

DOI:10.3969/j.issn.1000-1298.2010.05.044

基于生物金属纤维的微小流量气动阀*

鄂世举¹ 高春甫¹ 徐现荣²

(1. 浙江师范大学交通学院, 金华 321004; 2. 吉林大学机械科学与工程学院, 长春 130025)

【摘要】 设计了一种新型气动微型伺服阀。该伺服阀的电-机械转换由一种新型的形状记忆合金(SMA)-生物金属纤维(BMF)实现。通过实验,研究了BMF100的输出位移与负载特性,在0.1 N载荷、10 V驱动电压范围内,其电压滞环为0.2 V;在1.0 N载荷、11 V驱动电压范围内,其电压滞环为0.4 V。利用CATIA软件建立了伺服阀的三维模型,利用有限元分析方法对阀芯的应力及应变特性进行了仿真研究。伺服阀阶跃响应仿真研究表明,伺服阀输出压力的上升时间为0.3 s,输出流量的上升时间为1.6 s。

关键词: 生物金属纤维 驱动器 气动阀 实验 仿真

中图分类号: TN384 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2010)05-0218-04

BMF Based Micro-flux Pneumatic Servo Valve

E Shiju¹ Gao Chunfu¹ Xu Xianrong²

(1. College of Mechanical Science and Engineering, Zhejiang Normal University, Jinhua 321004, China

2. Institute of Mechanical Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130025, China)

Abstract

Utilizing a new type shape memory alloy (SMA)-biometal fiber (BMF) as the convertor from electrical energy to mechanical energy, a pneumatic micro-servo valve was developed. Input-output characteristics of BMF100, including displacement output and load output were investigated by the experiments. The voltage hysteresis of BMF100 was 0.2 V at 0.1 N load and 10 V maximum driving voltage, and the value was 0.4 V at 1.0 N load and 11 V maximum driving voltage. 3-D model of servo valve was simulated by the software of CATIA. As an important part, the allowable stress and strain of coniform core of valve was studied by the numerical simulation of finite element method with software of ANSYS. Response time of pressure output of the valve was 0.3 s. The result shows that it is feasible to use BMF as the convertor from electrical energy to mechanical energy of pneumatic servo micro-valve.

Key words BMF, Actuator, Pneumatic servo valve, Experiment, Simulation

引言

气动伺服控制系统具有价格低廉、结构简单、抗干扰性强等优点^[1-2],广泛应用于航天飞行器、导弹的姿态和飞行稳定控制以及机器人驱动等应用场合^[3-5]。作为电-气转换元件,伺服阀是气动伺服系统中的关键控制器件。目前,气动伺服阀结构复杂、体积大、造价高、普遍存在机械振动和噪声较大等问题。针对以上应用系统及存在的问题,研制基于不

同致动原理的小型、微型伺服阀是一个重要的研究方向^[6-7]。

本文基于一种新型的形状记忆合金材料(shape-memory alloy, 简称 SMA)-生物金属纤维(biometal fiber, 简称 BMF),设计一种新型结构的气动微型伺服阀。传统的 SMA 材料由于反应迟缓等缺陷,直接作为驱动器使用比较困难^[8]。本文利用日本 TOKI 株式会社开发的 BMF 材料作为伺服阀的电-机械位移转换器件。BMF 是一种纤维状二方

收稿日期: 2009-07-07 修回日期: 2010-01-31

* 国家自然科学基金资助项目(50777028)和浙江省钱江人才计划资助项目(2009R10010)

作者简介: 鄂世举,副教授,主要从事新型功能材料应用技术研究, E-mail: esx_2001@zjnu.cn

向形状记忆合金驱动材料,以 Ti - Ni 系及 Ti - Ni - Cu 系的形状记忆合金作为原料,经特殊工艺制造而成。与传统的 SMA 相比,BMF 具有如下特性:具有好的二方向形状记忆功能(伸长量约为 5%);可以往复输出大的变形(伸长量约为 5%)和力(100 ~ 150 MPa);温度滞环小,应答性好(正常负载下,10℃以下);状态稳定,往复输出变形量几乎不变;寿命长(负载 100 MPa, 3% 变形量下,大约 10^8 次);具有高的电气阻抗,用较小的电流即可驱动。以上特点使 BMF 非常适用于小型和微型驱动器。而基于 BMF 的新型气动微型伺服阀具有结构简单、紧凑、体积小,工作稳定、驱动控制方便、价格低廉等特点,具有重要的研究价值和较广阔的应用前景。

1 BMF 特性的实验

实验研究在一定负载下的位移输出特性,实验条件如图 1 所示。其中 BMF 的型号为 BMF100,长度 30 cm。悬挂重物负荷 W 分别为 0.1 N 及 1.0 N。加热驱动电路可采用定电压、定电流、交流驱动及脉冲加热驱动方式等。本文采用脉冲 PWM 加热驱动方式,如图 2 所示。这种方式有利于平均电流的调整、大电流的流动、通电时间及电荷的管理等,可获得 BMF 的高速动作。另外,在理论上,由于只存在“开”和“关”两个状态,回路内部发热少,有利于控制电路本身的小型化。

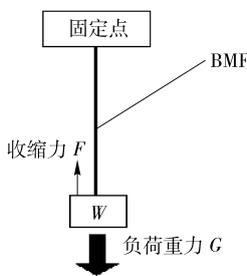


图 1 实验方式与条件

Fig. 1 Experimental method and conditions

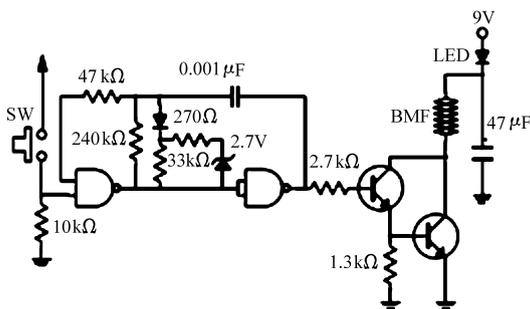


图 2 脉冲加热驱动电路

Fig. 2 PWM driving circuit

在给定的负载下,改变驱动电压,包括升压与降压两个过程,得到电压-输出位移关系曲线,如图 3

所示。图中实线 1 表示 BMF 增压时的收缩状态,虚线 2 表示 BMF 降压时的伸长状态。

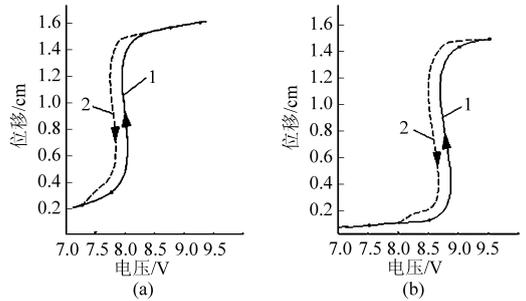


图 3 输入电压-输出位移关系

Fig. 3 Relationship between voltage input and displacement output

(a) 负载 0.1 N (b) 负载 1.0 N

图 3a 负载为 0.1 N,驱动电压达到 5 V 时,BMF 开始收缩,当达 8 V 时,BMF 急剧收缩,增压至 10 V 时,收缩结束,曲线趋于平稳。当降低驱动电压到 7.7 V 时,BMF 开始伸长,电压滞环为 0.2 V。图 3b 负载为 1.0 N,驱动电压达 6 V 时,BMF 开始收缩,当达到 9 V 时,BMF 急剧收缩,到 11 V 时,收缩结束,曲线趋于平稳。当降低驱动电压到 8.5 V 时,BMF 开始伸长,电压滞环为 0.4 V。可知,负载越大时,所需要的驱动电压就越大,电压滞环随之增大。

2 气动微型伺服阀的结构及工作原理

2.1 伺服阀的结构

伺服阀的结构如图 4 所示。气体从管接头 I 流入,通过阀体,从管接头 II 流出。该伺服阀通过控制输入电流调整输出气体的流量。未通电时,BMF 处于柔软、松弛状态,预压弹簧 4 将锥阀阀芯 8 压紧在喷嘴/管接头 9 上,此时阀处于关闭状态。通电时,BMF 加热收缩,拉动阀芯 8 并使之开启。在开启状态,BMF 通过自动平衡通电加热与气体流放热量的形式形成反馈,如图 5 所示。具体原理为:气体在阀体内流通,如果阀输入端气体气压向上波动,流量增大,致使 BMF 相对冷却而伸长,于是锥阀芯向小开启的方向运动;反之,如果输入端气体流量变少,BMF 相对温升,顶尖向大开启的方向运动。可见,该阀可在一定范围内,对应于一定的控制电流,

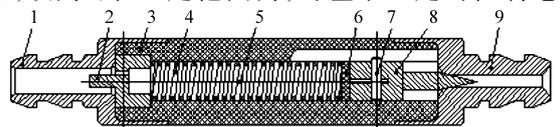


图 4 气动伺服阀结构原理

Fig. 4 Configuration and principle of pneumatic servo valve

1. 管接头 I 2. 端盖 3. 阀体 4. 预压弹簧 5. BMF 6. 绝缘体 7. 圆柱销 8. 锥阀芯 9. 管接头 II

使输出气体流量保持稳定,即可保持伺服阀的流量与通电电流相对应。

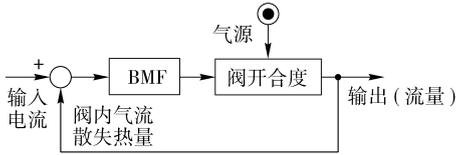


图5 气动伺服阀反馈控制原理

Fig.5 Principle of feedback control of pneumatic servo valve

2.2 BMF 材料的选择

BMF 包括一个系列,随线径的不同,呈现不同的输出特性。BMF 线径大,输出力大,通电电流也大,冷却时响应迟钝;相反,线径小,输出力小,通电电流小,响应速度快。输出力大致与截面积成比例,而输出变形量与线径无关。本文中所选择的 BMF100 线径为 0.1 mm,输出力为 0.8 N,输出变形量为总长的 4.5%,使用寿命为 10^6 次,驱动电流为 200 mA。

3 伺服阀的建模与仿真

3.1 伺服阀的建模

利用 CATIA 的零件设计平台,分别设计各阀体组件的三维模型。并利用装配设计平台,通过零件实体组装得到伺服阀三维模型图,如图 6 所示。

伺服阀的整体结构简单,设计灵活,装配精度与零件的加工精度要求不高(除阀芯锥尖与锥尖孔外),有利于伺服阀的小型化、降低成本。

3.2 阀芯的力学模型及有限元分析

伺服阀阀芯的受力包括 BMF 的驱动力、与阀套

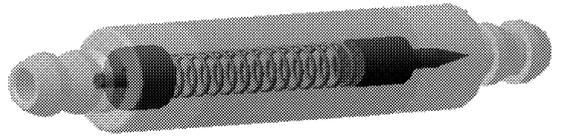


图6 气动伺服阀三维模型

Fig.6 3-D model of pneumatic servo valve

之间的摩擦阻力、预压弹簧的弹性力及阀芯两端的压力差等,力学模型可简化为图 7 所示。由于 BMF 材料在全程范围内的非线性(图 3),故伺服阀的动力学模型属于非线性离散

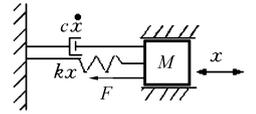


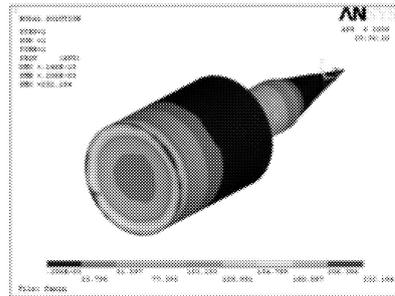
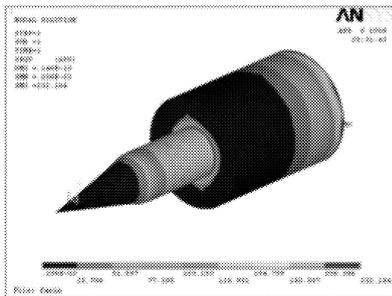
图7 气动伺服阀的力学模型

Fig.7 Mechanics model of pneumatic servo valve

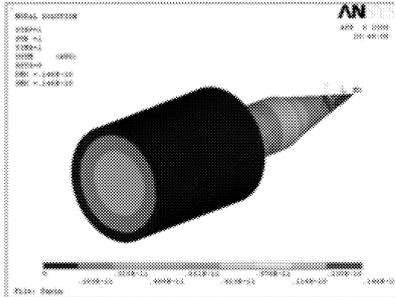
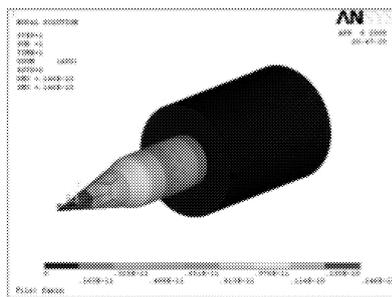
系统。但由于本文中所设计的为微小流量阀,只利用温度-输出位移曲线倾斜度大的一段,即选择 BMF 的线性工作区间,以利于提高 BMF 的响应特性及往复输出能力。在此条件下,阀芯的动力学模型可简化为线性离散系统。

阀芯作为伺服阀中的关键零部件,其结构强度、刚度及与管接头 II 的接触强度直接决定了伺服阀能否可靠、稳定工作。相对于球阀式结构,锥阀式有利于消除气动力的影响,克服气压力不平衡问题,故本阀采用锥阀芯。先用 CATIA 软件建立了阀芯的几何实体模型,然后用 ANSYS 软件进行有限元分析,分析结果如图 8 所示。其中图 8a 与 8b 分别为阀芯的应力与应变示意图。

应力等值线图中,颜色越深的地方说明应力越



(a)



(b)

图8 阀芯的应力与应变仿真分析

Fig.8 Simulation of stress and strain of valve core

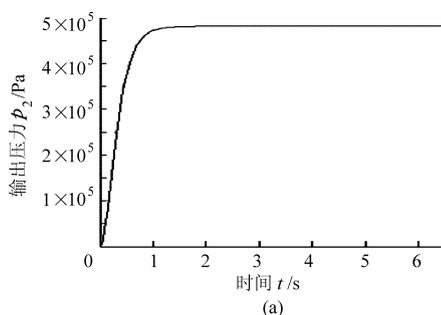
(a) 应力 (b) 应变

大,可以看出阀芯的左端面和阀芯的锥尖处应力、位移最大,设计中以伺服阀的公称压力为 0.5 MPa 进行计算,阀芯的最大应力为 206.386 MPa,没有超过铜的屈服极限,故以铜作为阀芯可满足要求。从应力分析角度,材料抵抗破坏的能力具有较大潜力。阀芯结构的总变形很小,能保证大承载条件下具有高的精度。

3.3 伺服阀仿真结果及分析

3.3.1 阶跃响应仿真

在气源压力为 1 MPa, 负载为 10 N 条件下,采用 PID 控制,利用阶跃响应对伺服阀的出口压力与流量进行了分析。其中 PID 控制参数为: $K_p = 8$,



$K_i = 3.5, K_d = 1.5$ 。出口压力 p_2 和出口流量 Q_V 的阶跃响应曲线分别如图 9a 与 9b 所示。由图可见,出口压力 p_2 的上升时间是 0.7 s。而出口流量 Q_V 的上升时间是 1.6 s。

3.3.2 伺服阀输入-输出特性

施加电压时, BMF 收缩, 阀芯开启。出口压力 p_2 和流量 Q_V 与控制电压 U 之间的关系曲线分别如图 10a 与 10b 所示, 取 $K_p = 8, K_i = 3.3, K_d = 1.2$ 。

由图 10 可见, BMF 自电压为 5 V 时开始收缩, 伺服阀处于小开启状态, 随着控制电压的增加, 阀口开度加大, 到 9 V 左右时, 出口压力 p_2 和出口流量 Q_V 趋于稳定。

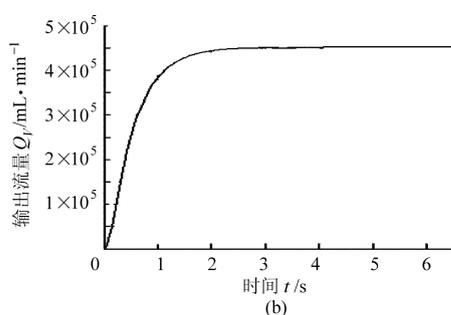


图 9 输出压力 p_2 与输出流量 Q_V 的阶跃响应曲线

Fig. 9 Step-response of output pressure p_2 and out put flux Q_V

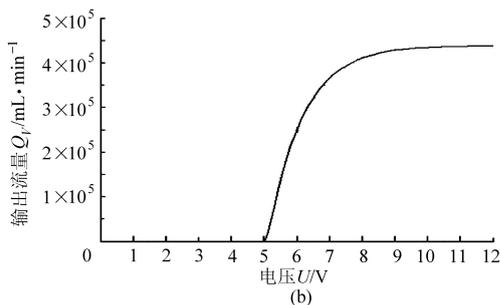
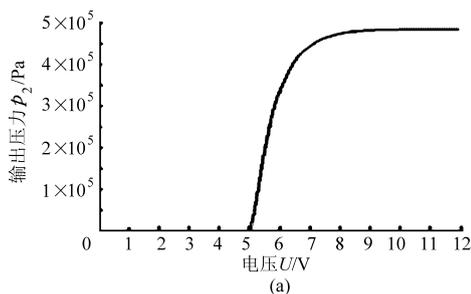


图 10 气动伺服阀的输入-输出特性曲线

Fig. 10 Output-input characteristics of pneumatic servo valve

4 结束语

与传统的 SMA 材料比较, BMF 具有诸多适用于驱动器的特点, 特别适用于小型和微型驱动器, 本文通过对 BMF 输入-输出特性的实验研究予以验证。以 BMF 为气动伺服阀电-机转换器, 并结合预

压弹簧实现了伺服阀的开启与关闭动作。通过对该伺服阀的建模、仿真与控制研究得出: 基于 BMF 的新型气动微型伺服阀具有体积小、结构简单、产生振动轻微等特点; 伺服阀可稳定工作, 并具有良好的控制特性。

参 考 文 献

- 1 李小宁. 气动技术的发展趋势[J]. 机械制造与自动化, 2003(2): 5~7, 12.
- 2 Zhang Chunsun, Xing Da, Li Yuyuan. Micropumps, microvalves, and micromixers within PCR microfluidic chips: advances and trends[J]. Biotechnology Advances, 2007, 31(2): 483~514.
- 3 樊则文, 刘小宁, 杨炳渊. 超声速飞行器气动伺服弹性稳定性分析[J]. 上海航天, 2008(4): 22~30.
- 4 武鹏飞, 吴张永, 邵晓光. 气动机械手柔性抓取控制系统设计与仿真分析[J]. 机床与液压, 2008, 36(12): 116~117.

参 考 文 献

- 1 Sheng W H, Ning Xi, Song M, et al. Automated cad-guided robot path planning for spray painting of compound surfaces[C] //IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2000: 1 918 ~ 1 923.
- 2 Chen H P, Sheng W H, Ning Xi, et al. Automated robot trajectory planning for spray painting of free form surfaces in automotive manufacturing[C] //Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2002: 450 ~ 455.
- 3 Prasad N Atkar, Aaron Greenfield, David C Conner, et al. Hierarchical segmentation of surfaces embedded in R^3 for auto-body painting[C] //Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2005:574 ~ 579.
- 4 赵德安, 陈伟, 汤养. 面向复杂曲面的喷涂机器人喷枪轨迹优化[J]. 江苏大学学报:自然科学版, 2007,28(5): 425 ~ 429.
Zhao Dean, Chen Wei, Tang Yang. Trajectory optimization of robotic spray painting for complex curved surfaces[J]. Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition, 2007, 28(5): 425 ~ 429. (in Chinese)
- 5 赵德安, 陈伟, 汤养. 基于遗传算法的喷涂机器人喷枪路径规划[J]. 中国机械工程, 2008,19(7):777 ~ 779.
Zhao Dean, Chen Wei, Tang Yang. Tool path planning of spray painting robot based on genetic algorithms[J]. China Mechanical Engineering, 2008, 19(7): 777 ~ 779. (in Chinese)
- 6 陈伟, 赵德安, 汤养. 自由曲面喷漆机器人喷枪轨迹优化[J]. 农业机械学报,2008,39(1):147 ~ 150.
Chen Wei, Zhao Dean, Tang Yang. Trajectory optimization on robotic spray painting of free-form surfaces[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(1): 147 ~ 150. (in Chinese)
- 7 Hertling P, Høg L, Larsen R, et al. Task curve planning for painting robots——part I: process modeling and calibration [J]. IEEE Trans. Robot. Autom., 1996,12(2):324 ~ 330.
- 8 Ellwood K R J, Braslaw J. A finite-element model for an electrostatic bell sprayer[J]. Electrostat, 1998, 45(1): 1 ~ 23.
- 9 李世武, 佟金, 张书军, 等. 逆向工程技术与工程仿生[J]. 农业机械学报,2004,35(3):109 ~ 112.
Li Shiwu, Tong Jin, Zhang Shujun, et al. Reverse engineering and engineering bionics[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2004,35(3):109 ~ 112. (in Chinese)
- 10 柯映林,王青. 反求工程中的点云切片算法研究[J]. 计算机辅助设计与图形学学报,2005,17(8):1 798 ~ 1 802.
Ke Yinglin, Wang Qing. Research on point cloud slicing technique in reverse engineering[J]. Journal of Computer Aided Design & Computer Graphics, 2005,17(8):1 798 ~ 1 802. (in Chinese)
- 11 Prasad N Atkar, Howie Choset, Alfred A Rizzi. Towards optimal coverage of 2-dimensional surfaces embedded R^3 : choice of start curve[C] // Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2003: 3 581 ~ 3 587.

(上接第 221 页)

- 5 Kenji Kawashima, Tomonori Kato, Koichi Sawamoto, et al. Realization of virtual sub-chamber on active controlled pneumatic isolation table with pressure differentiator[J]. Precision Engineering, 2007,31(2):139 ~ 145.
- 6 Al-Ali A R, Jarrah M A, Dhaouadin R. Microcontroller-operated anthropomorphic manipulator with haptic feedback[J]. Robotics and Computer-integrated Manufacturing, 2007,23(1):63 ~ 70.
- 7 Sonam Yun, Kyungwoo Lee, Honghee Kim, et al. Development of the pneumatic valve with bimorph type PZT actuator[J]. Materials Chemistry and Physics, 2006, 97(1):1 ~ 4.
- 8 Takeshi Naganuma, Masanori Kyo, Tatsuhiko Ueki, et al. A new, automatic hydrothermal fluid sampler using a shape-memory alloy[J]. Journal of Oceanography, 1998,54(3): 241 ~ 246.