

# 实用电液 比例技术

吴根茂 邱敏秀 王庆丰 等编著



浙江大学出版社

# 实用电液比例技术

吴根茂 邱敏秀 王庆丰等编著

浙江大学出版社

(浙)新登字 10 号

### 内容简介

本书对电液比例控制技术所涉及的电控制器,比例电磁铁,各类比例压力阀,流量阀,方向阀和比例泵等的相关基础理论、控制原理、性能特点、工程应用作了比较全面的论述,并对其静态特性进行了分析,对电液比例控制器件及系统的测试及计算机仿真作了相应的介绍。本书着重从工程应用角度进行系统的深入浅出的论述,可作流体传动及控制、机械电子工程,以及相关机械、电子专业的教材,也可供相关工程技术人员、大专院校师生参考。

### 实用电液比例技术

吴银康 邱敏秀 王庆丰等编著

责任编辑:宋纪海

浙江大学出版社出版

杭州富阳何云印刷厂印刷

浙江省新华书店发行

---

787×1092 16开 20.5印张 524.8千字

1993年9月第1版 1993年9月第1次印刷

印数:0001—1000

ISBN 7-308-01170-4/TH·040 定价:9.85元

# 前 言

电液比例控制技术是近 20 年发展起来介于普通断通控制与电液伺服控制之间的新型电液控制技术公支,它已成为机电一体化的基本构成之一。电液比例控制技术在近 10 年得到迅猛发展,其性能有显著提高,其应用领域得以迅速拓展。本书侧重从工程应用角度,从与普通断通控制及电液伺服控制既相互联系又相互区别角度,介绍电液比例控制器件的基本类型,工作原理,性能和功能特点;研究组成实用电液比例控制系统的原理、特征、设计和使用要点。

本书引用了编著者和浙江大学流体传动及控制研究所十余年来的研究成果和国内外相关技术资料。本书由长期进行电液比例控制技术科研和教学工作的同志集体编写。第一、二、三、六、七、十章由吴根茂执笔;第八、九、十二章由邱敏秀执笔;第四、五、十四章由五庆丰执笔;第十三章由邵大文执笔;第十一章由金力民执笔;全书由吴根茂统稿。由于时间和条件的限制,书稿虽经修改,仍难免有疏漏或错误之处,请读者指正。

“感谢张礼明先生为全书绘制插图”。

作者

1992 年 9 月

# 目 录

## 第一章 比例技术概述

|                                |     |
|--------------------------------|-----|
| § 1.1 比例技术含义 .....             | (1) |
| § 1.2 技术发展概况 .....             | (2) |
| § 1.3 电液比例控制的技术特征 .....        | (4) |
| 1.1.1 性能特点 .....               | (4) |
| 1.1.2 原理特点 .....               | (5) |
| 1.1.3 结构特点 .....               | (5) |
| § 1.4 比例控制系统的构成分类<br>及特点 ..... | (6) |
| 1.4.1 比例控制系统的构成与分类 .....       | (6) |
| 1.4.2 比例控制系统的基本特点 .....        | (9) |

## 第二章 压力与流量

|                                   |      |
|-----------------------------------|------|
| § 2.1 压力 .....                    | (13) |
| 2.1.1 压力区的划分 .....                | (13) |
| 2.1.2 压力基本公式 .....                | (13) |
| 2.1.3 有效体积弹性模量 .....              | (14) |
| 2.1.4 压力区动态特性实验举例 .....           | (16) |
| 2.1.5 ISO 有关压力飞升速率分级<br>的规定 ..... | (18) |
| § 2.2 流量 .....                    | (19) |
| 2.2.1 液压量与电量的类比 .....             | (19) |
| 2.2.2 流量的基本公式 .....               | (19) |
| § 2.3 压力与流量的基本控制方式 .....          | (22) |
| 2.3.1 控制量与干扰量 .....               | (22) |
| 2.3.2 节流(恒排量)控制与流量(恒流量)控制 .....   | (22) |
| 2.3.3 开关控制与比例控制 .....             | (23) |
| 2.3.4 阀控与泵控 .....                 | (25) |

## 第三章 液压阀上的作用力

|                       |      |
|-----------------------|------|
| § 3.1 液动力 .....       | (26) |
| § 3.2 摩擦力与液压卡紧力 ..... | (27) |
| § 3.3 液压力 .....       | (29) |
| § 3.4 弹簧力 .....       | (29) |

## 第四章 比例控制放大器 与检测反馈系统

|                       |      |
|-----------------------|------|
| § 4.1 比例控制放大器概述 ..... | (30) |
| 4.1.1 典型构成 .....      | (30) |
| 4.1.2 分类 .....        | (30) |

|                                      |      |
|--------------------------------------|------|
| § 4.2 比例控制放大器主要电路的<br>构成、原理及功能 ..... | (32) |
| 4.2.1 电源电路 .....                     | (32) |
| 4.2.2 输入接口单元 .....                   | (32) |
| 1) 模拟量输入接口 .....                     | (32) |
| 2) 数字量输入接口 .....                     | (34) |
| 3) 遥控接口 .....                        | (34) |
| 4.2.3 信号处理电路 .....                   | (34) |
| 1) 斜坡信号发生器 .....                     | (34) |
| 2) 阶跃函数发生器 .....                     | (35) |
| 3) 双路平衡电路 .....                      | (35) |
| 4) 初始电流设定电路 .....                    | (36) |
| 4.2.4 调节器 .....                      | (36) |
| 1) P 调节器 .....                       | (37) |
| 2) I 调节器 .....                       | (37) |
| 3) PI 调节器 .....                      | (38) |
| 4) D 调节器 .....                       | (38) |
| 5) PD 调节器 .....                      | (39) |
| 6) PID 调节器 .....                     | (39) |
| 4.2.5 颤振信号发生器 .....                  | (42) |
| 4.2.6 测量放大电路 .....                   | (42) |
| 4.2.7 功率放大级 .....                    | (42) |
| 1) 模拟式功率放大级 .....                    | (44) |
| 2) 开关式功率放大级 .....                    | (44) |
| 3) 快速型功率放大级 .....                    | (47) |
| § 4.3 国内外几种典型比例控制放大器<br>简介 .....     | (48) |
| 4.3.1 国内外比例控制放大器发展<br>概况 .....       | (48) |
| 4.3.2 几种常用比例控制放大器简介 .....            | (49) |
| 4.3.3 专用比例控制放大器 .....                | (53) |
| § 4.4 比例控制放大器的使用 .....               | (55) |
| 4.4.1 电源 .....                       | (55) |
| 4.4.2 规格及连接插座 .....                  | (55) |
| 4.4.3 输入信号 .....                     | (55) |
| 4.4.4 接线与安装 .....                    | (55) |
| 4.4.5 调整 .....                       | (56) |
| 4.4.6 检查正确运行情况 .....                 | (57) |
| § 4.5 检测反馈系统 .....                   | (57) |

|                                |      |
|--------------------------------|------|
| 4.5.1 基本结构 .....               | (57) |
| 4.5.2 常用传感器件简介 .....           | (57) |
| 1) 位移(转角)传感器件 .....            | (57) |
| 2) 速度传感器件 .....                | (60) |
| 3) 压力传感器件 .....                | (61) |
| 4) 流量传感器件 .....                | (63) |
| 4.5.3 检测反馈电路 .....             | (67) |
| 1) 测量放大电路 .....                | (67) |
| 2) 匹配放大器 .....                 | (69) |
| 4.5.4 比例阀内部常见的检测<br>反馈形式 ..... | (69) |
| 4.5.5 检测反馈系统的选择 .....          | (70) |

## 第五章 比例电磁铁

|                                 |      |
|---------------------------------|------|
| § 5.1 比例电磁铁结构、工作原理<br>及分类 ..... | (71) |
| 5.1.1 典型结构和工作原理 .....           | (71) |
| 5.1.2 比例电磁铁的分类 .....            | (73) |
| 5.1.3 国内外比例电磁铁的发展概况 .....       | (73) |
| § 5.2 比例电磁铁的控制特性 .....          | (77) |
| 5.2.1 稳态控制特性 .....              | (77) |
| 1) 不带位移反馈型 .....                | (77) |
| 2) 带位移反馈型 .....                 | (77) |
| 5.2.2 动态控制特性 .....              | (77) |
| 1) 线圈电流动态特性 .....               | (77) |
| 2) 输出力动态特性 .....                | (78) |
| 3) 位移动态特性 .....                 | (81) |
| 5.2.3 动态控制特性的改善 .....           | (81) |
| 5.2.4 比例电磁铁的性能测试 .....          | (83) |
| § 5.3 耐高压双向极化式比例电磁铁 .....       | (85) |
| § 5.4 比例电磁铁的运行与调整 .....         | (85) |
| 5.4.1 比例电磁铁的运行 .....            | (85) |
| 5.4.2 比例电磁铁的调整 .....            | (86) |
| § 5.5 旋转电磁铁 .....               | (87) |

## 第六章 先导控制液压桥路

|                        |      |
|------------------------|------|
| § 6.1 概述 .....         | (89) |
| 6.1.1 液桥与电桥的类比 .....   | (89) |
| 6.1.2 液桥的基本功能 .....    | (89) |
| 6.1.3 液压半桥 .....       | (89) |
| § 6.2 基本液压半桥 .....     | (90) |
| 6.2.1 半桥的基本类型 .....    | (90) |
| 6.2.2 半桥构成的基本原则 .....  | (90) |
| 6.2.3 液桥构成分析实例 .....   | (92) |
| 6.2.4 对先导控制液桥的要求 ..... | (93) |
| § 6.3 典型的无因次特性 .....   | (93) |

|                                |       |
|--------------------------------|-------|
| 6.3.1 三种基本半桥的特性曲线 .....        | (93)  |
| 6.3.2 压力增益和流量增益 .....          | (95)  |
| § 6.4 滑阀式先导级 .....             | (96)  |
| 6.4.1 阀口特性曲线 .....             | (96)  |
| 6.4.2 滑阀式先导液桥特性曲线<br>的修正 ..... | (98)  |
| § 6.5 锥阀式先导级 .....             | (99)  |
| § 6.6 先导液桥中的液阻 .....           | (100) |
| 6.6.1 固定液阻的工作点 .....           | (100) |
| 6.6.2 动态阻尼 .....               | (100) |
| 6.6.3 动压反馈 .....               | (101) |
| § 6.7 液压半桥实例 .....             | (102) |
| 6.7.1 A型半桥 .....               | (102) |
| 6.7.2 B型半桥 .....               | (103) |
| 6.7.3 C型半桥 .....               | (104) |

## 第七章 比例压力阀

|                        |       |
|------------------------|-------|
| § 7.1 压力阀的分类 .....     | (105) |
| § 7.2 溢流阀的功能与特性 .....  | (105) |
| 7.2.1 基本功能 .....       | (105) |
| 7.2.2 直接控制式溢流阀 .....   | (105) |
| 7.2.3 先导式溢流阀 .....     | (110) |
| § 7.3 先导式比例减压阀 .....   | (118) |
| 7.3.1 二通型减压阀 .....     | (118) |
| 7.3.2 三通型减压阀 .....     | (123) |
| § 7.4 直接作用式比例减压阀 ..... | (125) |
| 7.4.1 三通滑阀型比例减压阀 ..... | (126) |
| 7.4.2 三通插装型比例减压阀 ..... | (127) |
| 7.4.3 手动先导阀 .....      | (128) |

## 第八章 电液比例流量控制阀

|                                 |       |
|---------------------------------|-------|
| § 8.1 节流控制的基本原理及分类 .....        | (129) |
| 8.1.1 基本原理 .....                | (129) |
| 8.1.2 分类 .....                  | (129) |
| § 8.2 电液比例节流阀 .....             | (130) |
| 8.2.1 单级比例节流阀 .....             | (130) |
| 1) 普通型单级比例节流阀 .....             | (130) |
| 2) 位置——电反馈型单级比例<br>节流阀 .....    | (131) |
| 8.2.2 先导式比例节流阀 .....            | (132) |
| 1) 位移——力反馈型先导式<br>比例节流阀 .....   | (132) |
| 2) 三级控制型大流量比例<br>节流阀 .....      | (134) |
| 3) 位移——电反馈型先导控制<br>式比例节流阀 ..... | (137) |

|                          |       |
|--------------------------|-------|
| 8.3.3 比例节流阀的基本特性分析 ..... | (137) |
| 1) 阀口形状对稳态控制特性           |       |
| 曲线的影响 .....              | (137) |
| 2) 阀口形状对输出流量的影响 .....    | (137) |
| 3) 抗负载干扰能力的评价 .....      | (138) |
| 4) 输入信号阶跃响应特性 .....      | (139) |
| 5) 频率响应特性 .....          | (139) |
| 8.3.4 比例节流阀的选用原则 .....   | (139) |
| 1) 最低工作压差选择 .....        | (139) |
| 2) 阀的功率域 .....           | (139) |
| 3) 如何选择比例节流阀的            |       |
| 公称流量 .....               | (140) |
| 4) 比例节流阀的应用特点 .....      | (140) |
| § 8.3 电液比例流量阀 .....      | (141) |
| 8.3.1 二通型电液比例流量阀 .....   | (141) |
| 1) 传统减压节流型比例流量阀 .....    | (141) |
| 2) 流量——力反馈二通比例           |       |
| 流量阀 .....                | (142) |
| 3) 流量——电反馈二通比例           |       |
| 流量阀 .....                | (147) |
| 8.3.2 三通型电液比例            |       |
| 流量阀 .....                | (149) |
| 1) 定差溢流型三通比例流量阀 .....    | (150) |
| 2) 流量——力反馈型三通比例          |       |
| 流量阀 .....                | (151) |
| 3) 电反馈型三通比例流量阀 .....     | (154) |
| 4) 电液比例压力流量复合阀 .....     | (155) |
| 8.3.3 力反馈型比例流量(节流)阀      |       |
| 的设计 .....                | (158) |
| 1) 单控制边先导级 .....         | (158) |
| 2) 反馈弹簧估算 .....          | (160) |
| 3) 二通插装式主阀的特点 .....      | (161) |
| 8.3.4 比例流量阀的基本特性 .....   | (161) |
| 1) 阀的最大输出流量 .....        | (161) |
| 2) 比例流量阀的调节区间 .....      | (161) |
| 3) 时域特性 .....            | (162) |
| 4) 频域特性 .....            | (162) |
| 8.3.5 电液比例流量阀的选用 .....   | (162) |

## 第九章 电液比例方向阀

|                           |       |
|---------------------------|-------|
| § 9.1 电液比例方向阀的特点与分类 ..... | (165) |
| 9.1.1 电液比例方向阀的特点 .....    | (165) |
| 9.1.2 电液比例方向阀的分类 .....    | (165) |
| § 9.2 直接控制式比例方向节流阀 .....  | (166) |
| 9.2.1 普通型直控式比例方向节流阀 ..... | (166) |

|                           |       |
|---------------------------|-------|
| 9.2.2 位移——电反馈直控式比例        |       |
| 方向节流阀 .....               | (166) |
| § 9.3 先导式电液比例方向节流阀 .....  | (168) |
| 9.3.1 先导压力控制型二级比例         |       |
| 方向节流阀 .....               | (169) |
| 9.3.2 级间位置反馈型比例方向节        |       |
| 流阀 .....                  | (170) |
| 9.3.3 位移——力反馈型比例方向节       |       |
| 流阀 .....                  | (171) |
| 9.3.4 位移——电反馈型比例方向节       |       |
| 流阀 .....                  | (172) |
| § 9.4 比例方向节流阀的设计与应用 ..... | (177) |
| 9.4.1 控制阀口设计 .....        | (177) |
| 9.4.2 滑阀机能及中间过渡形式 .....   | (177) |
| 9.4.3 非对称型节流阀口 .....      | (177) |
| 9.4.4 各种阀芯型式的基本用法示例 ..... | (177) |
| 9.4.5 无泄漏的比例方向阀系统 .....   | (179) |
| 9.4.6 比例方向阀的 I—Q 特性 ..... | (180) |
| 9.4.7 用 I—Q 特性曲线选用比例      |       |
| 方向阀 .....                 | (181) |
| § 9.5 电液比例方向流量阀 .....     | (183) |
| 9.5.1 定差减压型电液比例方向         |       |
| 流量阀 .....                 | (184) |
| 9.5.2 定差溢流型电液比例方向         |       |
| 流量阀 .....                 | (189) |
| 9.5.3 带位移——流量——压力反馈       |       |
| 节流口的负载补偿型比例方向             |       |
| 流量阀 .....                 | (189) |
| 9.5.4 流量反馈型电液比例方向         |       |
| 流量阀 .....                 | (192) |
| § 9.6 插装式电液比例方向阀 .....    | (192) |
| 9.6.1 二通插装式比例方向阀 .....    | (192) |
| 9.6.2 三通插装式比例方向阀 .....    | (193) |

## 第十章 比例控制液压泵

|                           |       |
|---------------------------|-------|
| § 10.1 变量泵的基本原理 .....     | (195) |
| 10.1.1 容积式泵工作原理 .....     | (195) |
| 10.1.2 变量调节原理 .....       | (195) |
| 10.1.3 基本类型 .....         | (196) |
| 10.1.4 电液比例控制液压泵 .....    | (196) |
| § 10.2 比例控制排量调节泵 .....    | (197) |
| 10.2.1 位移直接反馈式排量调节 .....  | (197) |
| 10.2.2 位移——力反馈式排量调节 ..... | (198) |
| § 10.3 比例控制压力调节泵 .....    | (199) |
| 10.3.1 基本功能 .....         | (199) |

|                    |                   |       |
|--------------------|-------------------|-------|
| 10.3.2             | 压力调节泵的主要用途        | (200) |
| 10.3.3             | 基本类型              | (200) |
| 10.3.4             | 应用实例              | (201) |
| 10.3.5             | 应用实例之二(失效例)       | (204) |
| § 10.4             | 比例控制流量调节泵         | (204) |
| 10.4.1             | 基本功能              | (205) |
| 10.4.2             | 基本类型              | (205) |
| 1)                 | 传统压差控制型           | (205) |
| 2)                 | 内含流量传感器检测         |       |
| 反馈型                |                   | (206) |
| 3)                 | 电反馈型              | (206) |
| 4)                 | 泄漏电反馈补偿型          | (206) |
| § 10.5             | 功率调节泵             | (207) |
| 10.5.1             | 带压力和位置反馈的         |       |
| 恒功率调节              |                   | (207) |
| 10.5.2             | 现场可调的恒功率泵(A7VOLR) | (208) |
| 10.5.3             | 双泵总功率控制           | (208) |
| 10.5.4             | 速度敏感控制            | (210) |
| § 10.6             | 复合控制变量泵           | (212) |
| 10.6.1             | 压力、流量(或排量)的复合控制   | (212) |
| 1)                 | 传统方式的压力流量复合       |       |
| 控制                 |                   | (212) |
| 2)                 | 内含流量传感器的压力        |       |
| 流量复合控制             |                   | (212) |
| 3)                 | 压力流量复合控制变量泵       |       |
| 的特性测试              |                   | (213) |
| 10.6.2             | 多功能复合控制变量泵        | (214) |
| 1)                 | 恒功率与恒流、限压功能组成     |       |
| 的变量控制              |                   | (214) |
| 2)                 | 恒功率与恒压恒流的复合       |       |
| 控制                 |                   | (214) |
| 3)                 | 电反馈多功能复合比例        |       |
| 控制                 |                   | (217) |
| § 10.7             | 变量泵的若干要点          | (217) |
| <b>第十一章 二次调节系统</b> |                   |       |
| § 11.1             | 引言                | (218) |
| 11.1.1             | 闭式容积传动系统          | (218) |
| 11.1.2             | 功率适应系统            |       |
| (负荷传感系统)           |                   | (219) |
| 11.1.3             | 定压网络液压马达系统        | (219) |
| § 11.2             | 定压网络液压马达调节系统      |       |
| 的原理、特点及应用          |                   | (220) |
| § 11.3             | 系统分类与分析           | (220) |
| § 11.4             | 二次调节系统的应用         | (224) |

## 第十二章 电液比例元件的测试

|        |                    |       |
|--------|--------------------|-------|
| § 12.1 | 电液比例元件测试系统的组成      | (226) |
| § 12.2 | 电液比例元件的试验系统简介      | (227) |
| 12.2.1 | 试验条件               | (228) |
| 12.2.2 | 测试装置的液压回路          | (232) |
| § 12.3 | 电液比例元件的主要性能指标及试验方法 | (238) |
| 12.3.1 | 稳态控制特性             | (239) |
| 12.3.2 | 稳态负载特性             | (243) |
| 12.3.3 | 阶跃响应特性             | (244) |
| 12.3.4 | 频域响应特性             | (245) |
| § 12.4 | 计算机辅助测试技术          | (248) |
| 12.4.1 | 液压计算机辅助测试技术的特点     | (248) |
| 12.4.2 | 计算机辅助测试系统简介        | (249) |
| 12.4.3 | "SDTH"计算机辅助测试系统的应用 | (250) |
| § 12.5 | 环境与寿命试验            | (252) |
| 12.5.1 | 环境试验               | (252) |
| 12.5.2 | 寿命试验               | (253) |

## 第十三章 电液比例控制系统及其设计计算

|        |                              |       |
|--------|------------------------------|-------|
| § 13.1 | 电液比例控制系统应用实例的基本类型及应用计算       | (264) |
| 13.1.1 | 电液比例压力控制系统                   | (264) |
| 13.1.2 | 电液比例速度控制系统                   | (267) |
| 13.1.3 | 电液比例方向流量控制系统                 | (268) |
| 13.1.4 | 电液比例位置控制系统                   | (270) |
| § 13.2 | 电液比例控制系统的设计计算                | (275) |
| 13.2.1 | 液压缸面积及系统液压的估算                | (275) |
| 13.2.2 | 按系统工作过程的要求核算液压缸面积及压力         | (276) |
| 13.2.3 | 比例阀的选用                       | (277) |
| 13.2.4 | 考虑液压缸面积比和阀口面积比时,比例方向阀阀口压差的计算 | (279) |
| 13.2.5 | 系统固有频率的校核                    | (283) |

## 第十四章 比例元件及系统特性的计算机仿真



|                                        |       |                               |       |
|----------------------------------------|-------|-------------------------------|-------|
| § 14.1 概述 .....                        | (285) | 14.2.3 系统的模拟仿真 .....          | (287) |
| 14.1.1 仿真的基本概念 .....                   | (285) | § 14.3 数字仿真 .....             | (291) |
| 14.1.2 仿真的分类 .....                     | (285) | 14.3.1 数字仿真技术的概念 .....        | (291) |
| 14.1.3 仿真技术在开发比例控制<br>技术中的应用 .....     | (286) | 14.3.2 数值计算方法 .....           | (291) |
| § 14.2 模拟仿真 .....                      | (286) | 14.3.3 常用数字仿真专用软件<br>简介 ..... | (294) |
| 14.2.1 模拟计算机的基本运算部件 .....              | (286) | (第八章)附录 .....                 | (302) |
| 14.2.2 典型环节常用时间函数及<br>非线性特性的模拟仿真 ..... | (287) | 思考题与习题 .....                  | (308) |
|                                        |       | 参考文献 .....                    | (311) |

# 比例技术概述

## § 1.1 比例技术含义

70年代以来,随着人们对各类工艺过程的深入研究,已有可能写出某些工艺过程的最佳数学模型,从而对工程控制提出了更高的要求。现代微电子技术的发展,特别是计算机技术的发展和普及,又为实现各类工艺过程的最佳控制提供了技术基础。因此,工程控制理论的应用已逐步从航空、航天和军事工程领域,普及到广泛的民用工业部门。电液比例技术作为连接现代化微电子技术和大功率工程控制设备之间的桥梁,已经成为现代控制工程的基本技术构成之一。

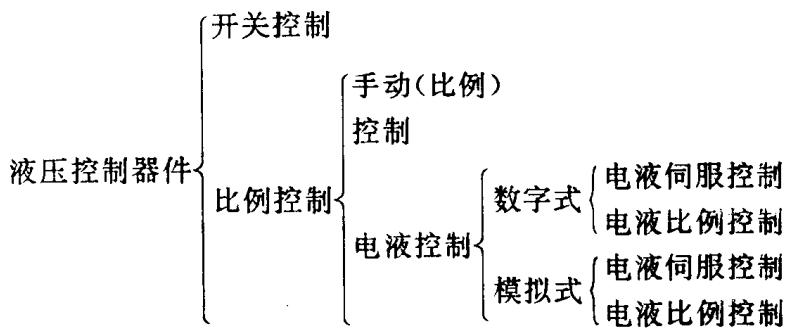
从广义上观察,在应用液压传动与控制 and 气压传动与控制的工程系统中,凡是系统的输出量,如压力、流量、位移、转速、速度、加速度、力、力矩等,能随输入控制信号连续成比例地得到控制的,都可称为比例控制系统。但在工程实用上,往往根据输入信号的不同,和系统构成的特点等,将广义的比例控制系统作出如表 1-1 所示的区分:根据输入控制信号方式,区分为手动(比例)控制和电液控制;根据控制系统构成特点和技术特性,进一步将广义概念上的电液控制,区分为一般概念上的电液伺服控制和电液比例控制。

电液伺服控制是较早主要在军事工程领域发展起来的电液控制技术,而电液比例控制技术,是针对伺服控制存在的诸如功率损失大、对油液过滤要求苛刻、制造和维护费用高等,而它提供的快速性在一般工业设备中又往往用不着的情况,在近 20 年迅速发展起来介于普通断通控制与伺服控制之间的新型电液控制技术分支。

除了模拟式电液比例元件外,早在 60 年代人们就开始注意数字式或脉冲式比例元件的开发。这类元件的优点是对介质污染不敏感,工作可靠,重复精度高,成批产品的性能一致性好。其主要缺点是由于按载频原理实现控制,故控制信号频宽较模拟器件低。数字式电液比例元件的电—机械转换器主要是步进马达和按脉冲方式工作的动铁式或动圈式力马达。数字式电液比例系统实质上是一电液数/模转换系统或载频调制系统。其控制分辨精度取决于每一脉冲的当量步长或调制精度。

本书着重讨论的是一般含义上的电液比例控制技术,介绍控制器件(含手动比例控制器件)的基本类型,工作原理,性能和功能特点,研究组成实用比例控制系统的原理,特征,设计和使用要点。

表 1-1 液压控制器件的分类



从整体看,电液比例控制技术的开发与普及,使工程系统的控制技术,进入了现代控制工程的新行列,不同程度地确立了机电一体化的技术优势。而构成电液比例技术的液压元件,却是在传统开关型和伺服型元件基础上的进一步发展。它们所依据的基础理论是一脉相承的,基本结构也是相同或相近的。另外,电液比例控制器件的基本控制物理量,与开关型和伺服型器件一样,都是压力  $p$  和流量  $Q$ 。如果撇开采用电液比例技术带来的能综合发挥微电子技术、计算机技术和液压技术优势,单从器件控制输入信号角度来看,电液比例控制仅是诸多控制信号方式,如手动、液动、机动、电动、电液等当中的一种,特殊性存在于共性之中。控制器件发展到 80 年代的一个重要特征,就是适用于多种控制输入方式,使器件能适应不同应用场合,不同技术层次的需要。

由此,本书在讨论有关器件与系统时,常涉及到不专属于电液比例控制的一般液压技术。这样处理,还可以帮助读者从更广泛角度加深对问题的了解。

## § 1.2 技术发展概况

第二次世界大战后期,由于喷气式飞机速度很高,因此对控制系统的快速性,动态精度和功率—重量比都提出了更高的要求。1940 年底,在飞机上首先出现了电液伺服系统。经过 20 余年的发展,到了 60 年代,各种结构的电液伺服阀相继问世,电液伺服技术日臻成熟。60 年代后期,各类民用工程对电液控制技术的需求,显得更加迫切与广泛。但是,由于传统的电液伺服阀对流体介质的清洁度要求十分苛刻,制造成本和维护费用比较高昂,系统能耗也比较大,难以作为各工业用户所接受。而传统的电液开关控制(断通控制)又不能满足高质量控制系统的要求。电液比例控制技术,就是要适应开发一种可靠,价廉,控制精度和响应特性均能满足工程技术实际需要的电液控制技术的要求,从 60 年代末以来迅速发展起来。与此同时,还发展了工业伺服控制技术。

工业伺服控制技术的主要特点是:在高性能伺服阀基础上,增大电—机械转换器的输出功率和适当简化伺服阀结构,着重改善阀的抗污染性能,并降低制造成本。比例阀则是以传统的工业用液压阀为基础,采用可靠、价廉的模拟电—机械转换器(比例电磁铁等)和与之相应的阀内设计,从而获得对油质要求与一般工业阀相同,阀内压力损失低,性能又能满足大部份工业控制要求的比例控制元件。其相互关系可参见图 1-1。

比例技术的发展大致可以划分为三个阶段:

从 1967 年瑞士 Beringer 公司生产 KL 比例复合阀起,到 70 年代初日本油研公司申请了压

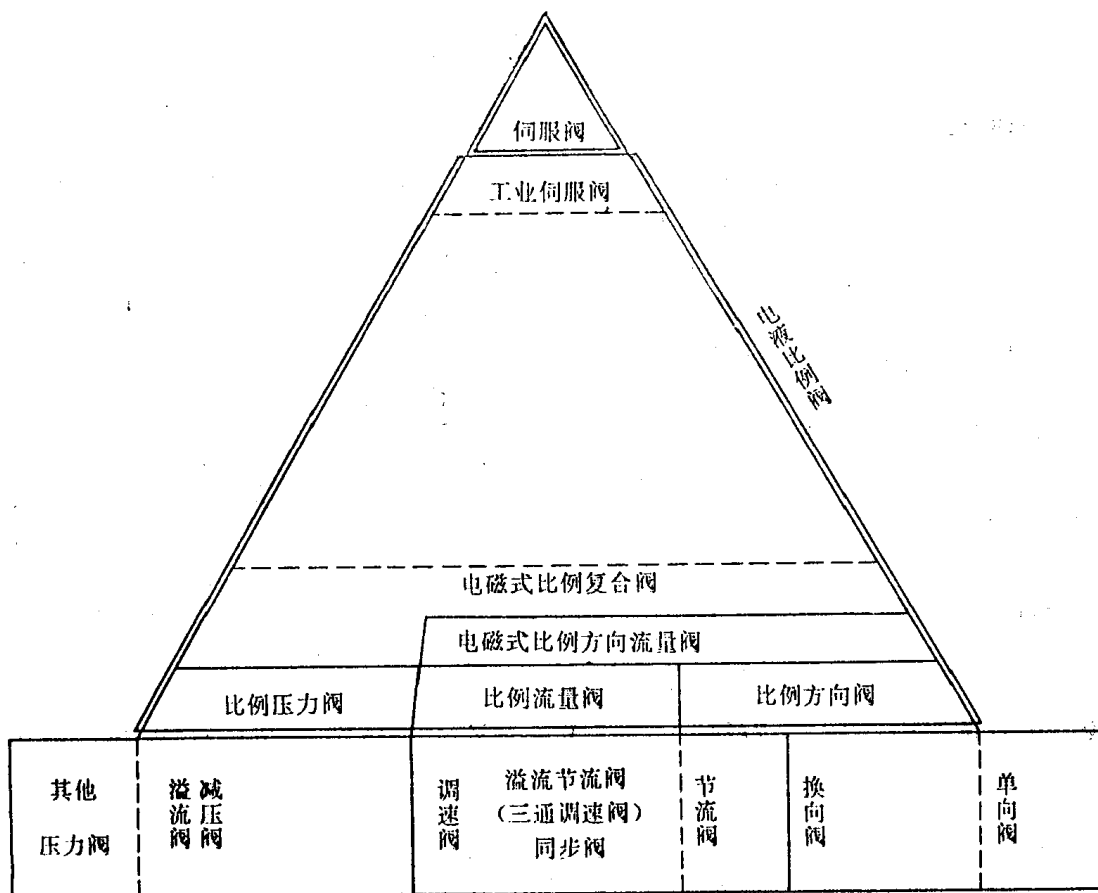


图 1-1 工业阀、比例阀、伺服阀关系图

力和流量两项比例阀专利为止，标志着比例技术的诞生时期。这一阶段的比例阀，仅仅是将比例型的电—机械转换器（如比例电磁铁）用于工业液压阀，以代替开关电磁铁或调节手柄。阀的结构原理和设计准则几乎没有变化，大多不含受控参数的反馈闭环。其工作频宽仅在  $1 \sim 5\text{Hz}$  之间，稳态滞环在  $4 \sim 7\%$  之间，多用于开环控制。

1975 年到 1980 年间，可以认为比例技术的发展进入了第二阶段。采用各种内反馈原理的比例元件大量问世，耐高压比例电磁铁和比例放大器在技术上也日趋成熟。比例元件的工作频宽已达  $5 \sim 15\text{Hz}$ ，稳态滞环亦减小到  $3\%$  左右。其应用领域日渐扩大，不仅用于开环控制，也被应用于闭环控制。

80 年代，比例技术的发展进入了第三阶段。比例元件的设计原理进一步完善，采用了压力、流量、位移内反馈和动压反馈及电校正等手段，使阀的稳态精度、动态响应和稳定性都有了进一步的提高。除了因制造成本所限，比例阀在中位仍保留死区外，它的稳态和动态特性均已和工业伺服阀无异。另一项重大进展是，比例技术开始和插装阀相结合，已开发出各种不同功能和规格的二通、三通型比例插装阀，形成了 80 年代电液比例插装技术。同时，由于传感器和电子器件的小型化，还出现了电液一体化的比例元件，电液比例技术逐步形成了 80 年代的集成化趋势。第三个值得指出的进展是电液比例容积元件，各类比例控制泵和执行元件相继出现，为大功率工程控制系统的节能提供了技术基础。

## § 1.3 电液比例控制的技术特征

### 1.3.1 性能特点

表 1-2 列出了电液伺服元件,电液比例元件和开关元件的性能对比,由表可见,现今电液比例元件的性能比起其发展早期,有了显著的提高。除比例元件具有中位死区之外,在滞环、重复精度等主要稳态特性上已与伺服阀相当,而工作频宽又具有足以满足大部份工业系统控制要求的相当水平;在对介质过滤精度要求,阀内压力损失和价格方面,又接近于开关阀。因此,赢得了比电液伺服元件远为广泛的应用领域。

表 1-2 伺服、比例、开关元件性能对照表

| 类 别<br>项 目   | 电 液<br>伺服阀 | 电 液<br>比例阀 | 早 期<br>电液比例阀 | 开关阀        |
|--------------|------------|------------|--------------|------------|
| 介质过滤度 $\mu$  | 3 ~ 10     | 25         | 25           | 25         |
| 阀内压力降 MPa    | 7/21       | 0.5 ~ 2    | 0.25 ~ 0.5   | 0.25 ~ 0.5 |
| 滞环 %         | 1 ~ 3      | 1 ~ 3      | 4 ~ 7        |            |
| 重复精度 %       | 0.5        | 0.5        | ± 1          |            |
| 频宽 $-3db$ Hz | 20 ~ 200   | 1 ~ 30     | 1 ~ 5        |            |
| 线圈功率 W       | 0.05 ~ 5   | 10 ~ 24    | 10 ~ 30      |            |
| 中位死区         | 无          | 有          | 有            | 有          |
| 价格因子         | 3          | 1          | 1            | 0.5        |

在控制性能上的第二个特点是,除了与传统工业液压阀一样,具有各种单一控制功能外,往往具有流量、方向与压力三者之间的多种复合功能。这一特点不仅表现在阀控元件,而且在容积控制元件中也越来越广泛地得到体现。阀控或容积控制元件的多功能复合,使电液比例控制系统较之传统控制,不但使系统大为简化,提高可靠性,也使控制性能得以提高。

内含主控量力反馈的电液比例元件,可适应多种控制输入方式,是其控制性能上的重要特点。这种力反馈型比例元件的控制输入电信号,最终被转化为作用于先导阀芯上的控制输入力信号。因此,将电—机械转换器替代成其他型式的输入信号—力转换器件,即能实现诸如手动调节、机械凸轮控制、油压控制等多种输入控制方式。图 1-2 给出了四种典型输入控制装置的简图。

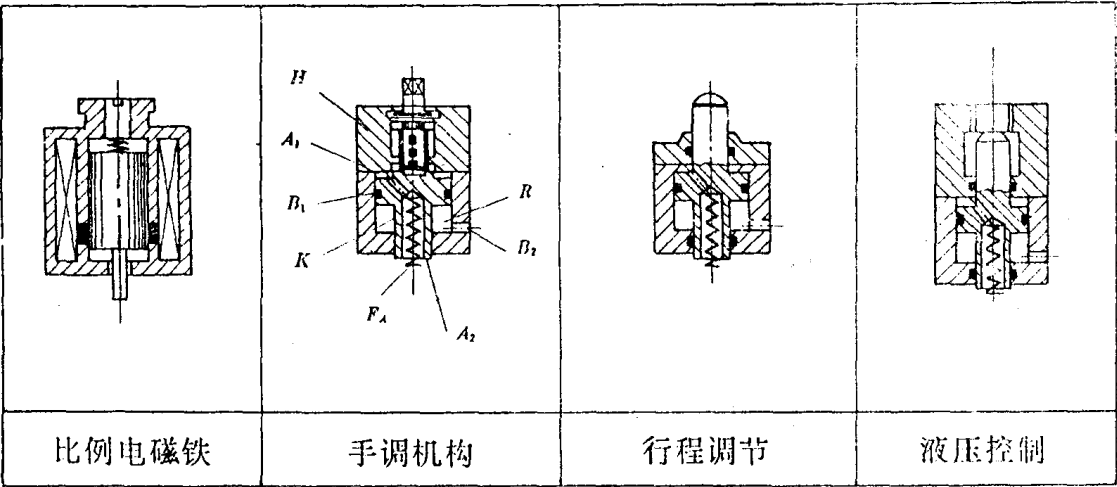


图 1-2 典型输入控制装置

内含主控量力反馈的新一代比例元件(力反馈、电反馈等)常具有多功能的技术适应性。例如带力反馈的流量控制技术,不仅适应于各类节流调节,而且同样适应于各类容积式流量调节元件(油泵、油马达等)。

### 1.3.2 原理特点

图 1-3 给出了电液比例控制阀的原理框图。由图可见,近期发展的高性能比例阀,一般都内含主控制参量的反馈闭环。这种反馈闭环,可以是主控制参量的机械或液压的力反馈,也可以是主控制参量的电反馈。

目前市场上提供的比例阀,除了占主导地位的力反馈和电反馈外,型式众多,实际上包括了比例技术发展三个阶段中开发的各种类型。早期开发的比例阀多沿用工业液压阀的传统控制原理,一般不内含主控制参量反馈闭环,多仅含局部小闭环,如表 1-2 所示,在性能上与现代比例阀有较大差别。

值得指出的是,就电—机械转换器而言,目前市场上既有耐高压比例电磁铁,又有其衔铁腔只能承受一般回油背压的低压比例电磁铁;有单向比例电磁铁,也有双向极化式比例电磁铁。

### 1.3.3 结构特点

早期比例阀,多为用比例电磁铁替代传统工业液压阀的调节手柄而成。近期的比例阀具有一些新的特点。

- 1) 与插装阀结合,开发出各种不同功能和规格的二通插装式比例阀,插孔符合 ISO 和国

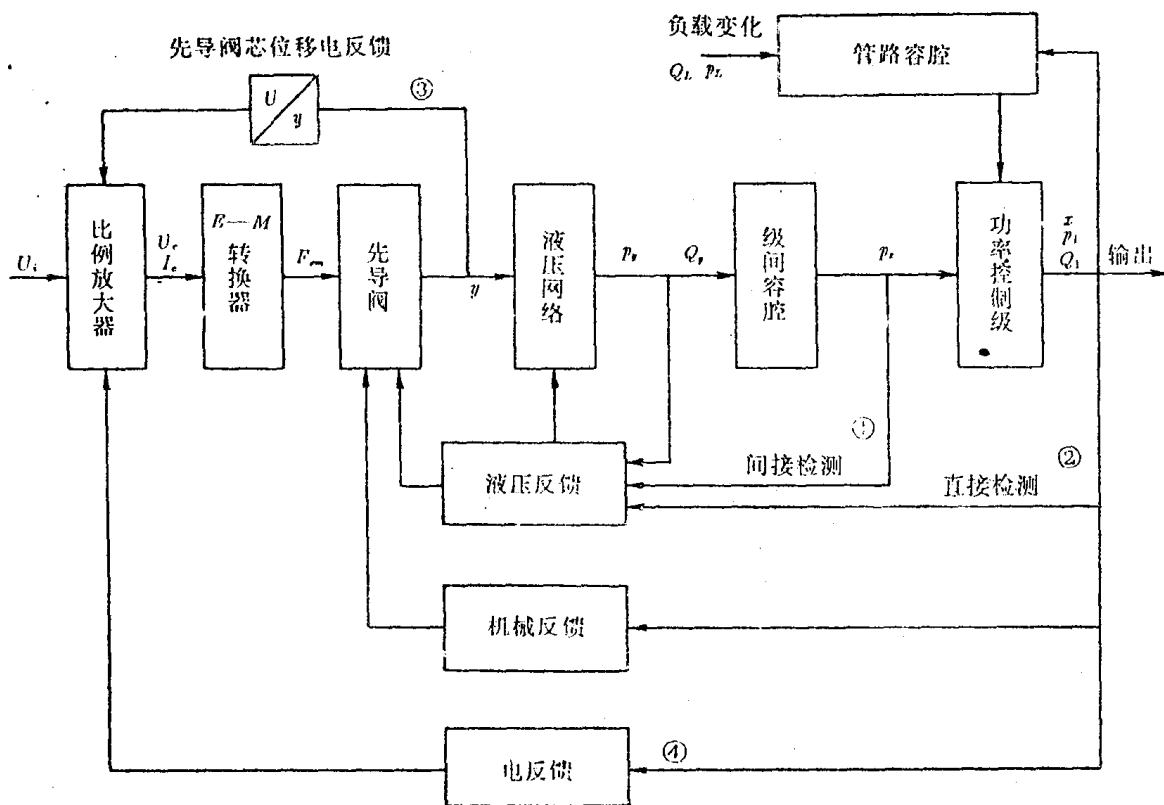


图 1-3 电液比例阀原理框图

标。二通插装型开关和比例控制元件，具有结构上的兼容特性。

2) 生产批量较大的比例压力阀、比例方向阀，常与开关阀通用主阀阀体（有的甚至通用先导阀体），有利于生产管理和标准化设计，也将给原有液压系统的技术改造带来方便。

3) 应用新近开发的双向极化式耐高压比例电磁铁，发展了三通（P、A、O 三个主通油口）插装式比例阀，其插孔正在形成标准。

4) 力反馈型比例元件可以配用多种控制输入方式（图 1-2）；不同的输入单元，具有统一的联接尺寸。

5) 比例泵的恒压、恒流、压力流量复合等多种功能控制块，多采用组合叠加方式，便于在基泵上进行控制功能的增减组合。

6) 已经出现控制放大器、电磁铁和比例阀，以及测量放大器、电磁铁和比例阀组合成一体，即电液一体化结构。更进一步，比例阀与动力油源，与执行机构组合，形成机电液一体化结构。这是当代机械工业及工程控制系统发展的重要特征。机电液一体化的框图如图 1-4 所示。

## § 1.4 比例控制系统的构成分类及特点

### 1.4.1 比例控制系统的构成与分类

电液比例控制系统，由电子放大及校正单元，电液比例控制单元（含电机械转换器在内的比例阀、电液比例变量泵及变量马达），动力执行单元及动力源，工程负载及信号检测反馈处理

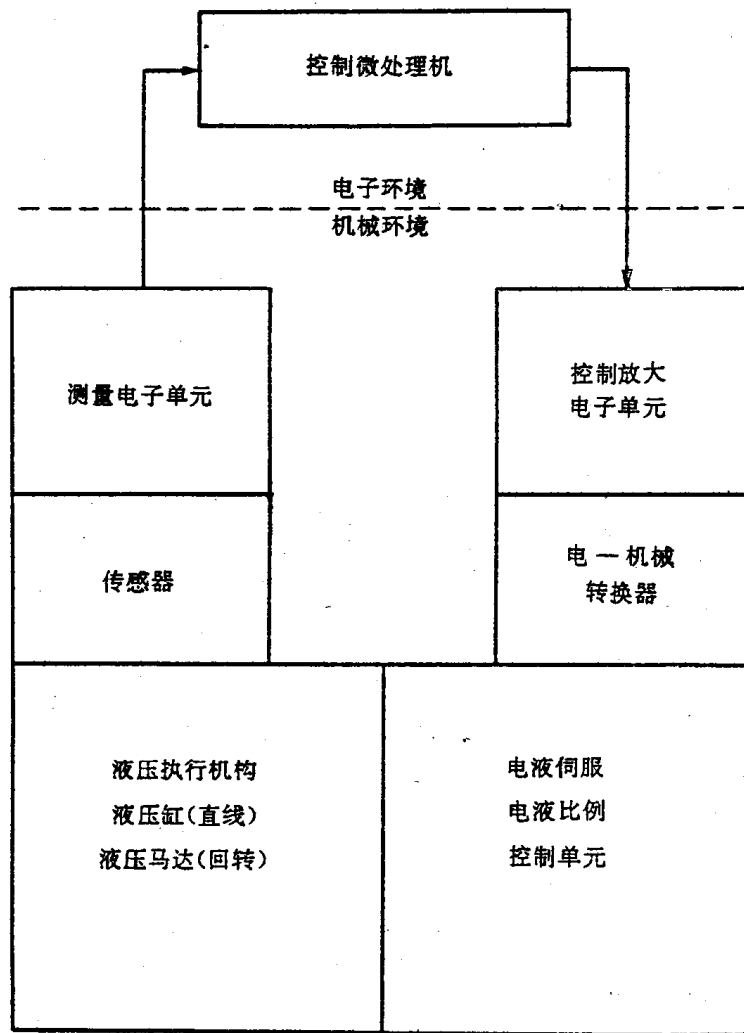


图 1-4 机电一体化框图

单元所组成,见图 1-5。

系统的指令及放大单元多采用电子设备。电—机械转换器往往采用比例电磁铁,它的功能是将放大器输出的控制电流或电压信号,转换为机械量的控制信号—力(力矩)或位移(转角)。液压转换及放大器件是比例阀、比例泵及马达,实际上是一功率放大单元。液压执行元件通常是液压缸或液压马达,其输出参数只能是位移、速度、加速度和力,或者转角、角速度、角加速度和转矩。系统可通过设置液压(压力和流量)和机械参数中间变量检测反馈闭环,或动力执行单元输出参数检测反馈闭环,来改善其稳态控制精度和动态品质。信号处理单元可采用模拟电子电路、数字式微处理芯片或微型计算机来实现。数字式集成电路在精度、可靠性、稳定性等项均占优势,其成本也越来越低廉,故应用日益广泛。

从整个电液比例控制系统来看,存在着两类检测反馈闭环。一类是动力执行单元输出参数(压力、力、力矩、位移、速度和加速度等)检测反馈闭环,设置这种反馈闭环的系统,就是通常所说的闭环控制系统。第二类是控制元件内部,对整个控制系统而言只是中间参量的小闭环。仅设置这类反馈闭环,不论是否为主控制参量的检测反馈,也不论是采用电信号反馈到指令及放大器,还是采用机械或液压方式反馈到电—机械转换器的输出端,对整个控制系统而言,均



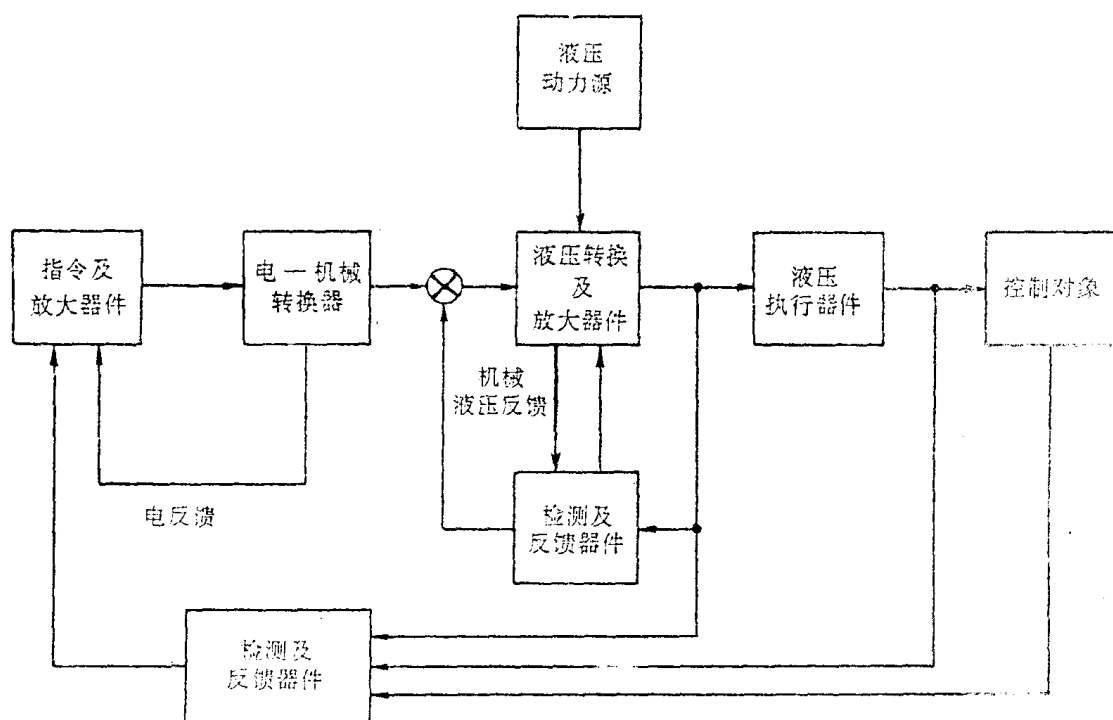


图 1-5 电液比例控制系统的技术构成

属于通常所指开环控制系统。

与传统的液压控制系统相似,按功率调节元件的不同,可将比例控制系统分为节流控制系统和容积控制系统。后者又可分为液压泵调节和液压马达调节。

节流控制的优点是动态响应快,利用公共恒压油源可控制不同执行元件(三通调速阀构成的负载适应系统除外),但功率损失较大。容积控制方式的突出优点是节能。事实上,现代容积控制多是通过电液节流控制元件,对液压泵或马达的排量参数(倾角或偏心量)进行控制而实现的。

如果按被控参数的不同来分类,则可将电液比例控制系统分为:

- (1) 位置(或转角)控制系统;
- (2) 速度(或转速)控制系统;
- (3) 加速度(或角加速度)控制系统;
- (4) 压力(或压差)控制系统;
- (5) 力(或力矩)控制系统;
- (6) 其他参数控制系统。