

用热流探针测量激波速度

张仕忠, 李进平, 陈宏

中国科学院力学研究所, 高温气体动力学国家重点实验室(筹), 北京海淀区 100190

摘要 电离探针作为测量激波速度的一种基本手段, 在激波速度较高的条件下应用效果很好, 但是在激波速度较低、波后温度达不到空气电离程度的情况下, 传统电离探针无法满足实验要求。同轴热电偶热流传感器频响很高, 可以将其作为测速探针, 但测速电子电路需重新设计。本文通过信号放大电路先锁定激波冲激信号, 然后触发脉冲信号发生电路, 实现了一种单通道、多测点的激波风洞测速系统。本测量技术可以广泛应用于各种激波风洞的激波速度测量, 具有实际应用价值。

关键词 激波测速, 同轴热电偶, 电离探针

引言

激波速度测量是激波管和激波风洞运行状态的一个重要测量参数, 一般都是通过测量传感器信号之间的时间间隔, 从而换算得出激波马赫数。常用的激波速度测量方法有: 通过压力传感器测量激波压力信号; 通过光学方法测量激波波面发光和激波前后密度的跳跃; 通过电离探针测出空气电离信号。

在激波管各连接环处安装压力传感器, 既可以测出激波压力信号, 同时也能得到激波速度信息, 是一种比较实用的激波管运行状态测量手段。常用的压力传感器有压电传感器和压阻传感器, 实验测试中每个传感器都需要占用一个放大器通道和一个数据采集通道。在小型激波管和激波风洞设备中, 所需传感器个数并不是很多, 可以采用这种压力测试手段, 但在大型激波管和激波风洞设备中, 由于所需测点数量较多, 如果全部采用压力传感器测量会造成测试系统成本很高, 特别是激波管的有些位置, 我们只关心激波传播速度而忽略激波压力信息, 这时候我们就需要用一种成本低、结构简单的激波速度测试系统。

电离探针作为一种激波测速方法, 其结构简单, 在空气解离的条件下, 可以很好的测出激波速度。但是在激波速度较低、波后温度达不到空气电离程度的情况下, 实验气流无法满足传统电离探针的工作条件, 传统电离探针失效, 这时候就需要研究一种新的激波测速探针。

激波测速探针需要测量激波管内的一种变化量, 而激波管内气体化学反应除了压力变化外还有温度变化。同轴热电偶热流传感器具有频响快、耐冲刷的优点, 一直被用在模型驻点热流测量上。充分利用热电偶频响快的优点, 我们采用同轴热电偶作为激波测速探针, 通过信号放大和触发电路, 实现了一种单通道、多测点的激波风洞测速系统。

1 传统电离探针测试系统

1.1 传统电离探针原理

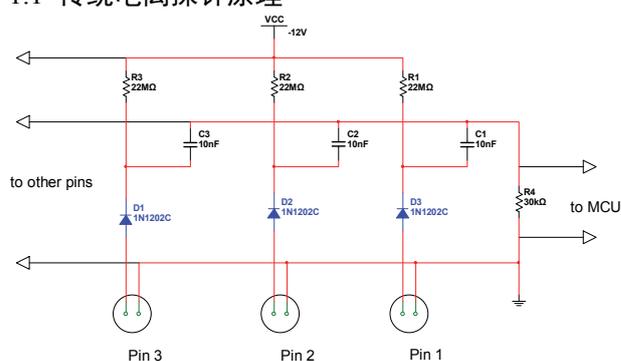


图 1 传统电离探针测试系统在强激波后面, 气流温度较高, ($M_s > 6$, $T_2 > 2000K$) 气体出现离解, 甚至局部电离, 因此波后气流存在着能导电的粒子, 传统电离探针就是利用这种特性制成测探系统, 元件制作简单, 测量线路也不复杂, 特别适用于测量强激波速度。

图 1 为传统电离探针测试系统原理图, 电离探针有二个电极, 其中一极加电压, 另一极接地, 当激波通过以后, 波后的气体将两极接通, 电容放电从而产生激波脉冲信号。

电极之间的电导率对输出信号波形及幅度有很大影响，激波后面气流的电导率是初始压力和激波马赫数的函数，电极形状和电极表面污染程度对电极间的电导率有很大影响。

1.2 带自锁功能的电离探针系统

在图 1 所示的电离探针系统中，当气体解离不均匀时会造成探针不断的断开和导通，从而使电容不断充电放电，测量信号中会有脉冲干扰，从而影响最后实验数据处理。针对这种情况，有如图 2 所示的改进系统：

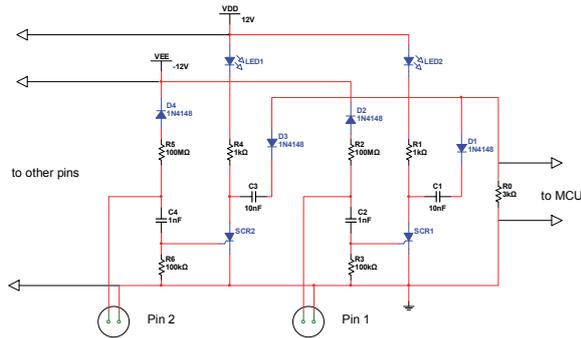


图 2 带自锁功能的电离探针测试系统

这种电离探针系统通过单向可控硅 SCR 从而带有自锁功能，R2, C2, R3 组成一个脉冲回路，当电离探针 Pin 1 导通时，C2 放电从而触发 SCR1 栅极导通，电容 C1 对负载 R0 放电得到激波脉冲信号。SCR1 一旦导通后，外部信号就无法使其关断，从而保证一路只有一个脉冲信号，从而避免了后面干扰脉冲的产生。下次再使用之前，需要对电路进行复位。

2 同轴热电偶探针

由以上分析可以看出，传统电离探针测试系统是建立在激波后空气电离的基础上进行工作的，当激波速度较低，($M_s < 3, T_2 < 1000K$) 波后温度达不到空气电离程度的情况时，传统电离探针无法工作。在这种情况下，我们研究了一种同轴热电偶探针测速技术。

2.1 同轴热电偶结构形式

热电偶是一种基于热电效应的温度传感器，其测量原理是将两种不同材料的导体或半导体 A 和 B 连接成一个闭合回路。当导体 A 和 B 之间存在温度差时，两者之间便产生电动势，因而在回路中形成电流，这种现象称为塞贝克

效应。同轴热电偶的结构如图 3 所示，将康铜丝穿入紫铜管中，使用环氧树脂隔离，表面使用机械打磨使其导通，从而构成铜—康铜热电偶。

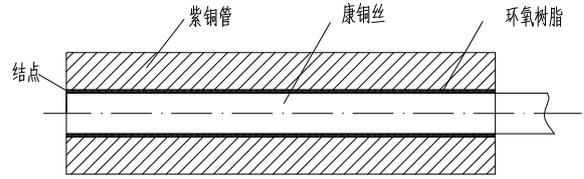


图 3 同轴热电偶结构形式

同轴热电偶优点是频响高，适用温度范围较宽，抗冲刷能力较好。

2.2 同轴热电偶频响

在探针设计中，首先通过现有的实验设备测量同轴热电偶的频响特性，图 4 是使用热电偶测激波管壁面温度和热流的电压信号（未进行换算处理），放大器采用东华 DH-3840P 放大器。

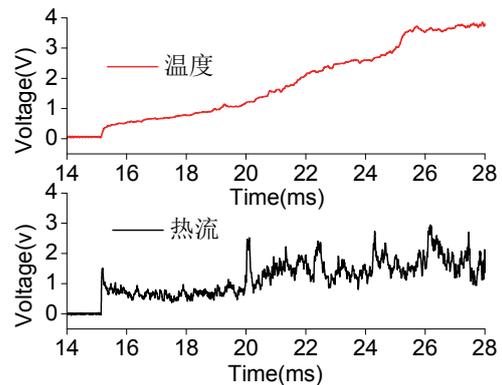


图 4 同轴热电偶测量壁面温度和热流曲线

从图 4 中可以看出，热流响应比温度曲线要快，对图 4 的热流曲线进行局部放大，如图 5 所示。

图 5 说明同轴热电偶热流响应在微秒量级，其频率响应完全可以用来作为激波测速探针。

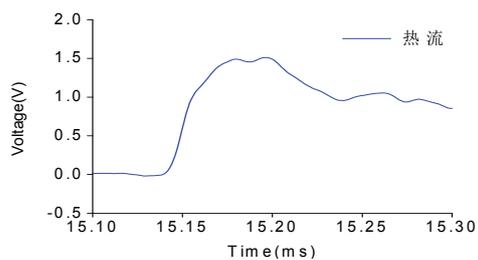


图 5 同轴热电偶热流响应曲线

3 激波测速系统

以上实验结果说明，同轴热电偶的频响高，完全可以作为激波测速探针使用。但由于现有的放大器成本高，而且不方便测速信号通道的合并，所以本激波测速系统的信号放大及触发电路需要全部自行设计。

3.1 激波测速系统组成

由于同轴热电偶信号很弱，所以必须先对热电偶温度信号进行放大。由图 4 可知，要提高热电偶探针激波测速系统的响应时间，必须使用热流信号作为触发源，所以电路设计中需要将温度信号转换成热流信号。本文设计的激波测速系统框架图如图 6 所示。

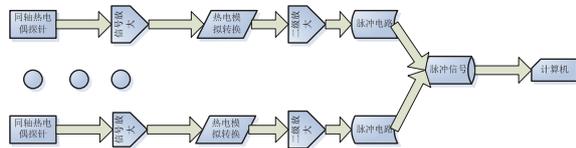


图 6 激波测速系统框架图

本系统中的热电模拟网络并没有完全按照实际热流测量需要的热电模拟网络节数来设计，因为在激波测速系统中，我们只关注时间响应，而对具体的热流值没有要求，这样可以大大简化电路设计。

3.2 激波测速系统电路设计

激波测速系统原理图如图 7 所示，图中只是一个测点的电路原理图，测速通道信号合并同图 2 原理相同，这里就不再画出。

本系统设计的关键是温度信号经过热电模拟网络后，由于通过电容负载，造成二级放大信号干扰特别大，所以二级放大电路的放大倍

数不能太高，但是热流信号起跳幅度又是由二级放大倍数来决定的，所以需要权衡这二者之间的关系，同时作好信号去噪措施。

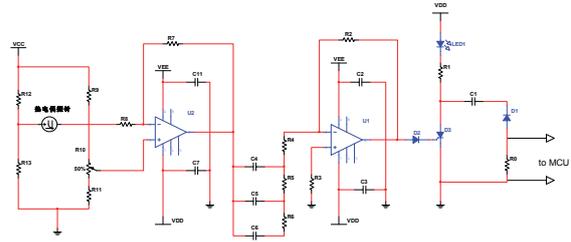


图 7 激波测速系统原理图

4 实验结果

4.1 高焓激波管实验装置

本文实验所用的爆轰激波管如图 8 所示。该设备激波管全长 31m，包括驱动段、被驱动段和卸爆段，内径均为 224mm；试验段直径 1m、长大于 8m。实验气体为空气，驱动气体是氢气和氧气，使用火花塞+点火管装置点火。

为了获得最佳的运行时间，驱动段和被驱动段最佳长度比是根据模拟飞行马赫数不同计算出来。该激波管比较适合模拟飞行高度 H=30~60km，飞行马赫数 8~18 范围内的模型头部驻点区气动加热实验。

实验中同轴热电偶探针安装在标号⑧和⑨的位置，同时，在这两个位置分别安装有压电传感器，用来作为本系统测量的对比信号。本次实验激波管运行激波马赫数为 3.0，实验气体总温计算公式如下：

$$T_{21} = \frac{[2\gamma_1 M_s^2 - (\gamma_1 - 1)][(\gamma_1 - 1)M_s^2 + 2]}{(\gamma_1 + 1)^2 M_s^2}$$

计算结果为 804K，低于空气解离温度。

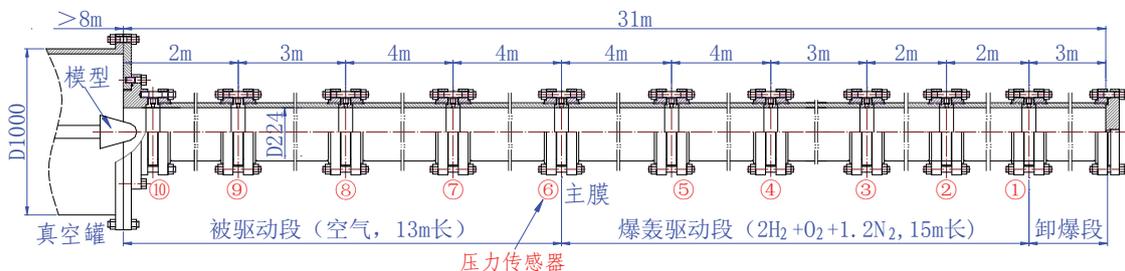


图 8 高焓激波管实验装置

4.2 温度作为触发信号

刚开始电路设计中，使用温度作为信号触发源，由于温度信号爬坡比较慢，所以实验前

先通过电位器调整热电偶平衡电路，使 SCR 栅极电位处于临界触发状态，得到的实验结果如图 9 所示。

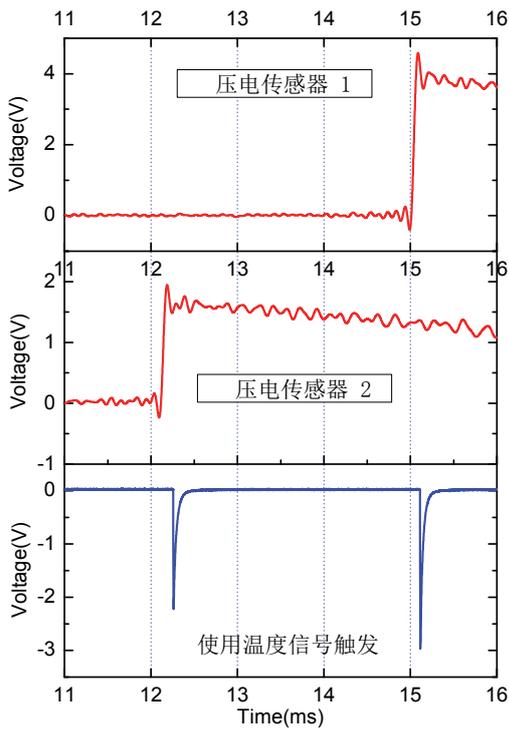


图 9 使用温度作为触发信号

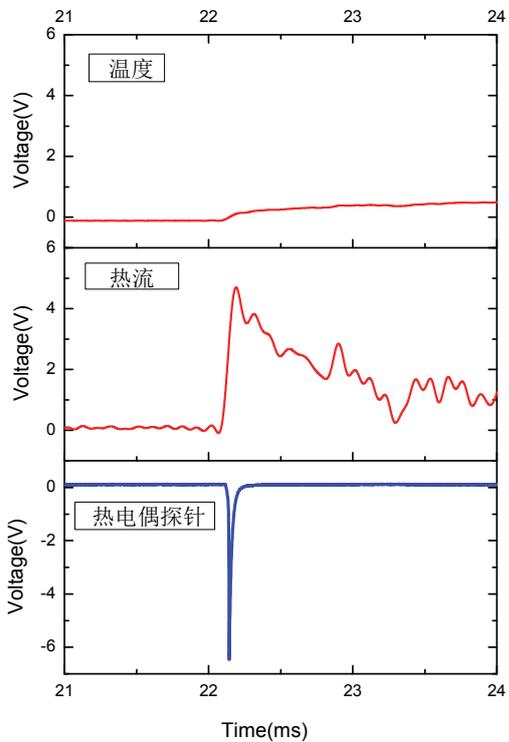


图 10 温度、热流及探针信号

激波信号的两个脉冲同压电传感器对比，第一个脉冲比压电传感器延迟 130 微秒，第二

个延迟 80 微秒，延迟时间不一致。分析原因为调整热电偶平衡电路使 SCR 处于临界触发状态时，元器件触发临界值有差异，调整触发极限电压时有误差，从而造成信号触发延迟不一致，并且重复实验发现每次试验延迟时间都有所差异。

4.3 热流作为触发信号

从温度作为触发信号的实验结果来看，要想获得正确的激波速度信息，必须保证触发信号无延迟，所以必须使用热流作为触发信号。

图 10 为使用自己制作的信号放大系统得到的一个热电偶探针测点的温度、热流及探针脉冲信号，激波达到时温度平缓上升，而热流值则会出现尖峰信号。

图 11 为使用热流作为触发信号源测得激波速度信号，可以看出，采用热流作为激波信号源，可以保证触发无延时，能够获得比较准确的激波速度。

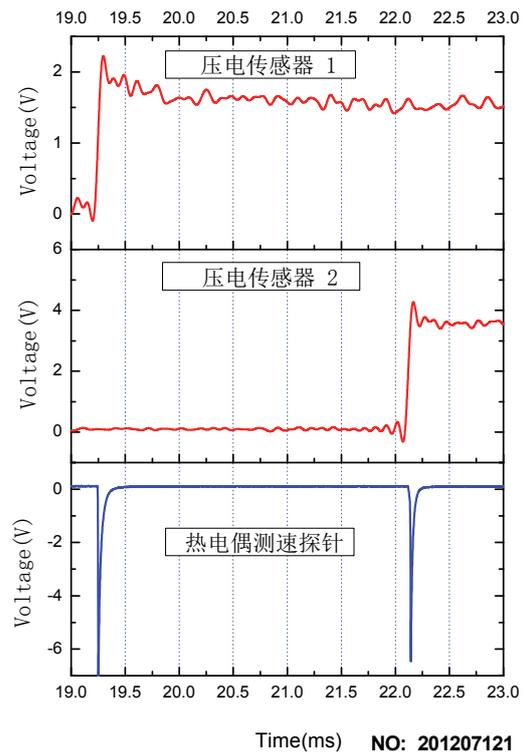


图 11 使用热流作为触发信号

图 11 说明使用热电偶作为激波速度探针，其测量结果可以和压电传感器一样准确，但本系统的成本却要低很多。

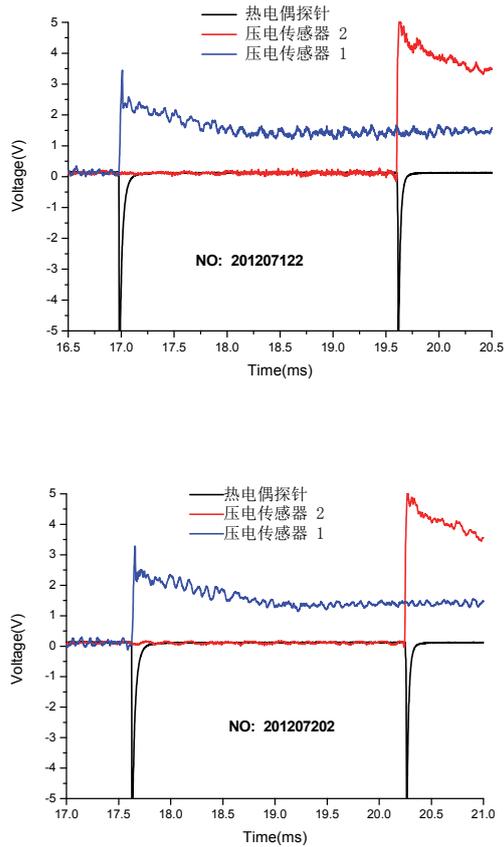


图 12 热电偶探针重复性试验

图 12 为热电偶激波测速探针多次试验结果，从图中可以看出，本测速系统重复性很好。

5 结 论

相对于传统电离探针系统，本系统使用同轴热电偶作为探针，其频响可以满足测试要求，在使用温度和热流作为触发信号的对比实验中可以看出，只有使用热流信号才能满足激波速度测量时间要求。

本系统克服了传统电离探针在激波速度较低、波后温度达不到空气电离程度的情况下无法测出激波速度的弊端，其适用范围更广，可以用于一般激波管和激波风洞测量激波速度需求，具有很好的实用价值。

参考文献

- 1 HERBERT T. KNIGHT AND RUSSELL E. DUFF. Precision Measurement of Detonation and Strong Shock Velocity in Gases. The review of scientific instruments, 1955
2. Edwin M. Chan, Vivian Lee, Samuel P. Mickan, Phil J. Davies. Low-Cost Optoelectronic Devices to Measure Velocity of Detonation. University of Adelaide
3. Wang Feng, Peng Xiao-shi, Liu Shen-ye, Li Yong-sheng, Jiang Xiao-hua, Ding Yong-kun. Direct measurement technique for shock wave velocity under super high pressure. 37th EPS Conference on Plasma Physics O4.216
4. D.L.Schultz, T.V.Jones. Heat-transfer measurement in short-duration hypersonic facilities. AGARD-AG-165.
5. 陈强. 激波管流动的理论及实验技术. 中国科技大学. 1975.7
6. 王世芬. 一种用于热流脉动测量的宽频带热电模拟网络. 气动实验与测量控制, 1990, 6, Vol 4, No 2

THE MEASUREMENT OF SHOCK WAVE VELOCITY BY FLUX PROBE

ZHANG Shizhong, LI Jinping, CHEN Hong

State Key Laboratory of High Temperature Gas Dynamics, Institute of Mechanics, C A S, No.15 Beisihuanxi Road, Beijing 100190, China

Abstract Ionization-probe is an effective means for determining the velocity of detonation or strong shock waves by using the conductivity behind the wave, but it can be unable to meet the experimental requirements under the conditions that the shock wave velocity is lower and the air behind the wave can not reach the ionization temperature. To solve this problem, a thermocouple flux probe with high frequency response is used in our system and the measuring circuit is redesigned. The shock wave signal is amplified and locked to trigger the pulse generating circuit to obtain the shock velocity signal. This system can be widely applied to various shock tubes for shock wave velocity measurement.

Key words shock wave velocity measurement, thermocouple probe, Ionization-probe