

电液伺服阀的研究现状

李跃松¹, 朱玉川¹, 吴洪涛¹, 田一松², 牛世勇²

(1. 南京航空航天大学 江苏省精密与微细制造技术重点实验室, 南京 210016

2. 西安飞行自动控制研究所, 西安 710065)

摘要: 介绍了超磁致伸缩材料、压电材料、磁流变流体、电流变流体、形状记忆合金的功能以及其在电液伺服阀中的应用, 对近几年电液伺服阀在结构改进方面的情况进行了论述, 最后给出了电液伺服阀在数字化、水压方面的发展现状。

关键词: 超磁致伸缩材料; 压电材料; 磁流变流体; 形状记忆合金; 水压伺服阀

中图分类号: TH137 **文献标识码:** A **文章编号:** 1673-5048(2010)06-0020-05

Research Actuality of Electrohydraulic Servo Valve

LI Yue-song, ZHU Yu-chuan, WU Hong-tao, TIAN Yi-song, NIU Shi-yong

(1. Jiangsu Key Laboratory of Precision and Micro Manufacturing Technology Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China

2. Flight Automation Control Research Institute Xi'an 710065, China)

Abstract: The functions of giant magnetostrictive material, piezoelectric material, magnetorheological fluid, electrorheological fluid, shape memory alloys and its applications in electrohydraulic servo valve are introduced. Then, improvements of structure of electrohydraulic servo valve in recent years are presented. Digital servo valve and water hydraulic servo valve are discussed at last.

Key words: giant magnetostrictive material; piezoelectric material; magnetorheological fluid; shape memory alloy; water hydraulic servo valve

0 引言

电液伺服阀是电液伺服控制系统的核心控制元件, 其性能直接决定和制约着整个电液伺服控制系统的控制精度、响应特性、工作可靠性及寿命^[1]。随着航空、航天和军事工业对电液伺服系统性能要求的提高, 民用工业对低成本、易维护、环保型电液伺服系统需求, 传统电液伺服阀已不能

满足要求。

为提高伺服阀性能, 国内外展开了以新型功能材料为基础的高频响、高精度电液伺服阀, 以结构改进为基础的大流量、抗污染、低成本型电液伺服阀, 以及以水作为介质的水压伺服阀的研究。本文从新型功能材料在电液伺服阀中应用、电液伺服阀结构改进、数字式和水压式电液伺服阀等几方面对当今电液伺服阀的研究现状进行论述。

1 新型功能材料在电液伺服阀中的应用

1.1 超磁致伸缩材料

超磁致伸缩材料(GMM)的基本物理原理为磁致伸缩效应, 即物体随磁化方向伸长或缩短的现象^[2]。此种材料做成的转换器具有输出力大、响应速度快、控制精度高等优点。

收稿日期: 2010-08-23

基金项目: 国家自然科学基金(50805080); 航空科学基金(20090752008); 南京航空航天大学基本科研业务费专项科研项目(NS2010150)

作者简介: 李跃松(1985-), 男, 河南三门峡人, 博士生, 研究方向是流体传动与控制、机器人技术。

图 1 为日本的 Takahiro Ura 等人用 GMM 转换器设计出了直动式伺服阀^[3]，它的原理是通过线圈中变化的电流产生磁场，使 GMM 棒伸缩，从而驱动与转换器直接连接的阀芯产生输出位移，并且按照其位移量大小来控制阀口流量。此 GMM 直动式伺服阀最大输出流量达 2 L/min 频宽 650 Hz

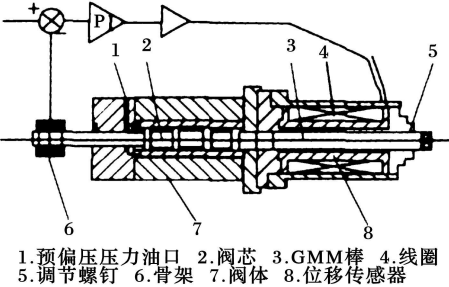


图 1 GMM 直动式伺服阀

图 2 为国内浙江大学研制的 GMM 喷嘴挡板伺服阀^[3]。在驱动线圈通入一定电流，引起磁场变化，驱动 GMM 棒产生一定的输出位移。输出杆也是挡板，喷嘴与挡板间距离由 GMM 棒伸缩位移控制。预压力机构由前端盖、预压弹簧、调节螺钉等组成，其基本原理是利用 GMM 棒的输出位移推动输出杆改变喷嘴与挡板间的间隙，从而实现喷嘴挡板伺服阀控制压力的改变，通过 GMM 棒位移输出的高频高精度实现伺服阀频响和精度的提高。该伺服阀具有较宽的控制压力特性，在供油压力 10 MPa 时，可达 0.52 MPa 学习度约为 2.5%；阶跃响应上升时间为 1 ms，幅频宽达 680 Hz

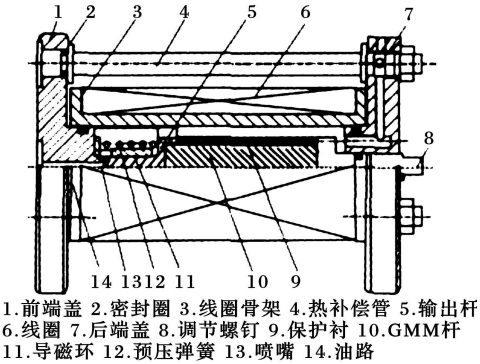


图 2 GMM 喷嘴挡板伺服阀

1.2 压电材料/电致伸缩材料

压电材料 (PZT) 和电致伸缩材料 (PMN) 都是电介质，在其极化方向上施加一定强度的电场，则会引起材料的机械变形，去掉电场后又能恢复到原状态^[4]。此种材料做成的转换器同样具有输出力大、响应速度快、控制精度高等优点，与 GMM 材料相比，研究成熟，价格低，但其需要较高的驱动电压。

图 3 为吉林大学研制的一种带位移放大的直动式压电伺服阀^[4]。当施加到压电叠堆上的外加电压增加时，压电叠堆伸长，推动柔性铰链放大杠杆的位移输入端。杠杆绕杠杆支点转动，放大后的位移由杠杆的输出端传递至滑阀阀芯，再推动弹性回复板，实现滑阀的左移；当外加电压减小时，压电叠堆缩短，在弹性回复板的回复力的作用下，滑阀右移，从而实现了滑阀的双向运动，在供油压力 7 MPa 时，流量可达 5.7 L/min 频响 1.2 kHz

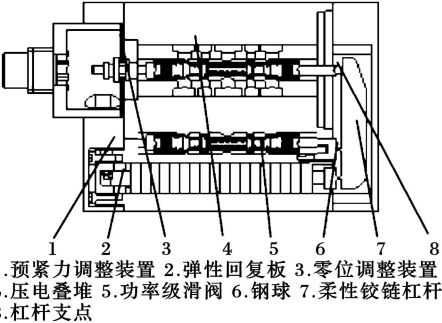


图 3 直动式压电伺服阀结构图

图 4 为利用 PMN 研制的双喷嘴挡板伺服阀^[3]，弹性板左右面为由多层压电叠片组成 PMN 元件。当左右 PMN 加以相反大小的电压时，由于两 PMN 叠片的伸缩量一个增加，一个减小，而使弹性板变形，从而引起挡板和喷嘴间距变化，达到驱动伺服阀的目的。实验研究表明：其频宽比一般的电液伺服阀的频宽有了很大的提高，幅频宽达到 1 500 Hz 左右。

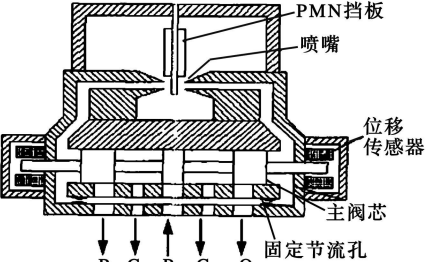


图 4 PMN 双喷嘴挡板伺服阀

1.3 形状记忆合金

形状记忆合金 (SMA) 是指具有一定初始形状的合金在低温下经塑性形变并固定成另一种形变后，通过加热到某一临界温度以上又可恢复成初始形状的一类合金。此种材料做成的转换器体积小、输出位移大、具有自感知功能等优点^[2]，与 GMM 材料和压电材料相比，响应较慢，输出力小，控制精度低，价格较低。

图 5 为日本 Shinhci Yokota 等人研制了 SMA 小型比例伺服阀^[3]，该阀采用差动结构，左右两端

的 SMA 转换器是由一组细丝状的形状记忆合金绕制而成。对该阀进行性能测试实验时,采用通电加热和强制油冷方法来驱动 SMA 转换器,对阀芯端分别给以加热或冷却,形状记忆合金就会相应地收缩或伸长,从而驱动伺服阀的阀左右移动;同时加入位置反馈来提高伺服阀的控制性能。

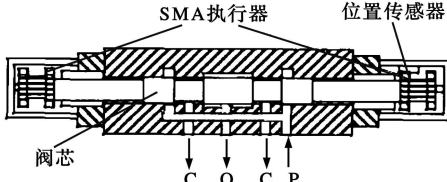


图 5 SMA比例伺服阀

1.4 磁流变流体

磁流变流体 (MRF) 属可控流体,由高磁导率、低磁滞性的微小软磁性颗粒和非导磁性液体混合而成的悬浮体。在外磁场作用下,表面黏度系数陡然增大两个数量级以上;当外加磁场增强时,会在一瞬间 (0.1 左右) 变成类固体,失去流动性,当撤销磁场后,材料立即恢复原状^[5]。

国内哈尔滨工业大学利用 MRF 在外加磁场作用下,具有较大磁化强度的特点,提出了在力矩马达衔铁和铁芯的工作气隙中加入 MRF 利用 MRF 来改善伺服阀动态性能的方法。实验表明,添加磁流变流体后消除了射流管伺服阀的自激振荡,但响应速度降低^[6]。

1.5 电流变流体

电流变流体 (ERF),也是可控流体,它是用不导电的母液和均匀散布在其中的固体电介质颗粒所制成的悬浮体。在电场的作用下,电流变流体从流动性体转变为有一定剪切屈服应力的粘塑性体。这样的转变是迅速的 (ms 级)、电依赖的、可逆的。利用电流变流体制成的伺服阀与传统的伺服阀和比例阀相比具有响应快、精度高、能耗低、稳定性好等优点^[7]。

图 6 为 ERF 伺服阀^[7],由四个结构和几何尺寸完全一致 ER 元件接成桥式回路与滑阀左右控

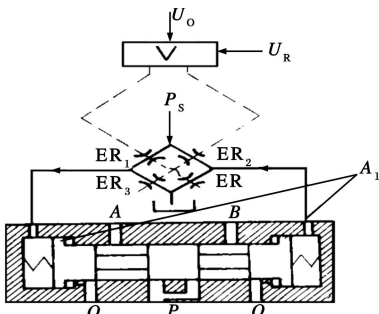


图 6 ERF 伺服阀

制控相连,当施加一电压信号,ERF 黏度发生变化,产生液阻,致使滑阀左右控制腔产生压差,驱动滑阀阀芯移动。

2 电液伺服阀结构的改进

2.1 直动式电液伺服阀

直动式电液伺服阀 (DDV) 由直线力马达、液压阀及放大器组件构成,具有很强抗污染能力和很高的工作可靠性,动态指标高,结构简单且成本较低,使电液伺服阀的应用领域得到了拓宽^[8]。

图 7 为直动式电液伺服阀结构^[8],一个电指令信号施加到阀芯位置控制器集成块上,电子线路在直线力马达上产生一个脉宽调制电流,振荡器就使阀芯位置传感器励磁,经解调后的阀芯位置信号和指令位置信号进行比较,阀芯位置控制器产生一个电流给直线力马达,力马达驱动阀芯,一直使阀芯移动到指令位置,阀芯的位置与电指令信号成正比,伺服阀的实际流量是阀芯位置与通过节流口的压力降的函数。

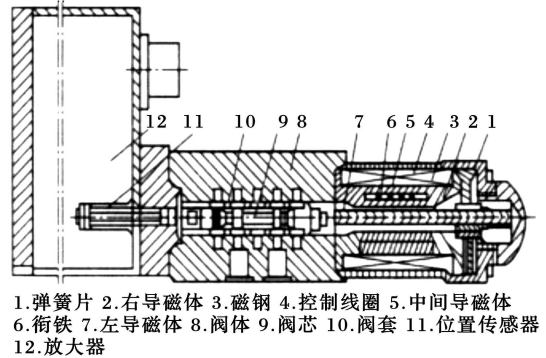


图 7 直动式电液伺服阀

2.2 电液伺服比例阀

电液伺服比例阀是伺服技术与比例技术结合的产物,是技术进步的一种必然。伺服比例阀分两种,一种是由比例阀发展而来,一种由伺服阀发展而来。由比例阀发展而来的伺服比例阀具有如下特点:利用大电流的比例电磁铁作为电-机械转换器;首级采用伺服阀的阀芯阀套;首级与主级阀口零遮盖;这种伺服比例阀无零位死区,可以用于各种闭环系统,因而加工精度与过滤精度要求与伺服阀相同;频响较一般比例阀高,可靠性比普通伺服阀高。而由伺服阀发展而来的伺服比例阀是对伺服阀结构进行简化,使其具有抗污染性、高可靠性、低成本等特点^[9]。

图 8 为国内研制的射流管伺服比例阀^[9],由于采用外接式滤器和过滤模块,其抗污染能力强,

对油液的清洁度要求等同于比例阀。该阀设计上主要通过改善工艺性来降低成本，并不降低加工精度，故其控制性能及精度完全等同于伺服阀，但与同规格伺服阀相比体积稍大。

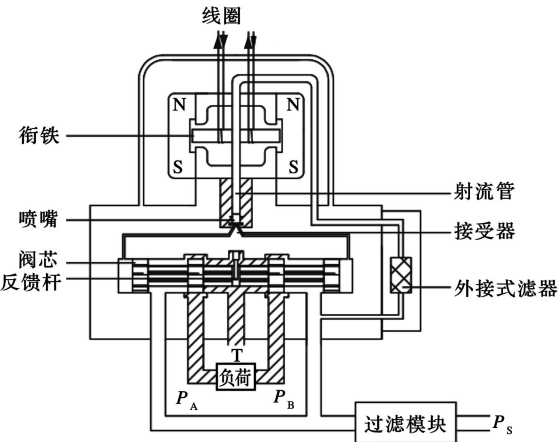


图 8 射流管伺服比例阀

2 3 旋转式电液伺服阀

为了解决传统伺服阀结构复杂，制造要求高，使用条件极为苛刻，对油液的污染非常敏感，故障率较高，制造和使用成本高的缺点，北京航空航天大学设计出一种基于转动阀芯结构原理的旋转式伺服阀^[10]，如图 9 所示，它由电动机直接驱动，从原理上克服了传统伺服阀的缺点。

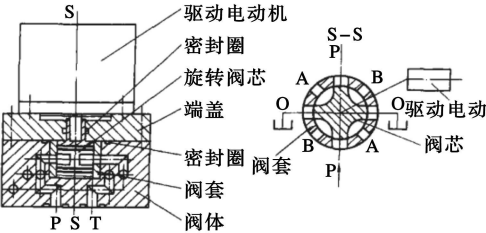


图 9 有限角度旋转式电液伺服阀

2 4 冗余电液伺服阀

在航空航天领域为了提高伺服阀的可靠性，出现了冗余伺服阀。冗余伺服阀的主要特点是将伺服阀的力矩马达、反馈元件、滑阀副做成多套，发生故障可随时切换，保证系统的正常工作。

俄罗斯在其研制的射流管式伺服阀阀芯两端设计了双冗余位置传感器，用来检测阀芯位置，一旦出现故障信号可立即切换备用伺服阀。国内有将射流管伺服阀的驱动线圈做成三冗余的，这些都大大提高了电液伺服系统的可靠性。

2 5 非对称电液伺服阀

非对称电液伺服阀是指液压油的进出节流窗口的面积梯度成一定比例的伺服阀。

非对称缸具有结构简单、占用空间少、承载能力较大等优点。采用传统的对称伺服阀对非对称

缸进行控制时，液压缸换向压力突变会使液压伺服系统产生振动和噪声，易出现气蚀和超压，且液压伺服系统两个方向上动态特性是不对称的。若采用非对称阀控制非对称液压缸的形式，液压缸两腔压力不再受运动方向影响，换向时压力突变消失，系统动态特性对称，对负载变化的承受能力也有很大提高。

3 电液伺服阀的数字化

随着计算机技术在流体控制系统中的大量应用，流体控制技术及元件的数字化成为一种必然的趋势。电液伺服阀的数字化主要体现在对数字化电—机转换器使用上，如步进电机，伺服电机取代力马达与力矩马达作为电液伺服阀的电—机转换器件。由于电机控制性能优良，因此此类伺服阀具有控制精度高、响应速度快、结构简单的优点。

图 10 为直流无刷电机驱动的电液伺服阀^[11]，控制器采用 DSP 系统，阀芯部分采用直流无刷电机直接驱动，它由 DSP 控制器与功率放大电路控制，滑阀阀芯的轴向位移通过与电机同轴的偏心机构，球铰耦合实现电—机转换。

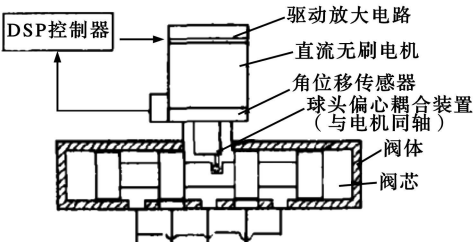


图 10 直流无刷电机驱动的电液伺服阀

4 水压电液伺服阀

水压伺服系统具有价格低廉、对环境无污染、防爆、适合海中作业等优点。水压伺服系统设计的关键是水压伺服阀的研制。

日本的 Takahito Ura 等研制开发了永磁直线力马达直接驱动水压伺服控制阀^[12]，如图 11 所示。伺服阀由线性力马达、液压滑阀和位置传感器（LVDT）及放大器组成，通过脉宽调制（PWM）

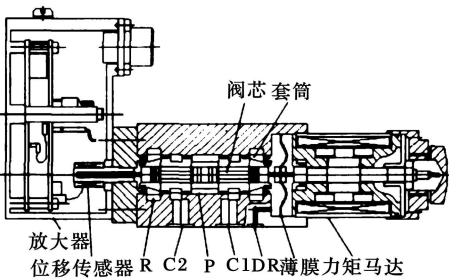


图 11 永磁直线力马达驱动水压伺服控制阀

电流驱动, 具有输出功率大、响应速度快等特点, 阀的最大工作压力 7 MPa, 额定流量 24 L/min, 阀内泄漏量 0.44 L/min, 滞环和零漂均小于 0.1%, 动态响应频率 92 Hz。

5 结 束 语

随着先进制造技术、现代设计技术和微电子技术的发展以及新型功能材料的应用, 高精度、高频响、高可靠性、低成本、数字化、智能化、微型化、绿色化的电液伺服阀已经处在研制之中, 这些电液伺服阀的研制成功必将给电液伺服控制系统性能带来更大的提高。

参考文献:

- [1] 王春行. 液压控制系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 1999.
- [2] 王耀光, 刘荣. 智能材料在液压控制中的应用[J]. 液压与气动, 2008 (12).
- [3] 王传礼. 基于 GMM 转换器喷嘴挡板伺服阀的研究

[D]. 杭州: 浙江大学, 2005.

- [4] 沈传亮, 程光明, 曾平, 等. 压电驱动式高频电液伺服阀实验研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2008 (9).
- [5] 张琳, 李彦希. 磁流变伺服阀的设计与动态特性研究[J]. 机械设计与制造, 2007 (6).
- [6] 盛晓伟. 添加磁流体的射流管伺服阀动态性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.
- [7] 覃爱明. 电流变伺服阀的特性研究[J]. 湘潭大学学报, 1998 (12).
- [8] 么居标. 直动式电液伺服阀的应用[J]. 液压与气动, 2008 (11).
- [9] 黄增, 金瑶兰, 李博. 伺服比例阀的发展[J]. 液压与气动, 2009 (1).
- [10] 卢菊仙, 李树立, 焦宗夏. 一种有限角度旋转式电液伺服阀[J]. 液压气动与密封, 2005 (4).
- [11] 刘向明, 吴盛林, 姜继海. 微型直流无刷电机直接驱动单级电液伺服阀的特性研究[J]. 石油化工自动化, 2005 (6).
- [12] 王新华, 孙树文, 李剑锋, 等. 水压伺服控制技术发展的现状及应用前景[J]. 机床与液压, 2008 36(5).

(上接第 15 页)

由表 4 可知, 与遗传蚁群算法相比, 本算法的火分配方案威胁系数和小且决策时间短, 即火力分配的方案更优; 与混沌算法相比, 本算法耗时虽然略长但仍能满足实际要求, 同时威胁系数和远小于混沌算法, 火力分配方案具有明显的优势。

5 结 论

根据多机协同空战情况进行分析, 结合火力分配目标函数的数学模型, 提出了一种基于混沌蚁群结合算法的火分配方法。仿真结果以及与遗传蚁群算法和混沌算法的对比表明, 混沌算法决策时间最短, 但是寻优结果的威胁系数和较大, 不能保证机群空战时的射击效益。三种算法的决策时间均能满足实际要求, 其中混沌蚁群算法决策结果明显较优, 能极大保证机群空战时的射击效益, 满足时间指标和寻优效率指标, 寻优效果好。

参考文献:

- [1] Min Hai-bo, Sun Fu-chun, Niu Feng. Decentralized UAV Formation Tracking Flight Control Using Gyroscopic Force [C] // International Conference on Computational Intelligence for Measurement Systems and Applications, Hong

Kong May 2009, 91—96.

- [2] Yang Zhong-fang, Ting Fan Qiong-jian. UAV Formation Flight Based on Vision Sensor [C] // 27th Chinese Control Conference, Kuming, July 2008, 592—597.
- [3] 王芳, 姜长生. 多机协同多目标攻击的遗传蚁群算法研究[J]. 电光与控制, 2008 (10): 26—32.
- [4] Sun Sheng-xiang, Huang Yu. Research on Weapon System Cost Forecasting Model Based on Chaos Optimization [C] // International Conference on Management Science and Engineering, Moscow, September 2009, 220—225.
- [5] 修春波, 刘向东, 张宇河. 一种求解火力分配问题的混沌优化算法[J]. 火力与指挥控制, 2006 (1): 14—20.
- [6] 孟中杰, 董刚奇, 黄攀峰, 等. 基于混沌遗传的巡航导弹实时规划技术[J]. 计算机仿真, 2009 (9): 51—54.
- [7] Guo Li-hua, Tang Wen-cheng, Zhao Chun-hua. A New Hybrid Global Optimization Algorithm Based on Chaos Search and Complex Method [C] // Second International Conference on Computer Modeling and Simulation, Hainan, January 2010, 233—237.
- [8] Sashi Kumar G N, Mahendra A K. Shape Optimization Using Hybrid GA—ACO Method and Grid-Free CFD Solver [C] // 18th AIAA Computational Fluid Dynamics Conference, Miami, June 2007, 25—28.
- [9] 傅调平, 陈建华, 李刚强. 基于遗传蚁群算法的舰艇编队防空火力分配[J]. 计算机仿真, 2009 (6): 10—13.