



普通高等教育“十五”国家级规划教材

流体力学

下册

丁祖荣 单雪雄 姜楫 编著



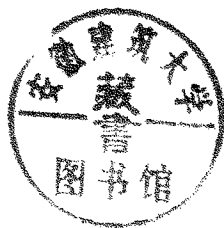
高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS

普通高等教育“十五”国家级规划教材

流体力学

下 册

丁祖荣 单雪雄 姜 楫 编著



高等教育出版社

内容简介

本教材是普通高等教育“十五”国家级规划教材,分上、中、下三册,内容包括绪论篇、基础篇、专题篇、应用与进展篇,共15章。绪论篇综述流体力学在推动社会和科技发展中的重要作用;基础篇围绕流体力学三大要素(流体、运动和力),介绍各专业共同必须具备的力学概念、观点、基本理论和分析方法;专题篇介绍运用基本理论与方法对五个专题不同类型流动问题的分析和求解过程,及有代表性的结果;应用与进展篇介绍流体力学在三个工程领域中的应用,及在计算流体力学和流体测量技术等领域的进展。

本书为下册(应用与进展篇),内容包括:管路系统、流体机械、流体测量、计算流体力学。

本教材可作为高等学校热能与动力工程、核技术与核工程、暖气与通风工程、机械工程等专业本科生的教材,也可供土木工程、化学工程、环境工程、水利工程等专业本科生和有关工程技术人员参考。

本教材配有《流体力学电子教案》和《流体力学网络课程》。

图书在版编目(CIP)数据

流体力学. 下册 / 丁祖荣, 单雪雄, 姜楫编著. —北京: 高等教育出版社, 2003. 12

ISBN 7-04-011856-4

I. 流... II. ①丁... ②单... ③姜... III. 流体力学-高等学校-教材 IV. O35

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 067424 号

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街 4 号
邮政编码 100011
总 机 010-82028899

购书热线 010-64054588
免费咨询 800-810-0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>

经 销 新华书店北京发行所
印 刷 高等教育出版社印刷厂

开 本 787×960 1/16
印 张 12.25
字 数 220 000

版 次 2003 年 12 月第 1 版
印 次 2003 年 12 月第 1 次印刷
定 价 14.90 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

序 言

本教材为准备学习流体力学基础知识的工程专业本科生编写。对这类学生来说,他们需要跨越一条存在于专业需要和自身知识结构之间的沟壑。几乎所有的工程专业直接或间接都与流体力学有关系,随着科技的发展和计算机软件的普及,各类工程专业对流体力学知识的需求日趋增长。另一方面,大多数学生对流体运动的感性认识明显的比对固体运动贫乏。本教材的宗旨是帮助这些学生顺利跨越这道沟壑,使其正确掌握能面向新世纪要求的流体力学知识。

在世纪之交,流体力学教学面临来自两方面的挑战:一是流体力学学科进入了一个新的发展时期。主要表现在流体力学的分析手段更为先进,处理流动问题的能力更为强大,对流体运动的认识更加深刻;流体力学与工程技术的结合不再局限于两个专业之间的简单合作,而是进入了相互融合的阶段;流体力学与其他学科领域的交叉渗透进一步深入和扩大等。为了适应这些变化,要求教材的体系和内容必须作相应调整和更新。二是教学课时压缩。在保证基本内容和适当增加扩展内容的前提下,要求教材在内容编排上更加科学合理,叙述精练准确,有利于学生自主学习,并加强多种媒体形式的辅助教学等。根据以上要求,本教材在以下几方面作了探索:

(1) 改变传统模式,建立新的内容体系。将全书分为绪论篇、基础篇、专题篇和应用与进展篇四部分,约 200 个知识点。绪论篇综述了流体力学在推动社会和科技发展中所起的重要作用;基础篇围绕流体力学三大要素(流体、运动和力)介绍各专业共同必须具备的基本概念、观点、理论和方法;专题篇介绍运用基本理论和方法对五个不同类型流动问题的分析求解过程和有代表性的结果,供不同专业选用;应用与进展篇介绍流体力学在三个工程领域中的应用,及在计算流体力学和测量技术等领域中的进展。

(2) 改变传统结构,建立枝状开放式结构。将全书分为四个层次,各层次均具有相对独立性和可扩展性。如在 B 篇下,B1 相当于章,B1.1 相当于节,B1.1.1 为知识点。例题以知识点名标号排序(第一道与知识点同名,第二道起分别加 A,B,C 等);习题以节名标号排序。补充新的例题或习题均不打乱其他知识点或节中例题或习题的排序。

(3) 注重物理阐述,引导学生建立正确的物理概念和力学模型。这一点对

工科学生应用流体力学知识解决本专业问题,及学习与运用流体力学计算软件时尤为重要。考虑到工科专业的特点,简化公式的推导过程,强调知识点的工程背景、分析的思路、结果的物理意义和如何运用等;对一些概念提出新的解释或表述,并充分运用图片、图表及多媒体手段介绍丰富的流动现象、流动模型,帮助学生理解各种概念和公式的物理本质。

(4) 注重研究方法的介绍和归纳。为适应现代计算机数值计算的发展和应⤵用,在基础篇中加强了微分分析的内容,引入速度场、加速度场、压强场等概念;一开始就以 $N-S$ 方程作为支配方程,专题篇各章中的运动方程均作为 $N-S$ 方程的简化情况直接导出;并在应用与进展篇中设章介绍计算流体力学的基础知识。设章集中介绍积分方法(控制体法),并加强了相似理论(模型实验)的内容,这两部分都是常用的工程研究方法。在专题篇中按内流和外流分别设章,每一类包含多种流动形式,有利于掌握它们的共性。

(5) 注重培养学生的应用和创新能力。注意介绍在流体力学发展过程中的应用和创新事例;在基础篇和专题篇中通过例题介绍流体力学的各种应用;在应用与进展篇中较为系统地介绍流体力学在三个工程领域中的应用,并介绍流体力学的新进展及与其他学科的交叉渗透,培养学生的创新和拓展意识。

(6) 有利于学生自主学习。例题具有典型性、实用性和前后连贯性,每道例题标有反映相关知识点内容的标题,以便于检索;习题按节标号排序,以利于学生自主选择;本书还配有网络版,供学生自主学习。

(7) 关于沿用“无量纲量”的说明。如何称呼所有量纲指数都等于零的量,至今仍是个有争议的问题。国标 GB3101-93 指出“所有量纲指数都等于零的量往往称为无量纲量”,也称为“量纲为一的量”。本教材采用“无量纲量”的提法。

本教材的主要使用对象是非力学类工程专业的本科生,如动力、能源、暖通、机械及相关专业的本科生。多学时课程以前三篇内容为主,应用与进展篇内容可选讲或作为学生自学用;少学时课程则只讲基础篇,及选专题篇部分章节。

华中科技大学的莫乃榕教授担任本教材的主审,提出了许多有价值的意见和建议;上海交通大学流体力学教研室的资深教授朱世权、孙祥海、郑国桦、吴君朋等分别审阅了部分章节,提出过许多宝贵的意见和建议;上海交通大学机械动力学院杜朝辉教授提供了宝贵资料,在此表示衷心感谢。高级工程师于乃华承担了几乎全部书稿的打印工作,研究生张可丰承担全部书稿的编辑排版和部分绘图工作,陈平汉、谢其军参加部分绘图工作,张景新(博士生)和王勇协助例题和习题的校对工作等,在此也一并致谢。最后要感谢家人对作者的支持和鼓励。

作者试图为读者提供一本讲解简练、内容较为丰富的流体力学基础教材,限于作者水平,再加上时间仓促,书中必存在不当和谬误之处,恳请专家与读者不

客指正,帮助作者及时修正。

作 者

2003年7月于上海交通大学

下册目录

应用与进展篇

D1 管路系统	2
D1.1 引言	2
D1.2 简单管路	3
D1.2.1 简单长管经验公式	4
D1.2.2 简单管路计算举例	5
D1.3 复杂管路基本类型	9
D1.3.1 串联管路	9
D1.3.2 并联管路	10
D1.3.3 枝状管路	12
D1.4 网状管路	14
D1.4.1 哈迪克罗斯方法	16
D1.5 水击	19
D1.6 二次流	24
D1.7 动脉管路流动特点	29
D1.7.1 直圆管脉动流	31
D1.7.2 分叉管局部流动	33
D1.7.3 弹性管脉搏波	35
习题	37
D2 流体机械	41
D2.1 引言	41
D2.2 流体机械的分类	42
D2.2.1 动力机械与工作机械	42
D2.2.2 静力型(容积型)与动力型	43
D2.2.3 径流式、轴流式与混流式	44
D2.3 叶轮机械的基本理论	45

D2.3.1	欧拉涡轮机方程	45
D2.3.2	叶轮机械的特性曲线与性能参数	48
D2.3.3	相似准则	53
D2.3.4	比转数	55
D2.4	工作机械——泵与风机	59
D2.4.1	泵在管路系统中的运行	59
D2.4.2	泵的特性曲线对运行稳定性的影响	61
D2.4.3	风机的特性曲线与运行工况	62
D2.4.4	泵与风机运行工况的调节	63
D2.5	动力机械——涡轮机	65
D2.5.1	水力涡轮机	65
D2.5.2	风力涡轮机	69
D2.6	水力机械的汽蚀与预防	72
D2.6.1	水泵空化的发生	72
D2.6.2	汽蚀余量	73
D2.6.3	汽蚀判别与预防	74
	习题	75
D3	流体测量	79
D3.1	引言	79
D3.2	流体粘度测量	80
D3.3	流体压强测量	84
D3.3.1	液柱式测压计	84
D3.3.2	压敏元件测压计	87
D3.3.3	测压探头	89
D3.4	流体速度测量	90
D3.4.1	普通测速方法	90
D3.4.2	热线测速仪	92
D3.4.3	激光多普勒测速仪	94
D3.4.4	粒子图像测速技术	97
D3.5	流量测量	100
D3.5.1	直接与间接测量法	101
D3.5.2	速度面积法	102
D3.5.3	压差式流量计	104
D3.5.4	线性效应流量计	108
D3.6	流动显示技术	111
D3.6.1	外加示踪物质法	111

D3.6.2	光学法	114
D3.6.3	全息干涉法	120
D3.6.4	高速摄影技术	122
D4	计算流体力学	124
D4.1	引言	124
D4.2	平板层流边界层的数值解	126
D4.3	微分方程的有限差分近似	131
D4.4	差分格式的稳定性	137
D4.4.1	差分格式的依赖区域、决定区域和影响区域	137
D4.4.2	差分格式稳定性的分析方法	140
D4.4.3	Lax 等价定理	142
D4.5	几种常见的差分格式	142
D4.5.1	迎风格式	142
D4.5.2	Lax 格式和正型格式	143
D4.5.3	双曲型偏微分方程差分格式的稳定性及 CFL 条件	144
D4.5.4	差分格式的数值耗散	145
D4.5.5	隐格式	146
D4.5.6	多步显式格式	147
D4.5.7	TVD 格式简介	148
D4.6	拉普拉斯方程的差分解法	149
D4.7	有限体积法	152
D4.7.1	有限体积法基本思路	152
D4.7.2	有限体积法的数值离散举例	153
D4.8	计算流体力学应用举例	155
附录 H	计算程序	158
主要参考文献	165
习题答案	166
索引	167
例题索引	172

Synopsis	173
Contents	174
后记	176
作者简介	178



应用与进展篇

流体力学既是基础学科,也是应用学科,流体力学在解决众多的工程技术问题中起着重要的,甚至是关键性的作用。在基础篇和专题篇中通过例题已经介绍过流体力学的各种应用。本篇将以管路系统、流体机械和流体测量为例,较为系统地介绍流体力学在工程或科研领域中的部分应用。三者 in 流动方式、运用流体力学的目的和方法上各不相同。在管路系统中,流体沿管路作一维迁移运动,工作目的是为了运输流体,分析方法以推广的伯努利方程为主;在流体机械中,流动方式以在一局部区域内的旋转运动为主,工作目的是为了转换能量,分析方法以积分形式的动量矩方程和能量方程为主;在流体测量中,将流体力学原理灵活应用于各种测量仪器中,目的是为了给流体及其运动参数定量化。

流体力学既是古老的学科,又是随着时代的发展不断取得进展、充满活力的学科。流体力学的前进动力来自解决自然科学和工程技术问题的迫切需要,在解决这些问题的过程中自身得到丰富和发展。在 20 世纪特别是下半叶,流体力学取得了引人注目的进展。在工程技术领域中,这种进展表现为如下特点:

(1) 与工程技术的结合更加紧密。例如在过去 50 年内,由于流体力学和相关技术的发展,流体机械中叶轮机的设计有了很大改进,工作效率提高约 30%,相当于每年节省电费约 5000 亿美元。动力机械效率的进一步提高要求流体力学的研究和应用有新的突破(参见 D2)。

(2) 与计算机的结合更加紧密。自从将计算机技术引入流体力学后,流体力学计算如虎添翼。过去无法解析的流体力学方程现在可以计算求解了,用计算流体动力学(CFD)可对复杂流场进行数值模拟,对涡轮机叶片这样复杂的型线进行优化设计等。本篇将介绍计算流体力学的基本知识(参见 D4)。

(3) 与其他学科互相渗透,建立新兴交叉学科。如生物流体力学(参见 D1.6)、环境流体力学、电磁流体力学等。

(4) 发展新的实验方法和测量技术(参见 D3)等。

本篇无意对流体力学的进展作全面总结,读者可从相关内容的简介中窥豹一斑。

D1 管路系统

D1.1 引言

在 C3 中曾讨论了直管道中的沿程损失和管件的局部损失,这些均属于单个管道部件的损失计算。实际工程中将这些部件组成管路系统,简称管路,就像电子或电器元件组成电路一样(图 D1.1.1)。城市自来水供水系统是典型的工程管路系统。供水系统通常分为动力(泵站、高水位水库或水箱)、输运(管道系统)和用户(终端设备和出水口)三部分。本章讨论的管路系统主要指输运部分,也可以包括动力,但不涉及用户。对管路的设计和计算称为管路计算。工程上的管路计算涉及的范围很广,包括不可压缩流体(如水)和可压缩流体(如空气)的定常流动和不定常流动,及动力、能源、管道材

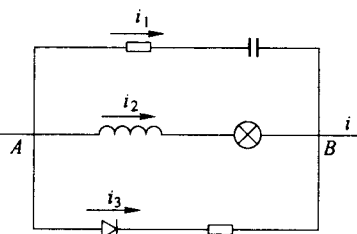


图 D1.1.1

料、成本的工程设计和计算等。作为基础教材,本章的前半部分以讨论不可压缩流体的定常流动为主,主要涉及水头损失、流量、管道长度、直径等计算,简称为管路水力计算。管路水力计算是将流体力学基础理论,特别是涉及管道内流动的理论和方法应用于工程实际的典型例子之一。

按结构分类,管路可分为简单管路和复杂管路,前者指一根等截面管分成数段,中间连接各种管件组成的管路;后者是指用许多简单管路通过各种连接方式组成的管路系统。按连接方式分类,复杂管路可分解成三种基本类型:串联管路、并联管路和枝状管路,如图 D1.1.2a,b,c 所示。通常将两根以上管子的连接点称为节点。如图 D1.1.2b 中的 A,B 点。对这三种基本类型的流体力学分析构成复杂管路水力计算的基础。按管内流束是否形成回路,管路系统又可分为枝状系统和网状系统。

按能量损失分类,工程上将管路可分为长管和短管两种,前者是指局部损失远小于沿程损失,因而计算中忽略局部损失,只计沿程损失;后者是指局部损失

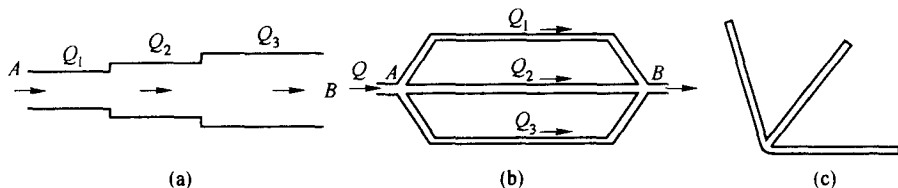


图 D1.1.2

与沿程损失大小相当,均不可忽略。为便于理解和计算,本章的简单管路按短管计算,复杂管路则按长管计算。按已知条件和求解对象分类,管路水力计算仍可分为与沿程损失计算相似的三种类型:(1) 给定管路和流量,求管路水头损失(正问题);(2) 给定管路和水头损失,求流量(反问题一);(3) 给定水头损失和流量,设计管径(反问题二)。

本章的后半部分涉及管路中的不定常流动、弯曲管中的流动及人体动脉管系中的流动等内容。D1.5 介绍工程管路中有时发生的水击现象。这是由外界因素引起管内流速突然改变,导致压强急剧变化并在管内传播的一种不定常过程。在水击过程中,要考虑水的可压缩性和管壁的弹性,压强脉冲以压力波的形式传播,并产生反射。水击现象是工程管路中不定常流动的典型例子。D1.6 介绍管路系统中普遍存在的弯曲管(和分叉管)中的二次流问题。二次流不仅造成局部流动损失,而且引起许多在直长圆管流动中观察不到的现象。在 D1.7 中,用流体力学的观点和方法对人体动脉血管内的流动特点作定性分析,归纳了动脉血流按心动周期变化的脉动性、动脉分叉管部位的复杂流场和沿动脉管壁传播的脉搏波等动脉血流的主要特征及其临床意义。这是将流体力学基本理论和方法运用于其他学科的一个例子,从中可以看到不同学科相互交叉,基础学科向新学科、新领域拓展和渗透的发展趋势。

D1.2 简单管路

简单管路又称为单通道管路,在一般单通道管路上既有沿程损失又有局部损失。只有沿程损失没有局部损失的,称为简单长管。所有复杂管路都可看作由许多简单管路组合而成,因此简单管路的水力计算是管路水力计算的基础。

每一根简单管路按一维流动处理,基本方程为连续性方程、能量方程和水头损失的表达式,分别为

$$Q = VA = \text{常数} \quad (\text{D1.2.1a})$$

$$\left(\frac{\alpha V^2}{2g} + z + \frac{p}{\rho g}\right)_{\text{in}} = \left(\frac{\alpha V^2}{2g} + z + \frac{p}{\rho g}\right)_{\text{out}} + h_L \quad (\text{D1.2.1b})$$

$$h_L = \sum \lambda \frac{l}{d} \frac{V^2}{2g} + \sum K \frac{V^2}{2g} \quad (\text{D1.2.1c})$$

上式中 λ 和 K 分别为达西摩擦因子和局部损失因数,由 C3.6 和 C3.9 介绍的方法确定。

简单管路的计算类型分为三类,下面通过相应的例题分别介绍。

D1.2.1 简单长管经验公式

最简单的管路是简单长管,在 C3.6.3 中已介绍了用穆迪图求解三种类型的简单长管问题,对第二、三类问题一般先假设一个 λ 值后用迭代法求解。工程上还有一种用经验显式直接求解的方法,其经验公式和适用范围分别为(参阅文献[7])

$$h_f = 1.07 \frac{Q^2 l}{gd^5} \left\{ \ln \left[\frac{\epsilon}{3.7d} + 4.62 \left(\frac{d\nu}{Q} \right)^{0.9} \right] \right\}^{-2} \quad \begin{cases} 3\,000 < Re < 3 \times 10^8 \\ 10^{-6} < \epsilon/d < 10^{-2} \end{cases} \quad (\text{D1.2.2a})$$

$$Q = -0.965 \left(\frac{gd^5 h_f}{l} \right)^{0.5} \ln \left[\frac{\epsilon}{3.7d} + \left(\frac{3.17 l \nu^2}{gd^3 h_f} \right)^{0.5} \right] \quad (Re > 2\,000) \quad (\text{D1.2.2b})$$

$$d = 0.66 \left[\epsilon^{1.25} \left(\frac{lQ^2}{gh_f} \right)^{4.75} + \nu Q^{9.4} \left(\frac{l}{gh_f} \right)^{5.2} \right]^{0.04} \quad \begin{cases} 5\,000 < Re < 3 \times 10^8 \\ 10^{-6} < \epsilon/d < 10^{-2} \end{cases} \quad (\text{D1.2.2c})$$

上式中 h_f 为水头损失, Q 为流量, l 为管长, d 为管径, ϵ 为壁面粗糙度, ν 为流体运动粘度, g 为重力加速度。

[例 D1.2.1] 用经验显式计算简单长管流动

试用(D1.2.2)式重新计算例 C3.6.3、例 C3.6.3A 和例 C3.6.3B。

解:(1) [例 C3.6.3](第一类问题)

已知 $Q = 0.027\,78 \text{ m}^3/\text{s}$, $l = 3\,000 \text{ m}$, $d = 0.2 \text{ m}$, $\epsilon = 0.2 \text{ mm}$, $\epsilon/d = 0.001$, $\nu = 0.355 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$, 利用(D1.2.2a)式求 h_f 。

$$h_f = 1.07 \frac{(0.027\,78 \text{ m}^3/\text{s})^2 (3\,000 \text{ m})}{(9.81 \text{ m/s}^2)(0.2 \text{ m})^5} \times \left\{ \ln \left[\frac{0.001}{3.7} + 4.62 \left(\frac{(0.2 \text{ m})(0.355 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s})}{0.027\,78 \text{ m}^3/\text{s}} \right)^{0.9} \right] \right\}^{-2} = 23.3 \text{ m}$$

与迭代法结果相比,误差为 1.3%。验算雷诺数

$$Re = \frac{Vd}{\nu} = \frac{4Q}{\pi d\nu} = \frac{4(0.027\,78 \text{ m}^3/\text{s})}{\pi(0.2 \text{ m})(0.355 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s})} = 4\,891$$

符合(D1.2.2a)式适用范围。

(2) [例 C3.6.3A](第二类问题)

已知 $h_t = 90.61 \text{ m}$, $l = 400 \text{ m}$, $d = 0.1 \text{ m}$, $\epsilon = 0.2 \text{ mm}$, $\epsilon/d = 0.002$, $\nu = 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$, 利用(D1.2.2b)式求 Q 。

$$Q = -0.965 \left(\frac{(9.81 \text{ m/s}^2)(0.1 \text{ m})^5 (90.61 \text{ m})}{400 \text{ m}} \right)^{0.5} \times \\ \ln \left[\frac{0.002}{3.7} + \left(\frac{3.17(400 \text{ m})(10^{-10} \text{ m}^4/\text{s}^2)}{(9.81 \text{ m/s}^2)(0.1 \text{ m})^3 (90.61 \text{ m})} \right)^{0.5} \right] \\ = -(4.549 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s})(-6.993) = 0.0318 \text{ m}^3/\text{s}$$

与迭代法结果相比误差为 0.3%。验算雷诺数

$$Re = \frac{Vd}{\nu} = \frac{4Q}{\pi d\nu} = \frac{4(0.0318 \text{ m}^3/\text{s})}{\pi(0.1 \text{ m})(10^{-5} \text{ m}^2/\text{s})} = 4.05 \times 10^4$$

符合(D1.2.2b)式适用范围。

(3) [例 C3.6.3B](第三类问题)

已知 $Q = 0.0318 \text{ m}^3/\text{s}$, $h_t = 90.61 \text{ m}$, $l = 400 \text{ m}$, $\epsilon = 0.2 \text{ mm}$, $\nu = 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$, 利用(D1.2.2c)式求 d 。

$$d = 0.66 \left[(0.2 \times 10^{-3} \text{ m})^{1.25} \left(\frac{(400 \text{ m})(0.0318 \text{ m}^3/\text{s})^2}{(9.81 \text{ m/s}^2)(90.61 \text{ m})} \right)^{4.75} + \right. \\ \left. (10^{-5} \text{ m}^2/\text{s})(0.0318 \text{ m}^3/\text{s})^{9.4} \left(\frac{400 \text{ m}}{(9.81 \text{ m/s}^2)(90.61 \text{ m})} \right)^{5.2} \right]^{0.04} \\ = 0.66 [(3.18 \times 10^{-21} \text{ m}^{25}) + (1.32 \times 10^{-21} \text{ m}^{25})]^{0.04} = 0.1 \text{ m}$$

与迭代法结果相比误差为 1.6%。验算雷诺数

$$Re = \frac{Vd}{\nu} = \frac{4Q}{\pi d\nu} = \frac{4(0.0318 \text{ m}^3/\text{s})}{\pi(0.1 \text{ m})(10^{-5} \text{ m}^2/\text{s})} = 4.05 \times 10^4$$

符合(D1.2.2c)式适用范围。

D1.2.2 简单管路计算举例

[例 D1.2.2] 简单管路计算类型 1: 求水头损失

说明: 水泵扬程(H)是指将单位重量的水, 从低水位送到高水位所需的能量, 它由两部分组成: 将单位重量的水位置提高后, 相应的位能增加(Δz), 及克服管道阻力的水头损失(h_L)。当管道系统中有泵输入能量时, 能量方程应采用伯努利方程的第二种推广形式(B4.6.14)式; 并取 $h_s = H$ 。

已知: 图 DE1.2.2 示水塔-泵-管道系统。水从蓄水池中经吸水口(滤网与逆止阀, $K_{in} = 2.2$), 螺旋球形阀(全开, $K_v = 5.7$) 四个弯头(每个 $K_b = 0.64$) 和出水口($K_{out} = 1.0$) 泵入水塔中。两液面水位差 $z_2 - z_1 = 25 \text{ m}$; 水管为商用钢管($\epsilon = 0.046 \text{ mm}$), 管直径 $d = 10 \text{ cm}$, 管长 $l = 50 \text{ m}$, 流量为 $Q = 0.04 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

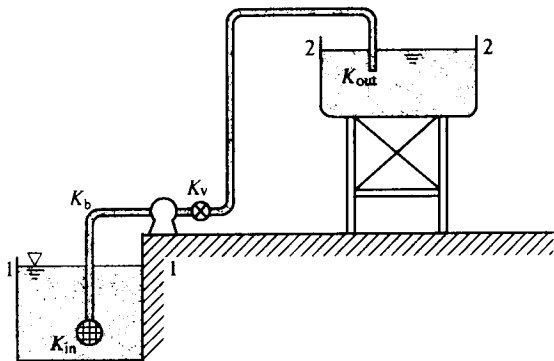


图 DE1.2.2

求:在如上条件下确定水泵扬程 H :(1) 忽略全部损失;(2) 忽略局部损失;(3) 计及全部损失。

解:对蓄水池(1)和水塔(2)两液面列伯努利方程的第二种推广形式,即(B4.6.14b)式

$$\left(\frac{V^2}{2g} + z + \frac{p}{\rho g} \right)_1 = \left(\frac{V^2}{2g} + z + \frac{p}{\rho g} \right)_2 + h_L - H \quad (\text{a})$$

式中 $h_L = h_f + h_m$ 。现 $V_1 = V_2 = 0$, $p_1 = p_2 = 0$,由(a)式可得

$$H = (z_2 - z_1) + h_L \quad (\text{b})$$

(1) 忽略全部损失, $h_L = 0$,由(b)式

$$H = (z_2 - z_1) = 25 \text{ m}$$

(2) 忽略局部损失, $h_m = 0$,

$$H_2 = (z_2 - z_1) + h_f = (z_2 - z_1) + \lambda \frac{l}{d} \frac{V^2}{2g}$$

设水的运动粘度 $\nu = 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

$$V = \frac{4Q}{\pi d^2} = \frac{4(0.04 \text{ m}^3/\text{s})}{\pi(0.1 \text{ m})^2} = 5.09 \text{ m/s}$$

$$Re = \frac{Vd}{\nu} = \frac{(5.09 \text{ m/s})(0.1 \text{ m})}{10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}} = 5.09 \times 10^5$$

$$\epsilon/d = 0.046/100 = 0.00046$$

查穆迪图得 $\lambda = 0.0173$;由(b)式

$$H_2 = 25 \text{ m} + 0.0173 \frac{50 \text{ m} (5.09 \text{ m/s})^2}{0.1 \text{ m} 2(9.81 \text{ m/s}^2)} = 25 \text{ m} + 11.42 \text{ m} = 36.42 \text{ m}$$

(3) 计及全部损失

$$\begin{aligned}
 h_m &= (K_m + K_v + 4K_b + K_{out}) \frac{V^2}{2g} \\
 &= (2.2 + 5.7 + 4 \times 0.64 + 1.0) \frac{(5.09 \text{ m/s})^2}{2(9.81 \text{ m/s}^2)} = 11.46(1.32 \text{ m}) = 15.13 \text{ m} \\
 H_3 &= (Z_2 - Z_1) + h_f + h_j = 25 \text{ m} + 11.42 \text{ m} + 15.13 \text{ m} = 25 \text{ m} + 26.55 \text{ m} \\
 &= 51.55 \text{ m}
 \end{aligned}$$

讨论:由以上结果可知,水泵实际有效扬程应为 $H_3 = 51.55 \text{ m}$,若忽略全部损失计算,水泵扬程为 $H_1 = 0.48H_3$,若忽略局部损失计算的水泵扬程为 $H_2 = 0.7H_3$,在本例的全部管路损失中沿程损失占 43%,局部损失占 57%。水泵的有效输出功率为: $\dot{W} = \rho g Q H_3 = 20.2 \text{ kW}$ 。若设水泵的工作效率为 $\eta = 0.75$,水泵的输入功率应为 $\dot{W}/\eta = 27 \text{ kW}$ (实际上水泵的效率和输出功率均是管路流量的函数)。

【例 D1.2.2A】 简单管路计算类型 2:求流量

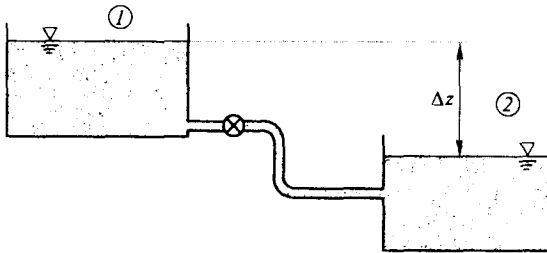


图 DE1.2.2A

已知:图 DE1.2.2A 示两个上下贮水池,由直径 $d = 10 \text{ cm}$,长 $l = 50 \text{ m}$ 的熟铁管连接($\epsilon = 0.046 \text{ mm}$);中间连有螺旋球形阀一个(全开时 $K_v = 5.7$), 90° 弯管两个(每个 $K_b = 0.64$)。设两贮水池水位差为 $\Delta z = 10 \text{ m}$,求管中流量 Q 。

解:对两贮水池液面(1)和(2)列伯努利方程的第一种推广形式,即(B4.6.13b)式

$$\left(\frac{V^2}{2g} + z + \frac{p}{\rho g} \right)_1 = \left(\frac{V^2}{2g} + z + \frac{p}{\rho g} \right)_2 + h_L \quad (\text{a})$$

$$h_L = h_f + h_m = \lambda \frac{l}{d} \frac{V^2}{2g} + (K_m + K_v + 2K_b + K_{out}) \frac{V^2}{2g} \quad (\text{b})$$

由于速度未知, Re 数不能计算, λ 无法确定。设水的运动粘度为 $\nu = 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

$$Re = \frac{Vd}{\nu} = \frac{0.1}{10^{-6}} V = 10^5 V \quad (\text{c})$$

由于 $V_1 = V_2 = 0$, $p_1 = p_2 = 0$,由(a)式可得