



燃 烧

韩 才 元

测量技术



RANSHAO CONGSHU

华中理工大学出版社

TQ038
4

燃 烧 测 量 技 术

韩 才 元 华中理工大学出版社



C586097



燃烧测量技术

韩才元

责任编辑 易秋明

*

华中理工大学出版社出版发行

(武昌喻家山)

新华书店湖北发行所经销

华中理工大学出版社印刷厂印刷

*

开本: 850×1168 1/32 印张: 8.875 插页: 2 字数: 217 000

1990年12月第1版 1990年12月第1次印刷

印数: 1-1 500

ISBN 7-5609-0488-2/TK·17

定价: 2.10元

内 容 提 要

燃烧过程是复杂的物理和化学反应过程，包括流体的流动、燃料的高温化学反应、炉内的对流和辐射热交换等。为研究燃烧过程的规律性，发展燃烧新技术，必须测量各种热工参数。作者收集了国内外有关资料，溶入了自己的研究心得，使本书具有自己的特色。本书主要内容：测量和燃烧测量的概念；流体的压力和流量的测量；流动速度的测量（压力传感、电量传感和光量传感）；温度的测量（细丝热电偶、多热电偶和激光全息干涉法）；烟气成分分析；炉内热流的测量和微机数据处理等。

本书作为大学高年级学生、研究生的教材，也可供从事燃烧技术的研究人员及工程技术人员参考。

F1385/04

前 言

燃烧丛书是由华中理工大学燃烧研究室汇编，作者综合汇集了最新文献、资料，结合了科研成果，由马毓义教授主编。丛书内容包括：

煤粉燃烧物理化学基础

燃烧测量技术

燃烧空气动力学

燃烧与污染

燃烧的稳态与强化

燃烧过程的模化

燃烧的优化

丛书文字简练、流畅，公式、图表清晰，有理论分析，内容新颖，实用性强。可作为热能、冶金、化工、航空、船舶和环保等专业研究燃烧技术的博士、硕士研究生，大学高年级学生和教师的教材，也可供有关学科研究人员及工程技术人员参考。

编者

1990年元月

序

燃烧过程是复杂的物理和化学反应过程，包括流体的流动、燃料的高温化学反应、炉内的对流和辐射热交换等。为了深入地了解和研究燃烧过程的规律性，以及提高燃料燃烧的稳定性 and 经济性，发展新的燃烧技术，必须对燃烧过程的各种热工参数专门进行测量。为此根据国内外积累的资料，结合多年来实验室研究和工业试验的实践，特别是我们的科研成果，编写了这本书。主要供高年级大学生、研究生和从事燃烧的广大工程技术人员参考。

本书的主要内容包括：测量和燃烧测量的概念；流体的压力和流量测量；流动速度测量（包括压力传感测量，电量传感测量和光量传感测量）；温度测量（重点为气流温度测量）；烟气成分分析；炉内热流测量；燃烧测量中微机数据处理等。

必须指出，本书是在华中理工大学燃烧研究室多年来教学和科研工作的基础上编写而成的。其中不仅编入作者积累的科研成果，有些成果还是初次发表的。在不少地方也引用了其他教师的科研成果，如第五章烟气分析中气相色谱法部分直接引用易秋明长期研究的成果；在速度测量（包括探针和热线风速仪）和温度测量的科研成果中李佛金作出了不少贡献。同样，本书也引用了国内同行的研究成果，例如浙江大学燃烧与传热教研室在微机数据处理方面所做的工作；东方锅炉厂李村生、吴哲辉在热流计综述方面所做的工作等等。在此，作者仅向以上各位同志表示谢意，并请对编写中取舍不当或与原意不符的地方给予指正。全书承徐旭常主审，并提出了许多宝贵意见，在此深表谢意。

编著者

1989年5月于华中理工大学

目 录

第一章 绪论

§1. 测量和燃烧测量的概念.....	(1)
§1.1 测量的概念.....	(1)
§1.2 燃烧测量的概念.....	(3)
§2. 测量仪表的基本性能.....	(4)
§2.1 测量范围和量程.....	(5)
§2.2 仪表的基本误差.....	(6)
§2.3 仪表的精度等级.....	(8)
§2.4 仪表的灵敏度与分辨率.....	(9)
§2.5 仪表的响应时间和漂移.....	(10)
§3. 燃烧检测的基本方法.....	(11)
§3.1 静态检测与动态检测方法.....	(11)
§3.2 点参数的测量和场参数的测量.....	(12)
§3.3 接触式测量与非接触式测量.....	(13)
§3.4 非零检测法和零位检测法.....	(13)

第二章 压力和流量的测量

§1. 流体的压力.....	(15)
§2. 流体静压的测量.....	(15)
§2.1 壁面静压的测量.....	(16)
§2.2 流场中静压的测量.....	(17)
§3. 流体全压的测量.....	(19)
§3.1 全压探针.....	(20)
§4. 压力计.....	(24)
§4.1 U 型压力计.....	(24)
§4.2 倾斜式微压计.....	(24)

§4.3	补偿式微压计	(26)
§4.4	微压计的校验	(27)
§5.	非标准型测压管测量流量	(28)
§5.1	笛形测压管	(29)
§5.2	靠背式动压测定管	(31)
§5.3	翼形动压测量装置	(32)
§6.	卡门涡流量计	(33)
§6.1	卡门涡流量计的基本原理	(33)
§6.2	卡门涡流量计的设计和计算	(33)
§7.	转子流量计	(35)
§7.1	转子流量计的原理和流量方程	(35)
§7.2	转子流量计的构造	(37)

第三章 速度的测量

§1.	压力传感测量	(39)
§1.1	一元流动速度的测量	(39)
§1.2	二元流动速度的测量	(45)
§1.3	三元流动速度的测量	(66)
§2.	电量传感测量	(84)
§2.1	热线风速仪的工作原理	(84)
§2.2	恒阻风速仪	(86)
§2.3	恒流风速仪	(87)
§2.4	温度补偿	(88)
§2.5	线性化	(94)
§2.6	桥路设计原则	(98)
§2.7	变温风洞及校正速度	(101)
§2.8	热线工作特性	(102)
§2.9	热线焊接线路和焊接工艺	(104)
§2.10	用于多元流动测量的热线风速仪	(105)
§3.	光量传感测量	(110)
§3.1	光量传感测速的特点	(110)

§3.2 激光多普勒测技术.....	(111)
§4. 风洞的设计及调整.....	(118)
§4.1 校正风洞的设计.....	(119)
§4.2 实例.....	(123)
§4.3 风洞调整.....	(124)

第四章 温度的测量

§1. 概论.....	(126)
§1.1 热电偶测量温度的原理.....	(126)
§1.2 热电偶的冷端温度补偿.....	(128)
§1.3 热电偶的焊接和校验.....	(132)
§2. 温度测量中的误差分析.....	(137)
§3. 烟风道中气流温度的测量.....	(140)
§4. 燃烧室内火焰温度的测量.....	(145)
§4.1 裸露热电偶测量烟气温度的.....	(145)
§4.2 带隔离罩热电偶测量烟气温度的.....	(148)
§5. 细丝热电偶及多热电偶.....	(151)
§5.1 细丝热电偶测量烟气温度的.....	(151)
§5.2 “零”直径外推法测量烟气温度的.....	(152)
§5.3 多热电偶法测量烟气温度的.....	(154)
§6. 抽气热电偶.....	(157)
§6.1 抽气热电偶的设计和使用.....	(159)
§7. 激光全息干涉法测量温度.....	(166)
§7.1 激光全息干涉法测量原理.....	(166)
§7.2 双波长激光全息干涉系统.....	(168)
§7.3 理想的激光全息干涉系统及计算.....	(171)
§7.4 激光全息干涉法的实际应用.....	(173)

第五章 烟气成分分析

§1. 烟气取样.....	(179)
§1.1 等速取样方法和计算.....	(179)

§1.2 等速取样装置的设计	(184)
§2. 烟气成分的化学分析	(187)
§2.1 奥氏分析器及其装置系统	(187)
§2.2 操作方法和注意事项	(189)
§3. 烟气成分的色谱分析	(190)
§3.1 气相色谱法的原理	(191)
§3.2 分离组分的条件选择	(195)
§3.3 分析组分的检测器	(198)
§3.4 热导池检测器	(200)
§3.5 气相色谱仪的标定	(202)

第六章 炉内热流的测量

§1. 热流测量的原理和应用	(206)
§2. 水流式热流计	(209)
§3. 不稳定式热流计	(210)
§4. 薄板热流计	(211)
§5. 板状热电偶式热流计	(212)
§5.1 “小泉式”热流计	(214)
§5.2 “荒卷式”热流计	(215)
§5.3 “加藤式”热流计	(215)
§6. 固定式热流式	(217)
§6.1 “金属片”热流计	(217)
§6.2 “圆盘式”热流计	(219)
§6.3 “隐形式”热流计	(222)
§6.4 热流计表面沾污问题	(223)
§7. 气幕式热流计	(227)
§8. 热辐射探头	(231)
§9. 椭球式辐射式热流计	(234)
§10. 双温差热流计	(235)

第七章 燃烧测量微机数据处理

§1. 概论.....	(239)
§2. 速度测量微机数据处理.....	(240)
§2.1 插值数据处理方法.....	(241)
§2.2 皮托管测速的数据处理.....	(244)
§2.3 探针测速的插值数据处理.....	(246)
§2.4 经验公式回归数据处理.....	(255)
§2.5 探针测速的回归数据处理.....	(262)
§3. 温度测量的微机数据处理.....	(268)
参考文献	

第一章 绪 论

§1. 测量和燃烧测量的概念

测量是人类认识事物本质所不可缺少的手段。通过测量和试验能使人们对事物获得定量的概念和发现事物的规律性。科学上很多新的发明和突破都是以实验测试为基础的。没有测量，就没有科学。例如，近年来天文学上的发现和许多精确的测量技术对广义相对论进行了成功的验证，才使这个理论得到长足的发展。在一般工业技术中，如各种新的机器、新的工艺过程，都与测量许多物理量有关。

为了检查、监督和控制某个生产过程或运动对象，使它们处于最佳运行工况，就必须测量各种物理量，通过数据处理，发出信号，进行闭环控制，就能大大地提高生产力和节约能源。例如，为了使锅炉处在最优化条件下燃烧，提高锅炉热效率，首先测量蒸汽压力，汽包水位，炉膛负压，排烟温度，烟气中含氧量等等，进行锅炉热效率的在线测量，通过闭环控制，使烟气中的含氧量保持在较佳值，就能保证锅炉的热效率高，达到较好的节能效果。

以上情况表明，测量既可以发现新的科学规律，制造出新产品；也可以使设备在最优化的条件下运行。因此，正确的掌握测量技术具有十分重要的科学意义。

§1.1 测量的概念

测量是指准确地获得表征被测对象特征的某些参数的定量信息。例如人们的身体健康情况，有时可以通过准确地测量体温，

给医生提供必要的数据，有助于作出正确的诊断，体温就是被测量或被测参数。被测量是指需要数值定量的一些参数或物理量，它含有表征被测对象的某些特征的定量信息。

温度的测量单位是摄氏度，其符号为 $^{\circ}\text{C}$ ，这就是说，某些物理量的测量单位就是人为定义其数值为1的某个物理量。所谓测量就是用实验的方法，借助一定的仪器或设备，把被测量与其单位物理量进行比较，求取二者的比值，从而得到被测量数值大小的过程。

设被测量为 X_0 ，其单位为 u ，二者的比值为 x_0 ，则测量过程可用数学形式描述

$$x_0 = X_0 / u$$

或

$$X_0 = x_0 u \quad (1-1)$$

上式称为测量的基本方程式。式中，数值化后的比值 x_0 称为被测量的真实数值，简称为真值。因为在实际求取数值化比值时，只能用有限位数的数字来表示，而真值 x_0 却往往不能用有限位数的数字来表示；而且，在测量过程中必定有各种误差存在。所以被测参数的真值 x_0 只能近似地等于其测量值 x ，即 $x_0 \approx x$ ，测量基本方程式应改写为

$$X_0 \approx x u \quad (1-2)$$

应当注意，被测量真值 x_0 或其测量值 x 的大小均与其单位有关。单位愈小，它们的数值愈大。例如温度的单位，多数采用摄氏温标和华氏温标，摄氏温标规定标准大气压下纯水的冰融点为0度，水沸点为100度，中间等分为100格，每格为摄氏1度，符号为 $^{\circ}\text{C}$ ；华氏温标规定标准大气压下纯水的冰融点为32度，水沸点为212度，中间等分为180格，每格为华氏1度，符号为 $^{\circ}\text{F}$ 。因此从表面看来，似乎华氏212度比摄氏100度大，但这仅仅是从绝对数字来看，实质上它们是相等的，它们之间的关系可以通过下列公式进行换算

$$C = \frac{5}{9}(F - 32) \quad (1-3)$$

式中，C, F 分别代表摄氏和华氏的温度值。

因此，一个完整的测量结果应该包含两部分内容，即所得的测量值 x 与所采用的测量单位。

从测量基本方程式可知，测量过程有三要素：一是测量单位，它是人们根据物理现象而做出的严格规定；二是测量方法，它是将被测量与其单位进行比较的实验方法；三是测量仪器和设备，它是测量过程的具体体现与实施者，是为了求取比值而使用的一些仪器设备。有些测量仪器输入的是被测量，而输出的就是被测量与其单位的比值——测量值。例如温度计、压力表和风速仪等。

取得了测量值并不意味着工作的终结。为了准确地获取表征对象的定量信息，还要对实验结果进行数据处理与误差分析，估计结果的可靠性，为保证安全生产，提高经济效益；为保证产品质量；为生产过程自动化；为科学研究提供可靠的数据。

§1.2 燃烧测量的概念

测量与燃烧测量没有什么本质上的区别，只是燃烧测量把测量限制在燃烧现象中而已。

燃烧过程是比较复杂的，物理现象和化学反应交替发生。有冷态试验，也有热态试验，包括实验室的科学实验和工业过程的大型试验。因此，燃烧测量的内容比较广泛，也比较复杂。例如速度测量，属于冷态或无燃烧的速度测量，它包括风管内气流速度测量，低温烟道内烟气流速的测量，炉膛冷态空气动力场的测量等；热态速度测量主要是指炉膛内燃烧气体动力场的测量，这里的火焰温度高达1600℃，而且煤灰、烟尘往往会损坏敏感探头，给准确的测量造成较大的困难。又如温度测量包括热风温度的测量，尾部烟气温度的测量，一般可用玻璃水银温度计、石英管水

银温度计或普通的热电偶，对于火焰温度的测量要用铂铑—铂铑热电偶，钨铼热电偶或辐射高温计等。

对于燃烧化学反应，一般只分析燃烧产物的成分，如 CO_2 ， O_2 ， CO 等等，还有未完全燃烧的飞灰和灰渣中的含碳量。在实验室的燃烧机理研究中，还要测量燃烧过程的中间产物，燃料反应过程的热重分析，挥发分的析出规律性等。

燃烧引起的污染，日益得到人们的极大关注，对污染物的排放量，提出了严格的控制，因此，要进行燃烧产物的有害气体 NO_x 、 SO_x 的测量，并提高测量的精确度。

总之，燃烧测量是复杂的，内容也比较广泛，测量环境比较恶劣，想要准确地取得测量值，必须做较细致的工作和探索新的测量方法。

§2. 测量仪表的基本性能

仪表的性能指标是评价仪表性能好坏、质量优劣的主要依据，也是正确选择仪表、使用仪表，以达到准确测量的目的，所必需具备和了解的知识。

仪表的性能指标很多，概括起来包括下列三个方面：技术指标、经济指标和操作指标。

仪表的技术指标有：基本误差、精度等级、灵敏度、量程、响应时间、漂移等。

仪表的经济指标有：功耗、价格、使用寿命以及综合指标的性能/价格比等。

仪表的操作指标有：操作维护是否方便、能否可靠安全运行、抗干扰和自我保护能力的强弱、自动化程度的高低以及智能化的水平等。

一般的仪表要完全满足上述条件是比较困难的。仪表正常工作时，对于一定的电源电压、频率、温度、湿度、振动、外界电

磁场、安装位置等条件，一般是能满足要求的。但是对仪表的基本性能，应用场所（实验室或工业用）要清楚的了解，才能达到准确的测量目的。

§2.1 测量范围和量程

在正常条件下，仪表可以测量被测参数的范围叫做测量范围，其最低值和最高值分别称为下限和上限。测量范围是用下限和上限来表示。例如某水银温度计的测量范围是 $(0 \sim 100) (^{\circ}\text{C})$ ；某弹簧管压力计的测量范围是 $(0 \sim 10) (\text{N}/\text{m}^2)$ 等等。

测量的量程是测量范围的上限和下限的代数差。如上述温度计的量程是 $100 (^{\circ}\text{C})$ ，压力计的量程是 $10 (\text{N}/\text{m}^2)$ 。

关于测量仪表量程的选择是十分讲究的。以弹簧管压力计为例，如果测量的压力在 $(1 \sim 2) (\text{N}/\text{m}^2)$ 或 $(8 \sim 9) (\text{N}/\text{m}^2)$ 范围内变化，选用 $(0 \sim 10) (\text{N}/\text{m}^2)$ 的压力计是不合适的，因为在仪表的上限或下限附近，仪表的读数不十分准确，线性条件较差，而且仪表的指针容易打到头。在严格的条件下，仪表的量程应选择在正常读数两倍的范围内，如测量的压力是 $5 (\text{N}/\text{m}^2)$ ，应选用量程 $(0 \sim 10) (\text{N}/\text{m}^2)$ 的压力表。如果测量范围有变化，例如测量值经常在 $l_1 \sim l_2$ 的范围内变化，那么，仪表的上限 l_0 和下限 l 应该这样选择：使测量值 (l_1, l_2) 总是处在仪表量程的 $(1/3 \sim 2/3)$ 的范围内。即应满足下列两个不等式

$$\left. \begin{aligned} l_1 &\geq \frac{1}{3} (l - l_0) \\ l_2 &\leq \frac{2}{3} (l - l_0) \end{aligned} \right\} \quad (1-4)$$

例如锅炉尾部的排烟温度变化为 $(100 \sim 200) (^{\circ}\text{C})$ ，可以选用量程为 $(0 \sim 300) (^{\circ}\text{C})$ 的温度计。

在实际使用中有时对仪表的测量范围作适当的改变，例如零点迁移或量程迁移等，视具体情况作出正确的处理。

§2.2 仪表的基本误差

基本误差是指仪表在规定的工作条件下（参比工作条件）的误差。仪表的基本误差有：

1. 绝对误差

仪表的指示值 x 与被测量的真值 x_0 之间的代数差值称为仪表示值的绝对误差。符号为 δ ，用下列公式表示为

$$\delta = x - x_0 \quad (1-5)$$

式中，真值 x_0 可为被测量公认的约定真值，也可以由标准仪表所测得的测量值。

在校准或检定仪表时，常采用比较法，即对于同一被测量，将标准仪表的示值 x_0 （真值）与被校表的示值 x 进行比较，则它们的差值就是被校仪表表示值的绝对误差。如果它是一个恒定值，则是系统误差，它可能是仪表在非常工作条件下使用而产生的，或其他原因所造成的附加误差。此时仪表的示值应加以修正，被测量的实际值 x_0 为

$$x_0 = x - \delta = x + c \quad (1-6)$$

式中，数值 c 称为修正值或校正值。修正值与示值的绝对误差的数值相等，但符号相反，即

$$c = -\delta = x_0 - x \quad (1-7)$$

试验室用的标准表常由高一级的标准表校准，检定结果附有示值修正表或修正曲线 $c = f(x)$ 。

绝对误差 δ 说明了仪表示值偏离真值的大小，它说明仪表测量的精确度。

2. 相对误差

仪表示值的绝对误差 δ 与被测量真值 x_0 的比值，称之为仪表示值的相对误差 r ，它常用百分数表示为

$$r = \frac{\delta}{x_0} \times 100\% = \frac{x - x_0}{x_0} \times 100\% \quad (1-8)$$