

文章编号:1674-8190(2013)01-085-05

基于三维测量技术的飞机表面波纹度数字化分析方法

金鼎, 吴剑

(中国商用飞机有限责任公司 上海飞机设计研究院, 上海 201210)

摘要: 飞机表面某些特殊区域的波纹度会对飞机的气动特性和飞行性能产生较大影响, 因此需要精确地掌握这些区域表面的波纹度情况, 以便为设计分析和工艺改进提供参考依据。基于三维测量技术, 提出一种分析飞机表面波纹度的新方法, 该方法借助 Max/Exa-scan 三维数字测量系统采集飞机表面信息, 同时结合 CATIA 软件数字化分析功能对采集数据进行分析, 可以更精确地获得被测区域表面的波纹度情况。工程应用实践表明, 该方法在民机设计和制造工艺改进方面具有较高的工程应用价值。

关键词: 三维测量技术; 波纹度; Max/Exa-scan 三维数字测量系统; CATIA

中图分类号: V262.7

文献标识码: A

A New Analysis Method of Aircraft Surface Waviness Based on 3D Measurement Technology

Jin Ding, Wu Jian

(Shanghai Aircraft Design and Research Institute, Commercial Aircraft Corporation of China, Ltd., Shanghai 201210, China)

Abstract: Some waviness of aircraft surface in special area will seriously affect the aerodynamic characteristics and flight performance. The waviness of these special areas needs to be measured accurately in order to get reference for design analysis and manufacturing technology improvement. A new analysis method of aircraft surface waviness is proposed, which is based on the 3D measurement technology. In the method, the Max/Exa-scan system is used to get the surface information of an actual aircraft at first. Then the analysis functions of CATIA are used to analyze the waviness of measured area. In the end, an example is given to show the feasibility and effectiveness of this method.

Key words: 3D measurement technology; waviness; Max/Exa-scan system; CATIA

0 引言

波纹度是指间隔距离大于粗糙度而小于表面几何形状偏差的表面几何不平度, 工程中常用的描述波纹度情况的参数有波幅和波纹斜率。波纹度的定义如图 1 所示。按照定义, 相邻最高点间的距离称为波纹长度, 用 λ 表示; 波幅为波谷至两波峰连线的距离, 用 D 表示; 波纹斜率用 D/x 表示, 其中 x 为沿波峰连线从波的最大深度点到两波峰的距离较小者。

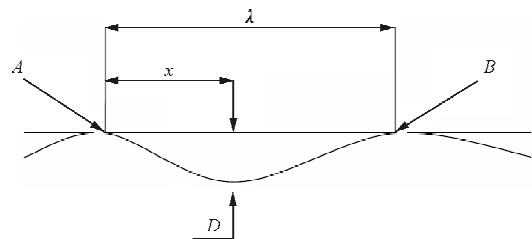


图 1 波纹度定义

Fig. 1 Definition of waviness

飞机表面某些特殊区域的波纹度会对飞机的气动特性和飞行性能产生较大影响, 比如: 空速管附近的波纹度情况会影响传感器压强测量值, 进而

影响飞机测速;静压口附近的波纹度情况直接影响民用飞机缩小最小垂直间隔(RVSM)运行能力的适航取证^[1]。因此,需要对这些区域表面的波纹度进行精确测量,以便为设计分析和工艺改进提供参考依据。

1 现有方法简介

目前国内外航空领域对波纹度的检测方法主要有以下三种:

(1) 钢尺法。检测时将钢尺置于待测区域之上,通过测量间隙获得相关的波纹度数据。该方法一般应用于曲率没有变化的区域,如测量飞机等直段沿航向的波纹度。其特点是简单快速,对测量环境、飞机状态和设备的要求较低,但适用性差,在大多数有曲率变化的情况下都不适用,精度也不高。

(2) 卡板法。此方法的原理与钢尺法类似,当待测区域存在曲率变化时,钢尺法不能适用,需要用与待测曲面形状变化一致的卡板作为基准。此方法与钢尺法一样具有简单、快捷的特点,并且比钢尺法适用范围广。但由于曲面形状各不相同,一块卡板只能用于某一特定区域的测量,因而不同曲面或者同一曲面不同位置的测量都需要制作不同卡板,对卡板形状、制造精度也有较高要求。

(3) 特征点样条法。其基本原理是在待测区域上按要求选取一系列特征点,然后通过测量,得到这些特征点的位置数据并组成样条,通过对样条形状的分析得到波纹度的相关参数。测量特征点位置时既可以通过激光跟踪法获得点的三维坐标,也可以通过测量与特定基准的距离获得相对位置关系。这种方法的优势在于适用性强,可应用于大多数曲面的波纹度测量,精度较高;缺点是特征点的选取与测量工作量大,且需要一定的测量环境配合,对测量设备和人员的能力也有较严格的要求。

2 基于三维测量的波纹度分析方法

随着飞机数字化技术的深入应用,精密测量技术也得到了巨大发展,尤其是非接触式三维摄影测量技术和扫描技术,在飞机的设计、生产和售后等各阶段都已大量运用。目前,三维测量设备主要有经纬仪测量系统、激光跟踪仪测量系统、激光扫描系统和三维数字摄影系统^[2]。

现阶段,各飞机制造商均已放弃使用实物样条

来检验波纹度,但尚未有其他规范成熟的测量工具来精确测量波纹度。基于三维测量技术的进步,已经在CAD系统中实现了严格的样条曲线功能,这使通过软件来精确分析飞机表面波纹度成为可能。考虑到没有现成的专业波纹度测量设备,本文通过三维测量技术采集飞机表面信息,结合CATIA软件分析功能的优势,精确地获得被测区域表面波纹度情况。该方法主要包括数据获取、数据预处理、数据分析三个步骤。

2.1 数据获取

数据获取以三维测量技术为基础,结合三维数字摄影法和激光扫描法(两者均为目前工程领域最为常用的非接触式三维测量方法),完成飞机表面信息的采集工作。

三维数字摄影法是通过特制的相机在不同位置和方向拍摄一定数量的数字图片,这些图片涵盖了待测区域上的所有测量点,通过计算机图像匹配等相关后处理技术进行拼接和修正,最终得到所有测量点的点云数据^[3]。

激光扫描法按测量原理大致可分为三类,脉冲法、激光相位法和激光三角法。脉冲法适合大范围测量,但精度较差;激光三角法的测量范围最小,受环境影响大,但测距精度最高,适用于室内精密测量;激光相位法介于两者之间,兼有二者优缺点,测距范围和受影响程度优于激光三角法,精度和扫描频率优于脉冲法^[4]。本文基于测量精度高的要求,采用激光三角法,该方法以空间交会原理为基础,基本原理如图2所示。

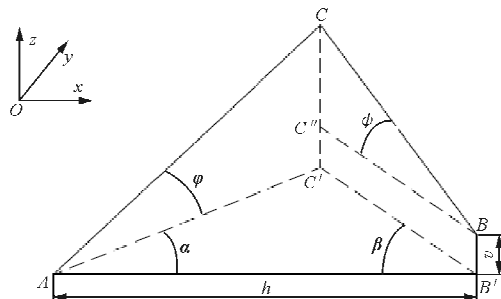


图2 激光三角法原理

Fig. 2 Principle of laser triangulation method

图2中,A、B分别为传感器探头位置,C为被测点, B' 、 C' 分别是B、C在A所在水平面的投影, C'' 为C在B所在水平面的投影。以A点为原点,

AB' 为 x 轴,过 A 点铅垂线向上为 z 轴,定义右手坐标系 $Oxyz$ 。设 C 点坐标为 (x, y, z) , $\alpha, \beta, \varphi, \psi$ 分别为 C 关于 A, B 两经纬仪的水平测角和俯仰测角。

假设 $AB' = h, BB' = v$ 已知,且令

$$s = \frac{\sin\beta}{\sin(\alpha + \beta)} \quad (1)$$

$$t = \frac{\sin\alpha}{\sin(\alpha + \beta)} \quad (2)$$

则

$$\begin{cases} AC' = h \frac{\sin\beta}{\sin(\alpha + \beta)} = h \cdot s \\ BC'' = h \frac{\sin\alpha}{\sin(\alpha + \beta)} = h \cdot t \end{cases} \quad (3)$$

可推导出 C 点的坐标为

$$\begin{cases} x = AC' \cos\alpha = h s \cos\alpha \\ y = AC' \sin\alpha = h s \sin\alpha \\ z = AC' \tan\varphi = h s \tan\varphi \end{cases} \quad (4)$$

由此便获得了 C 与 A 之间的相对位置关系,同理,可以获得 C 与 B 之间的相对位置关系,通过两个探头建立互联就可以定位 C 的空间位置。实际操作时依次扫描标示点,建立相互之间的空间位置关系,最后就能得到完整的空间点云。

本文采用 Max/Exa-scan 系统来完成飞机表面信息采集工作,该系统集成了三维摄影测量和激光扫描测量,两者即可自成体系单独完成测量,也可完美地结合在一个坐标系下。该系统可以方便、快速地完成飞机表面信息的采集工作,整套系统的测量精度约为 0.045 mm/m 。Max/Exa-scan 三维测量系统手持式探头如图 3 所示。

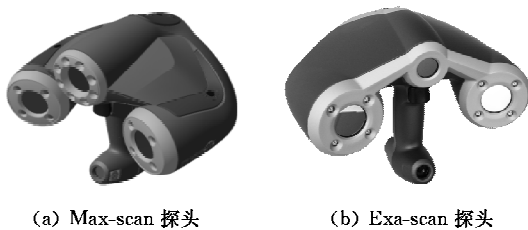


图 3 Max/Exa-scan 三维测量系统手持式探头
Fig. 3 Handheld probe of Max/Exa-scan system

测量时,首先需要在待测区域蒙皮表面粘贴反光测量点,粘贴点密度视表面区域曲率变化情况而定,原则上曲率变化较大或曲率半径较小的部位应适当加密。然后,使用 Max/Exa-scan 三维数字测量系统对该区域实施三维摄影测量和激光扫描测

量,分别得到所有反光测量点的点云数据和在此基础上加密的点云数据。

2.2 数据预处理

为了最终得到精确的波纹度分析结果,需要对测量所得数据进行预处理。数据预处理包括以下五个步骤:

(1) 数据导入:将三维摄影测量系统采集的数据通过数据接口传入 CATIA 系统,生成数据点云;

(2) 点云初步拟合:选取测得的特殊数据点(如飞机水平测量点)为数据点云建立坐标系,并用水平测量点理论坐标在理论蒙皮外形数模中建立相应的坐标系,通过坐标系转换将数据点云拟合到理论蒙皮外形上,拟合误差小于 1 mm ;

(3) 点云数据处理:对数据点云进行处理,去除坏点和部分非对称区域数据点,以提高与理论蒙皮外形面的拟合精度;

(4) 点云精确拟合:运用 CATIA 软件中的三角面片法生成的真实蒙皮渲染面^[5],并以理论蒙皮外形面为基准,运用 CATIA 软件 DSE(Digitized Shape Editor)模块中的 best fit 功能,将所测得的真实蒙皮渲染面精确拟合到理论蒙皮外形面上。精确拟合后,拟合误差由小于 1 mm 降低到小于 0.25 mm 。因为拟合误差为真实蒙皮和理论蒙皮之间面与面的整体误差,所以该误差对垂直于飞机表面方向的偏差的影响可忽略不计;

(5) 数据取样分析:将真实蒙皮渲染面和理论蒙皮外形面按一定的特征剖面切割为一条条剖面线,特征剖面的选取原则是尽可能地平均分布在曲面区域,涵盖典型位置,并且要尽量避开接头等附属物以保证曲线质量,特征剖面的数量越多分析结果就越能反映整体波纹度情况。数据预处理结果如图 4 所示。

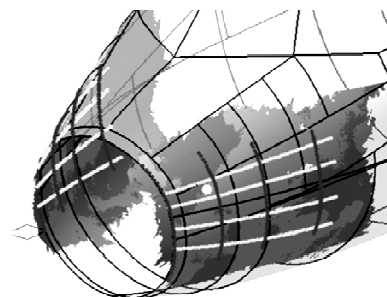


图 4 数据预处理结果
Fig. 4 Data preprocessing results

2.3 数据分析

在真实蒙皮渲染面和理论蒙皮外形面的剖面线上分别等间距提取一系列特征点,原则上特征点的密度越大越能精确反映波纹度情况。本文选取特征点间隔约为 25 mm,对波长 200 mm 左右的波纹而言,斜率精度优于 0.001。根据选取的特征点,利用偏差分析功能得到实测数据和理论数据的偏差情况,将实际偏差量放大 100 倍以便更直观地反映波纹情况,如图 5 所示。此时,样条线偏差的基准是理论蒙皮外形面上的剖面线。

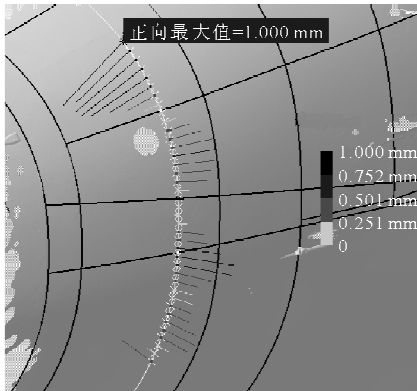


图 5 实测数据和理论数据的偏差分析
Fig. 5 Deviation analysis of measured data and theoretical data

把样条上特征点的偏差情况转换为一条直线上的偏差情况,也就是把波纹度的基准从曲线转换为直线进行分析。将图 5 中的曲线偏差,经过转换,得到的直线偏差如图 6 所示。图 6 中,波纹的幅值为实际的 100 倍,波长与实际一致,将偏差连成样条,利用 CATIA 测量工具就可以分析波纹度情况。

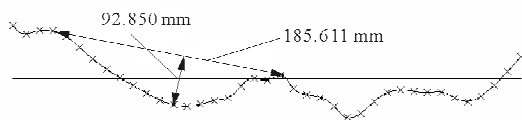


图 6 波纹度基准从曲线转换为直线
Fig. 6 Transform waviness datum from curve to straight line

3 实例分析

采用本文所述方法来分析某民机静压探头区

域表面的波纹度,从而说明本方法的实际使用情况。首先,应用 Max/Exa-scan 三维数字测量系统采集某民机静压探头区域蒙皮表面信息,测得的数据点云经数据预处理得到实际蒙皮渲染面;在该渲染面上按不同方向和位置选取特征剖面,通过对特征剖面的剖面线进行偏差分析,以特征剖面的波纹度来反映渲染面的整体波纹度,所测真实蒙皮表面及待分析位置示意图如图 7 所示。

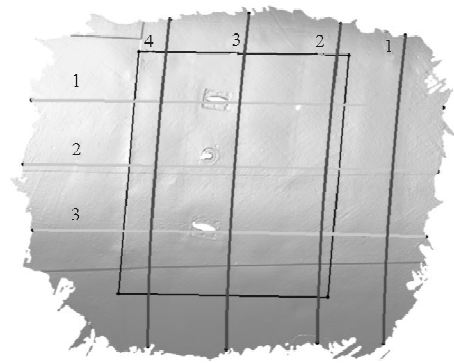


图 7 所测真实蒙皮表面及待分析位置
Fig. 7 Measured area and the analysis range

本例中,横向选取三个剖面,纵向选取四个剖面,分别对每一特征剖面进行分析,可以得到比较全面的测量区域波纹度情况。测量分析结果如表 1~表 3 所示。表 1 统计了每个剖面较大的波幅和斜率,表 2、表 3 分别反映了整体区域的波幅、斜率分布情况。

表 1 各剖面波纹度分析结果

Table 1 Analysis result of each profile waviness

测量剖面	横向剖面		纵向剖面	
	波幅/mm	斜率	波幅/mm	斜率
剖面 1	0.72	0.005 2	0.72	0.005 2
	0.94	0.008 4	0.62	0.008 5
	0.46	0.002 6	0.99	0.010 6
剖面 2	0.94	0.005 9	0.58	0.007 6
	0.77	0.011 4	0.62	0.003 4
剖面 3	0.77	0.005 7	0.93	0.008 3
	0.61	0.004 1	0.74	0.004 4
	0.60	0.008 0	1.41	0.012 1
剖面 4	0.52	0.012 6	0.94	0.014 7
	—	—	1.22	0.008 1
	—	—	0.98	0.008 8
			0.51	0.006 3

表 2 波幅分布情况

Table 2 Distributing of amplitude

波幅/mm	分布情况	波幅/mm	分布情况
$D \leq 0.7$	0.262	$1.4 < D \leq 1.8$	0.024
$0.7 < D \leq 0.9$	0.452	$1.8 < D \leq 3.0$	0
$0.9 < D \leq 1.2$	0.214	$D > 3.0$	0
$1.2 < D \leq 1.4$	0.048		

表 3 斜率分布情况

Table 2 Distributing of slope

斜率	分布情况
$D/x \leq 0.0025$	0
$0.0025 < D/x \leq 0.0040$	0.071
$0.0040 < D/x \leq 0.0060$	0.286
$0.0060 < D/x \leq 0.0080$	0.286
$0.0080 < D/x \leq 0.0100$	0.238
$0.0100 < D/x \leq 0.0120$	0.071
$D/x > 0.0120$	0.048

考虑 Max/Exa-scan 三维数字测量系统的测量精度约为 0.045 mm/m, 且 0.25 mm 的整体拟合误差对垂直于飞机表面方向的偏差分析的影响可以忽略不计, 因此, 上述结果中 D 和 x 在小数点后保留两位有效数字, 最终结果波幅精度优于 0.1 mm, 斜率精度优于 0.001。

4 结 论

本文提出了一种分析飞机表面波纹度的新方法, 该方法结合了三维测量技术和 CATIA 软件的数字化分析功能, 兼具三维测量的数据完整性和 CATIA 数字化分析功能的高精度。该方法已成功实现了两个型号多架飞机表面波纹度的精确测量, 测量结果可用于飞机表面波纹模型建立、波纹度影响分析研究以及工艺要求的改进。

工程应用实践表明, 该方法在民机设计和制造工艺改进方面具有较高的工程应用价值。另外, 需要指出的是, 目前该方法仍依靠人工抽样和统计, 若要求短期内对多架飞机、多区域进行批量检测, 该方法显得效率不高。因此, 后续研究将基于本文

所述方法, 结合 CATIA 软件的 CAA 二次开发功能, 开发点云数据批处理程序, 完成自动抽样和统计, 以改进该方法的不足。

参 考 文 献

- [1] 周颖. 飞机 RVSM 系统分析与测试[J]. 中国高新技术企业, 2010(19): 9-10.
Zhou Ying. Analysis and test of aircraft RVSM system[J]. China Hi-Tech Enterprises, 2010(19): 9-10. (in Chinese)
- [2] 赵小辉, 丁玲, 王磊. 三维光学形貌测量系统在飞机研制中的应用[C]. 上海: 中国航空学会总体分会几何设计专业第九次学术交流会, 2010.
Zhao Xiaohui, Ding Ling, Wang Lei. The application of 3D optical topography measurement system in the research of aircraft[C]. Shanghai: The 9th Geometric Design Specialty Exchange of China Aviation Learn to Overall Branch, 2010. (in Chinese)
- [3] 黄桂平, 范生宏. 大尺寸三维测量设备及其在飞机制造中的应用[C]. 上海: 中国航空学会总体分会几何设计专业第九次学术交流会, 2010.
Huang Guiping, Fan Shenghong. Large size 3D equipment and application in aircraft manufacturing[C]. Shanghai: The 9th Geometric Design Specialty Exchange of China Aviation Learn to Overall Branch, 2010. (in Chinese)
- [4] 黄桂平, 钦桂勤. 大尺寸三坐标测量方法与系统[J]. 宇航计测技术, 2007, 27(4): 15-19.
Huang Guiping, Qin Guiqin. Measurement methods of the large scale 3D coordinate and its system[J]. Journal of Astronautic Metrology and Measurement, 2007, 27(4): 15-19. (in Chinese)
- [5] 胡安文, 季铮, 盛庆红. 基于近景数字摄影测量的飞机表面模型重建[J]. 地理空间信息, 2004, 2(6): 23-25, 42.
Hu Anwen, Ji Zheng, Sheng Qinghong. Reconstruction of the plane surface model based on close-range digital photogrammetry[J]. Geospatial Information, 2004, 2(6): 23-25, 42. (in Chinese)

作者简介:

金 鼎(1986—), 男, 硕士, 助理工程师。主要研究方向: 飞机总体外形设计。

吴 剑(1986—), 男, 硕士, 助理工程师。主要研究方向: 飞机总体外形设计。

(编辑: 马文静)