

北京图书馆藏

N 17825

中文资料

汽轮机·燃气轮机

测试技术译文集

汽轮机行业情报网 编译出版
上海汽轮机厂汽轮机研究所技术情报组

一九七六年二月

26

毛主席语录

列宁为什么说对资产阶级专政，这个问题要搞清楚。这个问题不搞清楚，就会变修正主义。要使全国知道。

我们必须打破常规，尽量采用先进技术，在一个不太长的历史时期内，把我国建设成为一个社会主义的现代化的强国。

目 录

1. 校正压力、温度和速度测针的风洞.....(1)
2. 确定冷凝式汽轮机排汽湿度用的测针及其发展和试验.....(13)
3. 汽轮机的振动和应变测量.....(21)
4. 在进行蒸汽和燃气轮机验收和试验工作中所用的测量仪器和测量方法.....(32)
5. 测量小流量液体的球型流量计(ЛПР3-1型).....(39)
6. 工况因素对汽轮机级动叶片的动应力数值的影响.....(41)
7. 汽轮机轴承中油膜厚度的测量.....(45)
8. 用全息摄影干涉的振动分析法.....(48)
9. 测量透平动叶片振动的多普勒激光仪.....(65)
10. 用激光测量透平振动.....(73)
11. 温度、压力组合测针.....(74)
12. 透平、风机等的叶片振动及其消振措施(一)、(二).....(76)
13. 用塑料模型进行汽轮机汽缸的热应力分析.....(86)
14. 利用光弹性分析燃气轮机叶片的热应力.....(92)
15. 确定透平叶片叶根处的应力分布和变形以及设计薄弱部位的试验装置.....(95)
16. 透平转子.....(97)

B224/17



A 847442

校正压力、温度和速度测针的风洞

引言和问题的提出

为了验证和发展热力透平机械的理论计算方法,要求不仅在机器上而且在专门的风洞上(比如平面或环形叶栅风洞)对其部件进行流动的测量研究。对轴流或径流叶栅的流动研究主要用相应的测针进行。这些测针的性能必须在使用前就很准确地了解,这只能在专门的风洞上用所产生的已知流束来仔细地试验校正之。

为此,在汉诺威工业大学流体机械研究所建立了三个不同的校正风洞,它们可用来研究压力、温度和速度测针与各种影响参数(空间的来流方向,马赫数,雷诺数以及对热线测针来说还有压力和温度)的关系。本文介绍了这些风洞的设计和构造以及风洞流束特性的研究和调整。测针的校正方法则用所试验过的实例说明之。

理论基础

一种已知其特性的气体的流动是用其速度大小和方向以及它的状态参数(静压和静温)来完整地描述。气体流动时,其总压 P_0 与静压 P 以及当地马赫数 M_a 之间的关系为:

$$M_a = \sqrt{\left[\left(\frac{P_0}{P} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] \frac{2}{k-1}} \quad (1)$$

其中总压和静压是用已经校正过的测针所得之测值。根据当地马赫数的定义:

$$M_a = c/a \quad (2)$$

和当地音速的表达式:

$$a = \sqrt{K \cdot R \cdot T} \quad (3)$$

即可确定速度 C 。式中 K 为等熵指数, R 为气体常数, T 为静温。

高速流动气体的静温是不能直接测得的,它与总温 T_0 和流动介质在等压下的比热 C_p 之间具有如下关系:

$$T = T_0 - C^2 / (2C_p) \quad (4)$$

测量高速气流的静温(相对于气流而言)温度测针通常都是用微型的热电偶制成。由于气流在热电偶感受端的滞止和摩擦,使感受端所测出之温度 T' 高于未经扰动气流部分的温度 T 。为了测得静温,引入一个温度测针的无因次特性参数,即一般称为“恢复系数”,并通过校正决定之:

$$\bar{R}(M_a) = (T' - T) / (T_0 - T) \quad (5)$$

根据文献[1]和[2]以及本文作者的研究,恢复系数与温度测针的进气流马赫数有关。

在已知恢复系数时,对方程(2)至(5)进行简单变换后即可得到静温的表达式:

$$T = \frac{T'}{1 + \bar{R}(M_a) \cdot K \cdot R / (2C_p) \cdot M_a^2} \quad (6)$$

除了所谓压力测针外,热线或热膜测针亦用来测量速度,但我们所用的这些测针感受端的形状和构造与文献[3]中有较大的差别。其原理在于测量气体流过电加热测头时所引起的热损失。King在文献[4]中对处于二元,不可压,无摩擦位流中均匀加热的朗园柱体或线丝给出了理论解。当普特数和雷诺数之乘积 $Pr \cdot Re > 0.08$ 时,文献[5]给出下列近似关系:

$$Q = \lambda I_D \left(1 + \sqrt{\frac{2\pi d_D \rho C_p C}{\lambda}} \right) \cdot (T_D - T) \quad (7)$$

据根方程(7), 热损失 q 与测头的几何形状或尺寸即热线的长度 I_D 和直径 d_D 有关, 与流动介质的速度, 密度 ρ (对于气体介质来说, 也就是与其压力和温度) 有关, 与其热力特性如导热能力 λ 和等压比热有关, 以及与测头表面和流体的温差 $(T_D - T)$ 有关。如果这些参数中只有一个在变化时, 则

$$N_s = (1/\pi) + \sqrt{(2/\pi) \cdot R_s \cdot P_s} = f(R_s, P_s) \quad (9)$$

式中流体的特性参数按平均温度 $T_m = 0.5(T_D + T)$ 取用。在高速下, 即大约超过 $M_s = 0.3$ 时, 对空气介质来说, 存在着马赫数 M_s 对传热值的影响。于是:

$$N_s = f(R_s, P_s, M_s) \quad (10)$$

对双原子气体而言(空气介质可近似如此认为), 在常温范围内普朗特数 P_s 可近似认为常数。

校正风洞

表1列出了流体机械研究所现有三台用

热损失就直接随此参数的变化而改变。

普朗特数和雷诺数按下式定义:

$$P_s = \frac{\eta \cdot C_p}{\lambda}; \quad R_s = \frac{C \cdot \rho \cdot d_D}{\eta} \quad (8)$$

式中 η 是流体介质的动力粘度。

传热方程(7)可用努塞耳数 $N_s = \alpha \cdot d_D / \lambda$ (它是对流传热系数 α , 热线直径 d_D 和流体导热系数 λ 的复合参数) 和方程(8)所定义的无因次特性数来表示:

于研究压力、温度和速度测针校正风洞的最主要技术数据。鉴于测针校正, 特别是研究测针方向性能时的需要, 风洞的测量段皆为开式(即指测量段位于自由射流区内——译者注)。自由射流的测量段具有下述优点, 被校正测针对风洞流束的影响(例如测针对测量段面的部分阻塞)可进一步得到避免; 而且测针可以很容易地按装到所需要的风洞座标架上, 并可用手进行调整。鉴于经济和试验技术的原因, 有两台风洞是用于校正压力、全压、方向和气流流量测针。其中低速风洞(图1)主要用以第一次校正^①流测针

表1 风洞的数据

校正风洞	低速风洞(图1)	高速风洞1(图2)	高速风洞2(图3)
运行方式	无阻塞的开式测位段; 在压力室內的自由射流; 顺式运行, 换佛尔系统。	无阻塞的开式测位段; 开式自由射流; 顺式运行。	有阻塞的开式测量段; 在压力室內的自由射流; 顺式运行; 工质压力可调。
喷嘴出口直径	毫米	190	60
收放比	8:1	14:1	25:1
自由射流长度	520	230~430	120
排气喷嘴直径	毫米	220	70
排气扩压器	有	有	没有
最大马赫数	0.17	0.85	1.0
雷诺数	$2.5 \times 10^4 \sim 8 \times 10^4$	$5 \times 10^4 \sim 5 \times 10^5$	$7.5 \times 10^2 \sim 2.5 \times 10^3$
校正用流束的静压	1	1	0.5~6
流束的静压	20	20~150	20~100
最大功率	15	1600	980
最大流量	公斤/秒	11.1	5.1
使用目的	校正压力、全压、方向和 气流流量测针	校正压力、全压、方向、 和气流流量测针; 确定总 温测针的校正系数	校正热线测针与马赫数、 雷诺数、逆气流方向、压 力和温度的关系

设计原理

特别是空间方向读数的校正,以及在叶栅风洞和试验机器上做试验的前、后进行测针的校核。由于该风洞结构设计方面的考虑以及消耗的功率不大,它与研究所中心鼓风站是没有联系的,所以也就不影响研究所中正常试验研究计划的进行。在1号高速风洞(图2)上校正压力全压、方向和气流矢量测针(指同时测量出气流方向的速度大小的测针——译者注)以及确定测针恢复系数与马赫数的关系。此风洞与中心鼓风站相接,并按其最大流量设计,该鼓风站所需要的最大功率为1500瓩。为了研究热线测针与马赫数,雷诺数,进气流方向以及流体介质的压力和温度的关系,建立了2号高速风洞(图3)。为能改变风洞流束的压力和温度,该风洞必须按封闭式回流方式运行。故此,须用中心鼓风站的两台压气机运行。此风洞的投运,在调节技术方面要较高的费用投资。

这些校正风洞均按一般的风洞设计原理和校正数根设计的〔6~11〕。在风洞喷管前的稳流校正内装有一个整流器和一个或几个整流网。用这些措施可使风洞喷管入口前的气流尽可能地均匀、稳定。整流器应能消除进气流的涡旋,整流网则应均衡纵截面上的速度差别〔7,12〕。

风洞喷管的作用是将由稳流器内流出的气流在喷管内加速到测量段内的速度,并使所流出的流束截面上的流场均匀。喷管对测量段流束的影响取决于其收缩比,型线和长度。喷管可以消除其入口处的速度场不均匀度为 $1:n^2$ (n 为喷管入口截面与出口截面之比)〔6,7〕。三台风洞的喷管的型线皆为回转面。其型线的回转面半径按维托辛斯基公式计算〔7,11〕:

$$r = \frac{r_2}{\sqrt{1 - \left[1 - \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^k\right]} \cdot \frac{(1 - x^2/l^2)^k}{(1 + x^2/3l^2)^2}} \quad (11)$$

式中 r_1 , r_2 和 l 分别为喷管入口,出口和任意处截面的半径, x 为喷管轴线上轴向长度坐标, l 为喷管长度。上述公式为理想流体轴对称位流在确定的边界条件下的流函数方程式。喷管长度选为 $l = 4r_2$ 〔文献7〕。在喷管型线的出口端有一段长度为 $0.4r_2$ 、半扩张角为 0.25° 的一小段轻度扩散段,这是根据我们预先深入研究的結果而拟定的。这一个小扩散段与圆柱面的出口段相比,可使测量段内气流的静压分布不论在纵向而且在横向上都比较有利。原因是:在喷管出气段上截面的略为扩张可以修正边界层的排挤厚度〔文献9〕。为使测量段的自由射流外边界不影响被校正测针测头上的压力分布,应使喷管出口直径 d_2 与被校正测针头外径 d_1 之比,即 $d_2/d_1 \geq 50$ 〔7〕。这个要求已在设计喷管直径时充分地满足了。

测量段自由射流的长度应介于1倍~2倍(最多不超过2倍)喷管直径,因为自由射流会与周围静止的空气混合,故在2倍喷管直径的长度以后的地方,射流有效截面积将小于喷管截面积的 $1/4$ 〔6,7,9〕。校正风洞在结构上均允许有这样的可能,即:可以改变表1所列的原始自由射流长度以适应风洞在振动方面提出的要求,或者以此来改变射流流束原来的压力和速度分布,而所需的投资却很少。对开式测量段的风洞而言,自由射流是处在压力室内,故注意使压力室的截面积相对于测量段截面积来说应足够大。

自由射流后面安置有排气集气器,其直径应为 $1.1d_2$ 〔6,7〕。其后为扩压器,特别在低速风洞和2号高速风洞上扩压器的主要目的是回收射流能量。低速风洞扩压器的总扩张角为 6° ,高速风洞上取为 8° ;这样可避免

扩压器内的脱流从而避免对测量流束的反作用。另外，作为附加的措施是在低速和1号高速风洞扩压器的出口端部开通气隙缝，以及在低速风洞的扩压器出口端装置一个线滤网〔6，12，13〕。通气隙缝口的截面积和整流网的尺寸应在进行风洞射流调整的过程中找到其最佳值。

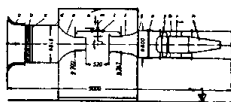


图1 低速风洞(说明见正文)

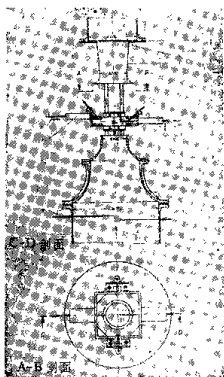


图2 1号高速风洞

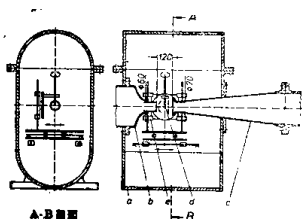


图3 2号高速风洞

风洞结构和设计

低速风洞

风洞(图1)为无迴流,开式测量段并按吸式运行的型式〔埃佛尔结构型式〕。空气由入口集流器a吸入,集流器的型线按气流由大气流入管口时的流线成型〔14〕。经一个整流栅格b和一个整流网c后流入圆筒形前置稳流筒d,随后由喷管e将气流加速到所需的速度;流束经测量段后流入带有集气器的扩压器f和其后的整流网g。在排气段h内装置了一台由可调的并激直流电机i驱动的轴流鼓风机j。工质(空气)经鼓风机和其后的内套扩压器k后自由排向试验室内。

因为该风洞按吸式方式运行,故其开式测量段在一个密封测量室n内与喷管e、装有被测测针m的风洞座标架l及扩压器f相连。密封的测量室n内除装有风洞所需设备和控制器外,尚容纳测量仪器和试验人员。风洞座标架l的结构允许被测测针m能在整个测量段空间范围内沿三个相互垂直的平面内移动,并可围绕两个相互垂直的轴线旋转。座标架的结构尚保证被测测针于空间内转动时,其测头尖楔部位处于空问的位置总是不动的。上述座标架的可调性结构是为了满足鉴定风洞流束和校正处于不同来流角度的测针的需要。为不使鼓风机装置所引起的外壳振动和音响传给测量室n及其内设备,排气段h用弹性接管o与测量室出气接管相联。

1号高速风洞

1号高速风洞(图2)与研究所的中心鼓风站相连。图中只表示了风洞测量段部分。空气由大气中经精滤器吸入三台并列运行的螺杆压气机,通过压气机后流入冷却水量随压缩空气温度而调节的空气冷却器。再流过风洞进气段a内的转向导流栅、整流栅格和整流网,进气段a实际上相当于一个前置稳定室。转向导流栅、整流栅格和整流网的布置和尺寸等均在风洞投用前的调整阶段内经广泛的研究调整后选择其最佳情况。本风洞是利用原有的一台迴转面型线的闭式测量段叶栅风洞加以改装的,在做为叶栅风洞时,进气喷管c和排气段d之间的距离b内作为闭式测量段;作校正风洞时,其开式测量段如图2所示,这时用两个总收缩比(进气面积与排气面积之比)为14的串接喷管c和e加速气流。第一个喷管c的型线为椭圆,第二个喷管e型线按维托辛斯基(7)公式(11)成型,两者的出气端均略有扩张形。

空气经自由射流的测量段进入排气集气器和其后的扩压器f,随后通过一个消音器而自由排入大气。扩压器与一个带孔的板g和一个呈可滑移的孔板的可改变开孔面积的通气装置h相连。如在垂直方向悬吊地移动排气段d和排气集气器与扩压器f时,可在230~430毫米范围内改变自由射流的长度。

1号高速风洞与低速风洞一样装有风洞座标架i,它主要是为校正气流矢量测针和研究测量流束的特性提供必要的自由度。沿四根垂直的支柱并通过滚珠轴承移动的风洞座标架呈正方形并对称于自由射流轴线。被校测针j和比较测针(即标准测针)k装在测针座标架l中进行校准,而后者均固装于风洞座标架i上。测量流束的气流静态参数是用装于风洞前置室a内的一个普朗特管m和一个温度测针n测量的。

2号高速风洞

2号高速风洞(图3)用于研究热线或热膜测针与马赫数、雷诺数、空间进气流角以及流动工质的压力和温度之间的特性关系。为改变测量段流束的压力和温度,采用闭式回流系统。开式测量设置于压力室a中。图4表示了该风洞运行的系统图。该风洞运行时需开动研究所中心鼓风站的两台螺杆压气机a和b。压气机a供环流系统的空气,它由一台可调并激直流电动机传动。压气机b用于调节或改变闭式环流系统的压力。在稳定工况下,它还用来补充闭式环流系统的漏气损失。环流的空气流经冷却器c和测量室e的精过滤清器d。采用精滤器是因为在高速下研究热线测针时对工质的清洁度要求很高之故。环路上的阀门f和旁通管道上的阀门g是用以调整测量射流的速度,它们又与放散阀h相连以调节射流束的压力。空气经前置冷却器i被冷却到所要求的进气温度后再进入压气机a中。测量用流束的压力、温度和速度能分别进行调节。环流系统内的压力是由调节器j通过压气机a前的压力来进行调节。当压力下降时,空气由压气机b并经调节阀k进入环流系统。空气由大气经由精滤器l而吸入压气机b,压出的空气经节流阀m(用它来调节补气压力)和其后的消音器n而排入大气。风洞流束的空气温度是用与调节阀p相连的调节器加以调整,它根据喷管前的空气温度来调节冷却器c的冷却水量。风洞射流束的气流速度是根据风洞喷管前后的压差通过调节器q及与其相连的阀门f来加以调整,调节的方式是力求保持此压差不变。

图5示出了在最好地使用压气机装置的情况下分别单独地测出风洞射流束的压力或温度与马赫数的关系曲线。常用风洞喷管入口平面处的空气静温 t_R 和静压 P_R 作为参变

量。

由风洞喷管 b 和带集流器的扩压器 c 构成的 2 号高速风洞的结构以及被校测针 d 的夹具和座标架 e 的结构等均与低速风洞的结构大致相似。

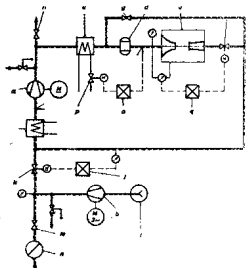


图 4 2号高速风洞的系统图

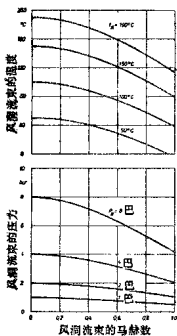


图 5 2号高速风洞流体的温度和压力与马赫数的关系

研究和调整风洞流束的特性

为校正气流流量测针和滞止温度测针，必须准确地了解风洞测量段射流束的气流情况，而且校正测针的流束在一定空间区域内沿风洞轴线方向应不存在压力梯度，从而也不存在速度梯度。与马赫数有关的风洞校正段射流特性是用一支钩状皮托管于每次校正前测量的。这种钩状皮托管在所达到的马赫数范围 ($Ma_{max} = 0.85$) 内无须加以修正 [6]。在鉴定风洞流束所常用的马赫数下，研究实践证明：当风洞进气温度不变时，流束的马赫数可用一个具有代表性的压力参数替代之。风洞前室（相当于气流静止状态）和测量室之间的压差可做这个代表参数，而且它也作为运行工况稳定与否的指标。测针置于风洞测量段流束的某个截面上进行校正，该流束应在轴向和截面方向均无压力或速度梯度。为使垂直于流束轴线方向等压或等速截面的半径尽可能地大，应使流束内气体静超压相对于测量室内静压值要高出全压的 0.5% 左右。风洞校正段就是按这个数字设计的。

在使用校正风洞前应对测量段流束进行深入的试验，如果必要的话，应按所需之要求加以调整。图 6 和图 7 以低速风洞为例引入了这方面大量工作的一部分。图 6 所示为喷管出口型线对流束静压分布的影响。曲线 a 是喷管出口端略具扩散形（其半扩散角为 1° ）时流束的静压分布，这个扩散角是由 [6, 9] 给出的。曲线 b 为喷管出口为圆柱面时的静压变化。曲线 c 为经进一步修正而得之半扩散角为 0.25° 喷管出口型线时测量段流束的静压分布。由图 6 可知，喷管出口型线不仅决定了风洞测量段流束在喷管出口截面后面射流前 $1/3$ 段上的静压分布，也确定了平均射流区的超压（压力高于测量室压力——译者注）大小。排气集流器入口前一

段射流的静压分布主要受扩压器的影响。除扩压器扩张角之外，扩压器通气缝隙的型式和大小亦对流束静压分布起决定作用。图7中以间隙宽度 y 代表扩压器通气量的大小，图中表示了 y 对流束静压分布的影响。改变流束的长度也有可能进一步改变排气集流器前一段的静压分布。图8将低速风洞测量段流束的静压分布与另外两个已建成的大型风洞设备的相应情况做了对比。对比表明，该校正风洞具有很佳的射流特性。图9中绘出

了1号高速风洞在射流长度为 $L = 375$ 毫米和 $L = 480$ 毫米情况下沿风洞轴线上的汽束静压分布。另外，图9中也表示了马赫数对流束静压分布的影响。适于校正测针的校正区，即在流束纵向和横向均无压力梯度的区域随马赫数的提高而移向喷管出口平面。为了在所要求的宽马赫数 ($Ma = 0.2 \sim 0.85$) 范围内使1号高速风洞的流束达到要求，在系统地改变上述提到的影响参数的情况下，对该风洞进行了广泛的研究。

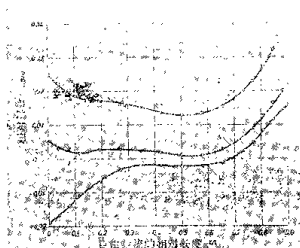


图6 喷嘴出口型式对风洞流束静压分布的影响

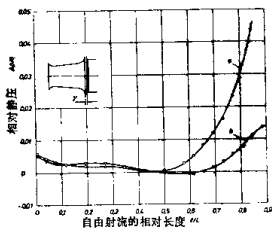


图7 扩压器通气间隙宽度对风洞流束静压分布的影响

- a. 间隙宽度 $y = 2.7$ 毫米
- b. 间隙宽度 $y = 8.0$ 毫米

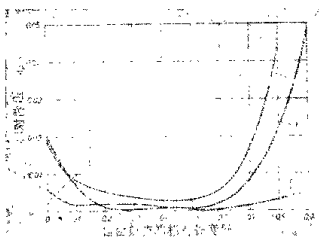


图8 不同风洞测量段流束的静压分布

- a. 哥廷根空气动力学研究所亚音速风洞[9]
- b. 汉诺威工业大学流体机械研究低速风洞
- c. DFVLR 的超音速风洞[11]

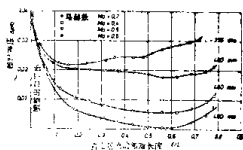


图9 自由射流长度和马赫数对风洞流束静压分布的影响

测针的校正*

气流矢量测针

气流矢量测针只用一个感受端可测量未知气流参数的大小和方向。目前流体机械研究所使用的矢量测针较之过去常使用的圆柱测针和球形测针不同之处是：这些测针的校正系数具有更大的独立性。这类测针感受端结构的设计是使之产生确定不变的脱流区，从而使测针的性能(校正系数)与 R_e 数基本无关[1, 6, 15, 16]。此外,测针的感受端的中线通过测针杆的轴线,从而当测针旋转时,感受头部的测量地点保持不动。做为示例,图10和11中分别表示了康拉得型多孔管[17]和楔形测针[16],它们均符合上述要求。以下用这两种测针的校正做具体说明。

图10所示康拉得多孔管适于测量总压、静压和两个相互垂直平面上的气流角度(从而测量出气流空间方向)。采用锥形头部可使测孔布置紧凑,从而使所造的测针尺寸小,测量时接近于一个空间点。测针头部由圆锥面过渡到圆柱面所形成的锐边使感受头部产生了确定不变的脱流区。全压孔位于圆锥感受端的顶端,四个静压孔位于测头的圆柱面上;四个方向测孔则位于圆锥面上,它们处于平行于测针杆轴线的平面内或垂直于此平面内。图11所示的楔形测针在对准来流时可测量未知气流的总压、静压、垂直于测针杆轴线的平面内的气流角度以及气流的滞止温度。气流总压由楔面尖端的下孔测量,静压和气流角度是由位于楔面上的两侧孔测量。

在楔面尖端的上孔是微型热电偶,用以测量气流全滞止温。有关全滞止温的测量将在下节介绍。楔形测针具有测头尺寸小的特点,故易穿过孔而用于闭式风洞测量段的测量中。

测针装在测针座标架内,然后与座标架一起进行校正。在校正后,测针座标架与测针即成一个固定的整体,并用于试验机器或叶栅风洞的测量中。在校正的时候,测针座标架与安装在其内的测针一起固装于相应校正风洞的风洞座标架上(例如图2所示)。

测针校正的目的是求出总压测量、静压测量和温度测量的修正系数与马赫数和来流空间方向的函数关系。图12表示了校正时以及以后的研究工作中所选用的座标系(相当于轴流透平机械导轮后的流动)。当用于试验机测量时,测针是由机器外壁径向地伸入流道内的。周向和轴向线所成平面内的气流角 α_1 是用“对塞法”将测针绕本身测针轴旋转对零后而得;与上述平面垂直的平面内的气流角 γ 是用压差法确定。在测针校正时,方向孔之间的压差 Δp_r 是与来流马赫数 M_∞ 和来流角 γ 有关。图13为来流马赫数 $M_\infty = 0.6$ 时,多孔管相对方向压力 $\Delta p_r / \bar{q}$ 与来流角度 γ 之函数关系。方向压力 Δp_r 被所测出的动压 \bar{q} 除后得无量因数,用这个数表示方向压力可消除测针校正过程中工况的波动。

测针所测出的压差读数 Δp_r 是测头在来流角 $\gamma = f(\Delta p_r)$ 下测得的。这就意味着,测针所测出的总压读数 \bar{p}_0 和静压读数 \bar{p} 与气流真正的值 p_0 和 p 不一致,而必须考虑对来流马赫数和已测得的 γ 角进行修正。气流真正的总压为

$$p_0 = \bar{p}_0 + \bar{q} \cdot \frac{\Delta p_r(\gamma, M_\infty)}{q} \quad (12)$$

$$\text{真实静压} \quad p = \bar{p} + \bar{q} \cdot \frac{\Delta p(\gamma, M_\infty)}{q} \quad (13)$$

$$\text{真实动压} \quad q = \bar{q} \cdot \frac{q(\gamma, M_\infty)}{q} \quad (14)$$

* 试验研究工作从属于由DFG所支持的研究任务之中。

式中带有“—”者为矢量测针所得之测值。总压和静压的修正函数 Δp_t 和 Δp_s 是气流真实的压力值与矢量测针在校正时的压力测值(与来流角度和来流马赫数有关)之差。出于上述同样原因,这些修正函数也都除以动压 $\bar{q} = p_t - p$ 而以无因次形式表示(图13)。

为了修正测值 \bar{p}_t 和 \bar{p} , 由 [12] 式至 [14] 式可知, 须已知来流角 γ 和马赫数 M_a 。如果用式 [1] 来计算马赫数 M_a , 则又需要知道已修正的总压和静压值。为此, 要用试算法解上述方程组, 而用数字电子计算机来处理试验测量数据是没有困难的。第一次近似求马赫数时, 在 [1] 式中代入测值 \bar{p}_t 和 \bar{p} 。

对于无法测定来流角 γ 测针而言, 需要研究来流 γ 角对压力测值的影响。图14表示了楔形测针在来流马赫数 $M_a = 0.6$ 时, γ 角对总压和静压测值的影响。由校正函数曲线可知, 将楔形测针用于具有径向速度分量的栅后测量是适合的。

图15中绘出了多孔管和楔形测针在来流角为零 ($\alpha = 0^\circ$, $\gamma = 0^\circ$) 时校正函数与马赫数的关系。当 $M_a \geq 0.6$ 时, 静压修正系数剧烈下降, 其中尤以多孔管为著。文献 [2] 指出, 测针的使用受其“临界马赫数”所限, 这时在测针头部出现激波, 而校正函数也出现正负符号颠倒的情况。多孔管的“临界马赫数”为 $M_a = 0.6$, 而楔形测针相应值为 $M_a = 0.85$ 左右(图15)。

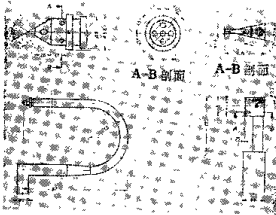


图10 康拉得多孔管 图11 楔形测针 a-孔径

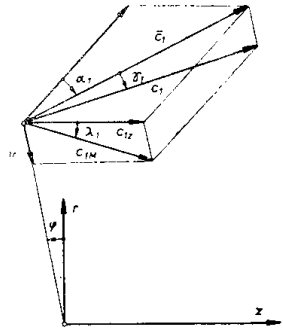


图12 座标系: r -与轴线距离, Z -轴向座标, φ -周向角, λ -导轮出口平面, C, M, C_1, C_1r, C_1Z 分别表示绝对速度 C 的子午面、径向、轴向和周向分量, C_1 -绝对速度 C , 在周向和轴向形成的平面内的投影, α_1 -导轮出口角, γ_1 -在垂直于上述平面上的气流角, λ_1 -子午面流线的倾角。

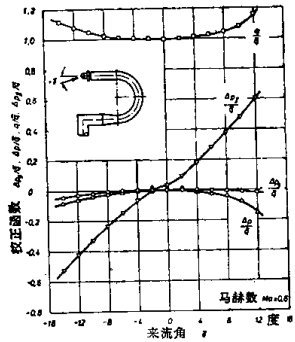


图13 康拉得多孔管的校正函数

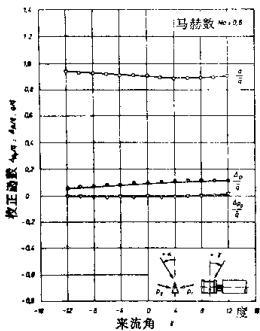


图14 来流角 α 对楔形测针校正函数的影响;
 P_s : 右侧面上的静压,
 P_t : 圆锥表面上的静压,
 α : 在周向和轴向线组成的平面内的角度,
 γ : 垂直上述平面内的角度。

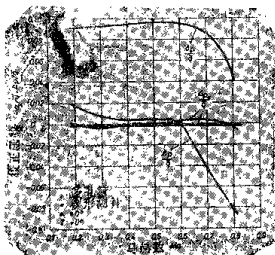


图15 马赫数对多孔管和楔形测针校正函数的影响

滞止温度测针

测量高速气流温度的滞止温度测针可做成如图16所示的三孔管或图17所示的开窗型测针。在测量技术上希望研制和使用恢复系数接近于1的温度测针，从而可以直接测出处于滞止状态的气体温度。为了达到这个目的，应使处于测孔内的微型热电偶的焊合点

由被阻滞的气流以很缓慢的速度绕流之，缓慢绕流的气体动能基本上都转变成热量了。这时测针所测出的温度接近于总温，即由式(4)中的静温部分和动温部分之和。

具有滞止温度测量的三孔管(图16)特别适用于未知气流方向的尾流总温测量。为保证装于测针头部中间开孔(总压孔)内的微型热电偶正好对准气流方向，测针应绕行杆轴线旋转，直至两侧孔的压力读数相同为止。热电偶焊点所在的开孔是通大气的，以便使热电偶测点通气。经这样对准之后，除可测量气流滞止温度外，尚能测量垂直于测针杆平面内的气流方向。

窗口型测针(图17)纯属温度测针，并特别适用于高速气流的温度测量(17)。测针中部开有一个窗口型的缺口，热电偶的焊点就装于此缺口内。气流介质由正对气流的小窗口流入，经容纳热电偶丝的两个空腔而由位于测针背面且与正面小窗口错开布置的一个小孔流出，这就保证热电偶测头处于必要的绕流之中。

图11所示楔形测针，其头部温度测孔一直钻穿到背面，从而保证了热电偶的通气。

温度测针恢复系数与来流马赫数的关系是在1号高速风洞(图2)中校正的。为此，取第一个喷嘴入口前150毫米的测量面上做为静止状态，并测出静止压力 P_R 和静止温度 T_R (图2中的测针m和n)。这样的选取是正确的，因为，来流管道与喷嘴出口截面的面积比约为14:1。当由静止平面到测量面的状态变化为绝热时，在某个马赫数下的恢复系数可由测量面上所测之总压 p_0 和静压 p ，被校测针的温度温值 T' 以及静止平面上的参数 P_R 和 T_R ，通过方程(1)~(5)而求得。

楔形测针，窗口型测针和三孔管的校正结果示于图18。楔形测针的恢复系数约为0.85，与马赫数的关系很少。开窗型测针的

恢复系数近于1.0,且基本上与马赫数无关,文献[18]认为,这归结于进气孔和出气孔的位置错开,并选择了有利的进气孔和出气孔的面积比,从而保证了气流合适地绕流过热偶测头。三孔管的恢复系数随马赫数的增加而略有提高,其绝对值介于开窗型和楔形测针之间。

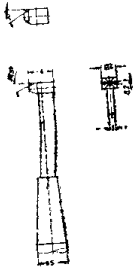


图18 有全部三孔度测点的三孔管

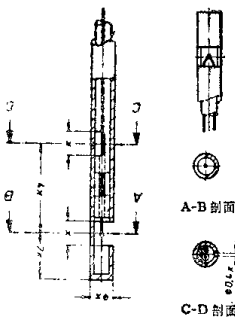


图17 窗口式测针

• 热线风速仪——译注

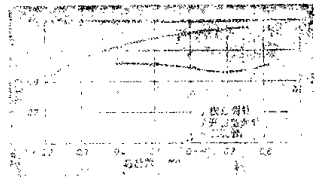


图18 恢复系数与马赫数的关系

热线测针*

某些作者,例如文献[19],在试验基础上求出(相对其直径来说是)很长的加热圆柱体与流体介质之间的热传方程式。这时,须将此传热看成是二元的,因而基本上不涉及热线或热膜测针的尺寸。由感受部分向测针杆端部或向支柱材料的热传导是不容忽视的。此外,例如因气流的作用力引起热线的伸长,或者线材料的不纯和变质(氧化,腐蚀)都会影响热传导。所以将测针置于以后试验会碰到的实际气流条件下直接进行校正 是必要的。

校正是在2号高速风洞(图3)中进行。测量段射流的气流状态参数(空气参数)可在表1或图5所到范围内相互独立地改变。校正截面的状态是用一个普朗特管在风洞测量段流束内测出总压和静压以及测出喷管入口前静止平面上的压力和温度值来得出(图4)。

图19绘制了热线测针在流动介质为空气中的校正结果。标志着感受部分热量损失大小的热线风速仪的输出电压 U ,作为流量密度 $\rho \cdot C$ 的函数[20]。在热线直径不变、空气温度不变,从而工质的动力粘度不变的情况下,由(8)式可知,流量密度 $\rho \cdot C$ 与雷诺数成正比。图中选用了静止温度 t_R 和测量段流束马赫数 M 。(鉴于(10)式)作为参变量。前已提及方程(10)中的普朗特数的影

响在用空气为工质时可忽略不计。

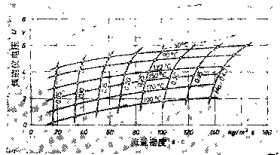


图19 在空气中校正某热线测针的校正曲线
材：钨；线径：5微米；线长：1.5毫米；
线温：225°C

结 论

研究热力透平机械流动或在专用风洞中研究其部件流动时，所用之压力、温度和速度测针均需加以校正。为此，建立了三台开

式测量段的校正风洞，其中一台为低速，两台为高速。校正风洞特别用以研究测针与空间来流方向、马赫数和雷诺数的关系，以及在专用于校正热线测针的2号风洞上研究流束中压力和温度对测针的影响。这些风洞均按通常的风洞数据设计，并在投用前对流束特性做了深入的研究和调整，使其达到了通常地要求。本文介绍了各种类型测针的校正结果。

参考文献(略)

(南京梅山 动力部 王清福
译自西德《Konstruktion》,
1973, H.7, 245~254页)

确定冷凝式汽轮机排汽湿度用的测针及其发展和试验

在冷凝式汽轮机中膨胀超过了饱和线，接着就在两相湿蒸汽区进行。由于在两相汽流中压力降低时的多层问题，人们可以应用主要是为了单相介质而发展起来的流体机械的液体和气体动力学理论，只是对于冷凝式汽轮机中湿蒸汽流过的级有很大的局限性。在设计这些级时，要大大的依赖于试验的结果。沿单一流线的参数分布，这里只能由压力或温度以及蒸汽的焓或湿度来确定，因为湿蒸汽是沸腾的水与饱和蒸汽的混合物。为了叙述一个确定的蒸汽状态，因而要求除去两个参数即压力和温度外，还要知道另外一个参数，即蒸汽焓 h_b 或蒸汽干度 x_n 。

利用测量仪器，通过试验来求得蒸汽焓或蒸汽干度。除去为了设计而提供的试验数据外，还要借助于这些仪器，使冷凝式汽轮机中的效率的确定工作大大简化。

全部在单相区工作的流体机械的效率可以由压力和温度测量来确定。这个“热工测量法”长期以来，就在燃气轮机和压气机上得到应用。最近，这种方法也在离心泵和水轮机上。这种热工测量法一般说来要比常用的必须测量工作介质流量和联轴轴功率的效率确定方法用得少，然而要精确的多〔1；5；6〕。冷凝式汽轮机的效率至今只是用通常的方法求得。

确定湿蒸汽成分的方法

在文献〔4；7；10；11〕中，叙述了各种直接确定湿蒸汽参数的方法。这些测量仪器中众所周知的，同时也是最老的是节流式量热计。通过等焓节流，把湿蒸汽转化为过

热蒸汽，它的参数可以通过压力和温度的测量确切地确定出来。从过热蒸汽的参数可以反算出湿蒸汽的成分，因为在节流装置中蒸汽的焓保持常数，如果没有加入速度变化的话，这个测量法对确定排汽湿度是不适用的，因为对正常运行时冷凝器中的压力来说，如此大的节流是不可能把湿蒸汽转化为过热状态的。

过热量热计的应用范围要大得多。这里，蒸汽不是通过等焓的节流，而是通过非常接近于绝热过程焓升转入到过热区，这里所需要的能量，一般是用一个电加热装置对蒸汽加热。要测出受热体前后的压力和温度、所输送的电能和蒸汽量，从流量和能量平衡中可计算蒸汽干度 x_0 。

除去这两种量热计的型式外，还发展了其他多种仪器。其中有应用得很多，实际上几乎没有经过试验的试验室仪器。由此点看，这些仪器基于其结构和作用原理，不能用在汽轮机内部，只能用在排汽口，而可直接用在湿蒸汽流中。要一定在主蒸汽流测量中，用取样测针通过一抽汽管，把蒸汽试样送给这些仪器。正如，经过Liska〔8〕的理论和试验研究所证明的那样，在这样的试样抽取中存在相当的误差。湿蒸汽是由饱和蒸汽和大小不同的水滴组合成的两相混合物，因此它不可能通过一根简单的取样管把从湿蒸汽流过的系统中来的蒸汽试样供给测量仪器，在抽汽取样管中发生两相分离，只还有较多或较少的干燥的饱和蒸汽通到测量仪表去。

因此Christ和Wulff〔4〕发展了电气量热计，它可以装入一台冷凝式汽轮机的排

汽管中。这台仪器允许直接在蒸汽流中测量湿蒸汽的参数，但要进行流量测量。因此，它损失了精确度。

这里补救的办法是 Rogner [9]~[11] 建议采用的空气混合式量热计。它在单独用于温度和压力测量方面是出色的，尤其是不要求测量流量。

如果将湿蒸汽与不是太冷的空气混合，那么，所有在蒸汽中粉碎的水滴都会蒸发。所需要的蒸发热是由空气——蒸汽混合物供给的。在图 1 中画出来的，由 Boie [3] 深入分析过的测试装置 [9] 就是按照这个原理进行工作的。



图 1 Rogner [9] 的测量蒸汽湿度的装置

- | | | |
|---------|---------|---------|
| a 湿蒸汽 | e 热电偶计 | i 真空泵 |
| b 钢质毛细管 | f 干球温度计 | k 压力套管 |
| c 外壳空隙 | g 湿球温度计 | l 干球温度计 |
| d 绝缘层 | h 进气管 | m 湿球温度计 |

真空泵 i 通过毛细管 b 吸入湿蒸汽 a，以及通过伸入到排汽流中的管道的外壳空隙 c，从四周吸入空气。蒸汽和空气在绝缘管道 d 中强烈地进行混合，使带入的水滴能够蒸发。其中空气得到冷却。用热电偶 e 测量的空气温降可以确定混合蒸汽的焓。而空气在进入外壳管之前和在真空泵排气管中混合之后的参数是用湿度计装置 f, g, l, m 来确定的。由此，可藉助于蒸发热来计算蒸汽湿度。要求是排气管中空气的参数要在饱和极限以上，因为在其他情况下经过分离的水可能使测量结果发生错误。

Kasprzyk [7] 简化了这个测量装置，他不是真空泵后，而是在空气压缩之前用低压湿度计来确定蒸汽混合以后空气的参数。低压时，空气的饱和温度是如此之低，

使得蒸发的水分可高达 10~20%，但没有达到饱和。因此，空气的冷却温度升高到 20℃。

量热计是放在汽轮机的外面。它的优点是简化了测量方法，缺点是蒸汽试样从气流中抽出，读数有误差。由此出发，空气的参数在与蒸汽混合之前和之后用湿度计测量。使用湿度计，特别是低压湿度计要求精细的维护，并使测量仪器灵敏。

确定冷凝式汽轮机排汽湿度的蒸汽—空气混合式量热计

根据上述所描写的确定蒸汽湿度的测量仪器，好象一台按照蒸汽/空气混合原理工作的仪器能满足所有的对一支用于汽轮机的排汽流中连续测量的测针所提出的条件。因此，要发展按此原理工作的测针并进行试验，它们直接从事蒸汽流中连续地吸出没有经过分离的试样，这个蒸汽试样与经过预热的空气混合，并提供水蒸汽—低饱和混合物，其参数可用湿度计或露点计来确定。新发展的测针的结构在图 2 中画了出来。



图 2 确定冷凝式汽轮机排汽湿度用的测针

- | | | |
|----------------|------------------------|---------|
| a 射汽抽气器 | f 测针头部 | l 套管 |
| b 挡板 | g 空气流量调节装置 | m 填料函 |
| c, r, t, p 的测点 | h 蒸发段 | n 电加热装置 |
| d 混合气排气管 | i 测量室, l 轻金属 | |
| e 夹板 | k t_2, t_1, p_2 的测点, | |
| | Plexiglas = 有机玻璃 | |

把所有的测量管道和装置装在轻金属套管 l 边。套管通过填料函 m 伸入排汽通道中。测量所需要的空气量从空间流经测针头部 f 的针阀 g 进入套管 l。在这个测针头部固定了一个用来加热流入的空气量的电加热器 n。空气的预热可防止空气在抽气器 a 的喷嘴中减压时，冷却到它所带进来的水的