

# 基于激光扫描的航空管件检测技术研究

王 巍, 金文瀚

(沈阳航空航天大学航空宇航学院, 沈阳 110136)

**[摘要]** 航空管件的制造精度是影响其装配质量的重要因素之一,在管件装配之前需要对其制造精度进行检测。目前常用的检测方法是通过机械检具进行验证,但是存在精度低、效率差等缺陷。为了保证检测结果的准确性,提高管件的生产效率,提出一种高效、精确的数字化管件检测技术。利用非接触式测量方法,基于激光扫描技术获取管件表面点云数据,在检测系统中通过提取点云数据的中轴线、弯曲点和弯曲元素,与管件理论模型比较进行误差分析,进而修正折弯系数,通过将修正数据传递给折弯机生产出高质量管件。

**关键词:** 航空管件; 数字化检测; 非接触测量; 激光扫描; 误差分析

**DOI:**10.16080/j.issn1671-833x.2020.19.041



王 巍

教授,主要研究方向为数字化飞机制造技术和飞机装配工装的通用性及模块化设计。

航空管件是飞机的重要组成部分,在飞机上的应用非常广泛,主要作用是完成油、水、气等介质的传递任务<sup>[1]</sup>。在一架双发军用飞机上需

要安装将近 2000 多根管件,几乎遍布整架飞机的各个位置。管件的制造精度不但会对整机能否顺利完成总装产生重要影响,而且还会影响飞机系统正常运行,因此管件的制造精度极其重要,受到航空企业的高度重视。

航空制造业使用的管件大多利用折弯机加工而成,受到管件本身金属材料的力学性能影响,管件会出现回弹、起皱等现象,造成管件加工完成之后与理论模型之间存在偏差。因此需要对管件的制造精度进行检测,对于超差的管件,根据检测结果进行修正,进而利用折弯机生产出合格管件<sup>[2]</sup>。

目前,最常用的航空管件制造精度检测多利用机械检具通过人工测量来完成,该检测方法存在一定的弊端,已经无法实现复杂管件高效、精准的检测需求。同时,随着数字化技

术的快速发展,近年来基于数字化测量的检测技术逐渐成为研究热点。因此,本文基于激光扫描<sup>[3-5]</sup>进行航空管件检测技术研究,具有一定的研究意义。

## 航空管件的常用检测方法

检具是指为了完成指定检验需求而专门设计的机械工具,其主要作用就是测量和监控零部件的外形尺寸,可以很好地反映出零部件的各项参数,如零部件的空间几何形态、位置度、间隙以及轮廓度等。而且操作简单,便于使用,稳定耐用,因此在航空制造业中得到了普遍应用<sup>[6]</sup>。

### 1 航空管件关键检测要素

在飞机零部件装配过程中,如果某个要素发生变化便会对零件的性能以及可装配性造成影响,则该元素可被称为关键检测要素,即位于零部件上的相关几何要素<sup>[7]</sup>。关键检测

要素主要用于确保零部件之间的协调性以及零部件的制造精度,例如:外形尺寸基准特征、位姿特征、接口特征等。最终,基于航空管件的生产工艺需求以及管件特性,结合航空管件装配工艺确定其关键检测要素为空间几何形态(即外形尺寸,主要分为轴向偏差和径向偏差)以及弯折角度。

## 2 常用的检测方法

检具一般由夹紧装置、端部检验块、U形槽支撑块或者L形槽支撑块等结构组成。航空管件主要分为两部分:直线部分和圆弧部分。由于管件直线部分的空间位置是影响其空间几何状态的主要因素,因此,管件的检测就是直线部分的检测,根据待检测管件的特点,通过选择U形槽支撑块或者L形槽支撑块来控制管件直线部分的空间位置来间接反映管件的空间几何状态,如果直线部分长度较小,不容易检测,则可以忽略该部分或者根据实际情况选择与直线部分相邻的圆弧部分进行检测。在检测过程中,先将管件放置在检具上,利用检具上的端部检验块与管件的首末端进行配合来限定管件整体的空间位置,再将直线部分放入到对应的U形槽或者L形槽中,最后利用夹紧装置在管件的关键点位置将其夹紧,此时可以根据管件直线部分与U形槽或者L形槽的配合状态以及管件首末端与端部检验块的配合状

态,再结合人工测量来综合分析管件的制造精度。管件的检测如图1所示。

## 3 常用检测方法存在的不足

由于当前使用的机械检具基本上是专用检具,柔性化程度低,一套检具只能完成一种管件的检测工作。然而飞机上的管件各种各样,需要针对每一种管件去设计一套对应的检具,最终需要设计多套检具才能完成飞机上所有管件的检测任务,而且个别管件长度较大,则对应的检具也会很大,很笨重,不够灵活;同时由于检具的材料均是金属材料,随着时间的推移,会出现腐蚀现象,为了避免该类情况的发生需要定期对检具进行保养;另外在检具经过长时间的使用之后,夹紧装置、端部检验块以及支撑块会发生松动或者出现磨损,导致检测精度下降,因此还需要定期对检具进行检测,对其进行修复进而保证其检测精度。因此利用机械检具进行检测会增加厂房的占地面积,而且浪费大量的人力和物力,同时机械检具的购置、保养、定期检测、存放均会产生高额费用,不仅提高了生产成本,还会影响整机的生产周期。

同时管件自身的材料特性能够产生一定程度的弹性形变,在检测过程中,操作人员将管件放到支撑块的凹槽中进行检验,即使管件的空间几何形态存在一定的偏差,操作人员稍微对管件施加一定程度的力,管件同

样会进入到凹槽中,因此操作人员对检测结果有很大的人为因素影响,重复性较差,不能保证管件检测结果的可信度。

而且利用机械检具进行检测,只能判断管件是否合格,并不能给出量化的测量结果,没有详细的误差分析数据,进而不能很好地得到用于折弯机的管件折弯修正系数。

## 航空管件检测系统设计

根据以上所述目前常用管件检测方法存在的不足,结合数字化检测技术设计一套高效、精确的航空管件检测系统。采用非接触式测量的方式实现管件空间几何形态的检测,进而完成管件安装尺寸的误差分析,并给出详细的误差分析报告。

### 1 管件检测系统总体方案设计

采用软、硬件结合的方式来完成管件检测系统的设计,该系统主要包括激光扫描系统以及点云数据处理系统。利用激光扫描系统完成管件表面点云数据的获取任务;利用点云数据处理系统对点云数据进行处理并进行误差分析,进而完成管件制造精度的检测。两个系统之间通过线缆实现数据交互。检测系统设计流程如图2所示。

### 2 激光扫描系统

激光扫描系统以关节臂测量机为核心进行搭建,主要包括激光扫描头、硬测头、控制器、旋转关节、蓄电

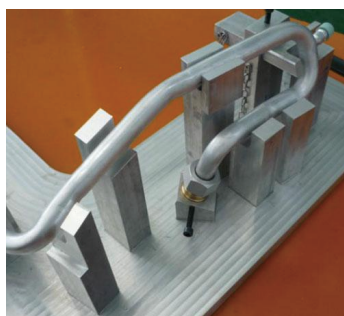


图1 利用检具检测管件示意图

Fig.1 Schematic diagram of tube inspection using checking-tool

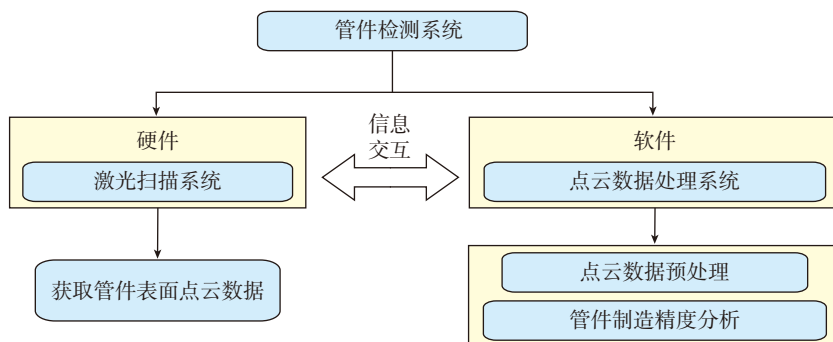


图2 管件检测系统设计流程图

Fig.2 Design flow diagram of tube inspection system

池、磁性基座和计算机 7 个部分,各部分功能如下:

(1)激光扫描头:采用非接触式测量方式,通过激光扫描待测产品表面获取点云数据;

(2)硬测头:采用接触式测量方式,用于激光无法扫描的孔和凹槽等几何特征的测量;

(3)控制器:用于处理分析激光扫描头或硬测头获取的数据,并传递给计算机;

(4)旋转关节:更加有利于测量臂的旋转移动,增加灵活性,提高扫描效率;

(5)蓄电池:用于稳定电压,提供电能,避免工作过程中突然断电导致系统关闭;

(6)磁性基座:用于固定关节臂测量机,通过电磁开关控制磁性的有无,能够稳定吸附在铁质材料上;

(7)计算机:用于存储点云数据。

通过手持测量臂控制激光扫描头空间位置对待测管件进行扫描,扫描过程中需要合理控制扫描头的移动速度,如果移动速度过快将会影响获取的点云质量,获取的点云数据通过线缆传递到控制器,经过控制器处理之后再通过线缆传递给计算机中的点云数据处理系统,完成信息交互,如图 3 所示。

### 3 点云数据处理系统

点云数据处理系统主要包括 3 个模块:显示模块、点云数据预处理模块以及数据分析模块,3 个模块之间息息相关,不断进行信息交互。系统架构如图 4 所示。

预处理模块:由于激光扫描系统获取的管件表面点云数据质量较差,需要利用预处理对数据进行处理,进而获取高质量的点云数据,为后期完成数据分析打下基础。该模块是保证整个系统高效、精准运行的基础。

数据分析模块:用于完成管件制造精度检测。将管件点云数据与

理论模型进行比对,完成误差分析,并生成具体偏差数据,基于偏差数据对折弯系数进行修正,并自动生成修正数据,将修正信息反馈给折弯机。

显示模块:展示给操作者直观且容易操作的显示界面,能够实时展示扫描过程中当前点云数据的状态、预处理后点云数据的状态、管件型面三维重构结果、误差分析结果以及其他相关数据信息。

### 4 航空管件检测系统工作流程

基于激光扫描的航空管件检测系统的详细工作流程如图 5 所示。检测流程大体包含下述 3 个阶段:

(1)点云数据获取。

利用激光扫描系统对管件进行扫描,如果管件长度较长,超出激光扫描系统的测量范围,不能一次性获取完整的管件表面点云数据,则需要对管件适当分段,并标定公共特征,对管件各段分别进行扫描,最终得到多组点云数据。



图3 激光扫描系统  
Fig.3 Laser scanning system

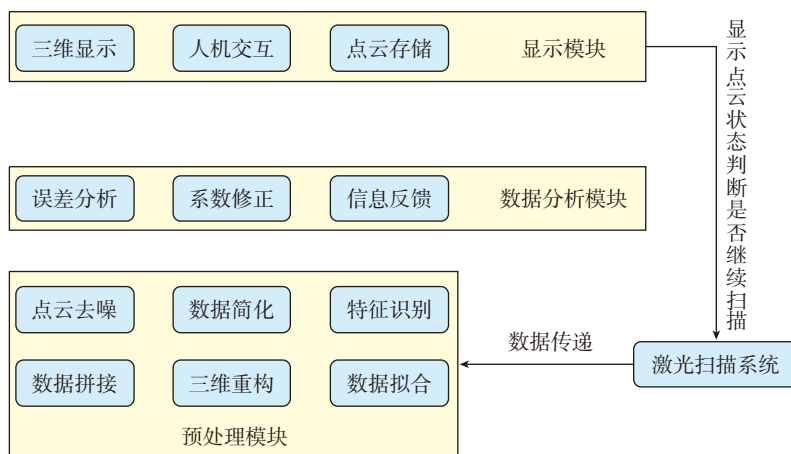


图4 点云数据处理系统架构图  
Fig.4 Architecture diagram of point cloud data processing system



$$P(y, \beta) = \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix},$$

$$Y(z, \alpha) = \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

且:  $R(x, \gamma)P(y, \beta)Y(z, \alpha) = RPY(\gamma, \beta, \alpha)$

目前,间接坐标系与设计坐标系的各个坐标轴方向相同且平行,只是坐标原点没有重合,此时将间接坐标系  $\{B\}$  进行平移,即可得到设计坐标系  $\{C\}$ 。平移变换如下:

$$\begin{pmatrix} {}^c M \\ 1 \end{pmatrix} = T(a, b, c) \begin{pmatrix} {}^B M \\ 1 \end{pmatrix} \quad (9)$$

$$\text{其中, } T(a, b, c) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & a \\ 0 & 1 & 0 & b \\ 0 & 0 & 1 & c \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, a, b, c$$

表示点  $M$  从间接坐标系  $\{B\}$  到设计坐标系  $\{C\}$  的偏移距离。则复合变换矩阵如下:

$$\begin{pmatrix} {}^c M \\ 1 \end{pmatrix} = T(a, b, c) \cdot RPY(\gamma, \beta, \alpha) \begin{pmatrix} {}^A M \\ 1 \end{pmatrix} \quad (10)$$

在点云数据中选取多个基准,将其点坐标(机器坐标系下)和理论模型中对应基准的点坐标(设计坐标系下)代入变换矩阵(4)式中得到转换矩阵,即可完成坐标系的拟合。

## 7 管件检测系统优势

管件检测系统操作方便,简单易用,仅通过一套管件检测系统即可完成不同类型的管件检测,无需再设计多套机械检具,且检测过程中无需额外夹具进行固定,也无需额外的测量工具进行辅助即可完成管件检测;人为因素影响大大减小,进而保证检测结果的准确性。

检测完成之后,可以提供详细实用的误差检测报告,提供完整的误差分析数据,而且采用图像的形式进行展示,更加直观。进而更加有利于辅助工作人员了解管件的实

际状态,更好地进行误差分析。而且系统通过与折弯机连接,可以自动生成折弯系数修正程序,直接用于折弯机。

综上所述,管件检测系统可以很好地提高检测精度,使检测结果更加可靠,减少废料的产生;不再需要设计机械检具,减少占地,大大降低了使用管理成本以及生产成本;而且系统检测速度快,有效提高了工作效率。

## 管件检测系统在某型管件检测中的应用

以某型号航空管件为例,基于关节臂测量机的激光扫描功能对管件进行扫描,结合点云数据处理系统进行误差分析完成检测工作,进而验证检测系统的合理性。

### 1 管件表面点云数据获取

由于点云在拼接过程中会造成一定的误差,如果多次进行拼接会造成误差积累,一旦误差积累过大经过拼接之后得到的完整点云数据便不能准确反映管件实体的实际状态。因此,在检测之前,需要根据待检测管件长度和关节臂测量机的扫描范围合理安排测量机和管件的摆放位置,尽量减少点云数据组数,避免多次拼接,进而获取高质量点云数据。点云数据获取如图6所示。

### 2 管件表面点云数据预处理

获取点云数据之后,在数据处理系统中通过对其进行降噪和简化处理得到高质量点云数据。再导入管件CAD理论模型,基于坐标系拟合算法,通过旋转和平移将点云数据和CAD理论模型转换到同一个坐标系下。

### 3 管件制造精度分析

坐标系拟合完成之后,系统便自动开始管件制造精度分析,基于点云数据拟合3D圆柱模型,获取中轴线,并自动识别计算弯曲点和弯曲元素与CAD理论模型进行比较完成管件制造精度的误差分析。分析结果如

图7所示,可知:(1)管件整体制造精度的变化趋势以及各个关键点处的超差情况,绿色表示满足误差范围要求,黄色、橙色以及红色表示超差,而且超差程度依次递增,因此该管件共有7个关键位置超出误差要求范围;(2)管件制造精度的修正是通过对不同参数(主要包括拉伸参数、弯曲参数以及旋转参数)进行补偿,最终使得生产的管件的制造精度满足要求;(3)根据超差的7个关键位置,针对不同的参数条件生成折弯修正系数数据(即各个位置处的偏差值),如图8所示(由上至下依次对应图7中由左至右超差的关键位置),其中个别位置处的某些参数修正值显示的是符号“n/a”,说明该参数不需修正,只需修正其他参数便可得到满足要求的管件。最终得到整体的修正数据并生成修正程序传递给折弯机。

## 4 管件检测系统的测量误差分析

管件检测系统的测量误差主要来源于激光扫描系统和点云数据处理系统,影响检测系统测量精度的主要因素包含以下4种。

(1)人为因素:扫描过程中移动激光扫描头速度过快,同时无法始终保证激光垂直于待测管件表面。

(2)环境因素:外界环境发生轻微震动、光照强度变化、温度变化。

(3)管件自身:管件表面的光暗程度会影响测量精度。

(4)系统误差:在点云数据处理系统对点云数据和理论模型进行拟合时存在误差。

## 结论

本文提出了一种基于激光扫描



图6 点云数据获取  
Fig.6 Obtaining point cloud data

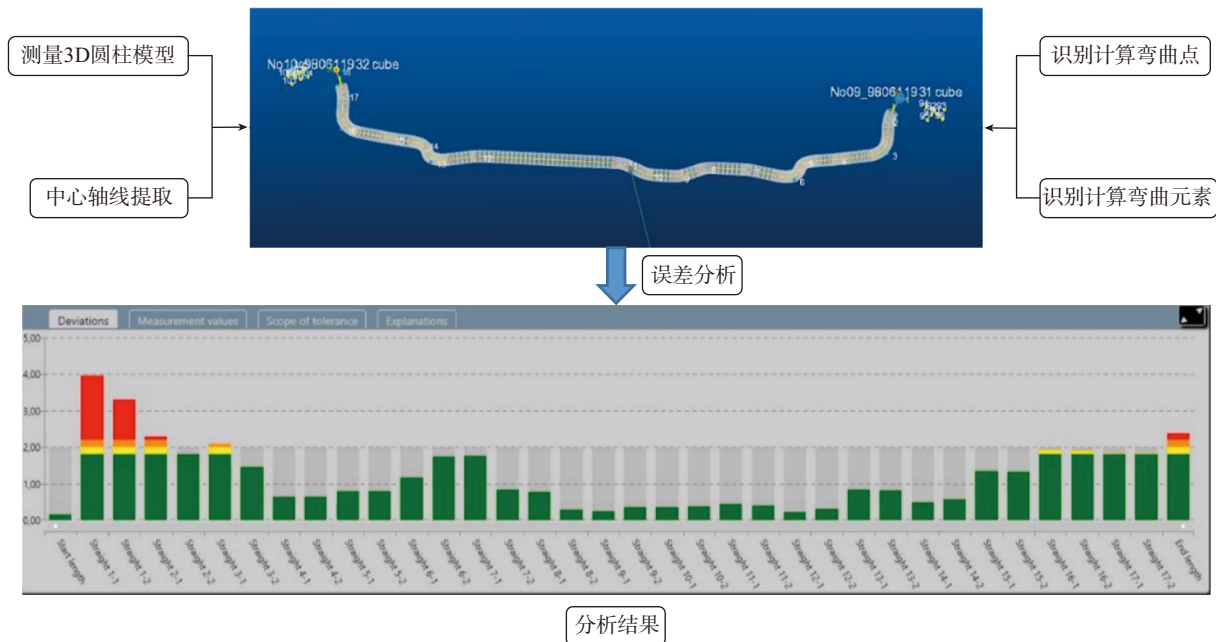


图7 误差分析结果  
Fig.7 Error analysis result

的管件检测系统,主要包括激光扫描系统和点云数据处理系统两部分。利用激光扫描系统获取管件表面点云数据,利用点云数据处理系统对点云进行降噪和简化处理,并与CAD理论模型对比实现误差分析。该系统具备操作简单,测量结果精度更好、效率更高等优势,对于提高管件检测技术的发展具有一定的应用价值。最后基于某型号管件进行验证,证明该系统测量稳定性好,有效可行。

### 参考文献

[1] 王萌. 飞机导管数控弯曲成形技术的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.  
WANG Meng. Digital agile manufacture technology of airplane tube[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.  
[2] 金鹏, 刘检华, 刘少丽, 等. 基于中心线的管路端点位置精确测量方法[J]. 计算机集成制造系统, 2016, 22(10): 2284-2293.  
JIN Peng, LIU Jianhua, LIU Shaoli, et al. Centerline-based measuring method for endpoints of tube[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2016, 22(10): 2284-2293.  
[3] SUN C K, YOU Q, QIU Y, et al.

No.	Push[mm]	Correction[mm]	Co Bend angle[deg]	Correction[deg]	Co Rotation[deg]	Correction[deg]	Co
1	93.60	-0.19	89.36	0.02	112.13	-0.09	✓
2	268.60	0.24	50.33	0.16	147.73	0.96	✓
3	89.81	-1.06	39.21	0.22	46.00	-0.44	✓
4	229.80	0.91	8.63	-0.01	68.96	0.37	✓
5	117.17	1.44	71.40	0.57	-172.27	-0.07	✓
6	94.29	-0.23	54.51	0.09	n/a	n/a	■
7	842.69	-0.13	n/a	n/a	n/a	n/a	■

修正值

无需修正

图8 修正系数数据  
Fig.8 Correction coefficient data

Online machine vision method for measuring the diameter and straightness of seamless steel pipes[J]. Optical Engineering, 2001, 40(11): 2565-2571.  
[4] 陈新禹, 胡英, 毕丰隆. CCD光学成像系统中亚像素边缘的精确定位[J]. 信息与控制, 2014, 43(2): 176-180.  
CHEN Xinyu, HU Ying, BI Fenglong. Precision location of sub-pixel edge in CCD optical imaging systems[J]. Information and Control, 2014, 43(2): 176-180.  
[5] CHEN X Y, HU Y, MA Z, et al. The location and identification of concentric circles in automatic camera calibration[J]. Optics & Laser Technology, 2013, 54: 185-190.  
[6] 崔占生. 汽车白车身用检具技术[J]. 汽车工艺师, 2015(7): 67-70.

CUI Zhansheng. Inspection tool technology for automobile body-in-white[J]. Modern Components, 2015(7): 67-70.  
[7] ZHENG L Y, MCMAHON C A, LI L, et al. Key characteristics management in product lifecycle management: A survey of methodologies and practices[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2008, 222(8): 989-1008.  
[8] 陈允全, 李泷果, 黄翔, 等. 基于机器人的飞机大型结构三维自动化检测方法[J]. 航空制造技术, 2019, 62(10): 51-57.  
CHEN Yunquan, LI Shuanggao, HUANG Xiang, et al. Three-dimensional automatic

(下转第72页)

## Research on Surface Roughness Detection Index of Micro-Milling Based on Multi-Objective Optimization

LI Wenqin, XU Jinkai, YU Huadong, ZHANG Xianghui, LIU Qimeng, YU Zhanjiang

( Ministry of Education Key Laboratory for Cross-Scale Micro and Nano Manufacturing, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China )

**[ABSTRACT]** Since the fact that the surface topography of micro-milling is complex and difficult to evaluate accurately, a surface roughness detection index based on three-dimensional (3D) characterization is proposed. Firstly, on the basis of principal component analysis, the 3D surface roughness parameters  $S_a$ ,  $S_{sk}$  and  $S_{ku}$  are converted into gray correlation degree as a surface roughness detection index based on the gray correlation analysis method. Secondly, the response surface methodology (RSM) is used to establish a gray correlation degree model to analyze the influence of machining parameters on the GRG. Finally, the combination of optimal machining parameters is obtained and verified. The results show that the average relative error of the gray correlation degree model is 6.54%, the fitting accuracy is high and the prediction effect is good, which verifies the feasibility of the model. The GRG corresponding to the obtained optimal process parameter combination is increased by 15.27%, which realizes the purpose of surface roughness minimization and surface abnormal features minimization and proves the feasibility of the detection index.

**Keywords:** Surface micro-machining; Multi-objective optimization; Grey correlation analysis; Response surface methodology; 3D surface roughness; Surface roughness detection index

(责编 阳光)

(上接第46页)

detection method for large-scale structure of aircraft based on robot[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2019, 62(10): 51-57.

[9] 严剑锋, 邓喀中, 邢正全. 基于最小二乘拟合的三维激光扫描点云滤波[J]. 测绘通报, 2013(5): 43-46.

YAN Jianfeng, DENG Kazhong, XING Zhengquan. 3D laser scanning point cloud filtering based on least squares fitting[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2013(5): 43-46.

[10] 李广云, 李宗春. 工业测量系统原理与应用[M]. 北京: 测绘出版社, 2011.

LI Guangyun, LI Zongchun. The principles and applications of industrial measuring systems principles and applications of industrial measuring systems[M]. Beijing: Sino Maps Press, 2011.

通讯作者: 王巍, E-mail: wwsh595@163.com。

## Research on Inspection Technology of Aviation Tube Based on Laser Scanning

WANG Wei, JIN Wenhan

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

**[ABSTRACT]** The manufacturing accuracy of aviation tube is one of the important factors that affect the assembly quality, it is necessary to inspect the manufacturing accuracy of tube before assembly. At present, the commonly used inspection method is to verify by mechanical checking-tools, but there are some defects such as low precision and low efficiency. So an efficient and accurate digital inspection technology of tube is proposed, in order to ensure the accuracy of inspection results and improve the production efficiency of tube. Non-contact measurement method is used to obtain the surface point cloud data of tube based on laser scanning technology, in the inspection system, the central axis, bending points and bending elements of point cloud data are extracted to make error analysis compared with the theoretical model of tube, and then the bending coefficient can be corrected, and high quality tubes will be produced by sending the correction data to the bending machine.

**Keywords:** Aviation tube; Digital inspection; Non-contact measurement; Laser scan; Error analysis

(责编 阳光)