

非轴对称端壁技术的应用及发展

Application and Development of Non – Axisymmetric Endwall Technology

曾军 唐洪飞 / 中国燃气涡轮研究院

导读:非轴对称端壁技术作为一项先进的航空涡轮设计技术, 能够有效地降低涡轮通道二次流损失, 提高涡轮效率。国外对非轴对称端壁技术进行了大量的机理研究和试验验证, 并将其应用于先进航空发动机的涡轮设计。本文介绍了国外非轴对称端壁技术的发展现状和特点, 总结并分析了非轴对称端壁技术的发展趋势。

关键词: 航空发动机; 涡轮; 二次流; 非轴对称端壁

Keywords: aero-engine; turbine; secondary flow; non-axisymmetric endwall

0 引言

随着现代航空发动机的发展, 对航空发动机关键部件之一的涡轮提出了更高效率的要求, 科研工作者和工程设计人员为此目标不断地减小涡轮内流动损失。非轴对称端壁技术是一种先进的二次流控制技术, 通过调整端壁的三维曲面形状, 能够有效减小小涡轮内的二次流损失, 从而提高整个涡轮的效率。

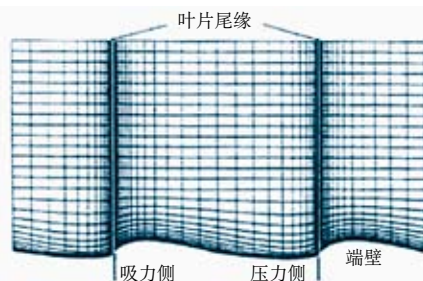
不同于传统的涡轮端壁设计, 非轴对称端壁技术将端壁造型从二维发展到三维, 非轴对称端壁技术的起源要追溯到20世纪70年代, Morris^[1]首次提出了涡轮叶栅端壁三维造型控制流动损失的方法, 限于三维设计的条件限制, 直到上世纪末和本世纪初非轴对称端壁技术的研究才取得了实质性的进展。随着涡轮三维设计条件不断成熟, 非轴对称端壁技术将会在工程设计中被广泛采用, 深入开展非轴对称端壁技术的研究对提高航空发动机涡轮部件的性能具有重要的意义。

对非轴对称端壁技术进行了大量的机理研究, 并在实际工程设计中开始采用此项技术, 其中各个科研团队的研究成果和研究方向各具特色, 极具代表性的有罗-罗公司、MTU公司和普惠公司等。

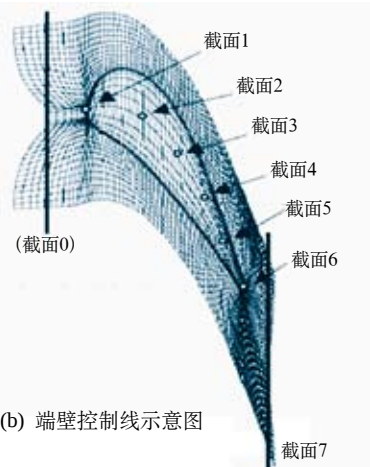
1.1 罗-罗公司

罗-罗公司是最早对非轴对称端壁技术进行开发的航空发动机公司。20世纪90年代末, 罗-罗公司与英国杜伦大学合作开始了此项技术的研究, 首次采用三角函数造型并进行扇型叶栅试验验证, 历时5年于1999

年开发完成自主的非轴对称端壁造型程序FAITH^[2] (见图1)。2001年罗-罗公司将自主研发的非轴对称端壁设计系统用于遑达500发动机的高压涡轮级改型设计, 试验证明高压涡轮级效率提高了 $0.59 \pm 0.25\%$ 。2002年罗-罗公司仍采用上述设计系统对遑达500的中压涡轮级进行改型设计, 同时进行了高中压两级涡轮级性能试验, 试验证明中压涡轮级效率提高了1%左右。同年, 罗-罗公司对非轴对称端壁造型控制区域的选择方法进行研究, 控制区域限制于流道



(a) 周向三角函数造型示意图



(b) 端壁控制线示意图

图1 罗-罗公司非轴对称端壁造型程序数学模型

1 国外研究进展

近十年来, 国外学者和工程人员

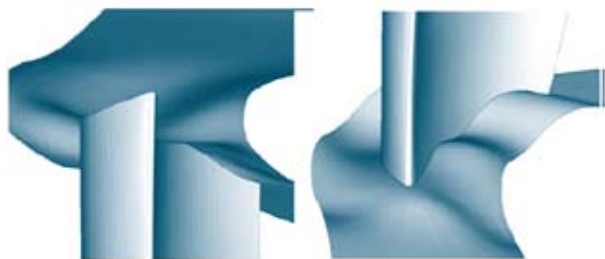


图2 遄达900发动机低压涡轮非轴对称端壁



图3 E3E发动机高压涡轮动叶端壁

内更加有效,避免了对马蹄涡形成的负面影响。2004年,罗-罗公司与杜伦大学合作,对采用控制流道内区域的非轴对称端壁技术的计算流体力学(CFD)方法进行了研究,通过试验对CFD方法进行改进,更新了自主的CFD软件SZ02,为工程设计中采用非轴对称端壁技术提供基础。2006年,罗-罗公司在用于空客A380客机的遄达900航空发动机的低压涡轮部件中采用了非轴对称端壁技术^[3](见图2)。2003年至2006年,罗-罗公司德国研发中心开展先进中等推力E3E发动机的核心机研发,除了在高压涡轮导向器中采用非轴对称端壁技术,在转子叶片端壁也采用了非轴对称设计^[4](见图3)。从机理研究到已有发动机涡轮部件改型设计再到新发动机涡轮部件的研制中均采用非轴对称端壁技术,经过近十年的发展,罗-罗公司开始将非轴对称端壁技术推向工程应用阶段,且申请了相关的专利。

1.2 MTU

MTU是首个将非轴对称端壁技术与数学优化方法和涡轮叶片设计结合进行设计平台开发的航空发动机公司。2003年,MTU公司首次采用数值优化方法进行涡轮的非轴对称端壁技术研究^[5],在研究中对叶型和端壁分别进行参数化,构建优化流程,端壁造型采用正交分解(见图4)和轴向成型函数(见图5)结合的数学模型。MTU采用自行开发的优化流程(见图6)扩大整个设计空间,具有寻优效率偏高等优点,通过试验论证了此数值优化系统对压力分布和二次流损失改善的真实性。2008年,MTU公司与苏黎世理工学院和斯图加特大学合作,对上述设计系统作进一步改善,并采用此系统对高载荷1.5级涡轮进行改型设计,通过级性能试验表明:1.5级效率提高约1%左右。2010年MTU公司和德国亚琛工大合作对某

1.5级涡轮进行非轴对称端壁造型^[6],进行定常和非定常的数值模拟和级性能试验,最后验证了非轴对称端壁技术降低二次流损失的有效性。经过七八年的研究,MTU公司基本构建了一套自有的非轴对称端壁设计技术工程应用系统。

1.3 普惠公司

普惠公司对非轴对称端壁技术的研究起步较晚,但它是第一个进行非轴对称端壁技术冷却效率影响研究的航空发动机公司。2007年普惠公司与加拿大卡尔顿大学合作,首次对非轴对称端壁技术进行研究,研究中对三种不同载荷的低压涡轮叶型端壁进行非轴对称造型,采用梯度优化算法和叶型自由参数化进行设计,通过试验进行设计系统校核。研究表明:非轴对称端壁技术能够有效地降低二次流损失,主要机理是将通道涡强度减弱和通道涡位置偏离端壁。2008年普惠公司与卡尔顿大学合作对上述非轴对称端壁设计体系进行完善,对低雷诺数下的低压涡轮采用非轴对称端壁进行评估和试验验证。2009年普惠公司与卡尔顿大学合作开展了更高载荷的低压涡轮非轴对称端壁设计技术研究,为了扩大设计空间,此次普惠公司采用高载荷叶型和非轴对称端壁联合造型设计的方法。结果表明:

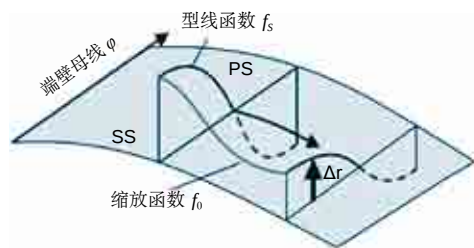


图4 MTU端壁造型正交分解图

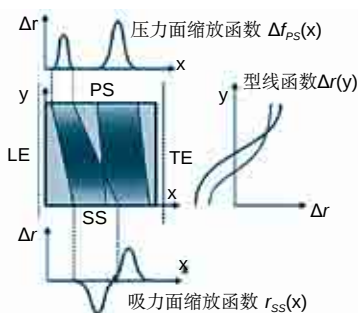


图5 MTU端壁轴向成型函数

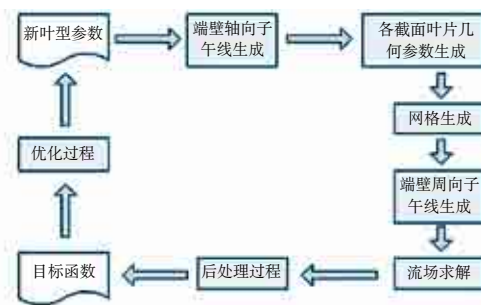


图6 MTU端壁造型优化流程

高载荷叶型和非轴对称端壁联合设计更能对二次流损失进行改善,采用非轴对称端壁能使高负荷前部加载叶型兼顾叶展主流区域的流动效率,提供更好的变工况特性和叶片表面分离控制。同年,普惠公司与美国宾夕法尼亚州立大学合作对采用非轴对称端壁的涡轮端壁传热系数进行研究^[7],端壁设计技术沿用了上述的设计系统,研究表明:采用非轴对称端壁时,传热系数最大区域的传热系数减小了20%,且雷诺数变化对传热系数改变没有影响(见图7)。2010年普惠公司与宾夕法尼亚州立大学进一步对非轴对称端壁带气膜孔的传热特性进行研究^[8],通过数值模拟和试验的方式进行研究,研究表明:采用非轴对称端壁将降低端壁气膜冷却效率(见图8)。虽然普惠公司进行非轴对称端壁技术的研究起步较晚,但经过四五年的深入研究,将非轴对称端壁的传热设计问题推上了研制的进程,非轴

对称端壁在热端部件的应用还需更多的深入研究。

1.4 其他

除了罗-罗公司、MTU、普惠公司及其合作高校外,南非科学与工业研究会(CSIR)、马德里理工大学(UPM)、瑞典查尔姆斯理工大学(CTH)、日本宇航局、三菱重工等均开展了非轴对称端壁技术的研究工作,但都处于机理研究阶段,距工程实用具有较大的差距。

2 工程应用与发展趋势

非轴对称端壁技术作为一种先进的控制涡轮端壁二次流的设计手段,随着三维设计条件的不断成熟,越来越多的研究机构 and 高校正在开展此项技术的研究。在涡轮叶型损失控制技术趋于成熟的今天,控制端壁二次流损失对提高涡轮的整个效率也越显重要。

2.1 初步工程应用

目前,罗-罗公司已将非轴对称

端壁技术应用于遄达500发动机的高中压涡轮的改型设计和遄达900发动机的低压涡轮设计中,均取得了成功。MTU公司结合自己的气动设计体系,将叶型设计与非轴对称端壁造型技术和数学优化方法相结合构建了自己新的叶型三维设计体系,并通过非定常级性能试验验证了此设计平台。普惠公司针对高载荷叶型开展了非轴对称端壁技术的开发工作,也取得了较好的成果。除上述公司的工程应用外,国内外高校大量学者也进行了非轴对称端壁技术的机理研究,非轴对称端壁技术慢慢被工程界所接受,在未来的几十年,非轴对称端壁技术将会被广泛的用于涡轮的端壁二次流控制气动设计。

2.2 气动机理研究

涡轮叶栅内三维流动是一个很复杂的过程,目前针对非轴对称端壁技术的机理研究,一致的结论是非轴对称端壁技术能够改善涡轮叶栅流动,提

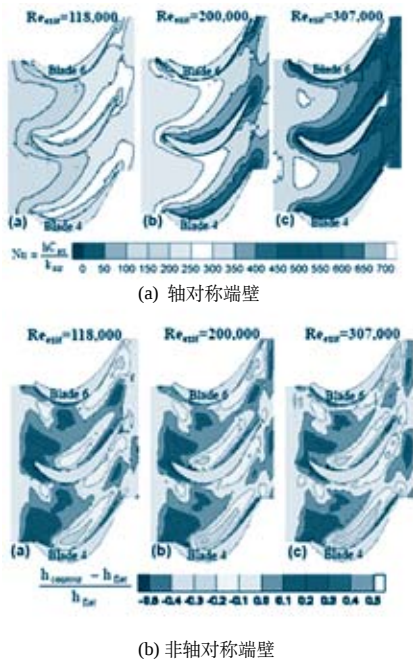


图7 宾夕法尼亚州立大学的非轴对称端壁传热系数云图

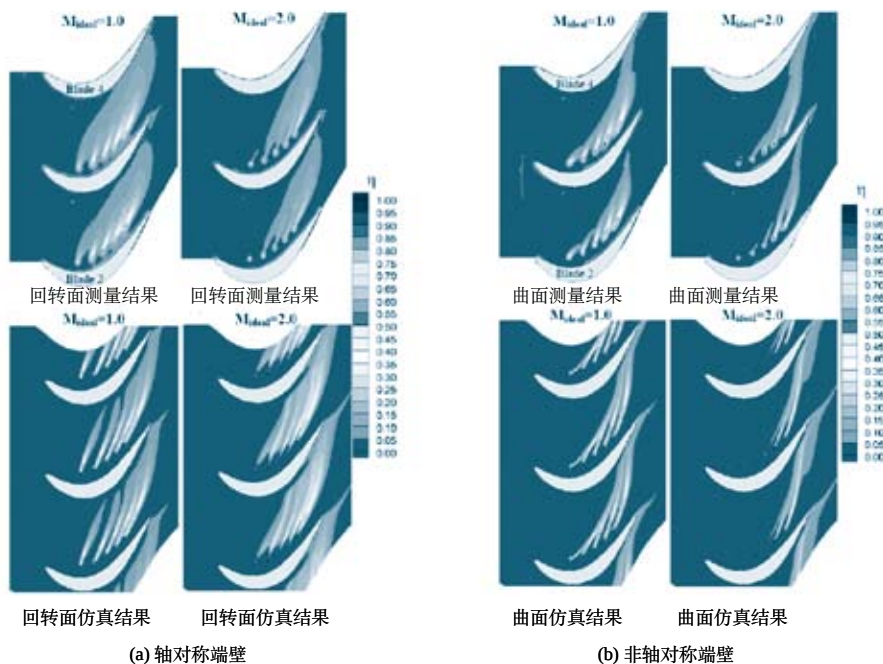


图8 宾夕法尼亚州立大学的端壁气膜冷却对比图

高涡轮效率, 但非轴对称端壁技术的适用范围、提高效率程度不明确, 且非轴对称端壁技术改善叶栅流动的机理很多, 比如: 通道涡的减弱、消弱通道涡的存在、涡的再次分割等, 这些不确定因素和机理成果还无法直接对工程设计起到指导作用。所以还需要进行更深入的研究, 让非轴对称端壁技术的工程应用更具易用性。

2.3 冷却综合设计

民用航空发动机的高压涡轮以及军用航空发动机的涡轮部件均具有展弦比小的特点, 涡轮内二次流损失所占比重偏高, 减小二次流损失对提高涡轮效率具有举足轻重的意义。所以, 非轴对称端壁技术除了具有用于无冷气涡轮的潜力外, 也期望用于民用航空发动机的高压涡轮以及军用发动机的高压涡轮部件中。在高压涡轮设计中导向器和工作叶片端壁的冷却非常重要, 普惠公司的研究工作成果表明, 采用非轴对称端壁技术会对叶片端壁冷却带来负面影响, 因此需开展非轴对称端壁性能与冷却的优化设计, 发挥非轴对称端壁性能优势的同时兼顾冷却设计。

2.4 工程化设计流程

涡轮端壁区域的三维流动复杂, 采用非轴对称端壁技术将带来端壁区域的涡系变化, 由于还未形成具有工程指导性的机理成果, 单从流态的变化还无法完全评估整个流动的改善, 即使在不久的将来掌握了改善端壁二次流的指导性机理成果, 仍需进行最优的量化设计, 才能体现非轴对称端壁技术的优势。所以, 非轴对称端壁技术有必要结合数学优化方法进行工程设计。MTU早在2003年就首次采用了非轴对称端壁技术与数学优化方法结合的方式进行工程应用尝试, 后

续的普惠公司、以及马德里理工大学也采用了优化的方式进行工程设计, 且尝试了如何选取与非轴对称端壁技术结合的优化算法的研究。同时, 端壁的三维设计周期较长, 为了提高优化效率, 将来更需要对非轴对称端壁技术适用的优化算法和优化策略进行研究。

3 结论

通过对非轴对称端壁技术在涡轮设计中发展和应用的回顾, 笔者总结和分析非轴对称端壁技术的发展趋势如下:

1) 非轴对称端壁技术能够减小涡轮通道二次流损失, 提高涡轮级效率约1%左右;

2) 使非轴对称端壁技术更具工程实用性, 该技术需结合叶片造型和优化算法构建新的设计体系;

3) 在冷却涡轮设计中有望广泛采用非轴对称端壁技术, 需开展性能和冷却优化设计研究;

4) 非轴对称端壁技术较复杂, 建议进行气动、传热等多学科优化设计, 同时结合叶片造型和优化算法构建设计方法, 进行充分的试验验证, 掌握该技术, 为非轴对称端壁技术在先进涡轮部件中的应用奠定坚实的技术基础。

AST

参考文献

- [1] Morris, A W H, Hoare R G. Secondary loss measurements in a cascade of turbine blades with meridional wall profiling[R]. ASME 75-WA/GT-13, 1975.
- [2] Harvey N W, Rose M G, Taylor M D. Non-axisymmetric turbine end wall design: part I/Three-dimensional

linear design system[R]. ASME Paper 99-GT-337, 1999.

[3] González P, Lantero M, Olabarria V. Low pressure turbine design for Rolls-Royce Trent 900 turbofan[R]. ASME, GT2006-90997.

[4] Klinger H, Lazik W, Wunderlich T. The engine 3E core engine[R]. ASME, GT2008-50679.

[5] Nagel M G, Baier R D. Experimentally verified numerical optimization of a 3D-parametrised turbine vane with non-axisymmetric end walls[R]. ASME, GT2003-38624.

[6] Poehler T, Gier J, Jeschke P. Numerical and experimental analysis of the effects of non-axisymmetric contoured stator endwalls in an axial turbine[R]. ASME, GT2010-23350.

[7] Lynch S P, Sundaram N, Karen A, Thole A K, Lehane C. Heat transfer for a turbine blade with non-axisymmetric endwall contouring[R]. ASME, GT2009-60185.

[8] Lynch S P, Sundaram N, Karen A, Thole A K, Lehane C. Computational predictions of heat transfer and film-cooling for a turbine blade with non-axisymmetric endwall contouring[R]. ASME, GT2010-22984.

作者简介

曾军, 博士、研究员、副总师, 中航工业气动热力技术首席技术专家, 主要从事涡轮、动力涡轮及空天动力技术研究。

唐洪飞, 博士、工程师, 主要从事涡轮气动设计技术研究。