

文章编号 1004-924X(2018)10-2463-12

单框架磁悬浮控制力矩陀螺的损耗计算 及热-结构耦合分析

韩邦成^{1,2,3}, 贺 赞^{1,2,3*}, 翟鲁鑫^{1,2,3}, 张 旭^{1,2,3}, 刘 旭^{1,2,3}

- (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:为了明确由损耗导致航天器应用中的磁悬浮控制力矩陀螺温升问题,需要对损耗和温度分布进行分析计算。本文针对额定转速 12 000 r/m,最大角动量 200 N·m·s 的单框架磁悬浮控制力矩陀螺,通过建立理论模型进行分析计算,得到了框架力矩电机、径向磁轴承、轴向磁轴承和转子高速电机的铁损以及铜损;对陀螺三维有限元模型进行了热场仿真分析,得到在各类损耗影响下的温度分布,并进行了热-结构耦合仿真分析。分析得到最大温度位于高速电机定子,最大温度是 48.3 ℃;最后,进行了样机温升实验验证,检测温度最大值位于高速电机定子,最大值为 51.8 ℃,与计算值误差为 6.8%。通过温升检测实验验证了损耗计算和有限元热场分析。实验结论为整体结构优化提供了理论参考。

关键词:磁悬浮;控制力矩陀螺;损耗计算;热场分析;有限元分析

中图分类号:V448.22+2;TH133.3 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20182610.2463

Loss calculation and thermal-structural coupling analysis of a single gimbal magnetically suspended control moment gyroscope

HAN Bang-cheng^{1,2,3}, HE Zan^{1,2,3*}, ZHAI Lu-xin^{1,2,3}, ZHANG Xu^{1,2,3}, LIU Xu^{1,2,3}

- (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: hezan17@163.com*

Abstract: To investigate the temperature rise caused by loss of the magnetically suspended control moment gyroscope for the spacecraft application, it is necessary to analyze and calculate the loss and temperature distribution. In this paper, theoretical loss models that consider the iron and copper losses were established. The losses in a single gimbal magnetically suspended control moment gyroscope

收稿日期:2018-05-08;修订日期:2018-07-09.

基金项目:国家重点研发计划民用航天资助项目(No. 2016YFB0500804);国家自然科学基金资助项目(No. 61573032);北京市科技计划资助项目(No. Z171100002217008)

(SGMSCMG), which consists of a frame torque motor, radial magnetic bearing, axial magnetic bearing, high-speed motor of rotor system, with a rated speed of 12 000 r/m and maximum angular momentum of $200 \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}$ were calculated. These losses were then used to determine the temperature distribution, which was based on a three-dimensional finite-element model. A thermal-structure coupled simulation analysis was also performed. The results reveal that the maximum temperature occurs at the stator of the high-speed motor and has a value of $48.3 \text{ }^\circ\text{C}$. Finally, the temperature rise of the prototype is verified by experiment. According to the experiments, the maximum temperature occurs at the stator of the high-speed motor, and its maximum value is $51.8 \text{ }^\circ\text{C}$. The error is 6.8% when the experimental results are compared with predicted values. The loss calculation and finite element analysis of the thermal field are verified by the temperature rise experiment. The experimental results provide theoretical reference for overall structure optimization.

Key words: magnetically suspended; control moment gyroscope; loss calculation; thermal field analysis; finite element analysis

1 引言

控制力矩陀螺作为航天器的惯性执行机构,通过角动量的交换产生控制力矩,可以精准地实现航天器姿态的调整和控制^[1-2]。与一般机械轴承支撑相比,磁悬浮控制力矩陀螺(Magnetically Suspended Control Moment Gyroscope, MSCMG)因其无接触、无润滑、主动振动抑制、输出力矩大、动态性能好及控制精度高等优点,在航天器姿态控制领域更具优势,可应用在如对地观测卫星、宇宙飞船以及空间站等大型航天器的姿态控制领域,是未来惯性执行机构的主要发展方向,有较大的研究价值^[3-6]。但控制力矩陀螺中的框架电机、磁轴承和高速电机中高频变化的磁场产生的铁损,控制电流在绕组中产生的铜损,最终都会转化为热的形式,使得陀螺温度升高,而陀螺应用于空间领域,真空工作环境,散热条件差,进一步加剧了局部温升。较高的温升会导致陀螺结构部件的强度降低,影响磁轴承的性能,降低陀螺寿命,对其运转可靠性和结构力学特性都有不利影响,不利于陀螺的安全运行^[3,7-8]。

国内外对磁悬浮电机和磁悬浮飞轮损耗和热分析研究较多,但少有针对单框架磁悬浮控制力矩陀螺(Single Gimbal Magnetically Suspended Control Moment Gyroscope, SGMSCMG)的损耗和热场分析研究。文献[9]对高功率密度永磁电机的转子涡流损耗建立了分析模型,综合考虑了气隙磁通密度谐波分量和集肤效应对涡流损耗的

影响。文献[10]以额定转速 30 000 r/min 的 30 kW 主动磁轴承高速永磁同步电机为研究对象,分析了定子铁损、风磨耗、磁轴承转子损耗、剩余损耗等,这些损耗产生的热量致使电机温度升高。文献[11]分析了 100 kW,转速 32 000 r/min 的高速磁悬浮电机转子风耗、涡流损耗、磁轴承铁心损耗,利用有限元的方法分析了高速转子的温度分布并进行了样机的对拖试验,对提高冷却结构设计,提高电机效率提供了参考。文献[12]采用二维有限元模型对磁悬浮飞轮的转子和定子组件进行了热结构仿真分析,对温度分布进行了模拟,对部件的热应力和变形进行了仿真计算,为组件的热结构设计提供了优化指导。文献[13]采用二维有限元分析方法,分析了一种磁悬浮储能飞轮系统的转子和定子损耗,对结构损耗产生的热量建立了热学模型进行模拟仿真,并对转子的损耗进行了实际测量,最后对仿真结果和实测数据进行了比较。文献[14]针对磁悬浮反作用飞轮在真空环境条件下工作,损耗产热不易散出的问题,计算了磁轴承和电机等主要产热量,用二维有限元与热网络结合的方法分析了磁悬浮反作用飞轮的温度场。文献[15]利用二维有限元方法对磁悬浮飞轮转子系统进行了温度仿真,分析了部件材料属性对温度场的影响。文献[16]基于损耗产热对磁悬浮控制力矩陀螺进行了三维有限元热场分析和热-结构耦合,并建立了热网络模型。文献[12-15]对于磁悬浮飞轮的温度场分析均采用二维有限元模型,相比于三维有限元分析误差较大,且没有考虑热-结构耦合对整体系统的影响。文献

[16]的损耗计算较为简单,忽略较多,对热场分布会有较大影响,且没有考虑框架电机损耗的影响。

相比于磁悬浮飞轮系统,SGMSCMG 转速更高,存在框架伺服系统,结构更为复杂,存在多种损耗产热形式,又工作在高真空的环境中,因此有必要对其损耗进行系统的分析研究,在损耗特性分析的基础之上进行温度场仿真,得到系统内部在各类损耗作用下的温度分布情况,为陀螺设计的可靠性提供参考依据。

本文针对 SGMSCMG 结构设计方案,对框架力矩无刷直流电机(Brushless DC Motor, BLDCM),两对径向磁轴承(Radial Magnetic Bearing, RMB),一对轴向磁轴承(Axial Magnetic Bearing, AMB),高速 BLDCM 通过建立损耗模型进行了系统性的损耗分析计算,基于损耗产热,利用三维有限元模型进行热场分析和热-结构耦合分析得到了整体结构温度分布和应力分布。最后,对样机进行了温升实验验证。

2 SGMSCMG 总体结构

SGMSCMG 整体结构主要由高速转子系统,支撑高速转子的框架和框架伺服动力系统三大部分组成。剖视图如图 1 所示,系统组成主要包括框架力矩 BLDCM,框架,陀螺房,以及上下对称

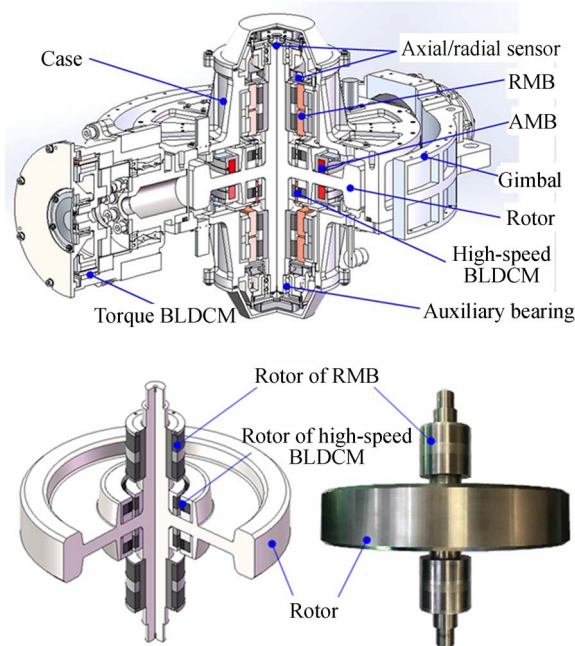


图 2 转子系统结构

Fig. 2 Structure scheme of rotor system

分布的 RMB, AMB, 高速 BLDCM 和轴向/径向位移传感器,保护轴承等。图 2 为高速转子系统,主要由上下对称分布的两对径向磁轴承转子组件和高速 BLDCM 的转子组件以及高速转子组成。

3 损耗计算

3.1 框架力矩 BLDCM 损耗计算

框架低速电机为高速陀螺转子系统提供扭矩动力,如图 3 所示,其结构主要由定子铁心、电枢绕组、永磁体和转子铁心组成。

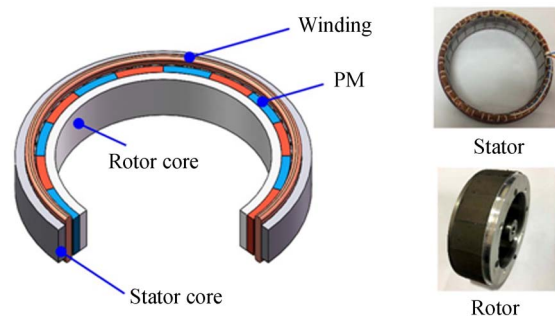


图 3 力矩电机结构

Fig. 3 Structure scheme of torque BLDCM

框架电机损耗包括定子绕组铜损、定子铁心、转子铁心的铁损以及永磁体的损耗。由于框架电机转速很低(最高转速 50 r/m),磁场变化频率低,所以定子、转子铁损和永磁体损耗均可忽略不计,主要为电枢绕组的铜损,绕组损耗占 98.6% 以上,故仅计算绕组损耗。由公式(1)可计算得出常温下电枢绕组的铜损为 8.212 5 W。

$$P_{\text{coil}} = R_{\text{coil}} i_{\text{coil}}^2 = \rho_{\text{Cu}} \frac{n_{\text{coil}} l_{\text{coil}}}{s_{\text{coil}}} [1 + \zeta(T_t - 20)] i_{\text{coil}}^2, \quad (1)$$

其中: R_{coil} , i_{coil} 为绕组阻值和通入电流, ρ_{Cu} 为铜导线电阻率(20 °C 时, $\rho_{\text{Cu}} = 1.75 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$), n_{coil} 、 l_{coil} 分别为线圈匝数和单匝线圈周长, s_{coil} 为单根导线的横截面积, ζ 为铜的温度影响系数($\zeta = 0.00393/^\circ\text{C}$), T_t 为绕组工作温度,取室温 25 °C 进行计算。

3.2 磁轴承损耗计算

磁轴承损耗包括径向磁轴承损耗和轴向磁轴承损耗,损耗类型分为铁损和铜损。其中,铁损包括磁滞损耗,涡流损耗和剩余损耗,铜损为绕组线圈电流产生的损耗。

3.2.1 RMB 铁损计算

如图 4 所示,径向磁轴承主要由包括定子铁心,转子铁心,铜线绕组,导磁套,导磁环与隔环等组成,外部为钛合金安装薄筒。为缩小磁轴承体积和降低功耗,RMB 采用永磁偏置的结构形式^[17-18]。

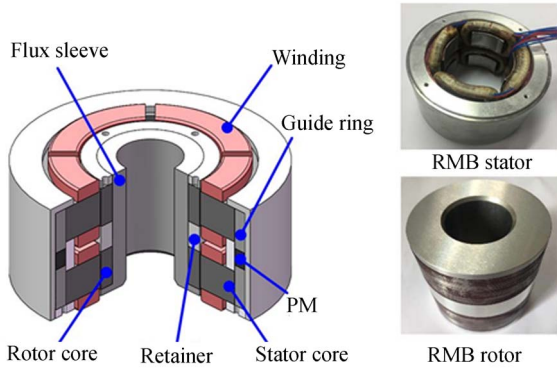


图 4 RMB 结构

Fig. 4 Structure scheme of RMB

为减小铁心损耗,转子与定子铁心采用 0.1 mm 的高饱和磁感应强度的软磁材料铁钴钒软磁合金 1J22 冲片叠压组成,可有效削减铁心轴向感应涡流,减少损耗的产生。

铁损取决于铁心材料的损耗系数,磁通密度幅值和磁场变化频率,由磁滞损耗,涡流损耗和剩余损耗三部分组成。

$$P_{R-Fe} = P_{R-hy} + P_{R-ed} + P_{R-ex}, \quad (2)$$

$$\begin{cases} P_{R-hy} = k_{hy} f_R B_R^\alpha \rho_{ron} V_R \\ P_{R-ed} = k_{ed} f_R^2 B_R^2 \rho_{ron} V_R \\ P_{R-ex} = k_{ex} f_R^{1.5} B_R^{1.5} \rho_{ron} V_R \end{cases}, \quad (3)$$

式(2)中 P_{R-hy} 为磁滞损耗, P_{R-ed} 为涡流损耗, P_{R-ex} 为剩余损耗。式(3)中 k_{hy} , k_{ed} , k_{ex} 分别为磁滞损耗、涡流损耗和剩余损耗的损耗系数, f_R 为 RMB 中磁场变化频率, B_R 为最大磁通密度, α 为 Steinmetz 常数, ρ_{ron} 为铁心材料密度, V_R 为 RMB 铁心有效体积。

各损耗系数和 Steinmetz 常数可由直接曲线拟合计算的方式得到。如图 5 所示为不同磁通密度和工作频率下的损耗功率曲线,将损耗功率曲线代入到公式(2)和(3)中,拟合结果如表 1 所示。

利用表 1 所得系数,可得 RMB 损耗计算结果如表 2,定子铁心损耗为 0.583 8 W,转子铁心损耗为 0.142 4 W。相比磁滞损耗和涡流损耗,剩余损耗所占比例很小。

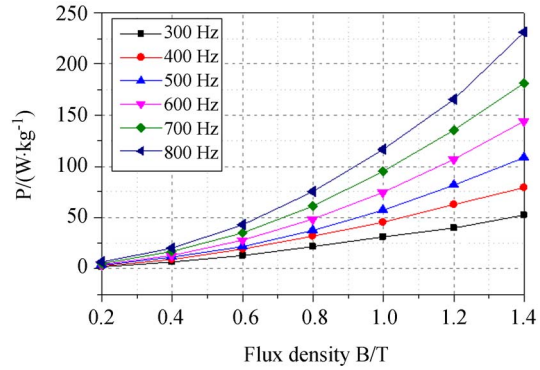


图 5 1J22 损耗功率曲线

Fig. 5 Loss curves of 1J22

表 1 1J22 损耗系数拟合结果

Tab. 1 Loss coefficient fitting results of 1J22

系数	k_{hy}	k_{ed}	k_{ex}	α
值	2.19e-3	6.19e-5	4.13e-7	1.89

表 2 RMB 定子铁心和转子铁心损耗值

Tab. 2 Loss calculation of RMB stator core and rotor core

	频率 /Hz	最大磁密 /T	铁心体积 /mm ³	损耗 /W
定子	200	1.35	57 823.81	0.583 8
转子	200	1.15	19 209.02	0.142 4

RMB 的其余部分导磁套、导磁环、永磁体为实心整体结构,计算方法与叠层不同。剩余损耗很小,可忽略,损耗包括磁滞损耗和涡流损耗两部分,如公式(4),其中 P_{S-hy} 为磁滞损耗, P_{S-ed} 为涡流损耗。

$$P_{Fe-S} \approx P_{S-hy} + P_{S-ed} = (k_{S-hy} + k_{S-ed}) \sigma_S \delta_S^2 f_S^2 B_S^2 V_S, \quad (4)$$

式中: σ_S 为各零件的电导率, δ_S 为各零件有效厚度, k_{S-hy} , k_{S-ed} 分别为磁滞损耗系数,涡流损耗系数, f_S , B_S , V_S 分别为磁场变化频率、磁通密度幅值和有效体积。导磁套、导磁环、永磁体具体参数和计算所得损耗值如表 3 所示。

表 3 RMB 其余结构件损耗

Tab. 3 Loss value of the rest of RMB

部分	电导率 /($S \cdot m^{-1}$)	频率 /Hz	最大磁密 /T	有效体积 /mm ³	铁损 /W
导磁套	2.5×10^6	200	1.215	52 780.02	0.617 2
导磁环	2.5×10^6	200	1.131	37 246.72	0.377 4
永磁体	1.2×10^6	200	0.859	15 682.83	0.078 4

3.2.2 AMB 铁损计算

一对 AMB 上下对称安装在高速转子的两侧,如图 6 所示为一个 AMB,其结构主要包括轴承盘,绕组,永磁体,磁轭和模拟推力盘等。其中轴承盘,磁轭所用材料为 1J22,模拟推力盘为模拟替代陀螺转子起到推力盘的作用。与 RMB 相同,为缩小磁轴承体积和降低功耗,AMB 也采用永磁偏置的结构形式。

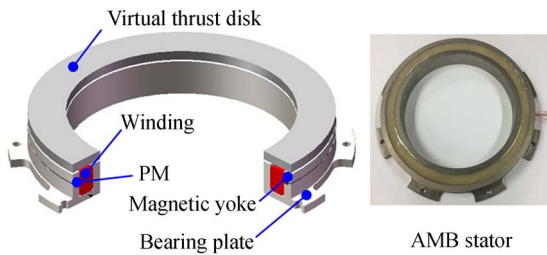


图 6 AMB 结构

Fig. 6 Structure scheme of AMB

AMB 的铁损产生于轴承盘、磁轭、模拟推力盘及永磁体 4 部分,如公式(5)所示:

$$P_{Fe-A} = P_{A-Bp} + P_{A-My} + P_{A-Vt} + P_{A-PM}, \quad (5)$$

式中: P_{A-Bp} 为轴承盘损耗, P_{A-My} 为磁轭损耗, P_{A-Vt} 为模拟推力盘损耗, P_{A-PM} 为永磁体损耗。这些损耗产生的零件都是实体结构,损耗包括磁滞损耗和涡流损耗。采用公式(4)计算,各部件损耗值如表 4 所示。

表 4 AMB 铁损值

Tab. 4 Iron losses in AMB

部分	电导率 /($s \cdot m^{-1}$)	频率 /Hz	最大磁 密/T	有效体积 / mm^3	铁损 /W
轴承盘	3.7×10^6	200	0.95	85 387.96	0.727 9
磁轭	3.7×10^6	200	0.91	10 930.23	0.152 7
模拟推力盘	10.2×10^6	200	0.83	43 982.30	0.481 7
永磁体	1.1×10^6	200	1.01	4 325.97	0.070 8

3.2.3 磁轴承铜损计算

磁轴承的控制电流在绕组线圈中产生铜损,2 对 RMB 每对各包含 8 个铜线绕组,共 16 个;两个 AMB 各含有一个铜线绕组,共 2 个。铜线电阻率受温度影响,铜损计算如式(1)。图 7 为径向磁轴承和轴向磁轴承绕组损耗曲线,表 5 为室温下径向磁轴承和轴向磁轴承绕组的损耗值。

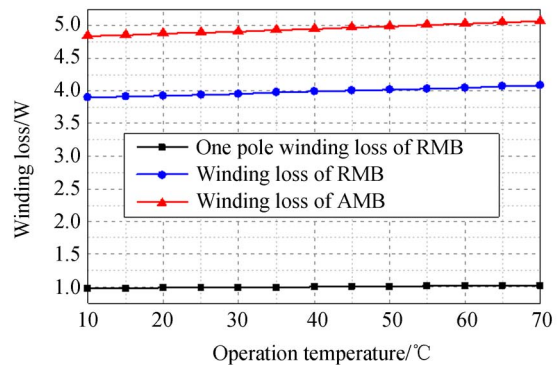


图 7 磁轴承铜损随温度变化曲线

Fig. 7 Copper loss curve of MB varying with temperature

表 5 RMB 和 AMB 铜损

Tab. 5 Copper losses of RMBs and AMBs

绕组	电阻/ Ω	电流/A	铜损/W
RMB 绕组(1~16)	0.85	1.07	0.981 7
AMB 绕组(1~2)	15	0.57	4.873 5

3.3 高速 BLDCM 损耗计算

高速 BLDCM 具有功率因数高的优点,在高速旋转机械领域应用广泛,可有效降低系统质量^[19]。空间应用提出了较高可靠性和低功耗的要求,采用无定子铁心的 BLDCM^[20-21]。

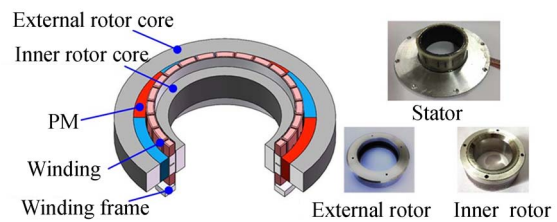


图 8 空心杯高速 BLDCM 三维结构

Fig. 8 Structure scheme of coreless high-speed BLDCM

如图 8 所示,高速 BLDCM 额定转速 12 000 r/m,驱动转子系统高速旋转,结构组成主要包括外转子铁心,内转子铁心,永磁体,绕组及绕组骨架等。外转子铁心,永磁体和内转子安装在高速转子上,定子绕组组件安装在陀螺房上。

3.3.1 转子损耗计算

转子损耗包括转子铁心损耗和永磁体损耗,其中转子铁损分为磁滞损耗,涡流损耗以及剩余损耗。转子铁心损耗又分为外转子铁心损耗和内转子铁心损耗两部分,考虑内部谐波对转子损耗

的影响^[22]。BLDCM 所用铁心材料为 1J22, 与 RMB 及 AMB 铁心材料相同, 所以损耗系数和

Steinmetz 常数一致。

$$P_{Fe-HM} = P_{HM-hy} + P_{HM-ed} + P_{HM-ex}, \quad (6)$$

$$\begin{cases} P_{HM-hy} = k_{hy} f_{HM} \sum_{k=0}^n k (B_{kmax}^\alpha + B_{kmin}^\alpha) \rho_{iron} V_{HM} \\ P_{HM-ed} = k_{ed} f_{HM}^2 \sum_{k=0}^n k^2 (B_{kmax}^2 + B_{kmin}^2) \rho_{iron} V_{HM} \\ P_{HM-ex} = \frac{k_{ex}}{(2\pi)^{\frac{3}{2}}} \frac{1}{T} \int_0^T \left(\left| \frac{dB_r(t)}{dt} \right|^{1.5} + \left| \frac{dB_\theta(t)}{dt} \right|^{1.5} \right) dt \rho_{iron} V_{HM} \end{cases}, \quad (7)$$

式中: P_{HM-hy} , P_{HM-ed} , P_{HM-ex} 分别为高速 BLDCM 的磁滞损耗, 涡流损耗和剩余损耗; k_{hy} 、 k_{ed} 、 k_{ex} 、 α 、 ρ_{iron} 与式(3)中含义相同; f_{HM} 为 BLDCM 中基波磁场变化频率, 为机械频率的 4 倍(含有四对极); B_{kmax} 、 B_{kmin} 为第 k 次谐波最大磁通密度和最小磁通密度; B_r 、 B_θ 为径向磁通密度分量和切向磁通密度分量; V_{HM} 为 BLDCM 铁心有效体积; T 为磁场变化周期。

当 SGMSCMG 以额定转速运行时, 将内转子铁心中的磁通密度进行分解, 得到各次谐波的最大值和最小值, 如图 9 所示, 忽略超过 16 阶的极小谐波, 可求得内转子磁滞损耗和涡流损耗。图 10 所示为内转子铁心径向磁通密度分量和切向磁通密度分量随时间变化值, 可求得内转子剩余损耗。同理, 图 11 为外转子铁心前 16 阶磁通密度谐波, 图 12 所示为外转子铁心径向磁通密度分量和切向磁通密度分量随时间变化值。内转子铁心和外转子铁心铁损计算结果如表 6 所示。

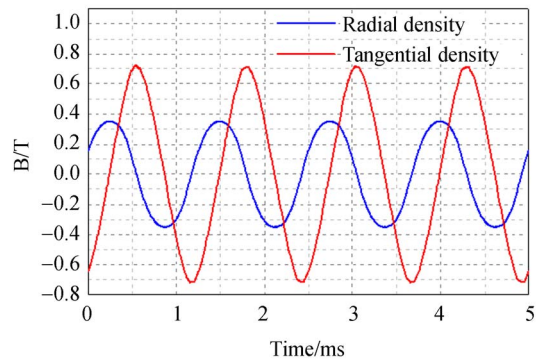


图 10 内转子磁密分量

Fig. 10 Flux density component of inner rotor core

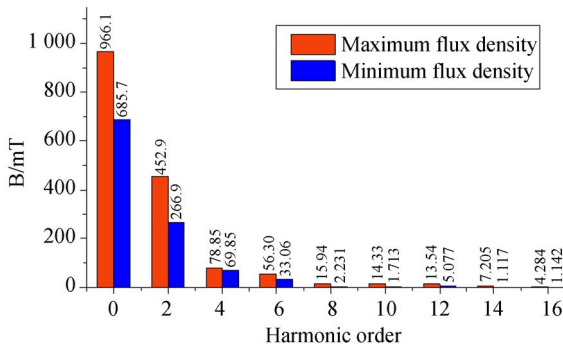


图 9 内转子铁心磁密谐波幅值

Fig. 9 Flux density harmonics amplitude of inner rotor core

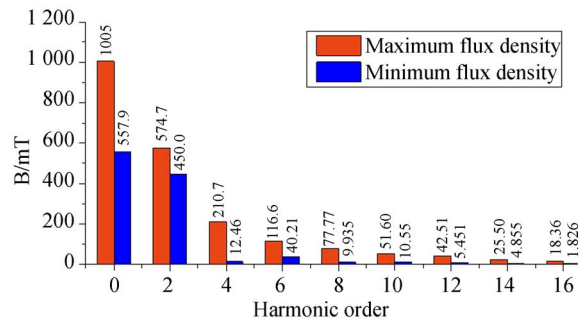


图 11 外转子铁心磁密谐波幅值

Fig. 11 Flux density harmonics amplitude of external rotor core

表 6 内/外转子铁心损耗

Tab. 6 Iron loss of inner/external rotor core

(W)

部件	磁滞损耗	涡流损耗	剩余损耗	铁损
内转子	0.020 1	0.191 2	0.001 3	0.212 6
外转子	0.027 3	0.325 8	0.002 1	0.355 2

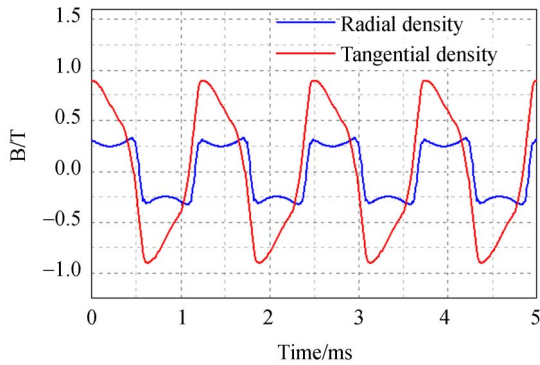


图 12 外转子磁密分量

Fig. 12 Flux density component of external rotor core

永磁体与外转子铁心粘接为一体,随转子高速旋转,所以转子损耗除内外转子铁心损耗还包括永磁体损耗。

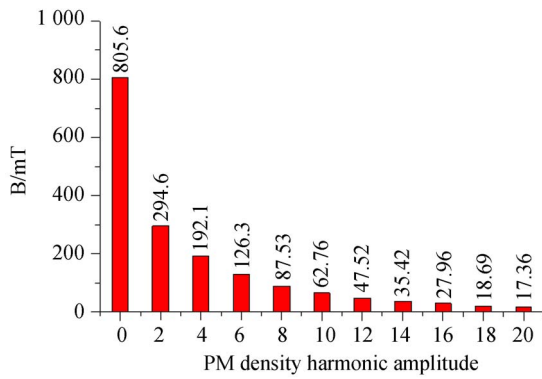


图 13 永磁体磁密谐波幅值

Fig. 13 Magnetic density amplitude of PM

永磁体内部由于存在高频谐波而产生涡流损耗。如图 13,忽略大于 20 阶的极小谐波,取前 20 阶谐波进行永磁体涡流损耗计算,某一阶的涡流损耗计算如公式(8)所示。

$$P_{ie} = \frac{1}{T} \int_0^T \int_0^{\frac{d_p}{2}} \int_0^L \int_{-\frac{\tau_i}{2}}^{\frac{\tau_i}{2}} \frac{J_i^2(x, t)}{\sigma_i} dx dy dz dt. \quad (8)$$

如公式(9)所示,对前 20 阶涡流损耗进行积分求和。

$$P_p = \sum_1^n \frac{\alpha_p \xi_p H_p L_p \tau_{pn} B_{pn} \omega_{en}}{16} \left[\frac{\delta_{pn}}{3 \tau_{pn}} \frac{\text{Sinh} \frac{\delta_{pn}}{\tau_{pn}} - \text{Sin} \frac{\delta_{pn}}{\tau_{pn}}}{\text{Cosh} \frac{\delta_{pn}}{\tau_{pn}} - \text{Cos} \frac{\delta_{pn}}{\tau_{pn}}} \right], \quad (9)$$

式中: α_p 为电机的极弧系数 ($\alpha_p = 0.76$), ξ_p 为永磁体电导率 ($\xi_p = 1.2 \times 10^6 \text{ S/m}$), H_p 为永磁体轴向厚度, L_p 为永磁体径向厚度, τ_{pn} 为次谐波极距

($\tau_{pn} = \pi D / 2np$, p 为极对数), B_{pn} 为各次谐波磁通密度幅值, ω_{en} 永磁体磁密电角度 ($\omega_{en} = 2\pi n f_{HM}$), 系数 $\delta_{pn} = 1 / (\pi n f_{HM} \mu_p \xi_p)^{1/2}$ ($\mu_p = 1.02$, 为永磁体相对磁导率)。将永磁体各参数代入公式(9)中可得永磁体损耗为 3.252 9 W。

3.3.2 定子损耗计算

高速 BLDCM 的定子组件主要由电枢绕组线圈和非导电材料聚酰亚胺制成的杯型骨架组成,所以定子的损耗主要为电枢绕组产生的铜损,利用公式(1)可得到室温下高速电机电枢绕组的铜损为 2.521 6 W。

4 热场分析和热-结构耦合

4.1 热场分析

SGMSCMG 系统内部结构紧凑复杂,散热条件较差,损耗产热部件较为分散,损耗发热会导致局部温度上升,产生热应力,如果温度过高会严重影响陀螺性能。有必要对整体进行温度分布分析,采用三维有限元对整体系统进行温度分布仿真。陀螺内部为真空,热的传递方式有热传导和热辐射两种形式。

为进行 SGMSCMG 的三维有限元温度分布仿真,需进行热生成率计算,求得各损耗部件单位体积发热率 q_v 。

$$q_v = \frac{P_{\text{loss}}}{V_{\text{loss}}}, \quad (10)$$

式中: V_{loss} 是各损耗部件的有效体积, P_{loss} 为各损耗值。

利用公式(10)计算各损耗部件单位体积发热率。表 7 为力矩 BLDCM、高速 BLDCM 以及 RMB 和 AMB 线圈绕组铜损的单位体积热生成率,表 8 为各铁心和永磁体损耗的单位体积热生成率。

表 7 绕组铜损热生成率

Tab. 7 Heat rate of copper losses

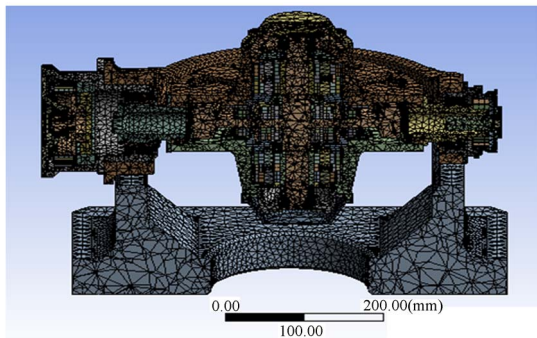
线圈	铜损 /W	体积 /mm ³	热生成率 / (W · m ⁻³)
RMB 线圈 1~16	0.981 7	48 039.57	20 257.26
AMB 线圈 1~2	4.873 5	62 264.14	78 271.38
高速 BLDCM 线圈 1~24	2.521 6	7 700.80	327 238.78
力矩 BLDCM 线圈 1~48	8.212 5	38 118.50	215 118.64

表 8 铁损热生成率

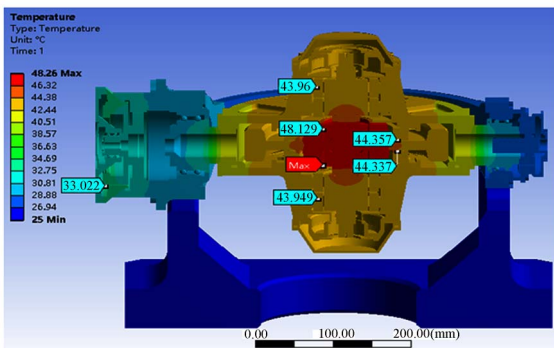
Tab. 8 Heat rate of iron losses

部分	铁损 /W	体积 /mm ³	热生成率 /($W \cdot m^{-3}$)
高速 BLDCM	外转子铁心	0.355 2	23 222.65
	内转子铁心	0.212 6	11 085.80
	永磁体	3.259 2	12 267.92
	定子铁心 1~4	0.583 8	57 823.81
RMB	转子铁心 1~4	0.142 4	19 209.02
	导磁环 1~4	0.377 4	37 246.72
	导磁套 1~2	0.617 2	52 780.02
	永磁体 1~2	0.078 4	15 682.83
AMB	主磁轭 1~2	0.727 9	85 387.96
	磁轭 1~2	0.152 7	10 930.23
	模拟推力盘	0.481 7	43 982.30
	永磁体 1~2	0.070 8	4 325.97

建立三维有限元模型,如图 14(a),整体结构剖分单元为 429 697 个,其中陀螺房内部剖分密度较大,而外框架和测试座剖分较疏,这样既提高



(a) SGMSCMG 有限元网格划分
(a) 3-D finite element mesh of SGMSCMG



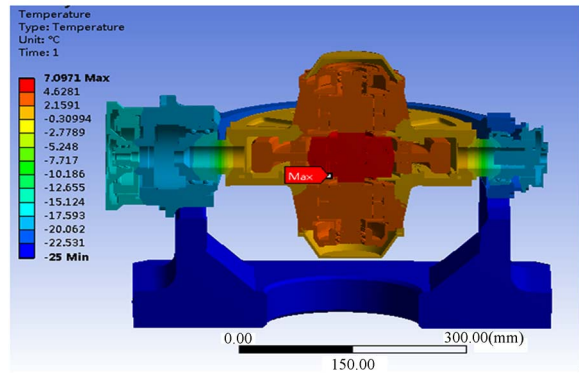
(b) SGMSCMG 温度分布
(b) Predicted temperature rise of SGMSCMG

图 14 SGMSCMG 有限元温度分布仿真

Fig. 14 Predicted temperature rise of SGMSCMG by FEM

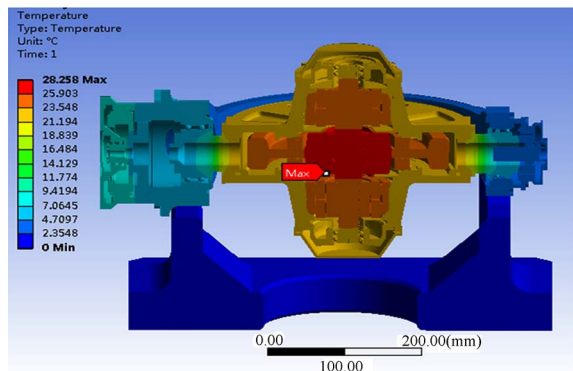
了计算速度,又保证了计算精度。将各损耗部件的产热速率作为载荷施加到三维有限元模型中得到整体温度分布,如图 14(b),最大温度产生于高速 BLDCM 的定子绕组处,最大温度为 48.26 °C。这是因为高速电机产热率高,又处于整体结构中心位置,散热较差,导致局部温度较高。

为探究不同环境温度对 SGMSCMG 的整体结构温升情况的影响,针对于不同环境温度对



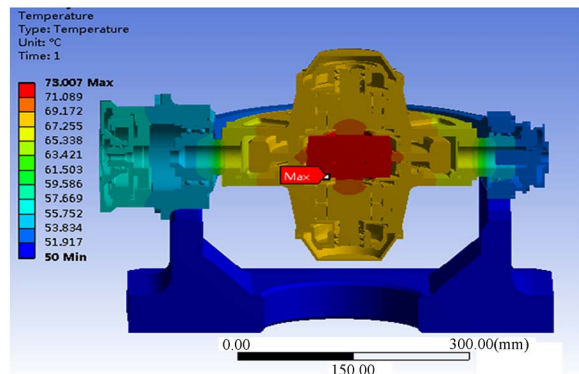
(a) -25 °C 时温度分布

(a) Temperature rise at -25 °C of SGMSCMG



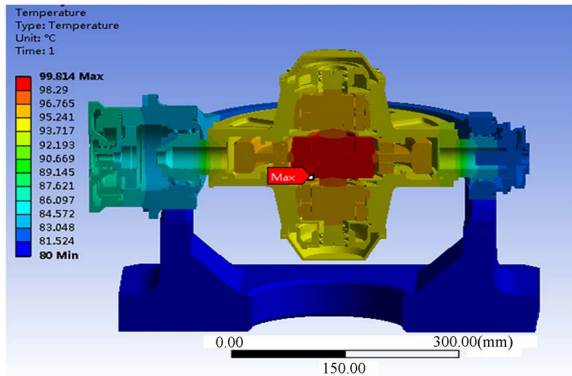
(b) 0 °C 时温度分布

(b) Temperature rise at 0 °C of SGMSCMG



(c) 50 °C 时温度分布

(c) Temperature rise at 50 °C of SGMSCMG



(d) 80 °C 时温度分布

(d) Temperature rise at 80 °C of SGMSCMG

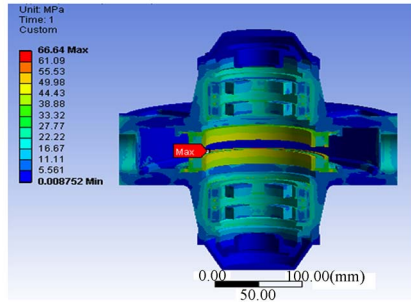
图 15 不同环境温度下 SGMSCMG 温度分布

Fig. 15 Predicted temperature rise at different ambient temperatures of SGMSCMG

SGMSCMG 进行温度分布仿真。如图 15(a)~(d)所示,环境温度从低到高变化时对应的温升分别为 32.1 °C, 28.3 °C, 23.0 °C, 19.8 °C,可以得到环境温度越低 SGMSCMG 温升幅度越明显,随着环境温度的升高,环境温度影响变大,由损耗产热导致的温升幅度减小。

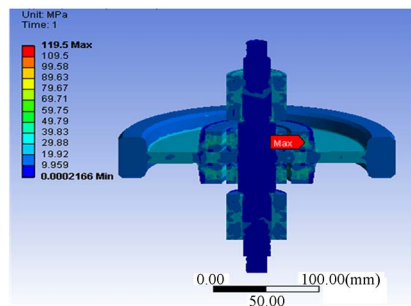
4.2 热-结构耦合分析

在热场分析结果的基础上,结合静力学对整体结构进行热-结构耦合分析,考虑转子系统高速旋转的影响,施加 1 256.6 rad/s 的额定转速。图 16(a)为整体应力分布,图 16(b)为陀螺房定子应力分布图,图 16(c)为高速转子应力分布图。可以得出,陀螺房定子部分最大应力处于轴向磁轴承定子磁轭,高速转子最大应力位于高速电机外转子铁心,最大为 119.5 MPa。表 9 为高速转子系统定子和转子组件最大应力安全性分析,可见强度均满足安全要求。



(b) 定子应力分布

(b) Stress distribution of stator



(c) 转子应力分布

(c) Stress distribution of rotor

图 16 SGMSCMG 热-结构耦合应力分布

Fig. 16 Thermal-structural coupling stress distribution of SGMSCMG

表 9 最大应力处安全系数

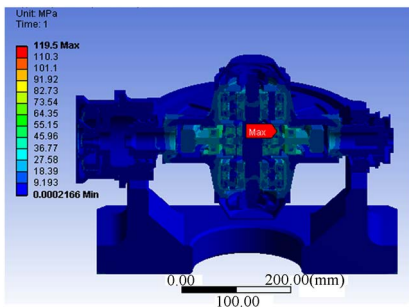
Tab. 9 Safety factor of Maximum stress location

部件	最大应力处	最大应力值 /MPa	屈服强度 /MPa	安全系数
陀螺定子	轴向磁轴承磁轭	66.64	490	7.35
陀螺转子	高速电机外转子铁心	119.50	490	4.10

5 温升实验

为验证损耗计算和有限元温度分布仿真的准确性,将 SGMSCMG 样机抽真空,提升至额定转速 12 000 r/m,进行温升实验。热敏传感器安装位置如图 17 所示,分别位于径向磁轴承、轴向磁轴承、高速 BLDCM 和框架力矩 BLDCM 的定子处,共 7 个。为尽可能避免由于传感器本身误差的影响,保证测量的准确性,选用热敏传感器精度为:±0.1 °C+0.0017|t|(|t|为实际温度的绝对值),测量范围为:−50 °C~250 °C。

图 18 为温升实验装置,环境温度 21 °C,陀螺房内部真空度 2.1 Pa,每隔 20 s 记录热敏传感器



(a)SGMSCMG 应力分布

(a) Stress distribution of SGMSCMG

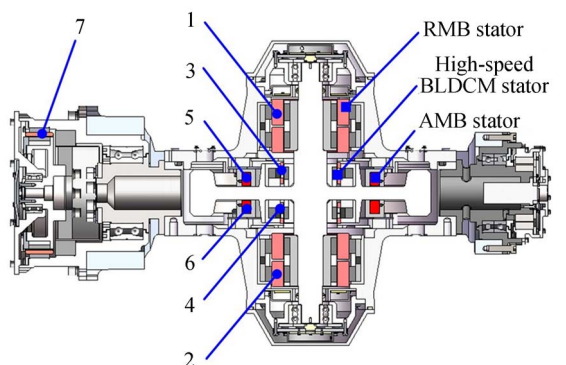


图 17 SGMSCMG 热敏传感器安装位置
Fig. 17 Location of thermistor for SGMSCMG

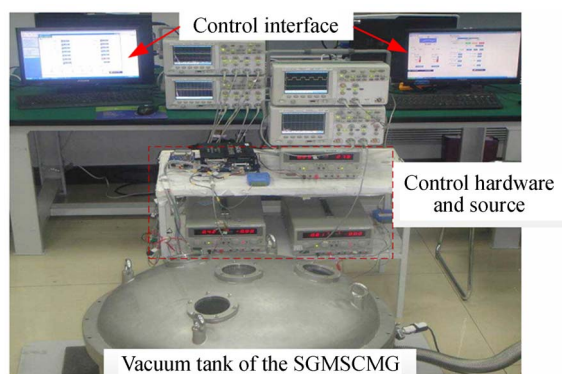


图 18 SGMSCMG 样机温升试验
Fig. 18 Temperature rise test of SGMSCMG prototype

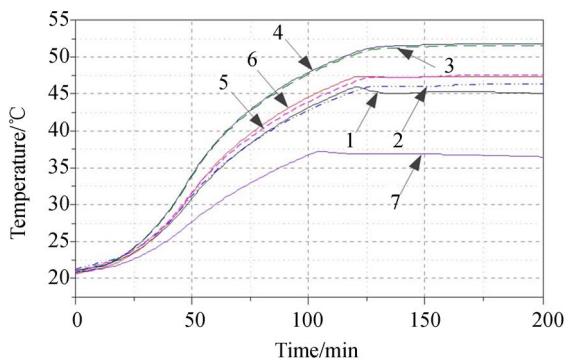


图 19 常温下 SGMSCMG 温升曲线
Fig. 19 Measured temperature curves of SGMSCMG at normal temperature

表 10 温度预测和实验数据对比

Tab. 10 Comparison between analytical and measured data of temperature rise at normal temperatures

热敏传感器位置	热敏电阻 编号	计算值 /°C	测量值 /°C	误差/%
RMB 定子线圈 1	1	44.0	45.3	2.9
RMB 定子线圈 2	2	43.9	46.3	5.2
高速 BLDCM 定子 1	3	48.1	51.5	6.6
高速 BLDCM 定子 2	4	48.3	51.8	6.8
AMB 定子线圈 1	5	44.4	47.6	6.7
AMB 定子线圈 2	6	44.3	47.4	6.5
力矩 BLDCM 定子线圈	7	33.0	36.2	8.8

数据,连续测得 200 min,得到温升曲线如图 19。由表 10 为各位置温度计算值与实验测量值的对比,可得计算值和测量值大小和趋势较为吻合。由于损耗计算时存在部分忽略的情况而导致实测值和计算值有所偏差,如框架电机忽略了铁损,且框架电机处于整体结构最外端,受环境温度影响较大,但误差为 8.8%,小于 10%,满足工程要求。

6 结 论

SGMSCMG 在航天领域应用中,损耗和温升是一个重要研究方向。本文以额定转速 12 000 r/m,最大角动量 200 N·m·s 的 SGMSCMG 为研究对象,对系统中的径向磁轴承、轴向磁轴承、高速电机和力矩电机产生的铁损和铜损进行了分析计算。基于损耗产热问题,利用三维有限元软件对 SGMSCMG 进行了温度分布和热-结构耦合仿真,得到了陀螺整体的温度分布和应力分布情况:最大温度处于高速电机的定子绕组处,最大值为 48.3 °C;最大应力处于高速转子外转子铁心处,最大值为 119.5 MPa。最后进行了样机的温升实验验证,实验测得最大温度处于高速电机的绕组位置,最大值为 51.8 °C。计算值和实验测量值误差为 6.8%。温升实验验证了损耗分析和热场分析,误差较小。上述研究结果为 SGMSCMG 的损耗问题、温度分布以及高速转子系统结构可靠性提供了理论参考,对整体结构的进一步优化结构设计和热设计有重要意义。

参考文献:

- [1] LI G, WU D Y, LU M, *et al.*. Research on high accuracy, long life, and high reliability technique of control moment gyroscope [C]. 2016 *IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*, Harbin, 2016: 1536-1540.
- [2] 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(04): 662-666.
- HAN B CH, HU G, FANG J CH. Optimization design of magnetic suspended gyroscope rotor [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(4): 662-666. (in Chinese)
- [3] HAN B CH, ZHENG S Q, LI H T, *et al.*. Weight-reduction design based on integrated radial-axial magnetic bearing of a large-scale MSCMG for space station application [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2017, 64(3): 2205-2214.
- [4] PARK S H, LEE C W. Decoupled control of a disk-type rotor equipped with a three-pole hybrid magnetic bearing [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2010, 15(5): 793-804.
- [5] HAN B CH, ZHENG S Q, WANG Z, *et al.*. Design, modeling, fabrication, and test of a large-scale single-gimbal magnetically suspended control moment gyro [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2015, 62(12): 7424-7435.
- [6] 谢进进, 刘刚, 文通. 双框架磁悬浮控制力矩陀螺磁轴承负载力矩复合补偿的控制[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(8): 2211-2219.
- XIE J J, LIU G, WEN T. Composite compensation for load torque of active magnetic bearing in DGM-SCMG [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(8): 2211-2219. (in Chinese)
- [7] ZHENG S Q, LI H T, HAN B CH, *et al.*. Power consumption reduction for magnetic bearing systems during torque output of control moment gyros [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2017, 32(7): 5752-5759.
- [8] GERADA D, MEBARKI A, SHANEL M, *et al.*. Design considerations of high-speed induction machines for high-temperature applications [C]. 2008 18th *International Conference on Electrical Machines*, Vilamoura, 2008: 1-6.
- [9] LEE S Y, JUNG H K. Eddy current loss analysis in the rotor of permanent magnet traction motor with high power density [C]. 2012 *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, Seoul, 2012: 210-214.
- [10] AN J, BINDER A, SABIRIN C R. Loss measurement of a 30 kW high speed permanent magnet synchronous machine with active magnetic bearings [C]. 2013 *International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, Busan, 2013: 905-910.
- [11] HUANG Z Y, FANG J CH, 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*, 2016, 63(4): 2027-2035.
- [12] ZHANG SH N, HAN B CH, LI H, *et al.*. Thermal and structural coupling analysis of magnetically suspended flywheel rotor [C]. *Proc. SPIE, Sixth International Symposium on Instrumentation and Control Technology: Sensors, Automatic Measurement, Control, and Computer Simulation*, 2006, 6358: 561-568.
- [13] HUYNH C, ZHENG L, MCMULLEN P. Thermal performance evaluation of a high-speed flywheel energy storage system [C]. *IECON 2007 33rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Taipei*, 2007: 163-168.
- [14] 王春娥, 房建成, 汤继强, 等. 磁悬浮反作用飞轮热设计方法与实验研究[J]. *航空学报*, 2011, 32(4): 598-607.
- WANG CH E, FANG J CH, TANG J Q, *et al.*. Thermal design method and experimental research of magnetically suspended reaction flywheel [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2011, 32(4): 598-607. (in Chinese)
- [15] 张姝娜, 房建成, 韩邦成, 等. 磁悬浮飞轮转子组件

- 温度场分析与研究 [J]. 中国惯性技术学报, 2007, 15(1): 67-71.
- ZHANG SH N, FANG J CH, HAN B CH, *et al.*. Thermal analysis and research on magnetically suspended flywheel rotor [J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2007, 15(1): 67-71. (in Chinese)
- [16] 韩伟涛, 刘刚, 孙津济, 等. 磁悬浮控制力矩陀螺热-结构耦合分析与研究 [J]. 北京航空航天大学学报, 2016, 42(2): 391-399.
- HAN W T, LIU G, SUN J J, *et al.*. Thermal-structure coupling analysis and research of MSC-MG [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2016, 42(2): 391-399. (in Chinese)
- [17] 房建成, 杨磊, 孙津济, 等. 一种新型磁悬浮飞轮用永磁偏置径向磁轴承 [J]. 光学精密工程, 2008(3): 444-451.
- FANG J CH, YANG L, SUN J J, *et al.*. Novel permanent-magnet bias radial magnetic bearing used in magnetical suspended flywheel [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(3): 444-451. (in Chinese)
- [18] ZHILICHEV Y. Analysis of a magnetic bearing pair with a permanent magnet excitation [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2000, 36(5): 3690-3692.
- [19] GERADA D, MEBARKI A, BROWN N L, *et al.*. High-speed electrical machines: technologies, trends, and developments [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2014, 61(6): 2946-2959.
- [20] ZHOU X X, CHEN X, ZENG F Q, *et al.*. Fast commutation instant shift correction method for sensorless coreless BLDC motor based on terminal voltage information [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2017, 32(12): 9460-9472.
- [21] LIU K, FU X H, LIN M Y, *et al.*. AC copper losses analysis of the ironless brushless DC motor used in a flywheel energy storage system [J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2016, 26(7): 1-5.
- [22] 江善林, 邹继斌, 徐永向, 等. 考虑旋转磁通和趋肤效应的变系数铁耗计算模型 [J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(3): 104-110.
- JIANG SH L, ZOU J B, XU Y X, *et al.*. Variable coefficient iron loss calculating model considering rotational flux and skin effect [J]. *Proceedings of the Csee*, 2011, 31(3): 104-110. (in Chinese)

作者简介:



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

通讯作者:



贺赞(1992—),男,河南周口人,硕士研究生,2016年于北京工业大学获得学士学位,主要从事磁悬浮控制力矩陀螺和磁悬浮电机结构研究。E-mail: hezan17@163.com