

# 测量叶轮机械气流参数的新式探针

孙积瑚 刘占民

(哈尔滨船舶锅炉涡轮机研究所)

**[提要]** 本文对用于叶轮机械内部流动中气流参数测量的新工具——叶片式探针进行了专题研究。文中阐述了此类探针的基本原理和制作要求,对其性能做了较为深入的分析与讨论,最后指出此类探针不但可用,而且效果较好。

**主题词** 测试设备 气动测量

## 引 言

叶轮机械内部流动中气流参数对于机组效率有着直接关系。为了能研制出高性能的叶轮机械,科研人员力求能准确地测量出各种气流参数。由于叶轮机械内部流动是一个复杂的三元流动,它既有轴向流动,又有径向流动和周向流动。其参数沿轴向,径向和周向都有变化。因此对叶轮机械内部流动进行测量是十分必要和甚为紧迫的。由于其内部结构复杂,级间空隙狭窄,无法将一般测量工具放入其中。就我国而言,目前只能在机匣壁面处测量气流的静压。至于内部流场中气流的压力、速度(量值和方向)、温度、密度等只能靠理论计算。这些数据不但不够准确,而且也无法进一步指导研制工作的深入开展。

叶片式探针可以完成对叶轮机械级间内部流动的测量,它能揭示出叶轮机械级间内部流动的奥秘。因此,作为一次元件的叶片式探针是叶轮机械内部流动中气流参数测量的良好工具。

本文将就叶片式探针的气动与结构特性进行分析与探讨。

## 叶片式探针的基本原理及制作要求

气流参数包括压力、速度、温度和密度。但对气流参数的测量最终归结为对压力和温度的测量。

根据一元稳定流动的微分方程式,在等熵流动的情况下,沿流管积分,得到伯努利方程式的一般表达式。在气流速度较小时,可以不考虑气体的可压缩性,并认为密度 $\rho = \text{常数}$ 。可得:

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

式中  $P_0$  —— 气流总压 Pa       $P$  —— 气流静压 Pa  
 $\rho$  —— 气流密度 kg/m<sup>3</sup>       $V$  —— 气流速度 m/s

(1) 式即是伯努利方程式, 它表示总压沿流线不变。

同任何被绕流物体一样, 叶片前缘处也有滞止点或称临界点。在这类点上气流完全滞止, 即速度等于零。其压力就是滞止压力。对于通过滞止点的流线可以使用公式(1)。

气流总温可由总温探针测量。对于气流的静温, 一般方法是将固定的热感受器直接引入被研究的气流中, 热感受器本身的温度就被认为是气流的静温。在高速气流中测量温度时, 则具有和低速时不同的特点。考虑压缩性时, 气流的位能正比于其静温。当气体运动时, 总能量不变, 即其动能分量和位能分量进行重新分配。在与外界没有热交换的情况下, 速度的增加与静温的降低有关。相反, 速度的减少引起气流静温的增加。当气流完全滞止时, 全部动能转变为热能, 静温升高, 并等于滞止温度。因此, 放到高速气流中的热感受器就将具有和高速气流静温不同的本身温度。

引入恢复系数

$$\gamma = \frac{T_s - T}{T_0 - T} \quad (2)$$

表示感受器对气流动能转变为热能的接受程度。经过变换, 可得

$$\gamma = 1 - \frac{T_0 - T_s}{T_s \left[ 1 - \left( \frac{P_0}{P} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]} \quad (3)$$

式中  $T_0$  —— 气流总温 °C       $T$  —— 气流静温 °C

$T_s$  —— 热感受器温度 °C       $k$  —— 绝热指数

当  $T_s$  和  $\gamma$  确定后,  $T$  也就可以确定。

叶片式探针的制作要求:

叶片式探针是以叶片为支撑体, 将测头放置在叶片上。此种探针可安放在轴流式压气机或涡轮的静叶上, 测量该流场的气流参数。根据此种探针的气动和结构特性, 制作时应满足如下要求

1. 叶片前缘处为滞止点, 总压、速度、方向和总温等测头放置在叶片前缘处。测头的轴线方向有两种:

(1) *A* 型: 测头轴线在前缘处叶型中弧线的切线上。在一般冲角下, 感受孔处的流线与叶型滞止点处的流线距离较近, 或就在同一条流线上 (图1.a)。

(2) *B* 型: 测头轴线在前缘处弦线的延长线上。若测头轴向长度稍大时, 感受孔处的流线与叶型滞止点处的流线距离较远, 因而测量误差较 *A* 型稍大些 (图1.b)。

此二型探针测头以 *A* 型性能为佳, 以 *B* 型制造方便。

2. 为了减小测头对叶片周围流场的影响, 应使测头的尺寸尽量小。

3. 为了减小支撑体——叶片对测量精度的影响, 应使测头感受孔距叶片前缘有足

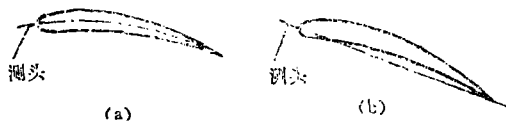


图 1

够的距离。

4. 由于叶片周围流场中气流方向很  
不一致,要求探针对气流偏斜角 $\alpha$ (径  
向)、 $\beta$ (周向)的不敏感度最大(方向  
探针除外)。如总压探针尽量选用套管总  
压式测头。

- 5. 为使测头之间相互不干扰,测头的间距应满足一定要求。
- 6. 探针的校正系数随时间稳定,在气流速度变化较大的范围内,校正系数不改变。

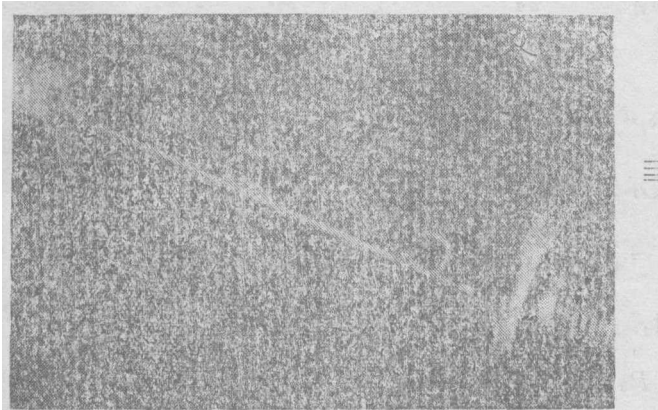


图2 叶片式总压探针

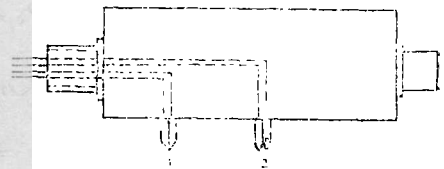
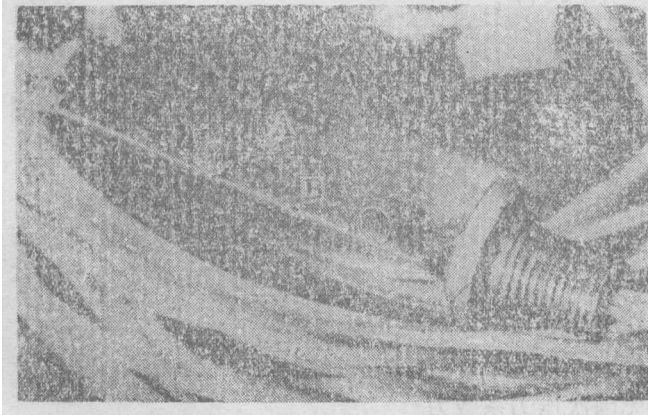


图3 叶片式方向探针

- 1—测量 $\alpha$ 角的测头
- 2—测量 $\beta$ 角的测头



A—滞止室式测头 B—裸式测头

图4 叶片式温度探针

7. 方向探针采用成对的组  
合式,可以同时测量 $\alpha$ 和 $\beta$ 角。

8. 测量叶轮机机械内部气流  
静温用的热感受器可选在叶片  
上,其热电偶接点最好放在气流  
速度变化小的部位,如叶片内弧  
靠近后缘处,以利于尽量缩小热  
感受器与气流的温差。当然也可  
以放在其他部位,如文献[4]中  
热感受器的热电偶接点就放在前  
缘处。

### 叶片式探针性能分析

#### 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

$$\frac{P_0}{P} = \left(1 + \frac{k-1}{2} M^2\right)^{\frac{k}{k-1}} \tag{4}$$

经变换得到

$$P_0 = P + \frac{1}{2} \rho V^2 \left(1 + \frac{1}{4} M^2 + \frac{2-k}{24} M^4 + \dots\right) \tag{5}$$

若取符号

$$e = \frac{1}{4} M^2 + \frac{2-k}{24} M^4 + \dots \tag{6}$$

则 (5) 式可写成

$$P_0 = P + \frac{1}{2} \rho V^2 (1 + e) \tag{7}$$

考虑气体可压缩性时, 气流速度表示式可写成

$$V = \sqrt{\frac{2}{\rho} \frac{P_0 - P}{1 + e}} \tag{8}$$

在不可压缩流体中, 即  $e = 0$  时, 式 (7) 和 (8) 变成

$$P_0 = P + \frac{1}{2} \rho V^2 \tag{9}$$

和

$$V = \sqrt{\frac{2}{\rho} (P_0 - P)} \tag{10}$$

比较 (7) 式与 (9) 式, 可知当  $M = 0.3$  时, 用 (9) 式表示  $P_0$  与  $P$ 、 $V$  之间的关系, 其误差达到 2.25%。同样, 比较 (8) 式与 (10) 式, 当容许误差为 1.5% 时, (10) 式只能在气流速度小于 105 米/秒的情况。

压缩性影响还表现在: 随着  $M$  数的增大, 叶片探针的有效测量区域逐渐减小。

当  $M \geq 1$  时, 由于探针前面产生正冲波, 此冲波是非等熵的, 于是就改变了测量的滞止压力。由总压探针所测量的是冲波后面的滞止压力, 而与冲波前面的滞止压力值不同。这个差别的大小决定于冲波的强度和  $M$  数。

### 2. 粘性——雷诺数的影响

假定在理想气体中, 滞止点的无因次压力系数为

$$\bar{P} = \frac{P_0 - P_\infty}{\frac{\rho V_\infty^2}{2}} = 1 \tag{11}$$

式中  $P_\infty$  ——未扰动气流压力。

但当粘性气体绕探针流过时, 沿它的表面的压力分布就与  $R_e$  数有关。因而, 测量的总压值在一般情况下与粘性有关。当雷诺数较大时 ( $R_e > 30$ ), 公式 (11) 仍然正确,  $R_e$  数对滞止点所测量的压力值无影响, 此时可不考虑粘性的影响。当  $R_e$  数较小时 ( $R_e < 30$ ), 粘性对所测量的滞止压力值的影响就很重要。在滞止点的无因次压力系数  $\bar{P}$

与 $R_e$ 数关系,可用下式表示

$$\bar{P} = 1 + \frac{4C_1}{R_e + C_2\sqrt{R_e}} \quad (12)$$

式中 $R_e = \rho V r / \mu$ ,  $r$ 为总压孔半径。系数 $C_1$ 、 $C_2$ 随物体的形状而异。如半球形: $C_1 = 2.0$ ,  $C_2 = 0.398$ ; 球形: $C_1 = 1.5$ ,  $C_2 = 0.455$ ; 圆柱形: $C_1 = 1.0$ ,  $C_2 = 0.457$ 等等。

### 3. 叶片不对称的影响

由于叶片不对称(分背弧和内弧),使叶片式探针的特性曲线不同于一般探针的特性曲线。

(1) 总压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(叶片的正冲角取 $+\beta$ )。尤其以测头轴线顺叶型弦线方向的探针(B型)为甚。特性曲线两侧不对称, $+\beta$ 部分变化较平缓, $-\beta$ 部分变化较剧烈。

(2) 对于速度探针,当选用半球形测头,且具有最佳的几何关系[由前端到静压孔中心的距离 $x_1 \geq (3 \sim 6.5)d$ ,由静压孔中心到支撑体的距离 $x_2 \geq (6 \sim 8)d$ ,静压孔直径 $d_1 \approx (0.1 \sim 0.3)d$ , $d$ 是测头外径],其不敏感区域与总压探针相同。

(3) 测 $\alpha$ 角的方向探针,只要测孔距离支撑体足够远,则支撑体对特性曲线无影响。测 $\beta$ 角的方向探针,其特性曲线较一般方向探针的特性曲线向右偏移,且分部 $+\beta$ 曲线变化较缓, $-\beta$ 部分曲线变化较剧烈。

### 4. 测头与后面支撑体的特征参数对探针特性的影响

(1) 对于总压探针,一般多作成梳状探针形式。设探针测头长为 $a$ ,外径为 $d$ ,间距为 $s$ ,支撑体厚度为 $D$ 。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。

当总压修正系数 $K \leq 0.01$  [ $K = (P^* - P) / P^*$ ,式中 $P^*$ 为标准总压值, $P$ 为被校探针测得的总压值],且已知 $\beta$ 与 $a/D$ ,则 $s/d$ 必须满足如下要求:

$$\text{若 } -10^\circ \leq \beta \leq 10^\circ, \frac{a}{D} \geq 0, \text{ 则 } \frac{s}{d} \geq 1.0$$

$$\text{若 } -15^\circ \leq \beta \leq 15^\circ, \frac{a}{D} \geq 0.75, \text{ 则 } \frac{s}{d} \geq 1.5$$

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

变化趋势为,当 $a/D$ 和 $s/d$ 不变时,随着 $\beta$ 增大,总压修正系数 $K$ 增大;当 $a/D$ 和 $\beta$ 不变时,随着 $s/d$ 减小, $K$ 增大。

(2) 速度探针和方向探针不必作成梳状探针形式,可在需要处单独使用。

### 5. 测头结构形状的影响

(1) 总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。文献[3]指出,以套管总压探针的稳定性最好,在 $-30^\circ \leq \beta \leq 30^\circ$ 时测量值准确。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  $-25^{\circ} \leq \beta \leq 25^{\circ}$ 。单管总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。

(2) 总温探针测头结构形状对测量准确度有密切关系。总温探针测头以滞止室式为佳。它对气流速度滞止效果好, 使气流动能转为热能程度高, 从而测得的温度接近气流总温。

(3) 温度探针的测头结构形状对测值准确度也有密切关系。文献[4] 将温度探针的测头放在叶片前缘, 它对两种测头 (滞止室式和裸式) 进行了试验比较。

i) 两种探针测得的  $\gamma$  值随  $M$  数的提高而增大。在同一  $M$  数下,  $\gamma$  值随着气流冲角的增加而减小。

ii) 滞止室型测头对气流速度滞止的效果好, 使气流动能转为热能程度高, 于是  $\gamma$  值高。

iii) 从两种结构探针的特性曲线可见, 裸式结构的  $\gamma$  值随  $M$  数和冲角的变化大, 测值分布稀松; 而滞止室式的  $\gamma$  值随  $M$  数和冲角变化小, 测值较密集。可见裸式结构较滞止室式结构灵敏, 但受外界影响大。

iv) 热电偶接点在滞止室中位置对测值准确度有直接关系。接点在中间, 测得的温度值高, 即测值准确度高。

### 6. 前面动叶尾迹的影响

如前所述, 叶片式探针都是放在静叶上。当机组运行时, 前面的动叶在高速转动, 与后面静叶的相对位置在不断变化, 因此探针的测值是前面动叶的尾迹区与主流区气流参数的平均值。

## 结 论

通过上面的分析与论述, 可以得到如下的结论:

1. 叶片式探针是探针的一个新分支。它依据的理论符合一般探针的基本原理。并根据其工作特点, 在制作方面又提出一系列要求。因此, 测量值是准确的、可信的。

2. 通过性能分析知道, 叶片式探针又有其独自的特点。只要我们掌握这些特点,

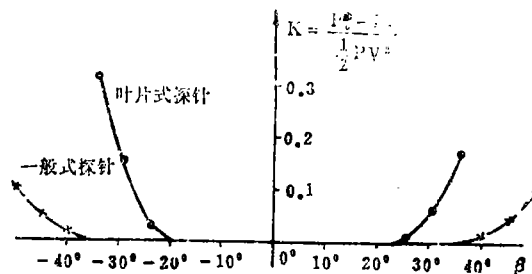


图 5 叶片式总压探针与一般式总压探针性能的比较

$P_0^*$ —标准总压值  $P_0$ —被校探针测量的总压值

就可以使其在科学实验中充分发挥作用。

3. 叶片式总压探针和叶片式温度探针在哈尔滨船舶锅炉涡轮机研究所研制的某型燃气轮机试验中得到应用。实践证明此种测试仪器是有效的、可靠的。

因此，叶片式探针可以作为测量叶轮机械内部流动中气流参数的一种新工具，使用它可以完成其他测试仪器所不能完成的任务。

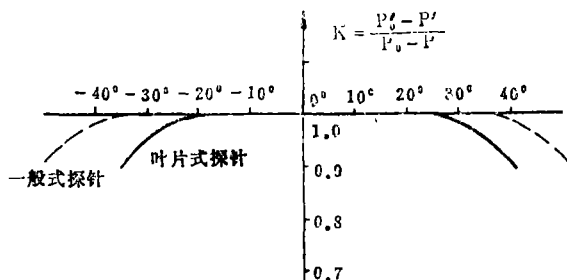


图6 叶片式速度探针与一般式速度探针性能的比较

$P', P'_0$ —被校探针静压、总压值  $P, P_0$ —标准探针静压、总压值

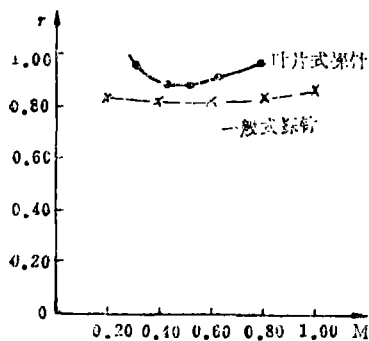


图7 叶片式温度探针与一般式温度探针性能的比较

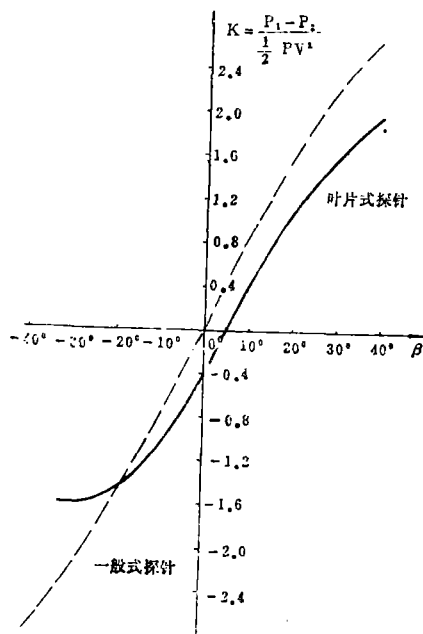


图8 叶片式方向探针与一般式方向探针性能的比较

参 考 文 献

[1] Петуни, А. Н.: Приемники для измерения давлений и скорости в газовых потоках ЦАТИ. «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» 哈尔滨船舶锅炉涡轮机研究所研究报告 研79  
 [3] 孙积瑚: «叶片式全压探针试验研究» 哈尔滨船舶锅炉涡轮机研究所研究报告 研255  
 [4] 单菊英: «叶片式热电偶探针总温恢复系数测定» 哈尔滨船舶锅炉涡轮机研究所研究报告

# A New Type of Probe for Measuring Turbomachinery Flow Parameters

Sun Jihu, Liu Zhanmin

(Harbin Marine Boiler and Turbine Research Institute)

## Abstract

This paper gives a detailed study of a blade type probe, a new tool for measuring turbomachinery internal flow parameters. The fundamental principle and manufacturing requirements of the probe are described with an in-depth discussion and analysis of its main features. In conclusion, it is pointed out that this type of probe is not only easy to use but can bring about good economic results.

**Key words:** measuring equipment, pneumatic measurement

## 简讯二则

### 一 东方首台 300MW 国产机组与上海首台 300MW 考核机组双双荣获国家重大技术设备优秀项目奖

国务院重大技术装备领导小组于1987年12月25日在京召开了重大技术装备表彰大会,宣布三项国家优秀项目奖。东方企业集团首台300MW 国产火电机组与上海地区首台300MW 火电考核机组荣获国家重大技术设备优秀项目称号和荣誉证书。李鹏代总理颁发了奖状与证书,并作了重要讲话。

东方集团独立成功地研制出我国首台300MW 水—氢—氢型汽轮发电机、首台亚临界中间再热式300MW 汽轮机及300MW 亚临界自然循环汽包炉。该机组是以自力更生为主,“嫁接”国外技术的一个范例。

300及600MW火电考核机组是我国12项重大技术引进装备项目之一。300MW主机制造任务于1986年完成,1987年6月通

过满负荷试运行。下半年并网发电600MW机组三大主机制造任务已于1986年12月17日在哈市地区全面完成,1987年6月开始安装,预计1988年6月底可以投运发电。

### 二 国内三大电站锅炉厂1987年度生产简况: 哈尔滨锅炉厂

1987年9月30日全面完成年生产计划,总产值实际超过3亿元(上报2.85亿元)。电站锅炉产量总计210万千瓦,为行业之首。该厂11月初通过了“国家二级企业”的审定,成为电站锅炉行业中第一家二级企业。

### 上海锅炉厂

1987年底突破202.5万千瓦,年产值达1.8亿元,利润3千万元。人均产值3.7万元。居行业之首。1987年承接了我国首台自行研制的秦山核电站30万千瓦机组压水堆一回路主设备(主蒸发器,稳压器等)的研制任务。

### 东方锅炉厂

1987年工业总产值突破1.5亿元,利润突破1500万元、完成电站锅炉10台共138.6万千瓦。10月初通过了美国NB总部与哈特福特蒸汽锅炉检验与保险公司的联合检查,取得ASME的S、U及U<sub>2</sub>三枚钢印及许可证。