

级间引气条件下轴流压气机特性预测方法

明 亮¹, 冯昊天¹, 刘家兴², 郑培英², 王志涛^{1*}, 张 轲²

(1. 哈尔滨工程大学 动力与能源工程学院, 哈尔滨 150001; 2. 中国航发沈阳发动机研究所, 沈阳 110015)

摘要: 为了确定级间引气对多级轴流压气机特性的影响, 便于在燃气轮机整体性能分析时简化引气模型, 开展级间引气条件下轴流压气机特性预测方法研究, 通过级间匹配模型求解引气位置压力、温度和引气位置上下游的特性, 根据引气后的上下游重新匹配确定受引气影响的压气机特性线。结果表明: 对 5 级压气机在换算转速为 1.0、0.7 和 0.5 倍设计转速情况下分别进行了预测, 得到的特性线与压气机原特性线相比有明显变化。在压比-流量特性图中, 引气后的等换算转速线整体位于原特性线之上, 压气机压比提高, 在小流量时提高较小, 在大流量时提高较大, 并且提高效果随引气流量增加逐渐明显; 在效率-流量特性图中, 引气后的等换算转速线与原特性线交于一点, 在该点左侧效率因引气而降低并随着引气流量增大而进一步降低, 在该点右侧则刚好相反。采用此 5 级压气机的抽放气特性对性能预测模型进行了验证, 引气位置总温的相对误差不超过 1%, 总压的相对误差不超过 2%。

关键词: 多级轴流压气机; 级间引气; 级间匹配; 特性预测; 性能分析; 燃气轮机

中图分类号: V231.3

文献标识码: A

doi: 10.13477/j.cnki.aeroengine.2023.05.005

Prediction Method of Axial Flow Compressor Characteristics under Interstage Bleed Conditions

MING Liang¹, FENG Hao-tian¹, LIU Jia-xing², ZHENG Pei-ying², WANG Zhi-tao^{1*}, ZHANG Ke²

(1. Engineering College of Power and Energy, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China;

2. AECC Shenyang Engine Research Institute, Shenyang 110015, China)

Abstract: The research on the prediction method of axial flow compressor characteristics under the interstage bleed conditions was carried out to determine the influence of interstage bleed on the characteristics of multistage axial compressors and simplify the bleed model in the overall performance analysis of gas turbines. The pressure and temperature of the bleed position and the characteristics of upstream and downstream of the bleed position were obtained by the interstage matching model. The compressor map affected by the interstage bleed condition was determined by rematching the characteristics of upstream and downstream of the bleed position. The characteristics of the five-stage compressor under the interstage bleed condition were predicted at 100%, 70%, and 50% corrected speed respectively. The results show that the predicted compressor map is significantly changed compared with the baseline. In the pressure ratio-flow characteristic map, the predicted constant corrected speed lines after bleed are generally above those of the baseline. The compressor pressure ratio increases, with a small increase at low flow rate and a significant increase at high flow rate, and the lifting effect grows with the increase of the bleed flow rate. In the efficiency-flow characteristic map, the predicted constant corrected speed line intersects with that of the baseline at a point. On the left side of the point, the efficiency decreases due to the bleed and further decreases with the increase of the bleed flow rate, while on the right side of the point, the opposite is true. The prediction method was verified by the characteristics of the five-stage compressor under the interstage bleed conditions. At the bleed position, the relative error of the total temperature is less than 1%, and the relative error of the total pressure is less than 2%.

Key words: multistage axial compressor; interstage bleed; interstage matching; characteristic prediction; performance analysis; gas turbine

收稿日期: 2023-06-15 基金项目: 航空动力基础科研项目资助

作者简介: 明亮(1988), 男, 博士, 副教授。通信作者: 王志涛(1981), 男, 博士, 副教授。

引用格式: 明亮, 冯昊天, 刘家兴, 等. 级间引气条件下轴流压气机特性预测方法[J]. 航空发动机, 2023, 49(5): 34-39. MING Liang, FENG Haotian, LIU Jiaxing, et al. Prediction method of axial flow compressor characteristics under interstage bleed conditions[J]. Aeroengine, 2023, 49(5): 34-39.

0 引言

对压气机采用级间引气技术已经逐渐成为航空发动机维持稳定工作状态的必然需要,引气通常源自压气机端壁,用于冷却高温部件、充当机舱气源、预防旋转失速、加强间隙密封等^[1]。然而,如果在进行压气机设计时没有充分考虑级间引气,将会导致各项性能(特别是喘振裕度)远离设计值^[2]。

关于级间引气对轴流压气机的性能影响,国内外研究人员进行了大量的建模、仿真和试验研究。Lorenzo等^[3]在考虑了级间引气的前提下建立了能够预测压气机性能的1维逐级模型;Samuel等^[4]建立了考虑可调静叶和引气的动态性能预测半经验模型;Luca等^[5]通过建立新模型研究了级间引气造成的气动弹性变化;陈业辉等^[6]研究了不同引气量对高压压气机的影响,发现高压压气机的流量、压比、效率在引气量增大后进一步升高;Abdelghany等^[7]计算了高涵道比涡扇发动机中高压压气机的抽气量大小对发动机各性能指标的影响;陈哲等^[8]对带有5个引气槽的多级轴流压气机流场分布进行了研究,发现引气对下游叶栅的压力分布有明显影响;姚丁夫等^[9]在转子端壁、静子前缘、静子叶背处分别进行引气,揭示了3种条件下压气机压比、效率变化规律;Liu等^[10]分别在进口流量系数不变和引气下游流量系数不变的2种情况下对压气机进行了试验;Peltier等^[11]对2种引气出口结构的气动特性进行了数值研究,并用详细的试验结果进行了验证,对压气机中流动现象进行了解释;丁骏等^[12]对级间引气的不同计算方法进行了研究比较,认为在工程中对总体特性进行分析时源项法能得到足够精确的结果,并节省一定时间;赵子恒等^[13]认为对于重燃多级轴流压气机的流场而言,周向槽引气的计算方法要更为合理;晏松等^[14]、Chen等^[15]、Wellborn等^[16]、Merchant等^[17]和Dobrzynski等^[18]将引气作为一种边界层流动控制的手段,对采用“边界层抽吸”的方法吸除叶顶低能流体后的压气机流场进行了分析讨论;Grimshaw等^[19]考虑了非均匀引气对轴流压气机稳定性的影响,并进行了单级压气机试验。

目前对于级间引气的研究多通过数值计算或试验进行,一方面需要大量的真实几何数据,另一方面比较耗费资源,虽然也有一些关于引气模型的研究,但仍缺少对压气机性能变化具有通用性的预测方法。

本文从压气机变工况级间匹配的角度出发,研究级间引气对压气机特性曲线的影响规律,提出一种级间引气条件下轴流压气机特性的预测方法。

1 未引气工况级间匹配模型

文献[10,13]中的数值计算及试验结果分析均证明:级间引气对压气机流场的影响在上游方向难以传递,引气量的变化也难以改变上游转子流场的展向分配,引气主要通过影响下游的方式改变压气机性能。基于这一现象,本文对于压气机内部从几乎未受影响和受到较大影响2个区域分别进行考虑,以结构较为简单的单轴燃气轮机为例,级间匹配模型系统站位如图1所示。根据级间引气的位置在代表压气机进口的截面1和代表压气机出口的截面2之间新添加1个截面11,通过对截面11和2个区域的计算可以获得预测引气后压气机特性所需要的数据。

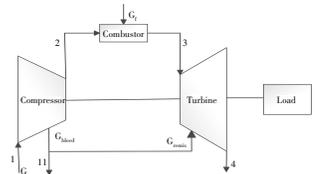


图1 级间匹配模型系统站位

1.1 未引气工况参数求解

以截面1、11间的区域为例,这部分的结构与1台压气机类似,也由某几级组成,并且作为整台多级轴流压气机的一部分,其内部各叶片的几何进口角与气流的进气角接近,气流能够顺利地流入叶栅通道,因此引气位置之前的几级在独立之后仍然能够满足作为压气机的气动要求。基于这一前提,将截面11前、后2部分均视为新的压气机,并且具有压比和效率的特性,在下文中分别用压气机A、B代表。

在压气机的某个给定工况下,对于添加截面11后的新模型,压气机的进口总压 P_1^* 、出口总压 P_2^* 、进口总温 T_1^* 、出口总温 T_2^* 、进口流量 G 、压比 π 、等熵效率 η 应均为已知,而未知量包括截面11的总压 P_{11}^* 、总温 T_{11}^* 及压气机A、B的压比 π_A 、 π_B 和等熵效率 η_A 、 η_B ,共6个未知量。

压气机A、B的压比可表示为

$$\pi_A = P_{11}^*/P_1^* \quad (1)$$

$$\pi_B = P_2^*/P_{11}^* \quad (2)$$

压气机A、B的等熵效率、压比应该满足

$$T_{11}^* = T_1^* + \frac{T_1^*}{\eta_A} \cdot (\pi_A^{\frac{k-1}{k}} - 1) \quad (3)$$

$$T_2^* = T_{11}^* + \frac{T_{11}^*}{\eta_B} \cdot (\pi_B^{\frac{k-1}{k}} - 1) \quad (4)$$

式中: k 为绝热指数。

将上述各方程联立,代入已知变量,只通过未知量表达方程

$$\begin{cases} \pi_A = f_1(P_{11}^*) \\ \pi_B = f_2(P_{11}^*) \\ \eta_A = f_3(T_{11}^*, \pi_A) \\ \eta_B = f_4(T_{11}^*, \pi_B) \end{cases} \quad (5)$$

此时,对于6个未知量存在4个方程,根据线性方程组解的判定定理可知,如果想求得全部未知量,需要给出更多方程或者将某个未知量转化为已知量。对于该方程组的求解,本文参考Rick等^[20]的数值计算结果,引入多变效率来增加方程数,并对 T_{11}^* 和多变效率做出假设。

多变效率是评价1台压气机气动专业水平的重要指标,当压气机将气体从 P_1^* 压缩到 P_2^* 时,多变效率等于压气机消耗的多变压缩功与实际消耗功之比^[21]

$$\eta_{\text{pol}} = \frac{h_{\text{pol}}}{h_{\text{tot}}} = \frac{\frac{m}{m-1}R(T_2^* - T_1^*)}{\frac{k}{k-1}R(T_2^* - T_1^*)} \quad (6)$$

式中: h_{pol} 为压气机消耗的多变压缩功; h_{tot} 为压气机实际消耗功; R 为气体常数; m 为多变过程指数

$$\frac{m}{m-1} = \frac{\ln(P_2^*/P_1^*)}{\ln(T_2^*/T_1^*)} \quad (7)$$

多变效率与等熵效率之间的关系为

$$\eta = \frac{(P_2^*/P_1^*)^{\frac{k-1}{k}} - 1}{(P_2^*/P_1^*)^{\eta_{\text{pol}} \frac{k-1}{k}} - 1} \quad (8)$$

在此基础上,关于模型提出2点假设:

(1)假设多级轴流压气机每级的总温增加量是相同的,也就是压气机内的总温在每级之间线性改变,每级的温升 ξ 为

$$\xi = (T_2^* - T_1^*)/\chi \quad (9)$$

式中: χ 为压气机总级数。

则截面11的总温为

$$T_{11}^* = T_1^* + n\xi \quad (10)$$

式中: n 为截面11前的级数。

(2)假设多级轴流压气机内部每级的多变效率相同,则对于压气机和压气机A、B

$$\eta_{\text{pol}} = \eta_{A,\text{pol}} = \eta_{B,\text{pol}} \quad (11)$$

根据以上各式,可以在压气机某一给定的工况下确定截面11的参数以及压气机A、B此时的匹配特性。

1.2 级间匹配模型验证

准确的压气机A、B特性曲线是后续对引气条件下压气机特性进行预测的重要依据,因此有必要对级间匹配模型的计算结果进行验证。本文以5级压气机为例,对该压气机换算转速为1.0和0.7的部分工况进行验证,通过各工况的设计数据利用级间匹配模型算得截面11参数,并与数值计算得到的截面11参数进行对比。

由于该压气机在设计时未确定级间引气的位置,因此需要选择截面11的位置。事实上,虽然本文提出级间匹配模型的目的是研究引气条件下的压气机特性,但是该模型可以对多级轴流压气机内任意2级间的截面参数进行求解,在对压气机进行其它研究时,如有需要也可以应用此模型。本文将截面11的位置确定在压气机第3、4级之间,换算转速为1.0、0.7时的计算结果和相对误差分别见表1、2。其中下标m代表级间匹配模型的计算结果,s代表数值计算结果; e 为相对误差。

表1 换算转速为1.0时的计算结果及相对误差

序号	p_m/Pa	p_s/Pa	$e/\%$	T_m/K	T_s/K	$e/\%$
1	128580	126300	1.81	310.78	307.9	0.94
2	124781	123000	1.45	307.86	305.5	0.77
3	120751	119300	1.22	304.91	303.8	0.36
4	118588	118000	0.50	303.36	302.5	0.29
5	113336	115000	1.45	299.74	300	0.09

表2 换算转速为0.7时的计算结果及相对误差

序号	p_m/Pa	p_s/Pa	$e/\%$	T_m/K	T_s/K	$e/\%$
1	114972	113950	0.90	300.01	298.8	0.41
2	114218	113100	0.99	299.32	298.6	0.24
3	111674	111400	0.25	297.25	297.3	0.02
4	109114	109300	0.17	295.29	295.4	0.04
5	106118	107300	1.10	293.11	293.6	0.17

从表中可见,在2种换算转速下,该压气机在各工况的级间匹配模型计算结果与数值计算结果均较为接近,其中总温 T_{11}^* 的相对误差都不超过1%,总压 P_{11}^* 的相对误差最大不超过2%,因此可以认为使用级间匹配模型计算截面11参数是可行的,在此基础上算出的压气机A、B特性曲线也是可信的。

2 考虑引气的特性预测方法

2.1 特性预测流程

级间引气能够通过上游、下游工况点的变化对压气机的特性产生影响,因此本文通过预测新工况下压气机A、B的工作点匹配提出一种能够预测压气机引气后特性的方法。

在之前的很多数值计算和试验研究中,由于将研究对象视作独立的部件,往往会在保持背压不变的条件下对压气机添加引气,这样便于观察和分析压气机内部的流动规律,然而此时级间引气会同时让上游、下游的流量发生变化,这种情况会导致定性分析的诸多不便,例如:压气机新工况的进口流量不容易直接预测,而需要通过测量获得;引气的下游位置会受到进口流量变化和级间引气的共同影响,不便于深入研究。因此,本文从燃气轮机整机性能分析的角度出发,重点考察引气条件下压气机特性曲线的变化,基于控制变量的思想提出一种新的研究方案,即在对原压气机添加引气的同时保持进口流量不变,通过压气机级间端壁引出的气体流量为进口流量的给定百分比,在实际的整机环境下,该流量大小可以根据引气的具体用途确定(例如用作涡轮中冷却掺混时通过涡轮热力过程计算)。

在进口流量不变的条件下,以压比-流量特性图为例,本文在某一工况下根据计算得到的引气后特性可以确定1个新工况点,由于流量相同,新工况点将会在原工况点的正上方或正下方,对于某一引气流量而言,在新特性线上将会存在工况点与原特性线上的点一一对应,这种对应关系将会与保持背压不变添加引气的情况下不同。在同一换算转速下,选择足够多的原工况点进行计算可以确定相同数量的引气后工况点,连接这些点并通过多项式拟合在一定范围内延长即可获得某一引气流量下的新特性线,由于是相同工况的同一物理过程,这条新特性线应该与其它研究方案得到的特性线相同,因此本文提出的新方案可以在得到正确结果的前提下简化引气研究,便于定性分析。

上文中已提到,级间引气对上游方向流场的影响不明显,即与压气机B相比,压气机A的特性受到级间引气的影响较小,可以忽略。由于 P_{11}^* 作为截面11的总压,既相当于压气机A的出口总压,又相当于压气机B的进口总压,因此 π_A 和 π_B 应满足

$$\pi = P_2^*/P_1^* = \frac{P_2^*}{P_{11}^*} \cdot \frac{P_{11}^*}{P_1^*} = \pi_A \pi_B \quad (12)$$

在进口总压 P_1^* 和进口总温 T_1^* 不变、压气机A的特性视作不变的前提下,引气后的截面11参数也应该保持不变,此时有

$$\pi' = P_2^{*'}/P_1^* = \frac{P_2^{*'}}{P_{11}^*} \cdot \frac{P_{11}^*}{P_1^*} = \pi_A \pi_B' \quad (13)$$

式中: $P_2^{*'}$ 为引气后压气机出口总压; π' 为引气后压气机压比; π_B' 为引气后压气机B压比。

压气机B特性发生变化的主要原因是级间引气导致其进口流量改变,引气后的压气机B工作在流量为 G' 的工况点上, G' 满足

$$G' = G - G_b \quad (14)$$

式中: G_b 为引气流量。

因此, π_B' 可以通过以下2种方法获得:

(1)如果在级间匹配模型中已经通过相同换算转速下的多个工况点确定了对应的压气机B工况点,并通过连接这些点得到了压气机B的压比-流量特性线,则可以直接在特性线上通过插值查找与流量 G' 对应的压比 π_B' ,并代入式(13)计算 π' 。

(2)如果在级间匹配模型中只进行了1次计算,而没有将其它工况点作为输入,则对于每个流量为 G 的工况点而言,只需要先在已知的压气机特性图上通过插值确定进口流量为 G' 时的压比和效率,再根据这些数据改变级间匹配模型的输入,此时模型输出的压气机B压比就是 π_B' ,将 π_B' 代入式(13)中计算得到的 π' 就是压气机进口流量为 G 时引气后的压比。这种方法是针对特定工况的快捷“点对点”计算,在对设计点进行预测时较为简便。

虽然引气后压气机B的效率 η_b 也可以采用上述方法获得,但由于压气机效率与压比的情况不同,其并不能根据 η_A 、 η_b 的简单表达式直接求解,因此关于引气后压气机效率 η' 的计算应该在最后进行。为了对级间引气条件下压气机的效率和消耗的压缩功进行更精确的预测,本文参考文献[21]中的修正方法,通过主流流量和引气流量的加权平均计算等熵效率

$$\eta' = \frac{\text{主流等熵压缩功} + \text{引气等熵压缩功}}{\text{主流实际消耗功} + \text{引气实际消耗功}} = \frac{G' T_1^* [(\pi')^{\frac{k-1}{k}} - 1] + G_b T_1^* (\pi_A^{\frac{k-1}{k}} - 1)}{G' (T_2^{*' - T_1^*) + G_b (T_{11}^* - T_1^*)} \quad (15)$$

式中： T_2^* 为引气后压气机出口总温，可由 π_B' 和 η_B' 计算

$$T_2^* = T_{11}^* + \frac{T_{11}^*}{\eta_B} \cdot \left[\left(\pi_B' \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] \quad (16)$$

本文对引气后压气机压比和效率的预测方法流程如图2所示。

2.2 预测结果及讨论

仍然以5级压气机为例，根据设计数据采用本文提出的预测方法对该压气机换算转速为1.0、0.7和0.5的特性线进行引气预测，每个工况点的引气流量选为进口流量的1.5%和3%。该压气机特性线与引气后的预测特性线如图3、4所示，其中压比、效率和换算流量均采用设计点数据进行归一化。

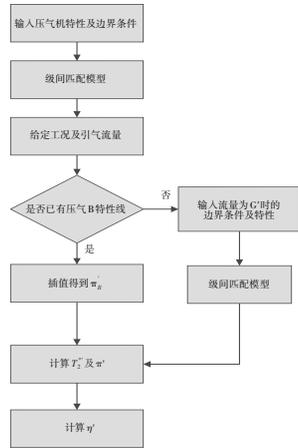


图2 对引气后压气机压比和效率的预测方法流程

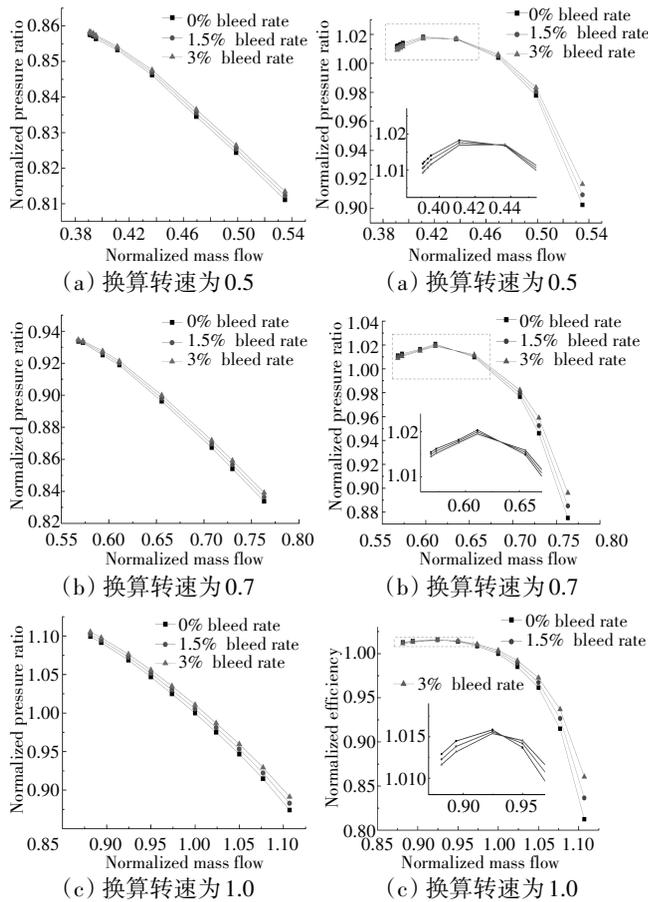


图3 压比预测结果

图4 效率预测结果

从图中可见，本文预测得到的特性线与压气机原特性线相比有明显的变化。根据预测得到的结果，在

压比-流量特性图中，引气后的等换算转速线整体位于原特性线之上，在近失速点附近压比增加量较小，而流量较大的工况压比增加较为明显，并且当百分比引气流量变大时，压比的增加量也随之变大；在效率-流量特性图中则情况不同，引气后的等换算转速线与原特性线会交于一点，在该点左侧效率因引气而降低并随着引气流量增加而进一步降低，在该点右侧则刚好相反，在3个换算转速下该交点都位于峰值效率点的附近，但并不重合，因为本文先计算压比后计算效率，所以对于该交点的确定方法尚不清楚。

3 结论

(1) 本文建立的1种压气机级间匹配模型，可以对多级轴流压气机内任意2级间的截面参数进行求解，通过5级压气机的数据进行验证，截面的总温相对误差不超1%，总压相对误差不超2%，将该模型应用于级间引气还可以求解引气位置上下游的特性。

(2) 采用本文提出的一种级间引气条件下轴流压气机特性预测方法可以只根据压气机的部件特性图预测在某一引气流量下特性图的变化。在燃机总体性能分析中应用此方法，可以将级间引气对压气机的影响通过特性图体现，而无需单独添加引气模块。

(3) 级间引气可以使压气机压比提高，在小流量时提高较小，在大流量时提高较大，并且提高效果随引气流量增加逐渐明显；级间引气对压气机效率的影响规律随峰值效率点不同而略有区别，整体趋势是在小流量时效率降低，在大流量时效率提高，具体临界点需由压比计算。

参考文献：

[1] Zhao B, Li S, Li Q, et al. Unsteady numerical research into the impact of bleeding on axial compressor performance[C]//Proceedings of the ASME 2010 3rd Joint US-European Fluids Engineering Summer Meeting Collocated with International Conference on Nanochannels, Microchannels and Minichannels. Montreal: ASME 2010 3rd Joint US-European Fluids Engineering Summer Meeting: Volume 1, Symposia - Parts A, B, and C, 2010:531-538.

[2] 程荣辉. 轴流压气机设计技术的发展[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2004(2):1-8.
CHENG Ronghui. Development of design technology for axial compressor[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2004(2):1-8. (in Chinese)

[3] Damiani L, Trucco G C A. A control oriented simulation model of a multistage axial compressor[C]//Proceedings of ECOS 2012. Perugia:

- The 25th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy System, 2012:26-29.
- [4] Cruz-Manzo S, Krishnababu S, Panov V, et al. Inter-Stage dynamic performance of an axial compressor of a twin-shaft industrial gas turbine[J]. *Machines*, 2020, 8(4): 83.
- [5] Mare L D, Simpson G, Mueck B, et al. Effect of bleed flows on flutter and forced response of core compressors[C]/Proceedings of the ASME Turbo Expo: Power for Land, Sea, & Air. Barcelona: ASME Turbo Expo 2006 Volume 5, Parts A and B, 2006: 1115-1122.
- [6] 翟志龙, 曹传军, 姜逸轩. 级间引气对多级轴流压气机性能的影响[J]. *航空发动机*, 2023, 49(1): 62-67.
ZHAI Zhilong, CAO Chuanjun, JIANG Yixuan. Effect of interstage bleeding on performance of multistage axial compressor[J]. *Aeroengine*, 2023, 49(1): 62-67. (in Chinese)
- [7] Abdelghany E S, Sarhan H H, Saleh A, et al. High bypass turbofan engine and anti-icing system performance: mass flow rate of anti-icing bleed air system effect[J]. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2023, 45: 102927.
- [8] 陈哲, 冯永新, 邓小文, 等. 级间抽气对多级轴流压气机性能及流场影响的数值研究[J]. *广东电力*, 2014, 27(9): 6-9.
CHEN Zhe, FENG Yongxin, DENG Xiaowen, et al. Numerical research on impact of air exhausting between stages on performance and flow-field of multistage axial compressor[J]. *Guangdong Electric power*, 2014, 27(9): 6-9. (in Chinese)
- [9] 姚丁夫, 成金鑫, 陈江, 等. 引气对多级轴流压气机性能影响的数值研究[J]. *航空动力学报*, 2016, 31(5): 1186-1195.
YAO Dingfu, CHENG Jinxin, CHEN Jiang, et al. Numerical investigation of bleeding effect on performance of multistage axial compressor[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2016, 31(5): 1186-1195. (in Chinese)
- [10] Liu B, Zhuang X, Guang F, et al. Numerical and experimental study of bleed impact in multistage axial compressors[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2023, 36(2): 1-16.
- [11] Peltier V, Dullenkopf K, Bauer H J. Numerical investigation of the aerodynamic behaviour of a compressor bleed-air system[C]/Proceedings of the ASME Turbo Expo: Turbine Technical Conference and Exposition. Düsseldorf: ASME Turbo Expo 2014 Volume 2A, 2014: June 16-20.
- [12] 丁骏, 郑健生, 郑群, 等. 多级轴流压气机级间引气的仿真方法[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2023, 44(4): 580-586.
DING Jun, ZHENG Jiansheng, ZHENG Qun, et al. Simulation method of inter-stage bleeding of multi-stage axial compressor[J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2023, 44(4): 580-586. (in Chinese)
- [13] 赵子恒, 陆瑶, 羌晓青. 重燃多级轴流压气机级间引气方式对流场影响的数值研究[J]. *节能技术*, 2023, 41(1): 16-23.
ZHAO Ziheng, LU Yao, QIANG Xiaoqing. Numerical research into the impact of different bleed modes on heavy-duty gas turbine multistage axial compressor performance[J]. *Energy Conservation Technology*, 2023, 41(1): 16-23. (in Chinese)
- [14] 晏松, 楚武利, 张皓光, 等. 不同轴向引气位置对自循环机匣处理的影响研究[J]. *推进技术*, 2019, 40(7): 1478-1489.
YAN Song, CHU Wuli, ZHANG Haoguang, et al. Effects of different axial position of bleeding air on circulation casing treatment[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2019, 40(7): 1478-1489. (in Chinese)
- [15] Chen S W, Gong Y, Zeng C. Experimental investigation of hole-type bleed for active flow control in an axial compressor cascade with tip clearance[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2022, 128: 107790.
- [16] Wellborn S, Koiro M. Bleed flow interactions with an axial-flow compressor powerstream[C]/38th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit. Indianapolis: Aerospace Research Central, 2002: 4057.
- [17] Merchant A, Kerrebrock J L, Adamczyk J J, et al. Experimental investigation of a high pressure ratio aspirated fan stage[J]. *Journal of Turbomachinery*, 2005, 127(1): 493-502.
- [18] Dobrzynski B, Saathoff H, Gummer V, et al. Active flow control in a single-stage axial compressor using tip injection and endwall boundary layer removal[R]. ASME 2008-GT-50214.
- [19] Grimshaw S D, Pullan G, Walker T. Bleed-induced distortion in axial compressors[J]. *ASME. J. Turbomach*, 2015, 137(10): 101009.
- [20] Hackney R, Nikolaidis T, Pellegrini A. A method for modelling compressor bleed in gas turbine analysis software[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2020, 172: 115087.
- [21] 强艳, 陈云永, 李游, 等. 压气机效率计算方法的探讨[J]. *燃气涡轮试验与研究*, 2019, 32(6): 26-30.
QIANG Yan, CHEN Yunyong, LI You, et al. Calculation methodology of compressor efficiency[J]. *Gas Turbine Experiment and Research*, 2019, 32(6): 26-30. (in Chinese)

(编辑:程 海)