

液压流体力学

〔日〕竹中利夫 浦田暎三 著

科学出版社

液 压 流 体 力 学

〔日〕竹中利夫 浦田暎三 著

温立中 贺正辉 译

科 学 出 版 社

内 容 简 介

本书全面地论述了与液压技术有关的流体力学和水力学问题。较好地运用了流体力学中的一些基本理论,如边界层理论、势论、流体波动理论等解释和分析了液压技术中的实际问题。特别是有关“阀动力学”、液压技术中的过滤理论和气蚀等问题,本书阐述的比较详尽。

为了提高液压元件和液压系统的性能,必须深入研究作为工作介质的液压流体在液压元件和液压系统中的运动规律。但是有关这方面的文献,以往多散见于杂志、学报和论文集中,而全面系统的专著几乎还没有。竹中利夫和浦田暎三所著的《液压流体力学》一书,正是弥补了这方面的不足。

读者对象: 流体动力的科研工作者和大专院校流体动力专业的师生。

竹中利夫 浦田暎三 著

油 力 学

養賢堂, 1973

液 压 流 体 力 学

〔日〕竹中利夫 浦田暎三 著

温立中 贺正辉 译

*

科 学 出 版 社 出 版

北京朝阳门内大街 137 号

中 国 科 学 院 印 刷 厂 印 刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1980 年 1 月 第 一 版 开本: 787 × 1092 1/32

1980 年 1 月 第一次印刷 印张: 10 3/8

印数: 0001—16,600 字数: 234,000

统一书号: 15031 · 259

本社书号: 1619 · 15—3

定 价: 1.10 元

译 者 序

为了提高液压元件和液压系统的性能,必须深入研究作为工作介质的液压流体在液压元件和液压系统中的运动规律。但是有关这方面的文献,以往多散见于杂志、学报和论文集中,而全面系统的专著几乎还没有。竹中利夫和浦田映三所著的“液压流体力学”一书,正是弥补了这方面的不足。

本书全面地论述了与液压技术有关的流体力学和水力学问题。较好地运用了流体力学中的一些基本理论,如边界层理论、势论、流体波动理论等解释和分析了液压技术中的实际问题。特别是有关阀的流体动力学问题,如:阀的动量理论、流量系数、阀的振动等,作者不仅给出了理论上的较详尽的分析,而且收集、总结了大量实验资料,这实际上就构成了“阀动力学”的主要内容;另外作者参照其它学科,以较大的篇幅详细论述了液压技术中的过滤理论和气蚀等问题,为进一步研究液压技术中的新课题提供了一定的方法。

本书日文原名为“油力学”,为符合我国习惯,中译本取名为“液压流体力学”。在翻译过程中,原文较明显的错误,就译者能力所及做了更正,有些为慎重起见,加了译注。

由于译者业务能力所限,译文中错误之处在所难免,敬希读者指正。

译 者
1978.5

35039

原 著 者 序

最近液压技术的进展非常惊人，所制造和使用的液压元件和装置，种类繁多，而液压技术的应用范围也正在进一步扩大。所以，研究液压元件及装置的特性和性能时，或者设计和制造液压元件及装置时，就需要许多工程学方面的知识。对于液压元件及装置来说，在工程学方面应具备的基础知识，大致有流体力学、机械力学和机械材料等学科。

本书将重点放在液压技术所应用的流体力学方面，讲述流体力学的概念和分析方法，并介绍目前有关这方面的研究水平。本书是大学工学院机械系学生的教科书和参考书，同时也是液压技术人员巩固和提高自己知识的参考书。

随着液压技术的进展，近年来国内外有关“液压”的书籍确实不少，但这些书籍的大多数，是讲述液压元件及装置的构造、性能和使用方法，还未看到从力学角度分析液压技术的书籍，而这正是液压技术的基本知识之一。

更具体地说，本书的目的是要重点叙述液压元件和装置内部油的流动，对于前面提到的读者来说，本书将给予他们理解液压元件和装置的性能，以及设计和制造液压元件和装置方面的一些辅助知识，实际是极为重要的知识。

一般认为液压技术是流体工程学的一个新兴领域，因此就提出了流体力学如何与之结合的问题。著者学识浅薄，难以回答这一问题，但作为一种尝试，想在“液压流体力学”这一书名下，提出液压技术中流体力学的各种问题。

本书有许多缺点，如写的不足之处，或冗长、粗糙和偏见

之处等。读者中如有体谅著者上述意图者，著者则深感安慰。另外著者学识浅薄，书中深恐有误解和错误之处，敬希读者指正。

编写本书时，引用了国内外许多论文和书籍作为参考，这些论文和书籍均附于各章之末，在此谨向这些作者表示感谢。

最后再说一句，本书的大部分内容，虽是一年前以“液压流体力学”为题，在养贤堂发行的“機械の研究”杂志上连载14回的修订和补充，但著者想把这些内容汇编成书的愿望，欣然得到及川锐雄常务董事为首的养贤堂书店诸同事们的同意，他们并在出版时给予了大力帮助，在此谨表示深切的谢意。

另外本书在校正时，得到东京工业大学研究院硕士班学生明石光生的帮助，在此顺表谢意。

著 者

目 录

第一章 绪论, 液压技术与流体力学	1
§ 1.1 引言	1
§ 1.2 水静力学定律和水压机	2
§ 1.3 水压蓄能器和静水压的利用	3
§ 1.4 早期的高速高压泵	6
§ 1.5 能量传递和液压传动	9
§ 1.6 今日概观	10
§ 1.7 液压流体力学的提出	12
第二章 实际流体与理想流体	14
§ 2.1 实际流体与理想流体	14
§ 2.2 欧拉 (Euler) 方程式	15
§ 2.3 连续方程式	19
§ 2.4 伯努里 (Bernoulli) 定理	21
§ 2.5 二维势流	24
§ 2.6 纳维斯托克斯 (Naver-Stokes) 方程式	28
第三章 液压阀的动量理论	36
§ 3.1 流体的运动	36
§ 3.2 动量理论	38
§ 3.3 控制体积	43
§ 3.4 滑阀的轴向力	46
§ 3.5 圆锥阀的轴向力	51
§ 3.6 圆板阀的轴向力	56
第四章 管流动力学	63
§ 4.1 管道的动特性	63
§ 4.2 基本方程式及波传播的分析方法	64

§ 4.3	考虑粘性的情况	71
§ 4.4	基本方程的解法	76
§ 4.5	有周期性变动的流动	81
§ 4.6	非压缩流体的脉动流	81
§ 4.7	频率响应	89
§ 4.8	管材的弹性影响	94
第五章	平板间的流动	99
§ 5.1	缝隙流动	99
§ 5.2	Couette 流及其例题	100
§ 5.3	缝隙宽度有变化的情形	103
§ 5.4	二维缝隙流	106
§ 5.5	边界层	114
§ 5.6	考虑起始段的情形	116
第六章	径向缝隙流动	122
§ 6.1	径向流动	122
§ 6.2	边界层理论在径向流动中的应用	126
§ 6.3	流函数解法	132
第七章	环形管流	137
§ 7.1	静止的偏心环形管流	137
§ 7.2	有锥度的偏心环形管流	140
§ 7.3	缝隙宽度比较大的情形	144
§ 7.4	考虑起始段的情形	145
§ 7.5	液压元件中的缝隙流动小结和存在问题	153
第八章	通过多孔物质的流动	156
§ 8.1	通过过滤器的流动	156
§ 8.2	空隙率及其测定方法	157
§ 8.3	达西定律, 多孔物质内的流动	163
§ 8.4	滤饼理论, 滤渣的阻力	168
§ 8.5	颗粒与颗粒群	170
§ 8.6	其它问题	174

第九章 液压管道中的压力损失	176
§ 9.1 损失系数	176
§ 9.2 管摩擦	177
§ 9.3 弯管内的流动及其压力损失	181
§ 9.4 异径管的损失系数	191
§ 9.5 分支、合流的损失	193
§ 9.6 终结	194
第十章 阀的流量系数	197
§ 10.1 阀的流量系数	197
§ 10.2 圆锥阀内的势流	198
§ 10.3 滑阀内的势流	205
§ 10.4 阀的流量系数和阻力系数的关系	212
§ 10.5 圆锥阀流量系数的理论公式	215
§ 10.6 圆锥阀的流量系数	220
§ 10.7 其它的阀	228
第十一章 气泡与气蚀	231
§ 11.1 油中的气泡	231
§ 11.2 掺混与溶解	232
§ 11.3 掺混有气泡的油的性质	237
§ 11.4 气泡力学	242
§ 11.5 气蚀	250
§ 11.6 液压泵中的气蚀	251
§ 11.7 执行元件中的气蚀	254
§ 11.8 其它气蚀	260
第十二章 射流	266
§ 12.1 射流	266
§ 12.2 自由射流	267
§ 12.3 半射流	278
§ 12.4 附壁射流的分类	283
§ 12.5 理想流体的附壁射流	285

§ 12.6	层流附壁射流	289
§ 12.7	紊流附壁射流	293
§ 12.8	射向气体中的液体射流	300
第十三章	阀的振动	306
§ 13.1	阀的振动	306
§ 13.2	与管道的共振	307
§ 13.3	稳定界限的计算	312
§ 13.4	振动的防止	318

第一章 绪论, 液压技术与流体力学

为了认识流体力学在液压技术中的作用, 需要概观技术或工程的背景。本章将按照液压技术的发展过程, 在“液压流体力学”的名称下, 提出液压技术中的各种力学问题。

§1.1 导 言

水力学和流体力学这一领域在装置设计和动力应用方面的进展, 是本世纪工程发展的显著特点之一。在详细论述以上水力学和流体力学之前, 需要回顾一下它们成为廿世纪巨大进展的历史背景。

研究流体运动的学科有水力学、水文地理学和流体力学。水力学有时也定义为“通过管道输送水的科学”, 但是水力学不仅讨论水系, 而且还讨论以水、油或合成流体为介质的力学系统, 所以水力学不仅包括液体的输送, 而且还包括着动力的传递或输送等。亦即包括液体静止时的水静力学和液体运动时的水动力学。

对于液压元件和液压装置来说, 以往从利用油的静压这一观点出发, 水力学的有用范围主要是水静力学。但是要论述液压元件内油的流动(如泵和马达内的流动、液压阀内的流动、管道内的流动等), 以及要考虑油的流动和流动力而进行元件的设计时, 就必须广泛地应用水动力学方面的知识。此外, 利用流体联轴节和液力变矩器这类装置的动力传递, 就更需要认真的作水动力学方面的分析。

其次,流体力学是用理论和数理的方法、二维或三维的分析流体内诸量的平衡、流体的流动以及物体在流体中运动时所受到的阻力等。

§1.2 水静力学定律和水压机

水力学的发展是较为近代的事情。但水力学的原理和应用,却在古代就为人们所熟悉。也就是说,公元前 255 年左右阿基米德(公元前 287—212)就发现了水静力学原理;伽利略(1564—1642)就研究了水动力学的基本问题。

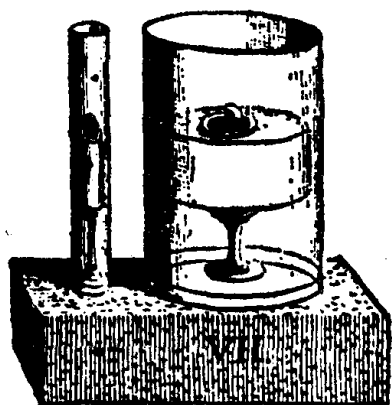


图 1.1 帕斯卡的增力机械

物理学中基本原理的发现或机械装置的发明在 15 和 16 世纪时就很盛行^[1]. 17 世纪时,法国哲学家和数学家帕斯卡(1623—1662)发现了解释近代一切水静力机械或装置的基本原理——“水静力学定律”。也就是说,帕斯卡根据许多实验结果,发现了“一根水柱顶千斤”这一

事实。帕斯卡将它称为“增力机械”。图 1.1 说明增力机械的增力原理。

帕斯卡对水静力学定律是这样说的:

- (1) 在边界面上,静止流体的压力垂直作用于该面;
- (2) 静止流体中任一点的压力各向均等;
- (3) 若不计及重力,则静止流体中各点的压力相等。

帕斯卡的研究大约经过 150 年才应用于实践。在此期间,唯一实用的水力机械,就是把水从井内或建筑物底层抽汲

到高处所使用的原始泵。

英国约克州(Yorks)一位农民的儿子约瑟夫·布拉曼(Joseph Braman)因身体病弱没有继承父亲的事业,而当了傢俱师的学徒。他学习了工具的使用,很快地熟悉了机械装置,并发现许多工具有改进的必要。

布拉曼由于助手亨利·莫斯利(Henry Maudsley)的帮助,在水压机方面获得了实用性的成功,并在1795年以此获得第一次专利。莫斯利是“自动密封环”的发明者。水力抽汲机用了这种密封环,无论在什么压力下工作均不漏水,并且在压力减小时能够自动返回。

布拉曼获得专利(No. 2045)的水压机,是由简单的手动泵供给压力水的,但以后的水压机是由转速50—60转/分蒸气驱动的往复泵来供给压力水的,这虽比手动泵有了较大的输出流量,但其往复速度仍然很慢,只能用在对往复速度要求不高的地方,比如用于从植物种子中榨油(图1.2)。

§1.3 水压蓄能器和静水压的利用

在19世纪40年间,流体动力的产生和配给方式几乎没有有什么进步。

阿姆斯特朗勋爵(Lord Armstrong)是设计高压水力机械的先驱。1845年威廉·阿姆斯特朗(William Armstrong)作了“用水柱作为推进机械动力”的讲课。他在英国新城(Newcastle)的一次讲课中,展示了用城市自来水推动的起重机模型^[2]。次年,他又在新城制作了用于码头的液压起重机,由于这一惊人的成功,使向他订购液压起重机的人蜂拥而至(图1.3)。这些起重机都是由水头——即贮存在高于操作机械的流体势能来工作的,1849年因城市干管的水头达不到所需要

的压力，阿姆斯特朗必须在水压不足的地方为起重机寻找流体动力源。为此，他采用了空气容器，即把空气充入两端密封的铸铁筒内，当水灌入容器内时，空气就被压缩。空气压力按照起重机工作的需要，再将水从容器排出。这样，空气容器就与能量供给源分离，成为一个应需的动力源。这种形式当时虽还不够完善，但却是今日气-液蓄能器的雏型。

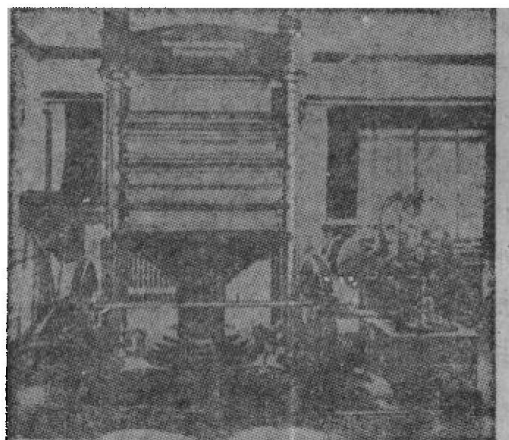


图 1.2 布拉曼制作的水压机

为了改进这种蓄能器，阿姆斯特朗又研究了其它形式的蓄能器。即在原有的蓄能器内安装了铸铁做成的油缸，并在油缸的活塞上装有可变重量的重物。这与近代的重力式蓄能器几乎没有什么不同(图 1.4)。

19 世纪的流体动力不仅是增力的手段，而且是高效率将动力向远处输送的手段。在 1850—1860 年间，英国的几个大城市设立了私营或公营的水泵厂，敷设了向很多工厂传递水力的管网，于是人们对流体动力更为重视，并开始试制水力机械或装置^[3,4,5]。

1886 年英国成立了伦敦水动力公司，为了向工业和其它消费者供应动力，建立了中央水动力站。这就是伦敦电力供

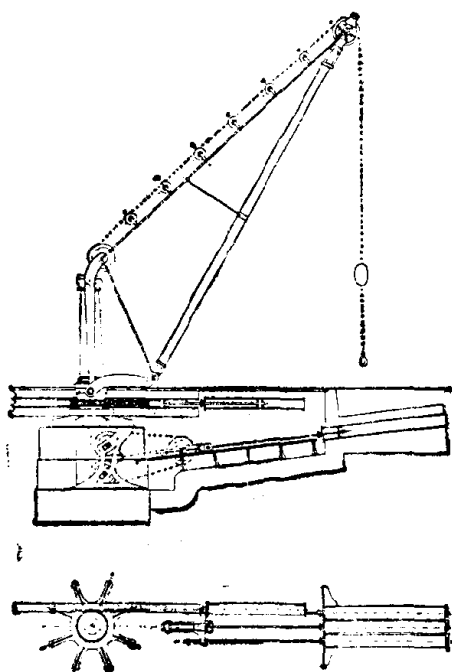


图 1.3 阿姆斯特朗的液压起重机

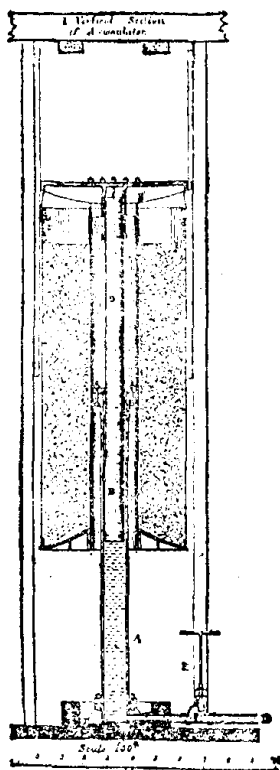


图 1.4 阿姆斯特朗的蓄能器

应公司建立前数年的情况。据说这些机构的大多数今日仍很兴旺。

虽然流体动力供应公司现在还进行着不可估量的工作，但从当时来看，由于 19 世纪末各种发动机或机械控制装置的研制，巨大电力的产生，以及其它动力应用的急剧发展，流体动力的作用是衰退了。也就是说，这是因为电气动力或发动机的动力比流体动力效率高而且易于控制，特别是电气动力即使在遥远的地方也能很经济地传送动力的缘故。

高效率的小型电动机的改进和生产，以及它在各种机械的广泛应用，是今日高速高压泵出现的基础。

因此第一次世界大战（1914—1918）后，液压的大力应用

再一次被人们所重视。当时妨碍液压元件进展的密封问题部分地被解决了,而且流体介质已开始用油或空气。1920年以后进展更为迅速,流体动力的需要更加增长,于是流体动力就得到很大的发展。

§1.4 早期的高速高压泵^[6,7]

液压元件大约在19世纪末20世纪初的20年间才开始进入正规的工业生产阶段。早期生产的高速高压泵是为了研制液压传动装置而产生的。当时最引人注目的是霍尔(J. W. Hall),他设计了闭回路的可变动力传动装置。这种装置为差动形,采用了径向配置有三个油缸的泵和马达。水的流量不是随传动机构的转速成正比的增加,而是借助于变量泵与流体传动装置的组合,使泵打入马达的压力水的流量与传动机构的转速成反比。于是马达以最低转速回转时,流量最大(参阅图1.5, 1.6)。后来彼特勒(Pittler)制成了由叶片泵和叶片马达组合的传动装置。此外林兹(Lente)设计了定量泵与定

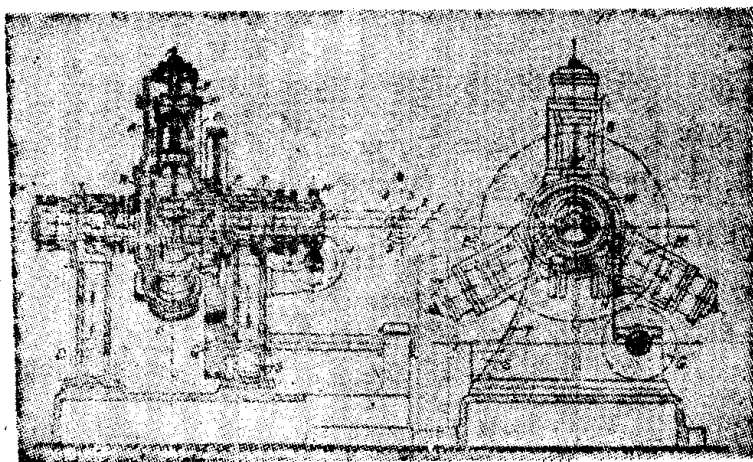


图1.5 霍尔的变量泵

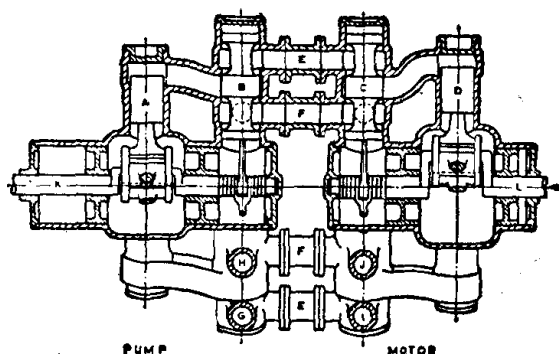


图 1.6 霍尔的动力传动装置

量马达组合的装置，为了变速，他在传动装置内装有控制阀，如图 1.7 所示。

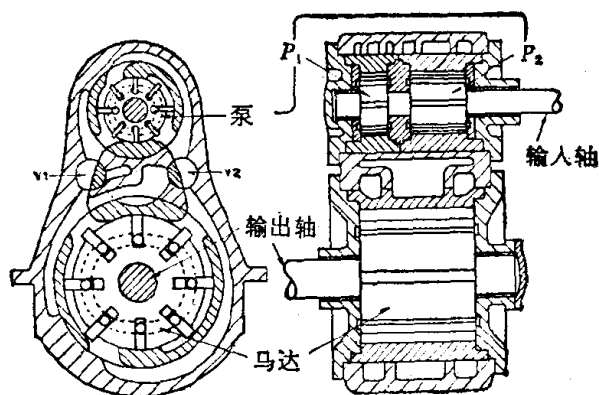


图 1.7 林兹式动力传递装置

图 1.8 为曼利(Manly)式动力传动装置。这种传动装置在入口和出口处设置有五个径向油缸和柱塞式控制阀。

瓦特堡 (Waterbury) 传动装置是美国康奈尔大学教授哈维·威廉斯 (Harvey Williams) 与技师雷诺斯·詹尼 (Reynolds Janney) 在 1901—1906 年共同研究，由瓦特堡工具厂制造的 (图 1.9)。1906 年利用这种传动装置替代电气式炮身控制装置 (发电机-电动机组)，在美国军舰弗吉尼亚号举起 12 英寸