

机床设计手册

4 液压、气动系统设计及机床现代设计方法

机械工业出版社

机床设计手册

第 四 册

液压、气动系统设计及机床现代设计方法

《机床设计手册》编写组 编



机械工业出版社

1 9 9 6

《机床设计手册》共分五册。第一册：通用标准资料；第二册：零件设计；第三册：部件、机构及总体设计；第四册：液压、气动系统设计及机床现代设计方法；第五册：电力传动及控制系统设计。

第四册内容包括五篇。第八篇为机床液压系统设计；第九篇为气压传动与控制；第十篇为机床结构有限元分析；第十一篇为机床动态性能分析；第十二篇为机床优化设计。

《机床设计手册》可供从事机床设计的工程技术人员使用，也可供其他有关专业人员和大专院校师生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

机床设计手册 第四册：液压、气动系统设计及机床现代设计方法 / 《机床设计手册》编写组编。—北京：机械工业出版社，1997

ISBN 7-111-05245-5

I. 机… I. 机… II. 机床-设计-技术手册 IV. TG502.1-62

中国版本图书馆CIP数据核字 (96) 第08569号

出版人：马九荣 (北京市百万庄南街一号 邮政编码100037)

责任编辑：何富源 版式设计：王颖 责任校对：姚培新

封面设计：姚毅 责任印制：卢子祥

机械工业出版社京丰印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

1997年10月第1版第1次印刷

787mm×1092mm¹/₁₆·70.5印张·2插页·2411千字

0 001—1 500册

定价：140.00元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

编写说明

本手册是在机械工业部机械科学研究所的组织下和各省市机械局的支持下，由机械工业部北京机床研究所、广州机床研究所、济南铸锻机械研究所、内江机床电器研究所和有关工厂、大专院校及科研单位集体编写的。

第四册包括五篇：

第八篇是由机械工业部广州机床研究所负责组织编写的，参加编写的人员为：

主 编 徐新章

第一章 吴盛林、赵克定、顾云飞

第二章 吴盛林、赵克定、顾云飞、徐新章

第三章 徐新章、黄启泉、王锡茂

第四章 钱祥生、黄启泉、林明炯、徐新章

第五章 徐新章、张景存、陈恬生

第六章 吴盛林、赵克定、顾云飞、钱祥生、严永福、黄启泉以及无锡机床厂、浙江大学机床教研室。

第七章 齐英杰、徐新章、陈恬生

第九篇是由机械工业部基础机械装备司、济南铸锻机械研究所负责组织编写的，参加编写的人员为：

主 编 吴筠、杨立成

第一章 王 炜 第二章 江 涛 第三章 杨立成 第四章 张庆文 第五章
杨立成、张庆文 第六章 江 涛 第七章 王 炜 第八章 王 炜 第九章
杨立成

第十篇是由哈尔滨工业大学负责组织编写的。

主 编 赵经文

第十一篇是由全国高校机床动力学研究会负责组织编写的，参加编写的人员为：

主 编 赵 沔

第一章 赵 沔 第二章 贺兴书 第三章 王先上 第四章 顾熙棠 第五
章 童忠钊 第六章 金瑞琪、张济生、郭大津、诸乃雄

第十二篇是由大连理工大学机械系组织编写的，参加编写的人员为：

主 编 李秀英

第一章 李秀英 第二章 滕弘飞 第三章 李秀英 第四章 李秀英、滕弘飞
第五章 李秀英 第六章 李秀英 第七章 李秀英

在第4册编写过程中，曾得到有关单位的帮助。第十篇经哈尔滨工业大学孙靖民教授审阅，第十一篇经中国科技大学酆明教授审阅，第十二篇经大连理工大学冯辛安教授、戴曙教授审阅；北京机床研究所汪星桥、遇立基同志参与了第十篇、第十一篇和第十二篇编写提纲的拟定和审稿等工作，在此一并致谢。

由于我们水平有限，从编写到出版又经历了较长时间，本手册可能有不少缺点和错误，希望广大读者给予批评指正。

《机床设计手册》编写组

1994年4月

第四册 目录

第八篇 液压系统设计

第一章 液压传动的一些基本概念	1	(三) 液压马达安装使用注意事项	73
一、机床液压传动的特点	1	(四) 机床液压系统常用的液压马达	73
二、流体的静力特性	1	三、液压缸	73
(一) 在重力作用下液体的静压力	1	(一) 液压缸的类型	79
(二) 静止液体压力的特性	1	(二) 液压缸的安装形式	81
(三) 静压力的计量及单位	1	(三) 液压缸的设计计算和选定	81
三、流动液体的一些特性	2	(四) 液压缸的材料、制造与试验	89
(一) 液体的一些物理性质	2	(五) 液压缸的安装及注意事项	89
(二) 流体的连续性方程	10	四、液压阀	90
(三) 伯努利方程式(能量守恒定理)	11	(一) 液压阀分类及其结构	90
(四) 两种流态——层流与紊流	11	(二) 液压阀安装面连接尺寸	102
(五) 薄壁小孔、圆管及各种缝隙的流量	12	(三) 管式液压阀油口连接螺纹尺寸	117
(六) 沿程和局部阻力损失	15	(四) 机床液压系统常用的三类阀	118
(七) 动量定理	21	1. 压力控制阀	118
(八) 液压系统的效率和发热量	22	2. 流量控制阀	130
第二章 工作介质	24	3. 方向控制阀	134
一、液压系统对工作介质的要求	24	五、叠加阀	145
二、工作介质的主要性能指标和成分	24	(一) 叠加阀的分类和结构	145
三、工作介质的分类及其主要性能	27	(二) 叠加阀的使用及选择	147
(一) 工作介质的分类	27	(三) 叠加阀产品	148
(二) 各种工作介质的主要性能	27	六、电液比例控制阀	156
四、工作介质的选择和使用管理	32	(一) 电液比例阀的工作原理	156
(一) 工作介质的选择	32	(二) 电液比例阀产品	156
(二) 液压油的使用管理	33	第四章 液压基本回路和阀类的组合	165
(三) 液压油的更换	34	一、液压基本回路	165
五、国内外油的品种对照	35	(一) 压力(力)控制回路	165
六、工作介质与密封材料的相容性	39	(二) 速度(流量)控制回路	169
七、高水基流体的发展、特性及合理使用	42	(三) 运动切换回路	170
第三章 液压元件	45	(四) 多缸动作回路	171
一、液压泵	45	二、阀类的组合	172
(一) 液压泵分类及其结构特征	45	(一) 液压操纵箱	172
(二) 液压泵的性能	50	1. 操纵箱的分类	173
(三) 定量泵和变量泵的比较	50	2. 典型磨床操纵箱简介	173
(四) 变量泵的控制形式	51	3. 典型磨床操纵箱主要性能指标	177
(五) 选择液压泵应注意的事项	52	4. 磨床操纵箱的设计	177
(六) 液压泵安装使用注意事项	52	5. 外圆磨床操纵箱计算举例	186
(七) 机床液压系统常用的液压泵	53	(二) 液压集成块	187
二、液压马达	71	第五章 液压辅件	193
(一) 液压马达分类及结构特征	71	一、油箱及其附件	193
(二) 液压马达的性能	73	(一) 油箱的用途	193

二、空气的性质及基本计算	380	四、方向控制阀	445
(一) 空气的性质	380	(一) 方向控制阀的分类	445
(二) 气压传动的基本计算	381	(二) 方向控制阀的主要品种规格	446
1. 湿空气	381	(三) 换向型方向控制阀(简称换向阀)	453
2. 流通能力的计算	383	1. 换向阀的密封结构形式	453
3. 理想气体状态方程	384	2. 换向阀产品典型结构介绍	455
三、充气放气温度与时间的计算	386	3. 滑柱式换向阀的设计计算	468
(一) 充气温度与时间的计算	386	4. 截止式换向阀的设计计算	476
(二) 放气温度与时间的计算	386	(四) 单向型方向控制阀	485
第二章 气源装置及处理元件	388	(五) 方向阀的使用及常见故障与排除方法	489
一、气源装置	388	五、气动逻辑元件	490
(一) 空气压缩机的分类及原理	388	(一) 概述	490
1. 空气压缩机的分类	388	(二) 逻辑元件基本原理及结构组成	491
2. 空气压缩机的工作原理	389	1. 截止式逻辑元件基本原理	491
(二) 空气压缩机的选用原则及容量计算	390	2. 膜片式逻辑元件基本原理	492
(三) 空气压缩机的设计原则及管道布置	392	3. 滑柱式逻辑元件基本原理	496
1. 空气压缩机站的设计原则	392	(三) 高压截止式逻辑元件(QLJ型)	498
2. 管道布置	393	六、电气比例阀	503
(四) 空气压缩机的使用维修	394	(一) 概述	503
二、气源处理元件	394	(二) 电气比例阀结构工作原理	505
(一) 气源系统的组成	394	(三) 电气比例阀主要技术参数	505
(二) 对气源系统的要求	396	第四章 执行元件	507
(三) 压缩空气的净化处理	398	一、概述	507
1. 压缩空气净化的机理	398	二、气缸	507
2. 过滤材料的分类及用途	402	(一) 气缸的种类和特点	507
3. 空气干燥的方法和干燥器的使用	404	(二) 几种常用气缸的工作原理和用途	510
4. 过滤器的结构原理与计算	410	1. 单作用气缸	510
5. 自动排水机构分类、工作原理及设计计算	412	2. 双作用气缸	511
(四) 油雾装置	416	3. 组合气缸	511
(五) 气源处理元件的选用	423	4. 特种气缸	514
第三章 控制元件	436	(三) 气缸的设计与计算	521
一、概述	436	1. 气缸的设计步骤及基本参数	521
(一) 控制元件的作用	436	2. 活塞杆上输出力和气缸直径的计算	522
(二) 控制元件的分类	436	3. 活塞杆的计算	523
二、压力控制阀	436	4. 缸筒壁厚的计算	524
(一) 压力控制阀的分类	436	5. 缓冲计算	525
(二) 压力控制阀的主要品种规格	436	6. 耗气量的计算	526
(三) 减压阀	437	7. 冲击气缸设计计算	526
(四) 压力顺序阀	440	(四) 气缸主要零部件结构、材料及技术要求	530
(五) 安全阀(溢流阀)	441	(五) 气缸的选择与应用	533
三、流量控制阀	442	(六) 气缸的性能和试验	536
(一) 节流阀的节流原理	442	(七) 气缸的动特性	537
(二) 节流阀的主要品种与规格	442	(八) 气缸的故障及其处理	539
(三) 节流阀的结构形式	443	(九) 气缸产品	540
(四) 节流阀的设计计算	445	三、气马达	541

(一) 概述	541	四、气动显示器	598
(二) 气马达的分类及性能	541	(一) 高压微型显示器	599
(三) 气马达的工作原理与特点	541	(二) 低压回转式显示器	599
1. 气马达的工作原理	541	五、气动管接头分类、结构及选用	599
2. 气马达的特点	544	(一) 有色金属管接头	599
(四) 气马达的选择、应用及润滑	544	(二) 棉线编织胶管接头	606
(五) 气马达的制造精度	545	(三) 塑料管、尼龙管用接头	608
(六) 气马达的示动图	545	(四) 快速管接头	612
(七) 压缩空气能量的利用率	546	(五) 组合式管接头	613
(八) 气马达典型产品	546	(六) 调速管接头	616
第五章 气动密封装置	548	第七章 气动回路	617
一、概述	548	一、概述	617
(一) 气动密封的分类	548	二、气压传动的回路和常用回路	617
(二) 气动密封的特点	548	(一) 压力控制回路	617
二、气动阀的密封设计	548	(二) 换向回路	618
(一) 气动阀通路间密封结构设计	548	(三) 速度控制回路	619
(二) 气动阀标准密封圈结构设计	550	(四) 力控制回路	621
1. O形橡胶密封圈密封结构设计	550	(五) 力矩控制回路	622
2. Y形密封圈密封结构设计	554	(六) 功率放大回路	623
三、气缸的密封形式及设计	556	(七) 同步回路	623
(一) 气缸的密封形式	556	(八) 安全保护回路	624
(二) 气缸的密封设计	558	(九) 选择回路	625
四、气动密封件	559	(十) 往复动作回路	625
(一) 气动密封件常用材料	559	(十一) 位置控制回路	626
(二) 气动阀用密封件	561	(十二) 双缸程序动作回路	628
(三) 气缸用密封件	569	三、逻辑回路	629
第六章 气动附件	587	(一) 基本逻辑回路及真值表	629
一、消声器工作原理、分类、结构及选用	587	(二) 记忆与时间控制回路	631
(一) 吸收(阻力)型消声器	587	四、程序控制回路的设计	632
(二) 膨胀干涉型消声器	587	(一) 多缸单往复系统回路设计	633
(三) 膨胀干涉吸收型消声器	587	(二) 多缸多往复系统回路设计	639
(四) 消声器主要技术规格	588	五、比例控制回路及应用	642
二、气电转换器、压力继电器的结构原理与 选用	589	(一) 比例控制回路	642
(一) 高压气电转换器	589	(二) 比例及伺服回路的应用	643
(二) 低压气电转换器	589	第八章 气动系统设计及应用	645
(三) 气电转换器的选用	590	一、气动系统设计程序	645
(四) 气电转换器、压力继电器的主要技术 规格	590	(一) 结构综合分析、明确设计依据	645
三、缓冲器	591	(二) 气动控制方案的确定及回路设计	645
(一) 缓冲器的分类	591	(三) 执行元件的选择和设计	646
(二) 油阻尼缓冲器的工作原理	591	(四) 控制元件的选择	646
(三) 油压缓冲器的各种结构形式与特点	592	(五) 气动辅件的选择	647
(四) 主要技术参数及选用	593	(六) 气动系统动力及管道计算	647
(五) 介绍两种典型油压缓冲器	598	(七) 装配图设计	649
(六) 油压缓冲器的应用	598	(八) 结构设计	643
		二、气动系统设计举例	650
		三、气动机构的应用	653

(一) 直线运动机构	653	1. 气动阀主要技术指标	659
(二) 摆动运动机构	656	2. 气缸主要技术指标	660
(三) 真空传送机构	656	3. 气动三大件主要技术指标	660
(四) 复合运动	657	(二) 气动元件试验方法	666
第九章 气动元件主要技术指标及试验		1. 气动阀试验方法	666
方法	659	2. 气缸试验方法	670
一、概述	659	3. 气动三大件试验方法	670
二、气动元件主要技术指标及试验方法	659	4. 气动元件试验压力	670
(一) 气动元件主要技术指标	659		

第十篇 机床结构有限元分析

第一章 概述	673	(二) 4 节点矩形薄板单元	713
一、有限元法的基本思想	673	(三) 3 节点三角形薄板单元	717
二、结构有限元分析过程	674	(四) 相容的板单元	719
三、机床设计中有限元法的应用	674	(五) 其它板单元	721
第二章 结构静力分析	676	二、壳体结构	721
一、基本原理及方法	676	(一) 壳体分析的平板单元	721
(一) 单元列式及节点位移方程	676	(二) 曲壳单元	726
(二) 坐标变换	677	(三) 8 节点壳体参数单元	727
(三) 位移约束处理及方程组求解	678	(四) 轴对称壳体	730
(四) 单元应力计算	678	三、复杂结构分析的几个问题	734
(五) 收敛性	678	(一) 不同单元的组合	734
二、杆件结构	679	(二) 复杂的位移约束	737
(一) 直梁	679	(三) 子结构分析	739
(二) 平面刚架	681	第四章 结构动力分析	741
(三) 空间刚架及桁架	683	一、结构的动力方程	741
三、平面问题	684	二、单元质量矩阵	744
(一) 常应力三角单元	684	(一) 一致质量矩阵和集中质量矩阵	744
(二) 4 节点矩形单元	687	(二) 几种单元的质量矩阵	744
(三) 平面等参单元	689	三、动力方程的简化	748
四、三维问题	695	第五章 温度场及热应力有限元分析	750
(一) 简单四面体单元	695	一、平面稳定温度场及热应力	750
(二) 8 节点等参元	697	(一) 平面稳定温度场	750
(三) 20 节点三维等参单元	699	(二) 平面热应力	752
(四) 其它的三维等参单元	701	二、平面不稳定温度场及热应力	754
五、轴对称问题	705	三、轴对称温度场及热应力	756
(一) 轴对称简单三角形单元	705	四、空间温度场及热应力	758
(二) 轴对称结构的半解析法	708	第六章 轴承油膜压力	762
第三章 板壳及复杂结构	712	一、基本方程	762
一、平板结构	712	二、油膜压力的有限元分析	762
(一) 薄板的弯曲变形	712	三、应用例举	764

第十一篇 机床动态性能分析

第一章 绪论	768	二、机床颤振的基本原理及稳定性判据	771
第二章 机床动态性能分析的基本理论和		(一) 颤振的理论基础	771
方法	771	(二) 机床切削稳定性判据	775
一、机床的振动	771	三、机床动态分析的理论和方法	778

1. 多自由度系统运动方程的建立	778	4. 机床模型试验	881
2. 固有频率和主振型及其确定方法	780	三、机床动态性能试验常用的分析设备和仪器	883
3. 主振型的正交性及系统的模态方程	782	(一) 激振设备	883
4. 机械阻抗技术在机床动态性能分析中的应用	783	(二) 拾振传感器	886
5. 多自由度系统传递函数的实模态参数表达式	789	(三) 测力传感器	888
6. 复模态分析的理论	790	(四) 记录设备	890
7. 多自由度系统传递函数的复模态参数表达式	792	(五) 分析设备	891
第三章 机床结构的动力学模型	794	第五章 机床结构模态参数识别技术	893
一、建立动力学模型的作用及主要原则	794	一、结构模态参数识别技术概述	893
(一) 建立动力学模型的作用	794	二、模态参数识别的频域法	893
(二) 建立动力学模型的主要原则	795	(一) 频域法概述	893
二、动力学模型的各种型式	795	(二) 迭代法	894
(一) 集中质量模型	795	(三) 线性最小二乘法拟合	897
(二) 分布质量梁模型	797	(四) 非线性最小二乘法拟合	900
(三) 有限元模型	797	(五) 频域法的新发展	902
(四) 混合模型	798	(六) 实例	905
三、建模的方法和步骤	799	三、多点激振模态识别技术	909
(一) 子结构法	799	(一) 多点激振技术概述	909
(二) 系统识别法	799	(二) 多点纯模态识别技术	909
四、建立机床动力学模型的子结构法	800	(三) 多基准法	917
(一) 子结构的划分	800	(四) 模态参数的整体识别法	919
(二) 子结构的动力学模型	800	四、模态参数识别的时域法	920
1. 子结构的理论模型	800	(一) 时域法概述	920
2. 应用动态试验数据建立子结构的动力学模型	825	(二) Ibrahim时域法	926
(三) 动力学模型的综合	833	(三) 脉冲响应函数法	931
1. 机械阻抗综合法	833	(四) 卡尔曼滤波识别方法	936
2. 模态综合法	835	(五) 直接曲线拟合的优化方法	940
3. 灵敏度分析法	837	(六) 时间序列分析法	945
(四) 子结构分析法建模的例子	838	第六章 机床结构动态性能分析实例	955
五、动力学模型物理参数识别概述	855	一、机床主轴部件动态性能分析实例	955
(一) 模态数与自由度数相等时	856	(一) 对机床主轴部件动态性能的要求和评价	955
(二) 当振动模态数少于物理参数个数时	857	(二) 机床主轴部件动态性能确定方法	957
第四章 机床动态性能试验的方法和数据处理	859	(三) 提高主轴部件动态性能的措施及实例	972
一、机床动态性能试验的目的和内容	859	二、机床整机动态性能分析实例	976
二、机床动态性能试验和分析的方法	859	(一) 机床整机动态性能分析评价项目	976
(一) 生产试验	859	(二) 机床整机动态性能分析实例	977
1. 机床切削抗振性试验	859	1. M8260曲轴磨床动态性能分析	977
2. 机床空运转试验	861	2. M2120内圆磨床动态特性试验	983
(二) 研究试验	861	3. C6150车床整机动态特性试验	995
1. 机床及其部件动刚度试验	866	4. Z512钻床整机动态特性试验	998
2. 整机相对激振试验	871	5. XQ6225型万能回转头铣床动态特性试验	1000
3. 机床振型的测试	876	6. 平面磨床动态特性分析	1004
		7. 数控立式车床动态特性试验	1007
		8. BS-100型立式镗铣床动态特性试验	1007

第十二篇 机床优化设计

第一章 概 述	1018	八、混合设计变量的优化设计方法	1050
一、优化设计的基本概念	1018	九、优化准则法	1051
(一) 目标函数和设计变量	1018	十、优化方法选择和计算结果分析处理	1058
(二) 约束条件	1019	第三章 机床传动系统优化设计	1061
(三) 优化设计的数学模型	1020	一、传动系统分析数学模型	1061
二、优化设计的几何概念	1020	二、传动系统优化数学模型	1067
(一) 设计空间、可行域及不可行域	1020	三、主传动系统优化设计实例	1068
(二) 局部最优和全局最优	1021	第四章 主轴部件优化设计	1071
三、机床常用数学模型	1024	一、集中参数模型	1071
(一) 建立数学模型的原则和方法	1024	二、分布质量梁模型	1075
(二) 机床常用数学模型	1024	三、有限元模型	1078
第二章 常用优化方法	1027	四、主轴有限元优化设计实例	1078
一、数学规划问题的基本概念	1027	第五章 支承件优化设计	1080
(一) 数学规划问题的分类	1027	一、支承件有限元分析模型的建立	1080
(二) 非线性规划问题的解法	1027	二、车床床身有限元优化设计实例	1081
(三) 下降算法的终止准则	1028	第六章 整机和部件优化设计	1088
二、一维搜索	1028	一、机床动态结构优化设计	1088
三、无约束优化方法的最速下降法、牛顿法、 变尺度 (DFP) 法	1031	二、灵敏度分析和结构修改法	1088
四、无约束优化方法的模式搜索法、单纯形替 换法、鲍威尔法	1034	三、模态分析和能量平衡准则法	1092
五、有约束非线性规划的直接解法	1041	四、实例	1095
六、有约束非线性规划的间接解法——罚函数 法	1046	第七章 数字仿真和优化设计实例	1103
七、多目标优化设计方法	1049	一、数字仿真基本原理	1103
		二、数字仿真数学模型	1103
		三、优化设计和实例	1110
		参考文献	1115

第八篇 液压系统设计

第一章 液压传动的一些基本概念

一、机床液压传动的特点

液体的特点是质点之间的内聚力较小,易于流动,其形状随容器不同而变化,并且几乎不可压缩。液压传动是在密封容积中,利用液体作为工作介质,进行能量的传递和转换的一种传动方式。

机床液压传动的特点是:

(1) 从结构上看,液压元件单位重量传递的功率大,体积小,惯量小,结构紧凑,布局灵活,便于和其它形式的传动联用。

(2) 从工作性能上看,液压传动的速度、扭矩均可无级调节,调速范围宽(可达2000:1),运动平稳,冲击小,能迅速起动、制动和换向。缺点是速比不如机械传动准确,传动效率低,不易远距离传动。

(3) 从控制上看,液压系统的控制和调节比较方便、省力,易于实现远距离操纵和自动控制。

(4) 从使用维护上看,液压元件能自行润滑,能实现系统的过载保护,使用寿命长,元件易于系列化、标准化、通用化。但对油液的质量、密封要求严格,对元件制造精度、安装、调整和维护要求较高。

二、流体的静力特性

流体的静力特性是指液体内部质点间没有相对位移时的力学特性。

(一) 在重力作用下液体的静压力

作用在液体单位面积上的力叫做压强,又称为静压力,一般称为压力。

$$p = \frac{F}{A} \quad (\text{Pa}) \quad (8.1-1)$$

式中 F ——作用力 (N);

A ——作用面积 (m^2)。

在重力作用下,静止液体中任意一点的压力 p 为:

$$p = p_0 + \rho gh \quad (\text{Pa}) \quad (8.1-2)$$

式中 p_0 ——液体表面的静压力 (Pa);

ρ ——液体的密度 (kg/m^3);

g ——重力加速度 (m/s^2)

h ——从液面到该点的垂直深度 (m)。

(二) 静止液体压力的特性

(1) 液体静压力垂直于其作用面,其方向和该面的内法线方向一致。

(2) 静止液体内任意点处的静压力在各个方向上均相等。

(3) 作用在封闭容器内液体边界面上的外界压力,大小不变地传递给液体内的所有各点。静止液体的上述特性即为帕斯卡原理。

(三) 静压力的计量及单位

静压力的计量及单位见表8.1-1,绝对压力、表压力和真空度之间的关系还可以用图8.1-1表示。

表8.1-1 静压力计量及单位

计量方法	定 义	相互关系	单 位			
			单位面积上作用力	水 柱 高	汞 柱 高	大 气 压 力
绝对压力	以绝对真空为基准来进行度量的压力	绝对压力=表压力+大气压力	Pa	mH ₂ O(米水柱) 1mH ₂ O =9.8×10 ³ Pa	mmHg(毫米汞柱) 1mmHg =1.33×10 ² Pa	工程大气压(at) 1at=9.8×10 ⁴ Pa

(续)

计量方法	定义	相互关系	单位			
			单位面积上作用力	水柱高	汞柱高	大气压力
表压力	以大气压为基准来进行度量的压力	表压力=绝对压力-大气压力	Pa	mH ₂ O(米水柱)	mmHg(毫米汞柱)	标准物理大气压
真空度	以大气压为基准来度量其小于大气压的那部分数值	真空度=大气压力-绝对压力		1mmH ₂ O =9.8×10 ³ Pa	1mmHg =1.33×10 ² Pa	1标准物理大气压=760mmHg =1.0108×10 ⁵ Pa

表8.1-2 密度的定义、计算公式和单位

名称	定义	公式	单位	注
密度 ρ	对于物质液体来说,单位体积内所含的质量	$\rho = \frac{m}{V}$ m—质量 V—体积或容积	kg/m ³	
ρ ₄	4℃水的密度		1000	
ρ ₂₀	矿物油20℃的密度		870	

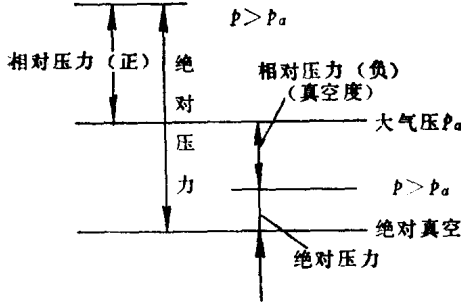


图8.1-1 绝对压力、相对压力和真空度

(2) 压缩性和膨胀性: 在机床液压传动中,当压力为中低压或者液体容积较小时,液体的压缩性可以忽略不计。但当研究液体的振动、冲击和某些过渡过程时,必须考虑液体的压缩性,特别在油液中含有空气的情况下,当温度和压力增高时,液体的压缩性和膨胀性更是不容忽视的。

三、流动液体的一些特性

(一) 液体的一些物理性质

(1) 密度的计算公式和单位: 见表8.1-2。

体积压缩系数、体积弹性系数及体积膨胀系数的定义、计算公式及单位见表8.1-3。

表8.1-3 体积压缩系数、体积弹性系数和体积膨胀系数计算公式表

名称	定义	公式	单位	矿物油压力<1.5MPa, T=293K	
				理论值	实际值
体积压缩系数 β _v	在温度不变情况下,增加单位压力时所发生体积减少的相对变化量	$\beta_v = \frac{\Delta V}{V \Delta P}$ ΔV—体积为V的液体在所受压力变化ΔP后减少的体积 V—液体在压力变化前的体积 ΔP—压力增量	m ² /N	(5.7~7.5)×10 ⁻¹⁰	1.43×10 ⁻⁹
体积弹性系数 E	体积压缩系数β _v 的倒数	$E = \frac{1}{\beta_v} = -\frac{\Delta P}{\Delta V/V}$	Pa	(1.33~1.75)×10 ⁹	7×10 ⁸
体积膨胀系数 β _t	在压力不变情况下增加单位温度时所发生体积增加的相对变化量	$\beta_t = \frac{\Delta V}{V \Delta T}$ ΔT—温度增量	1/K	(8~9)×10 ⁻⁴	

液体在压缩和膨胀后的密度 计算如 表8.1-4。

(3) 热量、比热容、热流量、导热系数及散热系数：表8.1-5给出了热量、比热容、热流量、导热系数及传热系数的定义、计算公式和单位。

(4) 油的粘度

表8.1-4 液体在压缩和膨胀后的密度计算表

条件	密 度	说 明
等温	$\rho_p = \frac{\rho_{20}}{1 - E_v \Delta p}$	ρ_{20} —液体在20℃和大气压力下的密度 E_v —增加压力后液体的密度 Δp —增加的压力
等压	$\rho_t = \frac{\rho_{20}}{1 + E_t \Delta T}$	E_t —增加温度后液体的密度 ΔT —温度差($t - 20^\circ\text{C}$)

a. 粘度的定义：液体在外力作用下流动时，在

流体分子间产生内摩擦力的现象叫作液体的粘性。液体粘性大小用粘度表示。

油的粘度用牛顿流体内摩擦定律表示如下：

$$\mu = \tau \left/ \frac{du}{dy} \right. \quad (8.1-3)$$

式中 μ ——油液的动力粘度绝对粘度；

τ ——使相邻液层之间产生速度梯度 $\frac{du}{dy}$ 所

$$\text{需的剪应力, } \tau = \frac{F_f}{A};$$

F_f ——相邻液层间的内摩擦力；

A ——液层接触面积；

du ——相邻液层间的相对滑动速度；

dy ——相邻液层间的距离。

表8.1-5 液体热量、比热容、热流量、导热系数和传热系数计算公式表

名 称	定 义	公 式	单 位	矿物油系数值
热 量 Q_A	液体温度变化时，其增加（或减少）的能量		J(焦耳) (1Kcal=4187J)	
比热容 c	使单位质量的液体温度升高一度所吸收的热量，叫该液体的比热。质量为 m 的液体温度升高一度所吸收的热量，叫热容量。	$c = \frac{Q_A}{m\Delta T}$ ΔT —升高的温度	J/kg·K ([1J/(kg·K)=2.39×10 ⁻⁴ K·cal/(kg·°C)])	(1.7~2.1)×10 ³
热 流 量 ϕ	在单位时间内按温度降方向所通过的热量	$\phi = \frac{Q_A}{T}$	J/s	
导热系数 λ	在单位时间内，单位长度上，温度降低1度时，单位面积通过的热量	$\lambda = \frac{Q_A l}{AT(k_1 - k_2)}$ l —两层液体间距离 A —两层液体的面积 T —传热时间 $(k_1 - k_2)$ —两层液体温差	W/(m·K) 1W/(m·K)=0.8598Kcal/(m·h·K)	0.12
传热系数 α_s	在单位时间内，温度降低1度时，单位面积上散出的热量	$\alpha_s = \frac{Q_A}{AT(k_1 - k_2)}$ Q_A —散出的热量 A —散热面积 T —散热时间 $(k_1 - k_2)$ —温差	W/(m ² ·K)	

上式对牛顿流体和非牛顿流体都适用。

b. 粘度的单位

(a) 动力粘度 μ : 面积各为 $1m^2$ 、相距 $1m$ 的两层液体, 当以 $1m/s$ 速度作相对运动时所产生的阻力, 即为动力粘度, 单位称帕·秒, 用 $Pa \cdot s$ 表示。动力粘度的非法定计量单位有泊(P)和厘泊(cP), 它们的关系是 $1Pa \cdot s = 1N \cdot s/m^2 = 10P = 10^3cP$ 。

(b) 运动粘度 ν : 在相同温度 T , 液体的动力粘度与它的密度之比, 称为运动粘度。

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (8.1-4)$$

因为 μ 的单位为 $Pa \cdot s$, ρ 的单位为 kg/m^3 , 则 ν 的单位为 m^2/s 。运动粘度的非法定单位有斯(St)和厘斯(cSt), 它们的关系是 $1m^2/s = 10^4St = 10^6cSt$ 。

(c) 相对粘度(条件粘度): 包括恩氏(E°)、赛氏、雷氏粘度。恩氏粘度即试油在一定温度 t (常用 $20^\circ C$ 、 $50^\circ C$ 、 $100^\circ C$)时由自重作用, 从恩氏粘度计流出 $200mL$ 所需时间(s)与蒸馏水在 $20^\circ C$ 时流出相同体积所需时间(s)之比值。

我国液压油的标号用运动粘度表示, 如 $N46$ 号液压油在 $40^\circ C(313K)$ 时的运动粘度为 $41.4 \sim 50.6 mm^2/s$ (相当于原 30 号液压油在 $50^\circ C$ 时的运动粘度

$27 \sim 33 mm^2/s$)。

c. 各种粘度的换算: 各种粘度与运动粘度的关系见表8.1-6, 其数值对照见表8.1-7、表8.1-8和图8.1-2、图8.1-3。

表8.1-6 各种粘度换算表

粘度名称		符号	单位	与运动粘度(mm^2/s)关系
绝对粘度	动力粘度	μ	$Pa \cdot s$	$\nu = \frac{\mu}{\rho}$
	运动粘度	ν	mm^2/s	
相对粘度 (条件粘度)	恩氏度	$^\circ E$	($^\circ$)	$\nu = 7.31^\circ E - \frac{6.31}{^\circ E}$
	恩氏秒	*E	s	$\nu = 1.435^*E - \frac{322}{^*E}$
	国际赛氏秒	SSU (SUS)	s	$\nu = 0.22SSU - \frac{180}{SSU}$
	赛氏一弗氏秒	SSF (SF)	s	$\nu = 2.2SSF - \frac{203}{SSF}$
	商用雷氏秒	*R (RSS) (Re·1 *)	s	$\nu = 0.26^*R - \frac{172}{^*R}$
	海军用雷氏秒	*RA	s	$\nu = 2.39^*RA - \frac{40.3}{^*RA}$
	巴氏度	$^\circ B$	($^\circ$)	$\nu = \frac{4850}{^\circ B}$

表8.1-7 mm^2/s 与 $^\circ E$ 数值对照表

运动粘度 (mm^2/s)	恩氏 ($^\circ E$)	运动粘度 (mm^2/s)	恩氏 ($^\circ E$)	运动粘度 (mm^2/s)	恩氏 ($^\circ E$)	运动粘度 (mm^2/s)	恩氏 ($^\circ E$)	运动粘度 (mm^2/s)	恩氏 ($^\circ E$)	运动粘度 (mm^2/s)	恩氏 ($^\circ E$)
10.0	1.86	12.4	2.09	15.8	2.46	19.2	2.86	22.6	3.27	26.0	3.68
10.1	1.87	12.6	2.11	16.0	2.48	19.4	2.88	22.8	3.29	26.2	3.70
10.2	1.88	12.8	2.13	16.2	2.51	19.6	2.90	23.0	3.31	26.4	3.73
10.3	1.89	13.0	2.15	16.4	2.53	19.8	2.92	23.2	3.34	26.6	3.76
10.4	1.90	13.2	2.17	16.6	2.55	20.0	2.95	23.4	3.36	26.8	3.78
10.5	1.91	13.4	2.19	16.8	2.58	20.2	2.97	23.6	3.39	27.0	3.81
10.6	1.92	13.6	2.21	17.0	2.60	20.4	2.99	23.8	3.41	27.2	3.83
10.7	1.93	13.8	2.24	17.2	2.62	20.6	3.02	24.0	3.43	27.4	3.86
10.8	1.94	14.0	2.26	17.4	2.65	20.8	3.04	24.2	3.46	27.6	3.89
10.9	1.95	14.2	2.28	17.6	2.67	21.0	3.07	24.4	3.48	27.8	3.92
11.0	1.96	14.4	2.30	17.8	2.69	21.2	3.09	24.6	3.51	28.0	3.95
11.2	1.98	14.6	2.33	18.0	2.72	21.4	3.12	24.8	3.53	28.2	3.97
11.4	2.00	14.8	2.35	18.2	2.74	21.6	3.14	25.0	3.56	28.4	4.00
11.6	2.01	15.0	2.37	18.4	2.76	21.8	3.17	25.2	3.58	28.6	4.02
11.8	2.03	15.2	2.39	18.6	2.79	22.0	3.19	25.4	3.61	28.8	4.05
12.0	2.05	15.4	2.42	18.8	2.81	22.2	3.22	25.6	3.63	29.0	4.07
12.2	2.07	15.6	2.44	19.0	2.83	22.4	3.24	25.8	3.65	29.2	4.10

(续)

运动粘度 (mm ² /s)	恩氏 (°E)	运动粘度 (mm ² /s)	恩氏 (°E)	运动粘度 (mm ² /s)	恩氏 (°E)	运动粘度 (mm ² /s)	恩氏 (°E)	运动粘度 (mm ² /s)	恩氏 (°E)	运动粘度 (mm ² /s)	恩氏 (°E)
29.4	4.12	33.0	4.59	36.6	5.05	40.2	5.52	43.8	6.00	47.4	6.47
29.6	4.15	33.2	4.61	36.8	5.08	40.4	5.54	44.0	6.02	47.6	6.49
29.8	4.17	33.4	4.64	37.0	5.11	40.6	5.57	44.2	6.05	47.8	6.52
30.0	4.20	33.6	4.66	37.2	5.13	40.8	5.60	44.4	6.08	48.0	6.55
30.2	4.22	33.8	4.69	37.4	5.16	41.0	5.63	44.6	6.10	48.2	6.57
30.4	4.25	34.0	4.72	37.6	5.18	41.2	5.65	44.8	6.13	48.4	6.60
30.6	4.27	34.2	4.74	37.8	5.21	41.4	5.68	45.0	6.16	48.6	6.62
30.8	4.30	34.4	4.77	38.0	5.24	41.6	5.70	45.2	6.18	48.8	6.65
31.0	4.33	34.6	4.79	38.2	5.26	41.8	5.73	45.4	6.21	49.0	6.68
31.2	4.35	34.8	4.82	38.4	5.29	42.0	5.76	45.6	6.23	49.2	6.70
31.4	4.38	35.0	4.85	38.6	5.31	42.2	5.78	45.8	6.26	49.4	6.73
31.6	4.41	35.2	4.87	38.8	5.34	42.4	5.81	46.0	6.28	49.6	6.76
31.8	4.43	35.4	4.90	39.0	5.37	42.6	5.84	46.2	6.31	49.8	6.78
32.0	4.46	35.6	4.92	39.2	5.39	42.8	5.86	46.4	6.34	50.0	6.81
32.2	4.48	35.8	4.95	39.4	5.42	43.0	5.89	46.6	6.36		
32.4	4.51	36.0	4.98	39.6	5.44	43.2	5.92	46.8	6.39		
32.6	4.54	36.2	5.00	39.8	5.47	43.4	5.95	47.0	6.42		
32.8	4.56	36.4	5.03	40.0	5.50	43.6	5.97	47.2	6.44		

表8.1-8 mm²/s、°E、SSU和°R数值对照表

mm ² /s	°E	SSU	°R	mm ² /s	°E	SSU	°R	mm ² /s	°E	SSU	°R
10.0	1.84	58.91	52	20.0	2.88	97.77	85	34	4.58	159.2	139
10.5	1.88	60.67	53.5	20.5	2.94	99.89	87	35	4.71	163.7	143
11.0	1.94	62.43	55	21.0	3.00	102.0	89	36	4.84	168.2	147
11.5	1.99	64.28	56.5	21.5	3.06	104.2	91	37	4.96	172.7	151
12.0	2.03	66.04	58	22.0	3.11	106.4	93	38	5.10	177.3	155
12.5	2.08	67.90	59.5	22.5	3.17	108.6	94.5	39	5.22	181.8	159
13.0	2.13	69.76	61	23.0	3.23	110.7	96	40	5.35	186.3	164
13.5	2.18	71.60	63	23.5	3.29	112.9	98	41	5.48	190.8	168
14.0	2.23	73.57	65	24.0	3.35	115.0	100	42	5.61	195.3	172
14.5	2.28	75.48	66.5	24.5	3.41	117.2	102	43	5.74	199.8	176
15.0	2.33	77.39	68	25.0	3.47	119.3	104	44	5.87	204.4	180
15.5	2.38	79.34	69.5	25.5	3.52	121.5	106	45	6.00	209.1	184
16.0	2.44	81.30	71	26.0	3.59	123.7	108	46	6.13	213.7	188
16.5	2.50	83.31	73	27.0	3.71	128.1	112	47	6.26	218.3	192
17.0	2.55	85.32	75	28.0	3.83	132.5	116	48	6.38	222.9	196
17.5	2.60	87.38	76.5	29	3.95	136.9	120	49	6.51	227.5	200
18.0	2.65	89.44	78	30	4.08	141.3	123	50	6.64	232.1	204
18.5	2.71	91.50	80	31	4.21	145.7	127				
19.0	2.77	93.55	82	32	4.33	150.2	131				
19.5	2.83	95.66	83.5	33	4.46	154.7	135				

条件粘度	国际赛氏秒	商用雷氏秒	巴氏度	赛氏 弗氏秒	海军用雷氏秒	动力粘度 Pa·s ×10 ⁻³	运动粘度 mm ² /s	条件粘度
°E	SSU	°R	°B	SSF	°RA			°E
100	3000	3000	8	300	300	600	700	100
70	2000	2900	10	200	200	500	500	70
50	1500		14	100	100	400	400	50
40	1000	1000	20	80	80	300	300	40
30	600		30	60	60	200	200	30
20	400	500	40	50	50	100	100	20
15	300	400	50	40	40	50	50	15
10	200	300	100	30	30	30	30	10
8	150	200	200	20	20	20	20	8
6	100	100	300	15	15	15	15	6
4	60	60	500	10	10	10	10	4
3	40	40	1000	7	7	7	7	3
2.5	30	30	2000	5	5	5	5	2.5
2	20	20	4000	3	3	3	3	2
1.5	15	15	8000	2	2	2	2	1.5
1.4	14	14	10000	1.5	1.5	1.5	1.5	1.4
1.3	13	13	15000	1.2	1.2	1.2	1.2	1.3
1.2	12	12	20000	1.0	1.0	1.0	1.0	1.2
1.1	11	11	30000	0.8	0.8	0.8	0.8	1.1
	10	10	40000	0.6	0.6	0.6	0.6	

图8.1-2 粘度换算图

d. 粘度与温度的关系

(a) 粘-温公式：油液种类不同，其粘度随温度变化的规律也不同，故很难用一个统一的方程式来准确表示粘度随温度变化的函数关系。

对于50°C时粘度不超过16°E的油液，当温度变化范围在30~150°C之间时，温度对于粘度的影响可用下式表示：

$$v_t = v_{50} \left(\frac{50}{t} \right)^n \quad (8.1-5)$$

式中 v_t ——温度为 t °C时的运动粘度；
 v_{50} ——温度为50°C(323K)时的运动粘度；
 n ——系数，由表8.1-9可查得。

(b) 国产油粘温曲线(图8.1-4)

(c) 其它牌号的油液或混合油在不同温度下的粘度可用图8.1-5求出。

【例】测得该油在50°C时的运动粘度为50mm²/s及在100°C时的运动粘度为20mm²/s，求不同温度下的粘度。

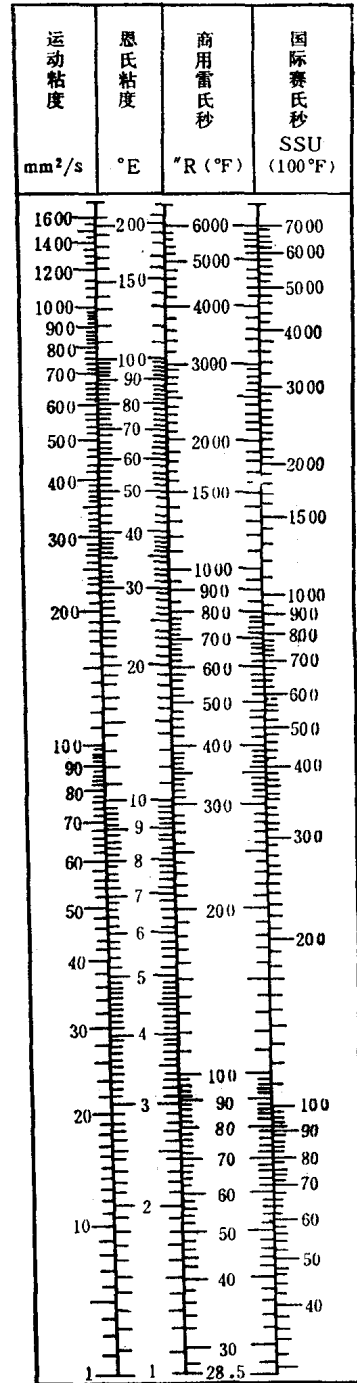


图8.1-3 粘度换算图

从图上50°C处向下引一垂线，再由50mm/s处向右引水平线，两线相交于A₁点。同样从100°C和20mm²/s处引线相交于B₁点。A₁、B₁两点连线，则该油在不同温度下的粘度可在A₁B₁线上求得。