

面向性能的压气机叶片铣削加工 误差分析及统计*

丛靖梅^{1,2}, 莫蓉¹, 吴宝海¹, 侯尧华¹

(1. 西北工业大学现代设计与集成制造技术教育部重点实验室, 西安 710072;

2. 中国航发沈阳发动机设计研究所, 沈阳 110015)

[摘要] 为提高航空发动机压气机叶片的加工质量,对其铣削加工中的质量影响因素进行了分析,包括加工前工艺规划及几何造型等因素、加工过程中变形与稳定性等问题以及加工后的残余应力变形等。针对必然存在的加工误差,提出了一种概率统计方法,并在此基础上对于影响气动性能的叶型关键几何区域,建立了有关轮廓误差和叶型参数误差的统计分析方法。借助于气动性能试验,获得了稳定工况下关键参数的误差分布,从而为指导叶片的实际铣削加工提供了理论依据。

关键词: 叶片;加工误差;叶型参数;统计分析

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2017.15.038



丛靖梅

博士研究生,研究方向为航空发动机设计、航空发动机性能仿真。

作为航空发动机的核心部件,压气机的性能对整台发动机的气动性能、可靠性以及经济性的影响至关重要。叶片是构成压气机的基本单元,由相邻叶片构成的通道内的流动情况决定了压气机的性能。随着压气机高速、高压比、高效率的发展趋势,压气机叶片扭曲弯度趋大,叶身趋薄,掠形加大,压气机叶片型面越来越复杂。这些特点使得叶片类零件成为航空发动机中数量最多、加工难度最大、生产工作量最大的关键零部件之一,直接决定着航空发动机的整体生产成本、制造水平与运行性能。

多轴数控加工技术因其高精度、高效率、稳定性好的优点成为压气机叶片的主要制造手段^[1]。由于压气机叶片型面复杂,且属于薄壁件,由切削力引起的弹性变形难以预测和控制。一方面,由于叶片壁薄、模量低,在加工过程中极易发生弹性

变形,造成加工精度的损失;另一方面,叶片零件质量轻、刚性弱,影响因素众多,容易造成加工过程不稳定^[2]。因此,叶片零件的特殊性使其成形加工与传统高刚性零件的加工有着本质的不同,对各种误差源的波动变化更加敏感,工序间误差的传递、累积等交互作用现象更加复杂。加工过程中机床、工件、刀具等产生的几何变形以及切削力产生的弹性变形将导致零件加工后实际轮廓尺寸偏离其理论轮廓尺寸,影响航空发动机压气机叶片零件的加工质量,进而导致叶片叶型参数误差的产生,影响压气机的气动性能。

普惠公司压气机部^[3]的大量试验研究发现,对于某些大型风扇叶片,叶片某些部位的参数0.0254~0.0762mm的加工误差会完全导致转子叶片服役性能和寿命的改变。Roberts^[4]的研究指出,压气

* 基金项目: 国家科技重大专项资助项目(2015ZX04001202)。

机叶型的前缘几何偏差会导致单位推力燃油消耗率增加 3% 甚至更多。而仅 1% 的燃油消耗率变化就意味着运营商盈利或是亏损的区别^[5], 可见压气机叶片加工质量的重要性。根据经验, 叶片的前后缘厚度、叶片进出口的几何角、叶片厚度以及某些特殊区域的曲率等对压气机性能有着较为明显的影响, 因此这些参数也是叶片型面上需要保持的关键尺寸。

因此, 在较高的加工效率前提下, 如何评估由于加工误差对气动性能带来的影响, 进而保证叶片在加工后具有精确的尺寸、准确的形状和严格的表面完整性, 以反映压气机叶片气动设计人员的真实设计思想成为航空发动机研制领域中必须突破的基础科学问题之一。结合我国现有的加工工艺特点, 开展有关三维叶片加工误差的敏感性分析及叶片结构细节对气动性能影响的研究, 建立新的叶片加工工艺尺寸体系, 从而指导叶片的设计与加工, 提高压气机叶片的加工效率和气动性能, 是我国进行新一代航空发动机研制、振兴航空动力产业迫切需要突破的关键技术难题。

本文结合目前的叶片加工工艺, 专注于压气机叶片加工误差的产生及其影响因素分析研究, 为叶片加工误差的统计分析及对气动性能的影响研究提供依据。

压气机叶片加工误差影响因素分析

与传统的刚性工件相比, 压气机叶片由于其弱刚性, 在加工中会出现薄壁零件特有的加工特性, 其误差来源比传统工件更为复杂。按照工件成形的顺序分为加工前误差、加工中误差和加工后误差, 如图 1 所示。

1 压气机叶片加工前误差

在数控铣削加工前, 工艺人员对压气机叶片进行工艺规划、编制加工程序等, 这些加工原理均是以数学

模型来模拟实际的切削过程, 必然出现偏差。这些加工原理误差包括 5 个方面:

(1) 叶片几何造型误差。

在叶片设计过程中, 设计人员一般采用自由曲面逼近实际的设计曲面, 这样所得的几何模型与原始曲面存在一定的偏差, 称为叶片几何造型误差。

(2) 加工工艺规划误差。

在编制切削加工数控程序时, 计算轨迹点和刀轴矢量时的数学模型也是以某些数学模型来模拟计算, 这必然引入以直线段拟合叶片外形轮廓产生的插补拟合误差、计算过程由四舍五入引起的圆整误差等。

(3) 机床调整误差。

包括机床的主轴回转误差、导轨几何误差以及传动误差等。

(4) 装夹定位误差。

叶片在装夹时由于放置于机床上的实际位置与理论位置的偏差所导致的误差。

(5) 工艺系统误差。

在铣削加工工艺规划中, 对于确定的铣削加工、装夹定位方案, 在选定数控机床、切削刀具、切削对象以及装夹工具后, 则由机床、夹具、刀具、工件组成的整个加工工艺系统的几何误差也可一并确定, 这些误差包括:

- 机床几何误差: 机床各个部件存在着制造装配误差;
- 夹具几何误差: 夹具的几何尺寸、定位基准造成的几何误差;
- 刀具几何误差: 刀具的几何尺寸、几何形状以及轴线的制造误差;
- 工件几何误差: 叶片的几何尺

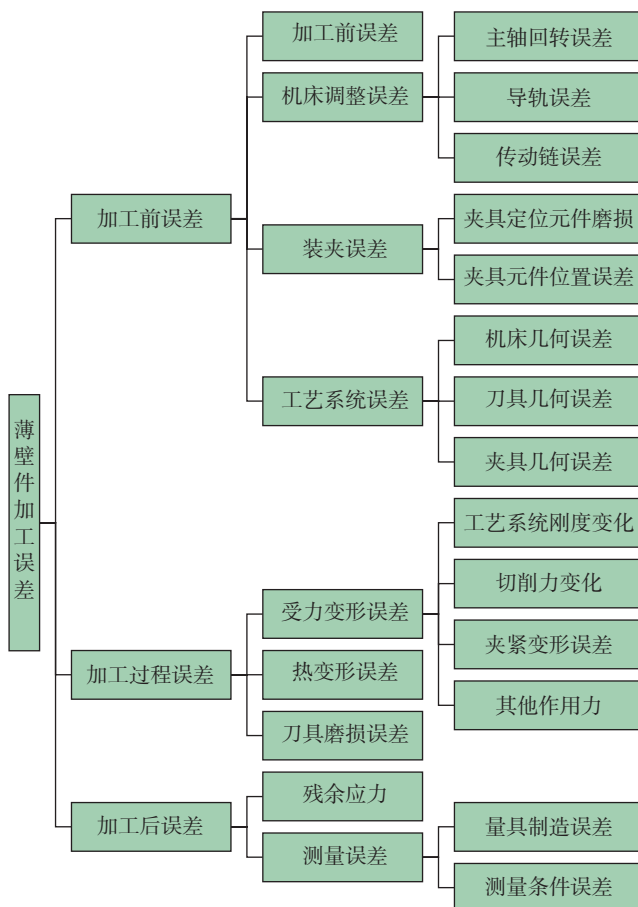


图1 薄壁件加工误差分析

Fig.1 Machining error analysis for thin-walled part

寸、几何外形在制造过程中存在的制造误差。

2 叶片加工过程中误差

(1) 工艺系统受力变形误差。

铣削加工时,刀具和工件的相对运动产生的切削力作用于整个工艺系统,造成工艺系统产生弹塑性变形,使得刀具运动的实际位置点与设计位置点存在偏离,引起加工误差。而压气机薄壁叶片由于受力变形所引起的弹性变形在加工误差中占主导因素。

(2) 工艺系统受热变形误差。

铣削加工过程中,在力热耦合作用下,由切削力引起的切削热传导至工艺系统中,工艺系统由于热胀冷缩效应而产生的热变形,造成加工误差。

(3) 刀具磨损引起的误差。

切削加工过程中,刀具和工件之间的摩擦使刀具磨损,造成加工位置偏离于设计位置,产生加工误差。

3 加工后的误差

叶片铣削加工之后,由于残余应力释放以及工件检测造成的加工误差。其中,残余应力释放导致的误差占主要因素。

压气机叶片铣削加工误差控制技术

按照加工误差因素,压气机叶片铣削加工的误差源主要包括:

(1) 叶片在交变切削力作用下,让刀变形和加工振动产生的误差;

(2) 叶片加工过程中因残余应力存在导致的加工变形;

(3) 叶片加工中因刀具磨损产生的误差;

(4) 叶片加工过程中因转动和数控系统伺服研制而引起的加工误差;

(5) 装卡定位产生的误差。

上述这些误差构成了薄壁叶片铣削加工的综合误差。

根据上述对薄壁叶片加工过程

误差源的分析,误差来源多而且性质也各不相同,部分源误差随着切削用量的增大呈线性变化,部分源误差则是非线性的变化。为了提高叶片的加工精度,采用薄壁零件叶片加工的精确控形方法,控制并减小加工误差,对于不同的误差源采用不同的误差控制方法,如表1所示。

为了减小叶片的装夹定位误差,采用在机测量技术(On-Machine Measurement Technology)和迭代最近点(Iterative Closest Point, ICP)算法,实现叶片的精确测量找正,装夹定位误差趋近于零。

在加工轨迹误差的控制中,针对叶片曲面的环形刀精加工,依据环形刀圆环面的切削刃包络截形曲率可以在很大范围内变化,从而更能适应被加工曲面曲率变化的特点,利用基于泰勒展开与公差约束的宽行加工方法可提高工件与刀具的匹配度,实现控制轨迹计算误差的目的。

采用刀具参数优化设计以及运用刀齿热力耦合控制的方法,减小刀具位姿误差和切削加工过程中刀具磨损造成的误差。

薄壁零件和刀具的受力变形是引起薄壁件综合误差的主要部分,采用工艺刚度增加的方法提高薄壁件的刚度,减小切削力引起的弹性变形误差。

残余变形误差是工件铣削加工之后,工件表面和内部材料组织受到

挤压存在的应力释放,也会产生加工误差,采用抑制残余变形的技术减小残余应力误差。

经上述分析可知,装夹定位误差、轨迹计算误差、刀具形状误差与残余应力变形误差经控制后均可趋近于0,同时在不考虑加工分析原理误差、计算舍入误差以及测量误差的前提下,叶片的铣削加工误差以刀具弹性变形和工件弹性变形为主。在实际加工过程中,除此之外的误差,在本文中定义为其他系统误差,则综合误差与这些误差的关系如图2所示。

目前,刀具的弹性变形和工件的弹性变形较为流行的预测方法是二者看作是线性误差,符合胡克定律,而综合误差则一般由三坐标测量或在机测量评估获得。

叶型几何参数误差定义

误差来源的最终表现形式是附着于叶片表面的综合误差,也就是加工误差。无论是接触式测量还是非

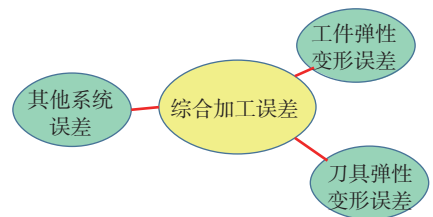


表1 薄壁件加工误差控制

误差源	误差分量	叶片加工精确控形方法
装夹定位误差	定位基准误差	薄壁件精确装夹定位
	装夹找正误差	薄壁件精确测量找正
加工轨迹误差	轨迹计算误差	薄壁件精确宽行逼近
	机床运动误差	加工轨迹综合优化
刀具形状误差	刀具位姿误差	刀具参数优化设计
	刀具磨损误差	刀齿热力耦合控制
受力变形误差	弹性变形误差	叶片工艺刚度增强
	受激颤振误差	叶片受激颤振抑制
残余变形误差	表面残余应力	叶片残余变形抑制
	毛坯内部应力	叶片毛坯内部应力控制

接触式测量,测量结果都是关于零件表面的三维点集。对于压气机叶片这一特殊零件来说,其几何特性决定了加工误差或者测量点在其型面上的表现方式,可划分为轮廓误差、变形误差和参数误差。

1 轮廓误差

轮廓误差指的是实际测量点与叶片设计模型间的有向距离,是描述零件加工误差的通用方法,基于公差带,可以直接判断零件是否加工合格。

2 变形误差

当轮廓误差满足公差要求,则叶片符合设计要求,达到了加工精度。若轮廓误差不满足公差要求,则叶片加工不合格,需分析加工产生的变形。

对于叶型叶身而言,通常的形状误差有:扭转变形、弯曲变形、翘曲变形以及收缩变形,其变形误差分析及参数见图3。图3(a)中扭转变形是指测量截面壁厚偏移量。

实际的加工变形一般为这4种变形的综合体现,这使得变形分析变得较为困难。

3 参数误差

参数误差指的是构成二维叶型几何外形的定义参数误差,一般包括:中弧线、前后缘点、弦线、最大厚

度、最大挠度、叶型弯度和叶型前后缘角。这些叶型参数不仅定义了叶片几何外形,更是决定了叶片最终的气动性能。特别是文献[6]指出,弦长与叶型厚度在很大程度上影响着气动性能。因此,在论文后续的试验验证中,将以最大厚度作为统计目标,以检测其加工精度。

叶片叶型参数误差概率统计方法

现有的统计方法不计其数,但在分析初期,由于不知道叶型参数之间的相互影响,不能采用较复杂的统计方式。最直接的分析单个参数的方法是方差统计。为了更加清楚地表示数据偏移量,可采用标准差进行统计。已知标准差的计算公式为:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (1)$$

式中, $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$ 。

对于设计模型来说,叶型参数为标准值 x ,加工后的叶片通过测量可以得到许多叶型截面,分别提取其叶型参数 x_i ,得到加工叶型参数。计算参数均值 \bar{x} 是叶型参数的平均误差,并计算加工叶型参数的标准差 σ ,分析叶片铣削加工的稳定性问题。

生产与科学试验中很多随机变

量的概率分布可以近似地用正态分布来描述,正态分布是当今应用最为广泛的连续概率分布。正态分布的概率密度函数为:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \cdot e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (2)$$

式中, μ 和 σ 分别代表均值和标准差。

对应的分布函数为:

$$F(x) = P(X \leq x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \cdot \int_{-\infty}^x e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} dv \quad (3)$$

由于正态分布具有很多优良性质,根据中心极限定理,诸多数据集合可以用它来近似拟合,所以生产与科学试验很多随机变量的概率分布都可以近似地用正态分布来描述。例如:在生成条件不变的情况下,产品某一方向的尺寸精度分布符合正态分布。一般来说,如果一个量是由许多微小的独立随机因素影响的结果,那么就可以认为这个量具有正态分布。

直方图又称质量分布图,是表示资料变化情况的一种主要工具。利用直方图可以解析出资料的规则性,比较直观地看出产品质量特性的分布状态,对于资料分布状况一目了然,便于判断其总体质量分布情况。在制作直方图时,涉及统计学的概

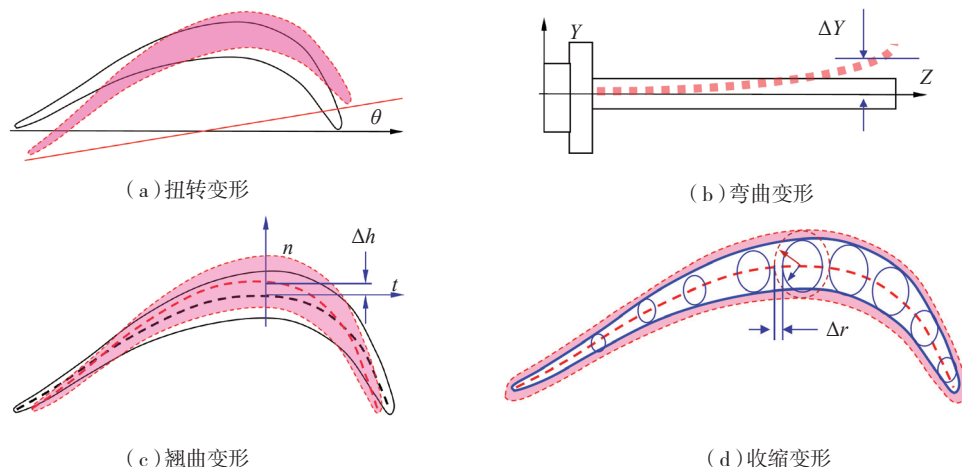


图3 测量叶型变形分析

Fig.3 Deformation analysis of measured airfoil

念,首先要对资料进行分组,因此如何合理分组是其中的关键问题。按组距相等的原则进行的两个关键数位是分组数和组距。直方图是一种几何形图表,它是根据从生产过程中收集来的质量数据分布情况,画成以组距为底边、以频数为高度的一系列连接起来的直方型矩形图。

设 (X_1, X_2, \dots, X_n) 是来自密度函数 $f(x)$ 的总体 X 的样本,根据样本做出频率直方图,估计总体的密度函数。把 X 的取值范围等分为 m 个小小区间,用 d 表示区间长度,用 n_i 表示落入第 i 个小小区的样本数,落在第 i 个区间的频率为:

$$\mu_i = \frac{n_i}{n} \quad (4)$$

计算落在第 i 个小小区间 $[t_{i-1}, t_i]$ 的频率,有:

$$p_i = \int_{t_{i-1}}^{t_i} f(x)dx = (t_i - t_{i-1})f(\xi_i)$$

$$\xi_i \in [t_{i-1}, t_i] \quad (5)$$

用频率估计概率有:

$$(t_i - t_{i-1})f(\xi_i) \approx \frac{n_i}{n} \quad (6)$$

$$f(\xi_i) \approx \frac{n_i}{d \cdot n} \quad (7)$$

当 $f(x)$ 在 $[t_{i-1}, t_i]$ 上连续, d 很小且样本量 n 充分大时,则可以用 $f(\xi_i)$ 作为 $f(x)$ 在小小区间 $[t_{i-1}, t_i]$ 上的近似值。这就是估计密度函数的等距频率直方图。

算例分析

为了验证文献 [6] 中提到的叶栅加工中,叶型轮廓正负误差对气动性能的影响,设计了 3 组试验,分别是原始叶型、放大叶型和缩小叶型,如图 4 所示。

1 轮廓误差统计

对加工后的叶栅叶型进行测量并使用轮廓误差概率统计,可以得到轮廓误差分布直方图,如图 5~7 所示。可以看出,在工艺稳定的情况下,这一批叶栅的加工误差分布于

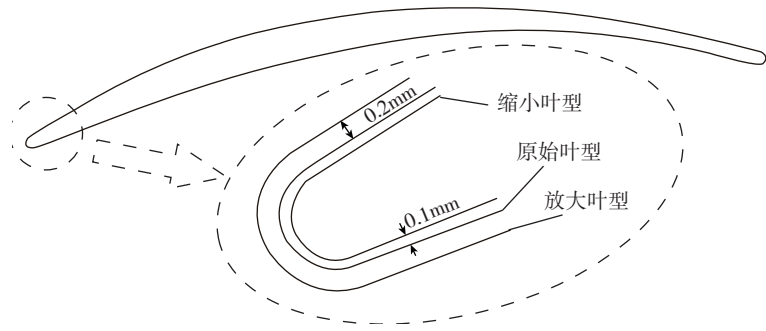


图4 试验叶栅截面对比

Fig.4 Comparison among airfoils of experiment

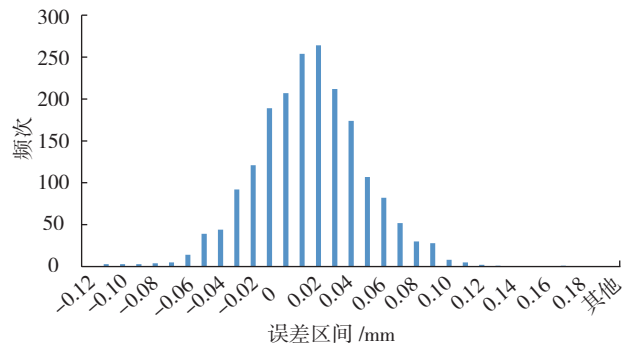


图5 放大叶型轮廓误差概率分布

Fig.5 Probability distributions of contour errors for expanded airfoil

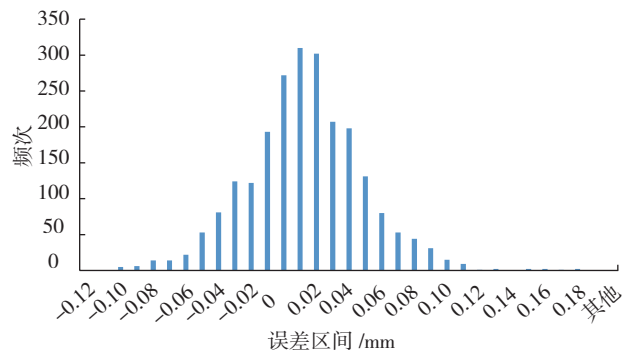


图6 缩小叶型轮廓误差概率分布

Fig.6 Probability distributions of contour errors for shrunken airfoil

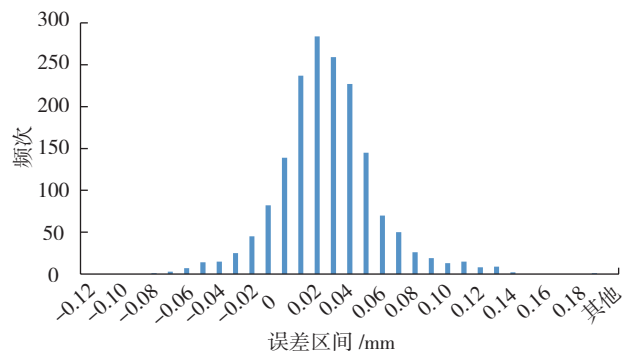


图7 原始叶型轮廓误差概率分布直方图

Fig.7 Probability distributions of contour errors for original airfoil

0.015mm 左右,误差较小,可以表现出叶型轮廓正负误差的区别。

2 叶型参数统计

对于放大叶型、原始叶型和缩小叶型,它们的最大厚度设计值分别为 2.979mm,2.642mm,2.343mm。由于在进行等距偏置时,曲线拟合误差的问题,其中放大叶型与原始叶型的最大厚度差距为 0.337mm,并不是 0.4mm。同时缩小叶型与原始叶型的最大厚度差距为 0.299mm,并不是 0.2mm。对加工结果分别统计,如图 8 所示。

将 3 种叶型的最大厚度放在统一的误差分布区间进行统计,发现同一叶型的最大厚度的峰值分布与设计值基本相同,表示出轮廓误差与最大厚度之间的几何关系。

如果统计的是参数的偏差而不是绝对值,则在不同截面上相同参数得到的误差概率统计图与轮廓或者相关参数的误差概率统计图大致相同。因此,在进行误差概率统计时需要根据叶型的具体几何特征,分析参数间的相关性。

3 气动试验

通过与西北工业大学动力与能源学院合作^[6],对加工后的叶栅进行试验,得到一系列试验结果。图 9 为放大叶型与缩小叶型实物,图 10 和 11 为叶栅出口总压损失系数。分析可知,正轮廓误差使性能降低,损失增加;负轮廓度误差使叶型性能有所提升,损失减小。

结论

本文以压气机叶片的加工误差为研究对象,针对具体加工试验所获得的误差数据,进行统计并分析了误差来源。依据叶型误差的概率统计结果,计算出关键叶型参数和具体的叶型参数误差。结合气动试验,以轮廓误差为例,分析其误差变化规律及其对叶片性能的影响,从而为后续的实际叶片铣削加工提供理论指导。

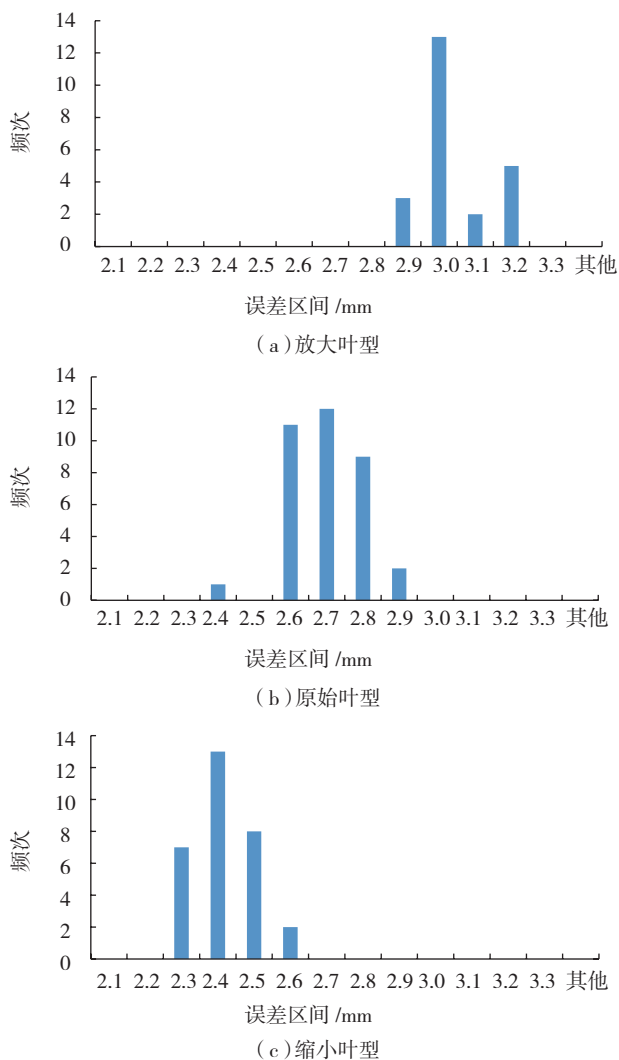
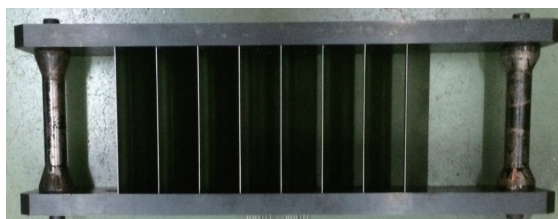
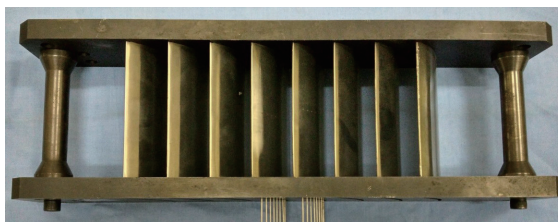


图8 3种叶型的最大厚度误差概率分布

Fig.8 Probability distributions of maximum thickness errors for 3 airfoils



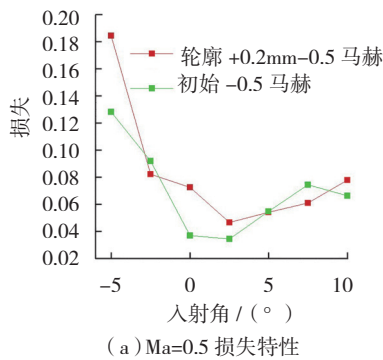
(a) 放大叶型



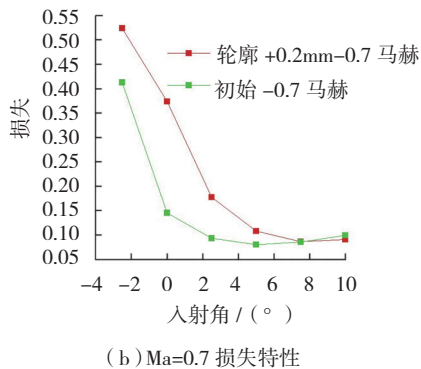
(b) 缩小叶型

图9 叶栅实物图

Fig.9 Cascade display



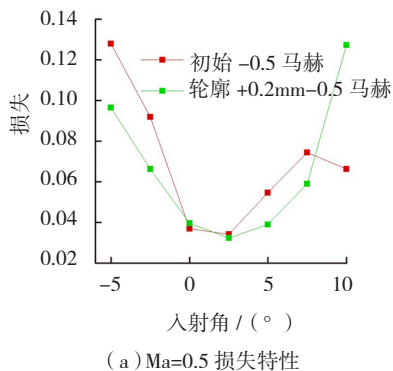
(a) Ma=0.5 损失特性



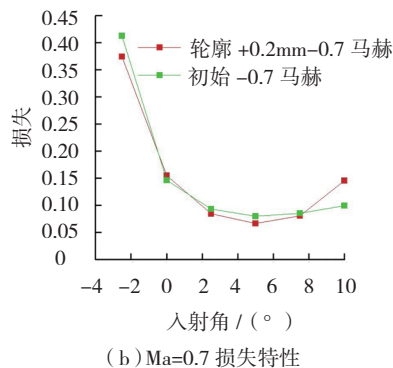
(b) Ma=0.7 损失特性

图10 放大叶型特性对比

Fig.10 Characters comparison of expanded airfoil



(a) Ma=0.5 损失特性



(b) Ma=0.7 损失特性

图11 缩小叶型特性对比

Fig.11 Characters comparison of shrunken airfoil

参考文献

[1] CHEN S L, WANG W T. Computer aided manufacturing technologies for centrifugal compressor impellers[J]. Journal of Materials

Processing Technology, 2001, 115(3): 284-293.

[2] 王增强, 孟晓娴, 任军学, 等. 复杂薄壁零件数控加工变形误差控制补偿技术研究[J]. 机床与液压, 2006(4): 61-63.

WANG Zengqiang, MENG Xiaoxian, REN

Junxue, et al. A scheme for the compensation of deformation error in NC machining of thin-walled complex parts[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2006(4): 61-63.

[3] WU C Y. Arbitrary surface flank milling and flank sam in the design and manufacturing of jet engine fan and compressor airfoils[C]//Proceeding of ASME Turbo Expo 2012: Turbine Technical Conference & Exposition, Copenhagen: International Gas Turbine Institute, 2012.

[4] ROBERTS W B. Axial compressor performance restoration by blade profile control[C]// Proceeding of ASME International Gas Turbine Conference & Exhibit, New York: The American Society of Mechanical Engineers, 1984.

[5] LYANTSEV O D, BREIKIN T V, KULIKOV G G, et al. On-line performance optimisation of aero engine control system[J]. Automatica, 2003, 39(12): 2115-2121.

[6] 高丽敏, 蔡宇桐, 曾瑞慧, 等. 叶片加工误差对压气机叶栅气动性能的影响[J]. 推进技术, 2017, 38(3): 525-531.

GAO Limin, CAI Yutong, ZENG Ruihui, et al. Effects of blade machining error on compressor cascade aerodynamic performance[J]. Journal of Propulsion Technology, 2017, 38(3): 525-531.

通讯作者: 吴宝海, 教授, 研究方向为航空发动机复杂零件的智能加工技术, E-mail: wubaohai@nwpu.edu.cn.

Performance Oriented Machining Error Analysis and Statistic of Compressor Blade

CONG Jingmei^{1,2}, MO Rong¹, WU Baohai¹, HOU Yaohua¹

(1. Key Laboratory of Contemporary Design and Integrated Manufacturing Technology, Ministry of Education, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;
2. AECC Shenyang Engine Design Institute, Shenyang 110015, China)

[ABSTRACT] Aiming to improve the machining quality of compressor blade of aeroengine, the influencing factors of blade machining are analyzed, including processing plan and geometric modeling before machining, the problems of deformation and stability during machining, the residual stress after machining. For the inevitable existence of machining error, the probability statistics method is presented in the paper. In detail, the statistical analysis method of contour error and airfoil parameters error in the key region of blade is established. With the help of aerodynamic experiments, the error distribution of the key parameters under stable condition is found to provide the theoretical basis for guiding the specific blade processing.

Keywords: Blade; Machining error; Airfoil parameter; Statistical analysis

(责编 铃兰)