

# 叶片式全压探针试验研究

孙积翊 刘占民

〔提要〕 本文对叶片式全压探针进行了专题研究。通过试验得到了从低速到高速多种工况下的性能曲线,对影响探针测量精度的因素进行了分析,对三种叶片式探针作了性能比较和讨论。这一研究成果已应用于七〇三研究所的压气机级间气动参数测量的科研工作中。实践证明叶片式探针不但可用,而且效果很好。

**主题词:** 探针的研究 压气机 气动测量

## 引 言

压力探针是用来测量气流中各点压强的一次元件。全压探针的设计原理是:在气流中顺流线方向放一个具有半球形头部的圆柱体,并且使头部朝向来流方向。当流体绕流圆柱体时,半球形头部顶点为驻点(或称临界点),气流在此点滞止,速度为零,因而其动压力为零。由柏努力方程

$$P_0 = P + \frac{1}{2} \rho V^2 \quad (1)$$

可知在驻点处测得的压力值即为所在流线的全压值。于是,在半球形头部顶点钻一小孔,就可测得来流之全压值。

轴流式压气机级间的流动特性对于压气机的性能关系重大。在级间测量中,由于轴向间隙窄小,难以放进一般常用探针。无法知道级间的流动情况。现将叶片式全压探针以级的一个静叶片的形式,应用于压气机级间测量,解决了多年想解决又未能解决的问题。本文对三种叶片式探针进行了试验和分析。这三种探针是:叶片式三套管全压探针(简称A型探针)、叶片式三单管全压探针(B型探针)、叶片式三球窝全压探针(C型探针)。此类多测头叶片式探针与梳状探针的主要差别在于后面的支撑体是叶片,不是对称体。由于支撑体不对称,使其气动特性出现了一些新的现象,本文也对此进行了分析研究。

本项研究原拟请外单位承担,费用需二万元。后来我们在本所的风洞上创造些条件,仅花了计划费用的20%(约四千元),就获得较理想的结果。

## 试验件及试验装置

### 1. 试验件

试验件为三支叶片式全压探针。

三支探针的相同点:它们的基本形状如图1。叶高为55毫米。弦长为38毫米,叶片沿叶

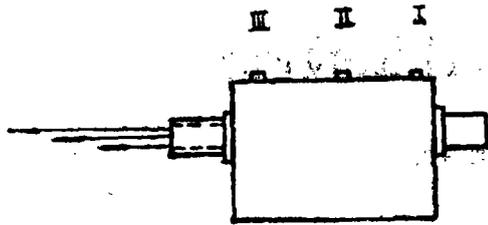


图 1 试验件测孔编号

高扭曲 $3^{\circ}40'$ 。测孔编号如图 1,依次为 I、II、III 孔。以 II 孔处叶型的零冲角为探针的零偏角。并以该处叶型的正冲角定为探针的正偏角,以其负冲角定为负偏角。

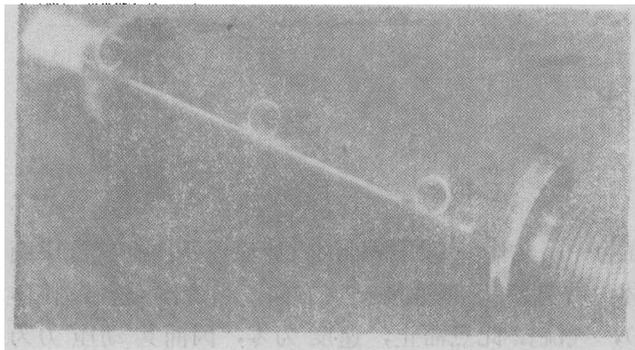
三支探针的不同点: A 型探针的测头形状为三个套管全压测头,位于叶片前缘附近,靠近内弧一侧(见图 2 之 a)。B 型探针的测头形状为三个单管全压测头,位于叶片前缘处(见图 2 之 b)。C 型探针的测头为三个球窝形全压测头,位于叶片前缘处(见图 2 之 c)。

## 2. 试验装置

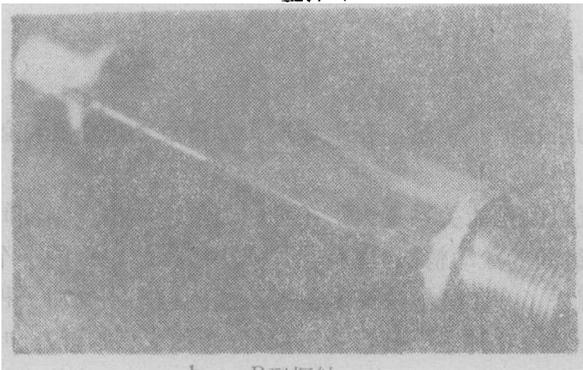
i) 本试验在探针校正风洞上进行。风洞工作段的直径为 150 毫米。在洞体的稳定段和工作段分别装有标准全压探针。

ii) 装夹: 用探针座标定位器、特制的上下导流夹具把被校探针装夹在风洞的框架上(见图 3)。转动探针座标定位器的角度以改变偏角  $\beta$ 。

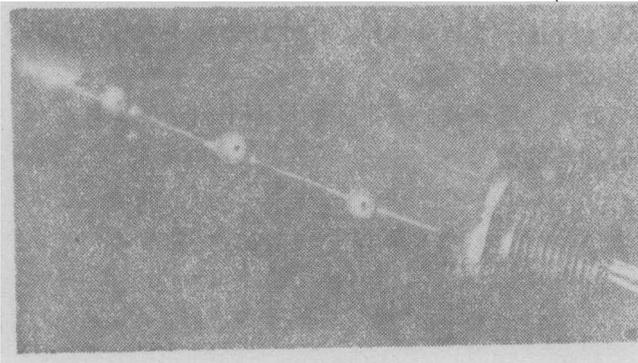
iii) 风源



a——A型探针



b——B型探针



c——C型探针

图 2 三种探针照片

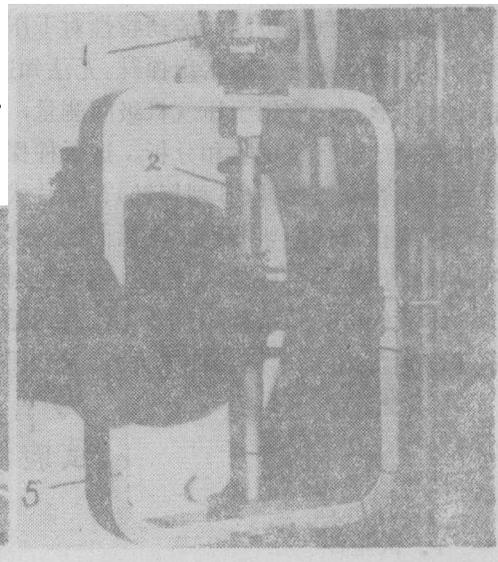


图 3 叶片探针装夹在校正风洞上

1. 探针座标定位器 2. 上夹具 3. 探针 4. 下夹具 5. 框架

作 $M < 0.25$ 的吹风试验时,用单级离心式鼓风机,其流量为 $17000 \text{米}^3/\text{时}$ ,全压为 $0.11$ 公斤/厘米<sup>2</sup>(表压),功率为 $125$ 千瓦。

作 $M \geq 0.25$ 的吹风试验时,用二级离心式鼓风机,其流量为 $42000 \text{米}^3/\text{时}$ ,全压为 $0.97$ 公斤/厘米<sup>2</sup>(表压),功率为 $1500$ 千瓦。

iv) 数据采集用压力巡回检测仪。

## 计 算 公 式

试验结果一般可用两种公式计算全压修正系数 $K$ 值。

### 1. 第一种计算公式

$$K = \frac{P_i^* - P_0}{\frac{1}{2} \rho V^2} = f(M, \beta, \alpha) \quad (2)$$

式中  $R_i^*$  —— 标准全压值,

$P_0$  —— 被校探针测得的全压值,

$\rho$  —— 气流密度,

$V$  —— 气流速度,

$\alpha$  —— 探针俯仰角,

$\beta$  —— 探针偏角,

并令  $P$  为静压, 在本试验中静压  $P$  等于大气压  $P_1$ 。

$\Delta H_0 = P_i^* - P_1$  为标准全压与大气压之差值。

$\Delta h_0 = P_0 - P_1$  为被校全压与大气压之差值。

于是可将公式变成

$$K = \frac{P_i^* - P_0}{\frac{1}{2} \rho V^2} = \frac{\Delta H_0 - \Delta h_0}{\Delta H_0} \quad (3)$$

如此, 只需在压力巡检仪上记下标准全压测量值  $\Delta H_0$  和被校全压测量值  $\Delta h_0$ , 代入公式即可。

### 2. 第二种计算公式

$$K = \frac{P_i^* - P_0}{P_i^*} = f(M, \beta, \alpha) \quad (4)$$

若用  $\Delta H_0$ 、 $\Delta h_0$ 、 $P_1$  等表示可写成

$$K = \frac{\Delta H_0 - \Delta h_0}{\Delta H_0 + P_1} \quad (5)$$

本试验选用第一种计算公式。

## 试 验 结 果

对A型探针作了六种速度, 即 $M = 0.21, 0.41, 0.49, 0.60, 0.67, 0.78$ 。每种速度下 $\beta$ 角从 $-40^\circ$ 至 $40^\circ$ , 中间每隔 $5^\circ$ 测一次。

对B型探針作了五种速度, 即 $M = 0.22, 0.41, 0.57, 0.74, 0.79$ 。每种速度下 $\beta$ 角从 $-15^\circ$ 至 $15^\circ$ , 中间每隔 $2.5^\circ$ 测一次。

对C型探針作了四种速度, 即 $M = 0.23, 0.41, 0.63, 0.79$ 。每种速度下 $\beta$ 角从 $-40^\circ$ 至 $40^\circ$ , 中间每隔 $2.5^\circ$ 测一次。

试验曲线见附录。

## 试验结果分析

### 1. 压缩性影响

当 $M \geq 0.3$ 以后, 气流的压缩性影响不能忽略。随着气流 $M$ 数的增大, 其影响越来越大。等熵流压比公式为

$$\frac{P_0}{P} = \left( 1 + \frac{k-1}{2} M^2 \right)^{\frac{k}{k-1}} \quad (6)$$

将(6)式作一简单变换, 得到

$$\frac{P_0 - P}{\frac{1}{2} \rho V^2} = \left[ \left( 1 + \frac{k-1}{2} M^2 \right)^{\frac{k}{k-1}} - 1 \right] \cdot \frac{2}{k M^2} \quad (7)$$

将 $\left( 1 + \frac{k-1}{2} M^2 \right)^{\frac{k}{k-1}}$ 展成级数, 则

$$\begin{aligned} \left( 1 + \frac{k-1}{2} M^2 \right)^{\frac{k}{k-1}} &= 1 + \frac{k}{2} M^2 + \frac{k}{8} M^4 \\ &+ \frac{k(2-k)}{48} M^6 + \dots \end{aligned} \quad (8)$$

将(8)式代入(7)式得

$$P_0 = P + \frac{1}{2} \rho V^2 \left( 1 + \frac{1}{4} M^2 + \frac{2-k}{24} M^2 + \dots \right) \quad (9)$$

若取符号 $\epsilon = \frac{1}{4} M^2 + \frac{2-k}{24} M^4 + \dots$

则(9)式可写成

$$P_0 = P + \frac{1}{2} \rho V^2 (1 + \epsilon) \quad (10)$$

在不可压流体中, 当 $\epsilon = 0$ 时, (10)式变成柏努力方程

$$P_0 = P + \frac{1}{2} \rho V^2 \quad (11)$$

当静压 $P$ 和速度 $V$ 一定时, 由于忽略流体的压缩性影响而引起的误差 $\epsilon$ , 可用表1或图4表示(当 $P = 760$ 毫米水银柱,  $T = 288^\circ K$ 时)。

表 1

M	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
e	0	0.0025	0.01	0.0225	0.04	0.062	0.09	0.128	0.173	0.219	0.275

上面的公式推导和图 4 从理论上说明了压缩性的影响。

在这三支探针的特性曲线中, 压缩性影响以 A 型探针最为明显。随着  $M$  数的增大, 亦即随着压缩性影响的增大, 探针的方向不敏感区域逐渐变小(见图 6)。

A 型探针 II 孔在不同  $M$  数下的方向不敏感范围( $K \leq 0.05$ )见表 2。

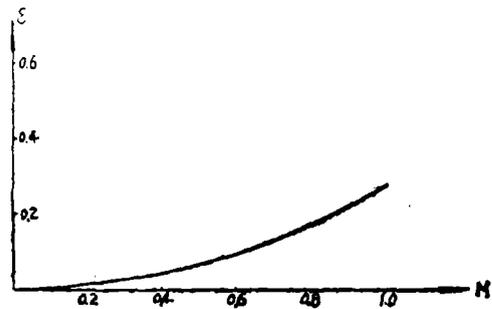


图 4 忽略压缩性对气流全压计算精确度的影响  
( $P = 760$  毫米水银柱,  $T = 288^\circ\text{K}$ )

表 2

M	始点和终点	范 围
0.2	$-26^\circ \sim 30^\circ$	$56^\circ$
0.4	$-21^\circ \sim 29^\circ$	$50^\circ$
0.5	$-21^\circ \sim 27.5$	$48.5^\circ$
0.6	$-16^\circ \sim 32^\circ$	$48^\circ$
0.7	$-17.5^\circ \sim 28^\circ$	$45.5^\circ$
0.8	$-11^\circ \sim 19^\circ$	$30^\circ$

## 2. 测头结构形状的影响

i) 全压探针的测头结构形状对于测值准确度、方向不敏感性关系较大。根据一般的单测头全压探针的校正规律, 以套管全压探针的稳定性最好, 在  $-40^\circ \sim -35^\circ \leq \beta \leq 35^\circ \sim 40^\circ$  时测量值准确。在此区域之外, 特性曲线向上翘曲, 且对称于纵轴。套管与内测管的相对位置对测值也有影响。在  $\lambda = 0.707 (M = 0.6741)$  时, 当套管与内测管的前端一齐时, 方向不敏感范围只有  $-10^\circ \leq \beta \leq 10^\circ$ ; 而内测管缩在套管里面的长度等于套管外径时, 不敏感范围扩大到  $-25^\circ \leq \beta \leq 25^\circ$ 。单管全压探针的稳定性也较好, 在  $-15^\circ \sim -10^\circ \leq \beta \leq 10^\circ \sim 15^\circ$  时, 测量值不变。与套管全压探针当比, 它的不敏感区域不及套管全压探针的一半, 但它受

到的压缩性影响不如套管全压探针那样大。在不同的M数下不敏感区域的边界几乎一样，当 $\beta \leq -15^\circ$ 或 $\beta \geq 15^\circ$ 时，虽然随着M数的增大曲线变陡，但比较靠近(参阅文献[1]、[2])。

ii) 本试验研究的三支探针的测头正是上述三种类型。由于后面支撑体的干扰，使不敏感区域缩小，但总的趋势是一样的。A型探针的方向不敏感区域最宽，为 $30^\circ \sim 56^\circ$ ；B型探针次之，在 $-9^\circ \leq \beta \leq 9^\circ$ 内变化时，测量值变化较小；C型探针性能较差，测量值变化较大。

3. 测头与后面支撑体的特征参数对方向不敏感性的影响。

i) 如图5所示：探针测头长 $a$ ，外径 $d$ ，间距 $s$ ，支撑体厚度 $D$ 。由这些特征量组成的特征参数 $s/d$ 、 $a/D$ 等对于探针测值准确度、方向不敏感性关系较大。

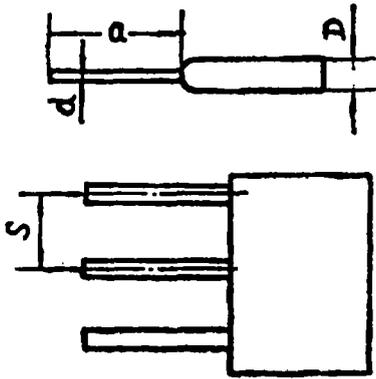


图5 探针测头与支撑体的相对位置  
a——探针测头长 d——探针测头外径 s——探针测头的间距 D——支撑体厚度

ii) 由文献[1]知，当全压修正系数 $K = 0.01$ (用第二种计算公式)时

$$\text{若 } \frac{a}{D} = 2.5, \text{ 则 } -20^\circ \sim -19^\circ \leq \beta \leq 19^\circ \sim 20^\circ,$$

$$\text{若 } \frac{a}{D} = 0.25, \text{ 则 } -15^\circ \sim -12^\circ \leq \beta \leq 12^\circ \sim 15^\circ.$$

当全压修正系数 $K \leq 0.01$ (用第二种计

算公式)，且已知 $\beta$ 与 $\frac{a}{D}$ ，则 $\frac{s}{d}$ 必满足

如下要求：

$$\text{若 } -10^\circ \leq \beta \leq 10^\circ, \frac{a}{D} \geq 0,$$

$$\text{则 } \frac{s}{d} \geq 1.0$$

$$\text{若 } -15^\circ \leq \beta \leq 15^\circ, \frac{a}{D} \geq 0.75,$$

$$\text{则 } \frac{s}{d} \geq 1.5$$

$$\text{若 } -20^\circ \leq \beta \leq 20^\circ, \frac{a}{D} \geq 2.0,$$

$$\text{则 } \frac{s}{d} \geq 1.0$$

变化趋势为：当 $\frac{a}{D}$ 和 $\frac{s}{d}$ 不变时，随着 $\beta$ 增大，全压修正系数 $K$ 增大；当 $\frac{a}{D}$ 和 $\beta$ 不变时，随着 $\frac{s}{d}$ 减小， $K$ 增大。

iii) 本试验研究的三支探针的特征参数见表3。

表3

	A	B	C
s	23	23	18
d	0.8	0.8	3
s/d	28.8	28.8	6
a	1	1.5	1
D	3	3	3
a/D	0.33	0.5	0.33

从表3可看出，三支探针的 $s/d$ 都较大，测头间的相互干扰可忽略。而 $a/D$ 都较小，测头受后部支撑体的干扰，使 $K$ 值变大。综合考虑这两个特征参数，以B型探针受到的干扰最小，C型探针受到的干扰最大。

#### 4. 叶片不对称的影响

i) 由于叶片不对称(分背弧和内弧),使探针的方向不敏感区域不以纵轴为对称轴,其中心点不在 $0^\circ$ ,而在某个 $+\beta$ 处。如在各种 $M$ 数下, A型探针的中心点在 $2^\circ\sim 5^\circ$ , B型探针在 $0^\circ\sim 3^\circ$ , C型探针在 $5^\circ\sim 10^\circ$ 。

ii) 特性曲线两侧不对称,  $+\beta$ 部份变化较平缓,  $-\beta$ 部份变化较剧烈。

iii) 由于A型探针的测孔偏向内弧一边,更加剧了叶片的不对称性的影响。

5. 考虑测头对叶片周围流场的影响,以B型探针的扰动为最小。

#### 6. 加工质量的影响

由于压气机叶片较薄,安装附体测头常会造成隆起及叶片损伤,因此加工质量对探针特性影响甚大。如C型探针的制造工艺不够精细,在内弧有一条小隆起,使特性曲线的 $+\beta$ 部份出现突台。又因III孔测头在背弧一侧有一个小豁口,使 $-\beta$ 部份的 $K$ 值偏小,且特性曲线平坦;在 $+\beta$ 部份 $K$ 值偏大,且特性曲线陡峭。

在上述分析中的3、4、5三项都是涉及测头与其支撑体的相互干扰问题。在亚音速流场中,一点处的扰动可传到整个流场。由于叶片前缘处装上测头,使其外形发生变化,改变了流线形状,改变了叶片背弧和内弧的压力分布,从而改变了叶片受力情况。若设法将测头作得小一些,可使这种扰动尽量减小。由于支撑体是较大的叶片,它不同于单测头探针的支撑体是一根细圆柱,也不同于梳状探针的支撑体是一薄板。叶片的扰动比前两种支撑体的扰动都大。它不但把其前缘处的气流推向两边。而且使其流线弯曲,给气流以一定的作用力。所以当气流流过叶片后,流场就不是直匀流,流谱发生剧烈变化。这些变化必然前传至测头,从而改变了测头处的气流方向及速度,影响了测量精度。但特性曲线表明:在实用的不敏感区域内,其误差可忽略不计。

## 结 论

i) 本文研究的三支探针以A型为最好,全压修正系数小,且方向不敏感范围宽(当 $K\leq 0.05$ 时,不敏感范围为 $30^\circ\sim 56^\circ$ ;当 $K\leq 0.01$ 时,不敏感范围为 $22^\circ\sim 45^\circ$ )。B型探针次之(当 $K\leq 0.05$ 时,不敏感范围为 $18^\circ$ 左右;当 $K\leq 0.01$ 时,不敏感范围为 $5^\circ\sim 8^\circ$ ),而且B型探针还有一个重要特点:尺寸小、构造简单、对流场扰动小、易于制造。C型探针不如A、B型。

ii) 试验结果表明,虽然叶片式全压探针的测头与支撑体间存在相互干扰,但其不敏感范围仍然较大,可以使用,特别是套管全压探针性能良好。因此叶片式全压探针可以作为用于压气机级间测量的一种新探针。一九八四年七〇三研究所作新型压气机试验时,已经应用了本文研究的成果,在压气机各级上都装有叶片式探针,使试验研究工作前进一步。

## 参 考 文 献

[1] А.Н.Петунин,«Приемники Для Измерения Давлений и скорости ВГазовых Потоках ЦАГИ,«Промышленная аэродинамика»Выпуск 19,Оборонгиз 1960

[2] 刘占民:《几种全压探针与速度探针试验研究》七〇三研究所,研790。

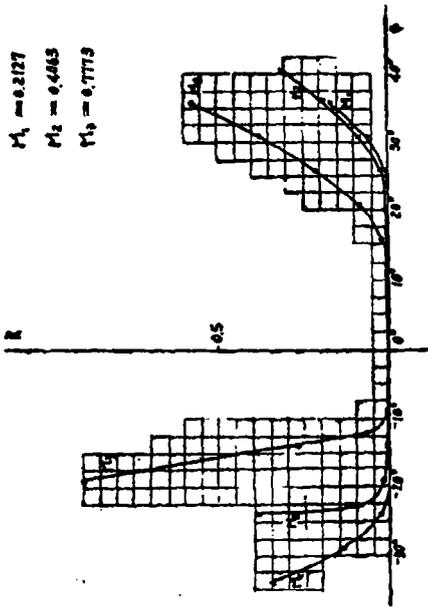


图 6 A型探针 II 孔 K 值随 M 数变化曲线

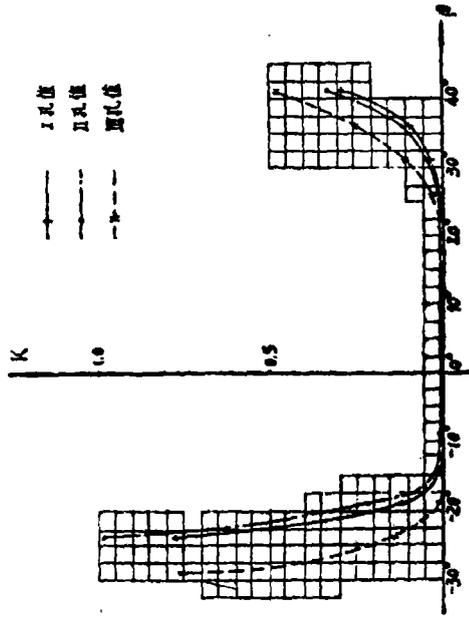


图 7 A型探针特性曲线(M=0.60)

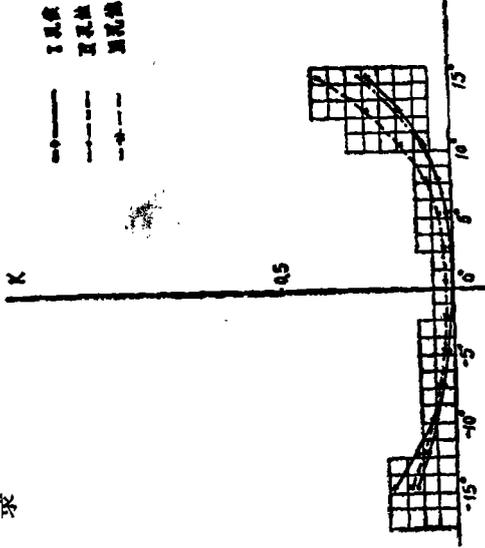


图 8 B型探针特性曲线(M=0.57)

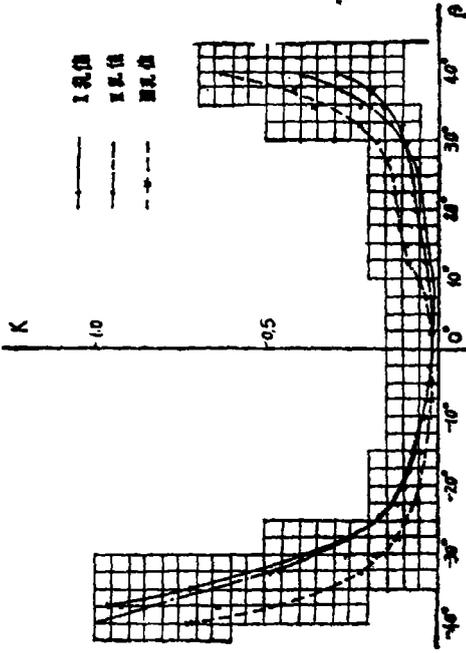


图 9 C型探针特性曲线(M=0.63)

# JOURNAL OF ENGINEERING FOR THERMAL ENERGY AND POWER

No.2 1986

## CONTENTS

### GAS TURBINE EXPERIMENTAL RESEARCH

1. An experimntal study of a blade-type total-pressure probe  
.....*Sun Jihu, Liu Zhanmin*( 1 )

#### Synopsis

A monographic study was carried out of a blade-type total-pressure probe. Through tests, characteristic curves under various regimes ranging from low velocities to high ones were obtained. Analysis was made of factors influencing probe measurement accuracy. Performance comparison of three kinds of blade-type probes was made and its result discussed. The study results have been used by the 703 Research Institue in its research work concerned with the measurement of compressor interstage aerodynamic parameters. Our practice has shown that blade-type probes are not only usable, but are highly effective.

2. Thermal stress measurements of flow deflectors in a power turbine exhaust duct.....*Zhu Zhuhong, Wang Shuxia*( 9 )

#### Synopsis

In an effort to solve the problem of warping, cracks and splintering being found on the flow deflector of a power turbine exhaust duct, several thermal stress measurements were made in the original and the improved version of the exhaust duct to obtain their respective stress and temperature distribution patterns under various operating conditions. The use of the welded half-bridge self-compensating high temperature strain gauges has provided a firm basis for ensuring a high efficiency and a long life feature for the power unit.

### MEASUREMENT AND TESTING TECHNIQUES

3. A study of bridge forms of double-element half-bridge resistance strain gauges  
.....*Lu Wenfa, Li Chunlan*(16)

#### Synopsis

This paper studies measuring circuits of double-element halfbridge self-compensaing resistance strain gauges and describes a four-line measuring circuit on the basis of the three-line connecting circuit. It can be seen from the results of analysis that the effect of the connecting wire resistance change with temperature on the compensation results has been significantly reduced, and the overall error has also been reduced accordingly. It is pointed out that, whichever bridge form is used, the wire resistance change with temperature can not be completely compensated and therefore a connecting wire with low resistance-temperature coefficient and a shortest possible wiring length in the high-temperature area must be used.