

50. 液压技术的发展动向和展望

50.1 液压技术的地位

液压技术作为机械传动的一种有力的补充,已成功地用于一切需要中等以上功率输出,而且需要对运动过程进行灵活控制和调节的地方。由于它具备功率密度高、结构小巧、配置灵活、组装方便、可靠耐用等独到的特点,并能以最小的空间、最灵便的途径、传递最大的动力、且动特性好,在国民经济发展中,发挥着无法替代的作用。其作用和地位大体上可归纳为以下四方面:

50.1.1 机械加工自动化的重要基础件

液压技术与机械制造业的关系最为密切,它是服务于机械制造业的基础工业技术,主要满足生产过程自动化的需要和机械制造设备的需要。在金属切削机床、压力机、铸造、焊接等设备中,液压技术应用已十分普及了。其进一步发展决定于机械制造业生产过程自动化的需要。因此,考察机械制造业的需要就可展望液压技术的发展趋势。

近代,由于微电子技术计算机技术发展和广泛应用,机械制造业发生了极其深刻的变革。以计算机辅助技术和自动化单元技术为基础的新一代制造技术正在形成和迅速发展。计算机辅助制造(Computer Aided Manufacturing),简称 CAM,它的功能是利用计算机编制零件的制造工艺规格,控制产品的加工、装配、试验、检验以至成品包装等全过程,以及与这些过程有关的全部物流系统的初步的简单生产调度。广义 CAM 的含意是极其丰富的,还包括监控、成本核算、各种管理等等。主要的应用方面有:

(1) 计算机数字控制(Computer Numerical Control)

计算机数字控制简称 CNC。指以小型或微型计算机直接控制各台设备或各个单一的制造过程。属一级控制层次。

(2) 直接数字控制(Direct Numerical Control)

直接数字控制简称 DNC。指由中型计算机监视与控制一群微型计算机,并向它们分配数控程序。属二级控制层次。又称计算机群控。

(3) 计算机辅助质量控制(Computer Aided Quality Control)

计算机辅助质量控制简称 CAQ,包括工序控制、验收检验等等。

(4) 柔性制造单元(Flexible Manufacturing Cell)

简称 FMC。FMC 是在加工中心机床的基础上,进一步扩大其功能而形成的适应性很强的加工设备。除原有的自动加工、自动换刀基本功能外,又增加了运输、储存等功能,多数采用 CNC 实现。一般由一台或两台机床组成, FMC 是构成柔性制造系统的重要基础。

(5) 柔性制造系统(Flexible Manufacturing System)

简称 FMS。FMS 是以数控机床、加工中心机床及辅助设备为基础,用柔性的自动化运输储存系统将它们有机地结合起来,采用 CNC、DNC 等多种不同组合形式的分级控制所组成的一种自动加工系统。这是 CAM 发展到现阶段最先进的一种自动加工系统。

(6) 柔性自动线(Flexible Manufacturing Line)

简称 FMI。FMI 是由通用数控机床、专用数控机床、辅助设备,采用柔性程度低的自动运输系统联接构成的自动生产线。

(7) 计算机集成制造系统(Computer Integrated Manufacturing System)

简称 CIMS。CIMS 是以上述各种层次和方式的 CAM 系统为基础,并与计算机辅助设计(即 CAD)系统联接起来,配以管理信息系统(Management Information System)为核心的必要子系统,利用数据通讯局域网络(Local Area Network)把机械制造中的各职能部门联系起来。用多级计算机分级控制,从而实现车间或分厂的制造过程全盘自动化。CIMS 是当前机械加工自动化最先进的形式,是 21 世纪所追求的新一代生产模式。

50.1.2 各种机械、设备的核心配件

除机械制造领域外,液压技术又广泛服务于其它许多技术装备,例如工程、建筑、矿山、冶金、军用、石化、轧钢、农业、林业等机械,上至航空、航天工业,下迄地矿、海洋开发工程,几乎无处不见液压技术的踪迹。它们都需要灵活地输出强大的功率,液压传动和控制是无可替代的最佳选择。液压系统中的元器件质量决定着整个机械、设备的功能和寿命。没有液压技术,这

些相关的经济领域是难以发展的。

塑料加工机械是液压技术成功应用的又一典型范例,它要求输出的功率虽然不大,然而要求精确地控制运动速度和力量。简洁、紧凑、方便地满足这种需要,正是液压技术的又一优势。

50.1.3 机电一体化的重要接口器件

机电一体化是国际公认的机械工业发展方向,液压技术正是弱电控制和机械强大功率输出之间的理想放大环节,故机电一体化术语(Mechatronics)问世不久,机电液一体化(Hydraulomechanics)、液电一体化(Fluitronics)术语也相继出现。作为一种重要的接口器件,例如电磁阀、伺服阀、比例阀、数字阀等,将随着机电一体化的发展,不断地得到完善、充实和更新。

古老的机械制造业正面临着高新技术发展的挑战,作为最简单可靠的机电接口的液压技术也遇到了良好的发展机遇。例如多自由度的大型运动模拟器、试验台,大型娱乐器材等等,在国外已获得成功的应用。

50.1.4 机械机器人化的关键环节

建设、工程、农业等行走机械是液压行业的主要用户,机电一体化工业的发展和人类不断的新需要必然会导致行走机械逐步实现机器人化,即使操纵与控制逐步摆脱人的参与,即要求机械自身具备感觉和认识功能。有信息处理和自适应作业能力的智能机器人是发展的方向。智能机器人起码需要以下环节:信息处理和传递环节(电脑和导线等电子系统,相当于大脑神经系统),能量传递或作功环节(液压泵、油管等液压系统,相当于人的心血管和肌肉系统),运动作业和支撑环节(杠杆、铰支点等机械系统,相当于人的四肢骨骼系统),加上环境感受环节(各种传感器相当于人的五官)。把它们有机的结合在一起就可以实现行走机械机器人化的目标,与具有高度智力的生物人比较,只是需要借助于外供能源,缺少通过消化和呼吸系统自身产生能源这种关键环节而已。显然液压技术的作用是完成能量转换、传输,承上启下和对外作功。这种大型行走机器人是21世纪高度自动化的必然发展方向。

总之,现代液压技术作为一种重要的工业自动化基础件已与微电子技术,传感技术紧密结合形成并发展成为包括传动、控制、检测、校正在内的综合自动化技术。它不仅会影响,而且可以促进装备工业的发展。技术装备是科技进步的载体,它将直接影响相应行业的生产效率和效益,影响产品的质量和档次。因此,先进的液压技术和产品将支撑用户在激烈的竞争中,立

于不败之地。工业发达国家的液压元件出口贸易值远远超过整个机械制造业。足见液压技术在国民经济发展中的重要地位。

50.2 发展动向和展望

液压技术是具有十分广泛应用面、不断迅速发展的一种包括传动、控制在内的自动化技术。必将随着科技迅猛发展,通过不断地满足各种经济领域的新需要,使自身得到发展。

总的发展动向是紧密与高新技术结合,特别是微电子技术、计算机技术、传感器技术等。此外,液压技术更重视:可靠性、能量利用率、减轻操作者负担,增强环境适应性等综合质量指标的提高;功能上的一体化、复合化;结构上的集成化、小型微型化;品种上的多样化、特色化;继续扩大应用服务领域,采用最先进的设计和制造技术以及灵活的经营策略。液压技术将发展成为内涵更丰富的完整的综合自动化技术。

50.2.1 可靠性和性能稳定性继续提高

技术愈进步,自动化程度愈高,系统愈先进,全面反映综合质量的可靠性就愈难保证,故障导致的损失和危害就愈大、愈不可容忍。所以,各工业发达国家都把可靠性放在液压件质量指标判断准则的首位。性能稳定性可理解为对可靠性要求的进一步补充。即在尽可能长的寿命期内,不仅无故障,而且性能变化也应限制在规定范围之内。

工作可靠性和性能稳定性是涉及面最广的综合质量指标,包括元、器、辅、附件的可靠性;系统的可靠性设计、制造;以及可靠性维护三大方面。其中最重要的发展趋势是:

(1) 新材料、新工艺、新结构的不断引入

诸如工程塑料、复合材料、精细陶瓷、低阻耐磨材料、高强度轻合金以及记忆合金等新一代材料将逐步进入实用阶段。除满足某些特殊场合使用需要外,其目的是普遍减少由于粘附擦伤、气蚀而引起的损伤。在大幅度提高可靠性和稳定性的同时,提高允许工作温度和减轻元器件自重。新材料的应用必然会加速推动新工艺、新结构的应用和发展。

(2) 系统可靠性设计理论将成熟并普及应用

元、器、辅、附件的可靠性无疑是组成系统可靠性的基础,是保证系统工作可靠性的必要条件,但并不是充分条件。因为一旦组成系统,就会增加许多相互干扰的因素,如负载效应、关联效应、耦合效应等等。系统的可靠性虽然与设计、制造、装配、使用等环节都有

关系,但首先是设计出来的。所以如何合理地进行元器件选择匹配,尽可能地可以对可以预见的诸因素进行全面分析,最大限度地消除诱发故障的潜在因素。将成为系统设计中必不可少的可靠性设计内容。

(3) 强化、完善系统介质的过滤技术

随着系统压力的升高、流速的增快,就意味着液压元件内部滑动面间间隙变得愈来愈小。典型现代液压元件的动态间隙是在 $0.5\sim 5\mu\text{m}$ 范围内。研究证明:大于间隙的微粒进入是产生磨损的根本原因。因此,不断强化和完善过滤技术是延长元器件使用寿命,保证系统工作可靠稳定的根本措施。如 $1\sim 3\mu\text{m}$ 的高精度过滤器;采用玻璃纤维等新材料、新结构的过滤器,可以有效提高纳垢容量,降低淤积程度,增强过滤效率。密封油箱以及用于监测报警的在线实时油污检测器等均将应市和应用。

除彻底清除固体杂质外,还要求清除油中的气体和水分。已开发出的同时可除去油中气泡的滤油器;油水分离静化装置;排湿阀以及基于专门交联聚合物材料制造的除水器件等将日渐普遍应用。

(4) 重视状态监测、异常显示和主动维护

状态监测是提高系统工作可靠性和功能安全性的必要辅助手段。同时也是减轻使用者负担,实现最科学的状态维修制度的有效措施。因此今后显示报警装置不只是滤油器应用,而且还将逐步具备某些判断功能。如电子报警逻辑系统,就能监测阀组的全部作业功能,并作出判断而发出报警信号。

50.2.2 增强对工作环境的适应性

虽然液压技术具有能在某些特殊或恶劣条件下正常工作的优势,但是仍然存在发热、噪声、介质污染等问题不尽如人意,制约了在某些场合中的应用。特别是面对愈来愈重视环境保护的将来,逐步解决或改善这些问题,增强环境适应性,对拓宽其应用领域十分重要。

(1) 高度重视能耗控制技术

能耗控制技术是从70年代开始重视节能而发展起来的。鉴于人们逐步认识到其意义远非节能效果本身。还在于能够消除发热温升这个诱发故障的根本潜因,提高系统工作可靠性和性能稳定性,更重要的还在于发热被控制后,冷却系统的必要性不断缩小,大大有利于增强环境适应性和扩大应用领域。尤其是随着压力提高,能耗控制更加重要,涉及到液压技术的进一步发展前景问题。所以已成为国际关注的焦点之一。相关的理论与实践也日趋成熟,已专章介绍,不再赘述。

(2) 进一步降低工作噪声

控制工作噪声主要从高噪元件入手,如溢流阀噪声将进一步下降;又如降噪、隔噪结构并用的泵电机全封闭式动力组合,其外壳用专门材料制成,结构十分紧凑,可望取得噪声降至 $60\text{db}(\text{A})$ 以下的优良效果。

系统降噪的关键是提高设计水平,引入动态设计概念。当然,减冲、无冲击、动作时间可调的电磁切换元件的合理匹配选用,也是不可缺少的条件。

(3) 改善代用介质的性能及其适应性研究

寻求矿物油以外的代用介质,是节约宝贵能源石油和抗燃安全方面的需要,今后更为突出的是环境保护的需要。理想的介质应是具有生物降解能力、无毒、价廉、使用方便,除抗燃性质外,具备某些类似矿物油的基本性质或某种突出优良特性的液体。

(A)环保介质目前已被证明在一定条件下可用的有天然酯或合成酯及植物油两大类。酯类因成本高,除十分严峻的工作环境,如飞机等特殊安全要求的场合外,应用受到限制。而以菜油为代表的植物油类较理想,这是一种有应用前景的环保介质。将进一步研究改进代用介质,降低成本,增加产量和品种,使之逐步推广应用,特别是在容易造成污染的农、林、筑路、矿山等机械上的应用。

(B)水基介质是一种十分有前途的抗燃介质,包括水-乙二醇、水油乳化液、高水基介质(HWBF)等几种。有望进一步研究,提高其稳定性和重要的品质指标,逐步推广应用。国际上还在继续开发其他高品质抗燃介质,如抗燃性极好的氯三氯乙烯(CTFE)已在军事装备中应用。

(C)“电流变”液体是一种固体粒子混合于基础液体中的两相悬浮液。在电场作用下,它具有可灵敏控制的液固态之间相互迅速转换的电流变效应。其研究意义远远超出液压技术领域,但对液压技术领域将会产生深远影响。实现以电流变液体为介质的控制,流动阻抗可以直接感受电场信号而调节变化,不再需要通过结构复杂、制造精度高,具有相对运动偶件的阀类。因而可以消除目前阀类存在的磨损、泄漏、卡死等一系列弊端,有望解决许多目前液压技术尚难解决的控制问题。故这种具备特有性质的液体一旦研究成熟,将会引起液压技术一场重大的变革。

(D)材质适应性研究是代用介质、新兴介质使用过程中,不可回避的技术问题。首先是密封材料,还有最适宜的摩擦副材料等,需要进行大量耗时的试验,选择寻求相容性好的材料,摒弃不能用的材料。

(4) 发展横向派生系列产品

联接尺寸标准化,核心零件通用化,发展横向派生系列产品是满足各种环境下,市场不同层次的多样化需求的最经济有效办法。例如同规格的电磁阀,除基型外,可以派生高压、高速、低能耗、低噪、无冲击、适合水基介质用等系列的品种,任由用户选用。

50.2.3 加速液电技术的融合

液压器件作为机电一体化的重要接口器件,直接受微电子技术飞速发展影响,将为液压技术发展注入新的动力。液电技术融合,已远远超出一般电控的结合含意,而是相辅相成,两者合而为一,成为一个不可分的整体。充分考虑到液压技术的特点,自行开发集液压、电子、传感技术于一体的全新产品。这些新一代产品及其组成的系统兼备了电气和液压技术的双重优势。因此,液压技术正越出自身传统的学科领域,朝向包括传动、控制、检测在内的,机、电、液紧密结合的综合自动化技术方向发展。

(1) 发展可直接接口的电液转换器

液压技术与微电脑或计算机相结合,可以提高控制精度和工作可靠性,并使系统具备一定的智能判别功能而日趋完善。因此发展无需附加转换,可以直接与电脑接口的电液转换器是必然的趋向。正在研制新一代低功耗(10mA以下)、高速(响应时间降至2ms以内)电磁铁,以及数字式等电液元器件。

(2) 附加工况监视和传感功能

实现计算机控制、判断控制误差和实施高精度闭环控制,进行在线实时数据处理等控制要求时,系统某些工作点的工况参数或执行机构的运动、动力参数的测量是必需的。常规的压力、流量、位移传感器将逐渐被新开发的、具有小型内藏式传感器和信号输出功能的元器件所替代,例如国际上已出现商品化的内藏位移传感器的液压缸。

(3) 完全合一的泵电机组件

这种泵电机动力组合是液电技术彻底融合的典型范例。它不是一般泵加电机的简单整体结构形式,而是一种以新技术应用为基础的全新设计。因此它在多方面综合反映了液压技术的发展动向。例如:

电机转子、定子借助于泵入口过油冷却不仅取消了风扇及其能耗,而且由于冷却效果比空气高10倍,在保证转子、定子不过热的前提下,此种泵电机组合可提高输入电流(功率),可以获得两倍于原绕组产生的额定输出功率,节约了能耗,有效地提高了原动机的效率。

采用精确对中的油浴花键联轴器,达到了高效直接传动的效果。

整体用一个小巧的聚乙烯降噪声外壳封闭,与普通泵、电机组相比,噪声降低70%(约10dBA),外型尺寸减小35%~50%。

此种泵电机新的组合使用寿命长、使用方便。因为它突破了原有结构形式,才取得如此广泛的综合效果。

50.2.4 高度集成化,提高元器件的功能密度

随着科技的飞速发展,市场需求品种愈来愈多样化,沿用的分离式单功能元件,无论就规格品种、结构形式、生产组织、方便用户等方面看,都难以满足市场需求不断增长和更新的需要。因此,追随电子技术,发展高功能密度的集成化器件是一种必然的趋势。出厂之前就安装调试就绪,确保优良的性能,使用户组成系统时技术含量高的部分工作,逐步向生产厂转移,尽量降低对其自身的技术要求。这样,不仅最大限度地方方便了用户,而且有利于提高应用水平和加速拓展应用领域。

集成式多功能元器件有以下不同层次:

(1) 单功能元件的组合向多功能元件发展

仅仅改变分离式元件阀体外形,按功能需要组合成的集成式多功能元器件是集成化的初级形式。从工作原理看仍然与分离元件类似,如叠加阀块等,其组合程度和结构紧凑性受到很大限制。

多功能阀是着眼于功能核心部分阀芯的彻底改造,利用压力、压差、流量信号的变化,通过不同部分的相对运动来实现不同的功能。外形类似单功能元件,因此能使结构高度紧凑。如用于工程机械闭式泵——马达系统的一种多功能阀,能够完成单向补油、高压溢流、旁路和压力释放四种功能。

(2) 集成器件子系统化

以具有代表性功能为目标而组成的集成化器件,或是具有一定的功能灵活性,或是甚至包括能量转换元件泵或缸等,具有较强的通用性。使用户只需联上执行机构或动力源,就能组成性能优良的系统。极大地方便了用户。这种模块式子系统化的集成器件,使得系统和元器件的界线日益模糊。也有利于提高用户的技术水平。

如插装阀向集成控制块和功能扩展块的形式发展就是一例。由阀芯、阀套、弹簧构成的插装阀核心组件是高度简化、通用性极强结构形式。只需配备适当的先导控制元件和阀体、阀套部分就能形成各种液压系

统。显然,比之用十分成熟的单一功能常规元件联接成系统,涉及技术问题更多。只有制造厂家自己把技术含量高的部分承担起来,发展相对独立,有一定灵活性的功能块。用户可以提出订货要求,买来就用,才有利于促进插装阀技术的发展。

又如以泵为核心的动力源集成子系统;以液压马达或缸为核心的集成子系统;甚至包括电机、泵、缸在内的、结构十分紧凑的整体式液压动力装置等,均以各具特色的形式逐步问世。

(3) 强化电子部分,开发智能型一体化器件

集成电路的发展使得弱电控制部分逐步从控制柜中移出,包括 A/D、D/A 转换、整流、放大电路等,直接集成于液压元器件内,形成功能密度极高的一体化器件,便于直接与计算机接口。甚至把小型微处理器集成于泵控制电路中,在操纵指令和比例阀间加设智能电子器件,不仅可实现各种灵活的调节方式,且可使它们可以修正人为控制信号,实现合理分配功率,自动保持最佳工作状态;实现软启动和制动等附加智能功能。

50.2.5 发展轻小型器件和微型液压技术

鉴于航天、航空、潜艇、轿车、机器人、医用器械等特殊应用部门对液压技术的需求不断增加,它们共同的特点是安装空间狭小,需求低附加质量、高功率密度,响应频带宽,速度快。只有大力发展轻、小、微型液压技术,才能满足这种对液压技术的挑战和苛求。

(1) 提高轻小型器件的功率密度

如小型叠加阀、小通径(6, 10mm)螺纹式插装阀均已先后问世。插装阀原只是用于大流量的一种阀类,如今已突破不小于 16mm 通径界线,而且压力级别不断提高,有望达到 50MPa 以上。用少数几种零件就可组成结构紧凑,可靠性高的各种轻小型高功率密度的油路块,他们使用很方便。

(2) 微型液压技术领域的开发

微型液压技术领域中的问题采用常规的结构和方式已不能解决,它将面临结构材料、工艺、装配、检验等等一系列有待研究解决的新课题。好比高密集度的液压集成块或液压“晶体管”。例如一种利用叠层板的新颖油路技术,其最小通道直径 0.127mm,节流元件仅 0.32 cm²。显然工艺上需要依靠激光技术才能解决。与之相适应的微型元器件均以崭新的面貌出现:如采用多层压电材料作驱动器的伺服阀,可获高达 5000Hz 的响应;与液压缸结构、材质全然不同的柔性液压执行元件;以及流量仅有 2.5ml/r 的微型齿轮泵等。

50.2.6 CAD, CAM 技术的普及和应用

为了适应市场多样化、产品频繁更新的需求,加强企业对市场的适应能力,加速计算机设计,制造技术的普及和应用是必然的趋势。

(1) CAD 技术的成熟和软件商品化

随着现代设计理论的日渐完善和成熟,重视设计已经成为决定产品或工程质量的最关键和有效的手段。这是由于借助于计算机辅助,现代设计技术不再局限于以实施方案为主体的纯技术设计,而是可以实现从技术、经济、管理到全局进行多目标全方位优化设计。要考虑到在设计、制造、安装、运行、维修乃至报废等产品整个寿命周期中涉及的人—机—环境间方方面面的关系问题。以及,确定如何用低成本费用取得高质量效益的途径,从而获得一个整体优化的结果。因此,设计阶段不仅全面反映了产品的技术含量,而且也将决定产品的生存和竞争能力。故 CAD 应用具有多方面的重大意义。

现代设计技术包含着多方面知识的获取、有关专家经验的积累、综合地运用、合理地取舍过程,更需要大量反复运算和可行方案的定量比较择优过程。显然只有依靠计算机辅助设计才有可能实现。高技术、高知识含量的软件商品化,可以使设计质量对使用者素质的依赖关系降至最小,从而可迅速提高设计水平。

(2) 生产装备的加速改造和更新

鉴于制造技术是保证产品质量和对市场快速应变能力及竞争能力的又一重要方面,旧有生产装备,落后的工艺远远满足不了液压元器件生产的需要,要求不断地充实、改造和更新。特别是需引入 CAM 技术,加速技术装备的柔性化进程。数控机床、加工中心、柔性加工单元、柔性制造系统将全面替代旧装备,并配以自动传送工具和立体仓库。甚至采用中心计算机进行控制管理,朝着自动化车间模式迈进。

50.2.7 发展特色产品、重视成套技术

液压技术的兴旺发展在于它是一种通用性很强、市场很宽广的技术。但近年已面临科技进步新需求的挑战,前述发展动向和展望已从技术的角度概括了满足新市场需求的主要方面。但还不够,面对激烈的市场争夺,营销策略的不断更新也是一个重要方面,而且对产品发展起着深远的影响。

(1) 有针对性地开发特色产品

仅仅生产常规分离式或通用组合方式的液压元器件,既满足不了技术进步的需要,也满足不了市场竞争

的需要。事实上,一个液压件生产企业不可能生产所有规格的品种去满足在广阔领域中所有用户的需求。必须根据自身原有的条件和实力,找准主要服务领域,变被动服务为主动服务,有针对性地开发高质量的特色产品,才能巩固某些服务领域的市场优势。

对新的和潜在需求的技术投入,又是一个市场争夺的重要方面。液压技术装备率较低的发展中国家,更有巨大的发展潜力,诸如大型娱乐设施、巨型午台设施、运动模拟设备、各种大型试验设备、物料回收和废物处理等环保设备,以及广大的轻工设备市场等等。另外在航天、海洋开发、海底作业、高层建筑、现代停车

场设施等高新技术领域,都需要质量过硬的特色产品去装备,有广阔诱人的发展前景。

(2) 成套技术日趋完善

随着液压技术与微电子技术、传感器技术等现代技术的紧密结合,使成套技术内涵日趋丰富,已成为一种日趋完善的综合自动化技术。鉴于它涉及机、电、液、传感、仪表等广泛领域的产品质量,所以国际上知名厂商均纷纷与相关产品厂商组成精干的伙伴联盟,利用其综合成套技术的质量优势和价格优势参与国际竞争,必将有力地推动成套技术的加速发展。

参 考 文 献

1. 雷天觉主编. 液压工程手册. 北京: 机械工业出版社, 1990
2. Robert D. Blerins. Applied of Fluid Dynamics Hand-book, New York; Van Nostrand Reinhold Co, 1984
3. Frank Yeaple. Fluid Power Design Handbook, New York; Marcel Denkker, Inc, 1990
4. Jacob Bear. Dynamic of Fluids in Porous Media. American Elsevier Publishing Company, Inc, 1972
5. 机械工程手册, 第5篇, 流体力学. 机械工业出版社, 1984
6. 竹中利夫, 浦田英三. 液压流体力学. 温正中等译. 北京: 科学出版社, 1980
7. 盛敬超编. 液压流体力学. 北京: 机械工业出版社, 1980
8. 张也影. 流体力学. 北京: 高等教育出版社, 1980
9. 液压传动与控制教研室编. 液压传动(下册). 北京: 北京工业学院, 1981
10. 赵克强, 韩占忠编. 流体力学基本理论与解题方法. 北京: 北京理工大学出版社, 1989
11. 赵克强, 刘淑艳. 流体粘性离合器的流场分析. 中国力学学会第二届全国工业流体力学学术会议论文集. 北京: 宇航出版社, 1991
12. 日本液压气动协会编. 液压气动手册. 《液压气动手册》翻译组译. 北京: 机械工业出版社, 1984
13. 夏志新. 液压系统污染控制. 北京: 机械工业出版社, 1992
14. Lukas M & Anderson D P. Techniques to Improve the Ability of Spectroscopy to Detect Large wear Particles in Lubricating Oils. ASTM Symposium on Modern Instrumental Methods of Elemental Analysis of Petroleum Products and Lubricants, 1989
15. Proactive Maintenance and Contamination Control Course Workbook. Diagnostics, 1993
16. PCC型便携式油液污染检测仪说明书. 北京: 中国矿业大学北京研究生部, 1990
17. ISO/WD 10949. Hydraulic fluid power - Cleanness of Components - Methods of sample collection, sample analysis and data reporting. 1996
18. Day M. J. The Characteristic of Partical System. Conference at Bath University. 1984
19. Eiichi Sugiura. 液压油 10 年无更换使用结果. 液压技术[日]. 1985, 9
20. Bensch L. E. & Banner W T. Field System Contaminants Where, What, Howmuch. Paper No. P73 - CC - 1. 7th Annual Fluid Power Research Conference. Stillwater OK. 1973
21. Research Reports of U. K. Fluid Power Contamination Control Program. Vol. I - Fluid Studies. Department of Trade and Industry. National Engineering Laboratory. Glasgow. 1983
22. Bensch L. E. Technical Report# 402. Pull Corporation
23. 液压污染研究报告. 建设部建筑机械研究室. 1985
24. 典型液压系统清洁度等级. 机械工业部“液压元件及系统清洁度管理规范”制定组. 1985
25. 钱祥生. 流体控制原理及模拟. 武汉: 华中工学院出版社, 1988
26. 钱祥生, 张金. 可靠性设计. 液压气动与密封, 1994年第1期
27. 绪方胜彦. 现代控制工程. 卢伯英等译. 北京: 科学出版社, 1976
28. 张旺, 王世臻. 自动控制原理. 北京: 北京理工大学出版社, 1994
29. 戴忠达. 自动控制理论基础. 北京: 清华大学出版社, 1991
30. 顾瑞龙. 控制理论及电液控制系统. 北京: 机械工业出版社, 1984
31. 王锦标, 方崇智. 过程计算机控制. 北京: 清华大学出版社, 1992
32. 唐照民. 计算机辅助设计. 北京: 机械工业出版社, 1993
33. 章一鸣. 计算机辅助设计. 北京: 北京理工大学出版社, 1990
34. 黄少昌, 曹为宁, 童秉枢. 计算机辅助设计基础. 北京: 清华大学出版社, 1988
35. 何克忠, 郝忠恕. 计算机控制系统分析与设计. 北京: 清华大学出版社, 1988

36. 郑叔芳. 计算机辅助测试. 北京: 航空工业出版社, 1992
37. 陈定方. 机械 CAD 与专家系统. 北京: 科学出版社, 1986
38. 王树林, 袁志宏. 专家系统设计原理. 北京: 科学出版社, 1991
39. 陆元章. 液压系统的建模与分析. 上海: 上海交通大学出版社, 1989
40. 张金寿, 周廷峰. 专家系统建造原理及方法. 北京: 中国铁道出版社, 1992
41. 上海煤矿机械研究所. 液压泵和液压马达. 北京: 煤炭工业出版社, 1976
42. 托马 J V. 现代液压工程. 北京: 国防工业出版社, 1984
43. 张虎. 液压油、润滑油超精过滤技术的研究. 博士学位论文, 中国矿业大学北京研究生部, 1995
44. 孔燕峰. 如何根据系统流量选择过滤器. 液压与气动. 1994. 6
45. 机械部北京自动化所液压中心. B-2 型液压冲洗机说明书.
46. 林建亚, 何存兴. 液压元件. 北京: 机械工业出版社, 1988
47. 李寿刚. 液压传动. 北京: 北京理工大学出版社, 1994
48. 孙文质. 液压控制系统. 北京: 国防工业出版社, 1988
49. 官忠范. 液压传动系统. 北京: 机械工业出版社, 1987
50. 宋学义. 袖珍液压、气动手册. 北京: 机械工业出版社, 1995
51. 刘长年. 液压伺服系统之分析与设计. 北京: 科学出版社, 1985
52. 张宇河. 计算机控制系统. 北京: 北京理工大学出版社, 1995
53. 徐州工程机械集团. HBT50 型混凝土泵使用说明书.
54. 梅里特 H E. 液压控制系统. 陈燕庆译. 北京: 科学出版社, 1989
55. 王春行. 液压伺服控制系统. 第二版. 北京: 机械工业出版社, 1989
56. 李洪人. 液压控制系统. 北京: 国防工业出版社, 1990
57. 李连升, 刘绍球. 液压伺服理论与实践. 北京: 国防工业出版社, 1989
58. 顾瑞龙. 控制理论与电液控制系统. 北京: 机械工业出版社, 1985
59. 王占林. 液压伺服控制. 北京: 北京航空学院出版社, 1987
60. 王军政. 水平连铸机微机控制电液伺服系统的应用研究. 博士学位论文. 北京理工大学, 1994
61. 王渝. 恒流源液压控制阀特性的研究. 中国流体传动与控制专业学会论文集, P42~P46. 1987
62. 1172 Frequency response analyser operating manual. Solartron Electronic Group Limited, 1975
63. 亚当斯 L F. 工程测试与检测仪表. 邓延光, 胡大统译. 北京: 机械工业出版社, 1980
64. 贝达特 J S, 皮尔索 A G. 随机数据分析方法. 凌福根译. 北京: 国防工业出版社, 1980
65. 丁汉哲. 试验技术. 北京: 机械工业出版社, 1982
66. 托平 J. 测量误差及处理方法. 穆纬丰译. 北京: 中国农业机械出版社, 1983
67. 市川常雄, 日比昭. 液压工程学. 周兴业译. 北京: 国防工业出版社, 1984
68. 戴诗尧. 随机振动实验技术. 北京: 清华大学出版社, 1984
69. 何国伟. 计量与测试的分析方法. 北京: 国防工业出版社, 1985
70. 陈锦荣. 动态参数测量技术. 北京: 国防工业出版社, 1986
71. 周斌. 自动控制系统实验技术. 北京: 机械工业出版社, 1986
72. 谭尹耕. 液压实验设备与测试技术. 北京: 北京理工大学出版社, 1989
73. ENDEVCO CORPORATION. Dynamic pressure measurement technology. Application oriented text. 1991
74. 吴正毅. 测试技术与测试信号处理. 北京: 清华大学出版社, 1991
75. 卢文祥, 杜润生. 机械工程测试、信息、信号分析. 武汉: 华中理工大学出版社, 1991
76. 机械电子工业部机械专业化办公室. 铸造锻造工艺标准汇编. 北京: 中国标准出版社, 1991
77. 施廷藻. 铸造实用手册. 沈阳: 东北工学院出版社, 1988
78. 赵建康. 铸造合金及其熔炼. 北京: 机械工业出版社, 1985

79. 曹文龙. 铸造工艺学. 北京: 机械工业出版社, 1989
80. 钱立, 马敬仲, 张国臣. 铸铁的孕育. 北京: 北京科学技术出版社, 1987
81. 《特种铸造手册》编写组. 特种铸造手册. 北京: 机械工业出版社, 1976
82. 肖柯则. 铸型涂料. 北京: 机械工业出版社, 1985
83. 史纪定, 嵇光国. 液压系统故障诊断与维修技术. 北京: 机械工业出版社, 1990
84. 嵇光国. 液压系统故障诊断与排除. 北京: 海洋出版社, 1990
85. 嵇光国. 液压系统故障诊断与排除. 液压与气动, 1990, 2, 3, 4 期
86. 任瑞伍. 液压工程实践. 北京: 国防工业出版社, 1991
87. 济南铸锻所. 高压水切割技术试验研究报告. 济南: 1992
88. 钱祥生, 徐鸿本. 液压件制造工艺学. 北京: 机械工业出版社, 1996
89. 杨尔庄. 国际液压气动密封技术的发展趋势. 液压气动与密封, 第 4 期, 1993
90. 刘盛东, 庞淑云. 《航空制造工程手册——机载设备精密加工》, 第八章. 北京: 航空工业出版社, 1996
91. Harwick W. Hydraulic filtration technology for the 90s. Hydraulic & Penumatic. No. 9, 1990
92. 戴元淳辅, 桑原龍司. 气泡. 固形異物除去新フィルター. 油空压技术. 9 期, 1991
93. 魏宸官, 张少华. 电流变技术及其应用. 中国机械工程, 第 1 期, 1996
94. 万汉驰. 一种多功能阀在轴向柱塞变量泵与定量马达闭式系统中的应用. 建筑机械, 第 11 期, 1996
95. Klapper J. Microhydraulic Packs Powerful Muscle into Tiny Space. Hydraulic & Penumatic No. 9, 1992
96. 王存堂. 微型液压系统及其在主动控制中的应用. 液压气动与密封, 第 1 期, 1997
97. 钱祥生, 张金. 计算机辅助设计. 液压气动与密封, 第 2 期, 1995
98. 徐绳武. 装备柔性化、工厂自动化. 液压与气动, 第 2 期, 1992
99. Freudenberg 公司. 产品介绍. The Simrit Standard Catalogue.
100. 大竹惟雄. 油压シリンダ用シールの適正使用法. 油空压设计. 78. 7~79. 12