

复合材料飞机的电流回路接地技术研究

Research of Current Return Path of Composite Aircraft

张宇 / 上海飞机设计研究院

摘要: 随着复合材料在飞机中所占比重的增大, 诸多电磁兼容设计的问题也日趋凸显。本文分析了飞机复合材料结构对电流回路接地的影响, 介绍了复合材料结构内接地网的应用及研究现状, 提出了接地网设计及优化时的设计目标与方法。

关键词: 复合材料飞机; 电流回路接地; 接地网

Keywords: composite aircraft; current return path; electric structural network

0 引言

飞机的设计研究一直与采用性能优越的新材料密切相关, 近年来碳纤维复合材料由于其高强度、高模量等优异性能, 在飞机结构中得到了大量的应用。但由于其射频频阻抗大、导电性差, 给飞机电磁兼容性设计带来了诸多麻烦。而传统的金属机身除了作为承力

结构外, 还具有以下功能: 电流/故障电流回路、为机载电气设备提供基准电位、静电防护、雷电防护、高强度辐射场 (HIRF) 防护、天线接地平面等。

此外, 多电飞机也是未来飞机的发展方向, 机载系统的二次动力部件将由电力驱动。这就使得飞机电源容量更大, 同时电气设备种类和电线电缆的数

量也将大大增加。因此有必要研究复合材料结构对电气系统带来的影响, 以及如何在复合材料结构区域内满足越来越多、越来越复杂的电气设备的用电要求。

本文主要针对复合材料结构对电流回路接地的影响进行了分析, 并介绍了复合材料结构内接地网的应用现状, 提出了接地网设计时应注意的设计原则。

L2、Wy1、Q6、Wy2、A、B、A1、L5、W2这10个装配参数。

4 结论

本文运用基于MINITAB的主成分分析法研究装配参数与整机振动之间的关系, 分别对“垂 I”和“垂 II”影响较大的装配参数综合分析, 从20个主要装配参数中, 挑选出10个装配参数作为关键装配参数。

在工厂中对这10个关键装配参数重点关注, 从与之相关联的零部件和装配工步中查找需要严格控制的关键点, 如在生产制造关键零部件时对其公差精度提高要求、在关键装配环节对相关工步精心操作、检验人员细心

检测关键装配参数等, 都将有助于提高发动机的装配质量, 从而提高发动机的整体性能质量。

AST

参考文献

- [1] 柏树生, 艾延廷, 翟学, 等. 航空发动机整机振动常见故障及其排除措施[J]. 航空维修与工程, 2011(1): 43-45.
- [2] 《透平机械现代制造技术丛书》编委会. 装配试车技术[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [3] A.H. 尼克金著, 于龙淮, 等, 译. 飞行器发动机装配工艺学[M]. 北京: 宇航出版社, 1987.
- [4] 陆兵焱, 陈友龙, 李映颖. BP神经网络主成分分析在试飞数据预测中的应

用[J]. 科技信息, 2009(17): 29-30.

[5] 孟生旺. 用主成分分析法进行多指标综合评价应注意的问题[J]. 统计研究, 1992(4).

[6] 范作民, 孙春林, 白杰. 航空发动机故障诊断导论[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 251-285.

[7] 马逢时, 吴诚鸥, 彩霞. 基于MINITAB的现代实用统计[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 2009: 105-118.

作者简介

沈献绍, 高级工程师, 军队注册装备承制单位资格审查高级审查员, 主要从事航空发动机检验验收及其生产过程质量监督工作。

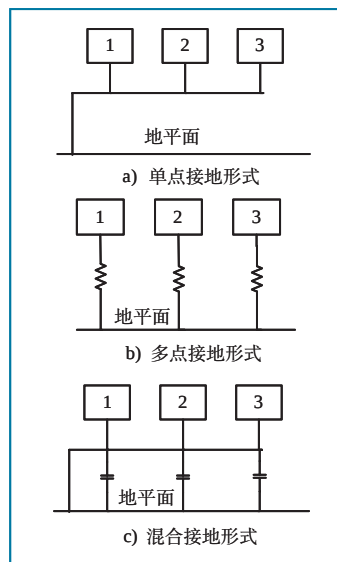


图1 接地形式

1 电流回路接地的基本目的及一般要求

根据MIL-B-5087B《航空航天系统电搭接和闪电防护》的规定,电搭接和接地是指在两金属物体之间建立一条供电流流动的低阻抗通路。搭接的目的在于为飞机金属构件之间以及构件、设备、附件与基本结构之间提供稳定的低阻抗电流通路,从而防止它们之间产生电磁干扰电平,提供电源电流返回通路,也是保护人身安全防电击以及提供静电防护、闪电防护、保证低阻抗的天线地网的必要措施。搭接良好与否,直接影响着飞机的安全和性能。搭接可分为天线及滤波器的搭接、电流回路的接地、防射频干扰搭接、防电击搭接、静电防护搭接、雷电防护搭接^[1]。本文重点关注复合材料结构对电流回路接地的影响。

电流回路的接地是指将飞机发电机的中线(或负线)以及电气设备的负线连接到基准的“地”参考点上,而金属材料飞机的铝质结构就是一种很好的导体地平面,可为电气系统提供接近理想的基准电位参考。

电流回路接地有以下两个功能:

a)为机载电气负载提供基准的电位参考,满足系统功能需要;b)电气负载发生短路故障时,为故障电流提供低阻抗的通路。

电流回路接地的方式可分为以下三类(如图1):a)单点接地;b)多点接地;c)混合接地。机载电气设备的接地一般采用多点接地方式,即将发电机的中线(或负线)以及电气设备的负线连接到最近的可用的低电阻地平面上,经常是经过电搭接处理的机架或者飞机主结构,这种方式的主要优点是可以省去很多电源回路线,特别是对于电源馈电线等大功率的电流回路线,可以有效地减轻飞机重量。

2 复合材料结构对电流回路接地的影响

复合材料结构对电流回路接地的影响,可从以下两个方面分析:a)对电气负载设备工作性能的影响;b)对故障电流的影响。

1) 对电气负载工作性能的影响

MIL-B-5087B中规定,作为电源回路组成部分的结构部件之间,应有能够传输电源回路电流的低阻抗通路,其搭接电阻应不大于1000微欧。由于复合材料是各向异性材料,在电阻率最小的方向上,其电阻率为铝电阻率的60倍以上^[2],直接用于电气接地时会引入远大于1000微欧的搭接电阻,使导线、电缆和接地回路总阻抗不能保证电压调节点与负载之间的电压降在规定的范围之内,影响电气设备的性能。

由于机载电气系统多采用两点或多点接地形式,即通过两点或多点实现与接地平面的连接,地电流流经接地公共阻抗形成地电压,此地电压会在电路两端形成共模干扰

电压,公共地阻抗耦合是电磁耦合的一个重要途径。如图2所示,干扰电路1中电流 I_1 在公共阻抗 Z_i 上产生的干扰电压 U_i ,此干扰电压耦合到负载 R_{L2} 端的电压为:

$$U_i = \frac{Z_i \cdot R_{L2} \cdot U_1}{(R_{g1} + R_{L1}) \cdot (R_{g2} + R_{L2})} \quad (1)$$

复合材料射频电阻大,如果直接使用复合材料结构作为接地平面,会带来很大的公共地阻抗,并形成共模干扰电压,如果耦合到负载 R_{L2} 端的干扰电压远大于它的敏感度,则负载 R_{L2} 不能正常工作。

2) 故障电流的影响

故障电流的影响以三相交流用电设备为例,大多数的故障为单相对地短路故障,如图3所示,在电气设备接地故障情况下,设备内部电源线与连接设备外壳的地短路。

在发生地接故障时,会有大电流流经飞机结构,此时必须考虑故障电流的热效应,即在触发故障保护机制前的短

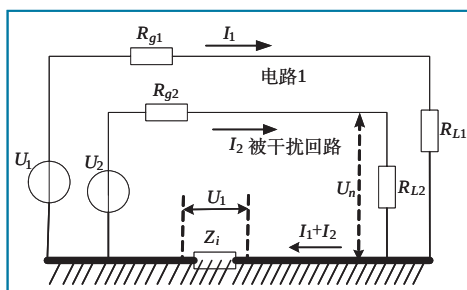


图2 公共地阻抗耦合示意图

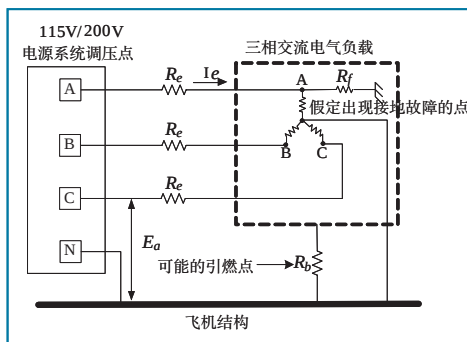


图3 单相对地短路故障

时间内飞机结构必须能够承受设备外壳与飞机结构的搭接处引起的局部发热。而复合材料对温度是非常敏感的,一般限制温度为 120°C ,局部过热会破坏复合材料的结构和强度。另外,在易燃易爆的区域,故障电流引起的“热点”是非常危险的。

综上所述,复合材料的机身结构是不能作为电流回路通路的,应有一条金属组成的主电流回路通路和若干支路,供复合材料区域内电气负载的接地。

3 复合材料区域内接地网的应用及设计约束

3.1 接地网的应用及研究现状

为了使复合材料结构满足飞机电气负载的功能需要以及电磁兼容设计的需要,波音、空客等主要的民用飞机制造商已在这一领域展开了深入地研究。目前,已获得实际应用的方案是在复合材料机身结构内安装接地网络,以代替传统的铝合金结构的电气搭接、接地及闪电防护的功能。

空客公司在A350XWB飞机的复合材料部件中使用了导电性好的金属条,将其安装在结构框周围,与飞机本身的金属结构连接形成电气结构网络(ESN),在复合材料机身内形成了与金属结构等效的接地平面。波音公司在波音787飞机上也采用了一种轻质的铝或铜的搭接组件,导电能力强的搭接组件

交错地安装形成连续的电气传导网络,克服复合材料大量使用所带来的限制,波音公司称其为电流回路网络(CRN)。庞巴迪的C系列飞机上也采用了被称为信号回流网络(SRN)的类似结构。

接地网一般采用如下的结构形式:多个导电能力强的金属搭接组件沿着飞机复合材料机身布置,提供飞机纵向的电气传导路径,纵向电气传导路径的布置应考虑到发动机转子爆破、轮胎爆破、鸟撞等影响,在飞机横向上提供多个金属搭接组件,沿飞机横向扩展构成飞机横向的电气传导路径,同时将横向的金属搭接组件与纵向的金属搭接件连接,保证当特定风险发生时,一些纵向金属搭接件发生失效,仍能有部分纵向金属搭接件实现电气传导的功能。图4a)是接地网的结构简图,图4b)是对应的电气原理图。

对应于先进民用飞机的分布式配电体系,图4a)、b)中所示的电源可代表主配电中心或远程配电装置。

3.2 接地网的设计约束

复合材料的使用可以有效地实现飞机的减重目标,但接地网的使用不可避免地会带来额外的重量,同时为实现与传统金属机身等效的电气接地功能,接地网在设计时需考虑接地网的重量、电流回路允许的压降、故障电流的搭接要求、电磁兼容的影响等四个约束条件。

1) 接地网的重量

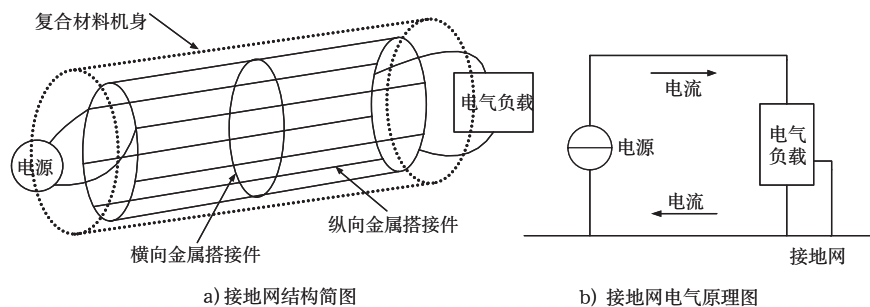


图4 接地网结构简图

表1 电流回路允许的压降

调压点端的电压 (V)	允许的最大压降 (V)	
	连续工作设备	间隙工作设备
28	1	2
115	4	8
200	7	14

为了将接地网带来的重量影响降到最低,应尽可能减小电气设备和电源之间的电流回路路径,文献[2]提出了将网络图理论中A*算法用于接地网路径的优化。

A*算法,是一种在网络理论和运筹学领域中的启发式搜索算法,广泛应用于最优路径求解和策略设计的问题。在接地网路径的优化问题上,可用网络图 $G=(V,E)$ 表示接地网,其中图的顶点表示接地网络中可能出现在电流回路路径上的导体连接点,边的权重表示接地网导体连接点之间的实际物理距离。将可能存在电气设备和电源之间的电流回路路径上的导体连接点作为输入,经过基于A*算法的布线程序,可得到考虑物理距离时的两点之间最短的路径。

2) 电流回路允许的压降

MIL-B-5087B中规定导线、电缆和接地回路总阻抗应保证电压调节点与负载之间的电压降在表1规定的范围内^[1]。

在设计接地网络时,可根据设备配电点的最低电压,减去用电设备允许的最低电压及设备电源线的最大电压降,

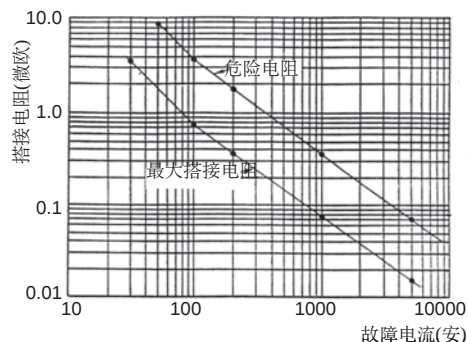


图5 最大允许搭接电阻与故障电流的关系曲线

得到接地回路的允许压降,可据此来设计优化接地网络的连接,并选择金属搭接件的横截面尺寸。

3) 故障电流的搭接要求

在考虑电流回路允许的压降要求并根据电气接地网的网络拓扑形式确定金属搭接件的横截面尺寸后,还需对其允许的温升进行校核。温升的校核除了要满足最恶劣的环境条件下的温升允许值,还要注意在故障条件下,金属搭接件的最高温度,在保护装置动作前不应超过允许值。

对接地网搭接组件的温升校核可根据电气系统能够过载传输的最大电流值计算。以图3所示的单相对地短路故障为例,不同的是此时接地网结构取代了飞机结构提供基准电位参考,故障电流的工程计算中可忽略搭接电阻 R_b 和故障电阻 R_f ,按(2)式计算。

$$I = \frac{E_a}{R_e + R_d} \quad (2)$$

(2)式中的 R_d 表示接地网引入的地阻抗,可根据(2)式计算的故障电流校核接地网的温升是否满足要求。在易燃易爆的危险区,电气负载与接地网之间应有良好金属面搭接,其搭接电阻应不大于图5所示的最大搭接电阻值^[1]。除此之外,还应注意电动机负载处的接地网的设计及搭接,电动机负载的启动电流常常高达几百安培,因此如果它与接地网的连接处电阻大,则该点将成为“热点”。

4) 电磁兼容的影响

与传统的金属机身接地相比,由金属搭接件组成的接地网会引入额外的自感和互感电压,增大了公共地阻抗,在连接到接地网的电路上引入共模干扰电压,因此在设计接地网时应注意尽可能降低搭接组件的射频阻抗,尽量降低搭接组件的电感。

对于圆截面导体的电感可由(3)式

计算:

$$L = 0.002l [2.303 \log_{10} (4l/d - 0.75)] \mu H \quad (3)$$

其中 l 为搭接条长度(cm), d 为线直径(cm)。

对于矩形横截面的扁平导体,电感可由(4)式计算:

$$L = 0.002l \left(2.303 \log_{10} \frac{2l}{b+c} + 0.5 + 0.2235 \frac{b+c}{l} \right) \mu H \quad (4)$$

其中 b 为搭接条宽度(cm), c 为搭接条厚度(cm)。

可以看出,对于圆横截面导体,其横截面外径与长度比越小,电感越小;对于扁平导体,横截面的厚度与宽度比越小,电感越小。

文献[3]指出,三角形网格形状的接地网产生的干扰电压比正方形形状的接地网要小,电流从边角注入则会引起更大的网间电压差。同时对于敏感系统的信号回路采用单端接地,使用平衡的差分电路,也可避免或减小地阻抗引起的共模干扰电压影响^[4]。

同时由于闪电防护的需要,复合材料外表面常会喷涂铝膜或者用铝丝网与复合材料一次成形,这种方法会带来一个问题,当闪电电流流过金属丝网时,将会对飞机内部的电线、电缆产生感应电压,甚至影响和损坏连接这些电线或电缆的设备。根据两电路间的磁耦合基本方程,减小感应电压则必须减小被干扰电路的环路面积。对于闪电电流产生的大的感应电压影响,可采取在雷电电流可能的传导通路上使电线、电缆应尽可能地靠近纵向的导电结构,以避免形成大的耦合环路。

此外,还应注意金属搭接件与复合材料结构之间的安装距离,避免在射频频率时的金属搭接件与复合材料结构

之间的电容耦合问题,在复合材料结构区域内推荐使用带屏蔽层的双扭绞导线。

4 结论

综上所述,由于复合材料导电性差、对高温敏感,因此不能把飞机复合材料结构直接作为电流回路接地使用。通过在复合材料机身内部安装导电性好的金属接地网,可以提供连续的接地通路。接地网在设计时除满足电流通路要求外,还应考虑重量成本、电流回路允许电压、故障电流的热效应及电磁兼容等设计目标及约束条件。 **AST**

参考文献

- [1] U.S Air Force. Military specification, bonding, electrical and lighting protection for aerospace systems[S]. MIL-B-5087B, Amendment 2, 1970.
- [2] Anca-Lucia, Michel, Jean-Michel, et al. Towards the conception and optimisation of the current return path in a composite aircraft[C]. Systems Conference 2010 4th Annual IEEE, 2010:466-471.
- [3] Guo Zhenan. Research of the technology of grounding grips at high frequency[C]. 2010 Asia-Pacific Conference on Information Theory, 2010: 405-408.
- [4] 雷虹,王天顺. 复合材料电磁特性研究[J]. 安全与电磁兼容, 2002(5): 16-19.

作者简介

张宇,硕士,助理工程师,主要研究方向为民用飞机的电气线路互联系统设计。