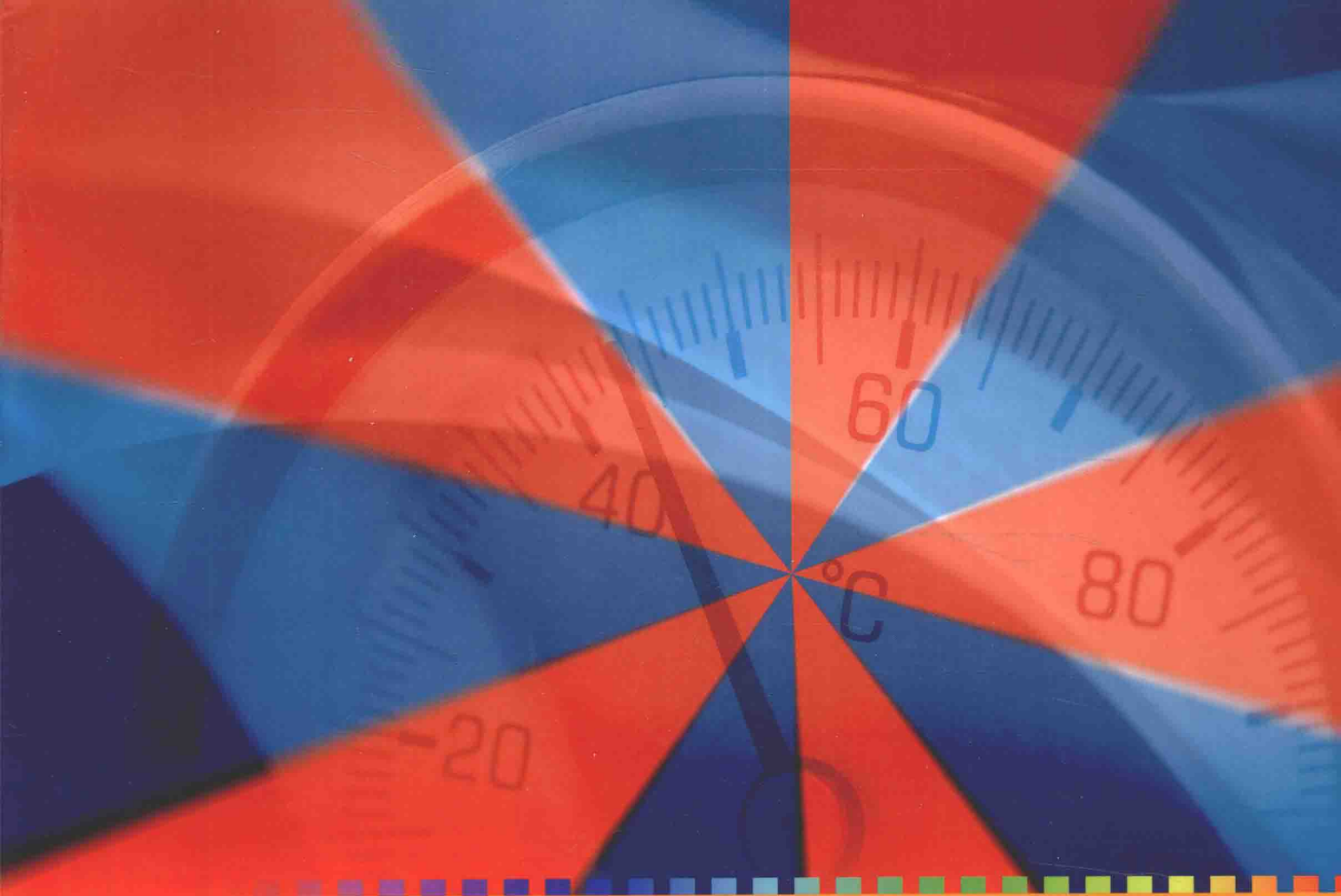




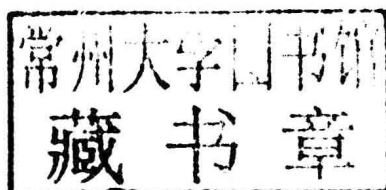
热量表计量检定技术和程序 实施指南

金志军 谷祖康 主编

 中国质检出版社
中国标准出版社

热量表计量检定技术和 程序实施指南

金志军 谷祖康 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

热量表计量检定技术和程序实施指南/金志军, 谷祖康主编. —北京: 中国质检出版社, 2015. 5
ISBN 978-7-5026-4134-4

I. ①热… II. ①金…②谷… III. ①热工仪表—指南 IV. ①TH81-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 082608 号

内 容 提 要

本书详细介绍了热量表和热量计量的有关概念, 热量表的工作原理和结构、计量检定技术及型式评价要求、耐久性试验方法、配对温度传感器的型式和要求、通讯协议以及热量表选用、安装和维护中应当注意的问题, 同时对 JJF 1434—2013《热量表(热能表)制造计量器具许可考核必备条件》进行了详细解读。

本书是热量表计量检定、热量表生产制造和供热计量科研人员、工作人员的重要参考资料, 对相关技术人员、检定人员及广大热计量及相关行业有关人员均有较大参考价值。

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 880 × 1230 1/16 印张 11 字数 272 千字

2015 年 5 月第一版 2015 年 5 月第一次印刷

*

定价 60.00 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** 金志军 (中国计量科学研究院)
谷祖康 (山东省计量科学研究院)
- 顾问** 王树铎 (中国科学院物理研究所)
- 编委** (按姓氏笔画排序)
- 卜占成 (河北省计量科学研究院)
王 振 (辽宁省计量科学研究院)
王永存 (唐山汇中仪表股份有限公司)
王华良 (徐州润物科技发展有限公司)
付 涛 (威海市天罡仪表有限公司)
冯 磊 (久茂自动化大连有限公司)
刘 巍 (天津市计量监督检测科学研究院)
刘 维 (泉州七洋电子科技有限公司)
孙卫国 (江苏迈拓智能仪表有限公司)
朱 江 (山东省计量科学研究院)
朱永宏 (河南省计量科学研究院)
朱 江 (山西省计量监督检定测试院)
许国辉 (常州剑湖仪表有限公司)
陈 兴 (天津市计量监督检测科学研究院)
张立谦 (北京市计量检测科学研究院)
张务铎 (山东省计量科学研究院)
罗志荣 (兰州市榆中县供热办)
周秉直 (陕西省计量科学研究院)
赵建亮 (浙江省计量科学研究院)
聂永磊 (广州柏诚智能科技有限公司)
徐德峰 (北京添瑞祥仪器仪表有限公司)
倪志军 (沈阳航发热计量技术有限公司)
曾永春 (大连博控科技股份有限公司)

前 言

供热计量是涉及国计民生、贸易结算、供热改革、节能降耗等事关国家发展诸领域的基础和关键技术。我国地域辽阔，各个地方有不同的发展特点和自身优势，合理利用能源，进行热能的准确计量和合理量值传递无疑是节约能源的重要手段之一，也是实现可持续发展的有力保障。

正因为此，建设部、国家发改委、财政部、人事部、民政部、劳动保障部、国家税务局、国家环保总局等部委先后多次下发通知和意见，就持续有效地推动我国城镇供热体制改革和热计量收费措施提出要求，明确指出，住宅（含新建住宅和既有住宅）必须进行热计量改革，合理确定热计量方式；新建住宅的公共建筑必须安装楼前热计量表，既有住宅要合理确定热计量方式，启动用热计量收费，促进能源节约措施有效实施。

热量表是由国家强制监督管理的计量器具，一方面，生产企业必须取得计量器具制造许可证，才能进行热量表的生产制造；另一方面，在安装使用热量表前，必须进行首次、强制性计量检定，检定合格后才能安装使用。

本书详细介绍了热量表和热量计量的有关概念，热量表的工作原理和结构、计量检定技术及型式评价要求、耐久性试验方法、配对温度传感器的型式和要求、通讯协议以及热量表的选用、安装和维护中应当引起关注的问题等。为使考核机构和热量表生产企业更好地理解热量表制造计量器具的许可条件要求，本书对 JJF 1434—2013《热量表（热能表）制造计量器具许可考核必备条件》进行了细致的解读，以保证技术法规的顺利实施和正确应用。

本书由中国计量协会热能表工作委员会组织委员会专家和会员单位共同编写。全书分为九章，编写人员分工如下：第一章，周秉直、金志军；第二章，张立谦、付涛；第三章，陈兴、谷祖康、刘巍、刘维；第四章，王振、赵建亮；第五章，朱永宏、金志军；第六章，金志军、曾永春；第七章，孙卫国、聂永磊；第八章，金志军、卜占成；第九章，罗志荣、王永存。

供热计量和热量表技术正在稳健发展和逐步推进，本书的内容在参照目前实施的有关技术规范 and 标准时，根据热计量发展的需要，也借鉴了国内外技术发展的现状，进行了整理和解读。但在使用过程中，与目前国家技术标准不一致之处，应以当前现行有效版本为依据进行热量表的计量检定、型式评价等工作。

由于编者水平有限，书中一定存在不妥和不足之处，衷心希望行业专家、热计量的广大同行不吝赐教、批评指正。

编 者
2015 年 3 月

目 录

第一章 热量表及热量计量	(1)
第一节 热量测量基础知识	(1)
第二节 热量表的术语和定义	(20)
第三节 热量表的分类和系列划分	(24)
第四节 与热量表有关的技术文件	(27)
第五节 国家计量检定规程、国家标准与欧洲标准的差异	(28)
第二章 热量表的工作原理和结构	(31)
第一节 热量表的工作原理	(31)
第二节 机械式热量表	(39)
第三节 超声波式热量表	(43)
第四节 电磁式热量表	(48)
第五节 热量表的口径和尺寸	(52)
第三章 热量表的技术要求和检定方法	(54)
第一节 热量表的技术要求	(54)
第二节 热量表的检定	(58)
第三节 检定注意事项及要求	(65)
第四节 测量不确定度评定	(78)
第四章 热量表的型式评价	(98)
第一节 型式批准的申请和核准程序	(98)
第二节 型式评价的项目	(101)
第三节 型式评价的项目要求和试验方法	(103)
第五章 热量表耐久性试验	(123)
第一节 耐久性试验说明	(123)
第二节 流量传感器耐久性试验	(124)
第三节 配对温度传感器耐久性试验	(128)
第六章 配对温度传感器的要求	(130)
第一节 温度传感器准确度的测试与计算	(130)
第二节 铂电阻温度传感器的结构和安装	(131)

第七章 热量表应用红外光学读数装置数据通讯协议 (139)

 第一节 通讯协议 (139)

 第二节 热量表应用红外光学读数装置的数据通讯协议 (141)

第八章 JJF 1434—2013《热量表(热能表)制造计量器具许可考核必备条件》

 解读 (149)

 第一节 编写说明 (149)

 第二节 条文释义 (151)

第九章 热量表的选用、安装和维护 (161)

 第一节 热量表的选型 (161)

 第二节 热量表的安装 (162)

 第三节 热量表的使用维护 (166)

参考文献 (167)

第一章 热量表及热量计量

第一节 热量测量基础知识

一、流量测量基础

1. 流量 (flow rate) 【JJF 1004, 1.1】

流体流过一定截面的量称为流量。流量是瞬时流量和累积流量的统称。在一段时间内流体流过一定截面的量称为累积流量,也称为总量。当时间很短时,流体流过一定截面的量称为瞬时流量,在不会产生误解的情况下,瞬时流量也可简称流量。流量用体积表示时称为体积流量,用质量表示时称为质量流量。

瞬时体积流量可用式 (1-1) 表示

$$q_v = \int_A u dA \quad (1-1)$$

瞬时质量流量可用式 (1-2) 表示

$$q_m = \int_A u \rho dA \quad (1-2)$$

累积体积流量可用式 (1-3) 表示

$$V = \int_t q_v dt \quad (1-3)$$

累积质量流量可用式 (1-4) 表示

$$m = \int_t q_m dt \quad (1-4)$$

式中: q_v ——流体的瞬时体积流量, m^3/s ;

q_m ——流体的瞬时质量流量, kg/s ;

u ——流体通过单元截面 dA 时的流速, m/s ;

A ——流体通过的截面面积, m^2 ;

ρ ——流体密度, kg/m^3 ;

V ——流体的累积体积流量, m^3 ;

m ——流体的累积质量流量, kg ;

t ——流体通过一定截面的时间, s 。

如果整个截面上各点的流速相同,则式 (1-1)、式 (1-2) 可以分别简化为

$$q_v = uA \quad (1-5)$$

$$q_m = \rho uA \quad (1-6)$$

对于稳定流,由于流体的流动是不随时间变化的,则式 (1-3)、式 (1-4) 可以分别简化为

$$V = q_v t \quad (1-7)$$

$$m = q_m t \quad (1-8)$$

在 SI 单位制中, 质量流量单位为 kg/s, 体积流量单位为 m³/s。常用的流量单位有: m³/h, m³/min, L/s, kg/h, kg/min, t/h 等。

例如: 对于公称通径为 DN20mm 的热量表, 若瞬时体积流量为 0.5 m³/h, 连续稳定运行 24h, 其累积体积流量约为: 0.5 m³/h × 24h = 12 m³。

2. 流量计 (flowmeter) 【JJF 1004, 1.4】

测量流量的器具。通常由一次装置和二次装置组成。

一次装置 (primary device) 是指产生流量信号的装置。根据所采用的原理, 一次装置可在管道内部或外部。如, 电磁流量计, 一次装置包括测量管、测量流体所产生信号的一对或多对径向对置的电极及在测量管中产生磁场的电磁体。超声波流量计, 一次装置包括测量管和超声波换能器。

二次装置 (secondary device) 是指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。

满管流量测量用流量计按测量原理可简单分为四大类: (1) 差压式流量计, 常见的流量计有标准节流装置、均速管流量计、临界流流量计、内锥式流量计、弯管流量计等; (2) 速度式流量计, 常见的流量计有涡轮流量计、涡街流量计、电磁流量计、超声流量计、弯管流量计等; (3) 容积式流量计, 常见的流量计有椭圆齿轮流量计、腰轮流量计、活塞流量计、双转子流量计等; (4) 质量流量计, 常见的流量计有科里奥利质量流量计、量热式质量流量计等。

3. 密度 (density) 【JJF1229, 二、3.1】

表示单位体积 V 中所含物质的质量 m 。对于均质流体, 其密度可用式 (1-9) 表示

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1-9)$$

式中: ρ ——密度, kg/m³;

V ——均质流体的体积, m³;

m ——均质流体的质量, kg;

对于非均质流体, 在其中任取一个体积为 ΔV 、质量为 Δm 的流体微团, 当微团无限小而趋近于一个质点时, 该点上的流体密度可用式 (1-10) 表示

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta V} = \frac{dm}{dV} \quad (1-10)$$

密度的倒数称为比容, 即单位流体的质量所占有的体积。比容可用式 (1-11) 表示

$$\nu = \frac{1}{\rho} \quad (1-11)$$

流体密度与温度、压力有关。当压力不变、温度不同时, 流体密度可用式 (1-12) 计算

$$\rho = \rho_{20} [1 - \beta(\theta - 20)] \quad (1-12)$$

式中: ρ, ρ_{20} ——工况温度和 20℃ 时液体的密度, kg/m³;

β ——流体的热膨胀系数, 1/℃;

θ ——液体的温度, ℃。

当温度不变、压力不同时, 流体密度可用式 (1-13) 计算

$$\rho = \rho_0 [1 + \kappa(p - p_0)] \quad (1-13)$$

式中: ρ, ρ_0 ——工况压力和压力为 p_0 时液体的密度, kg/m³;

p_0 ——标准状态下的压力, 101325Pa;

κ ——流体的压缩系数, 1/Pa;

p ——液体的压力, Pa。

当压力变化对流体密度的影响可忽略不计时, 可认为此状态下的流体为不可压缩流体。但在计量准确度要求高时, 不能轻易忽略液体压缩性对流体密度的影响。

4. 黏度

当流体在管道中流动时, 在相邻流层间的接触面上会形成一对阻碍两流层相对运动的等值而反向的摩擦力, 叫内摩擦力。流体的这种性质, 称为黏滞性。

流体运动所产生的内摩擦力与沿接触面法线方向的速度梯度和接触面面积成正比, 并与流体的物理性质有关, 而与接触面上压力无关。这个关系可用式 (1-14) 表示

$$f = \eta A \frac{du}{dy} \quad (1-14)$$

式中: f ——流体层接触面上的内摩擦力, N;

A ——流体层之间的接触面积, m^2 ;

$\frac{du}{dy}$ ——沿接触面法线方向的速度梯度, 1/s;

η ——表示流体物理性质的一个比例系数, 即动力黏度 (黏性动力系数), $Pa \cdot s$ 。

单位面积上的内摩擦力 τ (切应力) 可用式 (1-15) 表示

$$\tau = \frac{f}{A} = \eta \frac{du}{dy} \quad (1-15)$$

在运动流体中, 内摩擦力或切应力总是成对出现, 它们大小相等、方向相反。当流体静止时, 速度梯度 $\frac{du}{dy} = 0$, 所以不呈现切应力。

流体的动力黏度与密度的比值称为运动黏度 (黏性运动系数)。运动黏度可用式 (1-16) 表示

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad (1-16)$$

式中: ν ——运动黏度, m^2/s ;

ρ ——流体的密度, kg/m^3 ;

η ——动力黏度, $Pa \cdot s$ 。

在 SI 单位制中, 动力黏度的单位为 $Pa \cdot s$, 运动黏度的单位为 m^2/s 。

不同流体其动力黏度 η 值和运动黏度 ν 值各不相同。液体的动力黏度和运动黏度均随温度和压力而变化, 但是压力的影响很小, 常忽略不计。温度升高, 液体的动力黏度、运动黏度均减小。表 1-1 为水的动力黏度 η 随温度变化的数值, 表 1-2 为水的运动黏度 ν 随温度变化的数值。

表 1-1 水的动力黏度 η 随温度变化的数值

温度 $t/^\circ C$	0	20	40	60	80	100
动力黏度 $\eta/(10^3 Pa \cdot s)$	1.79	1.01	0.66	0.47	0.36	0.28

表 1-2 水的运动黏度 ν 随温度变化的数值

温度 $t/^\circ C$	0	4	10	15	20	30	40	50
运动黏度 $\nu/(10^6 m^2/s)$	1.79	1.57	1.31	1.15	1.01	0.80	0.66	0.56

5. 热膨胀系数和压缩系数

流体的体积随温度变化而变化。在大多数情况下,温度升高,流体的体积膨胀,这种特性称为流体的膨胀性。流体的膨胀性可用热膨胀系数来表示,其定义为:在一定压力下,温度每升高 1℃,流体体积的相对增加量。热膨胀系数可用式 (1-17) 表示

$$\beta = \frac{1}{V} \frac{\Delta V}{\Delta \theta} \quad (1-17)$$

式中: β ——流体的热膨胀系数, 1/℃;

V ——流体的原有体积, m³;

$\Delta \theta$ ——流体的温度增量, ℃;

ΔV ——流体的体积增量, m³。

当作用在流体上的压力增加时,流体所占有的体积将缩小,这种特性称为流体的压缩性。流体的压缩性可用压缩系数来表示,其定义为:在一定温度下,单位压力增量作用于流体时,流体体积的相对缩小量。压缩系数可用式 (1-18) 表示

$$\kappa = -\frac{1}{V} \frac{\Delta V}{\Delta p} \quad (1-18)$$

式中: κ ——流体的压缩系数, 1/Pa;

V ——流体的原有体积, m³;

Δp ——流体的压力增量, Pa;

ΔV ——压力增加 Δp 时,流体体积的变化量, m³。

当 Δp 为正值时, ΔV 是负值,在式 (1-18) 中有负号,使 κ 为正值。 κ 值的大小反映了流体可压缩性的大小。

6. 雷诺数 (Reynolds number) 【JJF 1004, 1.48】

表示惯性力与粘性力之比的无量纲参数。

雷诺数可用式 (1-19) 表示

$$Re = \frac{ul\rho}{\eta} = \frac{ul}{\nu} \quad (1-19)$$

式中: u ——流体的平均流速, m/s;

l ——流束的特征尺寸, m;

ν, η ——工作状态下流体的运动黏度 (m²/s) 和动力黏度 (Pa·s);

ρ ——流体密度, kg/m³。

从式 (1-19) 可知,雷诺数的大小取决于流速、特征尺寸和流体黏度 3 个参数。当规定雷诺数时,应指明一个作为依据的特征尺寸,如管道的直径、节流装置中孔板的直径、皮托管测量头的直径等。对于圆形管道,特征尺寸一般取管道直径 D ,其雷诺数的计算公式为

$$Re = \frac{uD}{\nu} \quad (1-20)$$

工程计算中,一般管道直径单位以 mm 表示,在已知体积流量 q_v (单位: m³/h) 或质量流量 q_m (单位: kg/h) 而非流速 u 的情况下,雷诺数可用下面的实用公式计算

$$Re = 0.354 \frac{q_m}{D\eta} \quad (1-21)$$

$$Re = 0.354 \frac{q_v}{D\nu} \quad (1-22)$$

式中, ν 、 η 的单位分别为 m^2/s 和 $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。

7. 层流 (laminar flow) 与紊流 (turbulent flow) 【JJF1004, 1.29 1.28】

层流是指与惯性力相比, 粘性力起主要作用的流动。层流是流体的质点作分层运动, 在流层之间不发生混杂的流动。

紊流是指与粘性力相比, 惯性力起主要作用的流动, 也称湍流。紊流是时间和空间上不规则 (随机) 的速度波动叠加在平均流上的流动。

判断管内流动是层流还是紊流的依据是雷诺数 Re 。根据实验测定, 圆管内流动的临界雷诺数为 $Re = 2320$ 。

一般地说, $Re = 2320$ 是从层流变为紊流状态的临界值。需要说明的是, 即使 Re 比 2320 大, 如果管道内壁面加工的很光滑且流动处于稳定状态, 仍可保持层流状态。当 Re 在 2320 以下时, 即使管内壁面是粗糙的, 也不会形成紊流状态。

不同流体密度、黏度、流速或管径条件下的两种流动, 如果雷诺数相同, 那么它们或者同为层流或者同为紊流, 而且这两种流动的流速场分布、压力场分布等动力学性质也是相似的, 这就是雷诺相似准则。流量仪表在某种标定介质 (通常液体流量计用水、气体流量计用空气) 中标定得到的流量系数, 可以根据在雷诺相似准则换算出另一种介质 (被测介质) 的流量或流速。

例如: 有一圆形水管, 已知其直径 $D = 50\text{mm}$, 水的流速 $u = 2\text{m/s}$, 水温 $t = 20^\circ\text{C}$; 查表可知水的运动黏度 $\nu = 1.01 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$, 用以上条件可计算出雷诺数

$$Re = \frac{uD}{\nu} = \frac{2 \times 0.05}{1.01 \times 10^{-6}} \approx 1 \times 10^5 > 2320 \quad (1-23)$$

由计算出的雷诺数可判断圆形管中的流动形态为紊流。

8. 速度分布 (velocity distribution) 【JJF 1004, 1.34】

在管道横截面上流体速度轴向分量的分布模式称为速度分布。一般规律是, 越靠近管壁, 由于流体与管壁的黏滞作用, 流速越小, 管壁上的流速为零; 越靠近圆管中心, 流速越大, 圆管中心的流速最大。

圆管内的流动状态不同, 所呈现的速度分布也不同。其中, 比较简单的速度分布模型为:

层流流动时

$$u_x = u_{\max} \left[1 - \left(\frac{r_x}{R} \right)^2 \right] \quad (1-24)$$

紊流流动时

$$u_x = u_{\max} \left(1 - \frac{r_x}{R} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (1-25)$$

式中: r_x ——距管道中心的径向距离, m ;

u_x ——管道中心的流速, m/s ;

$u_{\max}$ ——管道中心处的最大流速, m/s ;

R ——管道内半径, m 。

n ——随流体雷诺数不同而变化的系数, 其值见表 1-3。

从式 (1-24) 和式 (1-25) 可以看出, 在层流状态下, 速度分布是以圆管中心线为对称轴的一个抛物面。在紊流状态下, 速度分布是以圆管中心线为对称轴的一个指数曲面, 且随雷诺数的变化而变化。管内速度分布轴向剖视图如图 1-1 所示。

表 1-3 n 与雷诺数 Re 的关系

Re	n	Re	n	Re	n
2.56×10^4	7.0	4.28×10^5	8.6	1.10×10^6	9.4
1.05×10^5	7.3	5.36×10^5	8.8	1.52×10^6	9.7
2.06×10^5	8.0	5.72×10^5	8.8	1.98×10^6	9.8
3.20×10^5	8.3	6.40×10^5	8.8	2.35×10^6	9.8
3.84×10^5	8.5	7.00×10^5	9.0	2.78×10^6	9.9
3.96×10^5	8.5	8.44×10^5	9.2	3.07×10^6	9.9

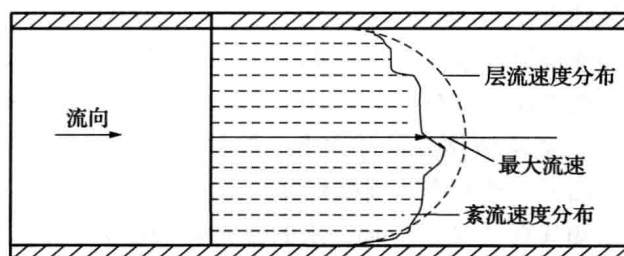


图 1-1 管内速度分布轴向剖视图

图 1-1 这样的典型管内速度分布,是指充分发展了的管内流动所具有的速度分布,也就是说,管内流体只有通过足够长的直管段以后才能形成。并非管内流动都是这样的分布。恰恰相反,由于流动过程中存在各种干扰,一般情况下,管内的速度分布总是要偏离这种典型的速度分布而对流量测量造成影响。因为流体流经阻流件,如弯头、三通、阀门等时,速度分布会发生畸变以及产生旋涡,这种情况称为非充分发展管流。非充分发展管流就是速度分布从一个横截面到另一个横截面皆在变化的流动。只有在很长的直管段末端或加装流动调整器后速度分布才能恢复到充分发展管流。这正是许多流量计需要足够长的表前直管段的根本原因。

9. 平均轴向流体速度 (mean axial fluid velocity) 【JJF 1004, 1.38】

平均轴向流体速度是指瞬时体积流量 (局部流体速度的轴向分量在管道截面上的积分) 与横截面积之比。平均轴向流体速度可用式 (1-26) 表示

$$\bar{u} = \frac{q_v}{A} = \frac{\int u_x dA}{A} \quad (1-26)$$

式中: $\bar{u}$ ——平均轴向流体速度, m/s;

q_v ——瞬时体积流量, m^3/s ;

A ——管道横截面积, m^2 ;

u_x ——管道中心的流速, m/s;

对于圆管, 将式 (1-24) 和式 (1-25) 代入式 (1-26) 得层流状态下的平均轴向流体速度

$$\bar{u} = \frac{\int_0^R u_x 2\pi r dr}{\pi R^2} = \frac{2\pi u_{\max} \int_0^R \left[1 - \left(\frac{r}{R}\right)^2\right] r dr}{\pi R^2} = \frac{1}{2} u_{\max} \quad (1-27)$$

紊流状态下的平均轴向流体速度

$$\bar{u} = \frac{\int_0^R u_x 2\pi r dr}{\pi R^2} = \frac{2\pi u_{\max} \int_0^R \left[\left(1 - \frac{r}{R}\right)^{\frac{1}{n}} \right] r dr}{\pi R^2} = \frac{2n^2}{(2n+1)(n+1)} u_{\max} \quad (1-28)$$

10. 稳定流 (steady flow) 与不稳定流 (unsteady flow) 【JJF 1004, 1.30 1.31】

稳定流是指速度、压力和温度基本上不随时间变化, 且不影响测量准确度的流动, 也称定常流。一般观察到的稳定流实际上是其速度、压力和温度等量都会围绕着平均值有很小的变化, 但不影响到测量的不确定度的流动。

不稳定流是指速度、压力、密度和温度中的一个或多个参数随时间波动的流动, 也称非定常流。对不稳定流所考虑的时间间隔应足够长, 以便排除紊流本身的随机分量。

11. 连续性方程

在流体流量测量实际应用中, 流体被认为是连续介质, 即由无数流体微团连续分布而组成, 表征流体属性的密度、黏度、速度、压力等物理量是连续分布的。这就是流体流量测量的“连续性假设”。

在管道内的流体流动过程中, 流体作稳定流动, 即流体的速度、压力和温度基本上不随时间变化, 在同一管道内的任意一横截面积为 A_1 的截面上, 平均流体速度为 $\bar{u}_1$, 平均密度为 ρ_1 , 在另一横截面积为 A_2 的截面上, 平均流体速度为 $\bar{u}_2$, 平均密度为 ρ_2 , 在一定时间间隔 Δt 内, 经过第一个截面的流体质量流量可用式 (1-29) 表示

$$m_1 = \rho_1 \bar{u}_1 A_1 \Delta t \quad (1-29)$$

经过第二个截面的流体质量流量可用式 (1-30) 表示

$$m_2 = \rho_2 \bar{u}_2 A_2 \Delta t \quad (1-30)$$

根据质量守恒定律和连续性假设, 则有

$$\rho_1 \bar{u}_1 A_1 \Delta t = \rho_2 \bar{u}_2 A_2 \Delta t \quad (1-31)$$

对于可压缩流体定稳定流, 连续性方程为

$$\rho_1 \bar{u}_1 A_1 = \rho_2 \bar{u}_2 A_2 = \text{常数} \quad (1-32)$$

对于不可压缩流体稳定, 连续性方程为

$$\bar{u}_1 A_1 = \bar{u}_2 A_2 \quad (1-33)$$

12. 伯努利方程

伯努利方程是表示流动流体的压力、流速与位置高度之间相互关系的能量方程。理想流体的伯努利方程可以由动能定理导出。根据动能定理, 某一段时间内流体动能的变化, 等于同一时间内作用于流体外力所做的功的和, 即

$$\frac{1}{2} m u_2^2 - \frac{1}{2} m u_1^2 = \Sigma W \quad (1-34)$$

式中: m ——流体质量, kg;

u_1 ——流体初始状态的流速, m/s;

u_2 ——流体动能变化后的流速, m/s;

ΣW ——同一时间内作用于流体外力所做的功的和, J。

如图 1-2 所示, 微小流束的过流断面 1-1, 2-2 面积为 dA_1 , dA_2 , 断面中心到基准面上的高度分别为 h_1 , h_2 , 在过流断面上的总压力分别为 p_1 和 p_2 , 则作用于流体

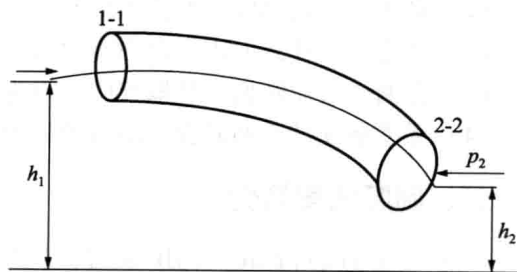


图 1-2 伯努利方程示意图

的和外力所做的功有：压力功 W_1 和重力做功 W_2 。

设在 dt 时间内，流体两个过流断面分别移动了距离 ds_1 和 ds_2 ，则压力功 W_1 为：

$$W_1 = p_1 dA_1 ds_1 - p_2 dA_2 ds_2$$

由于 $dA_1 ds_1 = dA_2 ds_2 = dV$ ，则，压力功可用式 (1-35) 表示

$$W_1 = (p_1 - p_2) dV \quad (1-35)$$

式中： dV ——流体微小流束体积。

重力做功 W_2 可用式 (1-36) 表示

$$W_2 = \rho g dV (h_1 - h_2) \quad (1-36)$$

式中： ρ ——流体密度；

g ——当地的重力加速度。

对于不可压缩流体在稳定流条件下的动能增量为

$$\frac{1}{2} (dm) u_2^2 - \frac{1}{2} (dm) u_1^2 = \frac{1}{2} dV \rho (u_2^2 - u_1^2) = W_1 + W_2 \quad (1-37)$$

由式 (1-35)、式 (1-36) 和式 (1-37) 得

$$\frac{1}{2} dV \rho (u_2^2 - u_1^2) = (p_1 - p_2) dV + \rho g dV (h_1 - h_2)$$

整理后得

$$h_1 g + \frac{p_1}{\rho} + \frac{u_1^2}{2} = h_2 g + \frac{p_2}{\rho} + \frac{u_2^2}{2} \quad (1-38)$$

式 (1-38) 即为流体流动的伯努利方程，表示流体运动时总的机械能守恒，所以称为流体的能量方程。

对于实际流体，由于流体与管壁的摩擦，流体内部的相互摩擦，一部分机械能会被转化为热能而消耗，称为阻力损失，用符号 h_w 表示。此时，伯努利方程修正为

$$h_1 g + \frac{p_1}{\rho} + \frac{u_1^2}{2} = h_2 g + \frac{p_2}{\rho} + \frac{u_2^2}{2} + h_w g \quad (1-39)$$

伯努利方程的适用条件为：

- (1) 流体的流动是稳定流。
- (2) 所取两过流断面是渐变流断面，即流体各点只受重力作用，流线几乎是相互平行的直线，但在两过流断面之间比一定要求是渐变流。

(3) 两过流断面间的流量不变。

(4) 流体为不可压缩流体。

在实际使用伯努利方程时，应注意以下几点：

- (1) 必须先选定流体为渐变流的两个过流断面。
- (2) 选定一个任意的水平面为重力的基准面。
- (3) 在两个过流断面上各取其中心点为代表点。
- (4) 无遗漏地计算两断面间的各项阻力损失。

二、温度测量基础

1. 温度 (temperature) 【JJF 1007, 3.2】

温度是表征物体的冷热程度的物理量。温度是决定一系统是否与其他系统处于热平衡的物理量，一

切互为热平衡的物体都具有相同的温度。温度与分子的平均动能相联系，它标志着物体内部分子无规则运动的剧烈程度。

温度是一个重要的物理量。在 SI 单位制中规定了 7 个基本单位，热力学温度单位就是其中之一，其单位名称是开尔文，单位符号为 K。1K 等于水三相点热力学温度的 1/273.16。

目前，国际上通用的温标是国际温标（符号 ITS），它能在各国得到复现，从而将温度量值逐级传递，直到各种测温仪表。

2. 温标（temperature scale）【JJF 1007, 3.8】

温标是温度的数值表示法。

为了定量表示物体的冷热程度，必须用数值将温度表示出来。用数值表示温度的方法称为温度标尺，简称温标。

建立一种温标必须具备以下 3 个条件：

（1）固定温度点

在不同条件下，物质通常都可以呈现为固体、液体、气体三种不同状态，称为物质的三“态”或三“相”。在一定条件下，物质的三相可以相互转化，或是维持在两相或三相共存的平衡状态。利用一些物质的“相”平衡温度（如水的汽相和液相的平衡温度——水沸点，水的液相和固相的平衡温度——冰点等）作为温标基本点，并对每个点的温度给以确定的数值，这些点就称为固定温度点（被选用的固定温度点的数值应当恒定，固定点的实现装置也应当便于制造和复现）。

（2）测温仪器

测温仪器利用某种物质的物理性质（如热膨胀，热电阻等）随温度的改变而变化的特性进行温度测量。这种被用来测定温度的物质称为测温质，用来测量温度的物理量称为测温量。例如，利用水银体积随温度的变化来测定温度的水银温度计和利用铂丝电阻值随温度变化来测定温度的热电阻等，其中水银和铂丝就是测温质，而热膨胀和热电阻则是测温量。

（3）温标方程

温标方程是用来确定各固定点之间任意点温度数值的数学关系式。以线性关系为例，设 y 为测温量， t 为温度，则

$$y = Kt + C \quad (1-40)$$

式中： K ——待定比例系数；

C ——决定初始值的常数。

利用两个已知温度数值 t_1 、 t_2 的固定温度点，可以求出常数 K 和 C

$$y_1 = Kt_1 + C \quad (1-41)$$

$$y_2 = Kt_2 + C \quad (1-42)$$

两式相减得

$$K = \frac{y_2 - y_1}{t_2 - t_1}$$

将 K 值代入式（1-41）得

$$C = y_1 - \left(\frac{y_2 - y_1}{t_2 - t_1} \right) t_1$$

将 K 、 C 值代入式（1-40），得到线性温标方程

$$t = \left(\frac{t_2 - t_1}{y_2 - y_1} \right) y + \left[t_1 - \left(\frac{t_2 - t_1}{y_2 - y_1} \right) y_1 \right] \quad (1-43)$$

3. 经验温标 (experimental temperature scale) 【JJF 1007, 3.9】

经验温标是借助于物质的某种物理参量与温度的关系, 用实验方法或经验公式构成的温标。例如, 摄氏温标和华氏温标。

(1) 摄氏温标。在 1742 年, 瑞典人安德斯·摄尔修斯 (Anders Celsius) 将 1 个标准大气压下的水的沸点规定为 0°C , 冰点定为 100°C , 将两固定温度点间等分为 100 个刻度, 这和现行的摄氏温标刚好相反, 直到 1744 年, 才被卡尔·林奈修订成现行的冰点定为 0°C , 水的沸点定为 100°C 。1954 年第十届国际计量大会特别将此温标命名为“摄氏温标”, 以表彰摄氏的贡献。目前, 世界上大多数国家采用摄氏温度单位。

(2) 华氏温标。在 1714 年, 德国人丹尼尔·家百列·华伦海特 (Daniel Gabriel Fahrenheit) 使用 3 个参考温度来标示刻度, 由冰、水以及氯化铵构成的混合物中, 温度计的刻度定为 0 度; 冰、水混合物中, 温度计的刻度标记为 32 度; 温度计含入口中或夹在腋下刻度标记为 96 度。后来, 其他科学家重新修订华氏温标, 使沸点刚好高于冰点 180 度。这样, 人体的正常体温修正成了 98.6 度。

华氏度 t_F 与摄氏度 t_c 的换算关系如下

$$\frac{t_c}{t_F - 32} = \frac{100}{212 - 32} \quad (1-44)$$

则有

$$t_c = \frac{5}{9}(t_F - 32) \quad (1-45)$$

$$t_F = \frac{9}{5}t_c + 32 \quad (1-46)$$

4. 热力学温标 (thermodynamic temperature scale)

经验温标具有局限性和任意性两个缺点, 是不科学的。只有超脱于任何特定特质, 而由普遍适用的自然规律所决定的温标, 才能将温度计量建立在科学的基础上。

在 1848 年, 物理学家开尔文 (Kelvin) 提出热力学温标。该温标是利用卡诺定理, 以热力学第一定律及第二定律为基础建立起来的。它与测温物质本身的性质无关。

(1) 热力学第一定律是由迈尔 (Mayer) 和焦耳 (Joule) 在 1842 年和 1843 年先后独立提出的。可以简略概括为: 一切物质的能量从一种形式转化为另一种形式, 从一个物体传给另一个物体, 在转化和传递中能量总量不变。

(2) 热力学第二定律是由克劳修斯和开尔文在 1850 年和 1856 年先后提出的。克劳修斯的解释可概括为: 不可能把热量从低温物体传到高温物体而不引起其他变化。开尔文的解释可概括为: 不可能从单一热源吸热使之完全变为有用的功而不引起其他变化。

(3) 卡诺定理: 所有工作于两个一定的温度之间的热机, 以可逆热机的效率最高, 并且所有可逆热机效率相等。

遵守卡诺定理的可逆热机热效率 η 为

$$\eta = \frac{W}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \quad (1-47)$$

式中: Q_1 ——卡诺热机从高温热源吸收的热量;

Q_2 ——卡诺热机向低温热源放出的热量;

W ——卡诺热机所做的功 (由热力学第一定律可得 W 、 Q_1 、 Q_2);

T_1 ——高温热源的温度;

T_2 ——低温热源的温度。

简化后可得