

高等学校“十一五”规划教材

 机械设计制造及其自动化系列

**INTRODUCTION OF  
ADVANCED HYDRAULIC  
TRANSMISSION TECHNIQUES**

**先进液压传动技术概论**

李松晶 阮健 弓永军 主编  
李洪人 主审

哈尔滨工业大学出版社

高等学校“十一五”规划教材



机械设计制造及其自动化系列

TH137/150

2008

# INTRODUCTION OF ADVANCED HYDRAULIC TRANSMISSION TECHNIQUES

# 先进液压传动技术概论

李松晶 阮健 弓永军 主编  
李洪人 主审

哈尔滨工业大学出版社

(如需要复印,可向出版社或各书店订购)

## 内 容 简 介

本书主要介绍液压传动技术中的先进设计理念及实现方法,第1章介绍机电一体化的液压传动技术,其中包括机电一体化的液压元件、故障监测及诊断技术以及遥控液压传动技术;第2章介绍数字液压传动技术,主要介绍直接式数字液压传动技术,其中包括开关式、阀组式和步进式数字液压传动技术;第3章介绍节能环保液压传动技术,其中包括液压系统节能技术、振动及噪声控制以及生物可降解液压油液等;第4章介绍的水压传动技术也是一种环保型的液压传动技术,主要包括水介质的特性、水压元件及水压传动技术的应用;第5章介绍液压传动仿真技术,包括液压元件及系统数值模拟方法,给出了液压元件及系统分析设计实例,并对某些液压传动仿真软件进行了介绍;第6章介绍了新材料在液压传动技术中的应用,其中包括工程陶瓷材料、压电材料、功能流体材料以及记忆合金材料等的应用。

本书可作为本科生及研究生的教材使用,也可供相关工程技术人员参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

先进液压传动技术概论/李松晶,阮健,弓永军主编.

—哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2008.2

ISBN 978-7-5603-2650-4

I.先… II.①李…②阮…③弓… III.液压传动  
IV.TH137

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 009827 号

策划编辑 孙 杰

责任编辑 范业婷

封面设计 卞秉利

出版发行 哈尔滨工业大学出版社

社 址 哈尔滨市南岗区复华四道街 10 号 邮编 150006

传 真 0451-86414749

网 址 <http://hitpress.hit.edu.cn>

印 刷 黑龙江省地质测绘印制中心印刷厂

开 本 787mm×1092mm 1/16 印张 15.75 字数 362 千字

版 次 2008 年 3 月第 1 版 2008 年 3 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5603-2650-4

印 数 1~3 000 册

定 价 28.00 元

(如因印装质量问题影响阅读,我社负责调换)

机械工业出版社

# 前 言

液压传动技术具有功率质量比大、响应速度快、能够自润滑以及易于与数字化信息网络相连接等特点,被广泛应用于工业生产、航空航天以及日常生活等领域,成为当代最重要的工程技术之一。随着电子、网络、信息技术的发展以及人们对液压技术性能要求的提高,液压传动技术在集成化、数字化、环保性等方面得到了迅速发展。本书在综述国内外液压传动技术发展现状的基础上,着重介绍了液压传动技术在数字化、机电一体化、环保以及计算机仿真计算等方面的发展,并介绍了新材料在液压技术中的应用。

本书第1章介绍机电一体化的液压技术,其中包括机电一体化的液压元件、故障诊断技术以及遥控液压技术;第2章介绍数字液压传动技术,主要介绍直接式数字液压传动技术,其中包括开关式、阀组式和步进式数字液压传动技术;第3章介绍节能环保液压传动技术,其中包括液压系统节能技术、振动及噪声控制以及生物可降解液压油液等;第4章介绍的水压传动技术也是一种环保型液压传动技术,主要包括水介质的特性、水压元件及水压传动技术应用实例等;第5章液压传动仿真技术,主要介绍液压元件及系统数值模拟方法,给出了液压元件及系统分析设计实例,并对某些液压传动仿真软件进行了介绍;第6章介绍了新材料在液压传动技术中的应用,其中包括工程陶瓷材料、压电材料、功能流体材料以及记忆合金材料等。

本书的第1章、第3章、第5章和第6章由哈尔滨工业大学李松晶编写,第2章由浙江工业大学阮健编写,第4章由大连海事大学弓永军编写,全书由哈尔滨工业大学李洪人教授主审。英国巴斯大学 Kevin A. Edge 教授、德国亚琛工业大学 Hubertus Murrenhoff 教授、加拿大萨斯卡其旺大学 Richard Burton 教授、哈尔滨工业大学许耀铭教授、芬兰坦佩雷理工大学 Jani Vilenius 先生、吉林大学王清岩老师等对本书的编写提出了宝贵的意见和建议。书稿整理过程中,哈尔滨工业大学机械电子工程专业博士研究生蒋丹,硕士研究生方振刚、盛晓伟、杨月华、喻开清、朱冬、王红丽、宋彦伟、杨炽夫、陈奇、臧增为、王微微、姜北、李永红等协助完成了查找资料、绘图以及仿真计算等工作。在本书的编写过程中,还得到了哈尔滨工业大学流体控制及自动化系领导和全体同志的支持和帮助,在此作者对所有支持和帮助过本书编写的同事表示衷心的感谢。

因作者水平有限,书中难免有不当和疏漏之处,恳请读者批评指正。

李松晶

2008年1月

# 目 录

## 第1章 机电一体化液压传动技术

|                           |      |
|---------------------------|------|
| 1.1 机电一体化液压元件 .....       | (1)  |
| 1.1.1 机电一体化液压泵 .....      | (1)  |
| 1.1.2 机电一体化液压阀 .....      | (6)  |
| 1.2 液压系统故障诊断技术 .....      | (12) |
| 1.2.1 故障诊断方法 .....        | (12) |
| 1.2.2 液压系统故障诊断方法及步骤 ..... | (16) |
| 1.2.3 故障诊断实例 .....        | (17) |
| 1.3 遥控液压传动技术 .....        | (21) |
| 1.3.1 遥控技术概述 .....        | (21) |
| 1.3.2 无线遥控技术 .....        | (23) |
| 1.3.3 遥控液压传动技术概述 .....    | (31) |
| 1.3.4 遥控液压传动技术的应用 .....   | (34) |
| 参考文献 .....                | (41) |

## 第2章 数字液压传动技术

|                              |      |
|------------------------------|------|
| 2.1 概 述 .....                | (43) |
| 2.1.1 间接式数字液压传动技术 .....      | (43) |
| 2.1.2 直接式数字液压传动技术 .....      | (44) |
| 2.1.3 数字液压元件 .....           | (45) |
| 2.1.4 直接式数字液压控制系统的物理结构 ..... | (45) |
| 2.2 开关式数字液压传动技术 .....        | (46) |
| 2.2.1 液压 PWM 技术的发展 .....     | (47) |
| 2.2.2 液压 PWM 技术的特点 .....     | (47) |
| 2.2.3 液压 PWM 系统的工作原理 .....   | (48) |
| 2.2.4 PWM 控制信号的产生方法 .....    | (49) |
| 2.2.5 液压 PWM 系统的组成形式 .....   | (51) |
| 2.2.6 高速开关元件的种类 .....        | (52) |
| 2.2.7 液压 PWM 技术的应用 .....     | (53) |
| 2.3 阀组式数字液压传动技术 .....        | (55) |
| 2.3.1 阀组式数字液压系统的组成及特点 .....  | (55) |
| 2.3.2 阀组式数字液压技术工作原理 .....    | (56) |
| 2.3.3 编码方式及编码矩阵 .....        | (59) |
| 2.4 步进式(增量式)数字液压传动技术 .....   | (60) |

|                               |      |
|-------------------------------|------|
| 2.4.1 步进式数字液压传动技术原理 .....     | (60) |
| 2.4.2 步进电机工作原理 .....          | (61) |
| 2.4.3 步进电机驱动电路 .....          | (62) |
| 2.4.4 步进电机的连续跟踪控制 .....       | (63) |
| 2.4.5 步进式数字液压传动技术中的传动装置 ..... | (63) |
| 2.4.6 步进式数字液压阀 .....          | (64) |
| 2.4.7 步进式数字液压传动技术的应用 .....    | (68) |
| 参考文献 .....                    | (70) |

### 第3章 节能环保液压传动技术

|                                |       |
|--------------------------------|-------|
| 3.1 液压技术的环保要求 .....            | (71)  |
| 3.2 液压系统的节能技术 .....            | (72)  |
| 3.2.1 液压系统的能量损失 .....          | (72)  |
| 3.2.2 液压系统的效率 .....            | (73)  |
| 3.2.3 节能措施 .....               | (74)  |
| 3.2.4 功率匹配液压系统 .....           | (75)  |
| 3.2.5 能量贮存及回收 .....            | (82)  |
| 3.3 液压系统的振动及噪声控制 .....         | (86)  |
| 3.3.1 液压系统的振动 .....            | (86)  |
| 3.3.2 噪声容许标准 .....             | (87)  |
| 3.3.3 液压系统的噪声来源 .....          | (87)  |
| 3.3.4 液压元件噪声及降噪方法 .....        | (88)  |
| 3.3.5 液体传播噪声及控制 .....          | (94)  |
| 3.3.6 液压冲击噪声及抑制 .....          | (99)  |
| 3.4 环保型液压油液 .....              | (100) |
| 3.4.1 环保液压油液概念 .....           | (101) |
| 3.4.2 环保液压油液的组成及种类 .....       | (102) |
| 3.4.3 环保型液压油液的生物可降解性评价标准 ..... | (104) |
| 3.4.4 环保型液压油液的其他性能 .....       | (106) |
| 3.4.5 生物可降解液压油产品比较 .....       | (111) |
| 3.4.6 存在的问题 .....              | (115) |
| 参考文献 .....                     | (116) |

### 第4章 水压传动技术

|                         |       |
|-------------------------|-------|
| 4.1 概述 .....            | (118) |
| 4.1.1 水压传动技术的发展历史 ..... | (118) |
| 4.1.2 水压传动技术的特点 .....   | (119) |
| 4.1.3 水压元件中的常用材料 .....  | (121) |
| 4.2 水压工作介质的特性 .....     | (123) |

|                                 |       |
|---------------------------------|-------|
| 4.2.1 纯水的低黏度特性 .....            | (123) |
| 4.2.2 水的状态转换 .....              | (126) |
| 4.2.3 水质监测及污染控制 .....           | (127) |
| 4.3 水压元件 .....                  | (130) |
| 4.3.1 水压泵 .....                 | (130) |
| 4.3.2 水压控制阀 .....               | (137) |
| 4.3.3 水压元件的关键技术 .....           | (141) |
| 4.4 水压传动技术的应用 .....             | (144) |
| 4.4.1 高压水射流切割 .....             | (145) |
| 4.4.2 细水雾灭火 .....               | (149) |
| 4.4.3 农业机械中的应用 .....            | (153) |
| 参考文献 .....                      | (155) |
| <b>第5章 液压传动仿真技术</b> .....       |       |
| 5.1 概 述 .....                   | (157) |
| 5.1.1 液压传动仿真技术的意义 .....         | (157) |
| 5.1.2 液压传动仿真技术的实施步骤 .....       | (158) |
| 5.1.3 仿真建模及模型解算方法 .....         | (159) |
| 5.1.4 液压传动仿真技术发展趋势 .....        | (163) |
| 5.2 液压元件仿真分析 .....              | (165) |
| 5.2.1 液压泵仿真分析 .....             | (165) |
| 5.2.2 液压阀仿真分析 .....             | (166) |
| 5.2.3 分析举例 .....                | (167) |
| 5.3 液压系统仿真分析 .....              | (175) |
| 5.3.1 液压系统动态特性仿真 .....          | (176) |
| 5.3.2 液压管路瞬态分析 .....            | (183) |
| 5.4 液压元件及系统优化设计 .....           | (187) |
| 5.4.1 优化设计数学模型 .....            | (187) |
| 5.4.2 优化步骤 .....                | (188) |
| 5.4.3 优化方法 .....                | (188) |
| 5.4.4 采用遗传算法的直动式溢流阀优化设计举例 ..... | (189) |
| 5.5 计算流体力学的可视化技术 .....          | (191) |
| 5.5.1 可视化分析 .....               | (191) |
| 5.5.2 可视化实验 .....               | (192) |
| 5.6 液压传动仿真软件介绍 .....            | (196) |
| 5.6.1 计算流体力学分析软件 .....          | (197) |
| 5.6.2 系统分析软件 .....              | (199) |
| 参考文献 .....                      | (205) |

## 第6章 新材料在液压传动技术中的应用

|                             |       |
|-----------------------------|-------|
| 6.1 工程陶瓷材料 .....            | (207) |
| 6.1.1 工程陶瓷材料的特性 .....       | (208) |
| 6.1.2 工程陶瓷材料的种类 .....       | (211) |
| 6.1.3 工程陶瓷材料的加工方法 .....     | (212) |
| 6.1.4 工程陶瓷材料的应用 .....       | (213) |
| 6.1.5 存在的问题 .....           | (216) |
| 6.2 压电材料 .....              | (217) |
| 6.2.1 压电材料的特性 .....         | (217) |
| 6.2.2 压电陶瓷材料的应用 .....       | (219) |
| 6.2.3 压电微泵 .....            | (220) |
| 6.2.4 压电陶瓷(PZT)驱动式液压阀 ..... | (222) |
| 6.2.5 存在的问题 .....           | (226) |
| 6.3 功能流体材料 .....            | (226) |
| 6.3.1 磁流体 .....             | (226) |
| 6.3.2 磁流变流体 .....           | (231) |
| 6.3.3 存在的问题 .....           | (238) |
| 6.4 形状记忆合金 .....            | (238) |
| 6.4.1 形状记忆合金的特性 .....       | (239) |
| 6.4.2 形状记忆合金的种类 .....       | (240) |
| 6.4.3 形状记忆合金的应用 .....       | (240) |
| 6.4.4 存在的问题 .....           | (243) |
| 参考文献 .....                  | (244) |

## 第 1 章

# 机电一体化液压传动技术

随着电气和电子技术的不断发展,机械及电力传动技术的优越性在某些应用场合已经超过了液压技术,因此液压技术只有不断吸取电气和电子技术的新理论和新方法,与机械、电气、电子、计算机及网络等技术紧密结合,形成机电液一体化技术,才能不断克服液压技术本身的缺点,进一步发挥液压技术的优越性,从而在与机电技术的竞争中保持更大的优势。

机电液一体化技术具有很高的自动化程度,能够实现高精度、高效率的动作要求,因此具有更好的工作性能。近年来,机电技术与液压技术的结合主要体现在机电一体化的液压元件、采用各种传感及信息技术实现的液压系统故障监测及诊断技术、节能技术以及遥控技术等方面。本章主要介绍机电一体化的液压元件、液压系统故障诊断技术及遥控液压技术,液压系统节能技术将在第 3 章节能环保液压传动技术中加以介绍。

## 1.1 机电一体化液压元件

传统液压元件多采用手动、液动、机械以及电磁铁控制等简单操纵方法。近年来,随着电气和电子控制技术的发展,液压元件的电气及电子控制部分不但能够实现更为复杂和高效的比例或伺服控制,而且控制器和传感器等元件还能够与液压元件结合成一体,作为一个完整的液压元件出售。例如集成了各种控制阀和电子控制装置的变量液压泵,集成了各种传感器和控制电路的液压阀等。机电一体化的液压元件不但工作性能得到了明显提高,而且还具备了小型化和集成化的特点,从而使液压元件的使用更加简单可靠。

### 1.1.1 机电一体化液压泵

能够输出各种恒压、恒流量及恒功率特性的变量液压泵或液压油源是机电一体化技术在液压技术上的成功应用之一,例如同步控制的斜盘型轴向柱塞泵变量机构。它以柱塞泵作为主体,利用控制阀、电气回路、传感器以及计算机等设备,控制和调节柱塞泵斜盘的倾角,从而改变柱塞泵的输出流量,达到对整个液压系统的流量及压力特性进行控制的目的。

#### 1. 常规轴向柱塞泵变量原理

##### (1) 恒压变量原理

图 1.1 所示为液压泵恒压变量特性原理图及特性曲线,图 1.1(a)中各元件分别为液压泵主体、变量活塞以及变量控制阀,其中变量活塞和变量控制阀往往与液压泵集成为一体。变量控制阀可为比例式或伺服式,由液压泵出口的压力或传感器信号来控制阀芯位移,从而调整变量活塞的移动方向及位移量。实际上,变量控制阀与变量活塞的作用相当

于三通阀控制差动缸,通过变量控制阀控制变量活塞无杆腔的压力  $p_a$ ,使变量活塞达到力平衡。如果变量控制阀是比例式控制阀或伺服式控制阀,当阀芯向左移动时,变量活塞无杆腔压力  $p_a$  值降低,变量活塞向右移动;当阀芯向右移动时, $p_a$  值升高,变量活塞向左移动。变量活塞的移动可带动柱塞泵斜盘摆动,使斜盘相对于柱塞泵转轴中信线的倾角发生改变,从而改变柱塞泵的输出流量。图 1.1(a)中液压泵出口  $D$  点压力同时作用在变量控制阀和变量活塞的左侧,当  $D$  点压力低于图 1.1(b)中液压泵流量  $q$  开始下降点的压力  $p_c$  时,变量控制阀阀芯在弹簧力作用下处于左侧工作位置,阀相当于工作在右位。此时,变量活塞右侧直接接油箱, $p_a$  值很低,变量活塞在弹簧力作用下,处于最右端位置,斜盘倾角最大,液压泵以最大起始流量输出,在图 1.1(b)的特性曲线中,液压泵的工作点在  $AB$  段上。当液压泵出口  $D$  点压力超过图 1.1(b)中液压泵流量  $q$  开始下降点的压力  $p_c$  时,变量控制阀阀芯左侧作用力大于右侧弹簧作用力,阀芯向右移动,阀相当于工作在左位。此时,变量活塞右侧压力  $p_a$  接近于液压泵出口  $D$  点压力,该压力同时作用在变量活塞的左右两侧,由于变量活塞左右两侧的有效作用面积不同,右侧作用面积大于左侧作用面积,因此,在液压泵出口压力作用下,变量活塞克服弹簧力作用,向右移动,从而带动斜盘摆动,使斜盘倾角减小,液压泵输出流量减小,直到变量活塞上的作用力与弹簧力相平衡为止。此时,液压泵的工作点处于图 1.1(b)特性曲线中  $BC$  段的某一位置。

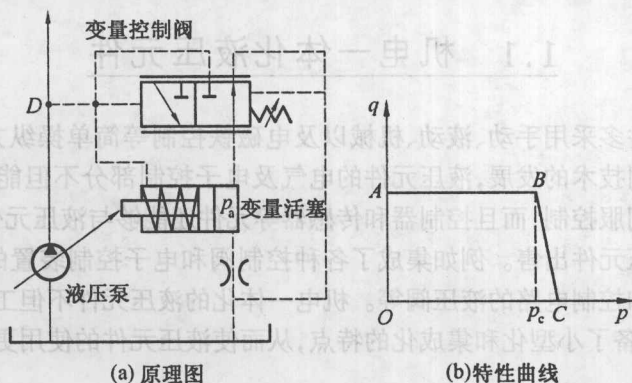


图 1.1 液压泵恒压变量特性

可见,通过液压泵上集成的比例或伺服式控制阀以及变量活塞的作用,可对液压泵的输出流量进行自动调节,从而使泵的输出特性满足恒压特性。

## (2) 恒流量变量原理

图 1.2 所示为液压泵恒流量变量特性原理图及特性曲线,图 1.2(a)中各元件分别为液压泵主体、变量活塞、变量控制阀以及节流阀。图 1.2(a)中液压泵出口  $D$  点和节流阀出口  $E$  点压力分别作用于变量控制阀的阀芯两侧,即变量控制阀感受的是节流阀两端的压力差。当泵输出某一流量时,节流阀上的压力差在变量控制阀阀芯上产生的作用力与控制阀阀芯左侧弹簧力相平衡。当泵出口压力较低时,在弹簧力作用下,变量控制阀工作相当于在左位,变量活塞左侧直接接油箱,右侧压力为  $D$  点压力,在变量活塞右侧弹簧力作用下,变量活塞处于最左端,泵斜盘处于最大倾角位置。当液压泵出口压力较高时,变量控制阀相当于工作在右位,变量活塞左右两腔压力均为  $D$  点压力,由于变量活塞左侧

作用面积大于右腔作用面积,此时变量活塞左侧作用力与变量活塞右侧作用力及弹簧力相平衡,液压泵斜盘工作在某一倾角位置泵输出某一稳定流量。当液压泵转速发生变化或节流阀出口处压力随负载力变化时,通过调节变量活塞位置使液压泵的排量发生相反变化,从而使排量与转速的乘积保持不变或流量不受负载力变化影响,以满足恒流量的需要。

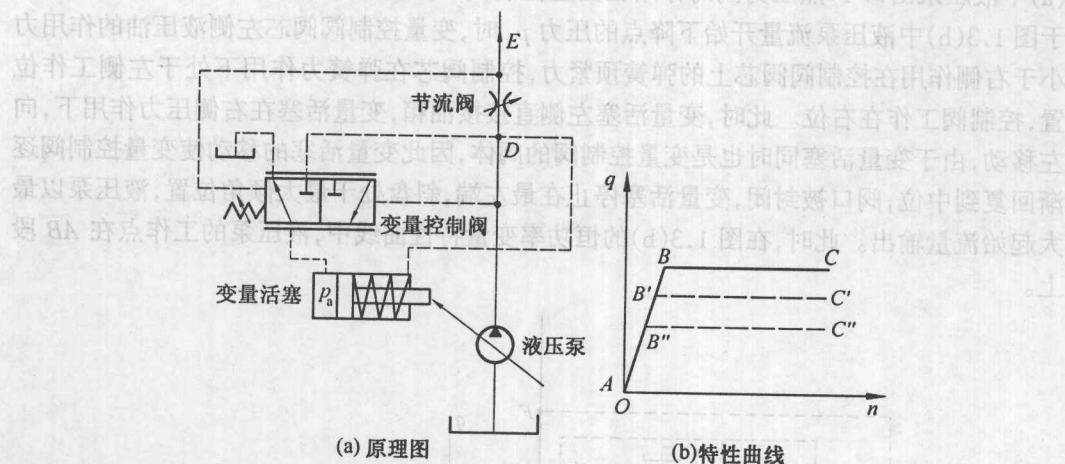


图 1.2 液压泵恒流量变量特性

图 1.2(b)特性曲线中的  $AB$  段为起始段,泵输出的流量小于节流阀的调节流量,因此,随着泵转速的增加,经过节流阀的流量增大。 $BC$  段为恒流量段,泵的输出流量不受泵转速  $n$  变化或负载变化影响。

例如,当液压泵转速增加时,经过节流阀的流量增大, $D$  点与  $E$  点的压差升高,变量控制阀阀芯右侧作用力增大,阀芯向左移动,结合图 1.2,根据三通阀控制差动缸的原理,此时变量活塞无杆腔压力  $p_a$  增大,从而使变量活塞向右移动,斜盘倾角减小,液压泵排量降低,直到变量活塞左侧作用力与右侧作用力及弹簧力相平衡为止。由于转速增加、排量降低,因此液压泵输出流量保持不变。

当节流阀出口处负载压力增加时, $E$  点压力增加,由于此时经过节流阀的流量不变,因此  $D$  点压力增加, $D$  点与  $E$  点的压力差保持不变,变量控制阀不动作。 $D$  点压力的增加使泵的内泄漏增加,经过节流阀的流量减小, $D$  点压力稍有降低,控制阀阀芯向右移动,阀工作在左位,变量活塞向左移动,斜盘倾角增大,液压泵输出流量增加,从而使  $D$  点压力恢复, $D$  点与  $E$  点的压力差保持不变,经过节流阀的流量不变。当液压泵转速减小或负载压力减小时,调节原理相同。

调节节流阀开口量, $BC$  段可移动到  $B'C'$  或  $B''C''$ ,泵的输出流量自动调节与节流阀所需要流量相适应。如果泵的输出流量大于节流阀的调节流量,则  $D$  点与  $E$  点的压差增大,变量控制阀阀芯向左移动, $p_a$  值增大,变量活塞上向右的作用力增加,活塞向右移动,斜盘倾角减小,泵的输出流量减小。泵的输出流量小于节流阀的调节流量时,调节原理相同。

### (3) 恒功率变量原理

图 1.3 所示为液压泵恒功率变量特性原理图及特性曲线。图 1.3(a)中各元件分别为

液压泵主体,变量活塞以及变量控制阀,其中,变量控制阀及变量活塞的作用与恒压变量及恒流量变量回路中的变量控制阀和变量活塞作用相同。但恒功率变量原理中变量活塞同时也是变量控制阀的阀体,因此当变量活塞移动时,变量控制阀的工作状态也会发生改变。此外,恒功率变量情况中,变量控制阀阀芯的一侧有两条弹簧起调压的作用。图 1.3(a)中液压泵出口  $F$  点压力同时作用在变量控制阀和变量活塞左侧,当  $F$  点处的压力低于图 1.3(b)中液压泵流量开始下降点的压力  $p_c$  时,变量控制阀阀芯左侧液压油的作用力小于右侧作用在控制阀阀芯上的弹簧预紧力,控制阀芯在弹簧力作用下处于左侧工作位置,控制阀工作在右位。此时,变量活塞左侧直接接油箱,变量活塞在右侧压力作用下,向左移动,由于变量活塞同时也是变量控制阀的阀体,因此变量活塞的移动使变量控制阀逐渐回复到中位,阀口被封闭,变量活塞停止在最左端,斜盘处于最大倾角位置,液压泵以最大起始流量输出。此时,在图 1.3(b)的恒功率变量特性曲线中,液压泵的工作点在  $AB$  段上。

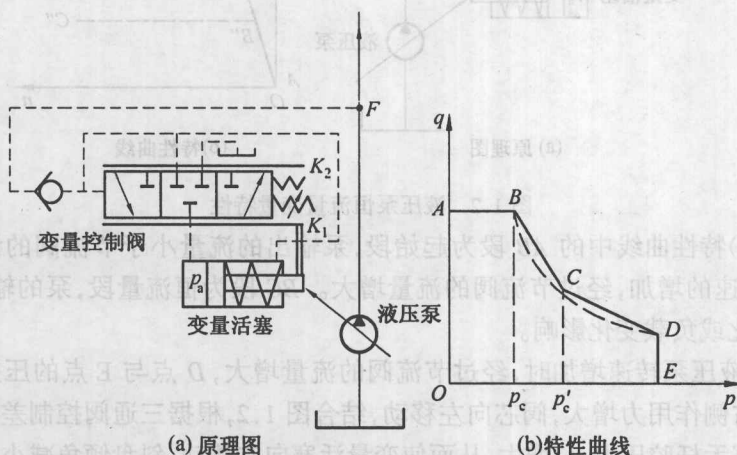


图 1.3 液压泵恒功率变量特性

当液压泵出口  $F$  点处的压力高于图 1.3(b)中液压泵流量开始下降点的压力  $p_c$  时,控制阀阀芯左侧液压油作用力大于右侧弹簧  $K_1$  的预紧力,控制阀阀芯向右移动,控制阀工作在左位。此时,液压泵出口  $F$  点处的压力同时作用在变量活塞两侧,由于变量活塞左侧的有效作用面积大于右侧的有效作用面积,因此,左侧作用力大于右侧作用力,变量活塞向右移动,从而带动斜盘摆动,使斜盘倾角减小,液压泵输出流量减小,直到变量活塞移动到使控制阀口关闭为止。此时,液压泵的工作点处于图 1.3(b)恒功率变量特性曲线中  $BC$  段上某一位置。

当液压泵出口  $F$  点处的压力进一步升高,超过图 1.3(b)中的压力  $p'_c$  时,变量控制阀阀芯左侧作用力大于右侧弹簧  $K_1$  和  $K_2$  同时作用的作用力,控制阀阀芯右移,控制阀工作在左位,从而控制变量活塞进一步右移,斜盘倾角进一步减小,液压泵输出流量也进一步降低,直到变量活塞的移动使变量控制阀口关闭为止。此时,液压泵的工作点在图 1.3(b)恒功率变量特性曲线的  $CD$  段上。由于工作点在  $CD$  段时有两条弹簧同时工作,因此  $CD$  段与  $BC$  段的斜率不同。如果把  $BC$  和  $CD$  两条线段近似为一条弧线  $BD$ ,则弧线

BD 可用关系式“ $pq = \text{常数}$ ”来表示,其中  $p$  为液压泵出口  $F$  点的压力,  $q$  为液压泵的输出流量,因此,液压泵的输出特性为恒功率特性。

## 2. 机电一体化液压系的原理及电子控制设备

液压泵输出恒压、恒流量或恒功率特性的目的是在液压系统的整个工作循环过程中,使液压泵的输出特性与系统负载需要相适应,从而实现液压系统的调速及节能。实现这一目的往往需要与电子及电气控制技术相结合,以达到更好的控制调节效果。电子控制的负荷传感技术就是实现这一目的的有效方法之一。

负荷传感技术是一种利用液压泵出口压力与负载压力之间的差值来控制 and 调节液压泵输出流量的技术,是在开环的液压传动回路中实现的一种压力闭环液压泵控制方式。负荷传感系统通常由负荷传感控制器、节流元件(有时是换向阀的阀口)以及变量泵组成。负荷传感控制器在感知液压泵输出流量与负载所需要流量的匹配程度或节流元件两端压力变化程度后,发出相应的控制指令,以改变液压泵的流量输出,从而使液压泵输出流量与负载所需流量相匹配。或者,当节流元件出口压力由于负载力变化而变化时,负荷传感控制器相应调节液压泵的排量,使经过节流元件的流量保持不变,从而使执行元件运动速度不随负载力变化而变化。而变量泵排量的调节通常是利用各种电子及电气控制技术来实现的。

电子控制的负荷传感技术原理图如图 1.4 所示,由于采用了各种传感器及控制技术,电子控制的负荷传感技术控制精度和灵敏度高、动作响应快,因此应得到了越来越广泛的应用。

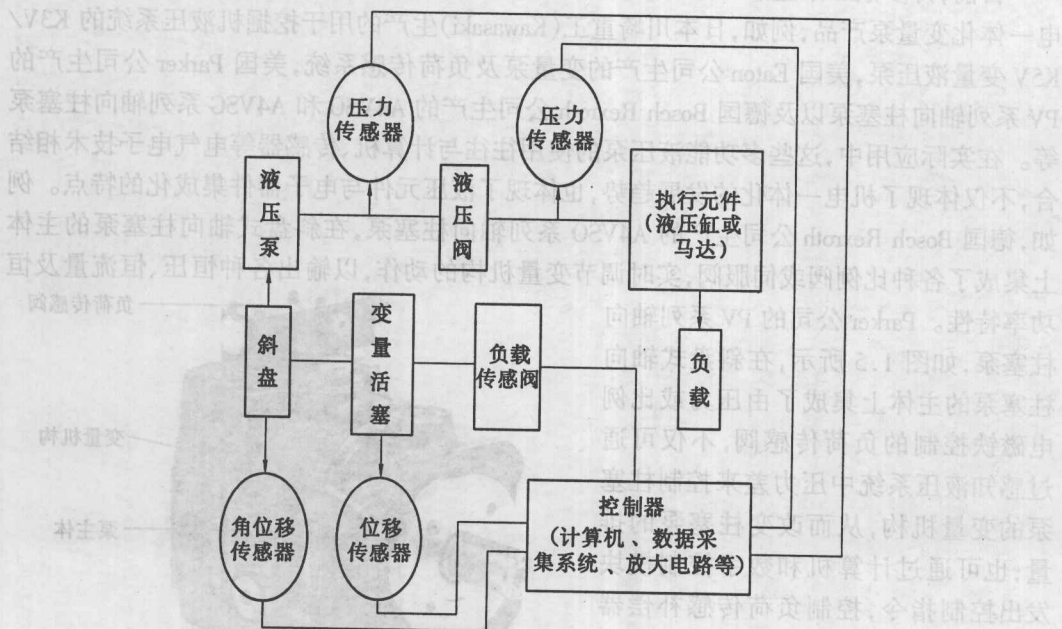


图 1.4 电子控制的负荷传感技术原理图

图 1.4 所示的电子控制负荷传感技术中液压泵通常采用变量活塞泵,控制器通常是计算机,计算机中安装有数据采集以及程序控制等软件。压力传感器、位移或角位移传感

器等传感器信号通过放大电路及数据采集系统被转换成数字信号,传入控制器,作为控制器发送控制指令的依据。实际应用中,使用角位移传感器或位移传感器中的一种即可,通常使用位移传感器。负荷传感阀通常为开关阀、比例换向阀或伺服阀,该阀的控制信号由控制器发出,控制器发出的数字信号经过 D/A 转换电路转换成模拟量,再经过放大电路转换成可以控制负荷传感阀的电压或者电流信号,控制负荷传感阀的开关,从而控制液压泵变量机构的动作。目前,大多数液压泵生产厂家都把负荷传感阀、传感器等元件集成在液压泵上,作为液压泵的一部分一起出售。此外,生产厂家还为用户提供控制阀的各种配套电子设备,例如,负荷传感阀的放大电路板、电源以及控制器和控制软件等,使变量泵的使用更加方便,操作更加简单。

负荷传感技术主要应用在如下液压系统:

- ①单泵供油的多执行元件系统;
- ②需要输出可变流量的系统;
- ③在低压和小流量下需要卸荷的系统;
- ④无论转速和负载力如何变化,工作循环中需要输出恒定流量的系统;
- ⑤要求节省能耗、减小发热的系统;
- ⑥需要不受负载变化影响、以恒定的转速来驱动的马达系统;
- ⑦经常会达到峰值压力的系统。

### 3. 机电一体化液压泵的应用

目前,许多液压泵生产厂家都能够为用户提供具有恒压、恒流量及恒功率等特性的机电一体化变量泵产品,例如,日本川崎重工(Kawasaki)生产的用于挖掘机液压系统的 K3V/K5V 变量液压泵,美国 Eaton 公司生产的变量泵及负荷传感系统,美国 Parker 公司生产的 PV 系列轴向柱塞泵以及德国 Bosch Rexroth 公司生产的 A4VSO 和 A4VSG 系列轴向柱塞泵等。在实际应用中,这些多功能液压泵的使用往往与计算机、传感器等电气电子技术相结合,不仅体现了机电一体化的发展趋势,也体现了液压元件与电子器件集成化的特点。例如,德国 Bosch Rexroth 公司生产的 A4VSO 系列轴向柱塞泵,在斜盘式轴向柱塞泵的主体上集成了各种比例阀或伺服阀,实时调节变量机构的动作,以输出各种恒压、恒流量及恒功率特性。Parker 公司的 PV 系列轴向柱塞泵,如图 1.5 所示,在斜盘式轴向柱塞泵的主体上集成了由压力或比例电磁铁控制的负荷传感阀,不仅可通过感知液压系统中压力差来控制柱塞泵的变量机构,从而改变柱塞泵的排量;也可通过计算机和数字控制模块发出控制指令,控制负荷传感补偿器产生相应的动作,从而改变柱塞泵的排量。

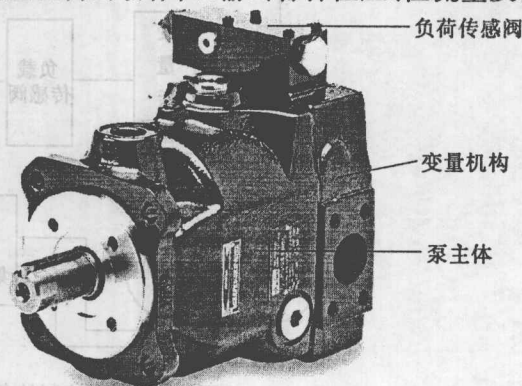


图 1.5 Parker 公司的 PV 系列轴向柱塞泵

上述机电液一体化液压泵的使用使外部液压回路的连接大大简化,不

[图片来源: Parker 公司, Introduction of Axial Piston Pump Series PV]

仅可提高回路的工作性能,而且便于用户操作和使用。

目前,机电液一体化的变量泵和负荷传感技术已广泛应用于航空航天、工程机械、自动化加工设备、林业机械以及农业机械等领域,例如,日本小松(Komatsu)公司生产的PC200系列挖掘机、日立(Hitachi)公司生产的EX100WD2挖掘机等。

日立公司生产的EX100WD2型轮式液压挖掘机,其液压系统原理图如图1.6所示,该液压系统主要由主、辅两个液压泵、方向控制阀、高速开关阀(负荷传感阀)、液压缸、各种传感器、控制器以及多个执行元件组成。由于采用了机电一体化的变量泵和电子负荷传感技术,因此液压系统不但能够满足负载的工作需要,还可实现节能的目的,充分体现了机电一体化技术与液压技术相结合的优越性。

图1.6所示EX100WD2挖掘机的液压系统中两个液压泵由发动机驱动,同轴转动,其中泵15为辅泵,给方向控制阀17以及压力补偿阀12提供控制油,并推动变量伺服缸动作;主泵16为变量泵,其斜盘倾角由变量伺服缸控制。高速开关阀1、2,变量伺服缸,压差传感器9,泵缸体摆角传感器7以及控制器等元件组成电子负荷传感控制系统。

EX100WD2液压系统的控制器通常是一台计算机,压差传感器9用于测量主液压泵16出口与各执行元件最大工作压力之间的差值,并把这一差值送入主液压泵的变量控制器,泵缸体摆角传感器7用于测量主液压泵16的斜盘倾角,发动机转速传感器6用于测量发动机的转速,二者的测量信号也输入控制器。控制器根据3个测量信号,采用一定的控制算法,向高速开关阀发出指令信号,推动主液压泵变量机构,控制主液压泵的斜盘动作,从而改变主液压泵的排量。控制调节的目的是使主液压泵的输出流量略大于各个执行元件所需要流量的总和,并且主液压泵输出压力与负载所需要压力的差值尽可能小,从而达到节能的目的。在某一稳定转速下,变量泵斜盘倾角随压差调节的过程是:液压泵输出压力与执行元件工作压力的差值小于系统给定的参考值时,表明主泵流量小于系统所需流量,此时高速开关阀1打开,高速开关阀2关闭,辅泵油同时进入变量伺服缸的大腔和小腔,大腔一侧的作用力大于小腔一侧的作用力,变量活塞向小腔一侧移动,柱塞泵斜盘倾角增大,主泵排量增加,输出流量增大。当压力差大于给定的参考值时,高速开关阀1关闭,高速开关阀2打开,辅泵油进入变量伺服缸的小腔,变量伺服缸的大腔接油箱,变量活塞向大腔方向移动,主泵斜盘倾角减小,排量减小,输出流量也减小。压力差等于给定参考值时,1、2两阀都关闭,变量伺服缸各油路被切断,柱塞泵排量保持不变。

当所有换向阀处于中位时,如果主液压泵继续供油,则液压泵出口工作压力不断升高,达到卸荷阀14的调定压力时,系统卸荷,系统中压差传感器9检测到的信号为卸荷压力(大于给定参考压力值),此时,控制器向高速开关阀发出信号,高速开关阀1关闭,高速开关阀2打开,变量活塞向大腔方向动作,斜盘倾角减小,直到使主泵以最小排量运行为止。此时,主液压泵的输出流量仅用以维持系统内部泄漏,因此系统功率损失很小。当系统负载过大而出现执行元件不能动作时,系统工作压力不断升高,达到溢流阀10的调定压力时,溢流阀10溢流,保证系统安全。

除液压系统与负载可实现能量匹配外,通过电子负荷传感控制系统的控制,也可实现发动机与液压系统的功率匹配,以进一步提高系统效率,节约能源。

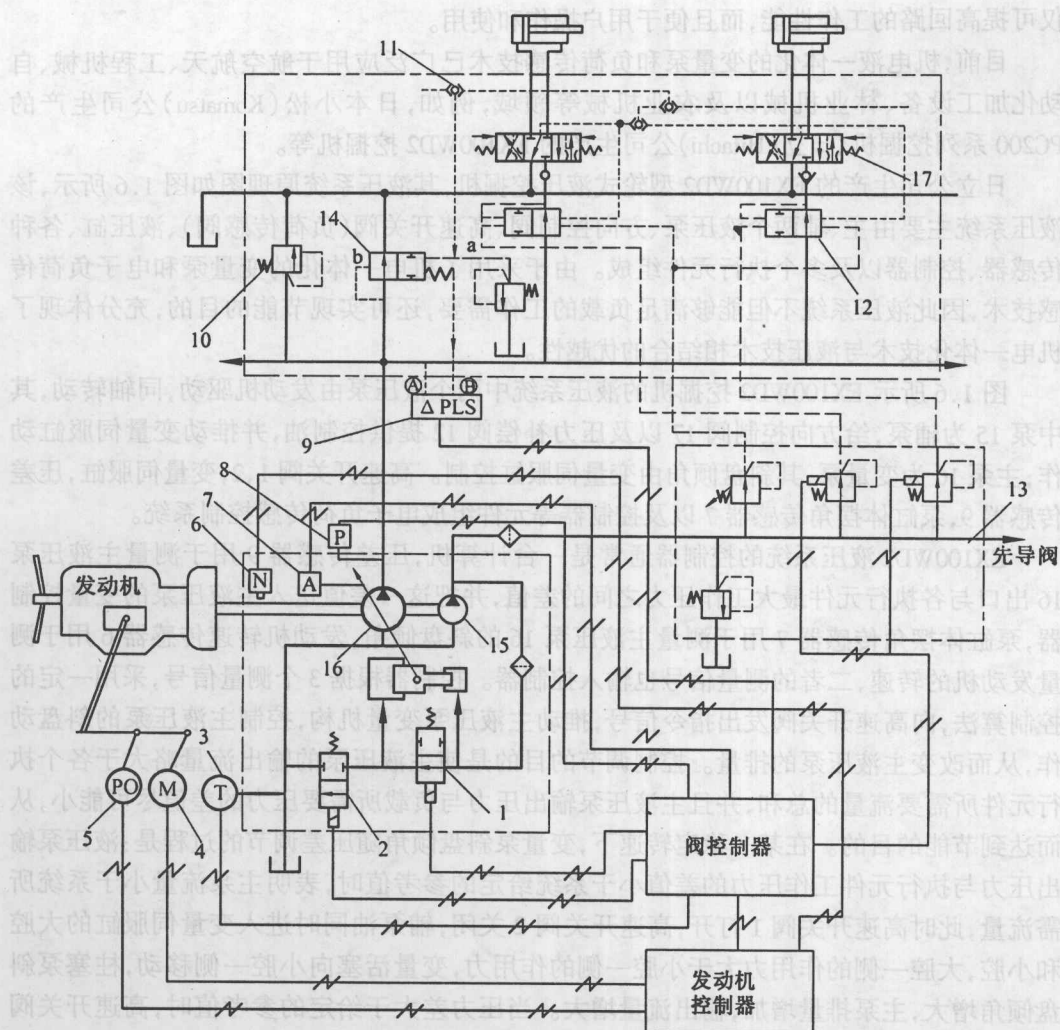


图 1.6 EX100WD2 挖掘机的液压系统原理图

1、2—高速开关阀；3—液压油温传感器；4—油门开度马达；5—油门开度传感器；6—发动机转速传感器；7—泵缸体摆角传感器；8—压力传感器；9—压差传感器；10—溢流阀；11—梭阀；12—可变压力补偿阀；13—比例电磁阀组；14—卸荷阀；15—辅泵；16—主泵；17—方向控制阀

### 1.1.2 机电一体化液压阀

在液压传动系统中使用的各种液压控制阀主要由阀体、阀芯、弹簧及控制调节机构组成,其中控制调节机构有手轮、推杆及电磁铁等形式。为了达到更高的控制精度和更好的控制效果,比例技术、伺服技术及传感器技术在液压阀控制上得到了广泛的应用。而且,为了进一步节约空间,减少电路连线的复杂性,比例或伺服控制电路以及各种传感器往往与液压阀集成为一体,形成机电液一体化的液压阀。

例如,德国 Bosch Rexroth 公司的 4WRPEH6 型比例电磁阀,如图 1.7 所示,该阀在传统

比例方向控制阀的基础上集成了阀芯位移传感器和电子控制器,具有阀芯位置反馈功能,因此响应速度更快,控制精度更高。

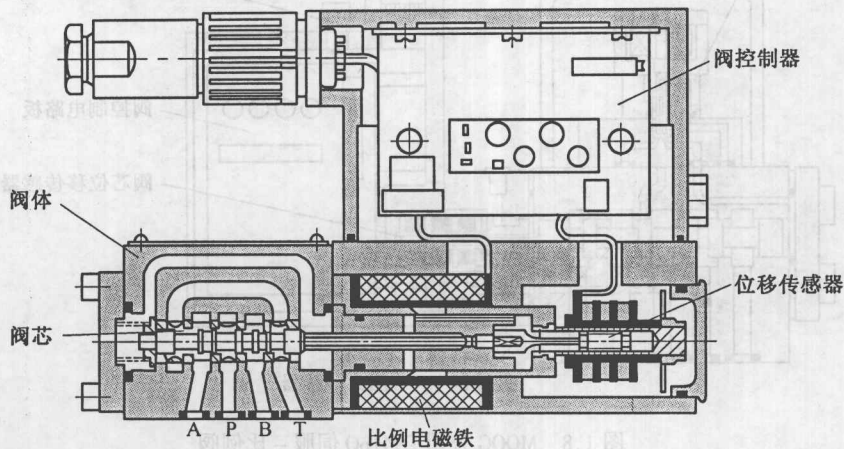


图 1.7 4WRPEH6 型比例电磁铁

[图片来源: Bosch Rexroth 公司, <http://www.boschrexroth.com>]

液压比例阀和伺服阀都是由于采用了先进的机电液一体化驱动技术,因此具有更高的控制调节精度和更快的响应速度,从而使液压系统具备了更好的控制性能。过去,这些液压控制阀除元件本身外还需要外置的控制设备和控制软件的支持,例如,放大电路板、计算机以及控制软件等,因此给元件的使用者带来使用和调节的不便。电子技术和传感器技术的小型化和集成化促进了比例阀或伺服阀的放大电路以及微处理器等设备与液压阀的集成。把放大电路以及微处理器与液压阀制作成一体,可减小液压元件及外部设备的体积,简化电路连线,给系统的参数调节及操作维护带来更大的方便。例如,美国伺服阀生产厂家 MOOG 公司生产的 D660 及 D941pQ 系列伺服 - 比例液压阀就是机电一体化技术与液压阀技术的集成,D941pQ 系列伺服 - 比例阀的结构图如图 1.8 所示。

D941pQ 比例阀既可用于控制流量,也可用于压力调节或限压。图 1.8 中伺服 - 比例阀的结构表明,该比例阀除了具有普通比例阀或伺服阀的阀体外,还集成了位移传感器、压力传感器以及控制电路板等元器件。其中阀体部分分为两级,前置级为射流管阀,主阀为滑阀,滑阀的阀芯上安装有位移传感器,以实时检测阀芯的工作位置;压力传感器与控制油口连通,用以测量系统中的工作压力。集成在阀内部的控制电路用于采集和处理传感器信号,并对比例阀发出控制指令。

这种新型阀实际上是一种数字阀,由于取消了模拟量控制并为用户提供了可配置的功能,因此用户可自定义阀的动态特性以满足某些特殊需求,例如提供高精度的数字流量和压力控制等。尽管该阀的流量很大,但用户不需要通过机械部件或电子元件的调整,而只需通过软件上参数的设置,即可调节阀的工作特性。因此在使用过程中,需要改变阀的工作参数时,即使不具备专业技术知识的操作人员也可以对阀进行调节,用户使用更加方便。