

武器装备防雷标准体系及应用研究

熊秀¹, 李红军²

(1. 西安爱邦雷电与电磁环境实验室, 西安 710077;

2. 空装驻西安地区第一军事代表室, 西安 710089)

摘要: 从国际防雷标准体系的研究入手, 梳理了国内武器装备防雷标准的技术来源, 对比了不同体系标准在雷电关键参数、标准内容、实际应用等方面的差异, 分析了存在的问题, 并提出协调与选择应用的建议, 可作为各类型装备开展雷电防护工作及后续标准规范制定的参考依据。

关键词: 雷电环境; 雷电防护; 标准体系; 武器装备

中图分类号: TJ06

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2021)08-0014-06

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2021.08.003

Study on Lightning Protection Standard Systems and Application of Weapon Equipment

XIONG Xiu¹, LI Hong-jun²

(1. Xi'an Airborne Lightning & EME Laboratory, Xi'an 710077, China;

2. First Military Representative Office of Airforce Equipment Department Stationed in Xi'an, Xi'an 710089, China)

ABSTRACT: There are various lightning protection standard systems for various types of weapon equipment. Typically, the standards of air vehicle and ground equipment are very different in lightning environment, protection measure and test method. The technical sources of domestic lightning standards are clarified based on the research on international lightning protection standard systems. The difference in key lightning parameters, standard content, and actual application among standards of various systems are analyzed, along with existing problems and harmonizing advice, which could be reference of lightning protection implementing and standard development for various type of equipment.

KEY WORDS: lightning environment; lightning protection; standard system; weapon equipment

雷电对空中、地面及水面的各类装备均会构成威胁, 随着我国装备研制水平的不断提高, 对雷电防护的重视程度越来越高。在装备防雷工作实践中, 标准至关重要, 但目前航空、地面、水面各类装备的防雷

标准较多存在不完善、不协调甚至冲突的情况, 严重制约了防雷工作的开展。鉴于国内防雷标准制定基本参照国外主流标准, 文中首先对国外雷电标准体系进行了梳理和比较, 进而对国内不同类型武器装备的防

收稿日期: 2021-03-05; 修订日期: 2021-04-23

Received: 2021-03-05; Revised: 2021-04-23

基金项目: 陆军装备预先研究项目 (30103100306)

Fund: Army Equipment Pre-study Projects (30103100306)

作者简介: 熊秀 (1980—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为雷电、静电等强电磁环境效应防护。

Biography: XIONG Xiu (1980—), Male, Master, Senior engineer, Research focus: strong electromagnetic environment (lightning, electrostatic etc.) effect protection.

引文格式: 熊秀, 李红军. 武器装备防雷标准体系及应用研究[J]. 装备环境工程, 2021, 18(8): 014-019.

XIONG Xiu, LI Hong-jun. Study on lightning protection standard systems and application of weapon equipment[J]. Equipment environmental engineering, 2021, 18(8): 014-019.

雷标准进行技术来源及存在问题的分析。最后结合国内外的探索经验, 提出一些标准制订和应用的建议。

1 国际防雷标准体系

国际防雷标准主要包括三大类型: 针对航空器的 SAE ARP 系列标准; 针对各类民用设施和设备的 IEC 标准; 针对军用设施和设备的美军标。

1.1 针对航空器的 SAE ARP 系列标准

美国机动车工程师学会 (SAE) 制订了一系列与航空器雷电相关的 ARP (Aerospace Recommended Practice) 标准, 具体包括: ARP 5412B—2013《雷电环境及相关试验波形》; ARP 5413—1999《飞机电气电子系统的雷电间接效应的验证》(2007 年取消, 由 AC 20-136A 替代, AC 20-136 已更新为 B 版本); ARP 5414B—2018《飞机雷电分区》; ARP 5415B—2020《雷电间接效应验证指南》; ARP 5416A—2013《飞机雷电试验方法》; ARP 5577—2002《飞机直接效应验证》。

图 1 中的 DO160^[1]第 22 章及 23 章虽然不属于 ARP 标准, 但其技术内容完全来源于 ARP 5416^[2], 可视作 ARP 的衍生标准。欧洲的航空雷电标准 (EUROCAE 发布的 ED 系列标准) 通常与 ARP 标准等同, 且同步发布。另外, 一些发布较早的针对军用航空器防雷的标准 (如 MIL-STD-1757A^[3]《航空航天器及硬件的雷电鉴定试验方法》、MIL-STD-1795A^[4]《航空航天器及硬件的雷电防护》) 均已废止, 不再使用, 而是直接采用 ARP 及 DO160 标准。因此, ARP 系列防雷标准几乎可视作国际航空器防雷标准的统一源头。

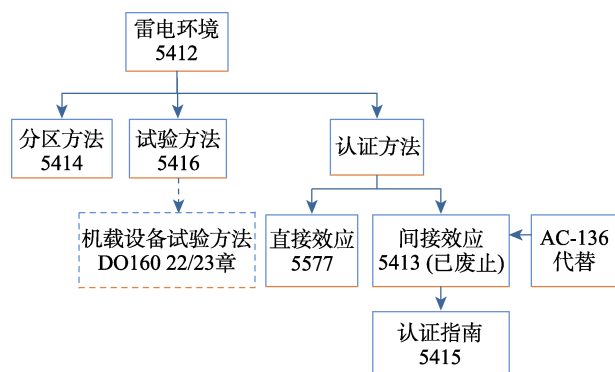


图 1 ARP 系列雷电标准
Fig.1 ARP standard group for lightning

1.2 针对各类民用设施和设备的 IEC 标准

针对地面设施和设备的防雷标准以 IEC 62305 为基础, 包括 4 个标准, 如图 2 所示。

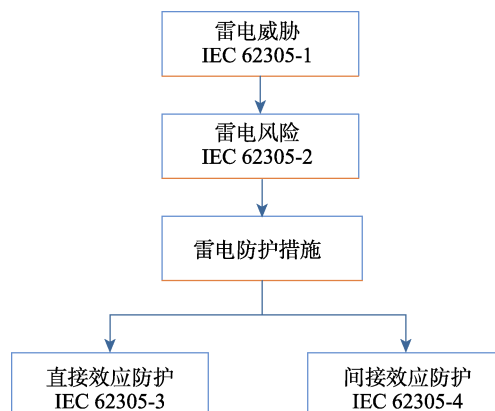


图 2 IEC 62305 系列标准
Fig.2 IEC 62305 standard group

1) IEC 62305-1^[5]《雷电防护 第一部分: 总则》。该标准主要描述了雷电环境及各类雷击的参数, 是进行防护设计、仿真及验证的基础。

2) IEC 62305-2^[6]《雷电防护 第二部分: 风险管理》。该标准描述了雷击损失相关的风险评估方法。

3) IEC 62305-3^[7]《雷电防护 第三部分: 建筑物的物理损坏和生命危险》。该标准描述了直接雷击防护系统, 包括外部接闪系统和内部搭接系统, 以及对接触和跨步电压威胁人身安全的防护措施。

4) IEC 62305-4^[8]《雷电防护 第四部分: 建筑物内的电子电气系统》。该标准描述了建筑物内部雷电间接效应的防护措施。

IEC 62305 标准最新版本于 2011 年发布, 其余的针对各类地面设施或系统的防雷标准基本上都是以该标准为基础。如风力发电机标准 IEC 61400-4:2010^[9]《风力发电机 第 24 部分: 雷电防护》, 其中规定的环境、风险评估方法和部分接地搭接方法引自 IEC 62305 标准, 但防护设计方法及试验方法等是根据自身特点来规定的。

IEC 62305-1 与 ARP 5412B^[10]中的标准雷电参数因选用的数据源不同而略有差异, 更大的不同体现在试验及分析的波形描述上, 见表 1。从表 1 可以看出, 2 个标准规定的雷电波形参数有明显区别, 必然会导致基于这些不同波形的分析、设计及试验也存在较大差别。

1.3 针对军用设备的美军标

MIL-STD-464C^[11]《系统电磁环境效应要求》由美国国防部于 2010 年发布, 该标准对军用设备 (包括飞机) 的雷电防护能力提出了要求。其 5.5 节规定: “对于雷电的直接效应和间接效应, 系统都应满足其工作性能的要求……符合性应通过系统、分系统、设备和部件 (如结构件和天线罩) 级试验、分析或其组合来验证。”MIL-STD-464C 中的雷电波形引自 SAE ARP 5412, 与 IEC 系列标准中的雷电参数有差异。

表 1 标准雷电波形参数差异
Tab.1 Lightning waveform parameter differences between two standards

项目	IEC 62305-1	ARP 5412B
防护等级	LPL I、II、III	不区分等级
波形	首次正雷击 10/350 首次负雷击 1/200 后续负雷击 0.25/100 长雷击：矩形波	首次回击，6.4/69 波形 中间电流 B，单向 持续电流 C，单向 ^a 后续回击 D，6.4/69 波形
直接效应	首次正雷击峰值 200 kA ^b 首次负雷击峰值 100 kA 后续负雷击峰值 50 kA	A 峰值 200 kA B 平均值 2 kA C 200~800 A D 峰值 100 kA
试验参数	未规定波形 短雷击 200 kA、100 C、10 MJ 长雷击 0.5 μs、200 C	电流分量 ABCD 有规定波形 分量 A：200 kA、2 MJ
间接效应波形	未明确限定，主要包括 1.2/50 波形 与 8/20 波形	波形 1(0.34/6.4)、2(6.4/69)、3(1~10 MHz 阻尼震荡)、4(6.4/69)、5A(40/120)、5B(50/500)、6H(0.245/4)以及多击与多重脉冲组

注：a.另外还有变化的 C 分量 C*；b.本单元格内均为 LPL I 的峰值

MIL-STD-461G^[12]《对分系统和设备的电磁干扰特性的控制要求》中新增“CS117 雷电感应瞬态敏感度传导试验”主要针对机载设备，依据 DO160G 制定。

另外有一些针对地面设施的美军标，如 MIL-STD-188-124B^[13]《包括地基通信电子设施设备在内的远程战术通信系统通用的接地、连接、屏蔽》和针对军用地面设施的 UFC 3-575-01^[14]《雷电与静电防护系统》中，关于防雷的技术内容则类似于前面所述的 IEC 标准。

2 国内防雷标准体系

对照国际防雷标准，国内的防雷标准也可以相应地分为航空类、民用设施设备类和武器装备类。

2.1 航空类

由于国内以前的航空产业主要针对军用装备，航空器的防雷标准主要为军标。现行有效的民用标准为：

1) HB 6167.24—2004^[15]《民用飞机机载设备环境条件和试验方法 第 24 部分：雷电感应瞬态敏感度试验》，该标准等同翻译 RTCA/DO-160G Section 22。

2) HB 6167.25—2014^[16]《民用飞机机载设备环境条件和试验方法 第 25 部分：雷电直接效应试验》，该标准等同翻译 RTCA/DO-160G 第 23 章。

2.2 民用设备类标准

民用设备通常是位于建筑物内，因而其防雷主要是针对间接效应，在标准中通常作为建筑物（设施）雷电防护的一部分。

GB/T 21714—2015 系列标准等同翻译 IEC 62305

系列标准，包括：GB/T 21714.1^[17]《雷电防护 第 1 部分：总则》、GB/T 21714.2^[18]《雷电防护 第 2 部分：风险管理》、GB/T 21714.3^[19]《雷电防护 第 3 部分：建筑物的物理损坏和生命危险》、GB/T 21714.4^[20]《雷电防护 第 4 部分：建筑物内电气和电子系统》。

国内民用设施方面，影响较大的标准还包括 GB 50057—2010^[21]《建筑物防雷设计规范》与 GB 50343—2012^[22]《建筑物电子信息系统防雷技术规范》。这两部标准内容较全，包括防护要求、防护方法、防护系统等，除了雷电参数和风险评估方面的内容，大致可以对应 IEC 62305 系列标准。

其余的标准主要针对具体行业的设施设备和防护器件，技术源头基本来自 IEC 62305。主要包括：GB 18802.1—2011《低压电涌保护器 第一部分：性能要求和试验方法》、GB 15599—2009《石油与石油设施雷电安全规范》、GB 50601—2010《建筑物防雷工程施工与质量验收规范》、GB 50650—2011《石油化工装置防雷设计规范》、GB/T 3482—2008《电子设备雷击试验方法标准》、GB/T 21431—2015《建筑物防雷装置检测技术规范》、GB/T 7450—1987《电子设备雷击保护导则》、TB/T 3074—2003《铁道信号设备雷电电磁脉冲防护技术条件》、NB/T 31039—2012《风力发电机组雷电防护系统技术规范》等。

2.3 武器装备类

武器装备类防雷标准包括：GJB 1389A—2005《系统级电磁兼容性要求》、GJB 8848—2016《系统电磁环境效应试验方法》、GJB 2639—1996《军用飞机雷电防护》、GJB 3567—99《军用飞机雷电防护鉴定试验方法》、GJB 1804—93《运载火箭雷电防护》、GJB 7899—2012《航天发射场雷电预警与报警规程》、

GJB 5080—2004《军用通信设施雷电防护设计与使用要求》、GJB 6784—2009《军用地面电子设施防雷通用要求》、GJB 7581—2012《机动通信系统雷电防护要求》、GJB 8007—2013《地地导弹武器系统雷电防护通用要求》。

针对以上标准作以下说明：

1) GJB 8848—2016^[23]中关于飞机的试验方法依据 GJB 3567 执行，地面装备的试验方法参考了飞机类标准中的直接效应试验方法和间接效应试验方法。

2) GJB 2639—1996^[24]提出了军用飞机的雷电防护要求，要求包括雷电防护计划、设计要求及检验 3 个部分。

3) GJB 3567—99^[25]和 GJB 1804—93^[26]均参考了 MIL-STD-1757A 中的试验方法，只规定了直接效应试验方法，没有机载设备雷电感应瞬态敏感度试验方法。GJB 1804—93 中关于雷电防护要求的部分则参

考了 MIL-STD-1795A。

4) 最后 4 项标准为地面设施防雷要求，这 4 项标准的内容主要参考针对地面建筑的 IEC 和 GB，与前面的几项标准在内容来源上有很大差异。

3 航空与地面装备的防雷标准差异

以 GJB 2639—1996《军用飞机雷电防护》和 GJB 6784—2009^[27]《军用地面电子设施防雷通用要求》为例，来说明航空与地面装备防雷标准的差异。从表 2 可以看出，两个标准差异明显。大体而言，同样是提防雷要求的标准，航空防雷标准重点在提要求和验证，而地面装备的防雷标准重点在设计实现和工程实施。这些差异，一方面是因为地面设施和航空器本身特点不同，另外也与技术来源及标准架构有直接关系。

表 2 航空与地面装备防雷标准的差异
Tab.2 Differences between airborne and ground equipment lightning protection standards

航空器		地面设施
SAE 标准		IEC 标准
雷电波形	直接效应试验波形与间接效应波形	无明确规定，IEC62305 中规定了电流试验参数和 SPD 试验波形
防雷等级	不区分防雷等级	按雷暴频次与设施重要性分为一级和二级
雷电关键性类别	按自身重要性和对雷电的敏感性分为 1、2、3 类	体现在防雷等级上
分类或等级差异	防护指标一样，差异体现在是否要进行专门的防护设计及验证	防护指标不同
雷击区域	按飞机初始附着和扫掠附着位置分为 1A、1B、2A、2B 及 3 区	按是否直接雷击及电磁场衰减分为 LPZ0A、LPZ0B、LPZ1、LPZ2 等
雷击区域划分方法	缩比模型附着点试验、仿真计算	滚球法
直接效应防护	机身结构及外部设备，无专门的接闪系统	避雷针/网+引下线+接地极/网
间接效应防护	屏蔽+接地+浪涌抑制，防护指标为 DO160 第 22 章的试验等级	屏蔽+接地+浪涌抑制，但设计差异很大，防护指标不太明确，体现为不同类型 SPD 的参数要求
防护设计与产品	通常为定制化设计与产品，对设计与产品只提要求，不对实现方式及规格作具体规定	通常为通用型设计与产品，对接闪、接地的设计及 SPD 的位置与规格有明确、具体的规定
验证试验	对设计要进行验证，要进行鉴定试验	未明确规定，通常按照货架产品对待，另外进行工程验收
工程实施	不涉及	对接闪、接地及 SPD 等的安装有具体规定

4 装备防雷标准应用及存在的问题

4.1 军用航空器防雷标准的应用

目前军用航空器使用的标准如图 3 所示。国际上航空器的防雷标准体系较为完善，在军用航空的防雷实践中，当没有可依据的国军标时，往往直接参考国际标准，因此目前实际发挥作用最大的标准还是 ARP5416 及 DO160。

4.2 地面武器装备

目前可用的标准除了 GJB 1389A 与 GJB 8848

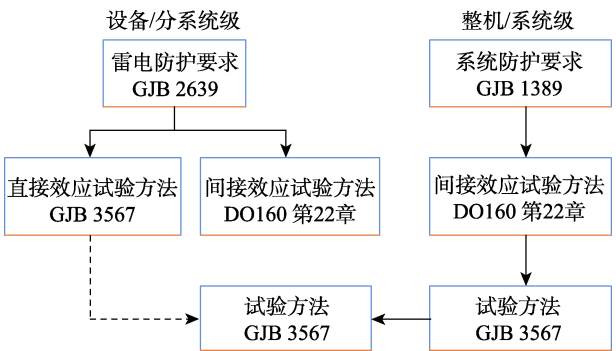


图 3 军用航空器标准应用现状
Fig.3 Current standards application on military aircraft

外,还有2.3小节所列的GJB 5080、GJB 6784、GJB 7581、GJB 8007。这些标准由于其来源主要针对设施,重点在设计实现上,没有提供明确的雷电波形及试验考核方法,在进行验证时,只能参考GJB 8848中提供的方法,因此不利于在军用装备上的实施贯彻。

水面装备目前可依据的防雷标准则更少,目前主要依据GJB 8848进行试验,在防护设计中,参考民用建筑类的标准(比如GB 50057等)。

4.3 武器装备防雷标准体系存在的问题

当前武器装备防雷标准体系存在的问题包括以下几个方面。

1) 标准体系不完善。从上文的讨论中可以看出,虽然航空器的防雷设计及验证已经大范围开展,但与国外相比,仍滞后不少。地面与水面装备的防雷标准欠缺更多,很多装备没有可直接依据的标准。

2) 来源于SAE与IEC的标准不协调。系统级的2个标准GJB 1389与GJB 8848中的雷电环境是按照航空器的标准来确定的,而其他防雷国军标基本参照IEC,基本的雷电波形及参数就不一样,其他的诸多差异在表2中已列出。

3) 地面装备的军标没有明确的试验方法与指标。这些标准对于设计规定较为详细具体,但往往没有明确的试验方法和雷电参数,这与武器装备研制中以试验考核牵引设计的原则不符合,使得标准的可执行性不够。比如GJB 8007^[28]“4.4.6 质量要求”中规定:“车辆的雷电防护装置试验应参照GJB 3567进行全尺寸部件附着点试验、结构直接效应试验、电晕和流光的直接效应试验,参照GB/T 18802.21—2004^[29]进行电气入口端浪涌电流试验,参照GJB 2093^[30]进行屏蔽效能试验”。这样规定可视为考虑到了设计验证的问题,但也必然带来以下问题:按照GJB 3567进行直接效应试验导致设计时考虑的雷电波形参数与试验时的参数不一致;GB/T 18802.21—2004是针对SPD的试验考核方法,并不能覆盖设备及分系统的间接效应试验。

4) 间接效应防护验证不协调的问题。航空器与地面装备标准的不协调在间接效应防护验证上体现得最为明显。航空装备的间接效应按照不同等级进行设备或系统的瞬态注入考核,而IEC标准中对间接效应的试验主要是针对SPD防护器件,而且由于民用SPD一般为货架定型产品,通常是由生产厂商进行出厂试验,地面装备的防雷标准中没有明确规定系统或设备的防雷试验方法。

5 装备防雷标准应用及编制的建议

鉴于上述不同来源军用标准之间的不协调,在防雷工作实施及一些新的标准规范制定中,已经开

始考虑标准的协调融合问题。最典型的需要融合的场景包括:

1) 系统中包含不同类型的分系统。比如军用浮空器系统,空中部分的雷电环境跟航空器类似,而地面部分的设施和设备明显与空中不同。近期的实践中是将空中部分参照ARP 5416和DO160进行设计和试验,而地面部分更多地参考GB 50057来设计,其直接效应试验验证参照空中部分,而间接效应验证主要体现在对SPD的试验上。SAE AE2近期即将发布一项关于无人机系统地面设备的雷电试验标准^[31]。该标准的思路是参照DO160设定5个试验等级,但试验波形融合了DO160中的试验波形与IEC电信防雷标准中的波形,确保试验波形尽可能体现实际场景可能出现的波形。这应该是一种值得参考的标准融合的思路。

2) 一个标准同时兼顾不同类型的装备对象。典型实例是GJB 8848《系统电磁环境效应试验方法》,该标准需要兼顾海陆空等多类型的装备,在规定了统一的雷电试验波形的基础上,对不同装备的试验方法分别进行规定:航空装备直接采用GJB 3567,而地面装备则另外规定了试验方法。对于下一层级的设备/分系统级的试验,如果能在雷电波形与试验方法方面与GJB 8848保持一致,则更有利于标准的执行。

3) 将地面设施与装备区分对待,地面设施与装备的防雷措施经常是密切相关的。对于军用设施,可以按照IEC标准体系进行防护设计及工程实施,但装备的防雷标准应着重明确研制要求和试验鉴定方法。

6 结论

随着装备雷电防护需求越来越多,防雷标准存在的问题会越来越突显,因此需要引起相关单位的重视。武器装备的防雷标准应进行梳理和协调,使用统一的雷电标准参数,同时考虑不同装备的特点,明确防护要求和考核验证方法,如此才能更有效地推动装备防雷能力的提升。

参考文献:

- [1] RTCA/DO-160 G, Environmental conditions and test procedures for airborne equipment[S].
- [2] SAE ARP5416A, Aircraft lightning test methods[S].
- [3] MIL-STD-1757A, Lightning qualification test techniques for aerospace vehicles and hardware[S].
- [4] MIL-STD-1795A, Lightning protection of aerospace vehicles and hardware[S].
- [5] IEC 62305-1, Protection against lightning-Part 1: General principles[S].
- [6] IEC 62305-2, Protection against lightning-Part 2: Risk management[S].

- [7] IEC 62305-3, Protection against lightning-Part 3: Physical damage to structures and life hazard[S].
- [8] IEC 62305-4, Protection against lightning-Part 4: Electrical and electronic systems within structures[S].
- [9] IEC61400-24, Wind energy generation systems-Part 24: Lightning protection[S].
- [10] SAE ARP5412B, Aircraft lightning environment and related test waveforms[S].
- [11] MIL-STD-464C, Electromagnetic environmental effects requirements for systems[S].
- [12] MIL-STD-461G, Requirements for the control of electromagnetic interference characteristics of subsystems and equipment [S].
- [13] MIL-STD-188-124B, Grounding, bonding and shielding for common long haul/tactical communication systems including ground based communications electronics facilities and equipments[S].
- [14] UFC 3-575-01, Lightning and static electricity protection systems[S].
- [15] HB 6167.24—2004, 民用飞机机载设备环境条件和试验方法 第24部分: 雷电感应瞬态敏感度试验[S].
HB 6167.24—2004, Environmental conditions and test procedures for airborne equipment of civil airplane-Part 24: Lightning induced transient susceptibility test[S].
- [16] HB 6167.25—2014, 民用飞机机载设备环境条件和试验方法 第25部分: 雷电直接效应试验[S].
HB6167.25—2014, Environmental conditions and test procedures for airborne equipment of civil airplane-Part 25: Lightning direct effects test[S].
- [17] GB/T 21714.1, 雷电防护 第1部分: 总则[S].
GB/T 21714.1, Protection against lightning-Part 1: General principles[S].
- [18] GB/T 21714.2, 雷电防护 第2部分: 风险管理[S].
GB/T 21714.2, Protection against lightning-Part 2: Risk management[S].
- [19] GB/T 21714.3, 雷电防护 第3部分: 建筑物的物理损坏和生命危险[S].
GB/T 21714.3, Protection against lightning-Part 3: Physical damage to structures and life hazard[S].
- [20] GB/T 21714.4, 雷电防护 第4部分: 建筑物内电气和电子系统[S].
GB/T 21714.4, Protection against lightning-Part 4: Electrical and electronic systems within structures[S].
- [21] GB 50057, 建筑物防雷设计规范[S].
GB 50057, Code for design protection of structures against lightning[S].
- [22] GB 50343, 建筑物电子信息系统防雷技术规范[S].
GB 50343, Technical code for protection of building electronic information system against lightning[S].
- [23] GJB 8848, 系统电磁环境效应试验方法[S].
GJB 8848 Electromagnetic environmental effects test methods for systems[S].
- [24] GJB 2639, 军用飞机雷电防护[S].
GJB 2639, Lightning protection of military aircraft[S].
- [25] GJB 3567, 军用飞机雷电防护鉴定试验方法[S].
GJB 3567, Lightning protection qualification test techniques for military aircraft[S].
- [26] GJB 1804, 运载火箭雷电防护[S].
GJB 1804, Launch vehicle lightning protection[S].
- [27] GJB 6784, 军用地面电子设施防雷通用要求[S].
GJB 6784, Rules for the continental military electronic facilities against lightning[S].
- [28] GJB 8007, 地地导弹武器系统雷电防护通用要求[S].
GJB 8007, General requirements for lightning protection of ground-to-ground missile weapon system[S].
- [29] GB/T 18802.21, 低压电涌保护器 第21部分: 电信和信号网络的电涌保护器(SPD) 性能要求和试验方法[S].
GB/T 18802.21, Low voltage surge protective devices-Part 21: Surge protective devices connected to telecommunications and signaling networks—Performance requirements and testing methods[S].
- [30] GJB 2093A, 军用方舱通用试验方法[S].
GJB 2093A, General test methods for military shelter[S].
- [31] ERIK B. A proposed new lightning transient test standard for UAV ground station equipment[C]// ICOLSE2019. Wichita: [s. n.], 2019.