

文章编号:1000-582X(2007)07-0018-04

准气体动力循环 Power MEMS 气体静压轴承

王婧^a, 张力^a, 邓达强^b, 陈卫军^a, 徐宗俊^b

(重庆大学 a. 机械传动国家重点实验室; b. 机械工程学院, 重庆 400030)

摘要:为追求微细尺度条件下超高能量密度的目标,提出了 Power MEMS 准气体动力循环发动机的概念。鉴于 Power MEMS 准气体动力循环发动机能够自行提供高压气源的结构特征以及气体静压轴承在性能上的优点,提出了将气体静压轴承应用于该 Power MEMS 发动机的研究和 Power MEMS 准气体动力循环发动机中气体静压径向轴承和止推轴承的结构形式的选择,指出了微细尺度下气体静压轴承的设计要点;运用气体静压润滑的基本原理对气体轴承的结构及运行参数进行了分析,获取了径向轴承和止推轴承的参数设计;通过气体轴承静态性能的计算,从承载能力方面验证了将所设计的气体轴承应用于 Power MEMS 准气体动力循环发动机中的可行性。

关键词:Power MEMS;微型发动机;气体静压径向轴承;气体静压止推轴承;承载能力

中图分类号:TP391.72

文献标志码:A

Power MEMS (MEMS-based power sources) 的研究,因其在 MAV (Micro Air Vehicles)、UAVs (Micro-Unmanned Aerial Vehicles)、可携带能源(可携带电脑、手机、GPS 接收器等器件的电池系统)、未来战争(满足 Land Warrior System 电池重量目标)等领域的应用前景,所进行的相关研究引人关注^[1-2]。典型的超高能量密度 Power MEMS 包括:微型涡轮发动机、微型转子发动机、微型自由活塞式发动机等。在微尺度条件下,为了追求超高能量密度的目标,Power MEMS 必须大幅度地提高其热力循环的频率,通常要求其轴承转速接近或达到 10^6 r/min 数量级。气体轴承无需其它介质的润滑,摩擦阻力小且可以取得极高的转速,而且这些优点在微尺度条件下同样适用^[3]。因此,在细尺度(meso scale)和超高转速条件下,气体轴承具有应用于 Power MEMS 轴承单元的必要性。但由于受到细尺度制造技术以及 Power MEMS 自身提供高压气源的限制,如 MIT 的微型涡轮发动机等 Power MEMS 器件,在结构上也仅能布置结构简单的气体动压轴承^[2]。

针对 Power MEMS 微细尺度高能量密度输出的应用要求,出现了准气体动力循环 Power MEMS 的概念。与以往的 Power MEMS 器件不同,准气体动力循环

Power MEMS 具备自行提供持续的高压气源的能力,于是采用静压气体轴承形成微细尺度和高转速条件下的可靠和稳定的轴承构造成为可能。然而,Power MEMS 的微细尺度特征,使气体轴承的结构形式和设计要点等有别于常规。因此,具体探讨了采用气体静压径向轴承和止推轴承承载准气体动力循环 Power MEMS 径向载荷和轴向载荷的问题;分析了 Power MEMS 静压气体轴承的结构特征和设计参数;通过气体轴承静态性能的分析计算,从承载能力方面验证了静压气体轴承应用于准气体动力循环 Power MEMS 中的可行性。

1 Power MEMS 准气体动力循环发动机气体静压轴承结构特征

对于特征尺寸为厘米数量级的 Power MEMS 准气体动力循环发动机,其内置的气体静压轴承结构特征如图 1 ~ 图 3 所示。其中,图 2 和图 3 分别表示了图 1 中区域 1 与 2 所示的气体轴承的详细结构。在 Power MEMS 发动机工作过程中,高压气体在发动机的活塞转轴中与燃料进行预混合并且随着活塞转轴一起高速旋转,在活塞转轴壁面通过 MEMS 技术加工若干小

收稿日期:2007-04-28

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50575231)。

作者简介:王婧(1982-),女,重庆大学硕士研究生,主要从事微机电动力系统领域的研究。张力(联系人),男,博士,副教授,
(E-mail) zhangli20@cqu.edu.cn。

孔, 高压气体可通过小孔流出至活塞转轴与发动机缸体的间隙中并产生压降, 同时由于活塞转轴上径向和轴向载荷的存在使其两端产生压力差, 形成气体静压轴承, 支撑活塞转轴的高速旋转。

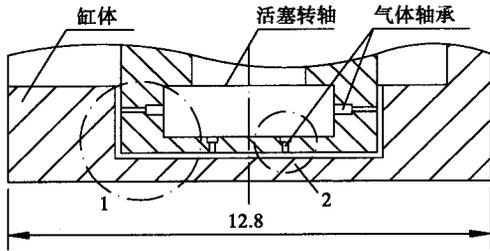


图1 Power MEMS 发动机气体静压轴承结构

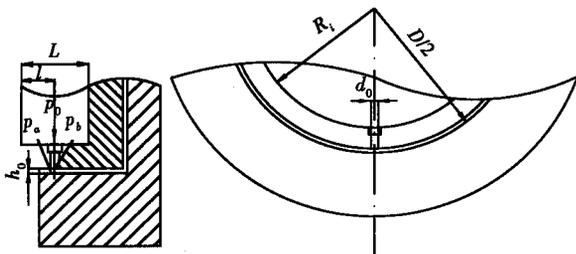


图2 环形孔式节流气体静压径向轴承结构

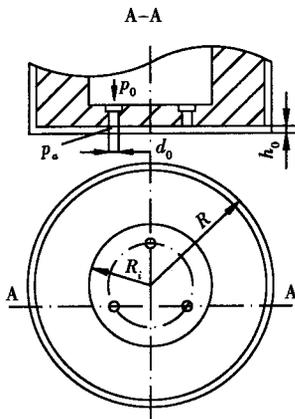


图3 多供气孔静压止推轴承结构

Power MEMS 准气体动力循环发动机总体上属于细尺度热机, 考虑 MEMS 制造技术的限制, 在满足性能要求的前提下尽可能采用结构简单的静压轴承, 较理想的选择有环形孔节流形式和简单孔节流形式。与环形节流孔的静压轴承比较, 简单节流孔轴承刚度较高, 但是要求在进气孔四周的轴承面中开气腔, 因此在细尺度和材料较硬的情况下会造成加工上的困难^[4]; 同时当间隙和表压比的值给定时, 环形节流孔的直径相对来说往往较大些, 因此更容易实现微细尺度条件下的加工。在稳定性方面环形节流孔没有气腔, 可以增强轴承对气锤的稳定性, 这有利于保证 Power MEMS 准气体动力循环发动机高转速条件下的稳定性。

2 气体静压径向轴承的参数分析

对气体轴承的静压润滑问题进行分析, 通常是采用如下无量纲稳态静压气体润滑雷诺方程^[5]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\bar{h}^3 \frac{\partial f}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\bar{h}^3 \frac{\partial f}{\partial z} \right) = 0, \quad (1)$$

式中 f 表示无量纲压力平方 (压方); \bar{h} 表示无量纲气膜厚度; x 表示无量纲轴向坐标; z 表示无量纲周向坐标。利用静压气体润滑的基本原理可对图 1 和图 2 所示准气体动力循环 Power MEMS 气体静压径向轴承的结构和性能进行分析。

Power MEMS 准气体动力循环发动机的轴承尺寸较小, 在进气孔被阻塞的情况下工作会出现所谓气锤现象的空气静压不稳定性, 因此避免进气孔阻塞成为轴承设计过程中的限制因素, 表压比 K_{go} 应满足以下的条件^[5]

$$0.8 > K_{go} = \frac{p_d - p_a}{p_0 - p_a} > \frac{\left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}} - \frac{p_a}{p_0}}{1 - \frac{p_a}{p_0}}, \quad (2)$$

式中 p_a 为气体轴承环境压力; p_0 为供气压力; p_d 为节流器出口压力; k 为气体的压缩指数。同时, 轴承半径间隙 h_0 的设计有下列限制^[5]

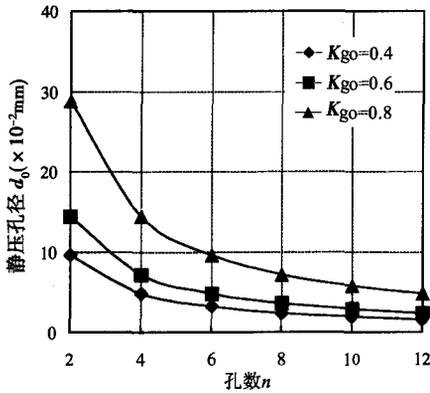
$$\frac{h_0}{D} = (0.00025 \sim 0.0005), \quad (3)$$

式中 $D = 2R = 4.4 \text{ mm}$, 于是按该式计算可得到 $h_0 = (0.0011 \sim 0.0022) \text{ mm}$ 。

通过计算轴承各参数特征及其变化趋势得到以下图 4 ~ 图 6。其中, 图 4 为气体轴承静压孔径 d_0 随孔数 n 的变化情况, 图 5 反映出静压孔径 d_0 随轴承几何参数 L/D 的变化趋势, 图 6 反映轴承参数 l/L 对静压孔径的影响。

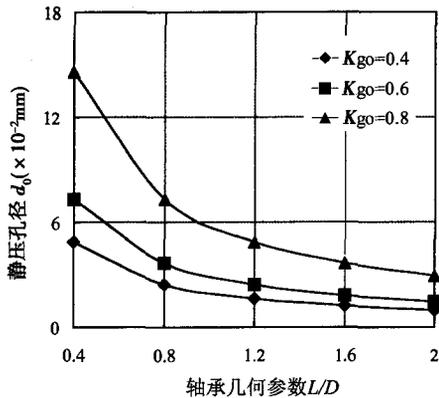
由以上各图可以看出, 对静压小孔的尺度设计影响的参数有多个。首先, 在 n 、 L/D 和 l/L 一定的情况下, 静压孔径都随着表压比 K_{go} 的增大而增大; 在满足式 (2) 的条件下表压比 K_{go} 越大越不易发生阻塞而且轴承刚度随之增大。据式 (2) 可知, 当使用空气作为润滑剂时, 只要满足 $K_{go} > 0.528$, 则 p_a/p_0 为任何值时节流器都不会发生堵塞。同时, 表压比一定的情况下, 孔径 d_0 随着 n 、轴承 L/D 和 l/L 的增大而呈减小趋势。于是, 在选取参数的时候还应该考虑到 Power MEMS 发动机的细尺度结构特性, 其加工制造会受到 MEMS 技术的限制, 在尽量保证结构简单。

根据以上分析, 气体静压径向轴承采用单排小孔



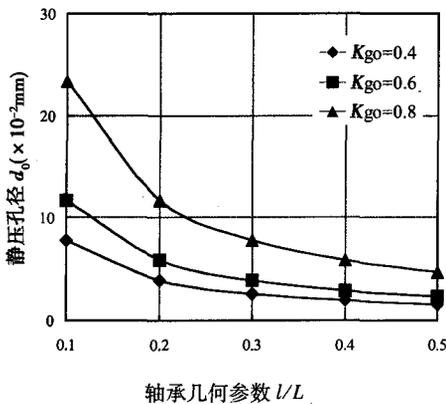
d_0 可见图 2 与图 3 的标注中

图 4 静压孔径随孔数的变化曲线



d_0, L, D 可见图 2 与图 3 的标注中

图 5 静压孔径随轴承 L/D 的变化曲线



d_0, L, l 可见图 2 与图 3 的标注中

图 6 静压孔径随轴承 l/L 的变化曲线

结构形式,各项轴承参数如下:孔数 n 为 6,表压比 K_{go} 为 0.6,轴承间隙 h_0 为 0.001 5 mm,孔径 d_0 为 4.6×10^{-2} mm,供气压力 p_0 为 1.0 MPa,环境压力 p_a 为 0.1 MPa(1 个标准大气压), L/D 为 0.6,。

3 气体静压止推轴承的参数设计

应用于 Power MEMS 准气体动力循环发动机的气

体静压止推轴承为多供气孔形式,轴承结构如图 1 和图 3 所示,轴承参数根据以下方法进行确定。首先,为使工作的轴承刚度尽可能高,轴承参数应选择无量纲刚度 \bar{k}_s 最大点对应的供气系数 Γ_s 进行估算。由于 $R = 2.2$ mm, $R_i = 1.1$ mm,若选用与图 2 所示的径向轴承相同的供气孔径 d_0 以及轴承间隙 h_0 ,则止推轴承各项参数之间的关系有^[6]:

$$\Gamma_s = \frac{6\mu nd_0 \sqrt{gR_0 T_0}}{p_0 h_0^2}, \quad (4)$$

式中, μ 为气体的动力粘度; R_0 为气体常数; g 为重力加速度。通过式(4)的计算,可得到合理的供气孔数。

在此基础上,可以确定气体静压止推轴承的设计参数:供气孔数 n 取为 3,轴承间隙 h_0 取为 0.001 5 mm,孔径 d_0 取为 4.6×10^{-2} mm,供气压力 p_0 取为 1.0 MPa,环境压力 p_a 取为 0.1 MPa(1 个标准大气压)。

4 气体静压轴承静态性能的分析

为验证轴承的承载能力能否满足 Power MEMS 准气体动力循环发动机的要求,对气体静压轴承的静态性能进行了计算。气体静压径向轴承的承载能力为^[4]

$$F = (p_0 - p_a)LD\bar{F}(\varepsilon \leq 0.5), \quad (5)$$

式中 F 为载荷系数, ε 为偏心率。根据式(5)对上述气体静压径向轴承的参数进行计算,得到轴承承载能力 F 等于 5.98 N;估算 Power MEMS 发动机中轴承所要承载的最大径向载荷 F_{rmax} 为 3.68 N,故在该组轴承参数满足发动机承载能力要求。通过计算得到如图 7 和图 8 所示的轴承承载能力随各参数的变化曲线。可以看出偏心率以及轴承的几何参数都是影响轴承承载能力的因素。

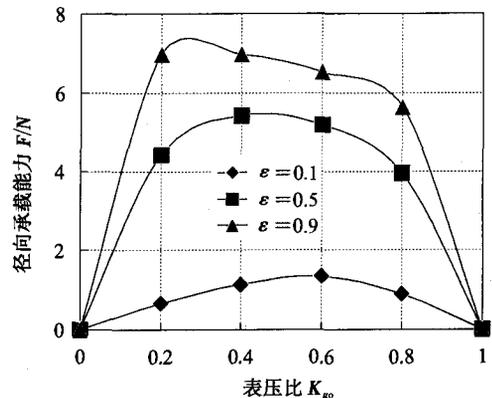
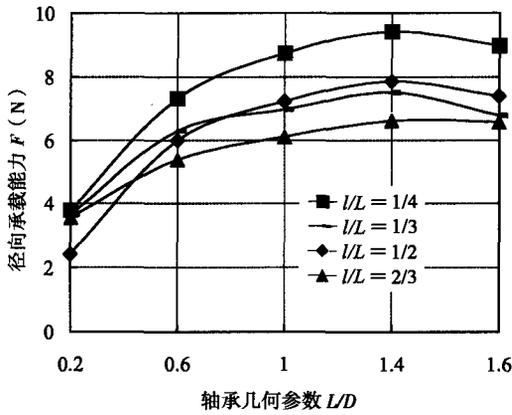


图 7 承载能力随表压比的变化曲线

在 Power MEMS 准气体动力循环发动机中,活塞转轴不仅承受径向载荷,同时也承载轴向载荷,静压止



L, D 可见图 2 与图 3 的标注中

图 8 承载能力随轴承 L/D 的变化曲线

推轴承的承载能力可表示为^[5]

$$W = \pi(R^2 - R_i^2)(p_0 - p_a) \bar{W}, \quad (6)$$

式中 \bar{W} 为无量纲的承载能力。通过该式计算可得止推轴承的承载能力 $W = 2.77 \text{ N}$ ，而 Power MEMS 准气体动力循环发动机中止推轴承需要承载的载荷为 1.30 N ，因此所设计的静压止推轴承满足要求。

变换止推轴承的供气孔数得到轴承静态性能的变化曲线，如图 9 所示。图中， K_s 为轴承刚度， Q 为气体流量。

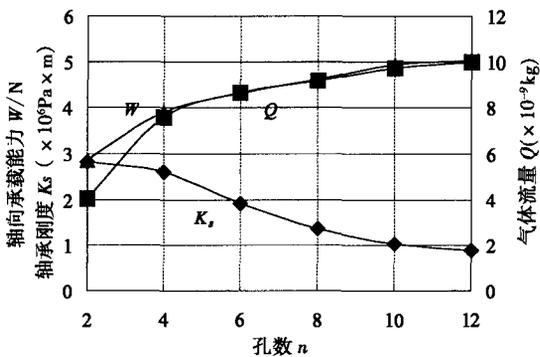


图 9 止推轴承静态性能随供气孔数的变化曲线

5 结 论

准气体动力循环 Power MEMS 具备自行提供持续的高压气源的能力，因此采用静压气体轴承形成微细尺度和高转速条件下的可靠和稳定的轴承构造成为可

能。不过，受微细尺度条件的影响，Power MEMS 准气体动力循环发动机气体轴承结构形式的选择受到限制，环形孔式节流的结构形式在加工制造和稳定性等方面具有优点。

Power MEMS 准气体动力循环发动机中气体静压轴承设计不同主要表现在 2 点：1) 是在普通轴承间隙一般大于 10^{-1} mm 量级，表压比的确定往往是将承载能力和刚度的要求放在首位，然而 Power MEMS 准气体动力循环发动机的气体轴承间隙在 10^{-3} mm 量级，于是避免进气孔被阻塞应该成为轴承设计过程中的首要考虑因素；2) 由于微细尺度影响，设计和选择轴承参数时不仅要考虑满足轴承静态性能的要求，还应该将轴承加工制造方面的限制作为重要考虑因素。

运用气体静压润滑的基本原理对气体轴承的结构及运行参数进行了分析，获取了静压径向轴承和静压止推轴承的参数设计。所进行的气体静压轴承静态性能的计算表明，所设计轴承的承载能力能够满足 Power MEMS 准气体动力循环发动机的要求，验证了静压气体轴承应用于 Power MEMS 准气体动力循环发动机的可行性。

参考文献:

- [1] JACOBSON S A, EPSTEIN A H. An informal survey of Power MEMS [C] // In: Proc. the International Symposium on Micro-mechanical Engineering, Chicago: IL, December, 2003.
- [2] KHANNA R. MEMS fabrication perspectives from the MIT. microengine project. Surface and coatings technology [J]. 2003 (163-164): 273-280.
- [3] LEE Y B, KWAK H D, KIM C H, et al. Analysis of gas-lubricated bearings with a coupled boundary effect for micro gas turbine [J]. Tribology Transactions, Park Ridge, 2001, 44 (4): 685-694.
- [4] J. W. POWELL. 空气静压轴承设计 [M]. 丁维刚, 林向群, 译. 北京: 国防工业出版社, 1978.
- [5] 成大先. 机械设计手册 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2002.
- [6] 十合晋一. 气体轴承 [M]. 韩焕臣, 译. 北京: 宇航出版社, 1988.

移变送装置现已获得国家实用新型专利,专利号为 ZL200620008659.2。

参考文献:

- [1] 金钟元. 水利机械[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2003:15-150.
- [2] 孙传友,孙晓斌,张一. 感测技术与系统设计[M]. 北京:科学出版社,2004:50-210.
- [3] 周生国. 工程检测技术[M]. 北京:北京工业大学出版社,2003:80-190.
- [4] 王党生,李长辉,刘鹏. 水轮机调速器的单项交流伺服装置[J]. 长江科学报,2001,18(6):53-55.
- [5] 麦景朝. 广蓄二期电厂调速器液压操作系统剖析[J]. 水电站机电技术,2007,30(1):6-10.
- [6] 向家安. 水轮机微机调速器 PID 参数的智能化设计[J]. 水电自动化与大坝监测,2007,31(1):54-56.

Capacitance Sensor Displacement Transmission Device Plan for Hydraulic Turbine Leaf of Transmit Water Current Relay Machine

DU Ting-na

(Hehai Institute, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: The author analyzes contact and easy wearing and reliability of export signal existing in potentiometer terminal model hydraulic turbine leaf of transmit water current servomotor displacement transmission equipment. A hydraulic turbine leaf of transmit water current relay machine displacement transmission device is designed based on the principles of capacitance sensor. The device can avoid the problem of old displacement transmission, and long time and reliably measure displacement volume of hydraulic turbine leaf of transmit water current relay machine.

Key words: hydraulic turbine; leaf of transmit water current; relay machine; displacement transmission; capacitance sensor

(编辑 张小强)

(上接第21页)

Externally Pressurized Gas Journal Bearings in Power MEMS of Quasi Gas Power Cycle

WANG Jing^a, ZHANG Li^a, DENG Da-qiang^b, CHEN Wei-jun^a, XU Zong-jun^b

(a. State Key Laboratory of Mechanical Transmission;

b. College of Mechanical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract: An original thermodynamic idea for Power MEMS, which is called as quasi gas power cycle, is proposed to further intensify energy density and simplify structure of Power MEMS. Because gas supply with preset high pressure is set up in the Power MEMS engine of quasi gas power cycle, it is convenient for the Power MEMS engine to employ externally pressurized gas bearings to improve the performance of its bearings. Therefore mal design philosophy and structural type of the hydrostatic journal bearing as well as the hydrostatic thrust bearing in the Power MEMS engine are investigated, considering the limiting factor on meso scale. Then the structural and operational parameters are analyzed, and the optimal designs of typical externally pressurized gas bearings are put forward. Moreover the feasibility of the externally pressurized gas bearings applied to the Power MEMS engine is further verified by the calculation of load-carrying capacity of the hydrostatic gas bearings.

Key words: Power MEMS; micro heat engine; externally pressurized journal gas-bearings; externally pressurized thrust gas-bearings; load-carrying capacity

(编辑 陈移峰)