

# 机器人技术在惯性器件精密装调中的应用\*

叶 萍, 李占京, 刘宇刚, 杨 劲

(航空工业西安飞行自动控制研究所, 西安 710065)

**[摘要]** 惯性器件在国防领域中应用范围广泛,但长久以来以人工装调为主的惯性器件生产模式具有效率低、一致性差以及产品合格率低等缺点。通过阐述机器人技术的优势,提出了采用机器人技术进行惯性器件精密装调的思路。重点分析研究了机器人技术在激光陀螺装配中的3个典型应用案例,应用结果显示装配效率、合格率以及一致性得到明显提升。最后,对机器人技术在惯性器件精密装调应用进行了总结,并对其发展趋势进行了展望。

**关键词:** 惯性器件; 激光陀螺; 精密装调; 机器人技术; 应用案例

## Application of Robotic Technology in Inertial Sensor Precise Adjustment

YE Ping, LI Zhanjing, LIU Yugang, YANG Jin

(AVIC Xi'an Flight Automatic Control Research Institute, Xi'an 710065, China)

**[ABSTRACT]** Inertial sensors are widely used in the field of national defense. However for a long time, the production mode of inertial sensors based on artificial adjustment has the disadvantages of low efficiency, poor consistency and low qualified rate. Through expatiation on the advantage of robotic technology, the idea of making use of the robotic technology to help inertial sensor precise adjustment is proposed. Three typical application cases of robotic technology in ring laser gyro assembly are proposed and analyzed. The application results show that the assembly efficiency, qualified rate and consistency have been significantly improved. In the end, the application effect of robotic technology in inertial sensor precise adjustment is summarized, and the developing trend of inertial sensor precise adjustment is prospected.

**Keywords:** Inertial sensor; Ring laser gyro; Precise adjustment; Robotic technology; Application case

**DOI:**10.16080/j.issn1671-833x.2018.19.097

惯性仪器仪表是一种可感知运动体在惯性空间的角运动、线运动,进而获取运动体姿态、位置、速度等信息的传感器,在航空、航天、航海、兵器以及汽车制造、机电工业和信息科技等领域都有着广泛的应用<sup>[1]</sup>。惯性器件是惯性仪器仪表的核心部件,其性能对导航精度具有极为重要的影响。

目前,国内惯性器件装配大量依靠人工操作,产品装配质量、装配精度及可靠性、装配效率均与操作工人的经验和技能有较大关系。随着我国在惯性领域相关工程技术的快速发展,越来越多的证据表明惯性器件的装配技术对其性能存在重要影响,而且随着惯性器件向小型化、高精度方向发展,其对装配精度、装配效率要求越来越高,原有生产方式已较难适应未来发展。

作为一种集合机械、电子、计算机、传感器等多学科先进技术于一体的高科技产品,很多工业机器人既具有人对环境状态的快速反应能力和分析判断能力,又有可长时间

持续工作、高精高速、高可靠性、不惧恶劣环境的能力<sup>[2]</sup>。正因为具有以上优点,机器人技术在航空航天、汽车制造、化工工业、智能物流、精密测试等领域具有广泛应用<sup>[3-5]</sup>。随着机器人技术不断发展以及工程应用经验积累,使得机器人技术在惯性器件精密装调中应用成为可能。

## 1 惯性器件装配现状与不足

在惯性导航系统中,陀螺仪与加速度计是其重要的组成部分。随着惯性导航系统向小型化方向发展,陀螺仪和加速度计结构设计也在趋向小型化、微型化。惯性器件总体尺寸小、设计精度高、结构复杂,涉及多种材料和连接方式,其装配过程极为复杂,采用了大量的人工装配方式,装配过程中的突出问题包括装配一致性较差、效率低、产品合格率低、个别工序高度依赖高技能操作工人等,这与精密装调的要求还有较大差距。

### 1.1 装配一致性

装配是产品制造中的重要环节,直接影响产品的性

\* 基金项目: 总装预先研究项目(41423010204)。

能。在惯性器件装配方面,装配一致性差是产品生产过程中最为突出的问题。个别装配工序高度依赖操作工人的技能与经验,加之部分工序未形成标准动作操作规范,从而对过程的管控不严,导致不同装配者装配的产品一致性较差,同一操作者不同时间装配的产品一致性也存在较大差异。此外,部分产品装配指标要求的细化程度不足也是导致产品一致性差的原因之一。装配一致性差会造成惯性器件性能波动,从而导致部分产品性能超出指标要求。

### 1.2 装配效率

惯性器件的装配效率低是产品装配中的重要问题。惯性器件的尺寸相对较小,装配精度要求较高,装配难度大等特点造成其装配效率较低。例如某装配过程需要在显微镜下人工对零件进行夹持、装配,完成产品组装。操作者在显微镜下进行装配操作,极易疲劳,因此装配效率较低。装配效率低导致惯性器件生产周期较长,产品研发周期相对也较长。而发达国家在这一领域已实现具有较高水平的精密装调、自动化生产,相关性器件年产量是我国的数倍以上。

### 1.3 产品合格率

由于微小惯性器件的装配高度依赖人工,操作规范化程度低,因此产品合格率相对不高,产品可靠性及长期稳定性还有待提高。由于产品装配合格率较低,在装配环节需要装配大量的产品供后端工序筛选出性能合格的产品,这对装配线造成很大的生产压力,也是极大的资源浪费。

综上所述,惯性器件装配手段已逐渐跟不上其小型化、高精度的发展趋势,需要有与之相匹配的更精准、更高效的精密装调手段。

## 2 机器人的优势

工业自动化及相关领域技术的发展推动了机器人技术的广泛应用。从应用效果看,机器人的主要优势就是借助机电一体化设备和控制软件,实现预定动作的高度重复作业,无疲劳问题,不依赖于操作人员,能够承受一定程度的恶劣环境,可以实现较高的装配定位精度和位置重复性,具有智能化的软硬件基础,目前在某些工程应用领域具有较高的性价比。

### 2.1 高精度

机器人由机电一体化设备和控制软件构成,其运动重复性、定位精度主要取决于相关硬件。近年来随着精密加工等技术的进步,制造微米级运动精度的机器人或运动机构已经不是梦想。例如以电机、导轨、运动控制卡、相关结构件组成的操作机器人的精度主要由电机、导轨决定。微米级精度的运动平台早已商品化销售,对

于一些特殊领域,已经可以构建纳米级定位分辨率的机器人<sup>[6]</sup>。借助于高精度的机械构件和相同的数字化控制参数,机器人的运动重复性也得到保证,微米级重复性的机器人已有应用。当然,高精度的背后是高成本和相关领域技术的支撑,在实际应用中机器人的精度能够满足使用需求即可。

### 2.2 高效率

机器人不存在疲劳问题,可以实现24h连续工作。同时在实际产品的装配过程中,对机器人的操作动作还可以开展分析优化进一步提高作业效率。机器人效率一般要比人工操作效率高出数倍甚至数十倍以上。但机器人由于自身特点,存在诸多制约其24h作业的因素,包括供料不及时、设备故障、机器人作业需要人工配合等。

### 2.3 智能化基础

工业领域的发展路线是从手工生产向自动化生产,再向智能化生产发展的,自动化技术是智能化的基础。在机器人自动化的基础上,进一步发展才有可能实现智能化。智能化是未来发展的一种趋势,是数字化柔性装配技术的一种高级形式,机器人技术是实现智能制造的基础之一。

## 3 机器人技术在微小惯性器件装配中的应用研究

在当前惯性器件装配操作模式下,产品的装配一致性、生产效率、可靠性及长期稳定性与发达国家相比,还存在较大差距,因此需要改进这种手工操作模式,通过提高产品精密装调技术来进一步提高产品精度和性能,缩短与世界先进水平之间的差距。

在分析了惯性器件装配现状和不足后,结合机器人的诸多优势,梳理出采用机器人技术进行惯性器件精密装调的总体思路:先分析装配过程的输入输出关系,梳理控制目标要素,找到需要采用机器人技术的关键点,而后实施验证。

陀螺仪与加速度计是惯性导航系统重要的组成部分,在微小型加速度计装配方面机器人技术已经有了较多应用<sup>[7-8]</sup>,本文将主要对激光陀螺装配、调试、测试这3种工作中典型机器人技术的应用案例进行分析研究。

### 3.1 基于机器视觉与温度压力闭环控制的电极封接设备

在激光陀螺装配中,电极与谐振腔腔体的连接一般是利用具有质地柔软、熔点低、密封性好等优点的钢,采用热压封的方式将微晶玻璃与金属电极连接。电极封接是激光陀螺关键工序,封接质量直接关系到激光陀螺的寿命。手工操作以及简陋的封接设备不能够完成可靠的封接,需要有更高精度、更先进的手段实现电极封接。为实现电极可靠封接,设计了一种温度与压力闭环控制的

电极封接设备,如图1所示,高精度的三自由度机械手配合真空吸附装置完成电极的自动拾取与精准放置,封接装置实现电极与激光陀螺腔体的可靠热压封接。

钢封温度与压力是钢封工艺中两个重要的参数,该设备采用温度与压力闭环控制的方式来实现重要封接工艺参数精确控制。热压头内有加热管和温度传感器,通过温度传感器感知热压头温度与设定值之间的差值调节加热管的加热功率来实现热压头工作温度调节。电机的旋转副通过直线轴承、导柱等转换为直线运动副,压力传感器可感知热压头施加压力大小,控制系统通过调节电机转动实现热压头压紧及松弛。因此,温度与压力传感器的精度对整个温度压力控制系统的控制精度起决定性影响,为此该设备选用了高精度的温度传感器与压力传感器,其中温度传感器最小分辨率为 $0.1^{\circ}\text{C}$ ,压力传感器控制精度可达 $1\text{N}$ 。该设备解决了激光陀螺高可靠性封接的工艺难题,极高的钢封工艺参数控制精度保证了封接质量,使装配一致性得到大幅提高,封接合格率提高20%以上。

为了进一步提高设备装配效率和自动化程度,在该设备的基础上增加的机器视觉系统的第2代封接设备也已投入生产,通过机械视觉系统可以实现目标零件的自动拾取与精准定位,自动化程度与装配效率进一步得到提高。

### 3.2 基于信号稳健高斯滤波及梯度算子快速寻优自动合光设备

激光陀螺是利用谐振腔转动时顺时针传播的两束光存在光程差从而形成拍频的原理来检测转动角速率传感器。用来检测拍频的传感器就是在合光工序装配的,图2为合光装配原理<sup>[9]</sup>。

激光陀螺谐振腔内顺时针两束光通过棱镜合光后产生干涉信号,这两路信号较为微弱,需要进行滤波处理,为有效抑制误差信号,提高信噪比,提出了基于稳健高斯滤波的信号处理方法<sup>[9]</sup>,并将其应用在自动合光

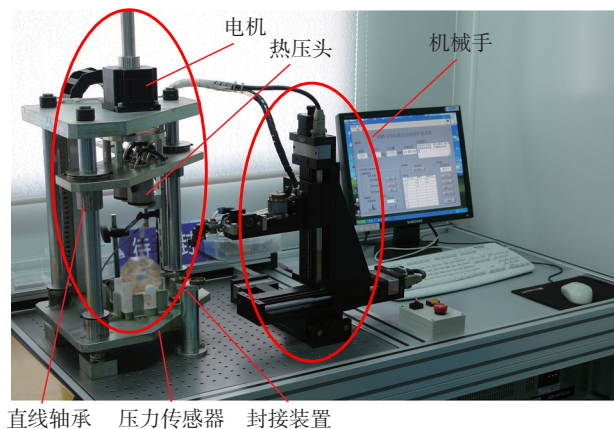


图1 钢封设备

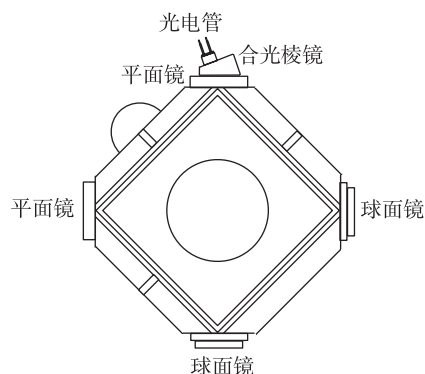
Fig.1 Indium-sealing device

设备上,提高了合光信号质量。

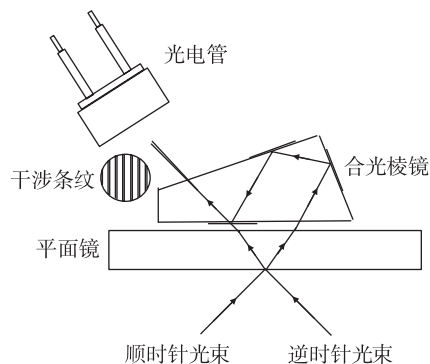
合光光电管一般为双光窗光电管,双光窗间隔约为 $1/4$ 个干涉条纹间隔。在合光过程中,调整光电管的位置以获取合适干涉条纹幅值、相位(幅值尽量大且相近、相位差值接近 $90^{\circ}$ ),提升电子电路鉴相、解调精准度,从而提高激光陀螺精度。原人工合光装配时,一致性不高且搜索最佳合光参数的效率较低,而在自动合光系统中,控制系统通过光电管实时采集干涉条纹幅值、相位参数信息,精密机械手夹持光电管进行微米级精密移动来搜寻全局最优合光参数。为提高搜寻效率引入梯度算子进行最优信号位置搜索,机器人技术的应用提高了合光调试过程一致性,使调试效率提升1倍以上。其操作界面如图3所示。

### 3.3 基于高精度微位移传感器的微小变形量测试系统

稳频组件是使激光陀螺保持腔长稳定的重要部件,其基本工作原理为通过压电陶瓷的逆压电效应对球面镜施加力载荷,从而使腔长保持不变。压电陶瓷作动性能测试是通过测试其在相同电压下微小变形量大小来判定。人工测试压电陶瓷作动性能时,测试一致性较差,不同测试者之间存在明显差异,测试一致性对后端装配较为重要,且测试效率低限制生产能力,为此设计了基于高精度微位移传感器的微小变形量测试系统,如图4所示。



(a) 激光陀螺示意图



(b) 干涉条纹的形成

图2 合光装配原理

Fig.2 Principle of beam-coupling assembly

该测量系统采用直角坐标机器人作为系统运动框架,在压电陶瓷拾取中应用真空吸附技术,有效避免了薄片型压电陶瓷意外损伤情况的发生;控制系统通过电源模块实现压电陶瓷自动加载测试电压,完成压电陶瓷自动充放电;并使用高精度接触式电感测微仪,采用双测头测量策略完成压电陶瓷电载荷下微小变形量测试,如图5所示。相比单测头测量方式,消除了零件搬运及放置位置误差、机构回程间隙等引入的测试误差,并可有效避免充放电压电陶瓷变形后与测头接触不良等情

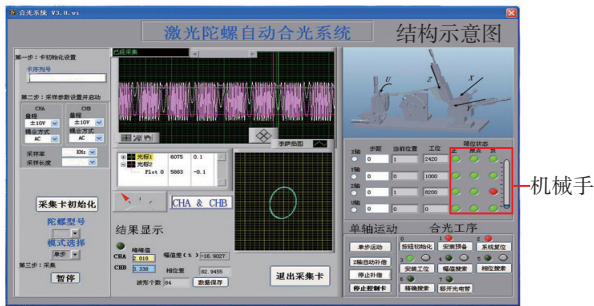


图3 自动合光系统操作界面

Fig.3 Operation interface of automatic beam-coupling system

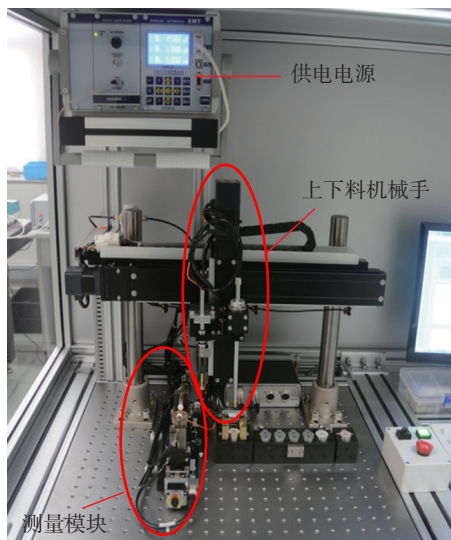


图4 微小变形量测试系统

Fig.4 Micro deflection measurement system

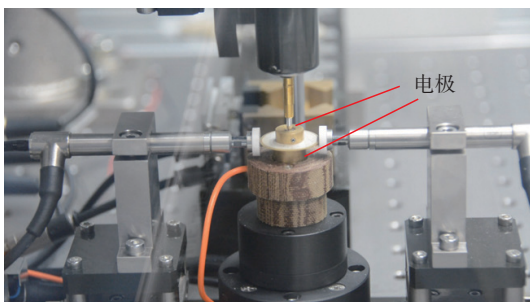


图5 测量模块

Fig.5 Measurement module

况。该测试系统采用模块化设计思路,由测量模块、上下料机械手模块和电源模块等组成。

该测量系统可批量完成压电陶瓷片的自动上料、测量和分拣工作,上料台一次可放置80片压电陶瓷,并且该系统可兼容测量不同尺寸规格的压电陶瓷片。试验表明,与原有人工测量方式相比,该测量系统能够提升测量速度60%以上,重复测量精度优于 $0.06\mu\text{m}$ 。

### 3.4 机器人技术在惯性器件装调中应用研究

机器人技术在激光陀螺装配、调试、测试等过程中的应用还有许多<sup>[10-11]</sup>,此处不再一一列举。

通过人工装调与机器人装调的对比可以看出,引入机器人技术,如高精度的感知测试技术、精准运动控制技术、机器视觉等,提高了激光陀螺装配、调试及测试过程中的一致性与操作效率,提高了产品可靠性与稳定性。当然,也并不是所有惯性器件装调过程都需要采用机器人技术,应该梳理采用机器人技术的必要性,权衡利弊,着重在瓶颈或重要工序采用机器人技术,重点突破,以点带面,推进装调过程自动化、智能化顺利进行。

此外,惯性器件装调过程中有一些工序无法应用机器人技术较好替代人工操作,比如某些胶黏工序。惯性器件为了减小体积缩减质量,采用了大量胶黏剂连接方式,而没有采用传统的焊接、机械螺栓连接、铆接等方式。使用胶黏剂黏接零组件存在较多问题,主要包括胶黏剂适用期短、胶黏剂使用量不易控制、胶黏剂拉丝后易污染其他零件、残留胶黏剂不易清理等。受限于机器人点胶技术发展与我国薄弱的化工工业基础,在精密自动点胶方面还未有较好的解决手段<sup>[12]</sup>,因此在惯性器件装配中某些胶接工序仍依赖高技能水平的工人。

## 4 结论

机器人技术具有高效率、高精度、重复性好等优点,目前已在许多领域广泛应用。在惯性器件装调中人工装调一致性差、效率低、产品质量差,通过在部分适合的工序应用机器人技术在一定程度上提升了惯性器件精密装调总体技术水平,较好地提高了产品一致性、装调效率、可靠性与长期稳定性。应用机器人技术的成功实践经验为进一步推进惯性器件精密装调生产线建设打下坚实的基础。

此外,与先进国家相比我国工业基础与技术基础相对薄弱,还存在着一些限制机器人技术在惯性器件精密装调中广泛应用的因素。消除这些因素需要一个较长的过程,需要加速科技创新,重视工艺研究,把握“中国制造2025”这一机遇,从而使惯性器件装配向着自动装调、精密装调、智能装调发展。

## 参考文献

[1] 赵民智, 纪丽敏, 万承军. 我国惯性仪器仪表的技术特点及发展综述[J]. 传感器世界, 2009(7): 16-19.

ZHAO Minzhi, JI Limin, WAN Chengjun. Technical characteristics and development summarization of native inertial instrument and meter[J]. Sensor World, 2009(7): 16-19.

[2] 毕胜. 国内外工业机器人的发展现状[J]. 机械工程师, 2008(7): 5-7.

BI Sheng. Development of industrial robots home and abroad[J]. Mechanical Engineer, 2008(7): 5-7.

[3] 黎田, 胡晓雪, 姚为, 等. 机器人在航天装配自动化装配中的应用研究[J]. 航空制造技术, 2014, 57(21): 102-108.

LI Tian, HU Xiaoxue, YAO Wei, et al. Research on application of robot in space equipment automatic assembly[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014, 57(21): 102-108.

[4] 杨金. 机器人在汽车车身制造中的应用[J]. 航空制造技术, 2004, 47(3): 36-37.

YANG Jin. Application of robots in car body manufacturing[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2004, 47(3): 36-37.

[5] 金桂银, 穆建军. 视觉识别机器人在物流作业中的智能应用[J]. 制造业自动化, 2013(11): 103-105.

JIN Guiyin, MU Jianjun. Material handling application of intellectual robot with vision system[J]. Manufacturing Automation, 2013(11): 103-105.

[6] WOERN H. Flexible microrobots for micro assembly tasks[C]//IEEE International Conference of Intelligent Robots and Systems, New York: IEEE, 2000.

[7] 王晖, 滕霖, 赵宝林. 自动微装配技术在航空机载光电传感器装调中的应用[J]. 航空制造技术, 2010, 53(2): 82-85.

WANG Hui, TENG Lin, ZHAO Baolin. Application of automatic micro-assembly technology in airborne mechanical/electronic/optical sensor assembly[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2010, 53(2): 82-85.

[8] 张习文, 王晓东, 罗怡, 等. 精密微小型零件自动装配系统显微视觉的照明自动优化[J]. 光电工程, 2012, 39(4): 14-20.

ZHANG Xiwen, WANG Xiaodong, LUO Yi, et al. Automatic illumination of microscopic machine vision optimization for precision miniature parts automatic assembly system[J]. Opto-Electronic Engineering, 2012, 39(4): 14-20.

[9] 马立, 周辅君, 谢炜, 等. 激光陀螺合光装配中信号的稳健高斯滤波方法[J]. 中国激光, 2014, 41(10): 15-20.

MA Li, ZHOU Fujun, XIE Wei, et al. Robust gaussian filtering of signals for beam-coupling assembly of ring laser gyroscopes[J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(10): 15-20.

[10] 马立, 欧阳航空, 谢炜, 等. 倾斜接触式调腔方法及试验研究[J]. 机械工程学报, 2014, 50(1): 10-17.

MA Li, OUYANG Hangkong, XIE Wei, et al. Slope-contact-type cavity adjustment method and experiment study for ring laser gyroscope[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(1): 10-17.

[11] 李占京. 激光陀螺抖动轮自动装配系统关键技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.

LI Zhanjing. Research on key technologies of automatic assembly system of laser gyro dithering-wheel[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.

[12] 罗怡, 刘宇, 王晓东. 微装配中的精密点胶分液技术[J]. 电子世界, 2014(7): 89-91.

LUO Yi, LIU Yu, WANG Xiaodong. Precise dispensing technology in micro-assembly[J]. Electronics World, 2014(7): 89-91.

通讯作者: 李占京, 硕士、工程师, 研究方向为机器人技术、激光陀螺装调工艺, E-mail: robosky@qq.com.

(责编 铃兰)

(上接第96页)

[4] BOGUCKI G, MCCARVILL W, WARD S, et al. Guidelines for the development of process specifications, instructions, and controls for the fabrication of fiber-reinforced polymer composites, FAA report: DOT/FAA/AR-02/110[R]. National Technical Information Service (NTIS), 2003.

[5] SULLIVAN W J. Quality control for the manufacture of composite structures. FAA Advisory Circular AC21-26[R]. National Technical Information Service (NTIS), 1989.

[6] WARD S, MCCARVILL W, TOMBLIN J. Guidelines and recommended criteria for the development of a material specification for carbon fiber/epoxy fabric prepregs. FAA Report: DOT/FAA/AR-06/10[R]. National Technical Information Service (NTIS), 2007.

[7] LEONELLI F, KELLER S. Research on procedures and guidance for process/repair specifications. FAA Report: DOT/FAA/AR-09/20[R]. National Technical Information Service (NTIS), 2009.

[8] 王仁龙, 谭永刚. 纤维增强复合材料零部件的制造符合性检查[J]. 航空制造技术, 2014, 57(9): 66-72.

WANG Renlong, TAN Yonggang. Conformity inspection of fiber reinforced composites parts[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014, 57(9): 66-72.

[9] 中国民用航空局. 运输类飞机适航标准: CCAR-25-R4[S]. 北京: 中国民用航空局, 2016.

Civil Aviation Administration of China. Airworthiness standard for aerotransport: CCAR-25-R4 [S]. Beijing: Civil Aviation Administration of China, 2016.

[10] 谭永刚, 张迎春. 复合材料工艺的适航审定[J]. 民用飞机设计与研究, 2014, 115(4): 58-60.

TAN Yonggang, ZHANG Yingchun. Certification of composites process[J]. Civil Aircraft Design & Research, 2014, 115(4): 58-60.

[11] 李宏运. 复合材料在民机应用中有关适航问题的探讨[J]. 航空制造技术, 2009, 52(16): 26-29.

LI Hongyun. Airworthiness issues of in civil aircraft composite applied[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2009, 52(16): 26-29.

通讯作者: 张婷, 博士、高级工程师, 研究方向为复合材料成型工艺、复合材料制件检测、复合材料工艺标准及适航符合性验证, E-mail: zhangting281020@163.com.

(责编 铃兰)