

# 工程机械液压控制技术的研究进展与展望\*

王庆丰 魏建华 吴根茂 张彦廷

(浙江大学流体传动及控制国家重点实验室 杭州 310027)

摘要：液压传动及控制技术在现代工程机械中发挥了越来越重要的作用。如何有效地发挥液压控制技术在提高工程机械整机的控制性能、可靠性等方面的作用，是液压行业和工程机械行业必需面对的课题。概述了国内外及浙江大学流体传动及控制国家重点实验室近年来在工程机械液压控制技术方面的研究进展，展望了该技术领域的发展方向和研究重点。

关键词：工程机械 液压传动及控制 研究进展

中图分类号：TH137

## 0 前言

作为主要施工设备的工程机械，目前 95% 以上都采用了液压传动与控制技术。液压传动与控制技术，是促进工程机械主流方向不断发展的基础条件：

在安装空间狭窄、对重量有严格限制条件下，实现大功率、多执行器的集中灵活控制(机位、远控、遥控)。在只能以发动机作为原动力情况下，达到功率的综合利用与限制。在相对更恶劣的外场工作环境和受油箱容积限制而出现较高油温情况下，保证运作的可靠性、安全性、舒适性。环境友好。

液压传动及控制技术对工程机械整体性能的影响越来越大。如何有效地发挥液压控制技术在提高工程机械整机的控制性能、可靠性等方面的作用，是液压行业和工程机械行业必需面对的课题。

## 1 发展趋势及研究进展

### 1.1 电子控制及自动化

(1) 电子控制及自动化的目标。对于液压挖掘机、起重机等作业机械系统的电子控制化，以液压系统的电子控制为主要特征，其目标主要如下<sup>[1]</sup>。

提高机能、性能：如挖掘机的自动挖掘(轨迹控制、自动反复挖掘、预先设定挖掘形状控制等)、作业范围限制(防止干涉、防止埋藏物破损等)。提高操作性：作业模式切换(优先作业等)、防止摇晃、防止冲击、振动挖掘等。提高安全性、可靠性和承

受能力：防止干涉、防止倾覆、遥控操作。提高能源利用率：从发动机到液压功率的转化效率高，泵输出流量的最优控制，能量再生。

对于轮式装载机、推土机、自卸卡车等驱动系统的电子控制化，除上述目标外，其主要目标还包括 HST(静液压驱动)<sup>[2,3]</sup>和 HMT(混合液压机传动)等的电子控制化<sup>[1]</sup>。

(2) 多路阀采用电液比例先导控制。多路阀采用电液比例先导控制，不但提高了执行器的工作性能，更为进一步的远控与无线遥控建立了坚实基础<sup>[4]</sup>。

(3) 电子泵技术。将变量泵的压力、流量参数通过电子控制系统控制，电控器随机处理相关传感器检测到的流量与压力信号，进行诸如恒压、恒流、恒功率以及各种复合控制，在提高变量泵性能、节能、简化系统和提高可靠性等方面，显现出惊人的效果。图 1 是配置压力、转速和倾角三个传感器的内置微机控制的电子泵<sup>[5]</sup>。

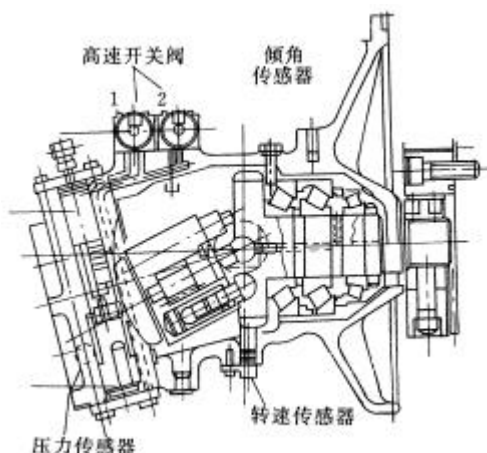


图 1 微机控制的电子泵

(4) 大型、特种工程机械的电子化控制。对于大型工程机械，电子控制是无可替代的，其首要目

\* 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(59975080)和教育部高等学校博士学科重点专项科研基金(20020335037)资助项目。20031023 收到初稿，20031105 收到修改稿

标是降低能耗、提高工作能力和安全可靠<sup>[6]</sup>。

三菱公司生产的超大挖掘机(420 t, SMEC), 其液压系统拥有 10 套主泵, 其中 2 套用于回转马达, 形成 HST 系统。采用了分布式电子控制系统, 并采用双向双传输系统以保证可靠性<sup>[7]</sup>。

图 2 是浙江大学与徐工集团共同研制的高空作业 / 消防车平台水平电液控制系统, 是一个集水平度检测、信号处理及放大、电液比例 / 伺服转换等为一体的工程机械载人平台水平电液控制系统<sup>[8]</sup>。该项技术还推广应用于桥梁检测车水平控制系统、环保铰吸式挖泥船铰刀头的水平控制。

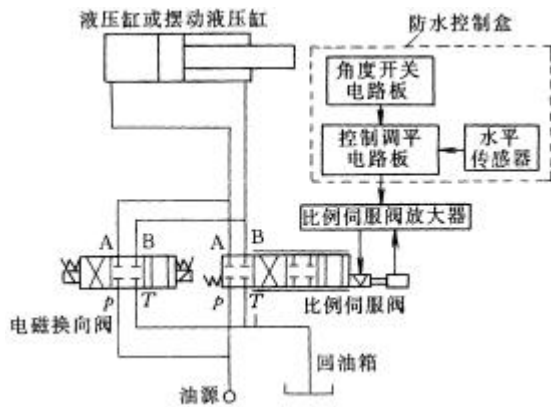


图 2 高空作业/消防车平台水平电液控制系统原理图

塔带机是一种将皮带运输机及塔式起重机有机结合在一起的大型特种工程机械, 用于将混凝土远程直接输送到施工现场, 对半径为近百米区域直接进行混凝土浇筑。其主起升泵马达电液控制系统, 既要满足塔机状态下的高速重载起升要求, 又要满足带机状态下的精确定点浇筑要求。塔带机电液控制包括采用封闭钢丝绳牵引的变幅小车液压系统电子控制, 具有特大回转惯量的塔机回转电液控制, 以及自重质量数百吨、且存在严重偏载的塔带机同步自顶升电液控制。浙江大学会同相关工程设计公司, 研制了塔带机电液控制系统, 并已成功应用于大型水电站的围堰及大坝的混凝土浇筑施工。

另一典型的特大型工程机械是盾构隧道掘进机, 是先进的隧道施工机械。其液压系统的电子控制是盾构掘进机中的关键技术之一, 包括刀盘液压驱动系统、盾构推进液压系统和螺旋输送液压控制系统等<sup>[9]</sup>。目前浙江大学和中铁隧道集团协作, 正在开展盾构机液压系统的电子控制化研制工作。

### 1.2 智能化

尽管目前工程机械的液压 - 机械系统的智能化还处于初级阶段, 却已对工程机械的性能与质量产生了重要影响。采用相关的智能化控制, 工程机械

的控制质量得到显著改善。例如, 通过采用高级控制策略, 可以解决挖掘机运动的稳定性问题, 减少启动和停止时的振动。图 3 是浙江大学和日本日立建机公司研究人员提出的一种针对工程机械大惯性系统加减速运动控制的方法: 基于压差传感的进、出口节流独立调节原理<sup>[10]</sup>。采用两个独立调节的电液比例节流阀 3、4, 阀 3 采用压差传感方式控制执行器进油侧流量; 执行器出油侧的压力由阀 4 进行控制, 而不再受执行器进油侧流量的影响。这种控制模式可以缩短大惯性负载加速过程时间, 避免减速及制动过程中执行器出油侧的压力冲击, 提高系统的阻尼比, 这是改善大惯性负载加速特性、减速及制动过程平稳性的有效途径之一<sup>[11]</sup>。

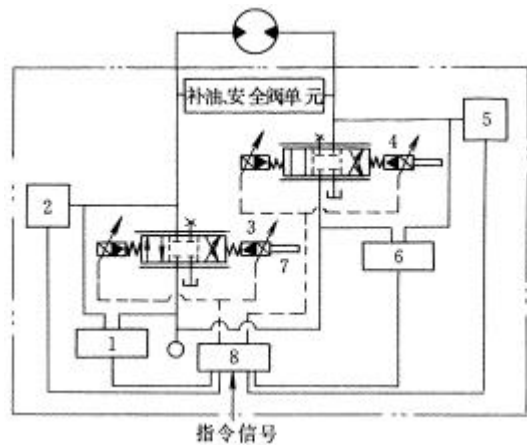


图 3 基于压差传感的进、出口节流独立调节控制原理

- 1、6. 压差传感器 2、5 压力传感器 3. 进口电液比例节流阀
- 4. 出口电液比例节流阀 7. 阀芯位移传感器 8. 控制器

智能化最典型的例子就是工程机械无线遥控技术(无人挖掘机等)。它集成了更先进的液压控制、通信和图像处理技术。极大改善了操作人员的工作环境, 降低了由于视觉受限制所带来的误操作事故, 提高了自动化程度。如图 4 所示, 是由无线信号操控的无人操作挖掘机<sup>[12]</sup>。可以说, 进一步的智能化, 将需要诸如视觉技术、图像处理、材料和土壤检测等新技术的组合<sup>[6,13,14]</sup>。

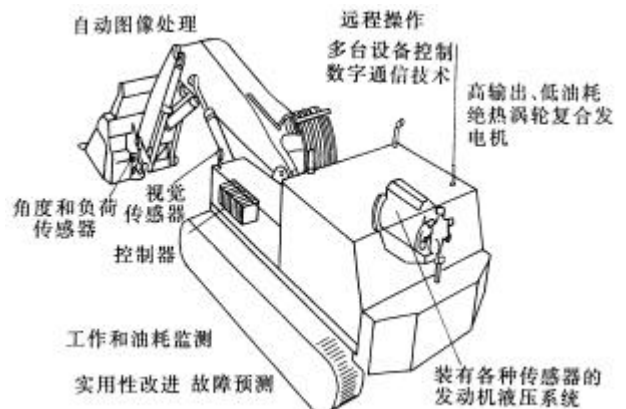


图 4 无人操作液压挖掘机

### 1.3 节能

面对经济性和环境问题，节能成为越来越重要的课题。工程机械的节能主要包括液压系统的节能和从发动机到液压系统的全局功率适应两个方面。

#### 1.3.1 液压系统的节能

(1) 开中心负载适应系统(图 5)：这种简易型节能措施，在引进的和国产的工程机械中，都多有应用<sup>[15,16]</sup>。

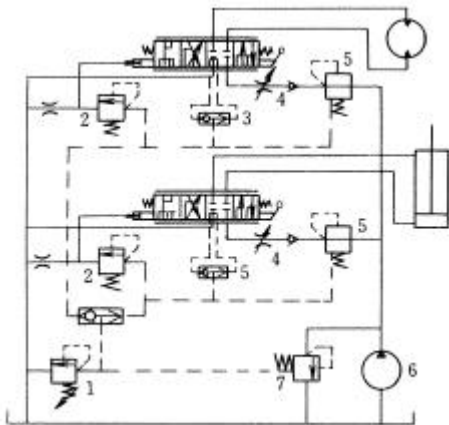


图 5 四通多路阀开中心负载敏感系统

- 1. 系统限压先导阀 2. 限压阀 3. 梭阀网络 4. 可变节流器
- 5. 二通压力补偿器 6. 定量泵 7. 三通压力补偿器

(2) 闭中心负载适应系统：必须配置负载敏感泵，成本高，但能基本达到与系统所需压力流量匹配，节能效果更为明显<sup>[17~19]</sup>。图 6 即为在挖掘机上应用的一种负载敏感系统<sup>[20]</sup>。

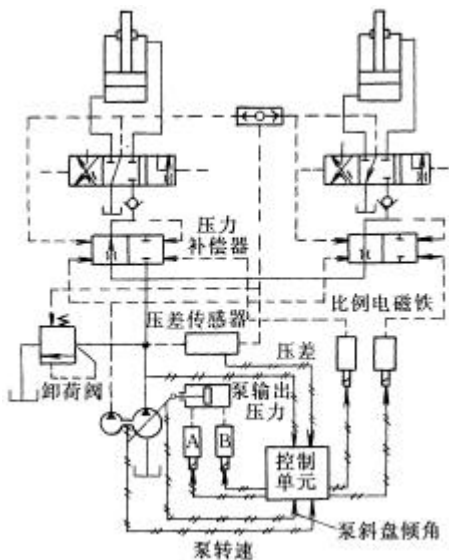


图 6 液压挖掘机负载敏感系统

图 7 是采用双泵 - 双阀结构的液压系统，控制阀实现串并联油路组合，获得较好的操作性，使得两泵能充分利用发动机的能量<sup>[21]</sup>。

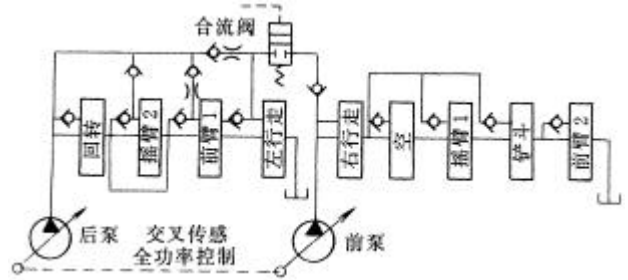


图 7 双泵 - 双阀结构的液压系统

一些工程机械执行机构与液压源距离远而引起的长管道问题，使得无法采用现有负载敏感技术。即使采用非负载敏感式定量泵加电液比例多路阀的控制方式，位于定量泵与电液比例多路阀之间的长管道，仍然会导致作业机构动作滞后或者作业精度差等问题。对此，浙江大学研究人员提出了相应的管道优化设计理论以及电液混合负载敏感系统的解决方案(图 8)。针对阀控系统，提出了用于判断能否忽略其中管道效应的理论判据<sup>[22]</sup>。

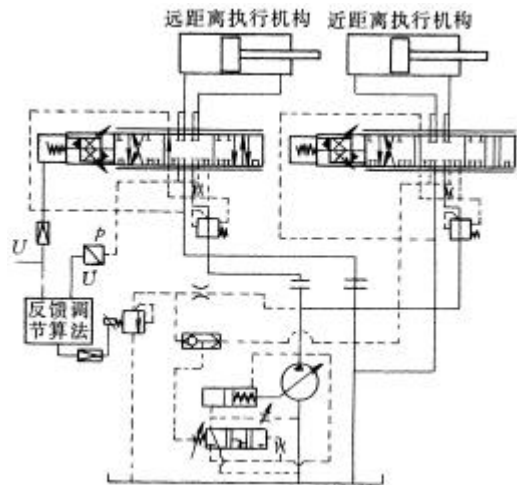


图 8 电液混合负载敏感系统

(3) 抗流量饱和节能高效同步操作系统：工程机械大多为单泵或双泵供油、多执行器同时工作。当泵流量不足时，小压差(大负载压力)执行器的流量就会变小或为零，使设备不能正常工作，甚至出现危险或事故工况。图 9 所示为这种负载传感补偿(LSC)非饱和控制的原理之一<sup>[4]</sup>。当出现流量饱和时，各补偿器的设定值同时相应降低，各负载之间工作速度比例关系仍然保持原设定值不变。这种系统将工程机械的操作性、节能、安全性提高到一个新水平。

(4) 负流量控制：对于使用六通多路阀的液压系统的节能新亮点是所谓的“负流量控制”<sup>[4]</sup>，如图 10 所示。它是通过在多路阀中位回油通道上设置流量检测元件，并将此流量信号引至具有负流量控制功能的变量泵，以改变泵的排量，最终

达到控制旁路回油流量为一个较小的恒定值，从而减少旁路损失的目的。

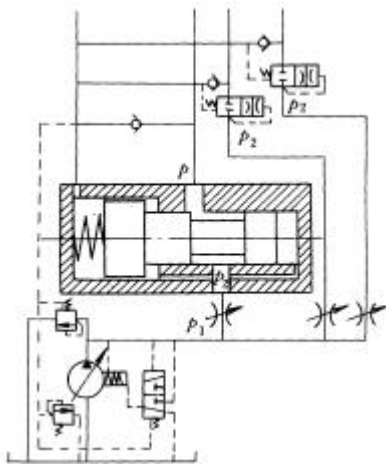


图 9 抗流量饱和的节能高效同步操作系统原理图

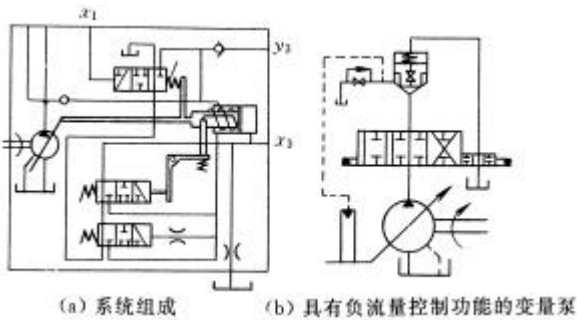


图 10 六通多路阀系统的负流量控制

### 1.3.2 发动机与液压系统的功率适应控制

(1) 局部负载时的模式切换控制。如图 11 所示，通过新型微机系统，在环境改变时会主动改变发动机的转速和功率，按照多种模式(如 P 模式，强调工作量的重要性；E 模式，强调油耗和噪声；L 模式，强调工作精度)工作，微机同时控制发动机和泵。这种系统扩充了传统电调节器的概念，微机根据操纵手柄的指令和工作模式的要求，控制调节器和泵的排量<sup>[6]</sup>。

(2) 基于发动机转速传感的全局功率适应控制。全局功率适应是把包括发动机、液压泵、控制阀及并行作业的液压执行元件作为一个整体来考虑。如为了达到某一作业速度，可以通过改变液压泵排量、液压阀开度、液压马达排量，还可以改变发动油门大小，进而改变发动机转速来实现。通过工程机械全局功率适应，实现从发动机到液压功率的高效率转化。发动机 - 泵控制单元如图 12 所示。液压泵的输入转矩由速度偏差控制，泵可以在发动机不停转的前提下吸收最大限度的发动机功率<sup>[6]</sup>。

### 1.4 环保

国外工程机械液压技术领域对环保给予充分

的重视，主要包括：在工作介质使用可生物分解的液压油，纯水，以减少对环境的污染；降低液压元件及系统由于高压、大流量产生的振动与噪声；不断提高元器件与系统效率，进而节约能源等。其中若干内容前面已经涉及，限于篇幅这里从略。

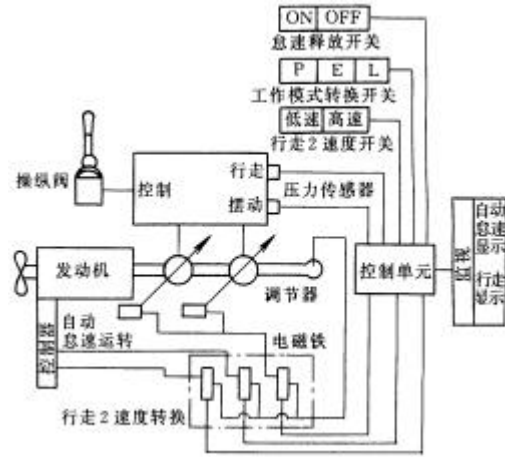


图 11 液压挖掘机的模式切换控制

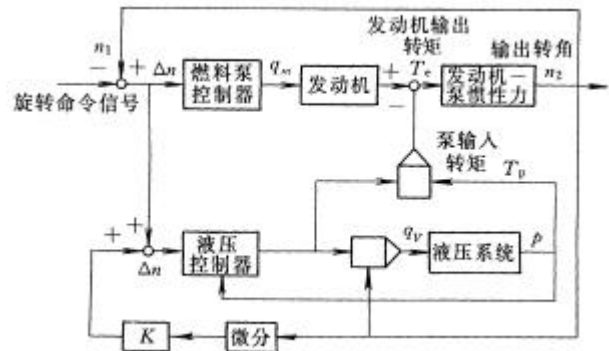


图 12 发动机 - 泵系统控制框图

## 2 展望

今后，工程机械的液压控制技术将更加侧重于在电子控制和节能、可靠性和安全性以及环境适应性等方向的研究与相关技术的开发。

在电子控制方面，由于电子控制化、自动化是提高工程机械附加值的重要方面，更需要设计者关注用户的需求，从用户角度进行设计<sup>[1]</sup>。

在节能方面，进一步提高器件单体效率的难度将越来越大，重点将转移到提高发动机 - 液压系统整体最佳效率的匹配研究<sup>[23]</sup>，以及研发新的实用化的节能液压元件及系统，如自由活塞发动机<sup>[24]</sup>、二次调节系统及相关的液压变压器<sup>[3,25]</sup>等；并更多关注能量的回收技术，如出口节流控制损耗能量、回转制动能量等的回收。目前在汽车上已开始应用的

混合动力系统也将开始应用于工程机械上，日本日立建机公司已研制出世界上第一台采用发动机和电池混合动力的轮式装载机，取得了良好的节能效果。

随着工程机械应用领域的不断拓展，安全法规越来越严，其可靠性和安全性要求也不断提高。提高耐环境性，如耐振性、耐水性、耐热性以及相关器件(特别是电子控制关联器件)的可靠性，将是今后一个重要研究方向。同时还需关注工程机械的安全性、功能可维修性等。

另一个重要研究方向是环境适应性研究，包括振动和噪声控制研究、各种可生物分解液压油的研究和开发等。在振动控制方面，用于高档轿车的液压主动悬架技术开始用于工程机械<sup>[26]</sup>，并将实用化。噪声控制方面，将更多地从液压元件的降噪着手。目前以流体动力学仿真、流体噪声数值模拟和噪声试验统计分析为基础的新的设计方法开始出现<sup>[27~30]</sup>，有望建立起一套液压元件低噪声的结构与参数设计准则，并使液压元件的噪声评价放在设计阶段进行。这也是液压元件设计的一个发展方向。

从1994年德国机械设备协会(VDMA)首先制定出可生物分解的液压油标准(VDMA 24 568、24 569)以来，ISO也制定了相应的标准(ISO 15380)。在瑞士、德国、澳大利亚和北欧等国家和地区，工程机械使用可生物分解的液压油已逐渐成为一种义务。随着各国环境法规的日益严厉，各种可生物分解的液压油的研究和开发步伐将不断加快<sup>[31,32]</sup>。另外，水液压技术<sup>[33]</sup>也有望在一些特殊工程机械上得到逐步应用。

### 3 结论

国内工程机械近年来得到很大发展，年增长率高达70%，应用领域拓展，但一些重要方面与国际相比仍然差距很大。对于技术含量和单台售价较高的工程机械，如液压挖掘机，其液压系统基本是成套地从国外引进。对于技术含量中等、量大面广的工程机械，国内厂家跟踪国外设计思路，对液压系统进行改进设计，并逐步提高国产件的比例，无论是主机还是液压系统，与国外的差距正在缩小，如三一重工的混凝土泵车及拖泵；徐工、浦元的起重机等。

为加速改变工程机械当前的被动局面，应从科研、开发、生产、市场各个环节协同努力。通过消化引进、自主开发，加强高技术含量工程机械液压元件的开发和系统设计；增强工程机械国产液压件的配套能力；同时加速培养工程机械电子控制化、

自动化、智能化所需的复合型人才。

### 参 考 文 献

- 1 油压駆動の世界．日本フルードパワーシステム学会創立30周年出版，日本フルードパワーシステム学会，2003
- 2 魏建华，黄龙贵，郑金传．电液闭式系统通用电子控制器．液压与气动，2003(1)：26~27
- 3 王意．行走机械液压驱动技术发展大观．液压气动与密封，2000(1)：19~28，2000(3)：1~6
- 4 路甬祥．液压气动技术手册．北京：机械工业出版社，2002：352~361
- 5 Masami Ochiai . Recent trend of hydraulic system in excavator . In : SAMOTER96 COVEGNO- MEETING . Verona, Italy, 1996
- 6 Ken Ichiryu . Recent trend and future forecast of hydraulic system and control . In : 9th Achener Fluidtechnisches Kolloquium, B2, 1990 : 345 ~ 369
- 7 Tamura M, Matoba N, Takahashi K. Development of electric-hydraulic control system for large-sized mining shovel . In : Fluid Power Proc. of the Second JHPS International Symposium on Fluid Power, Tokyo, 1993 : 63~68
- 8 魏建华．登高平台消防车电液控制系统．浙江大学博士后研究报告第五章，1996
- 9 房猛，魏建华．全断面隧道掘进机(TBM)材料吊机液压系统分析．液压气动与密封，2002(4)：41~42
- 10 Wang Q F, Gu L Y, Lu Y X . Research on digital control of meter-in and meter-out independent regulating for high inertia load . In : Proceedings of the FPST Division, The ASME International Mechanical Engineering Congress, Nashville, Tennessee, USA, 1999 : 109 ~ 114
- 11 顾临怡，王庆丰，路甬祥．液压驱动的大惯性负载加速特性研究．机械工程学报，2002，38(10)：46~49
- 12 Japan Land Development Technology Research Center . Higher Construction Technology System Development and Component Technology Development by Electronics, 1986
- 13 John D Duffy . A perspective on system and controls engineering in the earth moving and construction industry .In :Proceeding of American Control Conference, Philadelphia, Pennsylvania, 1998
- 14 黄宗益．工程机械机电一体化、机器人化．中国机械工程，1996，7(3)：64~66
- 15 REXOTH 公司．行走设备用液压和电子产品，RC64001．香港：力士乐公司，1995

- 16 Ebertshaeuser H. Fluidtechnik von A bis Z VF-KRAU-SSKOPF/INGENIEUR-DIGEST 1989
- 17 HAVE.PLS 和 PSV 型负载敏感式比例多路阀, D - 7700 - 3. 上海: HAVE 国际贸易(上海)公司, 2000
- 18 Pettersson H, Krus P, Jansson A, et al. Design of pressure compensators for load sensing hydraulic system. In: Proceedings of the 1996 UNACC International Conference On Control, Part 2 of 2, Exeter U.K., 1996
- 19 Krus. P. On load sensing fluid power systems. Linkoping Studies in Science and Technology, Dissertation No.198, 1988
- 20 Ken Ichiryu, Masami Ochiai, Tsukasa Toyooka. Simulation study on load sensing dynamics on hydraulic excavator. In: Proceedings of the 2nd JHPS International Symposium on Fluid Power, Tokyo, 1993: 477 ~ 482
- 21 落合正巳. 建设机械における油圧比例弁とその応用. 油空圧技術, 1994, 33(5): 69~74
- 22 孔晓武. 带长管道的负载敏感系统研究: [博士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2003
- 23 Monika Ivantysynova, Jean-Claude Ossyra. Control concept for hydrostatic drive lines. In: Proceedings of the 4th International Symposium on Fluid Power Transmission and Control, Wuhan, China, 2003: 9 ~ 15
- 24 杨华勇, 夏必忠, 傅新. 液压自由活塞发动机—未来的动力之星. 中国机械工程, 2001, 12(3): 353 ~ 357
- 25 董宏林, 姜继海, 吴盛林, 等. 液压变压器的原理及其在二次调节系统中的应用. 液压与气动, 2001(11): 30~32
- 26 Yasutaka Tsuruga. Study on hydraulic active suspension for wheeled hydraulic excavator. In: Proceedings of the 3rd JHPS International Symposium on Fluid Power, Yokohama, 1996: 367 ~ 372
- 27 高红, 傅新, 杨华勇, 等. 锥阀阀口气穴流场的数值模拟与试验研究. 机械工程学报, 2002, 38(8): 27 ~ 30
- 28 Ji H, Fu X, Yang H Y, et al. Investigation into cavitation induced noise within hydraulic relief valve. In: Proceedings of 5th JFPS International Symposium on Fluid Power, Nara, Japan, 2002: 409 ~ 412
- 29 Tetsuhiro Tsukiji, Sumikawa Hirokazu, Sumita Takashi, et al. Cavitation in a hydraulic holding valve. ASME, Fluids Engineering Division, 1996, 236(1): 373 ~ 378
- 30 冀宏, 傅新, 杨华勇. 内流道形状对溢流阀气穴噪声影响的研究. 机械工程学报, 2002, 38(8): 19 ~ 22
- 31 Ohkawa, S Konishi A. Biodegradable hydraulic oil for construction equipment. In: 1st International Fluid Power Conference, Band 1, 1988: 207 ~ 214
- 32 小西. 生分解性作動油の技術動向. 油空圧技術, 2000, 39(10): 11 ~ 14
- 33 杨华勇, 周华, 路甬祥. 水液压技术的研究现状与发展趋势. 中国机械工程, 2000, 11(12): 1 430 ~ 1 433

## PROGRESS AND PROSPECTS IN THE RESEARCH OF HYDRAULIC CONTROL FOR CONSTRUCTION MACHINERY

Wang Qingfeng Wei Jianhua  
Wu Genmao Zhang Yanting  
(Zhejiang University)

**Abstract:** The hydraulic transmission and control technology is playing an important role in modern construction machinery, and increasingly affecting the whole performance of construction machinery. It is of great significance to develop the hydraulic control technology for enhancing the whole performance and reliability of construction machinery. The recent research advances in China, abroad and especially in SKLoFP of Zhejiang University, are reviewed, and the future development directions and priorities are discussed.

**Key words:** Construction machinery

Hydraulic transmission and control  
Research development

作者简介: 王庆丰, 男, 1963 年出生, 博士, 教授, 博士生导师。浙江大学流体传动及控制国家重点实验室主任。主要研究领域: 电液控制工程、工程机械电液控制以及机电系统计算机控制等。