

整体叶盘超硬磨料砂轮数控磨削加工技术

陈志同¹,朱 燊¹,张 云¹,刘瑞松¹,吴宁宁²,张武刚³,程 璋²,徐启洋²,刘安洪²

(1. 北京航空航天大学机械工程及自动化学院,北京 100191;

2. 中国航发南方工业有限公司,株洲 412000;

3. 陕西秦川机床工具集团有限公司,宝鸡 710000)

[摘要] 针对航空发动机整体叶盘进排气边曲率半径小、材料加工难度大、工具磨损快、编程难度大、加工周期长和容易产生加工变形等问题,对多种整体叶盘的磨削加工技术进行了系统的研究,总结了一系列整体叶盘的 CBN 砂轮数控磨削加工技术,开发了专用的整体叶盘编程模块。利用鼓形砂轮插磨方法和宽行周磨方法实现了整体叶盘叶片的全型面高精度磨削,加工面轮廓精度提高到 15~20 μm ,最小进排气边圆弧半径达到 28.7 μm 。利用几何自适应磨削加工方法实现整体叶盘进排气边的局部磨削加工,接刀痕迹低于 10 μm 。提出了整体叶盘的三轴圆柱坐标磨削方法和圆周阵列磨削方法,可望将叶片长度不大于 60mm 整体叶盘的加工时间从数十乃至数百小时缩短到 3h 以内。

关键词: 整体叶盘;数控磨削;CBN 砂轮;叶片磨床;曲面磨削

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2018.19.064



陈志同

博士、教授、博士生导师,研究方向为复杂曲面数字化加工技术,航空发动机叶片、叶盘类零件加工技术,先进磨削抛光技术与装备等。

整体叶盘(图1)是航空发动机内的关键零件,其叶片的设计方案正向着薄壁化、大弯掠、复杂化方向发展。整体叶盘通常为高温合金、钛合金、不锈钢乃至陶瓷基复合材料等难加工材料,其流道空间小,采用传统的数控铣削方式进行加工时容易出现振颤和变形、进排气边容易发生啃切现象,并且整体叶盘加工刀具磨损极快、加工周期长。而采用精密电解的方式加工时流场、电场的控制较为困难。因此,整体叶盘是航空发动机内的一类极难加工的零件。

20 世纪上半叶,英国、美国、瑞士、苏联研制了系列的叶片仿形磨床,包含立体砂轮磨削等高效率新原理机床^[1]。我国在叶片仿形磨削方面也开展了大量的仿制工作。北京航空航天大学从 20 世纪 70 年代开

始研究整体叶盘数控仿形磨削加工技术^[2],美国 20 世纪 80 年代则率先开始研究整体叶盘的 CBN 砂轮数控磨削技术,但是受到小直径砂轮制备难度和容易磨损等问题的制约,该技术一直未见获得应用的相关报道^[3]。近 20 年来,德国、美国为了满足航空工业和能源工业的需要研发了多种适合叶片磨削抛光的机床,如图 2 所示,美国 Huffman 公司在 20 世纪末就已经开发了系列化的叶片数控

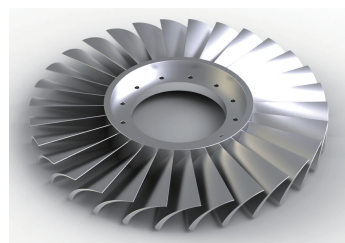


图1 整体叶盘类零件
Fig.1 Aero-engine blisk

砂轮磨削机床和砂带磨削抛光机床;德国 HAAS 公司开发的五轴磨削中心用于为航天工业加工叶片;2001 年德国 Blohm 公司在欧盟的支持下开始研制五轴联动磨床,主要用于磨削圆弧缘板。

两种五轴联动叶片磨床研制

2002 年,北京航空航天大学(以下简称北航)提出利用超硬磨料复杂母线 CBN 砂轮实现整体叶盘和叶片全型面的数控宽行磨抛技术路线,并与中国航发沈阳黎明航空发动机有限责任公司(以下简称沈阳黎明)共同申请并获得航空工业技术创新基金资助,开始研制五轴联动叶片磨床,同时开展了叶片磨削过程必要的复杂曲面编程技术、磨削抛光参数优化技术、砂轮制造与修整技术、专用夹具设计制造技术、变形控制技术、表面完整性控制技术、在机测量技术和误差补偿技术等 10 余项关键技术攻关。2005 年,北航设计出第一台五轴联动叶片磨床并通过沈阳黎明公司的评审,后委托秦川机床工具集团有限公司负责该机床详细结构设计和制造。经过持续改进,课题组共同研制出两种高精度五轴联动叶片磨床 QMK50A 和 QMK100,如图 3 所示。其中, QMK100 机床采用非笛卡儿坐标机床结构和滑枕式 Y 轴结构,大幅度提高了主轴系统的刚度、减小了 Y 轴惯量。

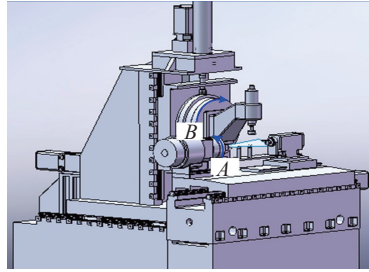
将所研制机床与国外叶片加工



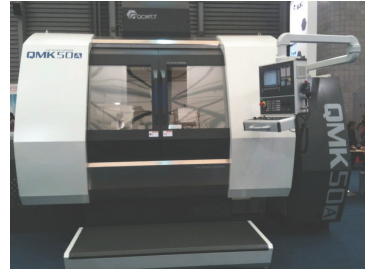
图 2 国外五轴联动叶片磨床
Fig.2 5-axis turbine blade CNC grinding machine tool

用 Starrag LX501 型机床进行精度对比,如表 1 所示。QMK50A 机床除 B 轴的双向定位精度和 Z 轴的双向重复定位精度略低于 Starrag LX501

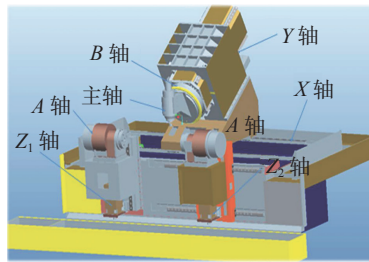
机床外,其余轴的精度均高于 Starrag LX501 机床。而 QMK100 由于 X 轴行程将近是 Starrag LX501 机床的 2 倍,所以 QMK100 的双向定位



(a) QMK50A



(b) QMK100



(c) QMK100 加工 5 级精度齿轮

指标项	图纸要求	实际测量	实际精度
单个齿距极限偏差 F_{pt}	± 0.032	左 6.3/ 右 4.2	5 级
齿距累积总公差 F_p	0.075	左 11.2/ 右 12.1	4 级
齿圈径向跳动 F_r	0.06	16.4	5 级
齿形公差 F_f	0.036	0.018/ 0.0125	5 级
齿向公差 F_{β}	0.049	0.0078/ 0.013	5 级

图 3 两种规格和结构形式的五轴联动叶片磨床

Fig.3 Two types of 5-axis blade CNC grinding machine tool with different structures and dimensions

表 1 QMK50A、QMK100、Starrag LX501 3 种五轴联动叶片磨床关键精度检测结果
Table 1 Accuracy test for three types of 5-axis blade grinding machine tools QMK50A, QMK100, Starrag LX501

运动轴	QMK50A			QMK100			Starrag LX501		
	双向定位精度 $P/\mu\text{m}$	双向重复定位精度 $P_s/\mu\text{m}$	反向间隙 $U/\mu\text{m}$	双向定位精度 $P/\mu\text{m}$	双向重复定位精度 $P_s/\mu\text{m}$	反向间隙 $U/\mu\text{m}$	双向定位精度 $P/\mu\text{m}$	双向重复定位精度 $P_s/\mu\text{m}$	反向间隙 $U/\mu\text{m}$
X	0.8	0.7	0.2	4.9	1.8	0.3	3.06	1.08	1.1
Y	1.7	1.3	0.4	2.2	1.6	0.4	4.03	1.65	1.3
Z	0.9	0.7	0.4	1.4	1.4	0.7	2.3	0.47	0.73
A	1.66"	1.11"	0.5"	4.75"	2.87"	0.47"	4.07"	2.05"	0.7"
B	4.53"	1.77"	0.23"	4.02"	3.48"	0.14"	3"	2.26"	1.09"

精度和双向重复定位精度虽稍低于 Starrag LX501 机床,但 QMK100 机床的反向间隙远小于 Starrag LX501 机床,由此说明所研制的机床已达到国际先进水平。

任意母线工具加工任意复杂曲面的数控加工编程技术

整体叶盘的加工受到复杂和狭窄流道空间的限制,因此编制无干涉和效率的加工轨迹是整体叶盘加工的难点之一。为此,国内外诸多学者提出了一系列的算法,但是这些算法大多只关注问题的某一方面,一直缺少能够统一解决干涉检查、刀轨规划、复杂母线刀具编程、宽行加工等问题的综合编程方案。

北京航空航天大学张洪在 20 世纪 70 年代研究鼓形砂轮仿形磨削整体叶盘时提出“通过增加加工行宽来减少波纹度”的编程思路^[4],提出通过分划工件成截形线并求解每条截型线与工具之间的最短距离获得误差分布曲线的“最短距离线对原理”^[5],如图 4 (a)所示。其中,截形线是指按一定规则从自由曲面上取出的曲线,不同的截形线之间互不相交,所有截形线所构成的集合代表了曲面的变化规律,截形线可包括等参数线、等高线等。最短距离是指离散的截形线到加工刀具的轮廓面之间的最近距离。

陈志同发现工具与工件间相互包络运动的有效特征线与工具的经线和纬线分布存在一一对应关系,提出了利用经线或纬线分划刀具,并通过求解每条经线或纬线到工件表面的距离分布来获得精确的刀具工件间误差分布曲线的“经纬线原理”^[6-8],如图 4 (b)、(c)所示。其中,经线法是指将加工中使用的刀具按照经线的方式离散为一系列的经线,使用这些经线所构成的曲线的集合来代表整个加工刀具。纬线法是指将加工中使用的刀具按照纬线的方式离

散为一系列的纬线,使用这些纬线所构成的曲线的集合来代表整个加工刀具。在此基础上结合上述的最短距离线对原理,通过求解刀具曲线集合中的每条曲线到待加工曲面之间的最近距离来求解任意情况下刀具与加工面之间的切触关系。上述两个原理可以归纳为任意形状工具加工任意形状曲面的“有效特征线段直接离散求解方法”。该方法可结合点到曲面最短距离计算的邻近三角形法^[9],用于实现利用任意复杂工具加工任意复杂曲面的刀位优化和刀轨规划。在误差分布^[10]的基础上,金曼、陈志同等发现了复杂母线刀具在加工复杂曲面时存在多种形状的误差分布曲线,从而确定了“端点误差确定原理”^[11],如图 4 (d)所示。上述 3 个原理是复杂曲面“宽行加工”(Strip Width

Maximization Machining, SWMM) 的 3 大基本原理。

基于上述思路,陈志同^[12]、陈果等^[13]研究了渐开线作为母线的鼓形工具编程算法,如图 5 (a)、(b)所示;生成了相应刀具的加工轨迹,如图 5 (c)所示;实现了整体叶盘的宽行铣削加工验证,如图 5 (d)所示。

2015 年,朱燊研究了利用纬线法实现整体叶盘数控加工刀位可行域的计算方法,通过样条曲线穿过所有刀具可行域的方法获得光滑的刀轴矢量变化曲线,从而生成光滑的加工轨迹^[14],如图 6 所示。与常规锥形可行域的假设相比,所使用的四边形可行域拥有更大的可行空间,使得整体叶盘的刀位优化和无干涉刀轨计算更为有效、简便。在此基础上开发了整体叶盘数控加工编程模块,如图 7 (a)所示,可适用于图 7 (b)轴

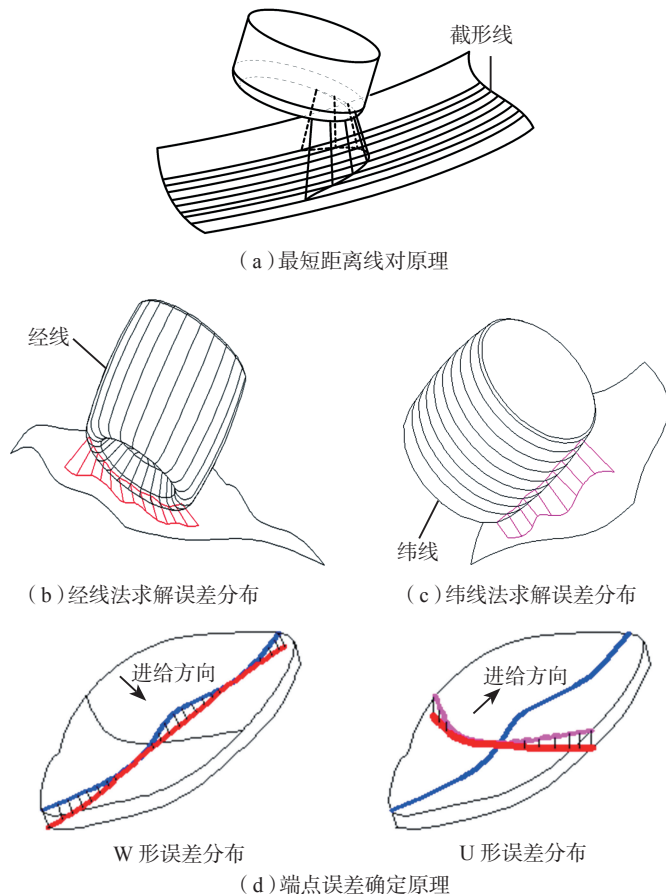


图 4 宽行加工的三大基本原理

Fig.4 Three fundamentals in strip-width maximization-machining

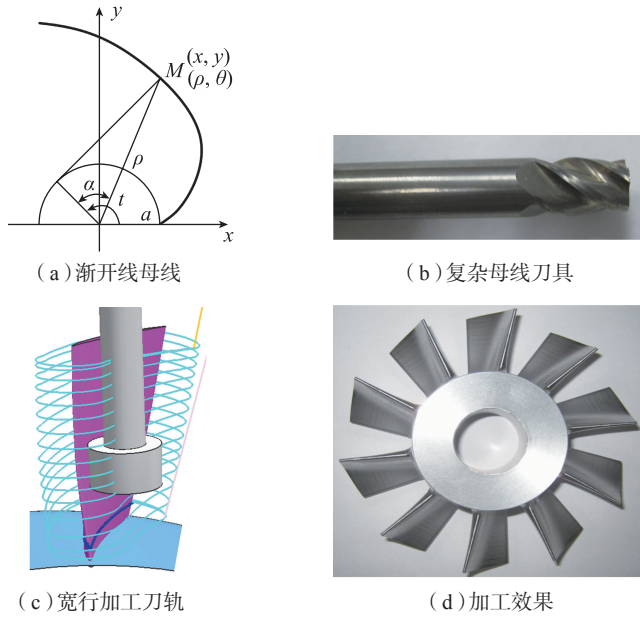


图5 渐开线母线工具和加工的整体叶盘
Fig.5 Involute generatrix tool and machined blisk

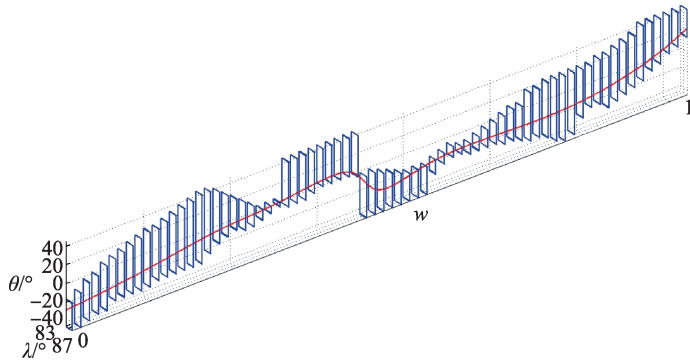
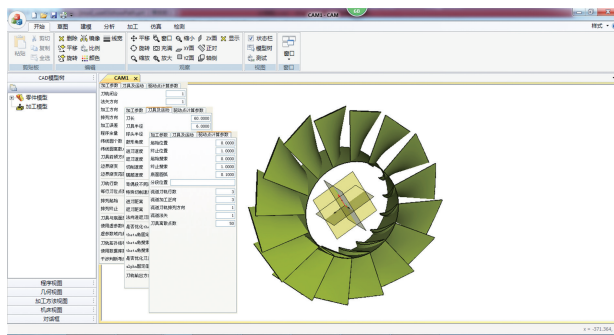


图6 一行刀轨前倾角与侧偏角可行域
Fig.6 A feasible region and a solution of incline angle and yaw angle of one row tool path



(a) 整体叶盘宽行加工编程模块



(b) 轴流式整体叶盘刀轨 (c) 离心式叶轮刀轨

图7 整体叶盘/叶轮加工编程软件
Fig.7 CAM software for blisk/impeller

流式整体叶盘和图 7 (c) 离心式叶轮的数控加工编程。

整体叶盘磨削工艺

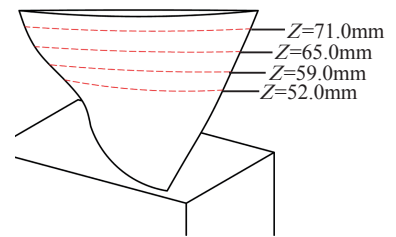
针对整体叶盘的材料、工艺刚性、几何属性等特征,开展 6 种典型工艺方法研究,形成了完备的整体叶盘磨削加工解决方案,并通过典型应用验证各方法的适用性和优势。

1 整体叶盘五轴数控插磨加工

2013 年,孟凡军^[15]开展了整体叶盘数控插磨研究,采用电镀 CBN 砂轮粗磨和陶瓷结合剂 CBN 砂轮精磨相结合实现了整体叶盘叶片插磨加工,如图 8 所示。精加工时通过多层磨削的方式来提高磨削精度,每层磨削深度 0.01mm,经检测磨削力在 15N 以下。

其中,单个叶片检测结果如图 9 所示,叶片型面轮廓度不大于 15μm。按照航空发动机叶片建模及检测的标准规定,图 9 中的“Z”表示在该 Z 值下的叶片截面线的检测结果。该检测结果为三坐标测量机检测后所得到的数据,其检测过程符合航空行业标准。

2 整体叶盘五轴螺旋轨迹磨削加工



(a) 加工模型



(b) 加工效果

图8 整体叶盘五轴数控插磨加工

Fig.8 5-axis plunge grinding of blisk

2015年,朱燊^[14]研究了整体叶盘的螺旋磨削加工方式,采用鼓形CBN砂轮生成螺旋加工刀轨,如图10(a)所示。加工后效果如图10(b)所示。叶尖/叶中/叶根三截面检测结果如图11所示(u 代表截面方向),由于型面设计公差为 $-0.06\text{mm}\sim 0$,理论编程余量取 -0.03mm ,叶身线轮廓

误差 $\leq 0.015\text{mm}$ 。

3 整体叶盘宽行磨削加工

2016年,朱燊^[16]在QMK50A机床上开展了小半径进排气边整体叶盘的宽行磨削加工,图12(a)为加工模型及宽行加工刀轨,对象整体叶盘最大外径为 146mm ,相邻叶片最小距离为 7.472mm ,叶高约

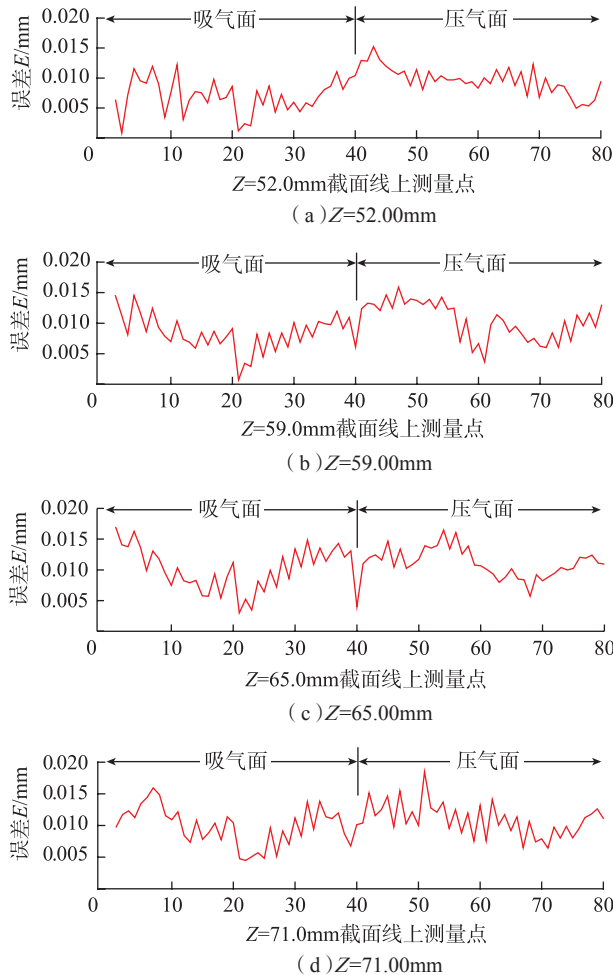
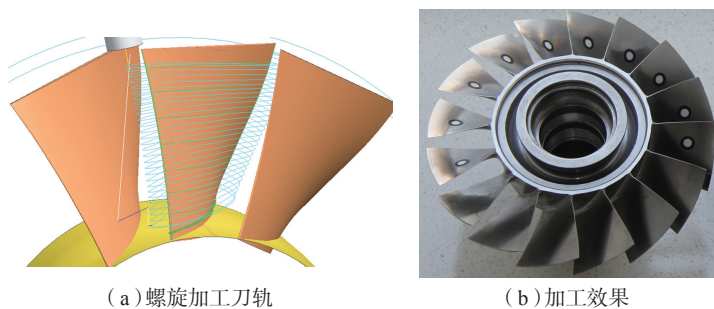


图9 插磨整体叶盘叶片的检测结果

Fig.9 Measured results of blisk machined with plunge grinding method



(a) 螺旋加工刀轨

(b) 加工效果

图10 $\varnothing 200\text{mm}$ 整体叶盘五轴螺旋轨迹磨削加工

Fig.10 Spiral grinding of a blisk ($\varnothing 200\text{mm}$ external diameter)

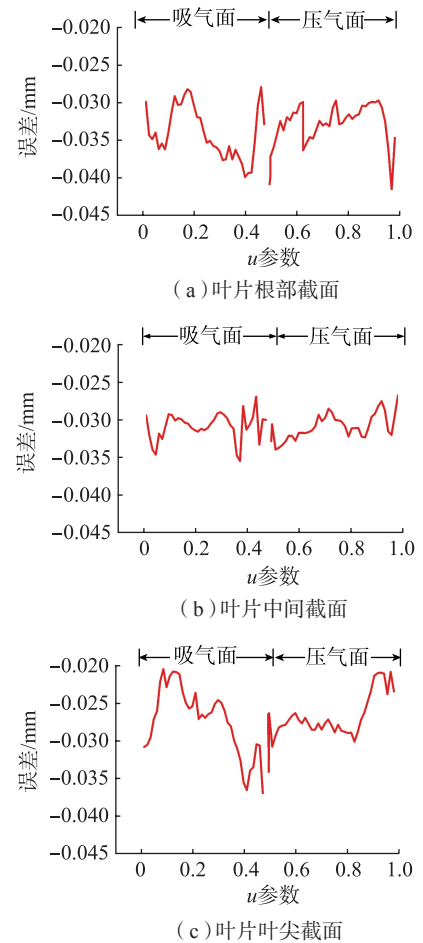
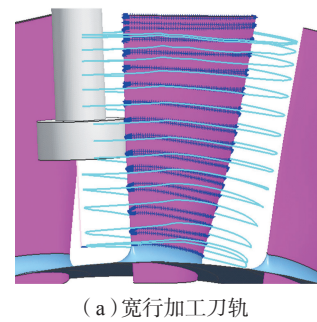


图11 螺旋加工整体叶盘型面检测结果

Fig.11 Measured results of blisk profile machined by the spiral grinding



(a) 宽行加工刀轨



(b) 加工效果

图12 整体叶盘宽行磨削加工

Fig.12 SWMM of a super-thin blisk

20mm, 宽度约 17mm, 最大厚度约 0.7mm。宽行刀轨共计 16 行, 编程残留高度为 0.005mm, 平均行宽约为 1.3 mm, 远大于商用 CAM 软件所生成行宽, 可成倍提高磨削效率。

采用 CBN 砂轮完成了该叶盘叶片的数控磨削加工, 如图 13 (a) 所示, 利用线切割方法获取该整体叶盘进气边横截面, 在显微镜下观测其圆度极好(圆弧半径 28.7 μm)。对该整体叶盘叶根至叶尖截面进排气边(圆弧半径 112.5~28.7 μm)进行检测, 如图 13 (b) 所示, 各圆弧半径偏差在 [-10 μm , +10 μm] 内。图 13 (c)~(e) 给出了叶尖/叶中/叶根三截面检测结果, 截面线轮廓度误差 $\leq 0.02\text{mm}$, 型面轮廓度 $\leq 0.03\text{mm}$ 。

4 整体叶盘三轴数控磨削加工

北京航空航天大学研究人员发现砂轮杆直径小于鼓形砂轮直径时能够采用三轴直角坐标机床进行叶片的磨削加工^[15], 并将此发现应用于复杂弯扭叶片的三轴加工, 如图 14~16 所示, 线轮廓误差在 0.01~0.025mm 内波动, 最大变化幅度不超过 0.015mm。

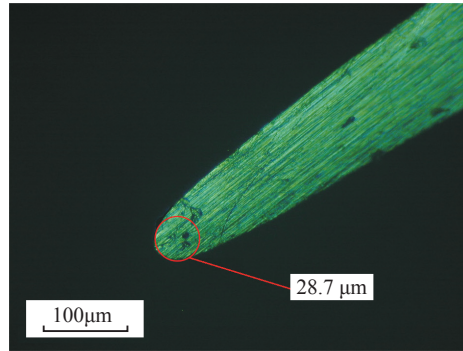
陈志同将该原理扩展到整体叶盘的加工过程^[17-18], 随后朱燊等^[19-20]证实了大多数整体叶盘可以采用特定空间姿态的鼓形砂轮进行全型面磨削加工的可能。图 17 为采用鼓形砂轮和三轴圆柱坐标机床磨削加工图 5 所示整体叶盘的 VERICUT 仿真效果, 无过切现象, 95% 的欠切量在 0.02mm 以内。由此表明整体叶盘可采用三轴圆柱坐标机床和鼓形砂轮进行磨削加工, 显著降低机床成本。

5 整体叶盘进排气边几何自适应磨削加工

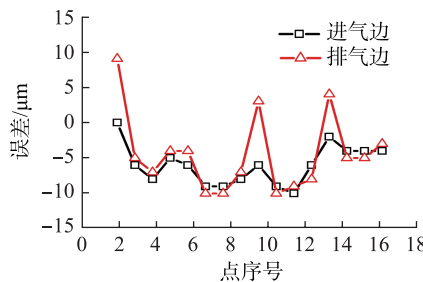
对于型面尺寸规格较大、进排气边曲率半径较小的整体叶盘, 叶身采用铣削、进排气边采用磨削的几何自适应加工方法既可以避免啃刀问题, 又可以获得更高的加工精度和效

率。Zhang 等^[21-22]开展了相关技术研究, 提出基于叶片中弧线的模型重构方法。图 18 为该整体叶盘(叶宽 35mm、叶高 37mm, 进排气边圆

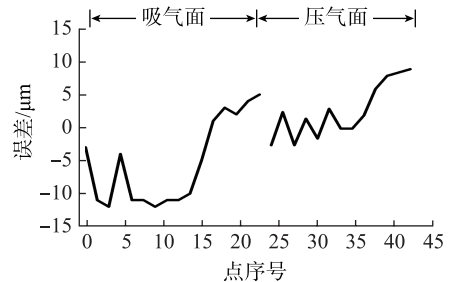
弧半径约 0.1mm) 的加工效果。在叶身铣削的基础上, 进排气边及其邻近区域采用几何自适应磨削加工, 其中叶尖截面检测结果如图 19 所示。



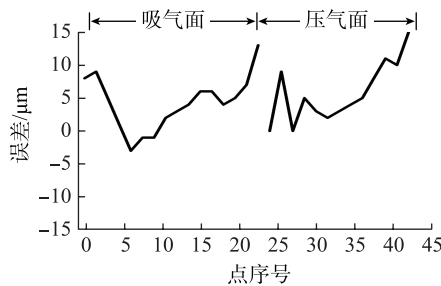
(a) 显微镜下观测进气边圆弧



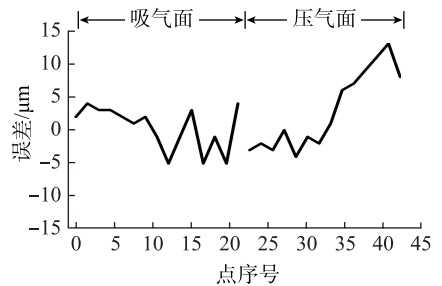
(b) 多截面进排气边圆弧半径加工误差



(c) 叶片根部截面



(d) 叶片中间截面



(e) 叶片叶尖截面

图 13 宽行加工整体叶盘检测结果

Fig.13 Measured results of blisk profile machined by SWMM grinding

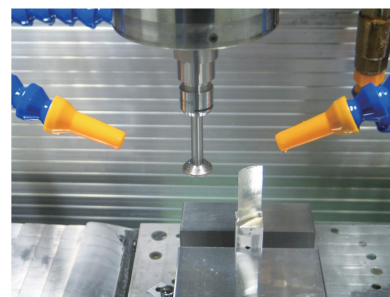
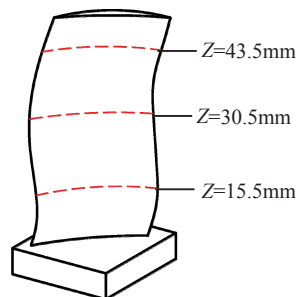


图 14 三轴数控磨削复杂弯扭叶片

Fig.14 There-axis CNC grinding of blending blade

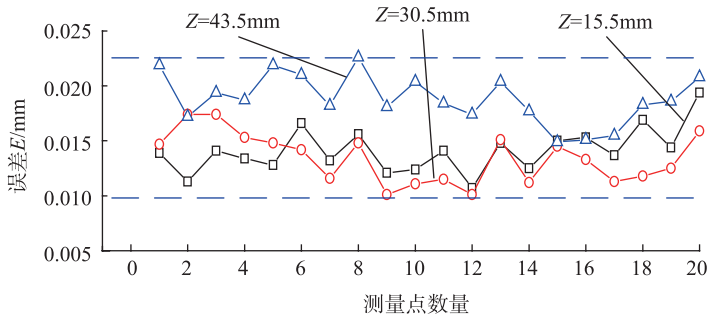


图15 压气面精度检测结果

Fig.15 Measurement result of pressure side

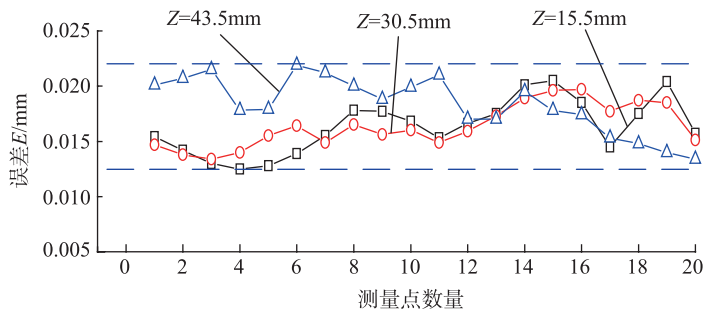


图16 吸气面精度检测结果

Fig.16 Measurement result of suction side

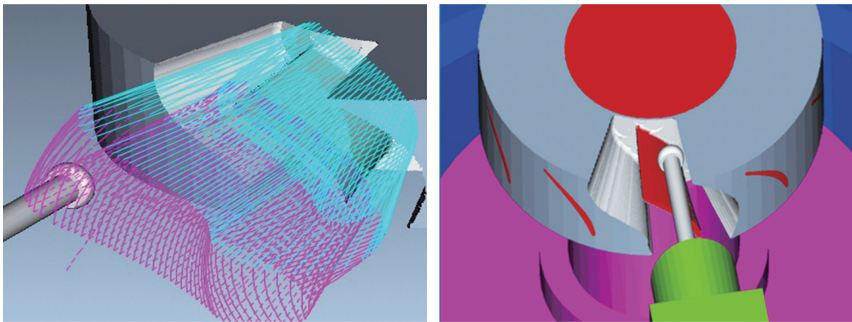


图17 整体叶盘三轴圆柱坐标机床加工仿真

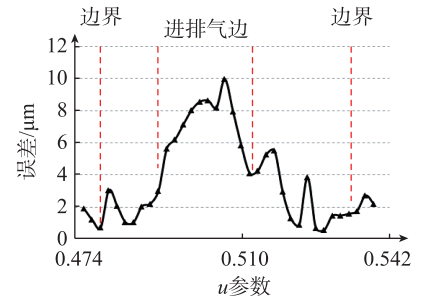
Fig.17 Simulation of blisk machining method with a 3-axis cylindrical machine tool



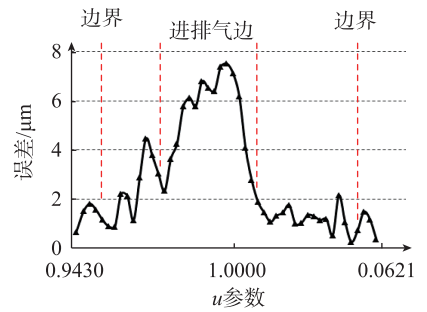
自适应加工区域

图18 具有小半径进排气边的整体叶盘

Fig.18 A blisk with small leading/trailing edge radii



(a) 参数增大



(b) 参数减小

图19 叶尖截面检测结果

Fig.19 Measurement result of tip section

进排气边圆弧轮廓光滑,线轮廓度误差 $\leq 0.01\text{mm}$,且与搭接边界无明显痕迹、过渡平缓,台阶差可控制在 0.01mm 以内。

6 整体叶盘圆周阵列磨削加工

为了进一步提高效率,陈志同提出了使用多主轴同步加工整体叶盘的思路^[17-18],并结合整体叶盘中心对称的特点,提出了圆柱坐标机床用于整体叶盘的加工,如图20所示。该机床的设计以圆柱坐标机床为基础,可针对待加工的整体叶盘的叶片分布情况,安装相应数量的加工主轴,并通过机械方法控制各主轴的同步运动,使其按圆柱坐标系的形式进行运动,从而同步加工出整体叶盘的型面,可望将叶片长度不大于 60mm 整体叶盘的加工时间从数十乃至数百小时缩短到 3h 以内。

结论

本文对多种整体叶盘的磨削加工技术进行了比较系统的研究,提出了一系列的加工解决方案,开发

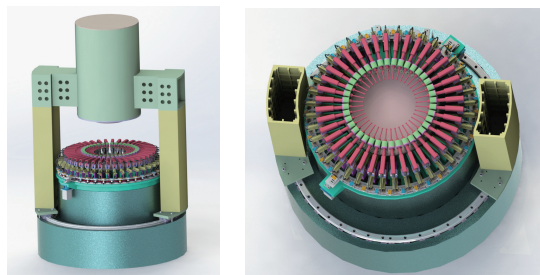


图 20 圆周阵列加工机床示意图

Fig.20 Application of using cylindrical coordinate array machine

了专用的整体叶盘编程模块,研究结果表明:

(1) 研制出国内第一台五轴联动叶片数控磨床, QMK50A 机床的单轴运动精度达到 $2\mu\text{m}$ 量级, 机床精度已达到国际同类机床的先进水平; QMK100 机床因采用非笛卡尔结构设计理念和滑枕设计方案, 可直接加工出 5 级精度的精密齿轮。

(2) 建立复杂曲面广义包络理论和宽行加工技术, 利用复杂母线工具实现了宽行加工刀轨规划和无干涉刀轨优化, 开发出复杂曲面高档数控加工编程系统。

(3) 高速磨削中使用微量磨削的方式提高加工效果, 其磨削力小, 磨削加工采用 CBN 砂轮磨削可以获得 $15\sim 20\mu\text{m}$ 的叶片面轮廓精度, 达到目前设计公差(线轮廓度、扭角误差、位置偏差的总和)10% 以内。

(4) 采用 CBN 砂轮高速磨削可以实现曲率半径小至 $28.7\mu\text{m}$ 的叶片进排气边的磨削加工, 可以避免铣削方法的啃切。

(5) 采用 CBN 砂轮磨削难加工材料, 可通过多次修整的方法延长砂轮的使用寿命, 可望大幅度降低整体叶盘加工成本。

(6) 钛合金等容易铣削加工的整体叶盘可以采用叶身铣削、进排气边磨削的几何自适应加工方法, 磨削加工进排气边的线轮廓度可达到 0.01mm 范围; 难加工材料的整体叶盘可采用超硬砂轮全型面磨削的方法。

(7) 插磨方式可以降低轨迹的加速度, 具有较高的加工精度, 但是加工过程有空行程, 效率较低; 宽行磨削可以显著提高加工效率; 三轴磨削方式可以降低加工成本; 圆周阵列磨床可以大幅度降低加工成本和加工效率, 有望将整体叶盘的加工成本降低到目前的 10% 以下。

参考文献

- [1] 沙里诺夫. 燃气涡轮发动机叶片的磨削与抛光 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1959.
- [2] 李家平. 五坐标数控仿形磨削在 10A 发动机一级工作叶片中应用的研究 [D]. 北京: 北京航空航天大学, 1992.
- [3] LI Jiaping. Research on the application of 5-axis numerical control profiling grinding in the first stage working blade of 10A engine [D]. Beijing: Beihang University, 1992.
- [4] GE. Impeller finishing process development [R]. General Electric Aircraft Engine Company, 1979.
- [5] 张洪. 从增大行距宽度减少波纹度的角度看型面加工发展的方向 [C]// 北京航空学院制造工程系型面加工与检测论文集, 北京, 1982.
- [6] ZHANG Hong. The direction of surface machining development from the angle of increasing strip-width and reducing waviness [C]// Surface Machining and Measuring Symposium, Department of Manufacturing Engineering, Beijing College of Aeronautics, Beijing, 1982.
- [7] 倪炎榕, 马登哲, 张洪, 等. 圆环面刀具五坐标数控加工复杂曲面优化刀位算法

[J]. 机械工程学报, 2001, 37(2): 87-91.

NI Yanrong, MA Dengzhe, ZHANG Hong, et al. Optimal orientation control for torus tool 5-axis sculptured surface NC machining [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2001, 37(2): 87-91.

[6] 李正强, 陈志同, 肖俊. 鼓形刀宽行刀位优化纬线分割算法 [J]. 北京航空航天大学学报, 2007, 33(6): 731-735.

LI Zhengqiang, CHEN Zhitong, XIAO Jun. Latitude distribution algorithm of cutter position optimization on drum-like cutter for strip-maximization [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2007, 33(6): 731-735.

[7] 陈志同, 张俐. 采用经线分划刀具的多坐标端铣加工刀位优化方法: 200810106647.7 [P]. 2008-05-14.

CHEN Zhitong, ZHANG Li. An optimization method of multi coordinate end milling cutter position using longitude method: 200810106647.7 [P]. 2008-05-14.

[8] 陈志同, 甘植旺, 李珊珊. 一种基于包络理论和经线划分的回转型刀具包络特征线计算方法: 201510229363.7 [P]. 2015-05-07.

CHEN Zhitong, GAN Zhiwang, LI Shanshan. A method for calculating envelope characteristic line of rotary tool based on envelope theory and meridian division: 201510229363.7 [P]. 2015-05-07.

[9] 陈志同, 焉嵩, 宁涛. 点到曲面距离计算的邻近三角形方法: 201010205869.1 [P]. 2010-06-12.

Chen Zhitong, YAN Song, NING Tao. A neighborhood triangle method for calculating the minimum distance between point and surface: 201010205869.1 [P]. 2010-06-12.

[10] 颜家勇, 陈志同, 贺英. 基于包络理论的刀位误差快速求解算法 [J]. 航空学报, 2011, 32(11): 2131-2139.

YAN Jiayong, CHEN Zhitong, HE Ying. A quick calculation method of tool position error based on envelope theory [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2011, 32(11): 2131-2139.

[11] 金曼, 张俐, 陈志同. 圆环面刀具五坐标加工端点误差控制刀位优化 [J]. 北京航空航天大学学报, 2006, 32(9): 1125-1128.

JIN Man, ZHANG Li, CHEN Zhitong. End-points error controlling method for torus tool position optimization in five-axis NC machining [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2006, 32(9): 1125-1128.

[12] 陈志同, 王爽. 单参数变曲

率鼓形刀具及其位姿确定方法和应用: 200810227517.9[P]. 2008-11-27.

CHEN Zhitong, WANG Shuang. A single parameter variable curvature drum shaped tool and its position determination method and application: 200810227517.9[P]. 2008-11-27.

[13] 陈果, 陈志同. 复杂母线鼓形刀具宽行侧铣加工算法[J]. 航空精密制造技术, 2010, 46(5): 34-38.

CHEN Guo, CHEN Zhitong. Flank milling with complex generatrix barrel cutters[J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2010, 46(5): 34-38.

[14] 朱燊. 整体叶轮宽行侧刃加工刀轨生成技术研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2017.

ZHU Yu. Study on the tool path generation technology for the strip-maximization flank machining of the impeller[D]. Beijing: Beihang University, 2017.

[15] 孟凡军. 整体叶盘叶片型面数控精密磨削加工技术研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2015.

MENG Fanjun. Study on the precision grinding technology for the CNC machining

of blade surface of blisk[D]. Beijing: Beihang University, 2015.

[16] ZHU Y, CHEN Z T, ZHANG Y, et al. Tool positioning method for achieving double-point contact in flank milling of a concave surface with a barrel cutter[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 93(5-8): 1791-1807.

[17] 陈志同, 陈宇飞. 一种圆周阵列曲面结构同步加工装置: 201310152367.0[P]. 2016-05-04.

CHEN Zhitong, CHEN Yufei. A cylindrical coordinate array surface structure synchronous machining device: 201310152367.0[P]. 2016-05-04.

[18] 陈志同, 陈宇飞, 王传彬. 一种圆周阵列曲面结构五轴同步加工装置: 201410004979.X[P]. 2016-01-20.

CHEN Zhitong, CHEN Yufei, WANG Chuanbin. A cylindrical coordinate array machine for machining the freeform surface with the synchronous processing method: 201310731503.1[P]. 2016-01-20.

[19] 朱燊, 宁涛, 陈志同. 圆柱坐标数控机床加工整体叶轮的的运动学分析[J]. 航空

学报, 2014, 35(8): 2364-2374.

ZHU Yu, NING Tao, CHEN Zhitong. Kinematic analysis of cylindrical coordinate CNC machine in Integral Impeller machining[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2014, 35(8): 2364-2374.

[20] ZHU Y, CHEN Z T, NING T, et al. Tool orientation optimization for 3+2-axis CNC machining of sculptured surface[J]. Computer-Aided Design, 2016, 77(8): 60-72.

[21] ZHANG Y, CHEN Z T, NING T, et al. Reverse modeling strategy of aero-engine blade based on design intent[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 81(9-12): 1781-1796.

[22] ZHANG Y, CHEN Z T. Constraints and CFD simulation-based parametric reconstruction for 2D blade profile in reverse engineering[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering, 2016, 230(12): 309-336.

通讯作者: 陈志同, E-mail: ztchen@buaa.edu.cn.

CNC Grinding Technology With Super-Abrasive Grinding Wheels for Blisk

CHEN Zhitong¹, ZHU Yu¹, ZHANG Yun¹, LIU Ruisong¹, WU Ningning², ZHANG Wugang³,
CHENG Zhang², XU Qiyang², LIU Anhong²

(1. School of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University, Beijing 100191, China;

2. China National South Aviation Industry Co., Ltd., Zhuzhou 412000, China;

3. Qinchuan Machine Tool & Tool (Group) Co., Ltd., Baoji 710000, China)

[ABSTRACT] There are a lot of difficulties in the process of CNC machining for open disk, such as small leading/trailing edge radius, difficult-to-machine materials, short tool life, complex CNC programming, long machining time, hard-to-control machining deformation, etc. The blisk grinding technique with CBN grinding wheels presented in this paper aims to solve the above-mentioned problems. To ensure this, firstly, cantilever grinding method and strip-width-maximization grinding method with barrel-shape grinding wheels are employed to realize high accuracy machining of blisk profile, the machining errors of suction/pressure surface are fluctuant in the range of 15~20 μm , and the minimum leading/trailing edge radius is near 28.7 μm . Secondly, a geometry-based adaptive machining method is suitable for the make up machining of leading/trailing edge, the residual error between machining area and its adjacent area is less than 10 μm . Finally, 3-axis cylindrical CNC grinding method and cylindrical coordinate array grinding method are proposed and verified through simulation, which can shorten blisk (its blade length is less than 60 mm) machining time from hundreds of hours to 3 hours or so.

Keywords: Blisk; CNC grinding; CBN grinding wheel; Blade grinding machine tool; Sculptured surface grinding

(责编 铃兰)