



航空基础技术丛书

航空器雷电防护技术

AIRCRAFT LIGHTNING PROTECTION TECHNOLOGY

合肥航太电物理技术有限公司◎主编



航空工业出版社



航空基础技术丛书

航空器雷电防护技术

合肥航太电物理技术有限公司 主编

航空工业出版社

北京

内 容 提 要

自人类发明航空器以来,大气雷电始终是挥之不去的梦魇,为保证飞行安全,人类与之进行了长期不懈的斗争,从而产生了航空器雷电防护科学并有了长足的发展。本书从航空器雷电防护设计、试验与适航取证角度,论述了大气雷电的一般知识、现代航空器雷电防护概况及航空器结构、燃油和机载设备的雷电防护设计、试验与适航取证的基本方法。

本书可供航空航天技术和管理人员阅读,也可供从事陆基、海基装备研制的科技人员参考,还可作为高等院校航空航天专业及其他相关专业教师、学生和研究生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

航空器雷电防护技术/合肥航太电物理技术有限公司主编. --北京:航空工业出版社,2013.12
(航空基础技术丛书)
ISBN 978-7-5165-0296-9

I. ①航… II. ①合… III. ①航空器—防雷 IV.
①V267

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第271847号

航空器雷电防护技术 Hangkongqi Leidian Fanghu Jishu

航空工业出版社出版发行

(北京市朝阳区北苑路2号院 100012)

发行部电话:010-84936555 010-64978486

北京地质印刷厂印刷

全国各地新华书店经售

2013年12月第1版

2013年12月第1次印刷

开本:787×1092 1/16

印张:19.5 字数:499千字

印数:1—3500

定价:78.00元

《航空基础技术丛书》总审委会

主	任	林左鸣						
常	务	副	主	任	谭瑞松			
副	主	任	顾惠忠	吴献东	耿汝光	李玉海		
			张新国	高建设	李方勇	孙卫福		
成	员	关 桥	曹春晓	赵振业	李 明	刘大响		
		冯培德	陈祥宝	魏金钟	刘 林	周国强		
		王英杰	梁丽涛	杨胜群	曹英杰	戴圣龙		
		孙侠生	张 军	赵 波	夏裕彬	张振伟		
		张明习	谢富原					

《航空基础技术丛书》总编委会

主任 徐占斌
副主任 荣毅超 李晓红 吴世平 陈刚 刘鑫
成员 向明 梅方清 姚俊臣 周宁 史晋蕾
李小飞 徐明 吴晓峰 张力 李兴无
杨海 李志强 李周复 黄蓝 刘恩朋
轩立新 益小苏 段泽民

《航空基础技术丛书》编写办公室

主任 梅方清 姚俊臣
副主任 周宁 史晋蕾
成员 李小飞 郭晓月 熊昌友 郭倩旎 冯冰
李亚军 李少壮 杨素玲 胡律行 王湘念
陈玉 汪慧云 杨占才 李冬 张明
姚红

《航空基础技术丛书》总序

近年来，以一批先进重点型号为代表的我国航空武器装备取得了“井喷式”的发展，航空工业实现了与发达国家从“望尘莫及”到“望其项背”的历史性跨越。但我们也要清醒地看到，面对新航空装备下一轮“井喷式”发展的需要，我们面临着加强航空科技创新的迫切需求。

党的十八大报告指出，要实施创新驱动发展战略，坚持走中国特色社会主义自主创新道路，以全球视野谋划和推动创新。航空工业作为高科技战略性新兴产业，在加强自主创新和提升创新能力方面面临三个方面的挑战：一是传统的技术跟随式发展模式已经走到了尽头；二是长期积累的技术创新成果已充分应用，技术储备急需创新实践来大量补充；三是新航空装备跨越式发展对技术和管理创新提出更高要求。

要实施创新驱动的发展战略，首先要注重原始创新。加大现象发现和原理验证力度，探索未知技术领域，积极寻求原创性突破，形成一批引领未来发展，技术成熟度在1~3级的创新成果。更要注重技术创新。航空基础技术作为航空科技的重要组成部分，发挥着重要的支撑作用，支持和引领着航空科技的发展。在国家科技重大专项、重点型号攻关、新型飞机和发动机的研制中都起着强有力的保障与支撑作用，具有重要的战略意义。随着我国从跟踪研制向自主创新、从制造大国到制造强国的转变，作为科技前沿的航空基础技术必将从服务和保障的方式向技术引领方式转变，并向社会其他国民经济领域进行技术转移和输出，为全社会的技术进步和创新发展起到强有力的推动作用。

中国航空工业集团公司基础技术研究院作为航空工业基础技术的龙头，肩负着支撑、引领型号发展的双重任务，本着“航空报国，强军富民”的理念，践行“变革为先，创新为本”的精神，以知识产权战略为抓手，牵引原始创新，推动技术创新，加强管理创新，最终实现从“型号牵引”到“牵引型号”的转变。

航空基础技术的传承与传播，与航空基础技术的研究与探索同样重要。目前，我们急需有关论述基础技术等科技前沿技术的专著。因此，在中国航空工业集团公司倡导下，由中国航空工业集团公司基础技术研究院组织所属12家单位联合编写了一套大型基础技术专著《航空基础技术丛书》。《航空基础技术丛书》的编写，开创了航空工业各专业板块之先河，为航空工业知识积累、传承、宣传工作，为航空科学技术服务于社会开了一个好头。这种勤勉探索，对航空工业、对全社会负责的精神，值得大力提倡。

该丛书的编写，对梳理航空工业基础技术的发展脉络，宣传航空基础技术成就，引领未来航空基础技术发展方向将起到重要作用，对政府主管部门、航空工业用户、其他工业领域用户了解航空基础技术提供了一个良好的媒介，对广大航空爱好者、尤其是青年人了解航空、热爱航空起到了宣传作用，亦对社会输出相关技术、服务于我国科技进步做出了贡献。

中国航空工业集团公司董事长
党组书记



2013年8月

《航空基础技术丛书》总前言

我国航空工业经过六十多年的发展，逐步形成了专业门类齐全，科研、试验、生产相配套，具备研制生产当代航空装备能力的高科技工业体系，发展了多类型多用途的飞机、直升机、发动机、导弹，研制出一批具有自主知识产权并与发达国家在役航空装备性能相当的航空器，大幅度缩小了与国外先进水平的差距，使我国跻身于能够研制先进的歼击机、歼击轰炸机、直升机、教练机、特种飞机等多种航空装备的少数几个国家之列，为我国国民经济建设、国防现代化建设、社会科技进步和综合国力的提升做出了重大贡献。

航空工业作为国家的战略性产业，决定了它的发展必须建立在牢固的基础之上。所谓跨越式发展，是长期扎扎实实、厚积薄发的结果。航空基础技术作为整个航空工业的根基，在整个航空工业的发展中起着举足轻重的作用。因此，认真梳理航空基础技术发展脉络，跟踪国际航空基础技术的发展趋势，不断创新我国航空基础技术，并为航空工业新产品研制做好技术储备，成为航空工业的一项重要任务。

为完成中国航空工业集团公司基础技术研究院“打牢基础、做强技术、支撑型号、创造财富”的使命，作为中国航空工业集团公司横向价值链的最前端，基础院承担着包括政府科研、装备预研等方面的研究任务，拥有12家科研院所和高科技企业、多个国家工程实验室和国防科技重点实验室以及航空科技重点实验室，为国防科技工业和航空科技实现长远的跨越式发展提供了技术保障，为我国航空工业又好又快发展贡献着力量。

为强化从知识创新、技术创新到成果产业化的有效传导机制，提升航空基础研究成果产业化运作能力，充分体现基础技术在基础保障、技术引领、服务支撑等方面的作用，中国航空工业集团公司基础技术研究院（简称基础院）组织编写了《航空基础技术丛书》，全面介绍了航空

基础技术的范围、内容、现状、发展趋势等，尤其对各种技术的工程化应用特点、新技术对航空装备的影响作了重点介绍，对产品设计者提高新产品设计性能，用户提升对新产品的信任起到了较大作用。通过总结经验、探索航空基础技术发展趋势，进一步构筑和完善了相关材料、制造、标准化、计量、强度、气动、测试、雷电防护等技术体系，从而夯实航空工业发展的根基，实现航空基础技术从“型号牵引”到“牵引型号”的转型升级。

《航空基础技术丛书》分为《航空标准化与通用技术》、《航空精密超精密制造技术》、《航空计量技术》、《航空材料技术》、《航空结构强度技术》、《航空制造技术》、《航空气动技术》、《航空故障诊断与健康管理技术》、《航空测试技术》、《航空电磁窗技术》、《航空复合材料技术》、《航空器雷电防护技术》12个分册，分别由基础院所属中国航空综合技术研究所、北京航空精密机械研究所、北京长城计量测试技术研究所、北京航空材料研究院、中国飞机强度研究所、北京航空制造工程研究所、中国航空工业空气动力研究院、上海航空测控技术研究所、北京长城航空测控技术研究所、济南特种结构研究所、中国航空工业集团公司复合材料技术中心、合肥航太电物理技术有限公司等12家科研院所和高科技企业负责编写。主编单位汇集了各个相关专业的一线科研骨干承担编写工作，由各相关专业的院士、专家负责审稿，并由各单位总工程师担任各分册编委会主任，意在全面、准确地介绍各相关专业的现状、发展趋势及应用特点。

该丛书适合航空工业相关部门、航空工业所属企事业单位，总装、空军、海军等装备需求部门，航天、兵器、船舶、核、电子等军工相关部门管理人员及相关技术人员，以及相关院校的师生等阅读。

由于航空基础技术涵盖范围甚广，相关科学技术发展很快，不足之处，还望广大读者批评指正。

中国航空工业集团公司副总经理

徐占斌

2013年8月

《航空器雷电防护技术》审委会

主 任 吴世平

成 员 刘保华 仇善良 倪有源 柳 鑫

《航空器雷电防护技术》编委会

主 任 段泽民

成 员 司晓亮 孙安宏 李卫民

《航空器雷电防护技术》前言

自人类诞生以来，对雷电就产生了许多美丽的遐想和神话传说，也许正是雷电，使人类懂得了火，从而给人类带来最初的文明和进步。我国对雷电现象的科学观察和客观记述早欧美千年以上，而对其本质的研究和揭示却又晚欧美百余年。公元前 1500 年，我国殷商甲骨文中就有“雷”字，稍晚的西周青铜器上亦有“电”字。最早对雷电做科学观察的学者当推东汉哲学家王充（公元 27 年—约 97 年）。他在《论衡》中对雷电做过描述。国外对雷电科学进行研究的主要是 19 世纪 70 年代的美国科学家富兰克林。

对于人类的飞行活动来说，雷电是危险的。雷电是大气层中的自然现象，其成因至今仍是个谜。现代雷电学研究认为，雷电可分布在海平面以上约 100km 的空间内，雷电电压可高达亿伏以上量级，当云层之间或云层对地之间的电场强度达到约 1000kV/m 量级时，大气就会被电离，形成导电的等离子体气流，从而产生泄放并中和电荷的等离子体导电通道。通道上电流巨大，温度极高，使通道上的气流瞬间膨胀，便产生了明亮耀眼的雷电和震耳欲聋的雷鸣。

在地球大气中，平均每天发生约 800 万次雷电。其中幅值高达 200kA 以上的雷电流约占雷电总数的 0.5%，雷电流的上升速率最高可达 10^{11} A/s 左右。有统计表明，一架固定航线的商业飞机，平均每年要遭到一次雷击，战斗机在其寿命周期内平均遭两次雷击。我国民用航空局统计表明，现在我国航线上的飞机年雷击事故约 50 起，由此造成的飞行安全事故时有发生，有些甚至是灾难性的。特别是现代先进飞机，为提高飞机飞行性能，大量采用了现代电子技术，如计算机飞行控制系统、通信导航系统，同时还大量采用了先进复合材料，如碳纤维复合材料等，但遗憾的是，这些先进的电子技术和材料技术，对雷电更敏感，

损失更大。因此，将大气雷电环境给飞行安全带来的影响减至最小，一直是人们努力追求的目标。人类系统开展飞机雷电防护研究是从20世纪60年代开始的，并同时举办了国际雷电与静电学术会议（ICOLSE）。

为了飞行安全，在相关适航条例中，对飞机的雷电防护设计提出了严格的要求，以此来确保飞机在雷电环境中的安全性。因此，当设计一架新型飞机，或对已有飞机进行改进改型设计时，均需切实考虑飞机的雷电防护性能，并将其贯穿于飞机设计的始终。由于电场位形对导电物体的几何分布敏感，而飞机的外形、结构及材料等往往又非常复杂，根据电磁场理论，采用常规的算法很难得出精确解。因此，在飞机设计过程中，必须进行充分的实验室雷电试验，依据有效的雷电试验数据指导设计，以满足飞机雷电安全适航取证的要求。

航空器雷电防护设计与试验技术是制约我国现代航空器设计的重大技术瓶颈之一，因此迫切需要相关专著来指导和帮助航空器设计人员。本书从雷电形成、雷电对航空器的危害、航空器雷电防护设计与试验以及适航认证等方面进行了论述，力求概念清晰，论述明确，尤其适于从事飞机研制的技术和管理人员阅读，也可作为从事飞机雷电防护工作的相关技术人员的参考书。

本书编写过程中得到了刘保华研究员、李格教授、仇善良博士、马明、陈荣宝、李鑫、倪有源副教授和姚红、胡好等研究生的大力帮助，在此一并致谢。

由于作者水平有限，书中不当之处在所难免，敬请读者批评指正。

《航空器雷电防护技术》编委会

2013年5月

目 录

第 1 章 大气电学与高电压基础	(1)
1.1 概述	(1)
1.1.1 大气成分	(1)
1.1.2 大气对流层	(1)
1.1.3 大气电离层	(1)
1.1.4 大气电模型	(2)
1.2 大气离子	(2)
1.2.1 大气的电离过程	(2)
1.2.2 大气离子的行为	(3)
1.3 晴天大气电场	(4)
1.3.1 晴天大气电场参数	(4)
1.3.2 大气传导电流	(6)
1.3.3 大气电路的欧姆定律	(6)
1.3.4 晴天大气电场随时间的变化	(7)
1.4 云雾雨电学	(7)
1.4.1 非雷雨云的荷电	(8)
1.4.2 积雨云	(8)
1.4.3 积雨云中的电结构	(9)
1.4.4 积雨云中的起电机制	(13)
1.5 雷电过程	(15)
1.5.1 尖端放电	(15)
1.5.2 雷电	(16)
1.6 地球大气电平衡	(18)
1.7 现代雷电学研究	(18)
1.8 高电压基础理论概述	(21)
1.8.1 物体带电	(21)
1.8.2 点电荷	(21)
1.8.3 电场	(21)
1.8.4 电位	(22)
1.8.5 等势线 (面)	(23)
1.9 气体放电的基本物理过程	(23)
1.9.1 原子的激励和电离	(23)
1.9.2 气体原子的电离	(24)
1.9.3 金属电极的表面电离	(25)

1.9.4	气体放电中负离子的产生	(26)
1.9.5	放电过程中带电粒子的消失	(26)
1.9.6	雪崩放电	(27)
1.10	汤逊理论和巴申定律	(28)
1.11	流注理论	(30)
1.12	不均匀电场中的放电过程	(32)
1.12.1	电晕放电	(32)
1.12.2	极性效应	(33)
1.13	气体介质的电气强度	(33)
1.13.1	雷电冲击电压作用下气体的击穿	(33)
1.13.2	操作冲击电压作用下气体的击穿	(36)
1.13.3	大气条件对气体击穿特性的影响	(38)
1.14	脉冲高压发生器	(40)
1.14.1	脉冲高压发生器的基本原理	(40)
1.14.2	波形要求与回路参数的关系	(40)
1.14.3	多级脉冲电压发生器	(42)
1.14.4	冲击高电压的测量	(43)
1.15	冲击电流发生器	(44)
1.15.1	冲击电流波形产生	(45)
1.15.2	冲击电流的测量	(45)
第2章	航空器的雷电附着现象	(50)
2.1	概述	(50)
2.2	雷电附着点的定义	(50)
2.2.1	附着点定义	(50)
2.2.2	附着区域定义	(51)
2.3	航空器遭雷击的环境	(52)
2.3.1	高度和飞行状态	(52)
2.3.2	天气气象条件	(52)
2.3.3	遭雷击时的即时环境	(54)
2.3.4	雷暴的回避	(56)
2.3.5	雷击发生的频度	(58)
2.4	航空器遭雷击的机理	(59)
2.4.1	电场效应	(59)
2.4.2	航空器上储存的电荷	(61)
2.4.3	航空器触发的雷电	(61)
2.5	扫掠雷击现象	(65)
2.6	航空器触发雷电的机理	(66)
2.6.1	触发的雷电环境	(67)
2.6.2	航空器对触发雷电的响应	(69)

2.6.3 触发条件的预示	(72)
2.7 Atlas Centaur 67 事件	(76)
第3章 雷电对航空器的危害	(77)
3.1 概述	(77)
3.2 雷电对金属结构的危害	(77)
3.2.1 产生凹痕和熔穿	(77)
3.2.2 磁力	(78)
3.2.3 结构界面处的凹痕	(79)
3.2.4 阻性加热	(80)
3.2.5 冲击波和过压力	(81)
3.3 雷电对非金属结构的危害	(81)
3.3.1 不导电复合材料	(82)
3.3.2 导电复合材料	(82)
3.3.3 其他工程塑料	(83)
3.3.4 雷击和闪光致盲	(84)
3.4 关于间接效应	(84)
3.4.1 报告	(85)
3.4.2 趋势及后果	(86)
3.4.3 雷电直接效应和间接效应的区别	(87)
3.4.4 磁感应电压	(87)
3.4.5 结构 IR (电流乘电阻) 电压	(87)
3.4.6 间接效应的其他特性	(87)
3.4.7 关注的系统	(87)
3.5 雷电对燃油系统的危害	(88)
3.6 雷电对航空器外部安装电气装置的雷电效应	(89)
3.7 雷电对推进系统的危害	(91)
第4章 直接效应与防护	(94)
4.1 引言	(94)
4.2 对金属结构直接效应及防护	(94)
4.2.1 对熔穿的防护	(94)
4.2.2 阻性加热	(98)
4.2.3 磁力效应	(100)
4.2.4 声冲击波	(103)
4.2.5 跨越搭接带、铰链和接头的电弧	(104)
4.2.6 接头和搭接电阻	(107)
4.3 不导电复合材料的防护	(108)
4.3.1 损坏效应	(108)
4.3.2 损坏机理	(109)
4.3.3 用分流条防护	(112)

4.3.4 用导电涂层防护	(118)
4.4 导电复合材料的防护	(121)
4.4.1 碳纤维复合材料蒙皮的防护	(121)
4.4.2 碳纤维复合材料连接和连接处的防护	(125)
4.4.3 应用方面的考虑	(127)
4.5 风挡、座舱盖和窗户	(129)
4.6 对推进系统的直接效应	(131)
4.6.1 螺旋桨	(132)
4.6.2 直升机转子叶片	(133)
4.6.3 齿轮箱	(133)
4.6.4 涡轮发动机	(134)
4.7 直接效应试验	(134)
4.7.1 试验设备	(134)
4.7.2 试验方法与标准	(141)
4.7.3 试验实例(飞机复合材料的雷电扫掠试验)	(145)
第5章 间接效应与防护	(148)
5.1 概述	(148)
5.2 基本概念	(148)
5.2.1 符号和单位	(148)
5.2.2 数学运算	(148)
5.2.3 材料特性	(148)
5.2.4 几何平均距离(GMD)	(151)
5.2.5 电压和电流	(151)
5.2.6 磁场效应	(154)
5.2.7 电场效应	(158)
5.2.8 波形分析	(159)
5.3 雷电间接效应设计项目中的步骤	(160)
5.4 雷电与高强度辐射场及核电磁脉冲的区别	(161)
5.5 雷电主要耦合机理	(162)
5.5.1 结构阻性电压	(163)
5.5.2 磁感应电压	(165)
5.5.3 容性产生的电流	(166)
5.6 确定电路响应的方法	(167)
5.7 航空器上测得的感应电压示例	(168)
5.7.1 飞机机翼航行灯电路	(168)
5.7.2 飞机空速管电加热除冰电路	(169)
5.8 航空器及其线路响应的数值分析	(170)
5.8.1 相互作用模型	(171)
5.8.2 雷电效应电磁仿真	(171)