

工程训练·工程实践

工程系统与控制

凌智勇 陆一心 主编 ●



化学工业出版社
教材出版中心

工程训练·工程实践

工程系统与控制

凌智勇 陆一心 主编



化学工业出版社
教材出版中心

·北京·

(京)新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

工程系统与控制/凌智勇, 陆一心主编. —北京:
化学工业出版社, 2004. 11
(工程训练·工程实践)
ISBN 7-5025-6347-4

I. 工… II. ①凌…②陆… III. 工程-控制系统
IV. TB114. 2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 120978 号

工程训练·工程实践

工程系统与控制

凌智勇 陆一心 主编

责任编辑: 刘俊之 陈 丽

文字编辑: 吴开亮 丁建华

责任校对: 顾淑云 战河红

封面设计: 蒋艳君

*

化学工业出版社 出版发行
教材出版中心

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

发行电话: (010) 64982530

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

大厂聚鑫印刷有限责任公司印刷

三河市延风装订厂装订

开本 720mm×1000mm 1/16 印张 15¼ 字数 280 千字

2005 年 1 月第 1 版 2005 年 1 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-6347-4/TB·97

定 价: 28.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

序

人类进入 21 世纪前后,以信息技术为重要标志的高新技术的飞速发展,正在改变着人类的社会、经济和生活方式。“天翻地覆慨而慷”,世界范围内的激烈竞争,已越来越明显地表现为人才的竞争,特别是创新人才的竞争。1998 年 10 月,联合国教科文组织在巴黎召开了首届世界高等教育大会,会议达成了共识:高等教育的根本使命是促进社会的可持续发展与进步。目前,教育开始求新求变,要求坚持以人为本,更具有前瞻性。对学生的人文素质、科学素质、实践能力和创新能力的培养更显重要。

“问渠哪得清如许,为有源头活水来。”技术是工程的基础,科学是技术的源泉,科学技术相互支持,但直接作用于生产实际的是技术。因此,面向经济建设要高度重视工程人才的培养,高度重视工程教育,要努力加速建立科学、技术、经济和管理相结合的工程教育体系,强化工程意识,重组工程训练,提高工程素质,培养创新精神、创新人格和实践能力,以实现知识创新、技术创新、管理创新和市场开拓型的工程人才培养。

近年来,尽管各国的国情不同,面临的问题也不同,在工程教育的体制和运作上互有差异,但对工程教育的认识、做法和发展方向上都强调“综合、创造、实践”,强调“工程教育工程化”、“工程教育为工程实际服务”、强调人文关怀、创新精神、实践能力和工程师素质的培养。

另一方面,我国加入世界贸易组织后,对外开放更将进一步扩大,中国将更加深入地参与国际分工,越来越多的产品将打上“中国制造”,制造业是工业的主体,装配制造业是制造业的核心。没有装配制造业就没有制造,没有制造就没有获得物质财富的基本手段。制造首先要依靠直接从事制造的技能人才。从而,培养“中国制造”的技能人才就成为关键。我国已经成为了一个高级蓝领即银领制造业人才稀缺的国家。

我国“十五”计划提出,要在 5 年内将职工中的高级技能人才的比例提高到 20%。一个合格的银领人才应当具备比较深厚的理论基础与相当丰富的实际经验,并能够针对生产第一线的实际需要,具备很强的技术革新、开发攻关、项目改进的能力。这种人才应具有高度的责任感,不但关心产品,更加懂得团结人、关怀人;不仅是某些关键生产环节中的操作者,还是整个生产环节的组织者;同时还能高度关怀、有效带动和组织协调其他技术人员一起动手进行应有的技术攻关,把优秀的设计变成一个高质量的产品。

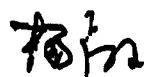
针对工程人才的需求,江苏大学工业中心组织编写了工程训练·工程实践系列图书,希望成为联接科学、教育与工程技术、生产实际的桥梁之一。在本系列图书规划过程中,作者针对“各种技能对工作的重要性”,对相关企业和历届毕业生进行了调查,证实在工业生产中,对技术交流、设计制造、工程经济、项目管理、质量控制、计算机等技能均有较高的要求。

本系列图书以工程类本科生(尤其是高职学生)和制造业银领的培训为对象,包括机、电、管三个领域。在内容上注重实践性、启发性、科学性,强调诸如制造、环境影响、质量、商务和经济等工程实践的多重功能。从当前工程人才的素质需求和实际出发,努力做到理论与实践并重,理论与实际相结合,基本概念清晰,重点突出,简明扼要,深入浅出,通俗易懂,以现代工程训练为特色,重视能力培养,面向生产实际,并考虑与国际教育交流,反映新技术、新工艺、新材料的应用和发展。

本套丛书的编写是适应我国制造业发展形势,在教育上的一个创新,值得鼓励。由于是一个创新,其中就不会没有问题,没有不足之处。我与编者的心情一样,希望读者能及时指出其中的问题与不足之处,有助于本系列图书不断改进,编者的水平不断提高。

谨以为序。

中国科学院院士
华中科技大学教授



2004年4月

前 言

随着教学改革的不深入，为了培养宽口径复合型人才，各学校专业设置、教学计划、教学内容和课程设置都在进行调整。特别是针对社会对人才的需求，各学校都在加强对实际动手、操作能力的培养，加强学生工程系统概念的培养，相继建立了各种形式的培训中心、训练中心等，该书即为适应对学生进行工程系统培训的需要而编写。

为了适应加强基础的需要，书中列入了作为液压、气压传动技术基础的流体力学基础，并力求阐述准确、简练、明了。为适应科技发展的需要，考虑到技术进步，在元件部分适当采用了一些新型的液压、气压、机械及控制元件。为适应加强对学生进行工程系统的培训，本书在液压、气压传动技术部分，适当增加了系统安装、调试、故障分析等内容。

本书由江苏大学凌智勇副教授、陆一心教授编写，由张弼教授、王存堂教授主审，编写分工如下：凌智勇副教授（绪论、第一章、第二章、第三章），陆一心教授（第四章、第五章）。

本书适用于工科院校本科生必修、选修课或工程训练的参考书。由于编者水平有限，书中不足之处在所难免，敬请有关专家和读者批评指正。

编者

2004 年 7 月

目 录

绪论	1
一、工程传动系统的工作原理	1
二、工程传动系统的组成	3
三、工程传动系统的特点及应用	3
第一章 流体力学基础	5
第一节 流体的物理性质	5
一、流体的基本概念	5
二、密度、重度	5
三、压缩性和热膨胀性	6
四、黏性与黏度	7
五、液压油的选用	9
第二节 空气及气体的状态方程	10
一、空气	10
二、气体的状态方程	12
第三节 流体静力学基础	13
一、流体静压力及特性	13
二、流体静力学基本方程	13
三、帕斯卡原理	14
四、压力的表示方法及单位	15
五、流体静压力作用于固体壁面的力	15
第四节 流体运动学和流体动力学基础	15
一、基本概念	15
二、流量连续性方程	17
三、能量方程（伯努利方程）	18
四、动量方程	21
第五节 管道中流体的流动	23
一、流动状态、雷诺数	23
二、圆管中的层流流动	25
三、圆管中的紊流流动	26

四、压力损失	26
第六节 孔口和缝隙流动	30
一、孔口流动	30
二、缝隙流动	33
第七节 液压冲击与气穴现象	37
一、液压冲击	37
二、气穴现象	38
第二章 液压传动技术	40
第一节 液压泵	40
一、液压泵概述	40
二、齿轮泵	42
三、叶片泵	43
四、柱塞泵	45
五、液压泵的选用	47
第二节 液压缸和液压马达	47
一、液压缸	47
二、液压马达	52
第三节 液压控制元件	54
一、方向控制阀	55
二、压力控制阀	60
三、流量控制阀	65
第四节 液压辅助元件	68
一、油箱	68
二、滤油器	69
三、蓄能器	71
四、热交换器	72
五、密封装置	72
六、管件	74
第五节 液压回路及系统	75
一、方向控制回路	76
二、压力控制回路	77
三、速度控制回路	79
四、其他回路	85
五、液压系统	88

第六节 液压系统的安装、调试与维护	90
一、液压元件的安装	90
二、液压系统的清洗	92
三、液压设备的调试与运转	93
四、液压设备的保养与维护	95
第七节 液压传动系统常见故障及原因	97
一、液压设备故障诊断步骤与方法	97
二、液压元件的常见故障	100
三、系统故障	101
 第三章 气压传动技术	104
第一节 气源装置	104
一、空气压缩机	104
二、储气罐	106
三、气源净化装置	108
四、压缩空气的调整装置	112
五、压缩空气的配管	115
第二节 气动执行元件	117
一、气缸	117
二、气马达	124
第三节 气动控制元件	126
一、压力控制阀	126
二、流量控制阀	128
三、方向控制阀	131
四、气动逻辑单元	132
第四节 气动辅助元件	135
一、消声器	135
二、自动排水器	136
三、真空元件	137
第五节 气动基本回路及气动系统	138
一、气动基本回路	138
二、行程程序控制	143
三、气动控制系统实例	144
第六节 气动系统的维护与故障分析	146
一、气动系统的维护保养	146

二、气动系统的故障分析·····	147
第四章 机械传动技术 ·····	152
第一节 机械传动的种类·····	152
一、连杆传动·····	152
二、齿轮传动·····	153
三、蜗杆传动·····	157
四、带传动·····	159
五、链传动·····	161
六、螺旋传动·····	163
第二节 机械传动的连接·····	165
一、过盈连接和固定连接·····	165
二、螺纹连接·····	167
三、键、花键连接·····	170
四、联轴器与离合器·····	172
第三节 机械传动的支承·····	176
一、滑动轴承·····	176
二、滚动轴承·····	178
三、静压轴承·····	180
第四节 机械传动的润滑与密封·····	181
一、摩擦·····	181
二、磨损·····	181
三、润滑·····	182
四、密封·····	183
第五章 工程控制系统 ·····	186
第一节 工程控制系统的组成·····	186
第二节 工程控制系统的工作原理·····	187
第三节 传感器技术·····	189
一、传感器的作用与地位·····	189
二、传感器的分类·····	189
三、传感器的组成·····	190
四、主要传感器介绍·····	190
五、传感器的特性与性能指标·····	201
第四节 控制器·····	203

一、控制器的分类.....	203
二、基本控制作用.....	203
三、液压控制器.....	205
四、气动控制器.....	208
五、电子控制器.....	212
第五节 执行器.....	218
一、电动执行器.....	218
二、液压执行器.....	224
三、气动执行器.....	224
第六节 工程控制系统实例.....	224
一、数字太阳传感器刻度试验台.....	224
二、液压泵控制液压马达式速度系统.....	227
参考文献.....	229

绪 论

工程系统是由若干相互关联、具有特定功能的部件按一定的结构组成的有机整体，具有满足人们使用要求的功能。

自然界由物质、能量和信息三大要素组成。工程系统是为了达到一定的预期目的而设计的，根据不同的使用目的，对输入系统的物质、能量和信息进行变换、传递、储存等，以输出改变形态或位置的物质。对输入的能量进行变换的是各种动力机械（电动机、内燃机等），对能量进行传递的是工作传动系统（如液压传动系统、气压传动系统、机械传动系统、电气传动系统等），最后通过执行结构输出新的不同形式的能量。

在工程中使用的各种传动系统，如液压、气压、机械和电气传动系统等，均由相应的动力元件、执行元件以及传递控制元件等构成，实现对能量的变换、控制与传递以及再变换并输出的功能。

液压（气压）传动以液体（气体）作为工作介质对能量进行传递与控制，相对于机械传动来说是一门新技术，机械传动则是一项古老而传统的传动技术，运用面广、量大。随着科学技术的不断发展，液压（气压）传动的应用越来越广泛，机械传动也在不断的发展和前进。

一、工程传动系统的工作原理

液压（气压）传动将原动机的机械能先转化为油液（气体）的压力能，再通过各种控制阀及传送管道将具有压力能的油液（气体）输送到执行机构，最后由执行机构把油液（气体）的压力能再转变为工作机构所需的机械运动和动力推动负载运动的能量。

图 0-1 所示为液压千斤顶工作原理图。当向上抬起杠杆时，小活塞就向上运动，小液压缸 1 下腔容积增大形成局部真空，关闭单向阀 2，油箱 4 中的油液在大气压作用下，经吸油管打开单向阀 3 进入小液压缸下腔。当向下压杠杆时，小液压缸下腔容积减小，油液受挤压，压力升高，关闭单向阀 3，打

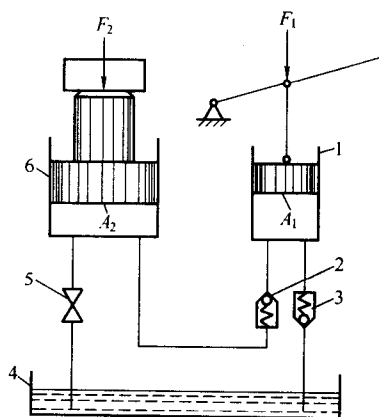


图 0-1 液压千斤顶工作原理

1—小液压缸；2—排油单向阀；3—吸油单向阀；4—油箱；5—截止阀；6—大液压缸

开单向阀 2，油液进入大液压缸 6 的下腔，推动大活塞上移顶起重物。杠杆不断上下扳动，则油液不断进入大液压缸下腔，使重物逐渐举升。如杠杆停止动作，大液压缸下腔油液压力将使单向阀 2 关闭，大活塞连同重物一起被自锁不动，停止在举升位置。如打开截止阀 5，大液压缸下腔通油箱，大活塞将在自重作用下向下移，迅速回复到原始位置。

若将千斤顶中两根通油箱的油管通大气，则变为气压千斤顶，但由于气体具有一定的可压缩性，只有在手动泵按动多次使系统中的大气建立一定压力后才能举升重物。

由千斤顶的工作原理得知，小液压缸 1 与单向阀 2、3 配合共同完成将杠杆的机械能转换为流体的压力能输出，大液压缸 6 则将流体的压力能转换为机械能输出，抬起重物。在这里大、小缸组成了最简单的液压（气压）传动系统，实现了力和运动的传递。

1. 力的传递

设由负载力 F_2 在系统中所产生的流体压力为 $p_2 = F_2 / A_2$ 。由帕斯卡原理，泵的输出压力 p_1 应等于缸中的流体压力，即 $p_1 = p_2 = p$ 。则作用力 F_1 应为

$$F_1 = p_1 A_1 = p_2 A_1 = p A_1 \quad (0-1)$$

在 A_1 、 A_2 一定时，负载力 F_2 越大，压力 p 也越高，所需的作用力 F_1 也越大，即系统压力与外负载密切相关。这是液压与气压传动工作原理的第一个特征：液压（气压）传动中工作压力取决于外负载。

2. 运动的传递

如果不考虑可压缩性、漏损和缸体、管路的变形，则泵排出的流体体积必然等于进入缸的流体体积。设泵活塞的位移为 s_1 ，缸活塞的位移为 s_2 ，则有

$$s_1 A_1 = s_2 A_2 \quad (0-2)$$

上式两边同除以运动时间 t ，得

$$q_1 = v_1 A_1 = v_2 A_2 = q_2 \quad (0-3)$$

式中， v_1 、 v_2 分别为泵和缸活塞的平均运动速度； q_1 、 q_2 分别为液压泵输出和液压缸输入的平均流量。若连续改变泵的流量 q_1 ，即可获得连续变化的缸的速度 v_2 。因此，流体传动能够实现无级调速。

可见，液压与气压传动是靠密闭工作容积变化相等的原则实现运动（速度和位移）传递的。调节进入液压缸的流量 q ，即可调节活塞的运动速度 v ，这是液压传动工作原理的第二个特征：活塞的运动速度只取决于输入流量的大小，而与外负载无关。

在液压（气压）传动系统中，与外负载力相对应的流体参数是流体压力，与运动速度相对应的流体参数是流体流量，压力和流量是液压（气压）传动中两个

最基本的参数。

机械传动是一项传统的传动技术，机械传动系统是机械设备的的重要组成部分，其包含的内容众多，传动的形式也非常多，但它们都由轮、杆等元件以旋转、摆动及直线等运动形式将动力源提供的运动和动力传动给工作机构而对外作功。

二、工程传动系统的组成

在工程系统中所采用的传动系统是多种多样的，但就其本质来讲，不外乎由以下部分组成。

(1) 动力装置 机器设备的动力源，它提供机器作功和运动形式转换的能量。对于液压（气压）传动则是将机械能转换为油液（气体）的压力能。动力源的形式：机械传动为电动机或内燃机；液压传动为液压泵；气压传动为空气压缩机。

(2) 工作装置 直接完成工作任务的部分，它把动力装置的能量进行转换并对外作功。对于液压（气压）传动则是将流体所具有的压力能转换为机械能的元件。工作装置的形式是各种各样的，其对外输出的运动形式有直线运动、摆动、转动等。

(3) 调节控制装置 对动力装置提供的运动和动力进行调节和控制，并传送到工作装置，是动力装置和工作装置之间的重要连接部分。对于液压和气压系统，调节控制装置主要对流体的压力、流量及油液流动方向进行调节控制。

调节控制装置在一台机械设备中是非常重要的，它除了可将动力装置提供的动力传递给工作装置外，还可以改变输出的运动形式（由旋转→移动，由连续运动→间歇运动），改变输出的运动速度，改变输出的运动方向以及分配动力和运动（由一个动力源带动几个工作装置）。

(4) 辅助装置 在各种传动系统中，除了上述主要装置外，还有一些其他元件，如液压传动的油箱、滤油器、油管等。这些元件在系统中对保证系统正常工作起着重要作用。

在设计一个工程传动系统时，需要绘制系统的工作原理图，该图可反映出系统的结构、组成元件及各元件间的连接等。在绘制系统工作原理图时，其中工作元件符号应采用国家标准规定的符号，这样不仅使所绘制的原理图简单明了，而且还便于绘制。各种元件的符号可参考有关手册、标准。

三、工程传动系统的特点及应用

在工程传动系统中，以流体作为工作介质的液压、气压传动系统，与机械传动和电气传动系统相比，具有体积小、重量轻、功率密度大的显著特点，并可在

大范围内实现无级调速，对系统中的参数（压力、流量、流动方向等）可方便地进行控制且易于实现自动化，在系统过载时极易实现过载保护等。由于在流体传动过程中，需要对能量进行两次转换，使其传动效率偏低，而且由于泄漏、可压缩性等因素，使其传动比不能得到严格保证。为了保证系统工作的可靠性，对流体传动元件的制造精度要求较高。在系统工作过程中若发生故障，不像机械传动系统那样容易诊断。

机械传动系统是一种传统的传动系统，几乎用于所有的设备当中，而液压与气压传动系统相对来说是一门新兴的技术。由于其具有的特点，目前已得到广泛的应用，如国防工程、机床、工程机械、冶金机械、塑料机械、农林机械、汽车、船舶等。现今，采用液压传动的程度已成为衡量一个国家工业水平的重要标志，在发达国家中 90% 的数控加工中心、95% 的工程机械、95% 以上的自动化生产线都采用液压传动技术。

随着机械自动化程度的不断提高，液压气动元件的应用数量急剧增加，元件的小型化、系统集成化是必然的发展趋势。液压技术与传感技术、微电子技术的密切结合，出现了许多机电一体化元器件（如电液比例控制阀、数字阀等），使液压传动技术在高压、高速、大功率、节能高效、低噪声、长使用寿命、高度集成化等方面取得了重大进展。气动技术的发展同样包含了传动、控制与检测在内的自动化技术，其元件的微型化、节能化、无油化是当前发展的特点，与电子技术相结合产生的自适应元件，使气动系统从开关控制进入到反馈控制。计算机的广泛普及及应用，使得元件与系统的计算机辅助设计（CAD）、计算机辅助制造（CAM）、计算机辅助试验（CAT）和计算机实时控制成为当前的发展方向。

第一章 流体力学基础

第一节 流体的物理性质

一、流体的基本概念

在液压与气压传动中所使用的工作介质分别是液体和气体，两者合称为流体。

流体由不断不规则地运动着的分子所组成，由于分子间具有一定的间隙（气体的较大，液体的较小），造成空间点上运动、状态参数（速度、压力、密度等）的不确定。空间内某点位于分子间隙中时，该点的运动速度为零，但当某个分子运动到该点时，该点突然具有该分子的运动速度，从而使问题的处理非常困难。但从宏观上看，分子群的运动始终处于平衡状态。由于我们所研究的是流体分子表现出来的平均性质，故将宏观的质点作为流体的基本单位，一个质点内包含了一群分子，质点的运动参数为该群分子运动参数的统计平均值，并且认为质点之间没有间隙。因此，力学上把流体看成是由无数极其微小的质点所构成的易于流动连续介质。

一定质量液体的形状随容器形状而变，但其体积保持不变；而一定质量气体的体积则随容积而变化，它始终充满容纳它的容积。

对于液体，压力变化时其体积的变化很小，以致在大多数工程应用场合可以忽略。压力对气体的影响则很大，压力增加，气体体积减小，压力减小，气体体积增大。

二、密度、重度

1. 密度

流体内某点处的微小质量 Δm 与其体积 ΔV 之比，当体积 ΔV 趋于零时的极限称为流体在该点的密度，用 ρ 表示，即

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta V} = \frac{dm}{dV} \quad (1-1)$$

对于均质流体，其密度为

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1-2)$$

流体的密度随压力或温度的变化而变化。工程计算中可忽略液体密度的变化，而气体密度的变化不能忽略。

2. 重度

流体内某点处的微小重量 ΔW 与其体积 ΔV 之比，当体积 ΔV 趋于零时的极限称为流体在该点的重度，用 γ 表示，即

$$\gamma = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta W}{\Delta V} = \frac{dW}{dV} \quad (1-3)$$

对于均质流体，其重度为

$$\gamma = \frac{W}{V} \quad (1-4)$$

重度与密度之间具有如下关系

$$\gamma = \frac{W}{V} = \frac{mg}{V} = \rho g$$

三、压缩性和热膨胀性

1. 压缩性

流体的体积随所受压力的变化而变化的性质称为可压缩性。压力对液体体积的影响非常小，而对于气体则影响非常显著。

可压缩性表示当流体所受的压力发生单位变化时流体体积的相对变化量，用压缩系数 k 来衡量，即

$$k = -\frac{dV}{V} \times \frac{1}{dp} \quad (1-5)$$

式中， dp 为流体压力的微分； dV 为流体体积的微分； V 为压力变化前的流体体积。由于压力增加，流体的体积减小，两者变化方向相反，为使 k 为正值，在式中加入一负号。

压缩系数 k 的倒数，称为流体的体积弹性模量，用 β 表示，即

$$\beta = \frac{1}{k} = -V \frac{dp}{dV} \quad (1-6)$$

对于液体，在压力和温度变化不大时常认为 β 为常数，在液压传动的稳态工况时，一般认为液体是不可压缩的。但在高压及研究系统的动态性能时，则必须考虑液体的可压缩性。

对于常用的纯液压油， β 的平均值在 $1.4 \times 10^9 \sim 2.0 \times 10^9 \text{ N/m}^2$ 范围内。但如果液体中混有空气，则其体积弹性模量的有效值（用 β_e 表示）将显著降低。

气体的可压缩性远大于液体，不能忽略，而且气体体积的变化应服从气体状态方程。在工程技术中，常常遇到的是等温变化过程和等熵变化过程。