

航空用三维线圈永磁微电机性能测试*

Performance Testing of MEMS 3D Coil Permanent Magnet Micromotor

■ 黄志平 雷凯博 桑济昌 徐天彤 / 北京航空航天大学

微机电系统 (MEMS) 电磁电机因具备高功率密度的特点, 作为微型驱动具有广泛的应用前景, 尤其是应用于微型航空推进方面。而由于毫米级微电机的尺寸与结构限制, 现有的测试数据通常集中在电机转速等关键指标, 针对微电机的测试还未形成相对成熟的测试方案。本文搭建的完整测试台可应用于毫米级电磁微电机的测试, 并为进一步拓展其未来的发展前景做出贡献。

器件微型化促进了可以应用在微型泵、芯片散热、微型旋翼飞行器上的MEMS电磁电机的发展, 尤其是在微型航空推进领域有广泛的应用。目前大部分研究的重点在于微电机的结构与工艺设计, 尤其是对电机线圈缠绕形式与工艺制造方式的研究, 但由于制造工艺的前沿性与复杂性, 仍需进行不断优化来提高制造的可靠性, 另外, 对于电机的测试方案也还需要进行进一步探索。

微电机性能测试概述

无论对传统大型电机还是微型电机来说, 转速、扭矩和反电势等3个指标是评估电机性能的关键, 多数针对微型电机的研究也重点展示了相关测试方法与结果。然而, 仅有3个参数不能完全代表电机性能。对于常规尺寸电机 (应用于电动车等) 已具有相对成熟的测试系统以及故障检测试验方法, 而微电机由于试验可重复性低、微量读取难度大等问题, 不能得到足够的支撑测试需求, 因此一些研究不断优化

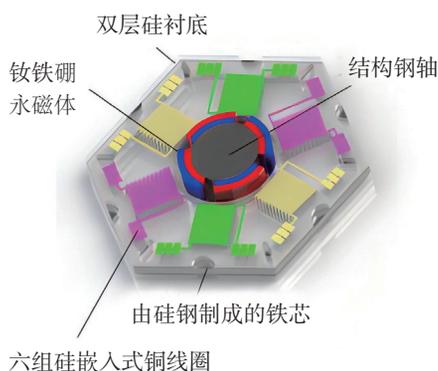


图1 带有三维铁芯螺线管线圈的径向磁通微电机

电机本身的结构与工艺, 以及从微量读取方法上进行突破, 提高微电机性能测试的可靠性与准确性。另外, 还有研究人员提出了一种监测电机转子偏心运动的方法, 以更加全面的评估电机运行状态。

已给出性能参数数据的永磁微电机, 几乎均采用平面线圈、轴向磁路设计的形式, 部分电机转速可达万转量级, 输出转矩均在微牛米量级。虽然平面线圈被广泛应用于永磁旋转电机, 但三维螺线管式线圈具有更高的电感密度, 有利于进

一步提高MEMS电机的功率密度。

在之前的研究中, 研究团队研制了一种具有更高功率密度的基于三维铁芯螺线管线圈的径向磁通永磁无刷直流 (BLDC) 微型电机, 虽然给出了仿真结果, 但由于并没有针对微电机的完整的测试方法, 因此未进行实际测试。本文针对制作结果较好的微型电机, 提出了对此微电机的完整测试方案, 并搭建了测试台, 对此微电机进行了测试, 得到了比较完整的电机性能测试结果, 证明本文提出的测试方案对于毫米级微电机的性能测试与迭代优化有帮助。

微电机的模型和实物

研究团队已经研制的基于MEMS三维铁芯电磁线圈的径向磁通永磁微电机如图1所示。微电机由六槽定子和四极转子组成, 其中, 六槽定子包含6组嵌硅线圈和插入的硅钢铁芯, 每组线圈匝数为15, 线径宽度为 $100\mu\text{m}$; 四极转子包含中间的圆钢轴和吸附着的4片扇形永磁体。嵌硅线圈采用了MEMS工艺制

*基金项目: 先进航空动力创新工作站项目 (HKCX 2020-02-015)

造,包括深度反应离子刻蚀、硅-硅(Si-Si)直接键合和穿透硅通孔技术(TSV)镀铜。微电机的尺寸为22.3 mm×19.3mm×1.6 mm,是尺寸比较小的径向磁通BLDC电机。

微电机的测试方案的构建

微电机的测试不同于大型电机,尤其是在实验室研制阶段,所采用的试验方案、监测参数有很大不同。研究团队构建的测试方案,在保证微电机测试时的稳定性、准确性的前提下,进行了静态测试、通电测试、耐温测试与运行测试等4部分测试,用以表征微电机研制进展,同时也反映了此种微电机样机MEMS加工试制的成功。

静态测试是针对微电机定子的测试,包括质量、电阻、插入铁芯前的电感、插入铁芯后的电感。定子的质量利用天平进行测量;6组嵌硅线圈的电阻利用四探针法进行测试;电感利用探针以及胜利仪器公司(VICTOR)VC4091C台式数字电桥进行测试,利用三轴位移平台、探针台、样品台等搭建组合式测试台,利用显微系统观察探针的位置,将其压紧在嵌硅线圈的引脚上进行测试。

耐温测试是在电机不转动时,给线圈通电,测量电机表面的温度变化,从而检验电机在堵转时,仍能保持良好的散热性能,能保证不会烧坏电机。硅的导热性能非常好,可以利用单一测温点的温度来表示整个电机表面的温度,因此直接利用热电偶对电机的定子进行测温。对于微电机来说,不仅尺寸微小,而且测温点需要避开嵌硅线圈,因此测温位置比较有限。选取微电机定子表面距离较远的两个测点,用导热胶将热电偶黏接在测温点处,搭建的耐温测试系统如图2所示,由微电机、热电偶、直流电源、冰瓶、数据采集模块、电脑构成。

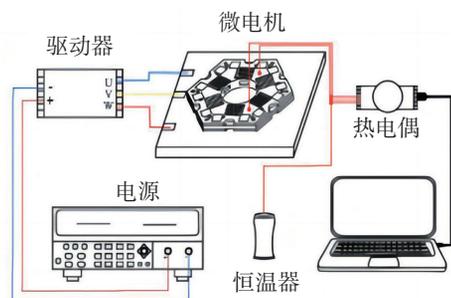
通电测试包括电机输出反电势和堵转试验。电机输出反电势方法是将伺服电机与扭矩传感器的另一端连接,不接驱动器。将电机与伺服电机相连并起动,带动本电机旋转,将其中两相绕组与示波器相连,输出反电势波形。堵转转矩测试方法为将电机转子停在不同角度锁紧电机,对电机施加额定电压,电机停止的短时间内,测量电机的扭矩、电流等数据作为堵转测试。运行测试是转子在定子的磁场驱动下正常转动的输出量的测试。

通电测试和运行测试是借助扭矩传感器(型号为UNIPULSE UTMII-0.2Nm,精度为0.03%FS)来实现的测试。按照设计转子的轴径尺寸,选取相同轴径的扭矩传感器,进而将扭矩传感器的轴作为测试时微电机的转子轴。这样可以给出更适合的实验室研制阶段的测试方案,同时可以减小轴承带来的摩擦力的影响,测试的结果更精确。

测试系统的安装顺序如下:将永磁体直接贴附在扭矩传感器的驱动轴作为转子,并安装于XY位移平台上;将微电机定子置于转接板上,由于微电机定子在加工过程中经过了研磨工艺,因此定子表面无法完成进行引线键合,本测试借助特殊形状的引电盖,成功利用银浆将导线从定子上穿过引电盖引出,再将定子安装与Z轴位移平台上;调节XY位移平台,将转子对准定子内径,调节Z轴位移平台,使得转子、定子完成配合。搭建的整体测试系统如图3所示,由测试台、驱动器、电脑和直流电源构成。

微电机的测试结果

静态测试的结果反映了本电机工艺制作的精良。定子实物测试的质量为2.250g,与设计值2.277g的误差仅有1.19%,这得益于MEMS工艺制作的高精度,转子的质量取决于实际使用时转轴的长短,如果取设计值6mm,则最终微电机的总质量为3.552g。由于微电机的六相线圈是分开的,因此分别测试单个线圈,电阻均为 0.39Ω 。在400Hz的输入频率下,铁芯为1mm厚时,单个线圈平均电感值为 $0.837\mu\text{H}$;铁芯为1.2mm厚时,单个线圈平均电感值为



(a) 微电机耐温测试系统



(b) 微电机测温点

图2 微电机耐温测试系统

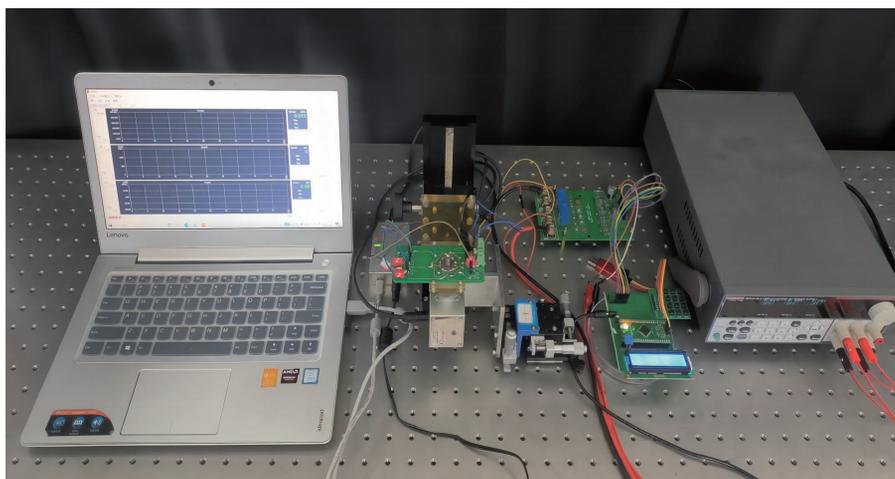
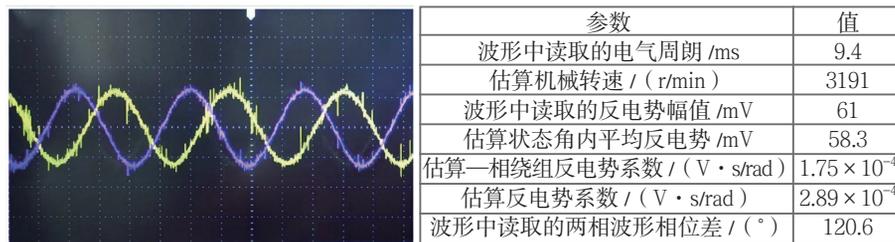


图3 微电机通电测试和运行测试系统



(a) 反电势波形

(b) 反电势波形的计算结果

图4 MEMS电机输出反电势测试

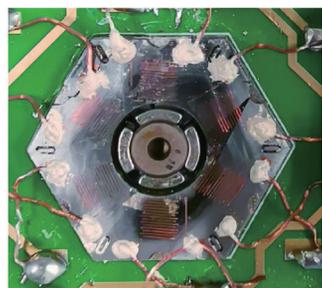
1.060 μH, 这表明本电机的MEMS线圈在加工时, 可以控制在键合前的刻蚀工艺, 实现不同深度的铁芯槽, 从而装配时插入不同厚度的铁芯, 得到不同的电感值, 有利于电机的特异化应用。与现有的小于

100nH量级的MEMS线圈相比, 储存并转化电能和磁能的能力明显提高, 也体现了本电机相对于采用平面线圈的电机的优势。

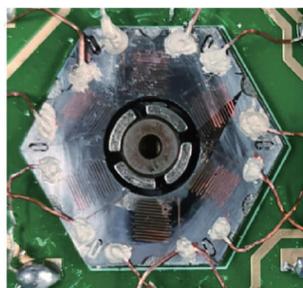
通电测试的结果反映了本电机的研制圆满成功。经过反电动势测

试, 得到反电动势测试结果如图4所示(伺服电机在3000r/min下, 本电机的输出反电势波形)。本电机的结构属于无刷直流电机, 由于永磁体的体积非常小, 加工能力有限, 因而采用简单的平行充磁和等厚设计, 所以测试得到的微电机的反电势形状接近正弦波。读取反电势波形可以得到电气周期和反电势幅值, 进而计算得到转速和平均反电势, 最后得到本电机的反电势系数为 $2.89 \times 10^{-4} \text{V} \cdot \text{s/rad}$, 与设计值相差极小, 证明本电机样机试制成功, 无结构缺陷。

堵转测试得到转子不同角度、不同电流对应的堵转转矩, 堵转转矩测试结果仅列出30°时的结果(转子永磁体与线圈同极正对偏转角为30°)如图5(c)所示, 因存在齿槽转矩, 电流为0时堵转转矩不为0。通过对应的输入电流和输出的堵转转矩的值进行计算, 得到不同角度的转矩电流比如图5(d)所示。可以得出, 一个状态角内的平均堵转转矩电流比为 $0.267 \text{mN} \cdot \text{m/A}$, 即测得的转矩系数为 $2.67 \times 10^{-4} \text{N} \cdot \text{m/A}$, 与设计的转矩系数误差在合理范围内, 可知本电机结构完整, 功能



(a) 堵转测试时转子停止在0°位置(永磁体与线圈同极正对)



(b) 堵转测试时转子停止在35°位置(永磁体与线圈同极正对偏转角为35°)

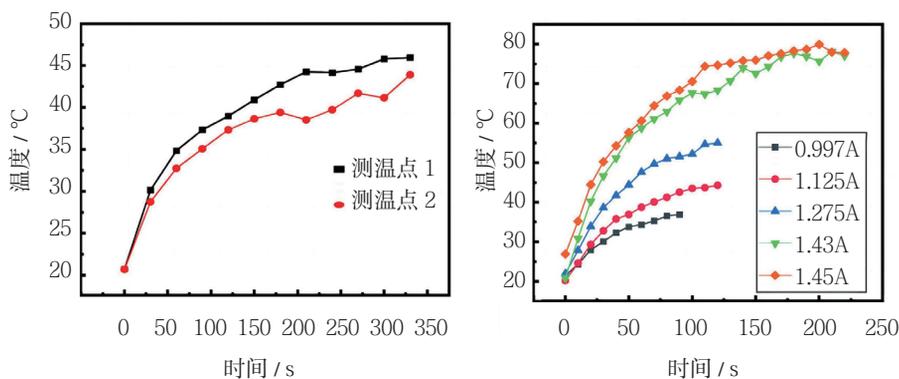
电流 /A	-2	-1.5	-1	-0.5	0	0.5	1	1.5	2
堵转扭矩 / (mN · m)	-0.69	-0.54	-0.40	-0.25	-0.19	0.06	0.22	0.38	0.56

(c) 堵转转矩测试结果(以30°为例), 电流为负表示通反向电流

机械角度 / (°)	0	10	20	30	35	40	45	55	65
转矩电流比 / (mN · m/A)	0.15	0.21	0.23	0.32	0.30	0.30	0.27	0.17	0.12

(d) 不同角度的堵转转矩电流比测试结果

图5 MEMS电机堵转测试



(a) 0.98A 稳定电流下两测点的温度-时间曲线 (b) 不同稳定电流下的温度-时间曲线

图6 MEMS电机耐温测试

良好,基本符合设计方案。

耐温测试的结果反映了本电机在实际使用时,不但可以长时间运行,而且在电机出现故障处于堵转状态下,也能不损坏电机。耐温测试结果为:在0.98A稳定电流下,CH1测点的数据较为平滑稳定,后续测试以CH1的数据为准,如图6(a)所示。图6(b)中展示了不同电流下CH1测点的电机发热情况,可知1.452A稳定电流(绕组发热功率为3.29W,电机额定温度为1.5A)下,本电机的静子表面温度能够稳定在78℃,同时也满足电机结构强度设计要求。

运行测试的结果反映了本电机的转速可以随电流的增加达到不同的转速。运行测试结果为:在0.3A电流下,电机的转速为150 r/min,在0.6A电流下,维持375 r/min转速的稳定旋转。电机转速性能也与控制器有关,后续将优化控制器来进一步提升电机的性能。

结束语

研究团队针对MEMS三维线圈永磁微电机性能进行了测试。测试结果显示, MEMS电机结构完整,可进行

稳运行。微电机的反电势波形为规则的正弦波,根据波形计算的反电势系数为 $2.89 \times 10^{-4} \text{V} \cdot \text{s/rad}$;在自然对流状态下,微电机内部发热功率为3.29W,微电机表面温度稳定在78℃,耐温能力良好;空载运行输入0.6A稳定电流可维持375 r/min转速稳定旋转。本文在毫米级微电机的测试方面有了进一步探索,之后将继续优化微电机的性能,拓展微电机未来发展前景。

航空动力

(黄志平,北京航空航天大学,博士研究生,主要从事超微型动力技术研究)

参考文献

- [1] NIENHAUS M,EHRFELD W,STOELTING H,et al.Design and realization of a penny-shaped micromotor[J].Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering,1999,3680:592-600.
- [2] MERZAGHI S,KOECHLI C,PERRIARD Y.Development of a hybrid MEMS BLDC micromotor[J].IEEE Trans,2011,47(1):3-11.
- [3] TAKATO M,YOKOZEKI Y,MISHIMA K,et al.Design of electromagnetic

induction type MEMS motor with multilayer ceramic three-dimensional coil[C]//2016 International Conference on Electronics Packaging (ICEP),IEEE,2016.

- [4] PANG D,SHI Z,XIE P,et al. Investigation of an inset micro permanent magnet synchronous motor using soft magnetic composite material[J].Energies,2020,13.
- [5] AKHTAR M,HUSSAIN M,PAL P, et al.dSPACE based motor testing platform for characterization of BLDC motor performance under different loading conditions[C]//2018 8th IEEE India International Conference on Power Electronics (IICPE),IEEE,2018.
- [6] MODAFE A,GHALICHECHIAN N,FREY A,et al.A microball-bearing-supported linear electrostatic micromotor with benzocyclobutene polymer insulating layers[C]// International Conference on Solid-state Sensors,2005.
- [7] GUCKEL H,CHRISTENSON T,SKROBIS K.A first functional current excited planar rotational magnetic micromotor[C]// Micro Electro Mechanical Systems,IEEE,1993.
- [8] XU T,SUN J,WU H, et al.3D MEMS in-chip solenoid inductor with high inductance density for power MEMS device[J].Electron Device Letters, IEEE,2019,40(11):1816-1819.
- [9] TAO Z,SUN J,LI H,et al.A Radial-flux permanent magnet micromotor with 3d solenoid iron-core MEMS in-chip coils of high aspect ratio[J].IEEE Electron Device Letters,2020,PP(99):1-1.