

# 气流温度测量技术

赵俭 杨永军 编著



中国质检出版社  
中国标准出版社

# 气流温度测量技术

赵俭 杨永军 编著



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

气流温度测量技术/赵俭,杨永军编著. —北京:  
中国标准出版社, 2017. 5  
ISBN 978 - 7 - 5026 - 4421 - 5

I. ①气… II. ①赵… ②杨… III. ①气流温度—  
温度测量 IV. ①TB942

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 069995 号

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 787 × 1092 1/16 印张 7.75 字数 168 千字

2017 年 5 月第一版 2017 年 5 月第一次印刷

\*

定价: 35.00 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

# 前言

## PREFACE

气流温度测量技术作为测量技术的一个分支,在航空、航天、兵器、船舶等领域均有广泛的应用。20世纪30年代,德国开始在气流温度测量技术方面投入研究,此后,世界各国继承并发展了该项技术。迄今为止,尚未出现对气流温度测量技术进行论述的专门书籍。

作者结合多年来的学习以及工作中的研究成果,怀着“尝尝螃蟹”的心情,编著了此书,目的是为从事相关工作的广大科技人员提供参考,也希望能为相关专业的高校在校生开阔眼界,增长一些知识的维度。

全书共分4章,第1章为概述;第2章主要介绍气流温度传感器稳态与动态性能的基本概念、影响因素、校准方法、性能数据以及数学建模;第3章主要针对大气总温传感器、快响应温度传感器和高温气流温度传感器,重点介绍气流温度传感器的典型结构、推荐结构以及设计方法等;第4章阐述瞬态高温高速和瞬态高温低压两种特殊条件下的气流温度测量技术。

本书内容凝结着中航工业304所动温实验室全体科技人员的劳动成果,并且得到了国防科工局计划项目“航空发动机高温气流温度测量规范化技术研究”以及科技部重大仪器专项“高温温度、压力、振动传感器开发与应用”等科研经费支持,在此一并表示衷心的感谢!

作者欢迎在本书出版后得到读者的批评和指正。E-mail: zhaojianbj73@sina.com。

编著者

2017年3月

第1章 概述 .....	1
1.1 气流温度测量的重要性 .....	1
1.2 气流温度测量方法分类 .....	1
1.3 气流温度测量的技术现状与发展趋势 .....	7
第2章 气流温度传感器的性能 .....	8
2.1 与气流温度测量相关的几个基本概念 .....	8
2.2 温度传感器的恢复特性 .....	12
2.3 温度传感器的动态特性 .....	29
2.4 温度传感器的辐射误差 .....	49
2.5 温度传感器的导热误差 .....	56
2.6 温度传感器的测温偏差 .....	62
第3章 气流温度传感器的设计 .....	72
3.1 气流温度传感器设计概述 .....	72
3.2 大气总温传感器的设计 .....	85
3.3 快响应温度传感器的设计 .....	91
3.4 高温气流温度传感器的设计 .....	97
第4章 特殊条件下的气流温度测量 .....	108
4.1 瞬态高温高速条件下的气流温度测量 .....	108
4.2 瞬态高温低压条件下的气流温度测量 .....	111
参考文献 .....	116

# 第1章 概述

## 1.1 气流温度测量的重要性

温度是三大热工参数之一,与人类的科研、生产、生活密切相关,而热力学温度又是国际单位制中七大基本量之一。温度的测量问题几乎遍布机械、电子、材料、化工、航空、航天等社会各行各业。

气体在驱动力的作用下获得动能,形成具有一定速度的定向流动,即成为气流。如自然界中的风,发动机或试验器的内流、外流等。

在航空、航天、兵器、船舶等国防科技领域,气流温度是重要的测试参数。如航空发动机试车时,大气总温测量结果将影响到标准状态推力的换算和燃油消耗量的计算等,而对于机载的情况,大气总温是大气数据计算机所必需的参数之一,计算大气静温、真空速的关键在于大气总温的测量;进气道内的气流温度测量,主要用于计算进气质量流量,进而计算发动机的燃油消耗量,进气道出口温度测量的目的是了解发动机进气温度畸变;压气机级间和出口温度测量的目的是了解压气机内温度场,计算压气机全台和各级效率、叶片基元级效率等;燃烧室出口气流温度测量的目的是了解燃烧室出口温度场,计算燃烧效率,对高温部件的使用寿命和可靠性进行分析;涡轮后气流温度测量的目的是了解涡轮出口温度场,计算涡轮效率,以及用于监控发动机的工作状态;加力燃烧室出口测温的目的是计算加力燃烧室的燃烧效率以及出口温度场分布等。对于高超声速飞行器、临近空间飞行器等,同样需要对各关键部位的气流温度进行准确测量,以评价飞行器的性能以及监控其运行状态等。

此外,在工业窑炉、电厂等民用领域,气流温度测量也受到了关注。气流温度的准确测量,对于系统设计、状态监测和安全控制等具有重要的意义。

## 1.2 气流温度测量方法分类

气流温度测量方法分为接触式和非接触式两大类。接触式测温方法,指的是感温元件浸入被测介质或与被测介质直接接触的测温方法。非接触式测温方法,指的是感温元件与被测对象不直接接触的测温方法。



## 1.2.1 接触式测温方法

接触式测温方法主要包括基于热电偶、热电阻以及黑体空腔的测温方法等。

### 1.2.1.1 热电偶

热电偶测温的基本原理是热电效应。两种不同的导体(或半导体)两端接合组成回路,当两个接合点的温度不同时,会在回路内产生热电势,这一现象称为热电现象。用它进行温度的测量就是依赖所产生热电势与两个接合点温度之间的一定关系而实现的,这一现象是在1821年由德国医生塞贝克(T·J·Seebeck)所发现的,所以又被称为塞贝克效应。塞贝克效应示意图如图1-1所示。

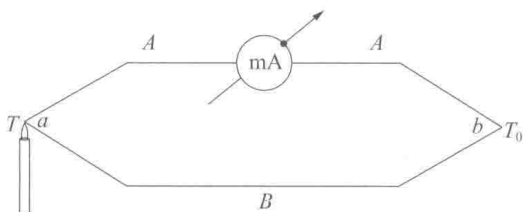


图1-1 赛贝克效应示意图

热电偶具有如下特点:(1)测量精度高;(2)结构简单;(3)动态响应快;(4)可作远距离测量(由于热电偶是利用热电势测温的,并且热电偶热电势的大小与其长短无关,所以信号可以远传,便于集中检测和自动控制);(5)测温范围广。

目前,国际化的热电偶包括S型、R型、B型、K型、N型、E型、J型和T型8种,其中前3种属于贵金属热电偶,后5种属于廉金属热电偶,贵金属热电偶由于熔点高,可以用到较高的温度。随科技的不断进步,所需测量的温度越来越高,国际化热电偶的使用温度上限受到了挑战。因此,铂铑40-铂铑20、铱铑系和钨铼系等非标准分度热电偶逐渐受到关注并投入应用。

在气流温度测量领域,热电偶式温度传感器的应用最为广泛,尤其是对于高温气流温度的测量。实际使用时,经常将传感器设计成多点梳状或耙状,以实现温度场的测量。

### 1.2.1.2 热电阻

若将热电阻传感器的感温元件置于被测介质中,其电阻值将随介质的温度变化而发生相应的变化,即每一个温度值将对应一个电阻值。它们之间的关系为:

$$R_t = R_0(1 + At + Bt^2 + Ct^3) \quad (1-1)$$

式中: $R_0$ —— $0^\circ\text{C}$ 时热电阻的电阻值, $\Omega$ ;

$R_t$ ——温度 $t(^\circ\text{C})$ 时热电阻的电阻值, $\Omega$ ;

$t$ ——被测介质的温度, $^\circ\text{C}$ ;



$A, B, C$ ——分度常数。

利用这个关系,可以通过测量在任一温度下的电阻值来得到待测的温度。

热电阻传感器具有测量精度高,性能稳定,灵敏度高,应用范围广,可远距离测温,便于微机实时处理,并能实现温度自动控制和记录等许多优点。

常用的热电阻有铂电阻、铜电阻和热敏电阻等。在工业生产和科研试验中大量使用的工业铂电阻温度计(IPRT),在我国一般习惯称为铂热电阻,国外称RTD。铂热电阻的主要型式有两种:一种是由细铂丝绕制而成,丝的直径可以小到0.1mm,然后封装在金属、玻璃或陶瓷保护管内;另一种使用铂制薄膜作为元件,它又有厚、薄膜铂电阻之分。

由于热电阻的使用温度上限低,所以多用于较低的气流温度测量场合,如大气总温的测量。

### 1.2.1.3 黑体空腔

黑体空腔的测温原理基于普朗克定律,任一绝对温度高于0K的物体都会发出红外热辐射,红外辐射能量与温度具有一定的对应关系。可制作人工的黑体空腔,使其有效发射率接近于1,通过探测黑体空腔的红外辐射能量,换算出对应的温度。普朗克定律的数学表达式为:

$$E_{\text{b}\lambda}(\lambda, T) = \frac{C_1}{\lambda^5 \left[ \exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right) - 1 \right]} \quad (1-2)$$

式中: $E_{\text{b}\lambda}(\lambda, T)$ ——黑体的光谱辐射力,  $\text{W}/\text{m}^3$ ;

$\lambda$ ——波长,  $\text{m}$ ;

$T$ ——热力学温度,  $\text{K}$ ;

$C_1$ ——第一辐射常数,  $C_1 = 3.742 \times 10^{-16} \text{W} \cdot \text{m}^2$ ;

$C_2$ ——第二辐射常数,  $C_2 = 1.439 \times 10^{-2} \text{m} \cdot \text{K}$ 。

常用的黑体空腔式温度传感器包括蓝宝石空腔温度传感器和管状空腔温度传感器。蓝宝石空腔温度传感器的传感头是在耐高温的蓝宝石光纤顶端制作一个封闭的黑体腔,当黑体腔置于被测温场中,与外界温场达到热平衡,就会发出与温度成一定函数关系的黑体辐射信号,辐射信号经高温光纤及传光光纤进入光电检测系统,探测器输出的信号是温度的函数。蓝宝石空腔温度传感器又分为单色式和比色式两种。图1-2所示为一种单色式蓝宝石空腔温度传感器结构框图。

管状空腔温度传感器与蓝宝石空腔温度传感器不同之处仅在于,其传感头为一头盲端的耐高温管,当满足一定的长径比时,管状空腔的有效发射率接近于1。管状空腔温度传感器也分为单色式和比色式两种。



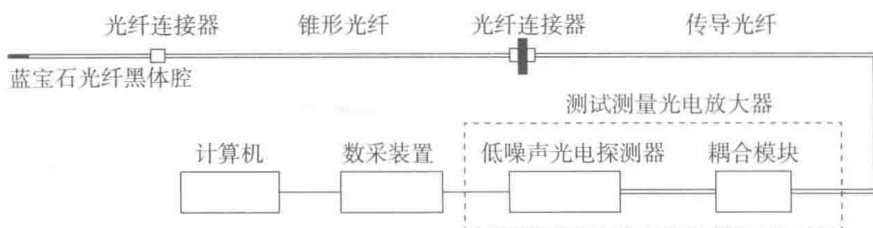


图 1-2 一种单色式蓝宝石空腔温度传感器结构框图

蓝宝石空腔温度传感器具有抗电磁干扰、响应快等特点,而管状空腔温度传感器如选用高熔点的材料,则可大大提高温度测量的上限。

由于低温时红外热辐射能量较低,所以黑体空腔式温度传感器多用于高温气流温度的测量。

### 1.2.2 非接触式测温方法

非接触式测温方法主要包括光学法和声学法,其中光学法又包括相干反斯托克斯拉曼散射光谱法、瑞利散射法、可调谐二极管激光器吸收光谱法、平面激光诱导荧光法等。需要说明的是,非接触式测温方法所测温度均为气流静温,需要通过计算得到气流总温。

#### 1.2.2.1 相干反斯托克斯拉曼散射光谱法

相干反斯托克斯拉曼散射光谱法简称 CARS 法。CARS 测量系统主要由 YAG 激光器、染料激光器、相应的测量光路和信号采集分析系统组成,其光学系统如图 1-3 所示。

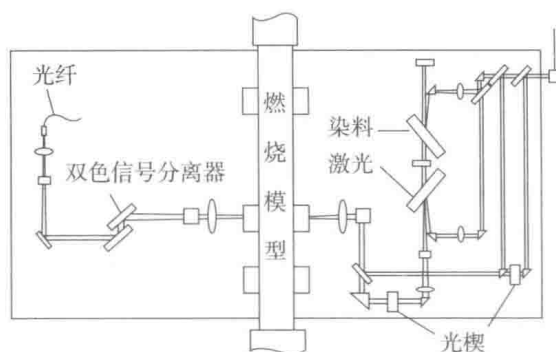


图 1-3 CARS 光学系统示意图

CARS 技术基于两作用光束的差频与待测介质拉曼散射频移相共振的四波混频效应。在三束入射光波中,两束入射光的差频与待测介质的拉曼跃迁能级间隔产生共振,从而使 3 次非线性电极化率得到共振增强,并产生第四束向高频方向移动的相干



信号波,其频移值等于介质的拉曼光谱频移值。CARS 信号的强度与被测介质的热力学温度间接相关,因此根据 CARS 信号的强度可计算出被测气流温度。

CARS 测温方法具有非侵入式、空间和时间分辨率高等优点,在非定常流、湍流等场合的温度测量中得到了应用,但 CARS 测温方法的缺点是光路复杂,整套装置的价格昂贵。

### 1.2.2.2 瑞利散射法

瑞利散射法简称 RS 法。RS 测温系统主要由激光器、诊断光路和信号采集分析系统组成,其光学系统示意图如图 1-4 所示。

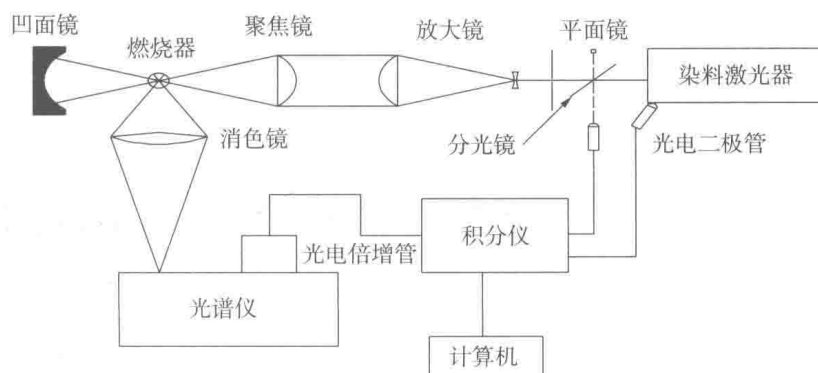


图 1-4 RS 光学系统示意图

对瑞利散射光谱(见图 1-5)进行解析,可得到气流的温度、速度以及密度等信息,而气流温度与光谱峰的宽度之间有一定的对应关系。如能得到光谱峰的宽度,则可以计算得到被测气流温度。

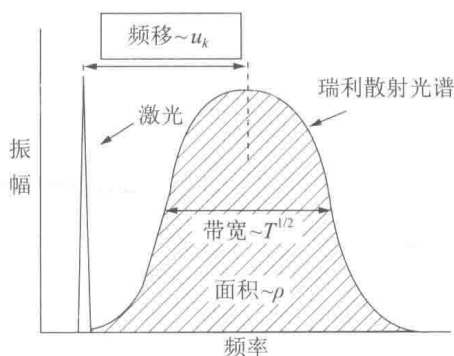


图 1-5 瑞利散射光谱

RS 测温系统可直接以图像的方式给出被测温度场的分布。相对于 CARS 而言,RS 测温系统的硬件结构较简单,价格较低廉,但 RS 信号容易受气流中粒子以及背景杂散光的影响,如采用分子过滤、法布里-珀罗干涉仪分析等手段,可将背景信号以及



米散射、布里渊散射等其他非瑞利散射信号滤除。

### 1.2.2.3 声学法

声学法气流温度测量装置的结构框图如图 1-6 所示。装置主要由超声波发射/接收装置、放大器、A/D 转换器、滤波器、下位机和上位机等组成。

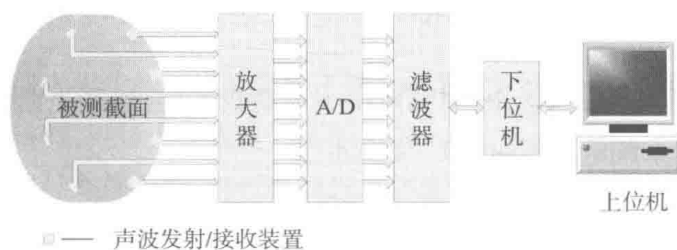


图 1-6 声学法气流温度测量装置

声学法测量气流温度的基本原理是,基于气体介质中声波的传播速度是该气体介质温度的函数,同时也与该气体的组分有关,可用式(1-3)表示:

$$a = \sqrt{\frac{\kappa RT}{M}} \quad (1-3)$$

式中: $a$ ——声波在气体介质中的传播速度, m/s;

$\kappa$ ——气体的绝热指数,即气体的比热比,与气体成分和状态有关;

$R$ ——气体常数,  $R = 8.314 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ ;

$T$ ——气体的热力学温度, K;

$M$ ——气体的摩尔质量, kg/mol。

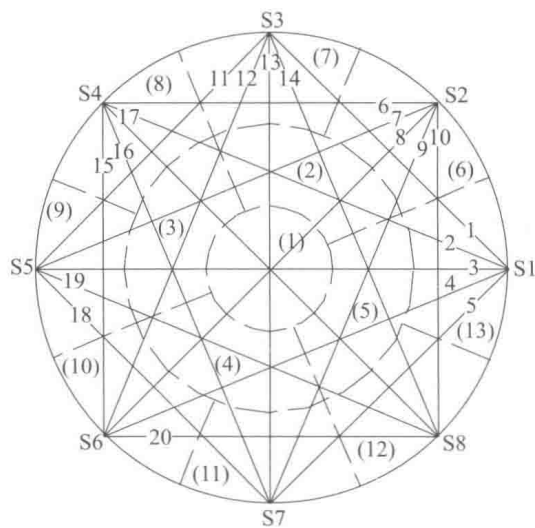


图 1-7 探头分布和测量区域划分图

因而如测量出声波在气体介质中的传播速度,就可以算出被测气流的温度。如在被测介质四周布置若干声波发送/接收探头,可以反演出被测温度场。

图 1-7 所示为一个圆形被测截面的探头布置与区域划分情况,图中, S1、S2、…、S8 为声波探头,在圆周上等角分布,有效的声波传播路径为 20 条,依次标记为 1、2、…、20。将被测空间用虚线划分成若干区域,每个区域内的温度未知,假定区域内的温度是均匀的。在模型中,被测空间被划分成 13 块,依次标



记为(1)、(2)、…、(13)。

在航空、航天发动机的地面试验中,存在较强的噪声,噪声会使得发射的声波被湮没,针对这个问题,研制了被动式超声波测温装置,即直接利用试验器内部产生的噪声进行温度测量。在国外,被动式超声波测量技术已成功应用于航空发动机的燃烧试验器上。声学测温方法尤擅测量大空间的温度场,由于硬件结构比较简单,与光学方法相比,更有希望应用于航空发动机的整机试车。

### 1.3 气流温度测量的技术现状与发展趋势

关于气流温度测量,国内现阶段主要采用接触式测温方法,也有部分高校、研究所致力于非接触式测温方法的研究,但大多处于实验室阶段,距离实用还比较远。北京长城计量测试技术研究所从20世纪70年代开始,建立了热校准风洞群,针对各类气流温度传感器进行了大量的稳态与动态校准试验,在气流温度测量误差理论、气流温度传感器规范化设计、特殊环境下的气流温度测量等方面取得了显著的成果。

美国航空航天局(NASA)在气流温度测量方面做了大量工作,在继承二战前德国科研成果的基础上,于20世纪50年代初到70年代末,对接触式测温方法进行了系统研究,积累了大量的风洞试验数据,总结出了大量的传感器性能规律。之后,美国开始致力于温场与流场的数值仿真研究,温场与流场的数值仿真成为未来发动机燃烧诊断和湍流研究的重要依据。据了解,俄罗斯在气流温度测量方面,也做了大量的研究工作。在这些研究工作的基础上,一些国际知名的发动机制造商或传感器供应商(如热测公司)提供系列化、标准化的用于发动机试验用的气流温度传感器。

从20世纪80年代开始至今,美国一些研究机构在CARS、RS等非接触式测温方法方面投入了研究,以此来对数值仿真的结果进行验证。这些非接触式的测温方法,都在燃烧试验器上进行了一定程度的应用,但技术仍不够成熟。CARS、RS等非接触式测温方法可以得到气流的温度场,并且有很好的动态特性,但这些方法大多测量的是气流静温,需要进行相应的修正才能得到气流总温。另外,这些技术中涉及的很多参数,是需要根据实际情况进行标定的,对使用者的素质有较高的要求,相比之下,接触式温度测量在现阶段仍占有重要地位。

采用接触式方法测量气流温度时,测量结果受到温度传感器本身的结构、材料、被测介质、环境条件等诸多因素的影响,这些因素相互耦合、相互影响,因而使得气流温度测量变得尤为复杂。要想得到准确的气流温度测量结果,不仅要對气流温度传感器的性能深入理解,还需要掌握气流温度传感器的设计方法以及气流温度的测量方法。

## 第 2 章 气流温度传感器的性能

### 2.1 与气流温度测量相关的几个基本概念

#### 2.1.1 静温与总温

由空气动力学的能量方程可以推导出,气流在等熵绝热的条件下,有:

$$T_0 = T + \frac{v^2}{2c_p} \quad (2-1)$$

式中: $T_0$ ——气流总温,K;

$c_p$ ——气体的定压比热容,kJ/(kg·K);

$T$ ——气流静温,K。

静温  $T$  是气体以速度  $v$  流动时的温度,它是气体分子无规则运动的度量。气流静温越高,说明气体内部分子的平均动能越大。 $\frac{v^2}{2c_p}$  称为动温,它是气流有向运动的动能的度量,是气流有向运动的动能在绝热条件下全部转化为热能所能引起的温升。总温  $T_0$  是静温与动温之和。

式(2-1)还可以表示为:

$$\frac{T_0}{T} = 1 + \frac{\kappa - 1}{2} Ma^2 \quad (2-2)$$

式中: $\kappa$ ——气体绝热指数,即比热比;

$Ma$ ——马赫数。

式(2-2)表明,马赫数越大,则气流的动能越大。

#### 2.1.2 静压与总压

气流在等熵绝热的条件下,可以推导出:

$$p_0 = p_s + \frac{1}{2}\rho v^2 \quad (2-3)$$

式中: $p_0$ ——气流总压,Pa;

$p_s$ ——气流静压,Pa;



$\rho$ ——气流密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;

$v$ ——气流速度,  $\text{m}/\text{s}$ 。

式中  $\frac{1}{2}\rho v^2$  称为动压。式(2-3)适用于低速流动,或者说适用于不可压缩流。气流总压  $p_0$  的含义是,气流以速度  $v$  和静压  $p_s$  流动时,在等熵滞止(即速度  $v$  降为零)时所达到的压力。

### 2.1.3 声速

空气中若有一个干扰源,就会使临近的空气质点发生振动。空气质点振动时,压力和密度发生微弱的变化,将这种变化称为弱扰动。在介质中弱扰动的传播速度就是声速  $c$ 。

声速公式的基本形式为:

$$c^2 = \frac{dp}{d\rho} \quad (2-4)$$

式中:  $c$ ——声速,  $\text{m}/\text{s}$ ;

$dp$ ——压力的变化微量,  $\text{Pa}$ ;

$d\rho$ ——密度的变化微量,  $\text{kg}/\text{m}^3$ 。

式(2-4)可以变换为另一种形式:

$$c = \sqrt{\kappa RT} \quad (2-5)$$

式中:  $R$ ——气体常数,  $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。

对于空气,  $\kappa$  通常取 1.4,  $R = 287.04 \text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ , 对于燃气,  $\kappa$  通常取 1.33,  $R = 287.33 \text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。

声速与气体压缩性有着密切的关系。压缩性越小的气体,其声速值越大;压缩性越大的气体,其声速值越小。对于同一种气体,温度越高,越难于压缩,则声速越大。

### 2.1.4 马赫数

气流速度  $v$  与当地声速  $c$  的比值叫做马赫数:

$$Ma = \frac{v}{c} \quad (2-6)$$

$Ma$  在数值上和气体中压力波传播时的压缩量相等。由  $Ma$  的大小就可以确定气流中压缩量的大小。

### 2.1.5 一些相似准则

在空气动力学和传热学中,为了使试验模拟实际情况,并把试验结果应用到实际情况中,常常使用相似准则。这里介绍有关的一些相似准则。



### 2.1.5.1 马赫数 $Ma$

马赫数  $Ma$  是可压缩流的相似准则,反映气体微团总能量中,流动动能与微观热能二者之间的分配情况。 $Ma$  越大,流动动能越大,微观热能越小。一般当  $Ma \leq 0.3$  时,可以把气流流动过程中的密度作为常数看待,视为不可压缩流;而当  $Ma > 0.3$  时,就不能把气流流动过程中的密度作为常数看待,要视为可压缩流。利用  $Ma$  可以判别气流的运动特征。当  $Ma < 1$  时,气流流动称为亚声速流动; $Ma > 1$  时,气流流动称为超声速流动; $Ma \approx 1$  时,气流流动称为跨声速流动。温度传感器校准时,一般要模拟实际使用的气流马赫数。

### 2.1.5.2 普朗特数 $Pr$

$$Pr = \frac{\nu}{a} \quad (2-7)$$

式中: $\nu$ ——运动黏度,  $m^2/s$ ;

$a$ ——导温系数,  $m^2/s$ 。

普朗特数  $Pr$  也可以写为:

$$Pr = \frac{\mu c_p}{\lambda} \quad (2-8)$$

式中: $\mu$ ——动力黏度,  $Pa \cdot s$ ;

$\lambda$ ——导热系数,  $W/(m \cdot ^\circ C)$ 。

动力黏度  $\mu$  来源于分子间的动量交换,由介质的种类和温度决定其大小;导热系数  $\lambda$  来源于分子间的能量交换。 $Pr$  数由流体的物性参数组成,可以看成是反映流体物理性质对传热影响的一个相似准则数。当  $Pr$  数小于 1 时,说明导热影响超过了黏性影响;当  $Pr$  大于 1 时,则说明黏性影响超过导热影响。如对于空气,  $Pr \approx 0.7$ ,因此导热影响超过了黏性影响;对于水,  $Pr > 1$ ,则黏性影响超过导热影响。

### 2.1.5.3 雷诺数 $Re$

$$Re = \frac{\rho v l}{\mu} \quad (2-9)$$

式中: $\rho$ ——流体密度,  $kg/m^3$ ;

$l$ ——特性尺度,  $m$ 。

$Re$  数是表示黏性流体运动情况的相似准则数。 $Re$  数的物理意义是流体微团所受的惯性力与黏性力之比。 $Re$  数越大,黏性力相对于惯性力就越小。



#### 2.1.5.4 努赛尔数 $Nu$

$$Nu = \frac{hl}{\lambda} \quad (2-10)$$

式中： $h$ ——对流换热系数(简称换热系数)， $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ 。

$Nu$  数表示了对流换热的强烈程度。 $Nu$  数越大，则说明对流换热越强。

#### 2.1.6 对流换热

对流是流体各部分之间发生相对位移时所引起的热量传递过程。对流仅发生在流体中，而且必然伴随着有导热现象。气流与另一种物体(如温度传感器)的表面直接接触时所发生的热交换过程，叫做对流换热。对流换热是流体的对流与导热联合作用的结果。

气流与温度传感器表面之间的对流换热公式为：

$$Q_v = hF(T_g - T_j) \quad (2-11)$$

式中： $Q_v$ ——对流换热量， $W$ ；

$F$ ——换热面积， $m^2$ ；

$T_g$ ——气流的有效温度， $K$ ；

$T_j$ ——温度传感器的指示温度， $K$ 。

换热系数  $h$  是一个复杂的参数，它与换热过程中的许多因素有关。对于温度传感器而言，它与温度传感器的结构、尺寸、气流流态及气流物性等因素有关。 $h$  值一般用试验方法确定，试验结果用无因次的准则方程式表示。

对于稳定的强迫对流，准则方程式的形式为：

$$Nu = f(Re, Pr) \quad (2-12)$$

对于空气和淡的燃气流， $Pr \approx 0.7$ ，准则方程式的形式为：

$$Nu = BRe^m \quad (2-13)$$

式中， $B$ 、 $m$  是常数。

对于热电偶式温度传感器，当热电偶偶丝截面为圆形，气流与热电偶偶丝垂直时，有：

$$Nu = (0.44 \pm 0.06) Re^{0.5} \quad (2-14)$$

式(2-14)适用范围为：偶丝直径  $0.2mm \sim 1.4mm$ ，温度  $15^\circ C \sim 1627^\circ C$ ，马赫数  $0.015 \sim 0.9$ ，质量流速  $9.8kg/(m^2 \cdot s) \sim 195kg/(m^2 \cdot s)$ 。计算时取偶丝直径为定性尺寸，气流总温为定性温度。

由式(2-14)可以导出：

$$h = 0.44\lambda \left[ \frac{v}{vd} \right]^{0.5} \quad (2-15)$$





式中： $\nu$ ——运动黏度， $\text{m}^2/\text{s}$ ；

$d$ ——偶丝直径， $\text{mm}$ 。

气流与热电偶丝平行时，有：

$$Nu = (0.085 \pm 0.009) Re^{0.674} \quad (2-16)$$

式(2-16)适用范围为：偶丝直径  $0.33\text{mm} \sim 1.3\text{mm}$ ，温度  $15^\circ\text{C} \sim 538^\circ\text{C}$ ，马赫数  $0.019 \sim 0.75$ ，质量流速  $7.3\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}) \sim 251\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。计算时取偶丝直径为定性尺寸，气流总温为定性温度。

由式(2-16)可以导出：

$$h = 0.085\lambda \left(\frac{\nu}{v}\right)^{0.674} \left(\frac{1}{d}\right)^{0.326} \quad (2-17)$$

当热电偶测量端为球形，气流与热电偶偶丝垂直时：

$$Nu = 0.37 Re^{0.5} Pr^{0.33} \quad (2-18)$$

式(2-18)适用于  $Re = 20 \sim 10^5$ ，取测量端直径为定性尺寸，气流总温为定性温度。

由式(2-18)可以导出：

$$h = 0.37\lambda \left(\frac{\nu}{vd}\right)^{0.5} \left(\frac{\mu c_p}{\lambda}\right)^{0.33} \quad (2-19)$$

## 2.2 温度传感器的恢复特性

### 2.2.1 基本概念

#### 2.2.1.1 速度误差

温度传感器测量气流温度，一般希望得到的是气流总温。但是，即使在忽略温度传感器导热和辐射的条件下，实际测得的温度也将低于气流总温。这是由于气流的气动滞止、黏性耗散和导热联合作用的结果。在紧贴传感器表面的速度附面层内，气流速度迅速下降，到表面处降为零，这一现象叫做气动滞止。由于外层气流向接近表面的内层气流作黏性剪切功，使内层温度高于外层温度；同时，由于黏性剪切功形成了内层高于外层的温度梯度，因而将有内层向外层的热传导，它使靠近表面的内层温度降低。上述两个过程达到平衡后，附面层内的气流和传感器表面将达到一个平衡温度  $T_g$ ，称为气流的有效温度，或者绝热壁温（恢复温度）。由于热传导，并且  $Pr$  数小于 1，导热影响大于黏性影响，因此  $T_g$  低于自由流总温  $T_0$ 。

由以上分析，可以写出：