

文章编号:1674-8190(2020)05-651-06

# 飞机机翼翼梁类零件变形控制方法研究

王聪<sup>1</sup>, 陈波<sup>2</sup>

(1. 航空工业西安飞机工业(集团)有限责任公司 数控加工厂, 西安 710089)

(2. 航空工业西安飞机工业(集团)有限责任公司 技改基建部, 西安 710089)

**摘要:** 翼梁类零件作为机翼装配的定位基准零件, 如何有效减小其在加工中的变形, 提高加工精度是一项重要工作。提出一种针对翼梁零件在加工过程中出现的平面度翘曲变形现象的控制方法, 根据飞机机翼翼梁类零件的工艺特点, 对生产现场零件的实际变形量进行统计, 分析翼梁类零件变形趋势、变形量及主要影响因素; 采用改进加工方案, 控制加工变形等方法减少梁类零件变形。结果表明: 本文所提方法能够有效提升零件在加工过程中的平面度值, 使梁类零件的变形成得到明显改善。

**关键词:** 翼梁; 翘曲变形; 数控加工变形控制; 加工精度

中图分类号: V261.2

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2020.05.006

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Research on Deformation Control Method of Aircraft Wing Beam Parts

WANG Cong<sup>1</sup>, CHEN Bo<sup>2</sup>

(1. NC Maching Factory, AVIC Xi'an Aircraft Industry (Group) Co., Ltd., Xi'an 710089, China)

(2. Technical Innovation and Infrastructure Department, AVIC Xi'an Aircraft Industry (Group) Co., Ltd., Xi'an 710089, China)

**Abstract:** As a positioning reference part for wing assembly, how to effectively reduce the deformation of wing parts and improve the machining accuracy is an important task. A control method for the flatness warping deformation of wing beam parts during processing is proposed. Based on the technological characteristics of aircraft wing beam parts, the actual deformation data of the parts on the production site is computed, and the deformation trend, deformation amount and main influencing factors of beam parts are analyzed. The improved processing plan and processing deformation control method can reduce the deformation of beam parts. The results show that the flatness value of the parts in the process of machining can be effectively improved, and the deformation of beam parts can be significantly improved by the proposed method.

**Key words:** wing beam; warping deformation; CNC machining deformation control; machining accuracy

## 0 引言

飞机零件的主要承力部件可以分为梁、框、肋、壁板、长桁、接头等类型, 随着国内航空产业的蓬勃发展, 飞机零件的发展趋势逐渐向高精度、大尺寸、

复杂化发展。多类型飞机结构件尺寸持续加大, 为了保证大尺寸结构件满足高精度装配的要求, 对零件的制造提出了更高的要求, 不仅要求其具有良好的刚性, 同时还要满足轻量化的要求。但是, 很多飞机零部件具有截面积小而整体轮廓尺寸过大的

收稿日期: 2019-12-02; 修回日期: 2019-12-30

通信作者: 王聪, 292617303@qq.com

引用格式: 王聪, 陈波. 飞机机翼翼梁类零件变形控制方法研究[J]. 航空工程进展, 2020, 11(5): 651-656.

WANG Cong, CHEN Bo. Research on deformation control method of aircraft wing beam parts[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2020, 11(5): 651-656. (in Chinese)

特点,导致其在加工过程中,随着零件刚性的降低,极易产生振动,影响零件的加工精度与表面质量,因此需要采用更高的标准、更好的工艺<sup>[1]</sup>。飞机零件在实际加工过程中需要进行相应的加工变形控制,例如提高颤振稳定性,进行误差补偿等<sup>[2-5]</sup>。由于加工效率高,加工的零件变形小,表面精度高,生产成本低等优势,高速切削加工成为目前满足飞机零部件加工精度需求的主要加工方式<sup>[6-10]</sup>。此外,零件的加工精度还受到刀具长度、工件形状及装夹方式等因素的影响,需要在加工前进行全面考虑<sup>[11-13]</sup>。

梁类零件以铝合金材料为主,其具体加工步骤大致分为粗铣,半精铣与精铣等过程。作为机翼装配定位的基准零件,梁类零件的精度会对机翼的整体装配产生很大影响,如何减少梁类零件在加工过程中的变形,提高加工零件制造精度就显得尤为重要。梁类零件从结构特点上可分为双面梁和单面梁两种,双面梁的加工虽然更复杂,但是由于零件材料从两面去除,导致零件的槽腔深度浅且两面的材料去除量几乎一致,零件的变形比较容易控制;反而是单面梁,零件材料从一侧去除,材料去除量不均匀,且零件槽腔较深,加工过程中变形很大,难以控制。通过零件实际加工情况的经验分析,单面梁类零件加工材料去除量较大(最高达 94% 以上),加工周期长,该类零件的翘曲及扭曲变形问题难以被克服,关键工艺流程的控制及理论修正补偿成了零件质量的技术攻关难点。张元军等<sup>[14]</sup>通过采用逐层加工,非对称加工以及分散加工三种加工方式来达到最大限度减小变形的效果;针对细长梁类零件,安卫星<sup>[15]</sup>在原有的加工方案基础上进行工艺方法与编程方式的优化,以达到有效控制长梁类零件变形的目的;谷妍<sup>[16]</sup>给出一种高速铣削的有效加工方案,通过实际加工验证了方案的有效性;黄乐明<sup>[17]</sup>提出一种针对短梁类零件的工艺优化措施,推进相应零件生产工艺与产品性能的改善;卞伟宇等<sup>[18]</sup>针对典型的钛合金梁类零件,从工件的定位装夹方式入手,结合新的工序安排,完成具体的工艺方案改进。

有限元软件的发展也为控制零件加工变形开创了新的思路,通过采用有限元方法对不同工艺参数的加工过程进行仿真,或者根据得到的表面残余应力来预测变形,进而完成加工过程的变形

补偿<sup>[19-23]</sup>。

上述的多种变形控制方法都是通过优化工艺方案、参数、工装定位等减小零件加工中产生的变形,但只要存在机械加工,零件的变形必然存在。

本文结合现有零件平面度控制方法在实际生产过程中的具体数据,提出一种梁类零件变形控制方法,优化梁基准面修正时的余量分布,根据余量创新基准面过修正的方法(通过人为方式预先引入反方向的变形,抵消零件加工中产生的变形),旨在改善数控加工阶段零件的平面度状态,实现工艺改进与变形控制。

## 1 典型零件介绍

某机型外翼内后梁及单面梁典型结构如图 1~图 2 所示,毛料尺寸 3 620 mm × 1 580 mm × 155 mm,共两件,材料为 7050-T7451,零件净质量 114 kg,毛料质量 1 241 kg,零件为单面梁结构形式,底面为梁基准面,另一面为带肋位筋,加强筋槽腔结构,可以在保证零件强度与寿命的强度下零件更加的轻量化<sup>[24-26]</sup>。由于零件的结构特点,材料的去除 95% 发生在槽腔面,从材料变形角度考虑,为降低因材料去除正反面不平衡造成的变形,将毛料余量尽可能地分配在无筋的基准面一侧去除。即便如此,零件的加工变形依然存在,需要采用其他加工方法来减小零件变形。

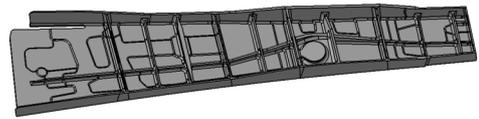


图 1 某机型外翼内后梁

Fig. 1 External wing internal rear beam

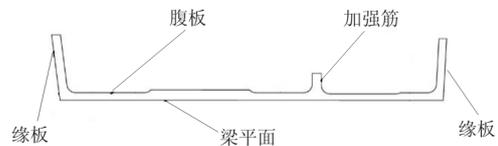


图 2 单面梁典型结构

Fig. 2 Typical single-sided beam structure

梁类零件的加工通常将粗加工和精加工分开,粗加工机床需用机床平台较为开敞的三坐标高速铣床加工,三坐标的主轴刚性相对加稳定,高速铣削的加工方法有利于降低材料的加工残余应力,减

小变形;精加工机床通常选用五坐标高速龙门铣设备,梁的外形为理论外形面,部分筋位为肋的定位面,带角度,需要五坐标机床才能完成加工,同时高速铣能够降低零件的残余应力,有利于零件变形的控制。

通过对批产零件的数据分析,零件主要的变形反映在马刀弯、长度延展、平面度翘曲方面。本文主要阐述平面度翘曲变形的控制方法。通过对数十架零件翘曲变形的测量,记录及分析总结,零件的变形趋势如图 3 所示。

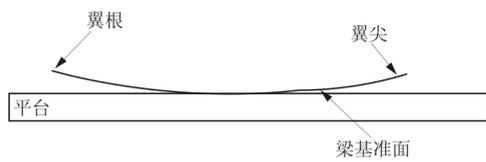


图 3 梁类零件翘曲变形示意图

Fig. 3 Warping deformation diagram of beam parts

对于此类零件的加工,零件的翘曲变形主要受零件两面材料去除量不均匀、设备精度、环境温度、加工流程、材料应力释放等方面的影响。

## 2 典型零件加工流程及变形控制方法

梁零件的加工流程相对简单,一般根据梁基准面的结构来确定精加工的方案。以某型机内后梁为例,因基准面有一处凹槽,故精加工采取 2 工位加工,此零件的加工流程分为 5 个工位进行,分别为粗加工 2 个工位,修基准 1 个工位,精加工 2 个工位。零件的加工流程如图 4 所示。

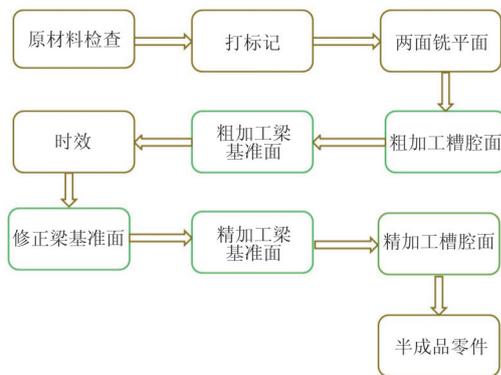


图 4 梁类零件的典型加工流程

Fig. 4 Typical processing flow of beam parts

### 2.1 加工过程检测方法

为了更准确的记录加工过程中零件的变形情况,对零件上的 16 处位置(如图 5 所示)的翘曲变形情况进行记录,确定零件的变形趋势。精加工前的检测方法为将零件自由放置在机床平台上,用百分表检查零件上表面,按图 5 所示位置记录变形量,精加工后的检测方法为将零件基准面贴合平台,用塞尺检查各检测位置间隙,并进行记录。

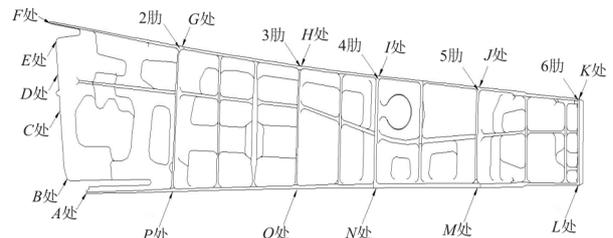


图 5 平面度检测位置图

Fig. 5 Flatness detection location map

通过数据的积累,长度为 3 500 mm,厚度为 150 mm 尺寸级别的梁类零件(粗加工余量设置如表 1 所示),粗加工过程中,零件的翘曲量为 2.5~4 mm,精加工过程中零件的翘曲量为 1.5~2 mm,加工流程中的修正梁基准面是决定整个零件加工完成后翘曲变形量的最重要环节,此环节控制的好坏直接影响着零件粗加工变形是否直接叠加给精加工,直接决定零件最终的变形量。

表 1 典型结构粗加工余量设置

Table 1 Typical structure roughing allowance setting

零件典型结构	理论尺寸范围/mm	余量设置
零件缘板	6.5~23	内外形各留 3 mm
零件腹板	6.9~31	腹板底面 2 mm, 腹板顶面 3 mm
零件筋厚	7~20	两侧各 3 mm
零件筋高	89~143	筋顶 3 mm, 筋底 2 mm
零件长度	3 500	两端头各留 3 mm
零件宽度	770	两侧各留 3 mm

### 2.2 加工过程控制方法

#### (1)粗加工余量设置及工艺设计

粗加工的目标是快速地去掉余量,提高工作效

率。该零件除梁基准面留 2 mm 余量外,其余部位余量全部按 3 mm 设置。加工机床采用三坐标龙门铣床,原材料采用套料形式,一次加工两件产品。加工刀具选取大直径刀具,例如  $\phi 40$  mm,长短刀分开,短刀加工槽腔上半部分,采取层优先的方式进行,在保证高效加工的同时,层优先有利于减小零件变形;槽腔的下半部分,采用长刀进行,依然采用层优先方式加工,加工效率按上半部分适当降低。长短刀及层优先的加工方法使得零件的毛料去除在各区域内均匀进行,有利于零件材料内形力平衡,不易造成材料内应力的不规则变化,有利于变形的控制。

### (2) 精加工前修整基准

粗加工完成后,自然时效 48 h,然后开始进行修正零件基准面,如图 6 所示。基准面的修正量必须要大于零件粗加工的变形量,即必须超过最少修正面,但是不能超过零件正反两面的精加工余量之和,即不能超过最大修正面。最少修正面可以彻底消除零件粗加工的变形,使得零件最终的变形只受精加工变形的影响,与粗加工变形无关。最大修正面,可以保证修正完成后,槽腔面的余量最小,精加工变形最小,理论上可以满足零件的加工要求,但是为了降低零件的质量风险,保证零件能够正常加工完成,修正时,不建议按最大修正面进行加工,最少给槽腔面留 0.5 mm 加工余量。

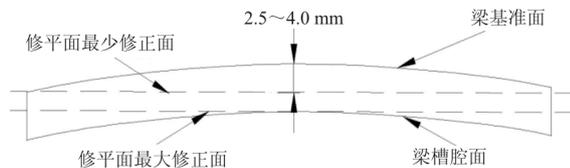


图 6 修正基准示意图

Fig. 6 Revision datum diagram

上述修正方法只用于零件粗加工变形的消除,不能消除零件精加工的变形,即使精加工采用高速铣设备等一系列较小变形的控制手段,变形依然存在,无法在加工过程中消除。对于零件平面度要求严格的零件,可采用基准过修正方法,该方法需要大量的精加工变形数据积累,在修正基准时,人为进行过修正,过修正量必须参考同类零件精加工过程的变形量数据积累,如图 7 所示。该方法有待进

一步试验验证。

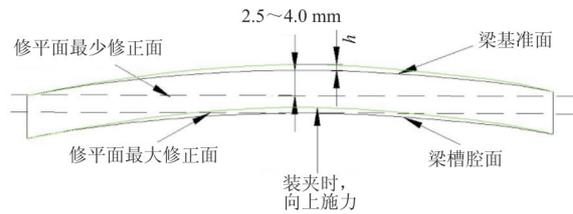


图 7 基准过修正示意图

Fig. 7 Datum overcorrection diagram

基准过修正原理为:通过对零件精加工变形量的积累和分析,确定该零件精加工的平均变形量,在精加工前修正基准时,将零件进行装夹(人为向上施力,增加零件变形量),然后进行修正,如图 7 所示。修正完成后,零件在自由状态下应为两头高中间低的凹曲面状态,与精加工变形状态及趋势相反。精加工过程中,过修正量  $h$  与槽腔面的加工变形相抵消(部分抵消),从而减小零件最终变形,改善零件的平面度状态,在此过程中,需要保证零件的粗加工变形量与过修正量之和不大于零件正反面的余量之和。

### (3) 精加工工艺设计

梁基准面加工完成后,零件最终的变形量基本确定,槽腔面的精加工方法只能很小程度改善零件的变形状态,但是依旧需要研究和总结,掌握其变形规律,在加工过程中逐渐克服。

精加工的加工流程一般为:预精铣腹板—精铣腹板—精铣筋高缘板高—精铣缘板厚—精铣筋厚—卸外形。整个过程中的重点工作是确定最优的加工刀具和加工参数方案,在发挥机床性能的同时,提高零件加工效率。细节化编程方面,同一槽腔的上中部和根部依据加工余量的不同,采用不同的切深切宽和切削速度,提高零件加工效率和表面质量。

通过对上述变形控制方法的研究、试验,试验前对 10 件样本按图 5 的位置进行检测并记录,平面度值最大 3.35 mm,最小 2.5 mm。经过 11 件样本的加工试验,试验完成后记录零件的平面度值,最大为 1.6 mm,最小为 1.3 mm,试验前后各样本平面度值记录如表 2 所示。

表 2 试验前后平面度记录表  
Table 2 Planeness record before and after trial

记录阶段	样本号	实验值/mm															最大平面度值/mm	
		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O		P
试验前	样本 1	1.50	1.75	1.80	1.00	2.20	3.35	0.95	0.00	0.15	0.35	1.05	1.40	0.60	0.25	0.00	0.70	3.35
	样本 2	2.25	2.20	1.75	1.75	2.35	2.90	0.95	0.00	0.00	0.00	0.25	0.40	0.15	0.00	0.00	0.85	2.90
	样本 3	2.45	2.25	2.20	2.15	2.60	2.70	1.05	0.10	0.00	0.10	0.20	0.20	0.00	0.10	0.10	0.70	2.70
	样本 4	1.80	1.30	1.00	1.20	1.90	2.90	0.60	0.00	0.00	0.15	0.95	0.80	0.09	0.00	0.00	0.90	2.90
	样本 5	1.35	1.28	1.30	1.50	2.30	3.20	1.00	0.00	0.00	0.26	1.20	0.86	0.17	0.00	0.00	0.85	3.20
	样本 6	1.80	1.50	1.30	1.80	2.30	3.15	0.75	0.00	0.00	0.00	0.60	0.50	0.15	0.00	0.00	1.00	3.15
	样本 7	0.10	0.10	0.10	1.20	1.50	2.60	0.80	0.10	0.05	0.10	0.15	0.10	0.10	0.00	0.05	0.10	2.60
	样本 8	0.10	0.10	0.50	0.75	1.50	2.50	0.75	0.00	0.00	0.15	0.20	0.20	0.10	0.00	0.00	0.05	2.50
	样本 9	2.45	2.25	2.20	2.15	2.60	2.70	1.05	0.10	0.00	0.10	0.20	0.20	0.00	0.10	0.10	0.70	2.70
	样本 10	3.00	2.80	2.50	2.50	2.40	2.70	1.50	1.00	0.05	0.20	0.85	1.00	0.80	0.00	0.05	1.80	3.00
试验后	样本 1	1.00	0.80	0.80	0.90	1.20	1.30	0.40	0.00	0.10	0.40	0.60	0.60	0.40	0.10	0.00	0.50	1.30
	样本 2	1.20	0.50	0.40	0.40	0.50	1.30	0.03	0.00	0.00	0.20	0.50	0.50	0.20	0.00	0.00	0.30	1.30
	样本 3	1.20	1.00	0.90	0.80	0.80	1.30	0.20	0.10	0.00	0.20	0.80	0.70	0.30	0.00	0.10	0.25	1.30
	样本 4	1.10	1.00	0.90	0.90	1.00	1.30	0.20	0.10	0.00	0.20	0.80	0.70	0.30	0.00	0.10	0.25	1.30
	样本 5	0.80	0.80	0.90	1.00	1.20	1.40	0.70	0.10	0.00	0.30	0.60	0.50	0.20	0.10	0.00	0.50	1.40
	样本 6	1.50	1.45	1.40	1.40	1.35	1.50	1.20	0.40	0.05	0.20	0.60	0.50	0.05	0.05	0.40	1.10	1.50
	样本 7	0.40	0.15	0.10	0.40	0.75	1.50	0.45	0.06	0.06	0.08	0.20	0.30	0.10	0.00	0.00	0.10	1.50
	样本 8	1.20	1.30	1.30	1.35	1.35	1.50	0.40	0.10	0.10	0.15	0.50	0.30	0.10	0.15	0.15	0.50	1.50
	样本 9	1.40	0.65	0.65	0.75	0.75	1.50	0.10	0.10	0.05	0.25	0.80	0.80	0.05	0.20	0.10	0.35	1.50
	样本 10	1.40	0.40	0.15	0.30	0.70	1.55	0.40	0.00	0.00	0.08	0.50	0.30	0.10	0.00	0.10	0.60	1.55
	样本 11	1.40	1.40	1.20	1.10	1.30	1.60	0.70	0.10	0.00	0.40	1.20	1.10	0.50	0.00	0.20	0.60	1.60

### 3 结 论

(1) 本文所提的研究方法使得零件在加工过程中的平面度得到明显改善,其平面度值由 2.5~3.35 mm 提升至当前的 1.5 mm,达到数控加工阶段稳定、可控的平面度控制量,同时又具备稳定生产的能力。

(2) 该方法不仅可用于梁类零件的变形改善,还可根据实际情况推广至壁板类、肋类零件,改善数控加工阶段零件的平面度,降低装配的难度及装配应力。

#### 参考文献

[1] 孙伟娜. 薄壁梁类零件加工方法研究[J]. 装备制造技术, 2014(5): 96-98.  
SUN Weina. Study of thin walled beam parts of the processing methods[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2014(5): 96-98. (in Chinese)

[2] ALBERTELLI P, BRAGHIERI L, TORTA M, et al. De-

velopment of a generalized chatter detection methodology for variable speed machining[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2019, 123: 26-42.

[3] WAN M, GAO T Q, FENG J, et al. On improving chatter stability of thin-wall milling by prestressing[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2019, 264: 32-44.

[4] REN Song, LONG Xinhua, MENG Guang. Dynamics and stability of milling thin walled pocket structure[J]. Journal of Sound and Vibration, 2018, 429: 325-347.

[5] WAN M, ZHANG W H, QIN G H, et al. Strategies for error prediction and error control in peripheral milling of thin-walled workpiece[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2008, 48(12/13): 1366-1374.

[6] 周文. 高速切削技术在薄壁零件加工中的应用研究[J]. 机床与液压, 2011, 39(12): 28-30,34.  
ZHOU Wen. Application research of high speed machining technology in machining thin-thickness boxed-shaped workpieces[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2011, 39(12): 28-30,34. (in Chinese)

[7] 单英吉, 孙树强, 杨巍. 高速切削技术在飞机结构件加工中的应用研究[J]. 中国新技术产品, 2016(8): 16-17.  
SHAN Yingji, SUN Shuqiang, YANG Wei. Application research of high speed machining technology in machining aircraft structure[J]. China New Technologies and New

- Products, 2016(8): 16-17. (in Chinese)
- [8] 李潇添. 飞机梁间肋类零件的高速加工和质量控制[J]. 山东工业技术, 2018(2): 6.  
LI Xiaotian. High speed machining and quality control of rib parts between aircraft beams[J]. Shandong Industrial Technology, 2018(2): 6. (in Chinese)
- [9] 王爱英. 机翼前缘薄壁件高速铣切[J]. 才智, 2013(19): 170.  
WANG Aiyong. High speed milling of thin-walled leading edge of wing[J]. Caizhi, 2013(19): 170. (in Chinese)
- [10] 汪通悦, 何宁, 李亮, 等. 薄壁零件铣削加工稳定性研究[J]. 机床与液压, 2009, 37(12): 15-17.  
WANG Tongyue, HE Ning, LI Liang, et al. Research on the stability of milling thin walled workpieces[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2009, 37(12): 15-17. (in Chinese)
- [11] 杨立新. 浅谈薄壁零件加工变形的原因及控制方案[J]. 黑龙江科技信息, 2016(22): 128.  
YANG Lixin. Talking about the causes and control schemes of processing deformation of thin-walled parts[J]. Heilongjiang Science and Technology Information, 2016(22): 128. (in Chinese)
- [12] 卢宏亮, 田欣华. 提高薄壁零件机械加工精度的工艺研究[J]. 技术与市场, 2019, 26(12): 151,153.  
LU Hongliang, TIAN Xinhua. Research on technology for improving machining precision of thin-walled parts [J]. Technology and Market, 2019, 26(12): 151,153. (in Chinese)
- [13] FEI J X, LIN B, XIAO J L, et al. Investigation of moving fixture on deformation suppression during milling process of thin-walled structures [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2018, 32: 403-411.
- [14] 张元军, 王希光, 曾海红, 等. 梁类零件数控加工变形工艺的研究[J]. 林业机械与木工设备, 2007(5): 52-53.  
ZHANG Yuanjun, WANG Xiguang, ZENG Haihong, et al. Research on CNC machining deformation process of beam parts [J]. Forestry Machinery & Woodworking Equipment, 2007(5): 52-53. (in Chinese)
- [15] 安卫星. 长梁类零件加工中变形的控制[J]. 装备制造技术, 2012(4): 140-142.  
AN Weixing. The control on the deformation of leung parts processing [J]. Equipment Manufacturing Technology, 2012(4): 140-142. (in Chinese)
- [16] 谷妍. 细长梁类零件的加工技术探究[J]. 装备制造技术, 2014(6): 102-103,106.  
GU Yan. Study on the machining technology of lathy beam [J]. Equipment Manufacturing Technology, 2014(6): 102-103,106. (in Chinese)
- [17] 黄乐明. 短梁类零件关键工艺优化措施[J]. 中国新技术新产品, 2018(10): 79-80.  
HUANG Leming. Key process optimization measures for short beam parts[J]. China New Technologies and New Products, 2018(10): 79-80. (in Chinese)
- [18] 卞伟宇, 王巍. 典型钛合金梁零件加工工艺改进[J]. 工具技术, 2019, 53(4): 124-125.  
BIAN Weiyu, WANG Wei. Improvement of processing technology for typical titanium alloy beam parts[J]. Tool Engineering, 2019, 53(4): 124-125. (in Chinese)
- [19] DONG H Y, KE Y L. Study on machining deformation of aircraft monolithic component by FEM and experiment[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2006, 19(3): 247-254.
- [20] 王继群. 薄壁件铣削加工变形有限元分析研究[J]. 科技视界, 2019(31): 83-84,70.  
WANG Jiqun. Finite element analysis of milling deformation of thin-walled parts[J]. Science & Technology Vision, 2019(31): 83-84,70. (in Chinese)
- [21] WANG Z J, CHEN W Y, ZHANG Y D, et al. Study on the machining distortion of thin-walled part caused by redistribution of residual stress[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2005, 18(2): 175-179.
- [22] 段振云, 戴现伟, 赵文辉, 等. 机翼颤振模型梁架加工变形研究[J]. 机械工程师, 2014(5): 113-115.  
DUAN Zhenyun, DAI Xianwei, ZHAO Wenhui, et al. Research on machining distortion of wing flutter model beams [J]. Mechanical Engineer, 2014(5): 113-115. (in Chinese)
- [23] 赵文辉, 段振云, 戴现伟. 基于变形预测的薄壁梁架加工工艺优化[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2015(4): 126-127,131.  
ZHAO Wenhui, DUAN Zhenyun, DAI Xianwei. Process optimization of thin-walled frame based on deformation calculation[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2015(4): 126-127,131. (in Chinese)
- [24] 叶景申, 张宝红, 于建民, 等. 筋板类构件成形技术研究进展[J]. 锻压装备与制造技术, 2015, 50(2): 7-10.  
YE Jingshen, ZHANG Baohong, YU Jianmin, et al. Research progress on forming technology of stiffened plate members[J]. China Metalforming Equipment & Manufacturing Technology, 2015, 50(2): 7-10. (in Chinese)
- [25] 董荣娟. 机翼梁结构中加筋对梁腹板屈曲的影响分析[J]. 大众科技, 2016, 18(4): 57-58.  
DONG Rongjuan. Spar structure reinforced influence on beam web buckling analysis[J]. Dazhong Keji, 2016, 18(4): 57-58. (in Chinese)
- [26] PENNER P E, WASTON A. Finite element buckling analysis of stiffened plates with filleted junctions [J]. Thin-Walled Structures, 2012, 59: 171-180.

#### 作者简介:

王 聪(1986—),男,学士,工程师。主要研究方向:切削加工。

陈 波(1977—),男,硕士,研究员级高级工程师。主要研究方向:数控加工及策划。

(编辑:丛艳娟)