

液压与气动技术

(第4版)

● 主 编 陈桂芳



北京理工大学出版社

BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

高等职业教育“十三五”新形态精品规划教材

液压与气动技术

(第4版)

陈桂芳 主编

 **北京理工大学出版社**
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 简 介

本书是根据高等教育的要求而编写的。在编写理念上力求基础理论以应用为目的,以必需、够用为度,贯彻理论联系实际的原则,注重基本概念和原理的阐述,突出理论知识的应用,加强针对性和应用性,注重引入新技术。

全书共 10 章,主要包括:液压传动基础、常用液压元件的结构原理、液压基本回路、典型液压系统实例分析、液压系统的设计及气压传动等。每章后附有思考题与习题,便于学生巩固提高。全书配有大量的工业应用图例,有利于提高学生分析问题和解决问题的能力。

本书可作为高等院校机电一体化、模具、数控、自动化等专业的教材,也可作为相关专业人员和相关技术人员的参考用书。

版权专有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

液压与气动技术 / 陈桂芳主编. —4 版. —北京:北京理工大学出版社, 2019. 2
ISBN 9787568262774

I. ①液… II. ①陈… III. ①液压传动②气压传动 IV. ①TH137②TH138

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 204140 号

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010)68914775(总编室)

(010)82562903(教材售后服务热线)

(010)68948351(其他图书服务热线)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 /

开 本 / 787 毫米×1092 毫米 1/16

印 张 / 14.5

字 数 / 338 千字

版 次 / 2019 年 2 月第 4 版 2019 年 2 月第 1 次印刷

定 价 / 57.00 元

责任编辑 / 张旭莉

文案编辑 / 张旭莉

责任校对 / 周瑞红

责任印制 / 李 洋

图书出现印装质量问题,请拨打售后服务热线,本社负责调换

丛书编审委员会

主任委员

夏成满 晏仲超

委 员

常松南	陶向东	徐 伟	王稼伟	刘维俭	曹振平
倪依纯	郭明康	朱学明	孟华锋	朱余清	赵太平
孙 杰	王 琳	陆晓东	缪朝东	杨永年	强晏红
赵 杰	吴晓进	曹 峰	刘爱武	何世伟	丁金荣

前 言

伴随着科学技术的迅猛发展和我国改革开放的不断深入，我国经济建设水平也迅速提高，人们的思想观念也发生了巨大的变化。当前，高等职业教育已发展成为一种具有巨大影响力的新的教学形式，本教材就是为了适应这种需要而编写的。

本书是高职高专技术教育机电一体化、模具、数控、自动化等专业的教学用书，是作者结合高职高专教学改革的要求及现代工业自动化飞速发展的需求，经过多年的教学、科研及生产的实践，参考最新技术资料编写的，力求满足广大读者的需要。

本书以液压传动技术为主线，阐明了液压与气动技术的基本原理，着重培养学生分析、设计液压与气动基本回路的能力，安装、调试、使用、维护液压与气动系统的能力，诊断和排除液压与气动系统故障的能力。在编写的过程中充分考虑高职高专教育的职业特色和高职学生的学习特点，在教学内容的设计上，注重理论联系实际，在内容的取舍上以必需、够用为度，力求做到少而精。

本书共分 11 章，主要内容包括液压传动基础、常用液压元件的结构原理、液压基本回路、典型液压系统实例分析、液压系统的设计和气压传动等。

本书由三门峡职业技术学院陈桂芳教授任主编，三门峡职业技术学院王凤娟、三门峡豫西机床有限公司辛百灵任副主编，三门峡合鑫机床有限公司王素琴、三门峡豫西机床有限公司张宇、顾卫娟参编。具体编写分工如下：陈桂芳负责第 3 章、第 5 章；王凤娟负责第 1 章、第 2 章、第 4 章、第 10 章；辛百灵负责第 6 章、第 11 章；王素琴负责第 8 章；张宇负责第 7 章；顾卫娟负责第 9 章及附录。

由于编者水平有限，书中存在的错误和不妥之处敬请读者批评指正。

编 者

AR 内容资源获取说明

——→扫描二维码即可获取本书 AR 内容资源!

Step1: 扫描下方二维码, 下载安装“4D 书城”APP;

Step2: 打开“4D 书城”APP, 点击菜单栏中间的扫码图标, 再次
扫描二维码下载本书;

Step3: 在“书架”上找到本书并打开, 即可获取本书 AR 内容资源!



目 录

第 1 章 液压传动概述	1
1.1 液压传动的定义和发展概况	1
1.2 液压传动的工作原理及系统组成	2
1.3 液压系统的图形符号	3
1.4 液压传动的特点	4
思考题与习题	5
第 2 章 液压流体力学基础	6
2.1 液压油的主要性质及选用	6
2.2 流体静力学基础	9
2.3 流体动力学基础	12
2.4 管路中液流的压力损失	16
2.5 液体在小孔和缝隙中的流动	19
2.6 液压冲击及气穴现象	22
思考题与习题	24
第 3 章 液压动力元件	26
3.1 液压动力元件概述	26
3.2 齿轮泵	28
3.3 叶片泵	32
3.4 柱塞泵	36
3.5 液压泵的选用	38
3.6 液压泵常见故障及排除方法	39
3.7 液压站	41
思考题与习题	43
第 4 章 液压执行元件	44
4.1 液压缸的类型和特点	44
4.2 液压缸的设计计算	48
4.3 液压缸的结构设计	51
4.4 液压马达	55
4.5 液压执行元件的常见故障及排除方法	56
思考题与习题	58

第5章 液压控制元件	59
5.1 液压控制元件的概述	59
5.2 方向控制阀	60
5.3 压力控制阀	71
5.4 流量控制阀	85
5.5 比例阀、插装阀、叠加阀和电液数字控制阀	90
思考题与习题	97
第6章 液压辅助元件	99
6.1 蓄能器	99
6.2 过滤器	101
6.3 油箱	104
6.4 热交换器	106
6.5 压力表及压力表开关	107
6.6 管件	108
6.7 密封元件	110
思考题与习题	113
第7章 液压基本回路	114
7.1 方向控制回路	114
7.2 压力控制回路	116
7.3 速度控制回路	121
7.4 多缸动作控制回路	127
思考题与习题	130
第8章 典型液压系统实例分析	132
8.1 液压系统图的阅读方法	132
8.2 组合机床动力滑台液压系统	133
8.3 液压机液压系统	136
8.4 数控车床液压系统	139
8.5 汽车起重机液压系统	141
8.6 液压系统故障的诊断方法	145
思考题与习题	152
第9章 液压系统的设计计算	153
9.1 液压系统的设计	153
9.2 液压系统设计计算实例	155
思考题与习题	160
第10章 液压伺服系统	161
10.1 液压伺服系统概述	161
10.2 液压伺服阀	164
10.3 电液伺服阀	167



10.4 液压伺服系统实例·····	169
思考题与习题·····	171
第 11 章 气压传动 ·····	172
11.1 气压传动概述·····	173
11.2 气源装置和辅助元件·····	176
11.3 气动执行元件·····	184
11.4 气动控制元件·····	190
11.5 气动基本回路·····	198
11.6 气动系统应用与分析·····	204
思考题与习题·····	208
附录 常用液压与气动元件图形符号·····	210
参考文献·····	217



第 1 章

液压传动概述

1.1 液压传动的定义和发展概况

1.1.1 液压传动的定义

一部完整的机器由原动机部分、传动机构及控制部分、工作机部分（含辅助装置）组成。原动机包括电动机、内燃机等。工作机即完成该机器工作任务的直接工作部分，如剪床的剪刀、车床的刀架等。由于原动机的功率和转速变化范围有限，为了适应工作机的工作力和工作速度的变化范围以及性能的要求，在原动机和工作机之间设置了传动机构，其作用是把原动机输出功率经过变换后传递给工作机。一切机械都有其相应的传动机构，借助于它达到对动力的传递和控制的目的。

传动机构通常分为机械传动、电气传动和流体传动机构。流体传动是以流体为工作介质进行能量转换、传递和控制的传动。它包括液压传动、液力传动和气压传动。

液压传动和液力传动均是以液体作为工作介质进行能量传递的传动方式。液压传动主要是利用液体的压力能来传递能量，而液力传动则主要是利用液体的动能来传递能量。



液压传动的应用

1.1.2 液压传动的发展概况

液压传动是一门新的学科，虽然从 17 世纪中叶帕斯卡提出静压传动原理，18 世纪末英国制成世界上第一台水压机算起，液压传动技术已有二三百年的历史，但直到 20 世纪 30 年代它才较普遍地用于起重机、机床及工程机械。在第二次世界大战期间，由于战争需要，出

现了由响应迅速、精度高的液压控制机构所装备的各种军事武器。第二次世界大战结束后, 液压技术迅速转向民用工业, 液压技术不断应用于各种自动机及自动生产线。

20 世纪 60 年代以后, 液压技术随着原子能、空间技术、计算机技术的发展而迅速发展。因此, 液压传动真正的发展也只是近四五十年。当前液压技术正向迅速、高压、大功率、高效、低噪声、经久耐用、高度集成化的方向发展。同时, 新型液压元件和液压系统的计算机辅助设计 (CAD)、计算机辅助测试 (CAT)、计算机直接控制 (CDC)、机电一体化技术、可靠性技术等方面也是当前液压传动及控制技术发展和研究的方向。

我国的液压技术最初应用于机床和锻压设备, 后来又用于拖拉机和工程机械上。我国在从国外引进一些液压元件、生产技术的同时, 也进行自行研制和设计, 液压元件现已形成了系列, 并在各种机械设备上得到了广泛的使用。

1.2 液压传动的工作原理及系统组成

1.2.1 液压传动的工作原理

图 1-1 为磨床工作台液压系统工作原理图。液压泵 3 在电动机 (图中未画出) 的带动下旋转, 油液由油箱 1 经过滤器 2 被吸入液压泵 3, 由液压泵输入的压力油通过节流阀 5、换向阀 6 进入液压缸 7 的左腔 (或右腔), 液压缸的右腔 (或左腔) 的油液则通过换向阀后流回油箱, 工作台 9 随液压缸中的活塞 8 实现向右 (或左) 腔移动, 当换向阀处于中位时, 工作台停止运动。工作台实现往复运动时, 其速度是通过节流阀 5 调节。当节流阀开大时, 进入液压缸的油量增多, 工作台的移动速度增大; 当节流阀关小时, 进入液压缸的油量减小, 工作台的移动速度减小。克服负载所需的工作压力则由溢流阀 4 控制。为了克服移动工作台时所受到的各种阻力, 液压缸必然产生一个足够大的推力, 这个推力是由液压缸中的油液压力所产生的。要克服的阻力越大, 缸中的油液压力越高; 反之压力就越低。这种现象说明了液压传动的一个基本原理——压力决定于负载。图 1-1 中 (a)、(b)、(c) 分别表示了换向阀处于三个工作位置, 阀口 P、T、A、B 的接通情况。



磨床液压系统

1.2.2 液压传动的系统组成

根据磨床工作台液压系统工作原理可知, 液压传动是以液体作为工作介质来进行工作的。一个完整的液压传动系统由以下几部分组成:

(1) 动力元件: 是将原动机所输出的机械能转换成液体压力能的元件。其作用是向液压系统提供压力油, 最常见的形式为各种液压泵。液压泵是液压系统的“心脏”。

(2) 执行元件: 是将液体的压力能转换成机械能以驱动工作机构的元件。这类元件包括各类液压缸和液压马达。

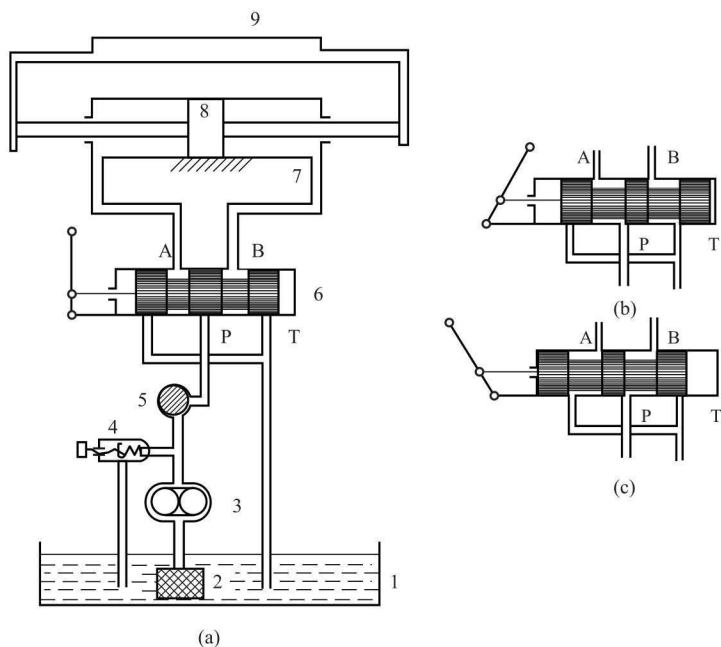


图 1-1 磨床工作台液压传动系统工作原理图

(a) 换向阀处于中位；(b) 换向阀处于右腔；(c) 换向阀处于左腔
 1—油箱；2—过滤器；3—液压泵；4—溢流阀；5—节流阀；6—换向阀；
 7—液压缸；8—活塞；9—工作台

(3) 控制元件：是用来控制或调节液压系统中油液的压力、流量或方向，以保证执行装置完成预期工作的元件。这类元件主要包括各种液压阀，如溢流阀、节流阀以及换向阀等。

(4) 辅助元件：将前面三部分连接在一起，组成一个系统，起储油、过滤、测量和密封等作用。例如管路和接头、油箱、过滤器、蓄能器、密封件和控制仪表等，是液压系统不可缺少的组成部分。



液压千斤顶
工作原理



液压千斤顶
工作过程

1.3

液压系统的图形符号

图 1-1 所示的液压系统是一种半结构式的工作原理图，它有直观性强、容易理解的优点，当液压系统发生故障时，根据原理图检查十分方便，但图形比较复杂，绘制比较麻烦。为便于阅读、分析、设计和绘制液压系统图，工程实际中，国内外都采用液压元件的图形符号来表示。按照规定，这些图形符号只表示元件的功能，不表示元件的结构和参数，并以元件的静止状态或零位状态来表示。若液压元件无法用图形符号表述时，仍允许采用半结构原理图表示。我国制订了液压与气动元（辅）件图形符号（GB/T 786.1—1993），其中最常用

的部分可参见附录。图 1-2 为用图形符号表示的磨床工作台液压传动系统工作原理图。

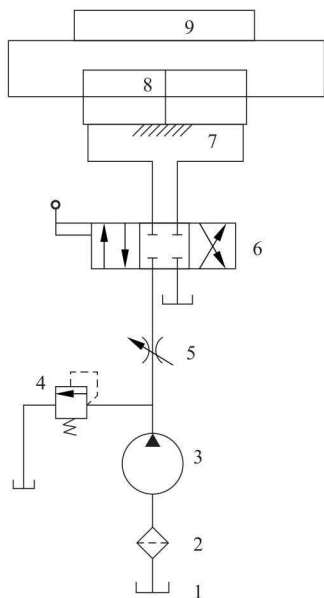


图 1-2 用图形符号表示的磨床工作台液压传动系统工作原理图

1—油箱；2—过滤器；3—液压泵；4—溢流阀；5—节流阀；
6—换向阀；7—液压缸；8—活塞；9—工作台

1.4

液压传动的特点

1.4.1 液压传动的主要优点

液压传动之所以能得到广泛的应用，是由于它与机械传动、电气传动相比具有以下的主要优点：

(1) 由于液压传动是油管连接，所以借助油管的连接可以方便灵活地布置传动机构，这是比机械传动优越的地方。例如，在井下抽取石油的泵可采用液压传动来驱动，以克服长驱动轴效率低的缺点。由于液压缸的推力很大，又加之极易布置，在挖掘机等重型工程机械上，已基本取代了老式的机械传动，不仅操作方便，而且外形美观大方。

(2) 液压传动装置的质量轻、结构紧凑、惯性小。例如，相同功率液压马达的体积为电动机的 12%~13%。液压泵和液压马达单位功率的重量指标，目前是发电机和电动机的 $\frac{1}{10}$ ，液压泵和液压马达可小至 0.002 5 N/W (牛/瓦)，发电机和电动机则约为 0.03 N/W。



(3) 可在大范围内实现无级调速。借助阀或变量泵、变量马达,可以实现无级调速,调速范围可达 $1:2\,000$,并可在液压装置运行的过程中进行调速。

(4) 传递运动均匀平稳,负载变化时速度较稳定。正因为此特点,金属切削机床中的磨床传动现在几乎都采用液压传动。

(5) 液压装置易于实现过载保护——借助于设置溢流阀等,同时液压元件能自行润滑,因此使用寿命长。

(6) 液压传动容易实现自动化——借助于各种控制阀,特别是采用液压控制和电气控制结合使用时,能很容易地实现复杂的自动工作循环,而且可以实现遥控。

(7) 液压元件已实现了标准化、系列化和通用化,便于设计、制造和推广使用。

1.4.2 液压传动主要缺点

(1) 液压系统中的漏油等因素,影响运动的平稳性和正确性,使得液压传动不能保证严格的传动比。

(2) 液压传动对油温的变化比较敏感,温度变化时,液体黏性变化,引起运动特性的变化,使得工作的稳定性受到影响,所以它不宜在温度变化很大的环境条件下工作。

(3) 为了减少泄漏,以及为了满足某些性能上的要求,液压元件的配合件制造精度要求较高,加工工艺较复杂。

(4) 液压传动要求有单独的能源,不像电源那样使用方便。

(5) 液压系统发生故障不易检查和排除。

总之,液压传动的优点是主要的,随着设计制造和使用水平的不断提高,有些缺点正在逐步加以克服。液压传动有着广泛的发展前景。



思考题与习题



- 1-1 何谓液压传动? 液压传动的基本原理是什么?
- 1-2 液压传动系统若能正常工作,必须由哪几部分组成? 各组成部分的作用是什么?
- 1-3 与其他传动方式相比较,液压传动有哪些主要特点?



第 2 章

液压流体力学基础

2.1 液压油的主要性质及选用

2.1.1 液压油的主要性质

液压油是液压传动系统中的传动介质，而且还对液压装置的机构、零件起着润滑、冷却和防锈作用。液压传动系统的压力、温度和流速在很大的范围内变化，因此液压油的质量优劣直接影响液压系统的工作性能。所以，合理的选用液压油是很重要的。

1. 液体的可压缩性

当液体受压力作用体积减小的特性称为液体的可压缩性。在常温下，一般认为油液是不可压缩的，但当液压油中混有空气时，其抗压缩能力会显著降低。所以，应尽量减少油液中混入的气体及其他易挥发物质的含量，以减少对液压系统的不良影响。

2. 液体的黏性

液体在外力作用下流动时，由于液体分子间的内聚力而产生一种阻碍液体分子之间进行相对运动的内摩擦力。液体的这种产生内摩擦力的性质称为液体的黏性。

由于液体具有黏性，当流体发生剪切变形时，流体内就产生阻滞变形的内摩擦力，由此可见，黏性表征了流体抵抗剪切变形的能力。处于相对静止状态的流体中不存在剪切变形，因而也不存在变形的抵抗，只有当运动流体流层间发生相对运动时，流体对剪切变形的抵抗，也就是黏性才表现出来。黏性所起的作用为阻滞流体内部的相互滑动，在任何情况下它都只能延缓滑动的过程而不能消除这种滑动。

黏性的大小可用黏度来衡量。黏度是衡量流体黏性的主要指标,是影响流动液体的重要物理性质。

当液体流动时,由于液体与固体壁面的附着力及流体本身的黏性使流体内部各处的速度大小不等,以流体沿如图 2-1 所示的平行平板间的流动情况为例,设上平板以速度 u_0 向右运动,下平板固定不动。紧贴于上平板上的流体黏附于上平板上,其速度与上平板相同;紧贴于下平板上的流体黏附于下平板,其速度为零;中间流体的速度按线性分布。我们把这种流动看成是许多无限薄的流体层在运动,当运动较快的流体层在运动较慢的流体层上滑过时,两层间由于黏性就产生内摩擦力的作用。根据实际测定的数据所知,流体层间的内摩擦力 F 与流体层的接触面积 A 及流体层的相对流速 du 成正比,而与此二流体层间的距离 dy 成反比,即

$$F = \mu A \frac{du}{dy} \quad (2-1)$$

以 $\tau = F/A$ 表示切应力,则有

$$\tau = \frac{F}{A} = \mu \frac{du}{dy} \quad (2-2)$$

式中 μ ——衡量流体黏性的比例系数,称为绝对黏度或动力黏度;

du/dy ——流体层间速度差异的程度,称为速度梯度。

上式是液体内摩擦定律的数学表达式。当速度梯度变化时, μ 为不变常数的流体称为牛顿流体, μ 为变数的流体称为非牛顿流体。除高黏性或含有大量特种添加剂的液体外,一般的液压用流体均可看作是牛顿流体。

流体的黏度通常有三种不同的测试单位。

1) 绝对黏度 μ

绝对黏度又称动力黏度,它直接表示流体的黏性即内摩擦力的大小。动力黏度 μ 在物理意义上讲,是当速度梯度 $du/dy = 1$ 时,单位面积上的内摩擦力的大小。动力黏度的国际 (SI) 计量单位为牛顿·秒/米²,符号为 $\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$,或为帕·秒,符号为 $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。其计算公式为

$$\mu = \frac{F}{A \frac{du}{dy}} \quad (2-3)$$

2) 运动黏度 ν

运动黏度是绝对黏度 μ 与密度 ρ 的比值,即

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (2-4)$$

式中 ν ——液体的运动黏度, m^2/s ;

ρ ——液体的密度, kg/m^3 。

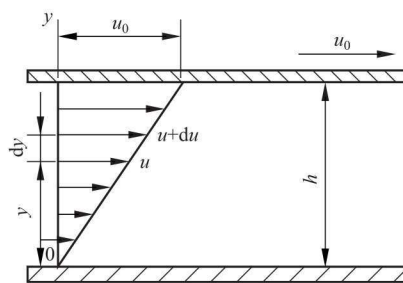


图 2-1 液体的黏性示意图

运动黏度的单位为 m^2/s (米²/秒), 工程单位制使用的单位还有 cm^2/s , 通常称为斯 (托克斯, St), St 的单位太大, 应用不便, 通常用厘斯来表示, 符号为 cSt, 故

$$1\text{cSt} = 10^{-2}\text{St} = 10^{-6}\text{m}^2/\text{s}。$$

3) 相对黏度

相对黏度是以相对于蒸馏水的黏性的大小来表示该液体的黏性的。相对黏度又称条件黏度。各国采用的相对黏度单位有所不同, 有的用赛氏黏度, 有的用雷氏黏度。

我国采用恩氏黏度。恩氏黏度的测定方法如下: 测定 200 mL 某一温度的被测液体在自重作用下流过直径 2.8 mm 小孔所需的时间 t_1 , 然后测出同体积的蒸馏水在 20 °C 时流过同一孔所需时间 t_0 ($t_0 = 50 \sim 52\text{ s}$), t_1 与 t_0 的比值即为流体的恩氏黏度值。恩氏黏度用符号 $^{\circ}\text{E}$ 表示。被测液体温度 t °C 时的恩氏黏度用符号 $^{\circ}\text{E}_t$ 表示:

$$^{\circ}\text{E}_t = \frac{t_1}{t_0} \quad (2-5)$$

工业上一般以 20 °C、50 °C 和 100 °C 作为测定恩氏黏度的标准温度, 并相应地以符号 $^{\circ}\text{E}_{20}$ 、 $^{\circ}\text{E}_{50}$ 和 $^{\circ}\text{E}_{100}$ 来表示。

知道恩氏黏度以后, 利用下列的经验公式, 将恩氏黏度换算成运动黏度, 其换算关系式为

$$\nu = \left(7.31^{\circ}\text{E}_t - \frac{6.31}{^{\circ}\text{E}_t} \right) \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s} \quad (2-6)$$

3. 黏温特性

油液的黏度随温度变化的性质称为黏温特性。液压油黏度对温度的变化是十分敏感的, 当温度升高时, 其分子之间的内聚力减小, 黏度就随之降低。不同种类的液压油, 它的黏度随温度变化的规律也不同。油液黏度的变化直接影响到液压系统的性能和泄漏量, 因此希望油液黏度随温度的变化越小越好。

2.1.2 液压油的选用

1. 液压油的使用要求

液压传动系统用的液压油一般应满足的要求有: 对人体无害且成本低廉; 黏度适当, 黏温特性好; 润滑性能好, 防锈能力强; 质地较为纯净; 对金属和密封件的相容性好; 抗泡沫性和抗乳化性好; 体积膨胀系数较小; 燃点高, 凝点低等; 氧化稳定性好, 不变质等。针对不同的液压系统, 则需根据具体情况突出某些方面的使用性能要求。

2. 选用

正确而合理地选用液压油, 乃是保证液压设备高效率正常运转的前提。

液压油可根据液压元件生产厂样本和说明书所推荐的品种号数来选用, 或者根据液压系统的工作压力、工作温度、液压元件种类及经济性等因素全面考虑, 一般是先确定适用的黏度范围, 再选择合适的液压油品种。同时还要考虑液压系统工作条件的特殊要求, 如在寒冷地区工作的系统则要求油的黏度指数高、低温流动性好、凝固点低; 伺服系统则要求油质纯、压缩性小; 高压系统则要求油液抗磨性好。在选用液压油时, 黏度是一个重要的参数。黏度的高低将影响运动部件的润滑、缝隙的泄漏以及流动时的压力损失、系统的发热温升