

# 航空实物制造依据三维数字化 测量及模型重建\*

陈丽丽<sup>1</sup>, 尹华彬<sup>1</sup>, 刘胜兰<sup>2</sup>, 张丽艳<sup>2</sup>

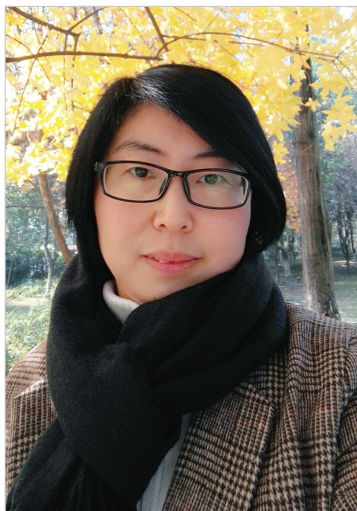
(1. 航空工业成都飞机工业(集团)有限责任公司产品研制部, 成都 610091;

2. 南京航空航天大学机电学院, 南京 210016)

**[摘要]** 实物制造依据包括样板、标准样件、模具等多种类型, 由于种类形式各异、复杂曲面和复杂刻线并存, 将其转化为数字化模型难度较大。在分析实物制造依据设计要素的基础上, 综合采用摄影测量、结构光扫描测量和光学追踪的接触式测量, 实现复杂实物制造依据三维数据的高精度完整采集; 根据实物的大小、形式、复杂程度的不同给出测量策略和模型重建方法, 提出一种以曲面外形与基准刻线等关键测量数据为基础、结合理论二维图纸的复杂实物数字化转化方法, 精度能够满足要求, 又大大提高了测量与模型重建的整体效率。

**关键词:** 飞机; 标准样件; 模具; 视觉测量; 模型重建

**DOI:** 10.16080/j.issn1671-833x.2018.05.024



陈丽丽

高级工程师, 主要研究方向为飞机部件装配、数字化测量。

飞机的实物制造依据作为模拟量协调方法的基础, 包括样板、标准样件、模具等多种类型, 具有数量庞大、种类繁多、外形复杂、精度要求较高等特点。随着我国航空制造技术的不断发展, 数字量协调制造方法已成为主流。对于采用传统模拟量协调方法生产制造的产品, 当生产线需要扩建、复制以及同系列改型飞机工艺准备时, 需要将模拟量协调方法转换为数字量协调方法。

另外, 有些模拟量协调制造体系下完成的机型目前已不再批量生产, 但相关机型仍在服役, 考虑到未来的全生命周期维护保障服务, 飞机的实物制造依据仍然需要保留。一方面, 这些实物制造依据使用率极低, 在存放的过程中会产生存储、维护、管理等一系列问题, 占用人力物力, 也给生产造成较大压力; 另一方面, 随着存储时间的不断增长, 实物制造依据

会出现老化、变形、损坏等问题, 这会导致后续零备件的生产过程中出现误差等。如何管理、保留这些模拟量协调下的实物制造依据成为各航空生产单位亟待解决的问题之一。如果将其转化为数字化电子依据, 则不但可以实现数字量协调下的生产制造, 也可以为备件生产保存永久制造依据。因此, 将实物制造依据复制、转化为数字化制造依据在我国航空企业有着大量的需求。

对实物进行数字化测量和逆向建模是将其转化为数字化制造依据的一种有效方法。从 20 世纪 90 年代开始, 这种逆向工程思想在机械、汽车、航空航天等领域得到大量研究, 文献 [1]、[2] 对逆向工程的工作流程及主要研究方法进行了总结性阐述。近年来, 该技术仍然得到大量的关注与应用, 例如文献 [3] 给出了采用数字化测量和 CAD 重建获得固

\* 基金项目: 航空科学基金项目(2014165 2015)。

定翼无人机外形的方法,并进行了关键参数的分析与仿真;文献[4]介绍了逆向工程在零件设计中的基本应用框架和未来发展方向;文献[5]给出了逆向工程在飞机整机外形设计中的应用;文献[6]、[7]分别对航空大型工装和航空模具进行了数字化测量和逆向曲面建模。

上述研究中,文献[3]~[5]的研究目标主要是对整个飞机产品或机械零件的外形进行三维数据测量、逆向设计和分析,与航空实物制造依据的数字化转化要求有所不同。文献[6]、[7]与本文研究有着类似的研究对象,但主要是对表面外形进行数字化测量与曲面重建。实际上,实物制造依据不仅有着复杂的曲面外形,表面上还刻有大量用来表示产品基准、零件边缘轮廓等的复杂刻线,如何对复杂曲面和大量复杂刻线并存的实物进行数字化测量与模型重建,尚未见研究报道。

本文研究航空实物制造依据的数字化测量与模型重建方法。在分析实物制造依据设计要素的基础上,针对其种类形式各异、复杂曲面和复杂刻线并存的特点,采用多种视觉测量手段综合的测量方法,实现三维数据的高精度完整采集;根据实物的大小、形式、复杂程度的不同给出测量策略和模型重建方法,提出一种以曲面外形与基准刻线等关键测量数据为基础、结合理论二维图纸的数字化转化方法,能够有效提高工作效率。

## 实物制造依据分析

### 1 设计要素

在模拟量协调方法中,航空实物制造依据有样板、标准样件、模具、夹具、装配型架等<sup>[8]</sup>,其设计要素主要有:几何外形、基准、零件边缘轮廓以及标识。图1为典型的某飞机前机身标准样件的设计要素示意图。

几何外形是指实物制造依据的主体表面外形,通常由多张曲面通过

一定的连续性拼接而成。由于飞机外形的复杂性,几何外形多由自由曲面构成。

基准按实物制造依据在设计制造过程中所处的阶段可分为全机级、部件级、组件级和零件级基准,在几何上可表现为刻线、销柱和定位孔等。刻线基准根据所表达的内容不同又可分为站位线、水平线和剖面线,用来对制造依据、飞机结构或者相关零部件产品的空间位置进行定位,有时根据功能不同分别称作基准线和结构线,在本文中统一称为基准线。销柱和定位孔在几何上为圆柱体。

零件边缘轮廓是指制造依据上所表达的肋、长桁、蒙皮、口盖等零部

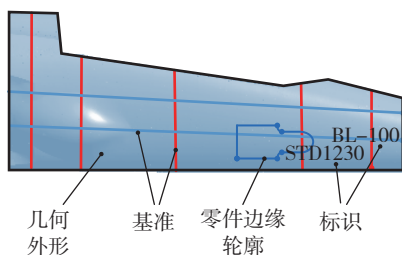


图1 实物制造依据中的设计要素  
Fig.1 Crucial geometry elements in design of aircraft manufacture tooling



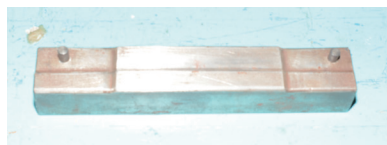
(a) 机身样件



(b) 拉型模



(c) 落锤模



(d) 手打模

图2 典型航空实物制造依据

Fig.2 Typical aircraft manufacture toolings

件产品的边缘轮廓,也可称为零件外形线。这些零部件多为薄壁结构,其表面与制造依据表面相一致或者互为相反,其边缘轮廓则通过刻线来表达。一些标准样件所表达或关联的零件很多,大量零件边缘轮廓形成十分庞杂的刻线,特别是同一标准样件上还会具有改型的不同批次飞机零件的各种刻线,更增加了刻线的复杂性。实际上,图1中所示的标准样件,其关联的零件多达50多件,图中仅示意了其中一个零件的轮廓。

标识是为辅助表达制造依据上的刻线内容而刻上的文字、数字、符号等内容,例如站位线标识、零件图号标识等。

为将实物制造依据转化为数字化制造依据,需要保证以上设计要素的完整数据采集和模型重建。

### 2 测量方法的选择及测量影响因素

航空实物制造依据种类多样,图2展示了一些典型的实例。

如果采用传统的三坐标测量机进行测量,则存在测量速度慢、变换实物的装夹位置和测量找正工作量大、测量数据点过少而无法描述实物制造依据外形情况等不足之处。摄

影测量、结构光扫描测量等视觉测量手段<sup>[9]</sup>是近年来发展较快的新型测量技术,具有测量速度快、精度高、现场适应性好等优点,是飞机实物制造依据三维数字化测量的首选方法。视觉测量方法的影响因素有:

(1)外形大小。对大型实物,要考虑测量转站或者数据拼接误差累积问题。实物制造依据中有超过几米的样件、型胎等大型实物,如图2(a)中的机身样件长达4m多。

(2)曲率变化。当零件表面曲率变化大或者有棱边等特征,需要考虑测量数据是否具有细节描述能力。图2(a)、(c)、(d)中均有曲率大的区域或棱边特征。

(3)材质。不同材质的表面亮度及反光性对视觉测量有影响。飞机实物制造依据中有环氧树脂、铅锌合金、合金钢等多种材质,如图2(c)中的实物较暗,而图2(d)中的实物则反光。

(4)刻线。对于宽度窄、深度浅的刻线(宽度与深度均小于1mm),通常的视觉测量方法无法通过图像技术直接进行识别。实物制造依据上有大量的基准刻线和零件边缘轮廓线,图2中各实物表面均有这类刻线,其中图2(a)中的样件上分布的各类刻线多达几百条。

结构光扫描测量实现对曲率变化大或者棱边特征的细节描述,目前的蓝色结构光能够有效解决表面较暗或反光问题,光学追踪的接触式测量通过人工打点对浅刻线进行测量。

测量前进行准备工作:对被测物实物制造依据进行清理,在被测物和测量辅助工装上布置视觉靶点(包括编码点和普通标记点)。视觉综合测量方法的工作过程如图3所示,首先采用摄影测量方法重建视觉靶点的空间位置,构造一个涵盖所有靶点的全局坐标系;再用结构光扫描测量方法从各个角度对被测物进行扫描,获得大量的表面点云数据;最后采用光学追踪的接触式测量方法对表面刻线、销/孔等特征元素进行测量,获得刻线点、特征元素数据。

实物制造依据中的各设计要素可得到完整测量,并通过视觉靶点统一在同一坐标系下。其中,几何外形的测量数据为表面点云,产品轮廓边缘的测量数据为离散刻线点,基准的测量数据为离散刻线点或圆柱/孔等特征元素,这些测量数据根据标识进行有效的分组管理。

## 2 测量策略

视觉综合测量方法能够实现高精度的三维数据完整采集,但是如果

对各种大小、形式、复杂程度不同的实物均完全采用图3所示的工作流程,则并不合适。特别是光学追踪的接触式测量,虽然灵活性好,但是测量速度较慢。因此,为提高测量效率,提出如下测量策略。

(1)测量方法灵活组合。3种测量方法可以有多种组合方式,完整的组合为ABC方式(A表示摄影测量,B表示结构光扫描测量,C表示光学追踪的接触式测量),适用于复杂大型实物与复杂刻线的测量。当实物表面没有刻线时,可以采用AB组合。若实物尺寸不大,则只需要几个角度就能够实现测量,就不存在拼合误差的累积问题,通常当扫描角度不多于10个时,可以采用BC组合。灵活的测量组合提高了测量效率。

(2)从庞杂刻线要素中选择关键基准线进行测量。有些实物制造依据(特别是一些大型标准样件)表面的刻线数量庞大、形状繁杂,从中选择关键基准线进行测量,确定实物样件的曲面与机身整体结构之间的位置关系,其他的站位线、水平线、零件轮廓线等可在需要时根据二维图纸进一步生成,这也是本文通过现场实际测量和对问题具体分析得出的对这类大型复杂实物制造依据进行数字化测量的一条切实可行的技术

## 测量方案

### 1 视觉综合测量方法

对实物制造依据进行测量,不但要求能够快速获得设计要素数据,而且需要解决大型实物数据拼接误差累积、细节描述、表面暗或反光、浅刻线等多个难题,单一的测量方法无法解决所有问题。本文采用文献[10]中介绍的综合测量方法:以视觉目标点为桥梁综合采用摄影测量、结构光扫描测量和光学追踪的接触式测量3种方法。

摄影测量通过构造一个全局坐标系来消除数据拼接误差累积问题,

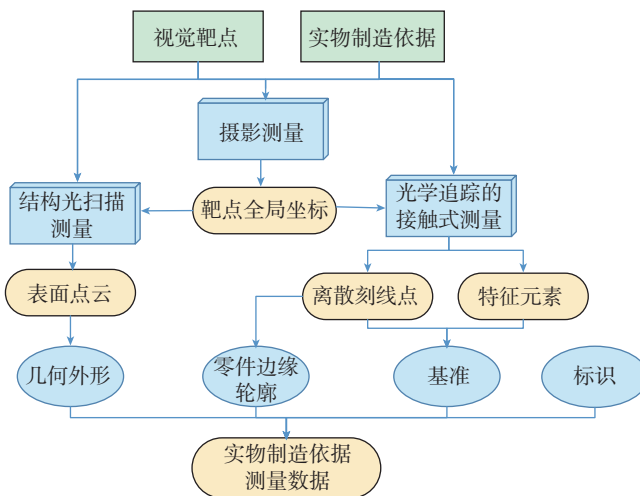


图3 实物制造依据的视觉综合测量工作流程

Fig.3 Integrated vision measuring process for manufacture toolings

路线,不但减少了测量工作量,也提高了模型重建工作的效率。

## 模型重建

### 1 实物制造依据重建流程

实物制造依据测量数据包括3类:点云数据、刻线点数据和特征数据,其中点云表示实物的几何外形,刻线点则表示基准和零件轮廓外形,特征数据数量较少,有销/孔等圆柱特征。模型重建流程如图4所示。

首先建立模型的坐标系,对有站位线、水平线、对称平面、销/孔定位等基准数据的模型,可根据这些基准来建立坐标系,对一些没有建坐标系特征的曲面模型,如部分型胎、正/反模型等,也可不重新建立坐标系。

然后对刻线点和表面点云分别进行构造。刻线点分组后,根据刻线类型进行自由曲线拟合或者二次曲线拟合,并进行求交、裁剪、延伸等曲线编辑,获得刻线的曲线模型;如果刻线为截面线,则可拟合成截面。

对点云数据,按外形特征进行数据分块,对各块数据分别进行自由曲面拟合、平面拟合或二次曲面拟合,然后进行曲面求交、裁剪、延伸、过渡、填充等曲面编辑,获得曲面模型。

将生成的曲线、曲面、平面进行融合,使得刻线位于曲面上。融合主要有两种方法:一种是将刻线所在

的截平面与曲面求交,此方法适用于站位线、水平线等刻线;另一种是将刻线曲线投影至曲面上,此方法适用于模具上的零件轮廓线。

### 2 曲面重建方法与原则

在实物制造依据的模型重建过程中,难点和关键因素是曲线/曲面重建方法的选择和曲线/曲面拼接时连续性的保证,特别是对一些曲率变化大、无法划分为四边域的局部区域,难度十分大。这里以曲面重建为重点给出重建方法和原则。

(1) 曲面片划分需依据模型特点、曲率变化和易于拼接3个原则来进行。模型上很多地方有着明显的曲面片分界,可以直接在该处进行划分;同一曲面片内的曲率尽量均匀,因此曲率突变的区域往往是曲面片划分的边界;有时,如果曲面片太大而难以保证整体拟合精度,需要在中间易于拼接处进行划分。具体实施方法可参验证实例。

(2) 自由曲面构造方法很多,但适于重建的方法主要是基于截面线的曲面拟合和基于点云的曲面拟合两类。第一种是先的点云上构造曲线再构造曲面,适用于桶形曲面或能够找出其扫略规律的曲面;后面一种是直接根据点云构造四边域曲面,重构时还可指定边界曲线或者与相邻曲面的连续性约束,因而对重建工

作有更强的适应性,也是实物制造依据模型重建中采用最多的方法。

(3) 曲面片重构时的精度和光顺性需要平衡取舍。曲面重构允许误差的设置通常不大于实物制造误差和测量误差的综合,如果在此误差下曲面光顺性较差,则需要在两者间进行平衡取舍。

(4) 曲面拼接光顺性应充分利用曲面编辑功能来保证。一张曲面片内部的重构精度和光顺性是相对容易获得的,多张曲面拼接处的光顺性如果直接依靠曲面重建时添加的连续性约束,则往往会影响局部曲面的波动而造成光顺性差,此时可以对曲面进行裁剪再添加过渡曲面或填充曲面来保证光顺性。

以下实例是按照这些重建方法和原则来实现的。

## 实例验证

### 1 机身样件验证

以图2(a)中的机身样件为例进行数字化测量与模型重建。该样件尺寸大(4.0m × 1.0m × 1.4m)、曲面复杂、刻线繁多,采用ABC的组合方式进行测量。在表面刻线中选择了部分关键基准线进行测量,其他基准线和轮廓线将在后续工作中根据二维图纸来生成。

图5(a)为摄影测量方法从各角度拍摄的图像以及识别标记点的空间坐标,这些标记点在统一的全局坐标系下。结构光扫描测量方法每次扫描的测量范围约400mm × 500mm,借助工装的旋转来改变样件与测量仪之间的相对位置与姿态,多次从不同角度测量可以获得各处的表面点云,见图5(b)。采用选择关键基准线进行刻线测量的策略,前机身样件上的关键站位线和水平线的测量结果如5(c)所示。

对图5测量结果进行模型重建,结果如图6所示。按照标识对测量数据进行分组管理,测量数据的结构

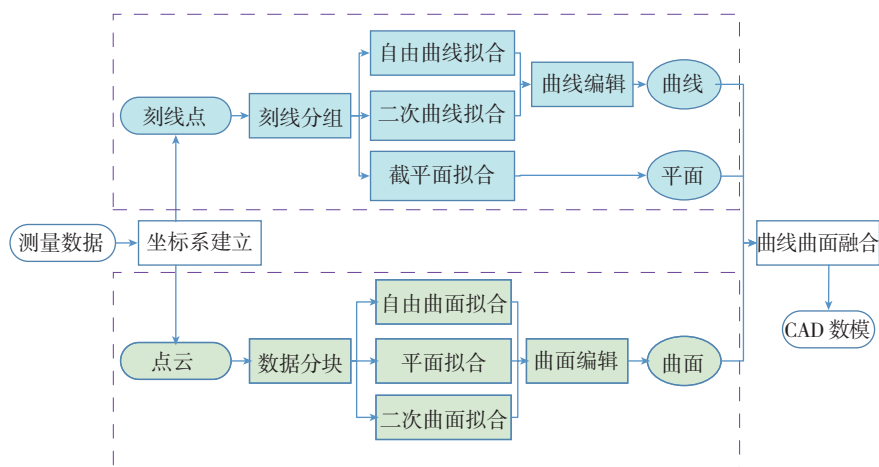
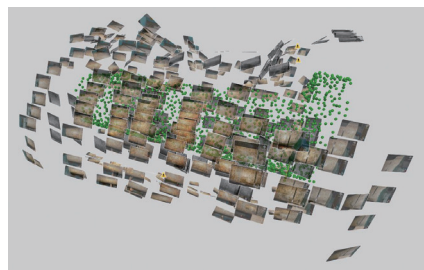


图4 模型重建流程

Fig.4 Process of model reconstruction

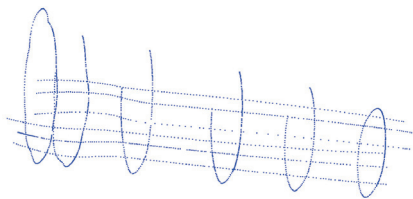
树见图 6 (a)。对表面点云进行分块、曲面拟合、裁剪、过渡等工作,图 6 (b) 显示了依据模型特点、曲率变化和易于拼接的原则划分的曲面边界,也显示了采用基于截面线和基于点云两种方法拟合的曲面,拟合的曲



(a) 拍摄的图像及识别的标记点



(b) 表面点云



(c) 刻线点

图5 前机身样件测量结果

Fig.5 Measuring data of the master tooling for an aircraft front fuselage

面有良好的光顺性,点云与重建曲面间的平均误差为 0.115mm,标准差为 0.130mm。

该样件的基准刻线都位于平面上,对各刻线所在截面进行平面拟合,然后与曲面进行求交,刻线结果如图 6 (c) 所示,刻线点与重建刻线间的平均误差为 0.179mm,标准差为 0.129mm。

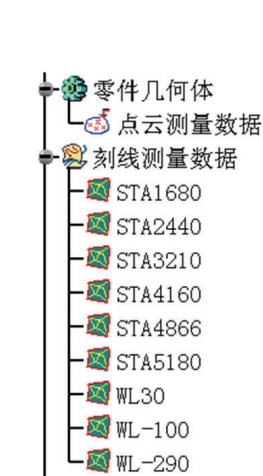
## 2 拉型模验证

选取图 2 (b) 中的拉型模(长度为 0.9m,宽度为 0.8m)对本文方法的精度进行验证,该模型已有 CAD 数模,并事先采用高精度三坐标测量机对表面关键点进行检测,误差范围为  $-0.125\sim-0.011\text{mm}$ 。

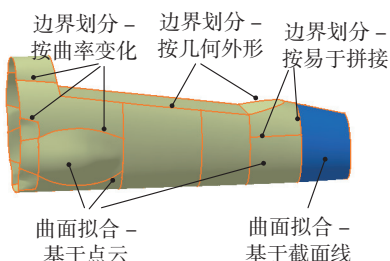
本文方法测量和模型重建结果如图 7 所示。图 7 (a) 为采用 BC 组合方式测量的数据,包括模具的表面外形点云和 4 条零件轮廓线刻点;图 7 (b) 为曲面重建结果,由 6 张曲面经过裁剪拼接而成;图 7 (c) 为刻线重建结果;图 7 (d) 为采用曲线向曲面投影后的融合结果;图 7 (e) 为表面关键点与重构曲面间的误差,误差范围为  $-0.180\sim 0.213\text{mm}$ 。

## 结论

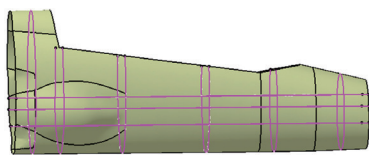
(1) 综合采用摄影测量、结构光



(a) 测量数据分组管理



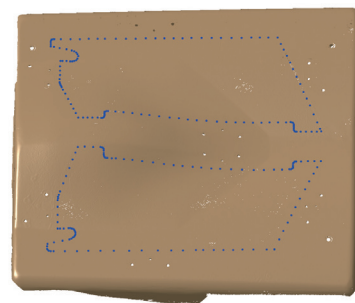
(b) 曲面片划分及重建结果



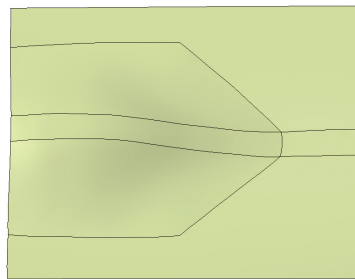
(c) 刻线重建结果

图6 前机身样件重建结果

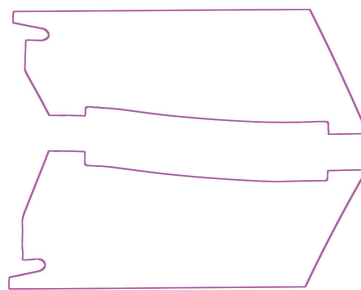
Fig.6 Model reconstruction result of the master tooling for an aircraft front fuselage



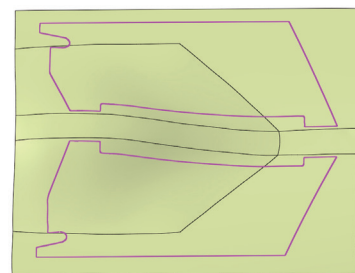
(a) 测量数据



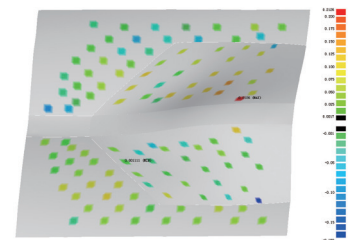
(b) 曲面重建结果



(c) 刻线重建结果



(d) 曲线曲面融合结果



(e) 表面关键点与重构曲面的误差

图7 拉型模测量与重建结果

Fig.7 Model reconstruction result of the drawing mould

扫描测量和光学追踪的接触式测量,可以实现对种类形式各异、复杂曲面和复杂刻线并存的航空实物制造依据进行三维数据的高精度完整采集。

(2)根据实物制造依据的特点,从中选择关键基准线进行测量,确定实物样件的曲面与机身整体结构之间的位置关系,其他的站位线、水平线、零件轮廓线等在需要时根据二维图纸进一步生成,大大提高了测量与模型重建效率。

### 参考文献

- [1] VARADY T, MARTIN R, COX J. Reverse engineering of geometric models—an introduction[J]. *Computer-Aided Design*, 1997, 29(4): 255–268.
- [2] RAJA V, FERNANDES K. Reverse engineering: an industrial perspective[M]. London: Springer, 2008: 1–69.
- [3] BURSTON M, SABATINI R, CLOTHIER R, et al. Reverse engineering of a fixed wing unmanned aircraft 6-DoF model for navigation and guidance applications[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, 629(1): 164–169.
- [4] ANWER N, MATHIEU L. From reverse engineering to shape engineering in mechanical design[J]. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 2016, 65(1): 165–168.
- [5] 陈文, 魏猛. 基于逆向工程的飞机外形设计[J]. *测控技术*, 2015, 34(S): 1–3.
- CHEN Wen, WEI Meng. Design of aircraft configuration based on reverse engineering[J]. *Measurement & Control Technology*, 2015, 34(S): 1–3.
- [6] 景智, 许学军. 关于提高大型工装逆向及加工精度的探讨[J]. *测控技术*, 2012, 31(S): 288–290.
- JING Zhi, XU Xuejun. Research on improving reverse engineering and precision in large processing equipment[J]. *Measurement & Control Technology*, 2012, 31(S): 288–290.
- [7] 王相君, 赵肖楠. 运-12飞机发房模具高精度逆向设计[J]. *长春理工大学学报(自然科学版)*, 2014, 37(6): 39–42.
- WANG Xiangjun, ZHAO Xiaonan. High-precision reverse design of transport-12 aircraft engine room mold[J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2014, 37(6): 39–42.
- [8] 周秋忠, 范玉青. 基于数字标工模型的飞机数字化协调方法[J]. *计算机集成制造系统*, 2008, 14(4): 683–689.
- ZHOU Qiuzhong, FAN Yuqing. Digital coordination method for aircraft based on digital master tooling[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2008, 14(4): 683–689.
- [9] PEGGS G N, MAROPOULOS P G, HUGHES E B, et al. Recent developments in large-scale dimensional metrology[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2009, 223(6): 571–595.
- [10] 刘胜兰, 张丽艳. 三维数字化综合测量及其关键技术[J]. *航空制造技术*, 2011, 54(21): 83–86.
- LIU Shenglan, ZHANG Liyan. Integrated solution and key technology for 3D coordinate measuring[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2011, 54(21): 83–86.

通讯作者: 刘胜兰, 博士, 副教授, 研究方向为数字化测量、计算机辅助几何设计、数据处理, E-mail: meeslliu@nuaa.edu.cn.

## 3D Metrology and Model Reconstruction Method for Physical Tooling in Aircraft Manufacturing

CHEN Lili<sup>1</sup>, YIN Huabin<sup>1</sup>, LIU Shenglan<sup>2</sup>, ZHANG Liyan<sup>2</sup>

(1. Manufacturing Technology & Project Control Department, AVIC Chengdu Aircraft Industrial (Group) Co., Ltd., Chengdu 610091, China;

2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China)

**[ABSTRACT]** In aircraft manufacturing, there are various types of physical toolings such as template, master tooling, mould and so on. It is quite a challenge to convert these physical toolings to digital ones due to their variable forms and complex shapes which comprise freeform surfaces, complicated carved curves and details. In this paper, the 3D metrology and model reconstruction method for digitizing the physical toolings are discussed. First, the crucial geometry elements in design of aircraft manufacture tooling are summed up and analyzed. Then, an integrated 3D metrology, which composites a photogrammetry, a structure light scanner, and an optical tracking tactile probe, is utilized to capture the physical toolings. The integrated metrology combines the advantages of all of the three techniques and is able to provide measuring data with completeness and high precision. Thereafter the strategy for improving the process efficiency is presented by considering the size, form and complexity of the physical toolings. For the tooling with large size and high complexity, the converting strategy is set to not use the whole measuring data, but the surface point clouds, a few basis carved curve points which indicate the structure of the aircraft, and the existing 2D drawings. It is highly efficiency and the precision meets the needs.

**Keywords:** Aircraft; Master tooling; Mold; Vision measurement; Model reconstruction

(责编 李丹)