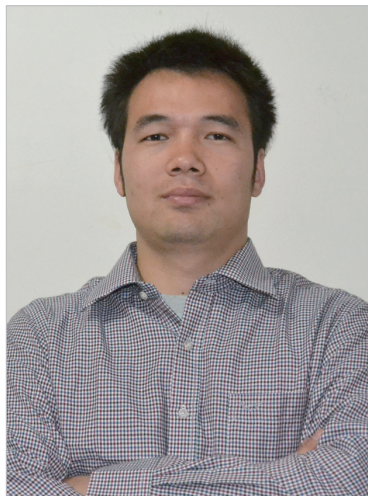


# 机身部件柔性装配数字化 测量技术应用\*

## Application of Digital Measurement Technology in Aircraft Fuselage Flexible Assembly

北京航空航天大学机械工程及自动化学院 汪西 张俐 王亮 李东升



汪西

北京航空航天大学机械工程及自动化学院飞行器制造工程系硕士研究生。研究方向为飞机柔性装配和数字化测量技术应用。目前参与的课题有：由北京航空航天大学、北京航空制造研究所(625所)和沈阳飞机工业集团公司合作的国防基础科研重点项目——《飞机大部件自动化装配技术》；北京航空航天大学和沈阳飞机工业集团公司合作的平垂尾大部件对接项目；北京航空航天大学和上海飞机制造有限公司合作的基于MBD环境下的民机对接工艺装备研究。

飞机部件级装配由于大多零组件外形结构复杂，装配工作量大，采用传统的刚性工装装配，成本高、效率低，精度也不高。因此，飞机部件的数字化柔性装配技术亟需深入的应用研究。本文主要针对机身部件数字化柔性装配中的数字化测量技术展开应用研究，为提高飞机装配精度，保证装配质量提供基础技术支持。

随着航空制造技术的不断发展，我国现代飞机的装配工艺正由传统的模线模板、刚性工装等模拟量传递协调的方法向柔性装配的数字量传递的方法转变。数字化、自动化和信息化已经成为飞机装配的主流趋势。在“十一五”期间，各大主机厂、航空院校和研究所充分发挥产学研模式的优势，对数字化柔性装配技术进行了深入研究和应用，在飞机壁板类组件级柔性装配和大部件对接柔性装配方面取得了部分成果，有了比较成熟的应用，基于激光跟踪仪的数字化测量技术已经普遍应用于各主机厂<sup>[1-3]</sup>。但是作为飞机装配中的关键一环，部件级装配在数字化柔性装配技术方面还比较薄弱，无论是柔性工装还是数字化测量，其应用研究都刚刚起步。

为了实现数字化精确装配，飞机在零组件装配、部件装配和总装对接的每一个阶段中均采用数字化测量技术，检测各项指标，同时将数字量从上游传递到下游，并且为飞行试验和新型号的研发积累科学数据。飞机部件级装配由于大多零组件外形结构复杂，装配工作量大，采用传统的刚性工装装配，成本高、效率低，精度也不高<sup>[4-6]</sup>。因此，飞机部件的数字化柔性装配技术亟需深入的应用研究。本文主要针对机身部件数字化柔性装配中的数字化测量技术展开应用研究，为提高飞机装配精度，保证装配质量提供基础技术支持。

### 飞机装配数字化 测量技术

相对于传统测量方式，数字化测

\* 国防基础科研项目(A0520110016)、国际科技合作项目(2010DFB73280)、国家科技支撑计划项目(2011BAF13B11)资助。

量技术不仅测量范围大、精度高,而且其测量结果直接以数字量表征,便于处理和共享。在整个数字化柔性装配过程中,数字化测量系统对采集的数据进行处理、传递、反馈和存储,是数字量传递调控过程中不可缺少的重要环节。

### 1 数字化装配测量系统构成

数字化测量技术是实现飞机数字化高精度装配的基础保障。广义上讲,一个完整的飞机部件数字化装配测量系统由计算机软件系统、控制系统、驱动机构、执行结构和测量系统5大部分组成<sup>[7]</sup>。这5部分按照主要的硬件设备来划分,由3部分构成:计算机平台、数字化工装以及测量设备。计算机平台是控制中枢和信息处理中心;工装和测量设备的控制和处理软件集成于计算机软件系统中,所有的数据和指令均由计算机输出,并最终反馈回计算机。整个系统是一个闭环控制系统。

系统运行流程可以简化成如下过程:首先一个结构件初步装配(Assembly)到约定位置,然后测量(Measure)它的位置,再把它移动(Move)到准确位置,即装配—测量—移动(AMM)。这是一个连续的循环的过程,不断地测量反馈,不断地调整,直至部件装配准确<sup>[8]</sup>。

### 2 激光跟踪仪及其测量软件

数字化测量系统的主要核心部分是计算机辅助测量设备和测量软件,它们在飞机装配线上主要用来测量和定位被装配产品,是飞机数字化装配系统的重要组成部分。在飞机数字化装配中应用较为广泛的先进数字化测量仪器主要有激光跟踪仪、iGPS、电子经纬仪、电子全站仪和数字照相测量系统。激光跟踪仪由于其测量范围大、精度高、动态测量、携带方便等特点,成为国内使用最广泛的大空间高精度测量设备。

以Leica AT901B激光跟踪仪为例,一套激光跟踪仪硬件设备主要包

括跟踪仪本体和控制机箱。

跟踪仪本体是整个仪器的核心部件,发出及接受反射激光,内部构造由角编码器、伺服马达和激光干涉仪等元件组成。

跟踪仪控制机箱是仪器的控制中枢,发出指令、接受数据、处理数据、传递数据,为跟踪仪本体供电等。控制机箱与跟踪仪本体是通过两根电缆连接的,其中一根电缆为跟踪仪本体供电,另外一根电缆为数据通信传送线路。

激光跟踪仪可以连续地瞄准、跟踪并确定由移动或稳定的反射靶标返回的激光束位置。这个系统应用采集的水平和垂直角来计算靶标在三维空间中的位置。发射靶标可手持或固定在机械上并通过程序控制移动。

目前使用的测量软件主要有Metrology、PC-DMIS和Spatial Analyzer(SA)。其中由美国NRK公司开发的SA软件在飞机装配系统中应用最广。该软件主要用于复杂的工业测量及分析,为各种工业测量硬件(Leica、FARO、SMX及API)提供了简单的通信端口。SA软件的开放式系统结构可使通过TCP/IP连接任意数目的端口,这些端口能在网络内的每一台电脑上同时运行。用一台电脑通过SA软件可以同时控制多台测量仪器,来进行多基站实时测量。

## 机身部件数字化柔性装配系统架构

### 1 机身及工装结构

某机身部件的主要框架结构由4个加强框和左右边梁组成,其他组件如内侧壁板和上下壁板、防火墙构

成封闭的机身结构。机身结构示意图如图1所示。

为了便于采用数字化柔性装配和测量技术,该机身部件装配采用以骨架为基准的装配方式。4个框的腹板面上下左右各有4个定位孔,柔性工装的定位器通过定位孔固定住4个加强框,机身的其他组件部件以加强框为装配基准进行装配。因此,4个加强框的装配准确度决定整个机身的装配精度乃至全机的装配质量。

该机身柔性装配工装为桥架式结构,上下各有5组横梁,每个横梁上有4~6个定位器,每个定位器具有X、Y、Z3个方向的自由度。横梁和定位器均采用伺服电机驱动。工装在装配过程中,通过定位器的数字控制运动调整来定位各个加强框,实现工装的数字化定位<sup>[9]</sup>。

### 2 机身装配平台系统

机身数字化柔性装配平台研制的主要目的是完成机身部件的数字化柔性装配与检测。平台硬件主要包括机身柔性定位总装工装1套,柔性工装工控机1台,信息控制管理用计算机1台,激光跟踪仪2台,摄

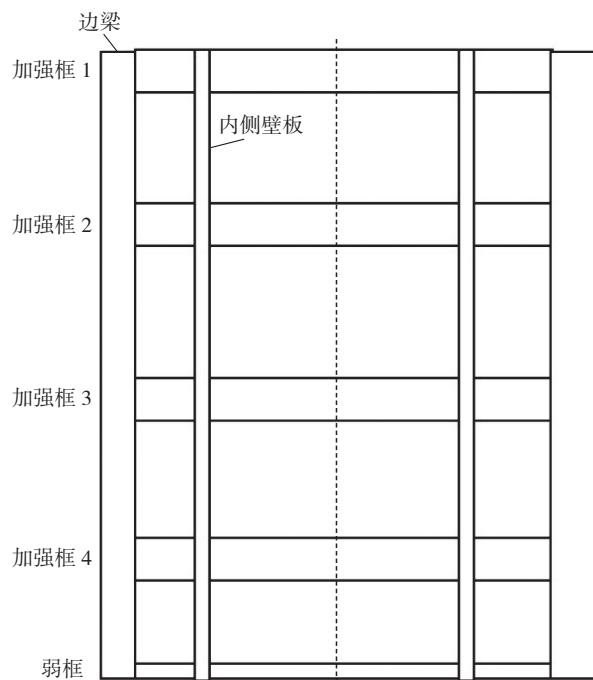


图1 机身结构示意图

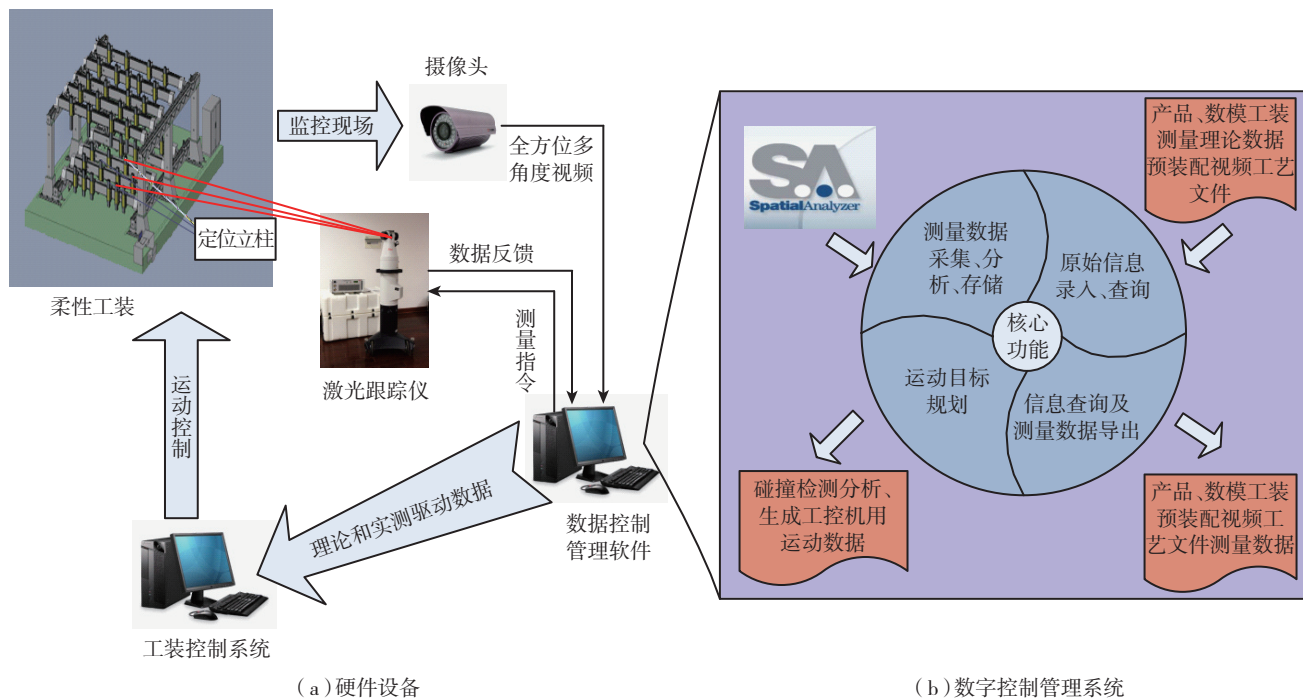


图2 机身数字化柔性装配平台

摄像头 4 个；软件包括工装控制系统 1 套，信息控制管理软件 1 套，数字化测量用 SA 软件 1 套。图 2 所示为机身数字化平台系统架构图。

## 机身数字化定位测量

### 1 测量规划

机身的主要结构和外形由卡板和定位器来保证。根据装配工艺要求，在装配过程中需要测量 4 个框在飞机航向的站位，通过定位器上的测量参考点来监控。初步装配到位后，对定位点进行测量，得出和理论位置的偏差，反馈回工装控制系统，对定位器进行微调。通过不断的测量反馈调整，直到框的装配位置达到装配精度要求。有些测量位置有遮挡或者孔位是非标准测量孔，通过转接测量方式实现。

#### (1) 激光跟踪仪布局。

根据机身及其柔性工装的整体架构，采用 2 台 Leica AT901-B 激光跟踪仪进行多基站测量。

在初始装配 4 个加强框时，两台激光跟踪仪放置在工装后方的左右发动机舱轴线位置，保证在能测量到

所有定位参考点的同时，也能测量到发动机舱内部壁板和防火墙上的发动机交点。4 个主体加强框装配完成以后，两台跟踪仪移至工装左右两侧，配合边梁装配测量。在所有装配完成以后，两台跟踪仪一前一后，测量产品关键特征点，检验装配质量。整体测量布局示意图如图 3 所示。

#### (2) 基准点布局。

基准点是整个测量的基础，通过测量基准点把测量坐标系转换到飞机坐标系下，保证后续测量数据是飞

机坐标系下的数据，可以和产品理论值直接比较。基准参考点的布局需要综合考虑工装结构和激光跟踪仪站位布局。每次参与建站的基准点所构建的测量空间，必须要包含后续所有测量点位，才能保证建站坐标系的有效精度。基准参考点布局示意图如图 4 所示。

在地基上 4 个角各设置一个工具球 (Tooling Ball) 基准点 (简称 TB 点，如图 4 中 TB101、102、103 和 104 所示)，中间位置设 2 个 (图 4 中

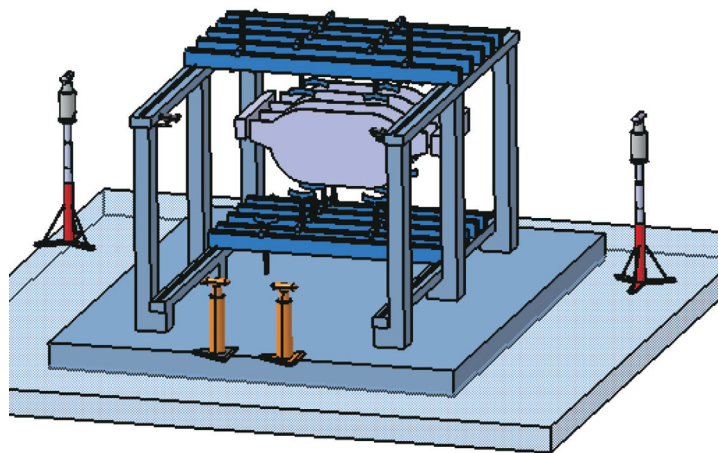


图3 激光跟踪仪测量布局示意图

TB105、106点)共计6个TB点;工装6个立柱内侧中部位置和两个上导轨中部各设置一个起辅助作用的增强基准坐标系统(Enhance Reference System)测量参考点(简称ERS点,图4中ERS1~10)共计10个ERS点。整个柔性工装总计16个基准参考点。

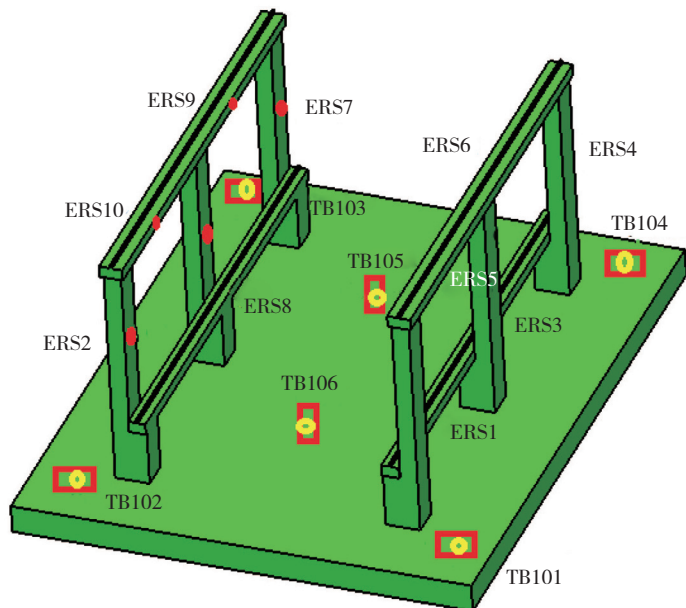


图4 基准测量参考点布局示意图

通过基准测量参考点建立起飞机坐标系后,就可以对装配中的飞机零件进行实时跟踪测量和定位检验测量。

## 2 工装校准

工装在飞机部件装配过程中起着支撑和定位的重要作用,其自身的精度是保证飞机装配精度的首要前提。一般工装的制造精度都比较高,但是在运输和安装过程中的振动可能会产生微量变形。另外在使用过程中,由于材料的自然时效和装配应力等的共同作用,工装也会失去原来的精准。数字化柔性工装的定位器是直接执行部件定位的重要元件,也是测量参考点的位置所在,任何微小的变形和误差都会对整个装配和测量产生重大影响。因此在装配之前,必须对工装进行校准,补偿系统误差,

保证后续测量的精度。

工装校准按照工装在装配过程中的状态可分为静态校准和动态校准。静态校准是指工装所有定位器均在其理论零点位置保持固定状态时,对工装进行校准。动态校准是指工装横梁和定位器在电机驱动下运动过程中的校准。动态校准的目的

是为了测量横梁和定位器的定位精度、重复定位精度和上下横梁的同步协调精度。

静态校准方法:激光跟踪仪通过地面基准标志点建立坐标系,然后测量工装上的所有测量参考点,和理论值对比,得出误差,反馈给控制系统,对各定位器进行微调校正。

动态校准方法:(1)定位精度——控制系统给横梁和定位器一个位移指令,激光跟踪仪实时跟踪横梁和定位器上的参考点,测量出运动的绝对距离和坐标,与指令数据对比。(2)重复定位精度——控制系统驱动横梁和定位器进行相同位移的往返运动,激光跟踪仪实时跟踪,对比往返位移误差。(3)同步协调精度——上下横梁同时运动相同位移,两台联站的激光跟踪仪分别实时

跟踪,对比上下横梁实际位移。

## 3 装配测量流程

机身整个装配过程中,从工装校准到第一个加强框的上架装配,再到最后的机身整体下架,全程需要基于激光跟踪的数字测量系统来控制调整,其数据流见图5,测量流程如下。

在进行实物测量之前,将包含测量点位理论信息的数模导入测量软件中。测量时,首先通过测量基准点把测量坐标系转换到飞机坐标系下,然后测量由工装定位器装配的部件上的测量点,并将实际测量数据实时反馈回测量数据中心。测量软件将实际数据和理论点的偏差传输给工装控制系统,对定位器不断调整,直到部件的实测数据与理论数据的偏差在精度要求范围内,此时部件装配准确到位。某一部件装配到位后,其定位器锁死,继续下一部件的装配。

## 方案实测结果与分析

根据测量方案,在后机身装配过程中实施,基准点测量数据如表1所示。

坐标系的转换精度为:

$$R_{MS} = 0.08。$$

坐标系建立后,将工装定位器调至理论零位并进行校准,然后把工装驱动至不影响后续装配的开敞位置。接着装配4个加强框,测量各框的站位数据,并且实时和第二步中所测得的数据进行对比,把偏差不断传送至控制系统,驱动定位器不断移动直至偏差在精度允许范围内。

由于框是机加合金件,腹板面是磨砂,粗超度较大,传统测量方式要求的精度为仅为0.5,并且各框之间的距离和总框距也要满足这个精度要求。对于激光跟踪测量,精度要求提高为0.25,由表2的数据可以看出所测数据精度要求,进一步分析可知框距和总框距也满足精度要求。

后续装配边梁,测量系统进行现场实时监控并在装配完成以后,检验

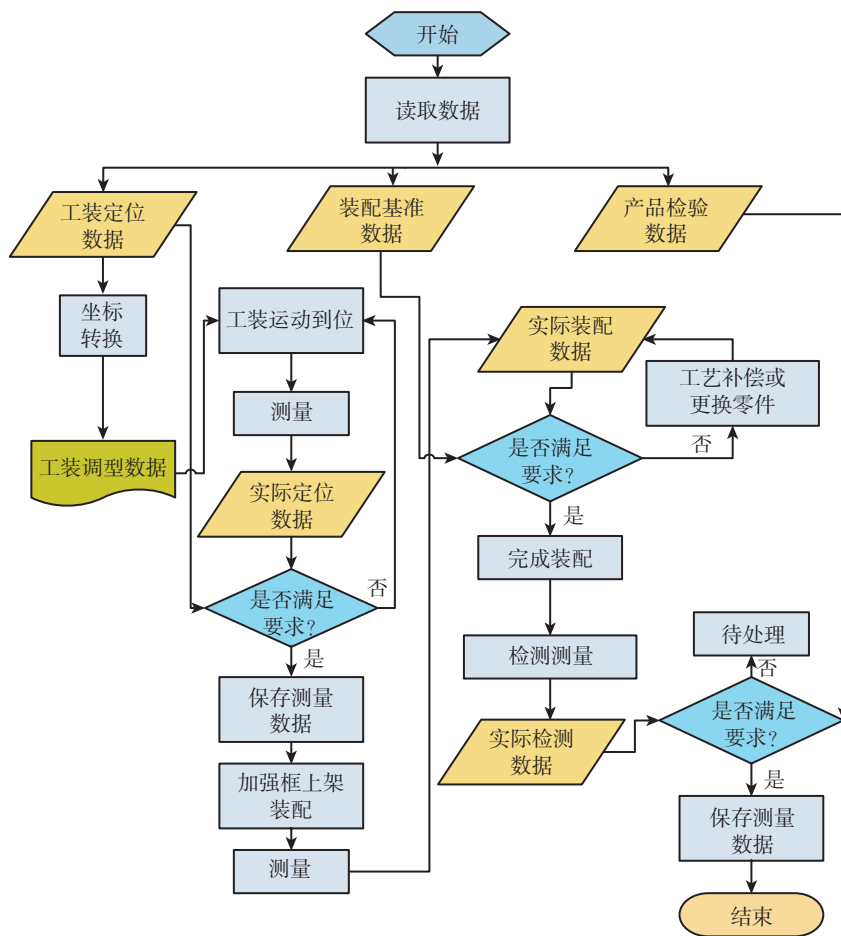


图5 测量数据流

表1 建立坐标系数据

点名	X	Y	Z
ERS1	6456.5377	-117.8574	1440.3534
ERS2	6449.6171	-147.8388	-1443.04275
ERS8	8108.06165	-174.692	-1443.3429
TB1	6409.371	-940.1485	1248.73485
TB2	6409.38185	-940.1015	-1248.7174
TB3	9744.25495	-940.08785	-1248.65645
TB4	9744.32035	-940.1034	1248.6765

表2 站位面实测数据

实测点位	补偿结果	理论值	误差
1 左	6769.3635	6769.25	0.1135
1 右	6769.083	6769.25	-0.167
2 左	7033.9058	7034	-0.0942
2 右	7033.8897	7034	-0.1103
3 左	7693.9442	7694	-0.0558
3 右	7693.90013	7694	-0.09987
4 左	8053.9321	8054.1	-0.1679
4 右	8054.24646	8054.1	0.14646

关键特征点,尤其是参与后续对接的部位,将测量数据随机身一起交付对接。

### 结论与展望

(1) 数字化测量技术是飞机数字化柔性精密装配的关键支撑技术之一,与数字化设计制造和柔性工装相互配合,大幅度提高装配精度,缩短装配周期,确保整个飞机装配过程的数字量协调。

(2) 通过应用数字化的激光跟踪仪对机身部件柔性工装进行测量和校准,补偿柔性工装制造及其调形过程中产生的定位误差,确保柔性工装的定位精度。

(3) 通过对装配过程中关键特征点的实时测量,提高了后机身装配过程中结构件的定位装配精度,为提高整个产品的装配精度提供了基础。

### 参考文献

- [1] 李洵,黄翔,方伟,等.飞机装配中的数字化测量系统.航空制造技术,2010(23):47-48,59.
- [2] 熊威,甘忠.测量辅助飞机装配技术.航空制造技术,2011(8):57-60.
- [3] Geraint J, Scott S. Integrated CAD-metrology and alignment of key features of A380 wings. Airbus UK: 2004 Coordinate Measurement System Committee, 2004.
- [4] 邹方,薛汉杰,周万勇,等.飞机数字化柔性装配关键技术及其发展.航空制造技术,2006(9):30-35.
- [5] 王亮,李东升,刘凤贵,等.飞机壁板类组件数字化装配柔性工装技术及应用.航空制造技术,2010(10):58-61.
- [6] 邹冀华,周万勇,邹方.数字化测量系统在大部件对接装配中的应用.航空制造技术,2010(23):52-55.
- [7] 梅中义,范玉青.基于激光跟踪定位的部件对接柔性装配对接技术.北京航空航天大学学报,2009(1):65-69.
- [8] Williams G, Chalupa E, Rahhal S. Automated positioning and alignment systems. USA: Advanced Integration Technology, Inc, 2000.
- [9] 郭洪杰,王亮,张书生,等.飞机部件数字化柔性工装技术研究.航空制造技术,2011(22):94-97.

(责编 深蓝)