

非定常流测量用 薄膜热电阻温度探针的性能研究

北京航空航天大学 彭建* 蒋浩康

【摘要】 设计了一种铂薄膜热电阻温度探针。稳态试验结果, 该探针线性度偏差低于 0.5%。用激波管和高频射流检查了温度探针的频率响应, 能达到约 6.0 kHz。经试验和传热学分析结果, 影响传感器热响应的最大因素是基底的热物性和尺寸。用该探针成功地测出了一台跨音速单级轴流压气机的旋转失速信号。实践表明, 薄膜热电阻温度探针以其高频响、良好的线性度、高灵敏度和简单实用, 在非定常流温度测量中有良好的应用前景。

关键词: 非定常流 薄膜热阻 温度测量 应用研究

1 前言

压气机内气流的动态压力、速度分布已有了不少研究, 而动态温度的分布, 受到敏感元件发展的限制, 研究工作进展缓慢。压气机的气流脉动温度测量的难度, 与传感器的工作条件和要求有关。突出的一点是频响要求高, 压气机的气流温度脉动频率, 从喘振和失速的几 Hz ~ 几百 Hz 到叶片频率的几 kHz ~ 十几 kHz; 其次, 温度脉动幅值比较小, 几度甚至只有零点几度, 这就要求传感器有高的测量精度; 此外, 气流速度高。显然, 一些常规的方法 (如细丝电偶法, 光学和声学方法, 软件和硬件温度补偿法) 均不能满足要求。70 年代末以来, 国外在气流脉动温度测量方面已经取得了显著的进展, 尤其文献 [1] 反应的另一种现代测温趋势, 即利用先进的薄膜工艺, 与简便而又精确的测试设备相结合, 有更实用的前景。

薄膜热电阻温度传感器其感温膜材料一般为纯铂金, 它具有化学稳定性好, 电阻温度系数高 ($\alpha \approx 3.3 \times 10^{-3}/^\circ\text{C}$) 的优点, 在 500 $^\circ\text{C}$ 以下有很好的线性度。利用薄膜溅射工艺可生产出感温膜极薄的微型传感器, 一般膜厚为几十 $\text{\AA}$ ~ 几千 $\text{\AA}$, 热容量极小, 所以热响应快。有文献表明, 靠溅射技术形成的薄膜, 能承受最大加速度达 $20g$, 频率为 10 kHz 的振动, 并能承受高速气流冲刷。此外, 易批量生产, 价格较同类测量元件低。国内有关薄膜热电阻的报导, 仅限于工艺探索, 非定常流的温度测量技术尚未起步。作者在薄膜热电阻的测温应用方面做了一些探索, 目的在于推进这项技术, 以期在非定常流测量中得到应用。

2 薄膜热电阻探针及测量电路设计

设计的探针结构见图 1。薄膜热电阻溅射于玻璃棒体 (如同文献 [1~4]), 玻璃棒与探针衬套间用硅胶绝缘和灌封。薄膜热电阻温度探针应用于测高频温度, 二次仪表至关重要。它应设计有较小的非线性, 并配用频响较高的放大器, 测量线路要简单, 易实现。为此选用不

本文于 1991 年 10 月收到。 * * 北京航空航天大学 404 教研室 100083

平衡电桥作为输入回路，它与平衡电桥相比，具有响应快的特点。薄膜电阻 R_t 与 t 的关系式为：

$$R_t = R_0(1 + \alpha t + \beta^2)$$
 (1)

经推导，不平衡电桥输出为：

$$E_{out} = V_E(R_2/R_3)\alpha$$
 (2)

选择比较大的 R_3/R_2 或 R_4/R_0 ，可降低非线性，(2) 式是一线性方程。利用 (2) 式可求出相应的电阻，用以构成桥路。但这个桥路存在导线联接电阻，易产生较大偏差。为解决这个问题，利用三端导线测量技术，使导线电阻互相抵消，减小测量误差。此外，不同的传感器的电阻不同，为使桥路具有通用性，在每个桥臂上加一个可调电位器，使电桥适应不同的传感器。

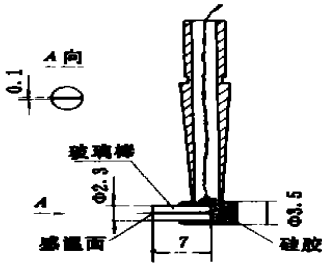


图 1 探针头部结构

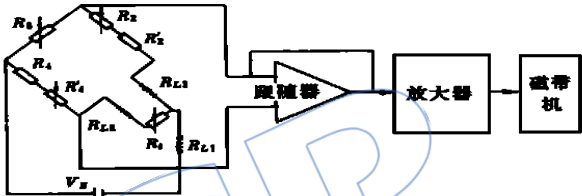


图 2 测量系统

放大器采用高性能型的美国 PRESTON 公司的 8300AU 型，频宽为 100kHz。放大器与电桥之间用一级跟随器 $\mu A 741$ 隔离，以便两者间有良好的阻抗匹配，见图 2。

3 探针的性能试验

3. 1 线性度和稳定性

感温膜电阻 R_t-t 关系的检验是在水槽中进行的。从图 3 可见， R_t 与 t 之间十分接近线性关系。为观察热电阻承受热冲击的能力及稳定性，曾在冰、室温水、沸水中反复做过多次试验，重复性良好。应该指出，这里仅反映了传感器短期内的稳定性，通过试验发现长期稳定性的优劣与感温膜工艺质量有关。

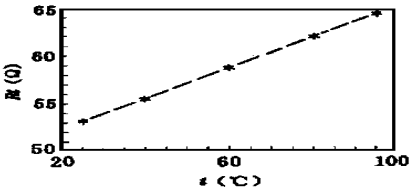


图 3 R_t-t 关系

3. 2 流速对薄膜探针电阻值的影响

为摸清薄膜电阻与被测气流速度的关系，将探针置于可变温度的低速风洞喷管出口处，在加温和不加温两种状态下进行了实验。从表 1 可见，在

表 1 $V \sim R_t$ 关系 (V—速度；t—温度； R_t —电阻)

不加温					加 温							
V (m/s)	37.8	37.9	22.1	22.1	39.6	36.4	34.8	31.6	28.3	25.0	18.5	11.8
t ()	24.0	24.5	24.6	24.9	53.0	54.6	55.8	57.3	58	59.4	64	67
R_t (Ω)	57.20	57.30	57.32	57.39	63.44	63.83	64.18	64.61	65.20	65.97	67.51	69.56

低速时流速大小对薄膜电阻值的影响不大,电阻值的变化受温度的影响显著,这正是我们所希望的。从表中也可见,电阻分辨率最高可达 0.02Ω ,说明灵敏度较高。

3.3 探针热响应试验

传感器的热响应特性决定着测量动态温度的能力及准确性。温度传感器的热响应受到传感器的温度敏感元件和被测介质之间传热控制。影响传感器的频响的因素,除气体流态外,主要是传感器元件本身的物性参数和尺度。研究温度传感器动态特性。新的方法有脉冲试验和环路电流阶跃响应试验(LCSR)^[5,6]。这些方法远离使用条件,不能全面反映传感器的响应特性。作者利用激波管与高频射流校验系统相配合和印证,对自制的薄膜热电阻温度探针进行了频响检测。

3.3.1 激波管检测

利用激波达低压室右端壁后形成的阶跃温度平台(其上升沿一般约为 $10^{-7}\mu s$,温度平台持续时间为几毫秒),利用温度平台特性,将温度探针放置于低压室右端,可用以检查探针的频响,图4是试验结果之一。结果表明,探针的热

响应上升沿时间是 $30\mu s \sim 35\mu s$,温度上升后维持约 $5ms$ 的爬升过程。频响试验还表明:基底棒长的探针热响应低于棒短的。涂硅胶于感应膜表面,虽能起到保护膜的作用,但将牺牲频响。

3.3.2 高频射流校验

为模拟薄膜热电阻温度探针在高速非定常流下的工作情况,自制了一套试验设备,见图5。空压机提供 $4bar$ 压力的气源,经加热后的气体通过口径为 $\Phi 2$ 或平行于膜片的平口槽的收敛喷嘴形成约 70 的音速射流。多孔或多槽转盘的转速为 $6000r/min$ 。轮盘以不同半径处的不同的开孔数或开槽数改变射流频率。

图6是取自对不同射流频率下探针的时域信号采样分析的结果,分别是在射流频率 $128Hz$ 、 $2.4kHz$ 和 $6.4kHz$ 下的波形。由图可见,在低频时温度幅值大,高频时脉动幅值较小,在一周只有局部数孔射流的情况下,波形伴有爬升现象。可见,高频射流频响校验系统虽然简单,却同样能达到检查频响的目的。

3.4 频响校验结果分析

从图4和图6可见,随着时间增加,平均温度在逐步上升。图4中的上升前沿 $30\mu s$ 和图6中的高频脉动频率真实反映了薄膜热电阻温度传感器中铂薄膜对温度变化的热响应,而爬

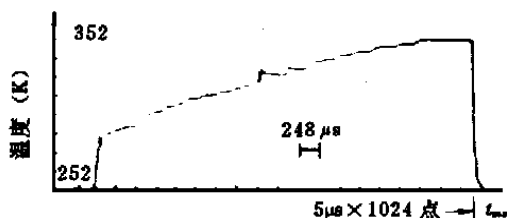


图4 用激波管标定的结果

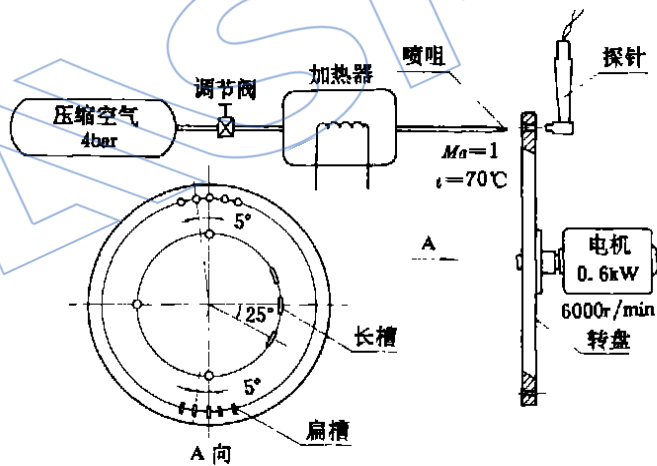


图5 高频射流频响校验系统

升过程实质上反映的是基底玻璃棒与感温膜间的热交换过程。这种现象可通过传热分析认识。

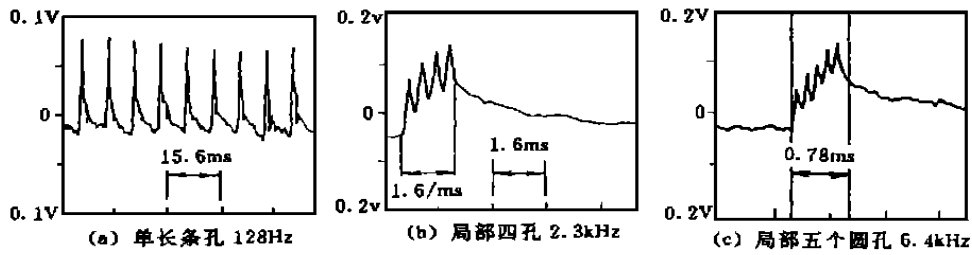


图 6 时域波形

分析模型见图 7a。当气流温度变化时，传感器感温膜与气体间有对流换热，基底与感温膜间则有热传导。对流换热可用集总参数法分析（取感温膜厚度 $\delta=1\mu\text{m}$ ），其计算公式为：

$$\tau = \rho_1 c_{p1} \delta / h_c \quad (3)$$

式中， ρ_1 、 c_{p1} 、 δ 分别是传感器感温膜的密度、比热和厚度。 h_c 是对流换热系数。为使感温膜时间常数小，膜厚应薄。结果见表 2。从表 2 可见，对于厚度为 μm 级的铂薄膜，时间常数很小，达 μs 级。

热传导的表现形式是，热流通过感温膜向基底渗透。渗透的速率和传热量可由基底瞬时表面温度变化来反映。分析热流通过薄膜后，在基底表面建立起来的温度的快慢，可以反映基底对感温膜热响的影响程度。文献 [7] 中给出了基底表面温度 T_1 与基底和感温膜物性的关系，分析模型见图 7b。

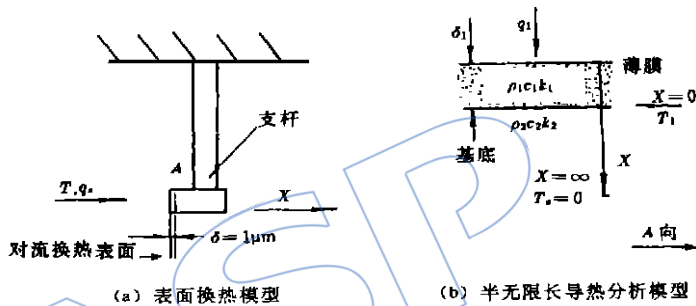


图 7 传热分析模型

表 2 薄膜热电阻时间常数 ($\delta=1\mu\text{m}$)

流 态	工作方式	换热系数 ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$)	时间常数 (μs)
层流 $Re \ll 2300$	管内平行流	$h_c \leq 5.25 \times 10^5$	≥ 5.7
紊流 $Re > 2300$	管内平行流	$h_c > 5.25 \times 10^5$	< 6.6

$$T_1(t) = 2q_s \cdot t / \pi \rho_2 c_{p2} k_2 - q_s \delta_1 / k_1 (\rho_1 c_{p1} k_1 / \rho_2 c_{p2} k_2 - 1) \quad (4)$$

式中， q_s 是感温膜与基底间的热流量。 t 是时间。 ρ_2 、 c_{p2} 、 k_2 分别是膜片和基底的密度、比热、导热系数。

图 8 中给出了在 $q_s = 100\text{w}/\text{m}^2$ 时，不同材料的基底和膜厚对基底表面温度 T_1 的影响。从图和 (4) 式可见，选择较低的密度、比热和导热系数的基底，可增大 T_1 的变化率，减小对感温膜热响应的影响。减

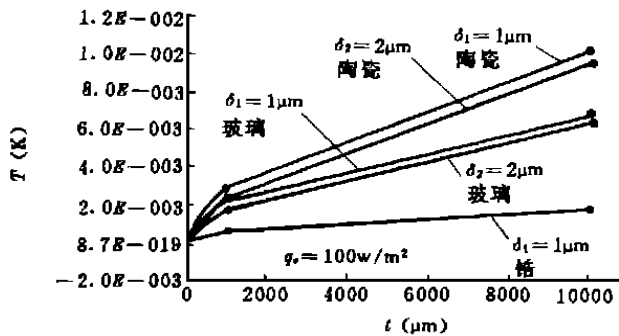


图 8 基底物性及膜厚对 T_1 的影响

小膜片的厚度也直接影响着 T_1 温度的变化率, 前者的影响更大一些。

一般基底端面积较膜片面积大 (作者用的传感器膜片面积是基底端面积的 5%), 感温膜与基底间并非简单一维传热。基底相对于膜片的面积比, 就影响着传感器的热响应。面积比大, 相当于基底在一维导热意义的比热容大, 基底对膜片的导热增加, 于是膜片的换热时间长。因此, 基底的多余断面应尽可能减小, 将传感器做成尖臂形更为合理。

4 膜热电阻温度探针的初步应用

作者将薄膜热电阻温度探针试用于 J69-T41A 轴流压气机试验, 用以判别失速, 取得了令人鼓舞的效果。前人曾用脉动压力探针检测过失速, 该压气机在未经机匣处理时, 旋转失速起始于叶尖^[8]。将温度探针安装在动叶后距叶尖部约 20% 叶高处, 试验分别是在 9600r/min, 13000r/min, 17600r/min 三个转速下进行的。图 9 给出了 17600r/min 下压气机失速前和失速后的温度波形。经分析, 失速频率为 56Hz。测量结果表明, 本温度探针不仅能象高频压力传感器那样监视失速, 还能测出失速区和非失速区的温度场。失速区温度高, 说明单位气流量接受的加功量比非失速区的大。高频温度探针能从反映能量分布的角度反映非定常流动特性。

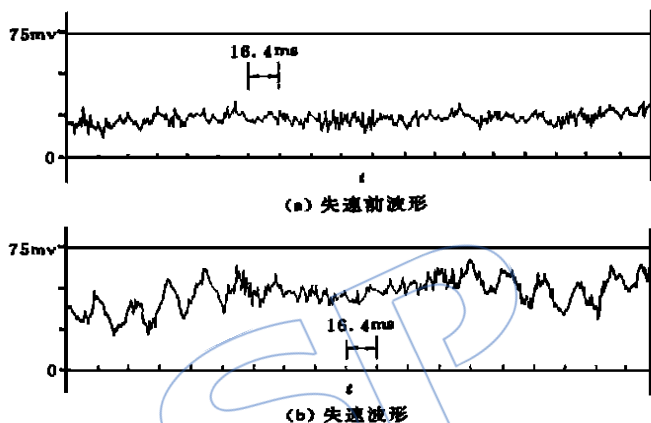


图 9 旋转失速前后的温度波形

的温度场。失速区温度高, 说明单位气流量接受的加功量比非失速区的大。高频温度探针能从反映能量分布的角度反映非定常流动特性。

5 结 论

(1) 微型薄膜热电阻温度探针, 确具有比传统的热电偶高得多的热响应, 并有灵敏度高、线性度好、易微型化、使用方便等优点。(2) 激波检测和变频射流检验互相印证, 可有效的检查温度探针的频响。(3) 试验和分析表明, 提高薄膜热电阻温度探针的频响和稳定性的主要方向是: 选绝热性好的、尺寸更小的陶瓷类基底, 感温膜厚度则要薄而均匀。(4) 压气机旋转失速试验表明, 薄膜热电阻温度探针有良好的测量非定常流高频温度的前景。

致谢 本研究所用薄膜电阻传感器是中国科学院第八研究室制作的。在此谨表谢意!

参 考 文 献

- 1 Nieuwvelt C, Bessem J M, Trines G R M. A Rapid Thermometer for Measurement in Turbulent Flow. Int. J. Heat Mass Transfer. 1976, 19: 975-980
- 2 Boker B F T, Sidles P H. Thin Film Platinum Resistance Thermometers: Fabrication and Use., J. Vac. Sci. Technol, 1977, 14 (1)
- 3 周鸿仁, 刘秀荣等. 微型薄膜铂温度传感器. 见: 中国电子学会电子学会敏感元件推广应用专题学术交流会论文集, 1983
- 4 Harald J, David Molnar W. Precious Metal Resistors- Precise Temperature Sensors., IEEE Ins. and Measu. 1989, CH2708-8
- 5 Kerlin T W, Hashemian H M. New Methods for Response Time Qualification Temperature Sensors. in. Sensor and Systems., 1982
- 6 Burgess J R, Yust M, Kreider K G. Transient Thermal Response of Plasma-Sprayed Zirconia Measured with Thin Film Thermocouples. in. Sensors and Actuators., A. 24, 1990
- 7 Schultz D L, Jones T V. Heat Transfer Measurements in Short-Duration Hypersonic Facilities. AGARD- AG- 165, 1973
- 8 庄平. 轴流压气机扩大稳定工况裕度的试验研究: [硕士论文]. 北京: 北京航空航天大学, 1984

A PLATINUM- FILM RESISTANCE TEMPERATURE PROBE FOR UNSTEADY FLOW MEASUREMENTS

Peng Jian, Jiang Haokang

(Beijing University of Aeronautics and Astronautics)

ABSTRACT

A platinum-film resistance temperature probe has been designed. Steady tests show that the linearity error of the probe is less than 0.5%. The thermal response of the probe has been checked by both shock tube and high frequency hot jet. It is shown that the frequency response of 6 kHz can be expected. According to heat transfer analysis, the thermal properties and the size of the base bar are the main factors of the effect on thermal response of the probe. The probe has been successfully used for measuring rotating stall signals of a single stage transonic compressor. The study shows that the film resistance temperature probe features high frequency response, fine linearity, high sensitivity and ease to use, so it has a bright prospect in application to unsteady flow measurements.

A PARALLEL MULTI-CHANNEL HIGH-SPEED DATA ACQUISITION SYSTEM BHD-200- FOR DYNAMIC MEASUREMENT IN TURBOMACHINE

Xiong Zhang, Liu Xudong, Chen Wangmei, Jiang Haokang

(Beijing University of Aeronautics and Astronautics)

ABSTRACT

A parallel multi-channel high-speed data acquisition system has been designed for dynamic flow measurement in turbomachine. With the swallowing and spitting capacity of 800 kc/s in all, the system can parallelly sample and process 16-channel signals. The structure, principles of operation, function and operation of the system are described in detail and two typical application examples are given.

EXPERIMENTAL RESEARCH ON CONDITION MONITORING AND FAULT DIAGNOSIS

Yang Leping, Chen Qizhi, Wang Kechang

(National University of Defense Technology)

ABSTRACT

A micro-computer system is introduced for condition monitoring and fault diagnosis in the ground testing of a throttling liquid rocket engine. The system presented is capable of monitoring all conditions of the static and dynamic performance parameters of the tested engine under each condition. According to the original data and curves provided by the monitoring system, it is possible to realize fault diagnosis for the throttling liquid rocket engine system in ground testing. The corresponding testing data and curves are presented in this paper.

THE MECHANISM OF LIQUID-COOLING OF VANE IN HIGH-TEMPERATURE TURBINE

Liu Dezhang, Liu Minhou, Wu Weidong

(Nanjing Aeronautical Institute)

ABSTRACT

In this research kerosene is used as coolant instead of water in the respect of identical and distinct properties. The heat transfer coefficient along full flow path