

〔美〕E.R.G. 埃克特 R.J. 戈尔茨坦 编著
蒋章焰 何文欣 陈文芳 译



HUANREXUE CESHI
FANGFA

传热学测试方法

国防工业出版社

传 热 学 测 试 方 法

[美] E.R.G. 埃克特 编著
R.J. 戈尔茨坦

蒋章焰 何文欣 陈文芳 译

蒋思宗 周序鸿 校

国 防 工 业 出 版 社

内 容 简 介

本书是一本关于传热学测试方法的综述性参考书,由蜚声国际的美国著名工程热物理学家埃克特 (E. R. G. Eckert) 和戈尔茨坦 (R. J. Goldstein) 主编。全书共分十四章,内容包括从深低温到高温的温度测量 (铂电阻和热电偶测温法、光学测温法、光谱测温法)、表面热流密度测量、热辐射测量、热物性测量、等离子体的探针测量、激光多普勒风速计、以及传热过程的模拟。书中着重论述各种测试方法的原理、要点和难点,同时也简要介绍标准铂电阻温度计的检定以及关于国际实用温标的一些基本知识。

本书主要对象是在航空、航天、能源、化工、冶金以及等离子体工程等方面从事传热测试的科技人员,也可供高等学校有关专业师生参考。

MEASUREMENTS IN HEAT TRANSFER

E. R. G. Eckert

R. J. Goldstein

McGraw-Hill Book

Company

*

传热学测试方法

【美】 E. R. G. 埃克特 编著
R. J. 戈尔茨坦

蒋章焰 何文欣 陈文芳 译

蒋思宗 周序鸿 校

*

国防工业出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

850×1168 $1/16$ 印张27 $3/4$ 646千字

1987年12月第一版 1987年12月第一次印刷 印数: 10,001—2,920册

ISBN7-118-00226-7/TK7 定价6.25元

序

传热学教科书一般都着重于传热过程的分析，而对测试方法完全避而不谈，或者只用少量篇幅论述测试方法。但是，在传热测试中会遇到一些特殊问题，要得到精确的结果，就需要有知识和技巧。本书就专门阐述传热测试的方法、难点和仪表。

在有热量传递的情况下测量温度，不能不考虑对可能存在的系统误差进行校正，这种系统误差是由传导、辐射引起的，或者在不稳态情况下由热容效应所致。第一章讨论这种系统误差及其计算方法。第二章论述铂电阻温度计，第三章论述热电偶，内容包括它们的检定以及它们在温度测量中的应用。深低温条件下的传热过程需要有特殊的温度测量方法，这将在第四章中加以讨论。

光学测温法具有不扰动被测量的温度场这样一个优点；基于折射率变化的光学测温系统将在第五章中评述。在高温情况下，光谱测定法可以用作检测手段；这种方法在第六章中论述。焓探针是测量高温气流焓的一种很有用的仪器，它将在第七章中加以讨论。

热流密度的测量是特别困难的，第八章中列举了几种方法，对此作了说明。传热过程和传质过程极为相似，这就有可能通过测量模拟的传质情况来获取有关传热过程的数据资料。这个方法的优点在于：传质实验做起来比较简单，或者所要求的边界条件是明显确定的。电化学法还有一些额外的优点：它只需要进行电学测量，而且既可以进行局部测量，又可以进行瞬时测量。这样一些模拟测试方法将在第九章中阐述。热辐射作为一种传热方式，近年来重要性提高了，这是因为工程系统有着向更高温度发展的趋势，此外，航天器在大气层外面的宇宙空间飞行时，热辐射是唯一的一种传热方式。第十章将论述用于研究热辐射的各种方法。

就特定的工程问题进行传热计算时，以及当用无量纲参数综合传热测试结果的时候，需要知道物质的热物理性质和输运性质。这样一些物性的测定往往是跟传热研究一起进行的。第十一章和第十二章将论述用于这类测试的方法。

流速测量往往是对流换热测试的基础。采用第十三章所描述的激光-多普勒法即可根据散射激光束的频率来推算出流速。与通常的流速测管不同，光束对流场没有什么影响。在低温下，流速的测定通常可用热线进行；而在较高的温度下，就需要用特殊的仪表，这类仪表将在第十四章详述。

本书第一版是根据在“传热学测试方法”暑期专修班上讲授的讲义编订而成的。该专修班系由明尼苏达大学主办，参加讲课的有明尼苏达大学机械工程系热力学和传热学教研室的教师，还有外面请来的其所讲授内容方面的专家。在这些讲义的基础上汇编成的文稿于1970年在北大西洋公约组织航空航天研究和发展顾问组(The Advisory Group for Aerospace Research and Development)的资助下初次出版。后经过修订、增补出了第二版。跟第一版相比，主要的变化有：关于铂电阻温度计和热电偶，分成新的两章进行论述；激光-多普勒风速计这一章完全改写了；其他各章也大都作了更新。

我们希望这本书将对在科学和工程各领域从事传热学测试研究的科技人员有所裨益。

DA 62 88 6603

目 录

第一章 温度测量误差的估算 1

E.M. 斯帕罗

- 1.1 导线的传热模型 2
- 1.2 固体温度的测量 4
 - 1.2.1 比较厚重固体的表面温度 4
 - 1.2.2 埋设在较厚重固体中的热电偶 5
 - 1.2.3 薄板的温度测量 7
 - 1.2.4 不稳态温度的测量误差 8
- 1.3 流体温度的测量 8
 - 1.3.1 稳态温度的测量 8
 - 1.3.2 不稳态温度的测量 9
- 1.4 辐射对误差估算的影响 12
- 术语符号 14
- 参考文献 15

第二章 铂电阻测温法 16

J.L. 里德尔, G.T. 古川,

H.H. 普卢姆

- 2.1 基础知识和基本概念 16
 - 2.1.1 热力学温标 16
 - 2.1.2 实用温标 16
- 2.2 铂电阻温度计的结构 18
- 2.3 铂电阻温度计的使用 22
 - 2.3.1 标准铂电阻温度计的机械保护措施 22
 - 2.3.2 标准铂电阻温度计的热处理 24
 - 2.3.3 铂电阻温度计的浸没深度 25
 - 2.3.4 标准铂电阻温度计的加热效应 27
- 2.4 电阻的测量 30
 - 2.4.1 米勒电桥 30
 - 2.4.2 交流电桥 33
 - 2.4.3 电位差计法 34
- 2.5 根据检定数据和观测电阻计算温度的方法 35
 - 2.5.1 从 0 到 630.74°C 的温度 36
 - 2.5.2 低于 0°C 的温度 38
 - 2.5.3 温度测定的误差 41
- 2.6 检定 44
 - 2.6.1 水三相点 44
 - 2.6.2 金属凝固点 46
 - 2.6.3 金属凝固点炉 51

- 2.6.4 锡点容器 54
- 2.6.5 锌点容器 59
- 2.6.6 氧的正常沸点 61
- 2.6.7 在 13.81 至 90.188 K 范围内的比较
检定 62

参考文献 66

附录 在铂电阻温度计定义的温度范围内
ITS-27、ITS-48、IPTS-48 以及 IPTS-
68 规定的固定点值和插补公式的
比较 69

第三章 热电偶测温法 71

R.L. 鲍威尔

- 3.1 基本原理 72
- 3.2 热电偶的配制和测量方法 74
- 3.3 标准化材料 80
 - 3.3.1 S 型热电偶——铂-10% 铑合金/铂
热电偶 81
 - 3.3.2 R 型热电偶——铂-13% 铑合金/铂
热电偶 85
 - 3.3.3 B 型热电偶——铂 30% 铑合金/铂
-6% 铑合金热电偶 85
 - 3.3.4 E 型热电偶——镍-铬合金/铜-镍合金
热电偶 91
 - 3.3.5 J 型热电偶——铁/铜-镍合金 (SAMA)
热电偶 94
 - 3.3.6 K 型热电偶——镍-铬合金/镍-铝合金
热电偶 98
 - 3.3.7 T 型热电偶——铜/铜-镍合金热
电偶 101
- 3.4 新型热电偶材料 104
- 参考文献 106
- 附录 标准偏差表 110

第四章 深低温学中的温度测量 114

J.A. 克拉克

- 参考文献 115
- 4.1 温度的概念 116
- 4.2 绝对 (热力学) 温标 119
- 4.3 绝对 (气体) 温标 120
- 4.4 国际温标 (ITS) 122
- 4.5 1968 年国际实用温标 127

4.6 低于90 K的早期温标	127
4.7 深低温温度计	130
4.7.1 热电偶	131
4.7.2 电阻测温法	136
4.7.3 磁性测温技术	153
术语符号	159
参考文献	160
附录 在0℃和标准重力加速度(980.665厘米/秒 ²)下 ⁴ He(1958年温标)的蒸汽压(10 ⁻³ 毫米汞柱)	165
第五章 温度测量的光学方法	168
R.J. 戈尔茨坦	
5.1 纹影系统	170
5.2 阴影系统	177
5.3 干涉仪	182
5.3.1 基本原理	182
5.3.2 使用马赫-曾德干涉仪时的条纹图	185
5.3.3 设计和调整	190
5.3.4 二维视场中干涉仪误差的分析	192
5.3.5 其他型式干涉仪	194
5.4 小结	195
术语符号	195
参考文献	197
附录 轴对称密度场或温度场的干涉图分析	200
参考文献	202
第六章 高温气体温度的光谱测定法	203
E. 芬德	
6.1 气体辐射的基本概念	204
6.1.1 气体辐射的强度和密度	204
6.1.2 气体的发射和吸收	204
6.1.3 在理想热力学平衡状态下的辐射	205
6.1.4 温度的定义	206
6.1.5 爱因斯坦跃迁概率	207
6.1.6 非均质气体层的辐射(阿贝耳变换)	208
6.2 高温等离子体的热力学状态	208
6.2.1 处于理想热力学平衡状态的高温等离子体	209
6.2.2 局部热力学平衡的概念	210
6.3 高温气体发射的辐射	213
6.3.1 线辐射(束缚-束缚跃迁)	214
6.3.2 复合辐射(自由-束缚跃迁)	214
6.3.3 韧致辐射(自由-自由跃迁)	215
6.3.4 黑体辐射	216

6.3.5 关于分子辐射的某些事实	217
6.4 光谱测定法	218
6.4.1 直接法	218
6.4.2 间接法	222
6.4.3 适用于发射-吸收性气体的方法	224
术语符号	227
参考文献	229

第七章 高温气体和稠密等离子体的

探针测量

J. 格雷

7.1 各种探针技术	230
7.1.1 测热探针	230
7.1.2 冷却式静电探针	238
7.1.3 辐射探针	247
7.1.4 循环探针	247
7.1.5 瞬态压力探针	248
7.1.6 热流密度探针	249
7.2 小结	250
术语符号	251
参考文献	252
书刊资料目录	253

第八章 表面热流密度的瞬态测

试技术

G.J. 斯科特

8.1 内部热阻可忽略的情况($r_i = 0$)	257
8.1.1 对流边界条件	257
8.1.2 辐射	258
8.1.3 流体温度变化时的对流换热	259
8.2 表面热阻可忽略的情况($r_s = 0$)	261
8.3 精确解和时间-温度曲线图(有限内部热阻和有限表面热阻的情况)	262
8.4 快速响应的测量	263
8.4.1 薄膜式测量仪	264
8.4.2 厚膜式测量仪	267
8.4.3 扫描操作	268
8.5 非均匀表面温度的影响	268
8.6 准稳态假设	269
术语符号	269
参考文献	270

第九章 传热过程的模拟

E.R.G. 埃克特

9.1 导热	271
9.2 辐射换热	271

9.3 对流换热	272	11.2 粘度的测定	324
9.3.1 常物性流体传质模拟的基本条件	272	11.2.1 泊肃叶流动的应用	325
9.3.2 气体中的传质模拟	274	11.2.2 落体的应用	327
9.3.3 变物性流体的传质模拟	285	11.2.3 旋转体的应用	327
术语符号	286	11.2.4 扭摆体的应用	328
参考文献	287	11.3 导热系数的测定	330
第十章 热辐射的测量	289	11.4 流体导热系数的测定	331
D.K.爱德华兹		11.4.1 稳态测量	331
10.1 热辐射	289	11.4.2 不稳态热流法	336
10.1.1 黑体辐射	289	11.4.3 测量流体导热系数的其他一些方法	337
10.1.2 辐射强度	291	11.5 固体导热系数的测量	338
10.1.3 相干性和偏振性	292	11.5.1 低导热性固体的导热系数的稳态测量	338
10.2 热辐射的特性	293	11.5.2 低导热性固体的导热系数的不稳态测量	341
10.2.1 各向同性材料的反射镜面	293	11.5.3 金属实心体的导热系数的测量	342
10.2.2 各向异性材料的反射镜面	297	11.5.4 测量固体导热系数的其他一些方法	343
10.2.3 漫射性表面	297	11.6 比热容的测量	345
10.3 辐射测量技术	298	11.6.1 固体比热容和液体比热容的测量	345
10.3.1 探测器、信号和噪声	298	11.6.2 气体比热容的测量	349
10.3.2 理想辐射计	299	术语符号	349
10.3.3 单谱、带通和全波谱辐射计	300	参考文献	351
10.3.4 带有热探测器的辐射计	300	第十二章 美国明尼苏达大学传热实验室关于输运特性的测量	356
10.3.5 辐射计的检定	301	W.艾贝尔	
10.4 表面辐射的测量	301	12.1 引论	356
10.4.1 表面体系的概念	301	12.2 单一气体和混合气体普朗特数的测定,直接测量复温系数法	356
10.4.2 各种测量方式	302	12.2.1 纯气体	357
10.4.3 双向特性	302	12.2.2 混合气体	359
10.4.4 定向吸收度和定向发射度	303	12.3 普通扩散系数-热扩散因子	362
10.4.5 定向反射度的直接测量和倒易测量	303	12.4 气体导热系数的测定,热丝测试装置	364
10.4.6 波长在0.3~2.5微米范围内的单谱定向反射度	304	12.5 小结	366
10.4.7 波长在2~20微米范围内的定向反射度	305	术语符号	366
10.4.8 远红外区的定向反射度	307	参考文献	367
10.4.9 半球特性	310	第十三章 激光多普勒风速计	369
10.4.10 误差分析	310	R.J.戈尔茨坦, D.K.克雷德	
10.5 气体辐射的测量	313	13.1 根据多普勒频移进行速度	
10.5.1 各种测量型式	313		
10.5.2 气体充装系统	314		
10.5.3 测试数据的整理	316		
10.5.4 误差分析中应该考虑的因素	317		
10.6 小结	317		
术语符号	318		
参考文献	319		
第十一章 热物性的测量	324		
W.莱登弗罗斯特			
11.1 概述	324		

测量	370
13.2 最佳散射几何结构的选择	375
13.2.1 可供选择的几种几何结构	375
13.2.2 散射光强度	375
13.2.3 频率偏移的大小	376
13.2.4 信号带宽	376
13.2.5 信噪比	379
13.2.6 光程的影响	380
13.2.7 光学几何结构	380
13.2.8 散射体积	382
13.2.9 多普勒信号	383
13.3 速度和频率限制	384
13.3.1 检测器	385
13.3.2 方向模糊	385
13.3.3 信号分析	387
13.3.4 散射中心	390
13.4 小结	391
术语符号	391
参考文献	392
第十四章 冷却膜式传感器在高温气 体测量中的工作特性和 应用	395
L.M.芬格森, A.M.阿米德	
14.1 采用热丝、热膜和冷却式探针的 恒温测风速技术	395
14.2 冷却式探针的传热综合 关系式	398
14.3 在恶劣环境下的测试	402
14.4 冷却膜式探针的准确度	403

14.5 冷却膜式传感器的应用	404
14.6 小结	405
术语符号	406
参考文献	406
附录 1968年国际实用温标	408
序言	408
I. 引言	408
II. 1968年国际实用温标 (IPTS-68) 的定义	409
1. IPTS-68的原则和定义固定点	409
2. 在各种不同的温度范围内1968年国际实用 温度的定义	409
III. 补充资料	414
1. 标准电阻温度计	414
2. 标准热电偶	416
3. 压力	416
4. 水的三相点	416
5. 平衡氢的三相点、17.042K点以及沸点	417
6. 氦的沸点	418
7. 氧的三相点和沸点	418
8. 水的沸点	418
9. 锡和锌的凝固点	419
10. 银和金的凝固点	420
11. 二级参考点	420
附件 I. 国际实用温标的历史沿革; IPTS-68 和IPTS-48之间的差别	422
附件 II. 用于0.2~5.2K温度范围的实 用温标	424
汉英名词对照	425

第一章 温度测量误差的估算

E.M. 斯帕罗 (E.M. Sparrow)

人们普遍认识到,诸如热电偶或温度计之类传感器的输出,只不过显示出流体或固体某一部位的近似温度值。有各种各样的因素会引起传感器输出值跟测点的实际温度(也就是测点没有传感器时的温度)之间的偏差。首先,传感器的存在本身就会改变测点及其周围的热状态,因而改变温度分布。例如,热电偶的热接点通过导线将热量导入或导出时就会出现这种情况。第二个主要因素是,传感器除了同要测量其温度的部位相连通之外,也可能跟其他环境有联系。比如,用于测量流动气体温度的热电偶,可能会通过导热和辐射方式而跟通道壁面进行换热。

还有,能量传递过程和储能过程的某些基本特性也会促使出现温度测量误差。其一特性是,对流换热不可能在没有温差的条件下进行(也就是换热系数不会是无限大的)。另一特性是,当物体置于高速气流中时,毗邻物体的边界层中会出现粘性耗散(气动加热)。此外,在瞬态过程中,传感器的热容量也会导致传感器与流体之间存在温差。

由于实际上不存在接近理想的绝热体,这就使设计低误差温度传感器这一课题变得更为艰难。这种情况跟电学测量情况大不相同,在电学测量的情况下,可以毫不费力地得到现成的理想绝缘体。

通过精心设计,能够减小由于上述一种或多种原因所引起的测量误差。例如,可以采用局部增大传感器附近流体速度的方法来增大对流换热系数。通过巧妙地设计传感器的尺寸和形状也可以达到同样的所需要的效果。给传感器加上遮热屏可以减小它跟周围环境的辐射换热。传感器设计所必需考虑的问题,在已出版的文献(例如文献[1~4])中已有详细论述。

这里设想有关传感器设计的专门资料可以从上述文献以及大量研究这一课题的文章中得到,故不再赘述。本章的目的在于研究温度测量误差的由来,同时也讨论可以用来估算这些误差的分析方法。

看来误差分析的目的自然是要提供具有一定精确度的校准公式,以便用来校准传感器的输出,从而提供准确的温度值。但是,实际上温度传感器所涉及的传热问题是很复杂的,很难进行精确分析。即便是可以采用大型电子计算机来减少求解的困难,也仍然以采用比较简单的分析方法为宜。目前,误差分析的实际目的就在于估算温度测量中预期误差的数量级。误差分析还可以给传感器设计提供指导意见,同时也可以为检定试验提出合适的相关参数。

为了说明分析温度测量误差时所遇到的传热问题的性质,这里来研究一下图 1.1 示意表示的处于流动气流中的传感器。该传感器系由某种支承结构或它本身的导线所定位。图中的虚线用来表示能量传递的通路。由图可见,传感器本身通过各种通路跟几种周围环境(一般说来,这些环境都有各不相同的温度)发生联系。通过支承和(或)其导

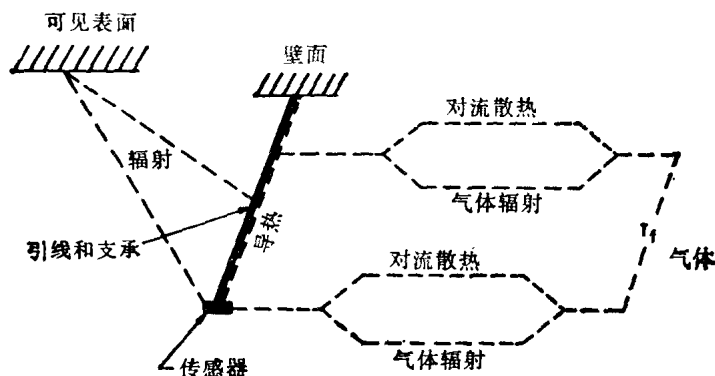


图1.1 置于气流中的温度传感器的传热通路示意图

线的导热，使传感器在连接点上连通壁温。通过辐射提供了传感器跟一个或多个可见表面（即壁面或其他一些结构元件）以及气流（假定气体具有辐射性质）连通的通路。一般说来，不论是可见表面还是气体，都不会具有沿空间均布的温度。传感器跟气体之间还通过对流传递热量。在高速气流的情况下，对流换热要计及边界层内粘性耗散的修正。

支承结构和（或）导线也会通过辐射和对流而跟壁面和气体进行换热，这种换热可能会对传感器跟壁面之间的导热产生很大的影响。此外，传感器本身就可能是一种相当复杂的组件，它可能带有辐射遮热屏、速度滞止罩等。即使传感器是裸露的热电偶热接点，它对导热、对流和辐射这每一种传热机理也都不是简单的几何结构。

上述讨论着重说明，要对温度测量误差进行精确的分析校正是有很大困难的，因而在此重申：误差分析的主要作用在于估算温度测量误差的数量级。这就是本章以下各部分所采取的宗旨。

误差分析所提供的误差估算的精度取决于所用的分析模型跟实际物理状况相符合的程度。本章以下各节将讨论有关固体温度测量和流体温度测量分析模型的若干实例。在大多数情况下，讨论将只涉及热电偶；但是，基本原理也适用于其他形式的传感器。不论是对固体温度测量进行分析，还是对流体温度测量进行分析，都需要确定导线中的传热模型，这就是下面将要讨论的课题。

1.1 导线的传热模型

按最简单的看法，可以把导线设想为在温度传感器和位于导线另一端的等温区之间构成的导热通路（参看图1.2）。如果导线穿过流体，那么从导线表面到流体就会有对流换热，也可能会有辐射换热。如果流体具有透射辐射的性能，则在导线和周围可见表面之间也会存在辐射换热。

最简单的导线是不绝缘的单丝导线。这种导线的直径比较小，而导热系数却又比较高，因而忽略不计沿导线横截面的温度变化是合理的，也就是说，可以把温度看作是轴向坐标 x 的函数。于是可以采用跟分析肋片导热相同的方法来分析导线中的导热（如文献〔5〕所述）。

更常见的是，导线为一环形绝缘层所包覆，如图1.3所示。采用这样一种导线结

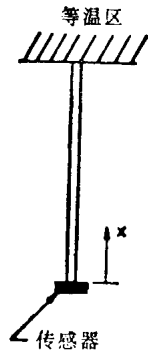


图1.2 导线简图

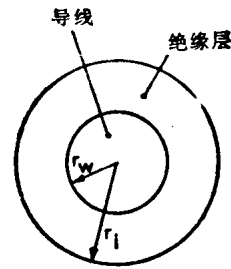


图1.3 单丝绝缘导线的横截面

构，有几种可供选择的方法可以用来建立其轴向导热和横向导热的模型。对导线本身来说，可以合理地假定温度沿横截面是不变的，所以，仅有 $T = T(x)$ 。另一方面，对绝缘层来说，温度则沿轴向和径向这两个方向而变化。在对流和辐射边界条件下，这种导热问题的精确解是十分复杂的。此外，因为还存在其他各种不确定因素（如接触热阻），这个解也许还不是合理的解。

一种简单的传热模型是假定所有的轴向热流都被限制在导线内，而穿过绝缘层的热流则是纯径向热流；这种简单的传热模型对大多数实用场合来说就已能满足要求了。因此，如果以 k_w 和 A_w 分别表示导线的导热系数和横截面积，以 $T(x)$ 表示局部温度，则轴向热流可表示为

$$Q_x = -k_w A_w \frac{dT}{dx} \quad (1.1)$$

另一方面，每单位长度的径向热流可表示为

$$\frac{dQ_r}{dx} = \frac{2\pi k_i (T - T_{\text{surf}})}{\ln(r_i/r_w)} \quad (1.2)$$

式中 k_i 是绝缘层的导热系数； T_{surf} 是绝缘层外表面的温度。

在稳态条件下，由式 (1.2) 所求得的 dQ_r 等于表面处的对流和(或)辐射热流；例如，在对流的情况下，有

$$dQ_r = h(2\pi r_i dx)(T_{\text{surf}} - T_f) \quad (1.3)$$

式中 T_f 为流体温度。联立式 (1.2) 和 (1.3)，可以求得

$$\frac{dQ_r}{dx} = \frac{T - T_f}{R} \quad (1.4)$$

$$R = \frac{1}{h2\pi r_i} + \frac{\ln(r_i/r_w)}{2\pi k_i} \quad (1.5)$$

式中符号 R 为热阻，而 $(T - T_f)$ 是导线和流体之间的温差。

应用式 (1.1)，(1.4) 和 (1.5)，则有绝缘层的导线的问题就可以象肋片的问题那样进行求解。顺便可以注意到，式 (1.1) 可能有点低估了轴向导热。以 $\tilde{k}A$ 量代替 $k_w A_w$ 可以得到另外一个过高估计的 Q_x 的表达式。 $\tilde{k}A$ 定义为

$$\tilde{k}A = k_w A_w + k_i A_i \quad (1.6)$$

在热电偶的实际使用中，常见的导线结构包含有两根导线和相应的绝缘层，如图 1.4 所示。两根导线具有相同的半径 r_w ，但具有不同的导热系数 k_{w1} 和 k_{w2} 。假定两根

导线在给定的 x 处具有相同的温度, 在这种情况下, 轴向导热可表示为

$$Q_x = -\tilde{k}A \frac{dT}{dx} \quad (1.7)$$

式中

$$\tilde{k}A = (k_w + k_{w2})A_w \quad (1.8)$$

其中忽略不计通过绝缘层的轴向导热。若把各绝缘层的 $k_i A_i$ 项加到式 (1.8) 上, 就会过高估计轴向导热。

为了建立从两根导线向绝缘层外表面横向导热的模型, 我们来考察一种由中心导线和环形绝缘层组成的等效复合圆柱体。设其内、外半径分别为 r_1 和 r_2 , 可由下式求得

$$r_1 = \sqrt{\frac{L_1 + L_2}{2}} r_w, \quad r_2 = \frac{L_1 + L_2}{4} \quad (1.9)$$

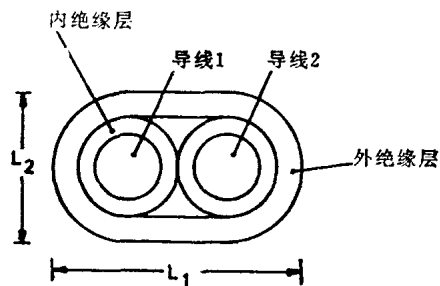


图1.4 双导线结构

通过绝缘层的径向热流密度由式 (1.2) 给出,

其中 r_w 和 r_i 要分别以 r_1 和 r_2 来代替。在绝缘层表面具有对流换热的环境下, 只要进行上述替换, 那么径向热流 dQ_r 就仍然可以用式 (1.4) 和 (1.5) 来表示。

上述计算模型是用来表征导线中的轴向导热和径向导热的有代表性的计算模型。

1.2 固体温度的测量

现在来讨论用来估算固体稳态温度测量误差的计算模型。要讨论下列三种实例情况: (1) 比较厚重固体的表面温度; (2) 埋设在比较厚重固体内的热电偶, 以及 (3) 薄板的温度测量。在 1.2.4 节中将研究固体内跟时间相关的温度的测量误差。

1.2.1 比较厚重固体的表面温度

图 1.5 示出这种物理状态的简图。热电偶被固定在比较厚重固体的表面; 因为热电偶跟固体表面是很好地焊接在一起的, 所以接触热阻可以忽略不计。其次, 热电偶可以安置在钻入表面的浅孔中。热电偶的导线穿过温度为 T_f 的流体。正如我们马上就要讨论的那样, 由于这样一种热电偶安置方式会改变所要测量的表面部位的温度, 因而会导致测温信息误差增大。

如果流体温度比固体温度还低, 那么热电偶就会从固体表面导出热量。在多数情况下, 由热电偶从固体表面导出的每单位时间内每单位面积的热量, 实际上远大于相应的从固体表面到流体的对流热损失。因而, 在固体中就会出现温度梯度, 从而使热量流向热电偶热接点。要特别指出的是, 有了这种热流, 就必定会使热接点的温度降低, 因而使热电偶的读数偏低。若流体温度高于固体温度, 则热电偶就象一条有效的输热管道那样起作用, 热量通过它传到固体上, 因而使固体表面温度局部升高, 相应地热电偶的读数就偏高了。

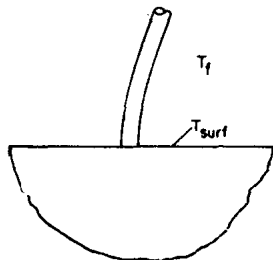


图1.5 厚重固体表面的温度测量

文献〔6〕对固体表面敷设热电偶所引起的温度测量误差作了分析, 这里只介绍一下分析的结果。设 T_{surf} 为固体表面的实际温度 (即不装热电偶时的温度), T_{tc} 为热电偶

检测的温度。假设热电偶导线具有半径为 r_1 的圆形有效横截面。如果只有一根导线,其半径为 r_w , 则 $r_1 = r_w$ 。若有两根导线, 每根导线的半径为 r_w , 则 r_1 由式 (1.9) 给出。在文献〔6〕所作的分析中, 假设热电偶热接点跟固体表面相接触的圆形区域中的温度是均匀的, 并且等于 T_{ic} 。如果热电偶导线是带有绝缘层的, 那么就要用 r_2 来表示绝缘层的等效外半径〔参看式 (1.9) 和有关的说明〕。

沿热电偶导线轴向导热时的导热系数和面积的乘积 $\tilde{k}A$ 以及径向热阻 R , 可按本章 1.1 节所叙述的方法进行计算。以 L 表示热电偶导线的长度, 以 k_s 表示固体的导热系数, 而以 h_s 表示固体表面跟流体之间对流换热系数。一般说来, h_s 不同于计算径向热阻 R 时所用的热电偶跟流体之间的对流换热系数 h 。

拟采用三个无量纲组合量来表示分析结果。第一个是无量纲温度误差

$$\frac{T_{\text{surf}} - T_{ic}}{T_{\text{surf}} - T_f} \quad (1.10)$$

式中 $(T_{\text{surf}} - T_{ic})$ 为测量误差, $(T_{\text{surf}} - T_f)$ 是所考察问题的特征温差。第二个无量纲组合量是

$$\sqrt{\frac{\tilde{k}A/R}{\pi r_1 k_s}} \operatorname{th}(\tilde{k}AR)^{-1/2} L \quad (1.11)$$

式中的分子是由肋片理论〔6,7〕导出的。在大多数应用情况下, 导线长度 L 是足够长的, 所以把式中的双曲正切函数值看作等于 1。最后, 第三个无量纲组合量是固体的毕奥(Biot)数

$$\frac{h_s r_1}{k_s} \quad (1.12)$$

图 1.6 表示出分析的结果, 图中以无量纲温度误差为纵坐标, 以式 (1.11) 所表示的无量纲组合量为横坐标。曲线以毕奥数为参变量。图 1.6 又分成两个曲线图, 上图是横坐标无量纲组合量为较小值时的曲线图, 而下图则是横坐标无量纲组合量为较大值时的曲线图。

横坐标无量纲组合量的大小是热电偶热导跟固体热导之比的一种度量。该图表明, 在某一恒定毕奥数 $h_s r_1 / k_s$ 的情况下, 当热电偶的热导较固体的热导为高时, 测量误差加大。反之, 当固体的热导较热电偶的热导为高时, 测量误差是无关紧要的。进一步研究图 1.6 可以看出, 在某一恒定的横坐标无量纲组合量的情况下, 毕奥数越大, 温度误差越小。

从图 1.6 还可以看出, 在某些条件下, 无量纲温度误差可以为负值。这只有在热电偶是作为一种绝热体而不是作为一种导热体这样一种不大可能的情况下才会出现。

1.2.2 埋设在较厚重固体中的热电偶

现在就要进行研究的这一课题的简图如图 1.7 所示。热电偶埋设在固体表面上钻出的孔中, 用某种粘合剂, 例如环氧树脂, 进行粘接(图中以涂黑表示)。热电偶导线从固体中向上引出, 穿过温度为 T_f 的流体。导线具有足够的长度, 所以其最终温度为流体的温度 T_f 。

热电偶作为一种热流通路, 热量能够通过它而流向(或流出)固体。这种热流引起温度测量误差的两个来源: 其一, 使固体温度升高(或降低), 其二, 由于存在粘合剂, 在固体和热电偶热接点之间会有附加的温差。如果固体是金属, 那么第二个作用机理就

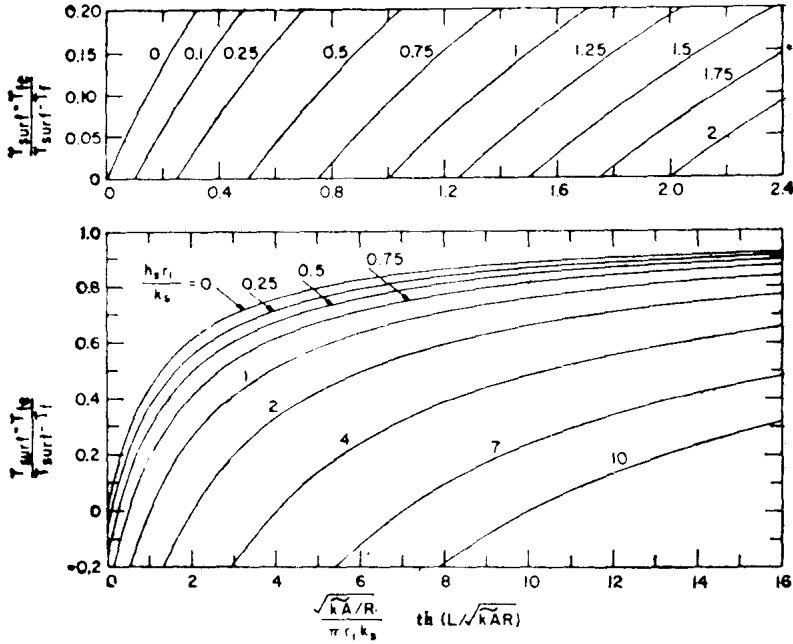


图1.6 表面敷设热电偶时的测量误差

起支配作用。也就是说，按首次近似，假定固体的温度不受埋设热电偶的影响。这里所要研究的就是这种情况。

误差分析模型以及所得到的温度误差表达式系引自莫法特 (Moffat) 的文献 [8]。他设想热电偶导线由两部分组成：

(1) 埋在固体中的部分，(2) 穿过流体的部分。这种情况示意表示在图 1.7 的右图上。虚线 0-0 表示表面的位置。莫法特从分别对区域 I 和 II (参看图 1.7) 解导热问题开始着手。这两个解都涉及到两个区域间交界面的温度 T_{00} 。于是，利用 0-0 面上热流密度连续性条件，并由此求出 T_{00} ，一旦知道了 T_{00} ，则热电偶接点的温度误差也就很容易计算出来了。

在区域 I 中，热电偶导线的特性就象置于均匀温度环境中 (也就是温度为 T_s 的固体中) 的肋片。粘合剂所产生的热阻为

$$\frac{\ln(r_3/r_2)}{2\pi k_a} \quad (1.13)$$

式中 k_a 为粘合剂的导热系数； r_2 和 r_3 分别为热电偶导线的外半径和粘合剂的外半径。而对于径向热流 dQ_r/dx ，从热电偶导线到固体的总热阻 R_1 为

$$R_1 = \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi k_i} + \frac{\ln(r_3/r_2)}{2\pi k_a} \quad (1.14)$$

当热电偶是由两根导线和几层绝缘层组成时，式中的 r_2 和 r_1 是等效半径 (参看 1.1 节

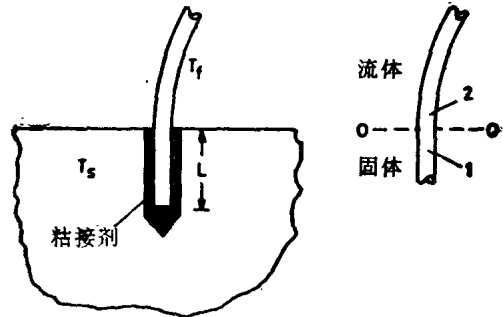


图1.7 埋在厚重固体中的热电偶

中的论述)。

如果 T_{00} 是 0-0 面的温度, 那么根据肋片理论, 通过 0-0 面进入区域 I 的热流可由下列表达式表示:

$$Q_I = \sqrt{\frac{\tilde{k}A}{R_I}} (T_{00} - T_s) \text{th} (\tilde{k}AR_I)^{-1/2} L \quad (1.15)$$

式中 $\tilde{k}A$ 量是热电偶导线轴向导热时的导热系数跟横截面积的乘积, 而 L 是导线在区域 I 中的长度。式 (1.15) 忽略了热接点本身的轴向导热, 但是, 应用由肋片理论得到的另一个表达式就能够计及这种导热的影响。

从区域 II 来的通过 0-0 面的导热热流, 可以用类似于式 (1.15) 的式子来表征, 不过需要作适当的符号变换: $R_I \rightarrow R_{II}$ 以及 $(T_{00} - T_s) \rightarrow (T_f - T_{00})$ 。此外, 一般说来, 导线在区域 II 中的长度是足够长的, 所以 $\text{th} (\tilde{k}AR_{II})^{-1/2} L \approx 1$ 。

$$Q_{II} = \sqrt{\frac{\tilde{k}A}{R_{II}}} (T_f - T_{00}) \quad (1.16)$$

Q_I 和 Q_{II} 这两个表达式应是相等的, 由此可得:

$$T_{00} - T_s = \frac{T_f - T_s}{1 + \sqrt{R_{II}/R_I} \text{th} (\tilde{k}AR_I)^{-1/2} L} \quad (1.17)$$

现在, 返回考虑区域 I, 并再次应用肋片理论, 则热电偶热接点的温度 T_{00} 可用 T_{00} 表示如下:

$$\frac{T_{00} - T_s}{T_{00} - T_f} = \frac{1}{\text{ch} (\tilde{k}AR_I)^{-1/2} L} \quad (1.18)$$

联立方程 (1.17) 和 (1.18), 可以得到温度误差 $(T_{00} - T_s)$ 的方程:

$$\frac{T_{00} - T_s}{T_f - T_s} = \frac{1}{\text{ch} (\tilde{k}AR_I)^{-1/2} L} \left[\frac{1}{1 + \sqrt{R_{II}/R_I} \text{th} (\tilde{k}AR_I)^{-1/2} L} \right] \quad (1.19)$$

在给定的 $(T_f - T_s)$ 值的情况下, 若埋设深度 L 较小、 $\tilde{k}A$ 值较大、热阻值 R_I 较大, 以及热阻值 R_{II} 较小, 则温度误差较大。这些定性规律从物理上看是合理的。

1.2.3 薄板的温度测量

下面来研究处于两种流体之间的薄板 (厚度为 δ), 流体的温度分别为 T_{f1} 和 T_{f2} (见图 1.8)。其相应的对流换热系数为 h_1 和 h_2 。在没有热电偶的情况下, 假定沿板厚的温度变化可忽略不计, 则平板的平衡温度 T^* 为

$$T^* = \frac{h_1 T_{f1} + h_2 T_{f2}}{h_1 + h_2} \quad (1.20)$$

热电偶的影响是把热量导入 (或导出) 薄板, 从而导致热电偶热接点及其附近区域薄板温度的升高 (或降低)。文献 [7] 已计算出与之相应的温度误差。若 T_{00} 是热电偶所指示的温度, T^* 是没有热电偶时的薄板温度, 则温度测量误差 $(T_{00} - T^*)$ 可表示为

$$\frac{T_{00} - T^*}{T_{f1} - T^*} = \left\{ 1 + 2\pi k_s t \epsilon r_1 \left[\frac{K_1(\epsilon r_1)}{K_0(\epsilon r_1)} \right] \frac{\sqrt{R/\tilde{k}A}}{\text{th} (\tilde{k}AR)^{-1/2} L} \right\}^{-1} \quad (1.21)$$

式中

$$\epsilon = \sqrt{\frac{h_1 + h_2}{k_s \delta}} \quad (1.21a)$$

符号 K_1 和 K_0 表示修正的第二类贝塞尔函数, 其数值已列于一些标准表中。

在推导式 (1.21) 时假定只有一根 (或两根) 实际的热电偶丝 (也就是它剥去了绝缘层) 被埋设在薄板中。对于半径为 r_w 的单根热电偶丝, $r_1 = r_w$ 。若有两根热电偶丝, 每根半径均为 r_w , 则 $r_1 = \sqrt{2} r_w$ 。 $\tilde{k}A$ 量是热电偶导线轴

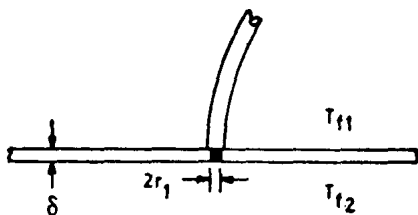


图1.8 薄板的温度测量

向导热时的导热系数和横截面积的乘积, R 是导线径向热流的热阻。这两个系数都已详细讨论过。 L 是热电偶导线的长度, k_s 是固体的导热系数。

文献[7]中的图 8.5 绘出相对温度误差曲线——式 (1.21) 的左边部分。该图给出的曲线表明, 当 ϵr_1 和 $k_s \delta \sqrt{(R/\tilde{k}A)/\text{th}(\tilde{k}AR)^{-1/2}L}$ 这两个值比较小时, 相对误差较大。

1.2.4 不稳态温度的测量误差

计算固体中不稳态温度的测量误差这一课题要比计算稳态温度的测量误差困难得多。研究业已发表的许多文献表明, 甚至一个简单的物理模型也会导致难以计算的数学问题。这种困难的实质在于, 即便是在空间关系仅是一维关系的情况下, 也需要解偏微分方程。而且, 由于传感器 (例如热电偶) 和固体之间的热相互作用, 会碰到伴随的两个偏微分方程。只有对于最简单的情况, 才能求得这种伴随方程组的解析解, 即便是在这种情况下, 也必须采用非初等的数学方法。文献[9]发表了对一个内部温度分布为阶跃变化、并且表面敷设有热电偶的半无限大物体所作的分析, 它典型地表明了这种数学课题的特征。

就时间相关的情况而言, 借助电子数字计算机进行数值求解, 看来或多或少是不可避免的。文献[10~12]发表了跟埋设热电偶有关的温度误差的典型数值解。

可以看到, 不稳态问题的测量误差计算决不是一个可以随意处理的课题, 不管是数值求解还是解析求解, 都必须仔细加以考虑。为了给所要求的实际求解的方法提供充分依据, 对每个问题或多或少都必须分别地建立模型。

1.3 流体温度的测量

现在来研究在稳态和瞬态工作条件下的流体温度测量误差的估算。对于现在所要讨论的问题, 辐射换热的影响暂且不予考虑; 辐射的作用将在 1.4 节中进行讨论。

1.3.1 稳态温度的测量

用于估算稳态流体温度测量误差的常用计算模型是假设热电偶或其他传感器的作用基本上跟肋片的作用相同。虽然有许多跟特定应用场合有关的变化, 但问题的一般性质则都可以采用如图 1.9 所示的简图来说明。热电偶和 (或) 支承固定在温度为 T_w 的壁面上。流体温度为 T_f 。如果忽略不计粘性耗散 (低马赫数时), 那么由于导线中的导热, 热电偶热接点的温度将处在 T_w 和 T_f 之间。

对高速气流来说,粘性耗散起很大的作用,因此当导线中不存在导热时,热电偶将指示出由下式定义的恢复温度 T_r :

$$T_r = T_f \left(1 + \mathcal{R} \frac{k-1}{2} M^2 \right) \quad (1.22)$$

式中 $\mathcal{R}$ 是复温系数(其值在 1 左右), k 是比热容之比 c_p/c_v , 而 M 是马赫数。在这样的气流中,由热电偶热接点检测到的温度处在 T_w 和 T_r 之间。

误差分析一般都忽略不计换热系数、复温系数、以及沿导线长度方向的流体温度等的可能变化。应用肋片理论并且考虑粘性耗散的影响,热电偶热接点的温度可表示为

$$\frac{T_{tc} - T_r}{T_w - T_r} = \frac{1}{\text{ch}(\tilde{k}AR)^{1/2}L} \quad (1.23)$$

式中 $\tilde{k}A$ 和 R 这两个物理量已在 1.2 节中作了论述。式 (1.23) 还忽略不计热电偶热接点本身的轴向导热,不过,这可能只是引起不确定度的比较次要的原因,而比较重要的原因则是热接点的几何形状不规则以及热接点区的换热系数的准确度尚有问题。式 (1.23) 可以用于估算温度误差。

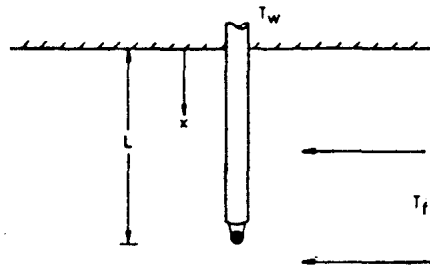


图1.9 流体温度测量简图

在没有粘性耗散的流动(即 $T_r \approx T_f$) 的情况下,显然可以使 $L/(\tilde{k}AR)^{1/2}$ 值尽可能大,从而使温度误差变成最小。当然,采取这类措施也有一定的自然限制:热电偶必须具有一定的最小横截面积,以保证其强度;绝缘层不能太厚,以免阻碍气流;此外,由于种种原因,其长度也受到限制。增加长度的一种方法是使热电偶导线的一部分沿轴向接触流体敷设。

在高速气流的情况下,粘性耗散的影响对设计成 T_{tc} 跟 T_f 相等的可能性多少会有点妨碍。实际上,人们可以尽可能设计成具有最小的 $(T_{tc} - T_f)$, 而后应用式 (1.22), 根据 T_r 来确定 T_f 。为了进行后一计算,必须知道复温系数 $\mathcal{R}$ 。莫法特^[1]对现有的实验资料作了评述,并给出:

$$\text{当热电偶丝垂直于气流时, } \mathcal{R} = 0.68 \pm 0.07 \quad (1.24a)$$

$$\text{当热电偶丝平行于气流时, } \mathcal{R} = 0.86 \pm 0.09 \quad (1.24b)$$

这些结果适用于普朗特数约为 0.7 的气体。

原则上可以计及沿导线长度方向流体温度、速度以及换热系数变化等因素的影响,从而改进刚才所讨论的误差估算;但是,实际上这些数据通常是不知道的,或者充其量也不过是不确定的。因此,在误差估算中很少采用这种改进方法。

通常要考虑辐射的影响,这将在 1.4 节中加以讨论。

1.3.2 不稳态温度的测量

估算不稳态流体温度测量误差的传统模型,是假定可以忽略不计传感器中的温度的空间变化、以及忽略不计导线对传感器所导入或导出的热量。因而,若以 M , c 和 A_s 分别表示传感器的质量、比热容和表面积,则基本的能量平衡方程式[●]为

● 其中不显含粘性耗散的影响。