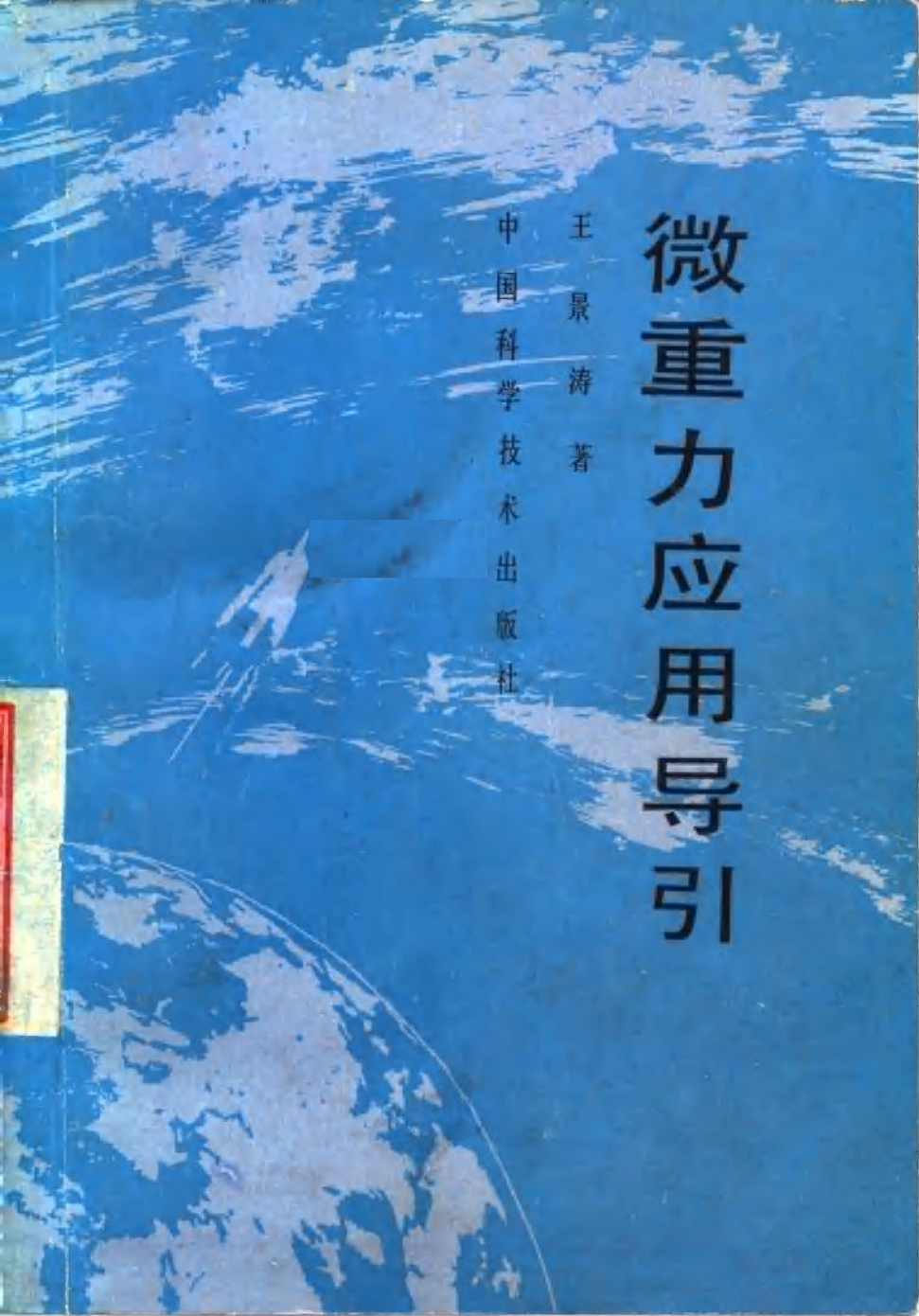




微重力应用导引

王景涛 著

中国科学技术出版社

微重力应用导引

王景涛 著

中国宇航出版社

内 容 提 要

微重力应用是一个正在发展的领域。微重力环境可为材料加工、晶体生长、药物制备以及液体行为和生物的研究提供没有重力干扰的条件,从而获得新材料、新工艺、新理论。通过对比可以改进地面上的工艺技术。本书对这种环境的产生、评价和具体方法,作了引导性的介绍。对空间飞行的发展和微重力应用的前景也作了简单介绍。该领域在我国出现不久,还没有相应的书籍,本书为准备进入这一领域的专业工作者提供一些必要知识,以便较快地深入进去。

本书可供有关专业的技术人员、科研工作者及大专院校教师参考。

微重力应用导引

王 景 涛 著

责任编辑:朱桂兰 刘黎

美术设计:范惠民

技术设计:王子南

*

中国科学技术出版社出版(北京海淀区白石桥路32号)

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

北京燕山印刷厂印刷

*

开本:787×1092毫米1/32 印张:3.875 字数:79千字

1988年11月第1版 1988年11月第1次印刷

印数:1—1,100 册 定价:1.55元

ISBN 7-5046-0066-0/V·3

序

正当国内在空间技术方面奠定了一定基础的时候，利用空间环境来进行科学研究已提到日程上来了。空间环境一个最主要特征是失却了人们在地面上所感受到的重力。在失却重力的条件下，许多物理现象和生物现象在地面上是难以出现的，这种现象有很多方面可以用来为人类和社会进步服务。许多科学工作者已注意到如何把样品、标本或工艺方法带上天去做失重实验，或者在地面上产生类似环境进行试验。做这些实验，有许多特殊的技术问题需要解决，而这些问题往往在日常环境中由于经历不到而易于忽略。

为此，王景涛同志在熟悉空间技术资料的基础上，以较短的时间写了这本书，是为从事微重力实验而过去不大接触这方面问题的人提供参考的，因此是本有用的书。

王大珩

致 读 者

自本世纪60年代末以来,随着载人航天的出现,科学家不断尝试利用飞行中的失重环境,进行一些科学实验。人们发现这种环境对材料加工、晶体生长、制药和生物制品的分离有明显的应用价值,从而揭开了微重力应用的序幕。80年代航天飞机的出现,表明地空间的运输能力有了新发展,从而使利用空间失重环境的现实性增加。人们称这种失重环境为微重力环境。通过天上的和地面的扩大实验,发现了利用这种环境的巨大潜在效益。不但可以直接应用微重力环境开发新产品新工艺,而且还可以通过对比改进地面上的产品和工艺。

我国科学家及时提出了高技术跟踪的建议,其中包括微重力科学和应用,得到了国家的支持,并于1987年利用我国卫星可回收的优点,首次进行微重力实验项目的卫星搭载实验,取得了可喜成果。这个领域的发展价值,在于它和生产发展的紧密联系。只有引起我国有关行业 and 单位的积极参与和对这种应用的追求,才能使在我国刚出现两年的这个领域获得长足、持续的发展。现在的宣传推广工作,远远跟不上发展的需求,当前还没有见到这方面的国内正式出版物。作者认为,若要迅速改变研究工作还大部分局限于与空间事业有关的研究单位里的状况,当务之急是尽早尽快地向社会介绍这个领域。据此,作者向读者提供了这本介绍微重力环

境的书。作者有幸在前几年参加中国科学院长远规划空间技术组的调研工作，在一年多的时间内得益于许多前辈和同行专家的启发，才涉足于这个领域，应当感谢这些同志们的帮助。由于这是个多学科、综合性很强、还没有发展到成熟阶段的领域，此书内容也不全面、不成熟，姑且称作“导引”，希望引出更好的书，更多青年人的关心和兴趣。

前辈科学家王大珩、吕保维教授，从关心这个领域在我国的发展出发，在百忙中用了很多宝贵时间给予作者具体指导和指正，不仅使我感受到诲人不倦的精神，也感受到他们对科学事业发展的责任心。在收集资料等方面得到了杜雅如馆员的大力支持，加速了工作进度，在这里一并表示衷心感谢。

本书可能是有关微重力应用的我国最初的出版物之一，敬希广大读者不吝指正。

作 者 王 景 涛

1988年3月

引 言

重力作用实质上是地心引力，其大小与至地心的距离平方成反比。距离大到一定程度，重力可以忽略不计时，物体将“失重”；所剩余的微不足道的重力，称作微重力。这种微重力环境因离地球太远了，没有多大实际意义。

我们将要讨论的较有实际意义的微重力环境，是在近地面空间的重力场中，人为地创造这样的一种环境。在地面上制造一个系统，使它能按重力加速度的大小和方向运动，系统内部便成为失重环境(见第二章)。例如在自由下落的升降机中，有人将硬币放在身旁，若不加任何力则硬币会飘浮在身旁并不下落，好象失去了重量，人本身也是如此飘浮着，下面将要讲到的落塔就是这种设施。如果这种设施设计精良，在一定条件下，内部所表现的重力加速度比静止时的常重力加速度 g_0 小得很多，小于 $10^{-4}g_0$ 是可能的。这时可以认为落塔内部是微重力环境，其中物体将受到微重力的作用，因而可以进行微重力实验，但不能认为 $10^{-4}g_0$ 是划分微重力的界限。可惜，落塔中可利用的微重力持续时间太短，只有几秒钟，即使如此，仍不失为一种地面实验设施。航天器的轨道飞行，为长时间微重力环境提供了真正的应用基础。当航天器以速度 v 在至地心距离为 r 的轨道上运行时，它的向心加速度恰好等于重力加速度才能维持轨道飞行，即

$$\frac{v^2}{r} = \frac{GM_e}{r^2}$$

其中 G 表示引力常数； M_e 表示地球质量。这种飞行具有落体的同样特点，加速度为重力加速度，不过只改变方向不能落到地面上，因而在航天器内部可以保持长时间失重环境。

或者更简单一些，认为具有速度 $v = \sqrt{\frac{GM_e}{r}}$ 的地球卫星，

它的“离心力”与重力相抵消了。关于轨道飞行的这些说明，含有一个假定，地球和卫星都是对于球心质量分布为对称的球体，所受引力等效于质量全部集中于球心相互间的引力。地球和卫星都不能完全满足这个假定，因之不能完全抵消重力作用。从这个意义上可以认为，航天器中存在微弱重力作用；相对于失重而言，这种作用可称作微重力。航天器在飞行中还会受到其它力的作用，留待第三章讨论。

微重力环境的获得，基本上清除了重力的束缚，可能正在打开一扇特殊实验室的大门。微重力环境的出现或将促进生产技术某些方面的发展，如材料加工、生物制品或药品的分离等等，现在已有苗头。这些特殊环境不是自然存在可以被人类直接利用的，和矿藏相仿，必须努力开发，才能利用，因而也可以看作一种特殊的资源。

完全失重或零重力的环境得不到。只能得到微重力环境；不论精度多么高，剩余加速度水平如何低，还是微重力。微重力环境消除了重力束缚，特别适合于研究流体行为，而对固体影响则较小。

池塘里荷叶上的水珠，大小不同、形状各异、越小越圆。桌面上不大可能有象荷叶上的水珠，却可以有水银珠。在

重力束缚下液滴的形状重力起了较大作用，表面张力较小时就不容易成珠状。重力很小时表面张力变为主要作用。当然还有接触浸湿角的影响。悬浮液滴动力学对于云雾物理、油滴燃烧、天体形成和飞行器液体燃料的管理都有应用价值。过去由于没有可观测的物理依据，对于完全不同的动力学理论难予评价；在微重力环境中可用大模型观察，自然会很有利。浓茶加到水里借助于热对流很快相混，这种对流在微重力环境中基本消失。在天空实验室里，浓茶用了三天的时间其扩散前沿只移动20mm，并观察到界面可能受容器影响成钝锥形。消除了重力便看到了扩散过程。〔1〕在空间的实验，还用同位素示踪的方法证实了熔融的锌服从扩散方程，并测出了扩散系数。热对流的消失，还使圆柱形的冰棒熔化时间约为地球上的6倍，熔化后的水包围着冰棒成球形，形成了一种水的绝热层，由于棒的两端在球状水中离球面近些，两端也比侧面熔化快些。在各种微重力环境中已做了大量熔融液体的研究，在合金的凝固、晶体的生长、生物细胞分离提纯等等方面都有可喜的成果。许多实验还可以在不用容器的情况下进行，这在地面上较难实现。当然，人类的想象力是丰富的，一个世纪以前曾有人用两种不相溶且等密度的液体研究悬浮模型。近代有使实验样品离开容器的电磁悬浮法，与微重力环境相比局限性很大，但这些想象却说明了人们早就打算解脱重力的束缚了。

采用不同的方法产生不同特点的微重力环境，这些内容大都是以近年空间活动为实际根据加以研讨的。这样将会使非空间专业的读者获得一些基本知识，在开发非常不同的学科(如生物和材料)的微重力应用、选择相应的微重力环境时，有所参考。本着这样的宗旨，本书将从回顾重力场的知

识开始，给出一些预备知识，然后叙述微重力产生的依据以及在同样依据下不同运动形式所对应的不同方法。然后以大气阻力为主介绍影响微重力环境精度的主要因素，产生微重力的必要计算方法。本书将用较大篇幅讨论除轨道飞行以外的产生微重力环境的具体方法，这是提供给读者的主要内容。微重力应用人员没有必要研究轨道飞行方法，而有必要在宏观或微观角度对轨道飞行以外的较简单些的方法，作些不同程度的了解。

本书不包括各种专业的具体应用内容。现在微重力科学和应用还在发展之中，还没有见到一本微重力物理学的系统而权威的图书。近年在国际上出现了微重力应用的大量文献，国内已开始出现，读者可根据各自的学科和途径去查找。

目 录

引 言

第一章 重力场和微重力环境	1
1.1 对重力场的认识	1
1.2 重力场的有关特点	3
1.2.1 有心力	3
1.2.2 保守力场	4
1.3 重力的作用	5
1.4 微重力环境的需求和意义	8
第二章 在重力场中获得微重力环境	13
2.1 物理依据	13
2.1.1 自由落体	13
2.2 产生失重环境的不同运动形式	16
2.2.1 抛射运动	16
2.2.2 垂直上抛运动	18
2.2.3 轨道运动	19
第三章 微重力来源和一些估计	22
3.1 引言	22
3.2 大气和微重力	24
3.2.1 关于大气	24
3.2.2 大气阻力	26
3.2.3 大气阻力的参考估计	34
3.3 太阳光压作用	38

3.4	飞行器的体效果	39
3.5	脉动干扰	44
第四章	获得微重力的非轨道方法	46
4.1	引言	46
4.2	利用火箭获得微重力环境	49
4.2.1	微重力持续时间	50
4.2.2	微重力水平	56
4.2.3	技术系统	59
4.2.4	应用特点和局限	61
4.3	利用飞机做微重力实验	63
4.3.1	微重力持续时间和精度	64
4.3.2	一般讨论	68
4.4	落塔和落管	69
4.4.1	自由落体法可获得的微重力时间和精度	70
4.4.2	落塔	73
4.4.3	落管	87
第五章	轨道飞行的发展和微重力应用的展望	95
5.1	概述	95
5.2	轨道飞行的发展	95
5.3	空间基础设施	97
5.4	条件和展望	99

第一章 重力场和微重力环境

1.1 对重力场的认识

人们不熟悉失重环境，而熟悉重力场环境。对不熟悉的失重环境的认识，从回顾重力场环境入手要更方便些。

对重力场的认识，可追溯到300多年以前。从哥白尼(1473年生)到牛顿(1642年生)近200年的时间内，经过许多科学巨人在天体运动方面的研究，尤其是约翰尼斯·开普勒(1571~1630)提出了天体运动三定律之后，人们对天体运动规律有了较精确的描述，从而在动力学方面提出了尖锐的问题：是什么样的力控制这些运动？例如从地球上看来，月球有一个近圆形的轨道，因此，月球必定受到一个向着地球的力和这个力产生的加速度。大家都熟悉“苹果落地”的问题，可将月球运动和苹果落地联系起来，实际上它们是同一个动力学问题。正是牛顿把前人在天文学和天体力学上的发现，汇集起来，加上他自己的发现，融合成引力定律，这一定律在天文距离上和在地球上同样有效。两个质量分别为 M 和 m 的质点，相距 R 时，其间的引力为

$$F = - \frac{GMm}{R^2} \quad (1.1)$$

其中常数 $G = 6.67 \times 10^{-11}$ 米/千克·秒²，称作万有引力常

数。这是大家熟悉的引力与距离平方成反比的万有引力定律。如从行星周期运动的角度考察，质量为 m 的行星将存在

向心加速度 $a = -\frac{4\pi^2 R}{T^2} = -\frac{4\pi^2 K}{R^2}$ ，其中 R 为轨道半径，

T 为运行周期， K 为开普勒第三定律确定的引力因子。那末，向心力应为

$$F = -\frac{4\pi^2 K}{R^2} m \quad (1.2)$$

式(1.1)与式(1.2)中的 m 如果相等，且可以认为行星运动的质量两方面都集中于质心，则比较(1.1)与(1.2)式后有 $4\pi^2 K = MG$ 。于是我们可以认为 $4\pi^2 K$ 为一引力源，其大小与 M 成正比，即取决于所含物质的量。如 $M = M_s$ ，取为太阳的质量， $4\pi^2 K_s = M_s G$ 代表太阳引力源；如 $M = M_e$ 取地球质量， $4\pi^2 K_e = M_e G$ 表示地球引力源。

地球并非质点，但可近似看作质量分布对称于球心的球体。在此情况下，它所产生的引力，等效于质量全部集中在球心的质点所产生的引力。在地球表面以上，至地心距离为 R 处，有可近似看作质点且质量为 m 的物体，它受到的引力可称作重力，其大小为

$$F = \frac{M_e G}{R^2} m = mg \quad (1.3)$$

式中 g 称作重力加速度。令 R_e 代表地球平均半径，则

$$F = \frac{M_e G}{R_e^2} m = mg_0$$

$$g_0 = \frac{M_e G}{R_e^2} \approx 9.8 \text{ 米} \cdot \text{秒}^{-2} \quad (1.4)$$

g_0 称作常重力加速度或常 g 值。在地球表面附近一定范围内, 为方便计, 近似认为重力场为均匀场, g 值为常数。若 $R \gg R_e$ 则 g 值和 R 的平方成反比, 即重力加速度

$$g = \left(\frac{R_e}{R} \right)^2 g_0 = \frac{M_e G}{R^2} \quad (1.5)$$

$$g R^2 = M_e G$$

至地心两个不同的距离 R_1 和 R_2 处, 重力场的加速度比值为

$$\frac{g_1}{g_2} = \left(\frac{R_2}{R_1} \right)^2 \quad (1.6)$$

即与距离平方成反比。

在地球表面以外有限远处任一点, 都有确定的重力加速度值, 这就形成了地球重力场。处于地面以外 R 处, 重力加速度为 $g = g_0 \left(\frac{R_e}{R} \right)^2$ 。如果在此处有某系统, 其内部的视重力加速度小于这个值, 即 $g < g_0 \left(\frac{R_e}{R} \right)^2$, 人们就说失重了, 也称作低重力; 如果 $g = 0$ 那就是完全失重, 或失重; 如 $g \ll g_0 \left(\frac{R_e}{R} \right)^2$, 也可以称作微重力。微重力常常是与特殊环境应用相联系, 失重常常用于描述低于正常重力的现象。虽然在称谓上有些含混, 但不妨碍内容的阐述。因而在以下的讨论中, 以行文的方便交互使用这些称谓, 不再作说明。微重力环境, 还有其它含意, 以后将作进一步的解释。

1.2 重力场的有关特点

1.2.1 有心力

如果选取地心为坐标原点, 从原点向外的任一方向为矢

径的方向，并将矢径 $\mathbf{r}$ 的单位矢量记作 $\hat{\mathbf{r}}$ ，则(1.5)式写成矢量形式为

$$\mathbf{g} = -g_0 \left(\frac{R_e}{R} \right)^2 \hat{\mathbf{r}} \quad (1.7)$$

重力记作

$$\mathbf{F} = m\mathbf{g} = -mg_0 \left(\frac{R_e}{R} \right)^2 \hat{\mathbf{r}} \quad (1.8)$$

从(1.8)式可知，当质量 m 为单位质量时，所受到的重力就是 $\mathbf{g}$ 值；单位质量在不同位置所受到的重力的方向，都是加速度 $\mathbf{g}$ 的方向，指向地心。这些不同位置 $\mathbf{g}$ 值的集合，就是重力场，且为有心力场。牛顿在解决引力规律的同时，曾证明了质量分布为球对称的球体外任一点的引力，等于质量集中于质心(即球心)的质点的引力。地球可近似看作均匀球体，以上各项公式均可用于地球重力场。

为了有些具体概念，给出几个 g 值的具体数字。离地面400千米时约为8.6米/秒²，在月球轨道附近为 $10^{-4}g_0$ ，重力梯度在230千米时，每升高1米，重力加速度约减少 2.77×10^{-5} 米/秒²。如果有一人造飞行体，沿 $\mathbf{r}$ 方向的长度为5米，则下部比上部的重力加速度大0.00015%。[2]

1.2.2 保守力场

在重力场有心力作用下，力 $\mathbf{F}$ 与矢径 $\mathbf{r}$ 共线，则 $\mathbf{r} \times \mathbf{F} = 0$ 。力矩为零，则动量矩为一恒矢量。动量矩方向不变，则矢径 $\mathbf{r}$ 只能在与动量矩垂直的平面内运动。不难证明，在有心力作用下的运动将是平面运动，用两个坐标变量即可描述。

在平面极坐标 (r, θ) 系中旋度 $\nabla \times \mathbf{F} = 0$ 的分量形式为

$$\frac{\partial F_\theta}{\partial r} - \frac{1}{r} \frac{\partial F_r}{\partial \theta} = 0$$