

引文格式:王发麟,李志农,王娜.飞机整机线缆自动化集成检测技术研究现状和发展[J].航空制造技术,2021,64(4):38-49.

WANG Falin, LI Zhihong, WANG Na. Research status and its perspective of automated integrated detection technology for aircraft cables[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2021, 64(4): 38-49.

# 飞机整机线缆自动化集成检测 技术研究现状和发展\*

王发麟<sup>1</sup>,李志农<sup>2</sup>,王娜<sup>3</sup>

(1. 南昌航空大学航空制造工程学院,南昌 330063;

2. 南昌航空大学无损检测技术教育部重点实验室,南昌 330063;

3. 航空工业江西洪都航空工业集团有限责任公司飞机总装厂,南昌 330024)

[摘要] 飞机整机线缆集成检测是飞机总装过程中的一项重要工作,是关乎线缆制造质量高低的一个关键环节,在航空制造企业受到了广泛重视。对飞机整机线缆检测方法进行了比较和分析,介绍了线缆自动化集成检测的内涵和主要研究内容,对比分析了国内外线缆自动化集成检测的研究现状,分析和指出了线缆自动化集成检测存在的问题以及发展趋势。最后对数字孪生技术在线缆自动化集成检测领域中的应用进行了展望。

关键词:飞机线缆;集成检测;分布式测试箱;转接电缆;数字孪生

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2021.04.038



王发麟

讲师,博士,主要从事航空航天产品线缆虚拟装配与仿真技术、线缆集成检测技术、数字化设计与装配技术、智能制造等方面的研究。

飞机上的航电系统、火控系统、电气系统、操纵系统等各系统要保证正常的运行,少不了提供控制信号、动力电源以及数据信息的、具有“神经网络”之称的整机线缆<sup>[1-2]</sup>。在众多影响飞机质量的因素中,飞机整机线缆的制造质量极为重要,而线缆检测是关乎线缆制造质量高低的一个关键环节,在航空制造企业受到了广泛重视。

在以飞机航电系统、电源系统、飞控系统、动力系统为主的系统功能试验之前,飞机总装过程中线缆的完整性测试是不可缺少的一个重要环节<sup>[3-5]</sup>。各分系统的线路运行情况、系统功能的完整性和可靠性等都需要通过线缆的完整性测试来得到保

证。基于转接电缆的线缆集成检测方法,是目前国内航空制造企业对于总装阶段的飞机整机线缆检测所采用的技术手段。整机的线缆配置状况、内部导通情况、绝缘情况等借助转接电缆的方式来完成测试,这种方法对于测试点数在两万点以内的中小型飞机线缆检测可以胜任。但对于如C919等大飞机来说,由于其线缆检测点数约3万点,整机检测点分布极广且分散,如果仍采用上述基于转接电缆的检测方法,将会出现以下问题<sup>[6-7]</sup>:

(1) 检测的可靠性低。基于转接电缆的方法很大程度上还是依赖于人工来进行操作,由于存在经验和操作熟练程度的差异,整机线缆检测的可靠性难以得到保证。

(2) 检测难度大。航电系统、电

\* 基金项目:国家自然科学基金(51675258);江西省教育厅科学技术研究项目(GJJ180539);南昌航空大学博士启动金(EA201803301)。

源系统、飞控系统、动力系统涉及到的检测点数多而分散,不同的系统在进行检测时需要根据实际情况来调整转接方案,加大了检测的难度。

(3)检测周期长,工作量大,效率低。以C919大飞机为例,测试工作按“地面拣选转接电缆→上机布置转接电缆→完成转接电缆插头连接”进行,那么以整机3万点的测试工作量来计算,完成全部测试工作需要3d,严重制约了飞机的最终交付时间。

(4)管理困难,设计成本高。检测点数的增加,使得转接电缆的数量也相应增加,大量的转接电缆在取用和存放问题上给管理人员带来难题。同时航空用的转接电缆价格往往都比较贵,设计制造的成本将大大提高。

计算机的性能不断提升,带动了计算机控制技术和集成检测技术的快速发展,使得数字化装配、自动化检测在飞机制造过程中得到了进一步的发展和应用<sup>[8]</sup>。利用数字化和自动化检测方法,飞机整机的线缆检测周期和工作量将会大大减少,整机产品质量也会显著提升,在整个飞机总装配检测环节上,人力、物力、资源配置等都将得到充分优化和利用。本文结合当前航空制造企业的现状,对飞机整机线缆检测方法进行了比较和分析,对线缆自动化集成检测的内涵和主要研究内容进行了介绍,对比分析了国内外线缆自动化集成检测的研究现状,并在此基础上指出了当前存在的主要问题和今后的发展方向,最后对数字孪生技术在线缆自动化集成检测中的应用进行了展望,以期对航空制造业飞机整机线缆检测提供参考和思路。

## 飞机整机线缆检测方法比较与分析

根据线缆检测技术的成熟度,飞机整机线缆检测方法主要有传统手

工线缆检测方法、基于转接电缆的线缆检测方法和整机线缆自动化集成检测方法<sup>[6,9]</sup>。传统手工的检测方法随着技术的发展逐渐被淘汰,基于转接电缆的检测方法目前还是主流,短期内仍将是各航空制造企业所采用的方法,而自动化集成检测方法则是未来发展的主要方向。

对飞机线缆而言,其连接状态一般包括连接正常、线路短路、线路断路、线缆端口接触不良、出现误配线等情况。对于一般的线路断路现象,通过传统的线缆测量方式可以得到解决;而对于诸如误配线、线路短路、线路搭接等造成的故障问题,则需要专业的仪器,采用转接电缆的线缆检测方法或自动化集成检测方法对所有点进行逐点扫描,才能准确判断;针对端口或连接器线缆接口焊接不牢、接口压接用力不当、出现挂锡、插拔力过大而引起的线缆端口接触不良等问题,则需要通过采用精密仪器进行精密电阻测试,根据微弱的电阻变化来判断问题属性。不同的测试方法具有不同的特点,下面对上述3种方法进行介绍。

### 1 传统手工线缆检测方法

传统的手工线缆检测方法以万用表、兆欧表、蜂鸣器或指示灯为主要检测工具<sup>[5]</sup>,利用手工完成每根导线的待测点搭接,通过电路中的导通电阻或蜂鸣器的声响来判断导线是否存在断路故障以及每条连接线的绝缘情况。整个检测过程要求检测人员操作仔细,注意力集中,所处的周围环境要达到一定的安静程度,否则会影响检测人员对检测结果的误判。在线缆检测过程中,线缆的导通测试一般由两人组成一个检测小组,使用万用表来完成;而线缆绝缘性检测则由3人组成一个检测小组,使用兆欧表来完成<sup>[10]</sup>。传统的手工线缆检测方法存在以下缺点<sup>[5,10-12]</sup>:

(1)手工检测完全依靠工人来完成,一方面不同工人的操作熟练程

度存在差异,另一方面工人的检测专注度会受个人情绪的影响,人为影响因素较大,工人的自觉程度直接关系到线缆是否存在错检、漏检等现象的发生,同时也无法保证每根导线是否都进行过正确测试。

(2)检测过程会产生大量测试结果,手工检测难以实现对测试结果进行数据的信息化管理。布线设计师设计、修改和更新的数据不能及时到达工人手里,布线设计师与线缆检测工人之间存在沟通延迟和不到位的现象,使得检测工人因没有及时获得更新的数据而采用老式线缆测试参照表,导致出现本可以避免的错误。

(3)由于检测工人在进行线缆测试时,采用的是人工纸质记录的方式将测试结果记录下来,没有进行信息化和数字化的管理,使得纸质版测试数据容易丢失,不利于长久保存和管理,导致后续新批次的飞机整机线缆测试缺少相应的数据参考。

(4)检测过程依赖工人对检测点进行一一检测,大量的整机线缆大大增加了工人的劳动强度,工作量大,检测效率低。由于需要人工时刻观察检测数据,时间一长工人容易产生疲劳,注意力下降,人为漏检和错检的概率增大,当出现故障时,主要依靠工人的经验来进行排除。

除上述缺点外,传统手工线缆检测方法在完成线间短路安装后如果没有进行检查,在后续整机线缆通电检测中,将再次对线路故障进行排查,增加了工人的重复性工作,严重时会对机载设备造成损坏,这已构成了影响批生产及新机研制的“瓶颈”,制约着国产飞机的型号研制。

### 2 基于转接电缆的线缆检测方法

针对传统手工线缆检测存在的上述不足,为提高飞机整机线缆的检测效率和质量,降低工人的劳动强度,基于转接电缆的线缆检测方法被提出。其主要原理是转接电缆作为中间件,

一端通过转接端口与飞机上的电缆相接,另一端与布置在飞机周围的分布式测试箱相接,飞机上的机载线缆由此接入外部的测试系统,从而实现机上线缆的检测。基于转接电缆的机上线缆检测如图1所示。

基于转接电缆的线缆检测方法解决了传统手工检测方法诸如工作量大、劳动强度高、检测效率低等问题,为航空制造企业提升飞机整机质量起到了重要作用,对于飞机总装阶段线缆检测模式的更新也产生了重要影响。目前该方法在国内一些航空主机厂应用较多。但正如该方法的工作原理阐述的那样,转接电缆两端分别连接上了机上电缆和测试箱,为了将转接电缆的一端与机上电缆相接,需要将转接电缆进行拖拽,并与飞机上的不同部位进行端接。由于转接电缆的柔性特性以及长短不一,转接电缆在拖拽的过程中会出现缠绞、工人踩踏、转接电缆架空等现象<sup>[9]</sup>,使得转接电缆的存储成为一个棘手的问题。工人在检测前对转接电缆的查找、检测完后对转接电缆的收放等,都需要耗费很多时间。对于超长转接电缆,自身出现绝缘等问

题也是难以发现的一类情况,出现这种情况反而影响现场检测效率。例如对于大型飞机来说,测试点数接近4万点,在飞机机头和中机身部位测试点更为密集,如果继续采用基于转接电缆的线缆检测方法,则转接电缆数量将非常庞大,重量非常重,给安装、拆卸和维护造成很大的困难,同时也会占用绝大部分的机内可用空间,无法放置其他测试设备<sup>[7,12]</sup>。该方法在测试准备阶段耗费的时间比较多,转接电缆的取用和归放操作不便。另一方面,由于航空用转接电缆价格一般比较昂贵,数量庞大的转接电缆也会使得成本大大增加。因此,以计算机自动控制为主要技术支撑的线缆自动化集成检测方法被提出,该方法借助了新一代信息技术,下面进行详细阐述。

### 3 整机线缆自动化集成检测方法

#### 3.1 线缆自动化集成检测内涵

传统的手工线缆检测方法和基于转接电缆的线缆检测方法都存在很多缺点,严重制约着飞机总装的效率和整机质量。线缆自动化集成检测技术充分利用了计算机自动控制技术,将传统的人工劳力解放了出

来,为提升飞机整机线缆测试效率和质量往前推进了一大步。其工作原理为<sup>[7,13-14]</sup>:使用工艺在线可替换单元(Line replaceable unit, LRU)、工艺转接电缆、电缆插头转接器等工艺设备将飞机上待测线缆两端连接到测试设备上,向导线输出低压或高压信号,然后对导线的导通电阻、导通电流进行精确测试,从而定量分析电缆的整体连接状况,根据施加的电压不同而测量所对应电压下的电流泄露情况(线缆中对地情况、线缆之间的情况),从而分析和判断线缆的绝缘状况,并综合上述情况来判断导线的电气特性是否符合规定的要求;对全机所有导线采取上述方法,并将各导线的连接关系、测试参数等信息存储在专门的测试软件数据库中,作为线缆测试标准;测试设备能够根据比对数据库中的数据来快速判断所有线缆的电气特性是否无误,从而完成对飞机整机线缆的检测。线缆自动化集成检测方法相比于传统的检测方法和基于转接电缆的方法有更大的优势。

#### 3.2 线缆自动化集成检测技术

以欧美国家为主的航空制造企

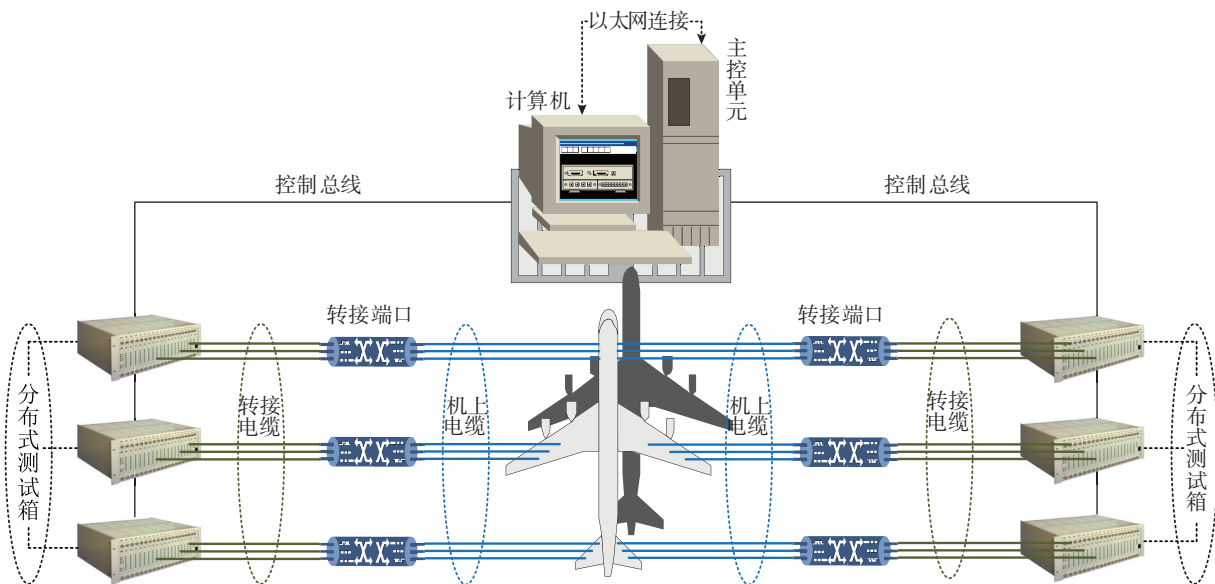


图1 转接电缆检测线缆示意图

Fig.1 Schematic diagram of transfer cable detection cable

业在整机线缆集成检测技术运用方面发展比较成熟,从20世纪60~70年代就开始在单板机模式下开展飞机线缆自动化集成检测<sup>[12, 15]</sup>。经过近60年的发展,已经基本实现了整机线缆系统检测的数字化和智能化<sup>[13]</sup>。得益于技术上的积累,国外先进的航空制造企业在对大型飞机进行整机线缆检测时,所需人工耗时仅为两名工人投入两天时间。对于自动化检测程度高的企业,在总装阶段甚至可以省去模拟通电检测工序,大大提高了检测效率和生产效率。

如前所述,线缆自动化集成检测方法主要通过工艺LRU、分布式测试箱、转接电缆等将飞机待测线缆两端进行连接,实现工艺LRU和分布式测试箱的线缆集成检测,工艺转接电缆的数量大大减少,在提高检测效率和质量的同时,方便了相关检测设备及其附件的管理。飞机整机线缆自动化集成检测如图2所示。

线缆自动化集成检测方法所用的主要设备如下<sup>[9, 10-12]</sup>。

(1)检测主控单元。线缆自动

化集成检测的一个优点是可以进行检测主控单元自动设置检测激励源,对控制指令即时发出,根据测试单元的不同来设定开关次序<sup>[9]</sup>;同时可以实现对整个测试过程的监控,支持对测试线缆数据库的操作、维护以及人机交互,测试结果数据可以进行传送并打印。检测主控单元主要由控制器、测试激励源模块、供电模块等构成,是整个集成检测系统的核心。工作时需要通过以太网与计算机连接,按操作员的测控指令来执行测试任务,同时控制与其相连的各分布式测试箱,测试结果会输出到计算机显示器上进行显示。当测试过程中出现错误时,检测主控单元还将发出报警信号。

(2)分布式测试箱。对于大型飞机的线缆检测,由于机内线缆多、布局复杂,采用转接电缆的方式进行集中式检测,耗费在转接电缆预先配制上的时间将大幅增加。为解决这一问题,必须采用分布式测试箱进行布局,以替代集中式线缆检测方法。分布式测试箱集通信功能、控制

功能、复用功能、绝缘功能于一体,可在检测主控单元与被测飞机线缆两者之间进行信号切换。各分布式测试箱将机上线缆(被测线缆)与检测主控单元相连接,利用主控单元中的测量仪表、测试激励源完成导通、绝缘等相关内容测试,分布式测试箱的电由检测主控单元提供,其内部主要为控制信号的开关矩阵<sup>[10]</sup>。

(3)工艺LRU。飞机内部因安装了大量的零部件,空间往往比较狭小,尤其是对于机载设备舱更加明显。以飞机驾驶舱为例,线缆敷设往往比较密集,需要测试的点数也多,狭小空间内集中了多个矩形连接器(也被称为机载LRU,一般采用托架进行布置)。“分布式测试箱+转接电缆”的组合测试方式一方面会造成转接电缆数量庞大,出现缠绕和扭绞现象;另一方面给测试前的准备及测试后的收尾工作都增加了较多工作量。工艺LRU在外形、尺寸、接口上,与机载LRU都保持一致,在功能上与分布式测试箱相同。由于工艺LRU可以直接与机上接口相连接,

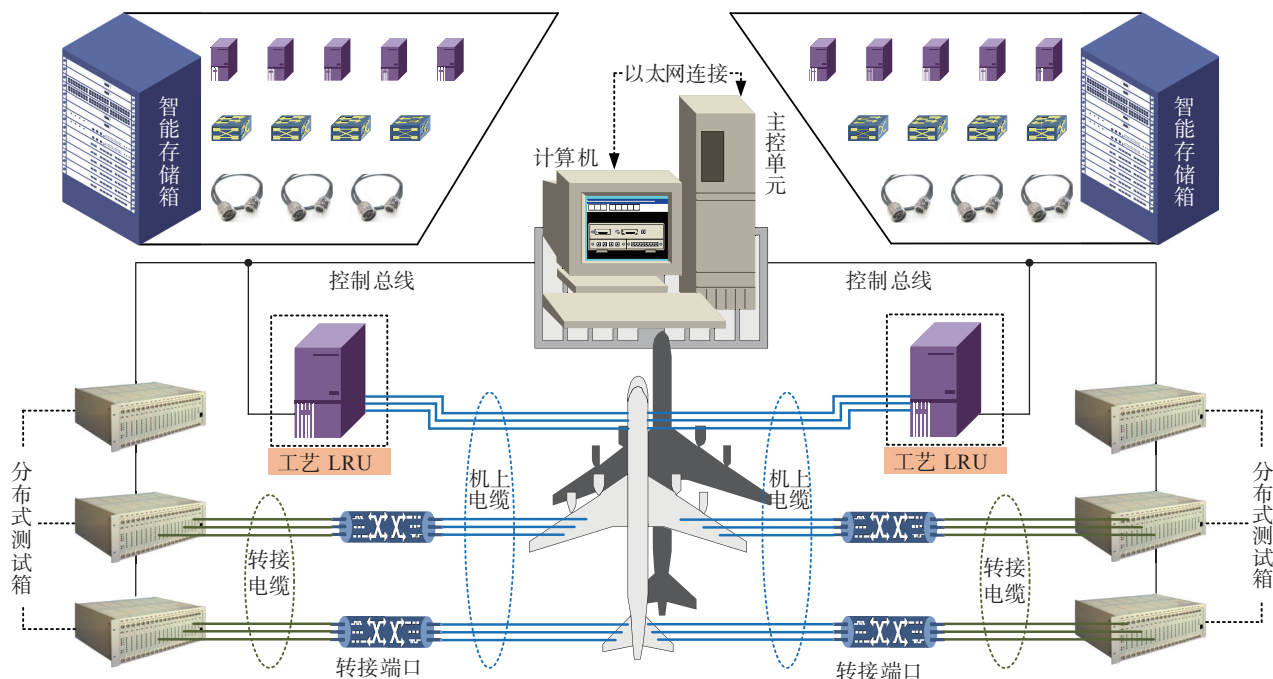


图2 飞机整机线缆自动化集成检测示意图

Fig.2 Schematic diagram of aircraft cable automation integrated detection

省掉了转接电缆和分布式测试箱的组合连接方式,测试准备工作量及转接电缆数量都大为减少,是进行飞机整机线缆集成检测的一种可行解决方案。

(4) 终端模块。整机线缆自动化集成检测的优点还在于,相对于整个待检测区,检测节点数量少或不方便工人操作的区域,可以采用终端模块来处理。该模块是一种快速连接装置,被测线缆一端与测试系统相连,另一端与终端模块连接器相匹配的短接端子连接,通过线缆内部电阻和电子二极管并联的方式,将单独测试电缆正向导通,反向不导通,进而形成并联回路。利用终端模块可以减少工艺转接电缆的数量,同时无需较长的转接电缆,方便了工人在狭小的空间内进行测试工作。

(5) 转接电缆。转接电缆在整机线缆自动化集成检测中具有非常重要的作用。虽然测试过程中也采用了工艺 LRU,但并不能完全替代转接电缆。转接电缆作为一个中间纽带的角色,将分布式测试箱和机上待测线缆关联起来。通过标准连接器与分布式测试箱连接,通过相匹配的插座或插头接插件与机上待测线缆连接,由此将机上导线接入到外围的测试系统。转接电缆在进行插接时,由于需要频繁的对转接电缆本身进行拉拽和端口的插拔,转接电缆及

其插接件的可靠性关乎到整个线缆的测试结果和质量,因此在转接电缆设计和制造时,其可靠性需要充分得到保证。

(6) 控制总线。整机线缆在测试过程中,测试设备需要相应的电源和激励源来保障其正常工作;同时测试产生的数据、各分布式测试箱内部转换的信号等,都需要向主控单元和计算机进行传输,控制总线(控制电缆)用于完成上述任务。除了传输功能外,它还是连接检测主控单元、分布式测试箱、工艺 LRU 的重要桥梁。检测主控单元一方面为各分布式测试箱提供电能,另一方面控制各分布式测试箱内部开关矩阵的切换状态。为防止高温复杂状态下控制电缆受到损伤,在设计控制电缆时会增加耐高温、耐磨损的保护功能,以提高控制电缆的寿命。

(7) 智能存储箱。转接电缆查找、收放等耗时多和存储困难,是航空制造企业经常面临的难题。检测前的准备工作和测试结束后的收尾工作,是整个飞机线缆检测的两个重要阶段。从某种程度上讲,充分的检测前准备,是保证检测工作顺利进行的;而测试结束后的收尾工作,则关系到下一次线缆检测是否能够有序开展。智能存储箱对检测过程中用到的转接电缆、工艺 LRU、终端模块、连接器等进行智能存储和管

理。通过加装位置识别器、RFID 等来实现智能存储系统与整机测试系统的连接和定位识别,转接电缆的实时存储位置、各阶段测试的状态信息、测试设备的使用状况等,都可以处在监控状态下。

(8) 其他辅助测试设备。用于辅助测试的其他相关设备,如复用板卡、测试探针、转接箱、打印机、通讯线等。

#### 4 线缆检测方法比较

手工线缆检测、基于转接电缆的线缆检测和整机线缆自动化集成检测 3 种方法的比较如表 1 所示。

### 线缆自动化集成检测研究内容

#### 1 线缆自动化集成检测工艺方法设计

对于具有检测点数多、检测点分散等特点的飞机整机线缆检测,现有的方法存在人为差错几率高、可靠性差、效率低下等问题。数字化技术和计算机自动控制技术等的发展,促进了大型飞机数字化设计与装配的进程,进而需要研究适用于总装配检测环节飞机整机线缆的数字化和自动化集成检测工艺方法。线间绝缘检测是传统手工检测难以完成的工作,需要研究新的集成检测工艺方法,在实现线间绝缘检测的同时,还可以测量导线配电终端的电压,以防止后续线缆通电时可能出现的安全隐患,确

表1 线缆检测方法比较

Table 1 Comparison of cable detection methods

方法	主要原理	优点	缺点	适用情况	备注
手工线缆检测	采用万用表、蜂鸣器等工具对单一系统的每根导线逐根、逐点搭接,通过电路中的导通电阻或蜂鸣器的声响来判断导线是否存在断路故障以及每条连接线的绝缘情况	成本低	检测效率低,操作繁琐,速度慢,工作量大,准确性差,极易出现人为差错等	检测电缆种类少,电缆芯数较少	逐渐淘汰
基于转接电缆的线缆检测	通过将转接电缆一端连接到线缆测试箱,另一端与机上插头相连,将机载导线接入测试系统	比手工检测效率高	转接电缆多,体积大,测试容量小,扩展困难	待检区域多,检测点数分布广	国内使用较多
整机线缆自动化集成检测	通过工艺 LRU、分布式测试箱、转接电缆进行转接,实现工艺 LRU 线缆集成检测	检测效率和准确性高,操作简便,工作量少	工艺 LRU 价格比较昂贵	大批量多种类多芯电缆的检测	国外发展较成熟,是未来趋势

保整个电源系统能够配电正确。

## 2 线缆自动化集成检测转接电缆优化设计

提高测试质量和效率是整机线缆自动化集成检测追求的永恒目标。转接电缆作为直接与飞机被测系统连接的重要纽带,其优化设计及合理性对整个测试系统的功能发挥具有决定性作用。在整机线缆自动化检测过程中,以分布式测试箱和转接电缆为搭配组合的测试方案仍是最常使用的一种。测试前的准备工作和测试结束后的收尾工作,所占据的时间达到整个测试周期的3/4,而在这3/4的时间里,所花费时间最多的是转接电缆与机上待测点的连接。因此,为提升整个线缆测试系统的质量和效率,需要对转接电缆进行优化设计,以增加设计质量的最优性和现场使用的便捷性。

## 3 线缆自动化集成检测故障快速定位技术

线缆检测的目的之一就是查看整个线路连接状态是否正常,如果检测出故障,需要快速定位出故障所在位置并解决。飞机整机线缆常出现的现象是线路未能正常导通,造成该现象的原因主要包括开路和错接两种情况。其中开路一般指因虚焊或线缆质量所引起的问题;而错接一般指两根导线在接入同一个插头上时插口位置被互换了。由于整机线缆数量多、连接复杂,加上敷设的长度又比较长,对其进行导通故障的定位和原因的排查、判断成了一件非常困难的事。目前采用的传统人工排查的方法效率低下,对线缆发生的故障位置不能实现快速定位。因此需要对不同敷设区域内线缆导通的故障特征进行分析,基于导通表和检测结果来建立线缆的导通模型,据此确定导通状态矩阵;对导通状态矩阵叠加导通激励矩阵,生成导通相应矩阵;最后根据导通状态矩阵、导通激励矩阵和导通相应矩阵,判断故障的

性质,定位故障的部位。

## 4 工艺转接电缆智能存储技术

对仪器设备和工具进行智能化,能够有效节省前期准备时间,尤其是对于像工艺转接电缆这样的特殊零件,涉及的数量大、连接端口类型多,因带柔性而弯曲缠绕明显,采用传统的人工管理会造成工艺转接电缆及其附件使用信息和状态信息以及相关使用人员信息不明确,严重影响检测的进度。研究工艺转接电缆的智能存储技术,引入连接器位置识别技术、RFID技术等智能识别技术,将工艺转接电缆的智能存储系统与整机线缆集成检测系统相结合,实现实时监测工艺转接电缆的存储和测试等状态信息<sup>[16-17]</sup>。为能够快速定位出工艺转接电缆的准确存储位置,以实现线缆检测时方便快捷的取用和归还,需要研究不同的存储位置检索方式。

## 国内外研究现状综述

### 1 国外研究现状及其分析

飞机设计制造及数字化装配、飞机整机的自动化检测等,随着计算机控制技术和自动化技术的发展而上升到了一个新的台阶,装配手段和检测方法都有了很大改进<sup>[18-19]</sup>。以国外先进航空制造公司为例,针对飞机线缆网络检测和故障诊断,自动化检测技术已经发挥出了优势<sup>[20]</sup>,整机线缆检测效率得到了很大程度的提高,在检测过程中因人为原因造成的安全隐患几乎被排除,生产制造效率和飞机安全性都有了提高。

国外航空航天业的波音、空客以及洛克希德·马丁公司等,在整机线缆检测方面已经放弃了传统的人工检测方法,广泛采用了整机线缆自动化集成检测技术对总装阶段的线缆导通、线缆绝缘、线缆故障等进行功能测试和诊断,检测过程高效、可靠、便捷<sup>[7,9]</sup>。如在军用机方面有欧洲的A400M、美国的F-22、F-35飞机

等,在民用机方面有波音的787、空客的A350、A380等<sup>[7]</sup>。空客汉堡公司在对线缆测试点接近4万个的A318、A319机身段进行检测时,采用的自动化集成检测技术只需要两个人用不到50min就可以完成,节省了大量时间<sup>[21]</sup>。在集成测试平台方面,法国的NEXEYA公司在复杂系统研发阶段的系统集成验证拥有丰富经验,提供飞机级、系统级和关键设备的综合验证系统,其开发的通用集成测试平台能够实现硬件和软件的在线测试,对于缺位的软件可以利用模型数据来进行代替,目前该测试平台已经成功应用于空客A380的装配测试中,在相邻测试空间内测试距离可以达到200m及以上,经扩展后可达到500m,且可实现9个空间测试范围内的1万多个测试点的检测<sup>[22-23]</sup>。NEXEYA公司的另一款产品——综合验证台SYS-Team在检测系统需求满足方面同样表现出较大优势,是航空制造企业青睐的对象<sup>[24]</sup>。

美国的航空制造业在全球都具有领先的地位。在线缆测试设备和检测领域方面,DIT-MCO公司在市场上占有很大的份额,经过50多年的技术积累和发展,该公司在开发与应用方面都具有丰富的经验,代表性的线缆测试仪产品有FACT7000/8000型、2650型、2651型、2115型和2135型等<sup>[12,25]</sup>。作为波音的主要使用用户之一,DIT-MCO公司开发的上述测试设备能够无缝连接到波音的计算机网络系统,完成设计数据读取、测试程序编辑、测试结果上传等工作,能够实时共享各分布式测试设备的测试资源,系统协调性好,工作效率高<sup>[13]</sup>。

快速定位故障位置是线缆自动化集成检测过程中的一项重要功能。采用传统的人工逐一排查,工作效率低,整机线缆自动检测技术的优势被大大削弱。因此利用自动

化检测技术实现飞机整机线缆导通故障快速定位成为一个亟待解决的问题<sup>[13]</sup>。霍尼韦尔航空航天集团公司为解决美国海军每年需要花费大量人工成本来对飞机线缆进行维修与故障排除的难题(据统计,每年超过180万工时的投入),开发了一项定位线缆故障点的智能远程维护技术,通过在Nova线缆集成项目中的应用,可实现在1min内完成对5000根电缆的检测,并完成对故障类型的判断,故障位置定位误差精度在1cm以内<sup>[26]</sup>。Furse等<sup>[27]</sup>研发的智能线缆测试系统能够利用频域反射法(Frequency domain reflection, FDR)实现线缆自动测试,通过无线通讯网络对故障位置、故障类型等数据进行采集,并发送给相关维修人员,该系统的故障位置定位误差精度在3cm以内。Jeon等<sup>[28]</sup>根据施加在线缆上的信号和反射信号彼此重叠的情况来分析线缆故障的位置,即使由于故障位置与应用位置的接近而导致应用信号和反射信号重叠,也可以准确地检查电缆的故障类型和故障位置。Ahmad等<sup>[29]</sup>开发了一种基于数据的电力电缆系统故障诊断系统,为了实现较高的故障诊断性能,同时使用小波分析和倒谱分析生成新的特征变量。Lee等<sup>[30]</sup>提出了一种基于时频域反射法(Time-frequency domain reflectometry, TFDR)的多芯电缆故障诊断方法,该方法使用基于TFDR结果的聚类算法来检测多芯电缆中的故障位置和故障线路,故障线检测聚类算法使用TFDR互相关和相位同步结果作为输入特征数据,可以检测故障线并成功识别故障点。

## 2 国内研究现状及其分析

相对于欧美等发达国家的航空制造企业而言,国内对飞机线缆的检测大多还是以采用人工操作和基于转接电缆两种方式为主,通过对电、光、声等测试信号的观察来判断线缆的导通、绝缘等情况,而在自动化集

成检测方面仍较落后<sup>[31]</sup>。

近些年,国内的一些学者和部分航空制造企业在飞机线缆检测技术方面进行了研究。如北京航空测控技术公司在2006年设计了一款主要用于小型设备的日常维护检测的电缆测试仪,该电缆测试仪携带方便,但对于飞机的复杂大型系统,其技术指标还难以满足要求<sup>[32]</sup>;王护利等<sup>[33]</sup>设计了一种便携式电缆测试仪,可实现对检测结果的实时显示和打印,能够满足对于一般专用电缆的测试要求,但是只局限于小型设备的线缆检测;李苹慧等<sup>[34]</sup>以工控机为核心,采用模块化设计方法设计了一款航空整机电缆自动测试系统,该系统初步面向机载电缆测试;刘长江<sup>[35]</sup>设计了基于改进电桥法的智能电缆故障定位仪,并开发软件用于定位电缆故障点;杜金茹<sup>[36]</sup>和张大刚<sup>[37]</sup>等对目前航空电缆检测技术的应用及未来发展进行了阐述;孙长胜等<sup>[38]</sup>对飞机电缆屏蔽层接地可靠性测试系统进行了设计,系统以NI CompactRIO机箱为核心,通过连接上位机、辅助电路以及测试工具搭建硬件测试平台,利用LabVIEW可视化编程语言编写控制程序;西安安泰电子公司(Aigtek)研制出的ATX-3000飞机线束测试仪,为飞机线束检测行业做出了贡献<sup>[39]</sup>。还有研究者对航空多芯电缆检测系统<sup>[40]</sup>、数字式电缆测试仪<sup>[41]</sup>、手持式电缆测试仪<sup>[42]</sup>等进行了研究和开发。文献[12-13]对某型飞机全机线缆自动检测系统进行了设计与优化,同时对导通故障定位方法进行了研究。

围绕线缆故障检测,翟禹尧等<sup>[43]</sup>以飞机电缆的绝缘缺陷为研究对象,根据时域反射法(Time domain reflectometry, TDR)原理建立了航空电缆绝缘故障模型,并用仿真软件针对3种不同波形的脉冲进行了仿真;高闯等<sup>[44]</sup>采用扩展频谱时域反射法(Spread spectrum time domain

reflectometry, SSTDR),基于FPGA技术设计了一种速率为500MHz的飞机电缆故障在线检测和定位装置,利用该装置在线监测电缆的健康状态,以实现故障的检测,在地面运营、维护方面提高了效率;毛健美等<sup>[45]</sup>提出采用感性耦合技术实现非接触式电缆故障在线诊断的方法,以解决现有非接触式诊断中容性耦合信号衰减量大、诊断效果不佳问题。相比于接触式诊断,非接触式诊断避免了诊断装置与待测电缆的电气连接问题;洪博等<sup>[46]</sup>针对航天器电源系统中一次母线故障的在线检测定位问题,构建了一种基于扩展频谱时域反射法的高定位准确度在线检测方法。

此外,荆涛等<sup>[47]</sup>提出了一种利用魏格纳数据分布矩阵检测飞机电缆故障的方法,在计算入射参考信号和反射信号之间相关性的基础上,通过计算相关函数波形中局部峰值时间准确确定飞机电缆故障位置;张俊民等<sup>[48]</sup>对飞机电缆出现的缺陷与故障进行了分类,着重介绍了传统检测方法和现代检测方法——反射法,从理论上分析和探讨反射法检测电缆缺陷与故障的原理、试验方法以及可行性。Shi等<sup>[49]</sup>提出了一种基于TFDR的飞机电缆故障检测与定位方法,以有效地检测间歇故障,并解决在时域反射中难以检测到的串行和后连接器故障,该方法利用反射信号和参考信号的相关函数,根据反射信号和参考信号在时频范围内的特征,对飞机故障进行检测和定位,有效提高了间歇性故障的检测和定位命中率;周训春等<sup>[50]</sup>为了提高飞机电缆故障定位的准确性,建立了电缆衰减特性模型并用该模型进行Simulink仿真和对4种长度的飞机电缆进行实测,所建立的衰减特性模型能较为准确地计算出信号在不同长度电缆中的衰减;Yuan等<sup>[51]</sup>提出利用回归分析的方式定位线缆故障的位置;Jing等<sup>[52]</sup>指出传统时域反

射法只能判断开路故障或者短路故障,他们提出的相位检测频域反射法可以检测出冷焊点、磨损点以及其他异常点。

从上述国内外关于线缆检测的研究现状可以看出,经过近60年的发展,以欧美国家为主要代表的飞机制造公司(如空客、波音等)和相关的电缆集成检测设备设计与制造公司(如英国的MK公司、美国的CKT公司及DIT-MCO公司等)在线缆自动化集成检测技术方面积累了大量的技术经验,在该技术运用方面也比较早,技术发展比较成熟,具有很大的技术领先优势。虽然国内围绕线缆检测的研究做了一些有益的工作,也研制了部分线缆测试仪器,但产品大多借鉴国外产品,缺乏创新性和核心技术,在产品的应用范围和技术水平等方面仍落后于世界先进水平。

## 线缆自动化集成检测发展趋势

### 1 转接电缆数量最小化和轻量化设计技术

对于大型飞机而言,测试点数往往是按几万点的数量级别来计算,由测试点数来安排所需要的转接电缆数量也非常大。相对于传统的检测方法,整机线缆自动化集成检测的一大优势和特点在于自动测试,测试过程中对转接电缆的操作(如拣选、取用、拖拽、归放和保存等)是否方便、快捷,是决定整个自动测试系统成功与否的关键环节之一。数量最小化和轻量化设计是转接电缆在设计 and 制造过程中实现操作便捷需要解决的重要难题。

### 2 线缆故障在线诊测与性能衰退预测技术

飞机由于存在空间小、布线不规范、相邻线缆走向不一致以及信号干扰大等特点,导致线路故障类型检出难和定位难。飞机结构的复杂性和线缆本身的特性导致飞机线路故障

定位效率低下,浪费了大量的时间和精力。线缆性能衰退状态预测是基于收集到的线缆历史监控数据,预测线缆未来的性能变化趋势。由于工作状态中的线缆会通电等缘故,对于衰退预测,线缆性能衰退中复杂的特性给预测模型带来了较大困难。因此,研究线缆故障在线诊测与性能衰退预测技术,对于提高飞机整机性能具有重要的意义。

### 3 线缆健康状态评估技术

作为飞机的“神经系统和血管”,线缆在整个飞机服役期间起着极其重要的作用。飞机的整个通信系统、控制系统、动力系统等的安全直接受线缆健康状态的影响,准确、客观地评估线缆健康状态,是实现飞机状态维修的一个重要技术手段。研究新的智能检测技术,将传感检测设备融入到整机电缆系统中,利用大数据分析技术对实时获取的航空线缆数据和健康状况进行处理和分析,实现实时在线诊断,准确评估飞机线缆的健康状态,可以为飞机的飞行计划和维修决策提供依据和技术支持<sup>[53]</sup>。

### 4 线缆工艺知识管理技术

线缆检测工艺方法设计需要相应的工艺知识作为支撑,作为提供辅助支持的管理工具,线缆工艺知识库需具备实时更新的功能。飞机线缆的设计具有更改频繁的特点,对其工艺知识的研究往往很难实现自动化的应用,这就使得很多航空制造企业没有专门的线缆工艺知识管理系统,导致线缆工艺知识的获取、存储与共享缺少有效的工具。另外,线缆接线逻辑的更改和工艺规则的更新,使得原先在系统里定义存储过程的程序代码必须做出相应的变化,这大大增加了专业的编程人员维护工艺知识库的工作量<sup>[54]</sup>。因此,需要研究线缆工艺知识管理技术,为线缆自动化集成检测提供知识基础。

## 数字孪生技术在线缆自动化集成检测中的应用展望

### 1 数字孪生技术应用于线缆检测的优势

数字孪生(Digital twin, DT)的概念模型<sup>[55-56]</sup>最早出现于2003年,由Grieves M.W.教授在美国密歇根大学的产品全生命周期管理(Product lifecycle management, PLM)课程上提出,最初被称作“镜像空间模型”(Mirrored spaced model)。2010年,美国国家航空航天局第一次将数字孪生概念引入到太空技术路线图中,目的是采用数字孪生技术来实现飞行系统的诊断与预测功能<sup>[57]</sup>。

关于数字孪生,目前还没有一个统一的定义。其主要思想是以数字化方式创建物理实体的虚拟模型,借助数据模拟物理实体在现实环境中的行为,通过虚实交互反馈、数据融合分析、决策迭代优化等手段,为物理实体增加或扩展新的能力<sup>[58-59]</sup>。作为一种充分利用模型、数据、智能并集成多学科的技术,数字孪生面向产品全生命周期过程,发挥连接物理世界和信息世界的桥梁和纽带作用,提供更加实时、高效、智能的服务<sup>[60-62]</sup>。

检测是针对被测对象某种或某些状态参量进行的实时或非实时的定性或定量测量,在产品生产的整个过程中,检测工作是保障各个生产环节能够正常、有序、高效率和高质量往前推进的重要条件。发展“四高两低”(“四高”指高效率、高质量、高精度、高可靠;“两低”指低能耗、低消耗)<sup>[58]</sup>的检测技术一直都是工业界和学术界的研究热点。数字孪生驱动的飞机整机线缆自动化集成检测模式是在虚拟空间中构建高保真度的线缆测试系统及被测线缆对象虚拟模型,借助测试数据实时传输、测试指令传输执行技术,在历史数据

和实时数据的驱动下,实现飞机线缆物理被测对象和虚拟被测对象的多学科、多尺度、多物理属性的高逼真度仿真与交互,从而直观、全面地反映飞机整机线缆运行过程全生命周期状态,有效支撑基于数据和知识的科学决策。

数字孪生驱动的飞机整机线缆自动化集成检测基于物理系统和虚拟系统的虚实共生,具有以下新特点和优势<sup>[58]</sup>:

(1)检测状态和结果能够直观呈现。原来的检测状态和结果主要由状态参量的数据化形式向工人呈现,工人需要根据自身的经验和知识对呈现出来的结果和数据进行分析、判断和处理;而利用数字孪生技术实现的线缆检测状态参量和结果则将以视觉化形式直观呈现在工人的面前,由于是实时的测试状态信息,工人可以较方便地得出飞机整机线缆的健康状态。

(2)测试时间进程的转变。整机线缆测试往往在所有线缆敷设完成后进行,或者飞机出现事故后再来进行故障的诊断和分析,属于事后测量。而基于数字孪生的线缆集成检测则是将线缆的测试工作安排到事前测量,整个测试过程可以在飞机线缆装配过程中或运行期间进行在线测量。

(3)测量的物理数据与反馈更新的虚拟数据共同指导整机的线缆测试。由于以虚拟信息的形式实时复现了物理状态下整机线缆的检测过程和数据,虚实共生的测试数据双向作用并指导测试操作,实现“虚实共生,以虚控实”的目标。

(4)响应方式由被动变为主动。传统检测方式的测试响应是根据测试结果来进行的,属于被动响应,即出现问题再来做出相应的反应;而引入数字孪生技术后,响应过程由被动变为主动,亦即基于虚实交互的自适应主动控制。

(5)数字孪生技术的一大主要特点是全生命周期管理。基于数字孪生的飞机整机线缆自动化集成检测由原先的状态监测向虚实同步映射的全生命周期健康状态预测转变。

## 2 基于数字孪生的线缆自动化集成检测

将数字孪生技术引入到线缆的自动化集成检测中,基于制造过程中的全数字量协调传递过程,借助“虚实共生、以虚控实”的手段,实现线缆的自动化集成检测。在线缆检测过程中,数字孪生技术可以全面对线缆的各个运行参数和指标进行监测和评估,对线缆的早期故障和性能退化信息进行丰富反馈,指导线缆的维护工作和故障预防工作,使线缆能够获得更长的寿命周期,延伸飞机的使用寿命。围绕数字孪生驱动的飞机整机线缆自动化集成检测模式研究,亟需突破以下难点问题:

(1)线缆数字孪生集成检测系统建模。数字孪生驱动的车缆集成检测以虚实共生为主要特征,构建面向整机线缆性能和待测线缆行为的动态集成测试系统模型,为整机线缆检测数据流管理提供理论基础。

(2)线缆数字孪生检测系统信息物理融合。信息物理融合是开展线缆数字孪生检测的前提条件,整机线缆状态测试、集成检测以及性能评估与预测,需要研究虚实共生驱动的测试设备和虚拟测试系统之间信息物理融合方法。

随着对数字孪生技术研究的深入和新一代信息技术(如云计算、物联网、大数据等)的不断发展,数字孪生驱动的飞机整机线缆自动化集成检测将具有广阔的应用前景。基于数字孪生的飞机整机线缆自动化集成检测系统框架、研究内容、关键技术及其实现途径,作者及课题组成员将在后续的工作中进行重点研究。

## 参考文献

- [1] 金颖超. 基于现场数据的客机机载设备可靠性评估方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2018.  
JIN Yingchao. Research on reliability assessment methods for field data of aircraft airborne equipment[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2018.
- [2] 王发麟, 廖文和, 郭宇, 等. 线缆虚拟装配关键技术研究现状及其发展[J]. 中国机械工程, 2016, 27(6): 839-851.  
WANG Falin, LIAO Wenhe, GUO Yu, et al. Research status and its perspective of key techniques for cable harness virtual assembly[J]. China Mechanical Engineering, 2016, 27(6): 839-851.
- [3] 樊华. 航空电缆综合测试系统的研究[D]. 西安: 西安石油大学, 2012.  
FAN Hua. Research of aviation cable integrated test system[D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2012.
- [4] 谢殿煌, 许光磊. 大型民用飞机全机系统地面综合验证试验平台研究[J]. 航空科学技术, 2015, 26(8): 38-42.  
XIE Dianhuang, XU Guanglei. Study on large civil aircraft's all aircraft systems integration verification test platform[J]. Aeronautical Science and Technology, 2015, 26(8): 38-42.
- [5] 徐小龙. 民用飞机全机电缆自动化测试系统研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2015.  
XU Xiaolong. Research of automatic testing system for whole cable on the civil aircraft[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2015.
- [6] 沙丽娜. 浅析大飞机全机电缆自动化检测技术[J]. 科技创新与应用, 2016(20): 145.  
SHA Lina. Analysis on the automatic testing technology of cables of large aircraft[J]. Technology Innovation Application, 2016(20): 145.
- [7] 党晓娟. 大型飞机全机电缆自动化检测技术研究[J]. 航空科学技术, 2016, 27(7): 44-47.  
DANG Xiaojuan. Research on automatic cable test technologies on large aircraft[J]. Aeronautical Science and Technology, 2016,

27(7):44-47.

[8] 林雪竹. 基于全三维模型的飞机大部件装配对接测量方法及实验研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2017.

LIN Xuezu. Assembly and joint measurement method and experimental study of large aircraft components based on full 3D model[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2017.

[9] 王萍. 整机线缆自动化集成检测技术在大型飞机上的应用研究[J]. 科技创新与应用, 2016(20): 120.

WANG Ping. Research on the application of the whole cable automatic integrated detection technology on large aircraft[J]. Technology Innovation Application, 2016(20): 120.

[10] 骆飞平. 整机线缆自动检测系统布局优化设计[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.

LUO Feiping. Design of aircraft harness automatic testing system optimal layout[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019.

[11] 张为民. 分布式航空线缆的网络化自动在线检测方法[J]. 航空制造技术, 2014, 57(21): 93-95, 98.

ZHANG Weimin. Aero cable online auto-detection method based on distributed network and embedded system[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014, 57(21): 93-95, 98.

[12] 张美. 某型飞机全机线缆自动检测系统设计与优化[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.

ZHANG Mei. Design and optimization of the cable auto-test system for an aircraft[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016.

[13] 章敏. 飞机全机线缆自动检测系统导通故障定位方法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.

ZHANG Min. A study on connectivity fault localization method with the aircraft cable auto-test system[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017.

[14] 裴书梅, 杨根军, 陈军. 飞机总装脉动生产线智能制造技术研究与应用[J]. 航空制造技术, 2016, 59(16): 41-47.

CHANG Shumei, YANG Genjun, CHEN Jun. Research and application of intelligent manufacturing technology for aircraft final assembly pulsation production line[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016,

59(16): 41-47.

[15] 范军华, 杨锋. 国内外先进飞机装配技术对比及思考[J]. 现代制造技术与装备, 2016(7): 183-185.

FAN Junhua, YANG Feng. Comparison and thinking of advanced aircraft assembly technology at home and abroad[J]. Modern Manufacturing Technology and Equipment, 2016(7): 183-185.

[16] 党一闻. 先进的分布式飞机线缆测试系统设计[J]. 航空制造技术, 2016, 59(4): 105-109.

DANG Yiwen. Advanced design of distributed aircraft cable testing system[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, 59(4): 105-109.

[17] 王萍. 基于模型算法的整机线缆检测转接电缆设计研究[J]. 黑龙江科学, 2019, 10(6): 74-75.

WANG Ping. Research on cable inspection and transfer cable design based on model algorithms[J]. Heilongjiang Science, 2019, 10(6): 74-75.

[18] 丘宏俊. 基于知识的飞机装配工艺设计关键技术研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2006.

QIU Hongjun. Research on key technology of knowledge based aircraft assembly process planning[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2006.

[19] 郑守国. 基于激光扫描数据的机翼壁板孔位修正及切边技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2015.

ZHENG Shouguo. Research on hole position correction and trimming technology of wing panel based on laser scanning data[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015.

[20] BHATTACHARYYA S, KUMAR R, HUANG Z. A discrete event systems approach to network fault management: Detection and diagnosis of faults[J]. Asian Journal of Control, 2011, 13(4): 471-479.

[21] TEAL C, LARSEN W. Inspection processes must compliment systems inspected[J]. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 2003, 18(11): 11-16.

[22] 莫文静, 钟霄寒. 一种航空公司采用的航空集成测试平台[C]// 第七届四川省博士专家论坛暨第四届德阳市学术大会. 德阳, 2014.

MO Wenjing, ZHONG Xiaohan. An aviation integrated test platform adopted by Airbus[C]//The 7th Sichuan Doctoral Expert Forum and the 4th Deyang Academic Conference. Deyang, 2014.

[23] 因索思信息技术有限公司. NEXEYA 装配线自动化测试系统[EB/OL]. (2018-01-12)[2020-07-30]. [http://www.isourceinv.com/?page\\_id=117](http://www.isourceinv.com/?page_id=117).

ISOURCE Information Technology Co., Ltd. NEXEYA assembly line automated test system[EB/OL]. (2018-01-12)[2020-07-30]. [http://www.isourceinv.com/?page\\_id=117](http://www.isourceinv.com/?page_id=117).

[24] 因索思信息技术有限公司. NEXEYA 系统综合验证台 SYSTeam[EB/OL]. (2018-01-09)[2020-07-30]. [http://www.isourceinv.com/?page\\_id=60](http://www.isourceinv.com/?page_id=60).

ISOURCE Information Technology Co., Ltd. NEXEYA system comprehensive verification platform SYSTeam[EB/OL]. (2018-01-09)[2020-07-30]. [http://www.isourceinv.com/?page\\_id=60](http://www.isourceinv.com/?page_id=60).

[25] DIT-MCO International. Wiring analyzers[EB/OL]. (2016-01-10)[2020-07-30]. <https://www.ditmco.com/products/wiring-analyzers/>.

[26] ROSENBERG B. Aircraft wire integrity program employs intelligent 'telemaintenance' [J]. Aviation Week & Space Technology, 2001, 155(24): 83.

[27] FURSE C, CHUNG Y C, DANGOL R, et al. Frequency-domain reflectometry for on-board testing of aging aircraft wiring[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2003, 45(2): 306-315.

[28] JEON J C, KIM J J, CHOI M I, et al. Cable fault diagnosis method and system: US10338124[P]. 2019-07-02.

[29] AHMAD I, MABUCHI H, KANO M, et al. Data-based fault diagnosis of power cable system: Comparative study of k-NN, ANN, random forest, and CART[J]. IFAC Proceedings Volumes, 2011, 44(1): 12880-12885.

[30] LEE C K, SHIN Y J. Multi-core cable fault diagnosis using cluster time-frequency domain reflectometry[C]//2018 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC). Piscataway: IEEE, 2018: 1-6.

- [31] 周启民, 王晋. 整机线缆集成检测技术分析与发展[J]. 西飞科技, 2004(2): 27-28.
- ZHOU Qimin, WANG Jin. Analysis and perspective of whole aircraft wire integration inspection and measuring technologies[J]. Xifei Keji, 2004(2): 27-28.
- [32] 苏建军, 郑永丰, 于功敬, 等. 便携式电缆测试仪的设计[J]. 计算机测量与控制, 2006, 14(11): 1585-1588.
- SU Jianjun, ZHENG Yongfeng, YU Gongjing, et al. Design of portable cable test apparatus[J]. Computer Measurement & Control, 2006, 14(11): 1585-1588.
- [33] 王护利, 何伟, 蔚海龙, 等. 便携式电缆测试仪[J]. 自动化与仪器仪表, 2008(5): 44-45.
- WANG Huli, HE Wei, YU Hailong, et al. Portable cable tester[J]. Automation & Instrumentation, 2008(5): 44-45.
- [34] 李萃慧, 林辉. 航空整机电缆自动测试系统的设计[J]. 计算机测量与控制, 2010, 18(4): 789-791.
- LI Pinghui, LIN Hui. Design of automatic testing system for whole plane aviation cable[J]. Computer Measurement & Control, 2010, 18(4): 789-791.
- [35] 刘长江. 智能电缆故障定位系统的研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2004.
- LIU Changjiang. The research of the cable fault location in intelligent system[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2004.
- [36] 杜金茹, 郑伟. 航空电缆检测技术的应用及未来发展[J]. 中国战略新兴产业, 2017(12): 41-41, 43.
- DU Jinru, ZHENG Wei. Application and future development of aviation cable inspection technology[J]. China Strategic Emerging Industry, 2017(12): 41-41, 43.
- [37] 张大刚. 航空电缆检测技术的应用与发展[J]. 电子技术与软件工程, 2015(23): 124.
- ZHANG Dagang. Application and development of aviation cable inspection technology[J]. Electronic Technology & Software Engineering, 2015(23): 124.
- [38] 孙长胜, 赵宏旭, 王家林. 飞机电缆屏蔽层接地可靠性测试系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2016, 24(9): 8-11.
- SUN Changsheng, ZHAO Hongxu, WANG Jialin. Design of aircraft cable shield grounding reliability test system[J]. Computer Measurement & Control, 2016, 24(9): 8-11.
- [39] 安泰电子. 飞机线束测试仪, 应用于航天航空领域 [EB/OL]. (2019-08-23) [2020-07-30]. [https://www.sohu.com/a/335811488\\_99978770](https://www.sohu.com/a/335811488_99978770).
- AIGTEK. Aircraft wiring harness tester, used in aerospace [EB/OL]. (2019-08-23) [2020-07-30]. [https://www.sohu.com/a/335811488\\_99978770](https://www.sohu.com/a/335811488_99978770).
- [40] 罗云林, 吴林. 航空多芯电缆检测系统设计[J]. 控制工程, 2009, 16(3): 342-345.
- LUO Yunlin, WU Lin. Design of aeronautical multi-core cables test systems[J]. Control Engineering of China, 2009, 16(3): 342-345.
- [41] 宋宏江, 孟晓风, 王琳. 数字式电缆测试仪的设计与开发[J]. 计算机测量与控制, 2008, 16(2): 288-290.
- SONG Hongjiang, MENG Xiaofeng, WANG Lin. Design of a digital cable testing instrument[J]. Computer Measurement & Control, 2008, 16(2): 288-290.
- [42] 李静秋. 手持式电缆测试仪设计[J]. 光电信息, 2011, 28(9): 68-71.
- LI Jingqiu. Design of hand-held cable tester[J]. OME Information, 2011, 28(9): 68-71.
- [43] 翟禹尧, 郭纲, 王子亦. 飞机电缆绝缘缺陷检测[J]. 现代防御技术, 2017, 45(3): 208-214.
- ZHAI Yuyao, GUO Gang, WANG Ziyi. Aircraft cable insulation defect detection based on time domain reflectometry[J]. Modern Defense Technology, 2017, 45(3): 208-214.
- [44] 高闯, 王莉, 杨善水. 电缆故障在线检测定位装置研究[J]. 航空工程进展, 2018, 9(3): 447-450.
- GAO Chuang, WANG Li, YANG Shanshui. Research on cable fault online detecting and locating device[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2018, 9(3): 447-450.
- [45] 毛健美, 王莉, 高闯, 等. 感性非接触式电缆故障在线诊断方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(7): 1579-1588.
- MAO Jianmei, WANG Li, GAO Chuang, et al. Research on inductive non-contact online cable fault diagnosis method[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(7): 1579-1588.
- [46] 洪博, 王莉, 毛健美, 等. 一种航天器一次母线故障在线检测定位方法[J]. 电工技术学报, 2016, 31(5): 118-125.
- HONG Bo, WANG Li, MAO Jianmei, et al. An online detection and locating method for spacecraft bus faults[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(5): 118-125.
- [47] 荆涛, 石旭东, 张璐, 等. 利用魏格纳数据分布矩阵检测飞机电缆故障的方法: CN102435913A [P]. 2012-05-02.
- JING Tao, SHI Xudong, ZHANG Lu, et al. Method for detecting aircraft cable fault by use of wigner data distribution matrix: CN102435913A [P]. 2012-05-02.
- [48] 张俊民, 谢华博, 魏娟, 等. 飞机电缆绝缘缺陷与故障的检测技术及分析[J]. 航空维修与工程, 2008(1): 26-29.
- ZHANG Junmin, XIE Huabo, WEI Juan, et al. Aircraft cable fault detection technology and its analysis[J]. Aviation Maintenance & Engineering, 2008(1): 26-29.
- [49] SHI X D, ZHANG L, JING T, et al. Research on aircraft cable defects locating method based on time-frequency domain reflection[J]. Procedia Engineering, 2011, 17: 446-454.
- [50] 周训春, 肖楚璇. 基于电缆衰减特性的军用飞机线路故障定位模型研究[J]. 国外电子测量技术, 2018, 37(9): 79-84.
- ZHOU Xunchun, XIAO Chuwan. Research on military aircraft line fault location model based on cable attenuation characteristics[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2018, 37(9): 79-84.
- [51] YUAN K, YU Y F, LIU X L. Aircraft cable fault location system based on principle of regression analysis[C]//2010 5th International Conference on Computer Science & Education. Piscataway: IEEE, 2010: 1226-1229.
- [52] JING T, ZHANG S B, SHI X D, et al. Design of aircraft cable fault diagnose and location system based on aircraft airworthiness requirement[J]. Procedia Engineering, 2011, 17: 455-464.
- [53] 黄加阳, 刘昕, 柏文华, 等. 民用飞机健康状态评估方法[J]. 计算机测量与控制, 2014, 22(10): 3256-3258.
- HUANG Jiayang, LIU Xin, BAI

- Wenhua, et al. Research on health condition assessment method of civil aircraft[J]. Computer Measurement & Control, 2014, 22(10): 3256–3258.
- [54] 王媛, 李青. 基于本体和 SWRL 的飞机线束协同研制知识集成框架及实现[J]. 航空制造技术, 2014, 57(13): 91–94.
- WANG Yuan, LI Qing. Knowledge integration framework and its realization of aircraft harness collaborative development based on ontology and SWRL[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014, 57(13): 91–94.
- [55] 孙敏. “数字孪生”改变行业规则的顶尖技术[J]. 大飞机, 2018(6): 44–47.
- SUN Min. “Digital twin” the cutting-edge technology that changes industry rules[J]. Jetliner, 2018(6): 44–47.
- [56] 陶飞, 张萌, 程江峰, 等. 数字孪生车间——一种未来车间运行新模式[J]. 计算机集成制造系统, 2017, 23(1): 1–9.
- TAO Fei, ZHANG Meng, CHENG Jiangfeng, et al. Digital twin workshop: A new paradigm for future workshop[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2017, 23(1): 1–9.
- [57] 杨林瑶, 陈思远, 王晓, 等. 数字孪生与平行系统: 发展现状、对比及展望[J]. 自动化学报, 2019, 45(11): 2001–2031.
- YANG Linyao, CHEN Siyuan, WANG Xiao, et al. Digital twins and parallel systems: State of the art, comparisons and prospect[J]. Acta Automatica Sinica, 2019, 45(11): 2001–2031.
- [58] 陶飞, 刘蔚然, 刘检华, 等. 数字孪生及其应用探索[J]. 计算机集成制造系统, 2018, 24(1): 1–18.
- TAO Fei, LIU Weiran, LIU Jianhua, et al. Digital twin and its potential application exploration[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2018, 24(1): 1–18.
- [59] 李凯, 钱浩, 龚梦瑶, 等. 基于数字孪生技术的数字化舰船及其应用探索[J]. 船舶, 2018, 29(6): 101–108.
- LI Kai, QIAN Hao, GONG Mengyao, et al. Digital warship and its application exploration based on digital twin technology[J]. Ship & Boat, 2018, 29(6): 101–108.
- [60] 李浩, 陶飞, 王昊琪, 等. 基于数字孪生的复杂产品设计制造一体化开发框架与关键技术[J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(6): 1320–1336.
- LI Hao, TAO Fei, WANG Haoqi, et al. Integration framework and key technologies of complex product design-manufacturing based on digital twin[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2019, 25(6): 1320–1336.
- [61] TAO F, CHENG J, QI Q, et al. Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 94(9): 3563–3576.
- [62] TAO F, ZHANG M. Digital twin shop-floor: A new shop-floor paradigm towards smart manufacturing[J]. IEEE Access, 2017, 5: 20418–20427.

通讯作者: 王发麟, E-mail: wjme@nuaa.edu.cn.

## Research Status and Its Perspective of Automated Integrated Detection Technology for Aircraft Cables

WANG Falin<sup>1</sup>, LI Zhinong<sup>2</sup>, WANG Na<sup>3</sup>

(1. School of Aeronautical Manufacturing Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China;

2. Key Laboratory of Nondestructive Testing of the Ministry of Education, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China;

3. Aircraft Assembly Plant, AVIC Jiangxi Hongdu Aviation Industry Refco Group Ltd., Nanchang 330024, China)

**[ABSTRACT]** Aircraft cable integration testing is an important task in the assembly process of an aircraft, and is a key link related to the quality of cable manufacturing and has received extensive attention in aviation manufacturing companies. The aircraft cable testing methods are compared and analyzed. The connotation and main research contents of cable automation integrated testing are introduced, and the current research status of cable automation integrated testing at home and abroad are also analyzed and compared, the problems and development trends of cable automation integrated testing are analyzed and pointed out. Finally, the application of digital twin technology in the field of cable automation integrated detection is prospected.

**Keywords:** Aircraft cable; Integrated detection; Distributed test box; Transfer cable; Digital twin

(责编 古系)