

# 基于激光扫描的零件毛坯优化设计技术研究\*

王 巍,张莹莹,穆志国,高雪松

(沈阳航空航天大学航空航天工程学部,沈阳 110136)

**[摘要]** 机加零件在飞机零件上的占比逐步增多,传统的毛坯尺寸、形状推导方法往往存在部分区域加工余量不足或加工余量过大的情况,导致毛坯加工中出现残品与浪费现象。针对这种情况,首先提出一种基于激光扫描的零件毛坯优化技术,将激光扫描技术应用于零件毛坯的优化设计,通过将毛坯点云与零件 CAD 模型拟合求解出毛坯在各加工面上的加工余量,其次研究了该技术的关键点并结合某型飞机某零件完成零件毛坯的可加工性评价与优化设计,相关应用取得了良好的经济效益。

**关键词:** 激光扫描;零件毛坯;点云拼接;CAD 拟合;优化设计

## Research on Optimization Design Technology of Part Blank Based on Laser Scanning

WANG Wei, ZHANG Yingying, MU Zhiguo, GAO Xuesong

(Faculty of Aerospace Engineering, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China)

**[ABSTRACT]** Machine parts in aircraft parts on the proportion gradually increased. The machining allowance of the traditional derivation method of blank size, shape part is partly insufficient or too large, resulting in scrap and waste phenomenon of rough machining. In this case, a optimization technology of parts based on laser scanning optimization design of blank is proposed, through fitting the blank point cloud and CAD model, machining allowance on each processing surface of blank parts is solved. Then the key point of the technology is studied. The machinability evaluation and optimization design of blank parts is completed combined with the part of a certain type of aircraft, and related applications have achieved good economic benefits.

**Keywords:** Laser scanning; Part blank; Point cloud registration; CAD fitting; Optimal design

**DOI:**10.16080/j.issn1671-833x.2019.05.096

提高整体结构件的用量是面向装配的飞机设计技术的重要方向。与传统铆接件相比,整体结构件零件数量少、精度高且装配质量好,在减轻飞机结构重量、提高飞机性能方面取得了良好的效果<sup>[1]</sup>。近年来,机械加工技术的快速发展使得大型整体结构件的应用成为可能,从铰链、支座到梁肋再到整体壁板,整体结构件在飞机上的用量不断扩大。毛坯尺寸、加工设备与工艺参数是影响零件加工质量的重要因素,毛坯数模设计是零件机加过程中的重要环节,受到诸多因素的影响。实际应用中由毛坯尺寸引起的零件超差、材料浪费等问题层出不穷,国内外学者针对毛坯尺寸的优化设计开展了诸多研究。Parsa 等<sup>[2]</sup>应用理论解析法完成毛坯优化设计;孙开胜等<sup>[3]</sup>提出了毛坯迭代修正法;兰箭等<sup>[4]</sup>将有限元分析法应用于毛坯的初始优化设计,取得了一定的成果,对于毛坯的优化设计做出了有益的探索与贡献。

\* 基金项目: 国防基础科研项目(JCKY2018410C004)。

以激光跟踪仪、激光扫描仪为代表的数字化测量设备广泛用于飞机零件测量、部件装配等过程,提高了零件测量的精度与速度,实现了部件装配的柔性化与自动化。测量范围广、数据采集速度快是数字化测量设备的典型特点。以 T-Scan 激光扫描仪为例,可以实现线宽 90mm、深度 78mm、20000 点/s 的扫描速度与 0.02mm 的扫描精度<sup>[5]</sup>。基于激光扫描设备在零件测量方面的优势,本文首先提出一种机加零件毛坯优化设计方法,用于某飞机机加零件的毛坯优化设计。

### 1 基于激光扫描的零件毛坯优化技术概述

机加件通常由铸造或锻造等方法得到带有加工余量的毛坯,经过数控加工最终得到零件成品。技术人员根据零件 CAD 数模与加工工艺、经验求解出毛坯尺寸参数,由零件数模推导出毛坯数模完成毛坯的下料,毛坯数模的生成如图 1 所示。毛坯数模的推导并不能产

生精确的尺寸形状,不仅过程繁琐并且往往存在部分区域余量过大,导致材料浪费和部分区域余量过小导致无法加工<sup>[6]</sup>的问题,尤其对于复杂结构小余量机加件,这类问题就更加突出。航空材料成本高昂且加工困难,对毛坯数模的精确设计具有较强的现实意义,若能够实现毛坯的最优化设计,将在加工工时、刀具磨损、零件合格率、材料用量等方面产生积极的影响。

针对机加件毛坯数模生成中存在的问题,将传统毛坯模型生成方法与激光扫描技术相结合。依据零件模型完成初始毛坯数模的近似设计与下料,由激光扫描仪采集初始毛坯外形点云数据,将初始毛坯点云与零件数模进行拟合匹配,求解各加工区域毛坯点云与零件数模的偏差,评价毛坯的可加工性。针对余量不足与余量过多区域依据两者偏差进行毛坯数模修正,完成毛坯数模的优化设计,最终得到既有充足加工余量又避免材料浪费的零件毛坯,实现毛坯可加工性与经济效益的平衡,

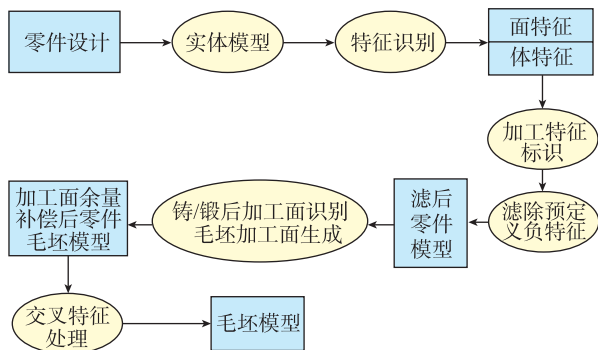


图1 毛坯数模生成

Fig.1 Blank modulus construction

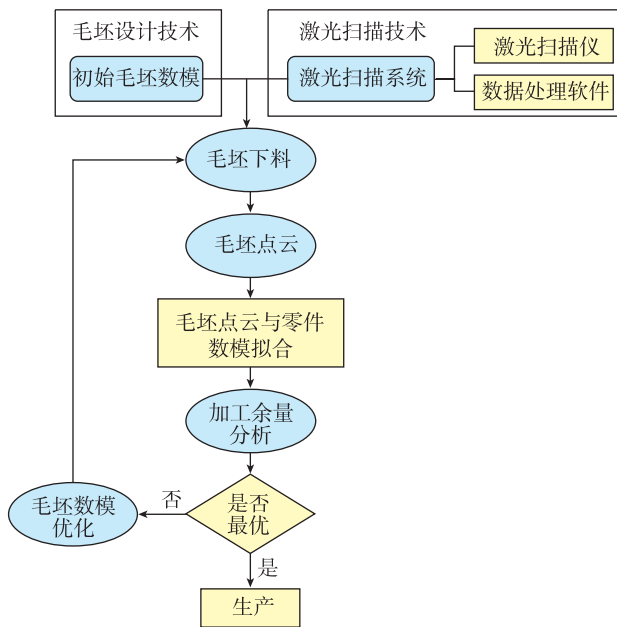


图2 技术路线图

Fig.2 Technology roadmap

总体技术路线如图2所示。

基于激光扫描的毛坯优化技术旨在解决传统毛坯数模生成中存在的计算量大、尺寸不准确、过程繁琐等问题。一方面可以简化初始毛坯的设计过程,仅需得到近似毛坯数模而不必对毛坯尺寸精确计算,利用拟合后偏差对初始毛坯进行优化修正,偏差数据的直观性加快了毛坯数模的设计速度;另一方面实现了毛坯加工余量的优化分布,使得各加工面具有适宜、均匀的加工余量,能够有效提高零件成品率、刀具使用寿命并且减少材料的浪费。该技术具有以下特点:

(1) 利用成熟的激光扫描技术,较好地解决了零件毛坯加工余量不足或加工余量过多的问题,提高了毛坯数模的设计速度与准确度。

(2) 深化了数字化技术在零件加工中的应用,建立毛坯—零件测量数据体系,明确零件加工过程中尺寸数据的演化,便于零件加工误差的溯源与质量管理。

## 2 基于激光扫描的零件毛坯优化关键技术

利用激光扫描仪获取初始毛坯的点云数据,将点云数据与零件数模拟合,计算两者在加工区域的偏差,以此为依据完成毛坯数模的优化设计。其关键点在于快速、准确地获取初始毛坯的点云数据并且采用适宜的方法完成点云与零件数模的拟合。大型零件或者具有复杂结构的零件毛坯,受制于激光扫描仪的量程与空间开敞性,往往难以在一个站位下完成毛坯点云的采集。实际情况下通常采用多视点云拼接的方法<sup>[7]</sup>实现不同站位下点云数据的拼接,从而得到完整的毛坯点云数据。因此,该技术主要包括激光扫描、点云拼接、点云与CAD拟合以及CAD设计技术,如图3所示。

### 2.1 激光扫描技术

激光扫描仪由激光发射器、聚光镜、接收镜以及CCD相机等组成<sup>[8]</sup>,采用光学三角法原理进行工作。由激光发射器发出一束平行光聚焦在物体表面,物体表面

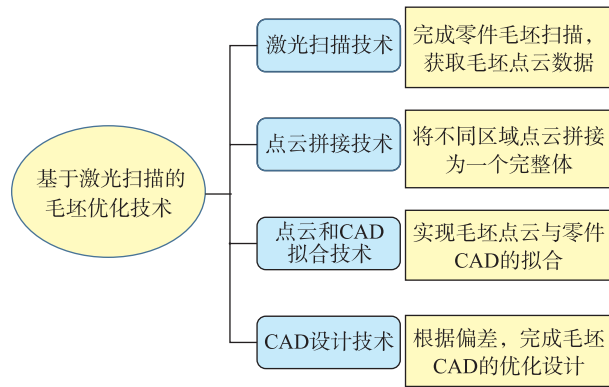


图3 关键技术

Fig.3 Key technology

产生的漫射光通过接收透镜成像在 CCD 光敏面上,当被测物体沿着激光入射方向移动时,表面上光斑相对会聚物镜的位置发生改变,其像点在光敏器件上的位置也发生改变,精确测量像点在 CCD 上的位移就可以得到被测物体的位移量,将承载了位移量信息的光学信号转换为电信号,经过计算机处理最终得到被测量物体的外形点云数据。根据激光束的不同入射方式可以分为直射式和斜射式两种。

直射式即入射激光束垂直于被测物体表面,主要接收物体表面的散射光;斜射式即入射激光束与被测物体表面不垂直,而是与被测物体表面的法线成一定角度,主要接受物体表面反射光。两种方式具有不同的优缺点,如表 1 所示。

直射式工作原理如图 4 所示,若光点的像在 CCD 光敏面上移动  $x'$ ,利用相似三角形的关系,可以求出物体表面沿着法线方向的移动距离为:

$$x = \frac{ax' \sin \theta_2}{b \sin \theta_1 - x' \sin(\theta_1 - \theta_2)} \quad (1)$$

### 2.2 点云拼接技术

ICP 算法是点云拼接常用算法,具有强大的功能与较高的准确度<sup>[9]</sup>,该算法基于迭代优化的思想,通过指定待拼接点云对应的点集,求解坐标变换矩阵,再进行迭代直到误差能够满足拼接精度的要求,从而实现多片

表1 直射式与斜射式优缺点比较

Table 1 Comparison of direct and oblique modes

方式	优点	缺点
直射式	适合测量表面散射特性较好的物体;光斑小,光强集中,整体体积小	难以测量镜面物体
斜射式	适合测量表面反射特性较好的物体即镜面物体;传感器分辨率较高	被测物体表面移动时,入射光照射在物体不同的点上,无法直接得出物体某点的位移情况;测量范围小,体积大

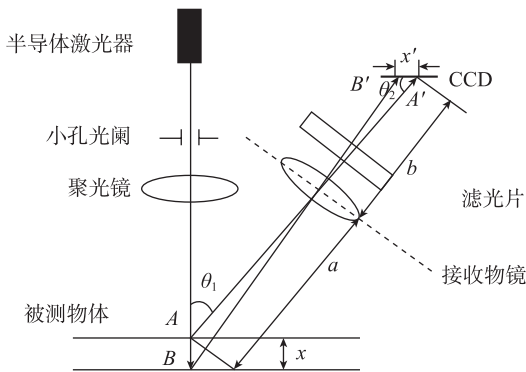


图4 直射式工作原理

Fig.4 Direct working principle

点云的拼接。

针对待拼接的点云  $A$  和点云  $B$ ,保持点云  $B$  不变,将点云  $A$  拟合到点云  $B$  下,实现点云的拼接。 $A$ 、 $B$  两点云存在重合区域,在  $B$  点云中寻找相对于  $A$  点云中需要用于匹配点的最近点,并建立两点坐标变换的偏差目标函数。理论上当两点云完全匹配时偏差目标函数变为零,但是由于点云采集过程中噪声的存在,并不总是存在对应点,因此当偏差目标函数取最小值时,就可以认为获得了最优匹配解,实现不同区域点云的最佳拼接。

已知点云  $A=\{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ ,点云  $B=\{b_1, b_2, \dots, b_m\}$ ,它们的初始坐标变换矩阵为  $R^0, T^0$ ,寻求平移矩阵与旋转矩阵使得误差函数为:

$$\varepsilon(A, B) = \min d^2(\eta(A), B) \quad (2)$$

$\eta$  是由  $R$  和  $T$  构成的坐标变换关系,对于采用点对点的 ICP 算法,误差函数可以表示为:

$$\varepsilon(A, B) = \min \sum_{i=1}^n \|b_{ki} - Ra_i - T\|^2 \quad (3)$$

其中,  $b_{ki}$  是点  $a_i$  在点集  $B$  中的对应点。对于点到平面的 ICP 算法,误差函数可以表示为:

$$\varepsilon(A, B) = \min \sum_{i=1}^n \langle Ra_i + T; S_i \rangle \quad (4)$$

其中,  $S_i$  表示为点  $a_i$  在点集  $B$  中对应点  $b_{ki}$  的切平面。当偏差目标函数达到最小值,即可结束迭代运算,完成点云的拼接。

### 2.3 点云与CAD拟合

为了使零件毛坯能够在机床上准确地装夹定位,部分零件会在毛坯上预先做出凸台、孔等基准要素,并保证毛坯基准要素的位置准确性,便于毛坯在加工中的定位找正,针对这类零件基准要素在零件加工阶段不需进行额外加工,只完成待加工表面的加工。而某些零件毛坯不预先做出定位基准,在机床上定位找正之后,完成全部加工面的加工。因此,针对这两种零件加工方式,为了使毛坯点云与零件 CAD 拟合后的结果恰当反映毛坯的可加工性,采用不同的拟合方法。

(1) 基于最小二乘法的拟合方法。

该种拟合方法将毛坯点云作为一个整体,计算点云整体上每一个点到零件 CAD 数模对应点的偏差,使得点云上每个点到零件 CAD 数模上对应点的距离最小,即实现整体点云的偏差最小,完成数据的最佳拟合。此时毛坯各区域的偏差自由分布具有整体的最小偏差,毛坯点云应在各处包络零件数模。

假设点云  $A$  (测量坐标系)和数模  $B$  (设计坐标系)中有  $n$  个相同特征点,分别为  $a_i=(x_i, y_i, z_i)^T, i=1, 2, 3, \dots,$

$n$ ;  $b_i=(x_i, y_i, z_i)^T, i=1,2,3, \dots, n$ 。利用最小二乘法求解目标函数  $\sum_{i=1}^n \|b_i - (Ra_i + T)\|^2$ , 使目标特征点集  $a_i (i=1,2, \dots, n)$  与参考特征点集  $b_i (i=1,2, \dots, n)$  具有最优解  $R$  与  $T^{[10]}$ 。

求解  $R$  与  $T$  之后, 即得到测量坐标系与数模坐标系的转换矩阵, 实现点云数据与 CAD 数模的拟合。

### (2) 基于基准特征的拟合方法。

该种拟合方法是以基准特征为求解测量坐标系与设计坐标系转换矩阵的桥梁, 转换矩阵求解过程中, 直接以基准要素之间的拟合偏差作为目标函数而不考虑其他点云的偏差, 当基准要素拟合偏差达到最小时完成拟合。此时基准处的偏差几乎为零, 达到最小, 加工区域处的偏差自由分布, 毛坯点云应均匀包络加工区域。

针对激光扫描、多视拼接与点云-数模拟合, 激光扫描仪采用 Hexgon Romer 7525SEI 关节臂测量机内置式 RS2 激光扫描仪, 扫描景深 20cm、采点速度 25000 点/s、采点精度 0.038mm, 较好地满足了激光扫描技术的要求; 数据处理软件采用 Geomagic Control 软件, 能够完成点云的读取、采样、去噪与删减, 提供  $N$  点拼接、工具球拼接等多种多视点云拼接方法<sup>[11]</sup>, 具有最佳拟合、RPS 拟合、特征拟合等多种点云-数模拟合方法, 较好地满足了点云后处理技术的要求。以 RS2 激光扫描仪与 Geomagic Control 软件为载体, 搭建激光扫描系统完成毛坯优化参数的计算, 为毛坯的优化设计提供直观依据, 如图 5 所示。

## 3 应用实例

以某型飞机某机加零件为应用对象, 采用基于激光

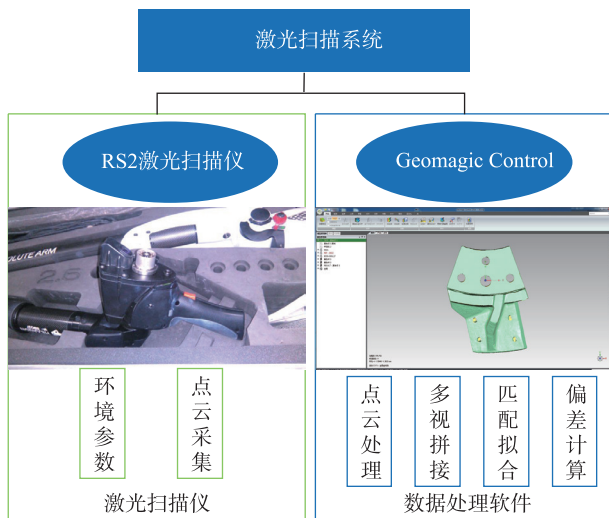


图5 激光扫描系统  
Fig.5 Laser scanning system

扫描的零件毛坯优化技术完成毛坯可加工性分析与优化设计。该零件通过铸造获得零件毛坯, 再对零件毛坯加工区域进行加工, 加工余量为 2mm, 零件数模及毛坯加工区域如图 6 所示。

采用上述激光扫描系统, 受制于激光扫描仪的量程与零件固定方式, 无法在一个站位下完成毛坯点云的采集。首先采集毛坯  $A$  区域点云, 其次移动零件完成  $B$  区域点云的采集, 利用  $N$  点对齐实现毛坯  $A$ 、 $B$  区域点云的拼接, 获得完整的毛坯点云。 $A$ 、 $B$  区域点云及点云拼接如图 7 所示。

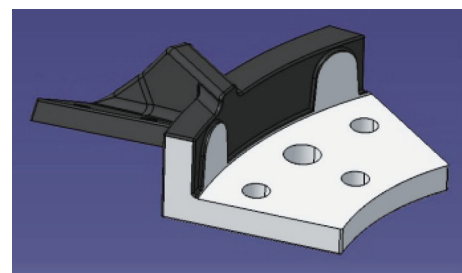
由于该零件没有预先加工定位基准, 毛坯在机床上夹紧后完成加工面的加工, 为保证加工面的余量充足, 采用最小二乘法完成毛坯点云与零件 CAD 数模的拟合, 如图 8 所示。

完成毛坯点云与零件数模最佳拟合后, 计算加工区域毛坯点云与零件数模的偏差, 初始毛坯加工余量如图 9 所示。

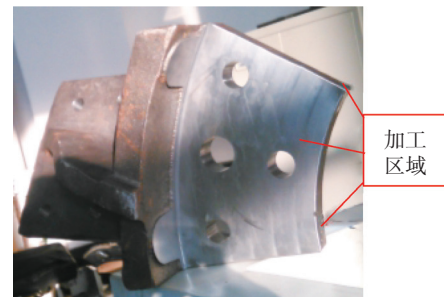
由于零件毛坯在加工区域应存在 2mm 的加工余量, 而偏差结果显示在部分区域毛坯的加工余量小于 2mm, 存在加工余量不足的问题, 需要对毛坯进行优化设计。根据偏差结果对毛坯进行优化设计后, 毛坯在加工区域的加工余量达到了 2mm, 完成毛坯数模的优化设计。毛坯数模优化后加工余量如图 10 所示。

## 4 结论

基于激光扫描的零件毛坯优化技术能够准确地评

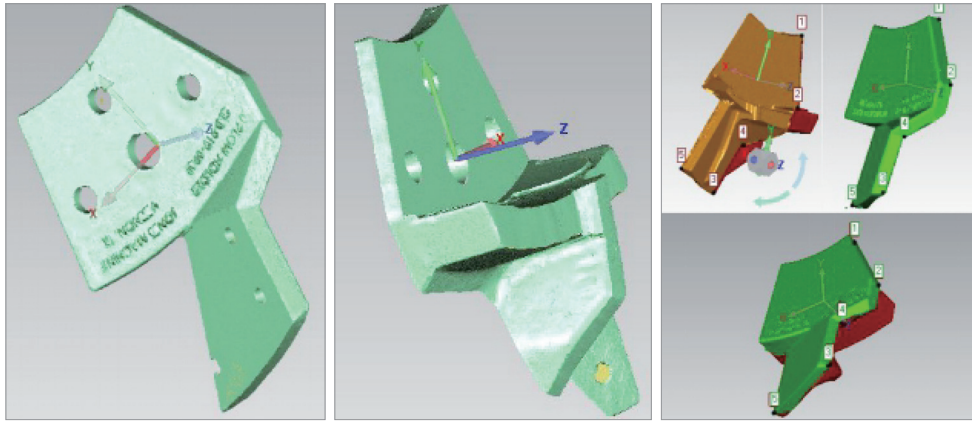


(a) 零件数模



(b) 加工区域

图6 零件数模及毛坯加工区域  
Fig.6 Part digital model and roughcast processing area



(a) A区点云

(b) B区点云

(c) 点云拼接

图7 点云的拼接

Fig.7 Stitching of point cloud

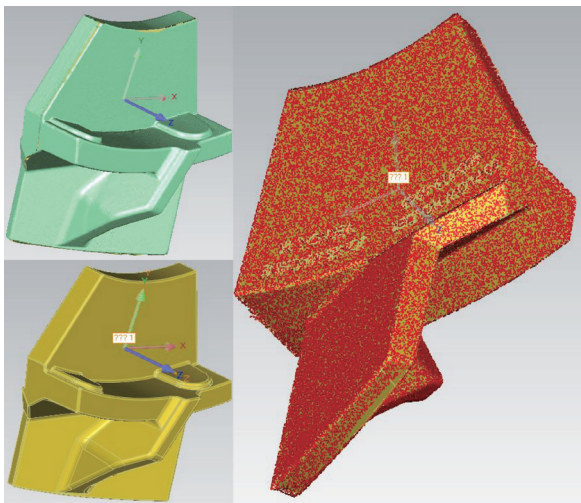


图8 点云与CAD拟合

Fig.8 Fitting of point cloud and CAD

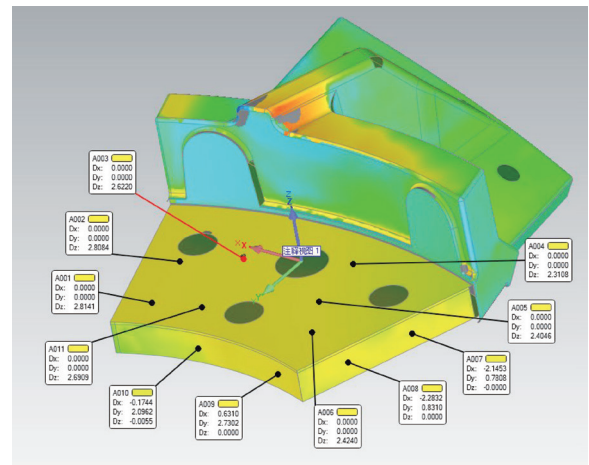


图10 优化后毛坯加工余量

Fig.10 Optimized blank machining allowance

价毛坯的可加工性,在毛坯加工余量评定与优化设计方面具有良好的应用前景,具体表现在以下3点:

(1)对毛坯的加工余量进行直观的评价,筛选出加工余量不足的毛坯,避免由于加工余量不足而造成零件加工失败。

(2)对毛坯的加工余量进行优化,针对余量过多与余量不足之处进行余量优化,减少毛坯材料的浪费,减少加工工时。

(3)对机加零件的数控编程进行指导,根据毛坯余量的大小与分布优化刀具加工路径与加工参数,提高加工效率。

总体来说,该技术操作方便、效率高、偏差结果直观易懂,在实际应用中取得了良好的经济效益。

### 参考文献

[1] 冯子明.飞机数字化装配技术[M].北京:航空工业出版社,2015.

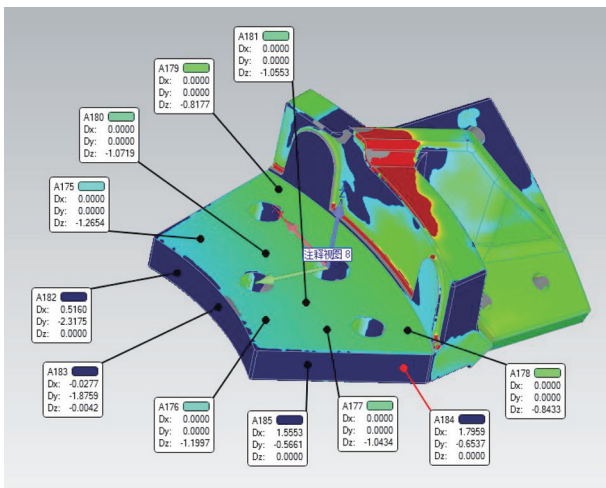


图9 初始毛坯加工余量

Fig.9 Initial blank machining allowance

- FENG Ziming. Digital and flexible assembly technology for fuselage[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2015.
- [2] PARSA M H, POURNIA P. Optimization of initial blankshape predicted based on inverse finite element method[J]. Finite Elements in Analysis and Design, 2007, 43(3): 218–233.
- [3] 孙开胜, 王雷刚, 黄瑶, 等. 截面线修正法在毛坯设计中的应用[J]. 模具技术, 2008(2): 32–34.
- SUN Kaisheng, WANG Leigang, HUANG Yao, et al. Application of section curve modification method in blank design[J]. Mold Technology, 2008(2): 32–34.
- [4] 兰箭, 张靖暹, 张沔利, 等. 基于弧长法的有限元逆算法在板料成形中的应用[J]. 热加工工艺, 2009(11): 82–85.
- LAN Jian, ZHANG Jingxian, ZHANG Mianli, et al. Application of inverse finite element approach based on arc-length method in sheet metal forming[J]. Thermal Processing, 2009(11): 82–85.
- [5] WEISS J. Application and statistical analysis of terrestrial laser scanning and forest growth simulations to determine selected characteristics of Douglas-Fir stands[J]. Folia Forestalia Polonica Seria A Forestry, 2009, 51(2): 123–127.
- [6] 吴佳常, 李晋. 确定机械加工余量的新方法及其计算机程序设计[J]. 机械设计与制造工程, 1986(6): 7–16.
- WU Jiachang, LI Jin. A new method to determine machining residue and its computer program design[J]. Mechanical Design and Manufacturing Engineering, 1986(6): 7–16.
- [7] 蔡润彬, 潘国荣. 三维激光扫描多视点云拼接新方法[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2006, 34(7): 913–918.
- CAI Runbin, PAN Guorong. A new method for multi-view point cloud registration[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2006, 34(7): 913–918.
- [8] 周坤. 激光三角法在大尺寸测量中的应用[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2009.
- ZHOU Kun. Application of laser triangulation in the large scale measurement[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2009.
- [9] 杨现辉, 王惠南. ICP算法在3D点云配准中的应用研究[J]. 计算机仿真, 2010, 27(8): 235–238.
- YANG Xianhui, WANG Huinan. Application research of ICP algorithm in 3D point cloud alignment[J]. Computer Simulation, 2010, 27(8): 235–238.
- [10] 邓军. 三维点云处理和规则曲面拟合算法研究[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2015.
- DENG Jun. Research on three dimension point cloud processing and surface fitting algorithm[D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2015.
- [11] LI X, QIU W, LU S. Research on quickly data sharing between Geomagic and SolidWorks[C]//International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering. Wuhan, 2010.
- (上接第95页)
- [3] WANG C S, COVIC G A, STIELAU O H. Power Transfer capability and bifurcation phenomena of loosely coupled inductive power transfer systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2004, 51(1): 148–157.
- [4] WANG C S, STIELAU O H, COVIC G A. Design considerations for a contactless electric vehicle battery charger[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2005, 52(5): 1308–1314.
- [5] ZHU X, LIN B, LIU L. Efficiency-based compensations and the mechanical load dependencies of rotary transformer for rotary ultrasonic machining applications[J]. IET Power Electronics, 2015, 8(6): 986–993.
- [6] ZHU X, LIN B, LIU L, et al. Power transfer performance and cutting force effects of contactless energy transfer system for rotary ultrasonic grinding[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(5): 2785–2795.
- [7] 申昊, 冯平法, 张建富, 等. 超声振动系统非接触式高效电能传输的电路补偿[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2015, 55(7): 728–733.
- SHEN Hao, FENG Pingfa, ZHANG Jianfu, et al. Circuit compensation for efficient contactless power transmission in ultrasonic vibration systems[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2015, 55(7): 728–733.
- [8] LUAN Y, LIN B, MA X, et al. Innovative contactless energy transfer accessory for rotary ultrasonic machining and its circuit compensation based on coil turns[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(10): 7810–7818.
- [9] 陈曦, 赵波. 无线电能传输系统的特性与仿真分析[J]. 机械设计与制造, 2015(1): 187–190.
- CHEN Xi, ZHAO Bo. Characteristics and simulation analysis of the wireless power transmission system[J]. Machinery Design & Manufacture, 2015(1): 187–190.
- [10] 袁文, 隆志力, 张建国, 等. 新型非接触式电能传输装置在超声加工中的应用[J]. 电工技术学报, 2015, 30(10): 52–57.
- YUAN Wen, LONG Zhili, ZHANG Jianguo, et al. The application of new non-contact electromagnetic conversion device in ultrasonic machining[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(10): 52–57.
- [11] MCLYMAN C W T. Transformer and inductor design handbook[M]. Boca Raton: CRC Press Book, 2011.
- [12] CAI W, ZHANG J, FENG P, et al. A bilateral capacitance compensation method for giant magnetostriction ultrasonic processing system[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 90(9–12): 1–9.
- [13] WAKIWAKA H, LIO M, NAGUMO M, et al. Impedance analysis of acoustic vibration element using giant magnetostrictive material[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1992, 28(5): 2208–2210.
- [14] CAI W, ZHANG J, YU D, et al. A vibration amplitude model for the giant magnetostrictive ultrasonic processing system[J]. Journal of Intelligent Material Systems & Structures, 2017, 53(19): 52–58.

通讯作者: 王巍, 教授、硕士生导师, 研究方向为数字化飞机制造技术、飞机装配工装的通用性及模块化设计, E-mail: wwsh595@163.com。

(责编 铃兰)

通讯作者: 冯平法, 博士、教授、博士生导师, 研究方向为超声与高速精密加工工艺装备、制造装备性能分析等, E-mail: fengpf@mail.tsinghua.edu.cn。

(责编 铃兰)