

流体传动及控制技术的评述*

王益群 张 伟

(燕山大学机械工程学院 秦皇岛 066004)

摘要: 在回顾流体传动及控制技术发展历史的基础上, 对 20 世纪 90 年代后期以来液压技术的发展作了综合评述, 它集众多学科于一体, 具有显著的机电液一体化特征, 尤其是与计算机技术相结合, 使得液压技术在系统设计、控制、故障诊断、虚拟现实等方面有了长足的进步。最后对流体传动及控制技术的发展前景进行了预测, 指出关注环保性能; 元件与系统的集成化、模块化、智能化、网络化; 新材料的使用将是未来的发展方向。

关键词: 流体传动及控制 历史回顾 发展现状 未来展望

中图分类号: TH137

0 前言

流体传动与控制技术发展到今天, 已经成为一门与其他学科相互关联、交叉的综合性学科。它是集液压技术、微电子技术、传感检测技术、计算机控制及现代控制理论等众多学科于一体的高交叉性、高综合性的技术学科, 具有显著的机电液一体化特征。

回顾了流体传动与控制的发展过程, 评述了发展现状, 对流体传动及控制的发展前景进行了预测。

1 历史回顾

作为流体传动与控制理论基础的流体力学、流体传动理论是人类在生产实践中逐步发展起来的。

对流体力学学科的形成作出第一个贡献的是古希腊人阿基米德(Archimedes), 他建立了物理浮力定律和液体平衡理论。

1648 年法国人帕斯卡(B.Pascal)提出静止液体中压力传递的基本定律, 奠定了液体静力学基础。

但流体力学尤其是流体动力学作为一门严密的科学, 却是在经典力学建立了速度、加速度, 力、流场等概念, 以及质量、动量、能量三个守恒定律之后才逐步形成的。

17 世纪, 力学奠基人牛顿(Newton)研究了在流体中运动的物体所受到的阻力, 针对粘性流体运动时的内摩擦力提出了牛顿粘性定律。

1738 年瑞士人欧拉(L.Euler)采用了连续介质的

概念, 把静力学中的压力概念推广到运动流体中, 建立了欧拉方程, 正确地用微分方程组描述了无粘性流体的运动。

伯努利(D.Bernoulli)从经典力学的能量守恒出发, 研究供水管道中水的流动, 进行试验分析, 得到了流体定常运动下的流速、压力、流道高度之间的关系——伯努利方程。

欧拉方程和伯努利方程的建立, 是流体动力学作为一个分支学科建立的标志, 从此开始了用微分方程和试验测量进行流体运动定量研究的阶段。

1827 年法国人纳维(C. L. M. Navier)建立了粘性流体的基本运动方程; 1845 年英国人斯托克斯(G. G. Stokes)又以更合理的方法导出了这组方程, 这就是沿用至今的 N-S 方程, 它是流体动力学的理论基础。

1883 年英国人雷诺(O. Reynolds)发现液体具有两种不同的流动状态——层流和湍流, 并建立湍流基本方程——雷诺方程。

1795 年英国人布拉默(J. Bramsh)发明了第一台液压机, 它的问世是流体动力应用于工业的成功典范, 到 1826 年液压机已被广泛应用, 此后还发展了许多水压传动控制回路, 并且采用机能符号取代具体的设计和结构, 方便了液压技术的进一步发展。

19 世纪是流体传动技术走向工业应用的世纪, 它奠基于流体力学成果之上, 而工业革命以来的产业需求为液压技术的发展创造了先决条件。

1905 年美国詹尼(Janney)首先将矿物油引入传动介质, 并设计研制了带轴向柱塞机械的液压传动装置, 并于 1906 年应用于军舰的炮塔装置上, 为现代液压技术的发展揭开了序幕。

1922 年瑞士人托马(H. Thoma)发明了径向柱塞泵。

* 纪念《机械工程学报》创刊 50 周年——“机械工程技术的历史、进展与展望”主题征文。国家自然科学基金资助项目(60074022)。20030729 收到初稿, 20030812 收到修改稿

1936 年美国威克斯(H. Vickers)一改传统的直动式机械控制机构,发明了先导控制式压力控制阀。稍后电磁阀和电液换向滑阀的问世,使先导控制形式多样化。

20 世纪是流体传动与控制技术飞速发展并日趋成熟的世纪,也是控制理论与工程实践相结合飞速发展的世纪,它为流体控制工程的进步提供了强有力的理论基础和技术支持。

1922 年美国米诺尔斯基(N. Minorsky)提出用于船舶驾驶伺服机构的比例、积分、微分(PID)控制方法。

1932 年瑞典人奈奎斯特(H. Nyquist)提出根据频率响应判断系统稳定性的准则。

1948 年美国科学家埃文斯(W. R. Evans)提出了根轨迹分析方法,同年申农(C. E. Shannon)和维纳(N. Wiener)出版《信息论》与《控制论》。至此线性控制理论基本形成,它对液压控制技术的发展产生了深刻的影响。

1950 年摩根(Moog)研制成功采用微小输入信号的电液伺服阀后,美国麻省理工学院的布莱克本(Blackburn)、李(Lee)等在系统高压化和电液伺服机构方面进行了深入研究,使电液伺服机构首先应用于飞机、火炮液压控制系统,后来也广泛用于机床及仿真装置等伺服驱动中。

1970 年前后信号功率介于开关控制和伺服控制之间的比例阀问世。此后,伴随微电子集成和数字化技术的快速进步,机电液一体化技术得到长足发展,特别是以电液先导控制技术为特征的液压控制技术趋于成熟,液压和电子技术的竞争与合作引起广泛关注。

二战后液压技术在航天、国防、汽车和机床工业中得到广泛应用,并且走向产业独立发展,西方各国相继成立了行业协会和专业学会,液压传动和控制被作为新兴技术得到重视。这一时期称得上是液压工业的黄金岁月。

1960 年布莱克本(Blackburn)的《液动气动控制》和 1967 年梅里特(Merritt)的《液压控制系统》两部科学著作相继问世,对液压控制理论作出了系统、科学的阐述。

从 1962 年开始制定液压元件的标准(CETOP, ISO / TC131)。

在主阀结构上,早期采用水介质时大多选择锥阀结构;油压控制发展后圆柱滑阀结构成为主流。1970 年前后二通插装阀(大中功率)以及螺纹插装阀(中小功率)问世并快速发展,使得滑阀结构受到冲击。

20 世纪是流体传动及控制技术逐步走向成熟的时代。随着现代科学技术的飞速发展,它不仅可充当一种传动方式,而且可以作为一种控制手段,充当了连接现代微电子技术和大功率控制对象之间的桥梁,成为现代控制工程中不可缺少的重要技术手段。

2 发展现状

进入 20 世纪 90 年代后期,随着自动控制技术,计算机技术,微电子技术、可靠性技术的发展以及新材料的应用,使传统的液压技术有了新的进展,也使液压系统和元件的水平有很大提高。

(1) 液压传动与微电子技术相结合,实现机电一体化集成是新型元件和系统发展的主要方向。从元器件结构组成上,往往是集传感器、控制放大器、执行器于一体,构成集成化功能单元。而系统应用上则趋向于采用集成单元来实现复合功能。

多功能集成电液元件、具有数字接口的电液元件和检测元件快速发展。由于电子元件的小型化、集成化,现在可以将电子驱动线路、信号处理、储存等单元内置于液压元件中。集成式传感器和两路通信接口的液压元件实现与所有其他液压元件及主计算机的通信。传感器本身都存储了标定数据,控制器将下达和读取此标定数据,以获取其输出信息,元件的关键参数可以存储于自身携带的只读存储器中。新型多功能电液元件增加了液压系统的技术含量,提高了它的附加值。

由于内置电子线路以及串行通信总线技术的发展,在一些大型现代化的电液系统,如冶金、大型矿山机械及工程机械中,泵、马达、阀等元器件装有各种必要的传感器和两路数据连接器,不仅可实现各种功能的控制,还可实现各元件状态的监测,使液压系统故障诊断技术有了进一步的发展。

现代的液压系统是高度机电一体化的大型复杂控制系统。中央工控机起中央调度、管理、监控和故障诊断等作用,PLC 控制器直接控制各子系统或各液压件,各子系统或液压件能根据自身特殊要求完成采集、处理、储存某些信号的功能。

中央计算机不断访问所有元件的当前特性,并且与标准特性相比较,若显著超出,可发出必要的警报。在中央计算机软件的不断开发,如逻辑运算判断、频谱分析和小波分析等,就可进一步实现液压系统的故障诊断。

(2) 计算机的广泛应用和性能的不断提高使得流体传动及控制技术有了新的发展。

有限元分析在流体力学中的应用受到广泛重视,尤其在低速流动和流体边界形状复杂的问题中,优越性显著。可以对液压元件中的流场进行数值模拟,得到流场的速度矢量图和流线图,对于分析元件的噪声和能量损失、优化设计元件流道等具有重要的意义。

计算机辅助设计(Computer aided design, CAD)大大地提高了工作效率。利用 CAD 技术全面支持液压产品从概念设计、外观设计、性能设计、可靠性设计到零部件设计的全过程。在绘图方面,从系统图、装配图到整个三维实体图都可用计算机生成并绘出。专用的液压集成块 CAD 系统可在计算机上演示阀块的立体图,自动检查内部管道是否相交,管道之间壁厚是否合理,设计是否优化等,并由交互设计向智能设计发展。

对系统设计来说,除能方便地根据设计要求绘出系统图外,还能演示在系统各种不同参数时输出的动态特性,检查各种控制策略的效果,以便选择合理的系统参数。不断地对现有的液压 CAD 设计软件进行二次开发,建立知识库信息系统,它将构成设计—制造—销售—使用—设计的闭式循环系统。

新控制策略不断被采用。流体传动及控制技术不仅能有效地传递能量,并且能控制和分配能量。液压系统由于其典型的非线性、低阻尼、时变性以及无法得到精确的数学模型,用经典的 PID 控制往往不能得到满意的效果。为了得到准确的快速响应,各种控制策略被广泛地研究。

自适应控制(AC)是指当被控对象本身特性及其外部环境了解不多时或者它们在正常运行中存在变化时,对其有自适应能力和鲁棒性,它具有如下功能:对象信息的在线辨识、综合控制量的可调控制器、对性能指标进行闭环控制。

鲁棒控制指的是当系统模型包含不确定性因素时,仍然希望控制系统始终保持良好性能的一种控制方式。近年出现的 H_{∞} 设计方法是鲁棒控制的代表。 H_{∞} 鲁棒控制实际上就是实现在最坏干扰的情况下,使系统的误差在 H_{∞} 空间的某种范数意义下最小。该方法运用经典函数论和算子理论,在 H_{∞} 模约束下成功地解决了多变量定常系统镇定补偿问题。

智能控制(IC)通过对系统特征的描述和提取,符号和环境的识别,知识库和推理机的开发以及控制规律的在线学习和修正,使系统对实际环境或过程有一定的组织、决策和规划能力,模拟人的智能和思维过程来实施控制。使控制系统具有人脑那样的感知、学习和推理能力,具有高度的自适应性、

自组织性、鲁棒性和容错能力,对改善液压伺服系统的控制性能有巨大潜力。

还有其他诸多控制手段在这里不进行一一列举,它们的不断发展和完善,为电液控制系统在各领域的不断推广使用奠定了基础。

故障诊断技术有了长足的进步并向智能化发展。液压系统的故障诊断技术在吸收和应用其他领域成果的基础上,结合液压系统特有的失效形式和故障机理,建立相应的知识库和规则库,利用信息处理技术,对提取的状态监测信号进行模式识别或分类,对系统故障进行诊断、机理分析、故障定位和故障预报等。

对于以算法为核心的信息处理与集启发式知识获取、处理和利用于一体的智能信息处理技术,结合人工智能和领域专家知识的智能专家系统是进行液压系统故障诊断的有效途径。

虚拟技术在液压行业中得到应用。虚拟仪器(Virtual instrument)是指通过应用程序将通用计算机与模块功能化硬件结合起来,通过友好的图形界面来操作计算机,从而完成对被测量的采集、分析、数据存储等。虚拟仪器的兴起使得计算机在测试过程中的作用得以充分发挥,“软件就是仪器”已成为新的测试理念。虚拟仪器在液压系统的状态监测和故障诊断方面起着重要的作用。

软测量(Soft-sensing)特点就是以计算机和软件为核心,根据某种最优准则,选择比较容易测得的一种或几种辅助变量,来估计不能直接测量的主要变量。例如根据液压测试特点,借助虚拟仪器系统,在动态流量的测试中引入软测量技术,通过测量特定管路内油液的压力、粘度、温度等易得信号,就能间接得到流量信号。

虚拟控制系统(Virtual control systems)是考虑到被控系统的各种控制目标、制约条件,在计算机上用软件建立虚拟被控系统,用离线指导与在线闭环控制的方法进行工作。将计算机仿真及实时控制结合起来,将模型放入“硬”件和系统中,借此在建造实际样机之前,便可在软件里修改其特性参数,以达到最佳设计结果。虚拟控制系统是一个基于建模技术、多领域仿真技术、信息管理技术、交互式用户界面技术和虚拟现实技术、能够完成设备仿真、控制仿真和管理仿真的大型仿真系统。

网络技术将促进流体传动行业多方面的发展。企业内部网(Intranet)和企业外部网(Extranet)的发展亦进入实用化阶段。企业内部网可以实现企业通信、构成 MIS 系统、实现 CAD / CAM 等功能。企业能够将自己推销给所有用户,可与分布在各地

的销售部门进行订货、供货等通信。

企业外部网是指对一些主要的用户、产品分销商、原材料供应商或承包商等贸易伙伴的外部连接,用户可以藉此了解液压企业产品的性能、价格,进行电子订货,还可以参与产品的开发,反馈产品的应用情况。

通过网络技术,可以使液压气动产品的设计、生产、销售和用户信息反馈及时挂起钩来。用户要求和设计信息可传给设计部门,设计结果通过网络传达到相应的生产部门及其他机构,可以在网上就出现的问题交流看法和提出建议,最终实现整个产品设计与生产过程的无纸化、文件的电子化。

总之流体传动与电子、计算机、通信等技术相结合,大大促进了流体传动元件及系统的发展。流体传动及控制技术已经成为现代机械工程的基本要素和工程控制关键技术之一。

3 未来展望

有统计资料表明:近 20 年来液压技术的发展来源于自身的科研成果仅约 20%,来源于其他领域发明的占 50%,移植其他技术研究成果占 30%,没有任何一种学科能关起门来发展,这也是所有学科的共同趋势。未来液压技术难有惊人的技术突破,应当主要靠现有技术的改进和扩展,不断扩大其应用领域以满足未来的要求。其主要的发展趋势将集中在以下几个方面。

(1) 流体传动与控制设备更加注重其环保性能。污染环境是流体传动工业面临的巨大挑战之一,也是妨碍它与电气和机械传动系统有效竞争的一大因素。

泄漏控制是液压系统需要解决的首要问题。它主要包括两个方面:既要防止液体泄漏到外部造成环境污染,又要防止外部环境对系统的侵害。今后将发展无泄漏元件和系统,发展集成化和复合化的元件和系统,实现无管连接,研制新型密封和无泄漏管接头、电动机泵组合装置。无泄漏将是液压界今后努力的重要方向之一。

另一考虑是加大非石油基液压油的使用力度。为了保护环境,减少漏油对环境危害,可采用降解迅速的液体介质以及水基液压油。

为进一步降低污染,必须应用先进的污染控制和过滤技术,使液压油保持清洁。将发展封闭式密封系统,防止污染物侵入系统。针对来自零件制造和装配过程的污染物,将建立有关保证元件清洁度的技术规范和经济有效的清洗方法。

水压技术是用过滤后的淡水或海水代替矿物油作为液压介质的一门技术,由于不存在污染环境和易燃烧这两大严重缺点,将会在冶金、采矿、食品机械和海洋开发等领域推广开来。

(2) 流体传动及控制系统变得更为集成化、模块化、智能化和网络化。由电子直接控制的元件将得到广泛采用,如电子直接控制液压泵,只要改变电子控制器的程序,即可实现液压泵的各种调节方式,实现合理分配功率,自动保持最佳状态,实现软启动等功能。具有内置式标准化传感器和计算机的智能化液压元件也将成为应用的主流。

借助现场总线,实现高水平的信息传递,可以对流体传动及控制大系统实现综合多目标最优控制——效率最优、功能最优或预选目标最优。可以对液压系统的流量、压力、温度和油液污染等数值实现自动测量和诊断,实现系统的主动维护。

流体传动及控制系统可实现加工、装配和调试等过程的全球化虚拟制造,并对研究过程、生产过程、营销过程实现全球网络实时管理与经营。

(3) 新材料的发展及使用。在新材料的发展方面,陶瓷材料由于其优越的耐磨性、抗气蚀性能、化学稳定性好、摩擦因数低,使其在纯水液压泵和阀上得到应用。陶瓷液压件的生产工艺将进一步成熟,成本降低,可以在工业中得到推广。

纳米材料、纳米工艺的进展,将为流体传动与控制技术发展开拓新的前景。流体元件加工精度及表面质量达到纳米量级,从而使元件效率、寿命得以提高,纳米技术将可能使流体传动及控制成为微机械系统的重要组成部分,它的研究已成为流体传动与控制技术新的前沿。

4 结论

综上所述,流体传动及控制技术必须在充分发挥自身优势和借鉴其他领域的发展成果,并不断进行改进和创新,才能在未来的竞争中获得发展。

展望新的世纪,液压技术将会面对新的机遇与挑战,我们对流体传动及控制技术的前景充满信心,仅以此文与液压界同仁共勉。

参 考 文 献

- 1 路甬祥. 流体传动与控制技术的历史进展与展望. 机械工程学报, 2001, 37(10): 1~7
- 2 杨尔庄. 21 世纪液压技术现状及发展趋势, 液压与气动, 2001(6): 1~2
- 3 史维祥. 流体传动几个重要方面的发展. 液压气动与密

- 封, 2000(1): 2~6
- 4 黄人豪, 濮凤根. 液压控制技术回顾与展望. 液压气动与密封, 2002(12): 1~9
 - 5 钱祥生. 液压技术发展展望. 液压气动与密封, 2000(4): 1~5
 - 6 杨尔庄. 我国液压气动技术与展望. 液压与气动, 1998(6): 1~6
 - 7 Murrenhoff H. 液压控制技术发展趋势(第一部分). 吴根茂译. 工程设计, 1997(3): 20~29
 - 8 Murrenhoff H. 液压控制技术发展趋势(第二部分). 岳继光译. 工程设计, 1998(1): 5~9
 - 9 高殿荣, 王益群. 液压锥阀流场的有限元法解析. 机床与液压, 2000(2): 12~14
 - 10 周惠友, 钟廷修, 王益群. 智能 CAD 技术在液压泵站三维建模中的实现. 机床与液压, 1999(5): 26~27
 - 11 Backe W. The present and future of fluid power. Proc. Instn. Mech. Engrs., 1993, 207(4): 193~212
 - 12 王益群, 高英杰. 液压传动及控制系统故障诊断技术的新进展. 燕山大学学报, 1998(1): 1~3
 - 13 姜万录, 王益群, 孔祥东. 齿轮故障的混沌诊断识别方法. 机械工程学报, 1999, 35(12): 45~47
 - 14 李运华, 史维祥, 林延忻. 近代液压伺服系统控制策略的现状与发展. 液压与气动, 1995(1): 3~6
 - 15 Burrows C R. Fluid power progress in a key technology. JSME Int. J., 1994, 37(B4): 691~701
 - 16 Felix Paturi R. Harenberg Schluesseldaten Entdeckungen und Erfindungen. Dortmund, Germany: Harenberg Lexikon Verlag, 1998
 - 17 王益群, 王燕山. 电力控制研究的进展. 液压与气动, 2002(7): 1~4
 - 18 王益群, 曹栋璞, 陈星, 等. 热连轧卷取机踏步系统鲁棒 H_{∞} 控制研究. 机械工程学报, 2002, 38(10): 62~64
 - 19 Robert W R, Kash E. The Complexity Challenge, Technological Innovation for the 21st Century. London and New York: PINTER, 1999
 - 20 王益群, 陈星, 曹栋璞. 基于遗传神经网络的电液伺服系统自适应控制. 机床与液压, 2002(5): 75~77
 - 21 董秀林, 周福章, 史维祥. 流体控制技术的发展 and 展望. 洛阳工学院学报, 1997(9): 22~25
 - 22 刘涛, 王益群, 姜万录. 基于软测量技术的虚拟动态流量计的模型研究. 液压与气动, 2002(9): 4~5
 - 23 Wang Y Q, Zhang W, Gao Y J, et al. Research on digital simulation of virtual rolling mills for continuous cold strip rolling process. In: The 4th International Symposium on Fluid Power Transmission and Control (ISFP' 03), Wuhan, 2003: 1~7
 - 24 陈鹰, 许宛菁, 顾越州, 等. 网络技术与液压气动行业. 液压与气动, 1998(5): 5~8
 - 25 张奕. 水液压系统的发展现状与面临的挑战. 液压与气动, 1999(1): 2~3
 - 26 杨华勇, 周华, 路甬祥. 纯水液压传动的应用与研究新进展. 中国机械工程, 2000, 11(12): 1430~1433
 - 27 刘文艳, 胡国清. 陶瓷液压技术综述——目前液压发展的新方向. 机床与液压, 1998(6): 3~6
 - 28 王意. 流体技术和电子技术的结合与竞争. 液压与气动, 1998(5): 1~5
 - 29 葛宜远. 流体传动及控制技术的新成就. 液压与气动, 1998(2): 1~3
 - 30 李运华, 史维祥. 流体动力技术的现状与发展. 机床与液压, 1994(4): 187~193
 - 31 Thomas A E. Clashing Views on Controversial Issues in Science, Technology and Society. USA: Dushkin/McGraw-Hill 2000 Sluice Dock Guiford, 2000

SUMMARY OF FLUID POWER TRANSMISSION AND CONTRAL TECHNOLOGY

Wang Yiqun Zhang Wei
(Yanshan University)

Abstract: The historical progress of fluid power transmission and control technology is reviewed, and present situation of hydraulic technology during late 1990s is summarized. The hydraulic technology is the selection of multi-discipline, which has the character of the integrative system of machinery, electronic and hydraulic devices. And the hydraulic technology combines computer technology to make more progresses in system design, control, fault diagnosis, virtual reality of the hydraulic technology. Finally its development trend is forecasted, which is focusing on its environmental protection, the integration, modularization, intelligence and networking of components and hydraulic circuits and applications of the new materials.

Key words: Fluid power transmission and control

Historical review

Present situation

Future expectation

作者简介: 王益群, 男, 1938 年出生, 校长, 教授, 博士生导师, 中国机械工程学会流体传动及控制分会主任, 浙江大学流体传动及控制国家重点实验室学术委员会副主任, 《机械工程学报》编委。主要研究方向为电液伺服控制技术, 轧机板形厚控制。获国家科技进步二等奖 1 项、部省级成果奖 4 项, 发表论文 100 余篇。