

飞机电缆短路故障分析及机理研究

李红¹, 邓乐武¹, 罗强¹, 张永强¹, 韩杨²

(1. 航空工业成都飞机工业(集团)有限责任公司, 四川成都 610092;

2. 电子科技大学机械与电气工程学院, 四川成都 611731)

摘要: 电缆用于连接机上各用电设备, 是飞机传递动力电源的重要装置。由于飞机结构和负载的限制, 对机上电缆的体积、重量、性能和规格有严格的要求。无论飞机处于地面维护还是空中飞行状态, 电缆异常都可能造成系统短路、断路故障, 严重影响用电设备运行, 甚至可能危及飞行员以及飞机的安全。重点分析了绝缘层、热效应、接触电阻、过载及负载短路对电缆短路特性的影响, 进一步通过暂态分析与 Matlab 仿真结果验证提出理论分析的正确性与有效性, 为预测非显性的故障隐患、电缆故障精确定位、电缆环境优化等提供有力支撑。

关键词: 热效应; 接触电阻; 短路; 绝缘层; 故障诊断; 暂态分析

中图分类号: TM246 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2019)06-0019-06

DOI: 10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2019.06.005

Analysis on Short-circuit Fault of Aircraft Cable and Research on Its Mechanism

Li Hong¹, Deng Lewu¹, Luo Qiang¹, Zhang Yongqiang¹, Han Yang²

(1. AVIC Chengdu Aircraft Industrial (Group) Co., Ltd., Chengdu 610092, Sichuan, China;

2. School of Mechanical and Electrical Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, Sichuan, China)

Abstract: The aircraft cable is used in the power system to connect different electrical equipment. Due to the structural limitations of electrical equipment, the volume, weight and performance of aircraft cable are required to be improved. Moreover, when the cable faults occur in aircraft power system, the short-circuit fault or breaking fault of cable will affect the operation of electrical equipment, even the safety of aircraft and pilots. The influences of insulation layer, thermal effect, contact resistance, load and overload short-circuit on the short-circuit characteristics of aircraft cable are analyzed. In addition, the results of transient analysis and Matlab simulation are provided to verify the effectiveness of the proposed theoretical analysis, which provides strong support for fault location and environment optimization of cable.

Key words: thermal effect; contact resistance; short circuit; insulating layer; fault diagnosis; transient analysis

0 引言

随着航空航天飞机的机载成品数量集成度越来越高, 对机上供电电能质量、用电、配电的要求也变得更加严格^[1]。电缆从驾驶舱覆盖到机尾, 并用于连接机上各用电设备, 其质量可达机载电子设备和电气设备总质量的 60%, 是飞机传递动力电源的重要装置^[2-4]。

由于飞机线路的复杂, 对电缆的故障定位变得

基金项目: 广东省自然科学基金项目(2018A030313494)

至关重要。目前在航空航天和电力电子领域故障检测方法包括时域反射法(time domain reflectometry, TDR)^[5-6]、驻波反射(standing wave reflectometry, SWR)^[7]、频域反射(frequency domain reflectometry, FDR)^[8]。以上的方法都可以分解为一个通用流程: 生成定义的波形, 记录反射/入射脉冲, 最后分析结果。然而上述方法无法判断电缆故障的根本原因。文献[9]利用 ANSYS 软件分析了截面、电流对截面温度场分布及线缆中不同层导线间的热接触传热影响, 但是却未考虑绝缘层以及负载突变对线路的影响。

通过分析电缆绝缘层、热累积效应、接触电阻、

过载及负载短路对电缆短路特性的影响,探究造成飞机电缆短路故障的机理,并通过暂态分析与 Matlab 仿真结果验证提出理论分析的正确性与有效应,为飞机电缆的故障诊断与定位提供依据,预测非显性的故障隐患,电缆环境优化等提供有力支撑。

1 飞机发电系统飞机电缆基本属性原理

1.1 飞机电缆的结构组成和种类用途

飞机常用线束包括总线、高温电缆、常温电缆和低温电缆。除专用的总线外,电缆的结构均如图1所示,主要包括芯线、绝缘层和防护套。

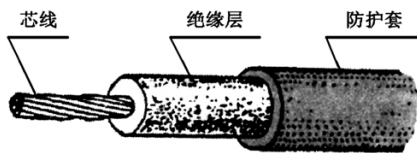


图1 典型的飞机电缆结构

在对飞机电缆进行设计或选型时,需考虑电缆受传递功率、传递距离、敷设方法和路径环境的影响,综合分析电缆横截面积、体积、重量和经济性^[10]。

飞机电缆芯线的材质通常选取铜或铝,而铜较铝电阻率更低,导电性和延展性更好,基本适用于飞机各系统导电性能指标要求。采用聚氯乙烯、乙烯-四氟乙烯共聚物等材料作为电缆的绝缘层以避免电缆之间短路,保证电缆间的电气隔离。在具体选材时还需考虑安装舱内环境、电缆功能的影响,如柔软性、耐热性、耐燃性等。电缆的防护套通常选用防波套、胶管、塑料管等,以起到不同的保护作用。

1.2 飞机电缆故障类型

飞机电缆故障主要分为软性故障和硬性故障。软性故障包括磨损故障和间歇故障,最终仍都表现为硬性故障,即短路和断路故障,断路硬性故障分别是信号传递中断和传递不正确主要原因^[11]。

飞机电缆故障严重影响用电设备的工作性能,危及飞机的飞行安全。飞机系统涉及种类繁多,相互关联性强,导致电缆故障原因错综复杂。下面主要针对短路故障进行详尽的梳理和分析。

2 飞机电缆短路机理分析

飞机电缆短路通常发生在设备/负载端、电缆插头座的连接处(接触偶)等。通常在设备/产品端发

生短路时,断路器、继电器等可有效切除故障部分,阻止危害进一步扩散。而在电缆连接点,即电缆与电缆插头座连接处,电缆与成品/设备插头座连接处出现短路时,通常未加入直接快速保护的措施,易导致供电中断、设备/负载受损,严重时更可能发生火灾等事故。综上所述,飞机出现电缆短路原因可分为:

- 1) 飞机电缆发生短路(但未发生火灾),影响设备成品或飞机正常运作,此时触发短路部分的断路器,短路故障停止;
- 2) 飞机电缆短路并引起火灾,除了需要及时切除故障部件,还需灭火;
- 3) 密闭舱出现火灾,引起电缆短路。

因此,若有火灾痕迹的事故分析中必须首先鉴定是火灾引起短路,还是短路引起火灾。

2.1 火灾发生时短路根因分析

飞机发生了火灾且出现了线路短路,在事故根因分析中,还需鉴别是火灾引起短路,还是短路引起火灾,能成为事故分析的重要依据之一。

火烧熔痕和短路熔痕存在差异性,可做火灾引起短路或短路引起火灾的初步判据^[12];由于火烧熔痕与短路熔痕在金相组织上呈现不同特征,可采用金相法做进一步的验证性分析^[13]。通过找寻电缆短路熔珠,结合火烧熔痕的金相显微组织特性,可准确判断火灾引起短路或短路引起火灾。

以上表明,当发生火灾情况时,若是火灾引起电缆短路故障,应着重从电缆相关系统或成品设备去分析;若是电缆短路引起火灾,可与未发生火灾时,电缆短路引起飞机故障一同分析。下面将着重分析电缆短路发生的原理(未发生火灾或火灾原因判定为电缆短路时均适用)。

2.2 绝缘层损坏导致电缆短路

图2所示为飞机正常运行情况下电缆连接方式之一,从图中可以看到三相交流电源的各相电均通过插针与插孔连接后再向负载供电,电源/设备的地线(GND)分布式的与机壳相连。图中A、B、C代表三相115V交流电,AC Power代表交流电源,Load代表负载端。

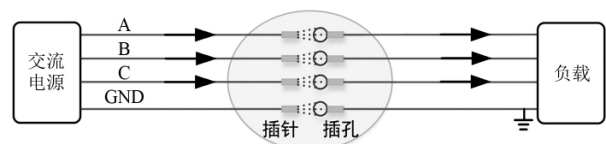


图2 典型飞机交流电源关联电缆连接

2.2.1 物理特性影响

图3为飞机频繁振动后,绝缘层损坏导致芯线之间形成短路回路的示意图。特殊用途电缆虽然会在连接处作屏蔽处理(靠近插头座处),但也仍易发生绝缘层损坏。

如图3所示,由于绝缘层损坏,电源直接由电缆接通成闭合回路,回路电流大幅度增加并超过其额定电流值。线路自身存在阻抗,进而形成热功率。电流越大则热功率越高,最终烧坏电缆。

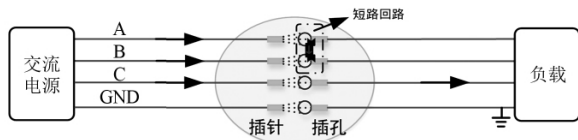


图3 电缆连接点的绝缘层出现物理损坏后示意

2.2.2 热效应累积造成绝缘层损坏

电缆发热功率 Q 可按式(1)进行计算:

$$Q = I^2 R t \quad (1)$$

式中 t 为持续运行时间。在电阻 R 基本恒定时,通过导体电流 I 越大,加热功率越大。运行期间释放的热量将被电线本身吸收,导致电线温度升高。由于电线在吸热的同时,也会将热量散发到外界。因此,正常运行时,电缆温度不会无限升高,将恒定在一固定温度 T_{std} 处,此时电缆吸热与散热功率一致,电缆处于热平衡状态。

实际飞机运行过程中,还存在一些限制:

- 1) 随着电缆工作年限增长,绝缘特性、承受最大电流、最大温度值将下降,即 $Q_{std} \setminus I_{max}$ 值下降。
- 2) 电缆长时间工作,散热性能降低, Q_{std} 进一步降低。
- 3) 电缆长时间,时间增加,导致热累积量逐渐增大。

以上表明,随着电缆性能和寿命的降低,导致稳态临界温度值逐渐降低;长时间工作后电缆的发热功率产生的热累积,最终超过临界值。

当电源所产生的热量来不及散发就会在一处堆积(通常堆积在插头座处),温度也就升高。升高到绝缘层的极限时,绝缘开始熔化进而发生短路,短路后电流又将增大,进入恶性循环直至烧断电缆。

2.3 接触电阻影响供电特性

电缆的频繁震动会出现以下3种情形:

- 1) 接头松动,导致电缆虚接,在连接点的载流量大大下降,当电缆流过的电流大于其连接点的安

全载流量时,即会发热;

- 2) 连接点还受到电流的热效应的影响,加快了电缆连接点处的金属腐蚀,致使电缆连接点处的有效导电面积减少,接触电阻增大;

- 3) 接触电阻突然增大,会在连接点处产生压降,在该点处就会做功,且该点产生功率逐渐增大现象,也会产生大量热量。

以上现象最终导致连接处发热,降低绝缘性,甚至出现供电中断等严重事故。

2.4 过载、负载短路对电缆影响

在飞机地面或者飞行状态时,若设备/成品出现短路,也会使飞机用电设备遭受机械或热损伤,甚至可能烧断供电电缆,引发火灾。

2.4.1 负载单相接地短路

电力电缆在实际运行中,除了要通过连续额定的载流量以外,还需承受短时过载和短路电流。如图4所示,负载输入端单相接地短路故障,则会反应到一相供电电缆发生故障,其他两相供电电缆就必须在短时间内承担较大的负载,导致电缆在极短需要承受较大短路电流。由于电缆工作温度不允许超过最高允许温度,造成过热的过载可作为判定的临界之一。因此,针对过载问题,需要确定过载时间和过载电流值间关系。

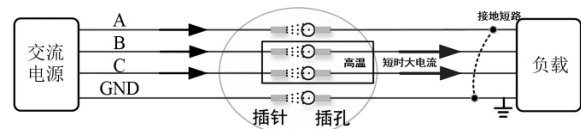


图4 负载单相接地短路

2.4.2 负载相间短路

如图5所示,与负载单相短路类似,如果负载AB相发生相间短路,则会造成短小时内C相需要承受大功率电流,过大电流则会在接触偶上产生热效应积累,严重时还会熔断插头座,甚至发生火灾。

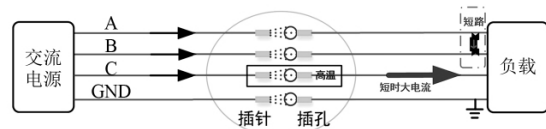


图5 负载供电端相间短路

3 暂态分析、仿真分析与案例验证

3.1 暂态分析

当电路发生短时过载时,过载温度可比额定最高

温度再高 10 ~ 15 °C。过载是随时间变化的,但其热场为暂态热场。飞机在空中飞行时,飞机电缆敷设于舱内,且周围成品工作时还会不断散发热量,导致电缆周围环境温度高于机外空气温度,为简化分析,假设短时过载时电缆周围环境温度不变。

热流 W 一部分为散入周围煤质空气中的 W' , 另一部分为为导体自身温度升高所吸收的热量 W'' 。其中:

$$Wdt = W' + W'' = hA(\theta - \theta_a) dt + Q_T d\theta \quad (2)$$

式中: W 为热流; h 为散热系数 J/m^2 ; A 为散热面积; θ 、 θ_a 分别为导体和周围煤质温度; Q_T 为热容系数。

由式(2)可得:

$$\begin{aligned} t &= \int dt = \int \frac{Q_T d(\theta - \theta_a)}{W - hA(\theta - \theta_a)} \\ &= \int \frac{d[W - hA(\theta - \theta_a)]}{W - hA(\theta - \theta_a)} \cdot \left(-\frac{Q_T}{hA}\right) \\ &= -\frac{Q_T}{hA} \ln[W - hA(\theta - \theta_a)] + C \quad (3) \end{aligned}$$

式中 C 为积分常数。

以上可分析示意热路图如图6所示。

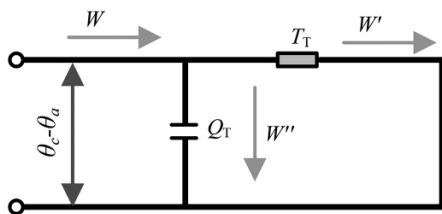


图6 电缆暂态发热近似等效热路

图7为裸电线发热和冷却曲线以及各曲线的变化率,图中1为发热曲线,2为冷却曲线;实渐近线为两根曲线的变化率。

根据暂态响应,可导出过载电流的计算公式。其中电缆各部分的热阻与电缆周围煤质热阻之和为等效热阻。

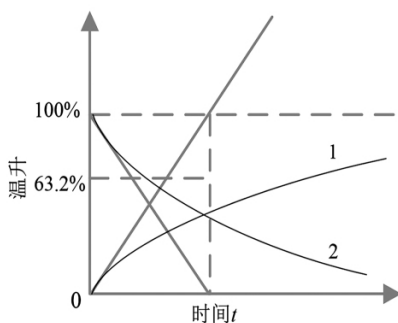


图7 裸电线发热、冷却曲线

对于低压电缆,介质损耗可忽略不计,温升仅与负载电流的平方成正比,故可据式(4)得到初载为0时的电流。

$$I_N^2 = I_P^2 (1 - e^{-t/\tau}) \quad \pi = Q_T T_T \quad (4)$$

式中: I_N 为长期允许的负载电流; I_P 为过载电流; τ 为时间常数; Q_T 为等效热容; Q_C 为导电线芯热容; T_T 为等效热阻。

若电缆变载前初始负载不为0,即初始负载电流为 I_1 时,则电缆允许在 t 时间通过的电流为

$$I_P = I_N \sqrt{\frac{1 - x^2 e^{-t/\tau}}{1 - e^{-t/\tau}}} \quad (5)$$

式中,负载系数 x 满足 $x = I_1 / I_N$ 。

额定电缆 I_N 亦可根据允许短时过载温度确定,从而求出过载电流。

短时过载电流允许倍数为

$$\frac{I_P}{I_N} = \sqrt{\frac{R}{R_P} \left(1 + \frac{\theta_P - \theta_m}{\theta_m - \theta_a} \frac{1}{1 - e^{-t/\tau}} \right)} \quad (6)$$

式中: I_P 和 I_N 分别为允许短时过载电流和连续载流量; R 和 R_P 分别为允许长期和短时过载导体电阻; θ_m 、 θ_P 、 θ_a 分别为允许短时和长期过载温度及环境温度。

根据以上分析,结合实际的电缆材质以及环境特性,可估计电缆工作特性以及过载电流值。

3.2 仿真分析

将利用 Matlab 对电缆电流、电阻、时间与发热功率关系进行分析,为便于分析,熔化绝缘层的热平衡温度 T_{max} 对应热功率近似为 Q_{max} 。

图8为某负载发生短路时的一种电流特性。图9为负载短路时,电缆接头功率、时间、电流的三维仿真图。假设连接电阻近乎保持不变,即 $R \approx 500 \text{ m}\Omega$ 。

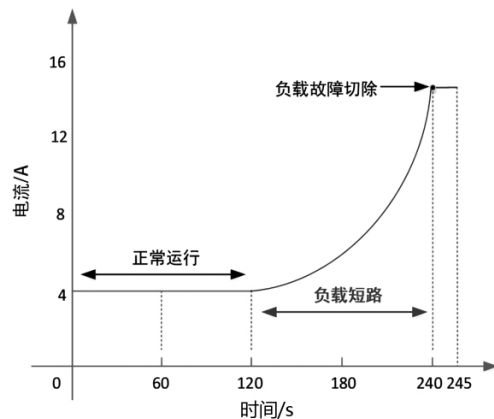


图8 某负载发生短路时的一种电流特性

图8中在 $t = 0 \sim 120 \text{ s}$, 负载正常运行, 电流达

到4 A;在 $t = 120 \sim 240$ s 发生短路时,电流随时间增加而不断增大;在 $t = 240$ s 时,故障负载被飞机保护系统检测到,并作出保护动作;在 $t = 240 \sim 245$ s 内,接头承受短时的大电流。

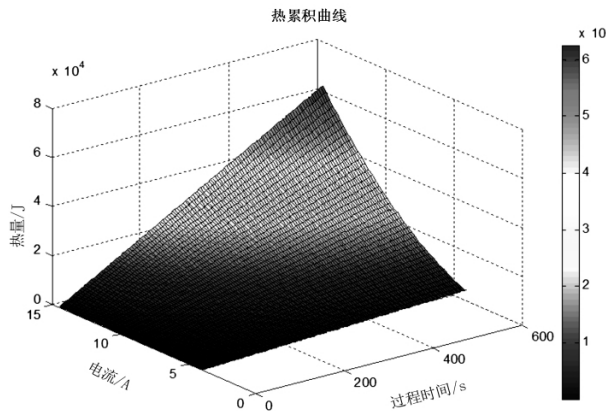


图9 负载短路时,电缆热累积曲线中接头功率、时间与电流关系

图9中,右侧温度表表示各范围的热功率。可以看出,若负载 $Q_{\max} < 5 \times 10^4$ J,则在故障负载安全切除后,电缆仍处于安全范围内;而当载 $Q_{\max} > 5 \times 10^4$ J,但故障负载还未切除,电缆已承担最大安全电流(由热功率和温度等效的电流)则电缆发生绝缘损坏,进而可能导致接触偶(供电端)相间短路,导致发电系统发生故障,严重时还会发生火灾。

图10为电阻长时间虚接状态的一种等效电阻示意图,在发生接触偶故障前,电流在正常状态内波动,即 I 为4~8 A。

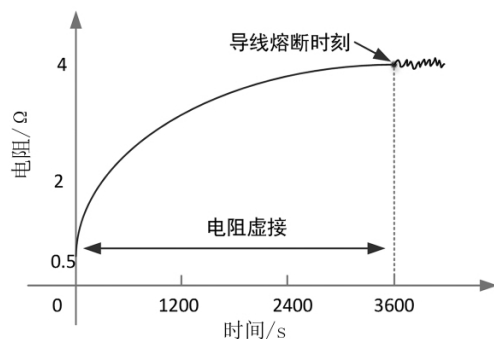


图10 电阻虚接时接触偶电阻变化曲线

图11为电阻虚接时电缆发热功率、过载时间及电流的关系曲线。在电阻虚接情况下,电流在正常值范围内逐渐增加。可以看出,若接触偶处 $Q_{\max} < 7 \times 10^4$ J 时安全切除电缆,则电缆仍处于安全范围内;而当载 $Q_{\max} > 7 \times 10^4$ J,故障还未切除,电缆已承担最大热功率,但发热功率仍主要受接触电阻影响。

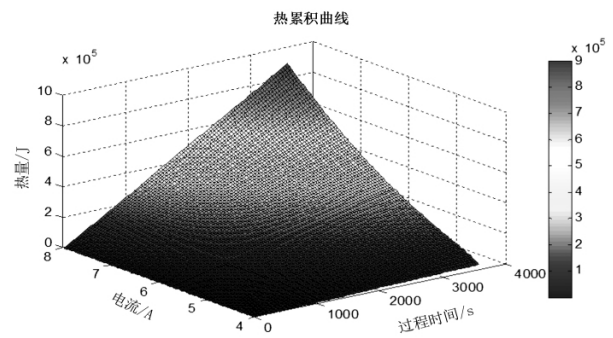


图11 电阻虚接时,热累积曲线热量、电流与过程时间关系曲线

图12为电缆发热功率、时间、接触电阻之间的关系图。在电阻虚接情况下,随时间增加接触电阻大幅度增加。可以看出,若接触偶处 $Q_{\max} < 7 \times 10^4$ J 时安全切除电缆,则电缆仍处于安全范围内;而当载 $Q_{\max} > 7 \times 10^4$ J,故障还未切除,电缆已承担最大热功率,则电缆发生绝缘损坏,进而熔化电缆或直接造成接触偶相间短路,导致发电系统发生故障,甚至发生火灾。

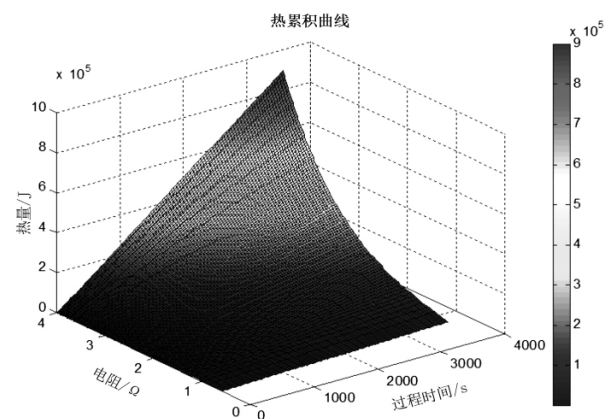


图12 电阻虚接时,热累积曲线热量、接触电阻与过程时间关系

以上分析表明,过载会导致多股电线电缆中内芯之间绝缘损坏。多芯电缆由绝缘层分开,过载绝缘层软化损坏,导致电线电缆的两根或多根导体直接接触而短路燃烧设备。同时短路瞬间大电流产生高温使线路起火、电线熔化,熔化的电线落到周围的易燃物上引起火灾。过载导体传热使附近的“可燃温度值”升高,因此附近燃点较低的可燃物质,可能会被点燃引起火灾。

过载也会导致线路中的接头处过热,加速连接点的氧化过程。连接点的氧化容易产生不易导电的氧化膜,氧化膜增加了接触点之间的电阻,导致打火等现象,甚至引起火灾。

3.3 飞机电缆故障的预防和改善

电缆故障在整个飞机生命周期中时常发生,提出4个方面的建议以优化电缆维护和保养,降低飞机维修成本,改善飞机整体性能。

1) 飞机电缆长时间与液压油、润滑油、防冰剂等接触时易产生接触污染,通过选用绝缘层抗氧化或腐蚀更强的电缆,能降低接触污染对电缆造成的影响。

2) 飞机电缆受到振动应力作用会对电缆产生不同程度的物理损伤。规范的电缆敷设以及对电缆布局作合理优化,都能减少电缆磨损或断裂、接触件松动或损坏概率,从而使飞机电缆性能大幅度的增加。

3) 需对电缆物理和化学性能进行周期性检查,及时发现、更换隐患或故障电缆,能减少飞机事故率,大幅度增加飞机的安全性及可靠性。

4) 对特殊电缆和关键、重要设备应选取更加适应恶劣环境影响的电缆,周期性检查对环境影响敏感的电缆,及时发现、更换故障电缆,避免电缆故障造成飞机飞行安全事故。

4 结 语

首先简述了飞机电缆的基本属性,包括飞机电缆的结构组成和种类用途,进一步分析了电缆的载流量、电压降、绝缘材料、质量和强度和特种用途对电缆性能的影响。

然后针对短路引起火灾事故,或电缆短路(未发生火灾)的情况,详细阐述了绝缘层损坏、热效应以及大负载、大电流对电缆短路的影响及后果,对飞机电缆的故障诊断与定位提供理论依据,为预测非显性的故障隐患、电缆的电气环境优化等提供了有力支撑。

最后通过暂态分析初步计算过载电流值,并通过 Matlab 对热累积功率、接触电阻、电缆电流与过载时间关系进行分析,结合故障实物照片验证了所提出的理论分析和仿真的正确性和有效性。针对飞机电缆的特殊性,提出了飞机电缆故障的预防和改善措施,进而减小电缆故障率,降低维护成本,大幅度增加飞机安全性和可靠性。

参考文献

[1] Jones C E, Norman P J, Szykiel M, et al. Electrical and

Thermal Effects of Fault Currents in Aircraft Electrical Power Systems with Composite Aero - structures [J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2018, 4(3): 660 - 670.

[2] 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.

[3] Mei Zh 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, United States: IEEE Computer Society, 2012: 485 - 488.

[4] 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.

[5] Laib A, Melit M, Nekhoul B, et al. Localization of Faults in Wiring Networks Using Time Domain Reflectometry and Adaptive Neuro - fuzzy Inference System [J]. Electronics Letters, 2017, 53(9): 600 - 602.

[6] Cole, Robert H. Time Domain Reflectometry [J]. Annual Review of physical chemistry, 1977, 28(1): 283 - 300.

[7] Teal C., Satterlee C. Managed Aircraft Wiring Health Directly Relates to Improved Avionics Performance [C]. The 19th Digital Avionics Systems Conferences IEEE, 2000 Proceedings(1): 3B6/1 - 3B6/6.

[8] Yoshimichi Ohki, Naoshi Hirai. Detection of Abnormality Occurring Over the Whole Cable Length by Frequency Domain Reflectometry [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2018, 25(6): 2467 - 2469.

[9] 高强, 仝杰, 雷煜卿, 等. ANSYS 下导线发热及相互间热接触的数值模拟 [C]. 2012 年电力通信管理暨智能电网通信技术论坛论文集, 2013.

[10] (英) E.H.J. 帕利特. 飞机电气系统 [M]. 韩世杰, 徐荣林, 译. 北京: 国防工业出版社, 1985.

[11] Guo Q. Novel Approach to Risk Assessment of Aircraft Electrical Wiring Interconnect System [J]. Journal of Aircraft, 2011, 48(6): 1888 - 1893.

[12] 覃萍. 铝导线短路熔痕的微观形貌实验分析 [J]. 广西民族大学学报(自然科学版), 2006(增刊1): 48 - 53.

[13] 叶海伦, 詹涌鑫, 李钊, 等. 不同接触方式的导线短路熔痕金相晶粒尺寸分析 [J]. 科技通报, 2017, 37(6): 6 - 9.

作者简介:

李 红(1993), 硕士, 助理工程师, 研究方向为飞机电气系统及供电保护。

(收稿日期: 2019 - 10 - 17)