



全国高职高专机电工程教育“十一五”规划教材
国家示范性高等职业院校核心专业精品课教材



机电工程系列

液压与气动技术

主编 徐从清 王尔湘

西北工业大学出版社

全国高职高专机电工程教育“十一五”规划教材
国家示范性高等职业院校核心专业精品课教材

液压与气动技术

主 编 徐从清 王尔湘



西北工业大学出版社
NORTHWESTERN POLYTECHNICAL UNIVERSITY PRESS

【内容简介】 本教材主要包括:液压与气动系统的组成及作用、液压传动基础知识、液压泵和液压马达的选用、液压缸的选用、液压辅助元件的选用、方向控制阀与方向控制回路、压力控制阀与压力控制回路、流量控制阀与调速回路、其他控制阀与其他液压基本回路、典型液压系统分析、液压系统设计实例、液压伺服系统、气压传动元件、气动基本回路、气动逻辑元件、气动行程程序控制系统设计等十六个模块。教材的编写模式采用了基于工作岗位技术要求项目化的原则,能有效帮助读者提升分析与处理问题的能力,注重内容的实用性与针对性。

本教材可供高职高专、成人高校、广播电视大学、函授大专等学校的机械类和机电类各专业或开设有该门课程的其他专业使用,同时可供相关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

液压与气动技术/徐从清,王尔湘主编. —西安:西北工业大学出版社,2009.8
ISBN 978-7-5612-2643-8

I. 液… II. ①徐…②王… III. ①液压传动②气压传动 IV. TH137 TH138

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 154778 号

出版发行:西北工业大学出版社

通信地址:西安市友谊西路 127 号 邮编:710072

电 话:(029)88493844 88491757

网 址:www.nwpup.com

印 刷 者:陕西兴平报社印刷厂

开 本:787 mm × 1 092 mm 1/16

印 张:18.75

字 数:454 千字

版 次:2009 年 8 月第 1 版 2009 年 8 月第 1 次印刷

定 价:30.00 元

前 言

本教材遵照“以就业为目标”的指导思想,改变了传统教学中“过多强调学科性”及“盲目攀高升格”的倾向,重视知识、技能传授的宏观设计及整体效果,改变了传统教材在学科体系基础上的编写模式。

本教材主要有如下特点:

(1)教材结构“模块化”:一个模块一个知识点,重点突出,主题鲜明。模块化课程结构以其良好的弹性和便于综合的特点适应了职业教育的多种需求。

(2)注重“方法论”的教学思想:教材是教学之本,故而方法也应是实践教材的主题,决不能简单地、狭义地认为技能实训就是学生的实际操作。技能实训教材以传授经过提炼、加工、升华的专家经验(方法)为主,这也是与传统实验报告相比的区别所在。

(3)教学内容“本体化”:一套教材由多本内涵不同的单科教材构成,就是教育“本体化”的体现,故而单个科目不向其他学科扩展渗透,追求单科教学内容单纯化,追求教材的组合效应是本教材的一个基本思想。

(4)教材内容更加直观:本教材广泛使用图表归纳法,用简洁的图表归纳整理,以解决日益庞大的知识内容与偏少的学时之间的矛盾。同时,本教材图文并茂、直观清晰、便于自学,文字表达简洁明了、明快易懂。

(5)练习题体现了理论对实践技能的指导:每一个“技能模块”的练习题都需要学生开动脑筋、相互讨论,到图书馆、互联网去查阅资料,到实验室去做实验才能解答。

总之,本书力求与当前就业单位“招聘的人能立即上岗”的要求合拍,并为学生毕业后在机电类各专业间转岗奠定了最基本的知识和技能基础。教材的编写风格为:新(新思想、新技术、新面貌)、实(贴近实际、体现应用)、简(文字简洁、风格明快)。

本教材由徐从清、王尔湘主编,王超、杨立峰任副主编,参加编写的还有朱玉丽。具体的编写分工是:徐从清编写模块一、二、三、四、五、六;王尔湘编写模块七、八;王超编写模块九、十、十一;杨立峰编写模块十二、十三;朱玉丽编写模块十四、十五。全书由徐从清统稿。

本教材在编写过程中,同时得到平煤集团东联机械制造有限公司、平顶山高压电气有限公司、平顶山煤矿机械有限责任公司等单位的工程技术人员、技术骨干的指点和帮助,在此表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,书中难免存在不足之处,敬请广大读者批评指正。

编 者

2009 年 6 月

目 录

模块一 液压与气动系统的组成及作用	1
项目一 液压与气动技术的应用与发展	1
项目二 液压与气动系统的工作原理、组成及特点	3
小结	7
考核与评价	7
模块二 液压传动基础知识	9
项目一 液压油的选用	9
项目二 液体静力学基础	17
项目三 液体动力学基础	20
小结	27
考核与评价	27
模块三 液压泵和液压马达的选用	29
项目一 液压泵和液压马达	29
项目二 液压泵和液压马达的选用	47
小结	64
考核与评价	64
模块四 液压缸的选用	65
小结	83
考核与评价	83
模块五 液压辅助元件的选用	84
小结	97
考核与评价	98
模块六 方向控制阀与方向控制回路	99
小结	117

考核与评价	117
模块七 压力控制阀与压力控制回路	118
小结	136
考核与评价	136
模块八 流量控制阀与调速回路	137
小结	149
考核与评价	149
模块九 其他控制阀与其他液压基本回路	150
小结	166
考核与评价	166
模块十 典型液压系统分析	167
小结	179
考核与评价	179
模块十一 液压系统设计实例	180
小结	187
考核与评价	187
模块十二 液压伺服系统	188
小结	192
考核与评价	192
模块十三 气压传动元件	193
小结	218
考核与评价	218
模块十四 气动基本回路	219
小结	228
考核与评价	228
模块十五 气动逻辑元件	229
小结	237
考核与评价	237

模块十六 气动行程程序控制系统设计	238
小结	277
考核与评价	277
附录	279
附录一 液压气压传动常用图形符号	279
附录二 常用液压元件型号(参考)	286
附录三 常用电子气动元件符号	289
参考文献	291

模块一 液压与气动系统的组成及作用

知识目标

1. 液压与气动系统的组成及工作原理。
2. 液压与气压传动的优缺点。

知识准备

知识点	内 容
各种传递动力的方式	机械传动、电传动、液压与气压传动、液力与气力传动

项目一 液压与气动技术的应用与发展

【项目描述】

液压与气压传动技术发展迅速,应用广泛。本项目要求了解液压与气动技术的应用,液压与气动技术的发展概况。

【项目分析】

液压与气压传动的应用范围,液压与气动技术的发展趋势。

【项目内容】

一、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传动形式。如果从 1795 年世界上第一台水压机诞生算起,液压传动已有 200 多年的历史,然而液压传动的真正推广使用却是近 50 多年的事。特别是 20 世纪 60 年代以后,随着原子能科学、空间科学、计算机技术的发展,液压技术也得到很大的发展,渗透到国民经济的各个领域之中,在工程机械、冶金、军工、农机、汽车、轻纺、船舶、石油、航空和机床工业中,液压技术得到了普遍的应用。当前液压技术正向高压、高速、大功率、高效率、低能耗、经久耐用、高度集成化等方向发展;同时,新型液压元件的应用,液压系统的计算机辅助设计、计算机仿真和优化、微机控制等工作也日益取得了显著的成果。

我国的液压工业开始于 20 世纪 50 年代,其产品最初应用于机床和锻压设备,后来又用于拖拉机工程机械中。自 1964 年开始从国外引进液压元件生产技术,同时自行设计液压产品

以来,我国的液压元件生产已形成规模,并在各种机械设备上得到了广泛的应用。目前我国机械工业在认真消化、推广从国外引进先进液压技术的同时,大力研制开发国产液压元件新产品(如中高压齿轮泵、比例阀、叠加阀及新系列中高压阀),加强产品可靠性和新技术应用的研究,积极采用国际标准和执行新的国家标准,合理调整产品结构,对一些性能差的不符合国家标准的液压元件产品采取逐步淘汰的措施。可以看出,液压传动技术在我国的应用与发展已经进入了一个崭新的历史阶段。

表 1-1 液压技术在各行业的应用

行 业	应用举例
汽车工业	汽车生产流水线、汽车自动变速箱、液压助力转向器等
轻工业	注塑机、打包机、造纸机等
工程机械	液压汽车起重机
矿山机械	采掘机械、液压钻机
冶金、机制工业	液压机、液压磨床、数控机床
军事工业	舰艇、坦克等装备上的炮塔转位瞄准器
农 业	联合收割机、农机的悬挂装置

二、气动技术的应用

气压传动技术在技术飞速进步、能源紧张的当今世界发展将更加迅速。随着工业的发展,它的应用也将日益扩大,同时它的性能也就必须满足气动机械多样化以及与机械电子工业快速发展相适应的要求。处在这样的变革时期,就要求按不同于以前的观点去开发气动技术、气动机械和气动系统,即不单纯强调进行气动元件本身的研究而使之满足多样化的要求,而是为了达到提高系统的可靠性、降低成本,要进行无油化、节能化、小型化和轻量化、位置控制的高精度化,以及与电子学相结合的综合控制技术的研究。

液压与气压传动发展到目前的水平主要是由于液压与气压传动本身的特点所致,可以预见,随着工业的发展,液压与气压传动技术必将更加广泛地应用于各个工业领域。

表 1-2 气动技术在各行业的应用

行 业	应用举例
汽车工业	汽车的制动系统
轻工业	气动上下料装置
制造业	自动化生产线
电子工业	家电生产线
化学工业	化工原料输送装置
军事工业	舰艇、坦克等装备上的炮塔转位瞄准器
农 业	联合收割机、农机的悬挂装置

三、液压与气动技术的发展概况

17 世纪中叶帕斯卡提出了静压传递原理,18 世纪末英国制成第一台水压机,19 世纪实践成功舰船上的炮塔转位器,其后出现了液压六角车床和磨床。第二次世界大战期间,在一些兵器上用上了功率大、反应快、动作准的液压传动和控制装置,大大促进了液压技术的发展。战后,液压技术转向民用机械、工程、农业、汽车等行业,20 世纪 60 年代后液压技术发展为一门完整的自动化技术。现在国外 95% 工程机械、90% 数控加工中心、95% 以上的自动线都采用液压传动。采用液压传动的程度成为衡量一个国家工业水平的重要标志。

气动技术历史悠久,19 世纪中叶空气压缩机在英国问世,19 世纪七十年代开始在采矿业使用风镐,19 世纪八十年代美国研制了火车的气动刹车。第二次世界大战以后,各国生产的迅速发展和经济繁荣,气动技术应运而生,20 世纪 60 年代以来,气动元件的发展速度已超过了液压元件。

项目二 液压与气动系统的工作原理、组成及特点

【项目描述】

液压与气压传动是利用密闭系统中的受压液体(液压油或空气)来传递运动和动力的一种传动方式。本项目要求了解液压与气动系统的工作原理、组成及其特点。

【项目分析】

液压与气动系统的工作原理,液压与气动系统的组成,液压与气动系统的特点。

【项目内容】

一、液压与气动系统的工作原理

液压与气压传动是研究以有压流体(压力油或压缩空气)为传动介质,来实现各种机械的传动和自动控制的学科。液压传动与气压传动实现传动和控制的方法是基本相同的,它们都是利用有关元件组成所需功能的基本回路,再由若干回路组合成传动系统来进行能量的传递与控制。因此,要研究液压与气压传动及其控制技术,就首先要了解传动介质的基本物理性能及其静力学、运动学和动力学特性;了解组成系统的各类液压与气动元件的结构、工作原理、工作性能以及各种基本回路的性能和特点,并在此基础上进行液压与气压传动控制系统的设计。

液压传动所用的工作介质为液压油或其他合成液体,气压传动所用的工作介质为空气。由于这两种流体的性质不同,所以液压传动和气压传动又各有其特点。液压传动传递动力大,运动平稳,但由于液体粘性大,在流动过程中阻力损失大,因而不宜作远距离传动和控制;而气压传动由于空气的可压缩性大,且工作压力低(通常在 1.0 MPa 以下),所以传递动力不大,运动也不如液压传动平稳,但空气粘性小,传递过程中阻力小、速度快、反应灵敏,因而气压传动能用于较远距离的传动和控制。

液压与气压传动的基本工作原理是相似的,现以如图 1-1 所示的液压千斤顶来简述其工作原理。图中大小两个液压缸 6 和 3 的内部分别装有活塞 7 和 2,活塞和缸体之间保持一种良好的配合关系,不仅活塞能在缸内滑动,而且配合面之间又能实现可靠的密封。当用手向上提

起杠杆1时,小活塞2就被带动上升,于是小缸3的下腔密封容积增大,腔内压力下降,形成部分真空,这时钢球5将所在的通路关闭,油箱10中的油液就在大气压力的作用下推开钢球4沿吸油孔道进入小缸的下腔,完成一次吸油动作。当压下杠杆1时,小活塞下移,小缸下腔的密封容积减小,腔内压力升高,这时钢球4自动关闭油液流回油池的通路,小缸下腔的压力油就推开钢球5进入大缸6的下腔,推动大活塞将重物8(重力为 G)向上顶起一段距离。如此反复地提压杠杆1,就可以使重物不断升起,达到起重的目的。

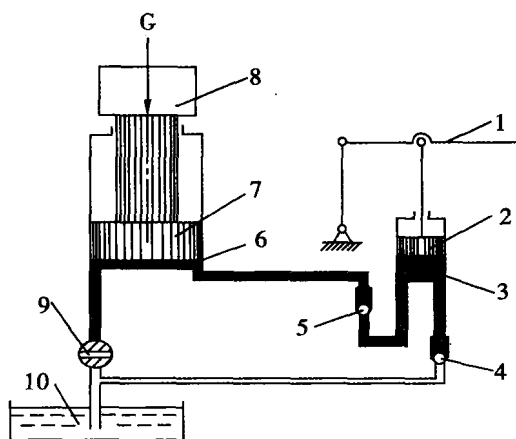


图 1-1 液压千斤顶的工作原理

1—杠杆;2—小活塞;3,6—液压缸;4,5—钢球;
7—大活塞;8—重物;9—放油阀;10—油箱

若将放油阀9旋转 90° ,则在物体8的自重作用下,大缸中的油液流回油箱,大活塞下降到原位。

由此例可以看出,液压千斤顶是一个简单的液压传动装置。分析液压千斤顶的工作过程可知,液(气)压传动是依靠液(气)体在密封容积变化中的压力能实现运动和动力传递的。液(气)压传动装置本质上是一种能量转换装置,它先将机械能转换为液压能,后又将液压能转换为机械能做功。

二、液压与气压传动系统的组成及图形符号

图1-2为一台简化了的机床工作台液压传动系统,通过它可以进一步了解一般液压传动系统应具备的基本性能和组成情况。

在图1-2(a)中,液压泵3由电动机带动旋转,从油箱1中吸油。油液经过滤器2过滤后流往液压泵,经泵向系统输送。来自液压泵的压力油经节流阀5和换向阀6进入液压缸7的左腔,推动活塞连同工作台8向右移动。这时,液压缸右腔的油通过换向阀经回油管排回油箱。

如果将换向阀手柄扳到左边位置,换向阀处于图1-2(b)所示的状态,则压力油经换向阀进入液压缸的右腔,推动活塞连同工作台向左移动。这时液压缸左腔的油亦经换向阀和回油管排回油箱。

工作台的移动速度是通过节流阀来调节的。当节流阀开口较大时,进入液压缸的流量较

大,工作台的移动速度也较快;反之,当节流阀开口较小时,工作台移动速度则较慢。

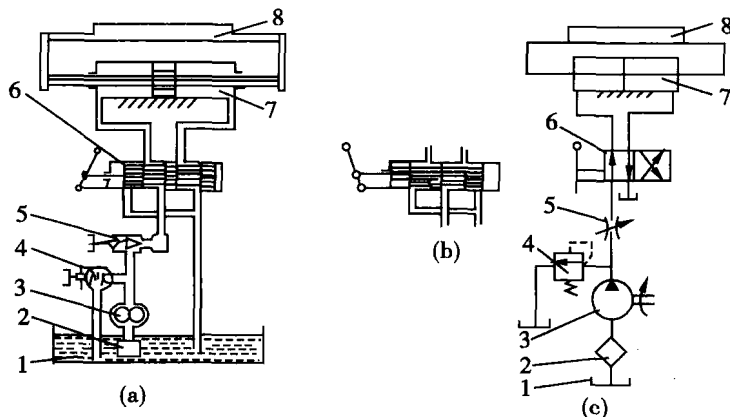


图 1-2 机床工作台液压传动系统

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—工作台

工作台移动时必须克服阻力,如克服切削力和相对运动表面的摩擦力等。为适应克服不同大小阻力的需要,泵输出油液的压力应当能够调整;另外,当工作台低速移动时,节流阀开口较小,泵出口多余的油液亦需要排回油箱。这些功能是由溢流阀 4 来实现的,调节溢流阀弹簧的预压力就能调整泵出口的油液压力,并让多余的油在相应压力下打开溢流阀,经回油管流回油箱。

如图 1-3 所示为一可完成某程序动作的气压传动系统的组成原理图,其中的控制装置是若干气动元件组成的气动逻辑回路,它可以根据气缸活塞杆的始末位置,由行程开关等传递信号,在作出逻辑判断后指示气缸下一步的动作,从而实现规定的自动工作循环。

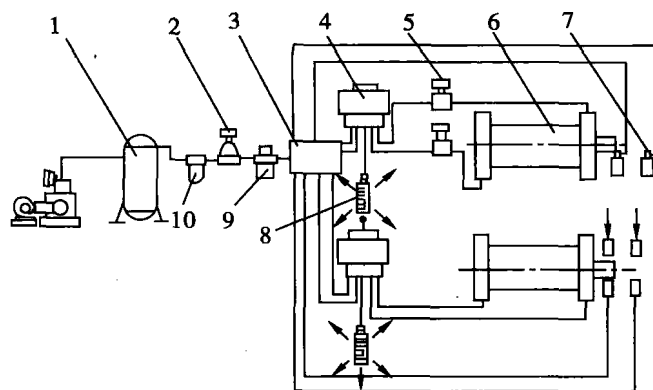


图 1-3 气压传动系统的组成

1—气压发生装置;2—压力控制阀;3—逻辑原件;4—方向控制阀;
5—流量控制阀;6—气缸;7—行程开关;8—消声器;9—油雾器;10—过滤器

由上面的例子可以看出,液压与气压传动系统主要由以下几个部分组成:

(1) 动力元件:一般最常见的是液压泵或空气压缩机。它的功能是将原动机输入的机械能

转换为流体的压力能,以驱动执行元件运动。

(2)执行元件:一般指作直线运动的液(气)压缸、作回转运动的液(气)压马达等。它的功能是将流体的压力能转换为机械能,以驱动工作部件。

(3)控制元件:指各种阀类元件,它们的作用是控制和调节液(气)压系统中流体的压力、流量和流动方向,以保证工作机构完成预定的工作运动。

(4)辅助元件:指除以上三种以外的其他装置,如油箱、滤油器、分水滤气器、油雾器、蓄能器等,其作用是提供必要的条件,使系统得以正常工作和便于监测控制。

(5)传动介质:即液压油或压缩空气,其作用是实现运动和动力的传递。液压与气压传动系统的图形符号有结构原理图和图形符号图两种。在图 1-2(a)中,组成液压系统的各个元件是用半结构式图形画出来的,这种图形称为结构原理图。结构原理图直观性强,较易理解,但难于绘制,系统中元件数量多时更是如此。在工程实际中,除某些特殊情况外,一般都用简单的图形符号来绘制液压系统原理图,故结构原理图只作为一种教学中的表达过渡。对于图 1-2(a)所示的液压系统,若用国家标准 GB/T 786.1—1993 规定的液压图形符号绘制,则如图 1-2(c)所示。图中的符号只表示元件的功能,不表示元件的结构和安装位置,这种图形称为图形符号图。使用图形符号,可使液压系统图简单明了,便于交流及原理的表达。GB/T 786.1—1993 液压与气压图形符号见附录一。

三、液压与气压传动的优缺点

1. 液压与气压传动与其他传动方式相比较有如下主要优点:

(1)液压与气压传动能方便地实现无级调速,调速范围大。

(2)在相同功率情况下,液压传动能量转换元件的体积较小,重量较轻。

(3)液压与气压传动工作平稳,反应速度快,冲击小,能高速启动、制动和换向。

(4)液压与气动系统便于实现过载保护。

(5)液压与气动系统操作简单,便于实现自动化。特别是电气控制联合使用时,易于实现复杂的自动工作循环。

(6)液压与气动元件易于实现系列化、标准化和通用化,故便于设计、制造。

(7)气压传动工作介质取之不竭,且不易污染。

2. 液压与气动的主要缺点是:

(1)泄漏和流体的可压缩性,使其无法保持严格的传动比,这一缺点对气动尤为显著。

(2)液压传动对油温的变化比较敏感,不宜在很高和很低的温度下工作,且易污染环境。

(3)气压传动传递的功率较小,气动装置的噪声也大。

四、液压试验台观摩

通过教师的操作、学生的参与、师生共同对现象的分析,增加学生对液压传动的感性认识,激发学生学习液压传动的兴趣。

1. 目的

(1)建立液压传动的感性认识。

(2)从外形上认识常用的液压元件。

- (3) 建立控制系统压力的概念。
- (4) 建立控制系统流量的概念。
- (5) 建立控制系统油液流动方向的概念。
- (6) 建立液压基本回路的概念。

2. 安全注意事项

- (1) 液压气动实训将与电、压力油、压缩空气相关,应保证实训设备和元器件的完好性和安全性。
- (2) 要正确地组装和固定好各元器件。
- (3) 管路要连接牢固。
- (4) 限位元件不应放在动作杆的对面,而应使其侧面与杆接触。
- (5) 不得使用超过限制的工作压力。
- (6) 应按要求连接回路,检查无误后才能起动电机。
- (7) 实训没有达到预期要求时,要仔细检查,逐步分析、寻找故障点。
- (8) 当做液压实训时,在有压力的情况下不准拆卸管子;当做气动实训时,在有压力的情况下拆卸某软管,应握紧该软管的端头。
- (9) 要严格遵守各种安全操作规程。

3. 液压试验台观摩

(1) THHPJY-3 液压综合实训台:THHPJY-3 液压综合实训台上,配置有泵和电动机作为试验台的动力装置;备有两个单活塞杆液压缸作为执行装置;配置有溢流阀作为压力调节装置;配置有 2 个三位四通电磁换向阀、二位三通换向阀、两位二通换向阀,用于控制油液的流动方向。还配置有节流阀用于控制进入液压缸的油液流量。

(2) THHPJY-3 液压综合实训台。

1) 压力的建立与调压:通过认识溢流阀和泵,建立调压回路,先将压力调为零,然后慢慢地调高压力,通过压力表显示压力的变化值。

2) 缸的运动方向的控制与换向:首先要使学生理解缸是如何运动起来的。没有压力油,缸是不运动的,有压力油,如果油路不通,缸是不运动的。只有进油路和回油路都是畅通的,压力油进入缸的一腔,缸的工作压力能克服外负载,缸才能运动起来。换向是通过换向阀来实现的。

(3) 其他液压试验台原理讲解。

小 结

液压与气压传动是利用密闭系统中的受压液体(液压油或空气)来传递运动和动力的一种传动方式。本模块主要了解液压与气动技术的应用,液压与气动技术的发展概况。

考核与评价

1. 什么是液(气)压传动? 液(气)压传动的基本工作原理。

2. 液(气)压传动系统有哪些组成部分? 各部分的作用是什么?
3. 和其他传动方式比较,液(气)压传动有哪些优、缺点?

模块二 液压传动基础知识

知识目标

1. 液压油的选用原则。
2. 液压油的分类、性质和牌号意义。
3. 流体静力学基本方程和连续性方程。
4. 伯努利方程。
5. 流体动量方程。

知识准备

知识点	内 容
帕斯卡原理	在充满液体的密闭容器中,在任一点施加一单位力,这一单位力向任意方向传递,其大小不变,方向作用于垂直到物体的表面
压力取决于负载	液压系统的压力取决于负载,该负载包括外负载和内负载;液压系统的最高压力由液压泵口溢流阀调定
速度取决于流量	执行元件的速度取决于输入的流量,通常与负载大小无关
连续性方程	液体在密闭的一条管道中流动,正常时不会断流、增加或减少,利用连续性方程可以求得液压缸内径、油管内径以及管内液体流速等
能量守恒定律	自然界的一切物质总是不停地运动着,其所具有的能量不变,只能从一种形式转化为另一种形式

项目一 液压油的选用

【项目描述】

为了正确选用液压油,需要了解对液压油的使用要求,熟悉液压油的品种及其性能,掌握液压油的选择使用方法。

【项目分析】

熟悉液压油的使用要求,液压油的品种及其性能。

【项目内容】

一、液压油的主要性质

1. 密度

单位体积液体的质量称为该液体的密度,即

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

式中 V ——液体的体积;

m ——体积为 V 的液体的质量;

ρ ——液体的密度。

密度是液体的一个重要的物理参数。随着液体温度或压力的变化,其密度也会发生变化,但这种变化量很小,可以忽略不计。一般液压油的密度为 900 kg/m^3 。

2. 可压缩性

液体受压力作用而发生体积减小的性质称为液体的可压缩性。体积为 V 的液体,当压力增大 Δp 时,体积将减小 ΔV ,则液体在单位压力变化下的体积相对变化量为

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

式中 k ——液体的体积压缩系数。

由于压力增大时液体的体积减小,因此式(2-2)的右边须加一负号,以使 k 为正值。

$$K = \frac{1}{k} = -\frac{\Delta p}{\Delta V} V \quad (2-3)$$

式中 K 为体积弹性模量,简称体积模量,表示产生单位体积变化量所需的压力增加量。在实际应用中,常用 K 值说明液体抵抗压缩能力的大小。在常温下,纯净油液的体积模量 $K = (1.4 \sim 2) \times 10^3 \text{ MPa}$,数值很大,故一般可认为油液是不可压缩的。

应当指出,当液压油中混有空气时,其抗压缩能力将显著降低,这会严重影响液压系统的工作性能。在有较高要求或压力变化较大的液压系统中,应力求减少油液中混入的气体及其他易挥发物质(如汽油、煤油、乙醇和苯等)的含量。由于油液中的气体难于完全排除,实际计算中常取液压油的体积模量 $K = 0.7 \times 10^3 \text{ MPa}$ 。

3. 粘性

(1) 粘性的物理本质

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,因而产生一种内摩擦力,这一特性称为液体的粘性。粘性是液体的重要物理性质,也是选择液压油的主要的依据之一。

当液体流动时,由于液体的粘性以及液体和固体壁面间的附着力,会使液体内部各层间的速度大小不等。如图 2-1 所示,设两平行平板间充满液体,下平板不动,上平板以速度 u_0 向右平移。由于液体的粘性作用,紧贴下平板的液体层流速为零,紧贴上下平板的液体层流速为 u_0 ,