

柔性 PCB 绕组径向磁通微型永磁电机设计^{*}

吕佳徽, 董 婷

(沈阳工业大学 电气工程学院, 辽宁 沈阳 110870)

摘 要: 采用无槽结构的高速微型永磁电机在检测设备、医疗器械等方面应用广泛, 但无槽电机绕组制作复杂, 使用绕组印制技术可以简化绕组的制作过程。目前已有的印制技术多以刚性印制电路板 (PCB) 为载体应用于轴向磁通电机, 对于径向磁通的高速电机来说, 刚性 PCB 已无法满足绕组沿圆周方向分布的需求, 柔性 PCB 绕组应运而生, 不过目前还没有完整的柔性 PCB 绕组电机设计方案。因此, 设计了一款高速微型柔性 PCB 绕组电机, 针对柔性 PCB 绕组特有的缠绕不等距问题, 提出了使用平均半径的解决方案, 并通过仿真对电机进行了分析。结果表明, 平均半径法解决了绕组缠绕不等距的问题, 所设计的柔性 PCB 绕组电机能达到电机技术要求且具有良好的热稳定性。

关键词: 柔性 PCB 绕组; 无槽电机; 高速微型电机; 有限元分析; 温度场

中图分类号: TM351 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2023)07-0013-08

doi: 10.12177/emca.2023.073

Design of Radial Flux Permanent Magnet Micromotor with Flexible PCB Winding^{*}

LÜ Jiahui, DONG Ting

(School of Electrical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China)

Abstract: High-speed permanent magnet micromotor with slotless structure is widely used in testing equipment and medical equipment. However, the production process of slotless motor winding is complicated, and the production process of winding can be simplified by using winding printing technology. At present, existing printing technologies are mostly applied to motors with axial flux using rigid printed circuit board (PCB) as carrier. For high-speed motor with radial flux, rigid PCB can hardly meet the requirement for winding distribution along the circumference. Flexible PCB winding comes into being, but there is no complete design scheme of flexible PCB winding motor at present. Therefore, a high-speed micromotor with flexible PCB winding is designed. In order to solve the problem of unequal winding of flexible PCB winding, an average radius method is proposed and the motor is analyzed by simulation. The results show that the average radius method solve the problem of unequal winding of flexible PCB winding, and the designed flexible PCB winding motor can meet the technical requirements of the motor and has good thermal stability.

Key words: flexible PCB winding; slotless motor; high-speed micromotor; finite element analysis; temperature field

0 引 言

无槽永磁电机具有效率高、转矩纹波小、铁损

耗低等优点^[1]。这些优点使无槽永磁电机成为各种应用的理想候选者, 通常是应用在电机转速高的场合^[2-4]。此外, 无槽永磁电机主要使用的是

收稿日期: 2023-03-07; 收到修改稿日期: 2023-04-03

^{*} 基金项目: 辽宁省教育厅基础项目 (LJGD2020013)

作者简介: 吕佳徽 (1999—), 男, 硕士研究生, 研究方向为高品质永磁电机及特种电机系统。

董 婷 (1982—), 女, 教授, 博导, 研究方向为交流伺服电机及其控制系统。

气隙绕组,使得这种电机非常适合于电机的小型化^[5],同时也适合于在大规模生产情况下其制造和组装过程的自动化^[6]。

需要注意的是,绕组形式对无槽永磁电机的性能发挥着重要作用^[7]。无槽永磁电机的气隙绕组通常由圆导线制成,这种绕组在制作时需要先进行分相排线,再进行固化封装,黏接到定子轭上才可使用,制作安装时较为复杂。

近几年,随着印制绕组技术在轴向磁通盘式电机上的应用,使得印制电路板(PCB)绕组具有广阔的前景^[8-10]。而对于径向磁通的电机来说,其绕组沿圆周方向分布,因此应用于轴向磁通盘式电机的刚性PCB绕组不适用于径向磁通的无槽永磁电机。柔性PCB因其挠度大,可以根据需要随意卷曲弯折,因此文献[11]提出使用柔性PCB绕组应用于径向磁通的无槽永磁电机,用柔性PCB上印制的绕组取代传统的绕线式绕组,然后将其卷起来,插入无槽永磁电机的气隙中。柔性PCB技术的改进,促使其在电机绕组制造领域中拥有更广泛的应用^[12-13]。

此外,温度场分析对于柔性PCB绕组电机至关重要^[14-16]。由于绕组形式与常规绕线式绕组不同,需要额外验证校核柔性PCB这一材料能否耐得住电机工作时的温升,从而保障电机的热稳定性。

综上所述,本文设计了一款额定转速为10 000 r/min,功率为2.1 W的柔性PCB绕组高速微型电机,之后验证该电机性能,并对电机进行温度场分析。

1 径向磁通微型永磁电机设计

所提柔性PCB绕组电机为内转子结构,柔性PCB绕组处于定子轭与永磁体之间,并沿电机定子轭将柔性PCB绕组缠绕固定,柔性PCB绕组电机基本结构如图1所示。

1.1 主要尺寸的确定

按照所给定的功率与转速指标,径向磁通微型永磁电机的电磁负荷 A 、 B_δ 与电机主要尺寸之间具有如下关系:

$$\frac{D^2 L_{\text{ef}} n}{P} = \frac{6.1}{\alpha A B_\delta} \quad (1)$$

式中: D 为电枢直径; L_{ef} 为电枢长度; n 为电机转

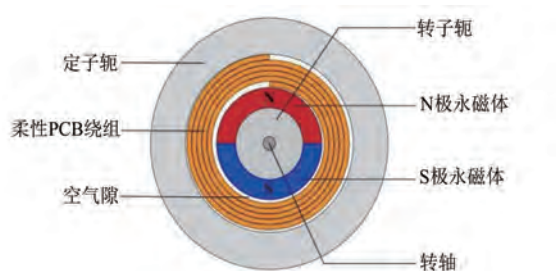


图1 柔性PCB绕组电机基本结构示意图

速; P 为电机的计算功率; α 为永磁电机的计算极弧系数; A 为电负荷; B_δ 为磁负荷。

永磁电机的长径比为

$$\lambda = \frac{L_{\text{ef}}}{D} \quad (2)$$

在永磁电机的设计过程中一般认为 λ 的范围处在0.6~1.5,之后根据长径比 λ 及式(1)可以得到:

$$D = \sqrt[3]{\frac{6.1P}{\alpha A B_\delta \lambda n}} \quad (3)$$

1.2 电磁负荷的确定

由于电机的功率 P 和电机的转速 n 在电机设计的起始阶段就已经给出了,而计算极弧系数 α 与电机的长径比 λ 的变化很小,对整体设计的影响不大。因此,电机的主要尺寸数值,由电机的电磁负荷 A 和 B_δ 来确定。电负荷表达式如下:

$$A = \frac{m I_a N}{2a \pi D} \quad (4)$$

式中: m 为永磁电机的相数; N 为永磁电机的每槽导体数; $2a$ 为电机绕组的并联支路数; I_a 为永磁电机的电枢电流。

磁负荷 B_δ 为

$$B_\delta = \frac{\Phi}{\alpha \tau L_{\text{ef}}} \quad (5)$$

式中: Φ 为永磁电机的每极主磁通; τ 为永磁电机的极距。

1.3 气隙长度的确定

对于无槽电机来说,由于其定子没有定子齿,电机绕组完全处于定转子之间的气隙中,导致其等效气隙偏大。因此,对于柔性PCB绕组电机来说,其绕组与转子轭之间的部分应尽量取得小一些,同时为了削弱由等效气隙大而导致气隙磁压降过大的影响,可以选择相对厚一些的永磁体,以

增加磁动势。最终,电机各部分尺寸设计如表 1 所示。

表 1 柔性 PCB 绕组径向磁通微型电机设计参数

参数名称	参数值
定子外径/mm	21.00
定子内径/mm	14.45
永磁体厚度/mm	3.00
永磁体外径/mm	11.60
轴向长度/mm	18.00
单层柔性 PCB 厚度/mm	0.20
定转子间间隙长度/mm	1.00
额定功率/W	2.1
额定转速/($r \cdot \min^{-1}$)	10 000
永磁体材料	NdFeB40SH

2 柔性 PCB 绕组设计

对于柔性 PCB 绕组来说,在结构上可以将其视为三个部分,分别是处于中间位置的柔性 PCB 基板,柔性 PCB 基板两侧的印制铜箔以及将柔性 PCB 绕组固化在定子轭上的固化胶,如图 2 所示。



图 2 柔性 PCB 绕组横切面展开图

由图 1 可知,柔性 PCB 绕组在使用时需沿电机定子轭将其进行周向贴合并缠绕,而随着缠绕过程的进行,其所贴合面的半径在不断地改变,使得所缠绕的每一圈周向长度均发生着改变。倘若在进行柔性 PCB 布线时对每个铜箔导体依次等间距排列,在缠绕时就会因为所沿圆周半径发生改变而使得沿径向上各层铜箔导体位置发生偏移,进而影响电机性能,如图 3~图 4 所示。



图 3 理想绕组的各相导体沿径向对齐

为了更清晰地展现这种导体径向偏移的结构特点,图 5 和图 6 以 A-Z 相绕组为例,分别给出



图 4 实际绕组的各相导体沿径向发生偏移

了沿径向偏移前后的绕组截面拓扑图。从图 5 和图 6 中可以清晰地看出,绕组在缠绕时的缠绕半径不断变化,使得绕组不断发生偏移,进而导致沿径向上原本应处于同一相位的内外层绕组无法再沿径向对齐,原本沿径向同相位的导体将产生相位差。

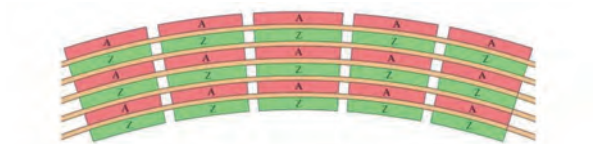


图 5 沿径向未发生偏移时的 A-Z 相绕组拓扑图

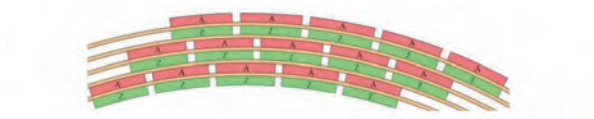


图 6 沿径向发生偏移时的 A-Z 相绕组拓扑图

不同于传统的绕线式绕组,上述现象是柔性 PCB 绕组的一大特殊性,本文将这种现象称为柔性 PCB 绕组的缠绕不等距现象。为了防止电机性能受到影响,柔性 PCB 绕组的缠绕不等距问题需要得到解决。

为了解决柔性 PCB 绕组的缠绕不等距问题并且简化模型,本文提出对所缠绕的各圈柔性 PCB 缠绕半径均用平均半径去替代的方法,如图 7 所示。

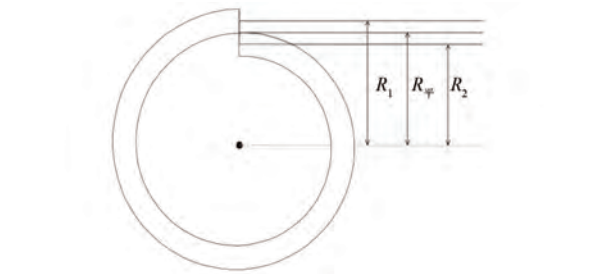


图 7 柔性 PCB 绕组平均半径的选择(以一圈为例)

由图 7 可知,柔性 PCB 绕组按圈缠绕是一个压合的过程。以缠绕一圈为例,当柔性 PCB 绕组

沿电机定子轭圆缠绕一圈时,柔性 PCB 绕组的两端并不是处于对齐接合的状态,而是处于压合的状态,柔性 PCB 绕组的两端会相差一层柔性 PCB 绕组的厚度。即柔性 PCB 绕组在缠绕的过程中,各圈柔性 PCB 绕组的两端处在不同的半径上,使用平均半径的方法可以将各圈的半径分别等效为其各自对应的平均半径,进而使得柔性 PCB 绕组的各相导体沿径向对齐,从而解决绕组缠绕不等距的问题。

对于所缠绕的每一圈绕组,均用对应的平均半径作为该圈的半径,根据每圈的平均半径可以计算出每圈柔性 PCB 的平面展开周长,接下来只需在每段周长上将该圈导体平均分布排开布线。所缠绕的各圈周长是按照各圈的平均半径分别得出的,因此在缠绕时各圈的导体均能保证缠绕后内外层对齐,柔性 PCB 绕组的缠绕不等距问题得以解决。

目前市场上高速小型电机的 PCB 印制绕组多选用 0.05 mm 规格,因此本文所选用的柔性 PCB 基板厚度 h 为 0.05 mm,基板两侧铜箔导体厚度 H 各为 0.05 mm,固化柔性 PCB 绕组的固化胶厚度 t 为 0.05 mm。综上,柔性 PCB 绕组层厚度 d 为 0.2 mm,如图 8 所示。



图 8 柔性 PCB 绕组横切面尺寸示意图

该电机所用的柔性 PCB 绕组依据定子轭与永磁体之间的气隙长度以及柔性 PCB 绕组的厚度综合分析后,将其缠绕圈数定为 6 圈。

柔性 PCB 绕组具体尺寸见表 2。

表 2 柔性 PCB 绕组具体尺寸设计参数

参数名称	参数值
铜箔厚度 H/mm	0.05
铜箔宽度 L/mm	1.45
基板厚度 h/mm	0.05
隔离胶厚度 t/mm	0.05
绕组层厚度 d/mm	0.20
轨道间距/ mm	0.10
缠绕圈数	6
每层每相轨道数	9

图 9~图 14 分别给出了所设计柔性 PCB 绕组缠绕 6 圈的各自半径,以柔性 PCB 绕组横切面平面展开图为例。



图 9 第一圈柔性 PCB 绕组半径尺寸平面展开图



图 10 第二圈柔性 PCB 绕组半径尺寸平面展开图



图 11 第三圈柔性 PCB 绕组半径尺寸平面展开图



图 12 第四圈柔性 PCB 绕组半径尺寸平面展开图



图 13 第五圈柔性 PCB 绕组半径尺寸平面展开图



图 14 第六圈柔性 PCB 绕组半径尺寸平面展开图

本文所设计的电机在原理上属于 2 极 3 槽 3 相电机(在结构上属于无槽电机,这里的槽指的是虚槽),即 A、B、C 三相绕组在一个圆周范围内进行一次循环。供电电流在柔性 PCB 基板的一侧通入印制铜箔,使得通入电流的印制铜箔起到

了绕组的作用。基板两侧的绕组通过过孔连接形成绕组回路,多组导体则通过柔性 PCB 绕组的同心缠绕得以实现。

如图 15、图 16 和图 17 所示,以 A 相绕组为例,实线代表柔性 PCB 基板顶层的绕组布线,虚线代表柔性 PCB 基板底层的绕组布线,将柔性 PCB 绕组沿定子轭缠绕 6 圈,图 15~图 17 中给出了 A 相柔性 PCB 绕组的分布形式。B 相绕组和 C 相绕组分布原理与 A 相绕组类似,只是在空间上与 A 相绕组分别相差 120° 和 240°。最终柔性 PCB 绕组整体布线如图 18~图 22 所示。

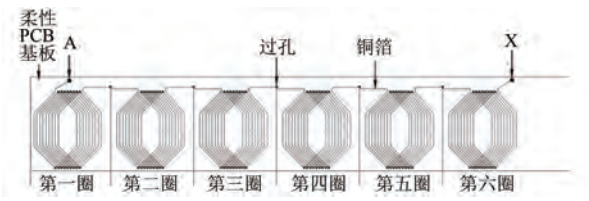


图 15 A 相柔性 PCB 绕组平面展开图

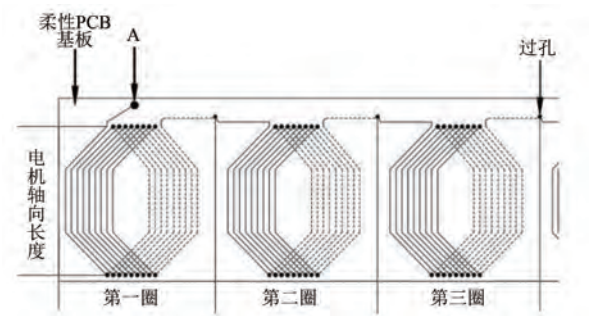


图 16 A 相柔性 PCB 绕组局部放大图(一)

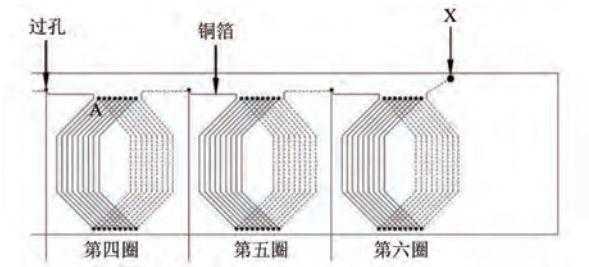


图 17 A 相柔性 PCB 绕组局部放大图(二)

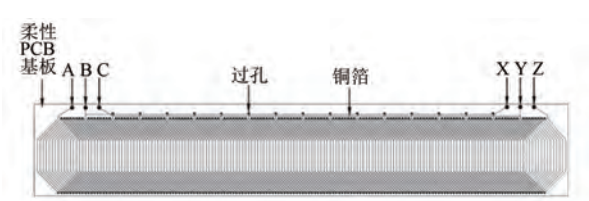


图 18 双层柔性 PCB 绕组平面展开图

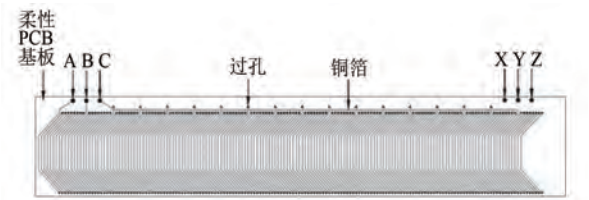


图 19 双层柔性 PCB 绕组平面展开图(顶层)

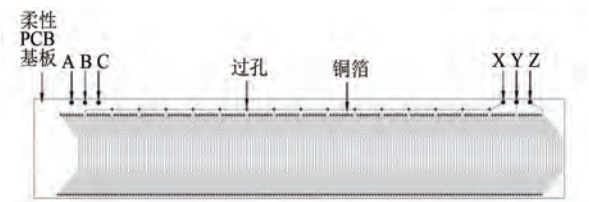


图 20 双层柔性 PCB 绕组平面展开图(底层)

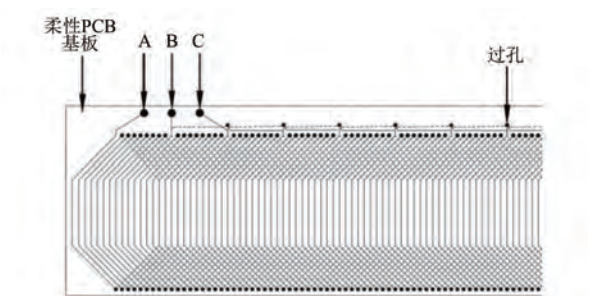


图 21 双层柔性 PCB 绕组局部放大图(一)

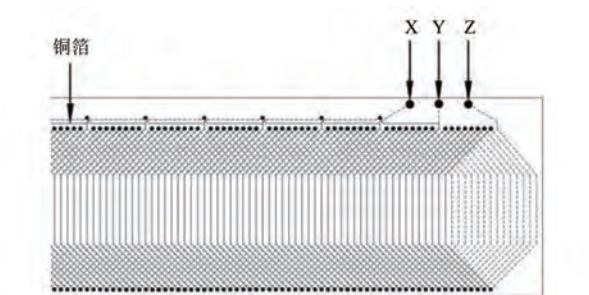


图 22 双层柔性 PCB 绕组局部放大图(二)

3 有限元分析

柔性 PCB 绕组电机的 Maxwell2D 模型如图 23 所示。柔性 PCB 绕组电机有限元仿真结果如图 24~图 29 所示。

由图 24 可知,空载气隙磁密有效值在 0.6 T 左右,波形近似为平顶波且谐波含量很小,气隙磁密较为平滑。



图 23 柔性 PCB 电机 2D 模型

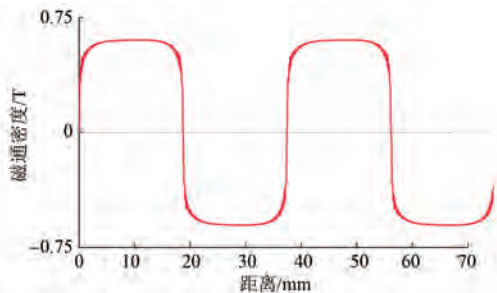


图 24 空载气隙磁密波形图

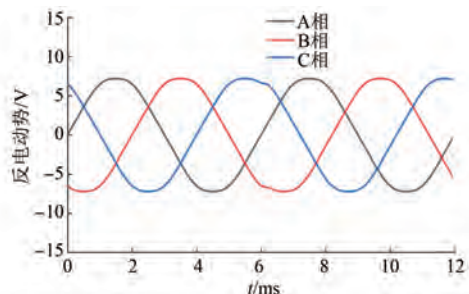


图 25 空载反电动势波形图

由图 25 可知,空载反电动势近似为正弦波且谐波含量较小,有效值为 5.2 V,满足电机电压技术要求。

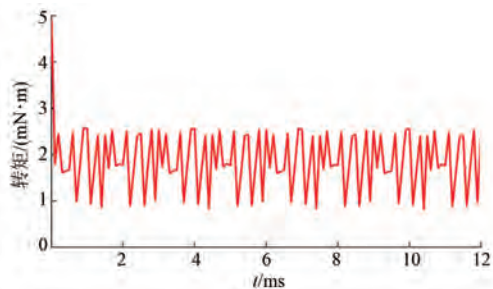


图 26 转矩波形图

根据电机转矩的换算式:

$$T = 9.549 \frac{P}{n} \quad (6)$$

代入前文的电机指标参数值,即功率 2.1 W、额定转速 10 000 r/min 后,可得电机的额定电磁转矩值为 2 mN·m。由图 26 可知,电磁转矩仿真结果达到技术要求。

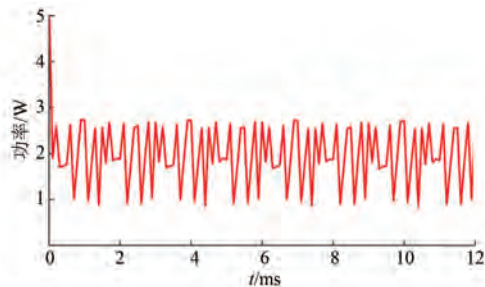


图 27 功率波形图

由图 27 可知,电机功率有效值为 2.17 W,满足电机技术要求。

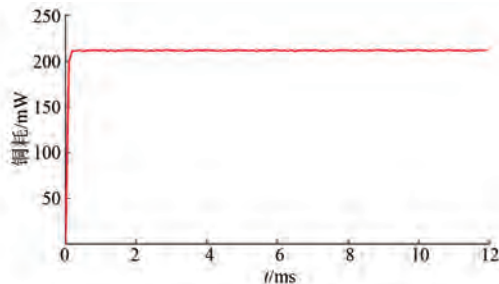


图 28 柔性 PCB 绕组铜耗曲线

由图 28 可知,当电机稳定运行在额定转速时,柔性 PCB 绕组铜耗有效值为 212 mW。

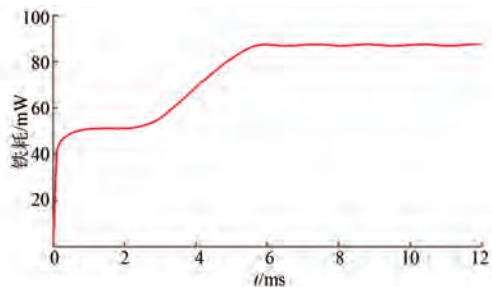


图 29 柔性 PCB 绕组电机铁耗曲线

电机铁耗包含定转子的磁滞损耗和涡流损耗,由图 29 可知,当电机稳定运行在额定转速时,柔性 PCB 绕组电机的铁耗有效值为 87.5 mW。

图 30 和图 31 分别为柔性 PCB 绕组电机磁力线图和磁密云图。由图 30 和图 31 可以看出,柔性 PCB 绕组电机的主磁通首先从转子的 N 极

产生,经磁力线穿过气隙,经过定子轭,最后流入到转子的 S 极。在此循环过程中,该部分的磁力线与电机的定子三相绕组相互交链,称其为有效磁通,此磁通内部产生感应电动势,进而产生电磁转矩。从图 30 和图 31 中还可以看出磁力线流径路径情况及电磁场分布情况,结合上述分析可知,所提柔性 PCB 绕组电机设计合理。

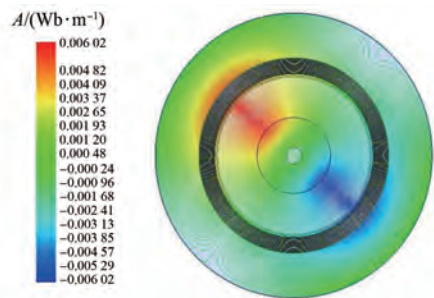


图 30 电机磁力线图

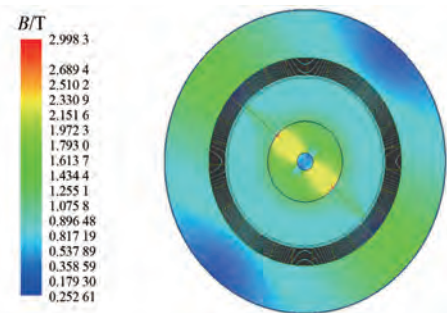


图 31 电机磁密云图

表 3 柔性 PCB 绕组电机各部件材料热系数

材料名称	密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	各向同性热导率/ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$)	比热恒压/ ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$)
空气	1.29	0.026 7	1 000
铜	8 978	387.600 0	381
钕铁硼	7 550	10.000 0	440
硅钢片	7 800	40.000 0	460
结构钢	7 800	70.000 0	450

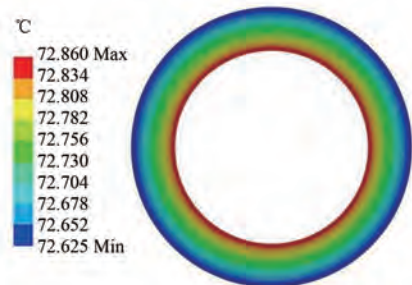


图 32 稳态下电机定子铁心温度场图

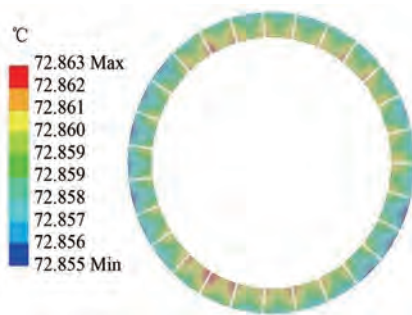


图 33 稳态下柔性 PCB 绕组温度场图

4 温度场分析

4.1 前处理

柔性 PCB 绕组电机由于其绕组材料的特殊性,与传统绕线式绕组电机相比,在进行温度场分析时要对柔性 PCB 基板材料耐热温度额外进行校核,以保障电机高速运行时柔性 PCB 基板材料不会发生温升过高而受到破坏。

使用 Workbench 软件对电机进行温度场分析,各部件材料热系数如表 3 所示。

4.2 后处理

额定工况下电机运行时间长达 6 000 s 后,得到了自然环境温度冷却条件下,柔性 PCB 电机部分结构的温度场云图及电机整体温度变化曲线图,如图 32~图 34 所示。

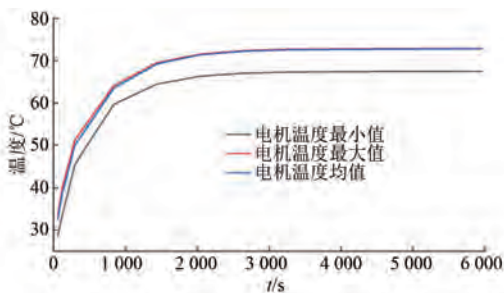


图 34 电机整体温度变化曲线图

由图 32~图 34 可知,当电机工作在额定工况下且工作时间足够长时,电机各部分结构的温度将保持在电机饱和温度值 72.863 °C 附近,此后在此温度值附近继续运行。

柔性 PCB 绕组的基板材料主要为聚酰亚胺,其材料本身具有良好的耐热性,长期使用时耐热范围在 200~300 ℃,部分应用场合下的耐热程度则会更高。永磁材料钕铁硼的耐热范围相对较低,在 80~200 ℃,当工作环境的温度超过 200 ℃时,钕铁硼永磁材料的磁特性就会受到很大影响。电机铁心的材料是硅钢片,耐热性能好。常规的无取向硅钢片退火温度可达 700 ℃。

综上所述,所设计的柔性 PCB 绕组电机在额定工况下且工作时间足够长时,电机温度均在电机各部分材料的耐热范围内,能够满足其热稳定性,保障柔性 PCB 绕组电机的稳定运行。

5 结 语

本文设计了一台额定转速为 10 000 r/min,功率为 2.1 W 的高速微型柔性 PCB 绕组电机,并对电机性能进行了验证,且对温度场进行了分析,得出以下结论:

(1) 柔性 PCB 绕组电机在电机结构尺寸的设计上可以参照无槽电机的设计方法来进行设计,其特殊之处在于绕组,需额外进行设计,本文给出了柔性 PCB 绕组设计方法。

(2) 柔性 PCB 绕组在缠绕的过程中会由于缠绕半径不断变化,出现绕组缠绕不等距的问题,即绕组沿径向产生偏移。本文提出使用平均半径的方法,可以将各圈的半径分别等效为其各自对应的平均半径,使得柔性 PCB 绕组的各相导体沿径向对齐,从而解决绕组缠绕不等距的问题。

(3) 通过有限元分析验证了所设计的柔性 PCB 绕组电机性能达到电机技术要求。在温度场中,当电机以额定工况长时间运行时,电机的最高温度稳定在 72.863 ℃,处于柔性 PCB 绕组电机各部分结构材料的耐热温度范围内,表明所设计电机具有良好的热稳定性。

【参 考 文 献】

[1] 彭媛媛. 无槽高速永磁无刷直流电机的设计与优化[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2021.

[2] 温晓阳. 高速外转子无槽电机设计与仿真[J]. 防爆电机, 2018, 53(4): 18.

[3] 姚光久, 谷爱昱, 江伟. 无槽电机的设计与仿真

[J]. 防爆电机, 2016, 51(5): 12.

[4] 关丽雅, 李耀国, 宋桀, 等. 无槽无刷直流电机设计[J]. 新技术新工艺, 2022, (7): 42.

[5] JUNG I, KIM J, CHOI J, et al. A study on design and manufacturing of a micro brushless DC motor[C] // 2005 International Conference on Electrical Machines and Systems, 2005.

[6] WALLMARK O, KJELLQVIST P. Analysis of a low-cost air-gap winding for permanent magnet synchronous motors[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2009, 24(4): 841.

[7] NAGRIAL M, RIZK J, HELLANY A. Design and performance of permanent magnet slotless machines[C] // 2008 18th International Conference on Electrical Machines, 2008.

[8] 王晓远, 黄旭东, 李天元. 高频供电条件下的 PCB 定子盘式永磁电机绕组优化设计[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(6): 1937.

[9] 王晓光, 胡藏现, 赵萌, 等. PCB 定子无铁心盘式电机绕组结构设计与优化[J]. 微电机, 2020, 53(10): 17.

[10] 南献茹. 基于 PCB 绕组的永磁无刷电机有限元仿真[D]. 济南: 山东大学, 2019.

[11] BAUDART F, DEHEZ B, DENIES J, et al. Shape optimization of flexible PCB slotless windings in BLDC machines[C] // 2013 International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2013.

[12] DEHEZ B, BAUDART F, PERRIARD Y. Analysis of a new topology of flexible PCB winding for slotless BLDC machines[C] // 2017 IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC), 2017.

[13] FRANÇOIS G, DEHEZ B. Impact of slit configuration on eddy current and supply current losses in PCB winding of slotless PM machines[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2022, 58(5): 6035.

[14] 韩雪岩, 李春雷, 宋聪, 等. 基于磁热耦合的高速永磁电机温升计算及其应用[J]. 微电机, 2020, 53(1): 13.

[15] 孔晓光, 王凤翔, 邢军强. 高速永磁电机的损耗计算与温度场分析[J]. 电工技术学报, 2012, 27(9): 166.

[16] 兰志勇, 王琳, 焦石, 等. 高速永磁同步电动机流场及温度场分析[J]. 微特电机, 2018, 46(2): 31.