

空间微生物学 基础与应用研究

刘长庭 常 德 ○ 主 编

SPACE MICROBIOLOGY
BASIC RESEARCH AND APPLICATION



北京大学医学出版社

SPACE MICROBIOLOGY
BASIC RESEARCH AND APPLICATION

空间微生物学 基础与应用研究

主编 刘长庭 常德



北京大学医学出版社

KONGJIAN WEISHENGWUXUE JICHU YU YINGYONG YANJIU

图书在版编目 (CIP) 数据

空间微生物学基础与应用研究/刘长庭, 常德主编. —北京:
北京大学医学出版社, 2016. 7

ISBN 978-7-5659-1409-6

I. ①空… II. ①刘…②常… III. ①环境微生物学—研究
IV. ①X172

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 134658 号

空间微生物学基础与应用研究

主 编: 刘长庭 常 德

出版发行: 北京大学医学出版社

地 址: (100191) 北京市海淀区学院路 38 号 北京大学医学部院内

电 话: 发行部 010-82802230; 图书邮购 010-82802495

网 址: <http://www.pumppress.com.cn>

E - mail: booksale@bjmu.edu.cn

印 刷: 北京佳信达欣艺术印刷有限公司

经 销: 新华书店

责任编辑: 高 瑾 武翔靛 责任校对: 金彤文 责任印制: 李 啸

开 本: 889mm×1194mm 1/16 印张: 18.5 字数: 455 千字

版 次: 2016 年 7 月第 1 版 2016 年 7 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-5659-1409-6

定 价: 128.00 元

版权所有, 违者必究

(凡属质量问题请与本社发行部联系退换)

SPACE MICROBIOLOGY
BASIC RESEARCH AND APPLICATION

空间微生物学 基础与应用研究

主 编 刘长庭 常 德

编 委 (以姓名笔画为序)

王俊锋	王雅娟	刘长庭	苏龙翔
李 佳	李天志	杨 军	杨 宇
余 昞	沈美龙	张学林	周 宏
保鹏涛	袁 明	徐 稠	高龙成
郭 军	郭英华	黄 兵	常 德
韩延平	谢 琼	潘 磊	

北京大学医学出版社

序 一

载人航天是人类认识宇宙、拓展生存空间和开发太空资源的伟大实践。中国载人航天计划于 1992 年正式启动，近期目标是将航天员送入太空，远期则包括建立永久空间站以及月球探索。载人航天技术是科技高度整合的一个领域，集成了包括工程控制、信息技术、推进、能源、材料和生命保障等多学科的最新成果。自 20 世纪 60 年代起，全球多个国家积极开展了大量的航天活动，而由载人航天衍生的许多技术成果都已渗透和应用到人类日常生活和工作之中。

空间生物医学是近年来新出现的一门学科，该学科的出现与载人航天密切相关，和空间技术相伴而生并互相推动，主要研究空间环境因素相关的生物医学问题。刘长庭教授作为“973”计划首席科学家，长期从事信息技术科学中的空间技术科学与生命科学的生物医学相交叉的新兴学科——空间生物医学研究，在空间生物医学领域，特别是失重的生物学效应、空间环境对微生物的影响及其应用研究方面做了全面系统的研究。

看到刘长庭教授及其团队编写的《空间微生物学基础与应用研究》专著出版，我非常高兴。这部专著体现出中国载人航天工程不但推动了我国空间科学技术的进步，而且促进了我国其他学科领域的发展。该书是国内空间微生物学领域的首部专著，介绍了刘长庭教授团队多年的研究成果，供后来进入该领域的学者学习和参考。作为空间医学微生物学科的创始人和奠基人，刘长庭教授不仅开辟了该学术领域，还在该领域开创性地完成了重要工作，获得了一系列的研究成果，培养了一支具有国际竞争力的空间微生物学研究团队，为我国空间生物医学的发展做出了巨大贡献。这也使我国空间医学微生物研究进入世界先进行列。

最后，祝贺这本专著的出版，也期待刘长庭教授团队取得越来越多的成果！

中国工程院院士

沈荣骏

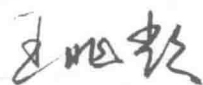
序 二

1992年9月21日，中共中央政治局常委会议同意中央专委会《关于开展我国载人飞船工程研制的请示》，正式批准实施我国载人航天工程，工程代号“921”，明确我国载人航天“三步走”发展战略。第一步，发射载人飞船，建成初步配套的试验性载人飞船工程体系，开展空间应用实验；第二步，突破载人飞船和空间飞行器的交会对接技术，发射空间实验室，解决有一定规模的短期有人照料的空间应用问题；第三步，建造空间站，解决有较大规模的长期有人照料的空间应用问题。

载人航天工程是国家综合实力的重要标志，体现了当今世界航天技术最复杂、最先进、整合程度最高的水平，对国家安全、利益拓展具有至关重要的作用，其最终目标是利用太空资源服务于人类。遥感空间生命科学和医学基本问题，是载人航天的重要领域之一，近年来一直是生命科学研究的热点和前沿。

刘长庭教授自1997年以来长期从事空间生物医学研究，在国内系统研究机体失重机制并首次提出了应对失重环境条件的药物防护策略，获得了多项创新性、实用性成果；承担并完成中国载人航天办公室赋予的针对空间微生物的多项研究任务；建立了空间微生物安全评估系统，为保障航天员的健康提供重要保障；提出了感染性疾病的防护策略，为治疗地面难治性感染疾病与药物研发奠定了基础；揭示了微生物腐蚀机制，为保障航天器安全运行、研制航天员正常工作所必需的生保系统提供了技术支撑。《空间微生物学基础与应用研究》一书，汇集了刘长庭教授及其团队在空间微生物学方面的多年研究成果。我衷心地祝贺这本书的问世。该书从空间环境对微生物的影响和作用入手，介绍了空间环境对病原微生物致病的影响及防护策略、微生物腐蚀航天材料、空间微生物制药等成果，是该领域的第一部专业著作。再次感谢本书的作者们，随着我国载人航天的发展，我期待并相信他们会不断推出新的研究成果。

中央军委装备发展部载人航天工程办公室主任



序 三

微生物是地球上数量最大的生物类群，在生物圈和地球物质循环中发挥着重要的作用。在自然界，微生物参与元素循环、推动物质转化，从而影响我们的生存环境。微生物与人类关系密切，人体表面及体内的正常微生物菌群有益于人类健康，但也有很多微生物能够引起人类疾病。由各种病原微生物引起的感染性疾病是人类最为常见和多发的疾病。

空间微生物学是随着航天技术的进步而出现的一门新兴学科。微生物体积小、培养条件简单，相对于高等生物在空间特殊环境下更易变异。空间环境诱变微生物，在一定程度上丰富了微生物的菌种资源；研究微生物对空间环境的响应，有利于微生物科学技术的发展。

我国航天事业的蓬勃发展为空间微生物研究带来了新的机遇。空间环境有助于发现一些地面条件下难以观测到的现象。国内外载人航天器在轨经验研究初步结果表明，空间环境中微重力、极度温差和粒子辐射等因素可诱导微生物的生物学性状发生改变。病原菌致病力和耐药性发生变化，可能会威胁航天员健康，腐蚀威胁平台设备安全。我国将于 2022 年左右建成空间站，因此，积极开展空间微生物研究，符合我国的战略需求。

《空间微生物学基础与应用研究》一书，是我国空间微生物学科领域的首部专著。目前，国内外在该领域的研究资料有限。该书从现有已发表的相关研究出发，全面系统地介绍了空间病原微生物、空间腐蚀微生物和空间制药微生物等，并对未来该学科的发展方向进行了展望。随着我国载人航天事业的发展，该书的正式出版，必将掀起空间微生物的研究高潮。

中国工程院院士

郑静晨

序 四

随着科技发展和社会需求增加,空间环境和资源正在逐渐被开发和利用,空间科学和技术是目前公认的高科技之一。空间技术和生物学研究相结合,诞生了空间生物学这一崭新学科。地球环境中,种类繁多的微生物无处不在。在航天飞行过程中,微生物在密闭的飞行舱中同样是无法被忽视的。本书率先系统地概括了空间微生物学的发展现状,翔实地介绍了目前空间微生物研究的几大热点问题——空间病原微生物学、空间腐蚀微生物学、空间制药微生物学以及空间微生物诱变育种等,对今后的研究探索起到很好的启示作用。

在航天过程中,微生物在空间环境中的毒力和致病性可能会发生改变,这是长期载人航天面临的一个重大安全性问题,严重威胁航天员的生命健康和航天器的长期运行安全。本书总结了国内外对常见病原微生物的代表性研究,并结合编者自己团队的研究结果,对多种病原微生物在空间环境下的变异及对航天员的影响提出了系统的学说、理论,具有前瞻性。自人类利用航天飞行器探索太空以来,空间材料的微生物腐蚀问题一直极大地困扰着科学家。本书详述了飞行器在太空飞行中携带的各类微生物的腐蚀特性及机制,并针对腐蚀微生物的防护及综合控制,提出了系统的方法和策略,对今后科研工作者来说有很大的参考价值和指导意义。

本书的编写填补了国内对于空间微生物学研究论著的空白,并与国际接轨,相信可以大大地推动我国空间微生物学的研究。

中国科学院院士

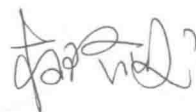


序 五

随着航天技术的进步，人类航天活动日趋增加。空间环境作为区别于地球的人类活动的新环境，失重、辐射、极端温差等因素给航天员的生活带来了极大的挑战。微生物存在于地球的各个角落，也会随着航天活动的开展进入太空。由于航天器的密闭性，微生物对航天员健康的威胁、对航天设备的腐蚀都是各国航天科研领域面临的重大挑战。近年来，太空环境逐渐成为各国争相争夺的战略资源，保障我国航天活动的开展刻不容缓。我国空间生物医学的兴起主要依托近年来航天技术的飞速进步。在空间生物医学领域，对空间环境中微生物的充分研究开辟了空间生物医学领域的新兴学科分支——空间微生物学。目前，西方一些国家积极开展空间微生物学的相关研究，而我国在这方面的系统研究尚处于起步阶段。刘长庭教授带领团队利用我国自主研发的空间生物搭载研究平台，在空间微生物领域进行了深入系统的研究。本书的主要内容基于上述研究成果以及国内外在此学科领域的最新进展，是目前国内空间微生物学领域的首部专著。

21 世纪，空间生物学领域已由起步进入飞跃式发展阶段，我国建立的空间站将取代目前的国际空间站成为人类唯一的空间研究平台，为空间微生物的研究提供更先进、更高效的技术支持。未来，依托我国航天事业的蓬勃发展，我国在空间微生物领域必将取得更多更好的研究成果，引领国际先进水平。

军事医学科学院微生物流行病学研究所教授



前言

空间环境具有地面环境中所不具备的一些特殊环境因素,包括微重力、高真空、极度温差、弱磁场和粒子辐射等,可诱导微生物产生基因突变,进而影响微生物的生物学性状和功能。载人航天是人类认识宇宙、拓展生存空间和开发太空资源的伟大实践,是现代科学技术革命的重要领域之一,它的发展对人类的社会生产、生活产生了深远影响。载人航天工程的实施也为微生物科学技术的发展提供了一条新途径,并促进了一门新的空间生物学分支学科——空间微生物学的诞生。

据世界卫生组织(WHO)统计数据,2000—2012年全球人类前十大死亡病因中,有五种为感染相关性疾病,即下呼吸道感染、获得性免疫缺陷综合征(艾滋病)、结核病、慢性阻塞性肺疾病和感染性腹泻。近年来,高致病性和多重耐药性病原菌不断涌现,对人类健康造成了极大的威胁,亟待人们研究其高致病性和耐药性产生机制,从而为发掘感染防治新策略和治疗新手段奠定基础。空间微生物学研究将大大促进病原菌致病与耐药机制探索,为重要感染性疾病的预防、控制和治疗新策略的发现提供机遇,具有广阔的临床转化前景。

国外载人航天器在轨经验和国内地面研究的初步结果表明,微生物会严重威胁航天员健康和平台设备安全。空间微生物学研究能够深化对航天器微生物风险的认识,探索更加有效的载人航天器微生物综合控制措施,为载人航天器的研制和运营提供技术支撑。

近年来,我国的空间生命科学在制药领域迈出了一大步,特别是生物制药领域。空间微生物制药是将代谢物可用于制药工艺的微生物送入太

空,利用太空特殊的环境诱变作用,提高某些基因的突变频率,并在其返回地面后进行培育、筛选,最终获得生产性能优良微生物菌种的育种新技术。空间微生物学研究为生物药物的部分品种开发注入强有力的市场竞争力,对于降低产品价格、减轻国民消费成本、保障人类健康,具有重要的经济和社会意义。

本团队是由解放军总医院牵头,整合了包括中国航天员科研训练中心、中国人民解放军军事医学科学院、北京航空航天大学、中国科学院等在内的国内20余家研究机构和企业优质资源,在空间微生物学领域做了大量研究,特别是率先开展了空间医学微生物学研究。针对空间环境微生物防护,系统研究了空间环境对微生物的作用及机制,提出了空间微生物分子效应学说,开创了空间医学微生物防护应用的新领域:①发现空间环境下病原微生物遗传变异规律,提出了空间微生物毒力突变致病理论。通过“神舟”系列飞船搭载,筛选鉴定出118株空间环境变异菌株,包括形态学、生物膜形成能力、毒力、耐药性和生化代谢发生变化的致病菌,在国内外首次发现空间诱变的肺炎克雷伯菌出现罕见的溶血现象。初步研究揭示了空间环境对病原菌的作用效应和分子机制,特别是致病性和耐药性的变化和产生机制,为空间和地面上难治性感染的前瞻性研究、预防和治疗提供了新思路和新靶点。②开创生物工程菌空间制药研究,提出空间微生物代谢通路改变相关的制药理论,为空间生物制药奠定理论基础。获得空间环境诱变后较高表达的重组人干扰素 $\alpha 1b$ 工程制药菌株,其产量提高3倍;发现搭载能制药的产酶溶杆菌产量较地面对照增加3.5倍。该研究有利于拓展我国空间生物制

药，为空间生物制药工程奠定了理论基础。③揭示空间环境下微生物腐蚀机制，提出空间微生物的腐蚀理论与洗消新材料技术理论，建立空间站材料表面的微生物控制体系，为防控空间站设备的微生物腐蚀奠定基础，有望延长航天器及空间站在轨时间。④首次自主研发了病原微生物样品飞船搭载系统，成功应用于“神舟”系列飞船的搭载研究，得到了中国载人航天办公室的高度评价并被推广应用，有力保障了我国空间搭载和未来空间站的空间生物医学研究进程。

本团队于1997年在国内开展空间生物医学研究；2006年召开国内首届空间生物医学研究与应用研讨会；2007年成立中国宇航学会空间生物医学专业委员会（2009年与中国宇航学会航天医学工程专业委员会合并为中国宇航学会航天医学工程与空间生物医学专业委员会）；2012年在北京香山召开面向后续载人航天任务的航天医学工程与空间生物学专题研讨会，有5名院士及数名本领域专家做了大会报告；2008年在国内首次出版《空间生命科学研究与探索》专著，成立了解放

军总医院空间生物医学实验室；建立了首支空间微生物研究团队；完成了中国载人航天办公室赋予我们的对空间微生物的研究任务。在本领域先后承担和完成医学重大工程项目、“973”计划等40余项国家和省部课题；在空间微生物学领域共发表论文80余篇，其中科学引文索引（SCI）收录论文40余篇；以LCT（Liu Chang Ting）命名微生物变异物种25株，其全基因组序列已被美国国家生物技术信息中心（NCBI）数据库收录；在该领域获国家发明专利23项，实用新型及外观设计专利7项。建立了世界唯一的空间微生物数据中心（网址 <http://www.spacemicrobe.org>），供世界研究空间微生物的工作人员参考和应用。本团队对国内空间微生物学的发展做出了重要贡献，使我国空间微生物学研究水平进入国际先进行列；促进了世界空间微生物学的研究。

最后，由于水平和时间有限，本书在内容和编排上难免有不足和错误之处，敬希读者批评指正，以便再版时修改和完善。

中国人民解放军总医院南楼呼吸科教授

刘长庭

目 录

第一篇 绪 论

第一章 空间环境简介	3	第二章 空间微生物学研究现状	13
------------------	---	----------------------	----

第二篇 空间病原微生物学

第三章 空间病原微生物学研究概况	33	第九章 空间环境对褪色沙雷菌的影响	123
第四章 空间环境对肺炎克雷伯菌的影响	41	第十章 空间环境对金黄色葡萄球菌的影响	133
第五章 空间环境对携带 NDM-1 的肺炎克雷伯菌的影响	47	第十一章 空间环境对大肠埃希菌的影响	139
第六章 空间环境对蜡状芽胞杆菌的影响	57	第十二章 屎肠球菌在空间环境下的变化及规律研究	151
第七章 二次空间环境对蜡状芽胞杆菌的影响	101	第十三章 空间环境对肠道菌群的影响	163
第八章 空间环境对铜绿假单胞菌的影响	113		

第三篇 空间腐蚀微生物学

第十四章 空间微生物腐蚀研究概况	175	腐蚀	205
第十五章 空间微生物腐蚀的研究现状 & 进展	185	第十八章 空间载人密闭舱内的微生物腐蚀	213
第十六章 空间微生物腐蚀的研究意义及方法	195	第十九章 空间微生物腐蚀的综合控制策略	223
第十七章 细菌生物膜与空间微生物			

第四篇 空间制药微生物学

第二十章 空间微生物制药研究概况	235	α 1b 研究	251
第二十一章 空间环境诱变产酶溶杆菌研究	243	第二十三章 空间微生物诱变育种及空间制药研究	259
第二十二章 空间环境诱变重组人干扰素			

第五篇 展 望

第二十四章 未来的空间微生物学发展	271
索引	276

第一篇

绪 论

第一章 空间环境简介

第二章 空间微生物学研究现状

第一章 空间环境简介

离地球表面 100km 以外的环境称为空间环境,包括了空间辐射、极端温度、高真空、微磁场及航天器内特有的微重力等环境因素,航天器内的空间环境是除陆地、海洋和大气以外人类生存的第四种环境。空间环境与人类生活的地表环境相比更加复杂,其中充满着各种形态的物质,包括粒子(中性气体、电离气体、等离子体和各种能量的带电粒子)和场(引力场、电场、磁场和各种波长的电磁辐射),以及流星体和空间碎片等,深空中还有小行星、行星及彗星等大型“粒子”,它们对载人航天器的设计和材料选择提出了很高的要求。目前,载人航天技术的发展使得人类空间活动主要在地球近地轨道,因此有必要了解近地轨道空间环境的特点。

一、近地轨道空间环境

(一) 大气环境

包围在地球周围的空气,通常称为大气。这是航空器唯一的飞行活动环境,同时也是火箭、导弹和航天器的重要飞行环境。地球大气是地球上一切生物生存的必要条件,它对航空航天和生物机体都有重要影响。

1. 地球大气的形成

地球大气的分布范围极为广泛,其底界为地面,但没有明显的上界,不存在与星际气体截然分开的界线。鉴于大气结构的复杂性,可以把大气看成是由若干个具有不同特点的同心层所组成的。例如,以温度的垂直分布可将大气划分为对流层、平流层、中间层、热层和外层五个层次。

地球大气层气体的形成主要受两种力的作

用:将它约束在地球上的地球引力和使气体扩散的太阳热辐射。由于这两种力相对的稳定与平衡,使大气层呈现出清晰的密度和压力垂直分布。海平面上的大气密度标准(ρ_0)为 1225kg/m^3 ,由于地球引力的变化,随着距地高度的增加大气密度逐渐降低。载人航天器通常运行于 300~400km 高度,其大气密度只有地面大气密度的千亿分之一。同时,随着大气高度的增加,气压逐渐降低。大气压的大小决定了真空程度,据此将真空分为五种:粗真空(大气压高于 $1.33 \times 10^3\text{Pa}$),低真空($1.33 \times 10^3 \sim 1.33 \times 10^{-1}\text{Pa}$),高真空($1.33 \times 10^{-1} \sim 1.33 \times 10^{-6}\text{Pa}$),超高真空($1.33 \times 10^{-6} \sim 1.33 \times 10^{-12}\text{Pa}$),极高真空(低于 $1.33 \times 10^{-12}\text{Pa}$)。载人航天器运行高度处于“超高真空”中,大气压为地面的千亿分之一。

载人航天中,从地球大气层到空间的过渡区里,有三点对人体防护和航天器设计有特殊的意义:①在大约 20km 的高空,低压且缺氧,这里是人体的生理耐受极限;②在大约 80km 以上高空,会遇到冯·卡曼线,这里是空气动力学的最低有效高度,由此高度再向上,则要通过喷射气流控制航天器的方向;③在 180~200km 以上高空,空气阻力接近于零,大气的力学作用已基本消失。高层大气环境是受太阳活动控制的,当太阳活动剧烈时,高层大气的温度和密度也随之发生剧烈变化;在太阳活动高年和低年时,高层大气的密度有很大差异。高度越高差异也越大,在 200km 高度上可相差 3~4 倍,500km 高度上相差 20~30 倍,1000km 高度上相差可以达到 100 倍。

当某一范围内气体压强（或密度）小于某一特定数值时就产生了所谓的“真空”。航天器运行的轨道越高，其真空度也越高。大气层边缘被定义为空气分子碰撞极罕见的区域，它在距地球表面约 700km 处。超出这个水平就是外大气圈，即空气粒子自由运动的区域，在那里空气逐渐变稀薄，直至变成真正的真空。这时气体分子的热传导可以忽略，只有辐射换热。但是，即使在那里，气体粒子密度也有约 $1 \sim 10/\text{cm}^3$ 。

2. 大气的组成

大气是一种混合气体，主要是由氮、氧、二氧化碳、氢和微量的稀有气体组成。在 90km 高度的范围内，空气组成的百分比基本保持不变，可以粗略地认为大气是由 79% 的氮气和 21% 的氧气组成。在 20~50km 高度，由于太阳紫外线辐射，大气中臭氧含量丰富，又称为臭氧层；在 100km 以上高度，由于受到粒子辐射和太阳电磁辐射作用，大气各成分开始扩散分离，氧分子开始部分地解离成氧原子。从 100~200km，氮分子的密度从 $10^{13}/\text{cm}^3$ 下降至 $10^9/\text{cm}^3$ ；氧分子从 $10^{13}/\text{cm}^3$ 下降至 $10^8/\text{cm}^3$ ；氧原子从 $10^{11}/\text{cm}^3$ 下降至 $10^9/\text{cm}^3$ ；氮原子的数量不超过氮分子的 2%~5%；一氧化氮的密度为 $6 \times 10^6/\text{cm}^3$ 。在这一区间内，大气各成分的密度还随着太阳的活动、季节、纬度等而变化，变化率可达 7~10 倍。在 300km 以下高度，大气的主要成分是氧原子、氮分子和氧分子。

（二）温度环境

地球表面及大气层的温度主要依赖吸收太阳辐射能量而形成的。由于纬度和地形高度的差异，地球表面温度有很大的不同，最低温度达 -87°C ，最高 60°C ，平均温度为 21°C 。大气层的温度与离地面的高度有关：离地面 10~20km，逐渐下降至 $-70 \sim -60^\circ\text{C}$ ；离地面 40~50km，由于大气层中臭氧吸收太阳光中的紫外线，使温度上升到 $-50 \sim -40^\circ\text{C}$ ；离地面 50km 以上，下降到 -95°C ；从 100km 以上到 300km，其间所有的紫外线均被大气吸收，温度又迅速升高，

到 400km 以上温度可达到 1000°C 以上。但在这一高度上，空气已极度稀薄，传热方式主要依靠辐射，而通常以分子传导和对流方式的热交换已不起作用。“冷黑”环境是航天器在飞行轨道中经历的主要环境之一。太空的“冷”是由于宇宙空间的能量密度约为 10^{-5} W/m^2 而产生的，只相当于 $3\text{K} (-270^\circ\text{C})$ 的黑体辐射能量密度；太空的“黑”是由于当航天器进入地球本影区时，本身的热辐射全部被太空吸收，没有二次反射，即航天器没有同空间其他星球进行热交换的可能，所以太空可以被视为理想的黑体。冷黑环境除影响航天器的温度外，还会影响航天器部分材料的性能，使其老化、脆化，进而使有伸缩活动的部位出现故障。

（三）引力场

引力场是普遍作用于所有物体间相互吸引的宇宙力，又称为万有引力。它无处不在地影响着宇宙万物，大至恒星、银河系及整个宇宙的形成结构与演化，小到飞行中的航天器，都无法将它阻断和增减。所有的行星和恒星都具有引力场，只是场强有所不同，随着天体间距离的增大，场强下降。地球引力圈向外扩展的距离约为地球半径的 1000 倍，随着距离增加逐渐融合到其他天体的引力场中。

人类飞离地球进入宇宙空间之所以困难重重，其根本原因在于地球表面的万物都处于地球的引力场中，每时每刻都受着地球引力的束缚，要想飞离地球必须克服这种束缚。

根据牛顿的万有引力学说，任何物体之间都存在着相互作用的引力 (F)，它们的关系为： $F = G \times m_1 \times m_2 / d^2$ 。式中， m_1 和 m_2 分别为两个物体的质量， d 为两物体质心之间的距离， G 为万有引力常数。从式中可以看出，引力的大小与两个物体质量的乘积成正比，而与两个物体质心距离的平方成反比。地球的质量和半径是一定的。地球表面的万物有大有小，质量和密度也不同，它们与地球之间的相互引力也就千差万别。为了方便地表述地球的引力，采用

牛顿著名的力学演化公式 $F=mg$ 来表示, 其中 g 的数值约为 9.81m/s^2 , 它可以方便地表示地球与它表面上任何一个物体 (不管它的质量大小) 之间的引力关系。

地球上的物体要飞离地球, 必须克服地球对它的引力。克服这种引力最直接最简单的办法是对物体施加一个大于 mg 并与其方向相反的外力。但是这种方法有一个致命的缺点, 就是这个外力作用一旦停止, 物体就又被地球的引力拉回地面。另外一种办法是沿与地面切线平行的方向施加一个外力, 使物体达到一定的速度, 使它沿地面弧度运行而产生一个向心加速度。这时, $a=v^2/r$, 式中 a 为外力作用产生的向心加速度, v 为沿地面弧度切线方向的速度, r 为地球半径。

物体离开地面的高度与地球半径相比非常小, 因而可以忽略不计。从这个式子中可以看出, 如果物体达到的速度 v 恰好使向心加速度 a 等于 g , 物体离心的惯性力恰好与 mg 方向相反而数值相等, 物体就可以围绕地球运行, 既不离开地球飞向远方, 又不会被地球拉回地面。一旦该物体达到这一速度, 即使外力作用停止, 物体仍可按照这一速度继续绕地球飞行。如果没有其他外力阻止物体, 物体就将永不停止地围绕着地球飞行。通过简单的计算就可知这个速度为 7910m/s , 这个速度只能实现近地轨道飞行, 只是迈向宇宙空间的第一步, 所以称为第一宇宙速度; 如果要挣脱地球的引力场, 飞向太阳系内的其他天体, 大约需要 $11\,180\text{m/s}$ 的速变, 这称为第二宇宙速度; 如果要摆脱太阳系的引力场而飞向其他星系, 就需要大约 $16\,700\text{m/s}$ 的速度, 这称为第三宇宙速度。

由于航天器的运行轨道是椭圆轨道, 航天器不但要受到外界和本身某些力的干扰, 而且还受到某些微重力的作用。空间轨道上航天器上的重力加速度值为 $10^{-6}\sim 10^{-3}g$, 这种环境称为微重力环境。微重力可以通过两种方式获得。由于引力将随距离的增大而减小, 因此可以通过飞离地

球实现微重力。然而, 要使其降至地球表面重力的百万分之一, 必须飞离至地球表面 637 万千米 (相当于地球到月球距离的 17 倍)。除了自动化的航天飞行器, 该方法是不切实际的。与之相比, 自由落体运动可以实现更为实际的微重力环境。虽然飞行器、落塔、小型火箭都能建立微重力环境, 但是这些方法存在一个共同问题, 即在几秒或几分短暂时长的低重力后, 自由落体运动一旦停止, 又将重新恢复到正常的地表重力场的作用中。为了能够获得长时间的微重力, 只能通过轨道航天器。即以合适的速度将其发射进入近地轨道, 并在一个固定的高度保持自由落体运动。

牛顿曾设想, 在一高于大气层的山峰上安置一门大炮并与地表平行射出炮弹, 此时空气的摩擦力可以忽略不计。如果将弹药量加大, 那么此后射出的炮弹会飞行得更远, 最终炮弹会消失于地平线。以此类推, 如果能量足够终将会有一枚炮弹绕地球一圈回到原点, 并继续绕地运行。假设除重力外没有任何力作用于炮弹, 那么该炮弹就会以此为轨道绕地球不断运动。这就是为什么航天飞行器可以留在轨道上, 也即将其发射进入近地轨道并以合适的速度保持在一个固定的高度进行落体运动。例如, 如果航天飞机要爬升到 320km 高的轨道, 它的速度必须达到 $27\,740\text{km/h}$ 才能获得一个稳定的轨迹。在这种速度和高度的情况下, 由于大气层外部的摩擦力极低, 航天飞机中的落体路径与地球表面平行。换句话说, 在宇宙飞船质心处生成一个离心加速度, 并抵消了地球的重力加速度。此时, 航天飞行器在地球周围处于一种自由落体状态, 其内的物体则处于一种微重力环境中。

(四) 磁场

磁场环境包括地球磁场和星际磁场, 对近地轨道飞行的航天器有影响的主要是地球磁场。从地心至磁层边界空间范围的磁场为地磁场。地磁场分布近似于偶极子分布, 随位置和高度不同而变化。地球两极磁场强, 赤道磁场弱, 高度越