

精密气动定位系统的发展及应用

袁文全, 巩岩*

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033)

摘要: 精密气动定位系统具有高精度、高速、大行程、传动平稳、使用费用低等优点, 目前广泛地应用于光刻、数控机床等诸多精密工程领域。本文按照时间顺序介绍了精密气动定位系统的发展情况, 总结了精密气动定位系统的应用特点, 并指出当前精密气动定位系统一些有待改进的关键技术。

关键词: 气动; 精密定位; 非线性; 气驱动器

中图分类号: TH138

文献标识码: A

DOI: 10.3788/OMEI20112808.0037

Progress and Applications of High-performance Pneumatic Positioning System

YUAN Wen-quan, GONG Yan*

(State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: High-performance pneumatic positioning system has such advantages as high-precision, high speed, large stroke, smooth transmission, cost-effectiveness and so on, and it is widely applied to precision engineering such as photolithography, CNC, etc at present. The progress of high-performance pneumatic positioning system was described in chronological order, the applications and key technologies were summarized.

Keywords: pneumatic; high-precision positioning; nonlinearity; pneumatic actuators

1 引言

气动系统具有快速反应、大行程、大推力、清

洁无污染及较低的使用费用等优点, 因而在食品、制药、石油工业及汽车生产等工业应用中成为一种主要的动力传动手段。然而, 气动系统也有它固有

*基金项目: 国家02专项基金(2009ZX02005)资助

的缺点,即气体的可压缩性、气缸中活塞阻尼及摩擦力的非线性、控制阀中气流摩擦力的非线性等,这些缺点成为气动系统在精密机械工程中应用的巨大障碍。自1954年^[1]起,人们开始对气动伺服控制技术进行研究,随后分别从数学模型、控制方法、开发新型气动控制元件及采用混合控制技术等方面对气动定位精度进行改进,使气动系统逐步在微纳光刻加工、精密电子产品的自动化装配及快速精密加工机床等领域有了广泛的应用。截止到2010年,已在实验室建立了小行程4 mm,精度为10 nm及大行程100~250 mm,精度为10~20 nm的混合气动系统^[2-4],这也代表了目前气动技术在超精定位应用中的最高水平。本文主要概述了精密气动定位系统的发展历程,对精密气动定位系统的应用特点进行探讨,并指出了未来发展的一些关键技术。

2 精密气动定位系统的发展历程

从精密气动定位系统的发展历史来看,大体上可以分为两个典型阶段,即以2000年左右为分界线,在此以前主要采用单一型式精密气动定位系统,而在此之后则更多地应用混合型式精密气动定位系统。以下分别对这两个阶段气动定位系统的发展及应用进行叙述。

2.1 单一型式精密气动定位

早期的气驱动器主要以“活塞-气缸”式驱动器为主,当时关注的焦点是活塞在气缸中运动过程中的非线性行为。最早关于气动位置伺服建模的研究始于1954年,Shearer J L^[1]对气缸中点位置的线性化模型进行了理论分析及实验。此后,Burrows C R等^[5]采用根轨迹法设计了一套气动伺服系统,研究表明,当活塞在气缸中部位置时,其系统的阻尼要小一些,定位的稳定性较差。接下来他们进行了更进一步的研究^[6],结果表明,气动系统的固有阻尼与活塞在气缸中的位置有关。Bowns D E等人^[7]则对活塞的摩擦力进行了研究,他们发现活塞的摩擦力与其在气缸中的位置具有明显相关性。总的说来,这一时期的

主要工作是气缸位置控制理论的探索阶段,有关气缸精密定位的研究则较少报道。

到了80年代,随着电子技术的飞跃发展,计算机运算能力的大幅度提升及在工业上的推广应用,使复杂控制系统得以实现。在气缸中气压的控制方面,形成两种比较典型的控制方法:一种是使用计算机结合脉宽调制的方法来控制高速开关电磁阀,使高速开关电磁阀能够快速开关,以实现气缸中气压的精确调节,进而实现活塞的精密定位,其典型结构如图1所示;另一种方法是使用计算机控制连续可调的比例伺服阀,这种方式可精确控制气体的流量及气路的开闭,以实现气缸内气压的精确调节,从而实现活塞的精密定位,其典型结构如图2所示。

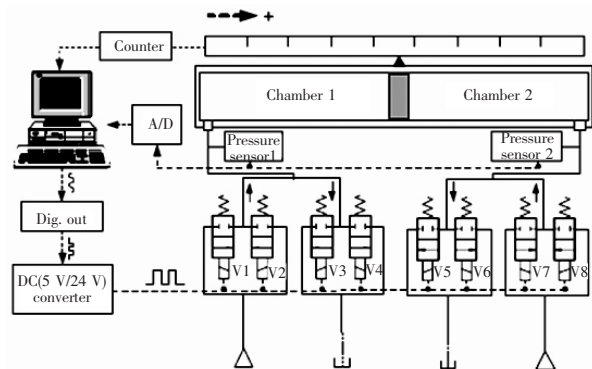


图1 高速开关电磁阀控制系统示意图^[8]

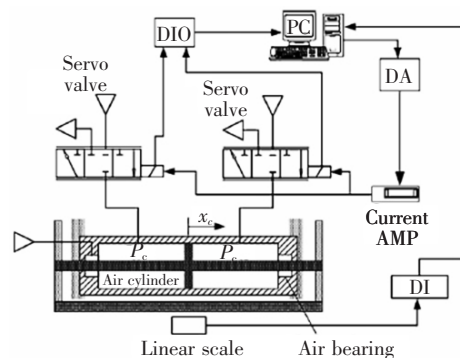


图2 比例伺服电磁阀控制系统示意图^[3]

早在1981年,Hanafusa H等^[9]即采用两个高速开关电磁阀来控制气缸,实现了行程120 mm,分辨精度为0.4 mm的气动定位系统。到了1986年,Kienzle公司与液气压传动与控制研究所(IHP:

Institute for Hydraulic and Pneumatic Drives and Controls) 合作^[10], 开发出一种模块化的、可编程直线运动定位单元, 每个单元采用两个电磁比例伺服阀来精确控制气缸运动, 其行程为 200 mm, 分辨精度达到 0.01 mm, 有效载荷为 100 N。由于采用了模块化设计思想, 因此很容易将这些单元装配起来以实现复杂的机械运动。图 3 展示了一种采用该单元组成的三轴气动机械手。

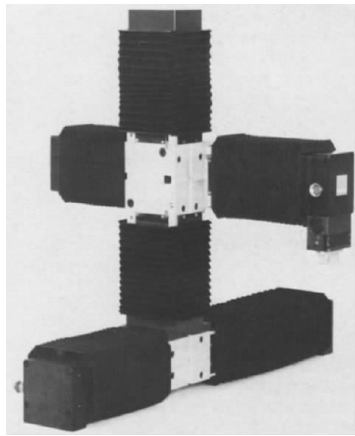


图 3 三轴气动伺服机械臂 (Kienzle)

由于高速开关电磁阀开闭的不连续性, 因此相对连续可调的电磁比例伺服阀来讲, 很难做到高精度定位。1986 年, Noritsugu T^[11-12]应用脉宽调制 (PWM: pulse-wide modulation) 方法结合高速开关电磁阀来进行活塞的速度及位置控制, 后来又在系统中应用了位置学习方法^[13], 达到了系统的快速定位。1995 年, Noritsugu T^[14]又通过对摩擦力的补偿控制, 实现了 10 kg 载荷情况下, 在 800 mm 行程上达到了 0.2 mm 的定位精度, 而在空载情况下达到 0.1 mm 的定位精度。Paul A K 等^[15]1994 年基于滑动模式控制提出一种新的气缸位置控制法则, 并采用 8088 处理器控制高速开关电磁阀来实现气缸的定位, 实验结果显示, 该方法在 200 mm 的行程上实现了 1 mm 的分辨精度。但 Paul A K 同时指出其原因在于模数转换器的分辨精度为 1 mm, 因此, 有理由认为该方法应该能进行更高精度的定位。Hamiti K 等^[16]于 1996 年提出采用两套闭环系统对气动伺服系统进行控制,

内环采用一个模拟型 P 控制器, 用来稳定系统及降低系统的非线性特征; 外环采用一个数字型 PI 控制器, 用来确定整个系统的特性及处理活塞上的粘滑性摩擦力, 最后的实验器件选用了电磁比例伺服阀及活塞式气缸, 然而实验结果却不尽人意, 仅实现了行程 250 mm, 精度为 0.5 mm 的定位精度。Song J 等^[17]于 1997 年基于 Lyapunov 稳定性理论并结合气动伺服系统的特性, 设计出基于滑动模式的控制器来控制电磁比例阀, 进而实现气缸的定位, 实现了在 30 kg 及 100 kg 载荷下行程 300 mm, 精度为 0.2 mm 的定位精度。1998 年, Shih M C 等^[18]使用模糊 PID 算法, 通过高速开关电磁阀控制气缸, 在 150 mm 的行程上实现上了 0.1 mm 的定位精度。在此及此后的一段时间, Varseveld R B^[19]、Wang J H^[20]、Fok S C^[21]、Shibata S^[22]、Parnichkun M^[23]等也都对气缸的精密定位进行了研究, 但定位精度却未有大的突破。直到 2004 年, Xiang F L^[24]等采用一种面向块的、近似线性化反馈的方法, 使用电磁比例阀控制气缸, 实现了行程 400 mm, 定位精度为 5 μm 的气动系统。当然, Xiang F L 和 Paul A K 有同样的理由, 即系统分辨精度为 5 μm , 因此他也相信如果采用更高精度的分辨系统, 则系统定位精度还有提升的空间。随后的学者如 Thomas M B^[25]、Ahn K^[8]等也都采用 PWM 控制方法结合高速开关电磁阀控制气缸进行了相关研究, 但定位精度仍然停留在亚毫米级的水平。

另外, 也有人提出采用新型式的气动执行器来达到高精度的快速定位, 如 Badano F 等^[26]于 1994 年采用图 4 所示的波纹管驱动器控制一个二维平台。由于波纹管驱动器无摩擦、反冲 (Backlash) 等非线性因素的响应, 因此其控制难度及定位精度相对活塞式气缸来说都要好很多。Badano F 等采用了非线性控制方程来描述该气动系统, 并通过适当简化建立了一套拟线性控制的数学模型, 这样可以通过线性控制策略并结合状态反馈控制方法来控制整个系统。实验结果表明: 该气动系统能够在峰值推力 250 N 的情况下, 28 ms 内实现行程 2 mm, 同时定位精度

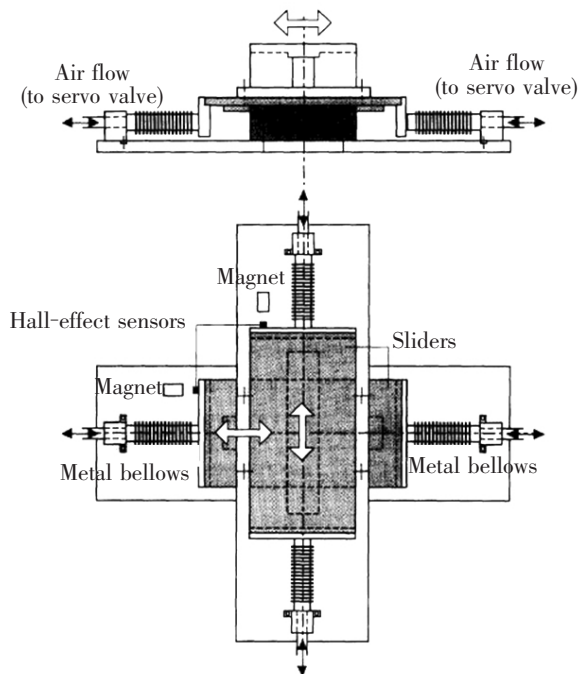


图4 金属波纹管驱动的平台精密定位台

达到 $2\ \mu\text{m}$ 。

2.2 混合型式精密气动定位

到20世纪末期,由于半导体零件尺寸的减小及大规模快速生产的需要,对光刻加工平台、微电子产品生产及装配平台的运行提出了大行程、高速、精密定位的需求。由于气动系统具有行程大、反应快速的优点,且气动系统的定位精度已经达到百微米级左右,即与压电陶瓷驱动器、波纹管驱动器在行程上形成了互补;因此,自此之后,人们在设计高精度气动定位平台时,通常采用活塞式气缸进行粗调、压电陶瓷驱动器或波纹管驱动器进行精调的两级混合型精密气动布局型式。

Liu Y T 等于1999年^[27]开始进行气动-压电陶瓷驱动器混合结构研究,并于2001年^[28-29]采用活塞式气缸及压电陶瓷驱动器组成串联系统来控制一个滑动平台。大位移的粗定位由气动执行器完成,而在精密定位过程中,他们采用了一种逐步搜索式的控制思想,即在每一个时间步里面,由压电陶瓷驱动器发出一个脉冲力,推动平台实现微小位移,由检测系统检测平台是否到达期望位置并进行反馈,以

确定是否继续对压电陶瓷驱动器发出脉冲电压,并推动平台进行微动。Liu Y T 等的实验是成功的,他们在 $2\ \text{mm}$ 行程上实现了 $0.5\ \mu\text{m}$ 的定位精度。在接下来的几年中,Liu Y T 等对精密定位系统进行改善^[30-32],2004年^[33],他们采用同样的设计思想,设计了一个行程为 $100\ \text{mm}$ 的活塞式气缸-压电陶瓷驱动器组成的混合定位平台;其中,气动粗调定位部分采用分段控制,在短行程和中行程时,均采用电动直控,而在长行程时,则采用了一个PI补偿器进行系统的精确定位,精调部分则仍然采用压电陶瓷驱动器产生脉冲力对平台进行微小调整;经过测试,该混合系统的粗调定位精度为 $10\ \mu\text{m}$,而精调定位精度达到了 $10\ \text{nm}$,其中精调部分耗时 $1.479\ \text{s}$ 。这一期间对气缸粗调的控制通常采用气压积分的办法来实现,这样直接导致压电陶瓷驱动器的电压波形控制变得异常复杂。鉴于此,Liu Y T 等^[2]于2007年设计了图5所示的气动-压电陶瓷混合定位系统,该系统采用控制气压压差的方法,实现了气动系统的粗定位,并利用气缸内的摩擦力,来提高压电陶瓷驱动器的定位精度,同时使压电陶瓷驱动器的电压波形控制大大简化。最终,该方法在 $4\ \text{mm}$ 行程上实现了 $10\ \text{nm}$ 的定位精度,但耗时 $2.683\ \text{s}$,约为此前采用气压积分控制方法的两倍时长。

在同一时期,Chiang M H 等也开展了采用气动-压电陶瓷驱动器混合结构进行大行程气动精密定位的研究,最初仅仅实现了亚微米的定位精度^[34-35],但在2010年,他们采用模糊控制的思想,设计了如图6所示的X-Y双轴式气动-压电陶瓷驱动器混合气动定

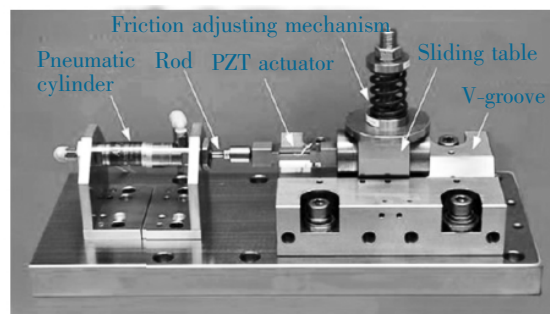


图5 气动-压电陶瓷混合定位设备

位系统^[4]。由于该二维定位系统的双轴是互相垂直的，因此，X、Y两轴的运动控制可以进行解耦处理。事实上，X、Y两轴不可能完全垂直，因此，系统采用了一个解耦控制器来减小两轴向运动间的相互影响。另外，对于压电陶瓷驱动器及活塞式气缸的运动也同样进行了解耦处理。最终，该系统能够在200 mm及250 mm长行程上实现了20 nm的定位精度，整个过程耗时>6 s。由于线纹尺(Linear scales)的分辨精度为20 nm及编码器的运算速度不高，因此，Chiang M H等认为，如果能就这两方面作出改善，系统的定位精度及瞬态响应还能大大提高。

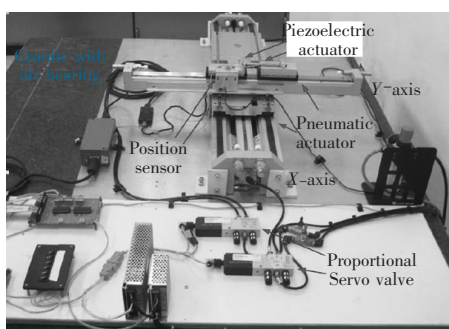


图6 X-Y双轴式气动-压电陶瓷混合驱动器布局

2010年，Kenji K等^[5]设计了一种粗、精两级混合气动定位系统，与其他系统不同的是：该两级调整机构均采用气动方式，其中采用活塞式气缸进行粗调，使用波纹管驱动器进行精调，其具体结构如图7所示。其粗调部分采用一个高性能气动伺服阀对活塞式气缸进行控制，而精调部分则采用压差控制的办法来实现波纹管驱动器的微小位移调节。实验结果证明，这种混合精密气动定位系统可在100 mm的行程上实现20 nm的定位精度，由于该系统的粗、

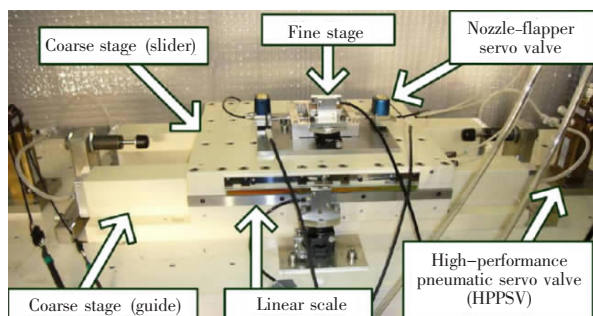


图7 气动粗/精双调整平台

精两级调整部分均采用气动布局，其发热量极小且不产生任何电磁辐射，因此，在超精密定位应用中适用性更强，尤其适合于一些特殊的微电子元器件生产场合。

3 精密气动定位系统发展探讨

从最早的气动定位研究到目前已经历了50多年的发展历程，而精密气动定位系统的应用则始于上世纪80年代，图8对自上世纪80年代以来一些典型精密气动定位系统的性能进行了统计。

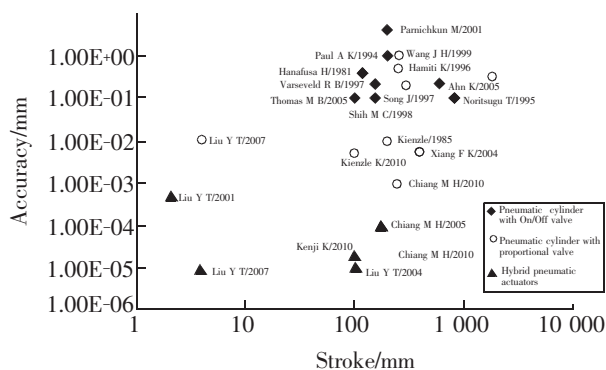


图8 一些典型精密气动定位系统的性能

从图8中可以看出精密气动定位系统的应用主要具有以下特点：

(1) 精密气动定位系统的发展与工业需求是密切相关的。在2000年以前，气动系统的主要工业应用以食品、制药、机床制造、石油工业为主，通常采用单一形式的精密气动定位系统即可满足要求；而在此之后，由于微纳光刻加工、微电子产品生产及装配方面的需求，对定位平台的速度及精度提出了更高的要求，因而一般采用混合形式的精密气动定位系统。

(2) 气动系统的选择与其经济性密切相关。由于电磁比例阀控制精度较好，但价格也贵，因此在满足精度的情况下，人们优先选用经济性较好的高速开关电磁阀控制气缸的定位，只有在较高精度场合才使用电磁比例阀控制气缸的定位。

(3) 新技术的应用大大提高了精密气动定位系

统的定位精度。由于压电陶瓷驱动器及波纹管驱动器具有更高的定位精度，因此与气动系统形成混合结构时，使气动系统的定位精度产生了质的飞跃。

目前，精密气动定位系统朝着高速、高精度的方向发展。从当前的研究来看，在精密气动定位方面仍然存在以下关键技术有待提高：

(1) 在了解系统特性的前提下，电磁比例伺服阀或电磁高速开关阀的控制技术；

(2) 制动技术，即系统能够在目标位置实现准确制动；

(3) 活塞式气缸和其他形式的驱动器，如压电陶瓷驱动器、波纹管驱动器的联合控制技术；

(4) 如何减小环境温度、振动对精密气动系统定位的影响；

(5) 反馈系统识别精度的提高。

4 结束语

在精密机械工程日益发展的今天，人们对精密气动定位系统进行了越来越深入的研究，使精密气动定位系统的定位精度不断提高。本文通过概述精密气动定位系统的发展历程，分析了精密气动定位系统的应用特点，并从当前的发展状况出发，总结了当前精密气动定位的关键技术，对研究精密气动定位系统具有一定的参考意义。

参考文献

- [1] Shearer J L. Study of pneumatic processes in the continuous control of motion with compressed air-I, II[C]. *Transactions of the ASME, Denver, United States*, 1956, 2: 233-249.
- [2] Liu Yungtien, Jiang Chiachi. Pneumatic actuating device with nanopositioning ability utilizing PZT impact force coupled with differential pressure[J]. *Precision Engineering*, 2007, 31(3): 209-303.
- [3] Kenji K, Takeshi A, Kotaro T, et al. Development of coarse/fine dual stage using pneumatically driven bellows actuator and cylinder with air bearings [J]. *Precision Engineering*, 2010, 34(3): 526-533.
- [4] Chiang Maohsiung. Development of X-Y servo pneumatic-piezoelectric hybrid actuators for position control with high response, largestroke and nanometer accuracy[J]. *Sensors*, 2010, 10(4): 2675-2693.
- [5] Burrows C R, Webb C R. Use of root loci in design of pneumatic servo-motors[J]. *Control*, 1966, 10(8): 423-427.
- [6] Burrows C R. Effect of position on the stability of pneumatic servo mechanisms[J]. *Journal of Mechanical Engineering and Science*, 1969, 11(6): 615-616.
- [7] Bowns D E, Ballard R L. Digital computation for analysis of pneumatic actuator system[J]. *Proceedings of Instruments and Mechanical Engineering*, 1972, 186(2): 881-889.
- [8] Ahn K, Yokota S H. Intelligent switching control of pneumatic actuator using on/off solenoid valves [J]. *Mechatronics*, 2005, 15(6): 683-702.
- [9] Hanafusa H, Noritsugu T. Pressure control pneumatic cylinder with high-precision positioning ability[J]. *Journal of Japanese Society Mechanical Engineering, Series C*, 1981, 47(3): 328-336.
- [10] Backe W. The application of servo pneumatic drives for flexible mechanical handling techniques[J]. *Robotics*, 1986, 2(1): 45-56.
- [11] Noritsugu T. Development of PWM mode electro-pneumatic servo mechanism, part I: speed control of a pneumatic cylinder[J]. *Journal of Fluid Control*, 1986, 17(1): 65-80.
- [12] Noritsugu T. Development of PWM mode electro-pneumatic servo mechanism, part II: Position control of a

- pneumatic cylinder [J]. *Journal of Fluid Control*, 1987, 18(1): 7-28.
- [13] Noritsugu T, Park J G. High-speed positioning of pneumatic robot using learning posicast control[J]. *Journal of Japanese Society Mechanical Engineering, Series C*, 1993, 59(8): 1779-1786.
- [14] Noritsugu T, Takaiwa M. Robust position control of pneumatic servo system with pressure control loop [C]. *Proceedings of IEEE International Conference on Robot and Automation, Nagoya, Aichi, Japan*, 1995, 3: 2613-2618.
- [15] Paul A K, Mishra J K, Radke M G. Reduced order sliding mode control for pneumatic actuator[J]. *IEEE Transaction of Control System and Technology*, 1994, 2(3): 271-276.
- [16] Hamiti K, Voda-Besan A, Roux-Buisson H. Position control of a pneumatic actuator under the influence of stiction[J]. *Control Engineering Practice*, 1996, 4(8): 1079-1088.
- [17] Song Junbo, Ishida Y. A robust sliding mode control for pneumatic servo system[J]. *Internal Journal of English Science*, 1997, 35(8): 711-723.
- [18] Shih M C, Ma M A. Position control of a pneumatic cylinder using fuzzy PWM control method[J]. *Mechatronics*, 1998, 8(3): 241-253.
- [19] Varseveld R B, Bone G M. Accurate position control of a pneumatic actuator using on/off solenoid valves[J]. *IEEE/ASME Transaction of Mechatronics*, 1997, 2(3): 195-204.
- [20] Wang Jihong, Pu Junsheng, Moore P. Accurate position control of servo pneumatic actuator systems:an application to food packaging[J]. *Control Engineering Practice*, 1999, 7(6): 699-706.
- [21] Fok S C, Ong E K. Position control and repeatability of a pneumatic rodless cylinder system for continuous positioning[J]. *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, 1999, 15(5): 365-371.
- [22] Shibata S, Tanakata K, Fujihara S, *et al.* Neuro control with δ -modification of pneumatic servo system [J]. *Journal of Japanese Society Mechanical Engineering, Serious C*, 2000, 66(3): 509-513.
- [23] Parnichkun M, Ngaechoenkul C. Kinematics control of a pneumatic system by hybrid fuzzy PID [J]. *Mechatronics*, 2001, 11(8): 1001-1023.
- [24] Xiang Fulin, Wikander J. Block-oriented approximate feedback linearization for control of pneumatic actuator system [J]. *Control Engineering Practice*, 2004, 12(4): 387-399.
- [25] Thomas M B, Maul G P, Jayawiyanto E. A novel, low-cost pneumatic positioning system[J]. *Journal of Manufacturing Systems*, 2005, 24(4): 377-387.
- [26] Badano F, Betemps M, Thomasset D. Control of a planar fine positioner actuated by metal bellows [J]. *Automatica*, 1994, 30(11): 1677-1691.
- [27] Liu Yungtien, Higuchi T. Precision positioning device utilizing the combined piezo-pneumatic actuator — simulation results [C]. *Proceeding of Japanese Society on Precision Engineering, Tokyo, Japan*, 1999, 3: 109-115 (in Japanese).
- [28] Liu Yungtien, Higuchi T. Precision positioning device utilizing impact force of combined piezo-pneumatic actuator [J]. *IEEE/ASME Transation of Mechatronics*, 2001, 6(4): 467-473.
- [29] Liu Yungtien, Lee Chenhao. High-precision position control system utilizing pneumatic cylinder and piezoelectric actuator[C]. *Proceedings of the 19th National Conference on Mechanical Engineering CSME, Taipei, Taiwan*,

2002: 165-172 (in Chinese).

- [30] Liu Yungtien, Higuchi T, Fung Rongfong. A novel precision positioning table utilizing impact force of spring-mounted piezoelectric actuator-Part I: experimental design and results[J]. *Precision Engineering*, 2003, 27(1): 14-21.
- [31] Liu Yungtien, Higuchi T, Fung Rongfong. A novel precision positioning table utilizing impact force of spring-mounted piezoelectric actuator-Part II: theoretical analysis[J]. *Precision Engineering*, 2003, 27(1): 22-31.
- [32] Liu Yungtien, Jiang Chiachi. Pneumatic actuating device with nanopositioning ability utilizing piezoelectric impact force[C]. *Proceedings of the First International Conference on Positioning Technology, Hamamatsu, Japan*, 2004: 247-252.
- [33] Liu Yungtien, Lee Chenhao, Fung Rongfong. A pneumatic positioning device coupled with piezoelectric self-moving mechanism[J]. *Asian Journal of Control*, 2004, 6(2): 199-207.
- [34] Chiang Maohsiung, Chen Chungchieh, Chang Yingshu. Development of a new PWM pneumatic-piezoelectric actuator for positioning with high response, large stroke and sub-micrometer accuracy[C]. *Proceedings of the seventh international conference on mechatronics technology, Taipei, Taiwan*, 2003: 331-337.
- [35] Chiang Maohsiung, Chen Chungchieh, Tsow Tanni. Large stroke and high precision pneumatic piezoelectric hybrid positioning control using adaptive discrete variable structure control[J]. *Mechatronics*, 2005, 15(5): 523-545.

作者简介: 袁文全 (1982-), 男, 河南新乡人, 硕士, 助理研究员, 2009年于中国科学院力学研究所获得硕士学位, 主要从事精密光机结构设计与分析。E-mail: yuanwenquan@tom.com

*巩岩 (1968-), 男, 吉林梅河口人, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事短波光学、光学系统光机集成设计、高精度光学系统装调技术的研究。E-mail: gongy@sklao.ac.cn