

借用优化概念构造多级轴流压气机 流场诊断方法*

华中理工大学

李士明*

清华大学

叶大均

【摘要】 提出一种诊断方法, 只要测量了多级轴流压气机的进出口流场及外端壁若干个静压值, 在不依赖于任何叶片排的冲角和落后角以及计算站的堵塞因子的经验系数或模型的情况下, 就能够诊断出多级轴流压气机的重要部位流场参数的径向分布。方法本身不受设计工况和非设计工况的限制。

主题词: 轴流式压缩机 流场 诊断 特性

1 引言

多级轴流压气机研制调试过程周期的减少和费用的降低以及实际使用中监控的实现都要求从少数易于测量的流场部位参数诊断出压气机中重要部位尽可能详细的流场流动状况。满足这一要求的流场诊断方法应该不依赖于流场中难以测量或目前没有把握测量的部位参数。仅从多级轴流压气机的进出口参数和外端壁静压这些即比较可靠又比较方便的测量参数出发, 不必要施行级间测量, 进行流场诊断, 是目前理想而又难度大的方案。另一方面, 目前用于多级流场计算的比较有把握且实用的方法是子午流场的计算。因此, 目前水平的诊断要依赖于子午流场的计算水平。然而, 子午流场计算结果要与实际相符, 在目前水平上, 必须依赖于给定每个叶片排的损失大小和落后角大小分布、以及每一计算站的堵塞因子这样 3 组经验数据。一些研究试图通过各种理论模型与子午流场一起迭代计算, 从而算出这 3 组数据, 如通过端壁边界层方法计算堵塞因子和端壁损失, 通过加入叶栅流面计算给出叶型损失、激波损失和二维落后角等。这些方法能够给出有参考意义的结果而且在一定范围内结果能实用, 但是, 在目前计算水平上, 有把握的计算结果必须依赖于取自于大量试验结果的 3 组经验数据。

从国内、外文献中, 没见到一种能够仅从多级轴流压气机进出口截面参数加上外端壁静压出发, 在不用关于叶片排的落后角和各计算站的堵塞因子的经验数据或模型的条件, 就能够在子午流场的框架内推算出多级压气机流场沿径向分布的方法。本文目的是探索提出这样一种方法、使得以后的多级压气机子午流场诊断在以上必须的 3 组数据中只用其中 1 组。

2 诊断原理

设研究的多级轴流压气机有 M 级, N 排叶片, 取 K 根流线采用流线曲率法进行子午流场计算, 压气机进出口截面上的总温、总压和气流角径向的分布及外端壁静压分别为测定。根据

* * 武汉市华中理工大学动力工程系 430074

这些条件, 我们得到 $2 \times K$ 个等式:

$$\sum_{i=1}^M \Delta T_i^*(l) = T_0^*(l) - T_1^*(l) \quad (l = 1, 2, \cdots, K) \quad (1)$$

$$\prod_{j=1}^N \sigma_j(l) = \sigma_T(l) \quad (l = 1, 2, \cdots, K) \quad (2)$$

其中, ΔT_i^* 为第 i 级的总温升。 T_0^* 和 T_1^* 分别为压气机出口和进口的总温, σ 为第 j 排叶片的总压恢复系数, σ_T 由压气机的总温总压确定。各叶片排的总压恢复系数由各个叶片排相应径向位置上的总压损失系数 $\bar{\omega}$ 求出, 而 $\bar{\omega}$ 是相应叶片排流场的函数, 即

$$\begin{aligned} \bar{\omega}(l) &= f_j \quad (\text{相应叶片相应位置的流场参数}) \\ (j &= 1, 2, \cdots, N; l = 1, 2, \cdots, K) \end{aligned} \quad (3)$$

一旦各级总温升 ΔT^* 、各级出口气流角 α , 各计算站堵塞因子被确定, 在当前广泛使用的流线曲率法子午流场计算水平上, 多级压气机的子午流场就由于子午流场方程组在给定测量条件下与(3)式联立确定下来。其中, 各计算站堵塞因子通过外端壁测量的静压值采用文献[1]中方法与子午流场迭代计算出来。因此, 子午流场的解确定了下列函数关系:

$$\begin{aligned} \sigma_j(l) &= \sigma_j(\Delta T_i^*(l), \alpha(l), P_q) \\ (j &= 1, 2, \cdots, N; i = 1, 2, \cdots, M; l = 1, 2, \cdots, K; q = 1, 2, \cdots, Q) \end{aligned} \quad (4)$$

其中, P_q 是第 q 站外端壁的静压测量值。

经过以上处理, 我们提出, 满足给定测量条件下压气机各级的子午流场的解可以由本文以下列出的多约束多变量非线性最优化问题确定:

优化变量: 各级总温升 $\Delta T_i^*(l)$ 、各级出口气流角 $\alpha(l)$ 、各叶片排总压恢复系数 $\sigma(l)$; $i = 1, 2, \cdots, M; l = 1, 2, \cdots, K; j = 1, 2, \cdots, N$; 共 $2 \times K \times M + K \times N$ 个变量。

约束条件为(1)、(2)、(4)式, 共 $2 \times K + N \times K$ 个等式约束。

优化目标: 压气机各叶片排流动熵增最小, 为方便取各叶片排流动总压损失最小, 即

$$\min \sum_{j=1}^N (1 - \bar{\omega})^2 \quad (5)$$

其中 $\bar{\omega} = \frac{1}{r_F - r_H} \cdot \frac{1}{\rho} \int_{r_H}^{r_F} \rho \sigma_r dr$, r_F 和 r_H 分别是第 j 排叶片进口机匣和轮毂半径, ρ 是该排叶片进口密度, $\bar{\rho}$ 是 ρ 沿径向的平均值。

应该指出, 根据目前理论发展水平, 可靠的损失计算方法仍然是经验模型, 即式(4)的原形式(3)目前需由试验数据给出, 这是本文唯一用经验数据的地方。尽管如此, 这仍然比目前必须依赖的3组数据少了2组, 而且, 只要(3)式适用各运行工况, 本文理论方法本身不受任何工况限制。

3 方法实施中的几个问题

由于以上优化问题的优化变量和约束个数多, 对于一个级数为两级或三级以上的压气机进行诊断, 就必须计算一个中大型的非线性优化问题, 计算机时较长。为了不改变这一最优化问题的解同时又能简化问题, 将(4)式代入(2)式和(5), 这样, 变量个数由原来 $2 \times K \times M + K \times N$ 个变为 $2 \times K \times M$ 个, 约束条件为(1~2)式, 为 $2 \times K$ 个等式约束。这一简化的优化问题显然与原优化问题的解一致。但是, 计算时间由于优化变量减少和约束个数减少将会大大缩

短。

由于任何一个函数 $g(x) = 0$ 等式等效于下面两个不等式: $g(x) \leq 0$ 和 $-g(x) \leq 0$, 这样, 以上优化问题可以表示成下面所示的非线性优化问题求解的规范化形式

$$\min f(x_1, x_2, x_3, \cdots, x_n) \quad g_i(x_1, x_2, x_3, \cdots, x_n) \leq 0$$
$$(i = 1, 2, \cdots, 4 \times K)$$

(6)

$n = 2 \times M \times K$ 。这种规范化优化问题解法很多。文献[2]的工作实现了一种使用可靠、计算速度快、收敛性好的通用工程优化方法计算系统, 但没有公布源程序。我们在其所述原理基础上, 开发了一套优化系统, 这套系统用可行方向法解非线性约束问题, 用 Fletcher- Reeves 法求非线性无约束问题, 用单纯形法求线性最优化问题(详见文献[3])。本文采用这套优化计算系统进行诊断计算。

多级轴流压气机流场采用子午流场流线曲率法计算程序^[4]。为了与所提约束条件(1~2) 式配合, 同时, 考虑到目前各种损失试验数据基本上未将掺混重新分布作用分开, 在本文计算中, 采用零掺混子午流场计算。实际计算中初始 ΔT_i^* 和 α 的给定必须尽可能靠近运行工况点的估算值, 这样能保证局部最优解是唯一的解且是与真实情况相符合的解。

4 计算结果分析

文献[5] 是两台 Pratt & Whitney 公司研究低展弦比作用的三级轴流压气机设计报告。首先用其中低展弦比压气机验证端壁静压对堵塞因子的诊断功能。开始输入设计损失、各级压比、各级出流角, 校核原设计。结果是当堵塞因子在一些主要计算站取值为表 1 中栏目“原值”时, 我们的设计结果与原设计结果^[5]符合得十分一致。因此, 并根据文献[5] 所述的计算方法, 可以认为表 1 中的“原值”即是文献[5] 设计时的取值。随后, 以上计算输入数据作如下改变, 即堵塞因子输入初始值各站均为 1. 0, 输入各计算站外端壁的设计静压值, 其它输入参数不变。计算中, 子午计算中加入端壁静压求堵塞因子的迭代过程, 结果是诊断的各相应计算站堵塞因子值与原设计值惊人接近, 如表 1, 这表明本方法中采用的端壁静压诊断堵塞因子的功能是可靠的。

表 1 3S1 压气机堵塞因子诊断结果

原值	0. 9922	0. 9730	0. 9730	0. 9257	0. 9259	0. 9681	0. 9582
诊断值	0. 9922	0. 9730	0. 9749	0. 9227	0. 9222*	0. 9654	0. 9563
原值	0. 9429	0. 9424	0. 9466	0. 9462	0. 9247	0. 9247	0. 9203
诊断值	0. 9394	0. 9394	0. 9465	0. 9464	0. 9226	0. 9223	0. 9191

* 最大相对误差 0. 40%

文献[6] 是一个 5 级核心压气机的前 3 级设计和总体性能试验报告。为了对压气机设计工况流场(设计工况下各级流场匹配很差^[6]) 进行诊断, 鉴于文献[6] 中没有流场测量参数, 认为试验数据的进口气流参数被换算为设计的进口参数, 进而由设计点的试验特性计算出压气机出口的总温、总压, 出口流场沿径向分布近似认为均匀, 且出口气流角近似为零, 认为取设计时堵塞因子计算是一个好的近似。损失的变工况计算按文献[7] 计算, 其中, 等效扩散因子的设计值和动量损失厚度的设计值按原设计结果推算出。在以上条件下用本文优化方法诊断流场, 第 1 级转子相对进气角沿径向几个位置的值如表 2。

诊断结果表明实际流动在设计转速下气流角均较设计大,进口导叶需正向转动进行调整。试验表明^[6],进口导叶正向转动达到较理想特性。这表明本文诊断定性上的合理性,诊断是可

表 2 NASA-TP-2597 第 1 级转子进气角(°)诊断结果

原 值(°)	67.1	64.7	60.9	57.7	54.5	50.7	48.4
诊断值(°)	71.3	67.5	63.1	59.9	57.1	54.2	52.7

行的。诊断结果与设计的比较所反映的调整角度与进口导叶实验得到的最佳调整角度 15°^[6]有较大差别。其它转子相对进气角在定性和定量上分别表现出类似第 1 级转子的情形。我们认为,由于本文的诊断方法没有作出比所用的原理和方法更多的假定,对进出口实际参数的推估不致于引起这样大的误差,所以分析认为这一差别主要是由本文引用的损失模型所造成的。从诊断方法本身来看,更加合理的变工况损失模型也是下一步要研究的重要课题。同时,也需要取得合适的完整的验证这一方法的实验数据以对该方法作更多的验证。

5 小 结

提出了一种在测量多级轴流压气机进出口流场及外端壁静压的条件下对流场的诊断方法,此方法通过子午流场计算和一优化计算过程完成,整个方法不需关于叶片排的冲角和落后角以及各计算站的堵塞因子的任何经验数据或模型。子午流场计算由目前必须用 3 组数据或模型变为只用 1 组关于叶片排的损失数据或模型。此方法本身不受变工况的限制。计算结果初步表明了本方法的可行性和合理性。寻求更加合理的变工况损失模型以及取得完整的验证这一方法的实验数据对本方法进行验证是一项重要的课题。

参 考 文 献

1 Hearsey R M. Computer Program for Single Stage Axial Compressor Test Data Analysis. Theory, Descriptions and Users Instructions, 1974, 1

2 Madsen L E, Vanderplaats G N. COPEX- A Fortran Control Program For Engineering Synthesis. NPS69-81-003, 1981

3 李士明,叶大均. 一种广泛适用的最优化计算机计算程序. 清华大学热能系资料, 1991

4 Li S M, Chen M Z. A Simple and Unified Model for Spanwise Mixing in Multistage Axial Flow Compressors. International J. of Thermal Science, 1992, 1(2)

5 Burdsall E A, Canal E Jr, Lyons K A. Core Compressor Exit Stage Study: I- Aerodynamic and Mechanical Design. NASA CR- 159714, 1979

6 Steinke R J. Design of 9.271- Pressure- Ratio Five- Stage Core Compressor and Overall Performance for First Three Stage. NASA TP- 2597, 1986

7 Swan W C. A Practical Method of Predicting Transonic Compressor Performance. J. of Eng. for Power, 1961: 322

(责任编辑 魏星禄)