

带热敏电阻的气动探针

西北工业大学 唐狄毅 朱杜国 徐国明 许都纯

摘 要

本文研究了使用热敏电阻测量气流温度时所遇到的各种技术问题,并探讨了扩大测温范围的技术途径。其中,主要是筛选热敏元件,控制自热效应,精心设计测量电桥,设法提高高温区的灵敏度和精度等。根据本文原理,研制了一种小型五孔复合探针,并在压气机单级试验器上进行实测,以验证其功能和各项性能指标。

轴流压气机流场复杂,内部充满各种涡系。要实现级间气流的总静压,总静温,方向和速度的同点三元测量,传统的总压-热偶复合探针满足不了上述测量要求。因此,面临着寻求新的感温元件以及发展小型化五孔复合探针的研究任务。

热敏电阻早在30年代末就用于补偿温度变化引起的通讯线路电阻的变化。长期以来,由于未能决稳定性问题,故未得到重要应用。近几年来改进工艺,在热敏电阻中渗入各种化学元素,使其稳定性大大提高。测温的长期重复性达到 0.005°C 。已广泛用于宇宙飞船、医疗仪器以及家用电器的自动控制和测温上。

目前国内对热敏电阻的研究进展较快,国产玻璃嵌装式的热敏电阻珠可做到小于 0.4mm ,重复性小于 0.05°C ,年漂移率小于 0.1% ,已可用于高精度的温度测量。

热敏电阻用作气动探针的感温元件,必须解决恢复系数的校检、温度与压力测量的复合、热敏电阻的标定与信号转换以及测温范围的扩大等问题。基于本文原理研制的带热敏电阻的气动复合探针(图1),由于尺寸小,可用以压气机级间流场的测量。测温范围为 $0\sim 200^{\circ}\text{C}$,比国外热敏元件的测温范围扩大了1倍多。在实验室条件下的测温误差小于 0.25°C 。能够满足压气机试验对测温指标的要求。

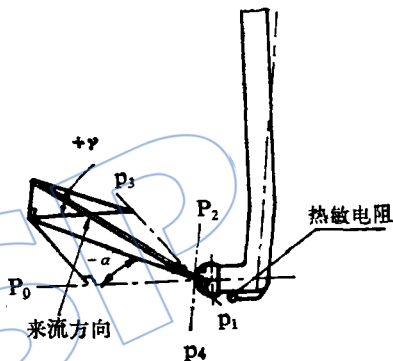


图1 气动复合探针

一、热敏电阻温度标定及信号转换

热敏电阻是利用其阻值随温度而变的关系来测温的。一般选用负温度系数的热敏电阻(NTC),其阻值与温度之间呈非线性的关系。

$$R = R_0 e^{-B \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)} \quad (1)$$

式中 R 和 R_0 是温度分别为 T 与 T_0 时的电阻, B 为热敏电阻的材料常数。

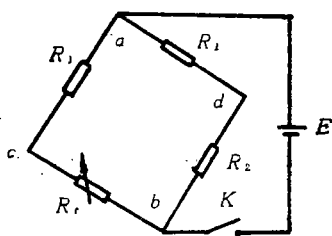


图 1 不平衡电桥

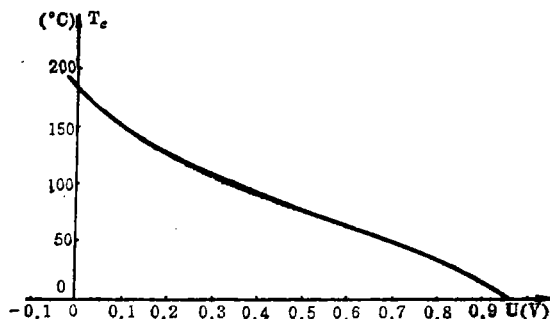


图 3 热敏电阻的温度定标曲线

R_0 和 B 值是随热敏电阻而异。因此，每一个热敏电阻都需单独标定。定标试验在水槽和油槽内进行。水槽的温度使用范围为 $10\sim 95^\circ\text{C}$ ，油槽的温度范围为 $90\sim 300^\circ\text{C}$ ，槽中实际温度用高精度铂电阻温度计测量，其测量误差为 0.001°C 。油槽温度不均匀度小于 0.02°C 。

热敏电阻的阻值变化通过一个不平衡电桥（图 2）转换成电压信号，经过标定就得出温度-电压特性。如图 3 所示，温度愈高，热敏电阻值愈小，电桥输出的不平衡电压也愈小。

二、恢复系数的定义及校验

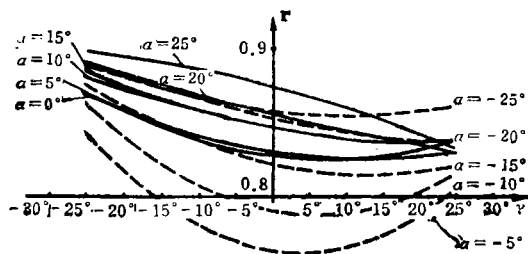
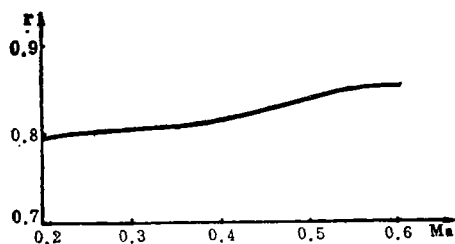
如图 1 所示，热敏电阻由于受气流的滞止及热交换的双重影响，在热平衡下其自身温度 T_0 低于总温 T_t ，高于静温 T_s 。为了测量气流的总温和静温，需要定义一个温度恢复系数：

$$r = \frac{T_e - T_s}{T_t - T_s} = \frac{T_e/T_t \cdot \left(1 + \frac{k-1}{2} Ma^2\right) - 1}{\frac{k-1}{2} Ma^2} \quad (2)$$

显然，温度比 T_e/T_t 取决于热交换条件，所以

$$r = f(Ma, \alpha, \gamma, Nu) \quad (3)$$

当工质为空气以及 Re 数大于 10^5 时，可以不考虑努赛尔数的影响，恢复系数主要与 Ma 数及方向角 α 和 γ 有关，并需要在风洞内校验。校验时气流总温由插入稳压箱中的 0.05°C 刻度的水银温度计读得。静温根据公式 $T_s = T_t / \left(1 + \frac{k-1}{2} Ma^2\right)$ 计算。而热敏电阻温度 T_e 根据电桥的不平衡电压，从图 3 上的定标曲线查得。校验在不同 Ma 数下， α 角和 γ 角在 $\pm 30^\circ$ 范围内每隔 5° 进行。图 4 为 $Ma = 0.2$ 时的恢复系数曲线。图 5 表示 Ma 数对 r 的影响。

图 4 恢复系数校正曲线 ($Ma = 0.2$)图 5 Ma 数对恢复系数的影响 ($\alpha = 0, \gamma = 0$)

三、温度与压力测量的复合

测量气体温度时热敏电阻不能单独使用。因为,由式(2)可知,校验时计算恢复系数需知 Ma 数。测量时计算总、静温也需知道 Ma 数。所以气流的温度测量必须与压力测量有机结合在一起,结构上做成三孔复合或五孔复合(见图1)。反之亦然,因为气流速度 $C = Ma \sqrt{KRT_s}$ 。温度与压力测量的复合,要求探针小型化,使压力和温度的读数尽量是在“同点”上测得。

四、测温范围的扩大

由于热敏电阻具有非线性的温-阻关系,限制了NTC热敏电阻的测温范围(限为 100°C 以下)。为了能用于全台压气机或发动机试验台上测温,本研究将测温范围扩大为 $0\sim 200^\circ\text{C}$ 。其难点是: 0°C 与 200°C 的阻值比大, $R_0/R_{200} = 140.5$;高温时灵敏度低, $(\Delta R/\Delta T)_0/(\Delta R/\Delta T)_{200} = 254$ (见表1)。阻值和灵敏度如此大的差异,给电桥设计带来了复杂性。为了提高测量精度和灵敏度,必须精心设计电桥。

表1 某热敏电阻的温-阻特性

T ($^\circ\text{C}$)	0	7.55	21	25.60	30.50	40.32	50.27	60.38
R ($k\Omega$)	60	48	23.5	20.0	16.3	11.7	8.56	6.42
T ($^\circ\text{C}$)	70.45	83.82	94.62	107.72	126.56	136.06	145.60	155.20
R ($k\Omega$)	5.0	3.56	2.80	2.12	1.47	1.236	1.046	0.89
T ($^\circ\text{C}$)	165.0	174.65	184.36	194.2	204			
R ($k\Omega$)	0.761	0.655	0.566	0.49	0.427			

1. 热敏电阻自热效应的控制

由于热敏电阻阻值变化很大,电桥电流变化也会很大。如果流过热敏电阻的电流稍有增加,使热敏电阻消耗功率过大,就会产生自热现象,从而增加测温误差。因为必须控制流过热敏电阻的电流,限制其实耗功率 $P_{t, \max}$ 。

2. 电桥电源要选择适当。电源应具有高的精度和热稳定性;另外电源电压 E 的大小应选得合适,以提高电桥输出的灵敏度及减小自热效应。

3. 电桥电阻 R_1 要配置适当。

(1) 电阻 R_1 应足够大以控制自热现象,即

$$R_1 \geq E^2/4P_{t, \max} \quad (4)$$

(2) R_1 应与热敏电阻 R_t 匹配,以满足读数灵敏度与电源电压稳定性这两方面的要求。

(a) 从灵敏度考虑, R_1 大则灵敏度差,因为

$$\frac{dU_t}{dR_t} = \frac{-E/R_1}{(1 + R_t/R_1)^2} \quad (5)$$

(b) 从电源电压稳定性来选择, R_1 应大于某一个能使电源电压稳定的值。例如

R_1 ($k\Omega$)	≥ 2	1.8	1.6	1.5	1.4	1.3	1.2	1.1
U (V)	1.2625	1.2625	1.2624	1.2624	1.2622	1.2621	1.2620	1.2610

则应选用 $R_1 > 1.5k\Omega$ 。

五、误差分析

由于温度-压力的复合, 在温度测量误差中包含了该探针可能引入的各种误差。故下面以温度 T_s 为例, 作一误差分析。温度测量误差计有: ① T_e 静校时引入的误差; ②恢复系数校准时引入的误差; ③ Ma 数的测量误差。

$$\text{由于} \quad T_s = T_e / \left(1 + \frac{k-1}{2} r M_a^2 \right) \quad (6)$$

$$\frac{dT_s}{T_s} = \frac{dT_e}{T_e} - A \frac{dr}{r} - 2A \frac{dM_a}{M_a} \quad (7)$$

$$\text{由式 (2) 求得} \quad \frac{dr}{r} = \frac{dT_e}{T_e} + \frac{dT_t}{T_t} + B \frac{dM_a}{M_a} \quad (8)$$

根据 Ma 数与压力比 P_t/P_s 的关系又可求得

$$\frac{dMa}{Ma} = C \left[\frac{dP_t}{P P_t} - \frac{dP_s}{P_s} \right] \quad (9)$$

$$\text{常数} \quad A = \frac{(k-1)rMa^2}{2 + (k-1)rMa^2}, \quad B = \frac{2(k-1)Ma^2}{2 + (k-1)Ma^2}, \quad C = \frac{k-1}{2k[1 - (P_s/P_t)^{\frac{k-1}{k}}]}。$$

由式(7)、(8)和(9)得偶然误差的传递公式为:

$$\frac{dT_s}{T_s} = \sqrt{\left(\frac{dT_e}{T_e} \right)^2 + A^2 \left(\frac{dr}{r} \right)^2 + 4A^2 \left(\frac{dMa}{Ma} \right)^2} \quad (10)$$

$$\frac{dr}{r} = \sqrt{\left(\frac{dT_e}{T_e} \right)^2 + \left(\frac{dT_t}{T_t} \right)^2 + B^2 \left(\frac{dMa}{Ma} \right)^2} \quad (11)$$

$$\frac{dMa}{Ma} = C \sqrt{\left(\frac{dP_t}{P P_t} \right)^2 + \left(\frac{dP_s}{P_s} \right)^2} \quad (12)$$

风洞中校验时, 总静压读数误差主要由大气压力计引入, 估计为 $\delta p = 7 \text{ mmHg}$, 总温读数误差为 0.05°C 。

热敏电阻温度 T_e 的静校误差可以通过一个简单实验加以确定。即反复把热敏电阻置入槽中多次, 恒温后记录电桥输出和铂电阻温度计的电阻值。表2示出两者的温度读数, 其误差小于 0.15°C 。这个误差包括槽内温度不均匀性误差、曲线拟合及定标曲线的插值误差和读数误差。

表2 热敏电阻自身温度误差

次 数	1	2	3	4	5
$T_{NTC}(^\circ\text{C})$	40.699	40.627	40.604	40.748	40.753
$T_M(^\circ\text{C})$	40.781	40.762	40.745	40.848	40.858
$\Delta T(^\circ\text{C})$	0.082	0.135	0.141	0.100	0.105
$\Delta T/T(\%)$	0.201	0.332	0.347	0.245	0.257

考虑其他无法分析的偶然因素, 将实验室条件下的测温误差定为 0.25°C 是可信的。

六、单级压气机试验

为了验证气动复合探针的功能及各项性能指标,将带热敏元件的五孔复合探针安装在压气机单级试验器上,在规定转速下测取周向一个栅距的扇形流场,取63个点的平均值作为截面的平均参数,与扭矩法进行比较。当换算转速为8130r/min时,在5个工况上的数据如表3所示。比较两者的温度,偏差小于0.25℃。应该指出,由扭矩值折算到温差,精度较差。这里不是将其作为标准,而是要说明参数平均的技术是可行的。

表3 热敏电阻测温与扭矩法比较

	状 态 点	1	2	3	4	5
折合流量	$m_{cor}(kg/s)$	2.8474	2.9903	3.1813	3.4989	3.7052
进口总温	$T_1^*(K)$	281.28	280.74	282.75	280.22	280.31
扭 矩 法	$T_s^*(K)$	287.54	286.85	288.81	285.80	285.67
	$\Delta T^*(K)$	6.26	6.11	6.06	5.58	5.36
热 敏 电 阻	$T_s^*(K)$	287.30	286.90	288.91	285.97	285.57
	$\Delta T(K)$	6.02	6.16	6.16	5.75	5.26
比 较	$\delta\Delta T$	0.24	0.05	0.10	0.17	0.10

单级试验还给出了级后流场以及参数沿径向和周向的分布,充分验证了该探针的各项功能,这里就不介绍了。

七、简短结论

1. 目前国内已能提供体积小,稳定性好的热敏电阻。由于结构简单,灵敏度高,寿命长,不需要补偿导线和参考结点等优点,适于作压气机内气流温度的测量,特别适于级间测量。

2. 为了测量气流温度,定义了一个恢复系数 r ,它不同于热电偶的总温恢复系数。其值取决于 Ma 数与气流角度。应通过风洞校验确定。

3. 测量气流温度时,热敏电阻不能单独使用。必须与压力测针复合。将它作为五孔探针的感温元件,就能为压气机试验技术提供一个有效的三元测具。

4. 通过精心设计电桥和筛选热敏元件,可将测温范围扩大为0~200℃,比国外所用的12~70℃的范围增大了一倍多。

5. 根据误差分析,热敏电阻的测温误差约为0.25℃。在不均匀的流场中计及参数平均时引入的误差,热敏电阻的测温误差为0.3℃左右。

参 考 文 献

1. Keith E. Ewing, "Understanding NTC-thermistors", Proc. Int. Microelectronic Symp, 1980.
2. Brian code, "Long-Term Thermistor Stability at an Elevated Temperature", Development Engineer Yellow Springs Instrument Co., Inc.
3. "NTC Thermistors in Temperature Measurement", Tempcon Temperature Control and Measurement Exhibition of Conference. 1975/3/18-20, London.
4. "New Trends in Temperature Technology", Measurements and Control Systems, June, 1982.

(责任编辑 杨帆)

A PNEUMATIC PROBE WITH THERMISTER

Tang Diyi, Zhu Zhuguo, Xu Guomin, Xu Douchun

(Northwestern Polytechnical University)

Abstract

A tiny 5-hole compound probe with NTC-thermister has been developed by the authors for measurement of flow parameters in the compressor. All problems encountered for the thermister to be used in measuring the flow temperature are discussed. The techniques for enlarging the temperature range measured are also considered, such as how to sift out the best thermister, how to apply a highly precise and voltage-stabilizing supply to an unbalanced bridge for transmitting an accurate millivolt signal, and how to set a limit to the self-heating power of the thermister. As a result, the temperature range is extended from 273K to 473K. The probe was tested in a single-stage compressor rig, and its function and performance were verified favorably.

REDUCTION OF EJECTOR NOISE WITH MULTIHOLE NOZZLE

Fang Rensong and Zhang Rongxue

(Nanjing Aeronautics Institute)

Abstract

In order to reduce the noise, an ejector with multihole nozzle is proposed as the primary nozzle, and its design method is presented. For comparison of the aerodynamic performance and the noise characteristics with those of conventional one in subsonic and supersonic ejector systems, the sound power levels and the primary and secondary mass flow rates of the ejectors were measured, and the static thrusts of the ejectors were estimated, based on the measured mass flow rates. The shroud length of the ejector system tested was altered in the experiments so as to study the effect of this parameter on noise and thrust. The experimental results show that the multihole nozzle ejector system not only reduces noise considerably but also gains better aerodynamic performance due to a shorter shroud. The shorter the shroud, the more noise reduction and greater the static thrust increment can be achieved. For subsonic ejector, the noise reduction is about 14dB and the static thrust increment is about 30% when ratio of shroud length is 7.6. For supersonic ejector, those are about 22dB and 35% respectively when the shroud length ratio is 9.6.