

轴流涡轮损失模型研究进展^{*}

王嘉辉^{1,2}, 张华良^{1,2}, 尹 钊¹, 李 文^{1,2,3}, 陈海生^{1,2,3}, 汤宏涛³

(1. 中国科学院工程热物理研究所, 北京 100191;

2. 中国科学院大学 工程科学学院, 北京 100049;

3. 国家能源大规模物理储能技术(毕节)研发中心, 贵州 毕节 551712)

摘 要: 轴流涡轮损失预测模型是开展先进轴流涡轮设计优化、特别是低维快速性能预测的重要工具和基础, 更准确通用的损失模型一直是涡轮气动热力学领域研究的重点。近年来, 精细化设计理念的深入对损失模型提出更高的精度要求, 同时先进实验测量方法和数值模拟技术的发展也为建立更精准的损失模型提供了可能。因此, 本文首先梳理了轴流涡轮损失模型的发展历程及近年来的发展趋势, 并结合最新研究进展分析目前仍存在的不足, 最后对轴流涡轮损失模型的未来研究重点和发展趋势进行展望。

关键词: 轴流涡轮; 损失模型; 气动损失; 非定常流动; 研究进展

中图分类号: TK05 文献标识码: A 文章编号: 1001-4055 (2021) 01-0082-12

DOI: 10.13675/j.cnki. tjjs. 200213

Review of Axial Turbine Loss Model

WANG Jia-hui^{1,2}, ZHANG Hua-liang^{1,2}, YIN Zhao¹, LI Wen^{1,2,3}, CHEN Hai-sheng^{1,2,3}, TANG Hong-tao³

(1. Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100191, China;

2. School of Engineering Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. National Energy Large Scale Physical Energy Storage Technologies R&D Center (Bijie), Bijie 551712, China)

Abstract: Axial turbine loss model is a key for axial turbine aerodynamic preliminary design and low-dimensional optimization. More accuracy and universal loss models have been the key issues in the field of aerodynamic thermodynamics of turbines. In recent years, the development of precise design puts forward higher precision requirements for the axial turbine loss model. Moreover, the high-precision experimental measurement and numerical simulation technology provide the possibility for the establishment of more accurate loss model. Therefore, the development history and trend of loss model in recent years are summarized firstly. Then, based on the latest research progress, the existing deficiencies are introduced. Finally, the future research focus and development trend of axial flow turbine loss model are forecasted.

Key words: Axial flow turbine; Loss model; Aerodynamic loss; Unsteady flow; Review

^{*} 收稿日期: 2020-04-10; 修订日期: 2020-05-29。

基金项目: 国家重点研发计划 (2017YFB0903602); 国家杰出青年科学基金 (51925604); 国家自然科学基金面上项目 (51976218); 中国科学院国际合作局国际伙伴计划 (182211KYSB20170029); 贵州省科技计划项目 (黔科合基础[2017]1161号)。

作者简介: 王嘉辉, 硕士生, 研究领域为涡轮气动热力学。E-mail: wangjiahui@iet.cn

通讯作者: 张华良, 博士, 高级工程师, 研究领域为叶轮机械内部流动分离及其控制方法。E-mail: zhanghl@iet.cn

引用格式: 王嘉辉, 张华良, 尹 钊, 等. 轴流涡轮损失模型研究进展[J]. 推进技术, 2021, 42(1):82-93. (WANG Jia-hui, ZHANG Hua-liang, YIN Zhao, et al. Review of Axial Turbine Loss Model[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2021, 42(1):82-93.)

1 引言

轴流涡轮作为一种叶轮式做功机械,已广泛应用于各种能源动力领域,如航空发动机、燃气轮机、汽轮机、余热/余压透平、涡轮空气马达、压缩空气储能系统等。现代涡轮技术始终致力于追求更高效的气动性能,带动结构、强度、材料、传热等相关学科以及先进制造工艺发展的同时,也极大地提升了基于轴流涡轮的能源动力装备性能。

为实现高效轴流涡轮设计,必须进行气动性能的准确预测。人们先后发展了损失预测模型、通流分析以及三维数值模拟等方法,使数值研究更贴合涡轮内部强三维非定常粘性流动。考虑到涡轮设计具有多参数非线性耦合特点,并且设计流程需要精细、反复调整,损失预测模型显得尤为重要,可以为低维仿真、优化和设计提供重要指导,并大大缩短研发周期^[1]。但现有的各种损失模型在基本假设、计算方法、损失预测精度和适用范围等方面都存在差异^[2-3],有研究表明不同损失模型的选择对优化设计结果造成很大影响^[4-5]。因此,追求更准确、适用性更好的损失预测方法一直都是国内外学者研究的重点课题。

早期损失模型主要依靠大量的实验数据和经验分析,相关研究可以追溯到20世纪30年代^[6],并在此之后发展了数十种损失模型,在航空发动机设计领域获得广泛应用,为发动机快速发展做出重要贡献。1993年,Denton提出的熵分析方法使研究者们更加关注各种损失的产生机理,通过对损失机理进行更深入的研究以建立具有物理内涵的损失预测模型成为新趋势。进一步地,高精度数值计算方法和流场测量技术的发展使学者们能够对涡轮内部流动结构及损失产生机理进行更细致和深入的研究,损失模型也逐步计入流场非定常性,向着更吻合涡轮内部真实流动的方向发展^[7-8]。值得指出的是,涡轮前温度的不断提高使涡轮冷却设计成为高效涡轮设计中不可或缺的一环^[9],并力图以最少的冷气喷射附加损失达到最高效的冷却效果,因此准确的气冷涡轮损失预测至关重要^[10]。

与此同时,随着精细化设计理念的发展,针对复杂几何和气动参数对气动性能的研究逐步深入,如高马赫数下的激波损失(航空发动机高压涡轮)^[11]、低雷诺数影响下的边界层损失(航空发动机低压涡轮)^[12]、变工况影响下的性能恶化(涡轴/涡桨和燃气轮机动力涡轮)^[13]、大展弦比下的分离流损失(低工

况汽轮机末级叶片)、冷气喷射与主流相互作用下的掺混损失^[14]等,多种参数之间伴随着强耦合关系,由此对损失模型提出了更高的要求。

本文首先对轴流涡轮损失模型的发展脉络做全面回顾,分别介绍非气冷及气冷损失模型发展历程;其次,分析总结目前损失模型改进的关键问题;最后结合国内外研究趋势对损失模型的发展进行展望。

2 轴流涡轮损失来源与构成

从本质上讲,轴流涡轮内部流动损失来源于一系列不可逆过程:摩擦、掺混、激波和剪切等^[15]。由于流动损失的产生机制各不相同,早期建立损失模型的直观思想是分别对不同类型的损失进行量化。通常按照其产生位置分为叶型损失和端区损失^[16]。对于气冷涡轮,冷气喷射与主流相互作用造成额外的气动损失,以附加损失的形式计入总损失^[17]。但需要说明的是,随着对流场的深入认识,研究人员发现涡轮内部的各种损失同时产生并且相互作用,很难将它们完全区分开^[18]。

叶型损失主要包括叶片表面边界层摩擦损失、尾缘损失以及激波损失等^[19]。边界层中发生的耗散占有很大的比例,在发动机低压涡轮中甚至占到叶型损失的约80%^[20]。端区损失主要由二次流损失和间隙泄漏损失组成^[21]。Booth^[22]分析了九种单级涡轮的损失分布,认为这部分损失占单级涡轮总损失的50%左右。不同涡轮的两类损失所占比例差异也较大,如表1所示。由于二次流和间隙泄漏主要表现为涡轮内部大量涡系结构的产生、发展和相互作用(图1),因此,除了定量的流场参数测量,建立旋涡模型,从涡动力学角度解释流动机理成为端区损失研究的重要手段^[23-25]。气冷引起的附加损失包括两部分^[26]:(1)射流冷气与主流掺混时由于温度、速度差异造成热力学损失和动量损失;(2)冷气喷射影响下游边界层,引起边界层转捩,降低叶栅气动性能。其中,掺混损失是气冷附加损失的主要部分^[27]。

Table 1 Loss breakdown for typical turbine stage^[28]

	Characteristic of turbine stage	Profile loss/%	Endwall loss/%
A	Normal aspect ratio, normal solidity	40.76	59.24
B	Normal aspect ratio, low solidity	73.38	26.62
C	Low aspect ratio, normal solidity	36.33	63.67
D	Low aspect ratio, low solidity	55.30	44.70

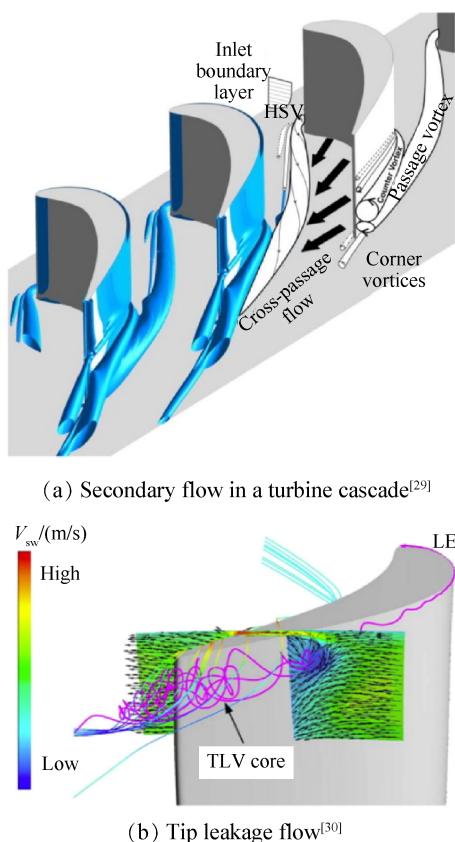


Fig. 1 Typical endwall flows in turbine cascade

3 轴流涡轮损失模型发展综述

国内外对损失模型的研究可以追溯至 20 世纪 30 年代。对于非气冷涡轮而言:其发展大致经历了两个研究阶段:20 世纪 90 年代以前,损失模型的建立主要依赖于大量的实验数据和数学拟合方法;自 1993 年 Denton 提出熵分析方法,研究者更注重对流动机理的研究,试图建立更符合流动物理机制的损失模型。近年来,根据设计要求和流场特征对已有损失模型进行组合选择和优化成为提高损失模型预测精度的有效方法。气冷涡轮损失模型的研究起步于 20 世纪 70 年代,由于冷气与主流相互作用机理非常复杂,模型的完善程度较低。下面分别对非气冷和气冷损失模型的发展历程进行回顾。

3.1 早期非气冷经典损失模型

早在 20 世纪 30 年代,国内外学者就开始基于实验数据,总结并提出轴流涡轮损失预测模型的概念,以追求快速便捷地对流动损失进行计算和评估。

第一个系统、完整的轴流涡轮损失模型由 Ainley 和 Mathieson^[31]于 1951 年提出,他们将总损失分为叶型损失 Y_p 、二次流损失 Y_s 和叶尖泄漏损失 Y_{tl} ,尾缘部分的附加损失以修正系数 χ_{TE} 的形式计入总损失,即

$$Y = (Y_p + Y_s + Y_{tl})\chi_{TE} \quad (1)$$

由于当时实验叶型的限制,该模型对大转折角、小展弦比叶型的损失估算精度较差,并且这种模型没有考虑马赫数的影响,只适用于亚声速涡轮的损失预测。20 世纪 60 年代 Soderberg^[32]、Carter 等^[33]通过直接整理试验数据,总结出利用进出口气流角等简单参数快速估计总损失的损失模型。1970 年,Dimhan 和 Came^[34]对 Ainley & Mathieson 模型进行了一系列的改进,计入马赫数、雷诺数、展弦比的影响,优化了间隙损失的计算方法,但是仍然没有考虑流体可压缩性的影响,并且认为雷诺数只影响叶型损失和二次流损失的大小。

1982 年, Kacker 和 Okapuu^[35]为提高损失模型的准确性对损失做了重新分解,将总损失分为叶型损失 Y_p 、二次流损失 Y_s 、叶尖泄漏损失 Y_{tl} 和尾缘损失 Y_{TE} ,即

$$Y = \chi_{Re} Y_p + Y_s + Y_{tl} + Y_{TE} \quad (2)$$

在叶型损失的预测中考虑了流体的可压缩性,并对激波损失的大小进行计算,有效提高了高马赫数时的预测精度;在对二次流损失预测时,还计入了流体的可压缩性,改进了展弦比因子。

Craig 和 Cox^[36]认为 Ainley & Mathieson 模型在预测损失时对展弦比和叶高的影响考虑不足,他们于 1970 年提出了一种同时适用于燃气轮机和汽轮机的损失预测方法。Chen^[37]于 1987 年在 Craig & Cox 模型的基础上拓宽了其在跨声速区域的适用性。1977 年, Traupel^[38]提出对静叶和动叶应采用不同损失预测关系式。Craig & Cox 模型和 Traupel 模型在对损失进行预测时考虑的气动参数和几何参数都较为全面。

边界层特征与叶栅中损失的关系早在 1960 年就得到研究者的重视。Stewart 等^[39-40]对叶片边界层特性进行了大量研究,建立起涡轮内部叶型损失与边界层厚度的关系式,端部损失、尾缘损失按叶型损失的一定比例进行预测。尽管 Stewart 模型在端壁损失、尾缘损失的预测方法上考虑因素过于简单,但该模型是首个从边界层特征考虑损失的模型。1968 年, Balje 等^[41]在 Stewart 模型的基础上,对叶型损失与边界层厚度的关系进行改进,并且将端部损失的预测分为端壁边界层损失和二次流引起的耗散两部分。这两种损失模型都没有考虑到激波对损失的影响,在对高马赫数涡轮进行预测时可能会有较大的误差。上述提到的模型都是可以预估涡轮内部总损失的损失预测模型,除此之外有研究者就二次流损

失或间隙损失单独进行研究,例如: Ehrrich & Detra^[42], Scholz^[43], Hawthorne^[44], Boulter^[45], Sharma & Butler^[46], Okan & Gregory-Smith^[47], Lakshminarayana^[48], Yaras & Sjolander^[49], Kim & Chung等^[50-51],在此不一赘述。

需要指出的是,由于航空涡轮发动机具有起飞、巡航、加速等多个工作状态,在偏离设计工况时,涡轮的运行攻角、雷诺数都会发生改变^[52]。非设计状态运行会导致涡轮性能的恶化^[53],宽工况适应性的涡轮设计需求使得研究者越来越重视预测模型的非设计点精度,甚至直接发展针对非设计点的预测模型。

攻角变化是最直观的参数,莫斯科动力学院^[54]、喀山航空学院^[54]、列宁格勒造船学院^[55]以速度系数作为损失的重要考量,对变攻角时速度系数的估算方法进行研究,考虑到叶片转折角、收敛度与攻角的关联关系,提出了一系列损失估算模型。

Ainley 和 Mathieson^[31]、Craig 和 Cox^[36]则引入攻角损失系数(χ_i),对零攻角时的叶型损失($Y_{p(i=0)}$)进行修正,即

$$Y_p = \chi_i Y_{p(i=0)} \quad (3)$$

认为变攻角引起的损失与失速攻角(失速攻角定义为叶型损失为最小值的两倍时的攻角)有关,并给出了攻角损失系数与失速攻角的关系,如图2、图3所示。Zehner(1980)^[56], Moustapha(1990)等^[57], Benner(1997)等^[58]先后提出损失计算的非设计点修正方法,计入了更全面的影响因素:栅距、气流转折角、安装角、前缘厚度、前缘楔角等,有效提高了非设计点损失的预测精度。

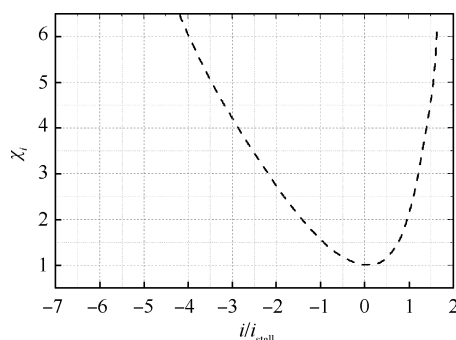


Fig. 2 Incidence loss coefficient in Ainley & Mathieson model^[31]

必须指出的是,根据涡轮叶型准确预估出口气流角的大小是预测损失的重要前提,通常使用的是基于平面叶栅试验结果的计算方法^[59],其中 Ainley 和

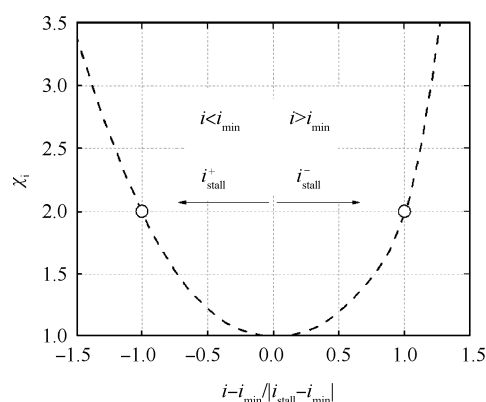


Fig. 3 Incidence loss coefficient in Craig & Cox model^[36]

Mathieson^[31]的计算方法不仅考虑到马赫数对落后角的影响,还计入了叶顶间隙大小、叶片是否带冠等因素。

应该说,早期基于实验数据统计获得的损失模型具有计算简便的优点,因此极具吸引力^[60],比如我国航空发动机设计手册上推荐使用是基于实验数据库的半经验算法模型,其中间隙损失采用 Hong Yong S 模型^[61],计算简便且精度可以满足工程的需求。但也有文献通过对比认为经典损失模型对某些关键因素的考虑仍有欠缺,存在适应性和准确性不足的问题^[15,62],特别是在非设计攻角的预测上仍然存在明显偏差^[63]。

3.2 现代非气冷损失模型研究现状

近年来损失模型的发展主要有两个方向:一是通过对气体动力学关系式的推导并结合实验,发展更接近真实流动的评估方法;二是通过对已有模型重新组合优化,提高预测精度和适用范围。

Denton(1993年)^[64]对叶栅中损失产生机制进行深入研究,试图用更接近物理机制的方式进行损失的评估,提出用熵增的方式对损失进行衡量,更能反应各种损失的产生机制

$$\zeta_s = \frac{T_2 \Delta s}{h_{02} - h_2} \quad (4)$$

将叶栅中的总损失分为边界层损失、尾缘损失、叶尖间隙损失、端部损失、激波损失和其他损失。尽管当时有部分损失仍需要通过经验公式计算,但其研究成果为更深入地分析损失来源和产生机制提供了重要思路。

2006年, Benner等^[65-66]认为目前对于叶型损失和端部损失的划分不合理,提出通过尾缘通道涡分离线的展向位置 Z_{TE} (图4)对叶型损失和二次流损失进行分解,即

$$Y = Y_{mid}(1 - Z_{TE}) + Y_{endwall} \tag{5}$$

并在此基础上改进了二次流损失的预测方式。

2012 年, Coull 等^[67]在 Denton 模型的基础上, 考虑叶型损失主要发生在吸力面边界层, 考虑折合频率对吸力面尾缘边界层厚度的影响, 将边界层的非定常效应计入叶型损失。之后, Coull^[29]对平面叶栅进行了参数化研究, 将端部损失分为两部分: 端壁边界层引起的耗散和二次流引起的损失, 并通过实验数据验证了该模型具有较高的预测精度, 但其对端区损失的研究仅考虑了进出口几何角的影响(图 5), 进口气动参数以及展弦比的影响还有待进一步研究, 并且此端部损失模型仍然没有考虑到流动的非定常性。

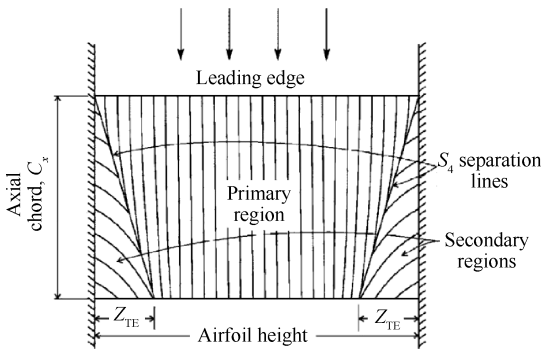


Fig. 4 Suction surface definition for the new loss breakdown^[65]

2016 年, Baturin 等^[68-69]对叶型损失的来源进行分析, 将叶型损失分解为激波损失 Y_{shock} 、摩擦损失 Y_{fr} 和尾缘损失 Y_{TE} , 计入了叶片转折角、叶片相对厚度、相对栅距、安装角、尾缘厚度、攻角、雷诺数等参数(表 2), 利用多目标优化程序结合大量实验数据建立了更准确的叶型损失的计算方法, 即

$$Y_p = Y_{fr} K_i K_{Re} + Y_{TE} + Y_{shock} \tag{6}$$

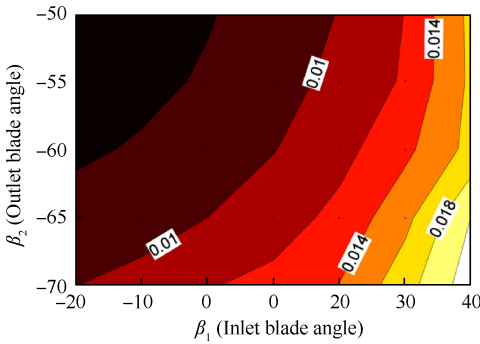


Fig. 5 Endwall entropy loss coefficients^[29]

式中 K_i, K_{Re} 分别为攻角修正系数、雷诺数修正系数。此叶型损失模型考虑了更全面的参数, 与 Kacker & Okapuu 模型相比, 具有更宽的适用范围、更高的预测精度。

近年来, 有很多研究者对经典的损失模型进行优化和重组, 达到了拓宽适用范围和提高预测精度的目的。

2005 年, Zhu 等^[70]认为现有的损失模型在对高载荷低压涡轮的预测上准确度不足, 他们对 Kacker & Okapuu 模型的叶型损失关系式进行改进, 仅通过优化模型的系数就提高了预测精度。

2010 年, Tournier 等^[71]整合了 Benner, Kacker & Okapuu, Zhu 等最新研究结果, 对叶型损失、二次流损失、间隙损失分别采用当时精度较高的方法(表 3), 建立了预测轴流涡轮性能的一维模型。Javaniyan 等^[72]发现该模型在设计点和非设计点都有更高的精度。2013 年, Beschorner 等^[73]拓宽了该模型的展弦比适用范围, 使损失模型对展弦比 $AR=0.25$ 的涡轮仍有较高的预测精度(图 6)。

为了方便地得到非设计点损失, Yuan 等^[74]于 2014 年定义了攻角因子, 对 Benner 非设计点计算方法和 Kacker & Okapuu 设计点计算方法进行整合, 建

Table 2 Variables affecting the value of profile losses in Baturin model^[69]

Variables	Loss type on which it affects
Relative value of flow deflection angle in turbine cascade	Friction losses
Relative position of maximum thickness	Friction losses
Relative maximum blade thickness	Friction losses
Isentropic specific velocity at the cascade outlet	Friction losses, wave losses
Relative spacing	Friction losses, edge losses
Relative blade angle	Separation losses
Reynolds number	Friction losses
Flow angle at the cascade outlet	Edge losses
Bending angle of profile	Edge losses
Trailing edge radius	Edge losses

Table 3 Tournier modle

Loss model source	
Total loss	Kacker & Okapuu, Benner
Profile loss	Kacker & Okapuu, Zhu
Secondary loss	Benner
Tip leakage loss	Yaras & Sjolander
Edge loss	Kacker & Okapuu

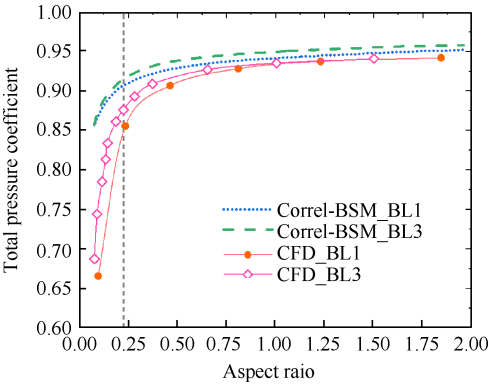


Fig. 6 Prediction of turbine losses with different aspect ratio (Beschorner model versus CFD)^[73]

立了通用的叶型损失模型。2016 年,倪林森等^[75]对多级轴流透平流动损失模型进行修正,在 AMDC 模型的基础上引入前排叶栅的修正提高了多级透平性能的预测精度。

3.3 气冷涡轮损失模型发展简介

气冷涡轮损失模型的建立包括掺混模型及损失计算方法两部分^[76]。1972 年,Hartsel^[77]提出掺混层模型(图 7),为冷气掺混损失模型的发展奠定了理论基础,该模型假定冷气与主流在掺混层内完全掺混,混合过程压力是恒定的。在此基础上,Hartsel 通过推导动量方程和能量方程提出 TOTLO 模型用于气冷掺混损失的分析,计算方法较为复杂,但是其精度满足需要^[78]。 W_0 为进口质量流量, W_1 为进口质量流量。

1980 年,Ito 等^[79]基于 Hartsel 掺混层模型发展了一种适用于单孔小吹风比气冷掺混损失的预测模型,简化了 Hartsel 的计算方法,由于其推导过程是基于不可压缩假设,对高马赫数情况的预测可能存在偏差。许开富等^[80](2006 年)在其基础上进行可压缩性修正,拓宽了模型的适用范围。曲龙^[81](2013 年)给出 Ito 模型中的参数 σ (掺混层气流流量占主流总流量的比值)的计算方法,使 Ito 模型的应用更为便捷。

Kollen 等 (1985 年)^[82]、Lakshminarayana (1996 年)^[83]基于 Hartsel 模型提出改进的计算方法,计入可压缩效应及冷气与主流掺混过程中的压力变化。杨

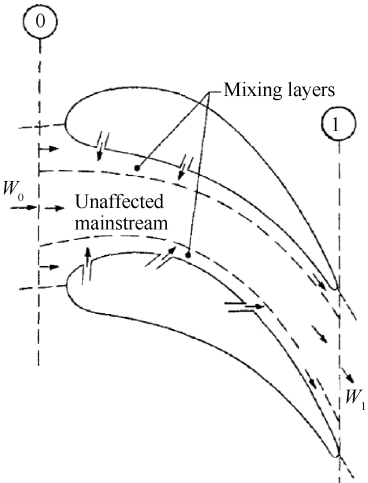


Fig. 7 Mixing model of Hartsel^[77]

弘 (1995 年)^[84]、Bohn 和 Kim (1999 年)^[85]在 Harsel 掺混层模型的基础上提出尾缘掺混模型,用于计算尾缘冷却损失。

1989 年,黄忠湖等^[86]给出一种间接计入冷气掺混损失的计算方法。他们利用半经验公式计算出质量、能量和动量掺混影响下的速度损失系数从而得到气冷引起的效率降低值,适用于气膜冷却、对流冷却、混合冷却等多种冷却方式。

与非气冷损失模型的发展历程类似,Denton (1993 年)提出用熵增的方式衡量损失,引导了之后的气冷损失模型的发展。2000 年,Ning^[2]结合掺混层模型和 Shaprio^[87]的流向一维方程提出一种计算熵损失的预测模型,使模型可以方便地应用于涡轮初步性能预估。2002 年,Wilcock 等^[88]将气冷引起的熵增分为三部分:冷却气流在内部传热和摩擦($\Delta\Sigma_{int}$)、外部与主流掺混($\Delta\Sigma_{ext,mix}$)以及外部有温差的传热($\Delta\Sigma_{ext,Q}$),即

$$\Delta\Sigma_{Air-cooled} = \Delta\Sigma_{int} + \Delta\Sigma_{ext,mix} + \Delta\Sigma_{ext,Q} \quad (7)$$

2012 年,Lim 等^[89]在 Hartsel 掺混层模型和 Yong&Wilcock 模型的基础上提出一种计算气冷涡轮气动效率的方法,引入主流与冷却射流的绝对夹角 (κ ,图 8),将模型的计算范围拓宽至具有复合角度的气膜冷却涡轮。

近年来,Cha (2014 年、2015 年)^[90-91]对冷气掺混进行了一系列研究,将 Hartsel 掺混层模型与有限速率模型^[92]结合提出气冷掺混熵增的计算方法,将主流与冷气不同组分之间化学反应的影响、掺混过程中压力变化纳入损失模型的计算。

3.4 当前损失模型存在的不足

通过对损失模型的发展脉络进行梳理,可以看

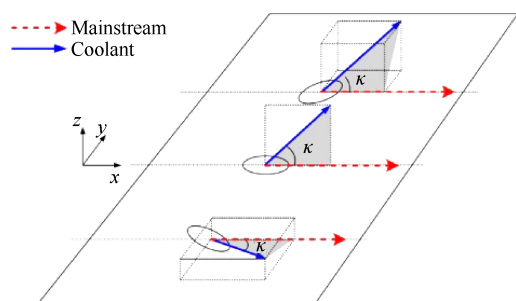


Fig. 8 Three cooling holes with the same κ ^[89]

出国内外研究者在损失模型的建立和发展上做出了大量努力,并且取得了一定的研究成果(表4)。但总的来说,由于涡轮内部流动本身的复杂性,尚未建立物理内涵清晰的流场-损失-模型三者之间的量化表征关系,导致目前损失模型在精度上、适用性上还存在许多不足,具体表现在以下方面:

(1)多因素间相互耦合关系有待进一步考虑。

随着对涡轮内部损失研究的不断深入,辅以更精细的实验条件和数值模拟技术,对其影响因素的探究也不只局限于单一因素。NASA^[93-95]在变速动力涡轮(VSPT)系列研究中指出损失模型在低雷诺数情况下的变攻角预测精度有限。此外,目前损失模型对展弦比^[96]、叶片转折角^[97]、攻角与载荷分布^[98-99]等因素相互作用的影响考虑不足,甚至存在尚未计入的因素(如尾缘形状^[100]、来流条件^[101]等)。

(2)端区流动机理与损失量化之间的联系有待进一步研究。

端区存在大量的附面层分离和旋涡运动,流动损失与这些流动现象密切相关,但目前最新的端部损失模型仍然属于半经验半理论计算方法,尚未建立模型参数与流动结构之间的内在联系^[29,64];同时,

Table 4 Summary of typical axial flow turbine loss models

Loss type	Loss model	Year	Loss type	Loss model	Year
Profile loss	Ainley & Mathieson	1951	Tip leakage loss	Ainley & Mathieson	1951
	Stewart	1960		Hong Yong S	1966
	Balje & Binsley	1968		Balje & Binsley	1968
	AMDC	1970		AMDC	1970
	Craig & Cox	1970		Craig&Cox	1970
	Traupel	1977		Lakshminarayana	1970
	Kacker & Okapuu	1982		Traupel	1977
	Denton	1993		Kacker & Okapuu	1984
	Zhu	2005		Yaras & Sjolander	1992
	Baturin	2017		Denton	1993
Edge loss	Coull	2017		Kim & Chung	1999
	Ainley & Mathieson	1951		Beshorner	2013
	Craig & Cox	1970	Incidence loss	Ainley & Mathieson	1951
Secondary loss	Traupel	1977		Craig & Cox	1970
	Ainley & Mathieson	1951		Zehner	1980
	Ehrrich & Detra	1954		Moustapha	1990
	Scholz	1954		benner	1997
	Hawthorne	1955	Air-cooled loss	Hartsel	1972
	Stewart	1960		Ito	1980
	Boulter	1962		Kollen & Koschei	1985
	Balje & Binsley	1968		Huang Zhonghu	1989
	AMDC	1970		Yang Hong	1995
	Craig&Cox	1970		Lakshminarayana	1996
	Traupel	1977		Bohn & Kim	1999
	Kacker & Okapuu	1984		Ning	2000
	Sharma & Butler	1987		Young & Wilcock	2002
	Okan & Gregory-Smith	1992		Lim	2012
	Benner	2006		Cha	2015
	Coull	2017			

涡轮中各种损失同时产生且相互影响,对其进行分解非常困难,但损失模型的建立往往需要对损失进行解耦分析,旋涡的发展过程既有独立的形态,又互相影响,如何建立旋涡模型与端区损失之间的联系还有待进一步的研究。

(3)气冷涡轮损失预测需要进一步细化。

涡轮本身的三维流动加上冷气喷射,使其流动机理更为复杂,目前还未形成系统的损失预测体系,并且现有损失模型大多是针对气膜冷却提出的,适用于新型冷却技术(如层板冷却、发散冷却)的损失模型还有待进一步探索。此外,相对于主流而言,冷气也属于一种二次流,研究表明射流冷气会在叶栅下游诱发很强的涡结构——肾形涡^[102],目前对其进行的研究还集中在涡结构对冷却效率的影响方面^[103],气冷附加损失的大小与该结构的关系还有待进一步研究。

(4)非定常效应与损失量化之间的联系有待进一步研究。

已有研究证实动静干涉和来流尾迹是涡轮内部非定常损失的主要来源,特别是上游尾迹还会影响涡轮的变攻角特性^[104]、端区二次流^[105]及边界层^[106]的发展。对于气冷涡轮而言,非定常效应更为复杂,冷气与激波^[107]、尾迹^[108]等发生相互作用影响涡轮的气动性能。考虑非定常特征的涡轮设计优化已有真实案例^[109](如时序效应、Calming效应^[110]等),然而损失模型对这些非定常效应的考虑还明显不足。

4 结论与展望

自20世纪30年代以来,研究者对轴流涡轮损失模型的研究从未间断,在损失构成、规律探索、模型建立、模型修正等方面开展了卓有成效的工作,预测精度及适用性不断提升。本文通过广泛调研,统计数十种非气冷与气冷涡轮损失模型及其发展历程,特别是展示了近些年研究的新思路,分析了目前仍存在的不足,上述工作对于未来损失模型改进具有一定参考意义。

随着现代能源动力装备对极限工况下的涡轮气动性能要求不断提高,改善损失模型的精度和适用性仍是提高涡轮效率、缩短设计周期的关键。轴流涡轮内部损失受到多种因素耦合影响,实验测量和数值模拟技术的发展为建立更准确的损失模型提供了可能。展望未来,轴流涡轮损失模型发展的主要途径包括:

(1)建立系统的实验/数值模拟数据库,考虑多几

何和气动变量的组合,更科学地设计实验方案,借助先进数据分析与回归方法,提升多变量耦合影响下的强非线性气冷与非气冷损失模型精度与普适性,特别是提高极限工况下的预测精度。

(2)通过对旋涡模型和二次动能耗散机理进行更深入的研究可以更好地对各部分损失进行解耦分析,并建立不同涡系之间的协同关系,从而进一步提高损失模型的预测精度。

(3)采用精细实验技术与高精度非定常数值模拟,定性分析和定量分析相结合,详细地研究尾迹、激波、边界层、冷气之间的相互作用机理,建立损失与可以表征涡轮内部非定常流动的无量纲准则数(如:折合频率、斯特劳哈尔数)之间的联系将是提高损失模型预测精度的有效方式。

致谢:感谢国家重点研发计划、国家杰出青年科学基金、国家自然科学基金面上项目、中国科学院国际合作局国际伙伴计划、贵州省科技计划项目的资助。

参考文献

- [1] Javaniyan J H, Eftari M, Shahhoseini M R, et al. A Method of Performance Estimation for Axial Flow Turbines Based on Losses Prediction[J]. *Journal of Mechanical Research and Application*, 2012, 4(1): 35-43.
- [2] Ning Wei. Significance of Loss Models in Aerothermodynamic Simulation for Axial Turbines [D]. *Stockholm: Royal Institute of Technology*, 2000.
- [3] 华鑫, 乔渭阳, 卢蕊, 等. 基于流线曲率法的航空轴流涡轮损失模型研究[J]. *机械设计与制造*, 2005, (12): 12-14.
- [4] 靳杰, 温风波, 韩万金, 等. 不同损失模型对气冷涡轮S2流面优化影响的分析[J]. *热能动力工程*, 2009, 24(1): 12-18.
- [5] Bertini F, Ampellio E, Marconcini M, et al. A Critical Numerical Review of Loss Correlation Models and Smith Diagram for Modern Low Pressure Turbine Stages [R]. *ASME GT* 2013-94849.
- [6] Hall S R. Investigation of the Effects of Compressibility on Profile Pressure Losses in Axial Turbine Cascades [D]. *Ottawa: Carleton University*, 2012.
- [7] 邵梓一, 李文, 张雪辉, 等. 透平内部非稳态流动试验研究进展[J]. *推进技术*, 2019, 40(10): 2161-2174. (SHAO Zi-yi, LI Wen, ZHANG Xue-hui, et al. Experimental Research Progress on Internal Unsteady Flow of Turbine [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2019, 40(10): 2161-2174.)
- [8] Pinto R N, Afzal A, D'Souza L V, et al. Computational Fluid Dynamics in Turbomachinery: A Review of State of

- the Art[J]. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 2017, 24(3): 467-479.
- [9] 杨卓君. 燃气涡轮气膜冷却的优化设计与气热性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2019.
- [10] Zhang J, Zhang S, Wang C, et al. Recent Advances in Film Cooling Enhancement: A Review[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2020, 33(4): 1119-1136.
- [11] Puente R, Paniagua G, Verstraete T. Design Trade-Off Study Between Efficiency and Rotor Forcing Attenuation in a Transonic Turbine Stage[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2015, 39(2): 838-850.
- [12] 朱俊强, 屈 骁, 张燕峰, 等. 高负荷低压涡轮内部非定常流动机理及其控制策略研究进展[J]. 推进技术, 2017, 38(10): 2186-2199. (ZHU Jun-qiang, QU Xiao, ZHANG Yan-feng, et al. Research Progress on Unsteady Flow Mechanism and Control Strategies of High-Lift Low Pressure Turbine[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2017, 38(10): 2186-2199.)
- [13] Jain N, Bravo L, Kim D, et al. Massively Parallel Large Eddy Simulation of Rotating Turbomachinery for Variable Speed Gas Turbine Engine Operation [J]. *Energies*, 2020, 13(3): 703.
- [14] Lanzillotta F, Sciacchitano A, Rao A G. Effect of Film Cooling on the Aerodynamic Performance of an Airfoil [J]. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2017, 66: 108-120.
- [15] Dahlquist A N. Investigation of Losses Prediction Methods in 1D for Axial Gas Turbines[D]. Lund: Lund University, 2008.
- [16] Ennil A B, Al-Dadah R, Mahmoud S, et al. Minimization of Loss in Small Scale Axial Air Turbine Using CFD Modeling and Evolutionary Algorithm Optimization [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2016, 102: 841-848.
- [17] 林晓春. 透平叶片气膜冷却及冷气掺混损失研究[D]. 北京: 中国科学院工程热物理研究所, 2018.
- [18] Zlatinov M B, Sooi Tan C, Montgomery M, et al. Turbine Hub and Shroud Sealing Flow Loss Mechanisms[J]. *Journal of Turbomachinery*, 2012, 134(6).
- [19] Božić I, Benišek M. An Improved Formula for Determination of Secondary Energy Losses in the Runner of Kaplan Turbine [J]. *Renewable Energy*, 2016, 94: 537-546.
- [20] Curtis E M, Hodson H P, Banieghbal M R, et al. Development of Blade Profiles for Low-Pressure Turbine Applications[J]. *Journal of Turbomachinery*, 1997, 119(3): 531-538.
- [21] 魏佐君. 高负荷涡轮端区非定常流动机理及损失控制研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2016.
- [22] Booth T C. Importance of Tip Clearance Flows in Turbine Design [R]. Von Karman Institute, VKI LS 1985-05, 1985.
- [23] 丁小娟, 钟兢军, 陆华伟. 涡轮平面叶栅设计工况下旋涡结构分析[J]. 节能技术, 2017, 35(5): 396-401.
- [24] 易小兰, 张华良, 苏 赫, 等. 超高负荷涡轮叶栅内的旋涡结构分析[J]. 工程热物理学报, 2014, 35(7): 1290-1294.
- [25] Gao J, Zheng Q, Liu Y, et al. Effects of Blade Rotation on Axial Turbine Tip Leakage Vortex Breakdown and Loss [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, 2017, 231(9): 1634-1649.
- [26] Walters D K, Leylek J H. Impact of Film-Cooling Jets on Turbine Aerodynamic Losses[J]. *Journal of Turbomachinery*, 2000, 122(3): 537-545.
- [27] 高 扬. 透平气膜冷却与冷气掺混损失研究[D]. 北京: 中国科学院工程热物理研究所, 2015.
- [28] 王远庆. 低稠度叶尖涡轮的气动设计与试验研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2018.
- [29] Coull J D. Endwall Loss in Turbine Cascades[J]. *Journal of Turbomachinery*, 2017, 139(8).
- [30] Gao J, Zheng Q, Xu T, et al. Inlet Conditions Effect on Tip Leakage Vortex Breakdown in Unshrouded Axial Turbines[J]. *Energy*, 2015, 91: 255-263.
- [31] Ainley D G, Mathieson G C. A Method of Performance Estimation for Axial-Flow Turbines[R]. *Aeronautical Research Council London (United Kingdom)*, ARC-R/M-2974, 1951.
- [32] Soderberg C R. Gas Turbine Laboratory. Massachusetts Institute of Technology[R]. *Unpublished Notes*, 1949.
- [33] Carter A F, Lenherr F K. Correlations of Turbine Blade Total-Pressure-Loss Coefficients Derived from Achievable Stage Efficiency Data [R]. *ASME 68-WA/GT-5*, 1968.
- [34] Dunham J, Came P M. Improvements to the Ainley-Mathieson Method of Turbine Performance Prediction [J]. *Journal of Engineering for Power*, 1970, 92(3): 252-256.
- [35] Kacker S C, Okapuu U. A Mean Line Prediction Method for Axial Flow Turbine Efficiency [J]. *Journal of Engineering for Power*, 1982, 104: 111-119.
- [36] Craig H R M, Cox H J A. Performance Estimation of Axial Flow Turbines[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 1970, 185(1): 407-424.
- [37] Chen S. A Loss Model for the Transonic Flow Low-Pressure Steam Turbine Blades[R]. *IME, C271/87*, 1987: 145-153.
- [38] Traupel W. Thermische Turbomaschinen [M]. Berlin: Springer Verlag, 1977.
- [39] Stewart W L. Analysis of Two-Dimensional Compress-

- ible-Flow Loss Characteristics Downstream of Turbomachine Blade Rows in Terms of Basic Boundary-Layer Characteristics[R]. *NACA TN 3515*, 1955.
- [40] Stewart W L, Whitney W J, Wong R Y. A Study of Boundary-Layer Characteristics of Turbomachine Blade Rows and Their Relation to Over-All Blade Loss [J]. *Journal of Basic Engineering*, 1960, 82(3): 588-592.
- [41] Balje O E, Binsley R L. Axial Turbine Performance Evaluation. Part A—Loss-Geometry Relationships[J]. *Journal of Engineering for Power*, 1968, 90(4): 341-348.
- [42] Ehrich F F, Detra R W. Transport of the Boundary Layer in Secondary Flow[J]. *Journal of the Aeronautical Sciences*, 1954, 21(2): 136-138.
- [43] Scholz N. Secondary flow losses in Turbine Cascades[J]. *Journal of the Aeronautical Sciences*, 1954, 21(10): 707-708.
- [44] Hawthorne W R. Some Formulae for the Calculation of Secondary Flow in Cascades[R]. *Aeronautical Research Council*, 1955.
- [45] Boulter R A. The Effect of Aspect Ratio on the Secondary Losses in a Cascade of Impulse Turbine Blades[R]. *Unpublished Pametrada Report*, 1962.
- [46] Sharma O P, Butler T L. Predictions of Endwall Losses and Secondary Flows in Axial Flow Turbine Cascades[J]. *Journal of Turbomachinery*, 1987, 109(2): 229-236.
- [47] Okan M B, Gregory-Smith D G. A Simple Method for Estimating Secondary Losses in Turbines at the Preliminary Design Stage[R]. *ASME 92-GT-294*.
- [48] Lakshminarayana B. Methods of Predicting the Tip Clearance Effects in Axial Flow Turbomachinery[J]. *Journal of Basic Engineering*, 1970, 92(3): 467-482.
- [49] Yaras M I, Sjolander S A. Prediction of Tip-Leakage Losses in Axial Turbines [J]. *Journal of Turbomachinery*, 1992, 114(1): 204-210.
- [50] Kim B N. A Numerical Study on Flow and Heat Transfer and Development of Tip-Leakage Loss and Broadband Noise Model for Axial Flow Turbomachinery Tip Gaps [D]. *Daejeon: Korea Advanced Institute of Science and Technology*, 1996.
- [51] Kim B N, Chung M K. Improvement of Tip Leakage Loss Model for Axial Turbines [J]. *Journal of Turbomachinery*, 1997, 119(2): 399-401.
- [52] 张宗辰, 杜皖实, 付海涛, 等. 非设计攻角对涡轮叶片叶型损失的影响特点分析[J]. *重庆理工大学学报(自然科学)*, 2017, 31(11): 109-116.
- [53] Jouini D B M, Sjolander S A, Moustapha S H. Midspan Flow-Field Measurements for Two Transonic Linear Turbine Cascades at Off-Design Conditions[J]. *Journal of Turbomachinery*, 2002, 124(2): 176-186.
- [54] 翁史烈. 燃气轮机性能分析[M]. 上海: 上海交大出版社, 1987.
- [55] 万欣. 燃气轮机机械[M]. 北京: 机械工业出版社, 1987.
- [56] Zehner P. Calculation of Four-Quadrant Characteristics of Turbines[R]. *ASME 80-GT-2*.
- [57] Moustapha S H, Kacker S C, Tremblay B. An Improved Incidence Losses Prediction Method for Turbine Airfoils [R]. *ASME 89-GT-284*.
- [58] Benner M W, Sjolander S A, Moustapha S H. Influence of Leading-Edge Geometry on Profile Losses in Turbines at Off-Design Incidence: Experimental Results and an Improved Correlation [J]. *Journal of Turbomachinery*, 1997, 119(2): 193.
- [59] 黄庆南, 刘泽秋, 朱铭福, 等. 航空发动机设计手册: 涡轮(第10册)[M]. 北京: 航空工业出版社, 2001.
- [60] 刘超. 航空涡轮损失预估方法研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013.
- [61] Hong Y S, Groh F G. Axial Turbine Loss Analysis and Efficiency Prediction Method[R]. *Boeing Co Seattle Wa Turbine Div D4-3220*, 1966.
- [62] Behera A K, Choudhary T, Kumar P. A Review on Turbine Design and Optimization—A State of Art II[J]. *Certified Journal*, 2014, 4(2): 881-884.
- [63] 孙大伟. 高压涡轮二次流机理、损失模型及控制技术研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2009.
- [64] Denton J D. The 1993 IGTI Scholar Lecture: Loss Mechanisms in Turbomachines [J]. *Journal of Turbomachinery*, 1993, 115(4): 621-656.
- [65] Benner M W, Sjolander S A, Moustapha S H. An Empirical Prediction Method for Secondary Losses in Turbines, Part II: a New Secondary Loss Correlation[J]. *Journal of Turbomachinery*, 2006, 128(2): 281-291.
- [66] Benner M W, Sjolander S A, Moustapha S H. An Empirical Prediction Method for Secondary Losses in Turbines, Part I: a New Loss Breakdown Scheme and Penetration Depth Correlation [J]. *Journal of Turbomachinery*, 2006, 128(2): 273-280.
- [67] Coull J D, Hodson H P. Predicting the Profile Loss of High-Lift Low Pressure Turbines [J]. *Journal of Turbomachinery*, 2012, 134(2).
- [68] Baturin O V, Popov G M, Kolmakova D A, et al. The Best Model for the Calculation of Profile Losses in the Axial Turbine [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2017, 803(1).
- [69] Baturin O, Kolmakova D. Development of A New Equations Describing Profile Losses in Axial Turbine Blade Row[C]. *Samara: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018.
- [70] Zhu J, Sjolander S A. Improved Profile Loss and Deviation Correlations for Axial-Turbine Blade Rows [R].

ASME GT 2005-69077.

- [71] Tournier J M, El-Genk M S. Axial Flow, Multi-Stage Turbine and Compressor Models[J]. *Energy Conversion and Management*, 2010, 51(1): 16-29.
- [72] Javaniyan J H, Eftari M, Shahhoseini M R, et al. A Method of Performance Estimation for Axial Flow Turbines Based on Losses Prediction[J]. *Journal of Mechanical Research and Application*, 2012, 4(1): 35-42.
- [73] Beschorner A, Vogeler K, Goldhahn E, et al. Experimental and Numerical Investigations to Extend the Validity Range of a Turbine Loss Correlation for Ultra-Low Aspect Ratios in Transonic Flow[R]. *ETC10, ETC2013-085*, 2013.
- [74] Yuan Z W, Zhang J, Zhu D S. Profile Loss Correlations for Variable Incidences[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, 577: 527-530.
- [75] 倪林森, 陈 榴, 戴 韧. 多级轴流透平流动损失结构与损失模型的修正[J]. *工程热物理学报*, 2016 (12): 78-84.
- [76] 侯伟涛, 潘贤德, 张 洪, 等. 高压涡轮气冷叶片冷却掺混损失数值研究[J]. *推进技术*, 2018, 39(2): 342-350. (HOU Wei-tao, PAN Xian-de, ZHANG Hong, et al. Numerical Investigation into Coolant Mixing Loss of High Pressure Turbine Air-Cooled Blade [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2018, 39 (2) : 342-350.)
- [77] Hartsel J. Prediction of Effects of Mass-Transfer Cooling on the Blade-Row Efficiency of Turbine Airfoils [C]. *San Diego: 10th Aerospace Sciences Meeting*, 1972.
- [78] Walters D K, Leylek J H. Impact of Film-Cooling Jets on Turbine Aerodynamic Losses[J]. *Journal of Turbomachinery*, 2000, 122(3): 537-545.
- [79] Ito S, Eckert E R G, Goldstein R J. Aero-dynamic Loss in a Gas Turbine Stage with Film Cooling[J]. *Journal of Engineering for Power Transactions*, 1980, 102 (4) : 964-970.
- [80] 许开富, 乔渭阳, 伊进宝, 等. 航空燃气涡轮冷气掺混流动损失的数值研究[J]. *航空学报*, 2006, 27(2): 182-186.
- [81] 曲 龙. 涡轮损失模型的研究及CFD验证[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2013.
- [82] Koellen O, Koschel W. Effect of Film Cooling on the Aerodynamic Performance of a Turbine Cascade [R]. *HTCG, N86-29823 21-07*, 1985.
- [83] Lakshminarayana B. Fluid Dynamics and Heat Transfer of Turbomachinery[M]. *New Jersey: John Wiley & Sons*, 1995.
- [84] 杨 弘. 气冷涡轮叶栅效率的计算方法[J]. *航空动力学报*, 1995, 10(1): 41-44.
- [85] Bohn D, Kim T S. Aerodynamic Loss Prediction of Axial Flow Turbine Blade Rows with Coolant Injection[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part A Journal of Power & Energy*, 1999, 213(2): 93-101.
- [86] 黄忠湖, 王月奇, 杨锦甫. 有冷气掺混的涡轮气动设计计算方法[J]. *航空动力学报*, 1989, 4(4): 6-9.
- [87] Shapiro A H. The Dynamics and Thermo-Dynamics of Compressible Fluid Flow[M]. *New Jersey: John Wiley & Sons*, 1953.
- [88] Young J B, Wilcock R C. Modeling the Air-Cooled Gas Turbine, Part 2: Coolant Flows and Losses[J]. *Journal of Turbomachinery*, 2002, 124(2): 214-221.
- [89] Lim C H, Pullan G, Northall J. Estimating the Loss Associated with Film Cooling for a Turbine Stage[J]. *Journal of Turbomachinery*, 2012, 134(2).
- [90] Cha C M. The Dissipation Function-Based Efficiency for Turbomachinery: Part 1—The Efficiency of a Cooled Turbine Row[R]. *ASME GT 2014-26656*.
- [91] Cha C M. The Dissipation Function-Based Efficiency for Turbomachinery, Part 2: The Power of a Cooled Turbine [R]. *ASME GT 2015-42660*.
- [92] Cha C M, Kramlich J C. Modeling Finite-Rate Mixing Effects in Reburning Using a Simple Mixing Model[J]. *Combustion and Flame*, 2000, 122(1-2): 151-164.
- [93] Mcvetta A, Giel P, Welch G. Aerodynamic Investigation of Incidence Angle Effects in a Large Scale Transonic Turbine Cascade [C]. *Atlanta: AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit*, 2013.
- [94] Flegel A B. Aerodynamic Measurements of a Variable-Speed Power-Turbine Blade Section in a Transonic Turbine Cascade[R]. *ASME GT 2013-94695*.
- [95] Flegel A B, Giel P W, Welch G E. Aerodynamic Effects of Turbulence Intensity on a Variable-Speed Power-Turbine Blade with Large Incidence and Reynolds Number Variations [C]. *Cleveland: AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference*, 2013.
- [96] Teia L. New Insight into Aspect Ratio's Effect on Secondary Losses of Turbine Blades[J]. *Journal of Turbomachinery*, 2019, 141(11).
- [97] Torre D, Garcia-Valdecasas G, Cadrecha D. The Effect of Turning Angle on the Loss Generation of LP Turbines [R]. *ASME GT 2017-64582*.
- [98] 梁 晨, 牛夕莹, 林 枫, 等. 动力涡轮整体三维流场分析和验证[J]. *舰船科学技术*, 2010, 32(8): 92-97.
- [99] Corriveau D, Sjolander S A. Aerodynamic Performance of a Family of Three High Pressure Transonic Turbine Blades at Off-Design Incidence [R]. *ASME GT 2005-68159*.
- [100] Melzer A P, Pullan G. The Role of Vortex Shedding in the Trailing Edge Loss of Transonic Turbine Blades [J].

- Journal of Turbomachinery*, 2019, 141(4).
- [101] Cui J, Rao V N, Tucker P G. Numerical Investigation of Secondary Flows in a High-Lift Low Pressure Turbine [J]. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2017, 63: 149–157.
- [102] 陈志涯, 詹杰民, 龚也君, 等. 气膜孔的位置对涡结构和气膜冷却效率的影响[J]. 汽轮机技术, 2019, 61(1): 29–32.
- [103] Gräf L, Kleiser L. Film Cooling Using Antikidney Vortex Pairs: Effect of Blowing Conditions and Yaw Angle on Cooling and Losses [J]. *Journal of Turbomachinery*, 2014, 136(1).
- [104] Simoni D, Berrino M, Ubaldi M, et al. Off-Design Performance of a Highly Loaded Low-Pressure Turbine Cascade under Steady and Unsteady Incoming Flow Conditions[J]. *Journal of Turbomachinery*, 2015, 137(7).
- [105] 屈 骁, 张燕峰, 卢新根, 等. 上游尾迹对高负荷低压涡轮非定常气动性能的影响[J]. 工程热物理学报, 2019, 40(9): 2004–2011.
- [106] Davide L, Simoni D, Ubaldi M, et al. Coherent Structures Formation During Wake–Boundary Layer Interaction on a LP Turbine Blade [J]. *Flow, Turbulence and Combustion*, 2017, 98(1): 57–81.
- [107] Zhao B, Qi M, Sun H, et al. Experimental and Numerical Investigation on the Shock Wave Structure Alterations and Available Energy Loss Variations with a Grooved Nozzle Vane [J]. *Journal of Turbomachinery*, 2019, 141(5).
- [108] Shi Liu-liu, Yao Shi-chuan, Xuan Li-ming, et al. Experimental and Numerical Investigation of the Wake Structure and Aerodynamic Loss of Trailing Edge Jet [J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2018, 32(5): 2039–2046.
- [109] 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, (4): 551–562.
- [110] Bons J P, Pluim J, Gompertz K, et al. The Application of Flow Control to an Aft-Loaded Low Pressure Turbine Cascade with Unsteady Wakes [J]. *Journal of Turbomachinery*, 2012, 134(3).

(编辑:张 贺)