



装备科技译著出版基金

李卓成 译

欧洲航天标准化协作组织 (ECSS) 著

Space Engineering—High Voltage
Engineering and Design Handbook

空间高电压技术 与设计手册



国防工业出版社

National Defense Industry Press



装备科技译著出版基金

空间高电压技术与 设计手册

欧洲航天标准化协作组织(ECSS) 著
李卓成 译

国防工业出版社

·北京·

著作权合同登记 图字:军-2018-043号

图书在版编目(CIP)数据

空间高电压技术与设计手册/ECSS
(欧洲航天标准化协作组织)著;李卓成译. —北京:
国防工业出版社,2019.1
书名原文:Space Engineering—High Voltage
Engineering and Design Handbook
ISBN 978-7-118-11717-2

I. ①空... II. ①E...②李... III. ①高电压-技术-
手册 IV. ①TM8-62

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第258429号

This standard contains in whole or in part a quotation and translation of ECSS standard no. with special permission of ECSS and ESA. The original English version of the ECSS standard is available from:
ECSS Secretariat

本书简体中文版由ESA授权国防工业出版社独家出版发行,版权所有,侵权必究。

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路23号 邮政编码100048)

三河市腾飞印务有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 710×1000 1/16 印张 12¼ 字数 215千字

2019年1月第1版第1次印刷 印数1—2000册 定价75.00元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

序 言

高压工程与设计从空间飞行器初期开始一直是航天器设计的一部分,这是由于对于作为通信链路一个主要部件的高压功率调节器的需求。20世纪80年代,由于受到用于通信卫星用行波管放大器和现代大功率雷达电子功率调节器(EPC)发展需求的支持,在欧洲建立了一些企业。

1989年,ESA发射了第一部用于地球观测的大功率雷达,该雷达安装在ERS-1卫星上(欧洲遥感卫星),从而实现了空间15~17kV的高压技术。

目前,在许多通信卫星上有10个到上百个工作电压在5~8kV的电子功率调节器。有些在轨运行的用行波管和速调管的空问雷达工作电压达到20kV,在许多任务中,不同空间环境和不同探测器情况下使用的电压从几百伏到30kV,电压达到150kV的大功率激光器已经开始研究,甚至在国际空间站使用高压源的某些实验也在进行中。

目前的趋势是卫星上不断增加的电子推进器的应用,它使用的电压在几百伏到10kV。与高压相关的异常现象仅在几个时期受到关注,一些是在积累经验初期,一些在晚期,尤其是在新的开发时期且开发团队在该领域没有经验。

在太空飞行初期,人们已经认识到标准的重要性,美国空军和美国国家航空航天局(NASA)早在20世纪70和80年代提出了一系列设计和试验手册。在欧洲,1992年ESA开始讨论有关工业标准草案:PSS-02-303草案2“ESA空间系统中用于EPC的高压变压器和元件要求”,这就成为许多空间项目的一个标准,即使它从来没有正式发布。日益增长的各种各样的高压应用使得制定一个新的标准化方法更加迫切。ECSS在2007年开始讨论,结论是一个标准不能满足当前项目需求,由于范围太宽以致不能覆盖各种各样的应用,它不适合于转换为高压工程设计和试验中的专业技能。因此,需要出版一个关于高压设备、元件设计和试验的具有广泛知识和建议的手册。

本书的编写和出版是为了满足上述需求,给出了有关高压方面详细的思考方法和有关的设计准则。

正如在ECSS-E-ST-20中定义的那样,对高压设备和部件的高压效应的规范化设计是高压系统工程中的一部分,在ECSS-E-ST-20中只有小部分关

于高压方面的要求。

对于包含高压设备和设计的新项目,可以本手册为参考制定适应于高压应用的特殊要求。

本手册的第7章给出了一些“最优方法”说明。

关于认为是高压的电压范围定义,唯一巧妙的答案如 ECSS - E - ST - 20C 所述:高压是能形成局部放电、电晕、打火和强电场发生的 AC 或 DC 电压。在空间环境下,这些情况可能发生。实际上,如果一种惰性气体在低气压环境下出现了“帕邢(Paschen)击穿”的临界气压,这种高压效应(放电、电晕、打火)便可在 60 ~ 80V 时发生。在空气中(氮气和氧气的混合物),这种局部放电可能发生在 300V 以上。

前 言

本书是 ECSS 系列文件之一,可作为关于 ECSS 空间项目和装置标准的基础资料。ECSS 是欧洲航天局(ESA)国际空间机构和欧洲工业协会以开发和维持通用标准为目的的一次合作尝试。

根据如何组织和完成用于空间的设计、制造、集成和测试高压设备、模块和元件的工作说明和建议确定本书的内容,它配合 ECSS - E - SF - 20C,覆盖功率调节器单元以及功率负载接口。

本书由 ECSS - E - HB - 20 - 05A 工作组编写,ECSS 执行秘书处审核,ECSS 技术管理局批准。

目 录

1	范围	1
2	参考文献	2
3	术语、定义和缩略语	7
3.1	源于其他文件的术语	7
3.2	本手册特定术语	8
3.2.1	传导发射(CE)	8
3.2.2	临界压力	8
3.2.3	电介质	8
3.2.4	剂量	8
3.2.5	双层绝缘	8
3.2.6	电气搭接	8
3.2.7	击穿场强	8
3.2.8	电子功率调节器	8
3.2.9	电击穿	9
3.2.10	静电放电	9
3.2.11	击穿电压	9
3.2.12	电绝缘	9
3.2.13	电磁兼容(EMC)	9
3.2.14	电磁干扰(EMI)	9
3.2.15	发射	9
3.2.16	接地	9
3.2.17	高电压	9
3.2.18	绝缘体	9
3.2.19	内部带电	10
3.2.20	内部介质电荷	10
3.2.21	离子发动机	10
3.2.22	门锁限流器(LCL)	10

3.2.23	释气率	10
3.2.24	等离子体	10
3.2.25	射频	10
3.2.26	辐射发射	10
3.2.27	辐射	10
3.2.28	太阳能电池组件(SCA)	10
3.2.29	表面充电	11
3.2.30	敏感度	11
3.2.31	敏感度阈值	11
3.2.32	推进器	11
3.2.33	行波管放大器(TWTA)	11
3.2.34	真空	11
3.3	缩略语	11
4	高压设计考虑因素	13
4.1	环境	13
4.1.1	环境影响	13
4.1.2	压力	13
4.1.3	温度	15
4.1.4	高能离子辐射	16
4.1.5	空间碎片和微流星体	17
4.1.6	等离子	17
4.1.7	机械结构	18
4.2	电绝缘	18
4.2.1	绝缘分类	18
4.2.2	气体绝缘	18
4.2.3	液体绝缘	21
4.2.4	固体绝缘	21
4.2.5	真空绝缘	24
4.2.6	复合绝缘	25
4.3	寿命限制因素	25
4.3.1	概述	25
4.3.2	电击穿	26
4.3.3	局部放电	32
4.3.4	帕邢击穿	34

4.3.5	老化	36
4.4	典型应用	41
4.4.1	DC/DC 高压功率调节器	41
4.4.2	行波管放大器(TWTA)EPC	43
4.4.3	电推进器	49
4.4.4	微波管	56
4.4.5	科学仪器与实验	58
5	高压设计原理	60
5.1	基本设计原理	60
5.1.1	电压控制	60
5.1.2	电场强度控制	61
5.1.3	电场分布控制	70
5.1.4	绝缘特性控制	72
5.1.5	表面特性控制	75
5.1.6	局部放电控制	75
5.1.7	电晕效应控制	76
5.1.8	帕邢击穿控制	77
5.1.9	“三联结构”效应控制	79
5.1.10	爬电路径控制	80
5.1.11	表面充电控制	81
5.1.12	干扰控制	83
5.2	高压组件	85
5.2.1	固体绝缘(灌封模块)	85
5.2.2	其他固体绝缘	104
5.2.3	气体绝缘	107
5.2.4	液体绝缘(油)	111
5.2.5	空间真空绝缘	112
5.3	高压元件	119
5.3.1	变压器和电感器	119
5.3.2	电容器	122
5.3.3	电阻器	123
5.3.4	半导体	126
5.3.5	导线和电缆	127
5.3.6	连接器	131

5.3.7	相互连接	132
5.3.8	绝缘与衬垫	132
5.3.9	馈入装置	135
5.3.10	印制电路板	136
5.3.11	其他器件	138
6	高压试验	139
6.1	非破坏性试验	139
6.1.1	绝缘电阻测试	139
6.1.2	体电阻率测量	140
6.1.3	表面电阻率测量	140
6.1.4	极化与去极化电流测量	141
6.1.5	介质损耗因子测量	142
6.1.6	局部放电试验	142
6.1.7	介质耐压试验	147
6.1.8	三联区试验	148
6.1.9	临界气压试验/电晕试验	150
6.1.10	寿命试验	152
6.1.11	加速寿命试验	152
6.1.12	老练试验	153
6.2	破坏性试验	154
6.2.1	击穿电压试验	154
6.2.2	寿命评估试验	155
6.3	补充方法	156
6.4	试验策划	156
7	高压产品	159
7.1	材料和工艺最优选择方法	159
7.2	设计优化方法	161
7.3	鉴定优化方法	162
7.4	飞行验收优化方法	164
7.5	验证优化方法	165
7.6	工艺标识文件	166
7.7	评估计划	166
8	特殊问题	167
8.1	高压变换器	167

8.2	电推进器	169
8.2.1	负载特性的危险性	169
8.2.2	电推进器的电磁兼容	170
8.2.3	卫星构造特性	171
8.2.4	电推进器的组装、集成和试验问题	172
8.3	电子器件(电子管)	173
8.4	科学仪器与实验	173
8.5	EMC 事项	174
9	危险与安全	175
9.1	危险	175
9.2	安全	175
附录 A	高压电场计算	176
A.1	球形和圆柱形场效应系数原理	176
A.2	球形结构	176
A.3	圆柱结构	177
附录 B	最优实践	181
B.1	高压评估计划	181
B.1.1	评估活动	181
B.1.2	评估计划	181
B.1.3	评估样品的制造	181
B.1.4	试验和特性鉴定	182
B.1.5	评估评审	182
B.2	材料评估	182
B.3	工艺标识文件	185

1 范 围

本手册的指导原则是确保高压电子设备的可靠性设计、制造和验证测试,这些高压设备包括高压发生、传输和高压负载设备,如高压功率调节器和高压配电设备(电缆和连接器)。

本书适用于实现高压硬件及其接口的所有技术层级和团队。

本书致力于以下内容:

- (1) 总结高压绝缘方面的大多数相关特性和数据;
- (2) 提供高压设计指南;
- (3) 提供高压电子设备设计指南;
- (4) 高压测试方法综述;
- (5) 确立一系列有关制定设计、验证规则与方法方面的建议;
- (6) 给出最优方法。

本书主要适用于功率调节器,除了实验项目外,也适用于其他用于空间任务中的高压电动和电功率设备。

2 参 考 文 献

- ECSS - S - ST - 00 - 01C ECSS System - Glossary of terms
- ECSS - E - ST - 10 - 03C Space engineering - Testing
- ECSS - E - ST - 10 - 02C Space engineering - Verification
- ECSS - E - ST - 10 - 04C Space engineering - Space environment
- ECSS - E - ST - 20C Space engineering - Electrical and electronic
- ECSS - E - 20 - 01A Space engineering - Multipaction design and test
- ECSS - E - ST - 20 - 06C Space engineering - Spacecraft charging
- ECSS - E - ST - 32C Space engineering - Structural general requirements
- ECSS - Q - ST - 30 - 11C Space product assurance - Derating - EEE components
- ECSS - Q - ST - 70 - 10C Space product assurance - Qualification of printed circuit boards
- ECSS - Q - ST - 70 - 11C Space product assurance - Procurement of printed circuit boards
- ECSS - Q - 70 - 71A Space product assurance - Data for selection of space materials and processes
- ESA SP - 398
(May 1997) Power supply and control unit (PCSU) for radio frequency ion thrusters (RIT)" ESA, Proc. 2nd European Spacecraft Propulsion, Noordwijk, The Netherlands, 27 - 29 May 1997 (ESA SP - 398), pp643 - 648.
- ESA SP - 555
(June 2004) The Power Control Unit for the Propulsion Engine of GOCE Program, Tato, C. ; Palencia, J. ; De la Cruz, F. , 4th International Spacecraft Propulsion Conference, 2 - 4 June 2004 Chia Laguna (Cagliari), Sardinia, Italy

- ESA SP – 569
(June 2004) The T5 Ion Propulsion Assembly for Drag Compensation on GOCE, Proceedings of the Second International GOCE User Workshop
- AIAA 2005 – 4224 (2005) First Test Results of the 1 to 15 kW Coaxial HEMP 30250 Thruster, 41st AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, 10 – 13 July 2005, Tucson, Arizona
- AIAA 2006 – 4476 (2006) High Power HEMP – Thruster Module, Status and Results of a DLR and ESA Development Program, 42nd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, 9 – 12 July 2006, Sacramento, California
- AIAA 2006 – 4825 (2006) Micro – Newton Electric Propulsion Subsystems for Ultra – Stable Platforms, 42nd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, 9 – 12 July 2006, Sacramento, California
- AIAA 2006 – 5172 (2006) Theoretical Study of the Breathing Mode in Hall Thrusters, 42nd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, 9 – 12 July 2006, Sacramento, California
- AIAA 2007 – 5215
(2007) Generic High Voltage Power Supply – Next Generation, 43rd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, 8 – 11 July 2007, Cincinnati, OH
- AIAA 2007 – 5250
(2007) RIT – μ X – High Precision Micro Ion Propulsion System based on RF – Technology, 43rd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, 8 – 11 July 2007, Cincinnati, OH
- AIAA 2008 – 4632 (2008) A model for the active control of low frequency oscillations in Hall thrusters, 44th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, 21 – 23 July 2008, Hartford, CT
- ASTM – D – 150
(2011) Standard Test Methods for AC Loss : Characteristics and Permittivity (Dielectric Constant) of Solid Electrical Insulation

ASTM D - 2214 (2002)	Standard Test Method for Estimating the Thermal Conductivity of Leather with the Cenco - Fitch Apparatus
ASTM - D - 2240 (2010)	Standard Test Method for Rubber Property: Durometer Hardness
ASTM - D - 638 (2010)	Standard Test Method for Tensile Properties: of Plastics
ASTM - D - 695 (2010)	Standard Test Method for Compressive: Properties of Rigid Plastics
ASTM - D - 794 (1993)	Practice for Determining Permanent Effect of Heat on Plastics
ASTM - E831 (2006)	Standard Test Method for Linear Thermal Expansion of Solid Materials by Thermomechanical Analysis
Cygan P and Loghari J R (October 1990)	Models for insulation aging under electrical and thermal multistress, IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol 25, pg. 923 -934
ESCC 3001 (October 2002)	Capacitors, Fixed, Ceramic Dielectric: Types I and II, Generic Specification
ESCC 3006 (October 2002)	Capacitors, Fixed, Film, Dielectric: Generic Specification
ESCC 3901 (October 2002)	Wires and Cable, Electrical, 600V: Low Frequency, Generic Specification
E. Bourguignon, T. Scalais, J. Thomas (June 2004)	High Power Processing Unit for Stationary Plasma Thruster, Journal: Proc. 4th International Spacecraft Propulsion Conference (ESA SP - 555). 2 - 4 June, 2004, Chia Laguna (Cagliari), Sardinia, Italy. p. 65. 1 ff
F. Boer (2004)	BN100 filler technology, ARTHE Engineering Solutions S. R. L. , 2004
GSFC - S - 311 - P - 796C (April 2007)	Resistors, "Matched - Pair", Low TC, Precision, RadialLead (Caddock Type TK)

- IEC 60216 – 1 ed5. 0
(July 2007)
- J. C. Halpin (1985)
- J. P. Crine
(October 2002)
- J. L. Parpal, J. P. Crine,
C. Dan
(April 1997)
- L. Ceruti, M. Magnifico
(May 2005)
- MIL – PRF – 19500P
(October 2010)
- MIL – R – 39008C
(August 1990)
- NASA – STD – 8739. 4
(March 2011)
- R. V. Latham
(1996)
- T. W. Dakin
(January 1948)
- Electrical insulating materials – Properties of thermal endurance, Part 1: Ageing procedures and evaluation of test results
- AVIP Air Force thrust for reliability”, Institute of Environmental Sciences, Annual Technical Meeting, 31st, Las Vegas, NV, April 30 – May 2, 1985, Proceedings (A86 – 23001 09 – 38). Mount Prospect, IL, Institute of Environmental Sciences, 1985, p. 206 – 218
- Ageing and Polarization Phenomena in PE under High Electrical fields,
IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 9, No. 5, pp. 697 – 703
- Electrical Ageing of Extruded Dielectric Cables,
IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 4, No. 2, pp. 197 – 209, 1997
- Power Control Unit for μ N Propulsion Subsystem,
Proc. Seventh European Space Power Conference, Stresa, Italy, 9 – 13 May 2005, Proceeding ESA SP – 589
- Performance Specification: Semiconductor Devices, general specification for
- Military Specification: Resistor, Fixed, Composition (Insulated), established reliability, general specification
- Crimping, interconnecting cables, harnesses, and wiring (Baseline w/ Change 6)
- High Voltage Vacuum Insulation, Academic Press, London, San Diego, 1996, Section 8
- Electrical Insulation Deterioration Treated as Chemical Rate Phenomenon, AIEE Transactions, Vol. 67, pp. 113 – 122.

T. W. Dakin
(1960)

Electrical Insulation Deterioration, Electrotechnology,
Vol. 3, pp. 129 - 13.

ESA contract 18697/04/
NL/MV
(July 2005)

Quick maintenance for high voltage equipment with the
new not toxic boron nitride powder (BN100) superior
thermal conductive and lightweight filler