

电子水表 传感与信号处理技术

姚灵 编著

Dianzi Shuibiao
Chuangan yu Xinhao Chuli Jishu

 中国质检出版社

电 子 水 表

传感与信号处理技术

姚 灵 编著

中国质检出版社

北 京

图书在版编目 (CIP) 数据

电子水表传感与信号处理技术/姚灵编著. —北京: 中国质检出版社, 2011
ISBN 978 - 7 - 5026 - 3528 - 2

I. ①电… II. ①姚… III. ①水表—水流量—数字传感器 IV. ①TH814 - 39

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 238226 号

内 容 提 要

本书深入浅出地介绍了流量测量的基础理论和流量测量仪表的相关知识, 重点对机械水表的旋转变量传感与转换技术、位置量传感与转换技术、电磁流量传感技术、超声流量传感技术、射流流量传感技术、涡街流量传感技术等现代流量传感技术以及常用信号处理电路和信号处理方法、水表的性能特性及其试验方法等做了较为详细的介绍。本书内容丰富, 实用性强, 便于读者全面了解和掌握电子水表传感与信号处理技术最基本的内容和要求。

本书可供水表制造企业、计量检测单位、质量监督部门、供排水企业等企事业单位技术、管理、采购等部门的人员使用, 也可作为高校相关专业教学参考书和企业培训教材。

中国质检出版社出版发行

北京市朝阳区和平里西街甲 2 号 (100013)

北京市西城区三里河北街 16 号 (100045)

网址: www.spc.net.cn

总编室: (010)64275323 发行中心: (010)51780235

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 19.5 字数 465 千字

2012 年 3 月第 1 版 2012 年 3 月第 1 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

序

水表作为国家重点监管计量器具，在水计量与贸易结算、科学用水管理以及工农业用水测量等方面一直发挥着重要作用。近几十年来，在良好的需求环境培育下，我国水表产业快速发展与壮大，从水表制造弱国逐步走向了水表制造大国，目前正在向水表制造强国迈进。

当今水表产品门类与品种繁多，除了传统机械水表外，带电子装置水表和电子水表等产品大量涌现，新品形势非常喜人。由于传统机械水表在某些方面的特有优势，至少在目前还不能被其他水流量测量仪表所替代，因此机械水表在水计量领域的主导地位在当前乃至今后较长一段时间内是不会改变的。但从发展眼光看，无机械运动机构的新型电子水表由于具有高性能和高性价比等优势，必将代表今后水表产品及技术的发展方向和趋势。

社会在发展，时代在进步，水表产品的计量性能与使用功能是否与时俱进，是否跟上水计量需求步伐，关系到节约用水工作的成效和用水贸易结算的公平性。因此不断提升水表的性能与功能，是水表产品发展的硬道理，也是行业既定的方向和目标。电子水表作为一类新兴产品和技术，在产品计量性能、使用功能、寿命、可靠性以及性价比等方面均有非常显著的潜在优势与后劲。作为机械水表性能与功能的升级与补充，电子水表正在逐步进入高端水计量应用领域，并已取得了明显成效。因此，研究和发​​展电子水表技术和产品，积极推进流量传感与信号处理新技术，是历史赋予我们的使命和机遇，也是我们赶超水表世界先进水平的一个重要切入点。

由中国计量协会水表工作委员会副秘书长、宁波水表股份有限公司技术总监、教授级高级工程师姚灵编写的《电子水表传感与信号处理技术》一书，正是为了满足行业内外希望了解和学习电子水表技术与产品的相关人士需要而编写的一本通俗易懂的培训教材。该书内容深入浅出，既有广度又有深度，收集资料较丰富，基本反映了当前电子水表及相关学科的现状与趋势。出版该书的目的是为了加快电子水表技术及产品的普及，让更多的人比较全面准确地了解电子水表的原理、结构、性能及相关技术等内容，提高水表行业对水流量传感与信号处理新技术的认知水平，共同来推进我国电子水表事业的健康发展。

中国计量协会水表工作委员会主任委员

宁波水表股份有限公司董事长

张世豪

2011年7月20日

前言

随着全球淡水资源日趋紧缺，世界各国都将面临缺水困境，而全球范围对水资源的非理性消费、浪费和滥用以及对水资源的污染等行为，则必将会给人类赖以生存和繁衍的生态环境带来难以估量的破坏和影响。因此，科学管理和使用淡水资源、准确计量和控制用水量、创建节水型社会显得非常重要和紧迫。

“水计量技术与仪器”作为一门研究水流体计量特性和水流量仪器仪表制造技术的工程学科，在水资源迫切需要准确计量和精细管理的今天，其重要地位是不言而喻的。科学技术的发展，带动了计量科学技术、流体科学技术和电子科学技术的高速发展，与此同时，和“水计量技术与仪器”学科息息相关的仪器制造、传感器与信号处理、计算机与通信、微电子等基础技术学科也得到了长足进步，发展日新月异，它们为“水计量技术与仪器”学科的健康发展奠定了良好的基础。

水表是流量仪器（仪表）范畴中应用最为广泛、品种规格最为丰富的一种水计量产品，在用水量的计量与贸易结算、工业过程测量与控制等方面有着举足轻重的地位和作用。长期以来，速度式叶轮水表和容积式活塞水表占据了水表产品的主导地位，并长期服务于供水行业、工矿企业和居民用户，为用水计量和贸易结算做出了突出贡献。由于这类水表使用安装方便，造价成本不高，不用电源供电，测量范围较宽，因此在某些方面有着其他流量仪表不可替代的优势和属性，深受广大用户欢迎。但速度式和容积式机械水表是以叶轮和活塞旋转形式在水中进行工作的，其运动部件经过长期运行后会产生明显磨损和失准，尤其在水质不好的条件下，这种情况更趋严重，其结果会导致产品使用寿命缩短、测量准确度下降。机械式水表由于自身原理和结构等原因，测量准确度和测量范围在现有技术水平上要有显著提升和突破是非常困难的（目前这类水表的准确度等级只能达到2级水平，重复性也不够理想），难以满足对管道内水流体更精确和更可靠的计量需求。水表测量管内有叶轮或活塞等运动部件存在，会使管网压力损失变大，造成管网能源消耗增加。由于同样原因，该类结构水表不适合在中水、污水、废水等水质不好或有杂质的工况条件下使用。

为此，当今在充分挖掘机械水表产品潜力基础上，需要研究与开发测量更加准确、性能更趋完善、功能更易拓展、性价比更高的水表新产品来满足水计量技术的需要，推进水计量技术的发展与进步。

电子水表的诞生不过短短十几年，但其影响力和表现出的巨大潜力已远远超出人们预想，它使“梦想”变成现实，给水表产品带来了新的发展希望和机遇。通常含义的电子水表主要包括“带电子装置的机械水表”（俗称“智

能水表”)和“使用现代传感与信号处理技术的水表”(俗称“全电子水表”)两大类。其中,智能水表主要解决现有机械水表计量数据的传输和管理以及使用功能拓展等问题,如卡式预付费水表、远传水表及抄表系统等等;全电子水表主要通过采用新颖流量传感技术和信号处理技术,来提高水流量的计量准确度、流量测量范围和使用寿命。在广大科技人员和水表用户的共同努力下,电子水表技术发展快速,新技术、新方法、新思路层出不穷,同时也带动了新兴市场的启动与兴旺。预付费用水管理、自动抄读水表计量数据、无线远(近)距数据传输与监控、网络双向数据交换与控制以及无线传感器网络、物联网等技术都在逐步推进与应用,广大用户积极使用,发展势头良好。

为传播电子水表基础知识及技术,推进电子水表产品的研究与应用,让更多人员关注、了解并掌握电子水表的工作原理、基本结构以及相关知识,作者经多年的学习与研究,在广泛借鉴现有各种技术资料、产品样本和国内外专利文献基础上编写成本书。其目的是抛砖引玉,让更多的专业研发人员来共同参与该项有意义的工作,让更多制造和使用电子水表的专业人士对电子水表有更清晰的认识和理解,共同来关心和推进电子水表事业的进步与发展,使我国电子水表产业尽早走在世界前列。

本书中有部分章节内容直接引用了有关作者的著作和文献,使本书更具实用性和指导性,在此向他们表示衷心感谢。

在本书编写过程中,得到了我妻子的支持和帮助。几十年里,她为了支持我的工作和学习,不辞劳苦,放弃自己的专业和爱好,全心全意地支持我;她相夫教子,扶持家庭,分忧担虑,使我在长期的专业工作中能全身心投入,无后顾之忧,取得一些业绩和成功。特别是在本书编写的两年多时间里,她承担了全部家务,让我能在业余时间安心写作。今天是她的生日,我将该书作为生日礼物献给她,祝她幸福快乐,永远年轻、漂亮。

同时,还要感谢宁波水表股份有限公司徐云总经理和中国计量协会水表工作委员会的领导和公司的同仁,没有他们的支持、指导和帮助,也是不可能完成本书编写工作的。

最后,要特别感谢宁波水表股份有限公司董事长、中国计量协会水表工作委员会主任委员张世豪先生和资深水表专家、水表工作委员会专职副秘书长叶显苍高级工程师,没有他们将我引入水表行业,没有他们对我长期信任、关心和支持,也就没有我今天对水表事业的热爱和向往,以及对水表技术的认识和积累,也不可能有本书的出版,在这里我衷心祝愿两位水表行业的老前辈、老专家身体永远健康,青春常驻。

由于作者水平所限,书中疏漏及不妥之处在所难免,敬请广大读者及同行批评指正。

作者

2011年11月14日

于宁波

目 录

第1章 水的基本特性	(1)
1.1 水的物理性质	(1)
1.1.1 水的密度	(1)
1.1.2 水的重度	(2)
1.1.3 水的黏度	(2)
1.1.4 水的压缩性和膨胀性	(4)
1.1.5 水的导电性	(5)
1.2 水在管道内的流动特性	(5)
1.2.1 层流与紊流	(5)
1.2.2 流速分布及平均流速	(6)
1.2.3 流体流动的基本方程	(7)
1.2.4 与水流动特性有关的基本概念	(9)
1.2.5 研究流体运动的基本方法	(13)
1.3 流量测量的概念	(15)
1.3.1 流量	(15)
1.3.2 总量	(15)
1.3.3 常用流量单位	(16)
第2章 水流量测量仪表	(17)
2.1 叶轮式流量仪表	(17)
2.1.1 涡轮流量计	(17)
2.1.2 叶轮式水表	(21)
2.2 流量仪表的动静态特性	(25)
2.2.1 静态特性	(25)
2.2.2 动态特性	(31)
第3章 水表旋转量传感技术	(35)
3.1 水表产品分类	(35)
3.2 磁敏传感工作原理	(36)
3.2.1 流量与脉冲数关系	(36)
3.2.2 敏感元件数选择	(38)

3.3 电感传感工作原理	(38)
3.3.1 电涡流传感技术	(38)
3.3.2 电感传感方式在水表中的应用	(40)
3.4 消除外界静磁场干扰方案	(43)
3.4.1 棘轮传感方案	(43)
3.4.2 光电传感方案	(43)
3.4.3 电感传感方案	(44)
3.4.4 增加磁屏蔽装置	(44)
3.5 常用磁敏元件	(46)
3.5.1 干簧管	(46)
3.5.2 霍尔元件	(47)
3.6 表征磁特性的物理量	(49)
3.6.1 磁感应强度	(49)
3.6.2 磁通量	(49)
3.6.3 磁场强度	(50)
3.7 永磁材料的基本特性	(50)
3.7.1 永磁材料磁滞回线和去磁曲线	(51)
3.7.2 表征永磁材料特性的主要参数	(51)
3.7.3 几种常用永磁材料的特性	(52)
3.8 软磁材料的基本特性	(58)
3.8.1 主要性能	(58)
3.8.2 软磁材料的种类和选用	(59)
3.9 磁敏传感方式数据处理	(60)
3.9.1 单脉冲输出信号处理	(60)
3.9.2 双脉冲输出信号处理	(60)
3.9.3 三脉冲输出信号处理	(61)
3.10 脉冲输出传感技术存在问题	(61)

第4章 水表位置量传感技术

(62)

4.1 绝对位置编码器工作原理	(62)
4.1.1 位置编码器的构成	(63)
4.1.2 光电发射元件	(63)
4.1.3 光敏接收元件	(63)
4.2 常用编码方式	(65)
4.2.1 二进制码	(65)

4.2.2	格雷码 (Gray code)	(66)
4.2.3	M 系列码	(67)
4.3	位置编码传感器在水表中应用	(68)
4.3.1	编码与读码	(68)
4.3.2	单道编码	(68)
4.3.3	编码器的加工与安装	(74)
4.4	其他非接触读码方式	(75)
4.4.1	光反射读码方式	(75)
4.4.2	电容读码方式	(75)
4.4.3	电涡流读码方式	(75)
4.4.4	光传导对射读码方式	(76)
第 5 章	电磁流量传感技术	(77)
5.1	概述	(77)
5.2	电磁流量传感技术特点	(77)
5.3	传感器结构	(78)
5.3.1	测量管	(79)
5.3.2	磁路系统	(81)
5.4	工作原理	(82)
5.4.1	电磁流量传感器测量的基本条件	(83)
5.4.2	权重函数的物理意义	(83)
5.4.3	流速分布对电磁流量传感器测量结果的影响	(85)
5.5	励磁方式	(86)
5.5.1	直流励磁方式	(86)
5.5.2	工频正弦波励磁方式	(87)
5.5.3	低频矩形波励磁方式	(87)
5.5.4	三值低频矩形波励磁方式	(88)
5.5.5	双频矩形波励磁方式	(89)
5.5.6	尖脉冲励磁方式	(89)
5.6	电磁水表 (流量计) 产品	(89)
5.6.1	户用小口径电磁水表	(90)
5.6.2	大口径电磁水表 (流量计)	(92)
第 6 章	超声流量传感技术	(96)

6.1	超声波基本知识	(96)
6.1.1	超声波传播特性	(96)
6.1.2	超声波衰减特性	(98)
6.1.3	介质的声特性阻抗	(99)
6.1.4	声反射与声折射	(99)
6.2	超声换能器	(100)
6.2.1	超声换能器的主要性能指标	(100)
6.2.2	超声换能器的结构与要求	(104)
6.3	超声流量传感器	(110)
6.3.1	测量管与声道布置	(110)
6.3.2	换能器收发电路	(112)
6.4	超声流量测量的原理与方法	(114)
6.4.1	时差测量法工作原理	(114)
6.4.2	时差测量法信号处理	(115)
6.5	管道流场对超声流量测量结果的影响	(116)
6.5.1	管道充分发展流条件下单声道超声测量的修正方法	(116)
6.5.2	管道非充分发展流条件下对超声测量的影响	(118)
6.6	多声道超声流量测量的基本方法	(119)
6.6.1	加权积分法	(119)
6.6.2	重现流速分布曲线法	(119)
6.7	超声流量测量方法的主要特点	(120)
6.8	超声水表 (流量计) 产品	(120)
6.8.1	户用小口径超声水表	(120)
6.8.2	大口径超声水表	(122)
第7章	射流流量传感技术	(125)
7.1	传感器结构	(125)
7.2	传感器工作原理	(127)
7.2.1	射流振荡原理	(127)
7.2.2	信号检测原理	(127)
7.2.3	分流式大口径射流流量传感器	(132)
7.3	射流流量传感器的主要技术特性	(133)
7.3.1	流量测量特性分析	(134)
7.3.2	流量测量特性改进	(134)

7.4 射流水表 (流量计) 产品	(136)
7.4.1 LXP-15/20 射流电子水表	(136)
7.4.2 Model 141/140MX 射流流量计	(137)
第8章 涡街流量传感技术	(138)
8.1 传感器工作原理	(138)
8.2 旋涡发生体	(139)
8.3 传感器信号检测形式	(140)
8.3.1 应力传感信号检测方法	(140)
8.3.2 恒磁励磁电磁检测方法	(141)
8.4 涡街流量传感器特点	(141)
8.4.1 主要优点	(141)
8.4.2 不利因素	(142)
第9章 信号处理电路	(143)
9.1 信号变换电路	(143)
9.1.1 测量电桥变换电路	(143)
9.1.2 Ω -V 变换电路	(145)
9.1.3 I-V 变换电路	(146)
9.1.4 V-F 与 F-V 变换电路	(147)
9.1.5 绝对值变换电路	(147)
9.2 信号放大电路	(148)
9.2.1 基本比例放大器	(148)
9.2.2 仪用数据放大器	(150)
9.2.3 可编程增益放大器	(151)
9.2.4 电荷放大器	(153)
9.2.5 电桥放大器	(153)
9.2.6 电压比较器	(154)
9.3 信号滤波电路	(156)
9.3.1 低通滤波器 (LPF)	(156)
9.3.2 高通滤波器 (HPF)	(158)
9.3.3 带通滤波器 (BPF)	(160)
9.4 超声时差法时间测量电路	(161)
9.4.1 主要特性描述	(162)
9.4.2 工作原理框图	(164)
9.4.3 时间测量原理	(165)

9.4.4	时测芯片“模拟输入部分”特性	(166)
9.4.5	TDC - GP21 超声时差测量过程	(167)
第 10 章 信号处理技术		(169)
10.1	微弱信号处理技术	(169)
10.1.1	噪声与干扰的基本特征	(169)
10.1.2	有源滤波器的应用	(170)
10.1.3	高性能运放的应用	(170)
10.1.4	微弱信号的处理	(170)
10.1.5	小波分析	(174)
10.2	嵌入式微系统技术	(179)
10.2.1	嵌入式系统简介	(179)
10.2.2	嵌入式系统的硬件	(180)
10.2.3	嵌入式系统的软件	(181)
10.3	信号处理的常用方法	(182)
10.3.1	数据处理方法	(182)
10.3.2	函数拟合方法	(185)
10.3.3	数据插值方法	(188)
10.3.4	温度修正方法	(191)
10.3.5	相关分析方法	(192)
10.3.6	频谱分析方法	(195)
第 11 章 水表性能特性		(200)
11.1	水表产品标准	(200)
11.1.1	标准的适用范围	(200)
11.1.2	产品性能特性及结构的名词术语与要求	(201)
11.1.3	标准的基本内容	(206)
11.2	电子水表相关技术指标	(207)
11.2.1	电子封印	(207)
11.2.2	一般要求	(207)
11.2.3	检验装置	(207)
11.2.4	电子指示装置	(208)
11.2.5	电源	(208)
11.2.6	带电子装置水表的性能试验项目	(208)
11.3	电子水表的检验装置	(211)
11.3.1	检验装置的作用	(211)
11.3.2	测量传感器的检验装置	(212)

11.3.3	计算器的检验装置	(212)
11.3.4	指示装置的检验装置	(213)
11.3.5	辅助装置的检验装置	(213)
11.4	水表的结构特点和实际流量	(213)
11.4.1	水表的结构特点	(213)
11.4.2	水表的实际流量	(213)
11.5	水表新老标准部分流量参数对照表	(214)
第 12 章	水表性能特性试验	(217)
12.1	通用试验要求	(217)
12.2	确定示值误差试验	(217)
12.2.1	原则	(217)
12.2.2	试验装置描述	(217)
12.2.3	管道系统	(218)
12.2.4	经校准的参比装置	(219)
12.2.5	影响示值误差确定的主要因素	(220)
12.2.6	基本示值误差	(221)
12.2.7	水温影响试验	(222)
12.2.8	内压影响试验	(222)
12.2.9	逆流试验	(222)
12.2.10	流速场不规则性试验	(222)
12.2.11	试验结果的判断	(224)
12.3	静压试验	(224)
12.4	压力损失试验	(225)
12.5	耐久性试验	(227)
12.5.1	连续流量试验	(227)
12.5.2	断续流量试验	(228)
12.6	电子水表和带电子装置的机械水表的性能试验	(230)
12.6.1	一般要求	(230)
12.6.2	气候环境和机械环境	(232)
12.6.3	电磁环境	(236)
12.6.4	电源	(240)
12.7	水表通用试验项目	(245)
12.8	水表施加影响量试验项目	(246)
12.9	水表出厂检定项目	(247)
12.9.1	外观和功能检查	(247)

12.9.2 密封性检查 (247)

12.9.3 示值误差检定 (248)

附录 A 水表相对示值误差的计算 (249)

附录 B 产品可靠性与电磁兼容性概念 (253)

附录 C 计算流体动力学及现代设计技术简介 (257)

附录 D 水表产品标准学习与理解 (262)

附录 E 水表技术及发展趋势 (274)

参考文献 (293)

第 1 章 水 的 基 本 特 性

1.1 水的物理性质

自然界的物体形态主要分为固态、气态和液态三种，水流体是诸多液态流体中最为常见的一种形态。水流体的物理性质参数对其流量特性的影响是水表及流量计等产品设计与使用时应考虑的主要因素。封闭满管道中的水流体与其在开放式明渠环境中的流量特性是有显著不同的，本书讨论的水流体流量特性仅限于封闭圆形满管道中的特性，因为目前全球的供排水系统绝大多数都是通过封闭圆形管道实现的。

与水流体物理性质有关的参数主要有：水的密度、水的重度、水的黏度、水的压缩性和膨胀性、水的导电性等。

1.1.1 水的密度

水的质量与其体积之比称为水的密度。在匀质水中密度可用下式表示

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

式中： ρ ——水的密度， kg/m^3 ；

m ——水的质量， kg ；

V ——水的体积， m^3 。

水的密度是温度与压力的函数，随着温度和压力的变化其密度也随之而变化，但在低压（小于 5MPa）和常温条件下，压力变化对水的密度影响非常小，可忽略不计，并可将其近似视为不可压缩的流体。

当压力为常量时，水的密度计算公式可表示为

$$\rho = \rho_{20} [1 - \alpha(t - 20)] \quad (1-2)$$

式中： ρ ——温度为 t 时水的密度， kg/m^3 ；

ρ_{20} ——温度为 20℃ 时水的密度， kg/m^3 ；

α ——水的体积膨胀系数， $1/^\circ\text{C}$ 。

当温度为常量时，水的密度计算公式可表示为

$$\rho = \rho_{20} [1 - \beta(p_0 - p)] \quad (1-3)$$

式中： ρ ——压力为 p 时水的密度， kg/m^3 ；

ρ_{20} ——压力为 p_0 时水的密度， kg/m^3 ；

β ——水的体积压缩系数， $1/\text{MPa}$ ；

p_0 ——标准压力，其值取 101325Pa。

各密度单位的换算见表 1-1。

表 1-1 密度单位换算

单位符号	克/毫升	千克/米 ³	磅/英寸 ³	磅/英尺 ³	磅/英加仑	磅/美加仑
g/cm ³ 或 t/m ³	1	1000	0.03613	62.43	10.02	8.345
kg/m ³ 或 g/L	0.001	1	0.00003613	0.06243	0.01002	0.00835
lb/in ³	27.68	27680	1	1728	277.42	231
lb/ft ³	0.01602	16.02	0.00058	1	0.1605	0.1337
lb/UKgal	0.0998	99.8	0.0036	6.2288	1	0.8327
lb/USgal	0.1198	119.8	0.004329	7.48	1.201	1

1.1.2 水的重度

水的重量与其体积之比称为水的重度。在匀质水中重度可用下式表示

$$\gamma = \frac{W}{V} = \frac{mg}{V} \quad (1-4)$$

式中 γ ——水的重度, N/m³;

W ——水的重量, N;

V ——水的体积, m³;

m ——水的质量, kg;

g ——重力加速度, m/s²。

由于水的密度为 $\rho = \frac{m}{V}$, 则重度也可表示为

$$\gamma = \rho g \quad (1-5)$$

1.1.3 水的黏度

水流体受外力作用在管道内流动时, 由于其分子之间的内聚力发生作用, 形成分子间的运动, 产生内摩擦力。水流体的黏度是表征其内摩擦力大小的一种参数。黏度也是水流体温度和压力的函数。通常情况下, 温度上升, 水流体的黏度就会下降, 这是因为水分子间的空隙增大, 吸引力减少导致其黏度减少。

在工程应用中, 通常仅考虑温度对水流体黏度的影响, 只有在压力较高的条件下才会考虑压力的影响并作相应修正。

黏度的表征方法有多种, 其中常用的有动力黏度和运动黏度两种。

1.1.3.1 动力黏度

流体的动力黏度可用牛顿内摩擦力定律来表示, 其定义为

$$\tau = \eta \frac{dv}{dy} \quad (1-6)$$

式中: η ——流体的动力黏度, Pa·s;

τ ——单位面积上的内摩擦力, Pa;

$\frac{dv}{dy}$ ——流层间的速度梯度, 1/s。

符合式(1-6)的流体称为牛顿流体,其余的称为非牛顿流体。常见的牛顿流体有水、空气等,非牛顿流体有泥浆、纸浆、油墨等。

1.1.3.2 运动黏度

水流体的动力黏度 η 与其密度 ρ 之比,称为水流体的运动黏度,可用下式表示

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad (1-7)$$

式中: ν ——水流体的运动黏度, m^2/s 。

水流体的运动黏度 ν 与温度 t 的关系可近似地用以下经验公式来表示

$$\nu = \frac{0.01775}{1 + 0.0337t + 0.000221t^2} \quad (1-8)$$

式中: t ——水流体的温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

水流体的密度 ρ 、动力黏度 η 和运动黏度 ν 在一定温度范围内相互之间的数值关系见表1-2。

表1-2 水流体的黏度和密度随温度变化的对应值

温度/ $^{\circ}\text{C}$	动力黏度 $\eta/ (10^{-3}\text{Pa}\cdot\text{s})$	运动黏度 $\nu/ (10^{-6}\text{m}^2/\text{s})$	密度 $\rho/ (\text{kg}/\text{m}^3)$
0	1.792	1.792	999.9
5	1.519	1.519	1000.0
10	1.308	1.308	999.7
15	1.140	1.140	999.1
20	1.005	1.007	998.2
25	0.894	0.897	997.1
30	0.801	0.804	995.7
35	0.723	0.727	994.1
40	0.656	0.661	992.2
45	0.599	0.650	990.2
50	0.549	0.566	988.1
55	0.506	0.513	985.7
60	0.496	0.477	983.2
65	0.436	0.444	980.6
70	0.406	0.415	977.8
75	0.380	0.390	974.9
80	0.357	0.367	971.8
85	0.336	0.347	968.6
90	0.317	0.328	965.3
95	0.299	0.311	961.9
100	0.284	0.296	958.4