

叶片柔性加工生产线中零件的自动找正方法

刘军伟¹，马维民²，石一琨²，陈玥³，李晶³

1. 中国航发西安动力控制科技有限公司 陕西西安 710077

2. 中航国际供应链科技有限公司 上海 200092

3. 北京航臻科技有限公司 北京 101304

摘要：提出并验证一种适用于叶片柔性生产线的零件自动找正方法，可以针对生产线内叶片安装过程的系统误差和随机误差等多种误差源有效地获取叶片在夹具中的实际安装位置和姿态。该方法有别于传统叶片类零件的单机找正模式，是基于叶片柔性自动化生产线，并综合利用零点定位、数字化检测、数控加工及信息化等技术，实现叶片毛坯在生产线中的准确、自动和高效定位。

关键词：叶片；柔性生产线；数控加工；自动找正



高级工程师 刘军伟

1 序言

叶片作为航空发动机、燃气轮机等透平系统的关键零件，其加工质量和效率直接影响整个系统的性能和制造成本^[1]。随着信息技术、数字化技术和自动化技术等先进制造技术的发展与深度融合，航空叶片制造正朝着柔性、自动、精密及高效的方向发展^[2, 3]。国内航空制造企业已建设了越来越多的叶片柔性加工生产线。

本文应用的叶片柔性加工生产线由2台五轴联动叶片加工中心、1台接触式三坐标测量机、3套零点定位底座、32套零点定位托盘、1套机器人自动化物流系统、2个装载站、料库以及生产线管控软件等组

成，用于8种叶片的生产线内全自动加工。所有叶片都使用模锻毛坯，其榫根在进生产线前已经加工完成，生产线内进行叶身、进排气边、缘板和叶尖的粗、精加工和检测评价。8种叶片的夹具本体可以共用，区别在于卡爪的不同，8种叶片使用8种不同的卡爪。为实现8h无人值守，生产线内每种卡爪配备32套，共256套卡爪。

叶片在加工中心内或三坐标上的安装状态如图1所示。零点定位底座固定在加工中心工作台和三坐标台面上。由机器人在线内运输的零点定位托盘与底座精密夹紧^[4]。托盘上面固定着叶片专用夹具本体，夹具本体上可以更换不同的卡爪，卡爪上则安

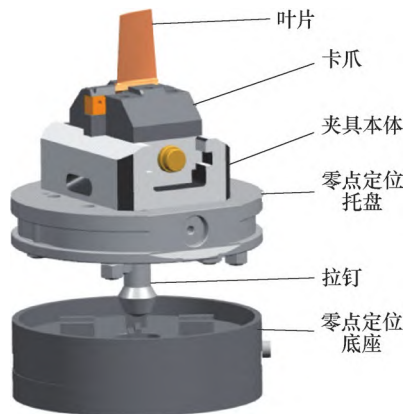


图1 叶片安装示意

装对应型号的叶片。

操作人员需要在装载站装卸叶片，即将叶片毛坯安装到榫根卡爪中，或将下线的叶片从卡爪中取走。由于托盘数量少于卡爪数量，所以某段时间集中加工某种叶片时，操作人员可能需要在装载站拆装卡爪，准备夹具的工作在这个时间段内只需要做一次。

生产线内的加工中心为全新设备，精度和性能都很稳定。叶片合格与否，直接取决于叶片在夹具上或者说叶片在加工中心内的实际位置和姿态。

2 叶片安装误差

生产线内叶片的安装过程含有多个可能引起叶片实际位置和姿态发生变化的误差源，既有系统性误差源，也有随机性误差源。

系统性误差源包括零点定位底座和托盘夹紧的重复度、卡爪安装在夹具本体上的安装精度、夹具本体的重复定位精度、卡爪本身的制造精度及叶片榫根定位面制造精度等。需要说明的是，一味提高夹具本身的制造精度并不现实，因为多套夹具之间要保持一致性，会大幅增加夹具的制造成本。本文应用的叶片柔性生产线中的夹具采用标准的精度等级制造。

随机性误差源包括操作人员安装叶片的误差。这8种叶片的榫根上可供夹紧的面非常小，容易出现夹不正的现象。即便是操作人员在安装过程中非常小心地操作，也可能在榫根处出现微小的偏差，从而在叶尖处出现较大的偏差。

最终安装误差是上述误差源的叠加。在生产线调试过程中，专门进行了安装误差测试。图2为叶片常见坐标系定义方式。XYZO为叶片编程坐标系，X'Y'Z'O'为叶片安装完的实际坐标系。两个坐标系之间的位置差异体现为原点O和O'在X、Y、Z3个轴向

的偏差，用 Δx 、 Δy 、 Δz 表示（受幅面限制，图2中未标出，而是将O和O'重合）。两个坐标系之间的姿态差异体现在毛坯在XOY平面内的旋转、在YOZ平面内的俯仰和XOZ平面内的侧摆，分别用X'在XOY平面的投影与X轴的夹角 α 、Y'在YOZ平面内的投影与Y轴的夹角 β 和Z'轴在XOZ平面内的投影与Z轴夹角 γ 表示。

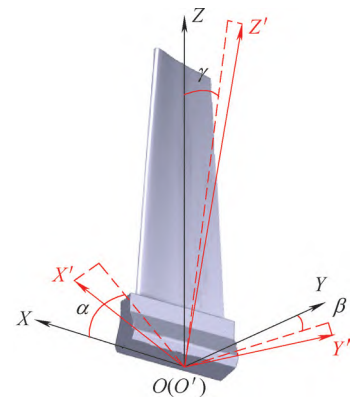


图2 叶片坐标系定义

表1是同一个操作人员对同一个毛坯在同一套卡爪上重复5次安装，在三坐标测量机上的测量结果（坐标系建立方式见后）。从表1中可以看出，5次安装的实际坐标原点有一定偏差，偏差范围约20 μm ，且Y方向偏正方向多一些。这主要是由于夹具定位基准点存在制造误差。另外毛坯俯仰角度相比于旋转和侧摆更显著，其主要原因是榫根夹紧面的宽度很窄（榫根Y向宽度），夹紧过程中叶片更容易产生俯仰。

表2为同一操作人员对同一个毛坯在5套不同的卡爪上各安装一次后，在三坐标测量机上的测量结果。由于卡爪的制造误差、卡爪与本体的安装重复性等系统性误差，原点的偏移和坐标系方向偏转误差范围均有不同程度增大，使叶片在夹具上的位置

表1 同一毛坯在同一卡爪上5次安装

序号	$\Delta x/\text{mm}$	$\Delta y/\text{mm}$	$\Delta z/\text{mm}$	α	β	γ
1	0.0211	0.039	0.013	00° 00' 55"	-00° 05' 26"	-00° 00' 01"
2	0.0198	0.040	0.011	00° 01' 00"	-00° 05' 02"	-00° 00' 08"
3	0.0081	0.042	0.017	00° 01' 06"	-00° 05' 17"	-00° 00' 12"
4	0.001	0.025	0.034	00° 01' 09"	-00° 04' 29"	-00° 00' 06"
5	0.0077	0.035	0.032	00° 01' 01"	-00° 05' 13"	-00° 00' 09"

表2 同一毛坯在5个不同卡爪上安装

序号	$\Delta x/\text{mm}$	$\Delta y/\text{mm}$	$\Delta z/\text{mm}$	α	β	γ
1	0.025	0.035	0.022	$00^{\circ} 01' 02''$	$-00^{\circ} 07' 31''$	$-00^{\circ} 00' 19''$
2	0.009	0.032	0.003	$00^{\circ} 01' 04''$	$-00^{\circ} 06' 48''$	$-00^{\circ} 00' 15''$
3	0.002	0.008	0.019	$00^{\circ} 00' 55''$	$-00^{\circ} 03' 58''$	$-00^{\circ} 00' 04''$
4	-0.002	0.024	0.025	$00^{\circ} 01' 05''$	$-00^{\circ} 07' 02''$	$-00^{\circ} 00' 21''$
5	-0.01	0.042	0.067	$00^{\circ} 00' 44''$	$-00^{\circ} 04' 58''$	$-00^{\circ} 00' 14''$

和姿态产生更多不确定性。

3 叶片安装误差导致的加工超差

除安装误差外，叶片的实际加工精度还受加工中心、刀具及加工变形等多方面因素的影响。生产线的加工中心为全新设备，精度和性能稳定；刀具同样为全新刀具，尚未出现明显磨损；通过在加工中心内精确打顶尖孔，叶片变形得到有效控制。本文重点关注叶片安装误差。

以表2中的第5次叶片安装为例，此时叶片毛坯在 YOZ 平面内存在 $\beta = -4'58'' = -0.083^{\circ}$ 的俯仰角。该角度使得距离榫根最远的I截面（截面高度105 mm，见图3）理论上将沿 Y 向偏离 $d_y = h \sin \beta = 105 \times \sin(-0.083^{\circ}) = -0.152 \text{ mm}$ 。

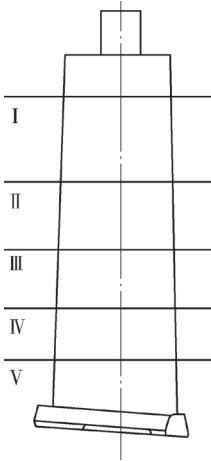


图3 叶片各截面示意

加工中心在此安装状态下直接加工该毛坯，加工完后在三坐标测量机测量各截面实际结果见表3。从V截面到I截面，随着其高度增加，每个截面上拟合得出的积叠点 Y 方向偏差 Y_0 也越来越大^[5]。实测I截面 Y 向偏离0.1838 mm，与理论计算相近。最终，该叶片因位置尺寸超差而报废。

表3 安装毛坯后直接加工叶身的测量结果

截面号	V	IV	III	II	I
截面高度/mm	22	55	72	88	105
X_0/mm	0.0076	0.0360	0.0469	0.0390	0.0540
Y_0/mm	0.0436	0.0993	0.1198	0.1404	0.1838

4 传统找正方式

传统单机加工叶片时，通常采用专用的校准工具^[6]，如榫根夹具验棒来校准夹具，从而消除夹具制造误差带来的定位影响。操作人员需要反复调整叶片夹具在加工中心的安装位置，使得验棒中心线最终与加工中心轴线重合，最终得到较为精准的夹具位置。后续在这台加工中心上始终使用此夹具加工该种叶片。

然而该方法调整过程过于繁琐，受操作人员的技术水平影响较大。而且生产线内有多套夹具、多台加工中心，叶片可能在任意一套夹具和任意一台加工中心上加工。传统找正方法无法适用柔性生产线模式下的叶片生产。另外，该方法只能消除夹具制造误差，无法消除上述提到的其他系统性误差和随机性误差。

5 适用于柔性生产线的自动找正方式

为了使叶片柔性生产线实现自动、柔性、高效和无人值守加工，同时确保不同毛坯在不同夹具、不同加工中心条件下的合格率，采用一种创新的自动找正方式，有效解决叶片安装误差带来的废件问题。

叶片在生产线中的加工流程如图4所示。

操作人员在装载站将叶片毛坯安装至夹具卡爪中；机器人自动将毛坯、夹具和零点定位托盘一同送往三坐标测量机的零点底座上；测量机根据叶片

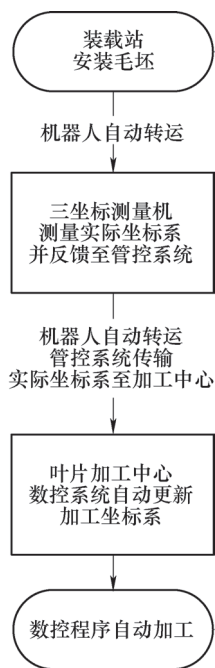


图4 叶片在柔性生产线中的加工流程

种类使用预先编制好的测量程序，在榫根上取点构建出毛坯相对于零点定位底座的实际坐标系 $(\Delta x, \Delta y, \Delta z, \alpha, \beta, \gamma)$ ，坐标系建立如图5所示。过程用时约1min。测量机将当前毛坯的实际坐标系发送至管控软件绑定并保存。

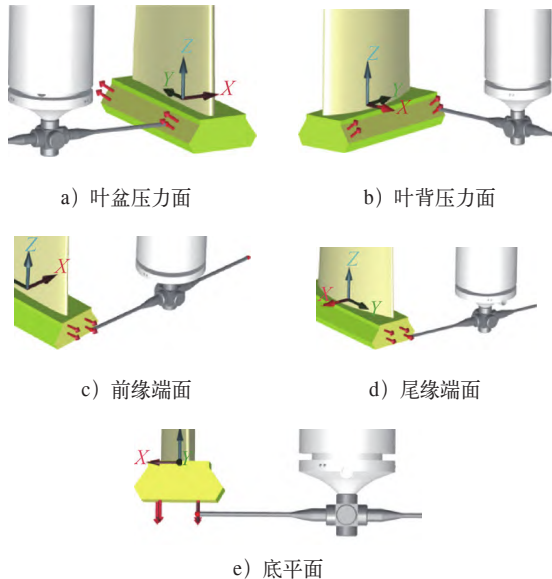


图5 毛坯加工坐标系建立

测量完成后，机器人自动将毛坯、夹具和零点定位托盘转运至叶片加工中心，并安装到零点定位底座上。管控软件自动将与该毛坯绑定的实际坐标系发送至加工中心的数控系统变量中。

本文使用意大利法拉利公司叶片加工中心，加工中心结构如图6所示。加工中心A、B轴为旋转轴。加工时使叶片Z轴与A轴重合，绕A轴旋转加工叶身，B轴主要用于控制切削时的刀具矢量方向^[7-9]。在加工中心数控系统内，预先存有零点定位底座在加工中心坐标系下的机械坐标值。数控系统为西门子SINUMERIK 840D SL。

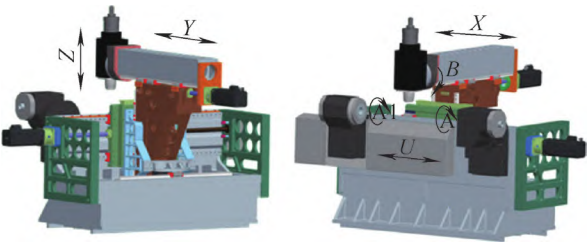


图6 法拉利叶片加工中心结构示意图

在数控程序中通过命令实现毛坯加工坐标系与编程坐标系完全重合。首先将毛坯实际坐标系的 $(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$ 值赋给数控系统G54的XYZ偏置，使毛坯实际坐标系原点与编程坐标系原点重合。再将毛坯实际坐标系的旋转角 α 赋给G54的A偏置，实现毛坯实际坐标系与编程坐标系在A方向上重合。

由于加工中心没有与毛坯实际坐标系的俯仰角 β 和侧摆角 γ 直接对应的坐标轴，使用840D的ROT()指令^[10, 11]，在上述坐标系的基础上，根据实际的俯仰角 β 和侧摆角 γ 值绕坐标系原点进行坐标系的变换，合成新的加工坐标系框架。

按照此方法，最终使每件毛坯的实际坐标系与编程坐标系完全重合，且找正过程自动完成。实际加工进行验证，成品叶片积叠轴测量结果见表4。

表4 调整后叶身测量结果

截面号	V	IV	III	II	I
截面高度/mm	22	55	72	88	105
X_0/mm	-0.0152	-0.0075	-0.0196	-0.0148	-0.0172
Y_0/mm	0.0095	0.0123	0.0143	0.0138	0.0116

表3是安装毛坯后未调整坐标系直接加工叶身的结果，对比表4可以看出，采用自动找正后，叶片积叠轴的倾斜程度明显改善，且各截面积叠点基本与叶片设计基准Z轴重合，偏移量很小，整个叶身的方位得到了有效的控制。在后续的批量生产中，使用不同编号的卡爪加工叶片，所有成品的叶身方位均得到了很好的控制，相关尺寸全部合格。

6 结束语

叶片柔性生产线内通常包含多台设备、多套夹具，如何在自动化的生产模式下确保零件的合格率是工艺人员要重点考虑的内容。本文介绍的自动找正方法，能够自动获得每件毛坯的实际坐标系，不受不同夹具个体、毛坯个体的系统性差异，以及操作人员安装时的随机性差异的影响，无需更改数控程序，利用零点、测量、数控和自动化系统配合，有效地控制成品叶片的位置度误差。能够显著提升自动化加工生产质量和效率，非常适用于航空叶片的柔性自动化生产。

参考文献：

- [1] 刘艳. 叶片制造技术[M]. 北京：科学出版社，2002.
- [2] XIONG Z H, WANG M Y, LI Z X. A computer-aided probing strategy for workpiece localization[C]. IEEE International Conference on Robotics & Automation, 2003: 3941-3946.
- [3] LI Y D, GU P H. Free-form surface inspection techniques state of the art review[J]. Computer-Aided Design, 2004, 36 (13) : 1395-1417.
- [4] 彭会文, 张娟, 赵西松, 等. 零点快换基准系统在

航空发动机零件加工中的应用[J]. 航空制造技术, 2014 (S1) : 78-81, 86.

- [5] 江和甫, 沈自荣, 韩红宝, 等. 叶片叶型的标注、公差与叶身表面粗糙度: HB 5647—1998[S]. 北京：中国航空工业总公司，1999.
- [6] 罗明, 张定华, 张莹, 等. 自适应加工技术及应用[M]. 武汉：武汉理工大学出版社，2020.
- [7] 朱燊, 宁涛, 陈志同. 圆柱坐标数控机床加工整体叶片的运动学分析[J]. 航空学报, 2014, 35 (8) : 2364-2374.
- [8] 王晶, 张定华, 罗明, 等. 复杂曲面零件五轴加工刀轴整体优化方法[J]. 航空学报, 2013, 34 (6) : 1452-1462.
- [9] 石一琨, 朱燊, 陈志同. 基于4+2轴机床的叶轮加工技术[J]. 北京航空航天大学学报, 2017, 43 (10) : 2127-2134.
- [10] SIEMENS. SINUMERIK 840D/810D/FM-NC编程指南 高级篇[Z]. 2001.
- [11] 徐斌, 倪红兵. 数控铣削编程中旋转指令应用研究[J]. 机械工程师, 2009 (9) : 95-96.

MW 20240501

《金属加工（冷加工）》“工匠故事”栏目征稿

为传承老一辈工匠的优良传统，彰显新时代工匠的拼搏精神，《金属加工（冷加工）》开设“工匠故事”栏目，文章内容以倡导和弘扬“工匠精神”为主题，以解决生产技术难题为主线，言之有物、物为所用，用多种形式来呈现和讲述创新技艺、传承工匠精神的匠心故事。

(1) 报道对象 在生产实践中作出突出贡献的高级技师、技能大师、劳模、技术大咖等均可为主要报道对象，可以写自己或写别人，以解决技术难题为主线。

(2) 主要内容 以融入技术的多种形式，记录那些具有倡导和弘扬“工匠精神”的行业人物及故事，突出言之有物、物为所用，以利传承与激励。

(3) 栏目格式 具体栏目格式请扫描二维码查看。



(4) 投稿网址 <http://tougao.mw1950.cn>

(5) 栏目联系 曹胜玉 13683585307 (同微信)