面向航空叶片加工的高档数控机床研制*

肖铁忠①，袁秀坤①，冯锦春①，黄　娟①，钟成明②
（①四川工程职业技术大学机械工程学院，四川 德阳 618000；
②德阳杰创科技有限公司，四川 德阳 618000）

摘　要：以航发叶片、盘类零部件加工为对象，通过分析叶盘及叶片等典型零部件加工需求，确定了机床的功能要求。在此基础上，确定了机床整体布局方案，以机床规格性能参数及整体方案为依据，设计了五轴联动高档数控装备结构，并对工件装夹装置、***B***轴和摆动电主轴铣头等关键部件进行了详细设计与阐述。同时，自主研发了基于 **CAD/CAM/CNC** 一体化的复杂型面五轴联动编程及一体化的后置处理软件，软件利用五轴 **RTCP** 插补算法对加工轨迹进行规划，以提升工件的加工精度及进排气边缘轮廓精度，经检测，**RTCP** 精度达到 **0.01 mm**。以某航发叶片粗、精加工进行加工精度验证，结果表明，叶片精加工后的型面轮廓精度为**−0.023 3/+0.015 8 mm**，达到甚至超过国际同类产品水平。

关键词：航空叶片；**RTCP**；高档数控机床；装夹装置；检测
中图分类号：TH122，TG659　　**文献标识码：A**
DOI: 10.19287/j.mtmt.1005-2402.2025.10.011

全文在线

Development of high-grade CNC machine tools for aerospace blade processing

XIAO Tiezhong①, YUAN Xiukun①, FENG Jinchun①, HUANG Juan①, ZHONG Chengming②
(①School of Mechanical Engineering, Sichuan Polytechnic University, Deyang 618000, CHN;
②Deyang Jiechuang Technology Co., Ltd., Deyang 618000, CHN)

Abstract: Taking the processing of aero-engine blades and disk components as the research object, the functional requirements of the machine tool were determined by analyzing the processing needs of typical components such as blisks and blades. On this basis, the overall layout scheme of the machine tool was formulated. Based on the specification performance parameters and the overall scheme of the machine tool, a five-axis linkage high-grade CNC equipment structure was designed, and key components such as the workpiece clamping device, *B*-axis, and swing electric spindle milling head were elaborately designed and elaborated. Meanwhile, an independently developed five-axis linkage programming and integrated post-processing software based on CAD/CAM/CNC integration was created. The software utilizes a five-axis RTCP interpolation algorithm to plan the machining trajectory, so as to improve the machining accuracy of the workpiece and the contour accuracy of the intake and exhaust edges. Tests have shown that the RTCP accuracy reaches 0.01 mm. The machining accuracy verification was carried out on the rough and finish machining of a certain aero-engine blade. The results show that the profile contour accuracy of the blade after finish machining is −0.023 3/ +0.015 8 mm, which meets or even exceeds the level of similar international products.

Keywords: aerospace blade; RTCP; high-grade CNC machine tool; clamping device; inspection

* 四川省经济和信息化厅 2024 年度四川省省级工业发展专项资金重大技术装备攻关任务“高精度叶片五轴联动加工中心”；德阳市科学技术局德阳市科技计划项目“基于航空发动机叶片复杂型面高速高精加工关键技术研究”（2024GZ201）

随着航空工业技术的不断进步，航空发动机的性能要求也在随之增加，其叶片、叶盘等关键零部件也在朝着结构更复杂，加工精度要求更高，材料加工难度更大，表面完整性、表面质量、轮廓精度及同级叶片加工精度一致性要求更高方向发展[1−2]，对此类零部件加工工艺及装备提出了更高要求。叶片由于壁薄、材料硬度高、型面比较复杂等，在加工时很容易因为刚性不够而发生振颤，从而导致工件表面质量差、加工精度不够和效率低等现象[3−8]。五轴数控机床是加工叶片、叶盘零件的主要装备，但一般的五轴数控机床在加工时，由于工件进排气边曲率急剧变化，使得机床存在速度及加速度跟不上加工要求的缺陷[9−12]，将会造成机床发生振动、过切等现象，从而影响工件的加工质量。而叶片、叶盘等的加工精度则直接影响航空发动机的整机性能[13−14]，叶片几何精度和表面质量直接影响机械效率，其质量的一致性直接影响动力机械安全性与寿命[15−16]，据统计，极大部分的航空发动机故障是由叶片引起的[17−19]。目前，此类零部件高速高精加工高端数控装备基本由欧美等控制，已成为我国动力装备行业及国防建设等健康发展的“卡脖子”问题。为解决上述相关问题，本文以航空发动机叶片、叶盘等高精度复杂型面零部件加工为研究对象，对其加工装备关键技术进行研究，形成具有完全自主知识产权的面向航空叶片、盘类零部件加工的高档数控装备，以国产替代进口，解决此类零部件加工装备“卡脖子”问题。

1 加工需求分析

1.1 航空发动机叶轮叶盘加工需求分析

航空发动机叶盘（图 1）及叶轮（图 2）作为高技术、高复杂性零部件的代表，其加工需求受到广泛关注。以某航空发动机钛合金叶轮加工为例，成品直径 210 mm，重量 1.15 kg，毛坯重量 7 kg，金属去除率为 83.57%。叶轮加工时局部最小曲率半径约 0.2 mm，叶片根部最小圆角为 R1.2 mm，流道最窄处为 5.5 mm，叶片扭角约为 65°，叶展为 45.6 mm。叶轮叶片铣削加工后其综合轮廓度误差要求小于 0.05 mm，叶片边缘 3 mm 处的综合轮廓度误差要求小于 0.02 mm。其加工难点主要有：

（1）零件加工时易变形且加工精度高，要求加工装备具备很好的动静刚度，且加工时需采用高线速度铣削加工，以保证加工质量，为满足较小叶根圆角加工，需保证最大线速度在 20 000 mm/min 以上。

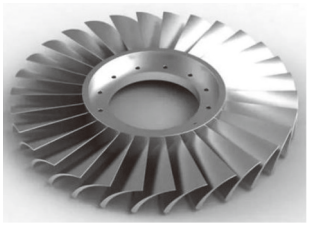


图 1 叶盘
Fig. 1 Blisk



图 2 叶轮
Fig. 2 Impeller

（2）叶片扭角约为 65°，且叶片间距较小，叶根部位空间狭小，需采用五轴联动以保证刀轴的姿态，完成复杂型面的加工。叶轮叶片边缘处的最小曲率半径为 0.2 mm，加工时曲率半径变化极为剧烈，故在翻边加工时对工件回转轴加速度及速度提出了很高的要求，否则会因为回转速度跟不上而发生过切现象。

1.2 航空发动机叶片加工需求分析

以中等推力航空发动机为例，其发动机叶片在 2 000～2 500 片，在叶片加工时，尺寸加工精度及表面质量要求较高，且尺寸精度一致性要求也较高，只有较高的精度一致性才能提升整机的精度，并保证使用寿命。叶片型面多为自由曲面，其型面曲率及扭曲度变化大，其毛坯材料多为钛合金、不锈钢及高温合金等难加工材料，这类材料加工时塑性变形及摩擦力均较大，且导热率较低，加工时会产生大量的热量，除合理配置工艺参数外，还需设置冷却装置，控制加工表面的温度，防止加工表面烧伤，形成裂纹等缺陷。图 3 所示为某航空发动机某级叶片，其型面形状呈弯、扭、掠，进排气边厚度为 0.1 mm 左右，综合轮廓误差要求小于 0.05 mm，型面轮廓度要求为±0.04 mm，进排气边轮廓度要求为±0.02 mm，表面粗糙度 Ra≤0.4 μm，截面扭转要求为±10"。航空发动机叶片一般都比较薄，为满足其加工精度要求，需提升工件装夹刚度，需在加工时解决其装夹刚度要求。

2 铣床整体结构及关键部件设计

2.1 机床功能要求

为满足大部分航空发动机叶片及盘类零部件的加工，将机床的加工范围设定在叶片加工气道长度 700 mm 以内，弦宽在 420 mm 以内，盘类零件直径在 400 mm 以内；为满足叶片加工时刚度要求，

需设置提升工件加工刚度的装置；为满足叶轮、叶片等复杂型面加工时刀轴姿态要求，要求至少设置两个回转轴；加工时，不同零件不同工序所需刀具不同，需设置合理数量的刀库，并能实现自动换刀；对于同级叶片加工，加工精度一致性要求较高，需设置合理装夹装置，提升工件加工精度的一致性；为实现叶片边缘曲率急剧变化的加工要求，主轴在加工时加速度、刚度及动态响应等要求较高，需设计合理的加速度、刚度及动态响应参数，保证高精度加工要求；为降低机床关键部件及工件热变形影响，在关键部件内部及主轴前端设计冷却装置；为实现高速度高精度加工，各驱动部件传动链越短越好。

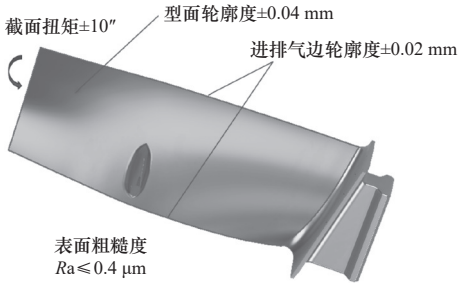
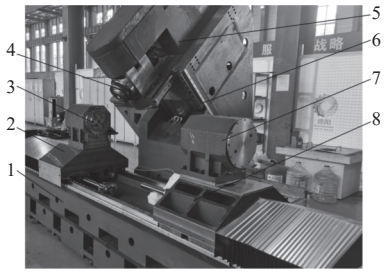


图 3 叶片

Fig. 3 Blade

2.2 铣床整体结构设计

根据加工要求设计的铣床具体结构如图 4 所示，机床由 3 个相互垂直的直线数控滑台、2 个工件回转轴 A 轴、刀具回转轴 B 轴、零点定位快换装置、自动刀库和床身等组成。床身 4 上端设置两个直线轴，即 X_1 与 X_2 轴，行程分别为 400 mm；X 轴上分别设置一个回转轴，为 A_1 与 A_2 轴，其行程为 360°；回转轴 A 轴前端各设置一个零点定位快换装置，用于装夹工件；床身后端设置立柱，与床身呈 T 字形分布；在立柱上设置与水平面呈 45°向上的 Z 轴，带着主轴上下运动，其行程为±200 mm；在 Z 上端设置一个与水平面呈 45°向下的 Y 轴，带着主轴上下运动，其行程为向下−100 mm，向上+300 mm；Y 轴上设置刀具回转轴 B 轴，带着刀具回转，回转行程为±95°。



1—床身；2—X_1 轴；3—A_1 轴；4—B 轴；5—Z 轴；6—Y 轴；7—A_2 轴；8—X_2 轴。

图 4 五轴联动数控铣床结构

Fig. 4 Five-axis linkage CNC milling machine structure

根据前述技术要求，拟定机床规格性能参数见表 1。

2.3 工件装夹装置结构设计

本文设计的工件装夹装置结构如图 5 所示。为增加加工时工件的刚度，将 X 轴设计为两个可相互独立移动的直线运动轴，X 轴由滚柱直线导轨、滚珠丝杠及滑台组成，工件装夹装置分别置于 X_1 轴与 X_2 轴上，通过对 X 轴双向施加量化可控的恒拉力，提升加工刚度，实现对超薄叶片稳定高速加工，避免产生震刀导致的质量问题；直线运动副均采用滚柱直线导轨，满足高速的同时又具有良好的负载能力；滑台上各设置一个力矩电机作为回转轴，回转轴前端设置安装法兰，法兰上设置零点快换装置，零点快换装置上设置五轴精密虎钳，用于工件的定位夹紧，五轴精密虎钳结构紧凑，避干涉能力强，使得工件具有很好的加工可达性，同时，采用齿形啮合式夹紧方法，可在较小的锁紧力矩下实现高可靠性夹紧。

对于叶片加工，为实现同级叶片加工精度的一致性，加工时，在 A_1 轴与 A_2 轴法兰前端设置八角短锥零点快换系统，结构如图 6 所示，基座与 A 轴法兰连接，五轴精密虎钳安装于托盘上，叶片由左右精密虎钳夹紧，完成本道工序加工后，将工件、精密虎钳及托盘一起卸下，进入下一道工序，保证加工基准，从而保证同级叶片加工精度的一致性。

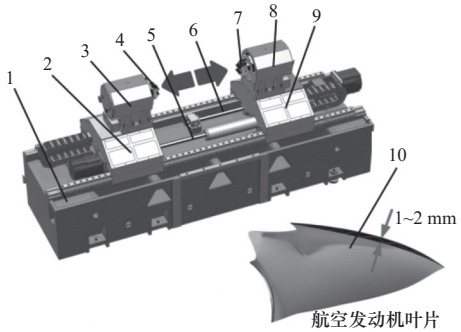
零点快换装置由基座与托盘组成，基座与 A 轴法兰相连，托盘上安装夹紧机构，托盘与基座用短

表 1 机床规格性能参数

Tab. 1 Machine tool specifications and performance parameters

机床轴数	机床尺寸/（mm×mm×mm）	刀库/把	主轴转速 V_{max}/（r/min）	主轴功率 P/kW	叶片加工范围/mm	盘类零件加工范围/mm	$X/Y/Z$轴行程/mm	A/B轴行程/（°）	直线运动轴定位精度/mm	A/B轴精度
五轴联动	3 410×2 261×2 583	24/32/36	15 000	45	20～700（长度），420（弦宽）	400	800/400/400	360/±95	≤0.004	±3″/±3″

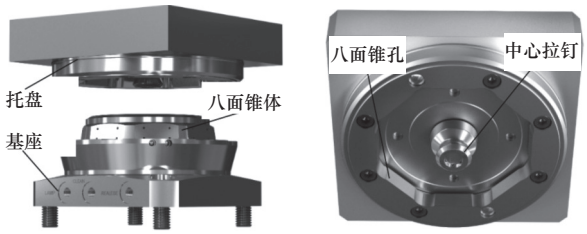
八面锥面及拉钉定位夹紧，其优点主要有：8 个锥面及拉钉定位夹紧，具有在狭小空间内实现高扭矩的传递，并承受高冲击载荷的能力；完全对称的圆锥面确保装置具备高自定心性能；加工时，热变形会从中心位置向四周扩散，热变形对装置的定位精度影响很小，工件以此道工序中心点为基准点进行二次高精密加工，保证工件的加工精度及一致性。



1—床身；2—X_1 轴滑台；3—A_1 轴；4、7—零点定位快换装置；5—X_1 轴丝杠；6—X_2 轴丝杠；8—A_2 轴；9—X_2 轴滑台；10—叶片。

图 5 工件装夹装置结构图

Fig. 5 Structural diagram of workpiece clamping device



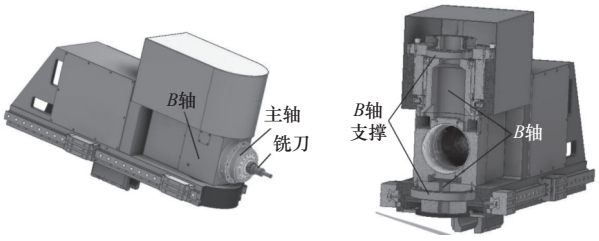
(a) 装置组成部件 (b) 定位夹紧结构

图 6 八角短锥零点快换装置

Fig. 6 Octagonal short cone zero point quick change device

2.4 *B* 轴和摆动电主轴铣头结构

B 轴和摆动电主轴铣头结构如图 7 所示。*B* 轴采用分片斜齿轮消隙结构，偏心销调整，配合无背隙高精度伺服减速机驱动电主轴铣头作±95°摆动，电主轴摆动轴两端均有轴承支撑，主轴悬伸较短，适应方钢毛坯叶片加工高刚性要求；同时 *B* 轴转动中心靠近电主轴铣头重心，*B* 轴不需要平衡，动态特性好，有利于提高加工效率。



(a) *B*轴和摆动电主轴铣头结构 (b) *B*轴结构剖视图

图 7 *B* 轴结构

Fig. 7 *B*-axis structure

主轴采用电主轴结构，如图 8 所示，采用直驱技术，可实现无间隙传动，有效提升主轴系统的精度及动态响应速度；同时，主轴、轴承等高速运动部件均采用恒温水冷却技术，水温可控制在±0.1 ℃以内，满足高精度加工热变形影响要求。

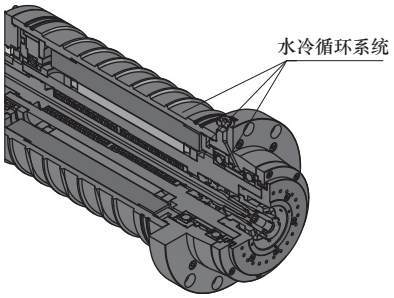


图 8 电主轴结构

Fig. 8 Electric spindle structure

3 样机加工验证

3.1 机床控制技术

传统的五轴联动平动轴与回转轴高加速度匹配技术主要采用最优平动轴约束进给量规划算法、三次 S 曲线加减速算法等，加工时，旋转轴因跟不上平动轴而出现过切、机械振动及表面质量和精度差等问题。为解决上述缺点，本机采用面向五轴线性插补的平动轴、旋转轴运动特性约束下的统一规划方法，技术路线如图 9 所示，解决旋转轴跟不上平动轴的问题，实现五轴联动平动轴与回转轴高加速度的匹配。同时，通过全闭环实时补偿方法，提高位置环及速度环控制增益，减小电流和速度振荡，从而提升闭环控制响应能力，实现高加速度运动轴的高速高精控制。

自主开发基于 CAD/CAM/CNC 一体化的复杂型面五轴联动编程及一体化的后置处理软件，刀具路径轨迹采用五轴 RTCP（rotational tool center point）插补法，其原理如图 10 所示，后置处理如图 11 所示，用以提升工件的加工精度及进排气边缘轮廓精度。利用球头检验棒及千分表对 RTCP 精度进行检测，如图 12 所示，其精度达到 0.01 mm。

3.2 加工验证

在完成整机的设计与安装调试后，利用雷尼绍 XL-80 激光干涉仪对五轴铣床各轴的定位精度及重复定位精度进行测量，直线轴精度均在 3.2 μm 以内，*A*、*B* 轴精度均在 3″以内，以主轴 *B* 轴为例，其定位精度为 2.8″，检测结果如图 13 所示，各轴精度均满足机床设计性能要求。

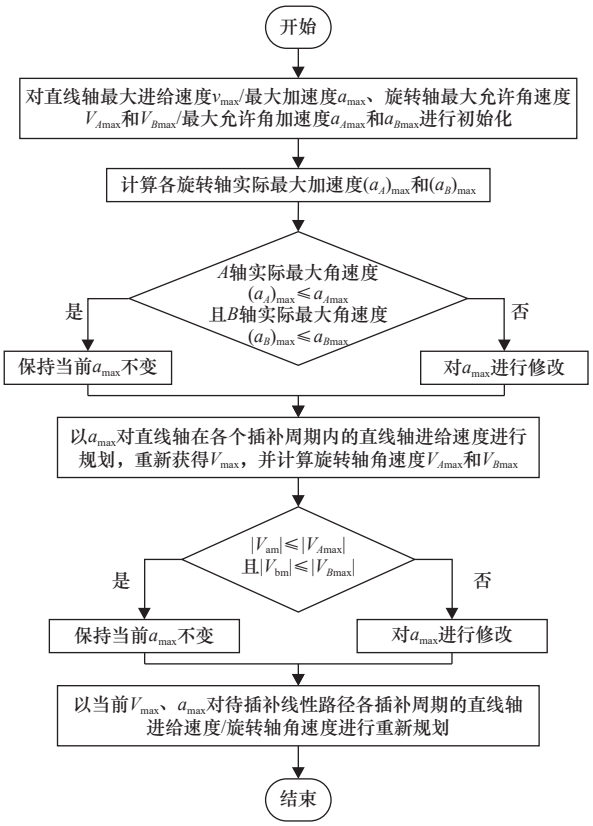


图 9 技术路线

Fig. 9 Technology roadmap

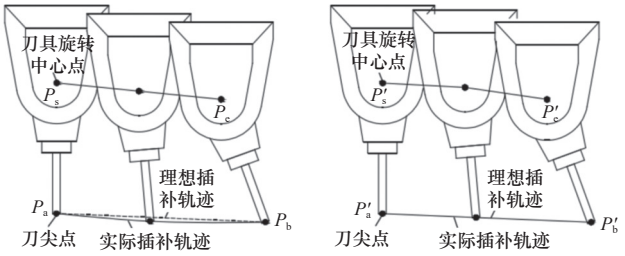
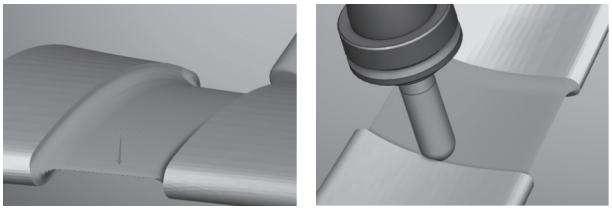


图 10 五轴 RTCP 插补算法

Fig. 10 Five-axis RTCP interpolation algorithm



（a）边界处理 （b）模拟加工

图 11 后置处理软件

Fig. 11 Post processing software



图 12 RTCP 精度检测

Fig. 12 RTCP accuracy detection

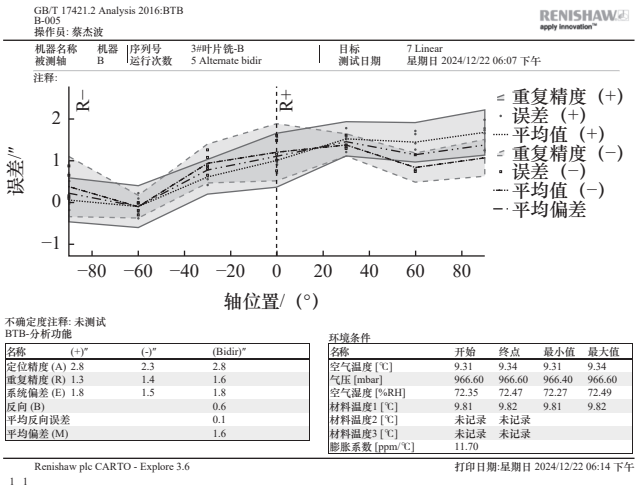


图 13 *B* 轴精度检测结果

Fig. 13 *B*-axis accuracy detection results

以某航发叶片进行实际加工验证，如图 14 所示。叶片毛坯为方钢，在装夹后，经粗精加工工序后，采用海克斯康（Global S 07.10.07 Green）三坐标测量仪对其轮廓度进行检测，如图 15 所示，仪器参数见表 2。

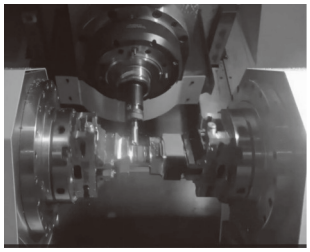


图 14 叶片加工

Fig. 14 Blade process

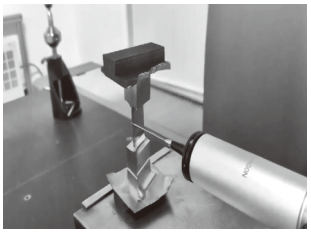


图 15 叶片精度检测

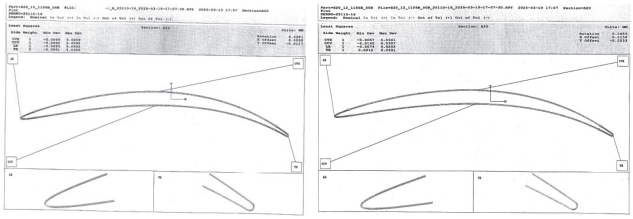
Fig. 15 Precision inspection of blades

表 2 海克斯康三坐标测量仪参数

Tab. 2 Parameters of Hexagon coordinate measuring machines (CMMs)

X/*Y*/*Z*轴行程/mm	被测工件最大重量/kg	长度测量最大允许误差 *MPE*（E0/E150）/μm	单探针形状最大允许误差 *MPE*（PFTU）/μm	重复精度最大允许限度 *MPL*（R0）/μm	扫描探测最大允许误差 *MPE*（THP）/MPT (τ)/（mm/s）	3D 运动速度/（mm/s）	3D 运动加速度/（mm/s^2）
700/1 000/4 660	900	1.6 + 2.8L/1 000	1.6	1.4	2.3 μm/457.3D 运动速度	516	2 598

选取 A20 与 A22 段各边检测结果如图 16 所示，其余各段精度均优于 A20 段，A20 段精度汇总见表 3，叶片型面轮廓精度为−0.023 3/+0.015 8 mm，达到国际同类产品领先水平。



(a) A22段 (b) A20段

图 16 轮廓精度检测结果

Fig. 16 Results of contour accuracy inspection

表 3 各边精度检测结果(A20 段)

Tab. 3 Accuracy detection results of each side (segment A20) mm

被测量边	最小偏差值	最大偏差值
CVX	−0.057	0.034 1
CCV	−0.014 2	0.030 7
LE	−0.007 4	0.025 5
TE	0.001 2	0.033 1

4 结语

(1)以航发叶片、盘类零部件加工为对象,设计了五轴联动高档数控装备结构,并对工件装夹装置及 *B* 轴和摆动电主轴铣头结构等关键部件进行了详细设计与阐述。

(2)自主开发了基于 CAD/CAM/CNC 一体化的复杂型面五轴联动编程及一体化的后置处理软件,利用五轴 RTCP 插补法对加工轨迹进行规划,以提升工件的加工精度及进排气边缘轮廓精度,经检测,RTCP 精度达到 0.01 mm。

(3)以某航发叶片粗精加工进行加工精度验证,结果表明,叶片精加工后的型面轮廓精度为 −0.023 3/+0.015 8 mm,达到同类产品领先水平。

参 考 文 献

[1]程义,尤超,樊玉辉,等. 激光冲击诱导加工硬化对叶片抗外物损伤的影响[J/OL]. 海军航空大学学报, 1-13[2025-05-18]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/37.1537.V.20250507.1112.004.html.

[2]吴中义,吕侃,马鑫楠,等. 小批量高精度叶片加工过程的质量异常控制与评估研究[J]. 中国机械, 2025(4): 65-68.

[3]田国富,韩明珠,赵桐. 航发压气机叶片的加工仿真分析[J]. 机床与液压, 2022, 50(4): 146-150.

[4]邵莉,王波. 叶片型面加工颤振控制研究[J]. 机械制造, 2021, 59(12): 38-40.

[5]刘旭. 航空发动机叶片加工中的时空骤变非线性刚度建模与动力学分析[D]. 沈阳: 东北大学, 2022.

[6]侯军明,王保升,吕东升. 薄壁叶片加工参数的多目标建模及优化[J]. 制造业自动化, 2024, 46(11): 109-116.

[7]江敏,董久虎,何美蝶,等. 汽轮机薄壁叶片加工变形预测及误差补偿[J]. 工具技术, 2022, 56(8): 147-152.

[8]刘飞. 薄壁叶片加工工艺参数优化及工艺知识库技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2021.

[9]虞奔,项四通,叶佩青. 考虑曲率与加工变形的薄壁叶片测点规划与补偿方法[J]. 机械设计与研究, 2024, 40(2): 126-131.

[10]刘志超. 复材叶片前缘钛合金加强边高效插铣加工工艺规划[D]. 大连: 大连理工大学, 2024.

[11]张豪. 航发叶片加工动态铣削力预测模型建模方法研究[D]. 重庆: 重庆理工大学, 2024.

[12]韩世凯. 航空发动机叶片加工变形及其控制研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2022.

[13]张申,梁嘉炜,吴动波,等. 航空发动机精锻叶片榫头加工夹具设计[J]. 中国机械工程, 2025, 36(4): 703-714.

[14]张得礼,秦峥,刘哲,等. 航空发动机复合材料叶片切削加工智能装夹系统[J]. 航空学报, 2023, 44(20): 292-300.

[15]冯华勇,杨林建,袁秀坤. 基于 RTCP 控制算法的叶片加工六轴砂带磨床优化设计[J]. 工具技术, 2024, 58(1): 101-105.

[16]蔡井洲. 发动机叶片加工过程检测方法研究[J]. 中国机械, 2023(26): 26-30.

[17]杨兴. 航空发动机叶片数控加工在机测量系统关键技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2022.

[18]吴国新,潘涛,刘秀丽,等. 基于数据驱动的叶片加工质量评估方法研究[J]. 制造技术与机床, 2021(12): 105-109.

[19]刘敏洋,肖佳佳,李莉,等. 基于 AR 技术的高档数控机床运维平台设计研究[J]. 制造技术与机床, 2024(10): 42-47.

第一作者:肖铁忠,男,1986 年生,硕士,讲师,研究方向为先进制造技术及装备。E-mail:593712861@qq.com

通信作者:袁秀坤,男,1970 年生,博士,副教授,研究方向为先进制造技术及装备。E-mail:914878892@qq.com

(编辑 李 静)

(收稿日期:2025−06−11)