

工程流体力学关于沿程阻力的教学探讨¹⁾

顾磊²⁾ 倪福生

(河海大学机电工程学院, 江苏常州 213022)

摘要 针对工程流体力学中沿程阻力知识点的教授, 将与其相关的连续性方程、伯努利方程、动量方程、牛顿内摩擦定律、量纲分析、雷诺实验、尼古拉兹实验以及沿程阻力的应用等知识点有机地串联在一起, 并传递了“理论推演—量纲分析—实验研究—实例应用”的工程流体力学经典研究方法, 构建了以沿程阻力为核心的知识体系, 以期为学生学习和教师讲授提供帮助。

关键词 沿程阻力, 理论推演, 量纲分析, 实验研究, 实例应用, 工程流体力学

中图分类号: O35 **文献标识码:** A

doi: 10.6052/1000-0879-17-265

工程流体力学是能源动力工程专业重要的专业基础课程, 因为基础知识涉及面广、基本概念多、内容抽象^[1], 普遍被学生认为是较难掌握的课程之一。但实际上, 工程流体力学作为一门经典理论, 其相关内容间具有严密的内在逻辑^[2]。在教学过程中如能让学生将前后相关的知识建立联系, 形成合理的知识体系, 不仅有助于学生快速掌握知识点, 而且能了解其来龙去脉, 建立流体力学的研究思路与方法。在工程流体力学教学过程中, 发现围绕沿程阻力可以形成一个知识体系。本文结合自身教学经验阐述其教学方法, 以期为学生理解这一知识提供帮助。

1 知识体系

“黏性流体在管道中流动时, 流体与管壁面以及流体之间存在摩擦力, 所以沿着流动路程, 流体流动时总是受到摩擦力的阻滞, 这种沿流程的摩擦阻力, 称为沿程阻力”^[3]。从这段沿程阻力的定义中可以知道, 沿程阻力由流体的摩擦力引起, 满足牛顿内摩擦定律。而内摩擦力只有存在速度梯度时才会显现, 速度梯度是由于静止管壁对运动流体的阻碍

引起的, 这属于流体与管壁间的相互作用, 涉及动量定理的知识。而对运动流体的分析还需应用连续性方程和伯努利方程。通过理论推演可以分析影响沿程损失的因素, 对于这一复杂问题, 其影响物理量必然较多, 采用量纲分析法可以减少研究参变量, 最终将问题转化为研究沿程阻力系数与雷诺数和相对粗糙度的关系, 通过实验寻求该关系, 则又可引出两个经典实验——雷诺实验和尼古拉兹实验, 并通过莫迪图进行总结。因此, 围绕沿程阻力可以建立如图1所示的知识体系。

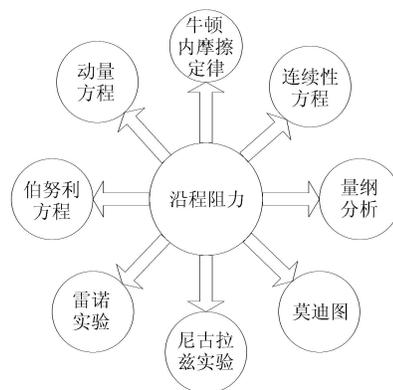


图1 沿程阻力知识体系

2 沿程阻力的影响因素——理论推演

沿程阻力是由内摩擦引起的, 可通过对流体内部流动以及与管壁相互作用的分析进行理论推演。以图2所示水平直管内充分发展段的不可压、定常流动为例, 取其内部空间作为控制体, 截面1和2为控制体进出口, 截面1与2之间的距离为 l , 管径为 d 。记位置为 z , 压强为 p , 管段内平均流速为 v 。 x 轴沿流动方向。由于管径不变, 根据连续性方程可

2017-07-21 收到第1稿, 2017-09-01 收到修改稿。

1) 河海大学核心课程建设项目资助。

2) 顾磊, 讲师, 主要从事流体力学和疏浚技术与装备方面的教学与研究。E-mail: headgulei@126.com

引用格式: 顾磊, 倪福生. 工程流体力学关于沿程阻力的教学探讨. 力学与实践, 2017, 39(6): 620-622

Gu Lei, Ni Fusheng. On the teaching of friction resistance in engineering fluid mechanics. *Mechanics in Engineering*, 2017, 39(6): 620-622

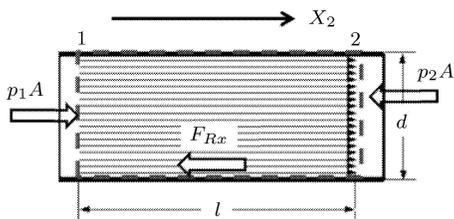


图 2 直管内流动分析

知

$$v_1 = v_2 \tag{1}$$

列出截面 1 和 2 的伯努利方程得

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + h_f \tag{2}$$

式中, ρ 为流体密度, g 为重力加速度.

$$h_f = z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} - \left(z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} \right) = \frac{\Delta p}{\rho g} \tag{3}$$

记管壁对流体的作用力为 F_{Rx} , 采用动量定理分析其内壁对流体的作用可知

$$p_1 A - p_2 A - F_{Rx} = \rho q_v (v_2 - v_1) = 0 \tag{4}$$

进一步转化可得

$$\Delta p = p_2 - p_1 = \frac{F_{Rx}}{A} = 4 \frac{l}{d} \tau_w \tag{5}$$

式中, τ_w 为壁面切应力. 结合牛顿内摩擦定律和相关分析可知, 壁面切应力与壁面粗糙度 ε 、流速 v 、密度 ρ 和流体黏度 μ 有关. 则截面 1 与 2 的压差可表示为

$$\Delta p = f(l, d, \varepsilon, v, \rho, \mu) \tag{6}$$

这一部分内容, 利用前面章节中的流体运动力学三大方程和牛顿内摩擦定律进行分析, 可以帮助学生加深对已学知识点的理解, 并掌握如何灵活运用.

3 问题简化 —— 量纲分析

式 (6) 涉及 7 个变量, 可通过量纲分析减少变量数量, 更重要的是可以实现变量的无量纲化, 以便于实验设计. 采用瑞利法进行量纲分析, 则式 (6) 中包含如下形式

$$\Delta p = k l^{x_1} d^{x_2} \varepsilon^{x_3} v^{x_4} \rho^{x_5} \mu^{x_6} \tag{7}$$

其中各参数量纲见表 1.

表 1 参数量纲汇总

| 参数 | Δp | l | d | ε | v | ρ | μ |
|----|-----------------|-----|-----|---------------|-----------|-----------|-----------------|
| 量纲 | $ML^{-1}T^{-2}$ | L | L | L | LT^{-1} | ML^{-3} | $ML^{-1}T^{-1}$ |

依据量纲一致性原则可知

$$\left. \begin{aligned} 1 &= x_5 + x_6 \\ -1 &= x_1 + x_2 + x_3 + x_4 - 3x_5 - x_6 \\ -2 &= -x_4 - x_6 \end{aligned} \right\} \tag{8}$$

取 x_1, x_3, x_6 为基本指数变量, 则其他指数均可由这 3 个数表示

$$\left. \begin{aligned} x_5 &= 1 - x_6 \\ x_2 &= -x_1 - x_3 - x_6 \\ x_4 &= 2 - x_6 \end{aligned} \right\} \tag{9}$$

式 (9) 代入式 (7) 进一步简化为

$$\Delta p = k \left(\frac{l}{d} \right)^{x_1} \left(\frac{\varepsilon}{d} \right)^{x_3} \left(\frac{\mu}{\rho v d} \right)^{x_6} \rho v^2 \tag{10}$$

由式 (5) 知 $x_1 = 1$. 结合雷诺数 $Re = \frac{\rho v d}{\mu}$ 以及式 (3) 得

$$h_f = k \left(\frac{\varepsilon}{d} \right)^{x_3} Re^{-x_6} \frac{l}{d} \frac{v^2}{g} \tag{11}$$

令

$$\lambda = 2k \left(\frac{\varepsilon}{d} \right)^{x_3} Re^{-x_6} \tag{12}$$

则有

$$h_f = \lambda \frac{l}{d} \frac{v^2}{2g} \tag{13}$$

这就是著名的达西公式. 对沿程阻力研究的关键则简化为寻求沿程阻力系数 λ 与雷诺数 Re 和相对粗糙度 ε/d 的函数关系. 需要重点说明的是, 两个参数均为无量纲数, 这为通过有限实验寻求普遍规律奠定了理论基础.

量纲分析在流体力学中是较为抽象的一个知识点, 但对于继续深造和从事科研工作的同学而言, 其又是非常重要和实用的分析方法. 这一环节采用量纲分析方法实现, 将抽象的理论方法具体化, 可大大降低学生的理解难度, 同时领会该方法的深层次意义.

4 沿程阻力系数 —— 实验研究

在流体力学发展史中, 沿程阻力系数的研究曾经是一个热门方向, 许多学者对其开展了实验研究 [4], 其中最为经典的两个实验为: 雷诺实验和尼古

拉兹实验,分别针对阻力系数的两个影响参数——雷诺数和相对粗糙度,重点进行了研究。

雷诺实验主要研究了雷诺数对流动的影响,其重要贡献是将流动分为层流和湍流两种状态。由此可引申出对雷诺实验操作过程、实验现象、实验结果、注意事项等的介绍,并通过对实验现象和结果的分析诠释雷诺数的物理含义^[5]。

尼古拉兹实验则在管道内壁粘附不同粒径的均匀沙粒,模拟管壁粗糙度的变化,以寻求相对粗糙度对流动损失的影响。其重要成果是将湍流区分为紊流光滑管区和湍流粗糙管平方阻力区。由此引出水力光滑和水力粗糙的概念,并分析其对流动的影响,在学生脑中构建湍流流动形态的印象。

莫迪图是沿程阻力系数实验研究成果的集成,对因雷诺数和相对粗糙度不同所划分的5个区域的实验数据进行了汇总,得到了方便工程查阅的沿程阻力系数图。在该环节授课过程中,可强调量纲分析对数据处理的重要意义,并通过例题讲解莫迪图的查阅方法。图3给出了实验研究讲授内容。

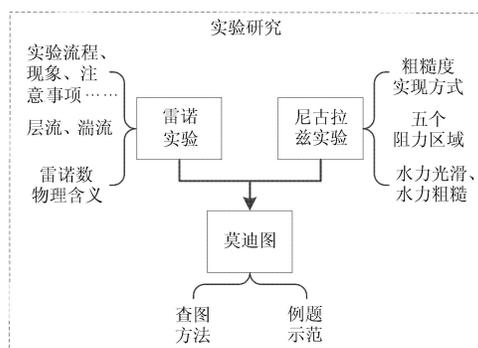


图3 实验研究讲授内容

5 实例应用

沿程阻力在许多工程中均有重要的应用。结合例题和案例的讲解可以帮助学生理解该知识“有何用”以及“怎么用”。在教学过程中常列举3个实例。

一是大家日常生活中常见的自来水管,指出长距离管道输送时管道压力主要用以克服沿程损失,给出市政管网供水压力、敷设管道长度以及关键的

局部损失,并告知水龙头出水流速的合理范围,让同学们计算所需管道直径范围,并与常见水管进行比较,从而让学生感觉所学知识与自身生活息息相关。

二是为能动学生后续专业课程——泵与风机准备的案例。流体流动即存在沿程阻力,为克服该阻力必然需要驱动动力,提供动力的机械即泵和风机。给出锅炉内冷却水管长度、直径和管壁粗糙度,并告知水流平均速度和温度,带领学生计算所需水泵扬程,据此进行设备选型,从而获得学生的专业认同感。

三是与本教研组背景相关的疏浚方面实例。已知条件包括:管道长度、直径、粗糙度,两相流体密度,泥沙悬浮的最低流速,单位功率的耗油量,让学生计算船舶输送所需的小时油耗,进而获取施工成本,让学生对大型工程中的阻力计算有所了解,直观感受降低沿程阻力对节能减排的重大意义,并适当提及两相流动流场、速度滑移、泥沙起动等一些问题,以激发具有科研意愿学生的兴趣。

6 结语

沿程阻力是工程流体力学课程中的重要内容,本文通过对沿程阻力问题的逐步深入,将相关知识点进行有机串联,构建了以沿程阻力为核心的知识体系。而且传授了“理论推演—量纲分析—实验研究—实例应用”的研究思路。实际教学发现,这种方式的讲解可以吸引大多数同学的课题注意力,在讲解结束时普遍发出“原来如此”的感叹。也希望由此引起大家的思考,为教师传授相关工程流体力学知识提供一定参考。

参考文献

- 郭楚文,王利军.关于工程流体力学若干问题的探讨.山东电力高等专科学校学报,2011,14(1):37-39
- 南军虎,张东.工程流体力学概要——由三个方程谈起.力学与实践,2016,38(2):189-191
- 薛祖绳.工程流体力学.北京:水利电力出版社,1992
- 孔珑.工程流体力学.北京:中国电力出版社,2015
- 张也影.流体力学.北京:高等教育出版社,2011

(责任编辑:周冬冬)