

ARTIFICIAL GRAVITY

人工重力

[法] 吉尔斯·克莱门特 编
[美] 安吉·伯克利

白延强 等 译



中国宇航出版社

ARTIFICIAL
GRAVITY

人工重力

本书系统地介绍了在航天飞行防护措施探索过程中采用人工重力这一大胆设想，并依据这一设想所开展的相关工作及结果。其中对失重生理学相关内容的系统阐述，对于指导后续的失重防护措施和方法的研究具有重要意义。书中详实的实验结果和机理叙述，对科学问题的系统梳理和归纳，不仅可以指导科研人员开展相关的研究工作，对于攻读航天医学的研究生是非常好的教材。

ISBN 978-7-5159-0292-0



定价：68.00元

人工重力

Artificial Gravity

[法] 吉尔斯·克莱门特 编
[美] 安吉·伯克利

白延强 等 译



中国宇航出版社

· 北 京 ·

Translation from the English language edition:
Artificial Gravity by Gilles Clement, Angeli Bukley (Eds.)
Copyright © 2007 Springer Science + Business Media, LLC
All Rights Reserved

本书中文简体字版由著作权人授权中国宇航出版社独家出版发行, 未经出版者书面许可, 任何个人或者组织不得以任何方式抄袭、复制或节录本书中的任何部分。

著作权合同登记号: 图字: 01-2012-6559

版权所有 侵权必究

图书在版编目 (CIP) 数据

人工重力 / (法) 克莱门特, (美) 伯克利 (Bukley, A.) 编; 白延强等译. --北京: 中国宇航出版社, 2012.10

ISBN 978-7-5159-0292-0

I. ①人… II. ①克… ②伯… ③白… III. ①人造重力 IV. ①O314

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 216725 号

责任编辑 曹晓勇 责任校对 祝延萍 封面设计 文道思

出版	中国宇航出版社	
发行		
社址	北京市阜成路 8 号 (010)68768548	邮编 100830
网址	www.caphbook.com	
经销	新华书店	
发行部	(010)68371900 (010)68768541	(010)88530478(传真) (010)68767294(传真)
零售店	读者服务部 (010)68371105	北京宇航文苑 (010)62529336
承印	北京画中国画印刷有限公司	
版次	2012 年 10 月第 1 版	2012 年 10 月第 1 次印刷
规格	880 × 1230	开本 1/32
印张	14	字数 403 千字
书号	ISBN 978-7-5159-0292-0	
定价	68.00 元	

本书如有印装质量问题, 可与发行部联系调换

译者序

在神舟九号与天宫一号组合体飞行期间，为本书撰写译者序，感慨万千。经历了四十多年的风风雨雨，我国的航天发射技术、飞行控制技术以及相关保障技术都取得了长足的发展，并逐步成熟。中国航天员队伍不断发展壮大，人员结构日趋合理，值得我们尊敬和佩服。在飞控现场看到航天员娴熟流畅地完成各项操作时，心底不由地在想，深邃的太空早已不是无法企及的梦想，我国的航天实力也得到了国际同行的高度认可。面对未来的航天之路，作为技术支撑的航天医学基础是否已经明确了研究目标？我们准备好了吗？

随着航天事业的发展，国际航天医学界越来越认识到，我们要有标准的研究方法、标准的检测方法，需要通过优势互补的合作来完成复杂的研究任务。前不久完成的“火星-500”试验，充分体现了这一点。本次组织翻译的《人工重力》一书，也体现了在未来长期飞行防护措施的探索过程中，国际合作的必然趋势。本书系统地介绍了在航天飞行防护措施探索过程中的大胆设想，并依据这一设想所开展的相关工作及结果。从数据内容来看，人工重力防护的研究工作还有很长的探索之路要走，目前的研究成果距离在飞行中以及在星际探索的居留地使用，还相去甚远。本书系统介绍了失重生理学的相关内容，对于指导后续的失重防护措施和方法的研究具有重要意义。书中详实的实验结果和机理叙述，对科学问题的系统梳理和归纳，不仅可以指导科研人员开展相关的研究工作，对于攻读航天医学的研究生也是非常好的教材。

本书的作者吉尔斯·克莱门特教授是活跃在航天医学界的资深专家之一，长期从事航天医学空间实验及教学工作。他也是中国航

航天员科研训练中心的老朋友，曾多次来中心参观交流，他主编的《航天医学基础》一书也由中心科研人员于2008年进行了翻译，由中国宇航出版社出版。

本书由中国航天员科研训练中心组织翻译，中心各研究室相关研究方向的科研人员承担了具体的翻译工作，他们是：王林杰，刘炳坤，汪德生，袁明，李志利，谈诚，曹毅，赵琦，宋锦苹，费锦学，李红毅，张磊，张立红。这些译者长期从事相关研究工作，确保了翻译的权威性和准确性。沈羨云、白延强担任了译著的主审，肖志军在校译和定稿中做了大量工作，中心科研训练科李娜承担了大量协调工作，大大促进了译著的出版过程。这里，要特别感谢中国宇航出版社在本译著版权合作及出版过程中给与的大力支持。

由于任务繁重、时间仓促并限于译者水平，本书的译校、统稿中难免有疏漏之处，敬请同行专家和广大读者指正。

白延强

中国航天员科研训练中心副主任

2012年8月

序

人工重力是一个老概念，起源于 19 世纪后期，当时被誉为俄罗斯航天之父的廉斯坦丁·齐奥尔科夫斯基（Konstantin Tsiolkovsky）提出了人体不能很好地适应太空轨道飞行微重力环境的观点。为解决这一问题，他提出将空间站进行旋转，产生向心加速度，提供类似于地面上重力的惯性载荷。后来爱因斯坦（Einstein）在他的相对论中证实了加速度与重力影响在本质上没有区别。此后，许多专家，包括来自科学界的沃纳·冯·布劳恩（Werner von Braun）以及来自文艺界的如亚瑟·C·克拉克（Arthur C. Clark）和斯坦利·库布里克（Stanley Kubrick），提出了各种详细的航天器旋转方案，用产生的“人工重力”抵消太空飞行所致的生理改变。

到了 1959 年，由于无法确定人类在太空飞行中的反应，迫使美国国家航空航天局（NASA）在早期人类航天器的研制计划中考虑设计人工重力装置的必要性。当然，部分原因是飞行时间相对较短，人工重力在美国国家航空航天局早期计划中并未得到实际应用。从这些早期的太空飞行任务中，我们发现人类可以耐受短期的零重力环境，但对于在这种环境中的长期暴露将导致显著影响的担忧一直存在。在进行长期飞行时，可能存在某个阈值，当超过该阈值后，航天员的健康、安全以及工作能力将会受到极大的影响，以至于对航天员个人乃至整个飞行任务带来无法接受的危害。因此，在 19 世纪 60 年代，美国国家航空航天局资助了多个学术会议，讨论人工重力在长期太空飞行中的必要性。

20 世纪 70 年代，通过天空实验室项目，我们得知人类可以耐受数周的零重力环境而不会超过人体耐受阈值。最近 20 年，随着和平

号空间站和国际空间站项目的进行，我们认识到通过一些特定系统的防护措施（如抗阻力锻炼和有氧锻炼），能够满足长达6个月的近地轨道飞行（LEO）所需的生理防护要求。现在，美国国家航空航天局的目光已经转向更远的飞行，包括在月球长期停留以及长达1000天以上的火星飞行或其他远离近地轨道的目标飞行。这些目标又重新引起人们对人工重力的关注，促使有关的学术团体达成共识，公开各自人工重力的研究结果，形成切实可行的旋转飞行器工程设计方案。

生理失代偿并不是威胁人类太空飞行的唯一因素。心理因素（如无聊、隔离、小团体成员间的互动），环境因素（尤其是辐射暴露）以及后勤保障（如空气、水及食品的供给）等，都会随着飞行时间的延长产生愈来愈显著的影响。这些因素中的任意一种都可能对未来载人飞行的时间产生制约。同时，飞行的距离受到所使用推进系统的限制。为实现某个特定推进系统功能的最大化，开展太空探索的国家都会投入大笔的经费开展相应的研究，以便将这四种因素的影响降至最低。最优解决方案不仅要使航天员在任务进行期间能胜任工作，还要保护他们的长期健康，此外，还应该能够利用最小的资源（如重量、体积、航天员乘组时间）非常可靠地实现任务目标。

由于太空飞行所致生理失代偿最根本的原因是重力负荷和力学刺激的消失，所以我认为最佳生理防护手段就是将重力通过离心加速度产生离心力的方式施加于人体。航天器的旋转属于被动施加力的作用方式，而且在航天器任何部位都可以受到加速度作用，无需在基本装置的基础上增加新的重量和体积，所需要的能量输出也仅仅是保证舱体在旋转起始和结束时达到需要的角速度，因此有可能成为最简单有效的防护措施。如果通过合理的设计能将科里奥利加速度的影响降至最小，旋转的航天器舱体对于解决航天员飞行中出现的一些心理问题也有一定的帮助，因为它可以减少一些笨重而不再需要的系统，如厨房中的部分装置、废物收集装置、辅助睡眠装

置、辅助锻炼装置等，使它们和其他物体所占的地方空出来，代之以地面经常使用的物品。间断作用的短臂离心机产生人工重力的设计在旅途中可能有一定的优势，但停留于其他低重力环境（包括月球、火星、火星的卫星、小行星以及其他星球）进行太空探索时则可能存在严重问题，因为在星体表面停留期间只呆在（不停旋转的）舱中是没有任何意义的。

一旦航天机构开始实施人类长期太空飞行计划，必然会遇到人工重力装置的设计以及开展优化研究等问题，以使之更加符合航天员的生理因素和人体因素要求。本书将会给开展人工重力研究的科学家、工程师以及项目管理人员提供帮助。

在本书中，克莱门特（Clément）博士和伯克利（Bukley）博士首次联合对人工重力防护研究的关键性进展和未知领域进行了讨论。由于本书的大多数章节均由当今太空生理和重力研究领域的知名专家撰写，包含了人工重力生理研究中的最新内容，对于那些准备开展人工重力防护研究的人员来说，这是一本在开展工作前不可不看的指导书。与他们联合完成此书是件愉快的事情，我衷心地希望读者您能从此书中受益。

威廉·H·帕洛斯基（William H. Paloski）博士

人体适应与对抗措施办公室

美国国家航空航天局约翰逊航天中心

2006年12月1日于休斯敦

前 言

目前，人类进行太空探索所能达到的最远距离仅限于近地轨道以及短期登陆月球。除了在和平号空间站或者国际空间站上停留较长时间外，飞行时间通常持续数天或几周。对于短期航天飞行任务，失重所产生的负面影响是很小的。但是，一旦我们开始长期月球探索或去往更远距离的星球时，飞行时间将大大延长，此时的失重环境会对航天员产生严重的危害。关于这一点，目前世界各国的航天机构正在开展相应的研究工作以寻求解决之道。长期失重飞行所带来的危害主要是我们并不希望发生的各种生理性适应，这些变化将会妨碍航天员在返回地球时正常的操作和活动。更为严重的危害包括感觉—运动系统和心血管系统的失代偿现象，立位耐力不良，肌肉萎缩和骨矿盐丢失（Clément, 2005, 《航天医学基础》，《空间技术系列丛书》）。

为了对抗失重所产生的负面影响，已经有多种防护措施得以研究，其中的一些已经在航天活动中投入使用，例如肌肉锻炼、增加饮食中的钙含量，以及其他药物治疗等均可用于减轻失重所致的生理变化。这些防护措施通常是针对单一器官或是某一症状，而且往往需要特定的装置。这些措施不仅需要花费大量的时间，还要制定标准严格的个体化实施方案，然而不幸的是，这些防护措施仅部分有效。

人工重力有着完全抵消长期失重飞行所致各种生理变化的可能性。当今使用的各种防护方法仅是部分有效，而人工重力则能够提供针对多个生理系统的综合防护。人工重力以离心或持续的线加速度所产生的惯性力替代重力的作用。实际上，早期太空计划中的载

人火星飞行，就已经建议使用该技术。使用旋转航天器舱体可带来多方面的益处，但部分由于其工艺设计的复杂性以及在重量和能量消耗方面的花费，目前还没能实际应用。

尽管现有的新技术已经能够实现设备的制造，但还有许多未知因素有待于进一步研究，如人体在旋转环境内如何适应，及其在到达一个不旋转环境（如登陆火星）后如何再适应等。这些有关人体的因素将是本书讨论的重点内容。最近的研究资料显示人体可以适应短臂离心机所产生的高转速环境。因此，代替全环境旋转舱体的另外一种方式就是在航天器内安装短臂离心机，产生类似人工重力的效果，这将是更为简洁有效的设计理念。

据我们所了解，目前还没有一本书完整介绍人工重力。这一研究领域的文献多局限于会议论文集和少数杂志文章中。因此，本书是一本及时、新颖、独一无二的从多学科角度开展人工重力探讨的专著。在本书中，第一章主要讨论人工重力的发展历史、基本概念以及在航天飞行中使用人工重力的合理性。同时也给出了目前对人工重力实施的意见，包括在航天器内使用短臂离心机。后面的章节包含了多位专家对使用连续或间断人工重力（大多数在航天器内使用离心机进行研究）的优缺点所开展的研究，对于人工重力改善感觉—运动神经系统、心血管系统以及骨骼肌肉系统的失代偿情况进行了详细的探讨。这些章节概括了目前我们已经了解的失重/超重对人体各系统影响的内容，以及我们目前正在探索的领域。

太空研究揭示了在失重环境中人体多个生理系统将产生可塑性改变。这些系统相互作用，共同产生影响。因此，开展防止失重所致负面效应防护措施的研究，应该具备全面的眼光。本书以3个章节的篇幅对生理系统包括自主神经、免疫系统以及营养学改变中存在的相互作用展开了论述。在最后一个章节中，特别介绍了人工重力使用过程中应该注意的医学、精神学以及安全措施等内容。在本书的结尾部分，我们还提出了开展进一步研究的一系列建议。

本书的各章节相对独立，因此读者在阅读本书的过程中可能会

注意到一些重复的地方，这是针对那些对特定内容感兴趣的读者设计的，以便于其能在阅读某一方面的人工重力研究内容时，同样也能实现全面的了解。

在此，我们衷心希望本书的内容能够激发大家对开展人工重力新研究的兴趣。同时希望在将来的某天，人工重力能在长期航天飞行中得以使用。

古尔斯·克莱门特 (Gilles Clément)

安吉·伯克利 (Angie Bukley)

2006 年 11 月 23 日于雅典市 (Athens)

致 谢

撰写本书的灵感来自于欧洲空间局（ESA）中关于人工重力研究首席工作组的研究内容。该工作组是根据 2004 年 11 月国际空间生命研究计划中的一项内容组建的团队。吉尔斯·克莱门特为该工作组的负责人。对于本书，该工作组进行了为期 1 年的合作编写，于 2005 年 11 月在荷兰的诺德韦克市进行了汇总，确定了本书的大部分内容。我们衷心地对参与编写本书的所有首席工作组的人员，尤其是欧洲空间局提供的大力支持表示感谢！

本书的其他资料来源包括 1965~1970 年由阿什顿·格雷比尔（Ashton Graybiel）博士组织的 5 次美国国家航空航天局论坛以及在彭萨科拉（佛罗里达州，美国）集中召开的关于“前庭器官在太空探索中的作用”会议中的文章和讨论内容。另一个重要来源是由威廉·帕洛斯基博士和拉伦斯·杨（Laurence Young）博士于 1999 年在里格市（坎萨斯州，美国）负责的关于人工重力研究项目，该项目由美国国家航空航天局和国家航天生物医学研究所资助。还有一个来源则是国际宇航科学院（IAA）关于人工重力研究小组所取得的研究成果。本致谢之后附有上述所有会议的会议文集名称。我们对所有与会人员所提供的资料表示感谢，本书也是对他们工作的传承。

在此，我们特别感谢参与本书各章节编写的所有作者，其中的一些作者出现在本致谢之后的照片中，尤其感谢威廉·帕洛斯基博士，他参与了多个章节内容的编写。此外，我们对奥利弗·安杰尔（Oliver Angerer）和米勒德·雷塞克（Millard Reschke）的审稿工作也表示深深的谢意。

本书由克莱门特博士在俄亥俄大学（雅典市，俄亥俄州）工作期间编写完成。他特别表达了对俄亥俄大学拉斯（Russ）工程技术学院化学和分子生物工程系全体员工，尤其是系主任丹尼斯·欧文（Dennis Irwin）先生的感谢。

感谢图卢兹市保罗萨巴蒂尔大学多媒体通讯部的菲利普·陶津（Philippe Tauzin）先生，感谢他作为本书的美编所付出的努力。同样感谢美国国家航空航天局和欧洲空间局提供的大量资料 and 多媒体资料。

威廉·帕洛斯基博士为本书也做了许多贡献。他在美国国家航空航天局约翰逊（Johnson）航天中心开展的关于人工重力预先研究中，集中了来自各行业的生理学家、工程师以及医生，为将来开展研究工作做出了示范。

最后，感谢哈里·布洛姆（Harry (J.J.) Blom）博士和詹姆斯·沃茨（James R. Wertz）博士一直以来的支持与帮助，使得本书能够列入在《空间技术系列丛书》中出版。

本书所参考的会议文集包括：

Graybiel A, 等, 编著. 前庭器官在太空探索中的作用论坛. NASA, 华盛顿, NASA SP-77, 1965.

Graybiel A, 等, 编著. 前庭器官在太空探索中的作用第二届论坛. NASA, 华盛顿, NASA SP-115, 1966.

Graybiel A, 等, 编著. 前庭器官在太空探索中的作用第三届论坛. NASA, 华盛顿, NASA SP-152, 1968.

Graybiel A, 等, 编著. 前庭器官在太空探索中的作用第四届论坛. NASA, 华盛顿, NASA SP-187, 1970.

Graybiel A, 等, 编著. 前庭器官在太空探索中的作用第五届论坛. NASA, 华盛顿, NASA SP-314, 1973.

Paloski W H, Young L R. 人工重力工作组, 城市联盟 (League 市), 坎萨斯州, 美国: 进展与建议. 美国国家航空航天局

约翰逊航天中心和国家航天生物医学研究所，休斯敦，坎萨斯，1999.

Young LR, Paloski W, Fuller C, Jarchow T. 人工重力作为一种工具在生物学和医学中的应用. 总结报告, 国际航天学院研究组 2.2, 2006.

Clément G, 等. 欧洲空间局人工重力首席研究组总结报告. 2006.



上图为 2005 年 11 月 28~30 日参加本书荷兰诺德韦克市集中编写的欧洲空间局人工重力首席研究组成员，他们为本书提供了大量的有价值资料。从左至右分别为：Eric Groen, Gilles Clément, Oliver Angerer, Angie Bukley, Pierre Denise, Guglielmo Antonutto, Marco Narici, Anne Pavy-Le Traon, Guido Ferreri, Jochen Zange, Floris Wuyts, Bill Paloski, Jorn Rittwegger, Joan Vernikos, Pietro Di Prampero

目 录

第 1 章 重力概述	1
1.1 为什么要采用人工重力	1
1.2 火星任务构想	4
1.3 失重的危害	8
1.3.1 骨丢失	8
1.3.2 肌肉萎缩	9
1.3.3 心血管功能失调	11
1.3.4 感觉—运动功能失调	12
1.3.5 调节生理学	14
1.3.6 人的因素	15
1.4 火星表面活动	17
1.5 现在的对抗措施	19
1.5.1 在轨对抗措施	19
1.5.2 对抗措施的研究	23
1.6 人工重力是一种综合对抗措施	25
参考文献	31
第 2 章 人工重力物理学	36
2.1 什么是人工重力	37
2.1.1 定义	37
2.1.2 如何产生人工重力	38
2.2 旋转产生的人工重力	41
2.2.1 重力大小	42

2.2.2 重力梯度	43
2.2.3 科里奥利力	45
2.3 人的因素考虑	48
2.3.1 重力大小	48
2.3.2 转速	49
2.3.3 重力梯度	50
2.3.4 舒适域	51
2.4 设计方法	53
2.4.1 连续人工重力: 旋转航天器	53
2.4.2 间歇人工重力: 内部离心机	60
参考文献	62
第3章 人工重力历史	65
3.1 概念	65
3.1.1 人工重力和航天旅行的历史	65
3.1.2 科幻小说	69
3.1.3 科学研究	76
3.2 人工重力的试验	79
3.2.1 动物飞行试验	79
3.2.2 人类太空经验	82
3.3 地面离心机试验	87
3.3.1 长臂离心机	89
3.3.2 短臂离心机	92
3.3.3 人力离心机	95
3.4 小结	101
参考文献	103
第4章 人工重力的生理学对象: 感觉—运动系统	110
4.1 感觉—运动系统的结构和功能	111
4.2 空间定向	115