

# 电液伺服 同步驱动系统 控制理论与应用

◎ 倪敬 主编



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS



# 电液伺服同步驱动系统 控制理论与应用

主 编 倪 敬  
参 编 许 明 陈国金



机械工业出版社

本书对电液伺服同步驱动控制技术所涉及的液压油源、电液比例伺服阀、液压缸和活塞位移检测反馈系统、工业 PLC 系统和上位工控机等元器件,以及电液伺服同步控制系统等的相关基础理论、控制原理、性能特点、工程应用等作了比较全面的论述,并对其建模过程和计算机仿真作了相应的介绍。本书还在具体电液伺服同步驱动技术的下位机控制编程实现和上位机编程实现方面,结合工程实际作了相关的阐述。

本书着重从工程应用角度,对电液伺服同步驱动技术进行系统的、深入浅出论述,可作为机械工程类本科生、研究生液压与电液控制课程的教材或主要参考书,也可作为专业技术人员和管理人员专业培训的参考书。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

电液伺服同步驱动系统控制理论与应用/倪敬主编.  
—北京:机械工业出版社,2013.6  
ISBN 978-7-111-42779-7

I. ①电… II. ①倪… III. ①电液伺服系统-伺服控制  
IV. ①TH137.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 119501 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)  
策划编辑:蔡开颖 责任编辑:蔡开颖 韩 静  
版式设计:霍永明 责任校对:程俊巧  
封面设计:张 静 责任印制:张 楠  
北京京丰印刷厂印刷  
2013 年 6 月第 1 版·第 1 次印刷  
184mm×260mm·10.25 印张·250 千字  
标准书号:ISBN 978-7-111-42779-7  
定价:23.00 元



凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010)88361066

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售一部:(010)68326294

机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010)88379649

机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010)88379203

封面无防伪标均为盗版

# 前 言

电液伺服同步驱动技术是在以单执行器闭环控制为特征的电液伺服控制技术的基础上,为适应高端数控机床及装备对传动与控制特性提出的更高的要求,从20世纪七八十年代开始逐渐发展起来的流体传动与控制领域中一个具有旺盛生命力的新分支。现今,电液伺服同步驱动技术已成为各种大功率数控机床、精密机械以及国防尖端产品不可或缺的核心技术,得到了工业界、技术界的格外重视。但由于其所具有的一些特点,对这种技术的了解、掌握和运用,不论是理论还是实践上,都有很多问题需要研究、探讨、总结与提高,使其逐步像单执行器电液伺服控制技术那样,形成相应的科学体系,以更好地推动技术的发展和相关人才的培养。

本书是根据电液伺服同步驱动技术的发展、国家自然科学基金项目及浙江省重大科技专项的资助和技术推广应用经验的积累而撰写的学术专著。本书从工程实际应用和电液伺服同步控制与单执行器电液伺服控制既相互关联又相互区别的角度,在系统应用方面,介绍了组成电液伺服同步驱动系统的伺服缸、比例阀、位移传感器和工业PLC等器件的基本工作原理、性能和功能特点;在系统建模理论研究方面,阐述了电液伺服同步驱动系统的非线性数学模型;在系统控制策略理论研究方面,阐述了电液伺服同步驱动系统的PID、非线性PID、模糊PID和定量反馈控制(QFT)同步控制策略;在系统的仿真研究方面,以MATLAB Simulink为平台,详细阐述了电液伺服同步驱动系统的仿真建模过程与仿真实验过程;在系统的实际应用方面,详细阐述了电液伺服同步驱动系统的PID、非线性PID、模糊PID和定量反馈控制(QFT)同步控制策略在工业PLC中的编程实现。

本书由杭州电子科技大学机械工程学院机械电子工程研究所倪敬主编,陈国金和许明参编。陈国金编写第1章,许明编写第2章,倪敬编写第3、4、5章,全书由倪敬统稿。由于作者水平、时间和条件的限制,书中难免有疏漏或者错误之处,敬请读者批评指正。

感谢杭州电子科技大学机械工程学院机械电子工程研究所所有同仁对本书的大力支持。

作 者

# 目 录

## 前言

## 第 1 章 绪论 ..... 1

- 1.1 电液伺服同步驱动控制技术研究的重要意义 ..... 1
- 1.2 电液伺服同步驱动系统简介 ..... 2
- 1.3 电液伺服同步驱动系统分类 ..... 4
- 1.4 电液伺服同步驱动控制技术国内外研究现状 ..... 7
  - 1.4.1 基于单通道模型的同步控制技术 ..... 7
  - 1.4.2 基于多通道模型的同步控制技术 ..... 9
  - 1.4.3 多液压作动器的冗余控制技术 ..... 10

## 第 2 章 电液伺服同步驱动系统 ..... 11

- 2.1 电液伺服同步驱动系统简介 ..... 11
  - 2.1.1 液压缸电液伺服同步驱动系统 ..... 11
  - 2.1.2 液压马达电液伺服同步驱动系统 ..... 13
- 2.2 电液伺服系统主要液压元器件简介 ..... 13
  - 2.2.1 伺服系统用液压油源 ..... 13
  - 2.2.2 电液比例阀 ..... 20
  - 2.2.3 伺服液压缸 ..... 25
  - 2.2.4 液压马达 ..... 29
  - 2.2.5 位移传感器 ..... 31
- 2.3 工业控制器简介 ..... 36
  - 2.3.1 工业可编程序控制器简介 ..... 36
  - 2.3.2 工业人机界面简介 ..... 50
- 2.4 上位机通信系统简介 ..... 55
  - 2.4.1 上位机与 PLC 的通信设备简介 ..... 55
  - 2.4.2 上位机与 PLC 的通信技术简介 ..... 57

## 第 3 章 电液伺服同步驱动系统建模理论 ..... 62

- 3.1 液压缸电液伺服同步驱动系统建模理论 ..... 62
  - 3.1.1 单缸电液伺服驱动系统数学模型 ..... 62
  - 3.1.2 双缸电液伺服同步驱动系统数学模型 ..... 67
  - 3.1.3 多缸电液伺服同步驱动系统数学模型 ..... 70
- 3.2 液压马达电液伺服同步驱动系统建模理论 ..... 75
  - 3.2.1 单马达电液伺服驱动系统数学模型 ..... 75
  - 3.2.2 双马达电液伺服同步驱动系统数学模型 ..... 78

## 第 4 章 电液伺服同步驱动控制理论 ..... 81

- 4.1 交叉耦合模糊 PID 同步控制理论 ..... 81
  - 4.1.1 单通道电液伺服驱动系统经典 PID 控制理论 ..... 81
  - 4.1.2 单通道电液伺服系统模糊 PID 控制器设计过程 ..... 84
  - 4.1.3 交叉耦合模糊 PID 同步控制理论简介 ..... 86
- 4.2 非线性 PID 同步控制理论 ..... 89
  - 4.2.1 非线性 PID 同步控制理论简介 ..... 90
  - 4.2.2 四缸同步举升系统的非线性 PID 同步控制器设计 ..... 93
- 4.3 定量反馈同步控制理论 ..... 94
  - 4.3.1 多缸电液伺服同步驱动系统控制策略分析 ..... 94
  - 4.3.2 定量反馈控制理论基本原理 ..... 98
  - 4.3.3 扰动观测器设计原理 ..... 101
  - 4.3.4 双缸电液伺服同步驱动系统控制器设计 ..... 103
  - 4.3.5 四缸电液伺服同步驱动系统控制器设计 ..... 107

---

<b>第 5 章 电液伺服同步驱动系统实验</b>	
<b>研究</b> .....	111
5.1 双缸同步驱动控制实验研究 .....	111
5.1.1 双缸水平驱动过程经典 PID 同步 控制仿真研究 .....	111
5.1.2 双缸水平驱动过程经典 PID 同步 控制实验 .....	117
5.2 双缸水平驱动过程模糊 PID 同步控制 实验 .....	124
5.3 双马达回转过程同步控制实验 .....	134
5.4 四缸同步驱动控制仿真实验 .....	140
5.4.1 四缸举升过程经典 PID 同步控制 仿真实验 .....	140
5.4.2 四缸举升过程模糊 PID 同步控制 仿真实验 .....	144
5.4.3 四缸举升过程 QFT 同步控制仿真 实验 .....	148
<b>参考文献</b> .....	152

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 电液伺服同步驱动控制技术研究的重要意义

电液伺服同步驱动控制技术是指以电液比例阀（伺服阀、比例控制泵）、液压缸（液压马达）、位移（速度或力）传感器等精密元器件为基础，融合电气控制器设计技术和同步控制策略，实现多执行器同步输出位移、速度和力的光机电液一体化闭环驱动控制技术。由于该技术对输出量进行检测和反馈，构成闭环控制，在很大程度上消除和抑制了不利因素的影响，从而可以获得高精度的同步驱动性能。目前，电液伺服同步驱动控制技术以其驱动过程输出功率密度大、跟踪响应快、同步控制精度高等优点，广泛应用于机械制造、钢铁冶金、水利水电和工程机械等行业中，如图 1-1 所示。

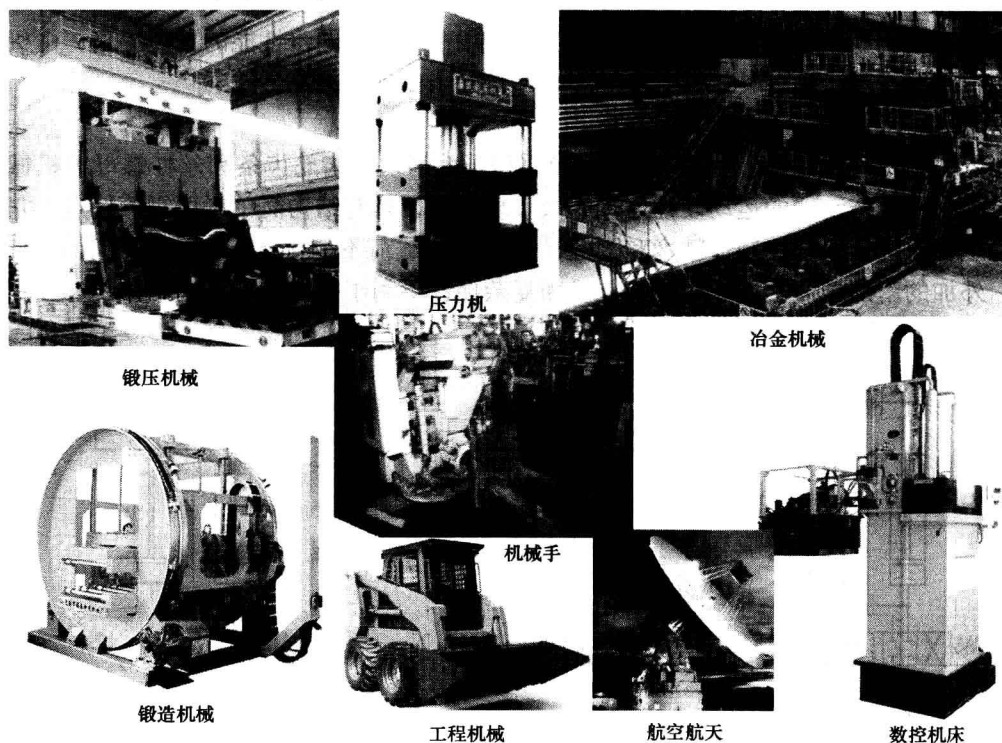


图 1-1 电液伺服同步驱动控制技术应用领域

电液伺服同步驱动控制技术应用于钢板轧机，通过两个液压缸来调整轧辊辊缝之间的距离，以保证带钢的纵向厚度误差在允许范围（ $\pm 0.2\text{mm}$ ）内；应用于大型砂型铸造机，通过跨距 2000mm 的两个液压缸精密同步驱动（同步误差小于 0.1mm），完成铸造过程中重载

上型和下型的合型与分型运动控制；应用于我国的三峡水电站闸门驱动，通过跨距大于 5000mm 的多液压缸同步驱动（各缸最大同步误差小于 1mm），实现大型水利闸门的可靠开启和关闭；应用于现代建筑施工，通过跨距大于 10000mm 的多液压缸同步驱动（各缸最大同步误差小于 0.1mm），完成如桥梁、建筑和大型构件等的提升、搬迁和就位以及运动姿态控制等；应用于 100t 拉削力的双缸精密拉削机床，通过跨距 1200mm 的双缸同步精密驱动（同步误差在 0.03mm 以内），实现对汽车发动机关键零部件的精密拉削加工；应用于液压机械手，通过跨距 800mm 的双缸同步精密驱动（同步误差在 0.05mm 以内）和双液压马达同步驱动，实现机械手的精确回转和举升工作，等等。

然而，高性能的电液伺服同步驱动技术，由于其系统干扰因素（工况扰动干扰、驱动负载多变干扰、驱动机构参数非线性或不确定性干扰，各通道耦合特性干扰和驱动冗余度等）以及液压系统本身的非线性特性（如阀控缸的负载压力动特性、油液粘度以及泄漏等）不易被实时检测和补偿，一直是机电液控制实现中的难点。因此，深入研究电液伺服同步驱动控制技术，更好地为国民经济各行业发展服务具有非常重要的理论和实际意义。

## 1.2 电液伺服同步驱动系统简介

电液比例伺服同步驱动系统是应工程实际应用中系统同步性能的不断提高，由机械同步和液压平衡阀同步两种具体形式发展而来，是同步驱动的最高形式。

### 1. 机械刚性同步驱动系统

如图 1-2 所示，机械刚性同步驱动系统采用导轨滑块、齿轮齿条和丝杠螺母等机械约束构件将多个液压作动器的运动硬性连接起来实现同步，具有结构简单、可靠等特点。它的同步精度主要取决于机构的制造精度和刚性，缺陷是偏载荷不能太大，否则易出现卡死现象，此外，外加的附加构件会增加机构的重量和复杂性，不利于机构的可控性。

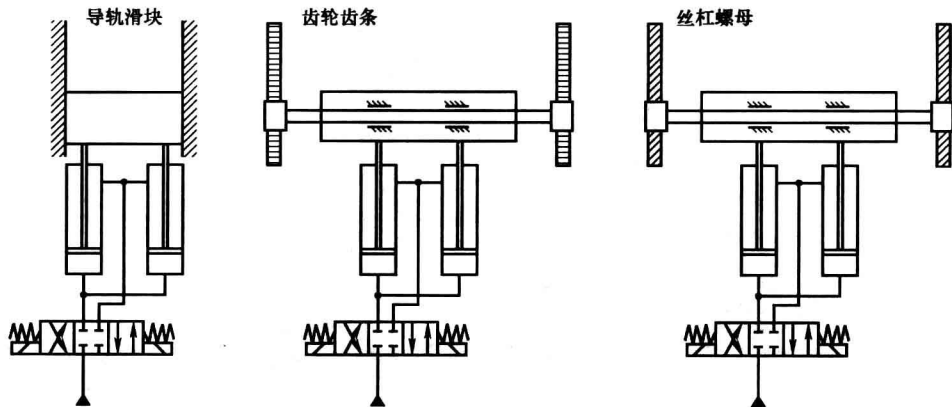


图 1-2 机械刚性同步驱动系统实例

### 2. 液压平衡阀同步驱动系统

如图 1-3 所示，液压平衡阀同步驱动系统采用各种液压同步控制元件，通过控制每个液压缸的供油流量来实现多个液压作动器的同步运动。这种同步系统的同步精度取决于同步控制器中的相关液压元件以及油液的相关性能。并且该同步系统一般都采用开环的控制形式，



所以很难获得较高的同步精度。如果期望得到高精度同步效果，那么就要采用下面介绍的电液伺服同步驱动系统。

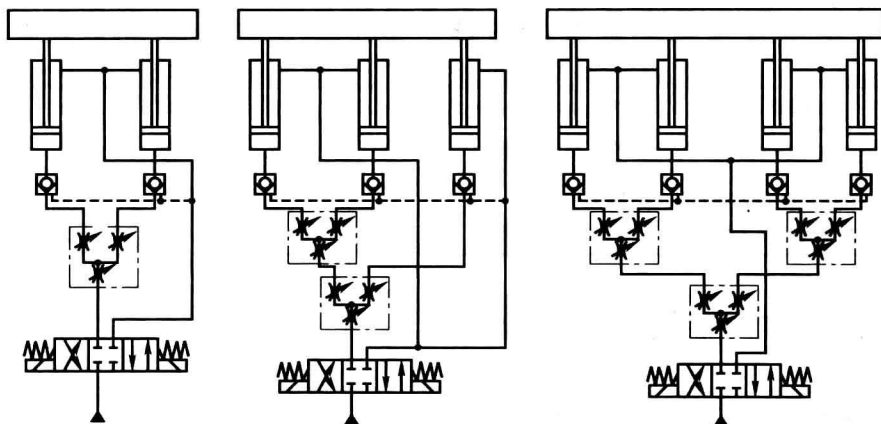


图 1-3 液压平衡阀同步驱动系统实例

### 3. 电液伺服同步驱动系统

如图 1-4 所示，电液伺服同步驱动系统是指采用各种比例阀、伺服阀或数字阀构成一个闭环电液伺服机构，以实现多个液压作动器的运动同步。它与上述机械刚性和液压平衡阀两种同步方式相比，尽管其控制环路的组成比较复杂、造价偏高，但由于它对输出量进行检测和反馈，构成闭环控制，在很大程度上消除和抑制了不利因素的影响，从而可以获得高精度的同步驱动性能。在所有直线运动的电液伺服同步驱动系统实现形式中，一阀控一缸的形式又最为常见，通过对非对称负载多缸控制性能的研究也揭示了这一原则。

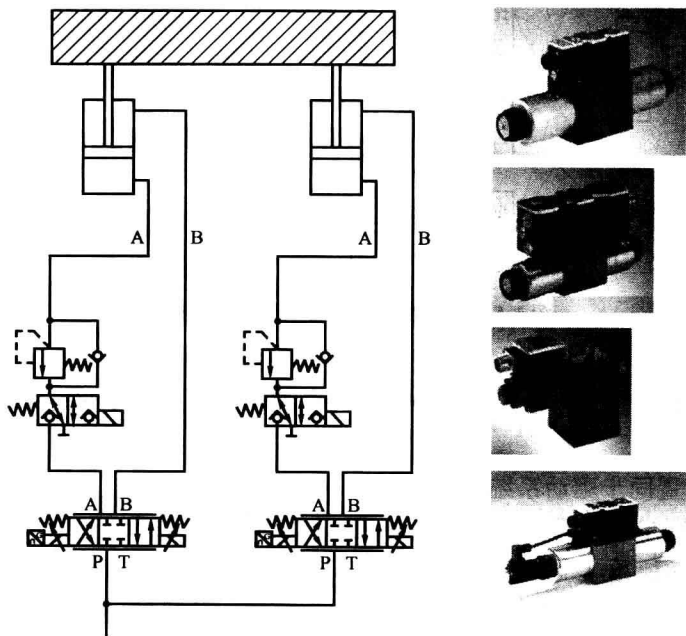


图 1-4 电液伺服同步驱动系统实例

根据上述分析和工程实际应用，四种同步驱动形式的性能比较见表 1-1。

表 1-1 四种同步驱动形式的性能比较

控制方式	驱动方式	同步精度 稳态情况	同步精度 动态情况	控制方法 灵活性能	任意曲线 跟踪性能	驱动速度 快慢性能	驱动系统 总体成本	驱动机构 加工精度
开环 控制	机械刚性同步	厘米级	一般	单一	无	慢	1	要求高
	平衡阀同步	毫米级	较好	单一	无	慢	2	要求较高
闭环控制	电液比例同步控制	微米级	好	灵活	有	较快	5	要求较低
	电液伺服同步控制	微米级	很好	灵活	有	快	10	要求较低

### 1.3 电液伺服同步驱动系统分类

电液伺服同步驱动系统的分类比较复杂，如图 1-5 所示。如果根据输出控制变量分，主要可以分为电液伺服位置同步驱动系统、电液伺服速度同步驱动系统和电液伺服力同步驱动系统；如果根据主要控制元件分，可以分为电液比例阀同步驱动系统、电液伺服阀同步驱动系统、数字控制阀同步驱动系统和电控变量泵同步驱动系统；如果按照执行元件分，可以分为液压缸同步驱动系统和液压马达同步驱动系统；如果按照执行元件的多少来分，可以分为双执行器同步驱动系统和多执行元件同步驱动系统（当执行器个数超过驱动机构自由度数为冗余同步驱动系统）。

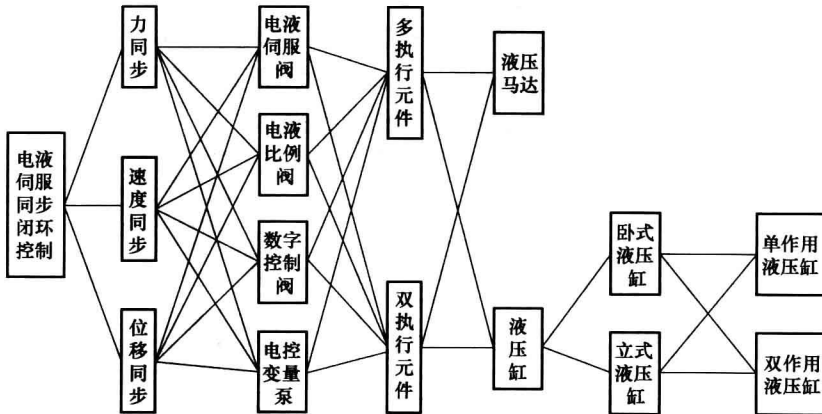


图 1-5 电液伺服同步驱动系统的分类

以下主要介绍电液伺服位置同步驱动系统、电液伺服速度同步驱动系统和电液伺服力同步驱动系统。

#### 1. 电液伺服位置同步驱动系统

电液伺服位置同步驱动系统是最常见的液压伺服同步驱动系统，它的控制目标是实现多个液压执行器的位移输出实时严格同步，即多个执行器在稳态或静态时的位置输出严格同步，运动过程中的位置输出严格同步。该系统典型应用如轧机的辊缝控制、剪板机的剪缝控制、大型铸机的合模及分模控制、机床的主运动控制和机械手的举升控制等。而电液伺服位置同步驱动系统又以双缸电液伺服位置同步驱动系统最为常见，其组成如图 1-6 所示，主要

由液压油源、电液比例阀、液压缸、位移传感器、控制单元和同步控制算法组成。在该图中，把一个比例阀控制一台液压缸的通路称为一个通道，其中  $r_1$ 、 $r_2$  为指令位置输入值； $e_1$ 、 $e_2$  为通道 1 和通道 2 的跟踪位移误差； $u_1$ 、 $u_2$  为通道 1 和通道 2 的控制输出值；D/A 为数字量模拟量转换模块； $i_1$ 、 $i_2$  为比例阀 1 和比例阀 2 的控制输入值； $q_1$ 、 $q_2$  为比例阀 1 和比例阀 2 的输出流量； $x_1$ 、 $x_2$  为液压缸 1 和液压缸 2 的活塞位置输出值；A/D 为模拟量数字量转换模块。双缸电液伺服位置同步驱动系统的工作原理是：首先，控制单元根据系统工艺要求，提供各通道的指令位置输入  $r_1$  和  $r_2$ ，这里两个通道的指令位置输入可以是常数值，也可以是随时间变化的函数；然后，通道输出  $x_1$  和  $x_2$  在各自通道的控制算法控制下，实时跟踪对应的  $r_1$  和  $r_2$ ，即对任意时间  $t$  时刻，都有  $|r_1 - x_1| \approx 0$ ， $|r_2 - x_2| \approx 0$ ，这样也就保证了在任意  $t$  时刻， $|x_1 - x_2| \approx 0$ 。

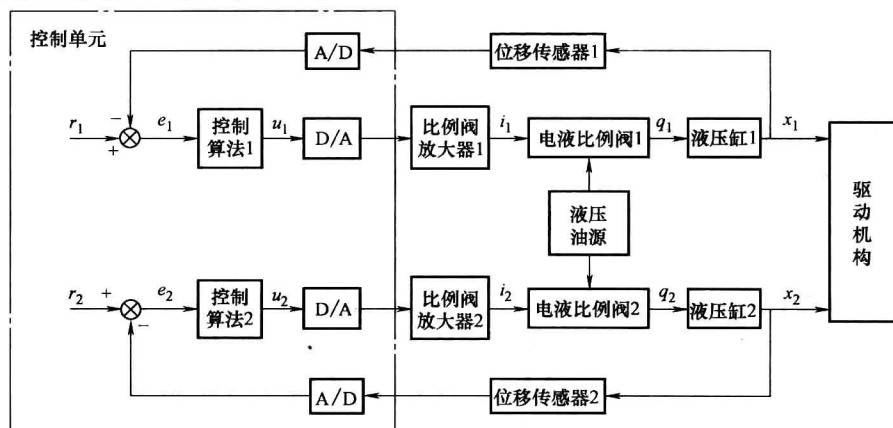


图 1-6 电液伺服位置同步驱动系统结构原理图

## 2. 电液伺服速度同步驱动系统

电液伺服速度同步驱动系统是常见液压伺服同步驱动系统之一，它的控制目标是实现多个液压执行器的速度输出实时严格同步，即多个执行器在稳态或静态时的速度输出严格同步，运动过程中的速度输出严格同步。该系统的典型应用如机器人的回转同步驱动控制、大型雷达天线回转同步驱动控制和大型火炮炮塔回转同步驱动控制等。而电液伺服速度同步驱动系统又以双缸电液伺服速度同步驱动系统最为常见，其组成如图 1-7 所示，主要由液压油源、电液比例阀、液压马达、旋转编码器、控制单元和同步控制算法组成。在该图中，也把一个比例阀控制一台液压马达的通路称为一个通道，其中  $r_1$ 、 $r_2$  为指令速度输入； $e_1$ 、 $e_2$  为通道 1 和通道 2 的跟踪位移误差； $u_1$ 、 $u_2$  为通道 1 和通道 2 的控制输出值；D/A 为数字量模拟量转换模块； $i_1$ 、 $i_2$  为比例阀 1 和比例阀 2 的控制输入值； $q_1$ 、 $q_2$  为比例阀 1 和比例阀 2 的输出流量； $\theta_1$ 、 $\theta_2$  为液压马达 1 和液压马达 2 的活塞位置输出值；A/D 为模拟量数字量转换模块。双缸电液伺服速度同步驱动系统的工作原理是：首先，控制单元根据系统工艺要求，提供各通道的指定速度输入  $r_1$  和  $r_2$ ，这里两个通道的指令速度输入可以是常数值，也可以是随时间变化的函数；然后，通道输出的  $\theta_1$  和  $\theta_2$  在各自通道的控制算法控制下，实时跟踪对应的  $r_1$  和  $r_2$ ，即对任意时间  $t$  时刻，都有  $|r_1 - \theta_1| \approx 0$ ， $|r_2 - \theta_2| \approx 0$ ，这样也就保证了在任意  $t$  时刻， $|\theta_1 - \theta_2| \approx 0$ 。

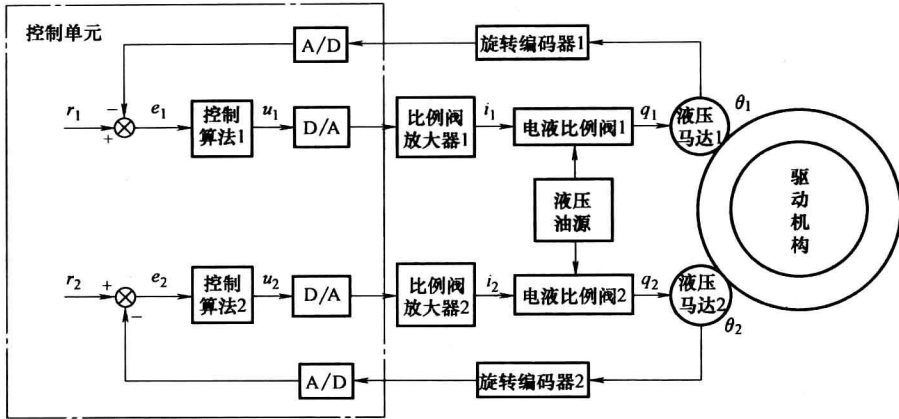


图 1-7 电液伺服速度同步驱动系统结构原理图

### 3. 电液伺服力同步驱动系统

电液伺服力同步驱动系统类似于电液伺服位置同步驱动系统，它的控制目标是实现多个液压执行器的力输出实时严格同步，即多个执行器在稳态或静态时的力输出严格同步。该系统的典型应用如轧机轴张紧力控制、车轮制动轴制动力控制等。而电液伺服力同步驱动系统又以双缸电液伺服力同步驱动系统最为常见，其组成如图 1-8 所示，主要由液压油源、电液比例阀、液压缸、力传感器、控制单元和同步控制算法组成。在该图中，也把一个比例阀控制一个液压缸的通路称为一个通道，其中  $r_1$ 、 $r_2$  为指令力输入； $e_1$ 、 $e_2$  为通道 1 和通道 2 的跟踪力误差； $u_1$ 、 $u_2$  为通道 1 和通道 2 的控制输出；D/A 为数字量模拟量转换模块； $i_1$ 、 $i_2$  为比例阀 1 和比例阀 2 的控制输入； $q_1$ 、 $q_2$  为比例阀 1 和比例阀 2 的输出流量； $F_1$ 、 $F_2$  为液压缸 1 和液压缸 2 的活塞位置输出；A/D 为模拟量数字量转换模块。双缸电液伺服力同步驱动系统的工作原理是：首先，控制单元根据系统工艺要求，提供各通道的指令力输入  $r_1$  和  $r_2$ ，这里两个通道的指令力输入可以是常数值，也可以是随时间变化的函数；然后，通道输出  $F_1$  和  $F_2$  在各自通道的控制算法控制下，实时跟踪对应的  $r_1$  和  $r_2$ ，即对任意时间  $t$  时刻，都有  $|F_1 - \theta_1| \approx 0$ ， $|F_2 - \theta_2| \approx 0$ ，这样也就保证了在任意  $t$  时刻， $|F_1 - F_2| \approx 0$ 。

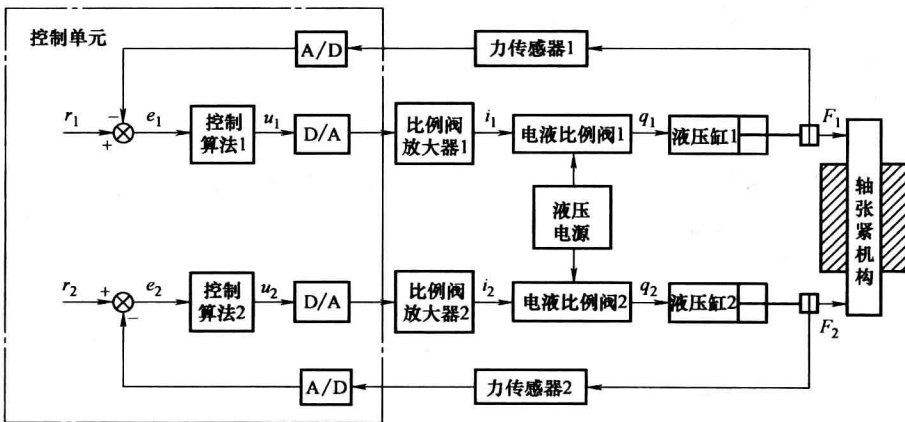


图 1-8 电液伺服力同步驱动系统结构原理图

## 1.4 电液伺服同步驱动控制技术国内外研究现状

关于多液压作动器同步控制理论分析和实验研究表明,产生同步误差的根本原因是各个同步子通道的系统性能受系统非线性、参数不确定性以及扰动的影响,不能达到完全一致的缘故,因此同步控制理论研究的目的是寻求能使各同步子通道性能一致的控制策略。根据 Lorenz 和 Keron 提出的两大同步控制理论以及近年来国内外关于同步驱动理论和多变量解耦控制理论的研究,多液压作动器伺服同步控制技术可以划分为基于单通道模型的同步控制技术和基于多通道模型的同步控制技术,也叫“复合控制技术”。

### 1.4.1 基于单通道模型的同步控制技术

基于单通道模型的同步控制技术立足于各自通道的性能要求,对各自通道分别进行控制性能补偿,以得到具有一致性能的多通道同步驱动系统。基于单通道的同步控制策略主要有“等同方式”和“主从方式”两种表现形式,其中的“主从方式”即指多个需要同步控制的执行元件以其中一个执行器的输出量为理想输入,其余的执行元件均跟踪这一选定的理想输入来达到同步驱动的方式,其具体结构如图 1-9a 所示。而“等同方式”是指多个需要同步控制的执行元件同时跟踪同一理想输入,其具体结构如图 1-9b 所示。图 1-9 中, $r$  为指令信号, $x_i$  为第  $i$  个通道 ( $i=1, 2, 3, \dots, n$ ) 的控制对象输出。总之,基于单通道模型的同步控制技术将多通道同步驱动过程通过两种同步控制策略,解耦成  $n$  个单一通道的电液伺服驱动控制技术。

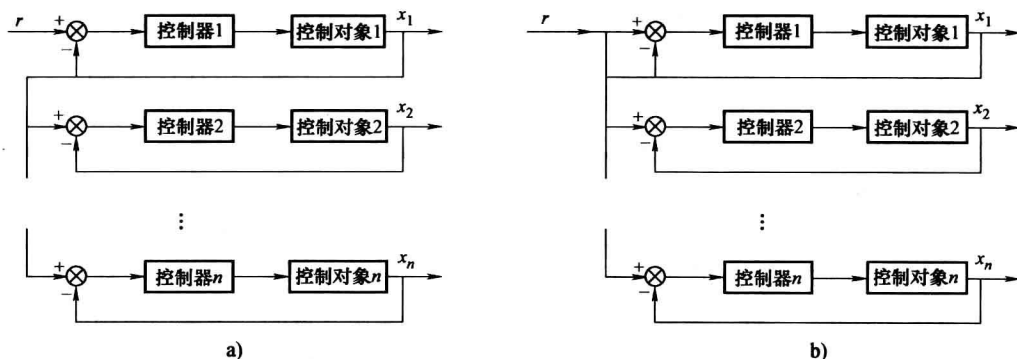


图 1-9 两种同步驱动控制原理图

a) 主从方式 b) 等同方式

目前,应用于电液伺服同步驱动系统中的单通道电液伺服驱动控制技术主要有以下几种:

(1) PID 控制 经典 PID 控制是以单变量线性定常系统为主要研究对象,所以也叫单变量 PID 控制。它以基于工作点附近的增量线性化模型为基础,以频率法作为研究控制系统动态特性的主要方法,以 Nichlos 图、Bode 图、Nyquist 曲线、根轨迹等作为系统分析和综合的主要工具。到目前为止,经典 PID 控制还因结构简单、易于实现等优点而成为工程上最实用、最流行的方法。随着现代控制理论和计算机技术的快速发展,吸取最优控制、自适应控

制和智能控制的基本思想,对传统 PID 控制进行改造,形成了自适应 PID、模糊 PID、智能积分 PID 和非线性 PID 等的各种新型智能 PID 控制技术,这使得 PID 控制对系统具有了更好的控制性能和效果。

(2) 自适应控制 (Adaptive Control) 该控制策略当被控对象的参数存在缓慢变化时,通过实时辨识对象参数的变化来自动地调整控制器的参数或者根据对象的实际输出与期望的输出(参考模型的输出)的偏差来调节控制器,从而使系统的性能保持不变。与 PID 控制相比,自适应控制则不需要模型完全已知,是一种“以变制变”的控制策略,其实际应用以模型参考自适应控制(MRAC)和自校正控制(STC)最为成熟。陈永新对液压伺服系统的基本理论作了进一步的探讨,并将现代控制理论、自适应控制理论与电液伺服控制理论相结合,对精校机电液位置伺服系统进行了全面的研究。李力争与何清华为电液比例系统提供了一个输入输出增量式线性时变模型,采用加权限定记忆回归法来估计模型参数,在此基础上进而提出了一种自适应预测控制方法,并给出了最优控制律,仿真结果表明自适应预测控制方法具有优良的控制品质。王大庆等针对动态电液伺服材料试验机,提出了一种模型参考模糊自适应控制(MRFAC)策略,以适应试样刚度变化对系统的影响,满足了系统高频响的要求,提高了控制精度。

(3) 鲁棒控制 (Robust Control) 相对于自适应控制而言,鲁棒控制针对系统的外扰以及模型的不确定因素,采取的是“以不变应万变”的控制策略。它要求设计的控制器在系统模型存在扰动以及出现最坏干扰时,系统仍能保持鲁棒稳定,并能得到预定鲁棒控制性能。在电液伺服系统中较为常用的鲁棒控制方法主要有定量反馈控制(QFT)、 $H_{\infty}$ 控制,以及自适应鲁棒控制等。王燕山与王益群采用 QFT 方法,对电液伺服加载系统进行了鲁棒控制器设计,结果表明,控制器能够有效地抑制参数扰动,如弹性负载刚度变化、有效体积弹性模量变化等。富强等在 QFT 的基础上,提出了一种 QFT 和神经网络并行控制的方案,以 QFT 为主控制器,利用神经网络进行动态误差补偿,进一步提高了系统的跟踪精度。

(4) 智能控制 (Intelligence Control) 智能控制(IC)是人工智能与自动控制交互作用的结果,由于它可以将数学模型和知识推理结合起来,便于处理复杂的非线性问题,因而在电液伺服控制系统中具有广泛的应用前景。近年来,有关人工智能控制的研究主要侧重于模糊控制、神经网络等方面,其在电液伺服控制系统中有成功的应用。傅连东等针对脱硫搅拌速度控制系统,研究了一种以误差、误差变化和时间为模糊变量的新型模糊控制器,大大改善了系统的动、静态性能。刘庆荣等针对电液速度伺服系统,研制了模糊控制器与 BP 算法相结合的模糊控制器。刘一江等针对电液伺服试验系统的多变量控制,提出了一种基于小波变换的“主控制器”结合“模糊控制器”的复合控制策略,以保证系统响应的快速性。

(5) 变结构控制 (VSC) 变结构控制通过在被控对象的相平面上设计一个滑动模态,通过适当的切换使对象的相轨迹始终沿滑动模态运动到原点,这种方法将任何对象的结构降阶为一阶系统,使得控制系统对对象参数的变化不敏感,达到鲁棒控制的效果。变结构控制是一类特殊的非线性控制策略,其非线性表现为控制的不连续性。变结构控制策略以及在电液伺服控制系统中实际有所应用。如段锁林等针对存在不确定性的非线性电液伺服力控系统的跟踪控制问题,提出了一种自适应滑模控制律综合方法,应用参数自适应的方法,消除不确定性对控制性能的影响,以达到鲁棒跟踪控制的目的。

综上所述,虽然基于单通道模型的伺服同步控制策略来源于 Lorenz 和 Keron 的同步控制

理论,在工程实际中也获得了许多成功的应用,但是其主要应用仍局限于各同步通道间性能差异不大的场合。对于具有工况条件复杂、负载多变的多液压缸同步驱动系统来说,系统各同步子通道间由参数非线性或不确定性引起的耦合和干扰作用已经不能忽略,此外,工况和负载的复杂多变性还要求系统具有良好的智能决策和自调整能力。另外,多液压缸同步驱动系统参数的非线性或不确定性可由阀的压力-流量方程和液压缸的负载压力动特性方程体现,如油液的可压缩性、粘温特性的非线性及由于泄漏和迟滞所产生的死区等。这样即使在构造多液压缸伺服同步系统时,为了保证各同步通道具有相同的性能,采取电液伺服(比例)阀成对选取,液压缸成对设计制造,但其组成的各通道仍然会存在差异,这也就使得系统不可避免地会产生同步误差。

#### 1.4.2 基于多通道模型的同步控制技术

基于多通道模型的同步控制技术按其控制理论的“复合方式”,可以分为多通道解耦同步控制技术和“交叉耦合”同步控制技术。

(1) 多通道解耦同步控制技术 该控制策略考虑了各同步子通道间的耦合作用,首先采用如线性解耦、最优控制解耦以及智能解耦、鲁棒解耦等方法对多通道系统进行解耦,然后再进行各自通道的性能补偿,以得到各同步子通道具有一致性能的多通道同步系统。针对系统的结构耦合和外部扰动耦合因素,王庆丰等分别采用线性反馈解耦方式设计了同步控制器,实验结果表明该控制策略具有算法简单、易于实际应用等优点。刘一江等采用基于小波变换的PID神经网络与模糊控制相结合的智能解耦方法,实现了对电液伺服试验系统的同步控制器设计,试验结果表明该控制策略具有良好的自学习和自适应解耦能力,能有效地提高多通道电液系统的同步性能。易孟林等采用了线性二次型最优控制(LQR)理论实现了双缸同步提升电液伺服系统的解耦同步控制;运用鲁棒最优控制原理,可以将多通道电液伺服同步系统中各通道间的耦合作用看成扰动,并基于QFT理论为多缸同步提升电液伺服系统设计同步控制器,实际控制结果表明该控制策略可以有效抑制系统同步误差,获得良好的同步控制性能。

(2) “交叉耦合”同步控制技术 该控制策略在对各子通道分别进行控制性能补偿的基础上,对各通道间由于系统非线性、外部扰动以及通道间相互耦合干扰所引起的同步误差进行再补偿,如图1-4所示的控制结构,这相对基于单通道模型的同步控制技术,更进一步地减小了各同步子通道间的性能差异,提高了同步控制性能。目前“交叉耦合”同步控制策略在马达同步驱动领域已经得到较多应用,但在液压伺服系统中的应用报道相对较少。Hong Sun等对双缸举升电液系统采用了单缸P控制和同步误差PI控制的交叉耦合控制器,实验结果表明该控制策略是有效的。Xiong Y F等提出了基于模型参考自适应控制和交叉耦合控制的联合控制器,有效地提高了同步控制性能,同时也抑制了系统的扰动和参数非线性。倪敬等将PID控制与模糊控制(Fuzzy Control)相结合形成模糊PID同步控制策略,该控制是一种以同步误差、同步误差变化和时间为模糊变量的新型控制方法,充分吸取了模糊经验专家系统的智能性,可以使控制参数和规则在控制过程中自动调整、修改和完善,从而使系统同步的性能指标不断完善,达到最佳的控制效果。

综上所述,基于多通道模型的同步控制技术可以应用现代控制理论对系统各通道间的性能差异进行预测和补偿,从而抑制同步误差;同时还可以根据实际工况和负载变化融合相应

的智能决策控制策略, 以实现系统各种干扰的抑制或补偿。因此这种基于多通道模型, 复合多种控制策略的系统同步控制技术已经成为液压伺服同步系统应用研究的主要发展方向之一。

### 1.4.3 多液压作动器的冗余控制技术

引入多液压作动器(如液压缸, 液压马达等)同步控制系统虽然可以使得系统具有负载对称、结构对称和控制灵活等优点, 但是也会出现液压作动器的“驱动冗余”现象, 即系统实际采用液压作动器的数目将可能超过负载运动的自由度。诸如液压缸冗余此类的“冗余驱动”现象普遍存在于航空航天、军事和汽车等领域中。引入“冗余驱动”一方面可以极大地增加负载(机械臂、机器人等)的可操纵特性, 如最小化机械手关节处的扭矩, 得到对复杂约束的作动器实现等; 另一方面还可以对系统内部的各作动器进行合理的负载分配, 以减小和均化各作动器承受的载荷。但也正是由于“冗余驱动”的引入, 使得系统的运动形式具有了很大的不确定性, 所以要对负载的运动和姿态控制就必须进行运动控制规划, 这就在很大程度上增加了系统控制的复杂程度。因此“冗余驱动”问题的研究不仅适合本书的多液压作动器同步驱动系统, 而且对其他领域多作动器驱动控制系统同样具有理论和实际意义。

目前国内外应用于“冗余驱动”系统控制的理论主要有两种, 最优控制理论和控制分配理论。Athans M 等介绍了采用最优控制原理, 将系统动特性设计和各作动器控制指令的分配设计一次完成的方法。Luya Li 等采用双优化控制策略来解决冗余作动器与系统动特性的矛盾, 仿真结果验证了其控制策略的有效性。Stevens B L 采用线性二次型(Linear Quadratic, LQ)最优控制理论来处理作动器冗余性问题, 并取得了较好的实际应用效果。Zhou K 介绍了  $H_{\infty}$  最优控制理论在作动器冗余性问题中的应用。

对于控制分配理论, 国外的科研工作者取得了较多的研究成果。这些方法归结起来主要可以分为广义逆方法、链式递增方法(Daisy Chaining)、直接分配方法(Direct Allocation)和数学规划方法(主要包括线性规划和二次规划)。但在国内, 与这方面相关的文献还相对较少, 如杨恩泉等跟踪和总结了目前控制分配理论的国外发展现状, 张曙光等在做带推力矢量的先进战斗机控制律设计和仿真方面对其有一些具体的应用。与最优控制理论相比, 采用控制分配理论进行冗余作动器控制量分配设计具有以下优点: 一是简化了控制律的设计, 即控制律设计同时考虑了受限控制量的设计和最优分配问题; 二是在有控制面出现故障失效时, 能够重新进行控制作用的划分, 提高系统的鲁棒性; 三是能直接处理控制量的约束问题, 包括位置约束和速率约束。



## 第 2 章 电液伺服同步驱动系统

### 2.1 电液伺服同步驱动系统简介

电液伺服同步驱动系统按执行元件分，有液压缸同步驱动系统和液压马达同步驱动系统。下面就本书涉及的相关电液伺服同步驱动系统作相应的介绍。

#### 2.1.1 液压缸电液伺服同步驱动系统

液压缸电液伺服同步驱动系统就是以液压缸为执行元件，采用比例阀或伺服阀为控制元件，采用磁致伸缩位移传感器反馈液压缸的输出位移参量，采用工业 PLC 作为伺服驱动控制器，以实现精确的同步直线驱动的系统。该类型的电液伺服同步驱动系统又有两个主要的形式：水平驱动系统和举升驱动系统。

图 2-1 给出了双缸水平同步驱动系统液压原理图。图中两个液压缸受两个比例阀独立控制，同时每个液压缸的两腔回路都会配置溢流阀，以防止某一回路过载引起的压力突变引发系统故障。具体驱动系统实物图如图 2-2a、b 所示。

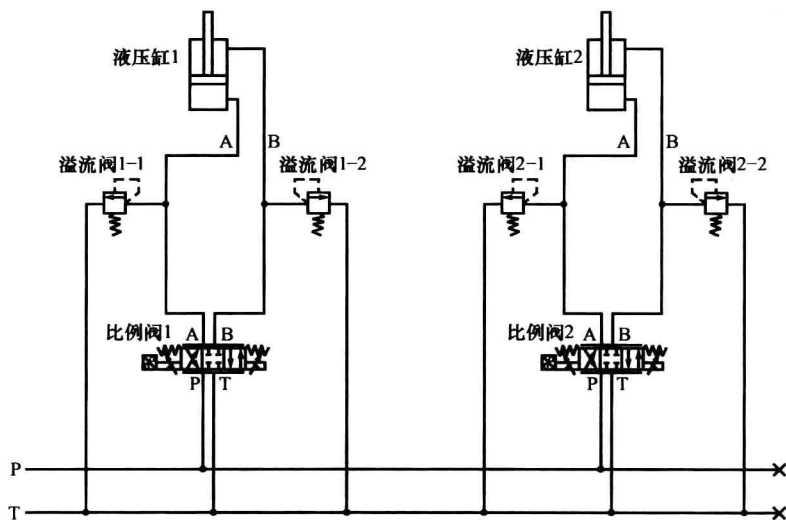


图 2-1 双缸水平同步驱动系统液压原理图

图 2-3 给出了四缸同步驱动系统液压原理图，相比双缸同步驱动而言，四缸同步驱动的动力更大，但是由于四缸系统的冗余及强耦合性，其液压回路也较双缸同步驱动复杂。如图 2-3 所示，系统液压原理设计在四个比例阀独立控制四个举升液压缸的基础上，为每一个举升液压缸的下腔都增加了一个背压阀，以提高举升运动控制的稳定性；为每一个举升液压缸的下腔都增加了一个锁紧阀，一方面实现在出现异常情况时四个举升缸能及时停止，另一方面防止停机时由于油液泄漏而造成举升负载的沉降；为每一个举升液压缸两腔配置了溢流