

高等学校教材

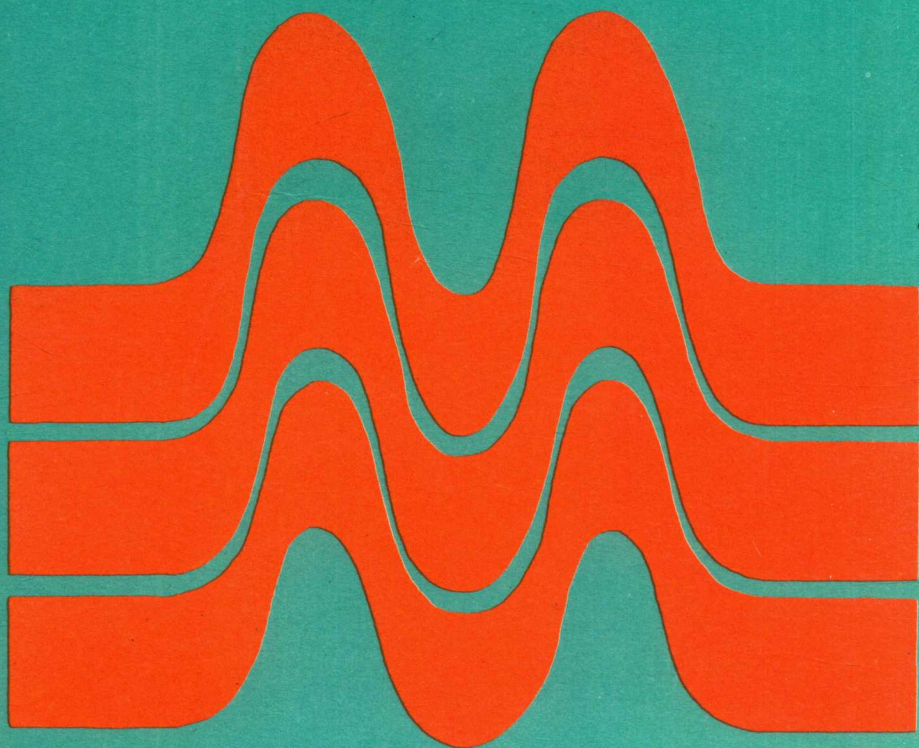
工程流体力学

(水力学)

下 册

闻德荪 魏亚东 李兆年 王世和 编

闻德荪 主编



高等教育出版社

TB120

1(2)

70/72

高等学校教材

工程流体力学

(水力学)

下



闻德荪 魏亚东 编
李兆年 王世和

闻德荪 主编

高等教育出版社

内 容 提 要

本书为大学本科土木建设类中学时教材,适用于环境工程、给水排水、供热通风及空调工程、城市燃气工程等专业。上册内容有:流体静力学、流体运动学、理想和实际流体动力学,平面势流,量纲分析和相似原理,流动阻力和能量损失,边界层理论基础和绕流运动。下册内容有:有压管流,明渠流,孔口、管嘴、闸孔出流及堰流,紊流射流和扩散基本理论,渗流,可压缩流体的流动。书中附有详例、习题及应用图表。本书内容丰富,文字通顺,可供土木建设类各专业广大教师及学生阅读,也可供有关技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

工程流体力学(水力学).下册/闻德荪主编. —北京:高等教育出版社,2001
ISBN 7-04-002668-6

I. 工… II. 闻… III. ①工程力学:流体力学-高等学校-教材②水力学-高等学校-教材 IV. TB126

中国版本图书馆CIP数据核字(2001)第037093号

出版发行	高等教育出版社		
社 址	北京市东城区沙滩后街55号	邮政编码	100009
电 话	010-64054588	传 真	010-64014048
网 址	http://www.hep.edu.cn		
经 销	新华书店北京发行所		
印 刷	成都新华印刷厂		
开 本	850×1168 1/32	版 次	1991年6月第1版
印 张	10.125	印 次	2001年7月第8次印刷
字 数	241 000	定 价	10.00元

凡购买高等教育出版社图书,如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请在所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

目 录

第九章 有压管流	1
§ 9-1 简单短管中的恒定有压流	2
§ 9-2 简单长管中的恒定有压流	11
§ 9-3 复杂长管中的恒定有压流	19
§ 9-4 沿程均匀泄流管道中的恒定有压流	25
§ 9-5 管网中的恒定有压流计算基础	30
§ 9-6 非恒定有压管流中的水击	49
习题	66
第十章 明渠流	72
§ 10-1 恒定明渠均匀流	74
§ 10-2 恒定明渠流的流动型态和若干基本概念	90
§ 10-3 恒定明渠流流态转换时的局部水力现象——水 跃和跌水	102
§ 10-4 恒定明渠非均匀渐变流动的基本微分方程	109
§ 10-5 棱柱体渠道中恒定非均匀渐变流水面曲线型式 的分析	111
§ 10-6 恒定明渠非均匀渐变流水面曲线的计算	124
§ 10-7 非恒定明渠流	131
习题	134
第十一章 孔口、管嘴、闸孔出流及堰流	139
§ 11-1 恒定薄壁孔口出流	139
§ 11-2 管嘴出流	146
§ 11-3 非恒定孔口、管嘴出流	151

§ 11-4	闸孔出流	156
§ 11-5	堰流	161
§ 11-6	水工建筑物下游的水流衔接与消能	174
	习题	186
第十二章	紊流射流和扩散基本理论	192
§ 12-1	射流的分类和紊流淹没射流的特性	192
§ 12-2	圆形断面淹没射流	197
§ 12-3	平面淹没射流	206
§ 12-4	非淹没射流	212
§ 12-5	分子扩散	214
§ 12-6	层流扩散	229
§ 12-7	紊流扩散	236
§ 12-8	剪切流的离散	241
	习题	253
第十三章	渗流	256
§ 13-1	渗流模型	258
§ 13-2	渗流基本定律——达西定律	259
§ 13-3	地下明渠中的恒定均匀渗流和非均匀渐变渗流	265
§ 13-4	棱柱体地下明渠中恒定渐变渗流浸润曲线型式 的分析和计算	267
§ 13-5	井的渗流	274
§ 13-6	渗流的基本微分方程	282
§ 13-7	井群	286
	习题	289
第十四章	可压缩流体的流动	292
§ 14-1	理想可压缩流体一维恒定流的基本方程	292

第九章 有压管流

前面各章阐述了流体运动的基本原理，这一章将运用这些基本原理，分析工程实践中有压管流问题。有压管流是环境保护、给水排水、采暖通风、市政建设、交通运输、水利等工程中常见的典型流动之一。本章主要讨论不可压缩流体的有压管流，并简要介绍非恒定有压管流中的水击问题。

工业与民用给水管、水处理构筑物中的连接管、虹吸管、泵的吸水管与压水管、室内及室外热水管、通风及燃气输配管、水电站压力引水管等管内的流动，都是有压管流的工程实例，它们大多可应用本章所介绍的原理和方法进行分析与计算。

分析恒定有压管流，主要是应用连续性方程、伯努利方程和能量损失的计算公式。能量损失包括沿程损失和局部损失。为了便于计算，常按这两种损失在总损失中所占比重的不同而将有压管道分为长管和短管两类。长管是指该管流中的能量损失以沿程损失为主，局部损失和流速水头(或气流动压)所占比重很小，可以忽

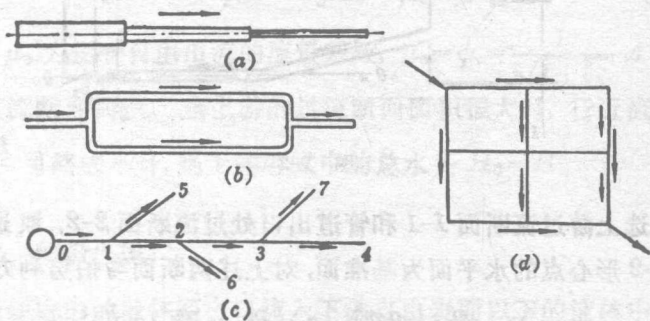


图 9-1

略不计的管道。短管是指局部损失和流速水头(或气流动压)所占比重较大,计算时不能忽略的管道。

根据管道布置与联接情况,又可将管道分为简单管道与复杂管道两类。前者指没有分支的等管径管道,后者指由两条以上管道组成的管系。复杂管道又可分为串联、并联管道和枝状、环状管网,分别如图 9-1*a*、*b*、*c*、*d* 所示。

§ 9-1 简单短管中的恒定有压流

根据简单短管的出流,可将其分为自由出流和淹没出流来加以分析。

一、自由出流

若短管中的液体经出口流入大气中,称为自由出流,如图 9-2 所示。

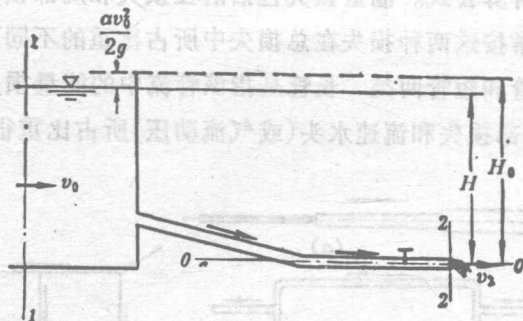


图 9-2

选上游过流断面 1-1 和管道出口处过流断面 2-2,取通过断面 2-2 形心点的水平面为基准面,对上述两断面写伯努利方程,得

$$H + \frac{p_a}{\gamma} + \frac{\alpha_0 v_0^2}{2g} = 0 + \frac{p_a}{\gamma} + \frac{\alpha v_1^2}{2g} + h_w$$

令
$$H_0 = H + \frac{\alpha_0 v_0^2}{2g}$$

可得

$$H_0 = \frac{\alpha v^2}{2g} + h_w \quad (9-1)$$

式中 v_0 为过流断面 1-1 的平均流速，又称行近流速。 H_0 为包括行近流速水头在内的总水头，又称作用水头。

由水头损失计算公式可知

$$h_w = \sum h_t + \sum h_j = \sum \lambda \frac{l}{d} \frac{v^2}{2g} + \sum \zeta \frac{v^2}{2g} = \zeta_c \frac{v^2}{2g} \quad (9-2)$$

式中 ζ_c 为短管的总阻力系数， $\zeta_c = \sum \lambda \frac{l}{d} + \sum \zeta$ 。

将上式代入式(9-1)中，得

$$H_0 = (\alpha + \zeta_c) \frac{v^2}{2g} \quad (9-3)$$

取 $\alpha = 1$ ，得

$$v = \frac{1}{\sqrt{1 + \zeta_c}} \sqrt{2gH_0}$$

令 $\phi_c = \frac{1}{\sqrt{1 + \zeta_c}}$ 称短管的流速系数，则

$$v = \phi_c \sqrt{2gH_0} \quad (9-4)$$

短管的流量为

$$Q = v \cdot A = \phi_c A \sqrt{2gH_0} = \mu_c A \sqrt{2gH_0} \quad (9-5)$$

式中 μ_c 为短管自由出流的流量系数， $\mu_c = \phi_c = \frac{1}{\sqrt{1 + \zeta_c}}$ ； A 为短管的过流断面面积。当上游的过流断面面积很大时，行近流速水头 $\frac{\alpha_0 v_0^2}{2g}$ 可略去不计，则上述各式中的总水头 $H_0 = H$ 。

二、淹没出流

若短管中的液体经出口流入下游自由表面以下的液体中，则称为淹没出流，如图 9-3 所示。

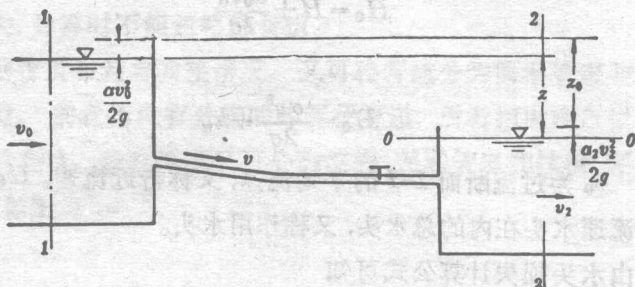


图 9-3

选过流断面 1-1 及 2-2, 以下游自由表面为基准面, 对上述两断面写伯努利方程, 得

$$z + \frac{p_a}{\gamma} + \frac{\alpha_0 v_0^2}{2g} = 0 + \frac{p_a}{\gamma} + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} + h_w$$

令 $z_0 = z + \frac{\alpha_0 v_0^2}{2g} - \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g}$, 则得

$$z_0 = h_w \quad (9-6)$$

式中 z_0 为淹没短管上、下游过流断面的总水头差, 式中的水头损失 h_w 仍可用式(9-2)计算, 但要注意此时的 $\Sigma \zeta$ 值比自由出流多一出口阻力系数 $\zeta_{\text{出口}} = 1.0$ 。将式(9-2)代入式(9-6)中, 得

$$z_0 = \zeta_c \frac{v^2}{2g}$$

或

$$v = \frac{1}{\sqrt{\zeta_c}} \sqrt{2gz_0} = \phi_c \sqrt{2gz_0} \quad (9-7)$$

短管的流量为

$$Q = \phi_c A \sqrt{2gz_0} = \mu_c A \sqrt{2gz_0} \quad (9-8)$$

式中 $\mu_c = \phi_c = \frac{1}{\sqrt{\zeta_c}}$, 为短管淹没出流的流量系数。比较式(9-5)和式(9-8)可知, 虽然短管自由出流与淹没出流的流量系数 μ_c 的计算公式不同, 但数值是相等的; 流量计算的差别, 主要是体现在

总水头的不同上。短管自由出流的总水头 H_0 为出口断面形心点上的总水头，而淹没出流的总水头 z_0 为包括行近流速在内的上下游总水头之差。

当上、下游过流断面面积都很大时，流速水头均可略去不计，则上列各式中的 $z_0 = z$ ，为上、下游自由表面之高差。

三、不可压缩气体经短管的恒定出流

不可压缩气体经简单短管出口流入管外气体（一般为大气），如图 9-4 所示。选过流断面 1-1 及 2-2，若管内外气体的重度相差很小，或两过流断面的高程差很小，则由不可压缩气体伯努利方程式 (5-40) 可得

$$p_1 + \frac{\rho v_1^2}{2} = p_2 + \frac{\rho v_2^2}{2} + p_{w1-2}$$

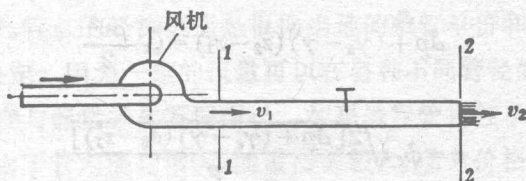


图 9-4

令 $\Delta p = p_1 - p_2$ ，因 $v_1 = v_2 = v$ ，

$$p_{w1-2} = \gamma h_{w1-2} = \rho g \left(\sum \lambda \frac{l}{d} + \sum \zeta \right) \frac{v^2}{2g} = \zeta_c \frac{\rho v^2}{2}$$

所以

$$\Delta p = \zeta_c \frac{\rho v^2}{2} \quad (9-9)$$

或

$$v = \frac{1}{\sqrt{\zeta_c}} \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} = \phi_c \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \quad (9-10)$$

短管的流量为

$$Q = \mu_c A \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \quad (9-11)$$

式中 ρ 为短管内气体的密度, 其余符号意义同前。比较式(9-8)与式(9-11)可知, 不可压缩气体经短管出流的流量公式与液体的流量公式, 在形式上近似, 差别在于不采用水头, 而采用压强差, 即以 $\frac{\Delta p}{\gamma}$ 代替了式(9-8)中的 z_0 。

若短管内外气体的重度相差很大, 两过流断面的高程差也较大时, 则由不可压缩气体伯努利方程(5-39)可得

$$p_1 + \frac{\rho v_1^2}{2} + (\gamma_a - \gamma)(z_2 - z_1) = p_2 + \frac{\rho v_2^2}{2} + p_{w1-2}$$

引用前已述及的符号:

$$\Delta p = p_1 - p_2, \quad v_1 = v_2 = v, \quad p_{w1-2} = \zeta_c \frac{\rho v^2}{2},$$

则上式可写成

$$\Delta p + (\gamma_a - \gamma)(z_2 - z_1) = \zeta_c \frac{\rho v^2}{2}$$

或

$$v = \phi_c \sqrt{\frac{2[\Delta p + (\gamma_a - \gamma)(z_2 - z_1)]}{\rho}} \quad (9-12)$$

短管的流量为

$$Q = \mu_c A \sqrt{\frac{2[\Delta p + (\gamma_a - \gamma)(z_2 - z_1)]}{\rho}} \quad (9-13)$$

式中 γ_a 为管外气体的重度, 一般为大气的重度; γ 为管内气体的重度。

四、简单短管中有压流计算的基本问题和方法

简单短管中有压流的计算, 实际上是根据一些已知条件, 确定前述诸公式中的某些变量, 而求解另一些变量的问题。它的基本问题有以下四种类型。

1. 已知水头或气流压强差、管径、管长、管道材料(与沿程损失有关)及局部损失组成,求流量和流速。这类问题多属校核性质,可直接用前述诸公式求解。

2. 已知流量、管径、管长、管道材料及局部损失组成,求水头或气流压强差。

3. 已知流量、水头或气流压强差、管长、管道材料及局部水头损失组成,求管径。这类问题直接用前述诸公式求解有困难,因为公式中的流量系数和过流断面面积均包含欲求的管径,所以一般用试算法或图解法求解;求得管径后,按已有管径规格选择相接近的标准管径,然后作复核计算:在流量不变情况下复核水头或压强差,或在水头(或压强差)不变情况下复核流量。

在实际工作中,通常是根据流量和管道经济流速值,先求出管径,然后按照管道的规格选择相应的标准管径,并按所选管径进行有关的计算。管道的经济流速是根据当地的敷管单价和动力价格,通过计算决定,因为一定的流量可以在各种不同管径的管道中通过,只是速度与能量损失不同而已。如果选择管径较小时,敷管单价较低,但由于管内流速增大,能量损失较大,动力价格较高;如果选择管径较大时,则得相反的结果。管道的经济流速是在全面的技术经济比较后决定的,可在有关的技术规范和手册中选取。

4. 分析计算沿管各过流断面的压强。对于位置固定的管道,绘出其测压管水头线,便可知道沿管各过流断面的压强。因为在工程中,如供水、消防等,常需知沿管各处压强是否满足工作需要;还要了解是否会出现过大的真空,产生气蚀现象,致使影响管道的正常工作,甚至遭到破坏。为了防止气蚀、汽化现象,有时需计算某些短管最高点的位置高度。

例 9-1 利用虹吸管将渠道中的水输送到集水池,如图 9-5 所示。已知管径 $d=300$ mm, 管长 $l_1=260$ m, 管长 $l_2=40$ m, 沿程阻力系数 $\lambda_1=\lambda_2=$

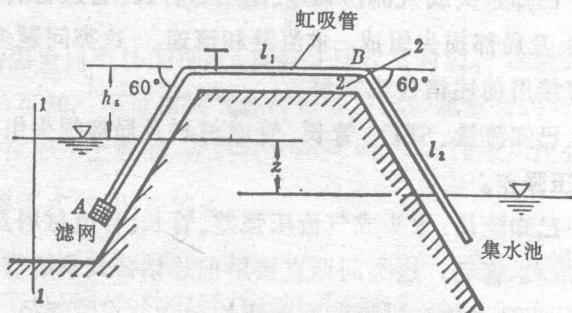


图 9-5

0.025; 由表 7-3 查得滤水网、折管、阀门、出口的局部阻力系数分别为 $\zeta_1=3.0$ 、 $\zeta_2=\zeta_4=0.55$ 、 $\zeta_3=0.17$ 、 $\zeta_5=1.0$ 。渠道与集水池的恒定水位差 $z=0.54\text{ m}$ 。虹吸管允许的真空高度 $h_v=7\text{ mH}_2\text{O}$ 。试求虹吸管的输水流量 Q 和顶部的允许安装高度 h_s 。

解: 因这一虹吸管为淹没出流, 可直接应用式(9-8)计算流量。

$$\mu_c = \frac{1}{\sqrt{\sum \lambda \frac{l}{d} + \sum \zeta}} = \frac{1}{\sqrt{0.025 \frac{260+40}{0.3} + 3 + 2 \times 0.55 + 0.17 + 1.0}} = 0.182$$

两过流断面面积均很大, 流速水头均可略去不计, 则由式(9-8)得

$$Q = \mu_c A \sqrt{2gz} = 0.182 \times \frac{\pi \times 0.3^2}{4} \times \sqrt{2 \times 9.81 \times 0.54} = 0.0419 \text{ m}^3/\text{s}$$

对过流断面 1-1、2-2 写伯努利方程, 得

$$0 + \frac{p_1}{\gamma} + 0 = h_s + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{\alpha v^2}{2g} + h_{w1-2}$$

$$h_v = \frac{p_1 - p_2}{\gamma} = h_s + \frac{\alpha v^2}{2g} + h_{w1-2}$$

因为

$$v = \frac{Q}{A} = \frac{4 \times 0.0419}{\pi \times 0.3^2} = 0.593 \text{ m/s}$$

$$\frac{\alpha v^2}{2g} = \frac{0.593^2}{2 \times 9.81} = 0.0179 \text{ m}$$

$$h_{w1-2} = \zeta_0 \frac{\alpha v^2}{2g} = \left(0.025 \frac{260}{0.3} + 3 + 2 \times 0.55 + 0.17\right) \times 0.0179 = 0.464 \text{ mH}_2\text{O}$$

所以 $h_s = h_v - \frac{v^2}{2g} - h_{w1-2} = 7 - 0.0179 - 0.464 = 6.518 \text{ m}$

例 9-2 某圆形有压涵管如图 9-6 所示, 上游水深 $H > 1.4d$ (管径), 此为涵管形成有压流的条件, 涵管长度 $l = 20 \text{ m}$, 上、下游水头差 $z = 1 \text{ m}$, 通过流量 $Q = 2 \text{ m}^3/\text{s}$, 沿程阻力系数 $\lambda = 0.03$, 进口、出口的局部阻力系数分别为 $\zeta_1 = 0.5$, $\zeta_2 = 1.0$, 试确定涵管管径 d 。

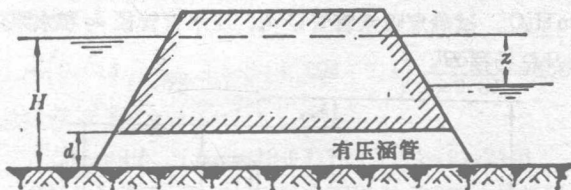


图 9-6

解:

涵管为淹没出流, 略去上、下游过流断面的流速水头可得

$$z = \left(\lambda \frac{l}{d} + \zeta_1 + \zeta_2 \right) \frac{\left(\frac{4Q}{\pi d^2} \right)^2}{2g}$$

代入各项数据得

$$1 = \left(0.03 \frac{20}{d} + 0.5 + 1.0 \right) \frac{\left(\frac{4 \times 2}{\pi d^2} \right)^2}{2 \times 9.81}$$

整理后得

$$d^5 - 0.495d - 0.198 = 0$$

可用试算法或用高次方程式求根的方法求解上式中的管径 d 。现用牛顿迭代法求 d 。上式可改写为 $F(d) = 0$ 的函数形式, 其一阶导数为 $F'(d) = 5d^4 - 0.495$; 其 $n+1$ 次迭代与第 n 次迭代的关系为

$$d_{n+1} = d_n - \frac{F(d_n)}{F'(d_n)}$$

式中 d_{n+1} 为第 $n+1$ 次迭代的管径; d_n 为第 n 次迭代的管径。设第一次迭代以 $d_1 = 1 \text{ m}$ 代入, 则

$$d_2 = d_1 - \frac{F(d_1)}{F'(d_1)} = 1 - \frac{1 - 0.495 - 0.198}{5 - 0.495} = 0.9318 \text{ m}$$

$$d_3 = 0.9318 - \frac{0.9318^5 - 0.495 \times 0.9318 - 0.198}{5 \times 0.9318^4 - 0.495} = 0.9186 \text{ m}$$

$$d_4 = 0.9182 \text{ m}, \quad d_5 = 0.9181 \text{ m}$$

迭代的次数视所要求的精度而定。工程实践中往往选与迭代值接近的或稍大一些的标准管径，本题可选 $d=1\text{m}$ 或 $d=900\text{mm}$ 的管径。现取 $d=1.0\text{m}$ 的管径。

复核：当 $d=1\text{m}$ ， $s=1\text{m}$ 时的流量满足所需通过的流量。

例 9-3 离心泵管道系统如图 9-7 所示，已知水泵流量 $Q=25\text{m}^3/\text{h}$ ，吸水管长 $l_1=5\text{m}$ ，压水管长度 $l_2=20\text{m}$ ，水泵提水高度 $s=18\text{m}$ ，最大真空度不超过 $h_v=6\text{mH}_2\text{O}$ 。试确定吸水管管径 d_a 、压水管管径 d_p 和水泵的允许安装高度 h_s 以及总扬程 H 。

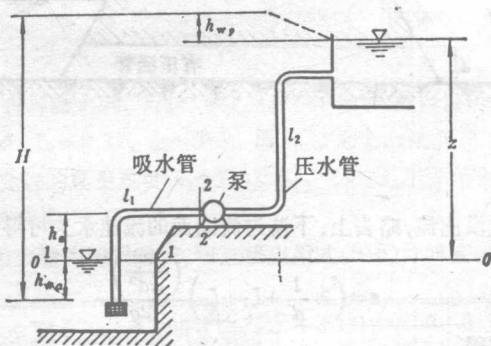


图 9-7

解：

(1) 吸水管经济流速 $v_a=1\sim 1.6\text{m/s}$ ，现取 $v_a=1.6\text{m/s}$ ，则

$$d_a = \sqrt{\frac{4Q}{\pi v_a}} = \sqrt{\frac{4 \times 25}{\pi \times 1.6 \times 3600}} = 0.074\text{m}$$

选取标准管径 $d_a=75\text{mm}$ ，相应的

$$v_a = \frac{4 \times 25}{\pi \times 0.075^2 \times 3600} = 1.57\text{m/s}$$

对过流断面 1-1 及 2-2 写伯努利方程得

$$h_s = \frac{p_v}{\gamma} - \frac{\alpha v_a^2}{2g} - h_{w1-2}$$

沿程阻力系数 $\lambda = \frac{0.021}{d^{0.3}} = \frac{0.021}{0.075^{0.3}} = 0.046$ ，局部阻力系数由表 7-3 查得：

滤水网 $\zeta_1=8.5$ ， 90° 弯管 $\left(\frac{d}{R}=1\right) \zeta_2=0.294$ ，水泵入口前的渐缩管 $\zeta_3=0.1$ 。

$\frac{p_v}{\gamma}$ 以 $h_v=6\text{mH}_2\text{O}$ 代入，

$$h_s = 6 - \left(1 + 0.046 \frac{5}{0.075} + 8.5 + 0.294 + 0.1 \right) \frac{1.57^2}{2 \times 9.81} = 4.37 \text{ m}$$

(2) 取压水管经济流速 $v_p = 1.6 \text{ m/s}$, 选取标准管径 $d_p = 0.075 \text{ m}$, $v_p = 1.57 \text{ m/s}$, 压水管沿程阻力系数 $\lambda = 0.046$, 90° 弯管的 $\zeta_4 = \zeta_5 = 0.294$, 出口 $\zeta_6 = 1.0$, 因此压水管水头损失 h_{wp} 为

$$h_{wp} = \left(0.046 \frac{20}{0.075} + 2 \times 0.294 + 1.0 \right) \frac{1.57^2}{2 \times 9.81} = 1.74 \text{ mH}_2\text{O}$$

吸水管水头损失为

$$h_{ws} = \left(0.046 \frac{5}{0.075} + 8.5 + 0.294 + 0.1 \right) \frac{1.57^2}{2 \times 9.81} = 1.50 \text{ mH}_2\text{O}$$

水泵总扬程 H 为

$$H = z + h_{ws} + h_{wp} = 18 + 1.74 + 1.50 = 21.24 \text{ m}$$

根据水泵扬程和流量, 即可从有关水泵样本或手册中选择适当型号的水泵。

例 9-4 有一长度为 25 m 的通风管道, 如图 9-4 所示。风管断面为边长等于 1.1 m 的正方形, 其沿程阻力系数 $\lambda = 0.032$, 各局部阻力系数之和 $\sum \zeta = 3.0$, 过流断面 1-1、2-2 间的压强差 $\Delta p = 300 \text{ N/m}^2$, 风管中空气密度 $\rho = 1.2 \text{ kg/m}^3$ 。求该风管中的空气流量 Q 。

解:

可直接应用式(9-11)计算流量

$$\mu_c = \frac{1}{\sqrt{\zeta_0}} = \frac{1}{\sqrt{0.032 \frac{25}{1.1} + 3}} = 0.518$$

$$Q = \mu_c A \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} = 0.518 \times 1.1 \times 1.1 \sqrt{\frac{2 \times 300}{1.2}} = 14.02 \text{ m}^3/\text{s}$$

§ 9-2 简单长管中的恒定有压流

简单长管中的恒定有压流如图 9-8 所示。由于不考虑流速水头, 所以总水头线与测管水头线重合。又因不计局部损失, 对过流断面 1-1、2-2 写伯努利方程可得

$$H = h_f \quad (9-14)$$

上式表明, 在长管中全部水头均消耗于克服沿程阻力。下面介绍