

高负荷透平特性计算的特点

石道中

(哈尔滨工业大学)

〔提要〕 本文指出在跨音速流动、大功率的情况下,用传统的一元流动理论计算透平特性的方法会出现较大的偏差,一些概念需相应完善。并提供了按一元和三元流动理论编制程序的计算实例。根据对计算结果与实测数据的比较和分析,表明按三元流动理论计算的结果比较符合实际情况。

主题词: 涡轮 计算方法 变工况

一、问题的提出

透平的特性是发动机的一项重要技术经济指标。而透平实际的性能,一般要在机器制成经过测试后才能确定。为了使所设计的透平特性能较好地满足实际运行的需要,往往还要修改后才能批量投产。因此,一台发动机的研制,不但耗资大,而且周期长。然而,应用变工况的理论分析和基于大量试验基础上的透平能量损失综合数据,有可能在透平的设计阶段就预算它的变工况性能,从而可有效地缩短试制周期和减少研制费用。

长期来,人们一直按一元流动理论估算透平的特性。这对于负荷不太高的亚音速流动的透平来说,基本上能满足生产实践的要求,但对于叶片较长(D/l 较小)、跨音速流动的高负荷透平,则需要探索更为准确的计算方法。因为叶片较长时,流动参数沿叶高的变化较大,当出现跨音速(指沿叶高同时存在亚音速和超音速)流动时,超音速流动部分的流量并不随出口流速的增大而增加,但亚音速流动部分的流量仍可继续增加。因此,即使平均直径处的出口马赫数为1时,通过该叶列的流量也并未达最大值。

图1为导叶出口气流速度沿其叶高的变化和通过该叶列的流量随出口气流速度变化的一个例子。曲线1、2和3分别为不同工况时导叶气流出出口速度沿叶高的变化,其中1、3分别为跨音流动的二个界限。曲线I、II分别为通过该叶列的流量随气流出口速度的变化,其中曲线I相应于一元流动的情况,即当平均直径处的出口气流速度达音速时,流量达最大值。曲线II相应于三元流动的情况,在跨音区内,当出口流速增大时,那些暂时还未达音速的各截面上的流量可继续增加,直至顶部出口流速达音速时,流量才达最大值。所以在跨音区域内,曲线II低于曲线I,并在 $M_2=1$ 处的差别最大。

二、计算与实测的结果

为了进行定量分析,在我们原来工作[2]、[8]的基础上,曾对三元流动理论的计算

程序作了大量的改进,使之能计算跨音速流动的高负荷透平的性能。以后又将此程序简化为一元流动理论的计算程序。在这两个计算程序中,采用了相同的计算损失的关系式和气出口偏转角的公式,即在航空及工业燃气轮机领域中得到广泛应用的安利和马西逊的综合关系式及其计算偏转角的公式[3]、[4],分别对两台有详细试验结果的燃气轮机进行了计算,即长春机车工厂2941.996千瓦(4000马力)机车燃气轮机和南京汽轮电机厂的23 000千瓦燃气轮机。

4000马力机车燃气轮机的透平共三级,其设计参数为:

流量	$G_0 = 26.5$ 公斤/秒	初温	$t_0 = 760^\circ\text{C}$
初压	$P_0 = 5.67$ 巴	转速	$n = 7900$ 转/分
终压	$P_2 = 1.064$ 巴	效率	$\eta^* = 0.897$

它是一台亚音速流动的透平。其特性的计算和试验数据的整理见图2。试验数据取自文献[7]。数据整理时,取燃烧室的压力损失系数 $\delta_R^* = 0.045$ 。

23000千瓦燃气轮机的透平为两级。所提供的设计参数为:

流量	$G_0 = 114.74$ 公斤/秒	转速	$n = 5100$ 转/分
初压	$P_0 = 9.69$ 巴	效率	$\eta^* = 0.885$
初温	$t_0 = 896^\circ\text{C}$		

该机为一跨音速流动的透平。其特性计算和试验数据的整理见图3。试验结果取自文献[9],图中曲线为对应于PG5301样机。该文献中将透平的特性曲线整理成 $\eta^* - 1/C_0$ 的关系,为便于比较,计算数据亦作了相应的换算(其中 C_0 —透平焓降所对应的理想速度)。

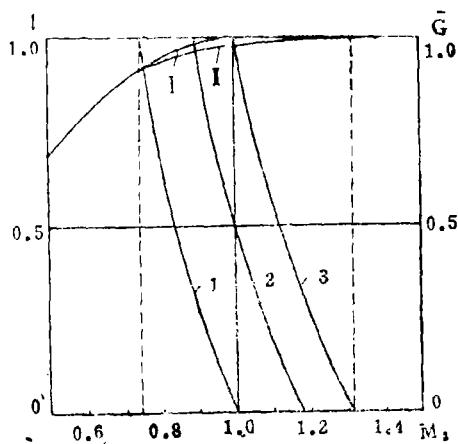


图1

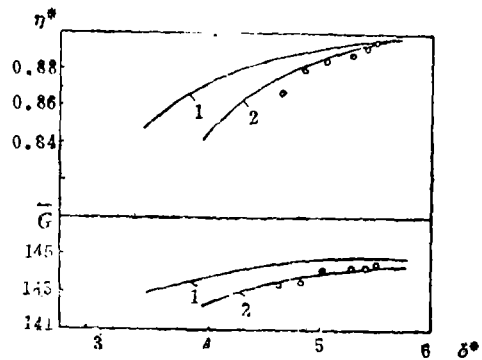


图2

1—按一元流动理论计算结果 2—按三元流动理论
计算结果 0—按测试数据整理结果

三、结果的分析

1. 按一元流动理论计算的通流能力略偏大,效率也稍偏高,这主要是由于平均直

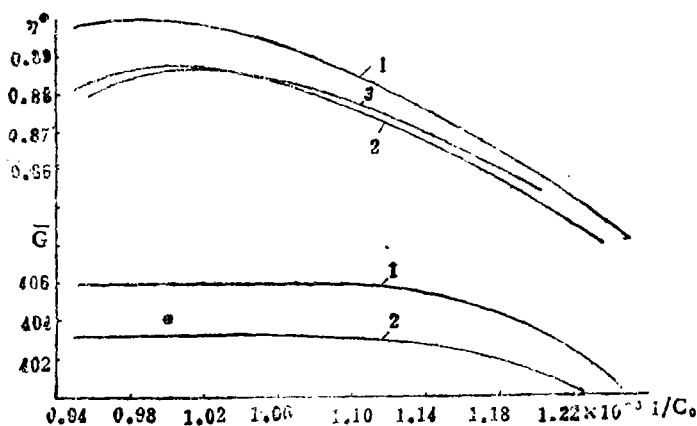


图3

1—按一元流动理论计算结果 2—按三元流动理论计算结果
 3—按测试数据整理结果 *—提供的流量

径截面处的流动较其它截面更有利。但在亚音速流动的条件下,其误差较小, D/l 越大,误差越小。一元流动理论的计算方法,大体上反映了亚音速流动透平变工况的实际情况。

2. 由对跨音速流动透平的计算结果表明,按一元流动理论计算的误差在亚音速区尚小,但在跨音速区的偏差很大,其主要原因为:

(1) 在跨音速区按一元流动计算的流量与实际的流量不符(见图1)。应着重指出,在跨音速区内透平的热力过程随流量的变化很敏感,流量的微小变化会导致热力过程的显著变化。

(2) 由图1所示,在跨音速区内,如按一元流动理论则存在有临界(阻塞)工况,一旦进入临界工况,如进一步增大负荷,则阻塞叶列前各列叶栅的流动基本不变,主要增加其后各列叶栅的负荷。如考虑实际流动的三元性质,则在跨音区内不会出现临界工况,但只有当流速最低的截面上气流速度达音速时才出现临界工况。因此,按一元流动理论所计算的各列叶栅的焓降分配就与实际情况有较大出入。不同的焓降分配,除了影响透平的特性外,还与各列叶栅的强度设计密切相关。

(3) 由于按一元流动理论的计算方法只计算平均截面上的流动参数,因此,它既不能考虑其它截面上流动的实际变化,也不能区分不同扭曲规律级的特性变化的客观差别。

3. 由于在跨音流动区内透平的热力过程随流量的变化十分敏感,这就决定了跨音速流动透平对其通流部分尺寸的要求必须十分严格,否则会影响发动机各部套间的匹配,对于多级透平来说,还会显著影响各级间的焓降分配,改变发动机的性能。

4. 按三元流动理论所计算的数据与试验值吻合较好。

四、结 论

1. 随着透平的容量不断增大和单级负荷日益增高,一元流动理论的计算方法越来越不能满足生产实践的要求。因此,采用三元流动理论计算透平的变工况性能,将是必然的发展方向。

2. 应以沿叶高各截面的最低出口流速达音速的流动(流量达最大值)定义为该叶列的临界流动,而不应把叶栅平均截面上出口马赫数为1时的流动定义为临界流动。据此,对于各叶列出现临界流动的膨胀比不再是常数,它主要与该叶栅的流动参数沿叶高分布的梯度和叶栅的径高比有关。

3. 跨音速流动透平通流部分几何尺寸的误差,对其特性,尤其是对各叶列间焓降的分配影响甚大。为此,应提高对这类透平叶栅的设计、制造、安装和装配的精度,以确保透平的性能。

(渠源沥 编辑)

参 考 文 献

- [1] Wu Zhong-hua: A general theory of three-dimensional flow in subsonic and supersonic turbomachines of axial radial and mixed-flow types. NACA TN-2604, 1952.
- [2] 王仲奇:《透平机械三元流动计算及其数学与气动力学基础》,机械工业出版社,1983.
- [3] D.G.Ainley and G.C.R.Mathieson: A method of performance estimation for axial flow turbines, ARC R&M2974.
- [4] J.Dunham and P.M.Came: Improvements to the Ainley-Mathieson method of turbine performance prediction, Trans. ASME, 1970.
- [5] Vinh-Hai Ngo and D.A.J.Millar: The design and performance prediction of axial flow turbines, Carleton University Report, No. ME73-3.
- [6] R.A.Novak: Streamline curvature computing procedures for fluid flow problems, Trans. ASME, 1977, No.4.
- [7] 长春机车工厂,4000马力燃气轮机车机组试验报告,1977.
- [8] 王仲奇、石道中、刘顺隆:用流线曲率法计算透平变工况性能以及可转导叶对机车燃气轮机牵引特性影响的研究,机械工程学报,第19卷第3期,1983.
- [9] 范懋谦:发电用燃气轮机的热力性能和调整试验的分析,中国机械工程学会第三届全国透平锅炉年会论文,1979.

SOME CHARACTERISTIC FEATURES OF TRANSONIC TURBINE PERFORMANCE CALCULATIONS

Shi Daozhong

(Harbin Institute of Technology)

Abstract

Under conditions of transonic flows and high unit capacity the traditional method for calculating turbine performance based on the one-dimensional flow theory will result in significant errors. Some old concepts must be revised accordingly. The calculating examples programmed on the basis of one-dimensional and three-dimensional flow theory are provided. The calculation results based on the three-dimensional flow theory are in better agreement with the experimental data.

Key words: turbines, characteristics calculation method