

机械工程前沿著作系列 HEP
HEP Series in Mechanical Engineering Frontiers MEF

液压伺服与比例控制

宋锦春 陈建文 编著

Hydraulic Servo and Proportional Control

机械工程前沿著作系列 HEP
HEP Series in Mechanical Engineering Frontiers MEF

液压伺服与比例控制
Hydraulic Servo and Proportional Control

宋锦春 陈建文 编著

YEYA SIFU
YU
BILI KONGZHI

内容简介

本书包括液压伺服和比例控制两部分内容。首先介绍了液压伺服与比例系统的基本概念以及相关控制理论的基本内容。在此基础上系统地介绍了液压伺服与比例控制系统的典型元件与回路知识,如电液伺服阀、机液伺服系统、电液比例阀、电液比例基本回路及电液比例技术的工程应用实例等,其中不少内容涉及液压伺服与比例控制领域的新技术。最后,介绍了液压伺服与比例控制系统的分析与设计方法以及基于MATLAB软件的仿真分析。

本书以液压伺服与比例控制为主线,注重阐述液压传动与控制理论基础。并且部分内容以作者所研究的工程项目为例,实现了理论知识与实际应用的有效结合。书中的液压元件尽可能选用最新产品,液压职能符号统一采用了国家最新标准。通过本书学习,读者可以对液压伺服与比例控制的理论知识、技术以及应用情况有比较全面的了解。

本书可作为机械工程类专业本科生和研究生的教材,也可供相关领域的科技工作者和工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

液压伺服与比例控制/宋锦春,陈建文编著. --北京:高等教育出版社,2013.7
ISBN 978-7-04-037392-9

I. ①液… II. ①宋…②陈… III. ①电液伺服系统-比例控制-研究生-教材 IV. ①TH137.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 097456 号

策划编辑	刘占伟	责任编辑	刘占伟	特约编辑	陈 静	封面设计	杨立新
版式设计	王 莹	插图绘制	尹 莉	责任校对	杨凤玲	责任印制	赵义民

出版发行	高等教育出版社	咨询电话	400-810-0598
社 址	北京市西城区德外大街 4 号	网 址	http://www.hep.edu.cn
邮政编码	100120		http://www.hep.com.cn
印 刷	北京鑫海金澳胶印有限公司	网上订购	http://www.landaco.com
开 本	787mm×1092mm 1/16		http://www.landaco.com.cn
印 张	20.5	版 次	2013年 7 月第 1 版
字 数	400 千字	印 次	2013年 7 月第 1 次印刷
购书热线	010-58581118	定 价	59.00 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换
版权所有 侵权必究
物 料 号 37392-00

前言

液压伺服与比例控制是工业控制领域一门新兴的学科,是液压技术的重要组成部分。随着工业自动化技术的不断发展,液压伺服与比例控制的应用越来越广泛,对控制性能的要求也越来越高。

作者在长期从事专业教学工作的基础上,融合了数十年来科研工作中大量的工程实际应用经验,考虑到液压伺服系统与液压比例控制内容的连续性与相关性,将两者有机结合起来,使相关内容互相参照,便于读者充分了解这门新兴科学技术。同时,结合作者长期的教学科研及现场工作经验,针对目前本专业液压伺服与比例控制系统的特点,本书强调基础知识与基本概念,使读者能够掌握液压伺服系统的分析与设计方法;结合液压伺服与比例控制系统的发展,本书还注重知识的更新。本书对最新出现的高性能比例阀等比例伺服元件的原理进行了介绍,并将计算机仿真分析技术应用于现代液压伺服与比例控制系统。本书还对有关知识点进行了合理调整,易于读者理解和掌握。本书着力结合工程应用,所给出的各项实例基本上都是作者科研工作中的成功范例,有利于读者解决工程实际问题。书中的所有图形符号均采用最新国家标准。

本书共分 12 章,主要包括控制理论、液压伺服和液压比例控制三部分内容。其中,宋锦春编写第 1 章、第 2 章、第 7 章、第 8 章、第 9 章、第 10 章和第 12 章,陈建文编写第 3 章、第 4 章、第 5 章、第 6 章和第 11 章。全书由宋锦春统稿。

东南大学王积伟教授对本书进行了认真的审核并提出了建设性意见,在此表示衷心的感谢!

限于作者水平,书中难免存在不足之处,诚望广大读者斧正。

编者

2013 年 3 月

符 号 表

符号	含义	符号	含义
A_p	液压缸有效作用面积	J_t	折算到马达轴上的等效惯量
B_p	黏性阻尼系数	K_a	控制放大器增益
B_L	负载等效黏性系数	K_c	流量 - 压力增益
C_c	断面收缩系数	K_f	反馈放大系数
C_d	滑阀流量系数	K_{ff}	力传感器反馈系数
C_{em}	液压马达外泄漏系数	K_{fx}	位移反馈系数
C_{ep}	液压缸外泄漏系数	K_{fv}	速度传感器反馈系数
C_{im}	液压马达内泄漏系数	K_g	增益裕量
C_{ip}	液压缸内泄漏系数	K_i	输入放大系数
C_{tm}	液压马达总泄漏系数	K_p	压力增益
C_{tp}	液压缸总泄漏系数	K_q	流量增益
C_r	伺服阀阀芯与阀套间的径向间隙	K_s	负载等效弹簧刚度
C_v	流速系数	K_{sv}	伺服阀的流量增益
D_0	固定节流口直径	K_v	开环放大系数
D_n	线圈内径	L	拉普拉斯变换
D_N	喷嘴直径	L^{-1}	拉普拉斯逆变换
D_w	线圈外径	m_t	折算到液压缸输出端的总质量
D_x	线圈平均直径	m_c	液压缸缸筒等效质量
$e_r(\infty)$	系统跟随误差	m_L	负载等效质量
e_{ss}	稳态误差	M_p	最大超调量
F_L	外负载	M_r	谐振峰值
F_B	黏性负载	p_1	液压缸进油腔压力
F_d	电磁力	p_2	液压缸回油腔压力
F_m	惯性力	p_c	控制压力
F_s	弹性负载	p_L	负载压力
F_{ss}	稳态液流	p_s	油源压力
F_t	作用在阀芯上的总轴向力	p_T	回油压力
$G(s)$	前向通道传递函数	q_0	伺服阀的空载流量
$H(s)$	反馈通道传递函数	q_1	液压缸进油腔流量
i_C	电容电流	q_2	液压缸回油腔流量
i_r	电阻电流	q_L	负载流量
I_n	伺服阀的额定电流	q_n	伺服阀的额定流量
ΔI_{D1}	摩擦力引起的死区电流	q_{sv}	伺服阀流量

符号	含义	符号	含义
t_d	延迟时间	x_v	阀芯位移
t_P	峰值时间	$y_{\max}$	活塞最大行程
t_r	上升时间	α	倾角
t_s	调整时间	β_e	有效体积弹性模量
T_L	外负载力矩	γ	相位裕量
$u(t)$	单位阶跃函数	$\delta(t)$	单位脉冲函数
u_e	偏差电压	ζ_h	液压阻尼比
u_f	反馈电压	ζ_m	负载阻尼比
u_i	输入电压	ζ_{sv}	伺服阀阻尼比
u_o	输出电压	ζ_v	开环系统阻尼比
u_r	指令电压	μ	油液的动力黏度
U	零位预开口量	ρ	油液密度
$v_{\max}$	最大工作速度	τ	时间常数
V_1	液压缸进油腔的容积	τ_{sv}	伺服阀的时间常数
V_2	液压缸回油腔的容积	φ_c	增益穿越频率对应相角
V_t	液压缸总容积	ω_c	增益穿越频率
W	阀的面积梯度	ω_d	有阻尼固有频率
$x_i(t)$	时域输入	ω_g	相位穿越频率
$x_o(t)$	时域输出	ω_h	液压固有频率
Δx_p	总静态误差	ω_m	负载的固有频率
x_c	液压缸缸体位移	ω_n	无阻尼固有频率
x_i	输入位移	ω_o	液压弹簧与负载弹簧并联耦合的谐振频率
x_L	刀架位移	ω_r	液压弹簧与负载弹簧串联耦合的谐振频率
x_p	输出位移	ω_{sv}	伺服阀的固有频率
x_{ss}	稳态值	ω_v	开环系统固有频率

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 液压伺服与比例系统的组成与工作原理	2
1.1.1 液压伺服系统示例	2
1.1.2 液压比例系统示例	4
1.1.3 液压伺服与比例控制系统的组成	5
1.2 液压伺服与比例控制系统的分类	6
1.3 液压伺服与比例控制系统的特点	6
1.3.1 液压伺服系统	6
1.3.2 电液比例控制系统	7
1.4 液压伺服与电液比例控制系统的发展与应用	8
第 2 章 控制理论基础	9
2.1 数学模型	9
2.1.1 微分方程	10
2.1.2 复数和复变函数	11
2.1.3 拉普拉斯变换与传递函数	12
2.1.4 方框图及其等效变换	16
2.1.5 系统辨识	20
2.2 典型环节	24
2.3 稳定性	31
2.4 稳态误差	32
2.5 频率特性	36
2.5.1 频率特性分析	37
2.5.2 对数幅相频率特性的稳定性判据	41

2.5.3 稳定性裕量	44
2.6 控制系统性能校正	45
2.6.1 系统的性能指标	47
2.6.2 系统闭环零点、极点的分布与系统性能的关系	49
2.6.3 并联校正	50
2.6.4 串联校正	53
2.6.5 控制器类型	57
第 3 章 电液伺服阀	61
3.1 电液伺服阀的组成	61
3.1.1 电气 — 机械转换器	61
3.1.2 液压放大器	63
3.2 电液伺服阀的分类	65
3.3 伺服阀液压放大器的静特性分析	65
3.3.1 滑阀	66
3.3.2 喷嘴挡板阀	88
3.3.3 射流管阀	98
3.4 常用电液伺服阀	103
3.4.1 力反馈式电液伺服阀	103
3.4.2 射流管式电液伺服阀	104
3.4.3 位置反馈式伺服阀	105
3.5 电液伺服阀的主要性能指标	106
3.5.1 静态特性	106
3.5.2 动态特性	111
第 4 章 液压动力元件	113
4.1 四边阀控制液压缸	113
4.1.1 基本方程	113
4.1.2 方框图与传递函数	116
4.1.3 传递函数简化	117
4.1.4 频率响应分析	122
4.2 四边阀控制液压马达	128
4.3 双边阀控制液压缸	129
4.3.1 基本方程	130
4.3.2 传递函数	131
4.4 泵控液压马达	132

4.4.1 基本方程	133
4.4.2 传递函数	134
4.4.3 泵控液压马达与阀控液压马达的比较	135
第 5 章 液压伺服系统	137
5.1 机液伺服系统	137
5.1.1 系统方框图	137
5.1.2 系统稳定性分析	138
5.1.3 机液伺服系统举例	140
5.2 电液伺服系统	146
5.2.1 电液位置伺服系统	146
5.2.2 电液速度控制系统	148
5.2.3 电液力控制系统	149
第 6 章 典型液压伺服系统举例	155
6.1 液压缸速度控制系统	155
6.2 汽车转向助力装置	156
6.3 撒盐车电液伺服系统	156
6.4 水平连铸电液伺服系统	157
6.5 跑偏控制伺服系统	159
6.6 液压压下伺服系统	161
6.7 卷取机恒张力控制系统	165
第 7 章 比例电磁铁与电液比例阀	169
7.1 比例电磁铁	169
7.1.1 电—机械转换元件的作用及形式	169
7.1.2 电磁铁的结构与工作原理	170
7.1.3 比例电磁铁的特性	171
7.1.4 比例电磁铁的分类与应用	174
7.1.5 比例电磁铁的设计	177
7.2 电液比例阀	178
7.2.1 概述	178
7.2.2 电液比例压力控制阀	180
7.2.3 电液比例方向阀	188
7.2.4 电液比例流量控制阀	192
7.2.5 压力补偿器	196
7.2.6 电液比例复合阀	199

第 8 章 电液比例容积控制	201
8.1 容积泵的基本控制方法	201
8.1.1 流量适应控制	201
8.1.2 压力适应控制	204
8.1.3 功率适应控制	206
8.1.4 恒功率控制	207
8.2 电液比例排量调节型变量泵和变量马达	209
8.2.1 位移直接反馈式比例排量调节	210
8.2.2 位移—力反馈式比例排量调节变量泵	212
8.2.3 位移—电反馈型比例排量调节	213
8.3 电液比例压力调节型变量泵	214
8.4 电液比例流量调节型变量泵	214
8.4.1 稳流量调节控制原理	215
8.4.2 电液比例流量调节型变量泵的特性	216
8.4.3 带流量适应的比例流量调节型变量泵	217
8.5 电液比例压力和流量调节型变量泵	218
8.5.1 压力补偿型比例压力和流量调节型变量泵	218
8.5.2 电反馈型比例压力和流量调节型变量泵	220
8.6 二次静压调节技术	222
8.6.1 二次静压调节技术的概述	222
8.6.2 二次调节静液传动的工作原理	223
8.6.3 二次调节系统的转速控制	224
8.6.4 二次调节系统的转矩控制	225
8.6.5 二次调节系统的功率控制	226
8.6.6 二次调节静液传动系统的特点	228
8.6.7 二次调节技术的主要应用	229
第 9 章 电液比例控制基本回路	233
9.1 比例压力控制回路	233
9.1.1 比例溢流调压回路	233
9.1.2 比例容积调压回路	235
9.1.3 比例减压回路	235
9.1.4 比例压力控制回路应用	237
9.2 电液比例速度控制回路	237
9.2.1 比例节流流量控制回路	237

9.2.2	比例容积式流量控制回路	238
9.2.3	比例容积节流式流量控制回路	239
9.2.4	比例流量控制回路应用	240
9.3	电液比例方向速度控制回路	242
9.3.1	对称执行元件比例方向控制回路	242
9.3.2	非对称执行元件的比例方向控制回路	243
9.3.3	比例差动方向速度控制回路	244
9.3.4	其他使用比例方向阀的实用回路	245
9.3.5	比例方向速度控制回路应用	248
9.4	比例复合回路	250
9.4.1	比例压力 - 流量复合阀调压调速回路	250
9.4.2	比例压力 - 流量调节型变量泵回路	251
9.5	应用于比例节流的压力补偿回路	252
9.5.1	进口节流压力补偿回路	252
9.5.2	出口节流压力补偿回路	255
第 10 章	电液比例控制技术的工程应用	257
10.1	电液比例控制技术在钢管水压试验机上的应用	257
10.2	电液比例控制技术在 CVT 中的应用	259
10.3	管拧机浮动抱钳夹紧装置电液比例控制系统	261
10.4	带钢对中装置电液比例控制系统	263
10.5	矫直机比例控制系统	264
10.6	飞机拦阻器电液比例控制系统	267
10.7	风力发电机的变桨距比例控制系统	268
第 11 章	液压伺服与比例控制系统的分析与设计	271
11.1	液压伺服与比例控制系统的设计流程与要求	271
11.1.1	设计流程	271
11.1.2	控制系统的设计要求	271
11.2	液压伺服与比例控制系统的方案拟定	273
11.2.1	确定控制方案	273
11.2.2	确定控制系统的控制方式	273
11.2.3	确定控制系统的控制元件类型	273
11.2.4	确定控制系统的控制系统类型	273
11.2.5	确定控制系统的执行元件类型	274
11.2.6	确定控制系统的原理方框图	274

11.3	液压伺服与比例控制系统的静态设计	275
11.3.1	控制系统的供油压力的选择	275
11.3.2	液压执行元件及控制阀规格的确定	276
11.3.3	反馈传感器、放大器等元件的选择	280
11.4	液压伺服与比例控制系统的动态设计	280
11.4.1	系统的组成元件及传递函数建立	280
11.4.2	系统的方框图	283
11.4.3	系统的开环传递函数	284
11.5	液压伺服与比例控制系统的静、动态品质检验	284
11.5.1	液压伺服与比例控制系统的稳定性	285
11.5.2	液压伺服与比例控制系统的误差	285
11.5.3	控制系统的校正	286
11.6	液压伺服控制系统的液压能源选择	287
11.6.1	伺服控制系统常用的液压油源	288
11.6.2	液压能源与负载的匹配	289
11.6.3	阀控伺服系统液压能源的选择	289
11.7	液压伺服与比例控制系统设计举例	289
第 12 章	液压伺服与比例控制系统的仿真分析	293
12.1	MATLAB 仿真工具软件简介	293
12.2	闭环位置控制系统仿真实例	294
	参考文献	307
	索引	311

第 1 章 绪 论

液压伺服与比例控制是液压技术与自动控制技术相结合的工程实用技术,以自动控制技术为基础,综合运用电子、机械、液压与计算机等手段实现对相应物理量(参数)的自动控制。

液压技术的应用由来已久,早在公元 18 世纪就出现了应用于工业的水压机。在第一次世界大战前,就已经在舰船操纵系统中应用了液压伺服控制手段。20 世纪 60 年代后期,电液比例控制技术的出现又使液压技术的应用更为广泛。

液压伺服系统和比例控制系统是以伺服阀和比例阀为核心元件,按照指令信号驱动液压执行元件完成特定功能的液压控制系统。

传统的液压控制方式是开关型控制,这是迄今为止用得最多的一种控制方式。它通过电磁驱动或手动驱动来实现液压介质的通、断和方向控制,从而实现被控对象的机械化和自动化操作。但是这种方式无法实现流量、压力连续、按比例地控制,同时控制的速度也比较低、精度差、换向时冲击比较大,因此在许多场合下的应用受到了限制。第二次世界大战期间,飞机、火炮等军事装备的控制系统要求快速响应、高精度等高性能,在这个背景下电液伺服控制得到了迅速发展。这种控制方式可根据输入信号(如电流)的大小连续、按比例地改变液流的流量、压力和方向,克服开关型控制的缺点,实现高性能的控制要求。

20 世纪 60 年代电液伺服控制日趋成熟,迅速向民用工业推广。但是,由于液压伺服系统元件的制造精度要求很高、成本昂贵等不利因素,限制了该技术更为广泛的普及应用。对于一般工业应用中对控制精度与响应速度等要求不是很高的系统,电液比例控制技术具有对油液污染不敏感、维护简单、成本低廉等优势,因此获得了越来越普遍的应用。

从广义上讲,凡是输出量,如压力、流量、位移、速度、加速度等,能随输入信号连续、按比例变化的控制系统,都称为比例控制系统。从这个意义上说,伺服控制也是一种比例控制。

但是通常所说的比例控制系统是特指介于开关控制和伺服控制之间的一种新型控制系统。与开关控制系统相比,它能实现连续、比例控制,并且控制精度高、反应速度快;与伺服控制系统相比,由于比例阀是在普通工业用阀的基础上改造而成的,因此加工精度不高,成本低廉,抗污染性能好。比例控制系统的控制精度、反应速度等虽然比伺服阀和伺服系统的差,但能满足大多数工业控制的要求,并且阀内压降小,能节省能耗,降低发热量。

比例控制主要用于开环系统,伺服控制主要用于闭环系统。伺服控制装置总是带有内反馈,任何检测到的误差都会引起系统状态的改变,而这种改变正是为了清除误差而进行的调整。

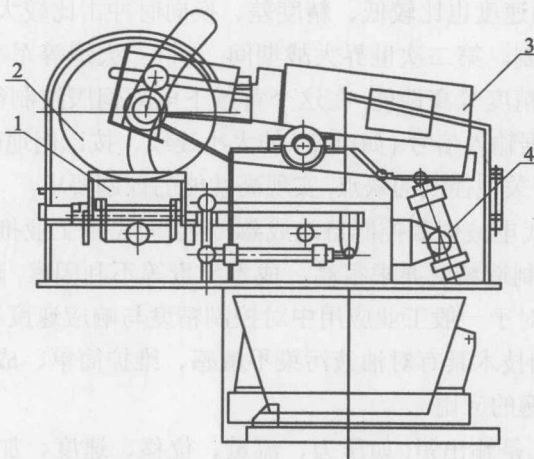
1.1 液压伺服与比例系统的组成与工作原理

1.1.1 液压伺服系统示例

液压伺服系统是以液压动力元件为驱动装置所组成的反馈控制系统。亦称随动系统,一般称控制系统。

1. 系统举例 1——液压磨切锯切割钢坯控制系统

图 1.1 为液压磨切锯的结构图。液压磨切锯是冶金工业一种广泛应用的重要切割设备。液压磨切锯中使用的液压伺服系统能够合理地控制进给速度,同时还及时补偿由磨削轮和钢坯之间在切削过程中所引起的转矩的变化,大大地提高了生产效率。使用液压伺服系统控制,使得磨削轮和钢坯传动带之间取得最佳配合,再配合 PID 控制,对磨切锯液压伺服系统的传递函数进行最优化,从而完成钢坯的精确切割。其控制系统方框图如图 1.2 所示。



1. 钢坯板; 2. 磨削轮; 3. 驱动部件; 4. 液压缸

图 1.1 液压磨切锯的结构图

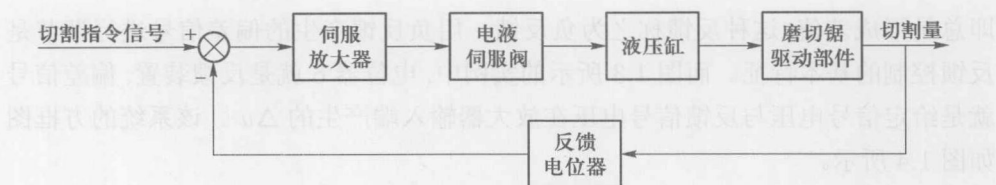
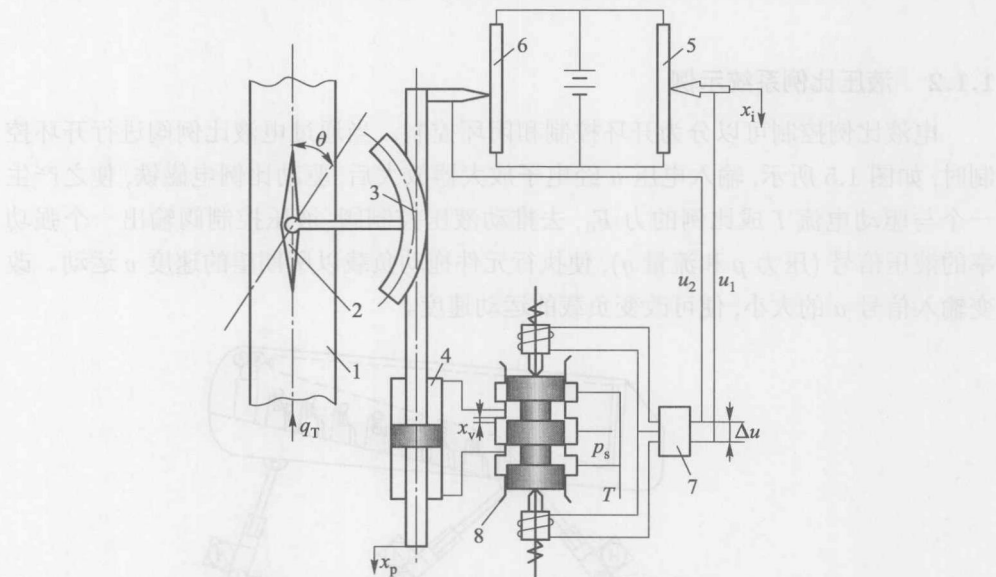


图 1.2 液压磨切锯切割控制系统方框图

2. 系统举例 2 —— 阀板转角控制系统

图 1.3 所示为一阀板转角控制系统的电流伺服系统。在大口径流体管道 1 中，阀板 2 的转角 θ 变化会产生节流作用，从而起到调节流量的作用。阀板 2 的转动由液压缸 4 带动齿轮齿条 3 来实现。这个系统的输入量是电位器 5 的给定值。



1. 流体管道; 2. 阀板; 3. 齿轮齿条; 4. 液压缸; 5. 给定电位器;
6. 反馈电位器; 7. 放大器; 8. 电液伺服阀

图 1.3 阀板转角控制系统的电液伺服系统

对应给定值 x_i ，有一定的电压 u_1 输送给放大器 7，放大器 7 将电压信号转换为电流信号施加到伺服阀 8 的电磁线圈中，使阀芯产生相应的开口量 x_v 。液压油经阀开口进入液压缸上腔，推动液压缸活塞杆下移。液压缸下腔的油液经伺服阀流回油箱。液压缸活塞杆向下移动，使齿轮齿条 3 带动阀板 2 产生偏转。同时，液压缸活塞杆也带动反馈电位器 6 的触点下移 x_p 。当 x_p 所对应的电压 u_2 与 x_i 所对应的电压 u_1 相等时，两者之差为零。这时，放大器的输出电流亦为零，伺服阀关闭，液压缸带动的阀板停在相应的位置。

在控制系统中，将被控对象的输出信号反馈到系统输入端，并与给定值进行比较而形成偏差信号，从而产生对被控信号的控制作用。反馈信号与被控信号相反，

即总是形成差值,这种反馈称之为负反馈。用负反馈产生的偏差信号进行调节是反馈控制的基本特征。而图 1.3 所示的实例中,电位器 6 就是反馈装置,偏差信号就是给定信号电压与反馈信号电压在放大器输入端产生的 Δu 。该系统的方框图如图 1.4 所示。



图 1.4 管道流量电液伺服系统方框图

1.1.2 液压比例系统示例

电液比例控制可以分为开环控制和闭环控制。当通过电液比例阀进行开环控制时,如图 1.5 所示,输入电压 u 经电子放大器放大后,驱动比例电磁铁,使之产生一个与驱动电流 I 成比例的力 F_d ,去推动液压控制阀,液压控制阀输出一个强功率的液压信号(压力 p 和流量 q),使执行元件拖动负载以所期望的速度 v 运动。改变输入信号 u 的大小,便可改变负载的运动速度。

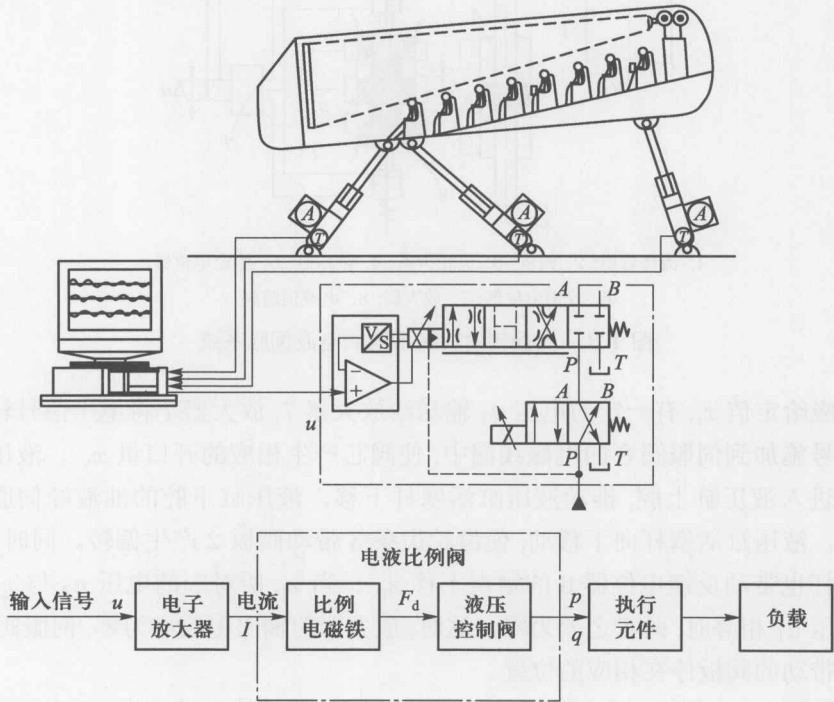


图 1.5 电液比例开环控制系统及方框图

若需提高控制性能,可以采用闭环控制,如图 1.6 所示。这时,可在开环控制的基础上增加一个测量反馈元件,不断测量系统的输出量 v ,并将它转换成一个与之成比例的电压 u_2 ,反馈到系统的输入端,同输入信号 u_1 比较,形成偏差 e 。

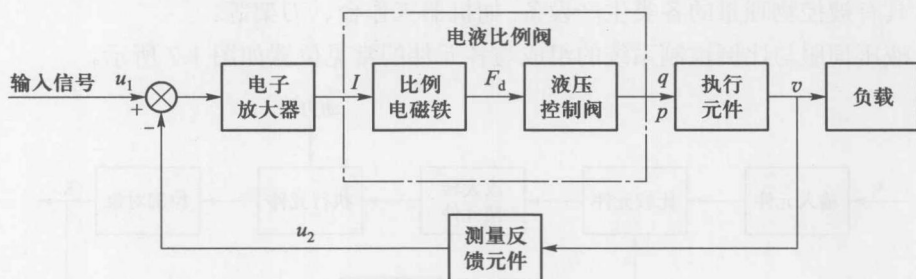


图 1.6 电液比例闭环控制系统方框图

此偏差信号 e 经放大、校正后,加到电液比例阀上,放大成强功率的液压能 p 和 q 去驱动执行元件,以拖动负载朝着消除偏差的方向运动,直到偏差 e 趋近于零为止。比较图 1.2 与图 1.6 可知,电液比例控制系统同电液伺服系统相似,只不过用电液比例阀取代了伺服系统中的电液伺服阀而已。

1.1.1.3 液压伺服与比例控制系统的组成

上述伺服与比例控制系统都是由输入元件、比较元件、电气放大器、液压伺服(比例)控制阀、执行元件、反馈元件(闭环系统)和控制对象这几部分组成的。

1. 输入元件

将指令信号引入系统的输入端的元件。该元件可以是机械的、电气的、液压的或者是其他的组合形式。

2. 比较元件

将反馈测量信号和输入信号相比较而得出偏差信号的元件。

3. 电气放大器

伺服阀与比例阀的电气放大器将控制系统的控制信号(电流或电压)转换成具有足够驱动能力(功率)的电力信号,用来驱动电液伺服阀或比例阀完成控制动作。

4. 液压伺服(比例)阀

利用电气放大器输出的驱动电能,通过液压放大作用,转换成大功率的液压能量的元件。

5. 执行元件

将控制作用施加于控制对象实现控制目标的元件,如液压缸和液压马达。

6. 反馈测量元件