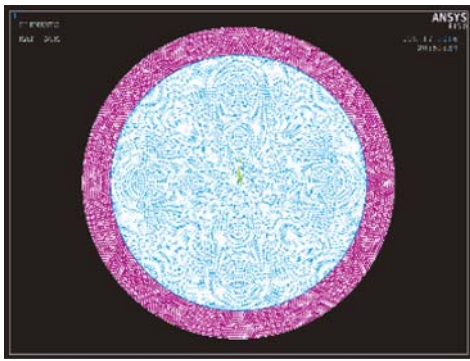


图 6 2D 转子接触强度分析模型

Fig. 6 2-D contact FE analysis model of rotor

### 4 基于多物理场的转子损耗优化

#### 4.1 优化设计方法

多物理场分析的特点是准确度较高,无需实验和经验修正系数,但是根据其分析结果得到的目标函数不连续,难以求导,需要使用特定的优化算法。采用序列二次规划算法进行优化,该方法能有效解决约束的非线性优化问题;无需对目标函数求导,直接利用目标函数和约束函数的值进行寻优;算法稳定,收敛速度较快。

将序列二次规划方法与多物理场分析方法相结合,使用 ISIGHT 软件集成 ANSOFT 和 ANSYS 软件进行迭代优化,优化流程如图 7 所示。

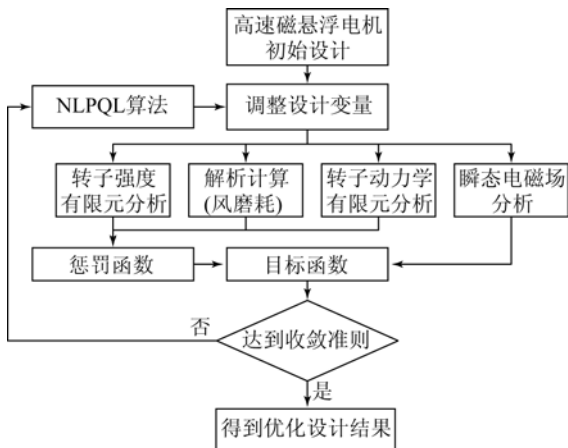


图 7 多物理场优化流程

Fig. 7 Optimization flow of high-speed magnetic levitation PM machine

#### 4.2 优化设计方案

选取对转子损耗影响较大的几何尺寸作为优化设计变量,分别是:转子永磁体外径、转子护套

厚度、电机机械气隙、电机定子外径、电机轴向长度,如图 8 所示。

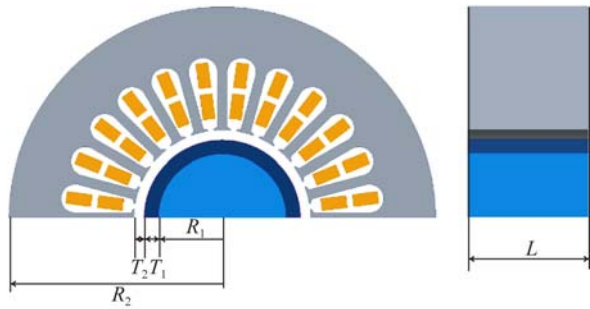


图 8 电机优化变量

Fig. 8 Design variables of high-speed PM machine

优化问题的数学描述为:

优化向量:优化变量即为图 8 中的 5 个几何尺寸变量,设  $\mathbf{x}$  为优化向量,其数学描述为:

$$\mathbf{x} = (R_1, T_1, T_2, R_2, L). \quad (12)$$

目标函数:选择转子损耗  $F_{\text{rotor loss}}(\mathbf{x}) = F_{\text{eddy}}(\mathbf{x}) + F_{\text{wind}}(\mathbf{x})$  (转子涡流损耗与风磨损耗之和) 最小为优化设计的目标函数,其数学描述为:

$$\min\{Z = F_{\text{rotor loss}}(\mathbf{x})\}. \quad (13)$$

边界约束:考虑到工程实际,优化向量的取值应在边界约束内,它的数学描述为:

$$\mathbf{x}_l \leq \mathbf{x} \leq \mathbf{x}_h, \quad (14)$$

式中:  $\mathbf{x}_l$  和  $\mathbf{x}_h$  分别优化向量的下界和上界。

各优化变量的取值范围如下:

$$\begin{cases} 20 \leq R_1 \leq 25 \\ 2 \leq T_1 \leq 8 \\ 2 \leq T_2 \leq 8 \\ 72 \leq R_2 \leq 78 \\ 55 \leq L \leq 65 \end{cases} \quad (15)$$

不等式约束:设  $g_i(x)$  为与优化向量  $\mathbf{x}$  相关的约束函数,分别为输出功率约束、电流密度约束、刚度约束、强度约束,  $n_1, n_2, n_3, n_4$  分别为约束的边界条件,则其数学描述为:

$$\begin{cases} g_1 \geq n_1 \\ g_2 \leq n_2 \\ g_3 \geq n_3 \\ g_4 \leq n_4 \end{cases} \quad (16)$$

针对 30 kW, 48 000 rpm 高速磁悬浮电机,具体的约束为:

(1)输出功率约束  $g_1$ :根据设计要求,电机的

输出功率  $P$  要大于 30 kW,即:

$$P \geq 30 \text{ kW}. \quad (17)$$

(2) 电流密度约束  $g_2$ : 电机定子电枢中的电流不可过大,否则会引起电枢发热从而破坏绝缘层,造成损坏。实际优化时,以定子相电流  $I_{\text{phase}}$  作为约束,即:

$$I_{\text{phase}} \leq 68 \text{ A}. \quad (18)$$

(3) 刚度约束  $g_3$ : 为保证高速电机的稳定运行,要求转子始终在刚性状态下工作,即转子的一阶固有频率  $f_1$  应大于转子工作转速频率  $f_n$  的 1.43 倍:

$$f_1 \geq 1.43 f_n = 1\,573 \text{ Hz}. \quad (19)$$

(4) 强度约束  $g_4$ : 在额定转速下,转子护套(材料 GH4169)的最大等效应力  $\sigma_{\text{sleeve}}$  应小于许用应力  $[\sigma_{\text{sleeve}}]$  的 1/2,转子永磁体(材料 Sm2Co17)的第一主应力  $\sigma_{\text{PM}}$  应小于许用应力  $[\sigma_{\text{PM}}]$  的 1/2,即二者的安全系数应大于 2,同时,护套与永磁体应始终保持接触,即二者的接触应力应大于 0,其数学描述为:

$$\begin{cases} \sigma_{\text{PM}} < [\sigma_{\text{PM}}]/2 \\ \sigma_{\text{sleeve}} < [\sigma_{\text{sleeve}}]/2. \\ \sigma_{\text{contact}} > 0 \end{cases} \quad (20)$$

### 4.3 优化设计结果

使用 NLPQL 算法在设计空间内求得一组满足约束条件的解,优化过程曲线如图 9 所示,满足约束条件的最优结果在第 63 步得到。表 1 所示为优化设计前后电机的设计变量,优化目标以及主要性能的变化。

表 1 高速磁悬浮电机优化设计结果

Tab. 1 Optimization results of high-speed machine

名称	优化前	优化后
转子永磁体外径 $R_1$ /mm	22.5	25
转子护套厚度 $T_1$ /mm	5	4.6
电机机械气隙 $T_2$ /mm	3.5	4.7
电机定子外径 $R_2$ /mm	75	72
电机轴向长度 $L$ /mm	60	55.7
转子损耗/W	426	355
相电流(有效值)/A	66	63
转子一阶固有频率/Hz	1 579	1 766

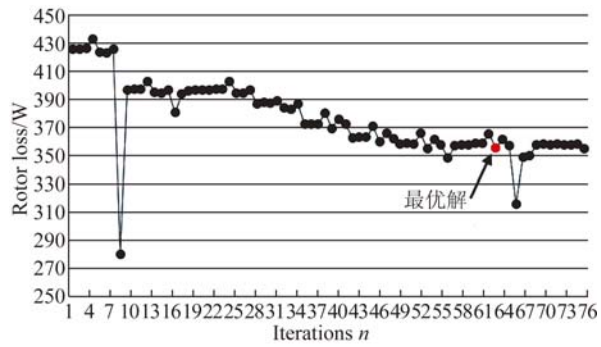


图 9 转子损耗优化曲线

Fig. 9 Optimization curve of rotor loss

经过优化后的高速电机转子损耗由 426 W 减小为 355 W(减小 16.7%),其中转子涡流损耗减小而风磨耗增加。转子的一阶自由模态在优化后有提升,由 1 579 Hz 增加为 1 766 Hz(增加 11.8%),满足刚性转子要求;电机转子永磁体及护套应力略有增加,均在允许范围内;电机的电磁功率以及相电流变化不大,符合约束条件。

从图 10 中可以看出,转子涡流损耗主要集中在护套和永磁体表面,经过优化后,电机的损耗峰值有明显下降,总损耗减少。

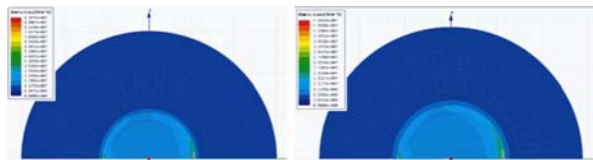


图 10 优化前后转子涡流损耗分布

Fig. 10 Eddy-loss of initial and optimization design

图 11 所示为电机转子优化前后的一阶自由模态对比,可以看出,转子的振型变化不大,优化后的转子一阶自由模态增加。

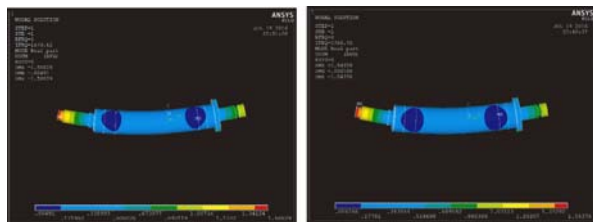


图 11 优化前后转子一阶模态

Fig. 11 1st order modal analysis results of initial and optimization design

优化前后转子在额定工作条件下的应力如图 12 所示,其中,护套(GH4169)许用应力 1 330 MPa,转子永磁体许用应力(Sm2Co17)80 MPa。优化前后,护套最大等效应力分别为 478 MPa(安全系数 2.78)和 450 MPa(安全系数 2.95);永磁体第一主应力分别为 -1.8 MPa(压应力)和 21 MPa(安全系数 3.8);护套与永磁体均保持接触。

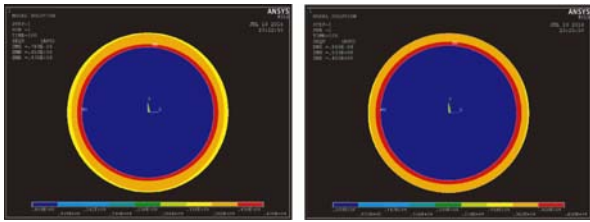


图 12 优化前后转子应力云图

Fig. 12 Strength analysis results of initial and optimization design

## 5 样机实验

### 5.1 样机对拖试验

根据优化设计的结果,设计制造了 30 kW, 48 000 rpm 高速磁悬浮电机,如图 13 所示。将两台样机用柔性联轴器连接,其中一台作为电机,由基于 IGBT 的电压源逆变器驱动;另一台作为发电机进行对拖试验,在三相绕组串联功率电阻。实验时,电机外壳上的冷却水道通入 20 °C 的冷却水,实验结果如表 2 所示。



图 13 样机试验平台

Fig. 13 Prototype of high-speed magnetic levitation PM machine and back to back test platform

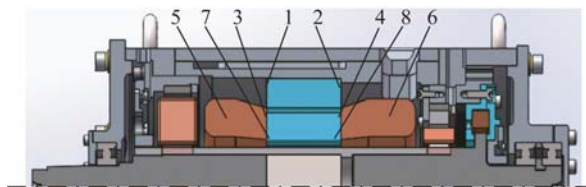
表 2 高速磁悬浮电机实验结果

Tab. 2 Test results of high-speed machine

测试项目	结果
额定功率/kW	30
最高转速/rpm	55 332
电机总效率/%	94.3
绕组损耗/%	2.9
电磁损耗/%	2.2
杂散损耗/%	0.6
最大温升(定子铁芯)/°C	100.3

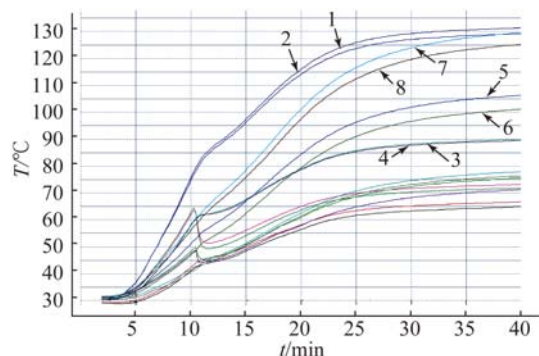
### 5.2 温升试验

温升是电机性能的重要指标之一,可以反映各部分的损耗。实验时,将 8 个热敏电阻安装在电机内部(见图 14(a)),使样机在额定负载(30 kW)以及额定转速(48 000 rpm)条件下连续运转,得到电机各部分温度随时间变化情况(见图 14(b))。由电机的温升曲线可以看出,各部分温度随着实验的进行逐渐上升,并趋于稳定,最大温升为 100.3 °C,出现在电机定子铁芯部分,总体温升在合理范围内。样机试验结果说明了基于多物理场优化方法的合理性。



(a)温度传感器分布

(a)Probe position of thermal resistors



(b)电机各部分温升曲线

(b)Temperature rise curve

图 14 样机温度传感器位置及温升曲线

Fig. 14 Probe position of thermal resistors in high-speed PM machine and temperature rise curve

## 6 结 论

本文提出一种基于多物理场分析的高速磁悬浮电机转子损耗优化设计方法,同时考虑了电机尺寸变化对电磁性能以及力学性能的影响。使用该方法对一台 30 kW, 48 000 rpm 高速磁悬浮电机进行了优化。使用综合考虑电磁场、应力场以

及转子模态分析的高速电机优化方法后,电机转子损耗减小 16.7%,其余力学性能均符合要求,优化效果较好,为高速电机的优化设计提供了参考;多物理场有限元分析的准确度较高,单次迭代计算时间较长,适合采用 NLPQL 这类收敛速度较快的优化算法;样机试验证明了优化设计的合理性,依据本文优化方法制作的样机能够稳定运行,各项性能符合工程要求。

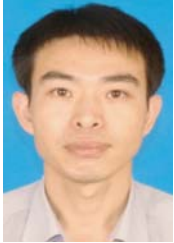
### 参考文献:

- [1] SOONG W L, KLIMAN G B, JOHNSON R N, *et al.*. Novel high speed induction motor for a commercial centrifugal compressor [J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2000, 36(3):706-713.
- [2] 沈建新, 李鹏, 郝鹤, 等. 高速永磁无刷电机电磁损耗的研究概况[J]. *中国电机工程学报*, 2013, 33(3):62-74.
- SHEN J, PENG L I, HE H, *et al.*. Study on electromagnetic losses in high-speed permanent magnet brushless machines-the state of the art [J]. *Proceedings of the Chinese Society of Electrical Engineering*, 2013, 33(3):62-74. (in Chinese)
- [3] 刘超, 刘刚, 赵光再. 主被动磁悬浮高速转子系统的自动平衡控制[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(3):714-722.
- LIU CH, LIU G, ZHAO G Z. Autobalancing control of high-speed rotor suspended by active-passive hybrid magnetic bearings [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(3):714-722. (in Chinese)
- [4] AGLÉN O. Loss calculation and thermal analysis of a high-speed generator [C]. *Electric Machines and Drives Conference, IEEE*, 2003:73-83.
- [5] HUANG Z, FANG J, LIU X, *et al.*. Loss calculation and thermal analysis of rotors supported by active magnetic bearings for high-speed permanent magnet electrical machines [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2015.
- [6] NG K, ZHU Z Q, HOWE D. Open-circuit field distribution in a brushless motor with diametrically magnetised PM rotor, accounting for slotting and eddy current effects [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 1996, 32(5):5070-5072.
- [7] 黄梓嫻, 韩邦成, 周银锋. 非线性接触下磁悬浮电机柔性转子系统模态分析[J]. *中国电机工程学报*, 2014(15):2438-2444.
- HUANG Z Y, HAN B CH, ZHOU Y F. Modal analysis of the flexible rotor system of magnetic levitation motors under nonlinear contact [J]. *Proceedings of the Chinese Society of Electrical Engineering*, 2014, 34(15):2438-2444. (in Chinese)
- [8] 韩邦成, 虎刚, 房建成. 磁悬浮控制力矩陀螺高速转子的优化设计[J]. *光学精密工程*, 2006, 14(4):662-666.
- HAN B CH, GANG H, FANG J CH. Optimization design of magnetic suspended gyroscope rotor [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(4):662-666. (in Chinese)
- [9] AUBRY J, AHMED H B, MULTON B. Sizing optimization methodology of a surface permanent magnet machine-converter system over a torque-speed operating profile: application to a wave energy converter [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2012, 59(5):2116-2125.
- [10] NARDO M D, GALEA M, GERADA C, *et al.*. Multi-physics optimization strategies for high speed synchronous reluctance machines [C]. *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, 2015.
- [11] SAARI J, SAARI J. Thermal analysis of high-speed induction machines [J]. *Helsinki University of Technology*, 1998.
- [12] 顾家柳. 转子动力学[M]. 北京:国防工业出版社, 1985.
- GU J L. *Rotor Dynamics* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1985. (in Chinese)
- [13] 陈家新, 郑传银, 白洋, 等. 高速永磁电机护套配合过盈量的计算及强度校核[J]. *微特电机*, 2015, 43(1):21-24.
- CHEN J X, ZHENG CH Y, BAI Y, *et al.*. Inter-

ference fit calculation and strength verification for rotor sleeve of permanent magnet motor operating

on high speed [J]. *Small & Special Electrical Machines*, 2015. (in Chinese)

导师简介:



韩邦成(1974—),男,辽宁灯塔人,博士,研究员,2004年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事磁悬浮技术及应用、磁悬浮电机、磁悬浮飞轮及磁悬浮控制力矩陀螺技术等机电一体化技术的研究。  
E-mail: hanbangcheng@buaa.edu.cn

作者简介:



薛庆昊(1990—),男,北京人,硕士研究生,2014年于北京科技大学获得学士学位,主要从事高速磁悬浮电机设计与优化的研究。E-mail: qinghaoxue@163.com