

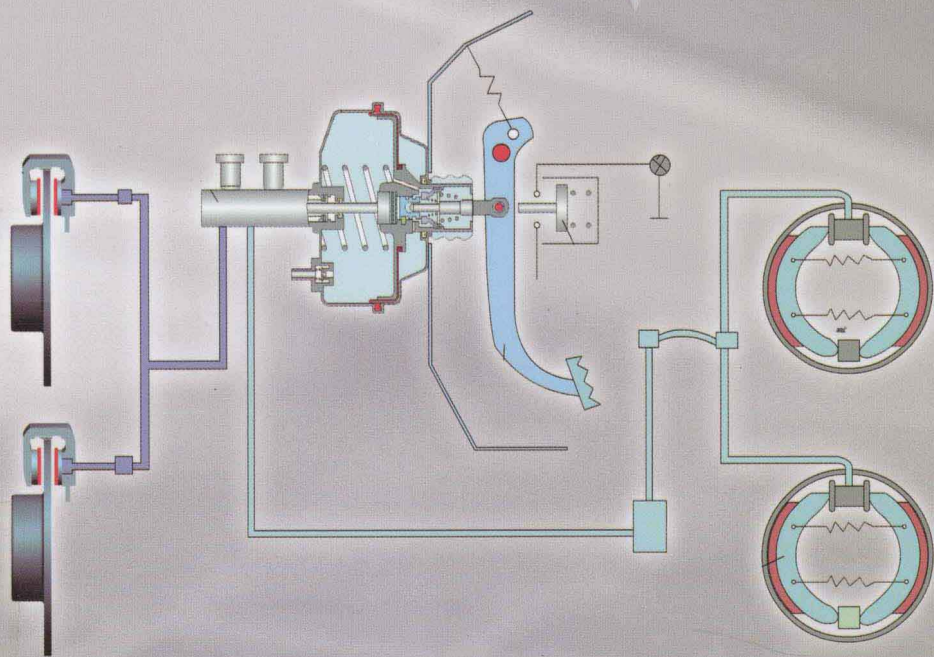


“十二五”普通高等教育车辆工程专业规划教材

# 汽车液压控制系统

QICHE YEYA KONGZHI XITONG

王增才 主编



人民交通出版社  
China Communications Press

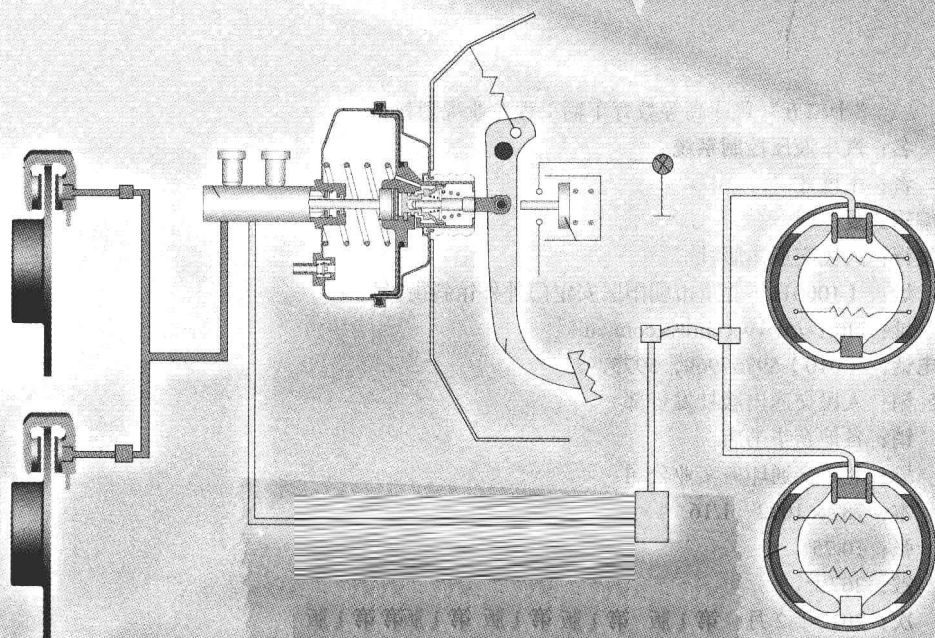


“十二五”普通高等教育车辆工程专业规划教材

# 汽车液压控制系统

QICHE YEYA KONGZHI XITONG

王增才 主编



人民交通出版社  
China Communications Press

## 内 容 提 要

本书共分为八章,按照“系统简介-液压元件-机液控制-电液控制-系统分析-系统仿真”的体系结构进行阐述。本书贯彻理论联系实际、学以致用原则,将车辆液压控制系统的经典理论和当前最新知识、技术及工艺相结合,在突出基础内容的基础上,注意反映车辆液压控制系统应用、分析及设计方法上的新动向和新成就。

本书是车辆工程、工程机械等专业本科生和研究生教材,也可供从事机、电、液一体化的车辆液压控制系统的设计、制造和使用维护工程技术人员、现场工作人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

汽车液压控制系统 / 王增才主编. -- 北京: 人民交通出版社, 2012.2

ISBN 978-7-114-09554-2

I. ①汽… II. ①王… III. ①汽车-液压控制-控制系统 IV. ①U463.22

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 268825 号

“十二五”普通高等教育车辆工程专业规划教材

书 名: 汽车液压控制系统

著 者: 王增才

责任编辑: 夏 轶

出版发行: 人民交通出版社

地 址: (100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街3号

网 址: <http://www.ccpres.com.cn>

销售电话: (010) 59757969, 59757973

总 经 销: 人民交通出版社发行部

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京交通印务实业公司

开 本: 787×1092 1/16

印 张: 10.75

字 数: 267千

版 次: 2012年2月 第1版

印 次: 2012年2月 第1次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-09554-2

印 数: 0001-3000册

定 价: 22.00元

(有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)

# “十二五”普通高等教育车辆工程专业规划教材

## 编委会名单

### 编委会主任

龚金科(湖南大学)

### 编委会副主任(按姓名拼音顺序)

陈南(东南大学)      方锡邦(合肥工业大学)      过学迅(武汉理工大学)  
刘晶郁(长安大学)      吴光强(同济大学)      于多年(吉林大学)

### 编委会委员(按姓名拼音顺序)

蔡红民(长安大学)      陈全世(清华大学)      陈鑫(吉林大学)  
杜爱民(同济大学)      冯崇毅(东南大学)      冯晋祥(山东交通学院)  
郭应时(长安大学)      韩英淳(吉林大学)      何耀华(武汉理工大学)  
胡骅(武汉理工大学)      胡兴军(吉林大学)      黄韶炯(中国农业大学)  
兰巍(吉林大学)      宋慧(武汉科技大学)      谭继锦(合肥工业大学)  
王增才(山东大学)      阎岩(青岛理工大学)      张德鹏(长安大学)  
张志沛(长沙理工大学)      钟诗清(武汉理工大学)      周淑渊(泛亚汽车技术中心)

## 教材策划组成员名单

顾燊鲁 黄景宇 林宇峰 张兵 夏韪

# 前 言

汽车液压控制系统在整车中的应用极为广泛,涉及车辆转向系统、制动系统、悬架系统等多个方面,其技术的发展体现了现代汽车技术发展的重要趋势,也是衡量车辆使用性能、设计以及制造水平的重要指标。经过多年的发展,汽车液压控制系统已由简单的机械液动控制逐渐向电子化、系统化、智能化、集成化方向发展,成为体现和制约汽车性能的重要标志。

通过对汽车液压控制系统基本内容的学习和掌握,学生可以获得有关汽车液压控制系统基本的以及最新的知识,对于培养复合型人才具有特殊的意义。为满足各院校车辆工程及其相关专业的教学要求,特编写了本教材。

本书编写的原则是:以液压系统的发展及其在车辆中的应用为主线,以系统组成及原理分析为主要内容,突出应用技术,系统地介绍有关汽车液压系统的基础知识。为解决当前各高校教学学时日益减少以及必修知识日益增多的矛盾,本教材选择介绍应用广泛的车辆液压系统,使用者可以从典型的、详细的系统中分析和论证相关主题,启发思维,举一反三。充分开发教师的主观能动性和提高学生的自学能力。

本书由山东大学王增才教授主编。研究生李云霞、孙岳、罗志刚等为本书相关资料的收集和整理做了大量工作,在此表示感谢。

主要包含八章内容,计划学时为32学时。为了方便初学者学习,编者对本书的结构进行了较为详细的分类。第一章绪论,主要介绍了液压控制系统的原理与组成及特点,并简介了几种液压控制系统在汽车中的应用。第二章,液压控制阀,重点介绍了几种典型的液压控制阀的结构特性及设计。第三章,液压动力元件,讲述了液压缸、液压马达的工作特性及匹配条件。第四章对机液控制系统的结构、设计进行了详细介绍,并有多个实例。第五章、第六章详细介绍了各类电液比例阀和电液伺服阀的特性及应用。第七章重点介绍了几种典型的汽车液压控制系统。第八章采用仿真软件技术对汽车液压系统进行了仿真建模,并给出了几种仿真实例。希望对读者了解车辆液压控制系统有所裨益。

尽管我们在教材编写中付出了很大努力,但由于水平有限,书中一定还存在很多不足之处,欢迎各位专家及使用本书的读者给予批评指正,以便再版修订时改正。

编 者

# 目 录

<b>第一章 绪论</b> .....	1
第一节 液压控制系统的原理与组成.....	1
第二节 控制系统的类型及适用场合.....	4
第三节 液压控制系统的优缺点.....	8
第四节 汽车中的液压伺服控制系统.....	10
<b>第二章 液压控制阀</b> .....	13
第一节 液压控制阀的结构及分类.....	13
第二节 圆柱滑阀的结构形式及分类.....	15
第三节 滑阀静态特性的一般分析.....	17
第四节 零开口四边滑阀的静态特性.....	21
第五节 正开口四边滑阀的静态特性.....	25
第六节 双边滑阀的静态特性.....	27
第七节 喷嘴挡板阀分析与设计.....	29
<b>第三章 液压动力元件</b> .....	37
第一节 四通阀控制液压缸.....	37
第二节 四通阀控制液压马达.....	49
第三节 三通阀控制液压缸.....	51
第四节 泵控液压马达.....	53
<b>第四章 机液控制系统</b> .....	57
第一节 机液控制系统的类型、原理及应用.....	57
第二节 机液位置伺服系统.....	62
第三节 动压反馈装置.....	65
<b>第五章 电液比例控制阀</b> .....	70
第一节 比例压力控制阀.....	70
第二节 比例流量阀.....	79
第三节 电液比例方向阀.....	88
第四节 PWM 电磁阀.....	96
<b>第六章 电液伺服阀</b> .....	103
第一节 电液伺服阀的组成及分类.....	103
第二节 力矩马达.....	105
第三节 力反馈两级电液伺服阀.....	109
第四节 直接反馈两级滑阀式电液伺服阀.....	122
第五节 电液伺服阀的特性及主要的性能指标.....	124
第六节 电液伺服阀选择方法及使用注意事项.....	128

第七节	伺服放大器	129
<b>第七章</b>	<b>汽车液压控制系统</b>	<b>132</b>
第一节	液压动力转向系统汽车自动变速器液压控制系统	132
第二节	自动变速器液压控制系统	135
第三节	DSG 直接换挡变速器系统	143
第四节	柴油机高压共轨系统	145
<b>第八章</b>	<b>液压系统仿真</b>	<b>148</b>
第一节	仿真平台 AMESim 简介	148
第二节	电液伺服速度控制系统仿真分析	151
第三节	汽车 ESP 液压控制系统仿真	154
第四节	工程车辆液压悬架系统仿真	158
<b>参考文献</b>		<b>163</b>

# 第一章 绪论

为了实现对某一机器或装置的工作要求,将若干液压元件连接或复合而成的总体,称为液压系统。液压系统种类繁多,按工作特性不同,液压系统可分为液压传动系统和液压控制系统两大类。

液压传动系统一般为不带反馈的开环系统,该系统以传递动力为主,以信息传递为辅,追求传动特性的完善,系统的工作特性由各组成液压元件的特性和它们的相互作用来确定,其工作质量受工作条件变化的影响较大。

液压控制系统多采用伺服阀等电液控制阀组成的带反馈的闭环系统,以传递信息为主,以传递动力为辅,追求控制特性的完善。由于加入了检测反馈,故系统可用一般元件组成精确的控制系统。其控制质量受工作条件变化的影响较小。

液压伺服控制是第二次世界大战期间及以后,由于武器和飞行器等军事装备对精度高、反应快的自动控制系统的需要而发展起来的,它与现代微电子和计算机技术相结合发展的电液比例控制和电液数字控制技术构成了现代液压控制技术的完整体系。与电动控制系统等其他控制系统相比,液压控制系统具有能容量大、响应速度快、系统刚度大和控制精度高等突出优点。因此,液压控制技术在各类机床、重型机械、起重机械、建材建筑机械、汽车、大型试验设备、航空航天、船舶和武器装备等领域获得了广泛应用。

本章在介绍液压控制系统的组成、分类、独特优势及其广阔应用领域的基础上,概要回顾了液压控制技术的历史进展,简要介绍当代液压控制技术的发展趋势和我国液压传动与控制技术的现状。

## 第一节 液压控制系统的原理与组成

液压控制系统能够根据机械装备的要求,对位置、速度、加速度、力等被控制量按一定的精度进行控制,并且能在有外部干扰的情况下,稳定、准确地工作,实现既定的工艺目的。

液压控制系统按不同的使用控制元件分类,可分为伺服控制系统、比例控制系统和数字控制系统三大类。本节以液压伺服控制系统(简称液压伺服系统)为例,说明液压控制系统的原理,最后归纳出液压控制系统的组成。

### 一、液压控制系统的原理

液压伺服系统(又称液压随动系统)是以液压动力元件作驱动装置所组成的反馈控制系统,其输出量(机械位移、速度、加速度或力)能以一定的精度自动按照输入信号的变化规律运动,与此同时,还起到功率放大作用,故又是一个功率放大装置。

图 1-1 所示是一个液压自动控制的举重系统原理图,系统由液压能源、四通滑阀(伺服阀)、液压缸等组成,杠杆上端 A 为操作者操纵端,下端 B 与重物支架相连。当操作者将杠杆压到某个位置时,四通滑阀的进油窗口被打开,液压能源的液压油便经四通滑阀进入液压缸



下腔,产生一个向上的力,从而推动重物  $G$  上升,同时也带动杠杆  $B$  端上升,因而四通滑阀阀芯逐渐关小进油窗口。当进油窗口完全关闭时,重物  $G$  就停留在对应位置(此时,进油窗口被封死)。如果由于油液泄漏等原因重物有些下降,则杠杆又自动将进油窗口打开,于是重物又开始上升,直到恢复原位。这种液压自动控制的举重系统,是一个力的放大器,可以举起人所未能举起重物,不仅操纵自如而且人可以离开,又因重物的举升高度与四通滑阀阀芯的位置一一对应,所以升降的高度相当准确。由于这种系统能够自动地完成人的某一工作,因此,该举重系统被称之为液压自动控制系统或者液压伺服系统。

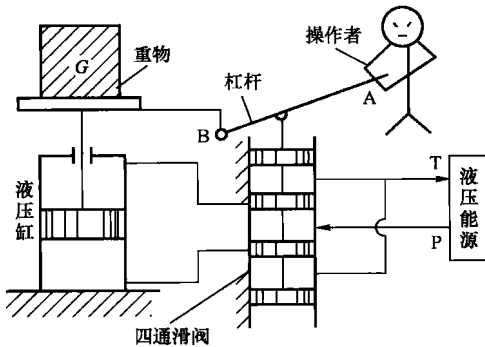


图 1-1 液压自动控制的举重系统

图 1-2 所示为一机床工作台液压伺服控制系统原理图,系统的能源为液压泵 1,它以恒定的压力(由溢流阀 2 设定)向系统供油。液压动力装置由伺服阀(四通控制滑阀)和液压缸组成。伺服阀是一个转换放大元件,它将电气-机械转换器(力马达或力矩马达)给出的机械信号转换成液压信号(流量、压力)输出并加以功率放大。液压缸为执行器,其输入的是压力油的流量,输出的是拖动负载(工作台)的运动速度或位移。与液压缸左端相连的传感器用于检测液压缸的位置,从而构成反馈控制。

图 1-2 所示为一机床工作台液压伺服控制系统原理图,系统的能源为液压泵 1,它以恒定的压力(由溢流阀 2 设定)向系统供油。液压动力装置由伺服阀(四通控制滑阀)和液压缸组成。伺服阀是一个转换放大元件,它将电气-机械转换器(力马达或力矩马达)给出的机械信号转换成液压信号(流量、压力)输出并加以功率放大。液压缸为执行器,其输入的是压力油的流量,输出的是拖动负载(工作台)的运动速度或位移。与液压缸左端相连的传感器用于检测液压缸的位置,从而构成反馈控制。

给出的机械信号转换成液压信号(流量、压力)输出并加以功率放大。液压缸为执行器,其输入的是压力油的流量,输出的是拖动负载(工作台)的运动速度或位移。与液压缸左端相连的传感器用于检测液压缸的位置,从而构成反馈控制。

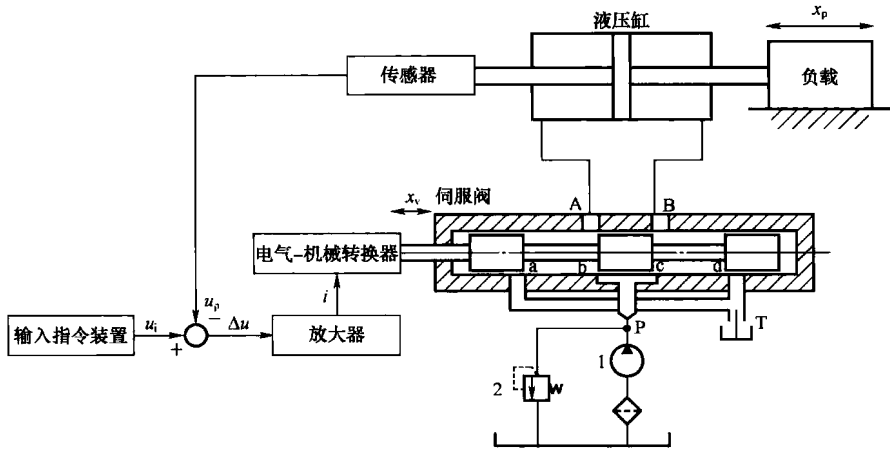


图 1-2 液压控制系统原理图

1-液压泵;2-溢流阀

当电气输入指令装置给出一指令信号  $u_i$  时,反馈信号  $u_p$  与指令信号进行比较得出误差信号  $\Delta u$ ,  $\Delta u$  经放大器放大后得出的电信号(通常为电流  $i$ ) 输给电气-机械转换器,从而使电气-机械转换器带动伺服阀的阀芯移动。不妨设阀芯向右移动一个距离  $x_v$ , 则节流窗口  $b$ 、 $d$  便有一个相应的开口量, 阀芯所移动的距离即节流窗口的开口量(通流面积)与上述误差信号  $\Delta u$  (或电流  $i$ ) 成比例。阀芯移动后, 液压泵 1 的压力油由  $P$  口经节流窗口  $b$  进入液压缸左腔(右腔油液由  $B$  口经节流窗口  $d$  回油), 液压缸的活塞杆推动负载右移  $x_p$ , 同时反馈传感器动作, 使误差及阀的节流窗口开口量减小, 直至反馈传感器的反馈信号与指令信号之间的差别(误差)  $\Delta u = 0$  时, 电气-机械转换器又回到中间位置(零位), 于是伺服阀也处于中间位置, 其输出流量等于零, 液压缸停止运动, 此时负载就处于一个合适的平衡位置, 从而完成了液压缸输出位移对指令输入的跟随运动。如果加入反向指令信号, 则滑阀反向运动, 液压缸也反向跟

随运动。

上述系统采用了电气的输入指令装置和反馈装置,因而指令信号与反馈信号都为电信号。而实际上,除了电气的输入指令装置和反馈装置外,这些装置还可以是机械、液压、气动之一或它们的某种组合。

## 二、液压控制系统的组成

液压控制系统的类型和应用场合相当广泛,然而,一个实际的液压控制系统不论如何复杂,都是由一些基本元件构成的,并可用图 1-3 所示的框图表示。这些基本元件包括输入元件、检测反馈元件、比较元件及转换放大装置(含能源)、执行器和受控对象等部分,各组成部分的作用见表 1-1。

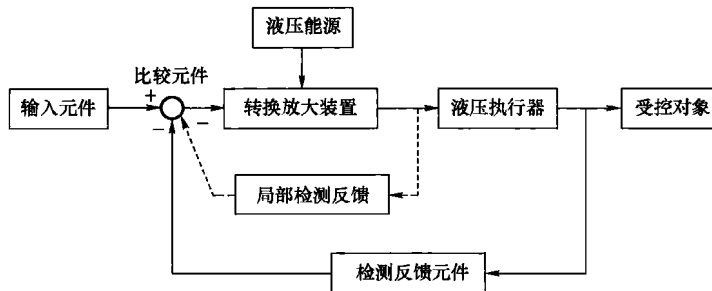


图 1-3 液压控制系统的典型组成  
液压控制系统的组成及其作用

表 1-1

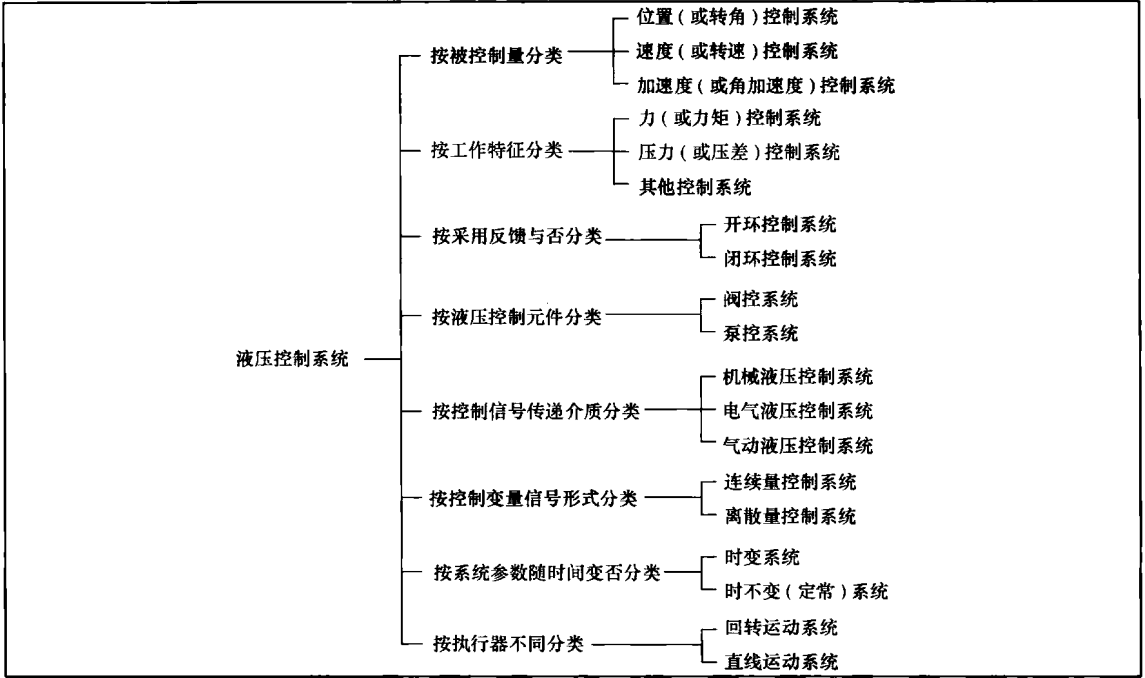
序号	名称	作用	说明
1	输入元件 (指令元件)	根据系统动作要求,给出输入信号(又称指令信号),加于系统的输入端	机械模板、电位器、信号发生器或程序控制器、计算机都是常见的输入元件。输入信号可以手动设定或程序设定
2	检测反馈元件	用于检测系统的输出量并转换成反馈信号,加于系统的输入端与输入信号进行比较,从而构成反馈控制	各类传感器为常见的反馈检测元件
3	比较元件	将反馈信号与输入信号进行比较,产生差信号,加于放大装置	比较元件经常不单独存在,而是与输入元件、反馈检测元件或放大装置一起,同时完成比较、反馈或放大
4	转换放大装置	将偏差信号的能量形式进行变换并加以放大,输入到执行机构	各类液压控制放大器、伺服阀、比例阀、数字阀等都是常用的转换放大装置
5	执行器	驱动受控对象动作,实现调节任务	可以是液压缸、液压马达或摆动液压马达
6	受控对象 (负载)	和执行器的可动部分相连接并同时运动,在负载运动时所引起的输出量中,可根据需要选择其中某物理量作为系统的控制量	受控对象可以是被控制的主机设备或其中一个机构、装置
7	液压能源	为系统提供驱动负载所需的具有压力的液流,是系统的动力源	液压泵站或液压源即为常见的液压能源

## 第二节 控制系统的类型及适用场合

液压控制系统的类型繁杂,可按不同方式进行分类,见表 1-2。每一种分类方式均代表一定特点。各种类型液压控制系统的特点、实例及应用场合如下所述。

液压控制系统分类

表 1-2



### 一、位置控制、速度控制及加速度控制和力及压力控制系统

液压控制系统的被控制量有位置(或转角)、速度(或转速)、加速度(或角加速度)、力(或力矩)、压力(或压差)及其他物理量。一个具体的液压控制系统,其被控物理量与控制对象及系统的用途和工艺要求有关,有的系统可能存在可切换的两个被控制量。例如,冶金设备中的轧机液压压下控制系统,大压下率轧制状态时采用位置闭环恒辊缝形式,而平整状态时则采用闭环恒轧制力。

### 二、闭环控制系统和开环控制系统

采用反馈的闭环控制系统(示例参见图 1-2),由于加入了检测反馈,具有抗干扰能力,对系统参数变化不太敏感,控制精度高,响应速度快,但要考虑稳定性问题,且成本较高,多用于系统性能要求较高的场合(如高精数控机床、冶金、航空、航天设备)。不采用反馈的开环控制系统(图 1-4),不存在稳定性问题,但不具有抗干扰能力,控制精度和响应速度由各组成元件

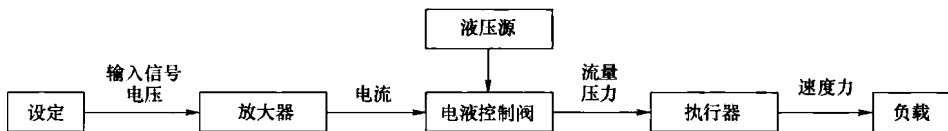


图 1-4 开环控制系统

的特性和它们的相互作用来确定,控制精度低,但成本较低,用于控制精度要求不高的场合。对于闭环稳定性难以解决、响应速度要求较快、控制精度要求不太高、外干扰较小、功率较大、要求成本低的场合,可以采用开环或局部闭环的控制系统。

### 三、阀控系统和泵控系统

阀控系统又称节流控制系统,其主要控制元件是液压控制阀,具有响应快、控制精度高的优点,缺点是效率低,特别适合中小功率、快速、高精度控制系统使用。按照使用的控制阀不同,液压控制系统可分为伺服控制系统(控制元件为伺服阀)、比例控制系统(控制元件为比例阀)和数字控制系统(控制元件为数字阀)三大类。图 1-2 所示为采用伺服阀的伺服控制系统;图 1-5 所示为电液比例控制系统的一般技术构成框图,其中液压转换及放大装置可以是比例阀,也可以是比例变量泵;图 1-6 所示为采用增量式数字阀的数字控制系统。

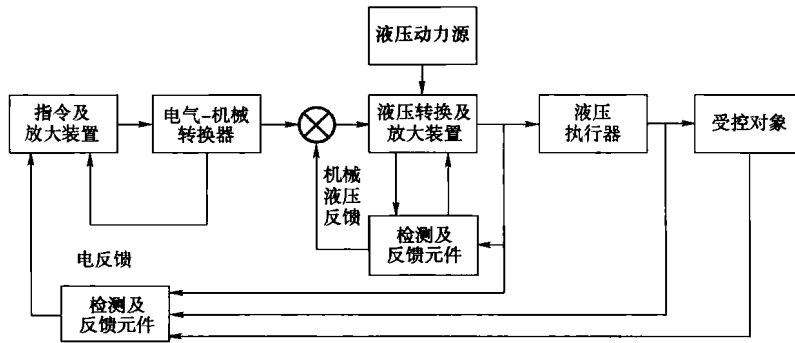


图 1-5 电液比例控制系统的一般技术构成框图

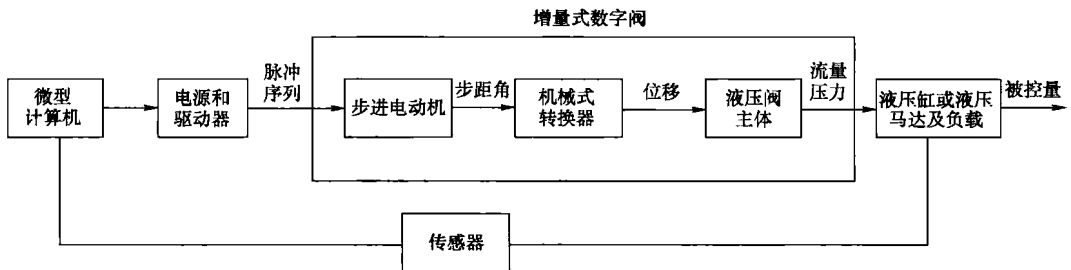


图 1-6 增量式数字阀控制系统构成框图

泵控系统又称容积控制系统,其实质是用控制阀去控制变量液压泵的变量机构,由于无节流和溢流损失,故效率较高,且刚性大,但响应速度慢、结构复杂,适用于小功率而响应速度要求不高的控制场合。

泵控系统示例如图 1-7 所示,它是一个位置控制系统。工作台由双向液压马达与滚珠丝杠来驱动,双向变量液压泵提供液压能源,泵的输出流量控制通过电液控制阀控制变量缸实现,工作台位置由位置传感器检测并与指令信号相比较,其偏差信号经控制放大器放大后送入电液控制阀,从而实现闭环控制。采用这种位置控制的设备有各种跟踪装置、数控机械和飞机等。

### 四、机械液压控制系统、电气液压控制系统和气动液压控制系统

机械液压控制系统简称机液控制系统,其原理框图如图 1-8 所示,它由液压和机械两部分

组成,系统中的给定、反馈和比较元件都是机械构件。其优点是简单可靠,价格低廉,环境适应性好;缺点是偏差信号的校正及系统增益的调整不如电液控制系统方便,难以实现远距离操作,此外反馈机构的摩擦和间隙都会对系统的性能产生不利影响。

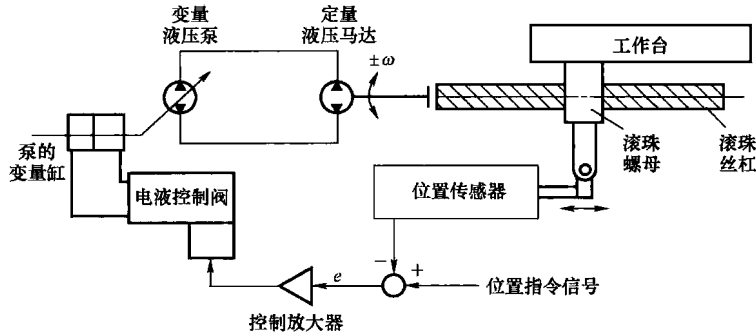


图 1-7 泵控系统原理图

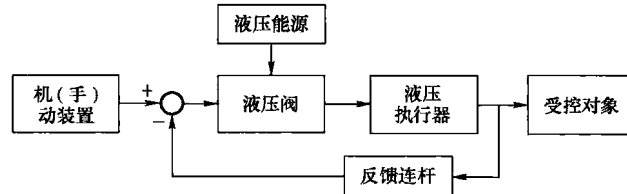


图 1-8 机液控制系统原理框图

图 1-9 所示为一个典型的机液控制系统原理图,系统用于控制车床仿形刀架。具有某种形状的模板(俗称靠模)作为系统的输入。模板用一边有预制切口的平板做成,与输入信号发生装置相连的触头沿着模板的边缘移动。传统的液压仿形刀架,触头直接(或通过机械杠杆)与伺服阀阀芯相连,控制刀架的液压缸也和伺服阀的阀套组成一体,当液压缸把伺服阀移到零位置时,又移动刀具,使刀具在零件上切削出和仿形模板切口一样的形状。为了克服纯机液控制系统偏差信号的校正及系统增益调整不便的缺陷,可以将触头连接到电子信号发生装置上,如直线位置传感器(LVDT),当触头扫过模板时,就产生了与其变化相应的指令信号。位置反馈传感器产生连续的反馈信号与指令信号相比较,所产生的误差信号控制伺服阀,伺服阀又操纵执行器(液压缸)。由于执行器控制着刀架或工作台,所以零件就被加工成所需的形状。

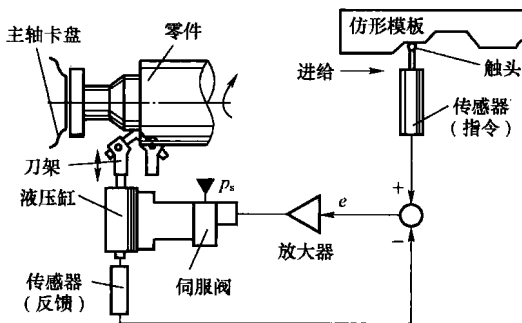


图 1-9 车床仿形刀架机液控制系统原理图

电气液压控制系统简称电液控制系统,如图 1-10 所示,它由电气及液压两部分组成,系统中偏差信号的检测、校正和初始放大都是采用电气、电子元件来实现;系统的核心是电液控制阀,按系统所用电液控制阀的不同,电液控制系统可分为电液伺服系统(参见图 1-2)、电液比例系统(参见图 1-5)和电液数字系统(参见图 1-6)。它们的详细分类、构成及特点见表 1-3。电液控制系统的优点是信号的测量、校正和放大都较为方便,容易实现

远距离操作,容易与响应速度快、抗负载刚性大的液压动力元件实现整合,组成以电子、电气为“神经”,以液压为“筋肉”的电液控制系统,具有很大的灵活性与广泛的适应性。由于机电一体化技术的发展和计算机技术的普及,电液控制系统在工程上普遍得到应用,成为液压控制中

的主流系统。随着机械装备工作性能要求的提高,有些普通的液压传动系统将逐步改为电液控制系统。

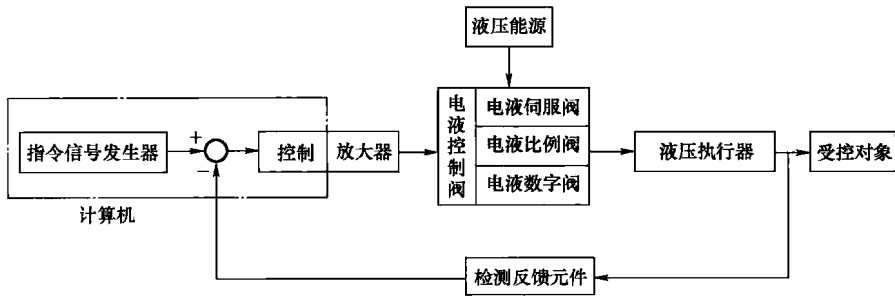


图 1-10 电液控制系统一般构成  
电液控制系统的详细分类、构成及特点

表 1-3

类 型		构 成	特 点	
电液 伺服 系统	位置系统	控制装置(伺服放大器和电液伺服阀)、 执行器(液压缸、液压马达或摆动液压马 达)、反馈检测装置(传感器)、能源装置(定 量泵或变量泵)	响应快、精度高,但成本较高,抗干扰能力 较差	
	速度系统			
	力(压力)系统			
电液 比例 系统	开环	控制装置(比例放大器和比例阀)、执行 器(液压缸、液压马达或摆动液压马达)、能 量装置(定量泵、变量泵或比例变量泵)	可明显简化系统,实现复杂程序控制;利用 电液结合提高机电一体化水平,但控制精 度低	
	闭环	除构成开环比例系统的装置外,还包括反 馈检测装置	响应较快,精度较高,价格低廉	
电液 数字 系统	增量式	开环	微机、增量式数字阀、步进电动机及其驱 动电源、执行器(液压缸、液压马达、摆动液 压马达)、能量装置	响应较快、精度高,不存在稳定性问题。性 能与微机、驱动电源、数字阀的性能有关
		闭环	除开环系统的组成装置外,还有反馈检测 装置	响应较快,精度较高,系统校正可用软件实 现,但成本高、控制复杂
	脉宽 调制式	开环	微机、脉宽调制数字阀、脉宽调制放大器、 执行器、能源装置	响应较快,精度较高,不存在稳定性问题。 性能与微机、放大器、数字阀的性能有关,成 本较高,控制复杂,软件编制较困难,控制流 最小(<20L/min)
		闭环	除开环系统的组成装置外,还有反馈检测 装置	响应较快,精度高,系统校正可用软件实 现,但成本高,控制复杂,软件编制困难,控制 流量小(<20L/min)

气动液压控制系统简称气液控制系统,它由气动和液压两部分组成,系统中信号的检测和初始放大均采用气动元件实现。气液控制系统具有结构简单,测量灵敏度高,工作可靠,可在高温、振动、易燃、易爆等恶劣环境下工作等优点,但需要压力气源等附属设备。

### 五、连续量控制系统和离散量控制系统

连续量控制系统中各变量均为时间的连续函数;离散量控制系统中某些变量是用脉冲调

制形式表达的。当采用电液数字阀时,必然是离散控制系统。用计算机控制电液伺服阀或电液比例阀的控制系统,实质上也是离散的控制系,系采用脉幅调制形式进行控制。

## 六、时变系统与时不变系统

时变与时不变(定常)系统由控制系统本身决定。时变系统如运行中的导弹由于燃料消耗使自身质量随时间而变化,机械手在运动过程中随着位置的不同转矩也随之变化等。这种系统的分析和控制都比较困难,一般情况下可按时不变系统考虑。

## 七、直线运动控制系统和回转运动控制系统

按照执行器的不同,液压控制系统可分为直线运动控制系统和回转运动控制系统。前者以液压缸作为执行器,后者以液压马达或摆动液压马达作为执行器。

液压缸是一种实现直线运动的常用执行器,由于配置方便,不但用于一维控制(图 1-9),还经常用于二维、三维控制。如图 1-11 所示,采用二组伺服阀 2、液压缸 1 及传感器 3,在仿形铣床上, $x$  及  $z$  方向的液压缸运动就是工作台的纵向和横向进给, $y$  方向的液压缸运动即为升降台的升降运动,从而实现了立体形状的仿形加工。

但进行位置控制、速度控制并不一定都要采用液压缸作为执行器,为满足负载力矩和负载速度的要求,或减小负载惯量的影响以提高液压固有频率,或将旋转运动转变为直线运动,经常采用液压马达作为执行器。工程上许多极精密的系统是采用液压马达与滚珠丝杠来驱动的,如图 1-7 所示。液压马达的控制精度可达几分之一转,滚珠丝杠能使控制精度进一步提高。

液压马达与滚珠丝杠结合在一起使用,可使直线位置的控制精度在  $1/1000\text{mm}$  以内或更小。

现代机械设备的运动日趋复杂化,例如计算机控制的数控机械加工设备,有的需要实现五维运动( $x, y, z$  再加两个平面运动),为此,采用五组电液控制阀控制的液压执行器(液压缸和液压马达),每一组为实现一个方向运动控制的完整的控制回路。这种多执行器控制系统多采用计算机进行控制,其指令信号通过计算机编程产生,但最终将以直流电压信号形式送至控制阀的电气-机械转换器上,阀芯移动,液压油液就通向执行器,使刀具或工件运动,完成复杂工件的加工。

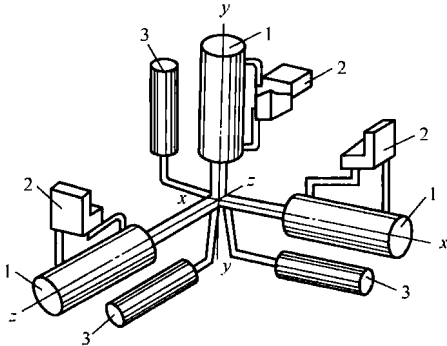


图 1-11 液压缸用于三维控制  
1-液压缸;2-伺服阀;3-传感器

## 第三节 液压控制系统的优缺点

### 一、液压控制系统的优点

液压控制系统除了具有本身的特点外,还具有液压传动系统所具备的一系列优点。这里仅从控制的角度,将液压控制系统的主要优点归纳如下:

(1)易于实现直线运动的速度、位移及力控制。采用结构简单的液压缸,液压控制系统便可很方便地直接实现位置控制、速度控制和力控制。与电气控制相比,液压力控制系统更是独树一帜;即使是转速控制,由于液压马达的低速性能比一般直流电动机好,因此液压控制系统

无须借助于机械减速器,也可实现低速或调速范围很宽的转速控制。

(2)驱动力、力矩和功率可很大。例如,大型四辊轧机要在 30kN 轧制力的条件下进行高响应、高精度的位置控制;大型挤压机要在 50kN 挤压力的情况下进行挤压速度控制;大型油压机要在 50kN 加载力的情况下实现多缸同步控制;在这些场合,只能求助于液压控制系统。

(3)尺寸小、质量轻、加速性能好。由于液压可高达 32MPa,而且液压控制系统容易通过自然散热或采用冷却器散发油液热量,因此允许液压元件及液压装置的尺寸制造得小,从而使结构紧凑、质量轻、功率-质量比大、力-惯量比大、加速特性好。

电气元件中单位面积的电磁力仅 0.3MPa 左右,且散热不方便,受散热条件的限制,尺寸-功率比大。因此,缸的力-质量比比直流电动机约大 100 倍;中等功率液压马达的转矩-惯量比比同容量的一般直流电动机大 10~20 倍,功率-质量比则大 10 倍左右;整个液压装置的质量-功率比为 1.5kg/kW,电气装置的质量-功率比为 7kg/kW。

(4)响应速度快。

(5)控制精度高。现代轧机的液压压下系统,在工业控制中是很有代表性的:单侧压下力为  $1 \times 10^4 \sim 1.5 \times 10^4$  N,运动部件质量达  $1 \times 10^5$  kg,系统频宽可达 15Hz,运动加速度为电动压下的 100 倍,板材的成品厚度差可控制在  $\pm 5 \mu\text{m}$  内,而电动压下只能控制在  $\pm (10 \sim 20) \mu\text{m}$  范围内。

(6)液压能的储存方便,从而可减少电气设备的装机容量。气动控制系统具备上述(1)的优点,但压力较低,驱动力较小;由于气体的压缩性大,“气压弹簧刚度”很小,因此气动执行元件——负载环节的谐振频率很小,约为液压谐振频率的 1/50,且易发生低频振荡。目前气动控制系统的应用不广,只用于宇航或高温、防火防爆或怕油的控制场合。

## 二、液压控制系统的缺点及克服办法

液压控制系统以液体为工作介质,因而带来如下缺点:

(1)油液易受污染。油液污染是引起液压控制系统故障的主要原因,因此可以说,清洁的油液与可靠性是两个同义词。为了提高系统的可靠性,对于抗污染性能差的伺服阀,不得不采取多重过滤措施,但这将使装置复杂、成本提高;研制抗污染的伺服阀是解决这个问题的最好办法。

(2)伺服元件的加工精度高、制造成本高。为减小泄漏、死区、零漂,提高分辨率,要求伺服元件的公差与配合严格,加工精度很高,一般为微米( $\mu\text{m}$ )级;为了达到线性的流量增量,需采用电火花加工阀套方孔;为减小滞环,需采用性能优良的铁磁性材料。这些都使制造成本提高,加上伺服阀的设计、调试技术较高,因此伺服阀的售价为一般换向阀的 20~30 倍。研制结构简单、性能优良的廉价工业用伺服阀,应是研究人员及制造厂的目标。

(3)外漏将使油液散失,造成环境污染,并有引起火灾的危险。完善的设计、良好的维护是解决这些问题的根本。

(4)液压控制系统的分析、设计、调整和维护都要求较高的技术水平。即使在工业发达的国家,直至 20 世纪 70 年代中期,对液压工程师来说,液压控制也属“阳春白雪”。提高教育水平,是推广和用好液压控制系统的保证。

## 三、电液控制系统是最理想的控制系统

由液压控制的特点及优缺点分析可知,液压控制的吸引力主要在于其动力元件性能上具



有很大的优势,但在能源,信号的检测、变换与处理,增益的调整,系统的综合、校正,遥控诸方面则不如电气系统。电液控制系统最大限度地发挥了流体动力在大功率动力控制方面的特长和电气系统在信息处理方面的优势,从而构成了以电气为“神经”,以液压为“筋肉”的最理想的控制系统。

电液控制系统与电气控制系统在竞争中不断发展。随着高起动转矩、高调速比的高性能直流电动机的问世,目前在小功率的控制场合,电气控制系统已处于有利形势。而在大功率、高精度、高响应的控制场合,电液控制系统仍居主导地位。

## 第四节 汽车中的液压伺服控制系统

液压伺服控制系统在汽车上有广泛的应用,液压传动主要包括电控液力自动变速器、电控悬架装置、电控防抱死制动装置、气压式挂车制动装置、液压或气压式转向助力装置、自动倾卸车举升机构及发动机燃料供给、机械润滑系统等。液力传动主要采用液力变矩器或液力耦合器实现发动机与变速器的离合与变速。液力变矩器具有对外负载的自动适应性,使车辆起步平稳,加速迅速、均匀,其减振作用降低了传动系统的动载和扭振,延长了传动系统的使用寿命,提高了乘坐舒适性、行驶安全性、通过性以及车辆的平均速度。下面概述几个典型的汽车液压控制系统。

### 一、汽车防抱死制动系统(ABS)

ABS 液压系统组成如图 1-12 所示,主要由 ABS 控制器(包括电子控制单元、液压元件、液压泵等)、四个车轮的转速传感器、ABS 故障警示灯、制动警告灯等组成。

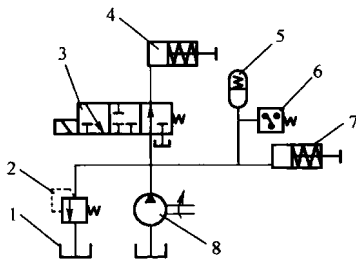


图 1-12 ABS 液压系统组成

1-储液器;2-安全阀;3-电磁阀;4-制动轮缸;5-储液器;6-压力报警开关;7-制动主缸;8-电动泵

ABS 制动压力调节装置工作原理:制动压力调节装置(简称液压调节器)主要由 8 个 2 位 2 通调压电磁阀、1 个双联式电动液压柱塞泵、2 个储液室、2 个低压储能室、1 个电动液压泵和几个止回阀等组成,如图 1-13 所示。电动液压泵转速传感器产生的转速信号输入 ECU,供 ECU 监测电动液压泵的运转情况,液压调节阀通过管路与制动主缸和各制动轮缸相连。

在制动过程中,如果电子控制单元(ECU)根据车轮轮速传感器输入的车轮转速信号判定是否有车轮趋于制动抱死倾向,需要调节制动轮缸的压力时,ECU 就使该制动轮缸相对应的进液电磁阀或出液电磁阀换位,并自动按以下情况分别进行判断、处理:

(1)保压过程——当 ECU 通过转速传感器得到信号识别出车轮有抱死倾向时,ECU 发出控制信号关闭相应车轮的进液电磁阀,并让出液电磁阀继续保持关闭状态,该制动轮缸中的制动液被封闭而使制动压力保持一定。

(2)减压过程——如果在保压阶段车轮仍有抱死倾向,则 ABS 进入降压阶段。此时 ECU 发出控制指令使该制动轮缸相应的进液电磁阀和出液电磁阀都通电换位(进液电磁阀处于断流,出液电磁阀处于导通)该制动轮缸中的部分制动液就会通过出液电磁阀流入低压储能室,使制动轮缸的制动压力随之减小。与此同时液压泵也开始工作,把低压储能室的制动液重新泵回制动主缸以补偿制动踏板行程损失,此时制动踏板出现抖动(有抬升或反弹感),车轮抱