

中国宇航学会·中国空间法学会 2015年学术年会论文集 (下)



中国宇航学会

主编



中国空间法学会



中国宇航出版社

中国宇航学会·中国空间法学会 2015 年学术年会论文集 (下)

中国宇航学会 主编
中国空间法学会



中国宇航出版社

·北京·

版权所有 侵权必究

图书在版编目（CIP）数据

中国宇航学会·中国空间法学会2015年学术年会论文集 / 中国宇航学会·中国空间法学会主编. — 北京 : 中国宇航出版社, 2016. 2
ISBN 978-7-5159-1026-0

I. ①中… II. ①中… III. ①航天科技—学术会议—文集②空间法—学术会议—文集 IV. ①V4-53②D999. 1-53

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第293167号

责任编辑 赵宏颖
责任校对 祝延萍 装帧设计 宇星文化

出版 中国宇航出版社

社址	北京市阜成路8号	邮编	100830	版次	2016年2月第1版
	(010)60286808		(010)68768548		2016年2月第1次印刷
网址	www.caphbook.com			规格	787×1092
经销	新华书店			开本	1/16
发行部	(010)60286888	(010)68371900		印张	78.25
	(010)60286887	(010)60286804(传真)		字数	2400千字
零售店	读者服务部			书号	ISBN 978-7-5159-1026-0
	(010)68371105			定价	188.00元
承印	中国宇航出版有限责任公司			本书如有印装质量问题, 可与发行部联系调换	

目 录

航天器系统、航天器结构

小天体环绕至着陆飞行策略研究	董 捷 孟林智 赵 洋/3
考虑灵敏度指标的天基反航母武器再入轨迹优化	冯东东 韩艳铎/14
从空间站的应用情况看物资下行飞行器的需求	
..... 郝扣安 王 欣 励吉鸿 杨剑峰 孟 瑶 王蔡健/22	
飞行器空间布局优化设计研究综述	郝思思 廖选平 张海瑞 洪东跑/28
空间机械臂 3K 行星轮系回差的灵敏度分析	李德伦 刘雅芳 王 康/35
解锁同步性对点式分离的影响性研究	李 庆 杜三虎 王 萌/41
基于行为方式的挠性飞行器族群姿态协同控制方法	梁海朝 王剑颖 王永海 尹 含 水涌涛/52
一种准零刚度支承装置静态特性分析	刘海平 黎 彪 史文华 杨建中/63
航天器真空热试验极高外热流模拟试验方法	柳晓宁 王奕荣 王 晶 李振伟 纪欣言/70
一种空间机械臂冗余数及最优构型的确定方法	刘先灿 罗 敏 辛振芳 李智卿/80
密封舱内压力变化对舱表设备指向精度影响研究	刘 欣 王晓姝/88
航天器高精度压力传感器温度补偿研究	龙 军 关 威 付新菊 陈 君 魏延明/95
用于无码多普勒定轨的锁相环设计	卢 欢 郁 丰 刘 莹 朱海微/102
弹性元件驱动单层构架式可展结构基频分析及测试	马 罡 吴明儿 关富玲/108
高精度轨道摄动解算法研究	马越辰 徐 明 徐世杰/114
巡视器姿态测量误差对指向精度的影响分析	彭 松 贾 阳 申振荣/122
一种新型柔性绳式压紧释放机构的研制	彭志龙 崔琦峰/128
面向空间运营的空天飞行器通用任务规划框架设计构想	
..... 宋子阳 周丘实 王 恽 秦筱械 王 泓/134	
微重下贮箱液固耦合动特性分析	孙千秋 李道奎 李家文/146
适用于耦合响应分析的动量轮动力学建模方法研究	王泽宇 邹元杰 庞世伟 王光远/154
应用于高速飞行器的闭式布雷顿能量管理研究	于 鹏 邵文清 宋月娥 汪 颖/166
舱内设备对流辐射耦合换热数值模拟及实验研究	余 群 王领华 吕建伟/173
幅频起伏特性对星地数据传输系统的影响研究及指标分析	张兰兰 赵 宁 明 建 王 海/179
基于 MSC 有限元软件的航天器电子设备结构力学分析	章 敏 曹文斌/187
弹性元件驱动单层构架式可展结构展开分析及测试	张天昊 吴明儿 关富玲/193
弹性元件驱动单层构架式可展结构平面度分析及测试	张振昌 吴明儿 关富玲/203

航天动力学

大型桁架式卫星用双组元 750N 轨控发动机设计及试验验证	陈夏超	赵 婷/211
上面级轨道转移段参数在轨辨识算法研究	李海燕 金 磊	王召辉/218
实验气体差异性对火星探测器模型气动特性影响	李海燕	罗万清/225
基于双梁模型的航天器飞行载荷分析		李厚国/237
返回舱气动外形对飞行稳定性的影响研究	马林静 阎 超 周丹杰	张元静/244
半分析方法在不同类型轨道 100 年尺度长期预报中的适用性	王大为	汤靖师/251
跨声速热线/热膜风速仪气动加热数值研究	夏子龙 王锁芳 张建超	张天宏 韦青燕/258
考虑根铰间隙的空间柔性太阳电池阵展开机构动力学分析	杨淑利	邵立民/265
Kriging 模型在气动建模应用中的综述	余秀伟 罗文彩	马 洋/279
任意构型空间站在轨期间气动力矩计算	张君静 徐世杰	贾英宏/286
对空间目标定位的双星轨道优化设计与仿真	张 宇	曾国强/296
小型部分进气亚声速涡轮气动设计和流场分析	郑晓宇 林奇燕 王 磊	王雪纯/305
基于 DSMC 模拟的稀薄气体动力学仿真	朱华光 付继伟 沈敦亮 龙 梁	彭 勇/312

航天推进系统、运载系统

电推进系统氙气物理特性研究	陈 涛 刘国西 武葱茏 宋 飞	张阿莉/319
新型运载火箭首飞测试发射研究	何 庆 杜光华	张晓东/325
液氧甲烷姿控发动机燃烧与传热特性仿真研究	洪 燕 李清廉 张家奇	沈赤兵/336
变质量推进模块的安装设计与验证	李传吟 吴金花 李立春 曹俊生 冯 宇	查学雷/349
添加含能物质的高能量密度新型燃料研究	李智欣 汤龙生	邵文清/355
核热火箭发动机方案及性能分析	马 元 朱 岩 张蒙正	李光照/365
CZ-2F 运载火箭逃逸系统辅助入轨模式及性能研究	潘 刚 张 进	唐国金/377
不对称内角流道中流速限制问题研究及其在卫星板式表面张力贮箱中的应用		
.....	唐 宇 刘 洋 童 俊	386
丙烷脉冲爆震发动机激波汇聚起爆点火技术数值模拟		王 丹/395
核热推进系统概述	王 戈 李 永 梁军强 高 俊 周 成	405
燃烧不稳定过程非线性压力振荡特征及其产生机理研究		
.....	汪广旭 石晓波 刘占一 杨建文 周立新	412
火箭发动机推力室再生冷却通道一维稳态两相流建模仿真	王正凯 胡小平 于 萌	421
空间微重力 3D 打印材料初步方案设计及几点建议	张阿莉 陈 涛 齐 瑾	430
液氧甲烷小推力发动机点火与燃烧性能试验研究	张家奇 李清廉 沈赤兵	436
一种运载火箭并联贮箱推进剂消耗不均衡分析	张荣荣 任 枫 张 亮	442
燃烧室参数对 ADN 基推力器内燃烧过程的影响规律研究		
.....	张 涛 李国岫 陈 君 虞育松 王 梦	449
火箭发动机唇形密封圈的大变形接触分析	张相盟 李洪春	李正大/455

空间电子学

卫星通信网网络演化模型研究	陈治科	熊伟/465
基于 ARINC659 总线的星载综合电子系统设计	程博文 刘伟伟 于敏芳	朱剑冰/472
SAR 载荷小卫星供配电技术研究及在轨验证	贾晓冬 鄢婉娟 付雷	王文涛 张润宁/479
卫星高速实时数据采集处理的研究与实现	栾丽	崔伟光 姜大伟/487
抗辐射芯片全自动开发方法 (XASIC 系统)		
..... 夏冰冰 吴军 刘鸿瑾 孙强 刘波		吴一帆/493
全极化微波辐射计天线参数对 Stokes 矢量影响分析	邢妍	陈文新/500
立方体卫星智能化供配电技术研究	姚雨迎 苏蛟 巩巍	李龙飞 梁惠升/508
基于虚拟仪器的载人航天器硬件在环仿真系统研究	应鹏	刘武通 任亮/515
CCSDS 设备数据池业务在航天器综合电子系统中的设计与应用	詹盼盼 郭坚 何熊文	张红军 程博文/522
星球近地漂浮与地表滚动探测器设想与展望	赵志晖 薛博	李群智 饶炜/528
毫米波干涉仪尺寸误差对测角的影响与校准	踪念科 刘东	王登峰 钟兴旺/536

空间控制

基于三频观测数据的周跳探测和修复技术发展概述	陈玲玲	张立新/547
针对非合作目标的自主逼近策略设计	李嘉玮	徐明/554
扩频多目标测控防错锁方法研究	刘童岭	徐荣/567
冻结轨道的轨道控制方案与分析	曲庆渝	徐明 林名培/574
控制力矩陀螺的联合减振系统设计	田鹏	钟睿/581
基于混合执行机构的卫星双轴姿态机动控制研究	王煥杰	贾英宏/594
基于预测误差直方图移位的无损信息隐藏算法	王鹏	周詮/602
一种基于 OSGi 的卫星地面控制软件框架	王英强 韩威	陈浩一 刘焱/609
国外小卫星技术的发展		魏晨曦/615
空间绳系卫星弹射分离与偏置控制一体化机构设计与研究	吴江 尹立新 闵涛	赵治华/632
星载处理器技术综述	张晓	伍攀峰/643
基于神经网络的火星软着陆制导控制方法研究	周杰 刘付成	朱庆华 张树瑜/652

发射工程与地面设备、载人航天

载人火星探测空间辐射效应及其防护技术探讨	陈朝基 李鹏伟	陈丹/661
非均匀杂波分组背景中距离扩展目标的 GLRT 检测器		顾新锋/667
基于状态机的遥感卫星地面站接收任务流程设计	韩威 王英强 路宽	王怀/673
雷达光学引导视差动态修正算法研究	李耀伟	张琦/681
空间飞行器低冲击对接系统密封关键技术研究	廖传军 王洪锐 方红荣 刘荣 张翼 许光	张婷/687

空间站超大舱箭分离冲击减缓方案设计及试验验证	吴金花	胡迪科	刘国林	曹俊生	查学雷/695
某船载雷达发射机速调管放大器热设计	姚学露	王新荣	刘 帅/702		
改性活性炭对挥发性有机物的吸附作用研究	张 烨	王 江	李建冬/706		
近地空间站出发在轨巡查任务策略研究	赵 照	贺波勇	李海阳/711		
基于任务规划技术提升载人航天运营规划能力	郑 艺	孙 鑫	庄 剑	袁鸿翼/720	

材料与微重力科学、材料与工艺

同步集成法制备 CE alloy-AlSiC 双层复合材料	高明起	熊德贇	赵 恂	郭伟奢/729	
大尺寸高精度 C/SiC 复合材料反射器的研制与性能	李瑞珍	崔 红	方 毅	孙建涛/735	
基于自组织神经网络的复合材料板分布式光纤冲击判位方法研究	史 璐	曾 捷	王 博	孟 静	李彤桦
空间环境下弹性原件驱动单层构架式可展结构热分析	帖 拓	吴明儿	关富玲/747		
C/SiC 复合材料结构损伤声发射源有限元模拟	肖登红	高 勇	周小红	李乃田	全栋梁/756
树脂基吸波材料研究进展	张 雅	齐洪磊	刘宇翔	刘 丹	徐 鹏/763

空间应用

感应式磁悬浮动量球仿真与实验研究	陈安林	张 鸣	朱 煜/771		
二氧化硅凝胶的力学性能增强方法与航天应用	崔方明	朱小溪	张 雁	王鹏飞	孟 松/777
TDICCD 连续时钟驱动电路应用设计	韩志学	王 栋/787			
体系作战中的天基信息应用分析与研究	黄 蓓	张 涛	周国峰/792		
星载 MIMO-SAR 成像与动目标检测方法	雷利华	周 菊	张建东/798		
工业 4.0 背景下的先进数字化测量技术应用模式分析	李 昂	孙红霞/806			
氢原子钟可用度关键技术研究	李锡瑞	贺振华	杨 浩/810		
星间信号传播时延影响 KBR 测量性能研究	刘 玄	王登峰	钟兴旺	杨珊珊	刘 洋/814
一种适用于卫星信道的混合式自适应迭代均衡算法	鲁 帆/822				
星载激光器光学性能测试方法	孙琼阁	颜凡江	高 龙	李明山/830	
太赫兹技术与产品在空间探测中的应用与前景分析	尤 睿	宋江波/840			
敏捷遥感卫星新型几何定标方法	余 婧	贺 玮	张国斌/848		
红外点目标探测的时—空过采样方法研究	张文昱/854				
基于激光声的天基海洋探测	周 菊	张建东	雷利华/859		

空间科学

低轨道空间碎片清除任务分析与发展建议	陈晓光	肖余之/867			
模拟航天特因环境对大鼠情绪行为的影响	陈怡西	刘新民	王 琼/874		
月表取心钻进工艺对钻头切削热的影响分析及实验研究	郭 程	周 琴	何录忠	郑 超/880	
利用月球表面 UHF 链路的短基线角跟踪方法	韩月涛	杨志群	王春霞	张 浩	石宝民/889
国际天基空间碎片光学探测调研及技术分析	贺 玮	赵晨光	余 婧	张 强	程 侃/897

真空环境下两相羽流固体颗粒分布研究	李中华	李志辉	彭傲平	吴俊林/905
基于单步预测控制的 L2 点轨道保持方法	梁伟光	周文艳	周建亮	杨维廉/913
基于 GNSS-R 体制的空间碎片成像方法			蒙继东	尚 社/922
基于热控涂层测算天体表面辐射特性的研究	宋 馨	张有为	刘自军	马巨印/928
一种小鼠运动性疲劳模型的建立	谢 磊	刘新民	王 琮	/936
全向视觉技术在机器人领域的硬件平台设计			张晓玲	魏宗康/942
小行星着陆探测方式及着陆装置设计约束分析			赵志军	李德伦/948
月球的形成与演进的科学解说			钟萃相	/954

其 他

高超声速滑翔飞行器飞行特性分析	黄春华	梁彦刚/965			
大口径相机水平装调时的重力卸载方法	李 玲	赵 野/976			
自由曲面在大视场低畸变空间光学系统的应用研究	李 娜	黄 颖/981			
利用天基仪测角的目标机动检测方法		林 彦/989			
高超声速热化学非平衡流场电子温度模型的研究	罗仕超	柳 军/996			
带旋转太阳阵卫星在轨模态变化规律研究.....	吕 旺	向明江	朱海江/1005		
地基光电望远镜系统探测能力分析.....	王功长	曹梦霏	郭 刚	段俊杰	高海森/1012
高超声速飞行器临近空间雷达散射特性研究.....	王明亮	王伟东	刘佳琪	艾 夏	张生俊/1020
高超声速非平衡流多温度模型.....			王源杰	柳 军/1026	
航天测量船外测数据检测方法.....			杨鼎新	杜 鹏/1036	
粗精组合绝对式测角系统设计.....			杨玉良	刘会通/1040	
文献计量视角下的我国航天领域的国际合作现况与评述.....			姚大鹏	徐欣锋/1047	
面向批量化研制的航天器技术状态管理方法.....	赵 寒	魏 平	宋文龙	徐晨光/1055	
重力扰动引起 SINS/GPS 测姿系统误差分析与补偿			钟明飞	徐 荣	姜永刚/1062
双分辨率相机在深空探测天体成像中的应用.....	邹 昕	顾 征	王 彤	薛 博	陈丽平/1068

空间法律政策

国家“一带一路”战略对中国航天的需求分析	汪 夏 侯宇葵	罗钢桥/1079
论中国参与国际航天合作的出口管制问题.....	李 杜	1085
国际空间站项目国际合作的经验教训及启示.....	仝俊义	1091
国际航天合作法规建设及我国策略分析.....	王上月 张生俊 王 悦	刘佳琪/1096
俄罗斯航天工业现状、困境和改革.....	何奇松	1101
外层空间法的基本范畴及其互动性研究.....	江 河	1109
浅议外空软法的运行机制及其实践.....	聂晶晶	1121
论空间活动损害赔偿的法律机制.....	陈 露	蔡高强/1129
国家承担外空活动致损责任的法律分析——以 2015 年国际空间法模拟法庭案例为视角	童 丹	蔡高强/1138
浅析空间太阳能电站的若干法律问题.....	高 冀	侯欣宾/1149
太空环境利用育种惠益分享机制研究.....	朱金虎	1153

论全球卫星导航的国际法规制..... 蔡高强 陈 露 刘思阳/1164

论太空旅游的法律调整..... 郑哲皓/1176

论外空资源开发法律制度的构建..... 高 阳/1182

对外层空间专利制度相关问题的思考..... 吴健泽 杜 沙 莫志刚 赵听会/1189

中国航天国际合作知识产权保护探析..... 刘功奇 蔡高强/1194

我国航天法立法中的重点与难点问题研究..... 高国柱/1201

中国航天立法价值取向的若干影响因素——基于空间碎片的立法实践..... 韩剑峰/1206

各国航天活动管理机构比较及其对中国航天立法的启示..... 李晶珠/1211

中俄航天立法的比较研究..... 吕 瑱/1218

美国空间安全政策发展研究..... 许红英 曹秀云 张莉敏/1223

英国首部《国家空间安全政策》解读及启示 王邵飞/1231

欧盟《外空活动行为准则》与预防性自卫权浅论 尹玉海 颜永亮/1236

发射工程与地面设备、载人航天

载人火星探测空间辐射效应及其防护技术探讨

陈朝基¹ 李鹏伟² 陈丹¹

1 中国空间技术研究院载人航天总体部;

2 中国空间技术研究院宇航物资保障事业部

chaojichen@asee.buaa.edu.cn

摘 要 载人火星探测由于往返需要很长时间,空间辐射对航天器和航天员的影响十分突出。随着我国高可靠、长寿命载人航天器的发展,先进的空间辐射防护技术研究刻不容缓。本文基于对载人火星探测过程中空间辐射环境和效应的分析,以空间质子和重离子辐射效应为防护对象,概述了空间辐射防护的必要性,介绍了航天器防护和人员防护的国内外研究进展,重点讨论了航天器防护中的质量屏蔽技术、磁场屏蔽技术、等离子体膨胀磁场技术和空间辐射屏蔽材料技术,在此基础上提出了对我国未来载人航天器空间辐射防护的建议。

关键词 载人航天;火星探测;空间环境;辐射效应;辐射防护

1 引言

载人深空探测是未来航天活动的热点发展方向之一。火星是除月球之外载人深空探测的首选目标。世界航天大国都非常重视火星探测,美国、俄罗斯等对火星的探测已提出长远计划:NASA 提出在 21 世纪中期实现载人登陆火星,俄罗斯提出 2035 年以后进行载人探索火星。根据世界载人航天的发展趋势,预计 2040 年后主要航天国家将可能实现联合载人探索火星^[1]。我国目前已在深空无人探测领域积极进行探索活动,并圆满实现了探月工程第二阶段的目标,后续同样需要在载人火星探测方面提前开展相关技术研究。

在火星探测过程中,航天器穿越地球磁层后至少要在星际空间飞行 7 个多月^[2]才能到达火星轨道,航天员登陆火星表面后还要在那里工作数周或半年左右再返回地球。空间辐射是航天器和航天员面临的重要安全威胁,受到最多的辐射是太阳宇宙射线及银河宇宙射线,其主要成分是空间质子和重离子。辐射粒子的存在会引起航天器辐照损伤,导致在轨故障,甚至失效;同时会对航天员带来严重的健康问题甚至是死亡。因此必须采取有效的辐射防护措施,来降低辐射减小辐射粒子的危害。

本文基于对载人火星探测过程中空间辐射环境和效应的分析,概述了空间辐射防护的必要性,从航天器防护和人员防护两个方面介绍了空间辐射防护技术的国内外研究进展,在此基础上提出了对我国未来载人航天器空间辐射防护的建议。

2 载人火星探测空间辐射环境及其效应分析

火星探测所面临的空間辐射主要有两种,一种是来自外太空、长期稳定的银河宇宙射线(GCR),另外一种偶发的、高剂量的太阳宇宙射线(SCR)^[3]。银河宇宙射线来自于银河系,是由能量极高、通量极低的高能带电粒子组成,粒子的能量可以高达 10^{20} eV,平均粒子通量为 $2.5 \text{ Particles}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$,由于能量高、具有很强的贯穿能力,难以屏蔽;这种粒子的主要成分是质子(约占 85%)、 α 粒子(约占 13%)以及原子序数大于 2 元素的原子核(约 2%)。在原子序数大于 2 的原子核中,有一类称为高能重离子,不仅原子序数大,而且能量极高,在银河宇宙线中危害最大,它不仅能穿透飞船座舱的舱壁,而

且击中人体后能引起组织器官的严重损伤。太阳宇宙射线来自太阳耀斑爆发期间从太阳表面的活动区喷射出来的高能粒子，主要是能量约为 10 MeV 到 1 GeV 的质子，由于其绝大部分由质子构成故又常称为太阳质子事件（SPE）。太阳质子事件的发生和强度与太阳活动周期密切相关，平均周期为 11 年，在太阳活动高的年份，发生太阳质子事件的可能性较大^[4]。因此根据太阳活动周期，可对太阳质子事件作一定程度的预测。

这些辐射环境将会对航天器和航天员造成很大的危害。在长期深空辐射环境下，航天器敏感材料如光学材料、太阳电池、绝缘材料、密封材料的性能会发生严重的退化，进而导致光学性能、电学性能、绝缘性能和密封性能降低；电子元器件会发生总剂量效应和单粒子效应等。人类在进行深空探测时，尽管深空辐射环境将被防护材料所削弱，但航天员仍将受到来自空间质子和重离子的辐射，穿过防护材料的重离子将对细胞分裂带来重要的生物学效应，引起组织的物理损伤及杀死人体细胞或改变人体内的 DNA，进而造成人体细胞的破坏，降低了人的免疫能力，增加癌症的发病率^[5]。

国外一直非常重视火星空间辐射环境及其效应的探测研究。2001 年 4 月 NASA 发射的奥德赛号火星探测器（Mars Odyssey）所携带的探测装置 MARIE 对火星轨道辐射环境进行了为期 20 个月的探测，共探测到 12 次 SPEs，其中最后几次的 SPE 造成 MARIE 探测器停止工作，因此需要重点关注 SPE 对火星探测器的影响和危害。俄罗斯 N. V. Kuznetsov 等人利用俄罗斯建立的火星辐射预示模型，预示了火星探测 3 年任务期内不同铝材料屏蔽厚度下 GCR、SCR 的辐射剂量，计算中 SPE 产生的概率按 1% 考虑。通过计算可以看出，太阳宇宙射线产生的辐射远远大于银河宇宙射线的辐射，采用屏蔽的方法防护 GCR 辐射剂量效果不大，而防护 SCR 辐射剂量效果比较明显。这表明火星探测中太阳宇宙射线的辐射防护是基本要求，需重点对太阳粒子事件的辐射进行防护^[2]。

国内的科研机构对于载人火星探测空间辐射环境和辐射效应的研究，未见相关成果发表，亟需开展相关研究工作。

3 载人火星探测空间辐射防护必要性

3.1 空间辐射对航天器的危害

空间环境是诱发航天器在轨故障的主要因素之一，空间辐射可导致航天器或卫星中的探测器等电子设备失灵，可导致灾难性后果。对我国早期 6 颗地球静止轨道卫星的故障原因进行统计分析发现，由空间环境引起的故障占总故障的比例达到 40%^[6]。美国国家地球物理数据中心统计了 1971—1986 年 39 颗地球静止或准静止轨道卫星的在轨异常，结果表明在由空间环境引起的卫星故障中，空间辐射环境诱发故障的比例高达 70%^[7]。据国外相关组织机构统计数据显示 2001—2003 年国际上总共发射了 300 多颗卫星，平均每年约有 18 颗卫星损坏或出现了故障，其中 2003 年出现故障的在轨航天器为 24 个，在这些卫星在轨故障或异常中，空间辐射环境居各种故障因素之首^[8]。2012 年 1 月 31 日，俄罗斯“福布斯-土壤”火星探测器发射失败也是由于舱内计算机遭到宇宙辐射影响而失灵造成的。

随着航天技术的日益发展，新型材料、高性能新型电子元件和新技术越来越多地被应用，这些新材料、新元件对空间辐射效应会更加敏感，使得空间辐射环境诱发故障的可能性增加，空间辐射环境对航天器在轨长寿命、高可靠运行带来的危险将更加严峻。

3.2 空间辐射对航天员的危害

人类的航天员没经历过深空环境的辐射，即使是常年运转的国际空间站它的轨道也仅仅只在地球上空 400 km 处，而我们的地球球体通过低层大气的折射在宇宙射线到达国际空间站之前已经拦截掉了其中最具危险的三分之一粒子，还有三分之一则被地球磁场给反射掉了，仅仅只有很少部分的宇宙射线打到了人体的身上^[9]。报告指出，国际空间站女航天员工作 18 个月、男航天员工作 24 个月身体遭受的太空辐

射已超过生命承受极限，飞往月球的阿波罗号上航天员多年后都患上了白内障，对于未来的载人火星任务而言，漫长太空之旅将承受更长时间的深空辐射。

空间高能粒子辐射可以穿透飞行器直接对航天员造成辐射损伤，对航天员的影响和危害主要是对细胞、染色体、DNA、中枢神经系统、骨髓和皮肤造成破坏，并诱发癌症、白血病和白内障。美国国家辐射防护委员会（NCRP）发布的低地轨道飞行时造血器官的最新剂量限值 0.5 Sv/a，在国际空间站停留的全身有效剂量限值为 0.2 Sv/a。而在火星探测中，航天员在太空的旅行时间将会长达一年以上，如此长时间暴露在空间辐射环境中，目前还没有哪个国家的研究人员能够估计出剂量限值和可能的危险后果。

4 空间辐射防护技术

由于载人火星探测空间辐射对航天器和航天员有着潜在的巨大危害，开展航天器的辐射防护技术研究刻不容缓。对航天器的辐射防护主要考虑通过被动或主动防护方式防护，对人员的辐射防护则体现为通过舱体屏蔽和服用化学药物的方式。

由于载荷质量的限制以及次级粒子等问题，传统的质量屏蔽防护方法已不能满足载人火星等深空探测飞行的需要，因此很多国家开始设计针对带电粒子的主动防护方法，通过电场、磁场、等离子体磁场^[10]等使带电粒子在到达航天器前改变运动方向使其无法进入被屏蔽体。其中由于电场防护存在耗电功率大等无法解决的问题，国内外研究较少。因此，本文在被动防护方法中讨论了质量屏蔽技术和屏蔽材料技术，主动防护技术则重点讨论了磁场屏蔽防护和等离子体膨胀磁场防护技术。

4.1 航天器辐射防护技术

（1）质量屏蔽技术

目前国内外对空间辐照环境下航天器及其内部关键电子设备、元件的辐照防护基本方法是采用质量屏蔽方法，该方法的原理是空间带电粒子在贯穿物质的过程中逐渐损失其能量，最后捕获足够数目的电子而停止下来，当屏蔽物质的厚度大于某种带电粒子在该物质中的射程时，入射粒子将被阻止在物质中。因此一定厚度的物质能够屏蔽一定能量范围（取决于粒子的种类）的粒子辐射。采用质量屏蔽方法进行辐射防护，首先应考虑加强设备或航天器自身的抗辐射能力，主要从元件级、设备级和系统级考虑加强抗辐射设计。

元件级辐射防护应该选用抗辐照的材料，提高元件本身的耐辐射性能；设备级主要通过屏蔽、冗余、故障隔离等设计方法，使设备容许辐射轰击设备，但同时能保证设备受到辐射影响后还能恢复正常工作；而系统级辐射防护则主要是通过合理选择壳体的厚度或材料、合理设计壳体结构，达到保护航天器内部电子设备免受空间辐射的目的。

国外对质量屏蔽防护技术研究的较多，也比较成熟。国内目前在星载电子设备的抗辐射加固设计、航天器质量屏蔽等方面取得了一定的应用效果，并且针对航天器用关键电子元器件已经开始自主研发宇航级辐照防护器件。

（2）磁场屏蔽技术

利用超导线材产生磁场防护高能带电粒子是最简单可行的一种方式。1993 年，美国 Duke 大学 Franklin Cock 为 NASA 撰写了针对太阳辐射粒子的航天器磁防护报告，他的磁场防护实现方式是在航天器外围环绕超导电流环，半径为 2000 m，质量达到 2000 kg，电流为 1200 A（见图 1）。这种设计能够使 200 MeV 的质子在到达航天器表面之前偏转，而超导电流环对航天员及飞行器的影响小于地磁场的影响。采用高温超导体来产生磁场是一个很好的选择，高温超导线材与常规电缆相比，损耗低、电流输送能力大、节约材料^[11]。2004 年 10 月，美国麻省理工学院的一个研究小组对航天器磁主动防护做了初步研究，他们把利用超导材料在航天器外产生具有防护作用的磁层称为“磁泡”。目前国内尚无关于空间辐射磁场屏蔽防护相关的研究报道。

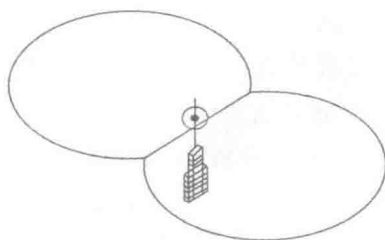


图1 NASA关于超导线圈磁防护的设计示意图

(3) 等离子体膨胀磁场屏蔽技术

根据 NASA 的论证, 在所有的主动防护方法中, 等离子引发磁膨胀技术被推荐为最有工程应用价值的空间辐射主动防护技术^[12]。20 世纪 90 年代后期, 美国华盛顿大学的 Winglee 教授提出了微型等离子推进技术^[10], 通过太阳能电池给航天器上的螺线管线圈供电产生磁场, 沿磁力线方向注入等离子体, 当等离子体的速度达到一定的数值时磁场会被冻结于等离子体中, 等离子体的运动将磁力线拉长, 使磁场随着等离子体的运动而膨胀, 形成较大面积和范围的磁场 (直径约为 20~30 km), 膨胀磁场与带电粒子的作用会产生磁顶层边界, 带电粒子无法穿过磁顶层。因此可以使太阳风及其他高能粒子沿着磁顶层发生偏转, 从而实现对航天员和航天器的有效防护^[13]。在等离子体磁膨胀技术中, 关键的问题是要设计一个高密度、低功耗的等离子体源。基于对等离子膨胀磁场技术的研究, 英国卢瑟福-阿普尔顿实验室的科学家正在模拟地球磁场研制迷你宇宙辐射防护罩, 他们称之为“迷你磁气圈”^[14]。目前该防护罩已经在聚变反应堆 (聚变反应堆能够产生与太阳风类似的等离子体) 中的一个模型上完成了测试, 并取得了令人欣喜的测试结果。

等离子体引发磁膨胀技术的研究在国内正处于起步阶段。2011 年中科院微电子所的贾向红等人^[15]设计了一种高密度螺旋波等离子体发生器产生高密度的等离子体, 入射到磁铁磁场, 通过测量喷口处的等离子体电子数密度及温度, 验证了磁场膨胀技术。

(4) 空间辐射屏蔽材料技术

随着航天器的复杂化, 传统防护材料 (如铝) 今后将无法满 足航天器对重量和体积的要求, 亟需研制轻质高效的新型辐射防护材料。而先进复合材料在降低航天器的质量、提高辐射防护能力上有明显的优势, 也是目前国内外学者研究的热点。

低原子序数材料具有良好的抗辐射防护效果, 无论是固态还是液态, 氢都是理想的抗辐射防护材料, 富氢聚合物材料对质子的辐射防护性能比其他材料的防护效果都好^[16], 具有突出的空间辐射防护能力。通过将纳米粒子等功能性粒子掺入富氢聚合物材料中, 可使得该复合材料的力学性能、辐射防护能力均比较优异, 被认为是未来空间辐射防护结构材料的理想选材。2012 年, NASA 开展了基于聚乙烯的防护材料研究, 研究人员将碳纳米管粒子加入到聚乙烯基材中探索新型的辐射防护材料, 对制备得到聚乙烯纳米复合材料, 使用和银河宇宙线中的粒子类似的 1 GeV 能量的高能重离子对复合材料进行测试, 发现其防护效率得到了很大提升。

除对复合材料制备的研究外, 为了减轻结构重量、提高有效载荷, 2000 年左右哈佛大学 Evans 教授、剑桥大学的 Ashby 教授、MIT 的 Gibson 教授等人提出了一种空间点阵材料结构, 基于此种结构所制备的材料具有超轻质、高刚度及高强度, 并且这种金字塔式点阵结构的复合材料为储氢提供了一种途径, 将液态氢封闭在这种复合材料中, 既能有效降低质量又能达到辐射防护效果。研究基于这种空间点阵结构的高效储氢辐射防护复合材料, 将会对空间高能质子和重离子能够起到很好的防护效果 (见图 2)。

国内哈工大、航天 510 所等单位具有材料防护方面的研究基础, 开展了相关方面的基础研究工作, 但研究成果未见公开发表。因此开展该方面的研究对提高我国未来载人航天器辐射防护能力具有重要的现实意义。

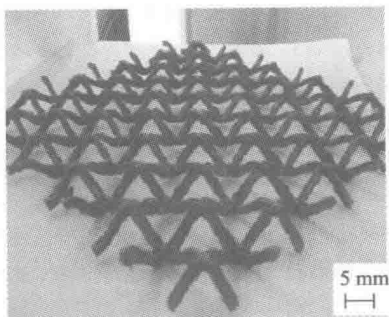


图2 基于空间点阵结构的复合材料

4.2 航天员辐射防护技术

为降低航天员接收的辐射照射,除了增加航天器舱壁厚度外,主要是采用化学药物防护方法,实验证明一些药物具有减轻辐射损伤的作用^[17-18]。在航天中配备这些药物,在辐射剂量超限时服用,可以减轻辐射的伤害。NASA《人—系统整合标准》中推荐的主要是半胱氨酸,它是一种天然存在的氨基酸,要在辐射暴露前短时间内给药才有效,静脉注射比皮下注射好,化学性质不稳定,极易挥发。目前对空间辐射的防治和治疗主要是沿用临床防治 γ 射线和X射线的药物,美国国家航天生物医学研究所辐射效应组近年来已开始大量的有关航天辐射效应及辐射防护剂的研究。近年来,我国的航天医学工作者开展了中药防护措施的研究,取得了一定的成效。

5 结束语

在载人火星探测的旅程中,空间辐射环境对航天器和人员都将可能造成很大的危害。而目前国内外关于火星辐射环境的研究及成果无论在空间辐射效应、辐射防护技术,还是在防护效果评价等方面,与未来载人火星探测活动的需求都存在着不小的差距,还有很多工作要做。

本文通过对载人火星探测过程中空间辐射环境和效应的讨论,分析了对航天器和人员进行辐射防护的必要性,阐述了目前国内外在航天器和人员辐射防护方面的研究现状,在此基础上提出了对我国未来载人航天器空间辐射防护的几点建议:质量屏蔽技术仍然是目前和未来航天活动工程应用中最基本的空间辐照防护方法;磁场屏蔽技术方案简单可行,但要产生满足条件的磁场需在航天器外围环绕大型的超导电流环,工程实现难度大;等离子体膨胀磁场屏蔽技术实现的关键是等离子体源的设计,未来最有工程应用价值;积极开展基于先进复合材料技术的新型辐射屏蔽材料对未来航天器辐射防护具有重要的意义。

参考文献

- [1] 刘映国,宣颖. 2010年国外载人航天发展综合分析[J]. 载人航天,2011(1):58-59.
- [2] 薛玉雄,马亚莉,杨生胜. 火星载人探测中辐射防护综述[J]. 航天器环境工程,2010,27(4):437-440.
- [3] 沈凌云,唐承革. 空间辐射对载人航天的影响及其防护措施[J]. 中国航天,2004(10):28.
- [4] 吴国兴. 恶劣可怕的火星环境[J]. 太空探索,2005(5):19-20.
- [5] 沈自才. 深空辐射环境及其效应的分析与比较[J]. 航天器环境工程,2010(6):313-316.
- [6] 赵雪,蔡震波. 空间环境与卫星在轨异常分析[C]. 中国空间科学学会空间探测专业委员会第十七次学术会议论文集,乌鲁木齐,2004,9:43-49.
- [7] 沈自才. 空间辐射环境工程[M]. 北京:中国宇航出版社,2013:1-3.
- [8] 薛玉雄,杨生胜,把得东. 空间辐射环境诱发航天器故障或异常分析[J]. 真空与低温,2012,18(2):63.
- [9] 徐菁. 抵御太空辐射的盾牌[J]. 太空探索,2005(4):12-13.

- [10] Piero Spillantini. Active shielding for long duration interplanetary manned missions[J]. Advances in Space Research, 2010, 45: 900 - 916.
- [11] 孟立飞, 易忠, 张超. 航天器防护高能带电粒子的新方法[J]. 航天器环境工程, 2008, 25(2): 198 - 199.
- [12] Adams JH, Hathaway DH. Revolutionary concepts of radiation shielding for human exploration of space[R]. NASA - 2005 - TM213688.
- [13] 贾向红, 许峰, 贾少霞. 载人航天微型磁等离子体辐射防护地面实验[J]. 辐射防护, 2012, 32(5): 311 - 312.
- [14] 苗秒. 科学家研制宇宙辐射防护罩[J]. 科学大观园, 2013(16): 69.
- [15] 贾向红, 许峰, 万军. 用于空间辐射主动防护的等离子体发生器设计[J]. 真空科学与技术学报, 2011, 31(4): 481 - 482.
- [16] 杨浩, 张紫霞, 方美华. 航天材料对质子辐射防护性能的模拟研究[J]. 航天器环境工程, 2008, 25(6): 550 - 551.
- [17] 徐冰心, 岳茂兴, 刘志国. 载人航天辐射防护剂的研究[J]. 第七届全国中西医结合灾害医学学术会议, 2011: 271 - 272.
- [18] 孙伟光, 卢婷利, 于洋. 空间辐射生物学效应及生物防护措施研究进展[J]. 中华航空航天医学杂志, 2009, 20(2): 100 - 102.

Study of Radiation Effects and its Protection methods During Manned Mars Exploration

Chen Chaoji¹ Li Pengwei² Chen Dan¹

1 Institute of Manned Spacecraft System Engineering,
China Academy Space Technology, Beijing, 100094;

2 Aerospace Components Engineering Center, China Academy Space Technology, Beijing, 100029
chaojichen@asee. buaa. edu. cn

Abstract The space radiation can cause a lot of harm to spacecraft and astronaut during the long term manned Mars exploration. As the development of high reliability and long - life manned spacecraft, it's urgent to do research on advanced protection methods from space radiation. This paper firstly analyzed the space radiation and its effect during manned Mars exploration, secondly summarized the necessity of protection from radiation effect caused by proton and high - energy particle, then discussed the research development of spacecraft and astronaut protection at home and abroad, finally some suggestions on the development of protection technology of our Manned spacecraft were presented based on the discussion of shielding methods.

Keywords manned spacecraft; Mars exploration; space environment; radiation effects; radiation protection