



国防科技图书出版基金

Space Cryogenic
Technology and Application

空间低温 技术与应用

李鸿勋 编著



国防工业出版社
National Defense Industry Press



国防科技图书出版基金

空间低温技术与应用

Space Cryogenic Technology and Application

李鸿勋 编著

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

空间低温技术与应用/李鸿勋编著. —北京:国防工业出版社, 2019. 1

ISBN 978 - 7 - 118 - 11775 - 2

I. ①空… II. ①李… III. ①航天 - 低温技术 IV. ①V419

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 292466 号

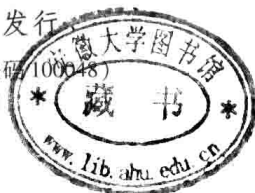
※

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 23 1/4 字数 403 千字

2019 年 1 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 120.00 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

致 读 者

本书由中央军委装备发展部**国防科技图书出版基金**资助出版。

为了促进国防科技和武器装备发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。这是一项具有深远意义的创举。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。
4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在中央军委装备发展部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由中央军委装备发展部国防工业出版社出版发行。

国防科技和武器装备发展已经取得了举世瞩目的成就,国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。开展好评审工作,使有限的基金发挥出巨大的效能,需要不断摸索、认真总结和及时改进,更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金
评审委员会

国防科技图书出版基金

第七届评审委员会组成人员

主任委员 潘银喜

副主任委员 吴有生 傅兴男 赵伯桥

秘书长 赵伯桥

副秘书长 许西安 谢晓阳

委员 (按姓氏笔画排序)

才鸿年 马伟明 王小谟 王群书

甘茂治 甘晓华 卢秉恒 巩水利

刘泽金 孙秀冬 芮筱亭 李言荣

李德仁 李德毅 杨伟 肖志力

吴宏鑫 张文栋 张信威 陆军

陈良惠 房建成 赵万生 赵凤起

郭云飞 唐志共 陶西平 韩祖南

傅惠民 魏炳波

前 言

现代尖端科学技术的相互渗透和融合极大地丰富了航天技术的内涵,而几十年来航天技术的发展又促进了现代科技的发展,甚至形成了新的学科,空间低温技术就是由此产生的新学科。与之相关的空间低温制冷技术、空间环境模拟低温技术、空间低温探测器及低温光学系统等技术的发展,极大地提升了航天器的应用范围,促进了航天技术的快速发展,使航天器在空间天文学、空间物理学、地球观测、气象卫星、卫星通信、火星探测和弹道导弹防御系统等方面发挥了重要作用。

本书是作者在综合消化了大量国内外科技文献的基础上,总结了自己多年从事低温科学技术研究的经验撰著而成。首先,为了说明空间环境模拟低温技术的重要性,简单介绍了空间环境和空间环境效应,特别强调了空间低温环境、空间真空环境及在空间环境下的自污染环境对航天器及其部件(包括空间制冷器和低温探测器)可靠性的影响。继而系统地深入论述了空间环境模拟中及应用于航天器上的各种制冷器、低温探测器的基本原理、结构和设计。全面阐述和列举了空间制冷器和低温探测器在低温电子学和通信技术、地球观测和气象卫星、空间天文学、空间态势感知能力、大型超导磁体和空间长期制冷剂储存技术等的应用。最后,阐述空间环境模拟技术,详细介绍了用于探测器试验的几种专用空间环境模拟器、用于模拟空间低温环境的液氮系统、用于模拟空间真空环境的内装式低温泵和外接式低温泵及其相应的低温制冷机。

全书共有六章,第1章绪论,第2章空间环境和空间环境效应,第3章空间制冷器,第4章低温探测器,第5章低温技术在空间科学技术中的应用,第6章空间环境模拟。

本书出版得到了西安交通大学陈纯正教授、冯全科教授、北京航空航天大学王浚院士、中国科学院物理化学研究所杨文治研究员和北京卫星环境工程研究所童靖宇研究员的支持和帮助,并得到了王政红、李佳惠、李佳鹏的关心和帮助,在此表示衷心的感谢!

本书内容来自作者多年从事低温工作的经验,并取自国内外科学技术文献,本书既注重低温技术中的系统知识,又反映了国内外空间低温技术与应用的最新技术和成果,具有很强的针对性和实用性。本书可供有关科技人员和使用单位工程技术人员参考,并可作为高等院校有关专业本科生和研究生参考书。

由于作者水平有限,书中错误和缺点在所难免,欢迎广大读者批评指正。

编著者

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 概述	1
1.2 空间低温技术与应用的研究范围	2
1.2.1 空间制冷器	2
1.2.2 低温探测器及其在空间的应用	3
1.2.3 空间制冷器和低温探测器的可靠性和试验	3
1.2.4 空间环境模拟低温技术	3
1.2.5 空间低温技术在空间的应用	4
1.3 空间低温技术的发展展望	5
第 2 章 空间环境和空间环境效应	12
2.1 概述	12
2.2 空间环境和航天器轨道的分类	12
2.2.1 空间环境分类	12
2.2.2 航天器轨道及其空间环境	13
2.3 太阳电磁辐射环境及其对航天器的影响	14
2.3.1 太阳电磁辐射环境	14
2.3.2 太阳电磁辐射环境对航天器的影响	15
2.4 空间离子辐射环境及其对航天器的影响	16
2.4.1 空间离子辐射环境	16
2.4.2 空间离子辐射环境对航天器的影响	18
2.4.3 从太阳辐射的不同类别能量的比较	20
2.5 地球中性热大气层和原子氧环境及其对航天器的影响	20
2.5.1 地球中性热大气层和原子氧环境	20
2.5.2 地球中性热大气层和原子氧环境对航天器的影响	22
2.6 地球电离层和地磁场环境及其对航天器的影响	23
2.6.1 电离层环境	23
2.6.2 地磁场环境	24

2.6.3	地球电离层和地磁场环境对航天器的影响	24
2.7	空间真空和冷黑环境及其对航天器的影响	25
2.7.1	真空和冷黑环境	25
2.7.2	空间真空和冷黑环境对航天器的影响	26
2.8	微流星和空间碎片环境及其对航天器的影响	28
2.8.1	微流星和空间碎片环境	28
2.8.2	微流星和空间碎片环境对航天器的影响	28
2.9	航天器充电和空间辐射对电子设备的影响	29
2.10	空间环境和污染对光学器件的影响	30
2.10.1	空间环境对光学器件及其涂层的影响	30
2.10.2	污染对光学器件及其涂层的影响	33
2.11	光学仪器及其器件的污染控制技术	36
2.11.1	污染控制技术的几个基本要点	36
2.11.2	低温光学仪器和空基激光仪器污染控制技术	38
2.12	空间环境污染对空间制冷器的影响	46
2.12.1	污染对辐射制冷器的影响及污染控制	47
2.12.2	污染对空间机械制冷器的影响及污染控制	49
第3章	空间制冷器	54
3.1	概述	54
3.2	固体制冷器	54
3.2.1	固体制冷器工作原理和工作温度范围	54
3.2.2	固体制冷器的特性和设计原理	56
3.2.3	固体氢低温恒温器	58
3.3	辐射制冷器	61
3.3.1	概述	61
3.3.2	辐射制冷器热平衡	62
3.3.3	航天器轨道的考虑	63
3.3.4	辐射制冷器的初步设计和分析	63
3.3.5	辐射制冷器的热力学特性	69
3.3.6	地球同步静止轨道卫星上的三级辐射 制冷器结构和热设计	72
3.4	脉管制冷器	74
3.4.1	脉管制冷器的热力学循环	75
3.4.2	脉管制冷器的分析模型	76
3.4.3	脉管制冷器的几种形式	77

3.4.4	空间应用的脉管制冷器	78
3.5	焦尔-汤姆逊(JT)制冷器	79
3.5.1	封闭循环焦尔-汤姆逊(JT)制冷器	79
3.5.2	开式循环焦尔-汤姆逊(JT)制冷器	82
3.6	吸附制冷器	86
3.6.1	吸附制冷器的工作和循环原理	86
3.6.2	吸附制冷器的设计	88
3.6.3	两种吸附制冷器简介	91
3.7	磁制冷机	94
3.7.1	绝热去磁制冷原理和制冷循环	94
3.7.2	核磁性及核去磁制冷设备	97
3.7.3	磁制冷机低温恒温器	99
3.7.4	连续的绝热去磁制冷机	103
3.8	稀释制冷机	104
3.8.1	稀释制冷原理	104
3.8.2	稀释制冷机的设计	106
3.8.3	稀释制冷机的主要部件	113
3.9	斯特林循环制冷机	115
3.10	新型固态微型制冷器	117
3.11	空间制冷器可靠性设计和试验	120
3.11.1	概述	120
3.11.2	空间低温系统和制冷器的可靠性和冗余设计	120
3.11.3	空间制冷器加速寿命试验和可靠性评估的方法	129
第4章	低温探测器	134
4.1	概述	134
4.2	低温光子红外探测器	136
4.2.1	概述	136
4.2.2	低温光子红外探测器技术的发展历程	138
4.2.3	几种用于空间的低温光子红外探测器	139
4.2.4	低温红外焦平面阵列	146
4.3	新一代光子探测器	150
4.3.1	概述	150
4.3.2	超导隧道结	151
4.3.3	跃迁边界传感器和跃迁边界传感器微量热量计	154
4.3.4	超导量子干涉器件	158

4.4	低温探测器在空间科学的应用	162
4.4.1	低温探测器在天文学的应用	162
4.4.2	低温探测器在低温电子设备的应用	165
4.4.3	用于空间望远镜的低温探测器	166
4.5	用于军事领域的低温探测器	168
4.5.1	几种军用低温探测器介绍	168
4.5.2	红外跟踪系统和红外搜索系统工作原理	171
4.5.3	用于弹道导弹防御系统的低温探测器	173
4.6	空间制冷器与低温探测器的耦合技术	177
4.7	低温光学系统	179
4.7.1	低温光学系统和低温冷却系统的配置	179
4.7.2	低温光学系统的热设计	185
第5章	低温技术在空间科学技术中的应用	187
5.1	低温技术在低温电子学和通信中的应用	187
5.1.1	低温技术在低温电子学中的应用	187
5.1.2	低温技术在空间通信中的应用	191
5.2	低温技术在地球观测和气象卫星上的应用	195
5.2.1	低温技术在地球观测中的应用	195
5.2.2	低温技术在气象卫星上的应用	200
5.3	低温技术在空间天文学的应用	204
5.3.1	低温技术在下一代空间望远镜的应用	204
5.3.2	用于詹姆斯·韦伯太空望远镜的低温系统	208
5.3.3	用于宇宙论和天体物理学空间望远镜的低温系统	212
5.3.4	低温技术在红外线天文卫星的应用	218
5.3.5	用于欧洲航天局下一代X射线天文台的低温系统	222
5.3.6	用于X射线天文卫星的低温系统	227
5.4	低温技术在空间态势感知能力和弹道导弹防御系统的应用	236
5.4.1	概述	236
5.4.2	用于天基红外系统的低温冷却系统	237
5.5	大型超导磁体低温冷却技术	240
5.6	用于载人空间站系统和火星探测任务中的低温技术	242
5.6.1	载人空间站系统的低温技术	242
5.6.2	用于火星探测任务中的低温技术	244
5.6.3	空间探测中制冷剂现场生产设备的设计和分析	245
5.7	低温制冷剂长期贮存技术	250

5.7.1	低温制冷剂零汽化贮存技术	250
5.7.2	低温推进剂汽化减少系统	255
5.7.3	航天飞机推进剂的零汽化贮存	258
5.7.4	低温推进剂零汽化贮存的冷却系统	260
第6章	空间环境模拟	263
6.1	概述	263
6.2	几种专用空间环境模拟器	264
6.2.1	低温传感器系统试验设备	264
6.2.2	用于量子阱红外探测器的试验装置	271
6.2.3	用于中红外仪器试验的低温空间模拟器	272
6.2.4	辐射热测量计的试验装置	274
6.3	液氮系统	278
6.3.1	液氮系统的几种形式	278
6.3.2	重力输送自循环液氮系统	281
6.3.3	KM6 载人航天器空间环境模拟器液氮系统	293
6.3.4	两相流管路压降计算	295
6.4	用于空间真空环境模拟的内装式低温泵	301
6.4.1	空间环境模拟器真空抽气系统	301
6.4.2	内装式低温泵结构形式的选择	305
6.4.3	内装式低温泵的抽速	308
6.4.4	低温泵的热负荷	312
6.4.5	内装式低温泵氨制冷机	314
6.4.6	氨制冷机和氨液化器的纯化系统	316
6.4.7	氨制冷机和氨液化器工艺流程的压力控制	322
6.4.8	KM6 载人航天器空间环境模拟器氨制冷机	325
6.5	用于空间真空环境模拟器的外接式低温泵	329
6.5.1	吉福特—麦克马洪制冷机	329
6.5.2	外接式低温泵的设计	334
6.5.3	制冷机低温泵的制冷功率和降温时间估算	341
参考文献		345

Contents

Chapter1	Introduction	1
1.1	Summary	1
1.2	Research range of space cryogenic technology and application	2
1.2.1	Space cryocoolers	2
1.2.2	Cryogenic detector and its application in space	3
1.2.3	Reliability and testing of space cryocoolers and cryocoolers	3
1.2.4	Space environment simulation cryogenic technology	3
1.2.5	The application of space cryogenic technology in space	4
1.3	The development prospect of cryogenic technology in space	5
Chapter2	Space environment and space environmental effect	12
2.1	Introduction	12
2.2	Classification of space environment and spacecraft orbit	12
2.2.1	Classification of space environment	12
2.2.2	Spacecraft orbit and its environment in space	13
2.3	Solar electromagnetic radiation environment and its effect on spacecraft	14
2.3.1	Solar electromagnetic radiation environment	14
2.3.2	The effect of solar electromagnetic radiation environment on spacecraft	15
2.4	Space ionizing radiation environment and its effect on spacecraft	16
2.4.1	Space ionizing radiation environment	16
2.4.2	The effect of space ionizing radiation environment on spacecraft	18

2. 4. 3	Comparison of different types of energy emitted from the sun	20
2. 5	Neutral thermosphere and atomic oxygen environment and its effect on spacecraft	20
2. 5. 1	Neutral thermosphere and atomic oxygen environment	20
2. 5. 2	The effect of neutral thermosphere and atomic oxygen environment on spacecraft	22
2. 6	Ionosphere and geomagnetic field environment and its effect on spacecraft	23
2. 6. 1	Ionosphere environment	23
2. 6. 2	Geomagnetic field environment	24
2. 6. 3	The effect of ionosphere and geomagnetic field environment on spacecraft	24
2. 7	Vacuum and cold black environment and its effect on spacecraft	25
2. 7. 1	Vacuum and cold black environment	25
2. 7. 2	The effect of vacuum and cold black environment on spacecraft	26
2. 8	Micrometeoroids and orbital debris environment and its effect on spacecraft	28
2. 8. 1	Micrometeoroids and orbital debris environment	28
2. 8. 2	The effect of micrometeoroids and orbital debris environment on spacecraft	28
2. 9	The effect of spacecraft charging and space radiation on electronic equipment	29
2. 10	The effect of the space environment and contamination on optical devices	30
2. 10. 1	The effect of the space environment on optical devices and optical coatings	30
2. 10. 2	The effect of contamination on optical devices and optical coatings	33
2. 11	Contamination control technology of optical instruments and its devices	36
2. 11. 1	Several basic main points of contamination control technology	36

2. 11. 2	Contamination control technology of cryogenic optical instruments and space-based laser instruments	38
2. 12	The effect of space environmental contamination on cryocoolers	46
2. 12. 1	The effect of contamination on radiant coolers	47
2. 12. 2	The effect of contamination on mechanical cryocoolers	49
Chapter3	Space cryocoolers	54
3. 1	Introduction	54
3. 2	Solid cryocoolers	54
3. 2. 1	Working principle and operating temperature range of solid coolers	54
3. 2. 2	Characterization and design principle of solid coolers	56
3. 2. 3	solid hydrogen cryostat	58
3. 3	Radiant coolers	61
3. 3. 1	Introduction	61
3. 3. 2	Radiant coolers thermal balance	62
3. 3. 3	Consideration of spacecraft orbit	63
3. 3. 4	Preliminary design and analysis of radiant coolers	63
3. 3. 5	Thermodynamic characterization of radiant coolers	69
3. 3. 6	Structure and thermal design of three-stage radiant cooler used for geosynchronous geostationary orbit satellite	72
3. 4	Pulse tube cryocoolers	74
3. 4. 1	Pulse tube cryocooler thermodynamic cycle	75
3. 4. 2	Analytical model of pulse tube cryocoolers	76
3. 4. 3	Several forms of pulse tube cryocoolers	77
3. 4. 4	Pulse tube cryocoolers for space application	78
3. 5	Joule-Thomson(JT) cryocoolers	79
3. 5. 1	Closed-cycle Joule-Thomson(JT) Cryocoolers	79
3. 5. 2	Open-cycle Joule-Thomson(JT) Cryocoolers	82
3. 6	Sorption coolers	86
3. 6. 1	Working and cycle principle of sorption coolers	86
3. 6. 2	Design of sorption coolers	88

3. 6. 3	Breif introduction of two kinds of sorption cryocoolers	91
3. 7	Magnetic refrigerators	94
3. 7. 1	Adiabatic demagnetization ref rigeration principle and the refrigeration cycle	94
3. 7. 2	Nuclear magnetism and adiabatic demagnetization refrigeration equipment	97
3. 7. 3	Magnetic refrigerator cryostat	99
3. 7. 4	Continuously adiabatic demagnetization refrigerators	103
3. 8	Dilution refrigerators	104
3. 8. 1	Dilution refrigeration principle	104
3. 8. 2	Design of dilution refrigerators	106
3. 8. 3	Main components of dilution refrigerators	113
3. 9	Stirling cycle refrigerators	115
3. 10	Introduction of new type solid-state microcryocoolers	117
3. 11	Reliability design and testing of space cryocoolers	120
3. 11. 1	Introduction	120
3. 11. 2	Reliability and redundancy design of space cryogenic system and cryocoolers	120
3. 11. 3	Accelerated life testing and reliability assessment method of space cryocoolers	129

Chapter4 Cryogenic detectors 134

4. 1	Introduction	134
4. 2	Cryogenic photon infrared detectors	136
4. 2. 1	Introduction	136
4. 2. 2	Historical review of the cryogenic photo infrared detector technology	138
4. 2. 3	Several kinds of cryogenic photo infrared detectors used in space application	139
4. 2. 4	Cryogenic infrared focal plane array	146
4. 3	New generation of photo detectors	150
4. 3. 1	Introduction	150
4. 3. 2	Super conducting tunnel junction	151
4. 3. 3	Transition edge sensors(TES)and TES microcalorimeter	154

4.3.4	Superconducting quantum interference device	158
4.4	The application of cryogenic detectors in space science	162
4.4.1	The application of cryogenic detectors in astronomy	162
4.4.2	The application of cryogenic detectors in cryo-electron devices	165
4.4.3	Cryogenic detectors used in space telescope	166
4.5	Space cryogenic detectors for use in military field	168
4.5.1	Introduction of several military cryogenic detectors	168
4.5.2	Working principle of infrared tracking system and infrared search system	171
4.5.3	Cryogenic detectors used in ballistic missile defense system	173
4.6	Coupling technology of space cryo coolers and cryogenic detectors	177
4.7	Cryogenic optical system	179
4.7.1	Configuration of optical system and cryogenic cooling sustem	179
4.7.2	Thermal design of opetical system	185

Chapter5	The application of cryogenic technology in space science and technology	187
5.1	The application of cryogenic technology in cryogenic electronics and communications	187
5.1.1	The application of cryogenic technology in cryogenic electronics	187
5.1.2	The application of cryogenic technology in space communications	191
5.2	The application of cryogenic technology in earth observation and meteorological satellites	195
5.2.1	The application of cryogenic technology in earth observation	195
5.2.2	The application of cryogenic technology in meteorological	200
5.3	The application of cryogenic technology in space astronomy	204

5.3.1	The application of cryogenic technology in next generation space telescope	204
5.3.2	Cryogenic system used in James. webb space telescope	208
5.3.3	Cryogenic system used in Cosmologies and astrophysics	212
5.3.4	The application of cryogenic technology in infrared astronomical satellite	218
5.3.5	Cryogenic system used in next generation x-ray observatory of ESA	222
5.3.6	Cryogenic system used in x-ray astronomical satellite	227
5.4	The application of cryogenic technology in space situational awareness capabilities and ballistic missiles defense system	236
5.4.1	Introduction	236
5.4.2	Cryogenic cooling system used in space-based infrared system	237
5.5	Cryogenically cooled technology of large superconducting magnet	240
5.6	Cryogenic technology used in manned space station system and Mars exploration mission	242
5.6.1	Cryogenic technology of manned space station system	242
5.6.2	Cryogenic technology used in Mars exploration mission	244
5.6.3	Design and analysis of refrigerant on-site production equipment in space exploration	245
5.7	Cryogenic cryogen long-term storage technology	250
5.7.1	Zero boil-off storage technology of cryogenic cryogen	250
5.7.2	Cryogenic propellant boil-off reduction system	255
5.7.3	Zero boil-off storage of space shuttle propellant	258
5.7.4	Cooling system of cryogenic propellant zero boil-off storage	260

Chapter6 Space environment simulation 263

6.1	Introduction	263
-----	--------------------	-----