

液压控制系统的分析与设计

卢长耿 李金良



煤炭工业出版社

1095007

液 压 控 制 系 统 的 分 析 与 设 计

卢长耿 李金良

煤 炭 工 业 出 版 社

内 容 简 介

本书系统地论述了液压控制理论及其最新发展与应用。体系完整,内容丰富新颖,注重实用;采用类比、综合及一般性的分析方法,分析深入,结论通用性强,有丰富的设计应用实例。

全书共十三章,按理论体系和设计需要编排。第一章绪论和第十三章液压控制的新发展为综述性内容;第二章液压控制阀的分析与设计、第三章液压动力元件的分析与设计、第四章伺服阀的特性分析与试验、第六章电液控制系统的分析与设计、第七章机液控制系统的分析与设计为液压控制理论的核心内容;第五章伺服放大器 and 常用检测元件、第八章液压控制系统的应用实例及分析、第十章液压控制系统的油源、第十二章液压控制系统的安装、调整与试验为应用性内容;第九章液压控制系统中的非线性和第十一章液压控制系统的计算机仿真与优化为专题性内容。

本书概念清晰、富于启发性、便于自学,可供从事液压技术科研、设计、安装、维护和管理的广大工程技术人员进修和参考,也适于作本科或研究生教材。

责任编辑:向云霞

液压控制系统的分析与设计

卢长耿 李金良

*

煤炭工业出版社 出版

(北京安定门外和平里北街21号)

煤炭工业出版社印刷厂 印刷

新华书店北京发行所 发行

*

开本787×1092mm¹/16。印张27¹/₁₆。

字数651千字 印数1—4,000

1991年2月第1版 1991年2月第1次印刷

ISBN 7-5020-0455-6/TD·414

书号 3240 定价 11.30元

60416/04

前 言

由 J. F. Blackburn 等人著述的《Fluid Power Control》和 H. E. Merritt 著述的《Hydraulic Control Systems》是影响最大的两本液压控制专著,前者出版于1960年(中译本《液动气动控制》为1965年),后者出版于1967年(中译本为1976年)。近20年来,液压控制理论有了新的发展,已广泛应用于军事和各工业部门。随着液压控制理论的日臻完善和计算机的普及,液压控制技术已朝着高精度、高响应、计算机控制、CAD、CAT 等方向发展。反映70年代液压控制理论成果的专著当推1980年出版的 T. J. Viersma 著述的《Analysis, Synthesis and Design of Hydraulic Servosystems and Pipelines》。

本书系统地论述了液压控制理论及其最新发展与应用,是作者长期从事液压控制技术科研、设计和教学工作的体会与经验总结,许多内容直接取自作者的科研成果论文。

本书有如下特色:

1. 全书在体系上注重系统性和完整性。

2. 在论述方法上,本书采用类比的方法,使内容深入浅出,便于自学。例如:

1) 由传动引出控制,通过比较液压传动系统和液压控制系统的工作任务、性能要求、控制原理、控制元件和控制功能,阐明了它们的本质差别、研究内容和应用范围。

2) 绪论中便引入动态液压弹簧概念,由机械谐振引出液压谐振,进而指明了液压控制系统的基本特性和特点,使读者很快入门,一开始便抓住了液压控制的核心和本质。

3) 伺服阀前置级常用四通双边滑阀或双喷嘴挡板阀,比较后可知:它们形异而质同,虽然结构不同,但都是带两个固定节流孔、两个可变节流口的正开口四通阀,功能、原理及节流特性相同,具有相同的静态特性,这样既抓住了问题的本质,又避免了重复分析。

3. 在分析方法上,本书扩展了一般分析方法,开拓了综合分析方法,使内容精炼,且分析结果具有普遍性和通用性。例如:

1) 对结构对称但阀口面积不配作的正开口四通阀(四通双边滑阀或双喷嘴挡板阀)进行了一般分析,通过引入常数 α [$\alpha = C_d W U / C_{d0} (\pi d^2 / 4)$], 获得了 α 为任意值情况下的静态特性及阀系数。而以往文献只给出 $\alpha = 1$ 的特定结果。

2) 通过对变量泵—变量马达的一般分析,完整地给出了各种泵控动力元件的动态方程及方块图。而以往文献只给出变量泵—定量马达(缸)的动态方程及方块图。

3) 力马达和力矩马达的构造和工作原理不同,以往文献都是孤立地分析,且结果不统一。实际上它们的功用相同,都是电—力(矩)—位移转换器,且力或力矩的产生都源于电磁作用力。通过综合分析,并引入等效参数,获得了统一的数学模型(动态方程、方块图和传递函数),从而更深刻地揭示了它们的本质与特点。

4) 伺服阀线圈接法不同时,线圈回路的动态是不同的。以往文献只给出某种接法的分析结果。本书采用综合分析,通过引入等效参数,获得了统一的电压方程,这就为伺服阀特性的综合分析和系统应用提供了方便和通用性的结果。

4. 书中内容丰富新颖,反映了液压控制理论的最新成就与应用。

1) 反映液压控制器件及伺服元件方面的新内容有:对称但不配作的正开口四通阀的一般分析,伺服阀转换器的一般分析,伺服阀特性的一般分析,伺服阀频宽的估计,伺服阀的试验,新型电反馈伺服阀,抗污染射流管伺服阀,伺服阀的CAD与CAT,数字步进缸等。

2) 反映液压动力元件方面的新内容有:负载等效计算,阀控动力元件与负载的最佳匹配,对称四通阀控制不对称缸的不相容性及其解决办法,泵控动力元件的综合分析等。

3) 液压控制系统方面的新内容有:采用P阀和Q阀的力控制系统分析及其比较,负载流量非线性的电补偿及应用,阻尼技术,系统校正技术,库仑摩擦力对系统性能的影响,机械结构柔度对系统性能的影响,定量泵—蓄能器油源及恒压泵油源的动态分析及管道动态,液压控制系统的CAD,液压控制系统的污染控制及故障诊断等。

5. 伺服阀一章的内容有很大更新,写法上也打破了传统格局:原理上突出静态特性与反馈方式关系的论述;内容上注重实用,突出静态与动态特性、性能参数、选用原则、使用要点、试验内容及方法;特性分析上采用综合分析方法,分析了典型伺服阀的静态与动态特性;最后从发展方向的角度介绍了新型的电反馈伺服阀和抗污染伺服阀。

6. 本书注重工程性与实用性。

1) 考虑到从事液压技术工作的读者一般不熟悉放大器和传感器,本书从系统设计与应用的角度编写了第五章。

2) 为了比较全面地反映液压控制在各工业领域中的应用,第八章专章介绍并分析了液压控制的诸多应用实例。

本书一至八章由厦门集美航海学院卢长耿副教授著,九至十三章、第八章第七节由山东矿业学院李金良副教授著,全书由卢长耿统稿和定稿。全书的制图、描图和誊写由王凤英、廖学珍、卢健和卢岩完成。

北京理工大学孙文质副教授和曹泛教授审校了本书的大部分章节,煤炭工业部科学技术情报研究所殷永龄高工对本书的内容提出过建设性建议,顺致感谢!

书中欠妥或差错之处,请同行和读者及时指正!

目 录

第一章 绪论	1
第一节 液压控制系统的工作原理及组成部分	1
一、液压控制系统与液压传动系统的比较	
二、液压控制系统的工作原理	
三、液压控制系统各组成部分的功用	
第二节 液压控制系统的分类	7
第三节 液压控制系统的基本特性及特点	7
一、液压弹簧的概念	
二、液压谐振频率的概念	
三、液压控制系统的基本特性	
四、液压控制系统的特点	
第四节 液压控制系统的优缺点	15
一、液压控制系统的优点	
二、液压控制系统的缺点及克服办法	
三、电液控制系统是最理想的控制系统	
第五节 液压控制系统的发展及应用概况	17
一、国外发展概况	
二、国内发展概况	
参考文献	18
第二章 液压控制阀的分析与设计	20
第一节 液压控制阀的结构类型及特点	20
一、液压控制阀的类型、工作原理及特点	
二、滑阀的种类及特征	
三、液压控制阀的液压源类型	
第二节 液压控制阀静态特性的描述	24
一、静态特性	
二、阀系数	
三、压力—流量特性方程的线性化	
第三节 滑阀的静态特性分析	26
一、四通滑阀的静态特性分析	
二、三通滑阀的静态特性分析	
三、带一个固定节流孔的正开口二通滑阀分析	
四、带两个固定节流孔的正开口四通滑阀分析	
第四节 滑阀的力特性分析	43
一、惯性力	
二、粘性摩擦力	
三、液压卡紧力及其减弱措施	

四、稳态液动力及其补偿方法	
五、瞬态液动力	
六、滑阀驱动力的确定	
第五节 滑阀的功率特性及效率	51
一、滑阀的输出功率	
二、滑阀的效率	
第六节 滑阀的设计	53
一、滑阀结构形式的确定	
二、滑阀主要参数的确定	
三、滑阀的结构与加工	
第七节 喷嘴挡板阀的分析与设计	56
一、喷嘴挡板阀的静态特性	
二、作用在挡板上的液流分析	
三、喷嘴挡板阀挡板驱动力矩的确定	
四、喷嘴挡板阀的设计	
五、喷嘴挡板阀的特点及应用	
第八节 射流管阀的分析	61
一、紊流淹没射流特征	
二、流量恢复系数和压力恢复系数	
三、射流管阀的静态特性	
四、射流管阀的特点及应用	
参考文献	65
第三章 液压动力元件的分析与设计	66
第一节 液压动力元件的静态特性及匹配问题	66
一、液压动力元件的静态特性	
二、负载特性及其等效	
三、动力元件与负载的匹配	
第二节 四通阀控制活塞缸的动态分析	80
一、对称四通阀控制对称缸的动态分析	
二、对称四通阀控制不对称缸的静态及动态分析	
第三节 三通阀控制不对称缸分析	110
一、三通阀控制不对称缸的类型、应用及特点	
二、动态特性分析	
第四节 四通阀控制液压马达的分析	113
一、动态方程及方块图	
二、动态特性	
第五节 泵控系统动态分析	115
一、泵控系统的类型、特点及应用	
二、泵控马达的动态特性分析	
三、泵控缸的动态特性	
第六节 动力元件的参数选择及设计	120
一、供油压力 p_s 的选择	
二、执行元件参数的确定	

三、机械减速箱传动比的确定	
四、控制阀流量的确定	
第七节 关于阀控系统线性化分析方法有效性的论证	121
一、描述阀控缸的非线性微分方程	
二、非线性微分方程的简化	
三、分析及结论	
第八节 多自由度系统中结构柔度对系统动态特性的影响	124
一、多自由度系统实例	
二、两自由度系统的动态特性分析	
三、多自由度系统的动态特性分析	
第九节 库仑摩擦力对动力元件性能的影响	129
一、库仑摩擦力与稳定性	
二、库仑摩擦力对系统精度及响应的影响	
第十节 增大动力元件阻尼的方法	133
一、旁路层流泄漏方法	
二、负载压力反馈方法	
三、加速度反馈方法	
参考文献	137
第四章 伺服阀的特性分析与试验	138
第一节 伺服阀的组成及分类	138
一、伺服阀的组成	
二、电气—机械转换器的类型及原理	
三、伺服阀的分类	
第二节 伺服阀的输出特性、反馈形式及工作原理	142
一、输出特性与反馈方式	
二、位置反馈式伺服阀的种类、原理及特点	
三、负载压力反馈式伺服阀的种类、原理及特点	
四、负载流量反馈伺服阀的原理	
第三节 伺服阀的特性及性能参数	150
一、伺服阀规格的标称	
二、伺服阀的静态及动态特性	
三、伺服阀的性能参数及指标	
四、伺服阀的传递函数	
第四节 伺服阀的试验	156
一、伺服阀试验的类型及项目	
二、标准试验条件	
三、伺服阀试验回路及测试装置	
四、伺服阀试验内容及方法	
五、伺服阀的计算机辅助测试 (CAT)	
第五节 伺服阀的选择、使用及维护	163
一、伺服阀的选择	
二、伺服阀的使用与维护	
第六节 力马达及力矩马达的特性分析	166

一、永磁力马达的特性分析	
二、永磁力矩马达的特性分析	
第七节 单级电液伺服阀的特性分析	179
一、力矩马达式单级伺服阀分析	
二、力马达式单级伺服阀分析	
第八节 两级电液伺服阀的特性分析	186
一、位置—力反馈式两级伺服阀分析	
二、位置直接反馈式两级伺服阀分析	
第九节 射流管式伺服阀	196
一、力马达式射流管伺服阀	
二、力矩马达式射流管伺服阀	
三、射流管式气液伺服阀	
四、偏转射流伺服阀	
参考文献	203
第五章 伺服放大器与常用检测元件	204
第一节 伺服放大器	204
一、伺服放大器的功用及基本要求	
二、伺服放大器的种类	
三、运算放大器及其在液压控制中的应用	
第二节 液压控制中的常用检测元件	211
一、位移检测元件	
二、速度检测元件	
三、力和压力检测元件	
参考文献	230
第六章 电液控制系统的分析与设计	231
第一节 电液位置控制系统的分析与设计	231
一、电液位置控制系统的类型、组成及工作原理	
二、电液位置控制系统的方块图及传递函数	
三、电液位置控制系统的稳定性分析	
四、电液位置控制系统的闭环响应分析	
五、电液位置控制系统的精度分析	
六、电液位置控制系统的校正	
七、双增益电液位置控制系统	
八、阀的负载流量非线性及其补偿	
第二节 电液速度控制系统的分析与设计	254
一、电液速度控制系统的类型及控制方式	
二、电液阀控速度控制系统的分析	
三、电液泵控速度控制系统的分析	
第三节 电液力控制系统的分析与设计	259
一、电液力控制系统的类型及其组成	
二、电液驱动力控制系统分析	
三、电液负载力控制系统分析	
第四节 电液控制系统的设计综述及设计实例	271

一、电液控制系统的设计方法及步骤	
二、电液控制系统的设计要点	
三、电液控制系统设计实例——钢带跑偏控制	
参考文献	290
第七章 机液控制系统	291
第一节 机液控制系统的类型、原理及应用	291
一、阀控机液控制系统	
二、泵控机液控制系统	
第二节 机液伺服机构的分析与设计	297
一、各种机液伺服机构方块图的综合分析	
二、机液伺服机构的特点及设计注意事项	
第三节 行走机械牵引部恒功率控制系统分析	299
一、系统各环节的动态方程	
二、系统方块图	
参考文献	303
第八章 液压控制系统的应用实例及分析	304
第一节 板带轧机液压压下板厚自动控制系统	304
一、液压AGC的功用、特点及其发展概况	
二、液压AGC的控制思想及控制原理	
三、液压AGC的电控系统	
四、液压AGC中的关键元件	
第二节 板带轧机的板形控制系统	310
一、板形缺陷及其产生的原因	
二、板形控制思想及其方法	
第三节 连铸机结晶器金属液面的控制及拉辊的速度控制	315
一、连铸工艺及设备概况	
二、结晶器金属液面的控制	
三、拉矫机拉辊的速度控制	
第四节 挤压机的速度控制系统	317
一、挤压工艺及设备概况	
二、等温挤压及其速度控制要求	
三、速度控制系统的组成及原理	
四、回转式电液伺服驱动器的结构、原理及性能	
五、挤压机速度控制系统的性能	
第五节 超高压水压试管机的压力控制	324
一、设备概况及试压工艺过程	
二、配压缸的功用及其压力自动控制	
第六节 电弧炉电极自动升降控制系统	326
一、电弧炉冶炼工艺及设备概况	
二、对电极自动升降控制系统的要求	
三、电极自动升降控制系统的控制方式及其原理	
第七节 采煤机牵引部液压恒功率控制系统	330
一、牵引部液压系统工作原理	

二、主泵恒功率液压自动调速系统各环节的传递函数	
三、稳定性分析	
第八节 锅炉—汽轮机发电机组的控制	337
一、汽轮发电机组的速度控制	
二、交流电源的频率控制	
三、锅炉的压力控制	
第九节 高炉煤气余压回收燃汽轮机发电机组的控制	339
一、对TRT设备的控制要求	
二、TRT设备的控制策略及工作原理	
参考文献	341
第九章 液压控制系统中的非线性	342
第一节 液压非线性系统动态过程的特点及分析方法	342
一、稳定性	
二、响应过程	
三、自激振荡	
四、非线性系统的分析方法	
第二节 液压控制阀的非线性对系统性能的影响	343
第三节 常见的非线性及其对系统性能的影响	345
一、饱和特性	
二、死区特性	
三、非线性增益特性	
四、游隙和磁滞非线性	
五、摩擦非线性	
第四节 常见的振荡现象及原因	355
参考文献	358
第十章 液压控制系统的油源	359
第一节 对液压控制系统油源的要求	359
第二节 液压控制系统油源的基本形式	359
一、定量泵—溢流阀恒压油源	
二、定量泵—蓄能器—卸荷阀恒压油源	
三、恒压变量泵式液压油源	
第三节 液压控制系统油源的性能分析	362
一、不带蓄能器的恒压变量泵油源分析	
二、带蓄能器的恒压变量泵油源分析	
第四节 液压控制系统的污染控制	366
一、污染的原因及危害	
二、确定污染度的方法和污染标准	
三、污染控制	
参考文献	371
第十一章 液压控制系统的计算机仿真及优化	372
第一节 计算机仿真及其分类	372
一、仿真的基本概念	
二、仿真系统的分类及原理	

三、系统仿真在液压技术中的应用	
第二节 常规系统的数字仿真	375
一、连续系统的数字仿真	
二、离散相似法数字仿真	
三、采样控制系统的数字仿真	
第三节 采煤机液压控制系统的计算机仿真	393
一、采煤机液压控制系统的数学模型	
二、线性系统的计算机仿真	
三、非线性系统的计算机仿真	
第四节 液压控制系统的参数最优化	402
一、机构寻优前的动态特性	
二、机构的寻优程序	
三、机构寻优前后动态性能分析	
参考文献	411
第十二章 液压控制系统的安装、调整与试验	412
第一节 液压控制系统的安装	412
第二节 液压控制系统的调整	413
第三节 液压控制系统的测试	414
一、静态性能试验	
二、动态测试	
参考文献	418
第十三章 液压控制的新发展	419
第一节 液压控制新技术	419
一、液压新元件	
二、液压技术中应用的新材料	
三、液压阻尼技术	
四、液压比例控制技术	
五、交流液压技术	
六、可靠性与多通道技术	
第二节 液压技术计算机化	425
一、液压元件和液压系统的计算机设计	
二、液压系统或元件的计算机试验与辨识	
三、微机控制的数字式液压系统	
第三节 液压节能技术	426
一、研制低耗能元件	
二、提高液压系统效率	
三、能量回收	
参考文献	428

第一章 绪 论

伺服亦称控制或随动。液压控制是液压技术的一个新分支，是控制工程领域的一个重要组成部分。

液压控制系统不仅具有液压传动系统所固有的一系列优点，同时还具有高精度、高响应等显著优点，因此，近40年来，液压控制的理论和应用都得到了很大的发展。目前，已广泛应用于航空、武器系统、机床、船舶、冶金、锻压、试验机、煤矿机械和动力设备等许多方面。

本章简介液压控制系统的工作原理、组成部分、分类、基本特性、优缺点及发展概况。

第一节 液压控制系统的工作原理及组成部分

一、液压控制系统与液压传动系统的比较

我们可以采用类比的方法，由传动系统引出控制系统，并说明它们的主要差别和应用范围。

图1-1为典型的液压传动系统，其中a为节流调速系统，b为容积调速系统。节流调速系统中采用流量控制阀（节流阀或调速阀）调节流量，从而控制执行机构的速度，用换向阀使执行机构换向，用溢流阀进行调压和限压。容积调速系统中，利用变量泵调节流量，采用双向变量泵时，无须换向阀便可使执行机构换向。可见，传动系统的基本功能是拖动、调速和换向。换向阀或双向变量泵处于中位，可以使执行机构停止运动，但由于存在惯性，难以在任意位置准确停车，即传动系统难以精确地控制位置。

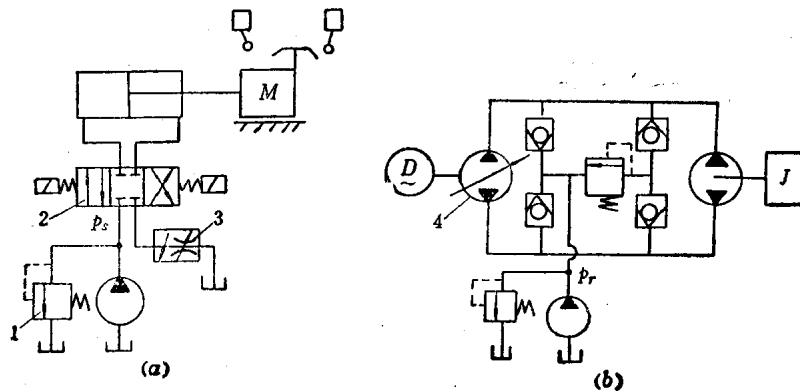


图 1-1 液压传动调速系统

a—节流调速系统；b—容积调速系统

1—溢流阀；2—换向阀；3—调速阀；4—手动变量泵

采用带压力补偿和温度补偿的调速阀时，流经调速阀的流量不受负载变化和油温变化的影响，因而执行机构的速度不受负载和油温变化的影响。但它并不能补偿调速阀和执行元件的泄漏，因而，当负载变化引起泄漏量变化时，速度仍有少许变化。再者，由于调速阀的动态响应较低，当负载的变化幅值较大，频率较高时，调速阀的压力补偿作用不及时，将出现很大的速度波动。也就是说，采用调速阀的液压传动系统，其稳态的速度控制精度较高，而动态的速度控制精度可能很差。

对于容积调速系统，执行机构的速度还要受变量泵内部泄漏的影响。

此外，传动系统难以实现任意规律、连续的速度调节。

图 1-2 为液压速度控制系统简图，其中 *a* 为节流式速度控制系统，*b* 为容积式速度控制系统。图 1-2 与图 1-1 相比，有 4 点明显的区别：

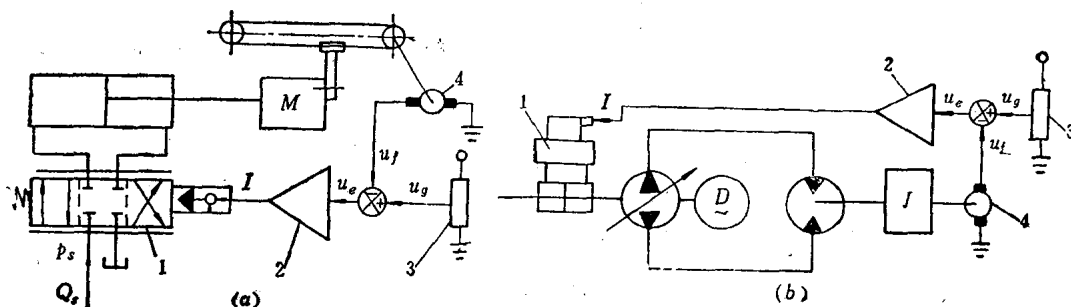


图 1-2 液压速度控制系统

a—节流式速度控制系统；*b*—容积式速度控制系统
1—伺服阀；2—伺服放大器；3—指令电位器；4—测速机

1. 控制元件不同

传动系统中，采用调速阀或变量泵手动调节流量；控制系统中，采用伺服阀自动调节流量。

通俗地讲，可以把伺服阀看成是一个零遮盖的，阀芯能在其行程内任一位置停留的、精密的比例换向阀。阀芯偏离中位的位移与伺服阀的输入电流（直流）成正比，阀芯向左或向右取决于输入电流的方向。因此，伺服阀同时起到了传动系统中的换向阀和流量控制阀的作用。

在节流式速度控制系统中，利用伺服阀直接控制执行机构的速度及方向；而在容积式速度控制系统中，利用伺服阀控制变量泵变量机构的位置和方向，从而间接地控制了执行元件的速度和方向。

2. 控制原理不同

传动系统是开环系统、而控制系统是闭环系统。

传动系统的指令即控制量是流量控制阀的开度或变量泵的调节参数（偏角或偏心），被控制量是执行机构的速度。对被控制量不进行检测，即只发出命令而不检查，当控制结果与希望值不一致时，系统没有修正能力。被控制量与控制量之间无联系，故为开环系统。开环系统的控制精度取决于其元件的性能和系统整定的精度。系统的扰动量（负载、油温、泄漏）和元件参数的变化都要影响到被控制量，因而控制精度较差。开环系统无反

馈，因而不存在矫枉过正问题，即不存在稳定性问题，所以传动系统的调整容易。

电液速度控制系统的控制量是由指令电位器给出的电压量，被控制量仍是执行机构的速度。利用测速机检测执行机构的速度（转速）并产生一个与转速成正比的电压量，此电压用作反馈信号。指令信号与反馈信号在伺服放大器中相减，并将相减后的偏差信号加以放大，再输入给伺服阀。由于对被控制量加以检测并进行反馈，从而构成了闭环系统，因而液压控制系统是按偏差调节原理工作的，即不管系统的扰动量和主路元件的参数如何变化，只要被控制量的实际值偏离希望值，系统便按偏差信号的方向和大小进行自动调整。例如，当负载突然增大，引起速度降低时，偏差信号增大，伺服阀的输入电流增大、阀口开大，从而使速度自动回升；反之，当负载突然减小，速度增大时，偏差信号减小，伺服阀的输入电流减小，阀口关小，速度便自动恢复至额定值。

指令电压代表了所希望的执行机构速度。调整指令电压，便调整了速度。采用程序装置使指令电压按某一规律变化，便可实现任意规律的连续的速度控制。

需要注意的是，如果偏差信号为零，则伺服阀的输入电流为零，阀芯处于零位（中位），于是执行机构的速度为零。因此，为了维持在某一速度下工作，必须有偏差信号存在，这意味着实际速度与希望值不一致，即存在速度误差，因此采用比例放大器时只能把稳态误差限制在很小的允许范围内，而不能完全消除，要想消除稳态误差，必须采用比例积分放大器。

控制系统有反馈，具有抗干扰能力，因而控制精度高；但也存在矫枉过度带来的稳定性问题。当系统设计或调整不当时，可能出现不稳定。因此控制系统要求较高的设计和调整技术。

3. 控制的功能不同

传动系统只能实现手动调速、加载和顺序控制等功能。

控制系统则可利用各种物理量的传感器对被控制量进行检测和反馈，从而实现位置、速度、加速度、力和压力等各种物理量的自动控制。

4. 性能要求不同

由于传动系统与控制系统的工作任务不同，因而性能要求和性能指标不同。

传动系统的基本工作任务是驱动和调速，因此，对传动系统的性能要求侧重于静态特性方面，主要性能指标是：调速范围、低速平稳性、速度刚度和效率。只有特殊需要时，才研究动态特性，而且，由于工作过程中系统指令不变，所以，研究动态特性时，只须讨论外负载力变化对速度的影响。

对控制系统来说，则要求被控制量能够自动地、稳定、快速而准确地复现指令的变化。因此，除了要满足以一定的速度进行驱动等基本要求之外，更侧重于动态特性（稳定性、响应）和控制精度的分析和研究。性能指标则应包括稳态性能指标和动态性能指标。

综上所述，液压控制系统与液压传动系统在工作任务、性能要求、控制原理、控制元件和控制功能方面均有所不同，因此，这两种系统的研究内容也是不同的。

二、液压控制系统的工作原理

最常见的液压控制系统是液压速度控制系统、液压位置控制系统和液压力控制系统三种。液压速度控制系统的原理前面已介绍，下面讨论液压位置控制系统和液压力控制系统

的原理。

(一) 液压位置控制系统

比较之下，液压位置控制系统最为常用，它可分为机液、电液和气液位置控制三类。

1. 机液位置控制系统

图1-3为一机液位置控制系统，阀芯位移 x_i 为系统输入量，缸体位移 x_p 为输出量。由于阀体与缸体作成一体，因此滑阀的开口量 $x_v = x_i - x_p$ 。零位即 $x_v = 0$ 时，阀口关闭，没有流量输出，缸不动。输入 x_i 瞬间，缸体尚未运动，即 $x_p = 0$ ，此时 $x_v = x_i$ ，于是阀口1、4打开，压力油经阀口1进入活塞腔，活塞杆腔油液经阀口4排出，因活塞杆固定，缸体便驱动负载向右运动。因 $x_v = x_i - x_p$ ，当 x_i 不继续输入时， x_v 随 x_p 的增大而减少；当缸体跟踪阀芯运动到 $x_p = x_i$ 时， $x_v = 0$ ，于是阀口重新关闭，缸体停在新的平衡位置上。同理，当 x_i 反向，阀芯向左运动时，阀口2、3打开，缸体又跟踪阀芯左移，直至 $x_p = x_i$ 。

机液位置控制系统中， x_v 便是偏差信号，而 x_p 便是反馈信号。位置反馈作用是利用阀体与缸体作成一体来实现的，无须专门的检测元件和比较元件，故称为直接位置反馈。由于输入量和反馈量都是机械位移，所以通常把阀控机液控制系统称作机液伺服机构。机液伺服机构必然是位置控制系统。

2. 电液位置控制系统

图1-4为采用双电位计的电液位置控制系统，指令电位计给出位置指令电压 u_θ ，反馈电位计检测活塞位移后给出反馈电压 u_f 。两个电位计及电源 E 组成电桥。

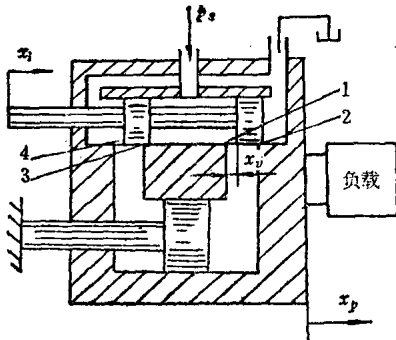


图 1-3 机液位置控制系统

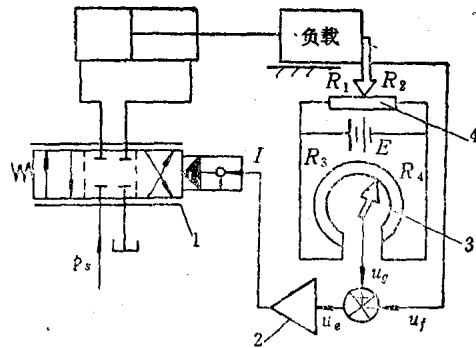


图 1-4 电液位置控制系统

1—伺服阀，2—伺服放大器，3—指令电位计，
4—反馈电位计

当指令电位计不动，电桥平衡即 $R_1R_4 = R_2R_3$ 时， $u_\theta = u_f$ ，偏差电压 $u_e = u_\theta - u_f = 0$ ，于是放大器输出电流 $I = 0$ ，伺服阀处于零位，活塞不动。

当指令电位计滑针顺时针旋转时，电阻 R_3 增大、 R_4 减小，于是 $R_2R_3 > R_1R_4$ ，电桥不平衡，使 $u_\theta < u_f$ ， $u_e < 0$ ，固而 $I < 0$ ，伺服阀阀芯右移，活塞向右运动；由于反馈电位计滑针装在工作台上随同右移，于是 R_1 增大、 R_2 减小，直至 $R_1R_4 = R_2R_3$ 时达到新的平衡状态，于是 $I = 0$ 、伺服阀又处于零位，活塞运动停止。这样一来，活塞的位移 x_p 便与指令电压 u_θ 的大小成正比。

反之，当指令电位计滑针逆时针旋转时， R_3 减小、 R_4 增大， $R_2R_3 < R_1R_4$ ， $u_\theta > u_f$ ，

$u_e > 0$, $I > 0$, 伺服阀阀芯左移, 活塞向左运动; 与此同时, R_1 减小、 R_2 增大, 直至 $R_1 R_4 = R_2 R_3$ 时, $I = 0$, 伺服阀又恢复零位, 活塞停止。可见, x_p 的方向取决于 u_e 的正负。

3. 气液位置控制系统

把电一位移检测元件换成气一位移检测元件, 把伺服放大器和电液伺服阀换成气动放大器和气液伺服阀, 便构成了气液位置控制系统。

(二) 液压力控制系统

图 1-5 为电液力控制系统, 采用伺服阀控制缸对被加载对象进行加载, 由力传感器检测加载力并转换成电压量进行闭环控制。当反馈电压 u_f 等于力指令电压 u_g 时, 伺服阀处于零位, 活塞不动, 加载力维持在 u_g 给定的水平上。

通过上述讨论, 不难看出:

1) 液压控制系统是按典型的偏差调节原理工作的闭环系统。

2) 采用位置传感器、速度传感器和力传感器分别检测位置、速度和力, 并构成负反馈, 便可实现液压位置控制、速度控制和力控制。

3) 采用伺服阀作液压功率放大器时, 构成的是阀控即节流式液压控制系统; 采用伺服变量泵作液压功率放大器时, 则构成泵控即容积式液压控制系统。

至此, 可对液压控制系统定义如下:

液压控制系统是通过液压控制元件(伺服阀或伺服变量泵)的功率放大作用, 将微弱的输入信号(电气、机械或气压)加以放大, 并驱动液压执行元件, 使之自动、连续、快速而精确地复现输入信号运动规律的自动调节系统。

三、液压控制系统各组成部分的功用

不管实际应用的液压控制系统多么复杂和多样化, 其组成不外乎如图 1-6 所示, 主要由指令装置、检测装置、比较环节、伺服放大器、液压控制元件、执行机构、校正环节和被控制对象八部分组成, 前七个部分的功用及结构如下:

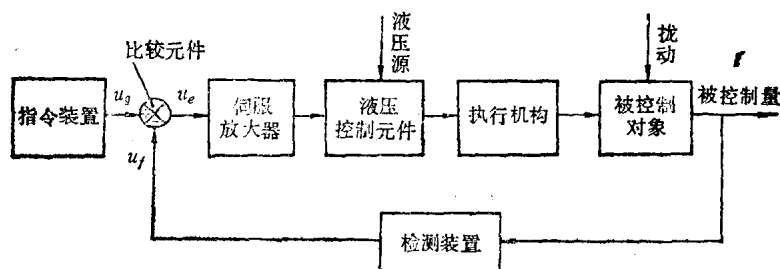


图 1-6 液压控制系统的职能图

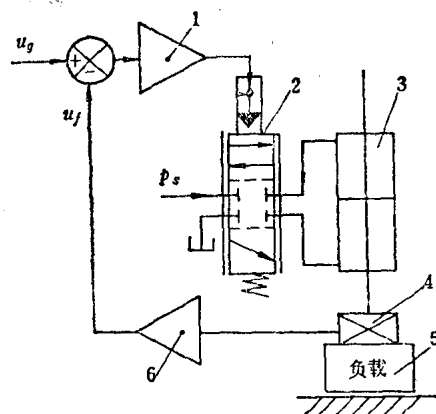


图 1-5 电液力控制系统

1—伺服放大器, 2—伺服阀, 3—加载缸, 4—力传感器, 5—被加载对象, 6—传感器二次仪表