

文章编号: 1006-2343(2012)01-001-04

基于气体润滑技术的 MEMS 透平研究进展

赵祥雄¹, 赖天伟², 赵红利², 侯 予², 陈双涛²

(1. 河南农业大学 机电工程学院, 郑州 450002, E-mail: tianwelle@stu.xjtu.deu.cn;

2. 西安交通大学 制冷与低温工程研究所, 西安 710049)

摘 要: 高能密度和微型化已经成为动力设备发展的必然趋势, 然而, 润滑技术的发展直接制约着高速透平的极限转速。微机电系统 (MEMS) 中的高速透平内轴承与转子间最小间隙为微米量级甚至更小, 必然会给装置的设计和制造带来一些新问题。文中简要介绍了基于气体润滑技术的 MEMS 透平国内外发展状况, 并对相关领域的研究进展进行了展望。

关键词: 微机电系统 (MEMS); 透平; 气体润滑

中图分类号: TK14 **文献标识码:** A

Development of Gas lubricated MEMS Turbine

ZHAO Xiang-xiong¹, LAI Tian-wei², ZHAO Hong-li², HOU Yu², CHEN Shuang-tao²

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Henan Agricultural University, Zhengzhou, 450002, China;

2. Institute of Refrigeration and Cryogenic Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: High energy density and miniaturization has become the inexorable trend for the power engineering equipment but the upper limit of rotational speed is restricted by the lubrication technology directly. The gap between the bearing and rotor falls into the range of micrometer or even smaller in the Micro-electromechanical Systems (MEMS) which brings up new challenges for the design and manufacturing. This paper presented the development of gas lubricated MEMS turbine and prospected the research development of related industry.

Key words: micro-electromechanical systems (MEMS); turbine; gas lubricated

微机电系统 (MEMS—Micro Electro Mechanical Systems) 是指可批量制作的集微型机构、微型传感器、微型执行器以及信号处理和电路, 直至接口、通信和电源等于一体的微型器件或系统。MEMS 是随着半导体集成电路微细加工技术和超精密机械加工技术而发展起来的, 属于微米技术范畴, 其特点是: 微型化、机械电气性能优良、可批量生产、集成化程度高。MEMS 技术涉及到多学科交叉问题, 如电子、机械、材料、制造、信息与自动控制、物理、化学和生物等多种学科, 集中了当今科学技术发展的许多尖端成果, 通过 MEMS 技术可以探索新原理、新功能的元件和系统, 将开辟一个新技术领域, 给人类社会带来另一次技术革命, 是关系到国家科技发展、国防安全和经济繁荣的一项关键技术。

1987 年, 加州大学伯克利分校成功研制第一台静电微马达, 标志着微机电系统时代的到来。基于 A. H. Epstein 等人提出的构想, 美国从 1994 年开始研制 MEMS 高能密度微型器, 包括微米级透平机械、燃烧系统、能量转换部件等微型设备^[1-2]。为了减小 MEMS 超高速转动部件之间的摩擦, 微型旋转机械中气体润滑比滚珠润滑和液体润滑具有更大的优

势^[3-4]。气体润滑轴承是一种以气体作为润滑剂的滑动轴承, 具有摩擦阻力小、精度高、磨损小、无污染、寿命长、化学性质稳定和转速高等优点。微型高速透平机械通常采用气体动压、静压和动静压复合润滑的方式。通常微透平机械在低速时采用静压气体润滑, 高速时采用动压润滑的复合润滑方式, 由于静压轴承在高速时不能提供足够的刚度, F. F. Ehrich 等人指出微透平机械的发展方向为全动压轴承^[5]。

MEMS 中微型气浮轴承轴承与转子间的最小间隙为微米量级甚至更小, 在该尺度下气膜厚度与气体分子的自由行程相当。因此, 微型旋转机械径向气体轴承润滑的流体动力学特性与较大尺寸机械存在差异, 需要考虑流体滑移作用, 在不同 Knudsen 数 (分子平均自由程与微系统特征长度的比值)、轴承数、轴径偏心率以及考虑气膜可压缩性和稀薄分子下需要对雷诺方程进行修正, 求解微气体径向轴承压力分布、承载力和姿态角^[6-15]; 另外, 流体流过较大相对粗糙度的表面时会产生压力波动, 随机表面粗糙度在分析和设计气体润滑微轴承也具有重要意义, 因此设计时还需要考虑气体稀释性与粗糙度的耦合效果^[16-18]。

1 MEMS 国内外发展状况

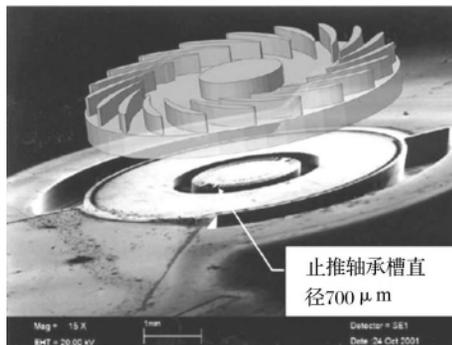
近年来在国外, 相继开展了微动力机电系统和微发动机的相关研究。1997 年, Piekos ES 等人设计并分析了高速微

收稿日期: 2011-07-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50976082); 高等学校博士
科点专项科研基金资助项目 (20090201110006)

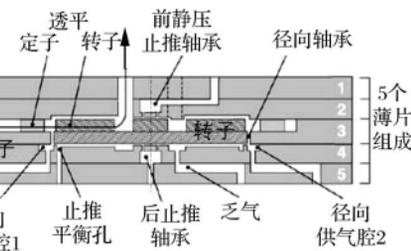
型气体径向轴承的性能^[19]。2004 年 MIT(麻省理工学院) Jacobson 等人设计、制造并测试了直径 4 mm 微型硅基透平,如图 1~图 3 所示。加工过程采用标准的反应离子蚀刻(RIE, i. e. reactive ionizing etching)和深层反应离子蚀刻技术(DRIE, i. e. deep reactive ionizing etching)在直径 700 μm 硅片周围加工出深 2.2 μm 和宽 40 μm 的螺旋槽动压气体轴承。微型旋转机械在低速时采用静压润滑,静压供气孔直径 10 μm,而在高速范围内依靠动压进行润滑的复合润滑技术。测试中微透平运行速度能够达到 450 000 r/min,承载力为 0.03 N^[20]。2009 年,MIT 研制了微气体轴承支撑的微转子气体透平,如图 4~图 6 所示。该透平的特点是由四个径向轴承供气腔提供各向异性刚度,并采用了防止流体泄漏流动的迷宫密封和强化的止推轴承结构设计,还考虑了对称供气系统壁面流动不均匀性。在生产过程中使用了大量测试设备保证重复生产过程中轴承的一致性,并探讨了不同轴承间隙和轴承几何尺寸对转子动力学特性的影响。实验中转子转速达到 1 700 000 r/min(对应叶尖速度达到 370 m/s)^[21-23]。

2005 年,哥伦比亚大学的 Luc G. Fréchette 等在单晶硅片上加工微透平并采用气体轴承支撑,如图 7~图 8 所示。实时控制并持续运行超过 100 000 r/min,机械功率接近 5 W。该装置将五片硅片熔接在一起,每个

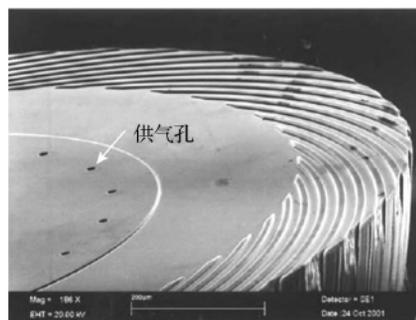


▲图 1 4.2 mm 微透平的气体止推轴承

硅片两面采用深层离子蚀刻。该单级径流透平安装在 4.2 mm 直径转子上,采用外部供气静压气体径向和止推轴承支撑,叶顶圆周速度达到 300 m/s^[24]。2008



▲图 2 微型轴承实验台的截面图

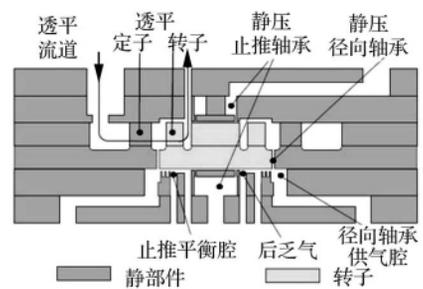


▲图 3 微加工的复合润滑气体轴承

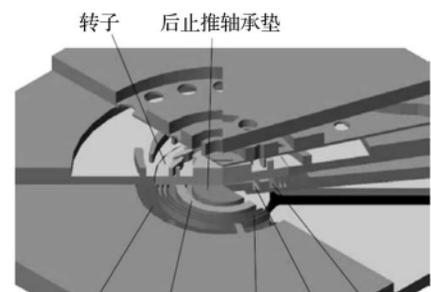
年,基于硅片微加工技术并设计制造了四级微透平机械,如图 9-图 10 所示,采用静压止推轴承和径向轴承,输出功为 1 W,最大转速时透平绝热效率为 63%,转子转速能达到

1 100 000 r/min,叶顶圆周速度达到 270 m/s^[25]。

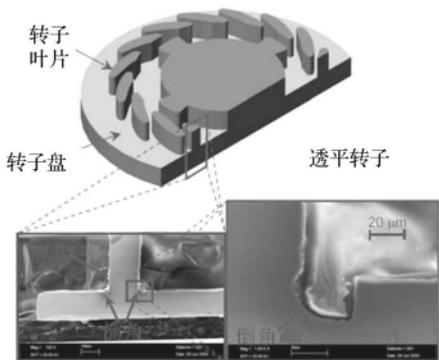
2007 年,新加坡的 X. C. Shan 设计了装有动压径向和止推气体硅片轴承的微型透平,如图 6~图 9 所示。通过增加长宽比 L/D 或者减小径向气体轴承的径向间隙以提高承载力。随着槽数的增加承载力上升,其峰值逐渐向高的槽角度移动。Shan 还采用数值方法确定了气体止推轴承的结构参数,使用优化的深层反应离子蚀刻工艺使微型径向轴承的长宽比大于 20:1。该透平设备能够稳定运行并且最高转速可以达到 14 700 r/min^[26]。2008 年, Q. D. Zhang 进一步分析了微系统内全动压螺旋槽气体轴承的动态特性和耐冲击特性^[27]如图 15 所示。



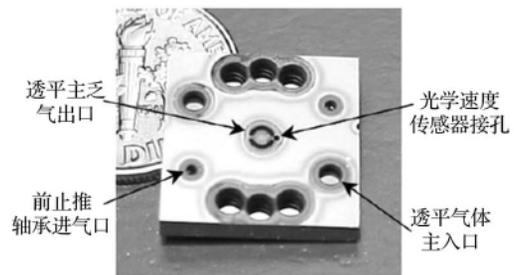
▲图 4 气体轴承支撑的 MEMS 气体透平截面图



▲图 5 转子背面的主要特征

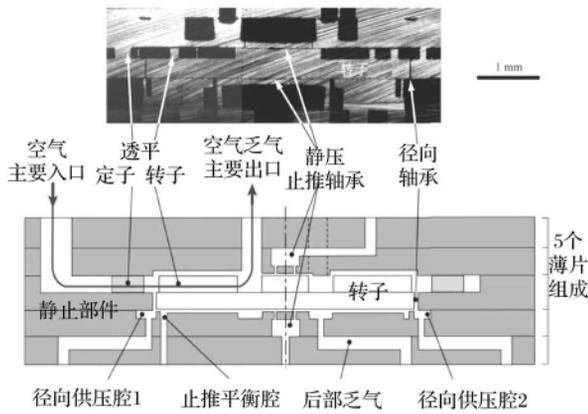


▲图 6 透平根部倒角



▲图 7 微透平驱动轴承台模

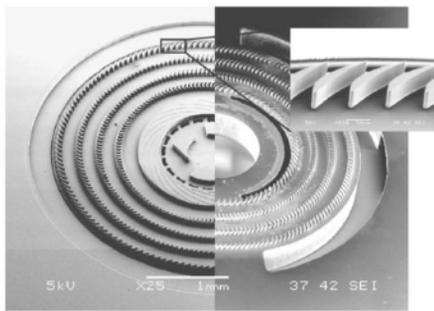
国内方面 2001 年以前微透平的研究尚未在我国开展,在其系统设计、各个部件有机整合和优化配置方面相对较弱^[28]。2004 年,上海交通大学上官倩英等人指出降低运动副表面的表面能可以降低表面粘着,是减轻微摩擦磨损的有效途径^[29]。随后孟光等人理论分析了微转子-轴承系统的稳定性和振动特性^[13-14],并提出了新的滑移模型^[16,17]。



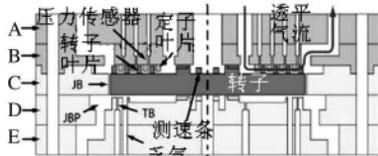
▲图 8 微透平驱动轴承的光学图和截面图

2007 年,重庆大学的王倩等人提出了将气体静压轴承应用于该动力 MEMS 发动机的研究和动力 MEMS 准气体动力循环发动机中气

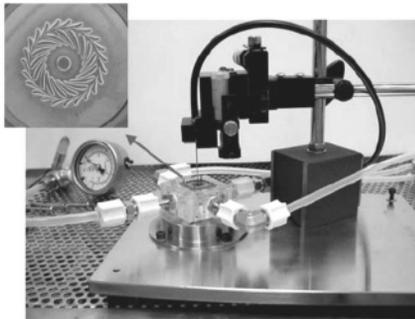
体静压径向轴承和止推轴承的结构形式的选择,指出了微尺度下气体静压轴承的设计要点,运用气体静压润滑的基本原理对气体轴承的结构及运行参数进行了分析,获取了径向轴承和止推轴承的参数设计。通过气体轴承静态性能的计算,从承载能力方面验证了将所设计的气



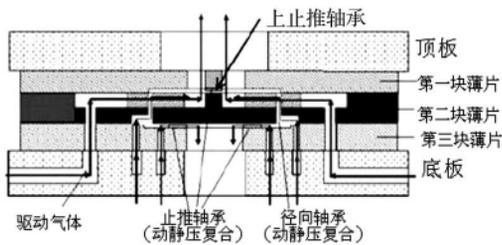
▲图 9 多级微透平结构



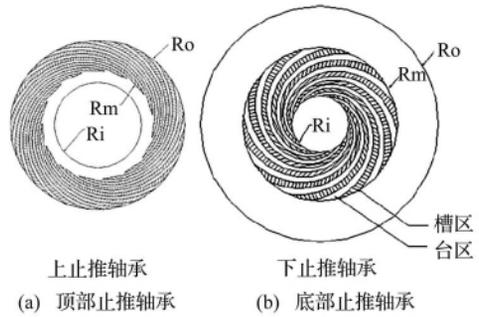
▲图 10 多级微透平结构图



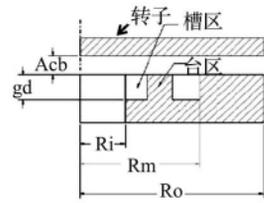
▲图 11 三层硅片和两层丙烯酸板构成的微透平原理图



▲图 12 透平测试系统



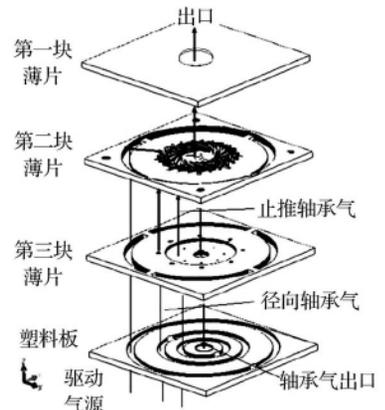
(a) 顶部止推轴承 (b) 底部止推轴承



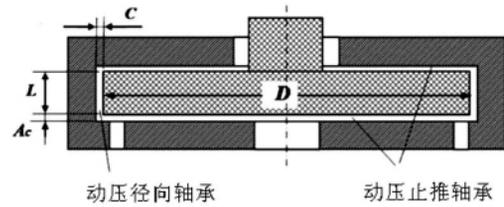
(c) 底部止推轴承的截面图

▲图 13 螺旋槽止推轴承的示意图

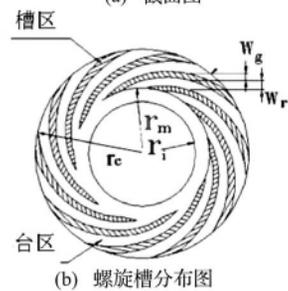
体轴承应用于动力 MEMS 准气体动力循环发动机中的可行性。2008 年,中科院联合燕山大学和郑州大学研制了微燃烧透平发电系统,如图 15、图 16 所示,透平直径 14 mm,材料选用耐高温的 316 不锈钢,采用精密滚动轴承,在冷态实验下,于最高转速 62 000 r/min



▲图 14 透平设备的分解图



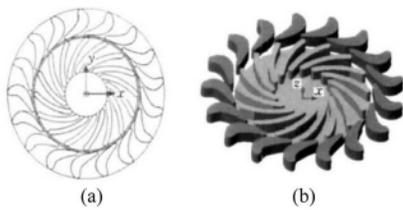
(a) 截面图



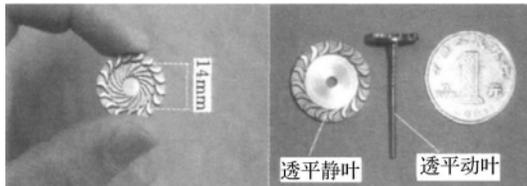
(b) 螺旋槽分布图

▲图 15 全动压微气体轴承

实现了长时间运转;但热态实验时,由于润滑油被烧干,磨损较为严重。2010 年,浙江大学张海军等人研究了气体的稀薄特性对微径向轴承特性的影响,提出了改进的考虑滑移边界条件的 Reynolds 方程^[8]。



▲图 16 微透平二维和三维叶片型线图



▲图 17 微透平实物图

2 结 论

MEMS 发展的目标在于,通过微型化、集成化来探索新原理、新功能的元件和系统,开辟一个新技术领域和产业。MEMS 可以完成大尺寸机电系统所不能完成的任务,也可嵌入大尺寸系统中,把自动化、智能化和可靠性水平提高到一个新的水平。21 世纪 MEMS 将逐步从实验室走向实用化,对工农业、信息、环境、生物工程、医疗、空间技术、国防和科学发展产生重大影响。现阶段国内对 MEMS 润滑机理以及超高速微型转子系统的研究还处于起步阶段。基于微气体润滑技术的 MEMS 微透平仍然存在一些问题亟待解决:

(1) 为了使高性能、低能耗、长寿命的 MEMS 产品在不久的将来得到批量生产,其表面的微摩擦、磨损和粘着是一个亟待解决的重要课题;

(2) MEMS 透平机械多采用硅基材料及蚀刻技术,硅基材料的耐高温性能较差,蚀刻技术的精度控制较为困难,为了保证高速旋转机械的强度和加工精度,需要探索新材料和新的加工工艺;

(3) 目前 MEMS 透平机械多采用静压气体轴承和动静压复合气体轴承,结构较为复杂,结构相对简单的全动压气体轴承的应用还较少。

参考文献

- [1] Piekos E S. Numerical simulation of gas-lubricated journal bearings for microfabricated machines [D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2000.
- [2] Savoulides N, Breuer K S, Jacobson, et al. Low-order models for very short hybrid gas bearings [J]. Transactions of the ASME, 2001, 123: 368 ~ 375.
- [3] Epstein A H, Senturia S D, Al-Midani O, et al. Micro-heat engines, gas turbines, and rocket engines-The MIT microengine project [C]//28th AIAA Fluid Dynamics Conference, 4th AIAA Shear Flow Control Conference, Snowmass Village, CO, AIAA Paper, 1997, 1 ~ 12.
- [4] Epstein A H, Senturia S D, Waitz I A, et al. Microturbomachinery [P]. World Intellectual Property Organization, International Publication Number WO 98/02643 and U. S. Patent #5932940, 1998.
- [5] Ehrich F F, Jacobson S A. Development of high-speed gas bearings for high-power density microdevices [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power-Transactions of the ASME, 2003, 125 (1): 141 ~ 148.
- [6] Hsu T C, Chiang H L, Lin C Y. Application of modified Reynolds equation for gas lubrication on air bearing analysis [J]. Industrial Lubrication and Tribology, 2006, 58(5): 269 ~ 275.
- [7] Zhang H J, Zhu C S, Yang Q. New numerical solution for self-acting gas journal bearings [J]. Journal of Zhejiang University-Science A, 2009, 10(5): 685 ~ 690.
- [8] Zhang H J, Zhu C S, Tang M. Effects of rarefaction on the characteristics of micro gas journal bearings [J]. Journal of Zhejiang University-Science A, 2010, 11(1): 43 ~ 49.
- [9] 张文明, 孟光, 陈迪. 微型旋转机械轴承研究进展 [J]. 振动与冲击, 2008, 27(05): 27 ~ 31; 171.
- [10] Lee Y B, Kwak H D, Kim C H, et al. Numerical prediction of slip flow effect on gas-lubricated journal bearings for MEMS/MST-based micro-rotating machinery [J]. Tribology International, 2005, 38 (2): 89 ~ 96.
- [11] Wang C C. Application of a hybrid numerical method to the nonlinear dynamic analysis of a micro gas bearing system [J]. Nonlinear Dynamics, 2010, 59(4): 695 ~ 710.
- [12] Chen X D, He X M. The effect of the recess shape on performance analysis of the gas-lubricated bearing in optical lithography [J]. Tribology International, 2006, 39(11): 1336 ~ 1341.
- [13] Huang H, Meng G, Chen J Y. Investigations of slip effect on the performance of micro gas bearings and stability of micro rotor-bearing systems [J]. Sensors, 2007, 7(8): 1399 ~ 1414.
- [14] Zhou J B, Meng G, Chen J Y, et al. Bifurcation analysis of ultra-short self-acting gas journal bearings for MEMS [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009: 3188 ~ 3194.
- [15] Meng G, Zhang W M, Huang H, et al. Micro-rotor dynamics for micro-electro-mechanical systems (MEMS) [J]. Chaos Solitons & Fractals, 2009, 40(2): 538 ~ 562.
- [16] Zhang W M, Meng G, Peng Z K. Random surface roughness effect on slider microbearing lubrication [J]. Micro & Nano Letters, 2010: 347 ~ 50.
- [17] Zhang W M, Meng G. Property analysis of the rough slider bearings in micromotors for MEMS applications [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2009: 465 ~ 473.
- [18] 张文明. 微转子系统径向气体轴承特性 [J]. 机械工程学报, 2008, 44(5): 25 ~ 33.
- [19] Piekos E S, Orr D J, Jacobson S A, et al. Design and analysis of micro fabricated high speed gas journal bearings [C]// AIAA Paper 97-1966, 28th AIAA Fluid Dynamics Conference, Snowmass Village, CO, 1997.
- [20] Wang C W, Zhang X, Jacobson S A, et al. A self-acting gas thrust bearing for high-speed microrotors [J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2004, 13(2): 158 ~ 64.
- [21] Teo C J, Liu L X, Li H Q, et al. High-speed operation of a gas-bearing supported MEMS-air turbine [J]. Journal of Tribology, 2009: 032001-1 ~ 9.
- [22] Teo C J, Spakovszky Z S. Modeling and experimental investigation of micro-hydrostatic gas thrust bearings for micro-turbomachines [J]. New York, NY, ETATS-UNIS: American Society of Mechanical Engineers 2006, 128: 597 ~ 605.
- [23] Savoulides N, Jacobson S, Li H Q, et al. Fabrication and Testing of a High-Speed Microscale Turbocharger [J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2008, 17(5): 1270 ~ 1282.

(下转第 10 页)

将式(11) ,(13) ,(14) ,(15) 代入式(1) 经整理得到整个机构的总质径积的矢量式:

$$\begin{aligned}
 MR = & (m_1 h_1 + m_1 r_{x1}) \mathbf{x}_1 + m_1 r_{y1} \mathbf{y}_1 + \\
 & \left[m_2 r_{x2} + m_1 r_{z1} \cos \alpha_2 - \frac{h_2}{h_4} (m_4 r_{x4}) \right] \mathbf{x}_2 + (m_2 r_2 + m_1 r_{z1} \\
 & \cos \beta_2) \mathbf{y}_2 + \left[m_2 r_{z2} - m_2 s_2 + m_1 r_{z1} \cos \gamma_2 + \right. \\
 & \left. m_3 r_{y3} \operatorname{cosec} \alpha_{23} + \frac{s_2}{h_4} (m_4 r_{x4}) \right] \mathbf{z}_2 + [m_3 r_{x3} - m_2 h_3 + \\
 & \frac{h_3}{h_4} (m_4 r_{x4})] \mathbf{x}_3 + m_4 r_{y4} \mathbf{y}_4 + m_4 r_{z4} \mathbf{z}_4 + \\
 & \left[m_5 r_{x5} - m_4 h_5 - \frac{h_5}{h_4} (m_4 r_{x4}) \right] \mathbf{x}_5 + m_5 r_{y5} \mathbf{y}_5 + m_5 r_{z5} \mathbf{z}_5 + \\
 & (m_3 r_{z3} - m_3 r_{y3} \cot \alpha_{23}) \mathbf{z}_3 - (m_2 + m_3 + m_4 + m_5) \mathbf{d}_1 - \\
 & \left[m_4 + m_5 + \frac{1}{h_4} (m_4 r_{x4}) \right] \mathbf{d}_2 \quad (16)
 \end{aligned}$$

而式中 \mathbf{z}_3 , \mathbf{d}_1 , \mathbf{d}_2 为常向量, 因此可得该机构的平衡条件为:

$$\left. \begin{aligned}
 A1 &= m_1 h_1 + m_1 r_{x1} = 0, \\
 A2 &= m_1 r_{y1} = 0, \\
 A3 &= m_2 r_{x2} + m_1 r_{z1} \cos \alpha_2 - \frac{h_2}{h_4} (m_4 r_{x4}) = 0, \\
 A4 &= m_2 r_{y2} + m_1 r_{z1} \cos \beta_2 = 0, \\
 A5 &= m_2 r_{z2} - m_2 s_2 + m_1 r_{z1} \cos \gamma_2 + \\
 & m_3 r_{y3} \operatorname{cosec} \alpha_{23} + \frac{s_2}{h_4} (m_4 r_{x4}) = 0, \\
 A6 &= m_3 r_{x3} - m_2 h_3 + \frac{h_3}{h_4} (m_4 r_{x4}) = 0, \\
 A7 &= m_4 r_{y4} = 0, \quad A8 = m_4 r_{z4} = 0, \\
 A9 &= m_5 r_{x5} - m_4 h_5 - \frac{h_5}{h_4} (m_4 r_{x4}) = 0, \\
 A10 &= m_5 r_{y5} = 0, \quad A11 = m_5 r_{z5} = 0
 \end{aligned} \right\} (17)$$

4 结 论

本文提出的基于单开链单元的空间机构震动力完全平衡的单位向量法, 其特点是推导过程简单, 通过建立常见单开链单元的质径积矢量方程, 在求解机构的震动力平衡条件时可以直接调用其结果, 而且便于程序化。该方法同样适用

于复杂的平面和空间多环机构的震动力完全平衡条件的求解。本文拓展了序单开链理论, 使结构学、运动学、动力学都能基于同一结构划分单元来分析, 从而形成一套完整、统一的机构学理论。

参考文献

- [1] 张启先. 空间机构的分析与综合(上) [M]. 北京: 机械工业出版社, 1984.
- [2] 杨廷力. 机械系统基本理论——机构学、运动学、动力学 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1996.
- [3] Yang T L. A Systematical Approach For Structure Synthesis Of Parallel Mechanisms Based On Single-Open-Chain Modules And Application [C] // Proc. Of the ASME 33-th Mechanisms and Robots Conference, DETC2009 - 86106.
- [4] 杨廷力. 机器人机构拓扑结构学 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- [5] 高峰, 赵永生. 多环空间连杆机构震动力完全平衡的单位向量法 [J]. 东北重型机械学院学报, 1992, 16(2): 128 ~ 132.
- [6] 杨廷力, 金 琼. 基于单开链单元的三平移—转动并联机器人机构型综合及分类 [J]. 中国机械工程, 2002, 38(8): 31 ~ 36.
- [7] Tsai L W. The Enumeration of a Class of three-DOF Parallel Manipulators [C] // Proc. of the 10th World Congress of the Theory of Machine and Mechanisms, 1999, 30: 1121 ~ 1126.
- [8] Herve J M. Design of Parallel Manipulators via the Displacement subgroup [C] // Proc. of the 9th World Cong., on Theory of Machine and Mechanisms, Milan, 1995, 82: 2079 ~ 2082.
- [9] Huynh P, Herve J M. Equivalent Kinematic Chains of Three Degree-of-Freedom Tripod Mechanisms With Planar-Spherical Bonds [J]. ASME Journal of Mechanical Design, 2005, 127: 95 ~ 102.
- [10] Li Q C, Huang Z, Herve J M. Type Synthesis of 3R2T 5-DOF Parallel Mechanisms Using the Lie Group of Displacements [J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 2004, 20: 173 ~ 180.
- [11] Huynh P, Herve J M. Equivalent Kinematic Chains of Three Degree-of-Freedom Tripod Mechanisms With Planar-Spherical Bonds [J]. ASME Journal of Mechanical Design, 2005, 127: 95 ~ 102.

作者简介: 罗玉峰(1960-) 男, 江西高安人, 博士, 教授, 博士生导师; 主要研究方向: 机械系统机器人及微型机械的分析、设计与制造, 已发表学术论文 40 余篇, 获国家发明专利 2 项, 国家教委科技进步二等奖、国家教育部科技进步二等奖各一项。

(上接第 4 页)

- [24] Frechette L G, Jacobson S A, Breuer K S, et al. High-speed microfabricated silicon turbomachinery and fluid film bearings [J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2005, 14(1): 141 ~ 152.
- [25] Lee C, Arslan S, Frechette L G. Design principles and measured performance of multistage radial flow microturbomachinery at low Reynolds numbers [J]. Journal of Fluids Engineering-Transactions of the Asme, 2008, 130: 111103 - 1 ~ 11.
- [26] Shan X C, Zhang Q D, Sun Y F, et al. Studies on a micro turbine device with both journal-and thrust-air bearings [J]. Microsystem Technologies-Micro-and Nanosystems-Information Storage and Pro-

cessing Systems, 2007, 13: 1501 ~ 1508.

- [27] Zhang Q D, Shan X C. Dynamic characteristics of micro air bearings for microsystems [J]. Microsystem Technologies-Micro-and Nanosystems-Information Storage and Processing Systems, 2008, 14: 229 ~ 234.
- [28] 张昊志, 李 政, 孙 昕, 等. 正在兴起的微透平技术 [J]. 动力工程, 2001(06): 1532 ~ 1538.
- [29] 上官倩英, 程先华. 微型机械的摩擦学特性及其表面润滑技术的研究 [J]. 润滑与密封, 2004(01): 87 ~ 89.

作者简介: 赵祥雄(1956-) 男, 副教授; 主要研究方向为机械设计及机械制造。