

基于时域反射法的航空电缆故障定位技术研究*

王丹阳,唐健钧,陈 讴,景世才

(航空工业成都飞机工业(集团)有限责任公司,成都 610091)

[摘要] 作为飞机的重要组成部分,电缆对飞行安全以及飞机性能的实现起着至关重要的作用。针对航空电缆装机后故障难以定位的情况,首先研究了基于 TDR 技术的电缆故障定位方法并分析典型故障波形,然后搭建试验平台,开展电缆短路和断路故障试验,其结果不仅验证了基于 TDR 原理的电缆故障定位方法的正确性,并且得到了有效的电缆典型故障判据及典型故障波形,能够指导机载电缆故障的识别及定位,一定程度上缩短了排故时间。

关键词: 航空电缆;时域反射法(TDR);故障识别;故障定位;阻抗特征

Aerospace-Cable Fault Location Technology Research Based on Time Domain Reflectometry (TDR)

WANG Danyang, TANG Jianjun, CHEN Ou, JING Shicai

(AVIC Chengdu Aircraft Industrial (Group) Co., Ltd., Chengdu 610091, China)

[ABSTRACT] As an important part of aircraft, the cable is crucial to aircraft performance and the flight safety. Because of the difficulty to locate the fault after aerospace-cable been installed in the plane, this paper has researched basic characteristic of the cable and studied the fundamental theory of TDR. Then the experiments are designed and conducted, which not only validates the fault location method based on TDR, but also obtains the effective waveform of typical cable faults and the criterion. These result could provide a guide of fault identification and location, and reduce time.

Keywords: Aerospace-cable; Time domain reflectometry (TDR); Fault identification; Fault location; Impedence characteristic

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2019.23/24.084

电网是飞机的“血管和神经系统”,分布于飞机的各个部位,电缆用量大、类型多、并且其工作环境复杂^[1-2],对飞机各系统设备的正常工作和飞行安全有着致命性的影响。以民用波音 737 飞机为例,全机电缆总长达 280km,而 DC-10 飞机电缆质量占机载电子电气设备总质量的 60%。由于本身结构特点,无论民机还是军机,其电缆安装空间极其狭小,多数电缆均是集束后敷设在机载设备与飞机结构的狭窄通道内,如图 1 所示。通常在完成电缆机上敷设安装后,电缆会被周围结构或产品遮挡,并且由于电缆集束安装,导致其内部出现失效的电缆往往不可见;即使电缆能暴露,由于飞机舱位空间以及结构限制,机务人员也难以顺利地使用手或工具进行排查。从而导致排除此类故障要大量拆装机载成品及附件,甚至需要将装机线束拆下飞机,才能找到故障

点,工作量大且耗时长。因此若能有效地检测出故障电缆并进行故障精确定位,那么对提高飞机维修质量和维修效率将有重要的意义。

目前,电缆的故障定位通常采用的方法有目检法、电桥法^[3]、高压脉冲法^[4]及二次脉冲法^[5]等。受飞机结构的限制,目检法只使用于电缆端头处,若故障隐藏在电缆中段,被飞机结构、成品等遮挡,那么该方法将难以奏效。而电桥法须在被测电缆两端同时操作^[3],考虑到实际排故过程中,存在电缆两端相隔距离长或者难以获取另一端的情况,这一方法也不便使用。至于高压脉冲法及二次脉冲法常用于电力电缆故障定位,但航空电缆基本是低压电缆,无法承受上千伏的高电压,所以不能采用高压脉冲法。

时域反射技术是通过测量电缆中的反射信号,分析反射信号中所含有的导线特性阻抗的变化信息,以确定故障类型并进行故障定位。不仅可以实现电缆的

* 基金项目:四川省智能制造项目:飞机移动式总装智能生产线。

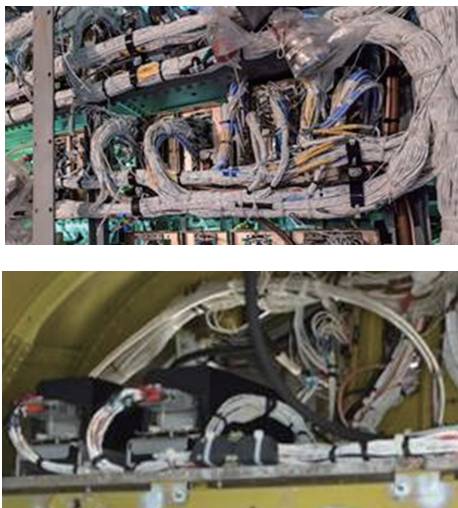


图1 机载电缆敷设安装
Fig.1 Cable installation on aircraft

单端检测,并且输入激励电压低,不会对电缆本身以及机载成品等造成伤害,对于电路资料依赖小,非常适合航空电缆的故障检测和定位。

目前,国际上关于时域反射法在航空电缆故障检测方面的研究已初见成效,不仅对于 TDR 在航空电缆故障定位领域应用的可行性进行了详细研究^[6],并且成功应用于 F-18 战斗机上控制线束的故障定位^[7]。而国内该领域的研究也取得了一定成效,在航空电缆绝缘故障的数学模型的建立^[8]、故障识别、故障波形去噪等方面进行了研究^[9-11]。但是目前国内的研究主体为高校,其研究成果基本处在实验室样机阶段,而在各飞机生产制造单位现场应用的比较少。因此针对目前现场生产需要、面向实际排故要求,开展基于时域反射法的飞机电缆故障定位研究,将有助于提高排故以及外场飞机线束维护和维修效率,具有良好的经济效益。

1 航空电缆故障分析

无论是民航飞机还是军用飞机,其飞行工作环境变化多样。民机为保证旅客的安全和舒适,需要尽可能保证飞行的平稳,只有在恶劣天气条件下才会出现大的飞行颠簸、振动等情况;但是民机通常会配备厨房、卫生间等设施,因此可能出现由于积水、洗涤剂、排泄物等处理不及时而造成的环境污染。对于军机尤其是战斗机而言,为满足作战需求,常需要完成各种空中格斗、机动,以及超音速飞行等科目,过程中不论是飞行员还是飞机产品本身都需要面临大过载、强振等恶劣条件。

1.1 航空电缆故障类型

引起飞机电缆故障的原因有很多,包括绝缘老化、受潮、机械损伤、护层损伤等,其表现形式也很多样。一

般情况下,将电缆故障分为开路故障、低阻故障和高阻故障^[12]。而高阻泄露故障和闪络性故障一般发生在中高压电缆中,而飞机电网属于低压范畴,因此不考虑高阻故障的情况,并且由于飞机电缆的特殊性,在生产、安装以及维修中经常出现的故障是断线故障、短路故障以及绝缘皮磨损和折皱。

1.2 电缆故障原因分析

造成飞机电缆出现故障或性能失效^[13]的原因可以分为以下两大类。

1.2.1 机械损伤

电缆机械损伤主要是指由于遭受与周围结构、成品、管路的摩擦、不合理的捆绑或敷设、人为拉伸或踩踏等物理过程,使电缆磨损或断裂,接触部件松动或损坏,从而造成性能降低甚至失效的情况。特对于战斗机而言,由于安装空间限制,电缆与结构、管路以及成品间距狭小,强振环境会导致电缆的动态移位,这些动态移位和相应的速度、加速度可能会引起或加剧结构、组件、成品和它们之间的机械磨损,以至于出现功能性损坏。

现有飞机电缆的制造以及装配过程仍是以人工为主,因此在制造、装配与维护过程中,由于人为施工不当(电缆剥皮尺寸不合格、切割尺寸过深、装配时强制拖拽导致拉力过大等),造成飞机电缆机械损伤甚至失效的情况时常发生。

1.2.2 环境因素造成的老化

由于气象和地理上的原因,飞机会长时间受到振动、高温、严寒、湿气、盐雾、高空射线粒子辐射等因素的影响,电缆的金属材料和非金属材料的物理性能和化学性能会随着时间变化,使其在强度、绝缘性、导电性等方面发生变化,使得电缆机械性能以及电气性能下降甚至失效。

除了自然环境影响,飞机电缆长时间处于与液压油、滑油、油脂、防冰剂、洗涤剂、积水等污染物接触的环境中,也会使得绝缘层被氧化或腐蚀,造成性能降低。

2 基于时域反射法的电缆故障定位技术

2.1 基于时域反射法的故障定位技术

电缆属于传输线的一种,在理想情况下,电缆线路可被视为均匀传输线^[14],因此采用分布参数来描述电缆模型是可行的,其等效分布参数模型如图 2 所示。

图 2 中 R, L, C, G 分别表示传输线单位长度的分布电阻、电感、电容和电导;根据以上参数可以获得其波动方程,如式(1):

$$\begin{cases} -\frac{\partial u}{\partial x} = Ri + L \frac{\partial i}{\partial t} = (R + j\omega L)i \\ -\frac{\partial i}{\partial x} = Gu + C \frac{\partial u}{\partial t} = (G + j\omega C)u \end{cases} \quad (1)$$

特征阻抗 Z_0 为入射波电压 u 与入射波电流 i 之比, 可得到:

$$Z_0 = \frac{u}{i} = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} \quad (2)$$

其中, 电容 C 和电感 L 与电缆的介电常数、材料芯线的截面积等因素有关, 这表明了不同种类的电缆其波阻抗是不同的。对于损耗较小的传输线, 由于 $\omega L \gg R$, $\omega C \gg G$, 因此特征阻抗 Z_0 可简化为 $Z_0 = \sqrt{L/C}$ 。反射系数可以表示为:

$$\rho = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \quad (3)$$

其中, Z_L 是故障点处的负载。据注入脉冲时间和脉冲反射时间的时间间隔, 可以由式(4)计算出故障点的位置:

$$L = \frac{1}{2} v_\rho (t_1 - t_2) \quad (4)$$

式(4)中, v_ρ 为脉冲在电缆介质中传播的速度, 与介质的介电常数相关; t_1 、 t_2 分别为脉冲发送的时刻与脉冲返回到发射点的时刻。在频率很高时, 电缆中电磁波传播速度趋近于一恒定常数^[15]。

2.2 故障分析

根据基于时域反射法的理论, 可获得电缆故障的阻抗基本特点。

(1) 电缆正常时, 负载阻抗与特性阻抗是匹配的, 即 $Z_L = Z_0$, 则根据式(3)反射系数 $\rho = 0$ 无反射回波。此时, 整段电缆阻抗均匀无突变点, 其阻抗波形曲线具体表现为一条幅值基本不变的直线段。

(2) 当电缆发生断路故障时, 有 $Z_L = \infty$, 则反射系数 $\rho = 1$, 入射波和反射波极性相同, 如图3所示。此时, 电缆阻抗在断路点发生突变, 其阻抗波形曲线具体表现为由正常阻抗波形(即一段幅值稳定的直线段)突然在某位置幅值增大, 并且趋近正无穷; 该突变点与正常阻抗波形起始点间的距离即入射/反射脉冲时间差, 与实际电缆短路故障点位置满足式(4)。

(3) 当电缆发生短路故障时, 有 $Z_L = 0$ 则反射系数 $\rho = -1$, 入射波和反射波极性相反, 如图4所示。此时, 电缆阻抗在短路点发生突变, 其阻抗波形曲线具体表现为由正常阻抗波形(即一段幅值稳定的直线段)突然在某位置幅值变为0; 该突变点与正常阻抗波形起始点间的距离即入射/反射脉冲时间差, 与实际电缆短路故障点位置满足式(4)。

(4) 电缆发生绝缘皮折皱、磨损及屏蔽破损时, 更进一步地, 考虑到机上电缆通常是集束之后通过航空电连接器连接, 其中每根电缆通常是通过接触偶进行连接, 连接点的引入必然会对测试线路上的阻抗产生影

响。此时有 $Z_L \neq 0$, $-1 < \rho < 1$, 相当于故障/异常点处为电感、电容、电阻的串联或并联, 图5为 $0 < \rho < 1$ 的情况。

此时, 电缆阻抗也会发生突变, 但是这些状态下电脉冲信号仍能继续沿电缆传播, 仅一部分信号在故障/异常点处发生反射, 因此电缆阻抗发生突变后仍能恢复平稳状态。其阻抗波形曲线具体表现为一段幅值稳定的直线在某位置幅值突然发生变化, 然后恢复正常, 幅值重新保持稳定状态; 该突变点与正常阻抗波形起始点间的距离即入射/反射脉冲时间差, 与实际电缆故障/异常点位置同样满足式(4)。

根据以上分析, 可以看出电缆发生短路和断路故障时, 反射波形以及电缆故障阻抗特征明显, 能够通过阻

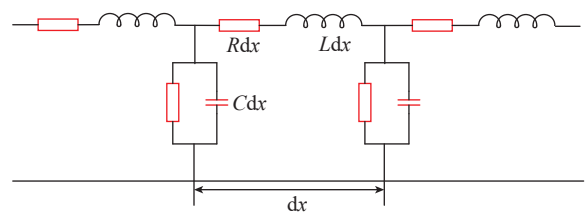


图2 电缆的等效分布参数模型

Fig.2 Equivalent distributed parameter model of cable

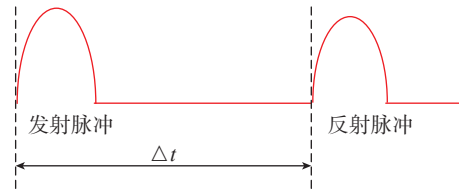


图3 电缆断路时, 入射与反射电压波形示意图

Fig.3 Schematic diagram of incident and reflected waves, when the cable open circuit occurs

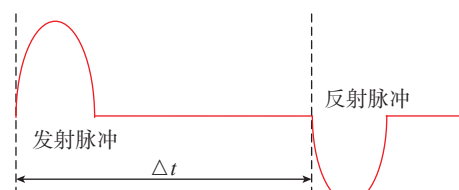


图4 电缆短路时, 入射与反射电压波形示意图

Fig.4 Schematic diagram of incident and reflected waves, when the cable short circuit occurs

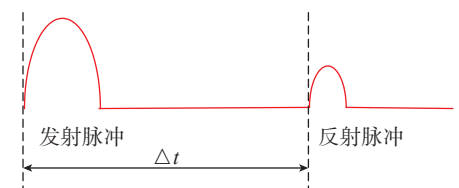


图5 $0 < \rho < 1$ 情况下, 入射与反射电压波形示意图

Fig.5 Schematic diagram of incident and reflected waves, when $0 < \rho < 1$

抗测试直接判定故障类型,而对于其他类型故障或者异常,虽然能够得到其变化特征,但是对于故障或异常类型的判断,则需要更加深层次的理论支撑。

3 电缆故障定位试验平台及试验结果

3.1 电缆故障定位试验平台

电缆故障定位试验平台主要由显示器、TDR 模块和被试电缆组成,其中 TDR 模块包括信号发生和处理电路、功率放大电路、阻抗匹配电路以及采样电路组成,如图 6 所示。

试验方法是通过 TDR 模块给被测电缆注入电压脉冲信号,其中功率放大器电路功能是提高发射脉冲的功率,使反射的特征信号更加明显。采样单元采集并保存反射波数据,与电压入射波进行比较和运算,依据时域反射原理,可以计算并测出电缆阻抗,通过阻抗的变化判断电缆上电信号传输的状态,定位故障位置。

为了保证脉冲发射信号和回波信号不会叠加,其脉冲发射频率应满足:

$$f \leq \frac{1}{T} = \frac{v_p}{L_{max} \times 2} \quad (5)$$

其中, v_p 为脉冲在电缆介质中传播的速度; L_{max} 为被测电缆长度的最大值。

为了保证最短检测距离盲区 L_{min} ,其脉冲宽度应满足:

$$T_{width} \leq \frac{L_{min}}{v_p} \quad (6)$$

测试转接电缆如图 7 所示,一端为通用 SMA 接口与 TDR 设备相连,另一端则为符合 GJB599 系列的航空连接器接触偶(针/孔),便于测试时与机上航空电连接器各型接触偶适配。

3.2 电缆故障测试流程

测试时,首先判断被测电缆是否包括在已有的标准样本库内,若包括在内,则通过夹具连接被测电缆,开始测试;若没有,则需要一段长度已知的样本线缆,进行采样测试。成功获取该型电缆阻抗信息后,继续进行测试。随后,通过对比故障典型波形,确定故障类型,并根据式(4)计算得到故障点位置。最后结合图纸资料提出机上排故方案。

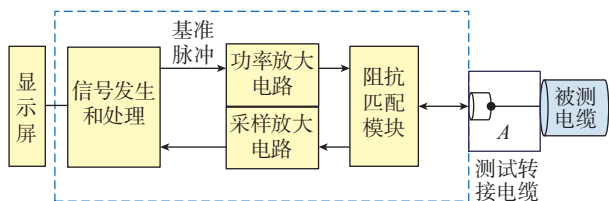


图6 试验平台原理图
Fig.6 Diagram of experimental platform

3.3 试验结果

根据图 8 所示流程,针对某型多芯屏蔽电缆开展部分典型故障试验。电磁波在该类型电缆中传播的波速度 v_p 为 197.00 mm/ns,可以通过试验得到。

部分典型故障试验结果如图 9~11 所示。其中图 9 和图 10 中的第①段波形对应转接电缆的阻抗波形,可以看到此段电缆的阻抗整体比较均匀,在 TDR 模块输出端口和转接电缆的连接处阻抗有突然变化,如图 9、10 中点 A 所示;观察图 9、图 10 中第②段的被测电缆阻抗波形,其被测电缆的阻抗明显与①段电缆阻抗值不同,并且在两段电缆的连接处阻抗有非常明显的波动。

图 9 中第③阻抗波形趋于零,即电缆此处阻抗值趋于零,可以判断出在第②和③段阻抗突变的位置,被测电缆出现短路故障。通过分析波形得到故障点至测试



图7 测试转接电缆

Fig.7 Signal conversion cable for test

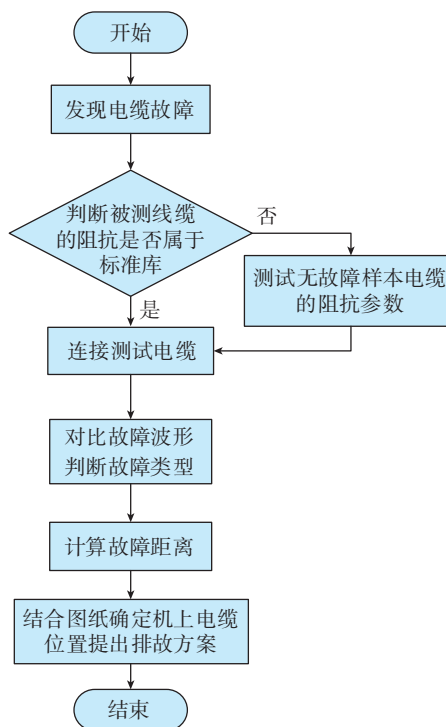


图8 测试流程图

Fig.8 Test flow chart

信号输入端的时间,根据式(4),求得短路位置距测试端的距离为 $L=1/2 \times v_p \times \Delta t = 0.5 \times 197 \times 5.569 \approx 548.54\text{mm}$,实际距离 560mm,误差为 2.0%。

图 10 中第③段阻抗波形趋于无穷大,即电缆此处阻抗值无穷大,判断得出在第②与③段阻抗突变的位置,出现断路故障。根据式(4)求得断路位置距测试端的距离为 $L=1/2 \times v_p \times \Delta t = 0.5 \times 197 \times 5.514 \approx 543.13\text{mm}$,实际距离为 560mm,误差为 3.0%。

图 11 中①段仍为转接装置的阻抗波形,②为被测电缆的第 1 段,③为被测电缆的第 2 段,两段电缆通过接触偶连接,从波形图中可以看到②和③连接处出现比较明显的变化,阻抗增大,即说明接触偶连接的引入会对电缆阻抗产生影响,使得该处的阻抗变大。

根据目前通过试验获得的部分结果和判据,针对那些难以通过目视直接定位故障点的情况,可采用该试验平台对故障线缆进行阻抗测试如图 12 和 13 所示。基于现有试验结论,基本能够实现对电缆的短路、断路的快速判断并计算得到故障点位置。

4 结论

根据飞机上电缆故障定位的需求,分析了时域反射

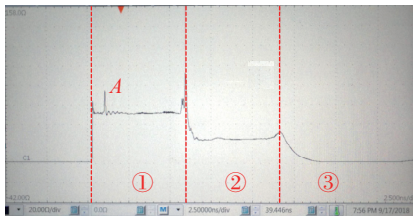


图9 测试电缆阻抗波形(短路)
Fig.9 Impedance waveform of test cable (short circuit)

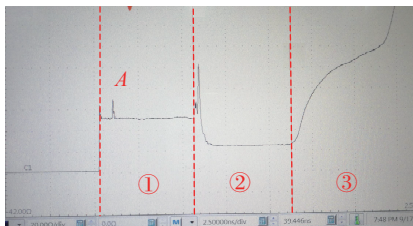


图10 测试电缆阻抗波形(断路)
Fig.10 Impedance waveform of test cable (open circuit)

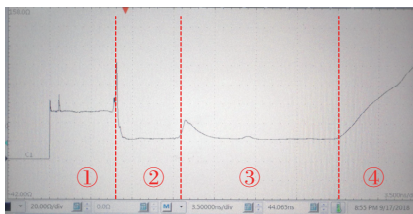


图11 测试电缆阻抗波形(包含接触偶连接)
Fig.11 Impedance waveform of test cable (including contacts)

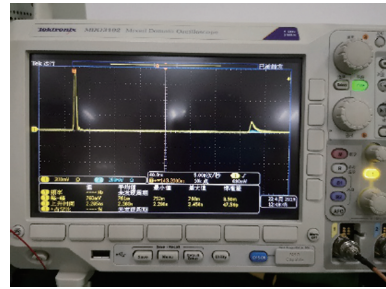


图12 试验图片1(入射波与反射波)
Fig.12 Picture of test cable (incident and reflected waves)

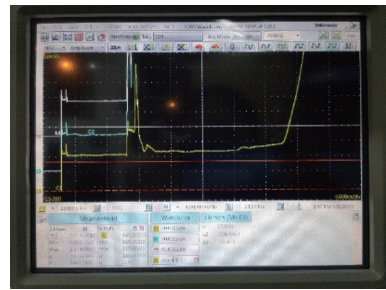


图13 试验图片2(某型电缆阻抗波形)
Fig.13 Picture of test cable (impedance waveform)

法的基本原理,并基于该原理搭建了试验平台,通过电缆典型故障的试验测试,实现了电缆的短路和断路故障的判别和定位,定位精度较好;结合实际需求,对于目前机载电缆的排故,有一定的指导意义。

现有技术不足之处在于对电缆其他故障模式的研究不够充分和深入,还需进行更加深层次的理论分析,开展电缆故障仿真工作,并结合大量试验,深入探索电缆其他故障模式的特点以及辨识方法。

参考文献

- [1] 张俊民,周小猛,魏娟,等. 基于小波变换的导线绝缘故障定位方法[J]. 电工技术学报, 2012, 27(5): 99-104.
ZHANG Junmin, ZHOU Xiaomeng, WEI Juan, et al. Method of wire insulation fault location based on wavelet transform[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(5): 99-104.
- [2] MEI Z P, LI Q, WEN J Q, et al. Research on optimization of wiring paths in airplane harness process[C]//2012 IEEE International Conference on Cyber Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems. New York: IEEE Computer Society, 2012.
- [3] YUAN K, YU Y F. Aircraft cable fault location system based on principle of regression analysis[C]//The 5th International Conference on Computer Science and Education. New York: IEEE Computer Society, 2010.
- [4] SHI X D, ZHENG J ZH, JING T, et al. Design of aircraft cable intelligent fault diagnosis and location system based on time domain reflection[C]//2010 8th World Congress on Intelligent Control and Automation. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2010.
- [5] NVE X, ZAN M, YI T. Selection of wiring environment and

(下转第96页)

参考文献

[1] DAVIS E W, SPEKMAN R E. Introduction to the extended enterprise: gaining competitive advantage through collaborative supply chains [M]. Prentice Hall/Financial Times, 2003.

[2] GOEL A, SCHMIDT H, GILBERT D. Formal models of virtual enterprise architecture: Motivations and approaches[C]// Pacific Asia Conference on Information Systems. DBLP, 2010.

[3] FOLAN P, HIGGINS P, BROWNE J. A Communication framework for extended enterprise performance measurement[J]. International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 2006, 19(4): 301-314.

[4] LI Y X. Supply chain management of aircraft industry[C]//8th International Conference on Management, Education and Information (MEICI 2018). Shenyang, 2018.

[5] CHOPRA S, MEINDL P. Supply chain management: strategy, planning & operation [M]. 5th ed. San Francisco: Person Education, 2012.

[6] MOCENCO D. Supply chain features of the aerospace industry particular case airbus and boeing[J]. Scientific Bulletin – Economic Sciences, 2015, 14(2): 17-25.

[7] 侯兆珂, 溥光星, 刘宣辰, 等. 主供模式下飞机模块化装配工艺设计探析[J]. 航空制造技术, 2019, 62(8): 55-60.

HOU Zhaoke, PU Guangxing, LIU Xuanchen, et al. Analysis of aircraft modular assembly process design in main manufacturer-supplier patterns[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2019, 62(8): 55-60.

[8] MYRODIA A, RANDRUPT, HVAM L. Configuration lifecycle management maturity model[J]. Computers in Industry, 2019, 106: 30-47.

[9] 陆汉东, 侯兆珂, 刘宣辰. 民用飞机机体供应商制造构型差异管理研究[J]. 锻压装备与制造技术, 2019, 54(2): 89-104.

LU Handong, HOU Zhaoke, LIU Xuanchen. Research on manufacturing configuration difference management of civil aircraft suppliers[J]. China Metalforming Equipment & Manufacturing Technology, 2019, 54(2): 89-104.

[10] 曾晶. 商用飞机研制阶段的供应商管理模式初探[J]. 科技创新导报, 2015, 12(21): 190-191.

ZENG Jing. Preliminary study on supplier management mode in the development stage of commercial aircraft[J]. Science and Technology Innovation Herald, 2015, 12(21): 190-191.

[11] 王龙. 民用飞机供应商管理职能体系分析[J]. 民用飞机设计与研究, 2013(2): 81-86.

WANG Long. Analysis of supplier management functions system of civil aircraft[J]. Civil Aircraft Design & Research, 2013(2): 81-86.

[12] 陈娟, 蔡建丽, 王咏梅. 民用飞机供应商构型管理技术研究与应用[J]. 航空维修与工程, 2014(3): 85-88.

CHEN Juan, CAI Jianli, WANG Yongmei. Technology research and application for civil aircraft suppliers configuration management[J]. Aviation Maintenance & Engineering, 2014(3): 85-88.

[13] 王庆林. 飞机构型管理[M]. 上海: 上海科学出版社, 2012: 89-104.

WANG Qinglin. Aircraft configuration management[M]. Shanghai: Shanghai Science Press, 2012: 89-104.

通讯作者: 李梅, 高级工程师, 研究方向为航空制造信息化应用技术, E-mail: aslm_7206@163.com.

(责编 阳光)

(上接第88页)

failure rate comparison analysis in aircraft wiring risk assessment[J]. Procedia Engineering, 2011, 14: 428-432.

[6] GRIFFITHS L A, PARAK R, CYNTHIA F, et al. The invisible fray: a critical analysis of the use of reflectometry for fray locating[J]. IEEE Sensors Journal, 2006, 6(3): 697-706.

[7] CHUNG Y C, FURSE C, PRUITT J. Application of phase detection frequency domain reflectometry for locating faults in an F-18 flight control harness[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2005, 47(2): 327-334.

[8] 张俊民, 魏娟, 谢华博, 等. 基于时域反射法的航空导线绝缘故障检测与分析[J]. 航空学报, 2009, 30(4): 706-712.

ZHANG Junmin, WEI Juan, XIE Huabo, et al. Detection and analysis of aerospace wire insulation faults based on TDR[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2009, 30(4): 706-712.

[9] 张正团, 文锋, 徐丙垠. 基于小波分析的电缆故障测距[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(1): 49-53.

ZHANG Zhengtuan, WEN Feng, XU Bingyin, et al. Wavelet analysis based power cable fault location[J]. Automation of Electric Power System, 2003, 27(1): 49-53.

[10] 刘晓琳, 袁坤. 基于互相关算法的飞机导线故障诊断与定位系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2014, 22(12): 3903-3905.

LIU Xiaolin, YUAN Kun. Design of fault diagnosis and localization system of aircraft wire based on cross-correlation algorithm[J]. Computer Measurement & Control, 2014, 22(12): 3903-3905.

[11] 翟禹尧, 郭纲. 航空电缆 TDR 数据去噪与故障定位新方法[J]. 现代防御技术, 2016, 44(6): 128-134.

ZHAI Yuyao, GUO Gang. New method of data denoising and fault location for aviation cable TDR[J]. Modern Defence Technology, 2016, 44(6): 128-134.

[12] CUPERTINO F, LAVOPA E, ZANCHETTA P, et al. Running DFT-based pll algorithm for frequency, phase, and amplitude tracking in aircraft electrical systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(3): 1027-1035.

[13] 刘晓琳. 飞机导线故障诊断与定位方法研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2013.

LIU Xiaolin. Research on fault diagnosis and location method of aircraft wire[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2013.

[14] 李保生. 基于时域脉冲反射原理的电线电缆精确测长技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2010.

LI Baosheng. Study on wire-cable length precision measurement technology base on TDPR[D]. Xi'an: Xidian University, 2010.

[15] 宋建辉. 基于时域反射原理的电缆测长若干关键技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.

SONG Jianhui. Some key techniques of cable length measurement based on time domain reflectometry[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010.

通讯作者: 唐健钧, 博士, 高级工程师, 研究方向为飞机集成装配技术及数字化车间, E-mail: tang8848@126.com.

(责编 阳光)