

# 高精度盘式永磁电机温度分析与研究

高 尧, 曹 君, 邹春花, 汪 奇

(博众精工科技股份有限公司, 江苏 苏州 215000)

**摘 要:** 以高精度无槽盘式永磁电机为研究对象, 建立了电机三维电磁仿真模型。详细分析了该电机反电动势和转矩特性, 避免由高次谐波引起的定、转子及永磁体涡流损耗, 有效改善了电机的热性能, 为进一步研究打下基础。建立了三维温度场仿真模型, 分析了热源分布和传热过程, 计算了电机在自然散热条件下温度的稳态分布。最后通过电机温升试验, 验证了理论分析的正确性与合理性。

**关键词:** 盘式永磁电机; 无槽; 损耗; 温度场

**中图分类号:** TM 351 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2019)07-0056-06

## Temperature Analysis and Research on High Precision Disc-Type Permanent Magnet Motor

GAO Yao, CAO Jun, ZOU Chunhua, WANG Qi

(BOZHON Precision Industry Technology Co., Ltd., Suzhou 215000, China)

**Abstract:** The high precision slotless disc-type permanent magnet motor was studied. A three-dimensional electromagnetic model of the machine was established. The back electromotive force and torque were analyzed. The eddy current losses of stator, rotor and permanent magnet caused by high order harmonics could be avoided. The thermal performance was improved and the foundation for further study could be provided. Then, the three-dimensional temperature field model was built. The heat source distribution and heat transfer process were analyzed. The steady state temperature field distribution of the machine under natural heat dissipation condition was calculated. Finally, the validity and reasonability of the theoretical analysis were verified by the temperature rise experiment.

**Key words:** disc-type permanent magnet motor; slotless; loss; temperature field

## 0 引 言

盘式永磁电机具有轴向尺寸短、重量轻、体积小、结构紧凑、转动惯量小等优点, 广泛应用于精密定位等场合, 并且对温升的要求较高, 故有必要对盘式电机的温升进行分析<sup>[1-4]</sup>。

国内外专家学者对盘式电机温度场进行了广泛关注和大量的研究。文献[5-6]基于经验公式, 建立了2D热网络电机模型, 并与3D有限元电机模型进行了比较, 并推导了电机各部件的瞬态温度趋势。文献[7]对1台无轭铁和分段电枢电机进行了有限元分析, 分析结果表明, 磁铁分割

和环氧涂层阻止了永磁体和背铁之间的涡流路径, 显著减少了转子损耗。文献[8]提出一种使用 $T-\Omega$ 方法计算电机瞬态场铁心损耗, 并通过功率平衡方程验证了该方法的有效性。文献[9-10]通过建立盘式电机温度场流场流固耦合求解域模型, 分析了额定工况下电机部件的温度分布, 分析了影响盘式电机温升的因素, 通过试验, 对电机温度过高进行了改进性探索。文献[11]通过建立仿真平台, 分析了电机的温升原因以及在自然条件下电机温度场分布状况, 并对电机的冷却方式进行了研究。文献[12]分析了一种用于导弹舵机的无铁心盘式电机的损耗, 并对该电机进

作者简介: 高 尧(1988—), 男, 工程师, 研究方向为高精运动平台设计及控制理论。

曹 君(1992—), 男, 工程师, 研究方向为高精度电机机械结构设计。

汪 奇(1992—), 男, 工程师, 研究方向为永磁电机设计及控制系统。

行了 3D 温度场分析,仿真结果表明,该电机的温升符合导弹舵机的性能要求。

上述文献对盘式电机的损耗、温升以及冷却方式进行了大量研究,为进一步对盘式电机温升研究打下了坚实的基础。但针对无槽盘式电机,特别是应用于精密定位平台的高定位精度、低速度波动的无槽盘式电机研究较少。因此,本文针对高精度微动平台设计的无槽盘式永磁电机(SL-DTPM)为研究对象,以有限元仿真平台为基础,分析了电机损耗,并建立了电机三维温度场仿真模型,分析了热源分布和传热过程,计算了电机在自然散热条件下的稳态温度场分布情况,并通过试验,验证了所建立模型的正确性和精确性。

1 SL-DTPM 电机基本结构

SL-DTPM 电机的主要特点是集成高精度光栅尺和读数头、低速,适合多工位精密分度控制应用。因此,在体积、功率和控制精度上具有极高要求。SL-DTPM 电机基本结构如图 1 所示。



图 1 SL-DTPM 电机结构

SL-DTPM 电机总体为轴向结构,转子为法兰结构,永磁体安装在转子上。为了减小电机质量,将电机底座(铝材料)和定子安装板(导磁材料)分开,电枢绕组通过夹具定位,并将电枢绕组粘贴在定子铁轭上。同时为了确保电枢绕组具有较高的机械强度,采用环氧树脂浇注成型,最后安装在定子底座上。与传统无铁心盘式电机<sup>[1,13-14]</sup>不

同,该电机采用单磁钢安装板,减小了相同极对数下磁钢的数量。同时,电机主磁路磁阻比传统无铁心盘式电机小,因而该电机具有更高的功率密度。具体的 SL-DTPM 电机性能参数如表 1 所示。

表 1 SL-DTPM 电机性能参数

| 参数名称                        | 参数值  | 参数名称                       | 参数值   |
|-----------------------------|------|----------------------------|-------|
| 额定电压/V                      | 220  | 极对数                        | 8     |
| 电机外径/mm                     | 120  | 峰值电流有效值/A                  | 5.4   |
| 电机轴高/mm                     | 25   | 额定电流有效值/A                  | 1.8   |
| 最大转速/(r·min <sup>-1</sup> ) | 60   | 峰值扭矩/(N·m)                 | 1.8   |
| 连续转速/(r·min <sup>-1</sup> ) | 30   | 额定扭矩/(N·m)                 | 0.62  |
| 线电阻/Ω                       | 3.16 | 转动惯量/(kg·cm <sup>2</sup> ) | 11.07 |
| 线电感/mH                      | 1.72 | 转子质量/kg                    | 0.633 |

2 SL-DTPM 电机电磁分析

图 2 所示为 SL-DTPM 电机在 30 r/min 下空载磁密云图。由图 2 可见,永磁盘式电机的磁场是一个复杂的三维磁场,且在电机不等半径的所有环形截面上,均具有完整的磁路。



图 2 SL-DTPM 电机磁密云图

图 3 所示为 SL-DTPM 电机在 30 r/min 下反电动势波形和转矩波形。电机三相完全对称,正弦度极高,经计算总谐波畸变率 THD 仅为 0.033,且电机转矩波形较为平直,具有良好的控制精度。SL-DTPM 电机优异的电磁性能,避免了由高次谐波引起的定、转子和永磁体的涡流损耗,有效改善了电机的热性能,为进一步研究打下了基础。

3 SL-DTPM 电机损耗计算

电机损耗主要包括电枢绕组铜耗、定、转子涡流损耗和永磁体涡流损耗。其中最主要的为电枢绕组铜耗。

由欧姆定律可知,SL-DTPM 电机定子绕组铜耗为

$$P_{Cu} = mI_{rms}^2 R_a \tag{1}$$

式中:  $m$ ——电机相数,  $m=3$ ;

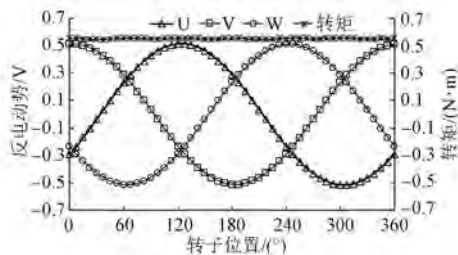


图3 SL-DTPM 电机反电动势和转矩波形

$I_{\text{rms}}$ ——电机额定电流有效值,  $I_{\text{rms}} = 1.8 \text{ A}$ ;

$R_a$ ——相电阻,  $R_a = 1.58 \Omega$ 。

永磁体的涡流损耗可以在极坐标下, 由式(2)求解:

$$P_{\text{pm}} = \frac{p\omega_r}{\pi} \cdot \int_0^{2\pi/\omega_r} \int_{R_i}^{R_o} \int_{-\alpha_p\pi/p}^{\alpha_p\pi/p} \int_0^{L_{\text{pm}}} \frac{|J_z|^2}{\alpha} r dr d\theta dz dt \quad (2)$$

式中:  $p$ ——电机极对数;

$\omega_r$ ——电机转子转速;

$R_i$ 、 $R_o$ ——永磁体的内半径和外半径;

$\alpha_p$ ——扇形永磁体侧边和几何中心线之间的夹角;

$L_{\text{pm}}$ ——永磁体轴向厚度;

$J_z$ ——永磁体传导电流密度。

定、转子的涡流损耗可以表示为

$$P_e = K_e f_s^2 B_m^2 V_s \quad (3)$$

式中:  $K_e$ ——材料的涡流损耗系数;

$f_s$ ——材料中的电频率;

$B_m$ ——材料中的磁密最大值;

$V_s$ ——材料的体积。

由于涡流损耗和  $f_s$  的平方成正比, 而磁滞损耗仅与  $f_s$  成正比, 且本文所述电机的定、转子材料为软磁材料, 磁滞回线狭窄, 因而磁滞损耗比涡流损耗小得多, 为简略计算, 可忽略不计。

图4所示为SL-DTPM电机涡流损耗密度云图。由于SL-DTPM电机无定子齿槽, 不存在由磁导不均匀引起的谐波分量, 因而永磁体的涡流损耗仅由电枢谐波电流引起。本文所述电机在仿真分析过程中, 电枢绕组激励为电流源, 默认为正弦波, 不存在电枢谐波电流。因此, 永磁体涡流损耗基本为零, 可忽略不计。具体的SL-DTPM电机永磁体涡流损耗波形如图5所示, 在一个电周期内的平均值仅为  $1.6 \times 10^{-4} \text{ W}$ , 数值极小, 可忽略不计。



图4 SL-DTPM 电机涡流损耗密度云图

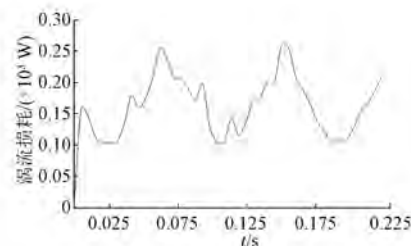


图5 SL-DTPM 电机永磁体涡流损耗波形

电机定子仅靠近气隙侧, 且正对永磁体位置处涡流损耗较大, 该处磁场随转子位置变化而不断变化, 因而磁场偏导数斜率变化较大。转子与磁场相对静止, 因而其涡流损耗较小。具体的SL-DTPM电机定、转子涡流损耗波形如图6所示, 在一个电周期内的平均值分别为  $0.011 \text{ W}$  和  $1.9 \times 10^{-4} \text{ W}$ , 同样的转子涡流损耗可忽略不计。

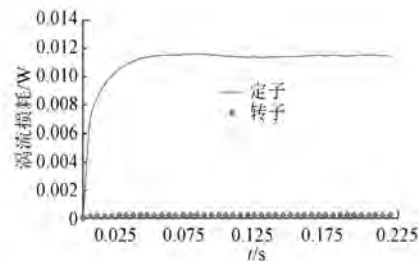


图6 SL-DTPM 电机定、转子涡流损耗波形

#### 4 材料属性和导热系数计算

电机绕组通常承受着最高温升, 是热分析关注的重点之一。在电枢绕组中, 热量主要沿着铜线传递, 且纯铜的热导率高达  $400 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ 。电机绕组通常由铜、铜绝缘和填充材料组成, 且是一个热导率各向异性的材料, 因此正确计算实际线圈各向等效热导率对温升计算具有很大影响。

根据 Hashin 和 Shtrikman 提出的计算公式, 线圈径向等效热导率  $\lambda_{\text{eqr}}$  为

$$\begin{cases} \lambda_{\text{eqr}} = \lambda_p \frac{(1 + v_{\text{cur}})\lambda_{\text{Cu}} + (1 - v_{\text{cur}})\lambda_p}{(1 - v_{\text{cur}})\lambda_{\text{Cu}} + (1 + v_{\text{cur}})\lambda_p} \\ \lambda_p = \lambda_{\text{iir}} \frac{v_{\text{iir}}}{v_{\text{iir}} + v_{\text{cir}}} + \lambda_{\text{cir}} \frac{v_{\text{cir}}}{v_{\text{iir}} + v_{\text{cir}}} \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $v$ ——各材料占槽面积的比例;

$\lambda$ ——热导率;

下标 Cu、ii、ci——铜、黑环氧树脂以及铜绝缘;

下标 p——黑环氧树脂和铜绝缘径向上的复合材料;

下标 r——径向,且  $v_{\text{iir}} + v_{\text{cir}} \neq 1$ 。

线圈轴向等效热导率  $\lambda_{\text{eqa}}$  计算公式为

$$\begin{cases} \lambda_{\text{eqa}} = (1 - v_{\text{cua}})\lambda_{\text{qa}} + v_{\text{cua}}\lambda_{\text{cu}} \\ \lambda_{\text{qa}} = \lambda_{\text{ii}} \frac{v_{\text{iaa}}}{v_{\text{iaa}} + v_{\text{cia}}} + \lambda_{\text{ci}} \frac{v_{\text{cia}}}{v_{\text{iaa}} + v_{\text{cia}}} \end{cases} \quad (5)$$

式中: 下标 q——铜绝缘和填充材料轴向上的复合材料;

下标 a——轴向,且  $v_{\text{iaa}} + v_{\text{cia}} \neq 1$ 。

表 2 所示为电机主要材料特性参数。结合式(4)和式(5)计算所得实际线圈等效特性参数,如表 3 所示。

表 2 电机主要材料特性参数

| 参数名称  | 热导率/<br>( $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ) | 比热容/<br>( $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ) | 密度/<br>( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ) |
|-------|----------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|
| 纯铜    | 400                                                            | 380                                                             | 8.96                                       |
| 漆包线绝缘 | 0.21                                                           | 1 000                                                           | 1.4                                        |
| 空气    | 0.026 14                                                       | 1 007                                                           | 0                                          |
| 环氧树脂  | 1.01                                                           | 1 850                                                           | 2.29                                       |
| 永磁体   | 7.6                                                            | 460                                                             | 7.5                                        |
| 底座    | 230                                                            | 900                                                             | 2.7                                        |
| 定、转子  | 49                                                             | 460                                                             | 7.85                                       |
| 绝缘纸   | 0.15                                                           | —                                                               | —                                          |

表 3 线圈等效特性参数

| 参数名称                                                          | 参数值     |
|---------------------------------------------------------------|---------|
| 径向热导率/( $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )  | 0.421   |
| 轴向热导率/( $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )  | 331.930 |
| 等效比热容/( $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ) | 486.61  |
| 等效密度/( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )                      | 7.456   |

电机底座壁和转子外表面均向周围空间的自然传热,包括对流和辐射,由于所设计电机的转速

较低,在考虑电机动态温升时,为简略计算,将电机转子视为静止状态,即转子散热系数和电机机座壁相等。

利用式(6)求取自然对流散热系数:

$$\begin{cases} h_c = \frac{0.54 \cdot Ra^{0.25} \mu}{l} \\ Ra = \frac{2g(T_s - T_\infty)l^3}{(T_s + T_\infty)\delta\alpha} \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $Ra$ ——Rayleigh 系数;

$\mu$ ——空气热导率;

$l$ ——平板长度;

$g$ ——重力加速度;

$T_s$ ——物体表面温度;

$T_\infty$ ——环境温度;

$\delta$ ——运动黏度;

$\alpha$ ——热扩散率。

另外,热辐射散热系数为

$$h_r = \sigma \varepsilon (T_s^2 + T_\infty^2) (T_s + T_\infty) \quad (7)$$

式中:  $\sigma$ ——斯蒂芬-玻尔兹曼常数,  $\sigma = 5.67 \times 10^{-8}$ ;

$\varepsilon$ ——发射率,对于黑色物体  $\varepsilon = 1$ 。

因此,综合散热系数  $h = h_c + h_r$ 。计算得  $h = 10 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。

传统的无槽或者无铁心电机的线圈均通过线架进行定位,而线架的热导率仅为  $0.26 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ,为绝热材料,导致电机绕组铜耗所产生的热量较难向外界传递。因此,采用线架的电机,散热性能较差。图 7 所示为 SL-DTPM 电机线圈灌胶实物图。线圈和定子通过黑环氧树脂灌封成型,不仅增加了电机铜线的散热性能(环氧树脂的热导率为  $1.01 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ),而且增加了电机的机械强度。



图 7 SL-DTPM 电机线圈灌胶实物图

## 5 温度场建模与分析

首先,为了更为全面地分析电机温度场分布,

对所述 SL-DTPM 电机全模型温度场进行建模与分析;然后,考虑到电机最高温度发生在电枢绕组上,为了更为直观地展示电枢绕组温度分布,同时为了节约仿真时间,不建立转子模型和空气域,将电枢绕组灌胶面设置为等温面,等效热路如图 8 (a)所示。首先,赋予线圈气隙侧胶层表面为等温面 SB1,并计算气隙热阻  $R_{\text{airgap}}$  和永磁体热阻  $R_{\text{pm}}$ 。考虑到电机 SL-DTPM 电机转子背铁热导率较大,热阻较小,为了简化计算,可忽略不计。

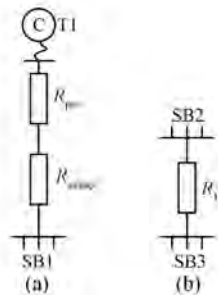


图 8 SL-DTPM 电机等效热路图

SL-DTPM 电机达到热稳态时,转子永磁体气隙侧表面也为等温面,即永磁体被线圈均匀加热。与高速旋转电机不同,SL-DTPM 电机气隙小,电机转速较低,转子运动带来的气隙内空气对流散热能力较差,故把气隙空气当作热传导分析。

电枢绕组和永磁体之间的气隙热阻为

$$R_{\text{airgap}} = L / (\lambda \cdot S) \tag{8}$$

式中:  $L$ ——气隙长度;

$\lambda$ ——空气热导率;

$S$ ——永磁体和电枢绕组灌胶面重合面积,即永磁体靠近气隙侧面积。

同理,在不考虑永磁体间空气间隔的影响下,由式(8)可以计算永磁体的热阻。所述 SL-DTPM 电机安装在导热能力较差的胶垫上,充分暴露在空气中,通过热对流散热(自然风冷)。具体用图 8 中的 T1 元件表示。

值得说明的是,由于加工工艺的限制以及考虑到耐压问题,电枢绕组不直接和定子轭板直接接触,中间夹有 0.17 mm 绝缘纸,因此在分析计算过程中,需要考虑热路中串联的绝缘纸热阻  $R_1$ ,并将电枢绕组靠近绝缘纸侧表面设置为等温面 SB2,定子轭板靠近绝缘纸侧表面设置为等温面 SB3。具体热路图如图 8 (b)所示。计算热阻如

表 4 所示。

表 4 温升模型中计算热阻 K/W

| 参数名称   | 符号                  | 参数值  |
|--------|---------------------|------|
| 永磁体热阻  | $R_{\text{pm}}$     | 0.16 |
| 空气气隙热阻 | $R_{\text{airgap}}$ | 11.3 |
| 绝缘纸热阻  | $R_1$               | 0.19 |

假定环境温度为 20 ℃,SL-DTPM 电机在自然冷却条件下的稳态温度场分布图如图 9 所示。

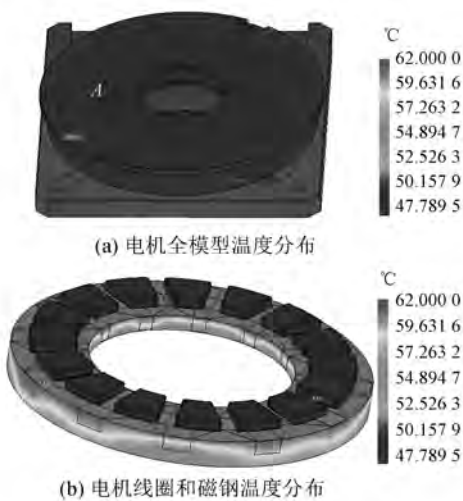


图 9 SL-DTPM 电机稳态温度场分布图

从图 9 可以看出,电机的底座平均温度约为 50.2 ℃,转子在 A 点的温度为 48.5 ℃。随着时间的变化,如图 10 所示,电机在约 160 min 时温度达到了动态平衡。同时可以发现,永磁体的稳态温度仅为 48.5 ℃,避免了因为高温而导致永磁体发生不可退磁的风险,证明了所建立的电机三维温度场仿真模型具有较高的精度。

电机温升主要分布在电枢绕组以及和电枢绕组紧密配合的灌密封胶上,增加了绕组的散热面积,证明了灌封绕组技术有助于电机散热,其平均温度仅为 58.9 ℃。同时,可以发现,电机的各部件

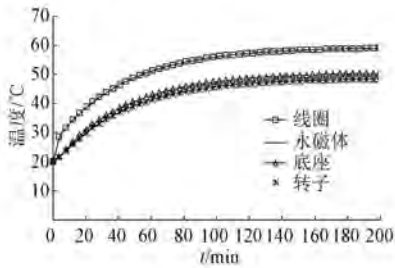


图 10 DL-DTPM 电机各部件温升曲线

稳态温度相差不大,最大温差仅为线圈与转子之间的 10 K。可见所述 SL-DTPM 电机结构件之间紧密结合,且导热性能优异,也从侧面再次验证了灌封绕组技术制成的电机线圈热性能高。

## 6 试验验证

为了验证所建立温升模型的合理性与正确性,分别通过热成像仪和热电偶对电机转子和底座进行温度测量。图 11 所示为电机在自然冷却条件下热成像仪拍摄稳态温度场分布图。从图 11 可以看出,电机转子在图 9(a)中 A 点的温度为 47.6 °C,为仿真数值的 98.14%,具有较高的精度。值得注意的是,用红外热成像仪探测物体的温度时,是通过接收辐射的能量进行测定的<sup>[15-17]</sup>。SL-DTPM 电机底座为金属材料铝,并进行了表面抛光处理,因而表面发射率较低,进而影响了温度测量的准确性。解释了图 11 中电机底座温度热成像仪探测温度与理论分析不相符的原因,底座显示温度仅为 27.0 °C。

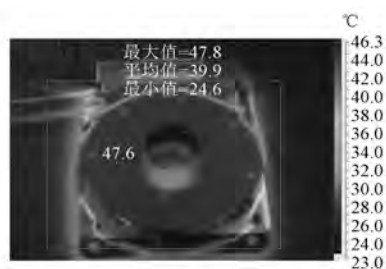


图 11 热成像仪拍摄稳态温度场分布

图 12 所示为电机在自然冷却条件下热电偶测量电机底座和图 9(a)中 A 点温度曲线。随着时间的变化,电机底座和转子温度在约 160 min 达到稳定状态,且底座和 A 点稳定温度分别为 54.5 °C 和 48.2 °C,与理论分析结果保持高度一致。这验证了所建立三维温度场模型的准确性和合理性。

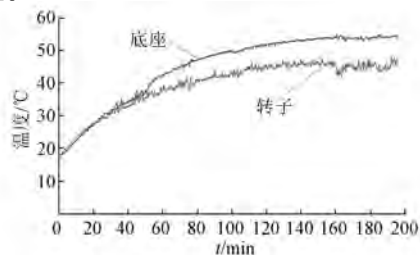


图 12 热电偶测量温度曲线

## 7 结 语

本文以高精度微动平台设计的无槽盘式永磁电机为研究对象,分析了电机的电磁场、损耗,并通过计算绕组的等效热导率和自然冷却条件下导热系数,分析了热源分布和传热过程,计算了电机在自然散热条件下的稳态温度场分布情况,并通过试验进行了试验验证,试验结果证明了理论分析的准确性和合理性。研究结果表明:该无槽盘式永磁电机转矩波形较为平直,具有良好的控制精度;所建立三维温度场模型具有较高的精确度,且电机温升符合高精度微动平台的设计要求。

### 【参考文献】

- [1] 王晓远,周晨.基于 PCB 绕组的盘式永磁同步电机温度场分析与冷却方式研究[J].中国电机工程学报,2016,36(11): 3062.
- [2] HAN B, XU L, HUANG Z, et al. Loss calculation, thermal analysis, and measurement of magnetically suspended PM machine [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(6): 4514.
- [3] MARIGNETTI F, COLLI V D. Thermal analysis of an axial flux permanent-magnet synchronous machine [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2009, 45(7): 2970.
- [4] MARIGNETTI F, COLLII V D, COIA Y. Design of axial flux PM synchronous machines through 3-D coupled electromagnetic thermal and fluid-dynamical finite-element analysis [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, 55(10): 3591.
- [5] VEREZ G, TIEGNA H, BARAKAT G, et al. Analytical thermal modelling of axial flux permanent magnet synchronous machines [C] // 2012 International Conference on Electrical Machines, IEEE, 2012.
- [6] ROSTAMI N, FEYZI M R, PYRHONEN J, et al. Lumped-parameter thermal model for axial flux permanent magnet machines [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2013, 49(3): 1178.
- [7] WOOLMER T J, MCCULLOCH M D. Analysis of the yokeless and segmented armature machine [C] // 2007 IEEE International Electric Machines & Drives Conference, 2007.

(下转第 88 页)

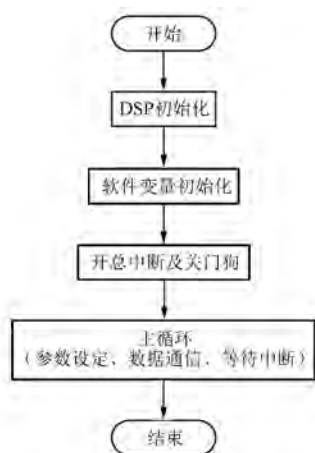


图 13 主程序流程

## 4 结 语

本文简要介绍了 BLDCM 驱动控制的研究背景,分析了其控制系统的基本组成及工作原理。基于 TI 的 TMS320F28027F DSP 芯片和 DRV8301 前置驱动器芯片进行了 BLDCM 无位置传感器驱动控制系统的设计。硬件方面主要介绍了系统中主控电路、驱动电路、参数检测电路等主要电路;软件方面介绍了基于 FAST 的转子位置估计方法以及控制系统主程序流程。与 BLDCM 传统控制方案相比较,DSP 控制较单片机计算和控制性

能更强,无传感器方案比有传感器方案稳定性更好且成本更低,DRV8301 集成前置驱动器比分立驱动元件体积更小,性能更好。因此,本文所设计的基于 DSP 的 BLDCM 无位置传感器驱动控制系统具有良好的市场应用前景。

## 【参考文献】

- [1] 夏长亮.无刷直流电机控制系统[M].北京:科学出版社,2009.
- [2] 颜廷玉.直流无刷电机控制系统的设计与研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2009.
- [3] 罗金龙.基于 DSP 的电动执行机构 BLDC 控制系统设计[D].上海:东华大学,2015.
- [4] 李同豪,王友仁,吴勇,等.无刷直流电机无位置传感器矢量控制系统[J].微电机,2016,49(10): 20.
- [5] 刘丁,余志平,杨延西.基于 DSP 的无刷直流电机无传感器控制系统设计[J].电机与控制学报,2002,6(1): 29.
- [6] 胡申旦,杨进,仇志坚,等.无位置传感器永磁无刷直流电机位置检测误差因素分析[J].电机与控制应用,2018,45(6): 91.
- [7] 孙祖光.电动汽车用无刷直流电机控制系统研究与设计[D].哈尔滨:哈尔滨理工大学,2016.
- [8] 高江,黄向慧.基于 DRV8301 的永磁同步电机控制系统研究[J].电力科学与工程,2017,33(11): 7.

收稿日期: 2019-02-26

(上接第 61 页)

- [8] LIN D, ZHOU P, FU W N, et al. A dynamic core loss model for soft ferromagnetic and power ferrite materials in transient finite element analysis [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2004, 40(2): 1318.
- [9] 陈起旭,周阳,杨来顺,等.大功率盘式交流永磁同步电机温度场流场耦合分析[J].电机与控制应用, 2017, 44(4): 20.
- [10] 陈起旭,梁得亮,徐俊,等.盘式交流永磁同步电机温升影响因素研究[J].电机与控制学报, 2018, 22(3): 33.
- [11] 闫羽佳,赵锦成.盘式无铁心永磁发电机温度场分析和冷却方式研究[J].微特电机, 2018, 46(8): 45.
- [12] 王俊杰,马恩林.无铁心盘式 PMSM 损耗和温度研究[J].鱼雷技术, 2015, 23(5): 359.
- [13] 李玉彬,杨宗霄.非均匀磁极盘式无铁心永磁 ISG 电机设计与分析[J].河南科技大学学报(自然科学版), 2018, 39(4): 28.
- [14] 钟义长,黄守道,罗德荣,等.双转子盘式对转永磁电机同步控制策略[J].电工技术学报, 2018, 33(7): 1478.
- [15] 陈水桥,陈洪山.表面材料对红外热成像仪测温准确性的影响和分析[J].实验技术与管理, 2008, 25(11): 41.
- [16] 宋绍京.热辐射参考源对红外图像获取的影响及图像恢复[J].激光与红外, 2005, 35(1): 65.
- [17] 陈木旺,亓洪兴,龚玉梅,等.定标黑体的温度稳定性对热成像的影响分析[J].红外与激光工程, 2006, 35(6): 652.

收稿日期: 2019-02-26