

液体流量计

杨有涛 陈梅 苗豫生◎主编

非
外
借



中国质检出版社
中国标准出版社

液体流量计

杨有涛 陈 梅 苗豫生 主编

中国质检出版社
中国标准出版社

北 京

图书在版编目(CIP)数据

液体流量计/杨有涛,陈梅,苗豫生主编. —北京:
中国质检出版社, 2017. 6
ISBN 978-7-5026-4420-8

I. ①液… II. ①杨… ②陈… ③苗… III. ①液
体流量计量—流量仪表 IV. ①TB937 ②TH814

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 069992 号

内 容 提 要

本书较为全面系统地介绍了各种液体流量计的结构、工作原理和计量检定方法,以及相关液体流量标准装置和测量结果的不确定度分析等,包括流体力学理论在流量计的应用,各种不同原理的液体差压式流量计、液体容积式流量计、液体速度式流量计、科里奥利质量流量计和液体流量标准装置等内容。

本书可作为液体流量计的技术培训教材,可供从事液体流量计科研、设计、制造、使用、计量检定、安装维修等相关工程技术人员阅读参考;同时,也可供高等院校相关专业师生学习参考使用。

中国质检出版社 出版发行
中国标准出版社

北京市朝阳区和平里西街甲 2 号(100029)
北京市西城区三里河北街 16 号(100045)

网址:www. spc. net. cn

总编室:(010)68533533 发行中心:(010)51780238

读者服务部:(010)68523946

中国标准出版社秦皇岛印刷厂印刷

各地新华书店经销

*

开本 787×1092 1/16 印张 17 字数 390 千字
2017 年 6 月第一版 2017 年 6 月第一次印刷

*

定价:58.00 元

如有印装差错 由本社发行中心调换

版权专有 侵权必究

举报电话:(010)68510107

编 委 会

主 编:杨有涛 北京市计量检测科学研究院

陈 梅 辽宁省计量科学研究院

苗豫生 国家水大流量计量站

编 委:(按照姓氏笔画排序)

于劲竹 天津市计量监督检测科学研究院

王 华 国家水大流量计量站

王建民 北京市计量检测科学研究院

付 涛 威海市天罡仪表股份有限公司

朱继光 哈尔滨市计量检定测试院

吴 刚 上海贝菲自动化仪表有限公司

陆 科 辽宁省计量科学研究院

李 晨 北京市计量检测科学研究院

陈 平 沈阳北星仪表制造有限公司

杨 静 北京市计量检测科学研究院

赵建亮 浙江省计量科学研究院

海 宁 开封仪表有限公司

郭铁军 开封仪表有限公司

崔耀华 河南省计量科学研究院

曹慧哲 哈尔滨工业大学

潘伯杰 南平市计量所

PREFACE 前言

液体流量计是专门用于测量液体流量的计量器具,其用途主要是定量计量液体流量,保证供方和用户方的公平贸易、合理结算。国际社会十分重视液体流量计,国际法制计量组织 OIML 为液体流量计编写了 R117、R75、R49 等国际建议。但是,目前国内尚缺乏有关液体流量计专业方面的参考资料,本书的出版弥补了这方面不足。为了帮助大家更好地理解液体流量计,保证流量量值的准确和统一,我们组织设计、生产和计量检定第一线的有丰富经验的工程师,本着体现“先进性、实用性”原则,编写了这本《液体流量计》。本书追求内容新颖实用,对于了解目前液体流量计的最新技术动态大有裨益。

本书主要介绍各种不同工作原理的液体流量计,对各种液体流量计结构特点及基本测量工作原理、检定标准装置及检定方法、测量结果不确定度分析、安装使用等方面进行了详细阐述。

正确使用和检定液体流量计,保证流量量值的准确和统一,不仅对于节约能源、提高经济效益具有重要作用,而且与大众利益密切相关。如果液体流量计计量不准确,将直接影响国家和消费者的利益,同时还将影响人民的生命、财产安全。因此,液体流量计被列入中华人民共和国强制检定的工作计量器具管理范围。

本书分为6章,每章内容相对独立,读者可以根据需要选择性阅读。

在此,对给予本书支持和关心的单位及人员表示诚挚的谢意!

由于编者水平有限,编写时间仓促,因此书中难免有不完善与遗漏之处,恳请读者批评指正。

编 者

2017年元月于北京

yangyt@bjjl.cn

CONTENTS 目 录

第一章 流量测量基础知识	1
第一节 流量测量基本概念	1
第二节 流量计的分类	13
第三节 液体流量的测量特性	16
第二章 液体差压式流量计	18
第一节 节流装置	18
第二节 巴类差压流量计	42
第三节 弯管流量计	56
第四节 浮子流量计	68
第五节 靶式流量计	79
第三章 液体容积式流量计	89
第一节 概 述	89
第二节 椭圆齿轮流量计	90
第三节 刮板流量计	97
第四节 腰轮流量计	103
第五节 双转子流量计	112
第六节 燃油加油机	120
第四章 液体速度式流量计	126
第一节 电磁流量计	126

第二节	超声流量计	149
第三节	涡街流量计	157
第四节	涡轮流量计	169
第五节	水表	177
第六节	热量表	196
第五章	科里奥利质量流量计	208
第一节	概述	208
第二节	工作原理	208
第三节	测量原理的理论分析	210
第四节	科里奥利质量流量计的组成	217
第五节	规格和性能	220
第六节	安装注意事项	221
第七节	计量性能特征及应用	221
第六章	液体流量标准装置	224
第一节	概述	224
第二节	静态质量法水流量标准装置	226
第三节	静态容积法水流量标准装置	233
第四节	标准表法水流量标准装置	239
第五节	体积管	246
参考文献	264

第一章 流量测量基础知识

第一节 流量测量基本概念

一、流量测量术语

1. 流量计

测量并显示流体流量的器具,如电磁流量计、超声流量计、涡街流量计、科里奥利质量流量计等,流量计一般由一次装置和二次装置组成。

2. 流体

无确定形状、能流动的物质,如液体和气体。

3. 牛顿流体

服从牛顿内摩擦定律的流体。气体和大多数液体都是牛顿流体。

4. 流量

流体流过过流断面(与流线垂直的截面)的量,是特定条件下由基本量(长度、质量、时间、温度等)合成的导出量。流量是动态量,只有当流体流动时才实际存在。

按测量时间的长短,流量可分为瞬时流量和累积流量。当测量时间很短时,流体流过过流断面的量称为瞬时流量。在一段时间内,流体流过过流断面的量称为累积流量或总量。所以,流量是瞬时流量和累积流量的统称。在不会引起误解的情况下,瞬时流量简称为流量。本书中的流量是指瞬时流量。

按量的表示单位,流量又分为体积流量和质量流量。流量用体积表示时称为体积流量,用 q_v 表示,体积总量用 V 表示。流量用质量表示时称为质量流量,用 q_m 表示,质量总量用 m 表示。即

$$q_v = \frac{dV}{dt} \quad (1-1)$$

$$q_m = \frac{dm}{dt} \quad (1-2)$$

$$V = \int_{t_1}^{t_2} q_v dt \quad (1-3)$$

$$m = \int_{t_1}^{t_2} q_m dt \quad (1-4)$$

式中: q_v ——体积流量, m^3/s ;

q_m ——质量流量, kg/s ;

V ——体积总量, m^3 ;

m ——质量总量, kg ;

t ——测量时间, s 。

5. 平均流量

在一段时间内流量的平均值。

6. 速度分布

在管道横截面上流体速度轴向矢量的分布模式。

7. 平均轴向流体速度/流速

由于流体具有黏性,所以流体在管道内流动时,在横截面上各点处流体的速度一般是不相等的。在管壁处速度为零,轴心附近速度最大。圆形管道内流体速度分布如图 1-1 所示。

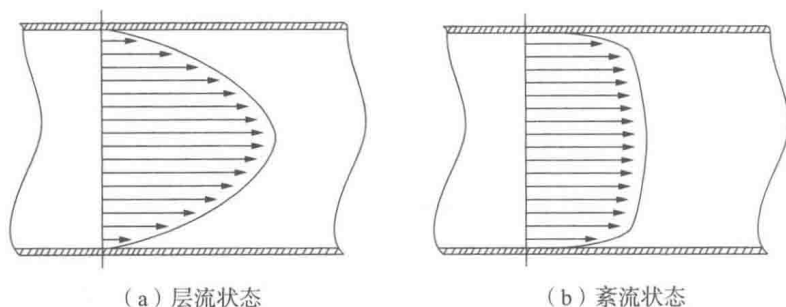


图 1-1 圆形管道内流体速度分布

把体积流量与管道横截面积的比称为平均轴向流体速度,简称流速,用 U 表示,即

$$U = \frac{q_v}{A} \quad (1-5)$$

式中: U ——流速, m/s ;

A ——管道横截面积, m^2 。

8. 稳定流

管道内流体在各处的状态(流速、压力、密度、温度等)不随时间显著变化,且不影响测量准确度的流动,也称定常流或恒定流。

对于稳定流,流速、流量、总量、测量时间的关系为

$$q_v = UA \quad (1-6)$$

$$q_m = \rho UA \quad (1-7)$$

$$V = q_v t \quad (1-8)$$

$$m = q_m t \quad (1-9)$$

式中: ρ ——流体密度, kg/m^3 。

9. 静压

在流体中不受流速影响而测得的压力值。

10. 流体的绝对静压

相对于完全真空的被测流体的静压。

11. 表压

流体的绝对静压与同一时间在测量地点的大气压力之间的差值。

12. 动压

动压分为流体单元动压和横截面内的平均动压两类。

对于管道中单元流束,流体的动能全部等熵转化为压力能所产生的高于静压的压力称为流体单元动压,用 p_d 表示。对于不可压缩流体

$$p_d = \frac{1}{2} \rho u^2 \quad (1-10)$$

式中: u ——流体局部速度,即点流速, m/s 。

以动能形式流经截面的流体功率对流体体积流量之比称为横截面内的平均动压,用 \bar{p}_d 表示。对于不可压缩流体

$$\bar{p}_d = \alpha \frac{1}{2} \rho U^2 \quad (1-11)$$

式中: α ——动能修正系数,无量纲。

动能修正系数是为修正以横截面内平均流速计算的动能与实际动能的差异而引入的,其值取决于横截面上流速分布的均匀性,流速分布均匀时, $\alpha = 1$;流速分布越不均匀, α 的值越大。在分布较均匀的流动中,如封闭管道中的紊流状态, $\alpha = 1.05 \sim 1.10$;层流状态时, $\alpha = 2$ 。在实际工程计算时,通常取 $\alpha = 1$ 。在流量测量过程中,需考虑过流断面上速度分布的影响。

13. 总压

表压与动压之和。对于静止的单元流体,表压与总压具有相同的数值。

14. 滞止压力

表征流体动能全部转化为压力能的能量状态的压力,其值等于绝对静压与动压之和。对于静止的单元流体,绝对静压与滞止压力具有相同数值。

有关压力术语的图解见图 1-2。

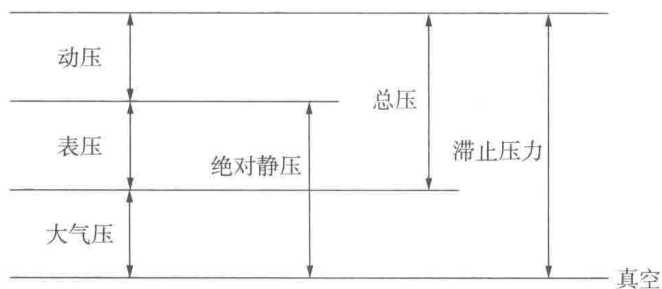


图 1-2 压力术语图解

15. 差压装置

装入管道以产生差压(即压力差)的装置。测量此差压,并根据已知的流体状态、

差压装置的几何尺寸和管道的几何尺寸,可计算出流量。

常见的差压装置有节流装置(孔板、喷嘴、文丘里管等)、V锥、楔形传感器、均速管、弯管等。

16. 一次装置

产生流量信号的装置。根据采用的测量原理,一次装置可以在管道内部,也可以在管道外部。有的一次装置也称传感器,如涡街流量传感器、涡轮流量传感器等。根据现有的习惯,对具体的流量计,本书有的称其为一次装置,有的称其为传感器。

17. 二次装置

接受来自一次装置的信号并显示、记录、转换和(或)传送该信号以得到流量值的装置。有的二次装置也称转换器或变送器,根据现有的习惯,对具体的流量计,本书有的称其为转换器,有的称其为变送器。

18. 输出信号

二次装置的输出,该输出是流量的函数。流量计常见的输出方式主要有频率/脉冲输出、4mA~20mA 电流输出、RS-485 数字通讯、HART 通讯等。

19. 最大流量

满足计量性能要求的上限流量值,用 q_{\max} 表示。

20. 最小流量

满足计量性能要求的下限流量值,用字母 q_{\min} 表示。

21. 流量范围

由最大流量和最小流量限定的范围,在该范围内流量计在正常使用条件下应满足计量性能的要求。

22. 分界流量

在最大流量和最小流量之间的流量值,它将流量范围分割成允许误差不同的两个区,即“高区”和“低区”,用 q_t 表示。

23. 满刻度流量

对应于最大输出信号的流量,用 q_F 表示。

24. 特征参数

流量计本身特有的影响其计量性能的参数。由于流量计的种类、生产厂家等各不相同,该参数可以有不同的名称,可能是传感器的系数或转换器的系数,也可能是一个数或一组数。

25. 仪表系数/ K -系数

单位体积或单位质量的流体流经流量计时,流量计发出的脉冲数,一般用 K 表示,又称 K -系数,即

$$K_V = \frac{N}{V} \quad (1-12)$$

$$K_m = \frac{N}{m} \quad (1-13)$$

式中: K_V ——体积仪表系数, $1/m^3$ 或 $1/L$;

K_m ——质量仪表系数, $1/kg$;

N ——脉冲数, 常用 P 表示。

仪表系数是频率/脉冲型流量计特有的参数, 流量计的种类不同, 仪表系数的含义亦不相同。有的(涡街流量传感器、涡轮流量传感器)仪表系数是特征参数, 用流量标准装置对流量计/传感器进行测量得到; 有的(电磁流量计、科里奥利质量流量计等)仪表系数表示的是输出信号与流量的对应关系, 与流量计本身的计量性能无关, 在检定/校准流量计或对流量计的数据进行传送时使用。

26. 流量计系数

对流量计进行检定/校准时, 按结果对流量计示值进行修正的系数, 一般用 F 表示, 其值为标准器示值与流量计示值之比, 即

$$F = \frac{q_s}{q} \quad (1-14)$$

式中: F ——流量计系数, 无量纲;

q_s ——标准器示值, m^3/h 或 t/h ;

q ——流量计示值, m^3/h 或 t/h 。

27. 流量系数

流量仪表的流量公式中, 表示流量与输出信号之间由于一些不可知因素而引入的修正系数, 一般用 α 表示, 常用于差压式流量计等。流量系数是流量计的特征参数, 用流量标准装置对流量计进行测量得到。

28. 流出系数

不可压缩流体通过节流装置的实际流量与理论流量的比值, 用 C 表示。

$$C = \frac{q_{m实}}{q_{m理}} \quad (1-15)$$

式中: C ——流出系数, 无量纲;

$q_{m实}$ ——实际质量流量, t/h ;

$q_{m理}$ ——理论质量流量, t/h 。

某些节流式差压流量计(孔板、喷嘴、文丘里管)的流量公式中, 流出系数 C 和流量系数 α 之间关系为

$$\alpha = CE \quad (1-16)$$

式中: E ——渐近速度系数, $E = 1/\sqrt{1-\beta^4}$, 无量纲;

β ——节流装置的直径比, $\beta = d/D$, 无量纲;

d ——节流装置的孔径, m ;

D ——管道内径, m 。

流出系数是流量计的特征参数, 用流量标准装置对流量计进行测量得到。

29. 直管段

安装在流量计上游和下游的用于使流场达到某种要求的一段管道, 其轴线是笔直

的而且内部横截面的面积和形状(通常为圆形)恒定不变。

30. 压力损失

流体流过一次装置而产生的不可恢复的压力值。

31. 流量标准装置

以流体为试验介质,提供确定准确度流量值的测量设备。

32. 测量

通过实验获得并可合理赋予某量一个或多个量值的过程。

33. 检定

查明和确认计量器具符合法定要求的活动。

34. 校准

在规定条件下,确定由测量标准(流量标准装置)提供的量值(标准器示值)与相应示值(流量计示值)之间关系的一组操作。

35. 标准器示值/参考值/标准值

用作与同类量的值进行比较的基础的量值,由流量标准装置给出,统称为标准器示值,用 q_s 、 V_s 、 m_s 等表示。

36. (测量)误差

表征被测流量计示值接近标准器示值的能力。流量计示值愈接近标准器示值,误差愈小,准确度愈高。误差一般用 E 表示。

流量计的误差有以下几种表示形式。

(1) 相对(示值)误差

流量计示值减去标准器示值,再除以标准器示值,用百分数表示。

累积流量的相对误差按式(1-17)计算

$$E = \frac{V - V_s}{V_s} \times 100\% \quad \text{或} \quad E = \frac{m - m_s}{m_s} \times 100\% \quad (1-17)$$

瞬时流量的相对误差按式(1-18)计算

$$E = \frac{q - q_s}{q_s} \times 100\% \quad (1-18)$$

(2) 引用误差

流量计示值减去标准器示值,再除以满刻度流量,用百分数表示,且在百分号后标注 F. S,多用于瞬时流量指示的流量计(如浮子流量计),即

$$E = \frac{q - q_s}{q_F} \times 100\% \text{ F. S} \quad (1-19)$$

(3) 线性误差

流量计的线性是在整个流量范围内流量计的输出与规定值之间一致的程度。

图 1-3 是流量计的输入-输出关系示意图。

当需要用流量标准装置对流量计进行测量得到仪表系数 K 、流量系数 α 、流出系数 C 等参数时,流量计的计量性能用线性误差表示。此时测量结果 K (或 α 或 C)按

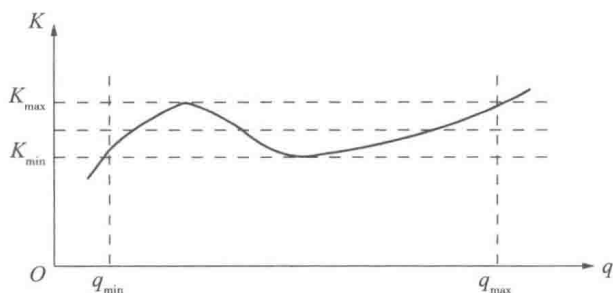


图 1-3 流量计输入-输出关系示意图

式(1-20)计算

$$K = \frac{K_{\max} + K_{\min}}{2} \quad (1-20)$$

式中: K_{\max} ——流量范围内各测量点中仪表系数的最大值;

K_{\min} ——流量范围内各测量点中仪表系数的最小值。

线性误差按式(1-21)计算

$$E = \frac{K_{\max} - K_{\min}}{K_{\max} + K_{\min}} \times 100\% \quad (1-21)$$

线性误差表示的是测量结果在整个流量范围内的偏差。其实,式(1-21)是式(1-17)的变形。

37. (测量结果的)重复性

在相同条件下,对同一被测量进行连续多次测量所得结果之间的一致性,一般用 E_r 表示。

38. (长期)稳定性

流量计保持其计量性能随时间恒定的能力。稳定性是对时间而言的,流量计在计量性能不发生变化的前提下工作的时间越长,稳定性越好。

39. 最大允许误差/误差限

对给定的测量、测量仪器或测量系统,由规范或规程所允许的,相对于已知参考量值的测量误差的极限值。

40. 准确度等级

在规定工作条件下,符合规定的计量要求、使测量误差或仪器不确定度保持在规定极限内的测量仪器或测量系统的等别或级别。准确度等级通常用约定采用的数字或符号表示。

流量计的准确度等级和最大允许误差之间的关系见表 1-1。

表 1-1 流量计的准确度等级和最大允许误差的关系

准确度等级	0.2	0.5	1.0
最大允许误差	$\pm 0.2\%$	$\pm 0.5\%$	$\pm 1.0\%$

二、液体流量测量常用物性参数

1. 流体的密度

流体的密度就是单位体积内流体的质量,用符号 ρ 表示。对于均质流体,其定义式为

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1-22)$$

式中: ρ ——流体的密度, kg/m^3 ;
 m ——流体(真空中)的质量, kg ;
 V ——流体的体积, m^3 。

各种流体的密度都随温度、压力的变化而变化,即密度是温度和压力的函数。流体的密度一般可通过查表、计算、测量等方式得到。

2. 流体的膨胀性(密度与温度的函数关系)

一般地,对一定量的流体,压力一定时,温度升高,体积膨胀;温度降低,体积收缩,这种特性称为流体的膨胀性(或热胀性),用体积膨胀系数(又称热胀系数) α 表征,即

$$V = V_r [1 + \alpha(t - t_r)] \quad (1-23)$$

式中: V ——温度为 t ($^{\circ}\text{C}$) 时流体的体积, m^3 ;
 V_r ——温度为 t_r ($^{\circ}\text{C}$) 时流体的体积, m^3 ;
 α ——流体的体积膨胀系数, $1/^{\circ}\text{C}$;
 t ——流体工作温度, $^{\circ}\text{C}$;
 t_r ——参考温度(一般为 20°C), $^{\circ}\text{C}$ 。

体积膨胀系数 α 是与温度有关的量,在一定温度范围内可视为常数,或为该范围内的平均值,一般可通过查表或计算得到。对于液体, α 的数量级为 $(10^{-5} \sim 10^{-3})$ 。

将式(1-23)代入式(1-22)并整理,忽略高阶无穷小后,得到压力不变时,液体密度按式(1-24)计算

$$\rho = \rho_{20} [1 - \alpha(t - 20)] \quad (1-24)$$

式中: ρ ——温度为 t ($^{\circ}\text{C}$) 时液体的密度, kg/m^3 ;
 ρ_{20} —— 20°C 时液体的密度, kg/m^3 。

可见,压力不变时,温度升高,密度减小;温度降低,密度增大。

3. 流体的压缩性(密度与压力的函数关系)

对一定量的流体,温度一定时,作用在流体上的压力增加,流体所占有的体积将会缩小,这种特性称为流体的压缩性,用压缩系数表征,即

$$V = V_0 [1 - \beta(p - p_0)] \quad (1-25)$$

式中: V ——压力为 p 时流体的体积, m^3 ;
 V_0 ——压力为 p_0 时流体的体积, m^3 ;
 β ——流体的体积压缩系数, $1/\text{MPa}$;
 p ——流体工作压力; MPa ;

p_0 ——参考压力,MPa。

体积压缩系数 β 是与温度有关的量,一般可通过查表或计算得到。对于液体, β 的数量级为 10^{-4} 。

将式(1-25)代入式(1-22)并整理,忽略高阶无穷小后得到温度不变时,液体密度计算式为

$$\rho = \rho_0 [1 + \beta(p - p_0)] \quad (1-26)$$

式中: ρ ——压力为 p 时液体的密度, kg/m^3 ;

ρ_0 ——压力为 p_0 时液体的密度, kg/m^3 。

可见,温度一定时,压力增加,密度增大;压力降低,密度减小。

常温下,5MPa以下压力的变化对多数液体密度的影响很小,所以工程计算上往往将液体视为不可压缩流体,即不考虑压力变化对液体密度的影响。但对碳氢化合物,压力对密度的影响,即使在较低的压力下也是不能忽略的。液体的压缩系数一般可通过查表或计算得到。

4. 流体的黏度

实际流体在流动时,流体内部层面间亦发生相对运动,而流体内部分子间的相互作用力对相对运动有阻碍作用,流体的这种性质称为黏性,其大小用黏度表示,即黏度是表征流体黏性大小的物理量。黏度越大,流体的流动能力越差。由于不同流体在流动时所受的阻力不同,因此不同流体在相同状态下有不同的黏度。

流体的黏度随流体的温度和压力的变化而变化。由于液体分子间的距离小,分子间相互作用力为引力(即内聚力)是构成黏性的主要因素,温度升高,分子动能增大,间距增大,内聚力减小,黏度随之下降;反之,温度下降时,液体的黏度上升。气体黏度随温度的变化规律与液体正好相反,由于气体分子间的距离远大于液体,分子热运动引起的动量交换是形成黏滞性的主要因素,温度升高,分子热运动加剧,动量交换加大,动力黏度随之增大。

一般地,液体的黏度只需考虑温度对它的影响,仅在压力很高的情况下才需要进行压力的修正。

黏度有多种表示方式,如动力黏度、运动黏度、恩氏黏度等。封闭管道中流体流量的测量问题常用的是运动黏度,用字母 ν 表示,单位为 m^2/s 。流体的黏度可通过查表、计算、测量等方法得到。

常压下,水在 20°C 时的运动黏度约为 $1 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$,在 100°C 时的运动黏度约为 $0.3 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$ 。

三、圆形封闭管道中流体的流动

1. 雷诺数

雷诺数是表征流体惯性力与黏性力之比的无量纲参数,对圆形管道,雷诺数由式(1-27)给出

$$Re = \frac{UD}{\nu} \quad (1-27)$$