

微球轴承支撑的集成电磁微型汽轮发电系统设计

田 亮

(山东电力工程咨询院有限公司, 山东 济南, 250013)

摘要:为实现碳氢化合物发电机的小型化,提高微机电系统的集成性和发电效能,设计了一种微球轴承支撑的电磁微型涡轮发电机系统,由一种具有高磁通密度的厚磁性元件的硅微涡轮转子和一种具有最佳磁通连接和低压线圈电阻的薄铜片线圈组成。充分利用微球轴承的稳定性和简单性,实现了利用气流推动转子转动输出电能的集成度高和简单操作目的。对系统设计方案和关键技术的实现进行理论验证,该系统设计减少了传统发电机制造和集成的复杂度,实现高能量密度碳氢燃料能源转换电能的开发和利用。

关键词:微球轴承;电磁;汽轮发电;涡轮转子

中图分类号:TM311 **文献标志码:**B **文章编号:**1001-9898(2021)01-0023-04

Design of Integrated Electromagnetic Micro Turbine Generator System Supported by Microsphere Bearing

TIAN Liang

(Shandong Electric Power Engineering Consulting Institute Co., Ltd., Jinan 250013, China)

Abstract: In order to realize the miniaturization of hydrocarbon generator and improve the integration and power generation efficiency of MEMS, an electromagnetic micro turbine generator system supported by microsphere bearing is designed in this paper. It consists of a silicon micro turbine rotor with thick magnetic elements with high flux density and a thin copper coil with optimal flux connection and low-voltage coil resistance. Taking full advantage of the stability and simplicity of the micro ball bearing, the high integration and simple operation of the rotor driven by air flow are realized. The system design scheme and the realization of the key technologies are theoretically verified. The speed reduction test of the micro turbine shows that the dynamic friction torque is as high as $33 \mu\text{Nm}$ at the speed of 16 krpm , which is equivalent to 6% of the turbine efficiency; the maximum cross current open circuit voltage of 0.1 V and the power of $5.6 \mu\text{W}$ are measured under the 220Ω resistance load, which can achieve the mechanical and electrical efficiency of 3×10^{-6} , which is consistent with the work of more than three orders of magnitude theoretical design requirements of rate level.

Key words: microsphere support; electromagnetic; steam turbine power generation; turbine rotor

1 概述

为了提高便携式发电机系统的性能,需要开发小型高密度电源,因此,有必要对由机电发电机和内燃机组成的传统大型发电机进行小型化革新设计和发电效能进行提升。A. S. Holmes 等人设计了一种具有轴向磁通和轴流的永磁微型涡轮发电机,该装置使用 SU-8 聚合物转子,支承在滚珠轴承上,在 30 kr/min 下产生 1.19 V ,相当于 1.1 MW 的预期交流功率^[1]。C. T. Pan 等人研制了一种类似的轴向磁通永磁发电机使用外部主轴驱

动,并达到 1.89 MW 在 13 kr/min ^[2]。H. Raisigel 等人开发了一种在永磁体上支撑涡轮结构的微型涡轮发电机,该装置由一个带有三相多匝线圈的定子和一个由磁气轴承支撑的转子组成,在 58 kr/min 时产生 14 MW 的功率^[3]。

综上所述,国外研究人员已经开展了较多基于微球支撑结构微型涡轮发电机的系统设计和性能验证,但其发电效能不够高、系统设计集成度不够,且处于初步研究阶段结构稳定性验证不足,没有充分利用新型清洁能源等。

本文是利用微球轴承的稳定性和简单性,充

收稿日期:2020-06-16

作者简介:田 亮(1981—),男,工程师,主要从事电气工程及自动化控制研究工作。

分利用碳氢燃料高能量密度的优势,旨在采用简单的操作方案将气流转化为电能。开展一个利用封装微型球轴承、转子和定子组成的微型涡轮发电机系统设计,实现集成性强、涡轮功效强大的目的。

2 系统设计方案

微型涡轮发电机涡轮转子由悬浮在定子上方的微型球轴承支撑,结构示意图如图1所示。涡轮转子由2块500 μm 厚的硅片粘合在一起,将微珠($\phi=285\text{ }\mu\text{m}$)封装在预蚀刻沟槽之间,如图1(c)所示。顶部晶片为蚀刻200 μm 深的径向流动涡轮结构,用于气动驱动。在底部晶圆上刻腔,以容纳10个500 μm 厚的NdFeB永磁体,见图1(b)。这些永磁体以交替极性排列,内半径和外半径分别为2 mm和5 mm。此外,磁铁和转子之间集成了一个250 μm 厚、半径为5 mm的高磁导率Fe-CoV盘。在采用钕铁硼磁体作为磁场源的同时,为了减小器件的磁阻,提高定子内部的磁通密度,在设计中加入了FeCoV盘。带有通孔的硅管道芯片放置在转子顶部,用于引导氮气流动,如图1(a)所示。

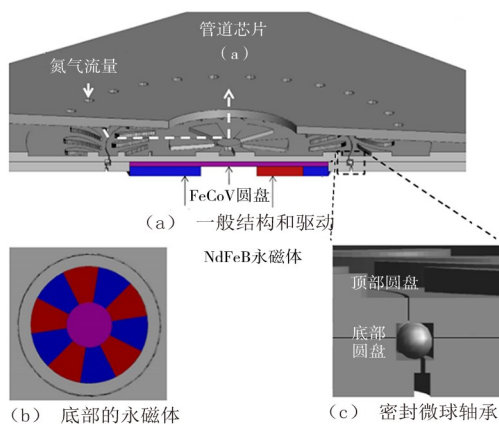


图1 转子的三维示意

定子由平面、三相、十极和每极三匝的铜线圈组成。由于法拉第磁感应定律,磁铁在定子上的旋转导致电压感应。为了优化磁通连接并降低径向线的电阻,线圈的径向特征以及一半的内部和外部连接被电镀在400 μm 厚的硅衬底上,硅衬底具有贯穿蚀刻的线圈。其余的连接定子背面有通孔的介电层上,使定子磁通最大化,同时使相位电阻最小化,以提高输出功率。

3 系统关键技术实现

3.1 微球轴承支撑微系统的制造

基于微珠轴承的器件是通过在硅中的深反应离子刻蚀在滚道中放置微珠来制造。为了减少球卡,滚道的设计宽度比微珠的宽度宽10 μm ,由于作用在转子/滑块上的法向力使滚珠与止推面接触,轴承在推力方向上没有游隙。密封轴承滚道深度被不对称地蚀刻,使得一个轴承设计为球直径深度的60%,另一个轴承设计为40%。偏移蚀刻深度的目的是防止球在操作过程中接触到键合界面。转子释放蚀刻将转子与定子断开。因为在微加工推力轴承中会产生不对称。转子需要在预定方向正常负载,以确保滚珠在平坦的硅表面上滚动。

3.2 转子系统的制造

转子由2块硅片组成,硅片上有蚀刻的滚珠滚道,滚道与中间微珠共析结合在一起。在两侧执行最终蚀刻步骤,以释放中心转子,并确定涡轮叶片和磁性部件外壳。另外,一个硅管道芯片被深刻蚀以形成通孔,在测试期间引导气流通过涡轮叶片。转子组件的制造和测试详情见文献[4]。在厚度为400 μm 的定子晶片中蚀刻和热氧化线圈外壳。采用自底向上镀铜工艺,共形填充刻蚀特征,形成线圈的第一层。在定子背面进行二级金属化,并通过200 μm 厚的溅射金层连接以完成线圈结构。

3.3 微型涡轮结构及系统组装

图2显示了设备横截面结构示意图。通过对轴承转速和推力载荷进行独立控制获得平面接触微球轴承动态摩擦特性。在降速试验期间,速度和负载的解耦是通过包装组件定义的静水压推力室实现的。微型加工涡轮机包装在2个塑料歧管之间,使用橡胶O形密封圈进行流体输送,以及柔性支撑。在操作过程中,装置的底面受压,产生净向上的法向力,使转子与滚珠轴承正确接触。在降速试验过程中,通过高灵敏度流量控制阀提供推力室流量并监测背面压力,可以实现所需的推力负载。为了驱动涡轮机,压缩氮气通过上部歧管提供,而光学位移探针跟踪减速器结构的旋转。光学位移传感器位于微型涡轮机中央出口处的12个蚀刻减速带结构正上方。当转子旋转时,传感器输出50%的占空比方波,频率比涡轮转速高12

倍。转子转速通过光学探针信号的快速傅里叶变换实时计算。

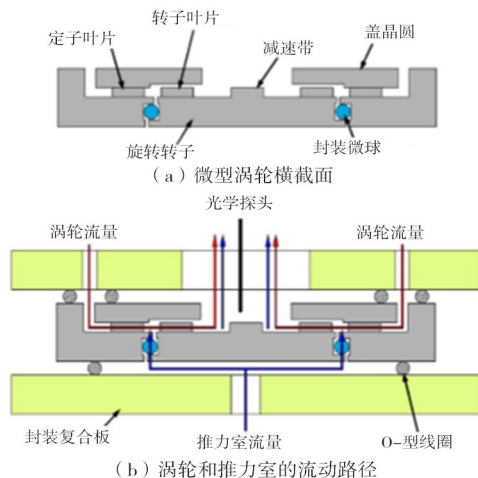


图2 设备横截面结构示意图

4 系统测试和结果

4.1 微型涡轮性能

涡轮性能曲线,见图3。

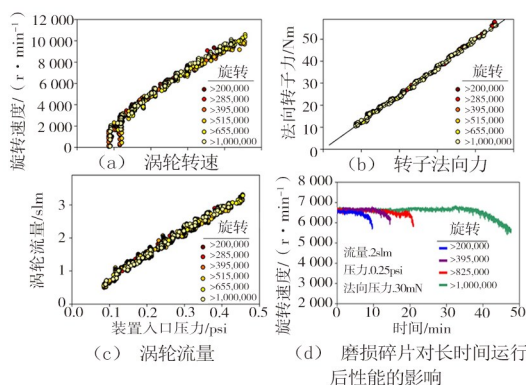


图3 涡轮机运行曲线

图3(a)显示了在低速下增加和减少驱动的备用路径。这可归因于多种因素,其中最简单的是与滚动接触相关的静摩擦大于动摩擦。与已经在运动的微珠相比,从静止开始,微珠需要更大的力来启动滚动。当涡轮机减速时,其在低于启动压力的驱动压力下保持旋转。此外,微珠的滑滚比变化也可能起到重要作用。在所有操作范围内,微珠的滑滚比是未知的,从静止开始,较大的滑滚比会导致更高的摩擦力。另一个可能的影响因素是由于启动过程中轻微不对称的负载条件,转子上的净径向力。

图3(b)显示了入口压力和转子法向力之间的线性关系,说明了驱动过程中法向力和旋转力的依赖性。虽然微型涡轮机已经超过50 kr/min的

速度启动,但装置特性被限制在10 kr/min。选择该值是为了将转子法向力的范围限制在相同尺寸的底驱动静电微电机中预期的范围。当装置在50 kr/min以上启动时,转子法向力的增加,再加上转速的增加,会导致装置的严重磨损和突然失效。

图3(c)显示了当涡轮气流通过转子外围时底面受压,产生净向上法向力,而不增加推力室流量。在没有通过轴承的推力室泄漏流的情况下,转速、法向力和涡轮流量在图3中显示为装置入口压力的函数。这种封装方法允许在降速试验期间对法向力和旋转力进行独立控制,这2种力在涡轮机驱动期间是耦合的。图3(a)~(c)中的特征曲线是在超声波清洗后收集的。这表明,虽然磨损碎片限制了设备的耐久性,但磨损本身(与制造状态的几何偏差)对清洁状态下的性能几乎没有影响。

图3(d)所示为磨损碎片对长时间运行后性能的影响,其中涡轮机在0.25 lbf的驱动压力下驱动,产生2 slm的流量和30 Nm的法向力。在持续运行的初始阶段之后,可以看到转速下降。这一行为归因于磨损碎屑的堆积,由于与颗粒污染相关的摩擦增加,使转子减速。因此,装置定期在丙酮浴中进行超声波搅拌以去除磨损颗粒。超声波清洗后,涡轮性能恢复到预期性能,显示出随着转速增加而运行更长时间;这意味着随着时间的推移,磨损率降低。

4.2 定子线圈的电性能测试

测量定子线圈的电性能结果表明:薄膜的每相电阻为220 Ω ,主要是由于薄膜背面金的金属化作用。测量电感为3.5 μH ,在输出频率(0~10 kHz)下产生0.2 Ω 的最大可忽略不计的最大阻抗。因此,假设内部定子每相阻抗为纯电阻220 Ω 。利用转子自旋下降法对微加工球轴承的摩擦力矩进行了表征。最初,加压氮气用于在16 kr/min下驱动转子。接着,流动中断,磁转子在轴承的摩擦下减速。

在减速过程中收集了转子角位置与时间的数据,如图4所示为转子转速下降和摩擦力矩计算曲线拟合。与R²值为0.99的指数曲线拟合后,动态摩擦值从(5.45~33 μNm)不等,相当于16 kr/min时涡轮效率约为6%。与其他装置中的微球轴承的演示相比^[5-7],该微型涡轮发电机的转子部件具有更高的摩擦力,因为其比表面积高44%,微球在装置中多20%,总质量增加了4倍。

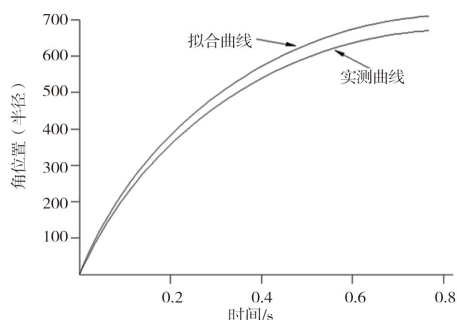


图4 转子转速下降和摩擦力矩计算曲线拟合

图5显示每相AC开路电压相对于转子速度的幅值,与在2 kr/min时的最大值为0.1 V呈线性关系。实验值在由柔性O形环定义的预期气隙范围(200~700 μm)下使用模拟结果计算的理论范围内。

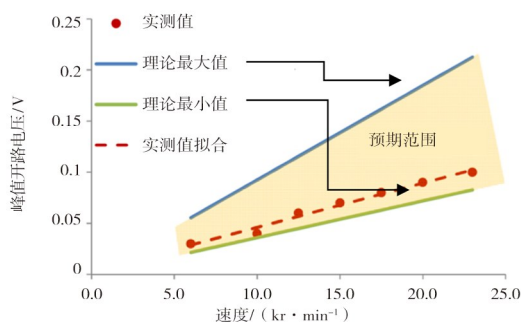


图5 开路电压与转子转速曲线

4.3 微型电机的送电测试

对该装置进行了送电测试,为了从微型涡轮发电机中提取最大功率,在一个相端连接一个匹配的220 μm 的电负载。转子采用加压氮气旋转,在不同转速下测量输出功率。同时,记录外加气体压力和流量,计算输入的外加功率,见图6。

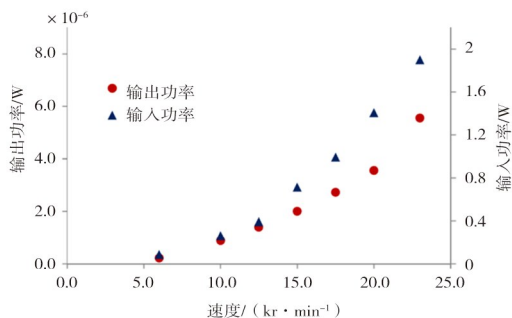
图6 220 Ω 电阻器输出的输入功率和输出功率与转子转速的关系

图6显示了220 Ω 电阻器输出的机械输入功率和输出功率与转子转速的关系。最大相对交流功率在2 kr/min时测量为5.6 μW ,对应于 3×10^{-6} 机械电效率。功率和效率值相对较低,主要是由于高

相阻抗。相阻抗的主要贡献者是形成总电阻99%以上的薄背面连接层。通过在厚度大于200 μm 的聚合物模具中电镀背面连接件,可以获得3个数量级以上的功率水平。

5 结论及展望

本研究设计了一种集成磁性元件和微球轴承的电磁微型汽轮发电机,具有集成性强、涡轮功效强大的优势,设定频率下,定子相位的电阻和电感分量测量为220 Ω 。微型涡轮的降速测试表明:在16 kr/min的转速下,动态摩擦扭矩高达33 μNm ,相当于涡轮效率的6%;在220 Ω 电阻负载下测量了0.1 V的最大相交流开路电压和5.6 μW 的功率,达到 3×10^{-6} 的机械电效率,符合获得3个数量级以上功率水平的理论设计要求。

微球轴承支撑的集成电磁微型涡轮发电机系统设计减少了传统发电机制造和集成的复杂度,可实现高能量密度碳氢燃料能源转换电能的开发和利用,为传统的机电发电机和内燃机等大型发电机的小型化提供了新的技术途径。

参考文献:

- [1] Andrew S. Holmes, Guodong Hong, Keith R. Pullen. Axial-flux permanent magnet machines for micropower generation [J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2005, 14 (1): 54-62.
- [2] C. T. Pan, Y. J. Chen. Application of low temperature co-fire ceramics on in-plane microgenerator [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2008, 144(1): 144-153.
- [3] H. Raisigel, O. Cugat, J. Delamare. Permanent magnet planar microgenerators [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2006, 130(s1): 438-444.
- [4] Arnold D P, Herrault F, Zana I, et al. Design optimization of an 8 W, microscale, axial-flux, permanent-magnet generator [J]. Journal of Micromechanics & Microengineering, 2006, 16(9): 290-296.
- [5] Tripathi S M, Tiwari A N, Singh D. Grid-integrated permanent magnet synchronous generator based wind energy conversion systems: A technology review [J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2015, 51: 1288-1305.
- [6] Herrault, F. Chang-Hyeon Ji, Allen, M. G. Ultraminiaturized, high-speed, permanent magnet generators for milliwatt-level power generation [J]. 2008, 17(6): 1376-1387.
- [7] 陈亮亮, 祝长生, 王忠博. 电磁轴承高速飞轮转子模态分离状态反馈解耦控制 [J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(18): 5471-5472; 5546.

本文责任编辑:罗晓晓