

文章编号: 1000-8055(2010)09-2097-06

一种考虑级间引气的压气机通流设计方法

赵斌, 李绍斌, 吴宏, 侯安平, 周盛

(北京航空航天大学 能源与动力工程学院

航空发动机气动热力科技重点实验室, 北京 100191)

摘 要: 为了探索考虑引气影响的压气机设计方法, 提出了一种基于周向槽引气的引气模型, 通过将引气区域的机匣端壁无滑移边界条件替换为端壁法向引气速度代表的引气边界条件, 把引气的影响计入压气机通流设计. 一台两级压气机的无引气和引气通流设计以及三维数值模拟流场的对比研究表明, 该引气模型和考虑引气的通流设计方法能够有效的将引气设计参数及其影响反映在通流流场结果中. 此外, 该引气模型和设计方法还能够准确反映引气流动随引气区域当地气动参数的变化.

关 键 词: 级间引气; 引气模型; 通流设计; 压气机; 燃气涡轮发动机

中图分类号: V231.3

文献标识码: A

Throughflow design of compressor considering bleeding flow effect

ZHAO Bin, LI Shaobin, WU Hong, HOU Anping, ZHOU Sheng

(National Key Laboratory of Science and Technology on Aero Engines,

School of Jet Propulsion, Beijing University of Aeronautics and Astronautics,

Beijing 100191, China)

Abstract: In order to observe the throughflow design of compressor under the influence of bleeding flow, a bleeding model was set based on the circumference bleeding slot. Bleeding was considered in the throughflow design of compressor by changing the endwall no-slip boundary condition of bleeding flow area into the velocity law of endwall for the new bleeding boundary condition. A comparative research between the bleeding and non-bleeding throughflow field and 3-D numerical analysis of a two-stage compressor show that, the bleeding model and its throughflow design method can reflect the influence of bleeding parameters as a result of the throughflow calculation. Furthermore, the bleeding model and its throughflow design method can also accurately reflect the change of bleeding with the local flow condition of bleeding flow area.

Key words: per-stage bleeding; bleeding model; throughflow design; compressor; gas turbine engine

航空燃气涡轮发动机的空气系统对飞机和发动机的安全、有效工作起着重要的作用. 根据飞机和发动机的不同工作状态, 空气系统从发动机不同的压气机级引气, 将具有适当压力和温度的空气用于座舱空调和增压、机翼热防冰、发动机进口

整流罩防冰、轴承封严、发动机热端部件冷却等方面^[1]. 随着涡轮进口燃气温度的不断提高和飞行器外部环境的日益复杂, 飞机和发动机所需的空气系统流量也越来越大^[2-4]. 研究表明, 空气系统从高压压气机级间引出的气流可达到主流流量的

收稿日期: 2009-08-03; 修订日期: 2010-03-31

基金项目: 国家自然科学基金(60934001); “凡舟”青年科研基金(20090403)

作者简介: 赵斌(1983-), 男, 河南兰考人, 博士生, 主要从事压气机气动设计以及空气系统引气对压气机性能的影响研究.

3%~5%。鉴于引气位置的特殊性,级间引气会对压气机气动性能产生重要影响。

从压气机级间引出高温压缩气体会对发动机的性能产生两方面的影响^[5-7]:第一,空气系统气源从压气机中引出的压缩空气本该进入燃烧室与燃料进行混合、燃烧,作为主气流参与全机的热力循环并对外做功,但为了满足空气系统功能的需要而被引出,失去了做功的机会,使发动机的整机做功能力下降;第二,大量气流从压气机的主流中引出,影响主流的流动,若引气处理不当,不但增加流动损失,还会引起主流的不稳定流动。因此,如何在设计过程中考虑级间引气的影响,成为了压气机设计迫切需要解决的问题^[8-11]。

目前,国内外的压气机设计体系对空气系统引气的影响都有所考虑。然而,关于设计方法和引气模型的细节却很少有公开发表的文献。为了探索考虑引气影响的压气机设计方法,本文通过对引气区域端壁边界条件的修改,提出了一种基于周向槽引气的引气模型,并将其应用于压气机的设计中,在验证引气模型和设计方法效果的同时揭示了引气对压气机设计的本质影响。

1 引气模型和引气的通流设计方法

通流设计主要是在周向平均面上计算压气机流场内的气动参数,并为叶片造型提供符合设计要求的气流角。在设计中考虑引气,需要将引气对流场气动参数和气流角的影响包含进通流计算中。建立包含引气装置的通流引气模型是不现实和不必要的。空气系统的气源引气装置往往具有复杂的结构,以周向槽引气为例,主要结构包括:周向对称的引气槽和集气腔,以及周向非对称分布的输气管。一方面,结构的复杂性使得在通流设计中包含引气装置不可实现。引气槽和集气腔设置计算网格会增加通流计算网格生成的复杂性和计算时间,而在周向平均面内更是无法考虑周向不连续或是非对称的引气结构;另一方面,从通流设计的目标来看,只需得到引气参数对流场气动参数和气流角的影响,而没有必要包含引气装置结构。

因此,将通过周向槽表面的引气流动视为边界条件,给出基于引气量的壁面速度,是一个更好的方法。下面将分别介绍基于周向槽引气的边界条件引气模型及其通流设计方法。

1.1 引气模型

基于周向槽引气方式建立引气模型,在引气

位置所在的端壁表面设置边界条件,利用引气量和当地气流参数计算得到引气速度,通过作用在引气表面的法向引气速度来代表引气的影响。

引气边界条件中,引气量 W_b 由引气系数 δ 表示,是压气机进口流量 W_{inlet} 的百分比,如式(1)所示

$$W_b = W_{inlet} \cdot \delta \quad (1)$$

由通过引气面积的流量 W_b 、边界条件作用的面积 A_b 以及引气区域端壁表面的气流密度 ρ_b 来计算引气速度的法向分量 V_n ,如式(2)所示

$$V_n = \frac{W_b}{\rho_b A_b} \quad (2)$$

从上述介绍可以看出,基于周向槽引气的边界条件引气模型具有两个特点:①引气模型允许引气速度的法向分量随当地流动条件的变化而变化;②在压气机中,引气槽轴向尺寸与压气机轴向长度相比很小,所以模型假定引气面积处的法向引气速度均匀分布。

1.2 边界条件引气模型的通流设计方法

本文将基于周向槽引气的边界条件引气模型融入时间推进通流设计中。所用的时间推进通流设计方法的介绍详见参考文献[12]。将引气模型考虑进通流设计中,需要改变引气区域的端壁边界条件。具体就是将引气参数,包括引气位置、引气量、引气面积、引气速度与压气机流道边界条件相结合。

引气位置主要由空气系统对气源参数的要求决定。在通流设计中,引气位置由机匣端壁处轴向计算站的序号表示, N_s 表示引气边界条件作用的起始计算站序号, N_e 表示引气边界条件作用的终止计算站序号,且沿流向 $N_s < N_e$ 。

引气量由通流计算给定的引气系数 δ 和计算得到的压气机进口流量 W_{inlet} 共同决定,由式(1)计算得到。

在通流计算中,引气面积由引气边界条件作用的端壁轴向计算站区域限定,即 $N_s \sim N_e$ 。此外,选取引气面积之前需要估计在指定面积上达到引气流量所需的最大引气速度,这个速度应小于当地声速。考虑到引气区域当地流动条件的影响,特将边界条件作用区域的 $\rho_b A_b$ 表示为引气区域处每个计算站表面气流密度和计算站之间面积的积分和,如式(3)所示

$$\rho_b A_b = \int_{N_s}^{N_e-1} \rho(i) \times [Z(i+1) - Z(i)] \times 2\pi r(i) di \quad (3)$$

在式(3)中, i 表示压气机机匣计算站的轴向序号, $\rho(i)$, $Z(i)$ 和 $r(i)$ 分别表示该计算站处气流的密度、计算站的轴向坐标和径向坐标。

引气区域处的法向引气速度可由总引气量、当地流动条件和引气面积共同决定, 如式(2)所示。

在通流计算中, 对机匣端壁的处理常常采用无滑移边界条件, 即在机匣端壁处, 气流的法向速度 $V_{wall} = 0$ 。在考虑引气时, 只需将引气区域的机匣端壁无滑移边界条件替换为引气边界条件就可以实现引气的设计。在引气区域 $N_s \leq i \leq N_e$, 令反映引气影响的端壁法向引气速度等于气流在端壁处的法向速度, 即 $V_{wall} = V_n$, 而在 $i < N_s$ 或 $i > N_e$ 的无引气端壁区域, 仍采用无滑移边界条件, 即 $V_{wall} = 0$ 。这样就可以通过通流计算的迭代求解, 使引气对压气机流场的影响向上下游传递, 从而将级间引气的影响考虑进通流设计中。

需要说明的是, 基于周向槽引气的引气模型和通流设计方法, 只适用于周向连续且对称分布的引气槽结构。鉴于通流设计周向平均面的方法局限, 目前在设计中还无法考虑不连续或非对称分布的引气结构。

2 级间引气的通流设计方法验证

将考虑级间引气影响的压气机通流设计方法用于一台两级压气机的设计, 通过无引气设计方案与考虑引气的设计方案的通流计算结果的对比, 验证通流引气设计方法的有效性。在考虑引气影响的通流计算中, 引气位置取在级间的机匣处, 引气量为核心流量的 5%。

2.1 级间引气的通流设计方法验证

由引气的特点可知, 从压气机级间引出气流会使得下游的主流流量减小, 在下游主流流道内, 流量减小产生的压力梯度使主流的速度场重新分布。本文的引气边界条件可以将引气的影响体现在通流设计中。

1) 压气机通流流场进出口流量的对比可以定量的表明, 引气边界条件使下游主流流量减小, 并与设计引气量一致。表 1 列出了压气机无引气与引气通流计算的进出口流量。将两者进行对比可以发现, 引气后压气机出口流量减小了 4.83%, 这与设计引气量基本相符。

2) 考虑级间引气影响的通流设计方法能够反映引气流动随引气区域当地气动参数的真实变化。图 1 是引气边界条件区域当地的气流密度, 可以看出受引气抽吸作用的影响, 主流气流向引气

区域堆积。图 2 是与当地流动条件相对应的引气边界条件区域的法向速度。图 1 和图 2 对比可以看出, 在引气流量一定的情况下, 每个计算站上的法向引气速度与当地气流密度成反比, 这与式(2)和式(3)所表示的法向引气速度与引气量和当地流动条件的关系相一致。体现了引气边界条件在通流计算中的有效性和合理性。

表 1 压气机无引气与引气通流计算的进出口流量

Table 1 Mass flow of inlet and outlet in throughflow field with and without bleeding

设计方案	进口流量/ (kg/s)	出口流量/ (kg/s)
无引气通流流场	25.043	25.043
引气通流流场	25.025	23.816

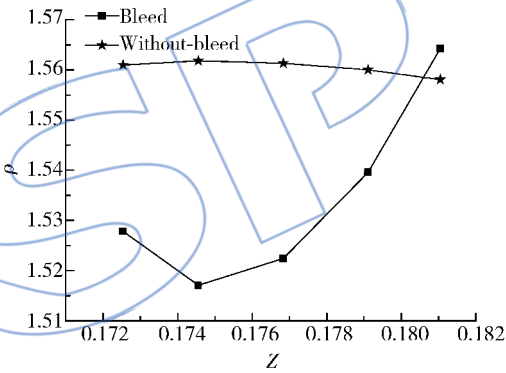


图 1 引气边界条件区域当地气流密度
Fig. 1 Local air flow density of bleeding boundary condition area

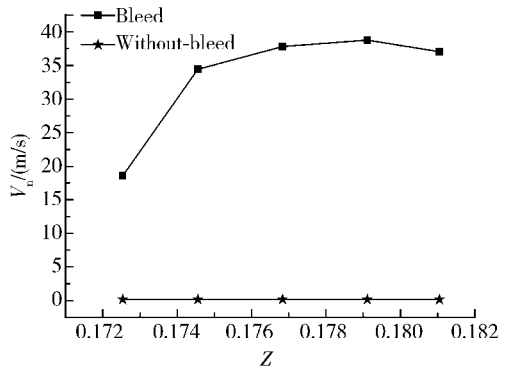


图 2 引气边界条件区域的法向速度 V_n 对比
Fig. 2 Comparison between the law velocities before and after bleeding in the boundary condition area

3) 引气边界条件区域流场的定性和定量分析表明, 引气边界条件可以有效的将引气设计参数及其影响反映在通流流场结果中。图 2 和图 3

对比了无引气和引气状态下引气边界条件区域的法向速度和切向速度. 图 4 是无引气和引气状态下引气边界条件区域附近的通流流场流线图, 图中 IG V 为进口导向叶片. 结合图 2 至图 4 可以看出, 在无引气时, 该区域受机匣壁面无滑移边界条件的约束, 沿机匣壁面流动, 法向速度 V_n 为零; 而在引气时, 该区域处于引气边界条件的作用下, 由引气量、当地流动条件和引气面积共同产生了法向速度, 气流按设计要求流出主流道. 此外, 受引气的影响, 引气区域表面的切向速度发生了变化. 切向速度变化的影响有待于在将来的工作中加以完善.

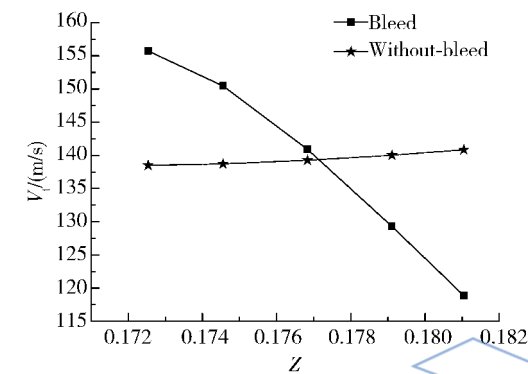


图 3 引气边界条件区域的切向速度 V_t 对比
Fig. 3 Comparison between the tangential velocities before and after bleeding in the boundary condition area

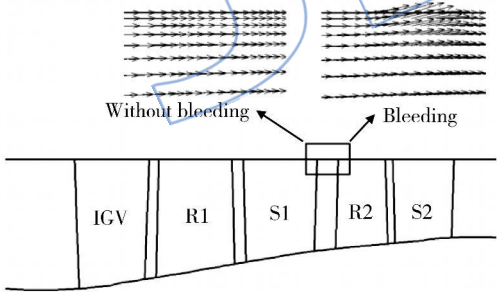


图 4 无引气与引气的通流计算流场
Fig. 4 Throughflow field with and without bleeding

上述分析表明, 引气边界条件能够有效的将引气设计参数的影响体现在通流设计中.

2.2 无引气与引气的通流流场对比分析

通流设计的主要目标是为叶片造型提供符合设计要求的气流角. 在通流设计中考虑级间引气的影响, 可以使通流流场的气动参数和压气机叶片造型与引气后的真实流动更为相符. 图 5 是下游转子叶排在无引气和引气情况下的进口气流角

对比. 引气使下游叶排的进口气流角增大. 而在设计中考虑引气的影响, 能够相应增大下游叶排安装角, 使设计攻角保持不变, 不影响上下游叶排的匹配特性. 图 6 是下游转子 95% 叶高位置处相对气流角的轴向分布, 代表了 95% 叶高基元中弧线的形状. 可以看出, 在设计中考虑引气的影响, 还可使下游叶排前缘的中弧线形状也随进口气流角的增大而变化, 使得叶片造型参数与引气影响下的真实流动相匹配.

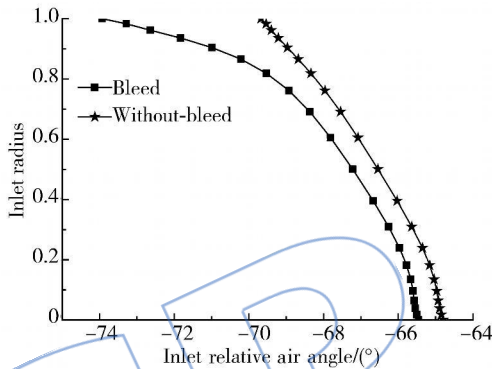


图 5 引气下游转子叶片进口气流角的变化
Fig. 5 Change of the inlet air angle of the downstream rotor of the bleeding

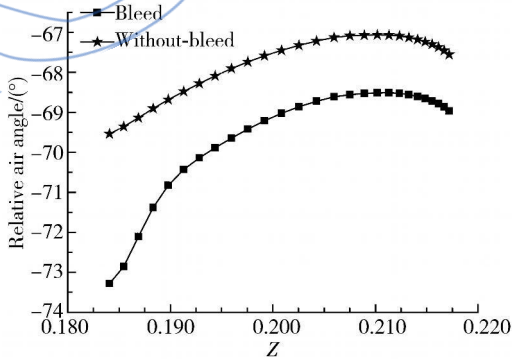


图 6 引气下游转子 95% 叶高气流角轴向分布
Fig. 6 Axial distribution of the flow angle at the 95% span of the downstream rotors of bleeding

3 无引气与引气的三维流场对比分析

3.1 对比方案及数值模拟方法

为进一步验证考虑引气的设计方法, 分析引气对压气机设计的影响, 特将前文所述的两级压气机按三个方案进行对比, 见表 2. 方案 A 和方案 B 都使用不考虑引气的通流设计结果进行叶片造型, 区别在于方案 B 在三维模拟中引气. 方案 C 使用考虑引气的通流设计结果进行叶片造型, 在

三维模拟中引气.

表 2 无引气与引气三维流场的对比方案

方案	一维设计	通流设计	三维模拟
A	无	无	无
B	无	无	引气
C	引气	引气	引气

方案 B 和 C 的引气位置与通流设计保持一致, 使用周向槽引气. 槽宽 6 mm, 槽高 25.39 mm, 引气槽角度为 90°.

压气机各叶排流道和引气槽的网格空间离散采用 FINE/TURBO 软件的前处理模块 AutoGrid 5 生成. 引气槽置于上游静子的静止坐标系中, 与主流的连接以 full non matching 边界处理, 在引气槽周向端面处设置周期性边界条件. 结构和网格如图 7 所示. Navier Stokes(N-S) 方程求解器采用 FINE 模块, 对三个方案的三维定常流场进行模拟, 空间离散差分格式采用具有二阶精度的 Upwind 格式, 时间推进采用 4 步 Runge Kutta 法迭代求解, 湍流模型采用 Spalart-Allmaras 模型, 工质为理想气体 air(perfect). 计算边界条件按照设计要求, 进口轴向进气, 给定总温、总压, 出口给定中径处的背压. 在引气槽出口处给定流量 1.25 kg/s 并估计当地静压来确保实现 5% 的引气量.

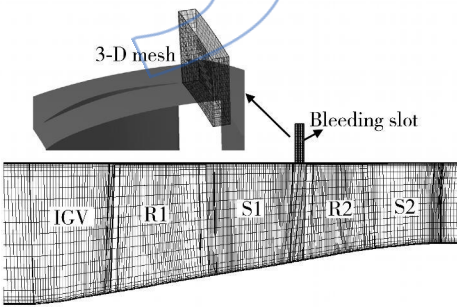


图 7 引气槽的结构和三维网格
Fig. 7 Structure and 3-D mesh of bleeding slot

3.2 三维流场结果的对比分析

对三个方案设计点流场进行对比, 分析引气对上游和下游叶排流场参数径向分布的影响.

1) 引气对上游流场的影响主要体现为上游流量的变化. 图 8 显示了引气上游静子进出口的气流角径向分布, 可以看出, 设计中不考虑引气而三维模拟引气会使得上游叶排的进口流量增加、

进口气流角减小, 如方案 B, 但这种影响继续向上游传递会受到上游级环境的削弱以及压气机流道喉道位置的约束, 对最终压气机进口流量增加的作用有限. 而在设计和三维模拟中都引气, 则引气不会对上游叶排流场产生影响, 如方案 C.

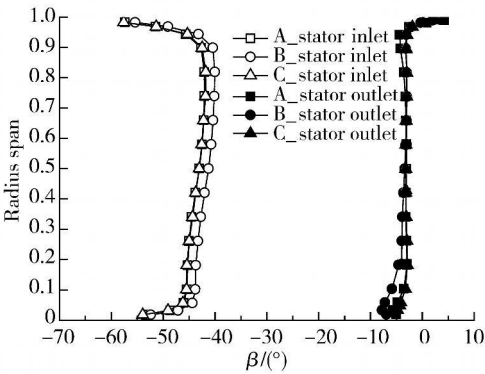


图 8 引气上游静子进出口气流角径向分布
Fig.8 Radial distribution of the flow angle at the inlet and outlet of the upstream stator of bleeding

2) 引气对下游流场的影响主要体现在主流流量减小所引起的流场参数变化上. 图 9~ 图 10 表明, 设计中不考虑引气而三维模拟引气, 主流流量的减小影响引气下游叶排 60% 以上叶高的流场分布, 进口气流角的增大会带来进气攻角的增大, 如方案 B, 90% 以上端区的攻角增大达到 3°~5°. 而在设计和三维模拟中都考虑引气, 主流流量的减小使得下游叶排的进口气流速度在全叶高范围内均匀减小, 引气对 80% 以上的叶尖流场的影响较为明显. 设计中考考虑引气的关键效果体现在, 下游叶片的安装角能够相应的增大, 使设下游叶片的攻角保持设计值, 不会影响上下游叶排的匹配特性及下游叶排的性能, 如方案 C.

图 11 可以看出, A, B, C 三种方案在引气下游转子出口的气流角基本一致. 也就是说, 引气只

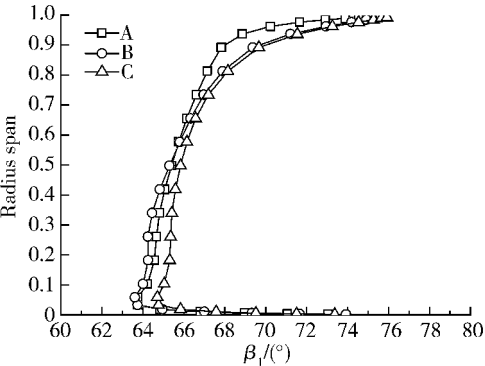


图 9 引气下游转子进口气流角径向分布
Fig.9 Radial distribution of the flow angle at the inlet of the downstream rotor of bleeding

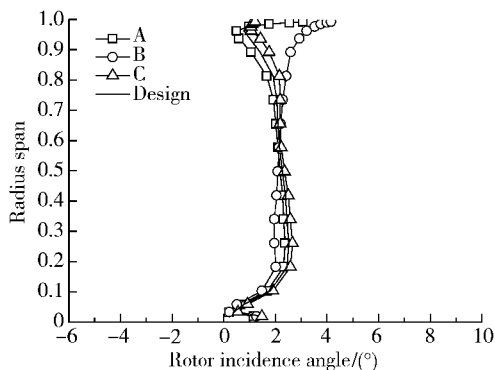


图 10 引气下游转子进气攻角径向分布

Fig. 10 Radial distribution of the incidence angle at the inlet of the downstream rotor of bleeding

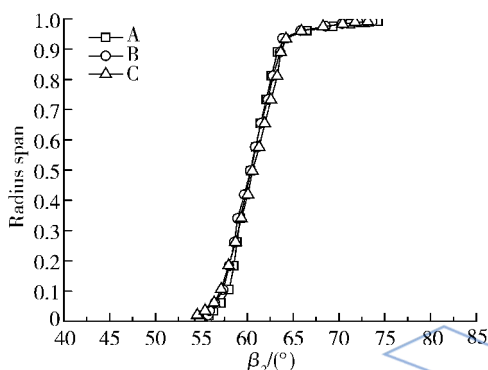


图 11 引气下游转子出口气流角径向分布

Fig. 11 Radial distribution of the flow angle at the outlet of the downstream rotor of bleeding

对下游的转子叶排产生影响, 并且这些影响在下游转子叶排的出口已经掺混均匀, 不会进一步向下游传递。

4 结 论

1) 考虑引气的通流设计方法, 无需包含引气装置, 只需将引气区域的机匣端壁无滑移边界条件替换为端壁法向速度代表的引气边界条件, 就可以实现引气的设计。

2) 考虑引气的通流设计方法, 能够反映引气流动随引气区域当地流动条件的真实变化。

3) 考虑引气的通流设计方法, 能够将引气参数有效的体现为下游主流流量的减小和速度场的重新分布, 使得通流计算得到的流场气动参数和叶片造型能够与引气的真实流动相匹配。

在设计中包含引气的影响是非常必要的, 在一维流道设计和通流设计阶段都必须考虑。一维设计中包含引气, 使得引气下游的流道几何与减小了的主流流量相适应, 约束攻角增大带来的影响, 在下游叶排内掺混从而恢复到设计状态; 在通

流设计中包含引气的影响, 得到与引气流动相匹配的下游叶片安装角和气流角, 从根本上保证了压气机与流场的相互匹配。

参考文献:

- [1] 赵斌, 李绍斌, 侯安平, 等. 发动机空气系统气源引气的研究和探讨[C] // 航空学会第十五届叶轮机专业委员会学术交流会议文集. 张家界: 中国航空学会动力专业分会, 2009: 190-198.
- [2] 林左鸣. 战斗机发动机的研制现状和发展趋势[J]. 航空发动机, 2006, 32(1): 1-8.
LIN Zuoming. The current development and future trends of fighter engines[J]. Journal of Aeroengine, 2006, 32(1): 1-8. (in Chinese)
- [3] 张津, 洪杰, 陈光. 现代航空发动机技术与发展[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2006.
- [4] 唐智明, 詹孟宜. 高效节能发动机文集: 第3分册[M]. 北京: 航空工业出版社, 1991.
- [5] 杨燕生, 吴向宇, 陆海鹰, 等. 航空发动机设计手册, 第16分册: 空气系统及传热分析[M]. 北京: 航空工业出版社, 2001.
- [6] Andrew J Y, Ronald J R. Effects of bleed air extraction on thrust level of the F404 GE-400 turbofan engine[R]. NASA TM-104247, 1992.
- [7] Alison B E. The effects of compressor seventh stage bleed air extraction on performance of the F100-PW-220 afterburning turbofan engine[R]. NASA CR-179447, 1991.
- [8] 邓峰, 顾春伟, 薛耀华, 等. 压气机级间抽气的数值模拟[J]. 工程热物理学报, 2008, 29(2): 40-42.
DENG Hao, GU Chunwei, XUE Yaohua, et al. Numerical simulation of the interstage bleed in an axial compressor[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2008, 29(2): 40-42. (in Chinese)
- [9] 张皓光, 楚武利, 吴艳辉, 等. 轴向间隙引气对双级轴流式压气机性能及流场影响的数值研究[J]. 流体机械, 2006, 34(7): 24-27.
ZHANG Haoguang, CHU Wuli, WU Yanhui, et al. Numerical investigation on the effect of axial clearance bleeding on a two-stage axial flow compressor flow-field and performance[J]. Journal of Fluid Machinery, 2006, 34(7): 24-27. (in Chinese)
- [10] 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, 17(2): 1-8.
CHENG Ronghui. Development of design technology for axial compressor[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2004, 17(2): 1-8. (in Chinese)
- [11] 程荣辉. 普惠公司压气机设计系统[J]. 燃气涡轮试验与研究, 1997, 10(2): 53-59.
CHENG Ronghui. Compressor design system of Pratt and Whitney[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 1997, 10(2): 53-59. (in Chinese)
- [12] 吴宏, 李秋实, 宋亚慧, 等. 风扇通流设计中环量分布形式的探讨[J]. 工程热物理学报, 2008, 29(1): 43-45.
WU Hong, LI Qiushi, SONG Yahui, et al. Effect of swirl distribution on fan throughflow design[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2008, 29(1): 43-45. (in Chinese).