

飞行器雷电直接效应与间接效应防护综述

刘贺楠, 郭俊, 伊同强, 任德昌

(西安交通大学 电气工程学院, 西安 710049)

摘要: 雷电直接效应和间接效应对飞行器的安全构成威胁, 大量复合材料的使用使飞行器内部电磁环境更加复杂。文章首先总结了雷电对金属材料、不导电复合材料和导电复合材料的直接效应和对应的防护方法, 简要介绍了磁力效应, 构件搭接处起弧的防护方法。其次, 简要分析了雷电间接效应, 并针对不同的耦合方式采用不同的防护方法, 对于辐射耦合采用屏蔽措施, 对于传导耦合采用端口部件防护。最后, 总结雷电间接效应防护的几个原则, 为飞行器雷电防护设计提供参考。

关键词: 雷电直接效应; 雷电间接效应; 耦合方式

中图分类号: V19

文献标志码: A

文章编号: 2096-4080 (2019) 04-0056-07

Protection of Direct and Indirect Effects of Lightning on Aircraft

LIU Henan, GUO Jun, YI Tongqiang, REN Dechang

(School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The direct and indirect effects of lightning pose a threat to the safety of aircraft. The use of a large number of composite makes the electromagnetic environment inside aircraft more complex. Firstly, this paper summarizes the direct effects of lightning on metal materials, non-conductive composites, conductive composites and corresponding protection methods. Secondly, the paper briefly analyzes indirect effect of lightning. Different protection methods are adopted for different coupling modes. Shielding methods are adopted for radiation coupling and port components are used for transmission coupling. Finally, several principles of lightning indirect effect protection are summarized to provide reference for lightning protection and design of aircraft.

Key words: Lightning direct effects; Lightning indirect effects; Coupling mode

0 引言

雷电是一种高电压大电流的放电现象, 在地球大气层中平均每天约发生 800 万次, 是自然界中最普遍的放电现象之一, 在大气中运行的高速飞行器(包括火箭、返回式飞船等)不可避免地会遭遇雷电环境, 因而由雷击引起的飞行器事故时有发生^[1]。雷电对飞行器的危害分为直接效应

和间接效应, 但这两种效应并不能绝对分开, 有些危害可能既包括直接效应, 又包括间接效应^[2]。雷电直接效应是指因雷电通道直接附着于飞机和因雷电流的传导造成的飞机及设备的物理效应, 包括表面和结构的绝缘击穿、爆炸、弯曲、熔化、燃烧以及汽化等, 也包括直接注入到布线、管道、控制线缆和其他传导部件中的电压和电流, 还包括一些其他的效应, 如震动效应对人员的闪光

收稿日期: 2018-11-23; 修订日期: 2019-05-06

作者简介: 刘贺楠 (1993-), 男, 研究生在读, 主要研究方向为电磁兼容。E-mail: henanLiu@stu.xjtu.edu.cn

致盲^[3]。即使雷电未直接接触飞行器的电气线路,对机身的雷击仍能在该线路中产生感应电压和电流浪涌,将感应电压和电流对系统造成的扰动或损坏定义为间接效应。历史上发生过多起飞行器雷击事件,造成了无法估量的损失,因此加强飞行器雷电防护措施具有重大意义。

在国内,能够完成整机的实验室雷电间接效应防护试验的机构主要有中航工业合肥航太电物理技术有限公司和合肥工业大学共建的安徽省飞机雷电防护重点实验室。我国航空工业到目前为止所有涉及雷电防护试验的飞机型号均在该实验室完成。该实验室已完成的飞机雷电防护试验项目包括:雷达罩、空速管、设备舱、电子电气设备(如发参显控设备、惯导设备、航姿设备、机载二次配电设备等)、机身盒段、平尾、机翼、复合材料垂尾、螺旋桨、燃油系统等,几乎涉及所有国产飞机。欧美等国家航空业发展早于我国,完成整机的实验室雷电间接效应防护试验机构更多、试验条件更成熟^[4]。但是,整机的雷电间接效应防护试验需要耗费大量人力、物力、财力,易受测试条件干扰,导致试验结果不够精确。数值仿真具有花费少、可对整机雷电流时域全过程进行模拟的优势,电磁仿真软件也被国内外学者广泛采用。

1 飞行器被雷电破坏案例

雷电击中飞行器后,在其表面快速上升的大幅值电流脉冲所形成感应的电压,往往高到足以击穿绝缘体或造成人员伤亡,即使雷电没有直接击中飞行器,雷电的间接效应可能会导致飞行器中某些关键电子设备损坏,致使飞行器失去控制。世界范围内雷电导致飞行器失控的事故并不少见。

1961年秋,部署在意大利携有140万吨当量热核弹头的美国丘比特固体导弹在发射阵地多次遭雷击,受到严重损坏^[5]。1984年6月上旬,日本反坦克部队在进行固体运载火箭实战演练时,遭受雷击,火箭落地坠毁,同时超高压大电流传导到操作台,操作人员受到不同程度的烧伤。1988年9月,越南一架客机在曼谷上空遭雷击,76人遇难。1994年7月,我国某固体运载火箭在进行飞行试验时,遭受间接雷击,导致关键设备损坏,造成飞行试验失利。2000年我国一架飞机在降落时遭雷击,51人遇难^[4]。2007年10月,

国航某客机受到雷击,导致数航班延误,幸未造成人员伤亡。2010年哥伦比亚的一架飞机遭雷击,飞机断为三段^[6]。

2 雷电对金属结构材料飞行器的直接效应与防护

2.1 雷电对金属结构飞行器的直接效应

为避免遭受雷击环境破坏,飞行器的制作材料和其组装方式是现代飞行器设计制造应考虑的两个重要方面。传统铆接结构的铝机身,由于其优良的导电性,很少因雷击而遭到严重的结构破坏,并且这些结构可以为一些敏感系统和机内人员提供良好的保护。

金属结构主要是指飞行器的外蒙皮,包括内部的金属支架,如翼梁和舱壁。由于雷电流扩散并流经雷电进入点和雷电离去点之间的整个机身,因此在机身段的大部分位置电流密度很低,另外制造这些结构的铝提供了优良的导电性,因此很少造成物理破坏。一方面,当电流路径上两结构部件之间有不良电连接时,才可能有两部件之间起弧引起的物理损坏;另一方面,在进入点或者离去点附近的电流通路覆盖区域,磁力集中和电阻加热可能导致这些区域上的损坏。总体来说,雷电对金属结构飞行器的直接效应包括以下几方面^[7-8]:

- 1) 在金属表面附着点处的熔穿或冲击波效应;
- 2) 雷电流导致金属体温度升高;
- 3) 磁力效应;
- 4) 声冲击效应;
- 5) 在搭接、接头处起弧;
- 6) 燃油箱易燃蒸气的点燃。

导致飞行器金属表面熔穿的原因是雷电在附着点处释放出高能量,在金属蒙皮上某一特定附着点产生的破坏主要取决于雷电在该点附着的时间长短,如果雷电通道迅速扫掠过未涂漆的铝蒙皮,则可能只是使得蒙皮外表面上产生微小的凹痕;反之,如果雷电停留时间更长,就增加了金属表面发生熔穿的概率。

2.2 对金属结构飞行器的直接效应防护措施

为防止飞行器金属表面附着点处的熔穿,通常采用增加厚度、弧根分散和多层进行防护。

弧根分散是用起伏不平的导电涂层处理外表面的一种防护,起伏不平会造成表面电场附近的

电场出现不均匀,从而导致弧根分成多个路径。当雷电附着在飞行器表面时可以分成多条电流细丝,则附着在蒙皮表面时就会产生多个附着点,这相当于把总能量分散到单个点,通过促使弧根分散的表面处理可以将蒙皮损坏降到最小。

防止金属表面附着点处熔穿的直接方法就是使用足够厚的金属板作为蒙皮,具体的蒙皮厚度取决于雷电驻留时间。对于分区过的机身,不同区中雷电驻留时间不同,则蒙皮厚度也不同。如处在1A区中,典型的涂层厚度下驻留时间假设为20ms,此时蒙皮厚度为2mm~3mm^[2]。在飞行器设计过程中要满足防止蒙皮熔穿的设计标准。

保护金属蒙皮其他常用方法就是用多层进行防护,将一个薄的金属保护层用不导电的胶黏剂黏结到金属蒙皮表面,使其分层。这样,熔化常局限于金属的外层,内层不会损坏。

3 雷电对飞行器复合材料的直接效应与防护

3.1 雷电对复合材料的直接效应

目前全金属飞行器几乎没有,飞行器正在采用高强度、轻质化纤维增强复合材料构造,而这些材料的导电性却比铝小得多。用于飞行器的不导电材料包括纤维增强复合材料、玻璃纤维、丙烯酸树脂等,这些不导电复合材料用来制造飞机上的许多结构,包括雷达罩、机翼尖和尾翼尖、整流罩和尾翼等。

由于电场可以穿透不导电复合材料制成的表面,迎面先导可能从不导电蒙皮下的导电物体发生,并可能在这些蒙皮上穿孔,这样雷电可能附着金属上,迎面先导造成的穿孔通常像针孔一样微小,如图1所示。如果雷电流过大,则孔隙将变得很大,常常对周围材料造成重大损坏。

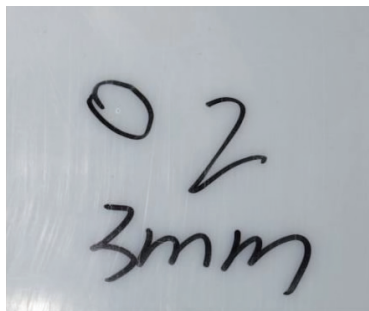


图1 雷电击穿聚乙烯印记

Fig. 1 The mark of lightning-penetrated polyethylene

导电复合材料包括树脂加强的各种碳纤维或碳丝的不同排列,以及树脂加强的各种硼丝的不同排列,碳纤维复合材料(CFC)最为常见。然而,碳纤维增强树脂复合材料相比于传统的金属材料如铝、钢和钛合金其导电率较低,对雷电更加敏感。低电导率的结构材料能够吸收更多焦耳热(电阻加热)形式的电能,这意味着相比于同体积的铝,雷电在碳纤维增强树脂复合材料中能量被吸收更多,考虑到碳纤维复合材料的物理特性,其雷电损伤程度比相应的金属材料高得多,损伤更为严重。雷击造成碳纤维复合材料的损坏包括树脂高温热解和由于冲击波效应造成的层合板破裂,这种损坏发生在雷击附着点或其附近,主要是雷电流所致^[9]。

3.2 对复合材料直接效应防护措施

飞行器某些结构是否需要雷电防护取决于它的功能和损坏后果。如损伤不产生严重的危险,则不必要求防护。如尾翼尖的丢失可能不会危及整机安全,可不予防护,万一遭受雷击,可对这些部位进行修理或者更换。但如影响飞行器安全就需要加装防护措施,如雷达罩的丢失可能会引起雷达失效,造成事故。

不导电复合材料雷电防护通常有两种基本方法。第一种是在外表面采用整体金属(通常是铝)分流条或分段式分流条,这些分流条提供了结合先导形成的优先位置;第二种方法是在结构的外表面敷设一层导电材料。外表面敷设导电材料是最有效的雷电防护,它还提供了保护密闭系统免受与雷电相关的磁场和电场影响的增强性保护。

分流条根据安装位置与制作工艺不同可大致分为以下4种:整体分流条、内分流条、箔条、分段式分流条。整体分流条是连续的金属条,放置在不导电蒙皮外面,以提供优先的流光和结合先导发源地,目的是从分流条传播的流光拦截雷电并安全地将雷电流传导到一个相邻的导电结构上。内分流条是整体分流条用紧固件安装在雷达罩的内表面,紧固件穿出雷达罩壁,起雷电附着点作用,相比于外置式分流条,内置式分流条降低了由于外部安装而产生的空气动力阻力,其缺点是可能发生内侧雷电。箔条是以前飞行器雷电防护采用的方法,现在很少使用,因为它们可以融化或汽化,通常只提供一次性雷电防护,对后面的雷电就失去了保护,并且箔条爆炸有时会损坏其

附着的复合材料。分段式（矩形金属钮扣式）分流条以独有的质量小、透波性能强、形状适应性好等优点越来越受到雷达罩防雷设计者的青睐^[10]。在大多数应用中，它们与整体分流条一样有效。矩形金属钮扣式分流条在对机载雷达罩形成雷电防护的过程中，随着雷电下行先导向飞机不断逼近，分流条表面的感应电场强度逐渐超过击穿临界值，分流条将发生击穿，并在上方产生雷电上行先导，当上行先导与下行先导相遇，雷电流将通过被击穿导通的分流条流向机身，从而避免雷达罩的损坏，实现雷达罩的雷电防护。分段式分流条的形状如图2所示。

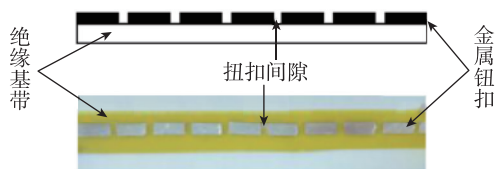


图2 金属钮扣式分流条的样品实物图

Fig. 2 Physical sample of metal button diverter strip

另外一种防护方法就是用导电涂层防护，即在不要电磁透明的地方，将导电材料应用于不导电表面以此将雷电流传导到机身，材料包括电弧或火焰喷涂金属、编织金属丝网、整体和网状金属箔、镀铝的玻璃纤维等。

对于导电复合材料的防护，一般采用编织丝网，与CFC配合使用延展金属箔、镀金属的CFC、交互编织的金属丝等。总体来说，这些方法的基本原则有两个：

- 1) 提高电导率，促使雷电流进入防护层而不流入CFC；
- 2) 促使雷电流在大范围内多点流入蒙皮，即弧根分散，避免蒙皮损伤。

4 雷电对飞行器其他直接效应与防护

飞行器的某些机构可能由于遭受雷电流的强磁场而变形损坏，当同方向电流流经两条或两条以上的平行导线时，其间的相互吸引力作用于导线上，严重时致使导线变形断裂，可能遭受磁力损坏的部件包括搭接条、雷电分流条、天线或空气数据探头等。对磁力损坏进行防护的原则是使搭接条尽可能短，最大程度降低搭接条的感应电压；采用足够大横截面积载送雷电流；如果使用两个或者两个以上平行搭接条导线，则应该使它

们有效分开，以使磁力效应减至最小。

当雷电流流入到先导通道中，大量的能量在数百微秒内被输送到该通道，导致该通道以超声速膨胀，膨胀期间通道压力为10~15个大气压，冲击波造成破坏的例子包括风挡和航行灯罩破裂或破碎。现代的风挡多为多层结构，有足够的强度经受住冲击波而不会被完全击碎。

接头传导大电流而不出现火花烧蚀的能力由接触材料、配合表面的形状和表面积以及表面处理方式、接触压力确定，这些因素是影响接头电阻的因素。任何接头或者紧固件对安全载送雷电流的适合性必须在指定的全部雷电的电流电平下通过试验确定^[2]。

对于燃油箱易燃蒸气的点燃的雷电防护是一个重要而系统的过程，主要目的是抑制和避免雷电导致燃油箱口盖和结构接头处起弧，在此不详论述。

5 雷电间接效应与防护

5.1 雷电间接效应

雷电的间接效应是指雷电流辐射的电磁脉冲对电子电气设备及系统的干扰和损伤效应。主要表现为雷电流产生的静电感应、暂态过电压和电磁耦合。而电磁耦合主要包括阻性耦合、磁场耦合和电场耦合3种方式^[11]。从外界电磁环境到飞行器内部最重要的耦合形式是开口耦合^[12]。雷电电磁脉冲是一种强瞬态电磁辐射，极易耦合到雷电附着点附近的通信和雷达天线上，对天线设备造成损伤。雷电电磁脉冲还会通过各类孔缝耦合到机体内部，对机体内部的动力、控制、监测和通信等重要的电子设备和系统造成干扰和破坏。此外，雷电电磁脉冲也会耦合在电源线和通信线等各类线缆上，感应出高幅值的瞬态电压和电流浪涌，侵入各类与线缆相连接的关键电子系统和设备内，对飞行器安全具有极大的威胁。

任何电磁干扰的发生都必然存在干扰能量的耦合途径（或传输通道）。通常有两种耦合方式：一种是传导耦合，另一种是辐射耦合^[13]。传导耦合必须在干扰源和敏感电子设备之间有完整的电路连接，干扰信号沿着这个连接链路传到敏感设备，发生干扰破坏现象。辐射耦合是指干扰信号通过空间传播，干扰能量按电磁场的规律向周围空间辐射^[14]。

现代飞行器越来越多地采用先进电子设备,机身蒙皮大规模地使用复合材料,这使得舱室内部的电子设备和线缆对雷电电磁环境十分敏感^[15]。飞行器一旦遭受雷击,后果不堪设想,因此为保障飞行器的航行安全,必须对雷电间接效应进行雷电防护设计并进行雷电试验验证。

5.2 雷电间接效应防护措施

对于飞行器来说,不可能将巨大的能量泄放到大地,只能通过均衡的原理在其内部建立等电位差。均衡原理要由电位补偿系统来实现,电位补偿系统由可靠的接地系统、等电位连接用的金属导线和等电位连接器组成,在瞬态现象存在的极短时间内,这个系统可以迅速地在被保护系统所处区域内所有导电部件之间建立起一个等电位差,这个电位差就是我们设计提出的箝位电压值^[16]。

飞行器内部各种电子设备的机箱很多是由金属板材加工组合而成的。由于技术水平的限制和功能的需要,难免存在各类孔缝,有的还在壳体

上有各类开口。如各种操作平台的显示器、通风散热窗口、操作显示窗口、电源、信号的出入口等这些孔隙是电磁脉冲能量进入的重要途径。

屏蔽是防止和减小雷电电磁脉冲以辐射对敏感电子设备危害的最有效方法之一。由于雷电的电场和磁场均较高,要求屏蔽材料既具有良好的电屏蔽,又具有良好的磁屏蔽效果。对屏蔽体的所有缝隙进行良好的焊接、压接、或弹性接触,并对屏蔽体的贯穿导体在入口进行良好的电连续性处理,都是提高系统屏蔽效果的有效方法。

针对雷电电磁脉冲传导耦合方式,通常采用雷电防护器件或者防护器件组成的电磁脉冲防护模块^[17]。端口综合防护模块的核心是浪涌防护器件,常用浪涌防护器件包括开关类器件和钳压类器件两大类。开关类器件包括气体放电管、玻璃放电管等,钳压类器件包括压敏电阻、瞬态电压抑制器(Transient Voltage Suppressor)二极管等。表1是常用浪涌防护器件的性能特性。

表1 常用浪涌防护器件性能特性

Tab.1 Performance characteristics of common surge protection devices

器件名称	响应速度	电容	通流量	击穿电压精确度	开关或钳位电压
气体放电管	数百 ns	几 pF	数十至百千 A	最低	最高
玻璃放电管	数百 ns	小于 1pF	数百至几千 A	较低	较高
半导体放电管	几 ns	数十至百 pF	数十至百 A	低	高
压敏电阻	25ns	数百至千 pF	数百至几千 A	较高	较低
TVS 二极管	<1ns	数十至千 pF	数十至百 A	最高	最低

开关类器件通常具有较大的通流能力,但其响应速度较慢,理论上为 ns 级;钳压类器件的响应速度通常较快,其中 TVS 的理论响应时间为 ps 级。TVS 非线性特性比压敏电阻好,能够用于需要精密保护的电子线路中,有单向和双向两种类型,TVS 不易老化,使用寿命长,但是它的缺点是额定电流小,TVS 二极管在快脉冲作用下钳位特性更加良好,而压敏电阻在应用中具有工作电压高、泄流能力强的优点。因此可以发挥各自优势,采用高低配合的模式设计防护电路,达到防护响应时间与通流量的要求^[18]。

飞机雷电间接效应防护的目标是减小机内电

子电气系统及其互连线束区域的内部雷电瞬态环境,使得通过互连线束耦合在设备接口的实际瞬态电平不大于预期的瞬态控制电平。

自 2006 年开始实施的我国军方标准 GJB1389A^[19]提出了飞机系统雷电间接效应防护设计要求,此标准和美国军方标准 MIL-STD-464A 类似^[20],要求雷电间接效应的符合性应通过飞机系统、分系统、设备和部件试验、分析或试验与分析组合等方法来验证,并规定了飞机系统雷电间接效应验证试验“电流波形 A、B、C、D”“多重冲击波形 D”和“多重脉冲组波形 H”及其对应参数,波形参数见表 2。

表 2 MIL-STD-454A 雷击信号类型

Tab. 2 Type of lightning strike signal in MIL-STD-454A

电流分量	描述说明	$I(t) = I_0 [e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}]$		
		I_0	$\alpha (s^{-1})$	$\beta (s^{-1})$
A	严重雷击	218810	11354	647265
B	中间电流	11300	700	2000
C	持续电流	400 for 0.5s	不适用	不适用
D	重击	109405	22708	1294530
D/2	多次雷击	54703	22708	1294530
H	多重脉冲组	10572	187191	19105100

对于雷电间接效应, 机载电子电气系统应采用综合设计技术, 从系统架构、软硬件方面减少雷击瞬态感应场对其造成的影响, 系统设计应避免在飞行器内部长距离传输信号。

在硬件设计方面, 需要从搭接、布线方式、布线长度、接地、屏蔽、滤波等方面综合考虑, 将一个连接器的模拟电路信号与数字电路信号分区布置。软件设计也可以增加系统对雷电感应瞬变的抗扰度, 这些技术包括数据通信、中断、定时器、多处理器、余度、非相似程序、容错等^[21]。

6 结论

雷电直接效应和间接效应可对飞行器的安全构成巨大威胁, 大量复合材料的使用使飞行器内部电子电气系统的电磁环境更加复杂。对于不同的材料应使用不同的雷电防护方式, 对于金属材料可采用弧根分散、增加金属材料厚度和使用多层的方法进行雷电直接效应防护。对于复合材料可以使用分流条、导电涂层、编织丝网和金属铝箔进行雷电直接效应防护; 对不同的雷电作用方式应用不同防护措施, 针对电磁脉冲辐射耦合方式可以用屏蔽的方式进行防护, 并对屏蔽体的缝隙进行良好的焊接、压接、或弹性接触以提高屏蔽效果; 针对电磁脉冲传导耦合方式可以用浪涌防护器件的方式进行防护, 采用压敏电阻和 TVS 二极管高低配合的方式, 可达到防护响应时间和通流量的要求。

总的来说, 对不同的应用材料, 对雷电不同作用部位与方式应采用不同的防护方法对飞行器进行有针对性的防护, 整体机载电子电气系统应采用综合防护设计技术, 并最终通过验证试验, 确保飞行器的安全。

参考文献

- [1] 李茜华, 陈曦, 刘贺楠, 等. 飞行器雷击瞬态电磁响应数值仿真 [J]. 中国舰船研究, 2018, 13 (2): 140-148.
- [2] 合肥航太电物理技术有限公司. 航空器雷电防护技术 [M]. 北京: 航空工业出版社, 2013.
- [3] 熊秀, 骆立峰, 范晓宇, 等. 飞机雷电直接效应综述 [J]. 飞机设计, 2011, 31 (4): 64-68.
- [4] 黄军玲. 飞机雷电间接效应仿真与研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2016.
- [5] 周萍, 吕英华, 陈志红, 等. 航天系统雷电防护技术发展综述及展望 [J]. 宇航学报, 2018, 39 (8): 827-837.
- [6] 滕向如, 刘光斌, 余志勇, 等. 飞行器雷电间接效应危害及其防护研究 [J]. 环境技术, 2014 (S1): 130-133.
- [7] 熊秀, 骆立峰, 范晓宇, 等. 飞机雷电直接效应综述 [J]. 飞机设计, 2011, 31 (4): 64-68.
- [8] Rupke E. Lightning direct effects handbook [R]. GATE-WP3.1-031027-043, 2002.
- [9] 刘辉平. 碳纤维复合材料雷电损伤特性研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2016.
- [10] 沈伋, 吕继淮. 飞行器雷达罩设计方法的研究 [J]. 南京航空航天大学学报, 1999, 31 (5): 594-598.
- [11] 方君, 戴邵武, 聂子健. 军用特种飞机雷电间接效应防护研究 [J]. 仪表技术, 2018 (5): 46-49.
- [12] 赵娜, 张磊, 刘向. 民用直升机雷电间接效应仿真设计研究 [C]. 第二十八届全国直升机年会论文, 2012: 570-577.
- [13] Meng C, Chen Y S, Liu S K, et al. Numerical simulation of early-time high altitude electromagnetic pulse [J]. Chinese Journal of Physics, 2003, 12 (12): 484-488.
- [14] 李超, 吴垚, 袁彝. 美国水面舰船电磁脉冲防护标准浅析 [J]. 装备环境工程, 2018, 15 (3): 71-

75. 冲骚扰防护模块设计 [J]. 高电压技术, 2018, 44 (3): 1034-1040.
- [15] 宿志国. 飞机雷电间接效应与仿真技术研究 [D]. 南京: 南京信息工程大学, 2015.
- [16] 虞昊. 现代防雷技术基础 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [17] 李明. 航空电子设备雷电间接效应防护设计及验证 [J]. 山西电子技术, 2016 (5): 23-25.
- [18] 张耀辉, 谢彦召, 黄刘宏, 等. 电源线纳秒级电磁脉
- [19] GJB1389A-2005. 系统电磁兼容性要求 [S]. 2005.
- [20] MIL-STD-464A Electromagnetic environment effects requirements for system [S]. 2002.
- [21] 胡平道. 机载电子电气系统雷电间接效应防护与验证 [J]. 飞机设计, 2009, 29 (6): 48-51.

引用格式: 刘贺楠, 郭俊, 伊同强, 等. 飞行器雷电直接效应与间接效应防护综述[J]. 宇航总体技术, 2019, 3 (4): 56-62.

Citation: Liu H N, Guo J, Yi T Q, et al. Protection of direct and indirect effects of lightning on aircraft [J]. Astronautical Systems Engineering Technology, 2019, 3 (4): 56-62.