

介绍一种简易精确的燃气轮机折合 转速的监测方法

李久星

[提要]由于燃气轮机的性能与它所处的大气条件有关。所以机的特性一般都整理成无因次参数来表示。舰船燃气轮机作陆上性能试验时,也以折合转速来定机的运行工况,以保证运行点的工况相似。本文介绍一种既简易又精确的折合转速监测方法。

主题词: 燃气机轮 测量方法

一、前言

压气机进气道中(到第一级动叶为止)任何一点的气流动压值与发生器转速、大气压力、大气温度都相关联。这个动压值能感受到这三个参数中任一参数变化。而这三个参数恰恰又是确定燃气发生器运行工况的最基本的三个参数。本监测就是基于这个原理而采用的。

压气机进口段沿壁的任一点上的壁面静压表压力的绝对值实际上就是沿壁气流的动压值。因此只要在压力排的玻璃管上读出水柱的升高值(因静压小于大气压,从物理概念上来讲它是负值、在压排的直观上水柱是上升的,转速愈高,动压愈大,静压表压力绝对值愈大,水柱升得愈高)就可知其折合转速。本监测方法的简单性已显而易见。本文讨论了本方法的精确性和本法对这三个参数中任一参数变化的灵敏度。并讨论了监测时的一些具体技术问题,还介绍一个应用实例。

二、基本原理

压气机进气道中的动压头与折合转速的对应关系,实际上就是对压气机特性、流动相似原理和伯努利方程的一个具体应用。

周知,气流中的动压 $\Delta P = \frac{1}{2} \rho V^2$

$$\text{即 } \Delta P = \frac{P}{2gR} \cdot \frac{V^2}{T} \quad (1)$$

对压气机进口来讲(从进气口到第一级动叶前),流道中任一点气流的动压是该点处气流的速度 V ,大气压力 P_0 和大气温度 T_0 的函数。因式中的静压 P 与大气压力差一个动压 ΔP ,

本文写作于1981年6月,收到日期:1986年9月16日

静温与大气温度一个动温 ΔT 。若把 $P = P_a - \Delta P$, $T = T_a - \Delta T$ 代入式(1)得:

$$\frac{\Delta P/P_a}{1 - \Delta P/P_a} = \frac{1}{2gR} \cdot \frac{(V/\sqrt{T_a})^2}{1 - (V/\sqrt{T_a})^2/\sqrt{2C_p}}$$

因 g, R, C_p 均为常数, 所以 $\Delta P/P_a \propto (V/\sqrt{T_a})^2$ 成正比,

即 $\Delta P/P_a \propto (V/\sqrt{T_a})^2$ 或 $\Delta P/P_a \propto M^2$ (2)

式(2)表明压气机进口段内的任一点气流动压与大气压之比, 即无因次动压 $\Delta P/P_a$ 与该点的折合速度 $V/\sqrt{T_a}$ 或 M 数的平方成正比。

又据压气机的特性, 在确定的大气压力和温度下, 对一台已经制造好的压气机来讲(即几何参数完全确定), 压气机流通部分任一点的速度与压气机的物理转速 n 是一一对应的, 即 $V \propto n$

于是式(2)可写成 $\Delta P/P_a \propto (n/\sqrt{T_a})^2$ (3)

也就是说压气机进口段内任一点气流的无因次动压与发生器的折合转速的平方成正比。从测量上来讲, 这动压头能感受发生器转速、大气压力和大气温度三参数中任一参数的变化。而这三个参数又是确定发生器运行工况的最基本的三个参数。

然而在压气机进气段内的任一点沿壁静压的表压力的绝对值实际上就是沿壁气流的动压头值。因其静压与大气压差一个动压头, 所以表压 $P_{e表} = -\Delta P$, $|P_{e表}| = \Delta P$ 。若用水为介质的压排来测, 负压力的水柱是升高的, 可不必考虑符号, 把它当动压头看待。

于是, 我们就可用壁面静压的表压来监测发动机的折合转速,

即 $P_{e表}/P_a \propto (n/\sqrt{T_a})^2$ 。

以往在测试中, 这一段流道中的壁面静压只用来测定燃气轮机进气室的阻力损失和发生器的空气流量, 现在经本文讨论还可用来监测折合转速。

上面的讨论是从不可压缩流体的伯利方程出发的, 这仅仅是为了讨论上的方便。考虑到压缩性的影响, 上述关系仍然成立。

把考虑压缩性影响的伯努利方程作二项式展开得:

$$\Delta P = \frac{1}{2} \rho V^2 \left(1 + \frac{M^2}{4} + \frac{M^4}{40} + \dots \right)$$

$$\therefore \frac{\Delta P}{P_a} = \frac{1}{2gR} \left(\frac{V}{\sqrt{T_a}} \right)^2 \left[1 + \frac{KgR}{4} \left(\frac{V}{\sqrt{T_a}} \right)^2 + \frac{(KgR)^2}{40} \left(\frac{V}{\sqrt{T_a}} \right)^4 \dots \right]$$

仍然可得 $\Delta P/P_a \propto (n/\sqrt{T_a})^2$

进气室的阻力损失并不影响本监测法对 $n/\sqrt{T_a}$ 的监测。

三、监测方法

在进口段的壁面上选定一静压测点, 把它引到水柱压力排的一根玻璃管上, 然后通过试车台上的试车, 对 $\Delta P/P_0$ 和 $n/\sqrt{T_0}$ 进行标定。因目前压气机设计计算的方法, 还不能很精确地建立转速和通流部分气流速度的关系。因此, 只能靠试验来标定。

根据相似原理, 只要保持无因次转速不变, 发动机就在相似的工况下运行。那末就我们的监测法来讲, 只要保持无因次动压不变, 就保持了工况相似。即无因次动压实际上就代表了无因次转速。

据我国的习惯, 通常不使用无因次参数, 而是把它折合到由设计者规定的标准大气条件下的参数来表示, 即用折合转速来表示:

$$n_{r,0} = \frac{\sqrt{T_{\text{标}}}}{\sqrt{T_0}} \cdot n$$

那末动压头就按下式折合

$$\Delta P_{r,0} = \frac{P_{\text{标}}}{P_0} \cdot \Delta P$$

$n_{r,0}$ 与 $\Delta P_{r,0}$ 的关系用试验标定。

四、测试时几个具体技术问题的讨论

1. 监测点位置的选择

据上所述, 压气机进口流场中任一点的气流动压头都可用来监测发动机的运行工况(折合转速)。虽然流场中各点的气流参数有一定差别, 但只要发动机的进口条件、几何参数、大气条件保持不变, 每一点的气流参数和转速的关系也就保持不变。所以测点可以任选, 其对应关系主要靠试验来确定。但是为了发动机能安全可靠地长期运行, 最好不要在进气道中设置任何探测传感器。在通道中长期放个速度传感器来测量动压头, 当然也是不合适的。

只要在进气道沿壁选一个较为合适的静压测点即可, 因为该流道中壁面静压的表压绝对值就是壁面气流的动压值。但是由于种种原因, 壁面的静压不是在所有点上都很稳定。不稳定的点不宜选为监测点, 应找一很稳定的点来监测, 这样的点还是很多的。

其次, 为了提高测试的灵敏度和精确度, 测点的位置以靠近零级导叶为好。因进气通道是收敛的, 愈到后面速度愈高。动压也就愈大。这样对应同样的大气温压或转速的变化, 其动压的变化也就愈大, 于是测试的灵敏度和精确度就高。例如, 在某工况、测点的动压为 1000mm 水柱, 若大气温度变化一度, 则动压头变化 1.6mm 水柱; 而在动压为 500mm 水柱的测点, 温度变化一度, 其动压头只变化 0.8mm, 灵敏度小一半。对转速也一样, 如某型机, 在静压为 1000 毫米的测点, 物理转速每变化 5 转/分, 动压头就有 1mm 水柱的变化。灵敏度已非常可观。在第一级动叶前的动压头有的可达 2000mm 水柱, 那灵敏度还能提高一倍。

2. 二次仪表一定要选以水为介质的压排,

因为用水柱来测压力的精确度和灵敏度目前还没有其他的压力表能和它相比，它既简单，又经济。量程上也允许，一般不会超过2000mm。

3. 进口前设置进气室后存在进气损失情况的讨论

一般来讲，燃气轮机装置前总有进气室。那么这时的壁面静压的表压力，就不是壁面气流的动压头了，而是进气损失与动压之和。但上述一一对应关系仍然成立。

现证明如下：

在有进气损失时，进口壁面静压的表压力为

$$P_{e表} = \Delta P + \delta P \quad \delta P \text{为阻力损失}$$

$$\text{而} \delta P = \lambda \cdot \Delta P \quad \lambda \text{为阻力损失系数}$$

只要进气室特性不变，即λ保持常数，于是

$$P_{e表} = (1 + \lambda) \cdot \Delta P = (1 + \lambda) \cdot \frac{1}{2} \rho v^2$$

$$\text{仍得} \quad P_{e表} \propto (n/\sqrt{T})^2$$

只要在有进气室的条件下，直接标定 $P_{e表}$ 与 $n_{r,0}$ 的关系即可。

4. 压排座标的设计和大气压力变化的修正问题

为了使测试人员或司机直接根据水柱的高度读出折合转速，以便及时调整运行工况，一般在压排水柱的座标上，根据标定得到的 $\Delta P_{r,0}$ 与 $n_{r,0}$ 的关系，标出各水柱高度时的 $n_{r,0}$ 。

但这里还存在大气压力的修正问题，因试验时的大气压与设计者规定的标准大气压总存在差异，而动压头也能感受大气压力的变化。

好在大气压力的变化范围是相当有限的，就拿上海地区来讲大气压力偏离标准大气压10330水柱，最大不超过200mm水柱。

按照这个变化范围，即使不对大气压的变化进行修正，其相对误差也只有2%。若动压头是500mm水柱，大气压力变化20mm水柱，其动压的变化量只是1mm水柱，误差是很小的。此外，一般来讲，在试车的几个小时内，大气压力几乎是没有什么变化的。

若要保证测量的更高精度，对大气压力的变化进行修正，那也不难。由于发动机在使用和试验时，往往只在有限的几个工况下运行，如：1.0；0.8；0.7；0.5工况等。这样便可在这几个主要工况下，直接在压排的读数座标上标出各不同大气压力下相对各工况时的动压头水柱高度，即折合转速值。刻度的设计实例见图2。

注意： $P_{e表}$ 与 $n_{r,0}$ 是两次方的关系，座标上工况之间的折合转速 $n_{r,0}$ 值不能线性内插。若座标要分得细，最好标定时标得细一点。

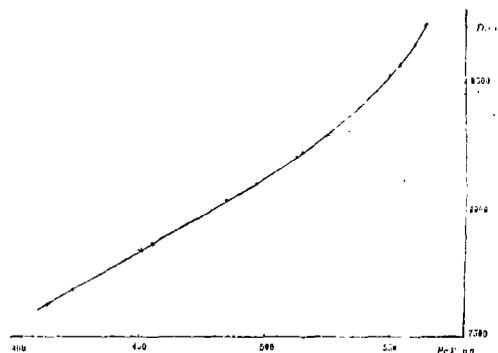


图1 本机的 $P_{e表}$ 对 $n_{r,0}$ 的关系曲线

五 总 结

综上所述，本文所介绍的折合转速监测方法，原理简单，使用方便，无需投资，既精确又灵敏。因为用水柱来测量压头是最精确最可靠的。

用本监测法，可使测试人员或司机直接读出折合转速，给试验工作带来极大方便。同时还可用来校核其他测试参数，使测试数据精确可靠。

由于水柱反应灵敏精确可靠，长期使用，还可监测发动机的性能衰退。如舰船燃气轮机积盐等原因引起的压气机性能衰退。

若进气温度不均匀，用单点监测，单点监测，其精确度受到影响。最好沿周多测几点，然后串联后读平均值，但标定时也应串联后标定。

六 使用实例介绍

在某型机双机并车试验中，取右机离流量管进口 510mm 处的右侧离水平直径 45° 位置上的壁面静压测孔作为折合转速的监测点。该处在 1.0 工况时静压的表压力为 -554mm 水柱。如取在进口机匣支杆截面上可达 1000mm 水柱。取在零级导叶前可达 2000mm 水柱。

图1是右机单机试车时测得的 $P_{c,表}$ 对 n_r 的关系曲线。其各测点落在一条光滑的曲线上，验证了本方法的可靠性。以后测试时，只要根据当天的气压和静压的表压值得出 $P_{c,表}$ ，即折合动压头。再据此曲线查得折合转速。

若要在车台上，不经过折算和查曲线直接读得折合转速，可把压排水柱的座标刻度设计成如图2所示即可。

图中用粗线标出在标准大气条件下，各工况对应的折合转速。

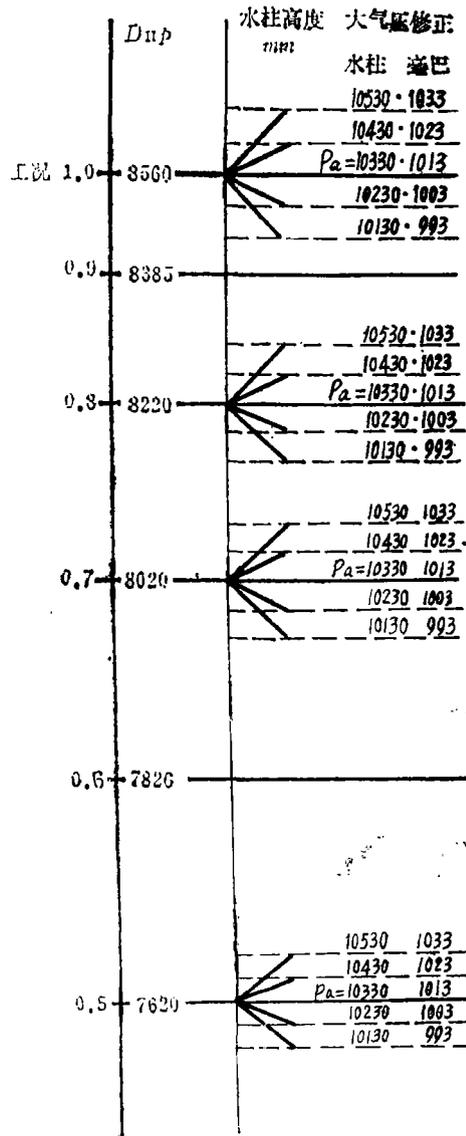


图2 压排水柱的座标刻度设计图

每个折合转速对应一个水柱高度，水柱高度以 mm 为单位，图中用细实线标出。

用虚线标出不同大气压下，保持各工况折合转速不变时，静压表压力的实际水柱高度。如：在1.0工况时，折合转速 n_r 是8560转/分；在10330水柱20大气压下，静压表压力值是 $-554mm$ ；在10530水柱的大气压力下为 $-565mm$ 水柱，直接在坐标上标出。这样开车时知道大气压后，就可以直接从水柱上监测折合转速。

简 讯

中国造船工程学会船舶轮机学术委员会 第三届学术年会在扬州召开

中国造船工程学会船舶轮机学术委员会第三届学术年会于1986年12月10日至14日在扬州市中国造船学会扬州学术活动中心召开。参加会议的有第二届船舶轮机学术委员会成员，各学组成员及论文作者。会议收到综合论文9地，学术论文84篇。前两天分别进行了大会发言和分学组论文宣读。

13日至14日召开了船舶轮机学术委员会第二届成员工作会议。轮机学术委员会主术顾宏中教授做了“船舶轮机学术委员会1986年工作总结”的报告。他说：1986年完成了下属7个学组的调整改组工作，聘任了254名第二届船舶轮机学术委员及各学组成员；除辅机学组“消防技术专题讨论会”因故推迟外，各学组都分别组织了一次学术活动；振动与噪声学组、船电学组的期刊《噪声与振动控制》、《船电技术》已坚持创办五年。顾宏中教授在谈1987年工作时说：船舶轮机委员会受中国造船学会的委托将于1987年11月4日至7日在上海举办“国际轮机工程学术会议”。学术活动的重点将以这次国际会议为核心积极筹备，认真组织，将这个会议开好。

会议还于学术活动的形式和内容如何适应改革的需要；如何开展高层技术决策咨询等问题进行了广泛讨论。

各学组对1987年的学术活动都分别做出了安排。

会议推荐篇论文参加“国际轮机工程学术会议”。

(齐连仲 供稿)

Synopsis

This paper discusses the major technical problems solved during the development of the first sawdust-fired fluidized-bed boiler in China, such as the selection of medium bed materials, the determination of fluidized-bed and suspended section wind velocity, the organization of combustion by stages, and boiler structural design. Operating experience has shown that the boiler operation is stable with a combustion efficiency higher than 99% being attained.

- 6. Soviet small capacity boilers

..... Translated by Huang Zhengxin (23)

MEASUREMENT AND TESTING TECHNIQUES

- 7. A simple and accurate method for monitoring gas turbine reduced speeds

.....Li Jiuxing (27)

Synopsis

Gas turbine characteristics are normally expressed in terms of nondimensional or reduced parameters, because the performance of a gas turbine depends on the atmospheric conditions under which it works. During shore testing, the working conditions of marine gas turbines are also set by using respective reduced speeds in order to bring into correspondence with their operational points. This paper introduces a simple and accurate method for monitoring reduced speeds.

- 8. The dynamic balance test on a test rig of a cantilever-type single disc flexible rotor by use of a three-circle method

..... Sun Guoweī (33)

- 9. Combustor liner wall temperature measurements for naval gas turbines

.....Wang shuxia, Ma Shaolu, Zhu Zuhong (38)

Synopsis

A brief description is given in this paper of the measurements of combustor liner wall temperature fields of a naval gas turbine during its start-up, acceleration, off-design operation as well as under maximum and normal load by use of temperature data acquisition system with a microprocessor serving as its main component. The measurement results have given a truthful picture of the dynamic variation characteristics of the liner wall high temperature sections following the adoption of a series of new cooling techniques. The paper has provided designers and operators with a solid basis for making a technical appraisal of combustor liners.

COMPUTING TECHNIQUES

- 10. Algebraic interpolation of multivariate functions and its use in axial-radial diffuser design