

化工自动化丛书

# 化工过程的特殊测量

陆水钧 黄祯地 陈婉珍 慎大刚 编

化学工业出版社

81.1657  
280

化工自动化丛书

# 化工过程的特殊测量

陆水钧 黄祯地 编  
陈婉珍 慎大刚

化学工业出版社

## 编写说明

近年来,随着化学工业和自动化科学技术的迅速发展,化工自动化技术有了新的进展。以现代控制理论为基础的各种新型控制方法和调节系统相继成功地应用于化工生产;新型的自动控制技术工具以及电子计算机也日益广泛用于化工自动化领域。

为了总结交流我国化工生产应用自动化技术的经验,介绍新的调节理论和控制方法,提高从事化工自动化工作的工人和技术人员的理论和技术水平,促进化工自动化工作的发展,一九七五年,在炼油、化工自动控制设计业务建设会议上,决定由化工部炼油、化工自动控制设计技术中心站负责,组织有关院校、科研设计单位和工厂,编写一套《化工自动化丛书》。

《化工自动化丛书》是在普及的基础上侧重提高的一套读物,主要包括经典和现代控制理论,各类调节系统和化工单元操作控制等方面的题材。“丛书”内容力求密切反映化工应用的特点,做到理论联系实际,既阐明基本概念,作出理论分析,又叙述工程应用方法和应用实例,说明具体实施方案和现场运行经验。

## 《化工自动化丛书》编委会成员

|       |     |              |
|-------|-----|--------------|
| 主任委员  | 周春晖 | (浙江大学)       |
| 副主任委员 | 蒋慰孙 | (华东化工学院)     |
|       | 万学达 | (中国寰球化学工程公司) |
|       | 王骥程 | (浙江大学)       |
|       | 沈承林 | (北京化工学院)     |
| 委员    | 韩建勋 | (天津大学)       |
|       | 庄兴稼 | (抚顺石油学院)     |
|       | 李乾光 | (化工部第一设计院)   |
|       | 林秋鸿 | (北京石油化工工程公司) |
|       | 王 翼 | (南开大学)       |
|       | 徐炳华 | (化工部第三设计院)   |
|       | 钱积新 | (浙江大学)       |
|       | 俞金寿 | (华东化工学院)     |
|       | 孙优贤 | (浙江大学)       |
|       | 罗秀来 | (上海炼油厂)      |
|       | 蔡鸿雄 | (兰州化学工业公司)   |

## 前 言

随着化工生产的发展和节能的需要，产生了新的化工工艺和控制方案，对化工参数的检测提出了新的要求：有些过去不检测或只是人工定期检测的参数要求在线连续检测了，例如，为了节能，要求采用烟道气含氧量作为被调参数之一来控制锅炉燃烧，这就需要自动检测烟道气中的微量氧；有些过去虽然也检测的参数，现在要求检测的精度提高了，例如，为了能量管理，需要精确地检测蒸汽流量。对于这些参数，尤其是新工艺中出现的一些新参数的检测方法，过去研究得较少，相应的检测仪表就更少。近几年来，在有关工程技术人员，特别是从事自动化仪表的工程技术人员努力下，为解决上述参数的检测，设计或仿制了不少新型仪表，也探索了一些新的检测方法。编写本书的目的就在于互相交流，及时推广、应用有关新技术、新仪表。

本书介绍了特殊流量、物性及物质成分分析等检测方法 & 检测仪表。其中特殊流量包括大流量、小流量、质量流量、水蒸汽流量、多相流量及腐蚀性介质流量、脉动流量等；物性测量及成分分析包括：含氧量、含水量、浓度、热值、密度、浊度及酸碱度等。

由于编者水平不高，书中所列内容尚不够全面，文中缺点、错误一定不少。诚恳地希望广大的读者给予批评和指正。

# 目 录

## 前言

### 第一篇 特殊流量的检测

|               |    |
|---------------|----|
| 概述            | 1  |
| 第一章 大流量的检测    | 4  |
| 第一节 毕托管及其发展   | 5  |
| 一、理论基础        | 5  |
| 二、标准毕托管       | 10 |
| 三、笛形均速管流量计    | 18 |
| 四、文丘里-毕托管流量计  | 23 |
| 五、双翼式均速管流量计   | 29 |
| 第二节 弯管流量计     | 34 |
| 一、工作原理及流量计算公式 | 34 |
| 二、流量系数 $s$    | 38 |
| 三、使用、安装及制造要求  | 39 |
| 第三节 卡门旋涡流量计   | 40 |
| 一、工作原理        | 41 |
| 二、流量方程式       | 44 |
| 三、变送器的组成      | 45 |
| 四、变送器的电子线路分析  | 49 |
| 五、使用安装        | 54 |
| 六、应用实例        | 55 |
| 第四节 插入式涡轮流量计  | 57 |
| 一、变送器的结构原理    | 57 |

|                               |    |
|-------------------------------|----|
| 二、使用安装                        | 58 |
| 三、应用实例                        | 60 |
| 第五节 超声波流量计                    | 61 |
| 一、基本原理                        | 61 |
| 二、应用频差法原理的超声波流量计              | 64 |
| 三、使用安装                        | 66 |
| 参考文献                          | 67 |
| 第二章 微小流量的检测                   | 68 |
| 第一节 小孔板流量计                    | 68 |
| 一、结构形式                        | 69 |
| 二、流量计算公式                      | 70 |
| 三、孔径和差压的选定                    | 71 |
| 四、读数修正                        | 73 |
| 五、应用实例                        | 73 |
| 第二节 内藏孔板流量计                   | 74 |
| 一、变送器的结构原理                    | 74 |
| 二、使用安装                        | 75 |
| 三、 $\frac{1}{4}$ 圆特殊节流元件(小喷嘴) | 77 |
| 第三节 层流流量计                     | 77 |
| 一、工作原理                        | 77 |
| 二、温度、压力影响                     | 78 |
| 三、盘形毛细管层流元件的结构                | 79 |
| 四、使用安装                        | 81 |
| 五、应用实例                        | 83 |
| 参考文献                          | 84 |
| 第三章 质量流量的检测                   | 85 |
| 第一节 间接式质量流量测量                 | 86 |
| 一、密度补偿式气体质量流量测量系统             | 86 |
| 二、温压补偿式气体质量流量测量系统             | 91 |

|                         |     |
|-------------------------|-----|
| 三、温度补偿式液体质量流量测量系统 ..... | 105 |
| 第二节 量热式质量流量测量 .....     | 109 |
| 一、量热式质量流量计原理 .....      | 111 |
| 二、量热式质量流量计的特点 .....     | 117 |
| 参考文献 .....              | 118 |
| 第四章 水蒸汽流量的检测 .....      | 119 |
| 第一节 水蒸汽的性质 .....        | 119 |
| 第二节 干饱和蒸汽流量的测量 .....    | 120 |
| 一、补偿公式的推导 .....         | 120 |
| 二、由单元组合仪表构成的测量系统 .....  | 123 |
| 三、专用干蒸汽流量测量装置 .....     | 128 |
| 第三节 湿蒸汽流量的测量 .....      | 139 |
| 一、流量公式 .....            | 139 |
| 二、干度的测量 .....           | 143 |
| 第四节 过热蒸汽流量的测量 .....     | 147 |
| 一、过热蒸汽的状态方程 .....       | 147 |
| 二、过热蒸汽流量测量装置 .....      | 149 |
| 参考文献 .....              | 156 |
| 第五章 多相流量的检测 .....       | 157 |
| 第一节 气液两相流量的测量 .....     | 157 |
| 一、差压法 .....             | 159 |
| 二、容积法 .....             | 164 |
| 第二节 气固流量的测量 .....       | 170 |
| 一、冲量式流量计 .....          | 170 |
| 二、其它型式流量计 .....         | 178 |
| 第三节 液固两相流量的测量 .....     | 183 |
| 一、潜水电磁流量计 .....         | 184 |
| 二、圆缺孔板流量计 .....         | 186 |
| 参考文献 .....              | 188 |



|                       |     |
|-----------------------|-----|
| <b>第六章 其它流量的检测</b>    | 189 |
| <b>第一节 腐蚀性介质流量的测量</b> | 189 |
| 一、仪表防腐蚀的一般方法          | 189 |
| 二、机械隔离                | 190 |
| 三、吹洗隔离                | 195 |
| 四、流量仪表的防腐             | 197 |
| 五、应用实例                | 199 |
| <b>第二节 脉动流量的测量</b>    | 206 |
| 一、测量脉动流量的条件           | 206 |
| 二、脉动流量测量系统            | 208 |
| 三、层流流量计               | 211 |
| 四、求平均值环节              | 212 |
| 参考文献                  | 213 |

## 第二篇 物性检测和物质成分分析

|                          |     |
|--------------------------|-----|
| <b>概述</b>                | 214 |
| 一、扩大应用领域, 增加品种规格         | 215 |
| 二、微机在流程分析仪器中的应用          | 220 |
| 三、新技术、新材料在分析仪器中得到越来越多的应用 | 221 |
| 四、分析仪器的发展动向              | 224 |
| 参考文献                     | 227 |
| <b>第七章 气体氧含量的检测</b>      | 229 |
| <b>第一节 氧化锆氧分析仪</b>       | 229 |
| 一、工作原理                   | 230 |
| 二、氧量变送器的校验与调整            | 246 |
| 三、探头的安装与维修               | 250 |
| 四、应用与发展动向                | 254 |
| <b>第二节 极谱式测氧仪</b>        | 255 |

|                            |            |
|----------------------------|------------|
| 一、工作原理 .....               | 255        |
| 二、结构、安装及维护 .....           | 260        |
| 参考文献 .....                 | 262        |
| <b>第八章 介质含水量的检测 .....</b>  | <b>263</b> |
| 第一节 检测介质含水量的几种方法 .....     | 263        |
| 第二节 微波法检测介质含水量 .....       | 267        |
| 一、基本原理 .....               | 267        |
| 二、几种微波水分仪的原理结构 .....       | 269        |
| 第三节 流程微波水分仪 .....          | 274        |
| 一、工作原理 .....               | 274        |
| 二、仪表的组成 .....              | 275        |
| 参考文献 .....                 | 283        |
| <b>第九章 溶液浓度的检测 .....</b>   | <b>284</b> |
| 第一节 概述 .....               | 285        |
| 第二节 工作原理与结构 .....          | 289        |
| 一、光电测量头 .....              | 286        |
| 二、直流稳压电源 .....             | 291        |
| 三、毫伏转换器 .....              | 291        |
| 第三节 校验、安装与维修 .....         | 293        |
| 一、校验 .....                 | 293        |
| 二、安装 .....                 | 298        |
| 三、使用与维修 .....              | 299        |
| 参考文献 .....                 | 300        |
| <b>第十章 其它特殊的物性检测 .....</b> | <b>301</b> |
| 第一节 可燃气体热值测量仪 .....        | 301        |
| 一、仪器的结构和原理 .....           | 302        |
| 二、仪器的应用 .....              | 308        |
| 第二节 自动密度计 .....            | 309        |
| 一、浮子式密度计 .....             | 310        |

|                            |     |
|----------------------------|-----|
| 二、振动式密度计 .....             | 315 |
| 第三节 自动浊度计 .....            | 321 |
| 一、盐水浊度计 .....              | 321 |
| 二、自动水质浊度计 .....            | 326 |
| 第四节 特殊介质pH值测定 .....        | 331 |
| 一、硝酸铵生产中硝酸铵中和液的pH值测定 ..... | 332 |
| 二、含硫酸尾渣尾液中和反应的pH值测量 .....  | 338 |
| 三、波动压力对象的pH值测定 .....       | 341 |
| 参考文献 .....                 | 343 |
| 附录 压力单位换算表 .....           | 344 |

# 第一篇 特殊流量的检测

## 概 述

流量是科研和工业生产的一个重要参数。流量的精确测量对石油、化工、冶金、电力等部门提高产品质量和科研数据的准确性，对节约能源、提高能源的效率都有着重大的现实意义。只有对流量进行精确的测量，才能做到“耗能有数，节能有据”。

人们对流量测量方法的研究及流量测量仪表的研制由来已久，可以说可资利用的原理及方法都进行了尝试，并成功地设计了多种流量仪表，满足了生产上的基本需要。

差压式流量计、面积式流量计和容积式流量计首先被应用于工业生产。在五十和六十年代中、涡轮流量计和电磁流量计获得了发展。那时，这五类流量计构成了流量测量技术的一大半。基于流体振动现象的卡门涡街流量计是七十年代的主要产品。此外，随着电子工业，特别是微处理器技术的发展，基于相关技术的相关流量计已进入实用化阶段。与此同时，还开发了一些新型流量计：超声波流量计、核磁共振流量计等等。

然而，工业生产的进一步发展及能量管理技术的提高，对流量仪表提出了新的更加苛刻的要求，诸如要求测量特大、特小流量，多相流体的流量，强腐蚀性流体流量等等。因而，迫使人们进行更深入、更广泛的研究，以期适应新形

势下对流量检测的要求。

目前,对流量检测技术的研究大致可归纳为如下几个方面:

1. 提高原有流量计的性能。例如,扩大量程比,提高测量精度等。

2. 扩大原有流量计的应用范围。例如,研究如何将单相孔板流量计用于气液两相流体流量的检测。

3. 解决综合输出。例如,对孔板差压式流量计,如何将差压、密度、膨胀系数等信号进行综合,最后输出流量信号。

4. 发展能量计量仪表。例如,国内对湿饱和蒸汽流量的计量问题正在大力研究。

5. 开发节能流量仪表。不仅要求流量计能准确地计量,还要求自身消耗的能量降到最小,以便代替节流式流量计这种耗能较大的流量计。

6. 开发特殊流量测量仪表。例如,特大流量,特小流量,强腐蚀性流量,高粘性流量,高参数(高温、高压、极低温、高真空)流量,脉动流量,质量流量,多相流量等流量的测量,都急待进一步解决。

流量是一个热工参数,而流量计却是一个“系统”。这是因为流量计的测量精度不仅取决于其本身的精度,还与流体的状态,管道的敷设情况有关。由此,给流量计的研制及使用带来了很多困难。这些困难表现在:

1. 流体的状态往往是不稳定的;
2. 被测流体的种类较多(例如,液体、气体、固体、多相流体等);
3. 状态参数(温度、压力)变化范围大;
4. 被测流体的物理、化学特性(密度、粘度、成分等)

的波动会影响仪表的示值；

5. 流量标定装置比较复杂, 造价昂贵, 这给流量标准的传递带来困难。

基于上述讨论, 流量检测技术尽管已进行了多年的研究, 亦已制造了品种繁多的流量计, 但仍然满足不了工农业日益发展的需要。流量检测作为一门技术, 仍然方兴未艾, 如何增加可靠性, 降低成本等一系列问题都等待着进一步探索和研究。

本篇介绍一些特殊流量的检测方法、检测仪表及试用经验。为此, 没有沿用传统的按照作用原理编排章节的方法, 而是按“特殊流量”进行编排。这里所指的特殊流量意指测量这些流量特别困难。例如, 湿蒸汽流量的测量仍然可以用节流装置进行测量, 因此, 从用节流装置测量流量的原理这一概念上来说, 并没有什么特殊的地方, 但它比测量单相流量时增加了额外的困难——干度校正。正因为这样, 我们把湿蒸汽流量作为特殊测量。当然, 困难与不困难、特殊与不特殊是相对而言的。随着时间的流逝, 困难的问题解决了, 原来特殊的变为不特殊了。随着生产的发展, 新的特殊流量又会产生, 迫使人们进行新的研究。

## 第一章 大流量的检测

所谓大流量是指河流、宽1m以上的大型水渠以及直径1m以上的管道流量。

大流量测量中最突出的矛盾是要求能耗小，投资省，安装维修方便，因此，通用的节流式流量计在大流量测量中是不大受欢迎的。

为了适应大流量测量的特殊情况，近年来相应研制了一些测量大流量的仪表。如电磁流量计可测最大管径为2500mm时的流量；超声波流量计可测最大管径为6000mm时的流量；还有一种利用管道的弯管部位来测量流量的弯管流量计，这是一种简易式流量计，适宜于测量精度要求不高的介质为液体的大流量；也有采用文丘里管来测量气体的大流量的，但成本较高。这些流量计在管内无可动部件，无压力损失或压力损失较小，尤其是超声波流量计，其成本并不随着管径增大而增加，安装方便，特别适用于大流量的测量。值得一提的是类似毕托管那样安装结构的插入式流量计逐渐得到发展，不仅各种较新结构的流量计设计成插入式结构，如文丘里-毕托管、均速管、涡街流量计等，也有将较早普遍使用的流量计，如涡流、电磁、靶式等做成插入式结构。这类仪表结构简单，拆装、维修方便，测量头体积小，因而成本低，压力损失小，是测量大流量的理想仪表。

## 第一节 毕托管及其发展

毕托管是最古老的测速元件，这种基于测量流速的差压感受元件，由于其有结构简单、成本低廉、压力损失小，安装和维修较方便等一系列优点，特别适合于大口径管道流量和要求压力损失较小的流量测量场合，近年来在国内外得到了很大的发展。

在毕托管的基础上，为了准确测量平均流速，提高测量精度，产生了均速管流量计及文丘里-毕托管流量计。

下面进一步阐述各种差压测量元件的结构原理、特性、计算和应用。

### 一、理论基础

如果我们已知管道内流体的流速，同时也知道管道内流速分布的规律，就很容易求出流体的平均流速，进而可以方便地从下式求得管道内流体的流量。

$$Q = F\bar{v} \quad (1-1)$$

式中  $Q$ ——体积流量；

$F$ ——管道截面积；

$\bar{v}$ ——平均流速。

对于一定的测量对象， $F$ 为常数，问题是如何求得 $\bar{v}$ ，这是我们讨论的主要内容。

下面讨论与平均速度有关的管流速度分布及平均流速的确定方法。

#### (一) 管流的速度分布

为了准确确定管截面上流体的平均流速，有必要首先了解一下管截面上流体的速度分布情况。

由流体力学可知，管道内流动的流体有两种状态：层



流和紊流。从流体内在结构来看,层流和紊流根本区别在于,层流中流体质点的流迹是相互平行的,其流动方向与管轴平行;紊流中流体质点的运动则相互混杂。

管流在层流状态下的速度分布,符合下列规律:

$$\frac{v(r)}{v_0} = 1 - \left( \frac{r}{R} \right)^2 \quad (1-2)$$

式中  $r$ ——在管截面上离管轴的距离;

$R$ ——圆管半径;

$v(r)$ ——流体在离管轴为 $r$ 处的轴向流速;

$v_0 = \frac{\Delta P}{4\mu L} R^2$ ——流体在 $r=0$ 处的流速,即管轴上的流速,

其中 $\Delta P$ 是长度为 $L$ 的管段上的压力降;

$\mu$ ——流体的动力粘度。

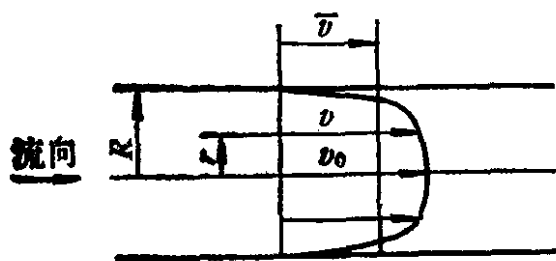


图 1-1 层流速度分布图

式(1-2)表明,管流在层流状态下的速度分布是一个以管轴为中心的旋转抛物面,如图1-1所示。管轴上的流速最大,即 $v_0 = v_{\max}$ 。

管截面上的平均流

速是个假想流速,它是按下式定义的:

$$\bar{v} = \frac{1}{\pi R^2} 2\pi \int_0^R v(r) r dr \quad (1-3)$$

将式(1-2)代入式(1-3)得:

$$\bar{v} = \frac{1}{\pi R^2} 2\pi \int_0^R \frac{\Delta P}{4\mu L} \left[ 1 - \left( \frac{r}{R} \right)^2 \right] r dr$$