

doi: 10.11832/j.issn.1000-4858.2014.05.001

作者简介:王军政,男,1964年出生,陕西凤翔县人,工学博士,北京理工大学控制科学与工程学科教授,博士生导师,自动化学学院院长兼党委书记,检测技术与自动化装置学科带头人,复杂系统智能控制与决策国家重点实验室副主任。长期从事运动驱动与控制、液压试验与综合测试、控制系统静态性能测试等方面的教学与科研工作。兼任自动化学会理事、中国计算机自动测量与控制技术协会常务理事、中国机械工程学会高级会员、中国机械工程学会流体传动与控制专业委员会委员、中国计量测试学会高级会员、中国航空学会航空电子与人机环境工程分会委员、中国自动化学会集成制造技术专业委员会委员。主持完成国家“863”计划、高新工程、国防预研、科技合作等项目40余项,以第一完成人获国家科技进步二等奖1项、部级二等奖1项、三等奖2项,参与的项目获部级二等奖1项、三等奖1项;获授权发明专利19项,发表学术论文90多篇,其中SCI、EI收录70余篇,编写著作1部,参与编写著作2部。科研成果已推广应用到航天、航空、兵器、部队、冶金和民用等多个领域。



电液伺服技术的发展与展望

王军政,赵江波,汪首坤

(北京理工大学 自动化学院,复杂系统智能控制与决策国家重点实验室,北京 100081)

摘要:电液伺服系统由于其具有负载能力强、功率密度大、响应快、控制精度高等优点,在运动控制系统中占据着不可替代的地位,被广泛应用于航天、航空、船舶、兵器、冶金、机床、模拟试验等多个领域。该文从电液伺服阀、电液伺服系统及实际应用等方面,对电液伺服技术的现状进行了概括性阐述,并对今后的发展方向进行了简要分析。

关键词:电液伺服系统;电液伺服阀;发展趋势

中图分类号:TH137 文献标志码:B 文章编号:1000-4858(2014)05-0001-12

The Development and Future Trends of Electro-hydraulic Servo Technology

WANG Jun-zheng, ZHAO Jiang-bo, WANG Shou-kun

(Key Laboratory of Complex System Intelligent Control and Decision, School of Automation, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081)

Abstract: Electro-hydraulic servo system is widely used in aerospace, aviation, ships, weapons, metallurgy, machine tools, simulation test and other fields because of its distinct advantages such as strong load capacity, high power-to-weight ratios, quick response and high control precision. In this paper, in terms of electro-hydraulic servo valves, systems and practical application, the status and development of the electro-hydraulic servo techniques are generally elaborated.

Key words: electro-hydraulic servo system, electro-hydraulic servo valve, the status and development

引言

电液伺服系统具有抗负载冲击能力强、功率密度大、响应速度快等特点,在航天、航空、船舶、兵器、冶

金、机床、模拟试验等领域有着广泛的应用,尤其是在

收稿日期:2014-04-15

直线运动驱动方面更具优势。电液伺服系统一般包括电液控制元件(伺服阀、比例阀等)、执行机构(液压缸、马达)、反馈传感器、电子控制器、液压油源等部分,集机、电、液、控制、计算机等技术于一体,属于复杂系统。随着工业技术的不断发展,对电液伺服系统的要求也越来越高。因此,相关研究机构和厂商对电液伺服阀、电液伺服系统中的新技术和新产品进行了不断的研发与推广应用。

1 电液伺服阀

1.1 现状

电液伺服阀是电液伺服系统的核心,其性能在很大程度上决定了整个系统的性能。目前广泛应用的电液伺服阀以喷嘴挡板阀居多,然而,与喷嘴挡板阀相比,由于射流管阀具有抗污染性能好、可靠性高等特点,越来越多的伺服阀生产厂商研制并推出了射流管式电液伺服阀。

大多数电液伺服系统采用两级电液伺服阀就能满足要求,对于一些特殊应用场合(如冶金行业的液压自动厚度控制系统等),则需要采用大流量伺服阀,这种大流量伺服阀可以是带有位置反馈的三级电液伺服阀,也可以是动圈式全电反馈的先导式两级阀(如MK阀)。对于三级电液伺服阀来说,其前级阀可以是喷嘴挡板的力反馈式,也可以是射流管式。

为了进一步提高伺服阀的抗污染能力,近年来又研制出电液伺服比例阀,它兼顾了伺服阀的高灵敏度和比例阀的抗污染性^[1,2],图1所示是一种先导级为射流管阀的伺服比例阀,其工作原理与射流管式伺服阀基本一致,通过位移传感器和电子控制器对主阀芯位置进行精确控制。

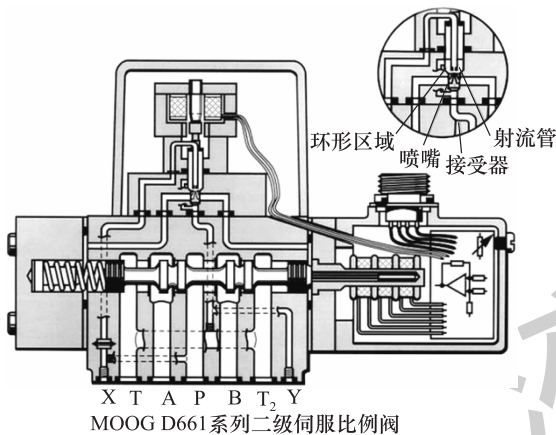


图1 电液伺服比例阀

在航空航天领域,由于空气阻力干扰比较复杂,导

致大惯量、小阻尼的液压伺服系统稳定性变差,特别在高频下易出现谐振现象(如运载火箭的推力矢量伺服系统)^[3],通过采用动压反馈式电液伺服阀有效地解决了这一难题^[4]。动压反馈式电液伺服阀是在普通流量伺服阀的基础上增加了一个由反馈活塞、反馈弹簧组成的微分网络,并与一对反馈喷嘴构成液压高通滤波装置,如图2所示。当负载压差发生谐振时,反馈活塞在负载压差的作用下往复运动,形成的液流通过反馈喷嘴作用于挡板,产生一个与控制力矩方向相反的反馈力矩,迫使衔铁组件回复零位,滑阀的开口量随之减小,使得负载谐振峰值降低,起到了增加系统阻尼的作用。

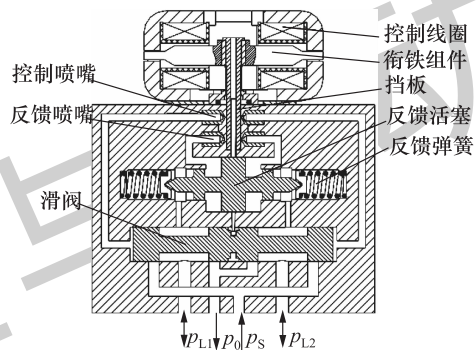


图2 动压反馈伺服阀结构原理

针对以上常用的电液伺服阀,当前的研究主要集中在加工工艺改进、新材料应用、测试手段提升等方面。在加工工艺方面,采用新型加工设备和加工工艺,主要目的是提高伺服阀的加工精度、加工效率和合格率,降低生产成本,并进行工序间测量,如滑阀副的高精度配磨和测量、力矩马达的高质量焊接和弹性元件的性能测量等。同时通过提高生产和测试的自动化程度,有效保证了伺服阀性能的一致性。在新材料应用方面,对伺服阀的一些零件采用了强度、刚度、弹性等机械性能更优的材料,力反馈杆头部的小球采用耐磨性更好的红宝石,密封材料也更能耐高压、耐腐蚀。新材料的使用使伺服阀不仅能够适应常用的液压油,而且也能适应航空煤油、柴油等腐蚀性强的工作介质。在测试手段方面,采用计算机技术实现伺服阀静动态性能测试,同时测试不同介质、压力、温度等情况下伺服阀的性能,并且还测试振动、噪声,抗电磁辐射干扰等性能,有效提高了伺服阀的质量。

1.2 发展趋势

现代国防和民用工业应用中,对电液伺服阀性能提出了越来越高的要求。为此,一些研究机构及伺服

阀厂商围绕节能高效、提高可靠性、提升响应速度、降低成本等方面进行了一些新伺服阀的研究,主要体现在采用新驱动方式、使用新材料、探讨新原理或设计新结构、应用数字控制技术等几个方面。

1) 新驱动方式

尽管射流管伺服阀比喷嘴挡板伺服阀在抗污染能力方面要好,但这两种类型的伺服阀存在的突出问题仍然是抗污染能力差,对介质的清洁度要求非常高,这给其使用和维护造成了诸多不便。因此,如何提高电液伺服阀的抗污染能力和提高可靠性,成为伺服阀未来的发展趋势。采用阀芯直接驱动技术省掉了喷嘴挡板或射流管等易污染的元部件,是近年来出现的一种新型驱动方式,如采用直线电机、步进电机、伺服电机、音圈电机等。这些新技术的应用不仅提高了伺服阀的性能,而且为伺服阀发展提供了新思路。

(1) 阀芯直线运动方式 这种伺服阀采用直线电机、步进电机、伺服电机或音圈电机作为驱动元件,直接驱动伺服阀阀芯。对于电机输出轴,可以通过偏心机构将旋转运动变成直线运动,如图3所示,也可通过其他高精度传动机构将旋转运动转换为直线运动。这种驱动方式一般都有位移传感器,可构成位置闭环系统精确定位开口度,保证伺服阀稳定工作。其特点在于结构简单、抗污染能力强、制造装配容易、伺服阀的频带主要由电机频响决定。

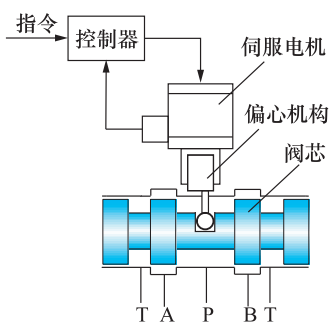


图3 采用偏心机构的电机驱动伺服阀原理

(2) 阀芯旋转运动方式 旋转式驱动是指通过主阀芯旋转实现伺服阀节流口大小的控制和机能切换,图4所示为一种旋转阀的油路结构原理。主要由阀套、转轴和驱动元件组成。转轴由步进电机、伺服电机或音圈电机直接驱动,转轴沿圆周方向分别开有4个可与压力油腔相通的油槽和4个可与回油腔相通的油槽。阀套上均匀分布4个进油孔和4个回油孔,油孔的直径略小于转轴上油槽的宽度,使进油和回油互不连通^[5]。另一种转阀的形式是阀芯上开有螺旋式结

构的油槽,通过电机转动阀芯实现节流口大小的调节。

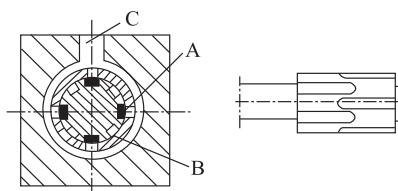


图4 旋转阀的油路结构

由于伺服电机响应频率快,因此可以带动阀芯进行快速旋转,实现工作油口的快速切换和节流口的快速调节,从而保证了伺服阀的频带。

2) 新材料

由于一些新材料表现出较好的运动特性,许多研究机构尝试将它们应用于电液伺服阀的先导级驱动中,以代替原有的力矩马达驱动方式。与传统伺服阀相比,采用新型材料的伺服阀具有抗污染能力强、结构紧凑等优点。虽然目前还有一些关键技术问题没有得到解决(如滞环大、重复性差等),但新材料的应用和发展给电液伺服阀的技术发展注入了新的活力。

(1) 压电晶体材料 压电晶体材料在一定的电压作用下会产生外形尺寸变化,在一定范围内形变与电场强度成正比^[6]。压电晶体驱动的原理是将阀芯分别与两块压电晶体执行机构相连,通过两侧施加不同的驱动电压,可使阀芯产生移动,从而实现节流口控制。但是,压电晶体的滞环非常明显,导致阀芯与控制信号之间的非线性比较严重,给高精度控制带来一定的难度。

(2) 超磁致伸缩材料 超磁致伸缩材料在磁场的作用下能产生较大的尺寸变化,因此可利用这种材料直接驱动伺服阀阀芯。其原理是将磁致伸缩材料与阀芯直接相连,通过控制电流大小驱动材料的伸缩量,以带动阀芯运动。由于超磁致伸缩材料具有较高的动态响应特性,使这种伺服阀较传统伺服阀具有更高的频率响应^[7]。

(3) 形状记忆合金材料 形状记忆合金的特点是具有形状记忆效应,将其在高温下定型后,冷却到低温状态并对其施加外力时,一般金属在超过其弹性变形后会发​​生永久塑性变形,而形状记忆合金却在加热到某一温度以上时,会恢复其原来高温下的形状^[8]。通过在阀芯上连接一组由形状记忆合金绕制的执行器,对其进行加热或冷却,就可使执行器的位移发生变化,从而驱动阀芯运动。形状记忆合金的位移比较大,但

其响应速度慢,且变形不连续,因此不适合于高精度的应用场合。

3) 新原理和新结构

传统的伺服阀存在节流损失大、抗污染能力差等缺陷,为此,一些新原理或新结构的伺服阀被提出并得到应用。前面提到的旋转阀便是一种新结构的伺服阀,其他还包括以下几种。

(1) 高速开关阀 高速开关阀的原理如图5所示,这种伺服阀具有较强的抗污染能力和较高的效率。其工作原理是根据一系列脉冲电信号控制高频电磁开关阀的通断,通过改变通断时间即可实现阀输出流量的调节。由于阀芯始终处于开、关高频运动状态,而不是传统的连续控制,因此这种阀具有抗污染能力强、能量损失小等特点。高速开关阀的研究主要体现在三个方面:一是电-机械转换器结构创新;二是阀芯和阀体新结构研制;三是新材料应用。国外研究高速开关阀有代表性的厂商和产品有:美国 Sturman Industries 公司设计的磁阀、日本 Nachi 公司设计生产的高速开关阀、美国 CAT 公司开发的锥阀式高速开关阀等。国内主要有浙江大学研制的耐高压高速开关阀^[9]等。由于高速开关阀流量分辨率不够高,因此主要应用于对控制精度要求不高的场合。

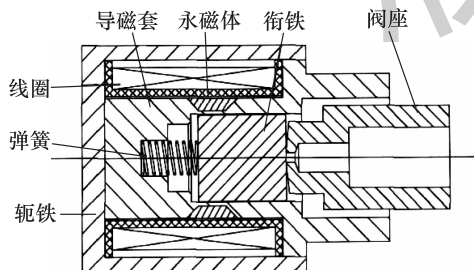


图5 高速开关式电-机械转换器

(2) 压力伺服阀 常规的电液伺服阀一般都为流量型伺服阀,其控制信号与流量成比例关系。在一些力控制系统中,采用压力伺服阀较为理想^[10]。压力伺服阀是指其控制信号与输出压力成比例关系。图6所示为压力伺服阀的结构原理,通过将两个负载口的压力反馈到衔铁组件上,与控制信号达到力平衡,实现压力控制。由于压力伺服阀对加工工艺要求较高,目前国内还没有相关成熟产品。

(3) 多余度伺服阀 鉴于伺服阀容易出现故障,影响系统的可靠性,在一些要求高可靠性的场合(如航空航天),一般都采用多余度伺服阀^[11]。大多数多

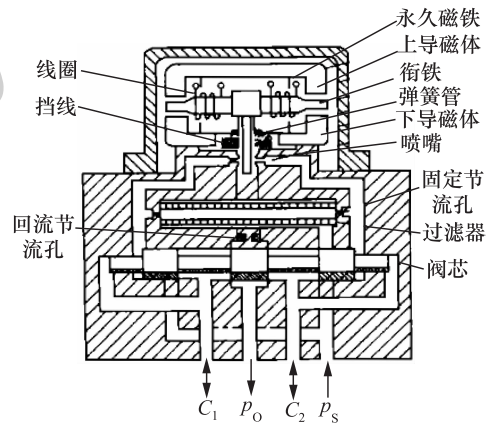


图6 压力伺服阀

余度伺服阀都是在常规伺服阀的基础上进行结构改进并增加冗余,比如针对喷嘴挡板阀故障率较高的问题,将伺服阀力矩马达、反馈元件、滑阀副做成多套,发生故障随时切换,保证伺服阀正常工作。图7所示为一种双喷嘴挡板式多余度伺服阀,通过一个电磁线圈带动两个喷嘴挡板转动,当其中一个喷嘴挡板卡滞后,另一个可以继续工作。

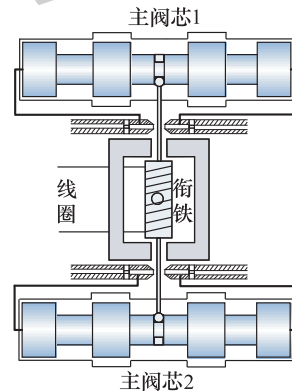


图7 双喷嘴挡板多余度伺服阀

(4) 动圈式全电反馈大功率伺服阀(MK阀) 动圈式全电反馈伺服阀(MK阀)可以分为直动式和两级先导式两种,其中两级阀中的先导级直接采用直动阀结构,功率级为滑阀结构。图8为动圈式全电反馈的直动式伺服阀结构原理^[12],当线圈通电后(电流从几安培到十几安培),在电磁场作用下动圈产生位移,从而推动阀芯运动,通过位移传感器精确测量阀芯位移构成阀芯的位置闭环控制。

(5) 非对称伺服阀 传统电液伺服阀阀芯是对称的,两个负载口的流量增益基本相同,但是用其控制非对称缸时,会使系统开环增益突变,从而影响系统的控制性能。为此,通过特殊阀芯结构设计研制的非对称

电液伺服阀,可有效改善对非对称缸的控制性能。

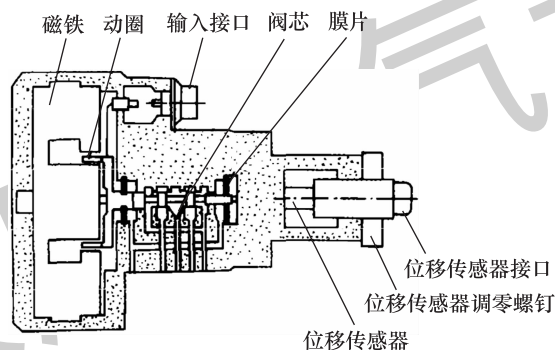


图8 MK 两级阀中的先导级结构原理

4) 数字控制技术

随着数字控制及总线通讯技术的发展,电液伺服阀也朝着智能化方向发展,具体表现在以下几个方面。

(1) 伺服阀内集成数字驱动控制器 对于直驱式伺服阀或三级伺服阀,由于需要对主阀芯位移进行闭环控制以提高伺服阀的控制精度,因此在伺服阀内直接集成了驱动控制器,用户无需关心阀芯控制,只需要把重点放在液压系统整体性能方面。

另外,在一些电液伺服阀内还集成了阀控系统的数字控制器,这种控制器具有较强的通用性,可采集伺服阀控制腔压力、阀芯位移或执行机构位移等,通过控制算法实现位置、力闭环控制,而且控制器参数还可根据实际情况进行修改。

(2) 具有故障检测功能 伺服阀属于机、电、液高度集成的综合性精密部件,液压伺服系统的故障大部分都集中在伺服阀上。因此,实时检测与诊断伺服阀故障,对于提高系统维修效率非常重要。目前可通过数字技术对伺服阀的故障(如线圈短路或断路、喷嘴堵塞、阀芯卡滞、力反馈杆折断等)进行监测,但这方面的技术还有待进一步提高。

(3) 采用通讯技术 传统的伺服阀控制指令均是以模拟信号形式进行传输,对于干扰比较严重的场合,常会造成控制精度不高的问题。通过引入数字通讯技术,上位机的控制指令可以通过数字通讯形式发送给电液伺服阀的数字控制器,避免了模拟信号传输过程中的噪声干扰。目前,常见的通讯方式包括 CAN 总线、Profibus 现场总线等。

2 电液伺服系统

2.1 现状

电液伺服系统包括阀控系统和泵控系统,阀控系统包括电液伺服阀、执行机构、控制器、反馈传感器和

液压油源共五个部分。泵控系统则省掉了电液伺服阀,直接由电液伺服(比例)变量泵对执行机构进行控制。

电液伺服阀控系统具有控制精度高、响应速度快等特点,在实际中得到了广泛应用。然而,一般阀控系统执行机构的运动速度是变化的,因此其需求的流量也是变化的,显然采用常规的定量泵加溢流阀给阀控系统供油就必然导致溢流损失而造成液压油发热,使得系统效率较低,这不仅增大了系统装机功率,而且附加的冷却装置又增加了系统的体积和成本,另外,发热也是造成液压系统故障的主要原因之一。恒压变量泵加蓄能器的供油方式可有效克服定量泵加溢流阀供油方式的缺陷,大多数阀控系统都采用这种油源泵站。

对于电液伺服(比例)变量泵直接控制油缸或马达的容积式系统,可有效提高系统的效率,但泵控系统控制精度低、响应慢,只能应用在精度和性能要求不高的场合。

为了克服阀控和泵控系统的各自缺点,阀控系统的供油泵站可采用变频调速电机驱动定量泵的供油方式来改变泵站输出流量^[13-16],虽然变频调速技术非常成熟,但这种方式输出的流量动态特性差,与变量泵相比,其流量调节的滞后更大。为此,又有学者提出了采用伺服电机驱动定量泵的供油方式^[17,18],伺服电机的响应速度要远高于变频电机调速方式。不过它们的共同缺点是液压泵的转速不能过低,否则其压力波动太大,将影响压力的稳定性。

2.2 发展趋势

1) 节能型伺服系统

(1) 伺服直驱泵控系统 伺服直驱泵控是利用伺服电机带动泵直接驱动执行机构的电液伺服系统。图9是一种伺服直驱泵控系统原理框图,主要由伺服电机驱动定量泵组成,通过反馈与给定进行比较来控制伺服电机转速,从而控制执行机构带动负载运动。

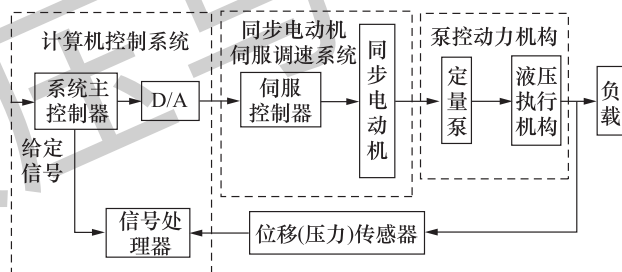


图9 伺服直驱泵控系统原理

为减少能耗,完全一体化设计的电机泵动力组合是目前电液伺服技术研究的热点。作为机电一体化的一种具体表现形式,它不是一般电机加泵的简单整体结构联接,而是一种全新技术,这也反映出电液伺服技术的发展动向。对这种设计来说,如果电机转子、定子能借助泵的过油来冷却,不仅可取消电机风扇,降低能耗,而且冷却效果也比空气高数倍,可以在保证电机转子、定子不过热的前提下,提高输入电流(功率),获得两倍于原绕组产生的额定输出功率,从而提高原动机效率^[19,20]。应用这种伺服直驱泵控制系统的效率比阀控系统能提高40%以上,大大减少了系统发热,这将成为实现液压控制技术绿色化的理想途径之一^[21-23]。直驱泵控制在注塑机中已得到了广泛应用。

(2) 泵阀协控双伺服系统 伺服阀控系统的特点是高精度、高频响,但效率低,而伺服直驱泵控系统的特点是高效节能,但控制精度低。因此,将伺服阀控系统和伺服直驱泵控系统结合在一起,形成泵阀协控双伺服系统。同时实现高精度、高频响和高效节能的控制成为一个研究热点,对于这种复合系统的建模分析、解耦优化控制等问题也是一个重要的研究课题^[24-26]。

以伺服恒压泵站和伺服阀控缸系统组成的双伺服系统为例,如图10所示。由伺服阀负载节流口的动态流量方程可知,液压能源对伺服阀控缸位置闭环系统的影响主要通过油源压力来体现,因此,必须保证控制过程中泵站能够提供恒定的压力油。然而,阀控缸系统所需的流量是实时变化的,要想保证节能,油源泵站提供的流量就要跟随其变化,而流量的变化又可能导致供油压力的波动,进而影响控制精度。也就是说,阀控缸位置闭环系统通过流量约束对伺服电机驱动的量

恒压泵站系统产生影响。这样,伺服阀控缸系统和伺服电机驱动泵系统彼此间相互依赖,又相互影响,形成了一个耦合的大系统,对其进行解耦与系统优化控制也需要进一步研究。

2) 主被动负载工况下的电液伺服系统

(1) 单腔控制 对于单向负载(如弹性负载、举升运动)系统,当油缸伸出(或缩回)时,需要克服阻力,就需要液压源提供高压油。而当油缸缩回(或伸出)时,外力作用使其运动,则不需要提供高压油。因此,对这种负载工况下的电液伺服系统,可以采用单腔控制油路,如图11所示原理,只需要用伺服阀的一个负载口控制油缸无杆腔,有杆腔连接经过减压阀输出的低压油,溢流阀和蓄能器保证油缸工作时有杆腔的低压压力保持恒定。

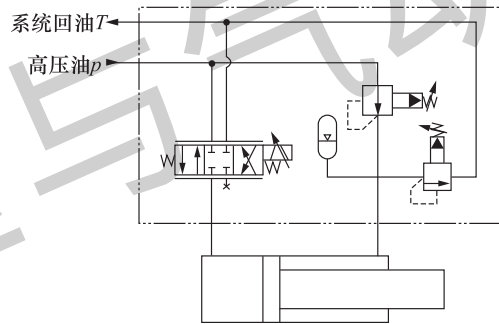


图11 单腔控制液压原理

(2) 负载口独立控制系统 对于同时存在主、被动负载的电液伺服系统,采用如图12所示的负载口独立控制的双伺服阀控缸位置闭环控制系统。由于对称阀控制非对称缸,或者存在被动负载的电液伺服系统的控制效果较差,而负载口独立控制的双伺服阀系统的出现,打破了传统电液伺服阀控系统的进出油口节流面积关联调节的约束,增加了伺服阀的控制自由度,提高了系统的性能和节能效果^[27,28]。因此,负载口独立控制系统得到了学者的关注。

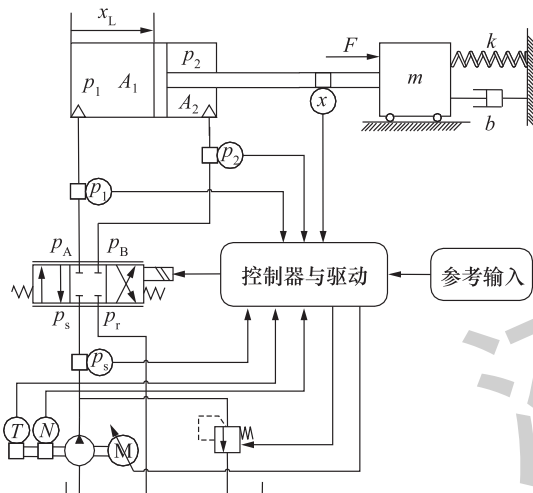


图10 泵阀协控双伺服系统原理

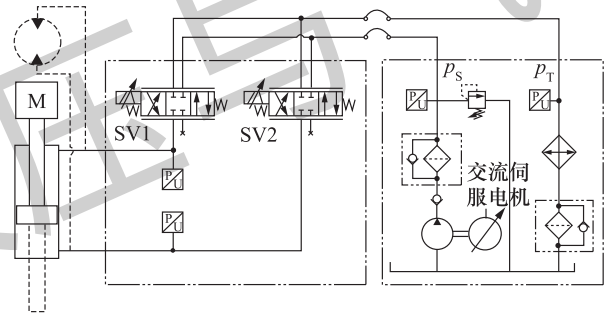


图12 负载口独立控制的双伺服阀控系统原理

负载口独立控制油路通过两个伺服阀分别控制油缸两腔,每个伺服阀都可以控制其进、出口的流量和压力,共有四种控制模式,如何选择一种高效节能的控制方式并相互平滑切换是此种控制油路的研究重点^[29,30]。四种工作模式主要是进口流量、出口压力控制,这种控制方式适用于主动负载;进口压力、出口流量控制,这种控制方式适合于被动负载;进、出口流量控制,这种控制方式适用于系统静态稳定时的位置调节;进、出口压力控制,这种控制方式更适用于阀控缸力伺服系统。

图13所示为组合阀形式的负载口独立控制系统,集成了多个二位二通比例阀。通过对各个阀工作状态进行组合,可实现负载口独立控制。美国普渡大学的Bin Yao教授等在这方面进行了大量的研究工作,目前已有公司进行了专利申请和产品试应用^[30]。

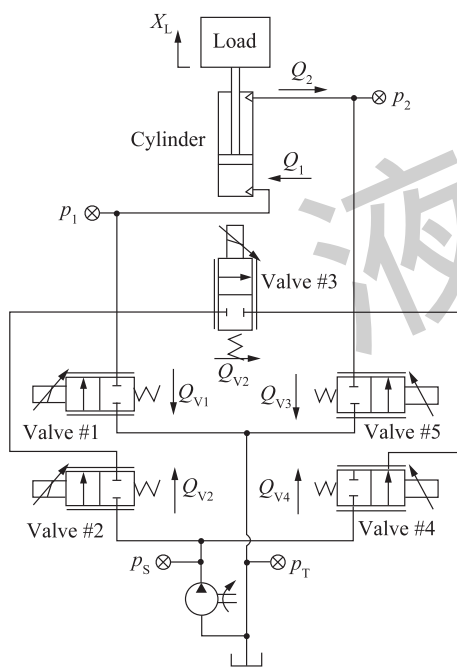


图13 组合阀形式的负载口独立控制原理

3) 多阀并联式电液伺服系统

在一些电液伺服系统中,要求执行机构能以大速度跟踪给定信号,这就要求系统必须使用大流量伺服阀,但大流量伺服阀频带和分辨率又比较低,为解决“大流量”和“低频响”、“低分辨率”之间的矛盾,提出了双伺服阀并联控制方式。在系统快速跟踪阶段采用双伺服阀同时工作的大流量特性,精确定位时采用单阀的高精度和高频响特性。其中多伺服阀控制的好坏,将直接影响整个系统的动态性能,并且还影响切换

过程是否能平滑过渡^[31,32]。因为关闭其中一个伺服阀,系统的增益会突然下降,产生流量的不连续和对被控对象的冲击。针对这些问题,有学者开展了多阀并联控制技术的相关研究和应用。

4) 高度集成的一体化电液伺服系统

为了便于系统的使用、安装及维护维修,高度集成的一体化设计已成为电液伺服系统的发展趋势。这种设计理念可实现电液伺服系统的柔性化、智能化和高可靠性。比较理想的设计是将油箱、电机、泵、伺服阀、执行机构、传感器等高度集成在一起。其优点是:无需管路连接,结构更加紧凑,减小了泄漏和二次污染等。同时由于各部件都是直接相连,可减小容腔体积,更有利于提高系统固有频率。但也存在一定缺陷,如散热面积过小会导致快速发热,加注油液时难以排出密闭容腔内的空气等。

5) 高性能电液伺服系统

随着工业应用的发展,对电液伺服系统的性能也提出了越来越高的要求。主要体现在以下几个方面:

(1) 超高压 通过提高液压能源和伺服阀、执行机构的工作压力等级,可大大减小系统的流量和系统的体积、重量。目前电液伺服系统的工作压力正在朝着 35 MPa 或者以上的超高压级别发展。

(2) 高频响 某些电液伺服系统往往要求很高的频响。而系统的频带主要受执行机构固有频率、电液伺服阀频带制约。因此,要提高系统频响,需要综合考虑二者之间的匹配。

(3) 高精度 执行机构的控制精度主要体现在定位精度和跟踪精度。要实现高精度控制的前提是传感器的精度要足够高,而执行机构的摩擦也会影响其低速运行时的平稳性。另外,伺服阀分辨率也会影响控制精度。

6) 数字控制技术

近年来随着电子技术、控制理论的研究和发展,电液伺服系统的数字控制技术已得到迅速发展和应用。

(1) 硬件控制器 高性能的 PLC、DSP、PC104 等嵌入式控制器的应用,为电液伺服系统实现先进控制算法奠定了基础。另外,采用数字通讯技术,使上位机能够通过 CAN 总线、Profibus 总线、以太网等向电液伺服系统的控制器发送指令、实时传送参数,并在线监控系统运行状态。

(2) 控制算法 在控制算法方面,针对电液伺服

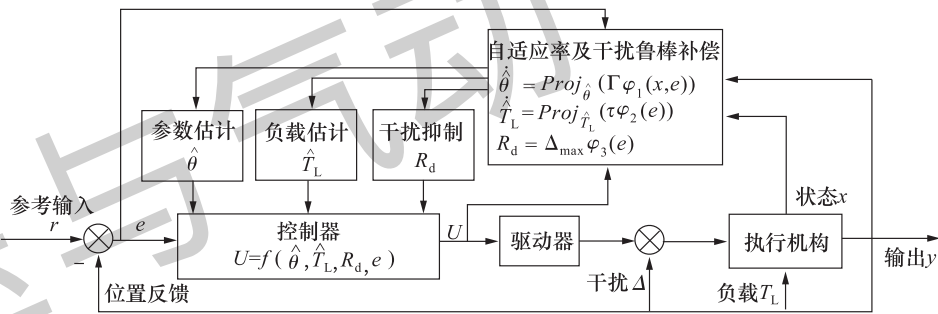


图 14 位置伺服系统的鲁棒自适应原理

系统的非线性、参数时变、存在滞回、负载复杂等问题，一些先进控制算法得到了应用。除常用的 PID 算法外，其它比较典型的控制算法主要包括以下几种：

① 鲁棒自适应控制 在传统自适应控制系统中，扰动能使系统参数严重漂移，导致系统不稳定，特别是在未建模的高频动态特性条件下，如果指令信号过大，或含有高频成分，或自适应增益过大，或存在测量噪声，都可能使自适应控制系统丧失稳定性。自适应鲁棒控制(Adaptive Robust Control)^[33-35]结合了自适应控制与鲁棒控制的优点，以确定性鲁棒控制为基础增加了参数自适应前馈环节，在处理不确定非线性系统方面取得了良好的效果。电液伺服系统中，普遍存在系统参数获取困难、负载模型不易建立、系统强耦合且非线性严重(如滞回、摩擦、死区等)等问题，通常采用鲁棒自适应控制方法实现在线估计参数^[35,36]，对非线性环节进行补偿，保证了存在建模不确定性和外界干扰系统的鲁棒性。鲁棒自适应控制器的原理如图 14 所示；

② 具有参数自整定功能的 PID 控制 PID 控制因其结构简单、含义明确、容易理解等特点在工程中得到广泛使用。但是电液伺服系统属于非线性系统，大量的实际应用表明，当系统状态发生变化时，固定参数的 PID 控制器性能变差。因此，具有参数自整定功能的 PID 控制得到了研究和应用^[37]。PID 控制器的参数整定方法包括常规的 ZN 法、继电器反馈法、临界比例度法等。在传统方法中，有的需要依靠系统精确数学模型进行参数整定，有的需要开环实验确定控制器参数，这些方法都容易造成系统振荡。因此，基于闭环系统实验数据的 PID 控制器参数整定算法得到了重视。比较典型的方法包括：迭代反馈整定算法和极限搜索算法^[38]。这两种算法均是利用闭环系统的输入输出数据进行控制参数的整定，其不同之处在于迭代反馈

整定法每次迭代过程需要进行三次实验，而极限搜索方法只需要进行一次实验；

③ 自抗扰控制 自抗扰控制是中科院韩京清研究员提出的一种控制算法，该算法的优点是不考虑被控系统的数学模型，将系统内部扰动和外部扰动一起作为总扰动，通过构造扩张状态观测器，根据被控系统的输入输出信号，把扰动信息提炼观测出来，并以该信息为依据，在扰动影响系统之前用控制信号将其抵消掉，从而获得最优的控制效果^[39,40]。从频域角度看，这样的控制手段要优于一般“基于误差”设计的 PID 控制器，自抗扰控制器原理如图 15 所示。

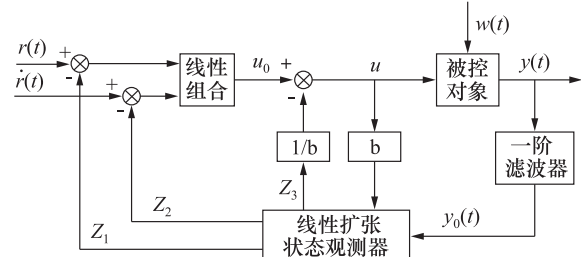


图 15 自抗扰控制器结构

(3) 故障检测与诊断 随着工业过程对电液伺服系统的可靠性要求越来越高，故障检测和诊断已成为控制器中一个必不可少的功能。

通过故障检测可向用户发出故障报警，如传感器故障、伺服阀故障等。目前，比较成熟的故障检测技术主要以数据为主，如专家系统故障检测、神经网络故障检测等。上述方法都需要大量的数据样本或专家知识作为前提。根据目前公开的文献看，现有的故障检测技术还只能局限于一些简单故障，对于复杂故障的诊断还有待于新故障诊断技术的发展。

3 典型应用

1) 液压自动厚度控制(HAGC)系统

在轧钢生产线上，轧机的压下控制采用电液伺服

阀控缸作为执行机构,液压缸的负载主要为弹性负载,通过建立电液阀控缸模型、钢板弹性形变模型、轧机机架的力弹跳模型等,可以实现钢板厚度的高精度实时控制。图 16 所示为某中板热轧生产线 HAGC 系统原理和实物照片。

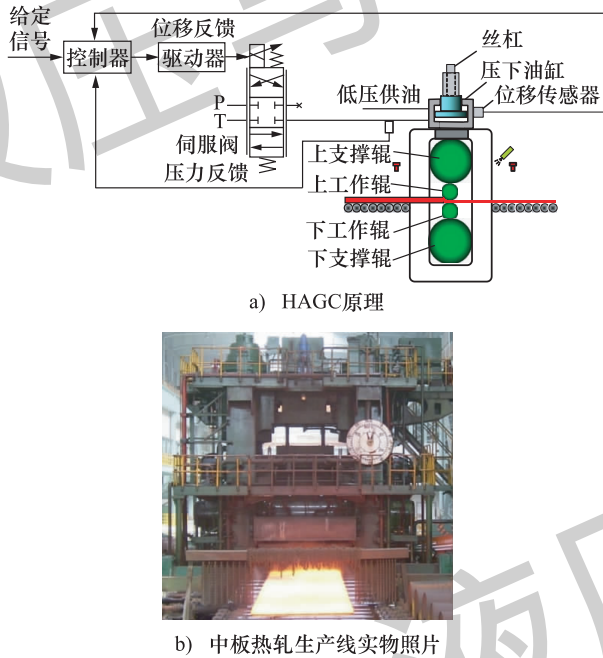


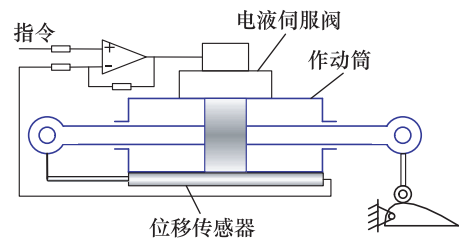
图 16 HAGC 原理及实物照片

2) 电液伺服舵机

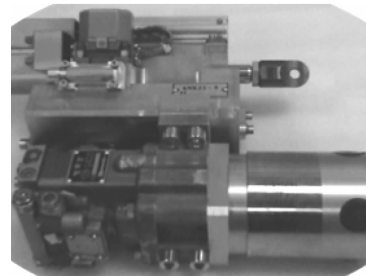
电液伺服舵机是控制飞行器姿态和舰船航向的主要部件,是一个典型的电液伺服阀控缸系统。在飞行器飞行过程中,舵面受到各种不确定性负载干扰,为了提高电液舵机的性能和可靠性,一方面,在系统设计上采用动压反馈式电液伺服阀以减少系统振荡,或采用多余度技术提高系统可靠性。另一方面,在控制算法上采用一些具有负载鲁棒性的算法。图 17 为某型电液伺服舵机原理和照片,它将泵站、伺服阀、作动器、传感器等全部集成在一起。

3) 火箭炮高低向泵控缸伺服系统

某火箭炮高低向采用了如图 18 所示的电液伺服泵控缸闭式控制回路。由于火箭炮大多数是多管,在满载、半载、空载时油缸承受的力变化非常大,从正负载变成负负载,为此,高低机采用了三腔缸,除了伺服变量泵控制的两个液压油腔外,还有一腔与蓄能器相连构成平衡腔。为了提高系统的效率而不会造成油温过高,采用了电液伺服变量泵实现了对三腔缸的位置闭环控制。



a) 电液伺服舵机原理



b) 电液伺服舵机实物照片

图 17 电液伺服舵机原理及实物照片

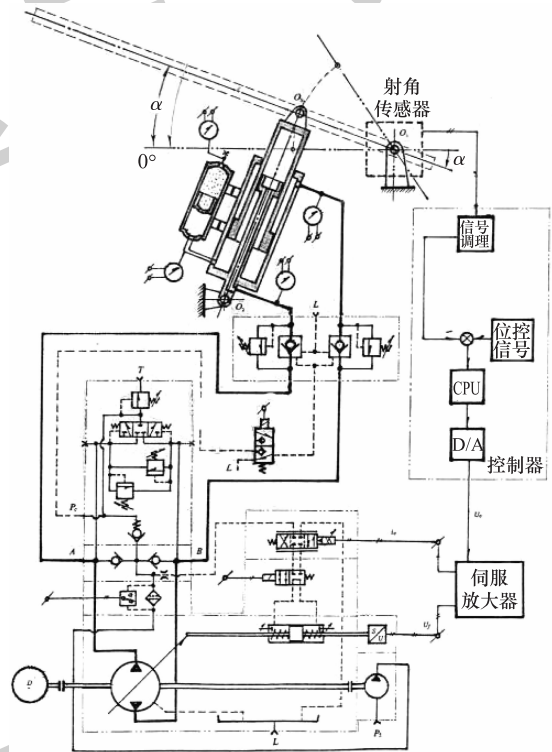


图 18 伺服泵控三腔缸原理

4) 加工机床

在制造行业中,有多种加工机床因为需要较大驱动力而采用电液伺服控制系统。图 19 所示为液压驱动的挤压成形设备和液压驱动的注塑机。

5) 高频电液振动台

炼钢过程中的结晶器振动大都采用电液伺服控

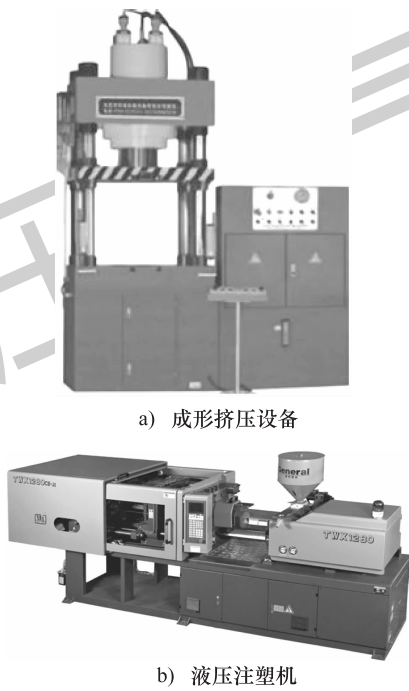


图19 成形加工机床

制。通过控制液压缸进行不同频率和幅值的正弦或非正弦运动,实现钢水在结晶器内的振动以提高钢坯品质和生产效率。图20所示为一组双缸驱动的结晶器振动装置,通过两侧的液压缸同步运动控制,使结晶器按照设定的规律振动,其关键是如何控制两组阀控缸系统的同步运动。

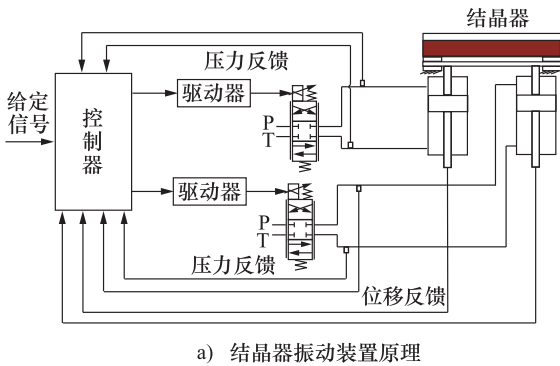


图20 双缸驱动的结晶器振动装置

图21所示为液压驱动的电液振动台,其驱动机构也是电液伺服阀控缸系统。相比电磁激振台,液压振动台具有更高的负载能力和更大的振动幅值。

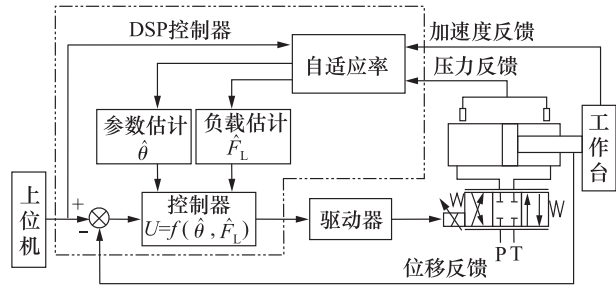


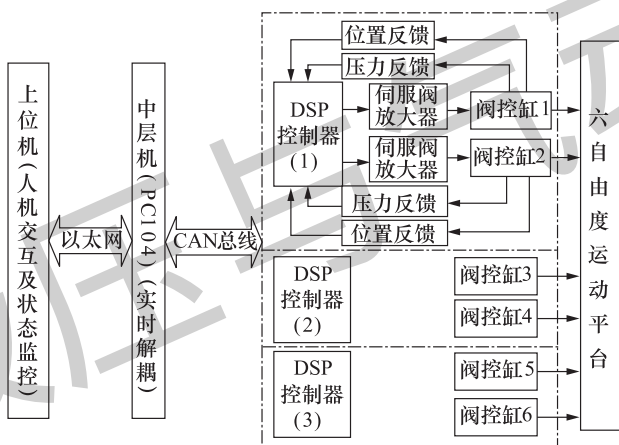
图21 电液振动台

6) 电液运动模拟器
并联式多自由度运动模拟器具有承载能力大、结构紧凑、控制精度高等优点,被广泛应用于运动模拟、动感仿真、模拟驾驶等方面^[41,42]。在重载运动模拟平台中,其驱动机构往往采用电液伺服阀控缸系统,如图22所示。

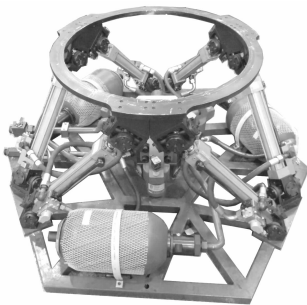
7) 液压机器人
未来战争的一个趋势是无人化。因此无人机、无人战车得到了重点研究。近年来,自主式液压足式机器人得到了广泛关注。采用液压作为驱动方式,可以保证足式机器人具有足够的负载能力。美国波士顿动力公司在这方面具有明显的领先地位,已成功研制出四足仿生机器人、双足直立机器人等。其中的关键技术包括高功率密度液压能源、电液阀控缸控制技术、足式机器人平稳性控制和步态规划等。图23所示为四足液压机器人,每条腿采用了4个电液伺服阀控缸系统作为关节驱动机构。

4 结论

本文主要从电液伺服阀、电液伺服系统及其典型应用等方面对当前的电液伺服控制技术进行了论述。



a) 六自由度运动模拟器控制原理



b) 六自由度运动模拟器实物照片

图22 六自由度运动模拟器



图23 四足液压机器人

就电液伺服系统而言,除了对性能指标要求较高外,对其应用环境也提出了更高的要求,包括在高、低温环境下能正常工作、介质具有更高的安全性(如防火、防爆)、系统具有更低的噪声污染等。另外,“跑、冒、滴、漏”一直是液压系统的顽疾,如何减少和彻底杜绝这一问题仍有待于密封技术、加工工艺、新材料使用等方面的进一步提高。

概括起来说,除高精度、高响应、高可靠性等基本要求外,高效节能、高功率密度、高集成度、数字化、智能化将成为今后电液伺服系统的发展目标。

参考文献:

- [1] 毛智勇,徐胜利,闵莉艳. 高频响电液伺服比例阀发展展望[J]. 液压与气动,2012,(3):98-100.
- [2] 黄增,金瑶兰,李博. 伺服比例阀的发展[J]. 液压与气动,2009,(1):76-79.
- [3] 陈祖希. 伺服阀动压反馈特性及其测试技术的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2009.
- [4] 赵江波,王军政. 动压反馈伺服阀的反馈性能测试方法[J]. 航空学报,2009,30(10):1918-1922.
- [5] 姜伟,胡新华. 高频液压激振器的仿真研究[J]. 机床与液压,2003,(3):131-132.
- [6] 欧阳小平,杨华勇,徐兵,徐秀华. 压电晶体及其在液压阀中的应用[J]. 浙江大学学报(工学版),2008,42(6):1036-1041.
- [7] 王传礼,丁凡,方平. 基于超磁致伸缩转换器喷嘴挡板阀的控制压力特性[J]. 机械工程学报,2005,41(5):127-131.
- [8] 涂福泉,毛阳,胡良智,李贺,曾庆斌,刘小双. 基于磁控形状记忆合金的伺服阀驱动器[J]. 机床与液压,2014,42(3):115-117.
- [9] 丁凡,姚健娣,笪靖,崔剑,张策. 高速开关阀的研究现状[J]. 中国机械工程学报,2011,9(3):351-358.
- [10] 田源道. 电液压力伺服阀的设计和使用[J]. 液压与气动,2001,(9):17-19.
- [11] 张磊,樊丁,彭凯. 力反馈电液伺服阀线圈余度设计与切换分析[J]. 科学技术与工程,2012,12(36):9905-9911.
- [12] 李其朋,丁凡. 电液伺服阀技术研究现状及发展趋势[J]. 工程机械,2003,(6):28-33.
- [13] 翟绍春. 基于变频调速技术的流量控制系统的设计与研究[J]. 液气气动与密封,2010,(4):26-28.
- [14] 金刚. 变频调速液压控制系统的压力脉动分析[D]. 杭州:浙江工业大学,2004.
- [15] 王吉龙. 基于变频技术的液压调速系统控制方案的仿真研究[D]. 大连:大连海事大学,2006.
- [16] 刘国文. 变频液压泵控调速调压开环实验及其结果分析[J]. 液气气动与密封,2007,27(5):41-43.
- [17] 郑洪波. 伺服直驱泵控液系统及其节能机理研究[D]. 广州:广东工业大学,2012.
- [18] 张红娟. 变转速泵控差动缸及低能耗注塑机技术研究[D]. 太原:太原理工大学,2011.
- [19] 李硕卫,张国贤. 现代液压技术的发展现状[J]. 机械工程师,2009,(2):54-57.
- [20] 杨联英. 浅谈国内外液压技术的现状及其未来发展趋势[J]. 科技创业家,2014,(3):93.
- [21] 权龙. 泵控缸电液技术研究现状,存在问题及创新解决方案[J]. 机械工程学报,2008,44(11):87-92.
- [22] 高强,金勇,王力,等. 泵控缸电液位置伺服系统建模研

- 究[J]. 兵工学报, 2011, 32(8): 950-956.
- [23] 郑洪波. 伺服直驱泵控液压系统及其节能机理研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2012.
- [24] 付永领, 张卫卫, 纪友哲. 电机泵阀协调控制作动系统的建模及仿真[J]. 机床与液压, 2010, 38(11): 72-76.
- [25] 齐海涛, 付永领, 王占林. 泵阀协调控制电动静液作动器方案分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2008, 34(2): 131-134.
- [26] Yongling Fu, Weiwei Zhang. Swarm Intelligence Algorithms for Coordinated Control of the Motor-pump-valve Actuator System[C]. IEEE International Power Electronics and Motion Control Conference, 2009; 2015-2020.
- [27] 曹剑, 徐兵, 孙军, 杨华勇, 王昊. 基于静态工作点前馈补偿的负载口独立控制系统[J]. 机床与液压, 2006, (8): 98-101.
- [28] Hansen A. H., Pedersen H. C., Andersen T. O., Wachmann L. Design of Energy Efficient SMISMO-ELS Control Strategies[C]. Proceedings of 2011 International Conference on Fluid Power and Mechatronics, 2011: 522-527.
- [29] 刘英杰. 负载口独立电液比例方向阀控制系统关键技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2011.
- [30] Song Liu, Bin Yao. Coordinate Control of Energy Saving Programmable Valves[J]. IEEE Transactions On Control Systems Technology, 2008, 16(1): 34-45.
- [31] 方锦辉, 魏建华, 孔晓武. 并联伺服阀的同步控制策略[J]. 浙江大学学报(工学版), 2012, 46(6): 1054-1059, 1066.
- [32] 于少娟, 彭昌, 宋君君, 等. 双阀并联电液伺服力控制系统的迭代学习控制[J]. 振动、测试与诊断, 2013, (2): 247-251.
- [33] Yao B, Tomizuka M. Adaptive Robust Control of MIMO nonlinear Systems in a Semi-strict Feedback Forms[J]. Automatica, 2001, 37(9): 1305-1321.
- [34] Yao B, Tomizuka M. Adaptive Robust Control of SISO Nonlinear Systems in a Semi-strict Feedback Forms[J]. Automatica, 1997, 33(5): 893-900.
- [35] Mohanty A, Yao B. Indirect Adaptive Robust Control of Hydraulic Manipulators with Accurate Parameter Estimates[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2011, 19(3): 567-575.
- [36] HE Yudong, WANG Junzheng, HAO Renjian. Fast Adaptive Robust Control of Electro-hydraulic Servo System[C]. Proceedings of the 32nd Chinese Control Conference, 2013: 3009-3013.
- [37] Jiangbo Zhao, Junzheng Wang, Shoukun Wang. Fractional Order Control to the Electro-hydraulic System in Insulator Fatigue Test Device[J]. Mechatronics, 2013, 23(7): 828-839.
- [38] Shoukun Wang, Junzheng Wang, Jiangbo Zhao. A Case Study of Electro-hydraulic Loading and Testing Technology for Composite Insulators based on Iterative Learning control[J]. Part I: Journal of Systems and Control Engineering, 2013, 227(6): 498-506.
- [39] 赵江波, 贾冬, 王军政. 一种新结构自抗扰控制器在电液伺服系统中的应用[J]. 北京理工大学学报, 2012, 34(4): 402-405.
- [40] 贾冬, 赵江波, 任广通, 王军政. 结晶器振动电液伺服系统的自抗扰控制器设计[A]. 中国自动化学会控制理论专业委员会, 中国自动化学会控制理论专业委员会(C卷)[C]. 中国自动化学会控制理论专业委员会: 2011.
- [41] Shoukun Wang, Junzheng Wang, Jiangbo Zhao. Application of PD-type Iterative Learning Control in Hydraulically Driven 6-DOF Parallel Platform[J]. Transactions of the Institute of Measurement and Control, 2013, 35(5): 683-691.
- [42] Wang Shou-kun, Wang Jun-zheng, Shi Da-wei. CMAC-based Compound Control of Hydraulically Driven 6-DOF Parallel Manipulator[J]. Journal of Mechanical and Science Technology, 2011, 25(6): 1595-1602.

全国液压气动标准化技术委员会液压污染控制 分技术委员会 TC3/SC4

主任委员: 张津津

副主任委员: 李方俊、陈建萍、叶萍

秘书长: 金涛

副秘书长: 吕寄中, 秘书: 杜立鹏、熊丽媛、王雪

委员(共25人): 张津津、李方俊、陈建萍、叶萍、金涛、吕寄中、赵书敏、唐松柏、陈丽卿、梁云、邵伟光、李建明、严洁、李红旗、魏峰、闵新和、阚超、王建永、王慧、宋科、曲丹丹、付艳、张文阁、杜立鹏、都丽红