

Qiyedian kongzhi jishu



气、液、电 控制技术

王才峰 等 编著

上海科学技术出版社

气、液、电控制技术

王才峰 等编著

上海科学技术出版社

图书在版编目(CIP)数据

气、液、电控制技术/王才峰等编著. —上海:上海科学技术出版社, 2010. 8

ISBN 978—7—5478—0342—4

I. ①气... II. ①王... III. ①气压传动②液压传动
IV. ①TH13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 102334 号

上海世纪出版股份有限公司 出版、发行
上海科学技术出版社

(上海钦州南路 71 号 邮政编码 200235)

新华书店上海发行所经销

苏州望电印刷有限公司印刷

开本 787×1092 1/16 印张:10.25

字数:230 千字

2010 年 8 月第 1 版 2010 年 8 月第 1 次印刷

ISBN 978—7—5478—0342—4/TH·5

定价:28.00 元

本书如有缺页、错装或坏损等严重质量问题,
请向工厂联系调换

内 容 提 要

本书共分九章,主要包括:液压传动基础,液压泵和液压马达,液压缸,液压辅助装置,液压控制阀和液压基本回路,液压系统的安装、调试、维护及系统设计,气压传动,气动系统的安装、调试、维护及故障处理,以及电气控制系统与 PLC 控制系统。每章最后均附有习题。

本书的主要对象是初步涉及气、液、电控制技术领域的科技人员或大专、高职院校的学生,对研究气、液、电控制技术的工程技术人员也有一定的参考价值。

前 言

随着现代化工业生产的发展,自动化控制技术的集成应用正起着越来越重要的作用。由液压技术、气动技术、传感器技术、PLC 技术、人机界面技术、网络及通信技术等学科相互渗透、紧密结合而形成的机电一体化技术(以气、液、电控制技术为主),是当今工业科技的重要组成部分,它们是各类机械装备的核心,对机械装备制造业及其制造业生产过程的自动化起着重要作用。因此,液压和气压技术及其与电气和 PLC 的综合控制技术在自动化控制领域得到了广泛的应用,同时使学习和掌握气、液、电控制技术成为工业控制工作者的一项任务。

目前,市面上有关气、液、电控制技术方面的书籍较多,但大多存在以下一些问题,例如,部分书籍是供设计人员使用的设计手册,内容上注重元件的性能指标,结构参数的介绍,而对原理性的东西介绍较少,在内容的安排上也不适合初学者学习使用;有些书籍是维修、答疑手册,内容主要介绍典型的故障维修实例和一些问题答疑,此类书籍作为学习时的辅助读本非常合适,但不能作为初学者的主要读本;还有一些书籍是高校的教材,章节排列有序,内容注重理论,这类书籍牵涉一些繁琐的公式推导和应用,内容上也各有偏重,适合在一定专业的背景下,由老师引导着学习,但如果让初学者自学,其内容就显得太难,同时知识面又不够全面。鉴于以上问题,笔者着手编写这本内容浅显易懂,知识面又比较广泛,适合初学者使用的有关气、液、电控制技术的书籍。

本书共分九章,内容主要包括液压和气压传动基础知识,液压和气压元件,液压和气压基本回路,液压和气压系统的安装、使用及设备的调试和故障诊断。与此同时,笔者在编写过程中注重各类专业知识的综合应用,在书中加入了电气控制、PLC 控制与气压、液压传动综合运用的章节。

参加本书编写的有上海工程技术大学高职学院王才峰(第一、二、三、四、五章)、宁宗奇(第六章)、陆勤(第七、八章)、张懿(第九章)。在本书的编写过程中,得到了庄慧忠老师及张孝三老师的指导,在此表示感谢。

本书特别适合于初学者使用,对研究气、液、电控制技术的工程技术人员也有一定的参考价值。

由于笔者水平有限,加之编写时间仓促,书中难免存在错误和不妥之处,敬请广大读者批评指正。

编 者

2010 年 6 月

目 录

第一章 液压传动基础	1
第一节 液压技术的应用	1
第二节 液压传动的组成和工作原理	2
第三节 液压油	6
第四节 液体流动中的压力损失和瞬变流动	12
第二章 液压泵和液压马达	16
第一节 概述	16
第二节 齿轮泵	19
第三节 叶片泵	21
第四节 柱塞泵	24
第五节 液压泵的应用	26
第六节 液压马达	27
第三章 液压缸	31
第一节 液压缸的速度和推力的计算	31
第二节 液压缸的结构	35
第四章 液压辅助装置	39
第一节 蓄能器	39
第二节 过滤器	41
第三节 油管与管接头	44
第四节 压力计与压力开关	46
第五节 油箱	47
第六节 热交换器	48
第五章 液压控制阀和液压基本回路	51
第一节 阀的基本类型和要求	51
第二节 方向控制阀和方向控制回路	52
第三节 压力控制阀和压力控制回路	61
第四节 流量控制阀和节流调速回路	72
第五节 容积调速回路和容积节流调速回路	78
第六节 其他控制回路	83
第七节 新型液压元件及其应用	91
第六章 液压系统的安装、调试、维护及系统设计	97
第一节 液压系统的安装与调试	97

第二节 液压系统的使用与维护	102
第三节 液压系统的故障诊断	103
第四节 液压系统设计	107
第七章 气压传动	108
第一节 气动基础知识	108
第二节 气源装置及气动辅助元件	109
第三节 气动执行元件	115
第四节 气动控制元件与气动基本控制回路	119
第八章 气动系统的安装、调试、维护及故障处理	138
第一节 气动系统的安装与调试	138
第二节 气动系统的使用与维护	140
第三节 气动系统的故障诊断	141
第九章 电气控制系统与 PLC 控制系统	142
第一节 电气控制系统	142
第二节 PLC 控制系统	146
附录 常用液压与气动图形符号	151
附录 A 符号要素、管路	151
附录 B 控制机构和控制方法	151
附录 C 泵、马达和缸	152
附录 D 控制元件	153
附录 E 辅助元件	154
参考文献	156

第一章 液压传动基础

【学习目的】

- 一、熟悉液压传动系统的组成及各组成部分的作用、特点,掌握液压传动的工作原理。
- 二、了解液压元件的职能符号、应用情况及优缺点。
- 三、了解液压油的物理性质。

第一节 液压技术的应用

液压传动相对于机械传动来说,是一门较新的学科,从 20 世纪 30 年代开始真正推广使用。

随着工业水平的不断提高,各种液压元件的研制不断完善并实现了各类元件产品的标准化、系列化和通用化,从而它在机床、工程机械、农业机械、汽车等行业中逐步得到推广。20 世纪 60 年代以后,随着原子能、空间技术、计算机技术的发展,液压技术也得到了很大发展,并渗透到各个工业领域中。当前液压技术正向着高压、高速、大功率、高效率、低噪声、长寿命、高度集成化、复合化、小型化及轻量化等方向发展;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、计算机仿真和优化设计技术、可靠性技术及污染控制等方面,也是当前液压技术发展和研究的方向。

我国的液压工业开始于 20 世纪 50 年代,液压元件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。经过 20 多年的艰苦探索和发展,特别是 20 世纪 80 年代初期引进美国、日本、德国的先进技术和设备后,使我国的液压技术水平有了很大的提高。目前,我国的液压件已从低压到高压形成系列,并生产出许多新型的元件,如插装式锥阀、电液比例阀、电液伺服阀、电液数字控制阀等。液压传动在机械行业中的应用举例见表 1-1。

表 1-1 液压传动在各类机械行业中的应用

行 业 名 称	应 用 场 所 举 例
机 床 工 业	磨床、铣床、刨床、拉床、压力机、自动机床和半自动车床、组合机床、数控机床、加工中心等
工 程 机 械	挖掘机、装载机、推土机、压路机、铲运机等
汽 车 工 业	自卸式汽车、平板车、高空作业车、汽车中的转向器、减振器等
农 业 机 械	联合收割机、拖拉机、农具悬挂系统等

(续表)

行 业 名 称	应 用 场 所 举 例
轻 工 机 械	打包机、注塑机、校直机、橡胶硫化机、造纸机等
冶 金 机 械	电炉控制系统、轧钢机控制系统、压力机等
起重运输机械	起重机、叉车、装卸机械、液压千斤顶、汽车吊、港口龙门吊、皮带运输机等
矿 山 机 械	开采机、提升机、液压支架、凿岩机、开掘机等
建 筑 机 械	打桩机、平地机等
船舶港口机械	起货机、锚机、舵机等
铸 造 机 械	砂型压实机、加料机、压铸机等
智 能 机 械	折臂式小汽车装卸器、数字式体育锻炼机、模拟驾驶舱、机器人等

虽然,我国的液压工业从无到有发展很快,取得了很大的成就,但与国外先进技术相比还有很大的差距。

我国机械工业在认真消化、推广国外引进的先进液压技术的同时,大力研制、开发国产液压件新产品,加强产品质量可靠性和新技术应用的研究,积极采用国际标准,合理调整产品结构,对一些性能差且不符合国家标准的液压件产品,采用逐步淘汰的措施。可以预见,我国的液压技术在 21 世纪必将获得更快的发展。

第二节 液压传动的组成和工作原理

一、液压传动的工作原理

液压传动是以液体作为工作介质并以压力能的方式来进行能量传递和控制的一种传动形式。图 1-1 所示为液压千斤顶的工作原理,由图 1-1a 可知,大缸体 9 和大活塞 8 组成举升液压缸,杠杆手柄 1、小缸体 2、小活塞 3、单向阀 4 和 7 组成手动液压泵。假设活塞在缸体内可自由滑动(无摩擦力)又不使液体渗漏,液压缸的工作腔与油管都充满油液并与大气隔绝——即液体在密封容积内。当提起手柄 1 使小活塞 3 向上移动时,小活塞下端油腔容积增大,形成局部真空,此时单向阀 4 被打开,通过吸油管 5 从油箱 12 中吸油;当压下手柄,小活塞下移,小活塞下腔压力升高,单向阀 4 关闭,单向阀 7 被打开,下腔的油液经管道 6 流入大缸体 9 的下腔,使大活塞 8 向上移动,顶起重物。为防止再次提起手柄吸油时,举升缸下腔的压力油逆向流入手动泵(小缸),设置单向阀 7,使其自动关闭,油液不能倒流,以保证重物不会自行下落。往复扳动手柄,就能不断地将油液压入举升缸下腔,使重物逐步升起;当打开截止阀 11,举升缸下腔的油液通过管道 10、阀 11 流回油箱,大活塞在重物和自重作用下回到原始位置。

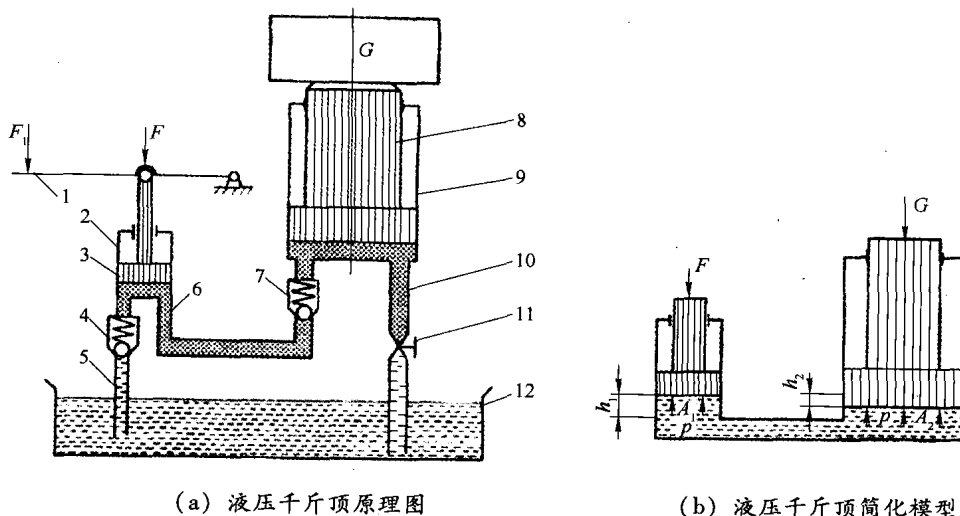


图 1-1 液压千斤顶

- 1 - 杠杆手柄; 2 - 小缸体; 3 - 小活塞; 4, 7 - 单向阀; 5 - 吸油管; 6, 10 - 管道;
8 - 大活塞; 9 - 大缸体; 11 - 截止阀; 12 - 通大气式油箱

由上例可见, 液压传动是一种以密封容积中的液体作为传动介质, 利用液体的压力能来实现运动和力的传递的一种传动方式, 又称为容积式液压传动。它具有以下特点:

- (1) 以液体为传动介质来传递运动和动力。
- (2) 液压传动必须在密闭的容器内进行。
- (3) 依靠密封容积的变化传递运动。
- (4) 依靠液体的静压力传递动力。

二、液压传动系统的组成

图 1-2 所示为简化了的平面磨床工作台液压传动系统图。如图 1-2a 所示, 液压泵 17 由电机带动从油箱 19 中吸油, 油液经过滤油器 18 进入液压泵吸油腔, 输出进入压力油路后, 通过开停换向阀 10、节流阀 7, 经换向阀 5 进入液压缸 2 的左腔。液压缸 2 的缸体固定不动, 活塞便在油液压力的推动下, 带动固定在活塞杆上的工作台 1 向右运动, 此时液压缸右腔的油液经换向阀 5 和回油管排回油箱。

若将换向阀 5 的手柄置成图 1-2b 所示的状态, 则经节流阀 7 的压力油将由换向阀 5 进入液压缸的右腔。此时液压缸左腔的油经换向阀 5 和回油管排回油箱, 液压缸 2 中的活塞将推动工作台 1 向左移动。

若系统中换向阀 10 处于图 1-2c 的位置, 则液压泵输出的压力油将经换向阀 10 直接排回油箱, 系统处于卸荷状态, 液压油不能进入液压缸, 所以换向阀 10 又可称为开停阀。

转换换向阀 5, 即可变换压力油进入液压缸 2 的方向, 从而实现工作台往复运动。工作台的运动速度可通过改变节流阀 7 的开口量进行调节, 当开口大时, 单位时间内进入液压缸的油液增多, 工作台的运动速度变快, 开口小时, 运动速度变慢。

为克服工作台的摩擦力、切削力等各种阻力, 液压缸必须输出足够大的推力, 这由液压泵输出的压力来保障, 根据不同的工作情况, 液压泵输出的油液压力由溢流阀 13 进行调整。

通常,由于电机转速一定,使液压泵单位时间内输出的油液体积也为定值,而输入液压缸的油液多少由节流阀7调节,因此液压泵输出的多余油液须经溢流阀13流回油箱19。

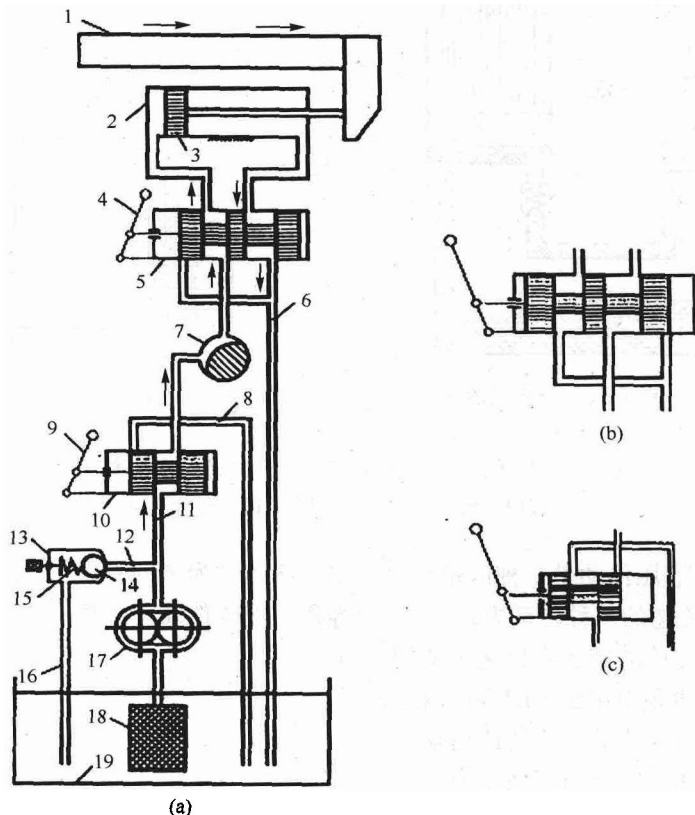


图 1-2 机床工作台液压系统工作原理

- 1—工作台;2—液压缸;3—活塞;4—换向手柄;5—换向阀;6,8,16—回油管;7—节流阀;
9—开停手柄;10—开停换向阀;11—压力管;12—压力支管;13—溢流阀;14—钢球;
15—弹簧;17—液压泵;18—滤油器;19—油箱

由以上实例可以看出,液压传动系统由以下几个部分组成:

(1) 动力元件——液压泵,是系统的能量输入装置,它将原动机输入的机械能转换成液体的压力能,向液压系统提供压力油。

(2) 执行元件——液压缸或液压马达,是系统的能量输出装置,它把液体的压力能转换为机械能,克服负载,带动机械完成所需的动作。

(3) 控制元件——各种控制阀,如压力阀、流量阀、方向阀等,用来控制和调节液压系统所需的压力、流量、方向和工作性能,以保证执行元件实现各种不同的工作要求。

(4) 辅助元件——油管、管接头、油箱、过滤器、蓄能器和压力表等起连接、储油、过滤、储存压力和测量油液压力等作用的辅助元件。它们对保证液压系统可靠和稳定地工作,具有非常重要的作用。

(5) 工作介质——液压油,是传递能量的介质,同时还可起润滑、冷却和防锈的作用,它直接影响着液压系统的性能和可靠性。

三、液压传动系统的图形符号

图 1-2 所示的液压传动系统图,是一种半结构式的工作原理图,称为结构原理图。这种原理图直观性强、容易理解,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,元件数量多时更是如此。为了简化原理图的绘制,系统中各元件可用符号表示,这些图形符号脱离元件的具体结构,只表示元件的职能(即功能)、控制方式及外部接口,不表示元件的具体结构和参数及连接口的实际位置和元件的安装位置。我国在 1993 年制定的 GB/T 786.1—1993《液压气动图形符号》(代替 GB 786—76)就属于职能符号。各类元件的职能符号将在后面介绍元件时再作具体介绍。图 1-1 所示为用图形符号绘制的液压传动系统。

在 GB/T 786.1—1993《液压气动图形符号》中,对这些图形符号有以下几条基本规定:

- (1) 符号只表示元件的职能和连接系统的通路,不表示元件的具体结构和参数,也不表示元件在机器中的实际安装位置。
- (2) 元件符号内的油液流动方向用箭头表示,线段两端都有箭头的,表示流动方向可逆。
- (3) 符号均以元件的静止位置或中间零位置表示,当系统的动作另有说明时,可作例外。
- (4) 若有些液压元件无法用图形符号表示时,仍允许采用半结构原理图表示。

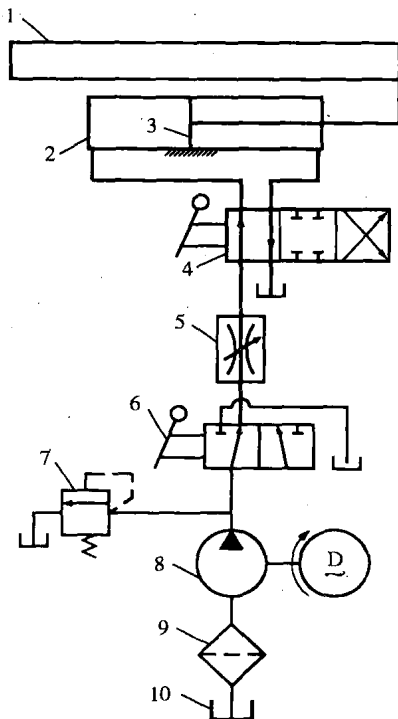


图 1-3 机床工作台液压系统的图形符号

1 - 工作台; 2 - 液压缸; 3 - 油塞; 4 - 换向阀; 5 - 节流阀; 6 - 开停阀;
7 - 溢流阀; 8 - 液压泵; 9 - 滤油器; 10 - 油箱

四、液压传动的优缺点

(一) 液压传动的优点

液压传动能得到如此迅速的发展和广泛的应用,是由于它与机械传动、电气传动、气压传动相比,具有以下优点:

(1) 单位功率的重量轻,即在输出同等功率的条件下,体积小、重量轻、惯性小、结构紧凑、动态特性好等。例如,轴向柱塞泵的重量只有同功率直流发电机重量的 10% ~ 20%, 前者的外形尺寸只有后者的 12% ~ 13%。

(2) 液压传动能方便地实现无级调速,并且调速范围大。

(3) 液压传动能使执行元件的运动十分均匀稳定,由于其反应速度快、冲击小,故可实现快速启动、制动和频繁换向。

(4) 液压传动装置的控制、调节比较简单,操纵比较方便、省力,易于实现自动化。当机、电、液配合使用时,易实现较复杂的自动工作循环。

(5) 液压传动能输出大的推力或大转矩,可实现低速大吨位传动,这是其他传动方式所不能比的突出优点。

(6) 液压传动系统便于实现过载保护,使用安全、可靠,不会因过载而造成元件损坏。而且,由于各液压元件中的运动件均在油液中工作,能自行润滑,故元件的使用寿命长。

(7) 由于液压元件已实现了标准化、系列化和通用化,所以液压系统的设计、制造和使用都比较方便。液压元件的排列布置也具有较大的机动性。

(二) 液压传动的缺点

液压传动的主要缺点包括:

(1) 液压传动是以液体为工作介质,在相对运动表面间不可避免地会有泄漏,同时,液体又不是绝对不可压缩的,因此液压传动不能保证严格的传动比,不能用于有严格传动比要求的内传动链中。

(2) 液压传动系统工作过程中的能量损失较大,如泄漏损失、溢流损失、节流损失、摩擦损失等,传动效率较低,因而不适宜作远距离传动。

(3) 工作介质对温度的变化比较敏感,工作温度或环境温度的变化对系统工作的影响比较大。因此,在低温和高温条件下,采用液压传动有一定的困难。

(4) 为了减少泄漏,液压元件的制造精度要求较高,因此,液压元件的制造成本较高,而且对油液的污染比较敏感,要求有较好的工作环境。

(5) 液压系统故障的诊断比较困难,因此对维修人员有较高的要求,既需要系统地掌握液压传动的理论知识,又要具有一定的实践经验。

(6) 随着高压、高速、高效率和大流量化,液压元件和系统的噪声日益增大,这也是需要解决的问题。

总而言之,液压传动的优点是突出的,随着科学技术的进步,液压传动的缺点将得到克服,液压传动将日臻完善,液压技术与电子技术及其他传动方式的结合更具有广阔前途。

第三节 液压油

液压系统中完全靠液压油把能量从液压泵经管路、控制阀传递到执行元件。根据统计,许多液压设备的故障皆起因于液压油的使用不当,故应对液压油要有充分的了解。

一、液压油的用途

液压油主要有以下几种作用:

(1) 传递运动与动力。将泵输出的压力能传递给执行元件,由于油本身具有黏性,因此,在传递过程中会产生一定的动力损失。

(2) 润滑。液压元件内各移动部位都可受到液压油的充分润滑,从而降低元件磨损。

(3) 密封。油本身的黏性对细小的间隙有密封的作用。

(4) 冷却。系统损失的能量会变成热,被油带出。

二、液压油的性质

(一) 密度

单位体积液体的质量称为液体的密度。体积为 V , 质量为 m 的液体, 其密度 ρ 为

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

矿物油型液压油的密度随温度的上升而有所减少, 随压力的提高而稍有增加, 但变动值很小, 可以认为是常值。我国采用 20°C 时的密度作为油液的标准密度, 以 ρ_{20} 表示。液压油的密度越大, 泵的吸入性就越差。常用液压油和传动液的密度见表 1-2。

表 1-2 常用工作介质的密度 (kg/m^3)

种 类	ρ_{20}	种 类	ρ_{20}
石油基液压油	850 ~ 900	增黏高水基液	1003
水包油乳化液	998	水 - 乙二醇液	1060
油包水乳化液	932	磷酸酯液	1150

(二) 闪火点

油温升高时, 部分油会蒸发而与空气混合成油气, 此油气所能点火的最低温度称为闪火点。如继续加热, 则会连续燃烧, 此温度称为燃点。可燃性液体的闪点和燃点表明其发生爆炸或火灾的可能性的, 对运输、储存和使用的安全有极大关系。从消防观点来说, 液体闪点就是可能引起火灾的最低温度。闪点越低, 引起火灾的危险性越大。

(三) 黏度

液体在外力的作用下流动时, 液体分子间的内聚力阻碍其分子间的相对运动而产生一种内摩擦力, 这种现象称为液体的黏性。液体只有在流动(或有流动趋势)时才会呈现出黏性, 静止的液体是不呈现黏性的。

如图 1-4 所示, 液体在管路中流动时的速度并不相等, 紧贴管壁的液体速度为零, 管路中心的速度最大。我们可将管中液体的流动看成是许多无限薄的同心圆筒形的液体层的运动, 运动较慢的液体层阻滞运动较快的液体层, 而运动较快的液体层又带动运动较慢的液体层, 这种液体层之间的作用类似于固体之间的摩擦过程, 因而在液体之间产生摩擦力。由于这种摩擦力是发生在液体内部的, 所以称为内摩擦力。黏性所起的作用只能延缓液体内部相互滑动的过程, 而不能消除这种滑动。

黏度是表征液体流动时内摩擦力大小的量, 是衡量液体黏性大小的指标, 也是液压油最重要的性质。油液黏度大可以降低泄漏, 提高润滑效果, 但会使压力损失增大, 动作反应变慢, 机械效率降低, 功率损耗增大; 油液黏度低可实现高效率小阻力的动作, 但会增加磨损和泄漏, 降低容积效率。

通常用黏度单位来表示黏度的大小,我国常用的黏度单位有3种:动力黏度、运动黏度和相对黏度。

1. 动力黏度

实验表明(牛顿内摩擦定律),当液体流动时,由于液体与固体壁面的附着力及液体本身的黏性使流体内各处的速度大小不等,以液体沿如图1-5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粘附于上平板上,其速度与上平板相同;紧贴于下平板上的流体粘附于下平板上,其速度为0;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 及液层间的速度梯度 du/dy 成正比,即

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

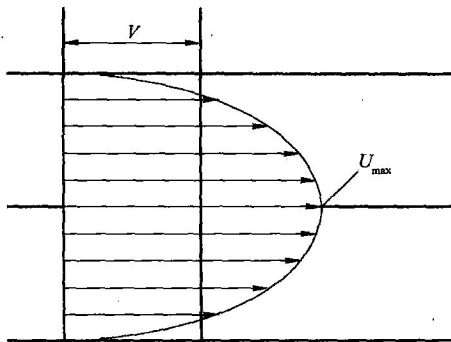


图1-4 液体在管路内的速度分布

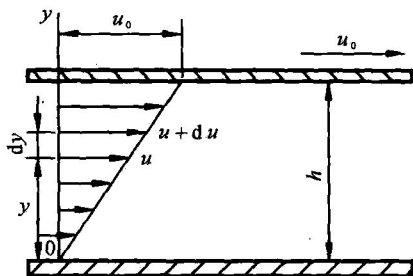


图1-5 液体黏性示意图

若用单位面积上的摩擦力(切应力)来表示,则式(1-2)可改写为

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (1-3)$$

式中, μ 为比例系数,称为动力黏度。动力黏度 μ 的单位是 $\text{Pa} \cdot \text{s}$ (帕·秒)。以前(CGS制中)使用的单位是 $\text{dyn} \cdot \text{s}/\text{cm}^2$ (达因·秒每平方厘米),又称为P(泊)。 $1\text{Pa} \cdot \text{s} = 10\text{P} = 10^3\text{cP}$ (厘泊)。

由式(1-3)可知,液体动力黏度 μ 的物理意义是:当速度梯度等于1时,接触液体层间单位面积上的内摩擦力为 τ 。

2. 运动黏度

动力黏度 μ 和液体密度 ρ 的比值,就称为液体的运动黏度 ν 。即

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1-4)$$

运动黏度的单位是 m^2/s ,工程单位制使用的单位还有 cm^2/s ,通常称为St[斯(托克斯)],工程中常用cSt[厘斯(托克斯)]来表示, $1\text{m}^2/\text{s} = 10^4\text{St} = 10^6\text{cSt}$ 。运动黏度 ν 虽没有明确的物理意义,因为在其单位中只有长度和时间的量纲,类似于运动学的量,故称为运动黏度。习惯上常用它来标志液体的黏度,例如各种矿物油的牌号就是该种油液在 40°C 时的运动黏度 ν (单位为cSt)的平均值。

3. 相对黏度

相对黏度又称为条件黏度,它是采用特定的黏度计在规定的条件下测出的液体黏度。各国采用的测量条件是不同的,中国、德国、前苏联等国家采用恩氏黏度 $^{\circ}E$,美国采用赛氏黏度 SSU,英国则采用雷氏黏度 RS。

恩氏黏度用恩氏黏度计测定:将 200mL 温度为 t (单位为 $^{\circ}\text{C}$) 的被测液体装入恩氏黏度计的容器内,由其下部直径为 2.8mm 的小孔流出,测出液体流尽所需的时间 t_1 (s),再测出 200mL 温度为 20°C 的蒸馏水在同一黏度计中流尽所需的时间 t_2 (标定值,一般 $t_2 = 50 \sim 52\text{s}$)。这两个时间的比值便是该液体在温度 $t(^{\circ}\text{C})$ 时的恩氏黏度,即

$$^{\circ}E = \frac{t_1}{t_2} \quad (1-5)$$

一般以 20°C 、 40°C 、 50°C 及 100°C 作为测定液体黏度的标准温度,由此而得到的恩氏黏度分别用 $^{\circ}E_{20}$ 、 $^{\circ}E_{40}$ 、 $^{\circ}E_{50}$ 和 $^{\circ}E_{100}$ 来标记。

液体黏度的测定可用旋转黏度计或运动黏度测定器直接测定,也可以先测出液体的相对黏度,然后再根据关系式换算出动力黏度或运动黏度。恩氏黏度与运动黏度 ν (m^2/s) 间的换算关系式为

$$\nu = \left(7.31^{\circ}E - \frac{6.31}{^{\circ}E} \right) \times 10^{-6} \quad (1-6)$$

4. 调和油的黏度

选择黏度合适的液压油,对液压系统的工作性能有着重要的作用。但有时现有油液的黏度不符合要求,这时可把两种不同黏度的油液混合起来使用,这种混合油称为调和油。调和油的黏度可用下面的经验公式计算,即

$$^{\circ}E = \frac{a^{\circ}E_1 + b^{\circ}E_2 - c(^{\circ}E_1 - ^{\circ}E_2)}{100} \quad (1-7)$$

式中 $^{\circ}E_1$ 、 $^{\circ}E_2$ ——混合前两种油的黏度, $^{\circ}E_1 > ^{\circ}E_2$;

$^{\circ}E$ ——混合后调和油的黏度;

a 、 b ——参与调和的两种油液各占的百分数 ($a + b = 100$);

c ——实验系数(取值见表 1-3)。

表 1-3 实验系数 c 的数值

a	10	20	30	40	50	60	70	80	90
b	90	80	70	60	50	40	30	20	10
c	6.7	13.1	17.9	22.1	25.5	27.9	28.2	25	17

5. 压力对黏度的影响

当液体所受的压力加大时,其分子之间的距离缩小,内聚力增大,其黏度也随之增大。在一般情况下,压力对黏度的影响比较小,在工程中当压力低于 5MPa 时,黏度值的变化很小,可以忽略不计。但当压力较大(大于 10MPa)或压力变化较大时,压力对黏度的影响才趋于显著。在工程实际应用中,当液体压力低于 50MPa 时,可用下式计算其黏度:

$$\nu_p = \nu(1 + \alpha p) \quad (1-8)$$

式中 ν_p ——压力为 p 时液体的运动黏度;

ν ——大气压下液体的运动黏度;

p ——液体的压力(105Pa);

α ——决定于油的黏度及油温的系数,一般取 $\alpha = (0.002 \sim 0.004) \times 10^{-5}, 1/\text{Pa}$ 。

6. 温度对黏度的影响

温度的变化使液体的内聚力发生变化,因此液体的黏度对温度的变化十分敏感。温度升高时,液体分子间的内聚力减小,其黏度降低。液压油的黏度随温度变化的关系称为液压油的黏温特性。液压油黏度的变化直接影响液压系统的性能和泄漏量。因此希望黏度随温度的变化越小越好,即黏温特性要好。黏温特性可用黏度指数 $V \cdot I$ 表示。黏度指数 $V \cdot I$ 是用被测油液黏度随温度变化的程度同标准油液黏度变化程度比较的相对值。通常在各种工作介质的质量标准中都给出黏度指数。 $V \cdot I$ 值越高,表示液压油黏度随温度变化越小,即黏温特性越好。一般要求工作介质的黏度指数应在 90 以上。当液压系统的工作温度范围较大时,应选用黏度指数较高的工作介质。几种典型工作介质的黏度指数如表 1-4 所示。

表 1-4 典型工作介质的黏度指数

介质种类	黏度指数 $V \cdot I$	介质种类	黏度指数 $V \cdot I$
通用液压油 L-HL	90	高含水液 L-HFA	≈ 130
抗磨液压油 L-HM	≥ 95	油包水乳化液 L-HFB	130 ~ 170
低温液压油 L-HV	130	水-乙二醇液 L-HFC	140 ~ 170
高黏度指数液压油 L-HR	≥ 160	磷酸酯液 L-HFD	-31 ~ 170

7. 气泡对黏度的影响

液体中混入直径为 0.25 ~ 0.5mm 悬浮状态的气泡时,对液体的黏度有一定的影响,其值可按下式计算

$$\nu_b = \nu_0(1 + 0.015b) \quad (1-9)$$

式中 b ——混入空气的体积百分数;

ν_b ——混入 $b\%$ 的空气时,液体的运动黏度;

ν_0 ——不含空气时液体的运动黏度。

(四) 液体的可压缩性

液体受压力作用发生体积变化的性质称为液体的可压缩性。压力为 p_0 时体积为 V_0 的液体,当压力增大 Δp 时,由于液体的可压缩性,体积要减小 ΔV 。液体的可压缩性用压缩率 κ 表示

$$\kappa = -\frac{1}{\Delta p} \cdot \frac{\Delta V}{V_0} \quad (1-10)$$

液体压缩率 κ 的物理意义是:单位压力变化下的体积相对变化率。常用液压油的 $\kappa = (5 \sim 7) \times 10^{-10} \text{m}^2/\text{N}$ 。液体压缩率的倒数称为液体的体积弹性模量,简称体积模量,用 K 来表示,其值为

$$K = \frac{1}{\kappa} = -\frac{V_0 \cdot \Delta p}{\Delta V} \quad (1-11)$$

一般液压油的体积模量为 $(1.4 \sim 1.9) \times 10^3 \text{MPa}$,而钢的体积模量为 $(2 \sim 2.1) \times 10^5 \text{MPa}$,可见液压油的可压缩性是钢的 100 ~ 150 倍。在一般情况下,由于压力变化引起液体体积的变化很小,液压油的可压缩性对液压系统性能的影响不大,所以一般可认为液体是