

用热流探针测量激波速度

张仕忠, 李 贤, 李进平, 陈 宏, 俞鸿儒

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

摘要: 激波速度测量是激波管和激波风洞运行状态的一个重要参数, 压电传感器或光学方法测速系统成本高, 而传统电离探针在激波马赫数较低、波后温度达不到空气电离程度的情况下无法满足实验要求。提出了一种使用同轴热电偶作为测速探针来测激波速度的方法, 弥补了电离探针在激波马赫数较低时的不足。介绍了同轴热电偶探针测速原理, 并设计了测量激波速度的系统电路。通过信号放大电路锁定激波冲击信号, 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。分别开展以温度与热流为触发信号的风洞实验, 结果表明只有使用热流信号才能满足激波测速的时间要求。

关键词: 热流探针; 激波速度; 同轴热电偶; 电离探针; 激波风洞

中图分类号: V211.71 文献标识码: A

The measurement of shock wave velocity by heat flux probe

Zhang Shizhong, Li Xian, Li Jinping, Chen Hong, Yu Hongru

(State Key Laboratory of High Temperature Gas Dynamics, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: Shock wave velocity is one of the most important parameters in shock tube for determining the running states. It can be measured through shock pressure or optical method, of which the cost will be high in large systems. Ionization-probe is an effective means of determining the velocity of detonation or strong shock waves by using the conductivity behind the shock wave, but it may not meet the experimental requirements under the condition that the shock wave velocity is so low that the air behind the shock wave cannot reach the ionization temperature. A thermocouple flux probe with high frequency response is used in our measurement system to overcome the aforementioned disadvantages. Based on traditional ionization-probe circuit, the thermocouple probe measurement circuit is redesigned. The shock wave signal is amplified and locked to trigger the pulse generating circuit to obtain the shock velocity signal. The key of the circuit design is that the secondary amp signal interference is particularly large after the thermal simulation network, due to the load through a capacitor, therefore, the magnification of the secondary amplification circuit cannot be too high, but the amplitude of heat flux signal is determined by the magnification, so the relationship between the two factors need to be balanced. Temperature and heat flux signals are used as trigger signals respectively. The delay times contrasted with piezoelectric sensors are inconsistent when the trigger signal is temperature. The first pulse delays 130 microseconds, and the second delays 80 microseconds, which is because the limit trigger voltages have error. When the trigger source is heat flux signal, the circuit can be triggered without delay to obtain more accurate shock wave velocity. The results show that only heat flux signal can meet the time requirements of shock velocity. This method overcomes the drawbacks of traditional ionization probe, and can be widely applied to various shock tubes for shock wave velocity measurement.

Key words: heat flux probe; shock wave velocity; thermocouple probe; ionization-probe; shock tube

收稿日期: 2013-11-13; 修订日期: 2014-04-15

引用格式: Zhang S Z, Li X, Li J P, et al. The measurement of shock wave velocity by heat flux probe. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2014, 28(5): 86-91. 张仕忠, 李 贤, 李进平, 等. 用热流探针测量激波速度. *实验流体力学*, 2014, 28(5): 86-91.

0 引言

激波速度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计算出激波速度,进一步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;通过电离探针测出空气电离信号^[1];通过光学方法测量激波波面发光和激波前后密度的跳跃^[2-6]。

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,只关心激波传播速度而忽略激波压力信息,这时候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,可以很好地测出激波速度。但是在激波马赫数较低、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,传统电离探针方法失效,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^[7-8]。同轴热电偶热流传感器具有频响快^[9-10]、耐冲刷的优点,一直被用在模型驻点热流测量上^[11]。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。

传统电离探针结构简单、易于操作,使用传统电离探针测量激波速度在国内外应用比较早,在 20 世纪 50 年代技术就已经发展得比较成熟,而使用热流探针测量激波速度这种方法在国内外则属于首创,之前没有被应用过。

使用热流探针测量激波速度系统设计有两大关键问题:一是如何实现热流探针信号的快速响应,二是对热流信号的放大处理措施。由于本系统设计是基于传统电离探针测速系统进行改进设计的,所以本文首先介绍传统电离探针电路。

1 传统电离探针测速系统

1.1 传统电离探针原理

在强激波后面,气流温度较高($M_s > 6, T_2 > 2000\text{K}$),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速系统,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

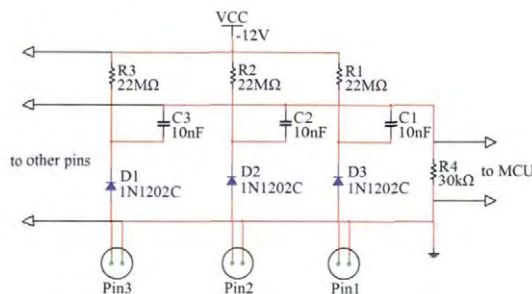


图 1 传统电离探针测试系统
Fig. 1 Traditional ionization probe test system

有 2 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,当气体离解不均匀时会造成探针不断断开和导通,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的处理。针对这种情况,可采用如图 2 所示的改进系统:

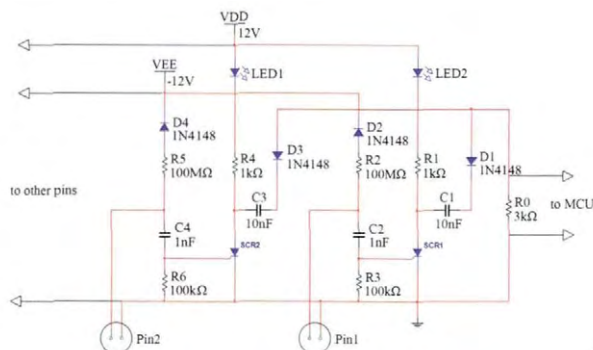


图 2 带自锁功能的电离探针测试系统
Fig. 2 Ionization probe test system with self-locking function

这种电离探针系统利用单向可控硅 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 Pin1 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。

由以上分析可以看出,传统电离探针测试系统是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,本文研究了一种同轴热电偶探针测速技术。

2 热流探针测速系统

激波测速系统主要由 2 部分构成,一部分为热流探针部分,另一部分为信号调理电路部分。热流探针必须能够对热流信号进行快速响应,工业用热电偶响应时间一般为 s 量级,反应时间慢,不能直接用来作为热流探针使用。本系统需要设计一种快速响应热电偶用来作为热流探针。信号调理电路涉及将温度信号转换成热流信号,其转换电路的容性负载会对系统造成很大的噪声干扰,在设计中需要合理调整放大倍数,并做好去噪措施。

2.1 热流探针设计

快速热流探针的结构如图 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。由于这种结构形式的热电偶节点很小,所以其相应时间很快,频响高,并且适用温度范围较宽,抗冲刷能力较好。

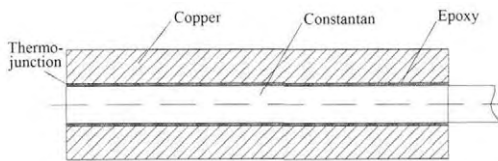


图 3 热流探针结构形式
Fig. 3 Structure of thermocouple probe

在探针设计中,首先通过现有的实验设备测量热流探针的频响特性,图 4 是使用热流探针测量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。

从图 4 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 μs 量级,其频率响应完全可以用来作为激波测速探针。

2.2 信号调理电路

由于热流探针信号很弱,必须先对热流探针温度信号进行放大。由图 4 可知,要提高热流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。设计的激波测速系统信号调理电路框架如图 6 所示。

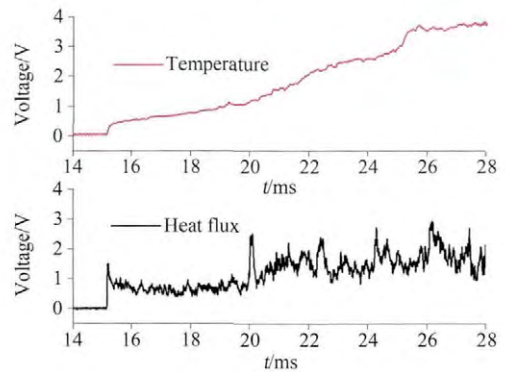


图 4 热流探针测量壁面温度和热流曲线
Fig. 4 Temperature and heat flux curve on shock tube wall measured by coaxial thermocouple probe

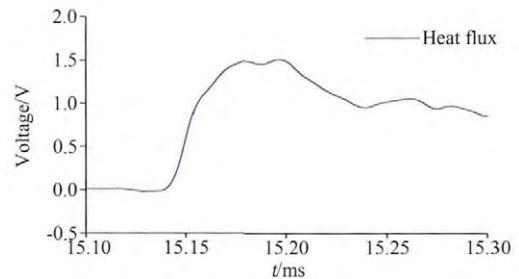


图 5 同轴热电偶热流响应曲线
Fig. 5 Heat flux response curve of coaxial thermocouple

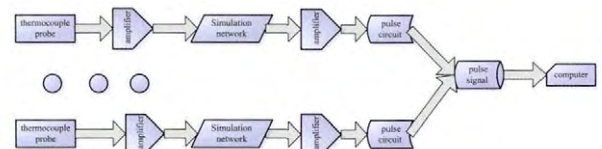


图 6 激波测速系统框架图
Fig. 6 Framework of shock wave velocity measurement system

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点^[12]来设计,因为在激波测速系统中,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。

激波测速系统信号调理电路如图 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,这里不再给出。

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,二级放大电路的放大倍数不能太高,而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。

3 激波风洞实验

3.1 高焓激波管实验装置

本实验所用的爆轰激波管如图 8 所示。该设备

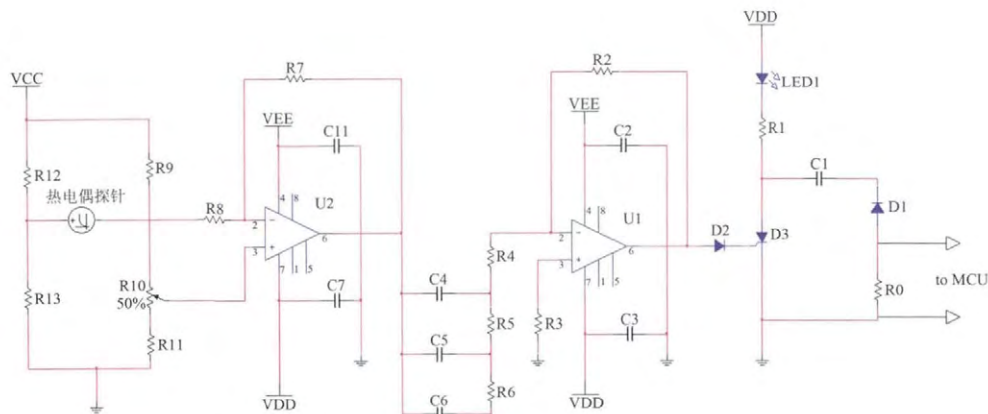


图 7 激波测速系统原理图
Fig. 7 Schematic of shock wave velocity measurement system

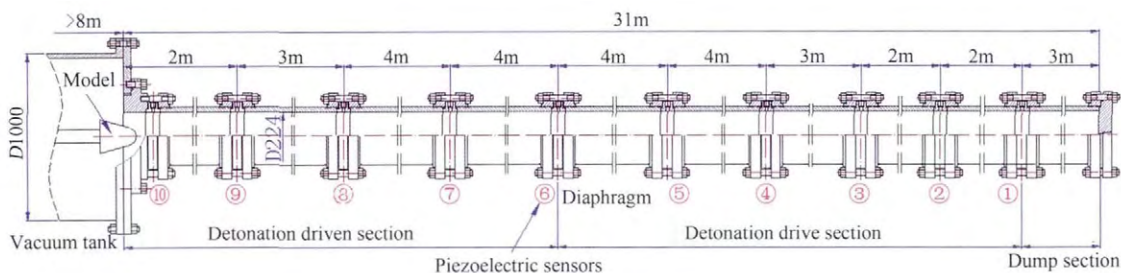


图 8 高焓激波管实验装置
Fig. 8 Shock tube with high enthalpy

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。

为了获得最佳运行时间,驱动段和被驱动段最佳长度比是根据模拟的飞行马赫数计算出来的。该激波管比较适合飞行高度 $H=30\sim 60\text{km}$,飞行马赫数 8~18 范围内的模型头部驻点区的气动加热的模拟。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。本次实验激波管的激波马赫数为 3.0,实验气体总温计算公式如下:

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

计算结果为 804K,低于空气解离温度。

3.2 温度作为触发信号

在本系统设计中,使用了两个同轴热电偶探针测量激波速度。本系统具有很好的扩展性,只需要将扩展的探针模块电路并联接入主电路就可以工作。

首先使用温度信号作为脉冲的信号触发源,在图 4 分析中,知道温度信号爬坡比较慢,幅度值比较小,要想作为触发源,信号幅度必须能达到 SCR 的栅极电位。为满足这个触发条件,在实验前先通过一个平衡电路来调整热电偶的输出偏置电压,从而使得

SCR 栅极电位处于临界触发状态,这样即使信号幅度很小也可以触发栅极,实验结果如图 9 所示。

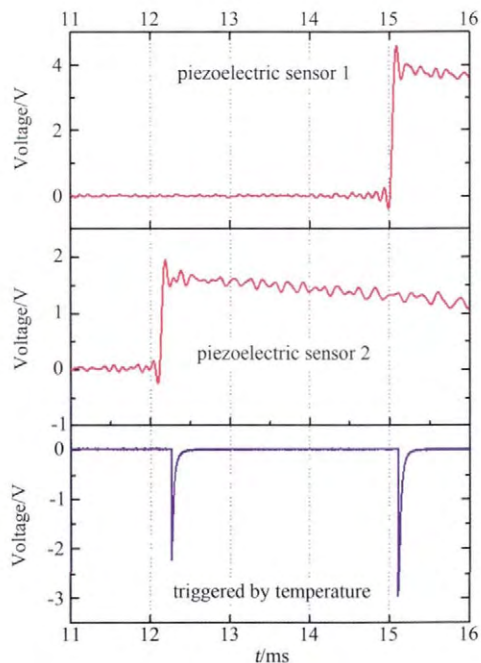


图 9 使用温度作为触发信号
Fig. 9 Temperature as the trigger signal

使用温度作为触发信号得到的激波速度信号为 2 个脉冲信号,同对应位置的压电传感器相比,第 1 个脉冲比压电传感器延迟 $130\mu\text{s}$,第 2 个延迟 $80\mu\text{s}$,延迟时间不一致。原因为使用温度作为触发信号,幅

值小,所以热电偶平衡电路处于偏置状态,使得 SCR 栅极处于临界触发状态。但是由于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,所以不能使用温度作为触发信号。

3.3 热流作为触发信号

在放大电路中加入热点模拟网络,将热电偶探针的温度信号转换成热流信号,经过热电模拟网络处理的热流信号可以认为是温度信号的微分形式,信号响应时间大幅度提高,信号输出幅值也高,这样可以不用考虑由于 SCR 元器件栅极触发电压的差异而造成的触发延时现象。

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、热流信号,以及使用热流信号作为触发信号得到的激波脉冲信号。从温度曲线中可以看出,激波到达时温度平缓上升,而经过热点模拟网络的热流值则会出现尖峰信号,并且热流信号起跳是温度信号的 10 倍,其值远远大于 SCR 的栅极触发电压,从而保证了脉冲信号触发无延时。

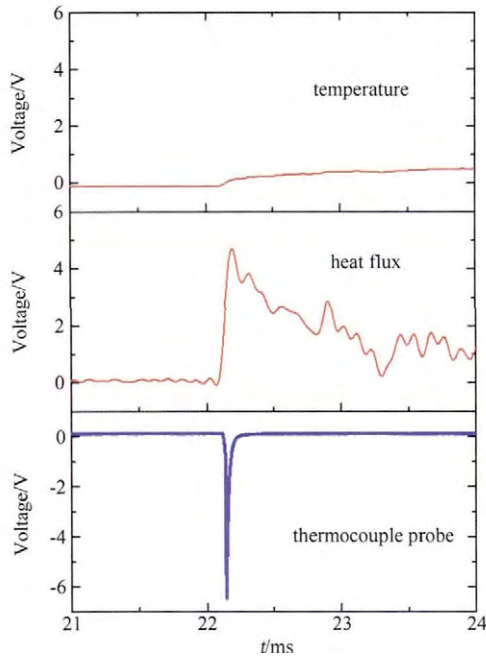


图 10 温度、热流及探针信号

Fig. 10 Temperature, heat flux and thermocouple probe signal

热电偶激波测速系统具有很好的扩展性,所有的热电偶探针单元可以很方便地并入总系统单元,本实验中仅以 2 个热电偶探针为例,测得的激波速度如图 11 所示。

图 11 中 3 个图为 3 次重复性试验,每个图中为热电偶探针系统测得的激波速度信号和相应位置安装的压电传感器测得的压力起跳信号对比。可以看出,采用热流作为激波速度信号触发源,可以保证信号触发无延时,能够获得准确的激波速度。

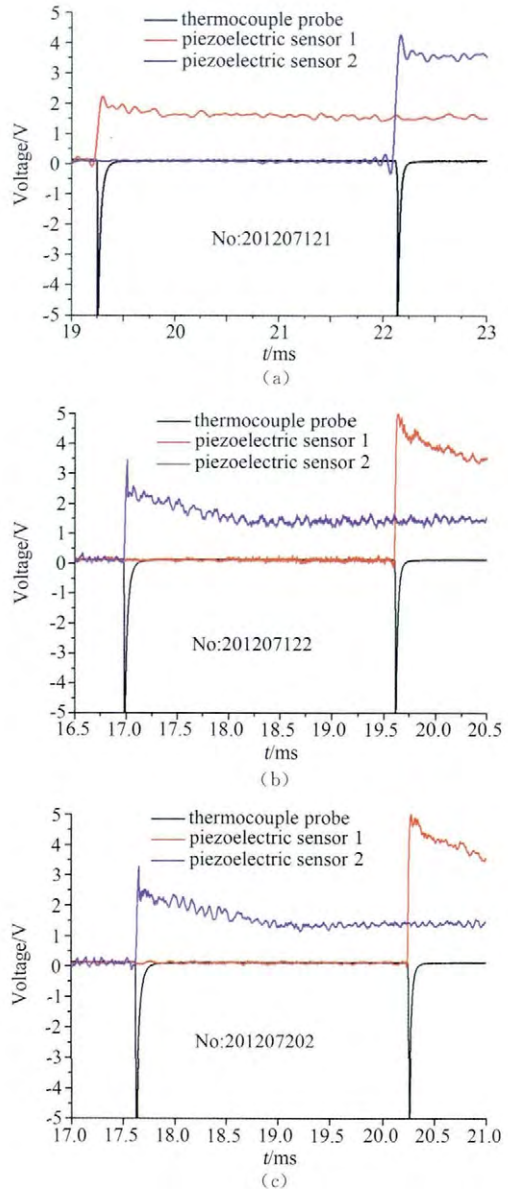


图 11 热电偶探针重复性试验

Fig. 11 Repeatability of thermocouple probe system

同时从图 11 中可以看出本热电偶测速系统具有很好的重复性。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。

4 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,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,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, Russell E Duff. Precision measurement of detonation and strong shock velocity in gases[J]. The review of scientific instruments, 1955.
- [2] Edwin M Chan, Vivian Lee, Samuel P. et al. Low-cost optoelectronic devices to measure velocity of detonation[J]. SPIE Vol. 5649, 2005.
- [3] Wang Feng, Peng Xiaoshi, Liu Shenye, et al. Direct measurement technique for shock wave velocity under super high pressure[C]//37th EPS Conference on Plasma Physics O4. 216.
- [4] Merzkirch W, Erdmann W. Measurement of shock wave velocity using the doppler principle[J]. Appl Phys, 1974, 4: 363-366.
- [5] Dubinov A E, Sadovoy S A, Selemir V D. Measurement of shock waves velocity in the air plasma of capacitively coupled RF discharge[J]. Shock Waves, 2000, 10: 73-76.
- [6] Celliers P M, Bradley D K, Collins G W, et al. Line-imaging velocimeter for shock diagnostics at the OMEGA laser facility [J]. Rev Sci Instrum, 2004, 75(11): 4916-4929.
- [7] Schultz D L, Jones T V. Heat-transfer measurement in short-duration hypersonic facilities[R]. AGARD-AG-165.
- [8] 陈强. 激波管流动的理论及实验技术[M]. 合肥: 中国科技大学出版社, 1975.
- [9] 钱兰, 陈宁. 薄膜热电偶动态响应特性的分析与测试[J]. 汽车运输研究, 1996, 15(1).
- [10] 尹协振, 姚久成. 测量低密度气流速度和运动激波马赫数的火花放电法[J]. 实验力学, 1987, 2(1): 68-73.
Yin Xiezheng, Yao Jiucheng. A spark discharge method for measuring flow velocity and moving shock Mach number in low density flow field [J]. Journal of Experimental Mechanics, 1987, 2(1): 68-73.
- [11] Sanderson S R, Sturtevant B. Transient heat flux measurement using a surface junction thermocouple[J]. The review of scientific instruments, 2002.
- [12] 王世芬. 一种用于热流脉动测量的宽频带热电模拟网络[J]. 气动实验与测量控制, 1990, 4(2): 58-65.
Wang Shifen. A wide-bandwidth analogue circuits heat transfer fluctuation measurements [J]. Aerodynamic Experiment and Measurement & Control, 1990, 4(2): 58-65.

作者简介:



张仕忠 (1983-), 男, 湖北随州人, 工程师。研究方向: 激波管和激波风洞实验测量。通信地址: 北京市北四环西路 15 号中科院力学所高温空气动力学国家重点实验室 (100190)。E-mail: zhangshizhong191@163.com

(编辑: 张巧芸)