

叶栅风洞与试验雷诺数计算方法分析及应用

倪 明^{1,2}, 魏佐君^{1,2*}, 姜正礼³, 吴 帅⁴, 任光明^{1,2}, 甘晓华^{1,2}

(1. 南方科技大学 工学院 力学与航空航天工程系, 广东 深圳 518055; 2. 南方科技大学 深圳市宽速域变密度连续式风洞重点实验室, 广东 深圳 518055; 3. 中国航发四川燃气涡轮研究院, 四川 绵阳 621000; 4. 中国联合重型燃气轮机技术有限公司, 北京 100016)

摘 要: 通过比较不同黏度计算方法, 基于黏度指数法和萨特兰法, 详细推导了叶栅试验中雷诺数的计算公式, 得到了特征参数间数量级关系和特征雷诺数随马赫数变化的规律。建议将单位特征长度雷诺数(Re/L)作为通用性的风洞雷诺数特征参数。最后提出一种基于展弦比、雷诺数和风口高度约束的叶栅模化尺寸与叶片数量确认方法。研究给出的叶栅风洞试验的雷诺数计算方法具有工程可接受的误差范围, 并在风洞建设、叶栅试验与模化设计领域有重要的参考价值。

关键词: 叶栅风洞; 叶栅试验; 雷诺数; 黏度计算; 模化设计

中图分类号: V211.7 文献标识码: A 文章编号: 1672-2620(2024)06-0024-07

DOI: 10.3724/j.GTER.20240044

The calculation and application of Reynolds number in cascade wind tunnel and experiment

NI Ming^{1, 2}, WEI Zuojun^{1, 2*}, JIANG Zhengli³, WU Shuai⁴,
REN Guangming^{1, 2}, GAN Xiaohua^{1, 2}

(1. Department of Mechanics and Aerospace Engineering, College of Engineering, Southern University of Science and Technology, Shenzhen 518055, China; 2. Shenzhen Key Laboratory of Wide-Speed-Range and Variable-Density Continuous Wind Tunnel, Southern University of Science and Technology, Shenzhen 518055, China; 3. AECC Sichuan Gas Turbine Establishment, Mianyang 621000, China; 4. China United Gas Turbine Technology Co., Ltd., Beijing 100016, China)

Abstract: The calculation formula of the Reynolds number in cascade testing was derived in detail using different viscosity calculation methods, including the index method and the Sutherland method. The relationship between characteristic parameters and the law of characteristic Reynolds number changing with Mach number was obtained. The Reynolds number per unit length (Re/L) was suggested to be used as a universal characteristic parameter of wind tunnel Reynolds number. Finally, a method to confirm the modular size of a cascade and blade number based on the constraints of aspect ratio, Reynolds number, and vent height was proposed. The error range of Reynolds number calculation method of the cascade wind tunnel test is acceptable in engineering. And the method has important reference value in the fields of wind tunnel construction, cascade experiment, and modular design.

Key words: cascade wind tunnel; cascade experiment; Reynolds number; viscosity calculation; modular design

收稿日期: 2023-09-05

基金项目: 深圳市基础研究重点项目(JCYJ20200109141403840); 国家自然科学基金青年科学基金项目(52106045); 深圳市重点实验室筹建启动项目(ZDSYS20220527171405012)

作者简介: 倪 明(1994-), 男, 上海人, 博士研究生, 主要从事叶轮机械气动热力学与叶栅试验技术研究。

通信作者: 魏佐君(1986-), 男, 博士, 研究助理教授, 研究领域为叶轮机械气动热力学、微小型燃气涡轮发动机设计及飞机/发动机一体化分析。

E-mail: weizj@sustech.edu.cn

1 引言

平面叶栅是研究叶轮机械流动问题的二维简化模型,能够有效反映气流折转的基本特征。平面叶栅风洞是目前研究叶轮机械问题最简单、最基本的试验设备。叶栅试验具有操作便捷、周期短、成本低等特点,其试验数据在基础研究和工程研制中具有广泛应用价值^[1]。

叶片弦长雷诺数是叶栅试验的关键特征参数和重要决策变量。在常规叶栅性能测试中,该参数用于验证试验模型的动力学相似性,即确认是否达到雷诺数自模化条件。当满足该相似条件时,可忽略雷诺数的影响;否则需要通过特定的修正方法对试验结果进行雷诺数修正。在试验过程中,当叶片表面附面层的流动状态处于层流向湍流的转换过程时,测试结果会与纯湍流状态下的结果产生显著差异^[2-4]。这种差异源于流动状态的本质不同,若未加识别而直接将转换条件下的评估结果用于表征湍流条件下的性能,将导致评估结果失真。基于上述原因,需要在特定的叶栅测试,即变雷诺数叶栅试验,系统研究叶栅性能随雷诺数变化的规律。通过确定叶型在不同雷诺数下的性能变化规律及能力边界,建立相应的雷诺数修正关系式^[5]。

根据雷诺数调节能力,叶栅风洞可分为常规开式直排式风洞和非常规可变雷诺数风洞两类。开式直排式风洞中,马赫数与雷诺数特性曲线呈线性关系,马赫数和雷诺数同步变化,无法独立调节。而可变雷诺数风洞(如闭式回流式、下吹暂冲式和吸入式)能够独立调节马赫数与雷诺数,其特性曲线呈现包络面形式^[6-7]。

为准确描述上述风洞的性能特征,研究人员发展了2种雷诺数表征方式:一是使用基于标模尺寸的雷诺数(Re)进行表征,如文献[8-13]所示;二是使用单位特征长度雷诺数(Re/L , L 为特征长度)来表示,如文献[7, 14]所述。虽然 Re 和 Re/L 均可用于表征风洞的雷诺数特性,但关于其适用性和优劣的系统性对比研究仍显不足。

另外,实际开展叶栅试验设计时,还需要同时考虑多个约束条件:①展弦比约束,展弦比应在1.5~4.0范围内,且受风口宽度限制;②自模化条件约束,雷诺数需大于临界值,不低于 2.5×10^5 ^[15];③叶片数量约束,确定稠度下叶片数量受风口高度

约束。在HB 20145-2014^[16]中,建议的约束条件为:展弦比大于等于1.8;自模化区雷诺数大于 4×10^5 ;叶片数为7~11。目前尚无文献提出系统的参数化设计方法以满足上述全部约束条件。

为解决上述问题,本文将建立叶栅风洞与试验雷诺数的显式计算方法,以便相关研究人员直接应用。在此基础上,将该计算方法应用于以下2个关键工程问题:一是通过对比分析 Re 和 Re/L 2种风洞雷诺数特性表征方式的差异,提出合理的参数选择建议,为风洞特性表征提供理论依据;二是提出一种综合考虑展弦比、自模化雷诺数和风口高度约束的叶栅模化参数确定方法,用于指导叶栅试验中叶片数、特征弦长的确认及叶栅风洞选型。

2 叶栅风洞雷诺数计算方法

2.1 风洞雷诺数的定义

对风洞雷诺数估算的核心计算公式进行推导。根据完全气体方程,马赫数和雷诺数的基础定义,可得到式(1):

$$Re = \frac{p_s}{\sqrt{kRT_s}} \frac{U}{\sqrt{kRT_s}} \frac{L}{\mu_s} \approx 0.06984 \frac{Ma \cdot p_s \cdot L}{\sqrt{T_s} \mu_s} \quad (1)$$

式中: p_s 为当地(试验段内重点关注区域)静压; T_s 为当地静温; μ_s 为当地黏度; k 为气体绝热常数,其值为1.4; R 为气体常数,其值为287 J/(kg·K); U 为特征速度; L 为特征长度,通常选为叶栅弦长; Ma 为试验段内的特征马赫数;下标s代表静态。

叶栅试验中,通常使用空气动力学中滞止参数与静态参数和 Ma 的等熵关系式(式(2))计算试验段的等熵马赫数,其中滞止参数通常选为稳压箱内的总压 p_0 和总温 T_0 ^[17-18]。当地静压测点通常布置在试验段侧壁。针对压气机叶栅试验,当地静压选取栅前栅板壁面平均静压;针对涡轮叶栅试验,当地静压可以选择栅后栅板壁面平均静压或背压 p_b 。当地静温则以式(2)计算得到的马赫数和稳压段内的总温通过式(3)计算得到。

$$\frac{p_s}{p_0} = \left(1 + \frac{k-1}{2} Ma^2\right)^{-\frac{k}{k-1}} \quad (2)$$

$$T_s = \frac{T_0}{1 + \frac{k-1}{2} Ma^2} \quad (3)$$

将式(2)、式(3)代入式(1)可得式(4):

$$Re = \frac{k}{\sqrt{kR}} \frac{Ma \cdot p_0 \cdot L \left(1 + \frac{k-1}{2} Ma^2\right)^{\frac{k+1}{2-2k}}}{\sqrt{T_0 \mu_s}} \approx \frac{0.06984}{(1 + 0.2 Ma^2)^3} \frac{Ma \cdot p_0 \cdot L}{\sqrt{T_0 \mu_s}} \quad (4)$$

公式(4)是以稳压箱内的 p_0 、 T_0 和试验段特征马赫数为自变量的雷诺数定义式,为推导过程中的基础计算公式。式中仅 μ_s 未能直接给出计算公式,需要进一步确定。

2.2 动力黏度的计算与确定

动力黏度是表征流体输运特性的参数之一,其物理定义用于联系流体的剪切应力与变形速率,下文统一简称为黏度。叶栅风洞内的气流符合低密度或稀薄气体的定义范畴,黏度与温度有着很强的单调关系,即黏度为温度的单变量函数 $\mu(T)$ 。

在目前的工程实践中, $\mu(T)$ 主要通过指数法(Index)^[19]、萨特兰公式(Sutherland)^[20]和多项式法(Polynomial)^[21]计算,相应的计算公式分别如式(5)~式(7)所示,公式中各系数取值见表1。

$$\mu(T) = \mu_{00} \left(\frac{T}{T_{00}} \right)^n = B_1 T^n \quad (5)$$

$$\mu(T) = \mu_{00} \left(\frac{T}{T_{00}} \right)^{1.5} \frac{T_{00} + S}{T + S} = C_1 \left(\frac{T^{1.5}}{T + S} \right) \quad (6)$$

$$\mu(T) = 10^{-6} \sum_{i=0}^4 a_i T^i, \quad 250 \leq T \leq 600 \text{ K} \quad (7)$$

表1 黏性计算公式系数

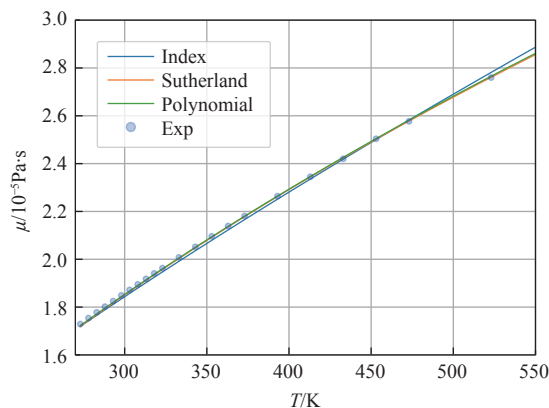
Table 1 Viscosity calculation formula coefficients

变量	值
μ_{00}	17.2×10^{-6}
T_{00}	273.16
n	0.70~0.76, 本文选定为0.74
B_1	2.7076×10^{-7}
S	111
C_1	1.4636×10^{-6}
a_0	-9.8601×10^{-1}
a_1	9.080125×10^{-2}
a_2	$-1.17635575 \times 10^{-4}$
a_3	1.2349703×10^{-7}
a_4	$-5.7971299 \times 10^{-11}$

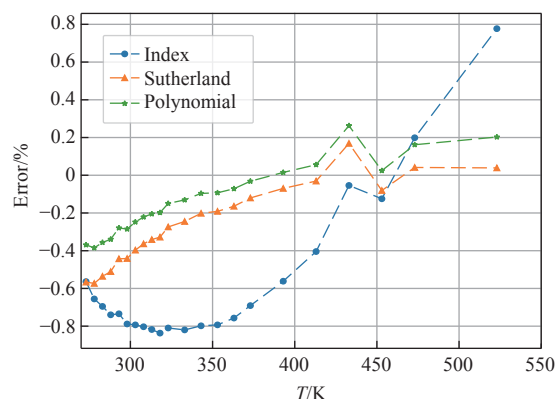
图1为273~550 K温度范围内不同黏度计算公式的计算准确性对比。其中,图1(a)为各计算公式的黏度计算结果与试验值(Exp)^[22]的对比;图1(b)

给出了各计算公式结果与试验物性的相对差,其中相对差定义见式(8)。

$$\text{Error} = \frac{\mu - \mu_{\text{Exp}}}{\mu_{\text{Exp}}} \times 100\% \quad (8)$$



(a) 计算结果与试验值的对比



(b) 计算结果与试验物性的相对差

图1 不同黏度计算公式的比较

Fig.1 Comparison of viscosity calculation formulas

图1表明,在273~550 K温度范围内,3种计算方法均能有效计算空气黏度。其中,指数法计算误差随温度变化最为显著,但误差最大不超过 $\pm 1\%$;萨特兰公式在此温度区间与试验物性的误差范围为 $-0.57\% \sim 0.17\%$,精度较高;多项式法在此温度区间与试验物性的误差范围为 $-0.39\% \sim 0.26\%$,精度最高。尽管多项式法具有最高的计算精度,但其相对于其他两种方法的优势并不显著,且其计算公式最为复杂。就雷诺数计算公式的构建而言,多项式法的复杂形式不利于公式推导和参数量级分析;萨特兰公式在计算复杂度和精度方面达到了较好平衡,便于雷诺数估算公式推导;而指数法虽然计算精度相对较低,但误差仍在工程可接受范围内($< 1\%$),且形式最为简洁,有利于雷诺数估算公式推导和参数

量级分析。基于上述分析,本研究选用指数法和萨特兰公式计算空气黏度。

2.3 风洞试验雷诺数的计算方法

式(6)、式(7)中的温度均选当地静温,分别代入式(4),整理后即得到本文的叶栅风洞雷诺数计算公式,分别见式(9)、式(10):

$$Re_{Index} \approx 257\,954.601\,59 \frac{Ma \cdot p_0 \cdot L}{(1 + 0.2Ma^2)^{2.26} T_0^{1.24}} \quad (9)$$

$$Re_{Sutherland} \approx 47\,720.846\,18 \cdot \frac{Ma \cdot p_0 \cdot L \left[111 + T_0(1 + 0.2Ma^2)^{-1} \right]}{T_0^2(1 + 0.2Ma^2)^{1.5}} \quad (10)$$

利用某风洞某轮常规涡轮叶栅试验的运行参数对式(9)、式(10)进行验算,运行参数和验算结果见表2。试验选定5个运行工况,涡轮叶栅弦长选定为60 mm,特征马赫数选栅后等熵马赫数,基于叶栅出口栅板壁面的平均静压通过式(2)计算得到。验算结果表明,式(9)、式(10)计算得到的雷诺数的数量级一致且结果相近,认为本文推导的公式正确。

式(9)为雷诺数与各参数关系的影响分析提供了理论基础。风洞试验雷诺数与进口总压和特征尺寸 L 成正比,与进口总温的1.24次方成反比。从数学关系看,虽然总温的指数关系表明其对雷诺数有显著影响,但由于进口总压通常比总温高2个数量级以上,所以总温的指数效应在实际应用中并不显著。特征尺寸 L 受风洞建设条件及成本约束,调节空间有限。工程实践中,调节进口总压是改变雷诺数最直接的方法,只有当总压调节和特征尺寸优化无法满足试验要求时才考虑调整来流总温。欧洲跨声速风洞(ETW)的设计即体现了这一思路:即使配备了当时(20世纪90年代初)世界上最大功率(50 MW)的驱动电机,但仍难以满足高雷诺数试验需求,最终

通过低温风洞技术(将来流总温降至110 K)实现了所需试验条件^[23]。然而,由于温度调节系统造价昂贵,总温调节通常作为提高雷诺数的备选技术方案。

式(10)的计算精度较式(9)更高,适用于具体数值计算。然而,由于该公式中各参数(尤其是进口总温与试验马赫数)之间存在复杂的耦合关系,难以分离独立变量进行参数敏感性分析。因此,本研究采用式(9)进行特征参数影响规律的讨论。

Ma 对雷诺数的影响在其他特征参数保持不变的情况下呈非线性关系,需要进一步分析其变化趋势。现基于式(9)提取 Ma 相关函数,记 $f(Ma)=Ma/(1+0.2Ma^2)^{2.26}$,并将该函数绘制成曲线,见图2。分析表明,该函数的驻点落于 $Ma=1.192$ 处,而非 $Ma=1.000$ 的声速点;在 $Ma \leq 1.192$ 时, $f(Ma)$ 单调上升,使雷诺数增加; $Ma > 1.192$ 时, $f(Ma)$ 单调下降,使雷诺数减小。

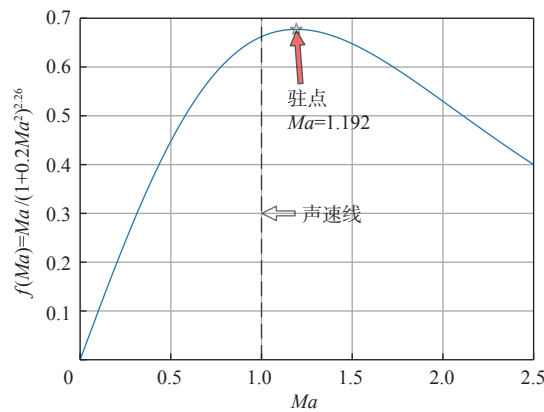


图2 $f(Ma) = Ma / (1 + 0.2Ma^2)^{2.26}$ 函数图
Fig.2 Graph of the function $f(Ma) = Ma / (1 + 0.2Ma^2)^{2.26}$

3 风洞雷诺数公式的应用

3.1 风洞雷诺数评估参数辨析

风洞特征雷诺数是衡量风洞性能的重要参数之一,通常通过标模试验对风洞的流场品质和试验能

表2 某风洞某轮常规涡轮叶栅试验的运行参数及雷诺数验证结果
Table 2 Operating parameters and Reynolds number verification results of a conventional turbine cascade experiment in a wind tunnel

变量	工况1	工况2	工况3	工况4	工况5
稳压箱总压/kPa	120.187	129.401	154.895	172.499	231.386
稳压箱总温/℃	22.094	22.908	23.847	26.545	34.267
特征长度(弦长)/mm	60	60	60	60	60
特征马赫数	0.509	0.608	0.800	0.902	1.139
Re_{Index}	7.310×10^5	8.929×10^5	1.254×10^6	1.454×10^6	1.992×10^6
$Re_{Sutherland}$	7.301×10^5	8.925×10^5	1.257×10^6	1.459×10^6	2.006×10^6

力进行确认与评估。在叶栅试验中,雷诺数计算公式中的特征尺寸通常选用叶栅弦长,即弦长雷诺数。

目前常用的特征雷诺数的2种表征方法在形式上的差异仅在于是否将特征长度作为独立参数处理,二者可通过简单的数学变换相互转化。基于 Re 和 Re/L 特性图计算风洞特征雷诺数的流程见图3。

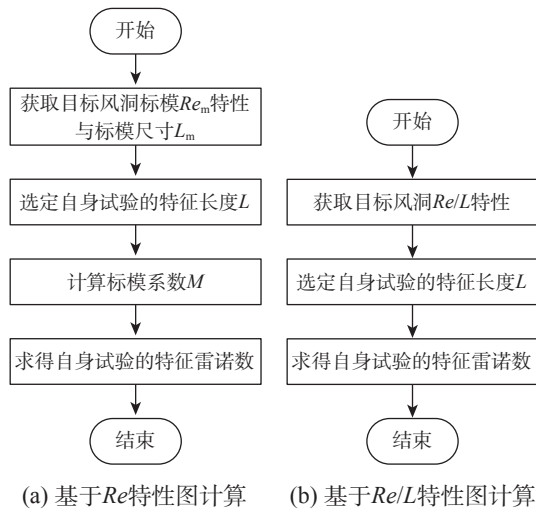


图3 基于 Re 和 Re/L 特性图计算试验雷诺数的流程图

Fig.3 Flowchart of calculating experimental Reynolds number based on Re and Re/L

基于风洞 Re 特性图计算试验雷诺数,需要经过基于标模特征雷诺数 Re_m 折算过程。具体而言,首先在风洞标模试验中,通过标模试验件的特征尺寸 L_m 计算对应的标模特征雷诺数 Re_m ,建立风洞的标准化雷诺数特性。其次根据自身试验需求确定特征尺寸后,根据式(11)计算出标模系数 M ,并通过式(12)基于标模雷诺数 Re_m 折合计算出自身试验的特征雷诺数。在进行不同风洞性能对比时,需要获取各风洞的 Re_m 特性图和标模试验件的特征尺寸 L_m ,重复进行基于标模特征雷诺数 Re_m 折算过程。

$$M = \frac{L}{L_m} \times 100\% \quad (11)$$

$$Re = M \times Re_m \quad (12)$$

基于 Re/L 表征方法是将等式右侧的 L 移至等式左侧,量纲则从无量纲变成了 $[L^{-1}]$ 。这种数学变换虽然简单,但显著简化了风洞雷诺数水平的评估过程。在风洞标模雷诺数特性建立阶段,通过预先消除标模试验件尺寸的影响,形成标准化的单位特征长度雷诺数特性曲线。因此,只需获取目标风洞

对应 Re/L 特性图,再乘以自身所需求的试验件特征尺寸,即可得到试验的特征雷诺数并用于试验评估。

基于 Re/L 的计算方法显著优化了风洞性能评估流程,避免了基于 Re 的计算方法需同时获取标模特征雷诺数 Re_m 和标模特征尺寸 L_m 并进行标模系数 M 折算的繁琐过程。这种简化不仅降低了数据处理的复杂度,还为不同风洞雷诺数水平的标准化对比提供了统一的评估基准。综上,推荐 Re/L 作为通用的衡量风洞雷诺数水平的参数。将式(11)、式(12)改为 Re/L 形式,得到式(13)、式(14)。

$$Re_{Index}/L \approx 257\,954.601\,59 \cdot \frac{Ma \cdot p_0}{(1 + 0.2Ma^2)^{2.26} T_0^{1.24}} \quad (13)$$

$$Re_{Sutherland}/L \approx 47\,720.846\,18 \cdot \frac{Ma \cdot p_0 \left(111 + \frac{T_0}{1 + 0.2Ma^2} \right)}{T_0^2 (1 + 0.2Ma^2)^{1.5}} \quad (14)$$

3.2 叶栅试验中叶片数与特征弦长的确认

在叶栅试验设计阶段,需要根据风洞测试段的尺寸限制进行叶片几何参数设计,主要关注问题包括叶片弦长 C 与叶片数量 n 的选择。风洞测试段的关键尺寸包括风口宽度 W 和风口高度 H 。叶栅风洞测试段结构如图4所示,风口宽度 W 决定叶片高度,风口高度 H 限制叶片数量。

叶栅理论二维流动的假设限制了 C 和 W 的关系,二者通过展弦比 AR 联系,如式(15)所示。若 AR 过小,则端壁二次流在流道中占比增加,甚至破坏二维性假设;若 AR 过大,则会令叶片弦长过小或要求更大的风口宽度(即叶片高度)。叶片弦长过小会降低试验件的雷诺数水平,增加加工制造和试验测量难度;而增大风口宽度需要更高的风洞建设投入。 AR 值推荐范围为1.8~4.0,最低要求为不小于1.5。

将式(15)分别代入式(9)、式(10),可得到叶片弦长特征雷诺数 Re_C 计算公式(式(16)、式(17))。计算中的输入参数主要有 W 、 AR 、 p_0 、 T_0 和 Ma 。 W 对一特定的风洞为固定值; AR 为主要变动值,用于计算叶片弦长 C ; p_0 、 T_0 和 Ma 用于叶栅试验工况点的确定,其变化范围受风洞形式和能力的约束。

$$AR = W/C \quad (15)$$

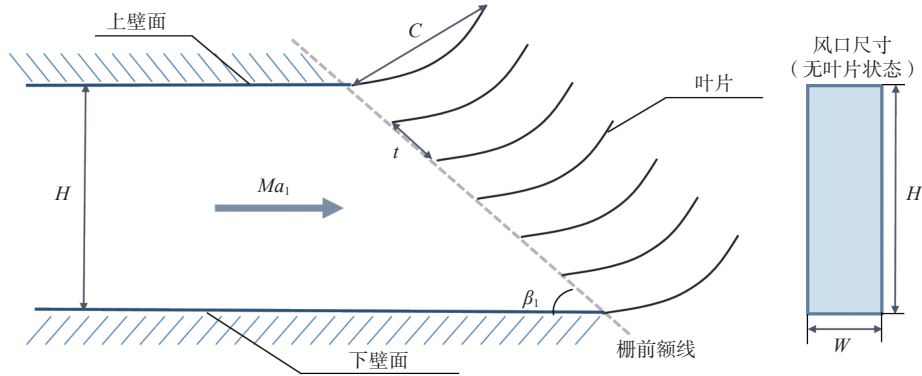


图4 叶栅风洞测试段基本结构示意图

Fig.4 Schematic diagram of the basic structure of a cascade wind tunnel test section

$$Re_{C,Index}(W, AR, p_0, T_0, Ma) \approx 257\,954.601\,59 \frac{W}{AR} \frac{Ma \cdot p_0}{(1 + 0.2Ma^2)^{2.26} T_0^{1.24}} \quad (16)$$

$$Re_{C,Sutherland}(W, AR, p_0, T_0, Ma) \approx 47\,720.846\,18 \frac{W}{AR} \frac{Ma \cdot p_0 \left(111 + \frac{T_0}{1 + 0.2Ma^2} \right)}{T_0^2 (1 + 0.2Ma^2)^{1.5}} \quad (17)$$

吴法勇和马宏伟^[24]推荐叶片流道区域总高度不低于风口高度的75%。基于此建议,可根据式(18)对叶片数量进行选择。叶片数以不小于7为佳,最小不能低于5^[15]。

$$H \geq (n-1) \cdot \frac{W}{AR \cdot \sigma} \cdot \sin(\beta_1) \geq 75\%H \quad (18)$$

式中: σ 为稠度,为叶片弦长与叶栅截距 t 之比; β_1 为进口气流角。

叶栅模化尺寸与叶片数量计算流程见图5。首先,需确认目标风洞的测试段基本尺寸,得到其风洞测试段的基本几何尺寸,包括风口宽度 W 和风口高度 H ,并获取期望测试工况点的参数工况点参数 p_0 、 T_0 和 Ma 。随后在选定 AR (推荐范围1.8~4.0)后,进行叶片弦长雷诺数和叶片流道总高度的计算。叶片弦长雷诺数应高于临界雷诺数(临界值为 2.5×10^5 ,建议不低于 4.0×10^5),以满足试验要求。若计算结果未达到要求,则需调整 AR 并重新计算,直至满足雷诺数条件。

叶片流道总高度的计算过程中,应当首先确定叶片稠度,其次是试验气流角范围,最后确定合适的叶片数量。在流道高度约束判断过程中,当初始计算结果不满足约束条件时,可首先通过调整叶片数量 n 进行优化(需满足至少5片)。若调整后仍不满足约束条件,则需重新选择 AR 并重复计算流程直至

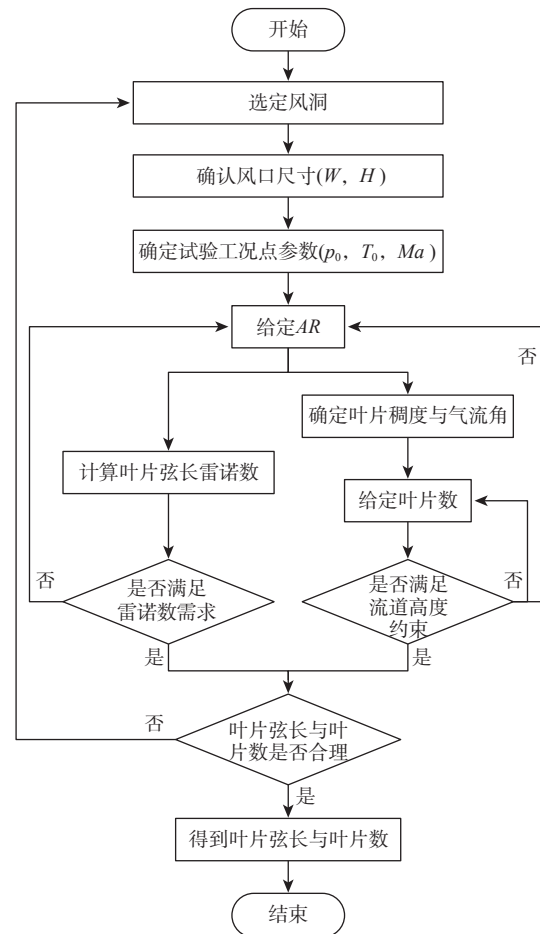


图5 叶栅模化尺寸与叶片数量确认方法流程图

Fig.5 Flowchart of a confirmation method about cascade modular size and blade number

满足要求。

叶栅几何参数的最终确定必须同时满足叶片弦长雷诺数要求和叶片流道总高度约束2个条件。在参数优化过程中,如果无法同时满足这2个条件,或得到的叶片尺寸与数量明显不合理,则需考虑选择其他风洞设施进行试验。

4 结论

基于黏度指数法与萨特兰法详细推导了叶栅风洞与试验中雷诺数的计算公式,并具体给出了该公式的应用示例,包括风洞雷诺数评估参数辨析和叶栅试验中的雷诺数评估,主要结论如下:

(1) 叶栅试验特征雷诺数计算方法可参见 Re_{Index} 和 $Re_{\text{Sutherland}}$ 计算公式(式(9)、式(10)),前者进行各特征参数的影响分析更简便,后者的计算精度更高。

(2) 试验雷诺数与进口总压和特征尺寸成正比,与进口总温的1.24次方成反比;在来流总温、总压和特征长度保持不变的条件下, $Ma \leq 1.192$ 时特征雷诺数增加, $Ma > 1.192$ 时特征雷诺数减小。

(3) 推荐采用单位特征长度雷诺数 Re/L 为通用性衡量风洞雷诺数水平的参数,其量纲为 $[L^{-1}]$,为不同风洞雷诺数水平的标准化对比提供了统一的评估基准。

(4) 给出了一种基于展弦比、雷诺数和风口高度约束的叶栅模化尺寸与叶片数量确认方法,可帮助研究人员开展叶栅试验件设计与风洞选型。

参考文献:

- [1] 张庆典,马宏伟,杨益,等. 平面叶栅气动试验研究进展与展望[J]. 力学学报,2022,54(7):1755-1777.
- [2] 邹正平,叶建,刘火星,等. 低压涡轮内部流动及其气动设计研究进展[J]. 力学进展,2007,37(4):551-562.
- [3] HODSON H P, HOWELL R J. The role of transition in high-lift low-pressure turbines for aeroengines[J]. Progress in Aerospace Sciences, 2005, 41(6):419-454.
- [4] 凌代军,姜正礼,于进涛,等. 低雷诺数平面叶栅试验方法研究[J]. 燃气涡轮试验与研究,2011,24(3):1-6.
- [5] 国家国防科技工业局. 航空燃气涡轮发动机轴流涡轮气动性能试验方法[S]. HB 7081-2012,2012.
- [6] POPE A, GOIN K L. High-speed wind tunnel testing [M]. New York: Wiley, 1965.
- [7] SCHLICHTING H. The variable density high speed cascade wind tunnel of the Deutsche Forschungsanstalt für Luftfahrt, Braunschweig [C]//. Eighth Meeting of the WFlight Test Techniques Panel. Brussels, Belgium: 1956.
- [8] ETW. European transonic windtunnel [EB/OL]. ETW-European Transonic Windtunnel GmbH. [2023-04-05]. <https://www.etw.de>.
- [9] SAUNDERS T. The European transonic wind tunnel-testing at flight Reynolds numbers [C]//. 34th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reno, USA: 1996.
- [10] SCHIMANSKI D, HEFER G. Recent aspects of high Reynolds number data quality and capabilities at the European Transonic Windtunnel [R]. AIAA 00-0292, 2000.
- [11] 张刃,杜文天,李庆利,等. 2.4 m连续式跨声速风洞气动设计与研究[J]. 空气动力学学报,2023,41(1):22-38.
- [12] 钟世东,吴军强,魏志,等. 2.4m跨声速风洞Re数模拟能力及其应用[J]. 实验流体力学,2008,22(4):76-79.
- [13] 谢飞,郭雷涛,朱涛,等. 高超声速风洞变雷诺数试验技术研究[J]. 空气动力学学报,2016,34(3):398-403.
- [14] 魏巍,马护生,周晓刚,等. 变密度平面叶栅风洞的设计与实现[J]. 实验流体力学,2022,36(5):24-33.
- [15] 李根深,陈乃兴,强国芳. 船用燃气轮机轴流式叶轮机械气动热力学(原理、设计与试验研究)[M]. 北京:国防工业出版社,1980.
- [16] 国家国防科技工业局. 超跨音速平面叶栅试验方法[S]. HB-20145-2014,2014.
- [17] 中国人民解放军总装备部. 低速风洞和高速风洞流场品质要求[S]. GJB-1179A-2012,2012.
- [18] 童秉纲,孔祥言,邓国华. 气体动力学[M]. 2版. 北京:高等教育出版社,2012.
- [19] 陈懋章. 粘性流体动力学基础[M]. 北京:高等教育出版社,2002.
- [20] SUTHERLAND W LII. The viscosity of gases and molecular force [J]. The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science, 1893, 36(223):507-531.
- [21] ANDREWS J R, BIBLARZ O. Temperature dependence of gas properties in polynomial form [R]. California: Naval Postgraduate School, 1981.
- [22] CENGEL Y A, CIMBALA J M, GHAJAR A J. Fundamentals of thermal-fluid sciences [M]. 6th. New York: McGraw-Hill Higher Education, 2021.
- [23] GREEN J, QUEST J. A short history of the European transonic wind tunnel ETW [J]. Progress in Aerospace Sciences, 2011, 47(5):319-368.
- [24] 吴法勇,马宏伟. 航空发动机涡轮试验[M]. 北京:科学出版社,2022.