



普通高等教育“十一五”国家级规划教材
中国科学院机械工程系列规划教材

液压与气压传动

宋锦春 苏东海 张志伟 编著



科学出版社
www.sciencep.com

普通高等教育“十一五”国家级规划教材
中国科学院机械工程系列规划教材

液压与气压传动

宋锦春 苏东海 张志伟 编著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书是为高等学校机械工程与自动化专业编写的教材,是中国科学院机械工程系列规划教材之一,并被教育部列为普通高等教育“十一五”国家级规划教材。全书分三篇:流体力学、液压传动和气压传动。全面介绍了本领域的新技术。元件视图选用最新的产品,读者可以通过本书对液压与气压传动方面的基础知识和该技术的目前发展概况有较全面的了解。

本书特点是:坚持理论联系实际,注重流体力学基础,以液压与气压传动系统为主线,以能初步设计液压与气压传动系统为目的。

本书可供机械工程类专业的大学本科生和研究生使用,也可供相关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

液压与气压传动/宋锦春,苏东海,张志伟编著. —北京:科学出版社,2006
(普通高等教育“十一五”国家级规划教材·中国科学院机械工程系列规划教材)

ISBN 7-03-017913-7

I. 液… II. ①宋…②苏…③张… III. ①液压传动-高等学校-教材
②气压传动-高等学校-教材 IV. TH13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 100882 号

责任编辑:段博原 贾瑞娜 / 责任校对:邹慧卿
责任印制:张克忠 / 封面设计:陈 敬

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

双青印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2006 年 9 月 第 一 版 开本:15(720×1000)

2006 年 9 月第一次印刷 印张:28 3/4

印数:1—3 500 字数:534 000

定价:34.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换<双青>)

序

装备制造业是我国国民经济中的重要基础工业。机械装备为各类产品的物化提供平台和载体,机械装备的技术水平是衡量社会生产力水平的重要标志,机械科学、机械工程技术和机械工业的发展水平对经济建设和社会发展的作用都至关重要。

目前,世界机械工业产值达到了总工业产值的 $1/3$ 以上。我国制造业增加值在国内生产总值所占的比重高达 40% ,我国的财政收入一半也来自制造业。随着我国加入 WTO,我国经济越来越融入到全球经济体系中,我国的制造业在世界制造业中的地位越来越重要,并正从制造大国迈向制造强国。至少在 21 世纪的前 20 年,制造业将仍然是我国国民经济增长的主要来源,因此需要大批综合素质高、能力强的机械类专业人才。

另外,我国高等教育从精英型教育阶段进入了大众型教育阶段,实现了高等教育历史性的跨越式发展,技术的进步和社会的发展也对高等院校机械工程教育的人才培养提出了新的要求。

为此,中国科学院教材建设专家委员会和科学出版社组织我国机械工程领域的中国科学院院士、教育部教学指导委员会成员、教学名师以及经验丰富的专家教授组成编委会,共同组织编写了这套《中国科学院机械工程系列规划教材》,以适应我国高等机械工程教育事业的发展,更好地实现机械工程类专业人才的培养目标,在规模上、素质上更好地满足我国机械科学技术和机械工业发展的需要,为建设创新型国家做出贡献。

本套教材主要有以下几方面的特点:

1. 适应多层次的需要。本套教材依据教育部相关教学指导委员会制定的最新专业规范和机械基础课程最新的教学基本要求,同时吸取不同层次学校教师的意见,进行了教材内容的编排与优化,能够满足各类高校学生的培养目标。
2. 结构体系完备。各门课程的知识点之间相互衔接,以便学生完整掌握学科基本概念、基本理论,了解学科整体发展趋势。本套教材除主教材外,还配有辅导书、多媒体课件、习题集及网络课程等。
3. 作者经验丰富。参加本套教材编写的人员不少来自相关国家重点学科、国家机械教学基地的院校,有些还是国家级、省部级教学成果奖完成人,国家级、省级精品课程建设负责人以及相关院校的骨干教师代表。
4. 理论与实际相结合,加强实践教学。在达到掌握基本理论、基本知识、

基本技能的教学要求前提下，注重例题、设计实践和实验教学，着力于学生分析问题能力、创新能力和实际动手能力的培养。

另外，为了保证本套教材的质量，编委会聘请国内知名的同行专家对教材进行了审定。

我们还将根据机械科学与工程学科发展的战略要求，对本套教材不断补充、更新，以保持本套教材的系统性、先进性和适用性。

我们热忱欢迎全国同行以及关注机械科学与工程教育、教学及教材建设的广大有识之士对我们的工作提出宝贵意见和建议，一道为我国机械工程教育的发展而努力。

中国科学院院士



2006年5月

前 言

本书是为高等学校机械工程与自动化专业编写的教材,是中国科学院机械工程系列规划教材之一,并被教育部列为普通高等教育“十一五”国家级规划教材。

本书是作者结合多年教学实践和科研实际工作总结,汲取国内外同类教材的精华精心组织编写而成。本书基于理论联系实际的思想,注重基本概念的建立,介绍了本领域最新出现的新技术,元件介绍选用最新的实际产品视图,读者可以通过本书了解到液压与气压传动技术的目前发展概况。

全书分三篇,第一篇为流体力学、第二篇为液压传动、第三篇为气压传动。共17章:第1章介绍液体静力学和动力学、孔口出流及缝隙流动、气体动力学等;第2章概述液压传动的工作原理和组成、特点等;第3章~第6章介绍了液压传动系统所用的动力元件、执行元件、控制调节元件和辅助元件;第7章介绍液压传动的基本回路;第8章介绍典型液压系统;第9章介绍液压传动系统的设计计算;第10章简要介绍电液伺服与比例控制系统的工作原理、电液伺服阀和比例控制阀;第11章概述气压传动系统的工作原理和组成、气压传动的应用;第12章~第14章介绍气源装置、气动辅件、执行元件、控制元件;第15章介绍气压传动的基本回路和常用回路;第16章介绍气动控制回路的设计等;第17章介绍电-气比例/伺服控制系统组成、基本原理、典型电-气比例/伺服控制系统。每章附有思考题与习题。在附录中列出了常用液压与气动元件图形符号(GB/T786.1—1993)、英语专业词汇,以便学生学习相关的英文文献资料。

本书由宋锦春、苏东海、王刚主编。参加编写的有东北大学陈建文、宋锦春、张志伟、从恒斌、王艳、赵丽丽(第1章、第2章、第5章、第6章、第10~13章、第15章、第17章),沈阳工业大学苏东海、王野牧、王洁(第7章、第8章、第14章、第16章),沈阳理工大学谢群、李艳杰、王刚(第3章、第4章、第9章)。

全书由东北大学教授张健成和东北大学兼职教授赵周礼审稿。他们对本书进行了认真审阅,提出了很多好的意见和建议,作者在此表示衷心的感谢。

限于编者水平,书中难免存在缺点和错误,诚望广大读者不吝指正。

编 者

2006年6月6日

目 录

序 前言

第一篇 流 体 力 学

第 1 章 流体力学基础	3
1.1 流体的主要物理性质	3
1.2 液体静力学	9
1.3 液体动力学	16
1.4 阻力计算	23
1.5 孔口出流及缝隙流动	36
1.6 液压冲击及空穴现象	44
1.7 气体动力学	47
思考题与习题	55

第二篇 液 压 传 动

第 2 章 绪论	61
2.1 液压传动概述	61
2.2 液压传动系统的组成	63
2.3 液压传动的优缺点	65
2.4 液压系统图的图形符号	65
思考题与习题	65
第 3 章 液压泵和液压马达	67
3.1 概述	67
3.2 齿轮泵	76
3.3 叶片泵	83
3.4 柱塞泵	96
3.5 各类液压泵性能比较及应用	105
3.6 液压马达	106
思考题与习题	111

第4章 液压缸	113
4.1 液压缸的分类与特点	113
4.2 液压缸的典型结构及主要零部件	120
4.3 液压缸的设计与计算	124
4.4 数字控制液压缸	128
思考题与习题.....	130
第5章 液压阀	132
5.1 概述	132
5.2 方向控制阀	132
5.3 压力控制阀	142
5.4 流量控制阀	150
5.5 二通盖板式插装阀	156
5.6 其他安装形式液压阀	164
思考题与习题.....	174
第6章 液压辅助元件	176
6.1 蓄能器	176
6.2 过滤器	183
6.3 油箱、热交换器.....	191
6.4 管件	198
6.5 常用仪表	203
6.6 密封装置	208
6.7 其他辅助元件	213
思考题与习题.....	214
第7章 液压基本回路	215
7.1 压力控制回路	215
7.2 速度控制回路	222
7.3 方向控制回路	237
7.4 多执行元件控制回路	240
思考题与习题.....	246
第8章 典型液压系统	251
8.1 组合机床动力滑台液压系统	251
8.2 液压机液压系统	254
8.3 地空导弹发射装置液压控制系统	259
8.4 大型剧院三块双层升降舞台的电液比例同步控制系统	263

8.5	SZ-250/160 注塑机液压系统	266
8.6	挖掘机液压系统	271
	思考题与习题	275
第 9 章	液压传动系统的设计计算	277
9.1	液压系统设计的步骤与要求	277
9.2	液压系统的功能设计	279
9.3	元件选择及计算	287
9.4	液压系统验算	293
9.5	液压装置的结构设计,编制技术文件	296
9.6	液压系统设计计算举例	300
	思考题与习题	310
第 10 章	电液伺服与比例控制简介	312
10.1	概述	312
10.2	电液伺服阀	314
10.3	电液比例阀	319
	思考题与习题	330

第三篇 气压传动

第 11 章	气压传动概述	335
11.1	气压传动系统的工作原理和组成	335
11.2	气压传动的优缺点	336
11.3	气压传动技术的发展和应	337
	思考题与习题	338
第 12 章	气源装置及气动辅件	339
12.1	气源系统的组成	339
12.2	空气压缩机	341
12.3	气动辅助元件	343
	思考题与习题	350
第 13 章	气动执行元件	351
13.1	气缸	351
13.2	气马达	355
	思考题与习题	357
第 14 章	气动控制元件	359
14.1	压力控制阀	359

14.2	流量控制阀	366
14.3	方向控制阀	369
14.4	气动逻辑元件	375
	思考题与习题	381
第 15 章	基本回路和常用回路	382
15.1	基本回路	382
15.2	常用回路	390
	思考题与习题	394
第 16 章	气动控制回路的设计及应用实例	395
16.1	气动非时序逻辑系统设计	395
16.2	气动时序逻辑系统设计	397
16.3	气动系统的设计计算	406
16.4	气压传动系统实例	418
	思考题与习题	422
第 17 章	电-气比例/伺服控制系统	423
17.1	概述	423
17.2	比例/伺服控制气阀	424
17.3	典型电-气比例/伺服控制系统	428
	思考题与习题	431
	参考文献	433
附录 A	部分常用液压与气动元件图形符号 (GB/T786.1—1993)	435
附录 B	英语专业词汇	443

第一篇 流体力学

第 1 章 流体力学基础

1.1 流体的主要物理性质

与固体不同,流体具有很强的流动性,在受到拉力与剪切力作用时都将产生极大的变形,只要这种作用力持续存在,流体的变形就会持续进行。

1.1.1 密度

单位容积的流体所具有的质量称为密度,以符号 ρ 表示。

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

式中, ρ 为密度, kg/m^3 ; M 为质量, kg ; V 为流体的体积, m^3 。

密度的大小与该种流体的温度和压力有关,即与可压缩性和温度膨胀性有关。

1.1.2 液体的可压缩性

液体受压力的作用发生体积变化的性质称为可压缩性,常用体积压缩系数 β_e 表示。其物理意义是单位压力变化所造成的液体体积的相对变化率,即

$$\beta_e = - \frac{\frac{\Delta V}{V_0}}{\Delta p} \quad (1-2)$$

式中, β_e 为体积压缩系数, $1/\text{Pa}$; ΔV 为液体的体积变化量, m^3 ; V_0 为液体的初始体积, m^3 ; Δp 为液体的压力变化量, Pa 。

因为压力增大,即 $\Delta p > 0$ 时,液体的体积减小,即 $\Delta V < 0$,为使 β_e 取正值,故在式 (1-2) 右端加一负号。常用矿物油型液压油的体积压缩系数值为 $(5 \sim 7) \times 10^{-10} \text{Pa}^{-1}$ 。

体积压缩系数 β_e 的倒数称为体积弹性模量,以 K 表示,即

$$K = \beta_e^{-1} \quad (1-3)$$

液压油的体积弹性模量 $K = (1.4 \sim 2.0) \times 10^9 \text{Pa}$,约为钢的体积弹性模量的 $0.67\% \sim 1\%$ 。当液压油中混有空气时,其体积弹性模量将显著减小。

1.1.3 液体的温度膨胀性

液体的温度膨胀性由温度膨胀系数 β_t 表示。 β_t 是指单位温度升高值 (1°C) 所引起的液体体积变化率。

$$\beta_t = \frac{\frac{\Delta V}{V_0}}{\Delta t} \quad (1-4)$$

式中, Δt 为温升, $^\circ\text{C}$ 。

β_t 是压力与温度的函数, 由实验决定。水和矿物油型液压油的温度膨胀系数如表 1-1、表 1-2 所示。

表 1-1 水的温度膨胀系数 $\beta_t \times 10^6 (1/^\circ\text{C})$

压力/MPa	温度/ $^\circ\text{C}$				
	1~10	10~20	40~50	60~70	90~100
0.1	14	150	422	556	719
10	44	166	422	548	704
20	73	184	426	539	—
50	130	237	429	523	660
90	150	291	437	514	619

表 1-2 矿物油型液压油的温度膨胀系数 $\beta_t \times 10^6 (1/^\circ\text{C})$

15 $^\circ\text{C}$ 时的密度/(kg/m^3)	700	800	850	900	920
β_t	8.2×10^{-4}	7.7×10^{-4}	7.2×10^{-4}	6.4×10^{-4}	6.0×10^{-4}

1.1.4 黏性

1. 黏性的物理本质

液体在外力作用下流动时, 分子间的内聚力要阻止分子间的相对运动而产生一种内摩擦力, 液体的这种特性称为黏性。

2. 液体内摩擦定理

如图 1-1 所示, 两平行平板间充满液体, 下平板固定, 上平板以速度 v_0 右移。由于液体的黏性, 下平板表面的液体速度为零, 中间各层液体的速度呈线性分布。

根据牛顿内摩擦定律, 相邻两液层间的内摩擦力 F_t 与接触面积 A 、速度梯度 $\frac{dv}{dy}$ 成正比, 且与液体的性质有关, 即

$$F_t = \mu A \frac{dv}{dy} \quad (1-5)$$

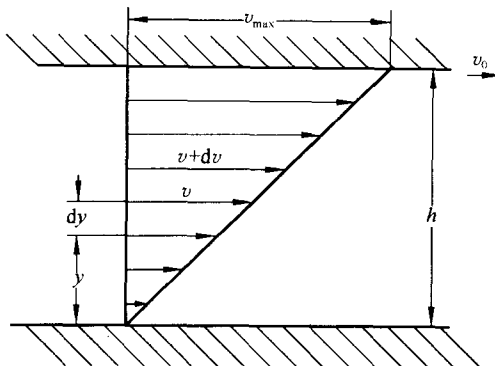


图 1-1 液体的黏性示意图

式中, μ 为液体的动力黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; A 为液层间的接触面积, m^2 ; $\frac{dv}{dy}$ 为速度梯度, $1/\text{s}$ 。

将式 (1-5) 变换成

$$\mu = \frac{F_f}{A \frac{dv}{dy}} = \frac{\tau}{\frac{dv}{dy}} \quad (1-6)$$

式中, τ 为液层单位面积上的内摩擦力, Pa 。

由式 (1-6) 知, 液体黏度的物理意义是: 液体在单位速度梯度下流动时单位面积上产生的内摩擦力。

3. 黏度

黏性的大小用黏度来衡量。工程中黏度的表示方法有以下几种:

(1) 动力黏度

式 (1-6) 中的 μ 称为动力黏度, 其法定单位为 $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。

(2) 运动黏度

液体的动力黏度与其密度的比值, 无物理意义, 以其量纲中含有运动学参数而称为液体的运动黏度, 用 ν 表示。即

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1-7)$$

我国油的牌号均以其在 40°C 时运动黏度的平均值来表注。例如, N46 号液压油表示其在 40°C 时, 平均运动黏度为 $46\text{mm}^2/\text{s}$ 。

(3) 相对黏度

相对黏度是指液体在某一测定温度下, 依靠自重从恩氏黏度计的 $\varnothing 2.8\text{mm}$

测定管中流出 200cm^3 所需时间 t_1 与 20°C 时同体积蒸馏水流出时间 t_2 的比值, 用符号 $^\circ E$ 表示

$$^\circ E = \frac{t_1}{t_2} \quad (1-8)$$

相对黏度与运动黏度的换算关系为

$$\nu = \left(7.13^\circ E - \frac{6.13}{^\circ E} \right) \times 10^{-6} (\text{m}^2/\text{s}) \quad (1-9)$$

4. 黏度的影响因素

(1) 温度

温度升高液体体积膨胀, 液体质点间的间距加大, 内聚力减小, 在宏观上体现为液体黏度的降低。一般矿物油型液压油的黏温关系为

$$\nu = \nu_{40} \left(\frac{40}{\theta} \right)^n \quad (1-10)$$

式中, ν 为液压油在 $\theta^\circ\text{C}$ 时的运动黏度; ν_{40} 为液压油在 40°C 时的运动黏度; n 为指数, 如表 1-3 所示。

表 1-3 矿物油型液压油指数 n

$^\circ E_{40}$	1.27	1.77	2.23	2.65	4.46	6.38	8.33	10	11.75
$\nu_{40}/(\text{mm}^2/\text{s})$	3.4	9.3	14	18	33	48	63	76	89
n	1.39	1.59	1.72	1.79	1.99	2.13	2.24	2.32	2.42
$^\circ E_{40}$	13.9	15.7	17.8	27.3	37.9	48.4	58.8	70.4	101.5
$\nu_{40}/(\text{mm}^2/\text{s})$	105	119	135	207	288	368	447	535	771
n	2.49	2.52	2.56	2.76	2.86	2.96	3.06	3.10	3.17

几种国产液压油的黏温特性如图 1-2 所示。

与液体不同, 气体的黏度随温度升高而增大。其原因在于, 气体的黏度是由气体分子间的动量交换产生的, 温度升高时, 气体分子间的碰撞加剧, 动量交换增加。

(2) 压力

随压力升高流体的黏度增大, 一般可用下式表示

$$\mu = \mu_0 e^{\alpha p} \quad (1-11)$$

式中, μ 为压力为 p 时的动力黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; μ_0 为压力为 1 大气压时的动力黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; α 为黏压指数, $1/\text{Pa}$ 。

一般矿物油型液压油 $\alpha \approx \frac{1}{432} 1/\text{Pa}$ 。

流体的黏度还与介质本身的组成成分如含气量、多种油液的混合情况有关。

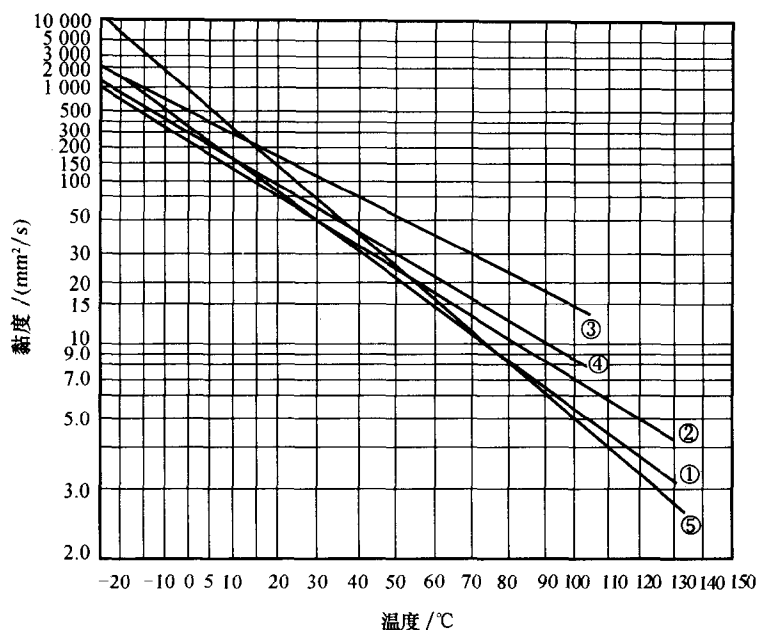


图 1-2 几种国产液压油的黏温特性

① 普通石油型；② 高黏度指数石油型；③ 水包油型；④ 水-乙二醇型；⑤ 磷酸酯型

1.1.5 比热容

单位质量液体温度变化 1°C 时所需交换的热量，用 C （单位： $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})$ ）表示

$$C = \frac{Q}{m \Delta t} \quad (1-12)$$

式中， Q 为液体所交换的热量， J ； m 为液体质量， kg ； Δt 为液体温度变化， $^{\circ}\text{C}$ 。

常用液压介质的比热容如表 1-4 所示。

表 1-4 常用液压介质的比热容

介 质	矿物型液压油	水包油乳化液	油包水乳化液	水-乙二醇乳化液	磷酸酯液压油
C $/(\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C}))$	1.88	4.19	2.81	3.35	1.34

1.1.6 湿空气

含有水蒸气的空气称为湿空气。空气中的水蒸气在一定条件下会凝结成水滴，水滴不仅会腐蚀元件，而且对气动系统的稳定性也会带来不良影响。因此常采取措