

# 液压作动系统阀泵联合控制技术研究

曹泽生, 仲悦, 王效亮, 颜峰

## Study on Jointing Control Valve Pump Hydraulic Actuating System of Hydraulic Actuating System

CAO Ze-sheng, ZHONG Yue, WANG Xiao-liang, YAN Feng

(北京精密机电控制设备研究所, 北京 100076)

**摘要:** 液压作动系统在向高压化及大功率方向的发展过程中, 经历了很多发展阶段, 在当前数字伺服快速发展的阶段里, 阀泵联合控制技术得到了发展与应用。该文介绍了阀泵联合控制技术的技术原理, 分析了其技术特点, 提出了关键技术。阀泵联合控制技术结合了阀控与泵控两种控制方式, 兼顾了液压作动系统的响应及效率, 应用领域广阔。

**关键词:** 液压作动系统; 阀泵联合控制; 数字伺服

中图分类号: V448.122; TH137 文献标志码: B 文章编号: 1000-4858(2013)02-0028-05

### 引言

液压作动系统的发展趋势是向质量轻、体积小、高压化、大功率、变压力、多余度等方向发展。随着负载需求的牵引, 高压化及大功率是发展核心。以战斗机用液压作动系统为例: 从1940年起, 其工作压力从14 MPa发展到35 MPa, 功率需求从50 kW发展到500 kW。

液压作动系统向高压化及大功率方向发展的同时, 必然伴随系统的无效功率的损失会大幅增加。此项功耗损失会产生如下影响:

(1) 功率损耗转换为系统的发热, 发热所产生的温升又导致对液压介质及密封材料提出更高的要求, 如发热显著, 系统还必须配置主动或被动散热装置, 这样势必增加液压油箱或散热装置的体积和重量;

(2) 功率损耗的增加对液压作动系统初级能源的需求同时大幅提升, 如初级能源采用电池或燃气发生器等方式, 则初级能源的功率、重量、体积均会有显著上升, 直至不能承受。

根据麦克唐纳飞机公司对执行典型空战飞行任务的F/A-18战斗机在空战格斗的数据分析表明: 在95%的时间内工作压力低于最高压力21 MPa, 大多数时间内工作压力在7 MPa以内, 在7 MPa下液压泵的热损耗可以减少50%, 对于锐边节流阀, 由内部泄漏引起的系统发热可以减少50%。然而目前现代飞机液压系统几乎都是恒压变量泵源系统, 系统的恒压力必须按最高压力设定, 但其使用时间极短, 因此造成很

大的功率浪费。

近20年来, 为解决因系统高压化大功率的应用而带来无效功率消耗增加的问题, 变压力泵源系统在飞机液压作动系统中得到了很大的发展。

变压力泵源系统所用的核心部件双级压力变量泵及智能泵均是基于变量泵技术发展而来, 变量泵基于输入转速不变, 通过调节泵排量控制输出流量及负载扭矩需求:

$$Q_{p0} = \eta_1 n q \quad (1)$$

式中:  $Q$  —— 泵输出流量, L/min

$n$  —— 泵转速, r/min

$q$  —— 泵排量, mL/r

$\eta_1$  —— 泵容积效率

$$M = \frac{pq}{2\pi\eta_m} \quad (2)$$

式中:  $p$  —— 系统压力, MPa

$\eta_m$  —— 泵机械效率

从式(1)、(2)可以看到: 系统压力为定值, 变量泵根据系统流量需求调节排量, 在系统流量需求减少时, 液压泵的流量输出减少, 泵的输入扭矩需求同时减少。变压力泵源系统相对于变量泵源系统, 其泵压力可调,

收稿日期: 2012-08-14

作者简介: 曹泽生(1975—), 男, 北京人, 高级工程师, 本科, 主要从事航天运载器伺服机构研究工作。

从式(1)、(2)可以看到:在变量泵的基础上,液压泵的输入扭矩需求进一步减少。因此,变压力泵源系统的应用是解决飞机机载液压系统高压化大功率产生负面影响的有效途径,美国 F/A-18E/F 已采用 20.7 ~ 34.5 MPa 的双级压力变量泵源系统。

但同时也可看到:无论是变量泵源系统还是变压力泵源系统,其均基于泵输入转速保持不变。由于液压泵转动部分存在转动惯量,必然存在零流量扭矩,在泵高速旋转过程中,其产生机械效率损失也不可小视。例如某型液压泵的额定扭矩为  $1.8 \text{ N} \cdot \text{m}$ ,其零流量扭矩实测为  $0.6 \text{ N} \cdot \text{m}$ ,即在液压系统零流量需求时其扭矩需求为额定值的  $1/3$ ,如不考虑液压泵的容积效率及伺服阀静耗量的情况下,驱动液压泵的电机额定输出的电流为 60 A 时,其零流量需求为 20 A。电机轴带动泵转动部分高速旋转所产生的 20 A 电流消耗最终完全变成了系统的发热,其能量损失也十分巨大。

### 1 作动系统的技术发展

近年来,随着稀土永磁无刷直流电机的发展,电力电子功率驱动控制的发展,以及数字伺服控制技术的发展,在飞机应用领域,电传飞控作动系统有了极大的发展。

电传飞控作动系统(Electric Powered Actuation)与传统液压作动系统相比,具有体积小、重量轻、生存力高等特点,因此在现代飞机占有重要地位。目前,电传飞控作动系统逐渐向航天、船舶等其他军用领域扩展,代表了作动系统的发展方向。电传飞控作动系统目前主流研究方向有三个,如图 1 所示。

它们分别是:

(1) 机电伺服系统(EMA) 通过齿轮箱、滚珠丝杠副等机械传动形式将电机的旋转运动转化为伺服机构的驱动力矩;

(2) 静液伺服系统(EHA) 双向变速电机通过定量泵将液压作为传动介质,驱动伺服作动器运动;

(3) 集成化容积伺服(IAP) 单向定速电机通过变量泵变量机构的双向调节将液压作为传动介质,驱动伺服作动器运动。

在这三种电传飞控作动系统中涉及到液压技术的均应用容积式控制方式,与传统液压作动系统相比不存在节流损失,可以大幅度地提高系统效率。但作动系统响应取决于电机及泵的响应,在短期内还无法满足大负载高响应系统的要求。

因此,针对航空、航天用伺服作动系统的实际需

求,国内外在综合以上三种方案中,逐渐形成了一种新型作动系统技术:阀泵联合控制技术。

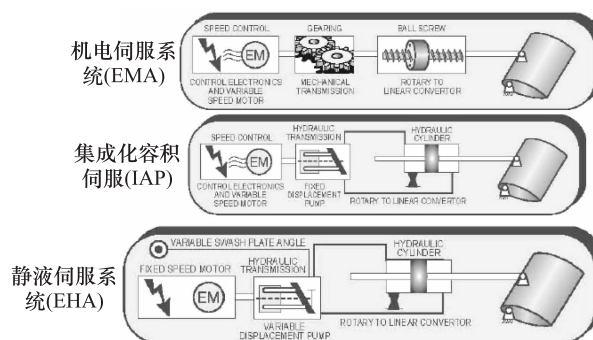


图 1 电传飞控作动系统选择方案

### 2 阀泵联合控制技术的系统原理

液压作动系统阀泵联合控制技术原理如图 2 所示,伺服作动系统内设两套回路:一套伺服控制回路、一套能量管理回路。

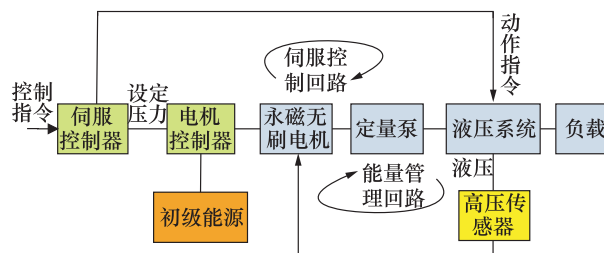


图 2 液压作动系统阀泵联合控制技术原理图

伺服控制回路与传统液压控制回路相同,即伺服接收控制指令驱动伺服阀将液压动力变换为驱动力矩,摆动负载,其实质为液压作动系统内部的阀控回路。

伺服能量管理回路是将伺服作动系统高压做为控制量,当负载流量大导致能源高压压力低于设定值时,伺服控制器驱动直流无刷电机-液压泵高速运转,补充高压油液;当能源高压压力达到设定值时,伺服控制器控制直流无刷电机-液压泵低速运转,维持伺服作动系统工作要求,以此实现直流无刷电机-液压泵单向变频调速,其实质为液压作动系统内部的能源泵控回路。

### 3 阀泵联合控制技术的关键技术

液压作动系统在采用阀泵联合控制技术时,需要特别重视如下关键技术:

(1) 系统的集成化设计技术 在传统的液压传动技术方案中,泵源系统及伺服作动系统可以分别配置,两者之间的关联性要求不高。但在阀泵联合控制技术方案中,泵源系统及伺服作动系统关系十分紧密,其中,直流无刷电机、液压泵、作动缸、电液伺服阀、压力传感器、位移传感器等各型元件通过伺服控制器及电

机控制器紧密结合构成一个整体,因此液压作动系统采用阀泵联合控制技术后向集成化一体式方向发展是趋势。

(2) 系统组成元件的参数优化技术 在采用阀泵联合控制技术后,无刷电机、液压泵、液压蓄能器三个关键元件需要特殊重视,设计或选型前需要进行参数优化。例如:将容积式控制应用于能源回路中,虽然能源回路要求的动态响应要求较低,但为确保系统的工作压力稳定,还是有一定的动态要求,如将动态要求全部置于“电机控制器-直流无刷电机-定量柱塞泵-压力传感器”之上,对电机、泵的动态响应要求会很高,显著提高了硬件成本。因此可以在系统中设置一适当规格的液压蓄能器,此时,液压蓄能器不仅可以完成产生系统闭式油箱背压、系统峰值流量提供和抑制系统压力脉动等三项基本功能外,自身还具有较强的积分效应,可以做为系统的积分器,以降低对电机、泵的动态响应要求。因此,液压蓄能器规格的选取需要从系统级着手进行优化,在满足系统功能的基础上,力争轻质小型化。

(3) 系统伺服控制回路控制软件优化技术 在航空、航天、船舶等军用领域,液压作动系统的负载对象大部分同时具有大惯量、低刚度、高扭矩等复杂特征,因此对伺服控制回路软件的设计要求本身很高。在采用阀泵联合控制技术后如需进行分级或多级压力控制,系统采用变增益的控制方式以及不同压力等级之间如何衔接过渡等均需伺服控制回路控制软件实现。因此,对系统伺服控制回路控制策略的选择提出了更高的要求。

(4) 系统能量管理回路控制设计技术 不可否认,液压作动系统采用阀泵联合控制技术后,系统能量管理回路控制的要求显著提高,其在“电机控制器-无刷电机-变量柱塞泵”方案的电机控制器定占空比恒速拖动技术的基础上,采用“电机控制器-无刷电机-恒量柱塞泵”方案的电机控制器变占空比调速驱动技术,实现系统压力反馈闭环恒液压控制。随着系统功率等级的提高,系统能量管理回路的硬件及软件设计的难度显著增大。系统能量管理回路控制设计的难度体现在电机控制器硬件的可靠性、发热、效率以及电机控制器软件的适应性等方面。

#### 4 阀泵联合控制技术的实现

##### 4.1 能量管理回路

在普通的液压回路中,较普遍采用“直流有刷电

机-变量柱塞泵”恒速拖动技术或“电机控制器-无刷电机-变量柱塞泵”恒速拖动技术,其基本原理是电机的转速基本不变,而通过变量泵排量的改变控制输出流量。而本方案的能量管理回路采用“电机控制器-直流无刷电机-定量柱塞泵-压力传感器”压力反馈闭环恒液压控制。通过电机变频调速对能源压力进行闭环控制,即根据作动器控制动作的需要,及时改变电机转速,从而改变液压泵供油流量,保持电液伺服能源输出压力恒定,以此实现能源的能量管理,从而达到提高能源利用效率,优化系统性能等目的。其基本原理是泵的排量保持不变,而通过调整电机转速改变控制输出流量。采用能量管理回路后,液压作动系统中具有以下特点:

(1) 简化液压作动系统硬件配置 采用配置简单的定量泵替代结构复杂、工艺难度高的恒压变量泵,可以提高产品的可制造性以及采购成本。

(2) 效率有所提升 采用“电机控制器-无刷电机-变量柱塞泵”恒速驱动技术,电机轴带动泵芯高速旋转所做的无用功率损耗导致存在较高的电流需求及系统发热;而在系统相同压力设定情况下,采用“电机控制器-直流无刷电机-定量柱塞泵-压力传感器”压力反馈闭环恒压控制技术后,电机处于实时调速状态,如作动器的运动缓慢,则电机基本处于低速工作状态,定量泵流量输出仅补充液压泵的泄漏损失及伺服阀的泄漏损失,同时由于电机控制器内部电力电子的调速效率远高于变量泵高速旋转的机械效率,因此,系统的无用功耗损失有较大规模的下降。以某型液压作动系统为例:变速定量泵驱动技术相较于恒速变量泵驱动技术,在泵源 21 MPa 恒压、作动器静态工作条件下,电流消耗由 24 A 降低到 20 A,同时系统在工作 3 min 时温升降低了 10 °C,其中图 3 为电流消耗对比。

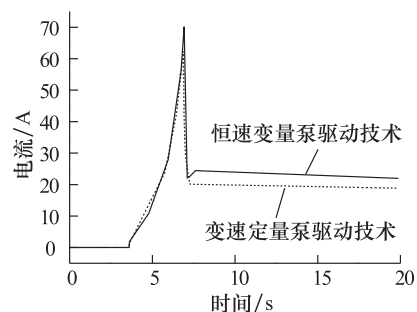


图3 液压作动系统不同驱动技术电流消耗对比图

(3) 减小液压泵的磨损 采用“电机控制器-直流无刷电机-定量柱塞泵-压力传感器”压力反馈闭环恒压控制技术后,电机处于实时调速状态,液压泵的工作

转速在大量时间内低于其额定设计转速,液压泵的磨损减小,由于在系统中液压泵的工作寿命因素对液压作动系统的可靠性影响很大,因此,延长液压泵的工作寿命,可以提高系统长时间工作可靠性。

(4) 可以方便实现分级压力控制 当负载变化在整个工作过程中划分较为清晰的情况下,液压作动系统可以方便实现分级甚至多级压力控制。例如在低负载工况情况下可以将系统压力设定较低,高负载工况情况下将系统压力设定较高。试验表明对某型液压作动系统:在 21 MPa 恒压变量工况下连续工作 6 min,系统油液温升为 110 °C,而采用分级压力控制后,14 MPa 连续工作 3 min,21 MPa 连续工作 3 min,系统油液温升约为 70 °C,温升降低约为 40 °C。

(5) 大幅减少初级能源的能量消耗 采用分级压力控制后,由于低工况的系统压力低于高工况系统压力,通过式(2)可知,负载扭矩需求相应降低,如以电池为初级能源,则电池能量消耗大幅减少,容量、重量及体积大幅降低。同样以某型液压作动系统为例:如采用恒压力控制,在 21 MPa 恒压变量工况下连续工作 6 min,需要采用两块电池,每块电池均为 8 kg,采用分级压力控制后,14 MPa 连续工作 3 min,21 MPa 连续工作 3 min,低工况情况下负载降低,这时低工况电池仅需 3 kg,因此电池减重为 30%。

#### 4.2 伺服控制回路

伺服控制回路保持了节流伺服阀控液压缸的工作方式,完全确保了伺服高动态、快响应的技术特点。

在此需要指出的是:如果液压作动系统采用分级甚至多级压力控制方式,由于系统工作压力在不同设定区间,必然导致伺服阀的流量增益表现不同,为使系统的回路增益基本保持一致,因此,需要伺服控制器根据系统压力,分档调整放大器增益。以此实现液压作动系统内部伺服控制回路变增益控制,达到使系统在获得高动态的同时具有较好的鲁棒性。目前,随着数字控制技术的发展,伺服控制回路变增益控制比较容易实现。以某型液压作动系统为例:在 14 MPa 的低负载工况以及 21 MPa 的高负载工况条件下,伺服控制回路采用变增益控制后,系统的各项性能指标可以基本保持一致,图 4 为动态特性实测曲线。

#### 5 阀泵联合控制技术的发展方向

(1) 向大功率液压作动系统方向发展 目前,阀泵联合控制技术已在几十千瓦级的系统上得到成功应用,在上百千瓦级系统上还未应用。鉴于阀泵联合控

制技术效率较高,因此在大功率系统上应用其能量的节省十分可观。

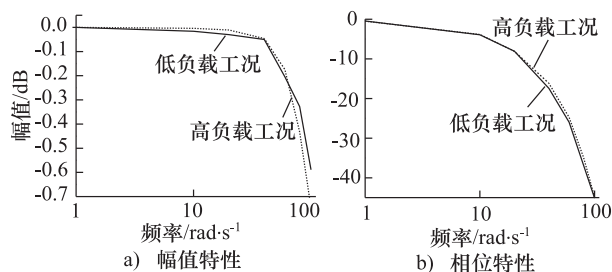


图 4 液压作动系统变增益控制动态特性实测曲线图

(2) 系统结构深度一体化 采用阀泵联合控制技术后,系统已应用集成化设计技术,但还可继续深入应用,例如适宜采用一体化伺服电动泵技术,它将电机外壳与液压泵壳体设计为一体,这样可以取消液压泵高速轴密封,解决了高速轴的动密封性问题,不仅提高了系统的功率质量比,还进一步地提高了产品可靠性。

(3) 系统冗余技术的应用 系统采用阀泵联合控制技术后,对电力电子设备以及控制回路的可靠性要求显著提升,因此在提升伺服控制器、电机控制器、永磁无刷电动机、压力传感器等产品的固有可靠性基础上,在兼顾成本、效率的前提下,如何采用冗余技术还需进行深入的设计分析。

(4) 新型控制策略的应用 为满足系统在某些领域的特殊需求,可以采用有针对性的控制策略,例如:液压作动系统对能源回路响应快速性的要求很高时,可以采用预测控制策略,众所周知,作动器的动作直接消耗液压能源,进而影响液压作动系统压力,因此系统将作动器的位移输出作为能量管理回路反馈闭环恒流恒压控制的一环,以此可以显著提高能源回路响应速度。

#### 6 结论

随着负载需求的牵引,液压作动系统在向高压化及大功率方向发展,容积式控制方式是发展方向。在当前数字伺服快速发展的阶段,阀泵联合控制技术得到了发展与应用,它结合了阀控与泵控两种控制方式,兼顾了液压作动系统的响应及效率,可以在航空、航天、船舶等民用及军用等领域扩展应用。

#### 参考文献:

- [1] 王占林,陈斌. 未来飞机液压系统的特点[J]. 中国工程科学,1999,(12):5-10.
- [2] 张巍译.“多电”控制舵面作动器——下一代运输机的一个方案[J]. 电力电子,2006,(4):15-18.
- [3] 张冰凌,张勇. 电传飞行控制作动系统[J]. 飞机设计机床

# 以管路为振动输出源的液压激振系统研究

陆春月<sup>1,2</sup>, 寇子明<sup>1,3</sup>, 吴娟<sup>1,3</sup>, 张慧贤<sup>1</sup>

## Research on the Hydraulic Vibration System with the Vibration Output Source of Pipe

LU Chun-yue<sup>1,2</sup>, KOU Zi-ming<sup>1,3</sup>, WU Juan<sup>1,3</sup>, ZHANG Hui-xian<sup>1</sup>

(1. 太原理工大学 机械工程学院, 山西 太原 030024; 2. 中北大学 机械工程与自动化学院, 山西 太原 030051;  
3. 山西省矿山流体控制工程中心, 山西 太原 030024)

**摘要:**根据有压瞬变流产生的原理, 该文提出一种新型液压激振方式。该激振方式将高压管路作为新的激振源, 利用激波器产生周期性的有压瞬变流, 使高压管路产生振动。构建了管道产生振动的变频液压振动系统, 建立了管路流固耦合的振动模型, 仿真了振动的工作模态, 并进行试验验证。管道的此种振动形式是一个非简谐的周期性振动, 并能够受变频系统控制, 表明该振动是可以被利用的。

**关键词:**管路振动; 有压瞬变流; 变频控制; 振动利用

中图分类号: TB123; O351.2; TH137 文献标志码: B 文章编号: 1000-4858(2013)02-0032-03

### 引言

振动设备是通过激振单元产生周期性变化的激振力, 使主振体产生持续的振动来工作的。激振单元可分为机械式、电动式和电液式等几种类型。电液激振与前二者相比具有激振功率大, 动力传输和控制方便等优点, 被广泛应用于重载、大功率的场合。传统的电液激振器一般是通过对电液伺服阀输入振动激励信号, 控制液压执行元件(液压缸或马达)。为解决其频宽小等问题, 提出了“2D 阀控电液激振器”新型液压振动器, 利用伺服控制技术控制阀芯的轴向和旋转运动<sup>[1-2]</sup>。但是由于伺服控制价格偏高, 其性能易受液压波动影响, 应用受到一定限制。

有压输流管路由于泵的启动、停机、阀门突然换向等原因使管内流速发生急剧变化, 从而产生液压冲击波, 使管道发生剧烈振动。管道振动是流固耦合动力学问题, 现有研究一般集中在管道的稳定性研究、管道振动抑制以及管道强度设计方面<sup>[3]</sup>, 有关对管道振动利用的文献较为鲜见。本文研究在有压瞬变流作用

下, 以高压管路或液腔为振动源的新型激振方式, 构建其产生振动的液压系统, 建立管道振动的数学模型, 仿真得到管道振动的工作模态, 并进行试验验证, 为振动利用提供新的思路和数据支撑。

### 1 液压管路激振系统的构建

有压管道中的流体受到外界作用流速产生急剧变化时, 引起管中压强产生快速的交替变化, 从而导致管道振动, 而管道的振动又会引发新的流场分布, 管道同时存在流体运动、压力脉动和管道的振动。因此, 要使管路能够持续振动, 其关键要使流体的流速发生周期性急剧变化, 即在液压系统中要不断产生有压瞬变流。通液口的快速启闭能使管内液体流速变化, 根据这一原理设计了激波器, 相当于一个快速运动的二位三通

收稿日期: 2012-08-20

基金项目: 国家自然科学基金(50775154); 山西省青年科技研究基金(2010201025)

作者简介: 陆春月(1979—), 女, 江苏无锡人, 讲师, 博士研究生, 主要研究方向为液压振动、机电液一体化。

- 与液压, 2007, (8): 53-60.
- [4] 纪友哲, 裘丽华, 祁晓野, 裴忠才. EHA 作动器的阀泵联合控制方案研究[J]. 液压气动与密封, 2007, (3): 1-3.
- [5] 纪友哲, 裘丽华, 王占林. 阀泵联合电动静液作动器的变压力控制研究[J]. 机床与液压, 2008, (1): 98-103.
- [6] K. W. Vieten. High Performance Fighter Fly-by-wire Flight Control Actuation System[R]. AIAA 92-1123. 1992.
- [7] Jean-Jacques CHARRIER, Amit Kulshreshtha. Electric Actuation For Flight & Engine Control System; Evolution, Current Trends & Future Challenges[R]. AIAA 2007-1391. 2007.