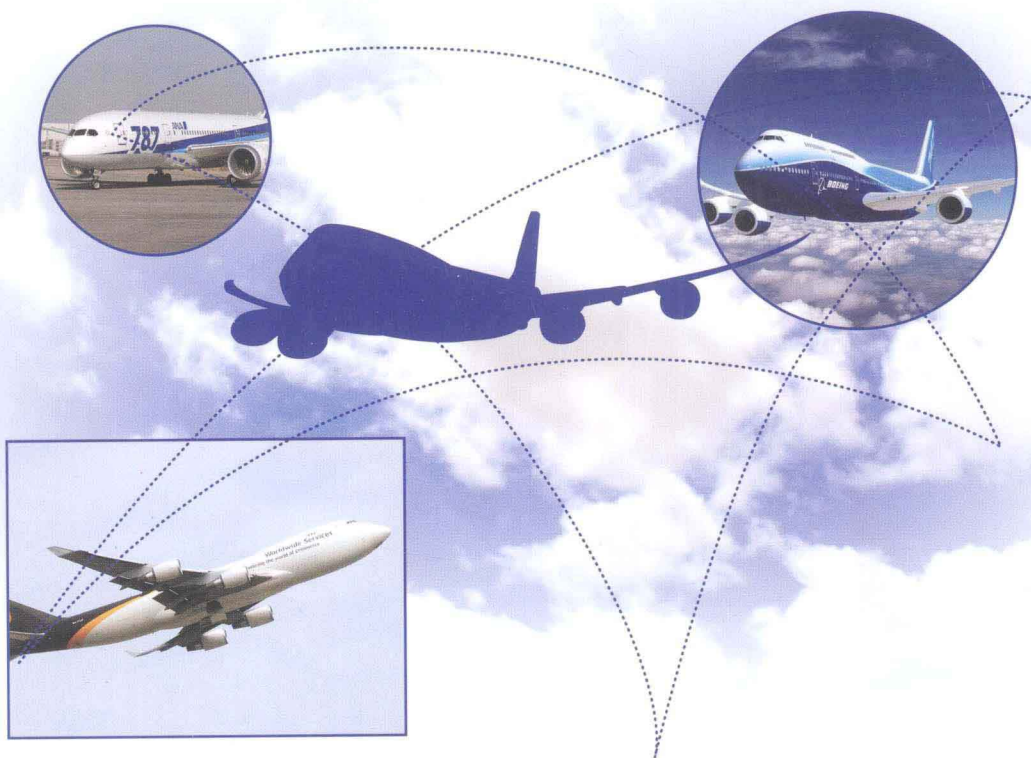


■ 普通高等院校航空专业“十二五”规划教材

飞机系统

Aircraft System

陈
闵
叶
么
娆
编



国防工业出版社

National Defense Industry Press

普通高等院校航空专业“十二五”规

飞机系统

陈阅叶 么 娆 编

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

飞机系统 / 陈闵叶, 么尧编. — 北京: 国防工业出版社, 2014. 1

普通高等院校航空专业“十二五”规划教材

ISBN 978 - 7 - 118 - 08774 - 1

I. ①飞... II. ①陈... ②么... III. ①飞机 - 构造 - 高等学校 - 教材 IV. ①V22

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 272264 号



※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京奥鑫印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787 × 1092 1/16 印张 24½ 字数 568 千字

2014 年 1 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 48.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010) 88540777

发行邮购: (010) 88540776

发行传真: (010) 88540755

发行业务: (010) 88540717

前 言

本书比较全面、系统地介绍了飞机液压系统、飞机飞行操纵系统、飞机燃油系统、飞机座舱环境控制系统、防冰排雨系统及飞机防火系统的基本知识。本书在编写过程中,重视基本理论知识与工程实际知识的有机结合。在各个系统编写内容的选取上,比较注重从物理意义的角度由浅入深、由具体到总体、知识点上下结构循序渐进并且体现连贯完整以及扩展相关知识面的原则,着重讲述飞机系统及其主要附件的结构组成、工作原理、工作性能和基本维护等知识。

本书所涉及飞机系统知识的实际图例,有中、小型飞机的部分内容,同时也结合了以波音机型为主的现代民用飞机系统结构的内容。通过这些图例,力求在阐述各个系统知识的深度与广度上兼顾系统性、继承性、先进性、针对性和实践性。

本书在编写过程中,考虑到航空类不同专业对有关飞机系统知识内容的不同需要,力求扩大相关的知识面。因此,本书可用作航空院校航空机电、飞行技术、航空发动机、航空材料、航行管制等专业涉及飞机系统课程的教材或参考资料,也可供航空企业工程技术人员阅读参考。

本书由陈闵叶、么尧共同编写,其中第一篇至第四篇由陈闵叶编写,第五篇和第六篇由么尧编写。本书在编写过程中,所选取的许多图例与对应文字的叙述参阅了大量的相关文献和资料,在此对这些文献和资料的作者深表感谢。同样要感谢李智忠老师为资料的收集整理、图文录入、排版等所付出的辛勤劳动。

限于编者有限的知识水平和经验,书中难免存在一定的错误和不足,恳请读者和同仁们给予批评指正,本人在此深表感谢。

编 者

2013 年 10 月

目 录

第1篇 飞机液压系统

第1章 液压传动总论	1
1.1 液压传动基本概念	1
1.2 液压油基本知识	3
1.3 液压管路流体力学	6
第2章 液压供压部分构造和工作原理	14
2.1 液压供压主要元件	14
2.2 液压泵的卸荷装置	38
2.3 液压系统供压基本回路	43
第3章 液压传动部分构造和工作原理	46
3.1 液压传动执行元件	46
3.2 液压传动控制元件	51
3.3 液压传动协调元件	58
3.4 其他液压控制元件举例	66
3.5 液压系统传动基本回路	70
第4章 电液伺服系统基础	75
4.1 电液伺服系统概述	75
4.2 伺服放大器	76
4.3 电液伺服阀	81
4.4 电液伺服系统的组成和工作原理	83
第5章 飞机液压系统组成与维护	86
5.1 典型现代飞机液压系统	86
5.2 液压系统维护	93
思考题	107

第2篇 飞机飞行操纵系统

第6章 飞行操纵系统概况	110
6.1 概述	110
6.2 飞行操纵系统的组成与基本要求	113
6.3 飞机电传操纵系统简述	114

第7章 操纵系统的构造和工作原理	122
7.1 飞机操纵机构	122
7.2 飞机传动机构	126
7.3 助力操纵系统	141
7.4 飞机辅助操纵系统	155
7.5 飞机飞行警告系统	162
第8章 现代飞机飞行操纵系统组成与维护	166
8.1 主飞行操纵系统	166
8.2 辅助操纵系统	176
8.3 飞行操纵系统的维护	182
思考题	187

第3篇 飞机燃油系统

第9章 飞机燃油系统总论	190
9.1 燃油供给系统的发展简述	190
9.2 燃油系统的基本要求	191
9.3 燃油特性及对系统的影响	192
9.4 燃油供给系统的高空性	194
第10章 燃油系统的构造和工作原理	198
10.1 燃油系统主要元件	198
10.2 油箱通气系统	208
10.3 加油、抽油及放油系统	211
10.4 供油与油量指示系统	218
第11章 现代飞机燃油系统组成与维护	226
11.1 典型现代飞机燃油系统的组成	226
11.2 燃油系统的维护	235
思考题	241

第4篇 飞机座舱环境控制系统

第12章 座舱环境控制系统概况	243
12.1 大气环境条件及其对人体生理的影响	243
12.2 氧气系统介绍	253
12.3 气密座舱概述	259
第13章 座舱环境控制系统构造和工作原理	265
13.1 气源与供气量调节装置	265
13.2 座舱温度调节装置	270

13.3	座舱压力调节装置	287
13.4	空气分配、货仓加温与设备冷却	297
第 14 章	座舱环境控制系统的组成与维护	302
14.1	典型飞机座舱环境控制系统的组成	302
14.2	座舱环境控制系统的维护	311
	思考题	314

第 5 篇 防冰排雨系统

第 15 章	飞机结冰机理及影响概况	317
15.1	结冰的机理	317
15.2	结冰对飞机性能的影响	318
第 16 章	飞机结冰探测与除防冰原理	323
16.1	飞机结冰探测	323
16.2	飞机除防冰原理与方法	326
第 17 章	飞机防冰排雨系统与维护	331
17.1	飞机除防冰系统	331
17.2	飞机排雨系统	342
	思考题	348

第 6 篇 飞机防火系统

第 18 章	飞机防火系统概况	349
18.1	燃烧的 3 个要素	349
18.2	火的种类及灭火基本原理	350
18.3	灭火剂	350
18.4	灭火瓶	352
第 19 章	飞机防火系统组成与火警探测	356
19.1	飞机防火系统组成	356
19.2	火警探测器	357
第 20 章	典型飞机防火系统及维护	363
20.1	发动机防火系统	363
20.2	APU 防火系统	372
20.3	货舱防火系统	376
20.4	引气管道泄漏过热探测	379
20.5	卫生间灭火	380
	思考题	382
参考文献		383

第 1 篇 飞机液压系统

第 1 章 液压传动总论

1.1 液压传动基本概念

液压系统是现代飞机上最重要的系统之一,它用来操纵飞机舵面、进行刹车、收放起落架等。

自 20 世纪 30 年代起,液压传动就已经可靠地使用在飞机上了。随着飞机的飞行速度、机动性和载重量的不断提高,操纵飞机舵面及部件需要的力和功率都大大增加,已非人力所能胜任,因此,有必要对上述部件进行动力传动。

1.1.1 液压传动的优、缺点

动力传动可以是电动的、气动的或液压的,它们各自有自己的优、缺点,有自己的适用范围。液压传动的优点主要如下:

(1) 单位功率的重量轻、结构尺寸小。据统计,轴向柱塞泵单位功率的重量指标是 $1.5\text{N/kW} \sim 2\text{N/kW}$,而直流电机则为 $15\text{N/kW} \sim 20\text{N/kW}$,前者单位功率的重量只有后者的 10% 左右。

(2) 能在很大范围内实现无级调速,转速比可达 $100:1 \sim 2000:1$ 。

(3) 传动运动均匀平稳,反应速度快,冲击小,能高速启动、制动和换向。液压传动装置的换向频率,在回转运动中可达 500次/min ,往复直线运动中可达 $400\text{次/min} \sim 1000\text{次/min}$ 。

(4) 能传递较大的力或转矩,这是液压传动的突出优点。在一些需要使用高压或很大力的新技术中,如果采用液压传动和控制,就能比较容易实现。

(5) 易实现功率放大。这在控制系统中是非常重要的一个特点。在输入信号很微弱的情况下,经液压设备的放大,即可驱动执行部件进行放大功率的工作,效率系数也较大。

(6) 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,尤其是和电气控制结合起来,可以实现复杂的控制。

(7) 液压系统易于实现过载保护。由于用油作为传动介质,故能自行润滑,元件使用寿命较长。

(8) 液压传动反应灵敏。在功率相同的情况下,液压马达的时间常数比电动的小若

千倍,因此,能快速反应。

液压传动也有其不足,缺点主要如下:

(1) 由于存在液体的泄漏和液体的压缩性,以及管路产生的弹性变形,使液压传动无法保证严格的传动比。

(2) 由于有机机械摩擦损失、压力损失和泄漏损失,从而总效率降低,不宜用作远距离传动。

(3) 工作时受温度变化的影响大,不宜在低温和高温条件下工作。

(4) 压力传递速度较小,所以在长距离的管路中有较明显的滞后。

(5) 液压元件制造精度要求高,使用维护比较严格,发生故障时不易查明原因,因而就不能迅速排除。

总的来说,液压传动的优点比较突出,与电动和冷气传动相比,具有较明显的优势。因此,在现代飞机上,液压传动仍保持着稳固的地位。

1.1.2 液压传动基本概念

从本质上讲,液压传动就是利用液体传递能量进行做功。液体传递能量分两种,即静压能和动能。在工程上依其传递能量的不同分为两大类型:凡是利用液体静压为主来实现传动功能的称为液压传动(即静液传动、容积式传动);凡是利用液体动能为主来实现传动功能的称为液力传动(即动液传动、涡轮式传动)。前者广泛应用于航空、机床、采掘、锻压等方面,后者多用于汽车、机车的动力传动上(作液力联轴器或液力变矩器用)。如上所述,飞机上都是应用液压传动(主要传递静压能),所以本章主要讲述液压传动的内容,液力传动不作讲述。

液压传动是用液压油为工作介质,通过动力元件液压泵,将机械能转换为油液的压力能,然后再通过管道、控制元件进入执行元件,将油液压力能转换为机械能,驱动负载实现直线或回转运动。

帕斯卡原理:在装满液体的密闭容器内,对液体的任意部分施加压力时,液体能把这一压力大小不变地向四面八方传递。利用这一原理可以制成一些省力的装置,如千斤顶等。液压系统的传力原理与此相似。但是,要使油液推动附件工作,仅仅利用油液传力是不够的,还必须使油液不断地向附件运动的方向流动。由此可知,进行传动的要素一是压力,二是流量。如果不考虑油液在管路中的流动阻力,则液压泵打出的油液压力取决于传动部件的载荷大小,载荷越大,液压泵打出的油液压力也就越大,才能传动部件。事实上,油液在管路中流动时都是有阻力的,液压泵压油的压力不但需要传动部件,而且要克服油液在管路中的流动阻力。液压传动的另一个要素是流量,流量越大,则传动部件运动的速度也越大,但流量大时,油液在管路中的流速也越快,流动阻力就越大,所需要的压力也随之增大。

油液推动部件运动时,即对部件做了功,油液在单位时间内对部件所做的功称为传动功率,用 N 表示。假如传动的力为 P ,传动的距离为 S ,传动的时间为 t ,则传动功率为

$$N = \frac{PS}{t} \quad (1-1)$$

而 S/t 就是单位时间内作动筒活塞移动的距离,即活塞的运动速度 v 。此外,作用在

活塞的力 P 等于油液压力 p 与活塞面积 f 的乘积,因此有

$$N = PS/t = pf \cdot v \quad (1-2)$$

式中: fv 为单位时间内流入作动筒的油液的体积,即流量 Q 。

所以,有

$$N = pQ \quad (1-3)$$

由此可见,液压传动功率的大小,取决于系统的工作压力和流量。目前,由于飞机的重量和飞行速度都不断提高,需要液压系统的传动功率也日益增大。由上可知,提高工作压力或增大油液流量都能提高传动功率。但从减轻重量的观点来看,提高工作压力较有利,目前许多飞机液压系统的工作压力为 $210\text{kgf/cm}^2 \sim 280\text{kgf/cm}^2$ ($1\text{kgf/cm}^2 = 9.80665\text{Pa}$),有的飞机更高达 $300\text{kgf/cm}^2 \sim 350\text{kgf/cm}^2$ 。

在飞机上,液压系统往往要传动几个部件或舵面,由于各传动部分的要求不同,它们选用的控制方式和元件也就不同。归纳起来大致可分为开关控制、比例控制和伺服控制3种。

1. 开关控制

开关控制就是用普通的液压元件和电气元件组成的液压传动部分。一般用手动或电磁驱动来控制系统的压力、流量和液流方向。其主要是控制油路的通、断和液流方向。例如,收放起落架的传动部分,主要控制液流方向是“收”还是“放”,对于被传动的起落架的位置及运动速度等,并没有很高的精度要求。

2. 比例控制

电液比例控制是由电液比例阀组成的电液比例控制系统。电液比例阀是由直流比例电磁铁和液压阀两部分组成。它按输入的电信号连续地、按比例地对液流的压力、流量和方向进行远距离控制,是一种新型的电—液控制元件,具有传递功率大、反应快、控制简单可靠、使用维护方便、造价低廉等优点。

3. 伺服控制

伺服控制是一种自动控制系统。由液压拖动装置作动力元件所构成的伺服系统称为液压伺服系统。它的主要元件是电磁伺服阀,电磁伺服阀的功能是把微弱的电信号转换成相应的机械位移量,然后将机械位移量转换成相应的液压信号,并经放大,输出与电控信号相应的液压功率。液压伺服系统具有重量轻、响应速度快、控制精度高等优点。因此,目前已广泛应用于航空、航天等许多重要的工业部门。

飞机液压系统一般由供压部分和若干个传动部分组成。各传动部分按其传动要求的不同,有的采用开关控制方式,有的采用伺服控制方式。为了提高液压系统的工作可靠性,目前许多飞机采用了“余度技术”,即在一架飞机上设置了若干个独立的液压系统,平时各自负责向确定的传动部分供给高压油液,互不影响,但在某个系统发生故障时,它的那些传动部分可以为另一个系统供给高压油液,以保障其工作可靠。有些重要部件的传动部分并列装有几个作动机构,也是为了提高工作可靠性。

1.2 液压油基本知识

液压系统使用的液体称为液压油。液压系统工作的好坏与液压油的品质有密切关

系。下面将阐明液压油的主要性质、对它的要求,以及一些常用液压油的品质。

1.2.1 液压油的性质和对它的要求

1. 压缩性

液体的压缩性是指液体所受的压力增大时其体积缩小的一种性质。一定体积的液体,在压力增量相同的情况下,体积的缩小量越小,则说明这种液体的压缩性越小。

试验证明,所有的液体都是可压缩的,但可压缩的程度一般很小,通常可以认为液体是不可压缩的,但对于高压下工作的液压系统来说,工作液体的压缩性具有很大的意义,在设计计算时要予以考虑。

液体的压缩性用容积压缩系数 β 来表示,它表示当压力 p 增大 1kgf/cm^2 时,容积 V 的相对变化,可用下式表达,即

$$\beta = -\frac{dV}{dp} \frac{1}{V} \quad (1-4)$$

式中: β 为容积压缩系数; dV/dp 为容积随压力的变化率,因为压力增大时容积缩小,所以取负号。

液体容积压缩系数的倒数称为容积弹性系数 E ,即

$$E = -\frac{dp}{dV} V = \frac{1}{\beta} \quad (1-5)$$

容积弹性系数 E 的物理意义是:液体每缩小一个相对单位体积所需要增大的压力值。 E 值越大,说明这种液体的压缩性越小,而传递压力的速度则越大。对于水 $E = 2.1 \times 10^4 \text{kgf/cm}^2$,航空液压油 $E = (1.5 \sim 1.6) \times 10^4 \text{kgf/cm}^2$ 。但是如果液体中溶有大量空气时,液体的 E 值将大大降低,大致为 $E_{\text{空气}} = 7000 \text{kgf/cm}^2 \sim 8000 \text{kgf/cm}^2$ 。如果液体中含有气泡,则 E 值将更低。

2. 黏性

液体的黏性是液体流动时内部产生摩擦力的一种性质。任何液体流动时,内部都会产生摩擦力,黏性的大小用黏度表示。

我国主要采用恩氏黏度和运动黏度单位。

(1) 恩氏黏度。被测液体在某种温度从恩氏黏度计流出 200mL 时所需的时间,与蒸馏水在 20°C 流出相同容积所需的时间(为 $50\text{s} \sim 52\text{s}$)之比,单位为“恩格列尔度”(°E)。温度为 t 时的恩氏黏度用°E表示。

(2) 运动黏度。液体从运动黏度计流出的时间 t 乘以常数 K ,即为运动黏度度值。

液体黏度的大小不但与液体种类有关,而且与温度和压力有关。温度升高时液体的黏度减小,温度降低则黏度增大。压力增大时黏度随之增大,但压力不是很高时,如在 200kgf/cm^2 以下时,黏度随压力的变化不大,可以略去不计。压力很高时,黏度将急剧增大,某些矿物油的压力从零增大到 1500kgf/cm^2 时,其黏度将增大17倍。

液压油黏度的大小,对系统工作影响较大。黏度过大则油液流动阻力很大,传动迟缓,而且消耗的功率也增加很多;反之,黏度过小,则油液容易泄漏,使系统压力不足。因此,要求液压油的黏度适中,并且要求其黏度随温度的变化率应尽量小。

3. 润滑性

液体的润滑性是指液体能在两个摩擦面之间形成一层“油膜”的特性。“油膜”可使两个摩擦面不直接接触,因而可减小其摩擦力及表面的磨损。

各种液体的润滑能力是不同的,对于润滑性不够好的液压油,可以加入适量的添加剂来改善其润滑性。液压系统中的附件都是利用液压油来润滑的,所以液压油应该具有良好的润滑性。

4. 机械稳定性

液体的机械稳定性是指液体在长时间的高压作用下(主要是挤压作用),保持其原有的物理性质的能力(如黏性润滑性等)。大多数液体,尤其是矿物油,受到长时间的高压作用后,其分子结构会遭到破坏,黏度会减小。

液压油应具有良好的机械稳定性,因为液压油经常要在高压作用下通过一些附件内的小孔和缝隙,如果它的机械稳定性不好,在使用过程中,黏度会很快变小而影响系统工作。

5. 抗燃性

液压油应具有良好的抗燃性,衡量抗燃性的一般指标为闪点、着火点和自燃着火温度。

油液的闪点是指在此温度下,液体能产生足够的蒸气,在特定条件下以一个微小的火焰接近它们时,在油液表面的任何一点都会出现火焰闪光的现象;着火点就是油液所达到的某一温度,在该温度下油液能连续燃烧5s(在有火焰点燃的情况下);自燃着火温度就是指油液在该温度下会自动着火。

航空液压油必须有良好的抗燃性。

6. 化学安定性

液体的化学安定性主要是指液体抗氧化的能力。

液压油内或多或少地含有一些空气,在使用过程中油液就会逐渐氧化。油液温度越高,它的氧化就越剧烈。油液氧化后,会产生一些黏稠的沉淀物,使油液的流动阻力增大,并使附件的活动零件黏滞或堵塞油孔。油液氧化后还会产生一些酸性物质,使金属导管和附件受到腐蚀,而腐蚀物能使油液更快地变质。

如果油液中含有尘土、金属粉末、油漆等杂质,不仅会使油孔堵塞附件磨损加剧,而且这些杂质还能起催化作用,使油液加速氧化。因此,液压油应具有良好的化学安定性,并且不含杂质。

除了上述各项性能要求外,液压油应不易着火和挥发,且是中性的(不带酸性和碱性),以免腐蚀系统附件。此外,液压油应无毒性,以免给保管和维护造成困难。事实上,十全十美的液压油是没有的,飞机上使用的液压油主要是根据各项条件综合考虑而选定的,重要的是能正确地维护和使用,以保持其品质良好。

1.2.2 常见的液压油

目前,民航飞机通常使用3种液压油。

1. 植物基液压油

植物基液压油(如 MIL-H-7644)主要由蓖麻油和酒精组成,它有刺鼻的酒精味并通常染成蓝色。这种油液最初是用在较老式的飞机上,天然橡胶密封件适用于植物基液

压油。这种类型的油液是易燃的。

2. 矿物基液压油

矿物基液压油(如 MIL - H - 5056)是从石油中提炼出来的,它具有刺激性气味,通常染成红色。这种类型的液压油适用于合成耐油橡胶密封件,这种类型的油液是可燃的。

3. 磷酸酯基液压油

磷酸酯基液压油(如 MIL - H - 8446)是由多种磷酸酯和添加剂用化学方法合成,润滑性较好、凝固点低、防火性能好,广泛用于民航飞机上。现在应用较多的牌号为 Skydrol - 500A 的液压油,其为透明紫色,其他牌号的液压油颜色为绿色或琥珀色,比水稍重,具有较宽的使用温度范围(从 - 65 °F ~ 225 °F)。磷酸酯基液压油非常易于从大气中吸收水分而被污染,因此必须有很好的密封。另外,它对聚氯乙烯、普通合成橡胶、油漆等非金属材料有很强的腐蚀性,液压系统中必须采用异丁橡胶或乙烯—丙烯合成橡胶作密封件。

1.3 液压管路流体力学

1.3.1 液压管路流体力学的几个基本方程和公式

1. 流量连续性方程

连续性方程是质量守恒定律应用于运动流体的一种数学表达式。图 1 - 1 所示的流管,两端的截面积为 F_1 和 F_2 ,压力为 p_1 和 p_2 ,平均流速为 v_1 和 v_2 。在定常流动时,是不可压缩流。根据质量守恒定律,单位时间内流过截面 1 的流量应该等于单位时间内流过截面 2 的流量,即

$$Q = F_1 v_1 = F_2 v_2 \quad \text{或} \quad \frac{F_1}{F_2} = \frac{v_2}{v_1} \tag{1 - 6}$$

流量连续性方程的含义如下:

- (1) 对于液体连续流,其任一截面上流量处处相等,等于截面积与平均流速的乘积。
- (2) 对于液体连续流,各截面流速与该截面的面积成反比,即截面积大处流速变小,截面积小处流速变大。

2. 能量方程

如图 1 - 2 所示,在稳定流动液体中取一流管,截面 1 和截面 2 由基准面算起的标高

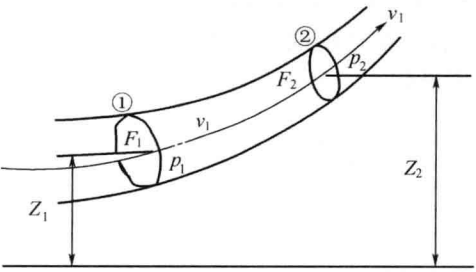


图 1 - 1 油液在流管中的流动

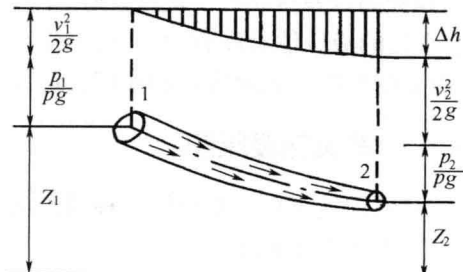


图 1 - 2 液体在流管中流动的能量变化

为 Z_1 和 Z_2 , 单位质量流体通过两个截面的位能、压力能和动能分别为 Z_1 、 $\frac{p_1}{\rho g}$ 、 $\frac{v_1^2}{2g}$ 和 Z_2 、 $\frac{p_2}{\rho g}$ 、 $\frac{v_2^2}{2g}$, 在流动中产生的能量损失为 Δh 。根据能量守恒定律, 可得出能量方程为

$$Z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + \Delta h \quad (1-7)$$

这就是黏性流体的伯努利方程, 若不考虑能量损失, 即 $\Delta h = 0$, 则称为理想流体能量方程(伯努利方程)。在飞机液压系统中, 导管位置高度 Z 的变化不大, 常可略去不计, 则上式简化为

$$\frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + \Delta h \quad (1-8)$$

或

$$p_1 + \frac{\rho v_1^2}{2} = p_2 + \frac{\rho v_2^2}{2} + \rho g \Delta h$$

从实际流体的伯努利方程可知, 黏性使流体在流动过程中产生阻力, 其主要以压力损失的形式消耗能量, 能量损失 Δh 是影响管路压力变化的一个重要因素。

3. 动量方程

在液压系统中, 常把刚体力学中的动量方程转化为流体流动的动量方程, 即

$$R = \frac{m(v_2 - v_1)}{t} = \rho Q(v_2 - v_1) = \frac{\gamma Q}{g}(v_2 - v_1) \quad (1-9)$$

式中: R 为作用于流体上的外力; m 为流体质量; ρ 为流体密度; Q 为流量; v_2 为外力作用以后的流速; v_1 为外力作用以前的流速。

动量方程说明, 作用于流体上的外力, 等于流体在单位时间内的动量变化量(增量); 反之, 如果流体动量发生了变化, 则流体受到新的外力。动量方程主要用来求解液体与限制其流动的固体壁(如各种阀)之间的相互作用力的大小和方向。

例 1-1 如图 1-3 所示, 在稳定流动中, 导管内的流体以速度 v_0 垂直射向挡板, 应用动量方程, 则挡板所承受的液动力 R_y 为

$$R_y = -R = -\rho Q(v_2 - v_1) = -\rho Q(0 - v_0) = \rho Q v_0 \quad (1-10)$$

可见, 液动力 R_y 的大小与管内流量 Q 和平均流速 v_0 的乘积成正比。

例 1-2 如图 1-4 所示, 当滑阀打开通油孔后, 液体流经通油开孔的速度为 v , 其方向角为 θ , 流量为 Q , 则滑阀受到的轴向液动力 R_y 为

$$R_y = -\rho Q v \cos \theta \quad (1-11)$$

4. 圆管流公式

实验证明, 液体在圆管内的流动状态分为层流和紊流两种, 用雷诺数判定为

$$Re = \frac{vd}{\nu} \quad (1-12)$$

式中: v 为流速; d 为圆管直径; ν 为液体的运动黏度。

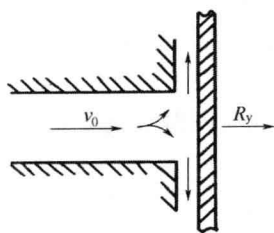


图 1-3 射流作用的挡板

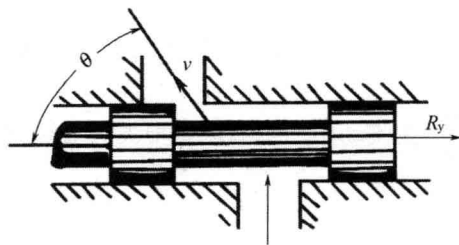


图 1-4 滑阀

实验表明,液流由层流转变为紊流的临界雷诺数约为

$$Re_{\text{临界}} = 2300 \sim 2320$$

当 $Re < 2320$ 时,为层流。

当 $Re > 2320$ 时,为紊流。

在飞机液压系统中,大多数液压泵的吸油管路多属于层流流动,高压油路和回油路多属于紊流,个别地段为层流。

由流体力学可知,层流时圆管截面上的速度分布成抛物线形,设抛物线上某点(半径为 r 处)的流速为 u ,圆管长度 l 两端之间的压力差为 $p_1 - p_2 = \Delta p$,则有下列式,即

$$u = \frac{\Delta p}{4\mu l} \left[\left(\frac{d}{2} \right)^2 - r^2 \right] \quad (1-13)$$

式中: d 为圆管直径; μ 为动力黏度。

在液流中心轴线上流速为最大(R 为圆管半径):

$$u_{\text{最大}} = \frac{\Delta p}{4\mu l} R^2 = \frac{\Delta p d^2}{16\mu l} \quad (1-14)$$

流量为

$$Q = \int_0^{\frac{d}{2}} u^2 \pi r dr = \frac{\pi d^4}{128\mu l} \Delta p \quad (1-15)$$

平均流速为

$$v = \frac{Q}{\frac{\pi d^2}{4}} = \frac{d^2}{32\mu l} \Delta p \quad (1-16)$$

长度 l 上的压力差(压力损失)为

$$\Delta p = \frac{32\mu l v}{d^2} = \frac{128\mu l}{\pi d^4} Q \quad (1-17)$$

若引入管道摩擦系数 λ , $\gamma = \rho g$, 则压力损失 Δp 通常写成

$$\frac{\Delta p}{\gamma} = \lambda \frac{l}{d} \frac{v^2}{2g} \quad (1-18)$$

此式可适用于层流和紊流,但 λ 应取不同数值。

层流时,取 $\lambda = \frac{64}{Re}$ (实用上取 $\lambda = \frac{75}{Re}$);

紊流时,取 $\lambda = 0.3164 Re^{-\frac{1}{4}}$ (经验公式)。

实际应用时,通常用实验方法测定 λ 值。

5. 小孔节流公式

设圆管中的压力、流速、横截面积分别为 p_1 、 v_1 、 F_1 ,节流小孔处的压力、流速和横截面积分别为 p_2 、 v_2 和 f_2 ,因为小孔很小,即 $f_2 \ll F_1$,所以 $v_2 \gg v_1$ 。

根据伯努利能量方程,可得

$$\frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{p_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} \quad (1-19)$$

因为 $v_2 \gg v_1$,忽略 v_1 ,则上式为

$$\frac{p_1}{\gamma} = \frac{p_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} \quad (1-20)$$

节流小孔处的流速为

$$v_2 = \sqrt{\frac{2g}{\gamma} \Delta p} \quad (1-21)$$

式中: Δp 为小孔前后的压差,有

$$\Delta p = p_1 - p_2$$

实验证明,小孔处的实际流速比上述推导出的流速要小,故引入一个速度修正系数 ϕ ,即

$$v_2 = \phi \sqrt{\frac{2g}{\gamma} \Delta p} \quad (1-22)$$

此外,液流流出小孔时还有一种射流收缩现象,即 $f_2 < f$,取 $f_2/f = \psi$,称为截面收缩系数,所以小孔处的实际流量为

$$Q = f_2 v_2 = \psi \phi f \sqrt{\frac{2g}{\gamma} \Delta p} = c f \sqrt{\frac{2g}{\gamma} \Delta p} = c f \sqrt{\frac{2}{\rho} \Delta p} \quad (1-23)$$

式中: c 为流量系数,与孔口结构形状和工作液体的性质有关,由实验测定,对于水 $c \approx 0.61$,对于液压油 $c \approx 0.6 \sim 0.7$; f 为小孔截面积。

流量系数在物理概念上有两层含义,包括液体摩擦引起的速度修正和射流截面收缩的修正。

6. 间隙流公式

液压装置的各零件之间,特别是具有相对运动的零件(如柱塞与衬筒)之间,需有一定的间隙,并且不安置密封装置。流过间隙的液压油流量就是间隙泄流流量。通常间隙通道狭窄,液流流速低且受壁面影响大,故间隙内的流态为层流。液压系统中常见的间隙流动有以下几种情况:

1) 平缝流

图 1-5 所示为平缝流,取坐标轴 x 和 y ,作用在一个长 dx 、高 dy 而宽 $b=1$ 的液流微元体上,侧表面 dx 上的摩擦力和端面 dy 上的压力沿轴向的平衡方程为

$$pdy + \tau dx - (p + dp)dy - (\tau + d\tau)dx = 0$$

简化上式得

$$\frac{dp}{dx} = \frac{d\tau}{dy} \quad (1-24)$$

将液体的内摩擦切应力表达式 $\tau = -\mu \frac{du}{dy}$ 代入,经变换可得

$$\frac{dp}{dx} = -\mu \frac{d^2u}{dy^2} \quad (1-25)$$

将上式积分并经运算后,得平缝某点的流速公式为

$$u = \frac{\Delta p}{2\mu l} \left(\frac{h^2}{4} - y^2 \right) \quad (1-26)$$

式中: h 为平缝隙的高度; y 为纵坐标; μ 为动力黏度; l 为平缝隙宽度; Δp 为平缝隙两端压力差。

当 $y=0$ 时,便得平缝中心线上的最大流速为

$$v_{\text{最大}} = \frac{\Delta p h^2}{8\mu l} \quad (1-27)$$

平缝间通过的流量 Q 为

$$Q = \frac{bh^3}{12\mu l} \Delta p \quad (1-28)$$

式中: b 为平缝侧向宽度。

平缝间的平均流速为

$$v_{\text{平均}} = \frac{h^2}{12\mu l} \Delta p \quad (1-29)$$

由上式可知,平缝流量与缝隙高度的立方成比例,即缝隙的大小对流量(或泄漏量)影响很大。

平缝轴线方向上的压力分布式为

$$\Delta p = \frac{12\mu l}{bh^3} Q \quad (1-30)$$

即平缝进出口之间的压力差($\Delta p = p_1 - p_2$)与进出口的距离 l 成正比。

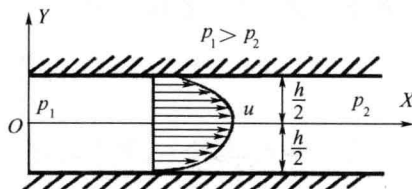
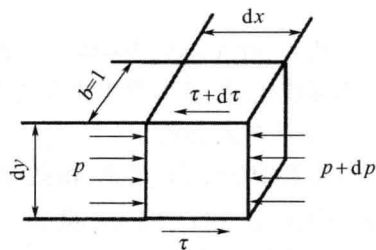


图 1-5 液体在平面间隙中的流动