

失重

从跳楼机到空间站，弄清「飘起来」这件被误解最深的事

王建硕

费曼式写法 · 由多个 AI 代理撰写与互相审校

导读

从跳楼机到空间站，弄清「飘起来」这件被误解最深的事

先别想着太空，也别想着宇航员。先想一个画面：

你走进电梯，门关上，缆绳「啪」地断了。电梯带着你直直往下掉。生死关头，你猜那一两秒里你会经历什么？

答案出乎意料：在坠落的那几秒里，你会**飘起来**。脚离开地板，松手的手机悬在你面前，你会体验到宇航员在空间站里每分每秒体验的东西——失重。同样的原理，一个要命，一个浪漫。

这本书就讲这件事：**失重到底是什么？**

几乎所有人都以为答案是「太空里没有引力」。但只要算一笔最简单的账就会发现不对：空间站离地才 400 公里，地球的引力在那里还有地面的将近九成——引力明明在，人却飘着。这个矛盾不是细节，它是理解失重的正门。推开它，里面是一连串层层递进的惊奇：

- 为什么你感觉到的「重量」，其实不是引力，而是地板顶你的那股劲？（第一章）
- 为什么爱因斯坦说，一个坠落的人感觉不到重量，是他「一生中最快乐的思想」？（第二章）
- 为什么绕地球飞行 = 永远砸不中地面的坠落？（第三章）
- 为什么锤子和羽毛在没有空气的地方同时落地，而这正是失重之所以可能的根基？（第四章）

往后还有更实际的：人类怎么用一架外号「呕吐彗星」的飞机在地球上造出 22 秒失重（第五章）；空间站里的失重为什么不叫「零重力」而叫「微重力」，那剩下的一丁点力从哪来（第六章）；失重怎样扰乱人的内耳、体液和骨骼（第七章）；为什么蜡烛在太空里烧成一个安静的蓝色圆球（第八章）；以及，我们能不能靠旋转给自己造一个「下」来（第九章）。

最后一章，我们会回到爱因斯坦，把整本书翻到最底：在广义相对论的视角里，失重不是异常状态，**站在地球上的我们才是异常的**——是大地每时每刻在推着我们，让我们偏离了那条最自然的运动轨迹。失重才是自由。

这本书不要求你会任何公式。它只要求你愿意跟着一个简单的画面往下想：一部断掉缆绳的电梯。牛顿用它统一了天上和地下，爱因斯坦用它掀翻了引力本身。读完这本书，你下次看宇航员在镜头前飘来飘去时，看到的将不再是奇观，而是一条三百多年前就开始推理的因果链的最后一环——而那部想象中的电梯，此刻正带着所有读者，安静地往下掉。

第一章 · 太空里不是没有引力

问一个看起来傻的问题：国际空间站里的宇航员，为什么飘着？

十个人里有九个会答：「因为太空里没有引力啊。」这个答案错得很彻底，而且错得有意思——错的这一步，正好就是这本书要翻过来的那块石头。

先算一笔账

国际空间站离地大约 400 公里。听起来很远——北京到济南的距离。但放在引力上，这点距离几乎不算什么。

引力怎么随距离变？三百多年前牛顿就写下了答案：两个物体之间的引力，跟距离的平方反比——大白话说，就是「距离翻一倍，引力不是少一半，而是变成四分之一」。写成式子是 $F = GMm/r^2$ ，其中 r 是你到地心的距离， G 是一个固定常数， M 和 m 是地球和你的质量。

注意式子用的是「到地心」的距离，不是「离开地面」的高度。地球半径约 6370 公里。你站在地面上， r 是 6370 公里；你上了空间站， r 变成 $6370 + 400 = 6770$ 公里。引力变成原来的 $(6370/6770)^2 \approx 0.89$ 。

大白话

大白话：在空间站的高度，地球的引力还有地面上的**将近九成**。一个体重 70 公斤的人飘在空间站里，地球还在用相当于地面 62 公斤重的力气拉着他。

九成引力还在，人却飘着。这就是贯穿这本书的问题：**失重到底是怎么回事？**

一个你用脚就能做的小实验

下次进电梯，手里握一串钥匙，拎在身体前方，别碰任何东西。电梯启动下行的那一瞬间——仔细感觉——钥匙好像轻轻「浮」了一下，你也觉得身体轻了一点。

那一两秒里，电梯地板在向下加速离开你，地球拉你的力气并没有变（高度才降了几厘米），可你感觉到「轻」了。反过来，电梯减速停稳前的那一瞬，你会觉得身体发沉，膝盖

要弯一下。

也就是说：**你感觉到的「重」，根本不是引力本身，而是地板顶住你的那股劲。**引力拉你向下，地板推你向上，两股力把你夹在中间，你的骨骼、内脏、内耳全都绷在这对抗里——这套对抗，就是「重量感」的全部内容。地板的劲一变，重量感就变，哪怕引力纹丝不动。

把电梯推到底

顺着这个思路往下推：如果地板的劲彻底消失呢？

想象电梯的缆绳断了（别怕，纯思想实验），电梯和你以完全相同的加速度一起往下掉。地板不再顶你了——它自己也在往下掉，掉得跟你一样快。这时钥匙脱手，不会落到地板上，而是停在你面前半空。你跳一下，会一直「升」到电梯天花板。

在那部下坠的电梯里，你就是宇航员。引力一点没少——正是引力在拽着你们一起加速——可你的感觉、钥匙的行为、电梯里的整个小世界，都和太空舱里一模一样。

这就是失重的第一个真相：**失重不是引力消失了，而是「支撑」消失了。**你在地球上每分每秒感觉到的重量，其实是地板、椅子、大地死扛着不让你往下掉的那份力。一旦没有东西扛着你，你就自由下落；一旦你身边所有东西陪你一起自由下落，失重就出现了。

那空间站凭什么一直不掉下来？

细心的读者已经皱眉头了：电梯往下掉，几秒就到底；空间站「往下掉」，怎么一掉就是二十多年？

问得对，这正是下一章要拆的东西。先给一句预告：空间站确实一直在掉，一刻没停过——它只是一边掉一边飞，飞得足够快，快得每次要撞上地球时都「错过」了。这套「永远砸不中地面」的把戏，牛顿三百多年前就想明白了。

而「掉下去的电梯」这个画面，值得在脑子里多留一会儿。它不光是个好类比——爱因斯坦后来说，正是这个画面让他灵光一现，被他称作「一生中最快乐的思想」。那是第二章的事。

第二章 · 下坠的电梯

1907 年，爱因斯坦在伯尔尼专利局上班，日常工作是审查电磁专利。有一天他后来说，一个念头突然击中了他，是「我一生中最快乐的思想」：

如果一个人自由下落，他感觉不到自己的重量。

就这么一句。不是方程，不是实验，是一个画面。但这个画面后来长出了广义相对论——二十世纪物理学最深的那个理论。这一章就把它掰开。

把电梯变成实验室

上一章说了：缆绳断掉的电梯里，你和电梯一起自由下落，钥匙松手就悬在半空，你感觉失重。爱因斯坦往前多问了一步——他问的不是「感觉」，而是**物理规律本身**：

把你关进一个没有窗户的电梯轿厢，密封，隔音，你完全看不到外面。现在考虑两种情形：

- 情形 A：轿厢悬在太空深处，远离一切星球，没有任何引力。它是静止的。
- 情形 B：轿厢在地球附近，缆绳断了，正在自由下落。

你在轿厢里做任何实验——松手放苹果、抛小球、倒水、荡单摆。有没有**任何一个实验**能告诉你，自己处在 A 还是 B？

答案是没有。在 A 里，苹果松手后原地悬着（没东西拉它）；在 B 里，苹果和轿厢一起加速下落，相对轿厢也是原地悬着。小球、水、单摆，全都无法区分这两种处境。爱因斯坦宣称：这不是我们实验做得不够精，而是**原则上就分不出来**——自由下落的密封舱，和无引力的深空，在物理上是同一个世界。

大白话

大白话：失重不是「引力暂时关了」的假象，它和「根本没有引力」货真价实、一模一样。你在失重时身体轻飘飘的那种真实感，就是证据。

反方向也成立。还是那个密封轿厢：

- 情形 C：轿厢静止放在地球表面。
- 情形 D：轿厢在空无一物的深空里，底部一台火箭发动机点火，以 9.8 米每二次方秒的加速度「向上」推。

在 D 里，地板加速迎上来撞你的脚，你松手的苹果被地板「追上」——舱内看，就是苹果直直落地，轨迹、快慢和地球上分毫不差。弹簧秤、抛物线、压在心口的那份重量感，全都复制出来。所以等效原理——用大白话讲，「站在星球上」和「被火箭以 1 个 g 推着走」，关在黑盒子里无法区分——是双向的：**失重 = 无引力，有重量 = 被加速**。

为什么这是「最快乐」的思想

这个等价关系听起来像文字游戏，它的威力在于：它给爱因斯坦提供了一台**思想模拟器**。凡是引力场里不好算的问题，都可以换成「没有引力、只有加速」的版本，用简单的运动学算出来，再宣布「所以引力场里也是这样」。

最著名的两个战果：

光线会被引力掰弯。在情形 D 的加速舱里，从一侧舱壁水平射出一道光。光穿过舱的这段时间里，舱已经向上加速窜了一截，所以光斑落在对面舱壁的位置比出发点**低**——舱内的人看到光线向下弯了。等效原理说，地球表面的引力舱里也一样：引力会弯曲光线。1919 年日全食时爱丁顿率队观测星光掠过太阳边缘的偏折，全世界报纸头条就此炸开。

引力会让钟变慢。同样是加速舱：舱底的发报机每秒嘀嗒一次，信号传到舱顶接收器时，舱顶已经加速到比发出时更快的速度，多普勒效应让舱顶觉得嘀嗒「变慢了」。翻译回引力场：低处的钟比高处的钟走得慢。这个效应今天就在你手机里——GPS 卫星的钟每天要比地面快约 38 微秒，不修正的话，导航一天就能漂出十来公里。

回到失重

等效原理把「失重」从一个游乐场项目，提升到了物理学的地基位置。它说：

自由下落的人觉得自己没有重量，这不是错觉，而是**他是对的**。真正「不自然」的状态反而是我们习以为常的这个——站在地面上。是大地的支撑每时每刻在推着我们，把我们推出了

那条最省事的运动轨迹，我们才感觉到重量。

换句话说，全书第一章的问题翻了个面：与其问「宇航员为什么没有重量」，不如问「我们为什么有重量」。答案是：因为我们被地板拦着，没掉下去。

但细心的读者还会问：地球的引力四面八方都指向地心，不是完全均匀的——近地心的一头拉得重一点，远的一头轻一点。密封舱如果做得足够大、实验足够精密，A 和 B 真能完全分不出来吗？这个裂缝里藏着「微重力」和潮汐力的故事，是第六章的事。眼下先解决第一章留下的悬念：空间站一直往下掉，怎么就掉不到地面？

第三章 · 永远砸不中的炮弹

第一章留下一个悬念：失重就是自由下落，空间站时刻都在往下掉——那它凭什么掉了二十多年还没落地？

答案牛顿自己就想出来了，还配了一幅插图，收在他晚年写成的《宇宙体系论》里——一门想象出来的大炮。

牛顿大炮

想象一座高到冲出大气层的山，山顶架一门大炮，水平方向开炮（这正是牛顿那幅插图里的构图）。炮弹飞出去，一边往前飞，一边往下掉——平抛运动，划一道弧线落地。

火药加倍，炮弹飞得更远，落地的弧线更长。再加倍，更远。牛顿问：一路加下去，会发生什么？

关键在一个平时注意不到的事实：**地面是弯的**。地球是球，你往前跑 8 公里，脚下的地面就往下「沉」了大约 5 米。而任何自由下落的物体，第一秒也正好掉大约 5 米（4.9 米，重力加速度 $g = 9.8$ 米每二次方秒的一半——匀加速运动，距离是一半的加速度乘时间平方）。

于是牛顿看到了那个精巧的对口：如果炮弹飞得**足够快**——快到每秒约 8 公里——那么它每秒钟往前飞 8 公里，同时往下掉 5 米；可它飞过的那段地面，也正好往下沉了 5 米。炮弹和地面之间的距离，**永远不变**。它一直在掉，地面一直在「躲」，它永远砸不中。

大白话

大白话：绕地球飞行 = 朝地面坠落，但地球是圆的，地面弯下去的速度正好等于你掉下来的速度。所谓轨道，就是一场永远扑空的坠落。

这门炮只要打得够快，炮弹就会绕地球一整圈，从背后飞回山顶，然后继续第二圈、第三圈——只要山顶之上没有空气挡路。炮弹里如果坐着一个人，他和炮弹以完全相同的方式一起掉、一起飞，失重。这就是宇航员漂浮的完整答案：**不是没引力，是整艘飞船带着他一起，在做一场永不落地的自由下落。**

每秒 7.7 公里的精确账

空间站的高度（约 400 公里）上，维持圆形轨道需要的速度约每秒 7.7 公里——步枪子弹的十倍，绕地球一圈只要 90 分钟左右。宇航员每天看 16 次日出日落。

这个数不是乱给的。道理是这样的：圆周运动需要一个不断把物体「往里拽」的力，拽得越急，弯转得越急。在 400 公里高度，地球引力能提供的「拽力」是固定的（约地面的 89%），能拽住的正好就是每秒 7.7 公里的飞行物。飞得慢，拽多了，就往内掉；飞得快，拽不住，就往外飘。半径定了，速度就定了，一个萝卜一个坑——月亮的轨道半径是空间站的 60 倍，所以月亮只需要每秒 1 公里，一圈花 27 天多。

那为什么还要燃料？

常有人问：既然轨道是「永远掉不下来」的，为什么新闻里老说空间站要「变轨」「抬升高度」，为什么退役卫星会再入大气层烧毁？

因为牛顿大炮的前提——山顶冲出大气层——在现实中只满足了一半。400 公里高空不是真空，还有极其稀薄的大气，每立方米只有地面大气密度的万亿分之一量级。稀成这样，撞上每秒 7.7 公里飞来的空间站，经年累月也是实实在在的刹车。空间站的高度平均每天往下掉几十米到上百米不等（太阳活动强时大气膨胀，掉得更快），所以每隔一段时间要靠发动机「推一把」，把高度补回来。

这个细节其实是对本章道理最好的反证：**轨道不是「到了就永远安全」的状态，而是持续下坠的动态平衡**。刹车片（稀薄大气）蹭掉一点速度，「永远砸不中」的对口就松一档，掉下来的弧度就陡一点。速度补回来，对口重新咬上。宇宙里没有「飘着不动」这回事，只有「掉得刚好错过」。

月球、苹果，和同一种下落

牛顿大炮真正石破天惊的地方，不在太空，在于它宣布：**月亮绕地球转，和苹果从树上掉下来，是同一种运动**。月亮每秒钟都在朝地球「掉」——掉出的弧度把直线路径掰成圆——只是它和炮弹一样，永远掉不完。天上的循环和地上的坠落，用的是同一条定律、同一个 G。在那之前，人类默认天上有一套完美法则、地上有一套苟且法则；牛顿把两套合成了一套。

所以回到失重：宇航员和苹果和月亮，都在自由下落。区别只在一件事——苹果没有横向速度，掉两秒就撞地；月亮和宇航员有足够大的横向速度，掉到地老天荒也掉不完。

不过这套图景还欠一笔账：凭什么炮弹和炮弹里的人、以及舱里的每个零件、每滴水，都掉得「一模一样快」？如果人和船掉得不一样快，失重立刻穿帮。这个「万物下落一样快」的性质，是整座大厦最深处的那块基石——它有个名字叫等效原理的另一半，下一章来拆。

第四章 · 铁球与羽毛

前面两章的推理全靠一个没明说出口的假设：飞船、宇航员、舱里的水和工具，**全都以一模一样的快慢往下掉**。只要掉的速度有丝毫差别——比如人比船掉得快一点点——人的脚就会慢慢「沉」向地板，失重当场穿帮。

这个假设靠谱吗？答案是：靠谱到人类测量精度的极限。但它为什么成立，曾是物理学最深的谜之一。这一章讲这个谜，从一根羽毛说起。

月球上的那一扔

1971 年，阿波罗 15 号宇航员大卫·斯科特站在月球表面，左手一把地质锤，右手一根猎鹰羽毛。同时松手——锤子与羽毛并排下落，同时砸在月壤上。他对着镜头说：「伽利略先生的发现是对的。」

在地球上做这个实验，羽毛会被空气托着慢慢飘，锤子直直砸下去。所以你我都「知道」：重的东西掉得快。可这是空气捣的鬼。抽掉空气（月球上天然没有），万物——锤子、羽毛、保龄球、一粒灰——全都以完全相同的加速度下落。

这就是失重之所以可能的全部根基：**引力不在乎你是谁，它对一切东西一视同仁地加速**。正因为飞船和宇航员受到完全相同的加速度，他们才会永远相对静止地「飘」在一起。

两个「质量」的巧合

伽利略发现的是现象，把现象顶到「谜」这个高度的，是下面这个观察。物理学里「质量」其实出现在两个八竿子打不着的地方：

- **惯性质量**：你推一个东西，它有多「懒」、多不情愿改变运动状态。 $F = ma$ 里的那个 m 。它度量的是「抗拒」。
- **引力质量**：一个东西被地球拉得多狠。万有引力公式 $F = GMm/r^2$ 里的那个 m 。它度量的是「受吸引的程度」。

一个是「推它有多费劲」，一个是「地球拉它有多用力」——逻辑上这完全是两回事，没有任何先验理由说它们相等。就像「一个员工的工资」和「一个员工的饭量」，碰巧成比例，

你肯定要问为什么。

但把两个式子拼在一起：引力提供的力 $= GMm_{\text{引}}/r^2$ ，这个力产生的加速度 $= \text{力} \div \text{惯性质量}$ 。如果 $m_{\text{引}}$ 恰好等于 $m_{\text{惯}}$ ， m 上下一约——**加速度里就不含 m 了**。一切物体，不论铁球还是羽毛，下落加速度完全相同。万物同速下落这个实验事实，等价于「两种质量严格相等」。伽利略在斜塔上（如果那故事是真的）看到的，其实是这个深层等式的一角。

人类最较真的一场比赛

这个相等有多严格？一代代实验物理学家跟它死磕了一百多年：

- 1889 年起，匈牙利物理学家厄缶（Eötvös）用扭秤——一根细丝吊着的横杆，两端挂不同材料——比较地球引力对它们的拉扯，验证到小数点后 9 位没发现差别。
- 后来的实验一路把精度推到 10^{-13} 。
- 2016 年发射的法国 MICROSCOPE 卫星，干脆把实验搬上太空：两个同心圆柱，一个钛一个铂铑合金，在同一条轨道上自由下落两年，盯它们有没有一丝丝的相对漂移。2022 年公布的结果：在 10^{-15} 的精度上，没有差别。

10^{-15} 是什么概念？相当于测量北京到上海的距离，误差不超过一个细菌。到人类能造出的最精密仪器为止，「万物下落一样快」连一个例外的影子都没有。

大白话

大白话：「推起来费劲的程度」和「被地球吸的程度」，在所有已知实验里都是同一个数，精确到小数点后 15 位。这不是巧合该有的样子——它一定是某种深层规律的露出来的衣角。

爱因斯坦掀了桌子

牛顿体系里，这个相等只能记成「神奇的巧合」。爱因斯坦不满意，他的做法是把巧合升级为公理：干脆假定「引力效应」和「加速效应」在本质上就是一回事（第二章的等效原理），那么万物同速下落就不再是巧合，而是必然——如果所有物体走的是时空里同一类「最直的路」，质量自然插不进嘴。

在这个新图景里，「羽毛和锤子同时落地」不再需要解释，需要解释的反而是我们平时为什么看到它们不一起落地（空气阻力）。视角整个翻了过来——这个翻法，第十章收尾时还会再翻一次。

所以给前两章补完最后一块砖：宇航员在舱里漂浮，靠的是「舱与人下落完全一致」，而这背后是小数点后 15 位的铁律。失重漂浮不是特技，是宇宙最深对称性之一的日常演示——每次航天员在镜头前飘来飘去，都在免费重演那颗卫星专门上天做的同一个实验。

反过来用：失重是可以「造」的

既然万物同速下落，那只要让「实验室本身」自由下落，里面的东西就集体失重。用不着去太空——一架飞机、一座塔，就能在地球上造出几十秒纯正的失重。这是宇航员训练、影视拍摄和大量实验的真实做法，下一章去坐一坐那架绰号「呕吐彗星」的飞机。

第五章 · 呕吐彗星

太空太远，失重又太有用。于是人类想出一个笨办法，笨得很漂亮：既然失重 = 自由下落，那就在地球上造一段「可控的自由下落」。要么造一根管子往下掉，要么——让整架飞机往下掉。

抛物线飞机：把失重切成 25 秒一份

NASA 有架著名的改装加油机 KC-135，绰号呕吐彗星——名字的来源你马上会懂。它飞一种特殊的剖面：

1. 先平飞，然后猛地拉杆爬升，机头抬到约 45 度。这一阶段乘客被压进座位，体验约 1.8 个 g——体重快要翻倍。
2. 爬到顶端附近，飞行员把油门收到只够抵消空气阻力，让飞机沿着一条精确的抛物线「扔」出去——飞机本身在做自由下落，像一颗被斜抛出去的炮弹。
3. 接下来约 22 到 25 秒，机舱里的一切集体失重：人浮起来，水变成飘在空中的球。
4. 然后飞机改出、拉平（又是 1.8 g），掉头，再来一次。一趟飞行飞三十到四十个抛物线，凑出十几分钟的总失重时间。

注意第二步里那个细节：油门不是全关，而是**收到正好抵消空气阻力**。如果全关，阻力会让飞机比「真自由下落」慢半拍，舱内就不是干净的零 g，而是百分之几的残差——第四章说了，失重的纯度取决于「所有东西一起掉」，阻力是那个要剔除的捣蛋鬼。所以抛物线飞机的失重段，本质是飞行员用油门追着「自由下落」这条理想曲线贴上去。

大白话

大白话：飞机先把你抛上天，然后自己也跟着抛物线一起「掉」，机舱就成了下坠电梯的加强版。区别只是这部「电梯」22 秒后要拉起来，喘口气再掉。

「呕吐彗星」的名字来自统计数据：大约三分之一的乘客会吐，三分之一难受但不吐，三分之一没事。原因和第七章要详讲的机制有关——内耳的平衡器官在失重里彻底错乱。训练教

官有句老话安抚新人：第一次吐了不丢人，第五次还吐才需要担心。甚至有一种说法流传于学员之间：有人吐着吐着，突然意识到自己正在飞，恶心感瞬间退掉一半。

这套装置用途极大：宇航员上天前在这里预习喝水、吃饭、修设备；电影《阿波罗 13 号》里那些飘浮镜头，是真的在呕吐彗星里一段一段拍出来的，23 秒一条，600 多条攒成一部电影；科学实验在这里做先期筛选——不行的方案，根本轮不到上空间站。

落塔：失重的极简主义

嫌飞机贵，还有更朴素的方案：一根高塔，抽成真空，让实验舱从塔顶直直掉下去。

德国不来梅大学有座 146 米高的落塔，真空管 110 米。实验舱自由下落的 4.7 秒里，里面的仪器享受的是比空间站某些工况还干净的失重——没有飞机发动机的振动，没有大气颠簸。2004 年后它加装了弹射模式：从塔底把舱垂直抛上去，升上去再掉下来，失重时间翻倍到 9 秒多。

4.7 秒能干什么？比你想象的多。燃烧科学家盯一团火焰的起燃；流体物理学家看一颗液滴怎么振荡；基础物理小组让两团原子云自由下落，比它们的下落差——第四章那种「万物同速下落」的检验，有一大批就是在落塔里做的。4.7 秒够物理定律原形毕露了。

三档「地面失重」排一排：落塔，几秒钟，质量最高；抛物线飞机，二十几秒一次、一趟攒十几分钟，能上人；空间站，无限续杯，但要先把人送上去。科学的常规路线是倒着走：先在塔里证明原理，再上飞机调设备，最后才争取船票。

一个意想不到的副产品：月亮和火星的失重

抛物线飞机还有个妙用：把抛物线「改扁」一点，舱内得到的就不是零 g ，而是任意中间值。飞一种剖面，得到月球重力的六分之一 g ；换一种，得到火星的约三分之一 g 。NASA 用它测试月球车怎么开、宇航服怎么走路——那些「月球上会不会一蹦三米高」的问题，在飞机上就能先得到一半答案。

这也再次印证了全书的主题：「失重」和「几分之几的重量」，在物理上没有分界线，只是「自由下落得够不够彻底」的连续谱。飞船跟着理想轨道贴得多紧，失重就有多纯——而真实的空间站，贴得再紧也还是有瑕疵。那点瑕疵叫什么、从哪来、为什么科学家又爱又恨，是下一章「微重力」的故事。

第六章·微，不是零

科学家说到空间站环境时，几乎从不说「零重力」，他们说微重力——意思是「剩下的大约百万分之一的 g 」。这不是谦虚，也不是术语癖。那剩下的百万分之一，来自几个非常具体的地方，而且每一个都能教你一点物理。

第一笔残差：大气在拖船

第三章说过，400 公里高空还有极稀薄的大气，像一块永远轻踩着的刹车，让空间站高度每天往下掉几十上百米。同样这块刹车也造成了微重力：站在舱内看，**船在减速，你没有**。船身被大气蹭着往后拖，舱里飘着的你和物体不受这个阻力，于是你们相对船舱缓缓向「船头」方向漂移。

这不是理论推演，是日常管理：舱里的东西不固定好，几个小时后就集体「迁徙」到迎风一端的舱壁上。宇航员把笔记本随手一放去找，第一反应是顺着气流方向去下游舱壁的滤网上翻——那里是失重世界的「沙发缝」，全世界的空间站杂物最后都堆在那儿。万有引力和大气阻力联手造出的这第一笔残差，大约在 $10^{-6} g$ 量级。

第二笔残差：引力场不是均匀的

第二章的密封舱等价实验，我们埋了个伏笔：如果舱足够大、仪器足够精，自由下落舱和深空无引力舱**其实分得出来**。裂缝在引力的方向和不均匀上。

地球的引力不是「处处竖直向下」的均匀场，它从四面八方**指向地心**，而且离地心越远越弱。空间站虽小，也横跨了几十米的高度差和横向宽度：

- 比船舱中心**低**一米的地方，引力强一点点——悬在那里的物体受到比船更「急」的加速，会相对船舱往下漂；
- 比中心**高**一米的地方，引力弱一点点，物体相对往上漂；
- 比中心**偏左偏右**的地方，引力方向略有夹角（都指着地心），合力会把物体轻轻往中线挤。

这个效应有个你熟悉的名字的亲戚：潮汐力——大白话说，就是「大引力场里不同位置受力不同，把一个东西往两头拉」的那份力。地球上的海洋潮汐，正是月球引力对地球近侧拉得

狠、远侧拉得轻，把海水拉成橄榄形。空间站里同一套机制在微观尺度上重演：一滴悬在舱中央的水，会被拉成沿「指向地心」方向微微拉长的椭球，拉长的量级约每米百万分之三——看不见，但仪器看得见。

大白话

大白话：「密封舱里完全失重」只在舱无穷小时严格成立。真实的舱有尺寸，引力场有梯度，两头受力不一样，舱内各处就冒出十亿分之一到百万分之一的 g 的「残余上下」。失重是精确的，只是精确的范围只有舱中心那一个点。

第三笔残差：船自己在转

空间站为了始终同一面朝向地球，每绕地球一圈自己也正好转一圈——90 分钟转 360 度，慢得像时针。可再慢也是转动，转动就有离心效应：舱内离转轴越远的地方，飘着的物体会被「甩」出一个微小的向外的漂移。在舱中心几十米外，这一项也能顶到微 g 量级。

微重力不是遗憾，是一门学科

三笔残差加起来——大气刹车、潮汐梯度、缓慢自转，再加上宇航员的推拉、水泵风机的振动——空间站的真实环境大约是百万分之一的 g ，而且随着「船头朝向」「有没有人刚蹬了一脚舱壁」起伏。这就是「微重力」这个词的全部含义：**不是零，是 10^{-6} ，而且来源清楚、可以逐项管理。**

它甚至反过来变成工具。材料学家想知道「熔化的合金在 $10^{-3} g$ 和 $10^{-6} g$ 下结晶有何不同」，微重力谱的不同档位就是实验参数。基础物理学家则盯着「潮汐力」那一项——它是广义相对论里真正抹不掉的信号（密封舱再大也消不掉潮汐），第十章我们会看到，正是它出卖了「引力=时空弯曲」这个终极答案。

而对生活在其中的宇航员来说，这百万分之一的残差无关紧要，真正翻天覆地的是那消失的 99.9999%：身体那套为「有下」的世界设计的系统——内耳、血压、骨骼——突然失去了用了几十年的参照系。那是下一章的事。

第七章·身体找不到「下」了

你的身体里有一整套假设「有下」的设备。这套设备进化了三亿年，从鱼类的祖先那里一路传下来，可靠到你从来意识不到它存在——直到它突然没了参照物。失重对人体做的，就是一夜之间抽掉「下」。

内耳：第一个造反的器官

你的内耳里有个精巧的装置叫耳石器——大白话说，就是一小撮「耳沙」：微小的碳酸钙晶体压在一层感觉绒毛上。你头一歪，耳沙因重力往低处滑，绒毛被压弯，大脑就知道「下在哪边、现在什么姿势」。这是身体的「水平仪」。

到了失重环境，耳沙失重，不再压向任何方向。水平仪的读数永远停在「零」。可眼睛明明看到舱壁、天花板、同事在你周围翻转——眼睛说「有上下」，内耳说「没有上下」。两套传感器打架，大脑的应对方式是——吐。

这有个名字：太空适应综合征，俗称太空病。超过一半的宇航员上天头两三天都会中招，症状是恶心、呕吐、头痛。原理和晕车一模一样（都是「传感器冲突」），只是失重把这个冲突开到最大。第五章呕吐彗星的那些乘客，体验的是它的 22 秒速成班。好消息是大脑不是死程序：两三天后它学会「这个环境里以眼睛为准，内耳的话先别听」，症状消退。坏消息是回地球时整套适应要倒着重来一遍——这次轮到内耳重新掌权。

体液：少了「下」，血液北上

在地球上，你的心血管系统时刻对抗重力：腿上的血要被泵回心脏，身体有一套调压系统维持「头不太晕、脚不太肿」。失重一来，这套系统对抗的东西没了——但系统还在按老剧本工作。结果是体液重新分布：大量体液涌向头部和上半身。

宇航员头几天脸肿成「月亮脸」，腿上却细了一圈（同事戏称「鸟腿」），鼻塞、头胀，像重感冒。身体随后判断「体液太多了」，排尿增加，血浆减少——总循环血量能掉一两成。这一切在天上问题不大，落地那一刻问题才来：回到 1 g，血液往腿上涌，而身体里「存货」和调压能力都已萎缩，一站起来就头晕甚至眼前发黑。这就是为什么长期任务的宇航员返回

地球出舱时，要被工作人员**抬出来**放在椅子上接受采访——不是虚弱到走不了，是心血管系统还没重新学会对付重力。

骨骼与肌肉：不扛就丢

骨骼是个精打细算的会计：你给它多少负荷，它就维持多少密度，多一克都不肯。卧床研究早就发现，人躺一个月，承重骨的骨量就明显流失。失重等于「全身卧床」的极致版：承重骨（腿骨、脊椎）每月流失 1% 到 1.5% 的骨量——绝经后妇女在地面上一年才丢这么多。半年任务下来，骨头变脆是不可逆风险的一部分。

肌肉的账更直观：不用扛体重，小腿和腰背的肌肉以肉眼可见的速度萎缩。为此空间站上有严格的「每日作业」：宇航员每天要在跑步机上跑（用弹性背带把自己「绑」在跑步带上，人造出「下」）、蹬固定单车、拉一套模拟杠铃的阻力设备，合计约两小时。这套锻炼不是为了健身，是为了让骨头和肌肉「以为」还有重力，把流失率压到可接受的水平。饶是如此，着陆后的宇航员也要花数周做康复。

还有些古怪的小账：脊椎间的软骨在地球上被体重压扁，失重时弹回来，宇航员能长高 3 到 5 厘米（回地球几天就缩回去）；眼球受颅内压力变化影响，长期任务里不少人视力下降，机制到今天还在研究——它有个缩写 SANS，是火星任务要解决的清单上的重点项。

身体告诉我们的事

这一章的清单看着像「失重的危害」，换个读法更有意思：它是一份「**重力使用说明书**」。你的每一次站立、走路、爬楼梯，都是在给骨骼充值、给心血管训练、给耳沙校准。我们从没感谢过重力的这些服务，因为账单从没寄到过——直到有人去了失重的地方，账单一次结清。

所以「失重很舒服」只对了一半。飘来飘去确实像飞翔（所有宇航员的日志都会写那种纯粹的快乐），但身体是三亿年重力世界的造物。如果人类要认真去火星——单程半年失重——就得解决一个工程问题：**能不能把「下」造出来？**第九章就来算这笔账：转一个环，把地板变成离心机的外壁。

不过在此之前，先看一眼失重世界里那些比人体「乖」得多的东西：火焰、水、金属熔液。它们没有内耳可造反，却展现出在地面永远看不到的形态——失重是一间独一无二的实验

室，下一章去看那朵圆形的火焰。

第八章·圆形的火焰

人体受不了失重，但很多东西在失重里反而露出了真面目。地面上，重力像一个唠叨的旁观者，掺和进几乎每一场流体和燃烧的过程——你看到的火焰形状、水的走向、合金的混合，全是它和别的力「合谋」的结果。失重把这位旁观者请出场外，剩下的，才是这些过程自己的样子。

火焰为什么变圆了

点一根蜡烛。火焰是泪滴形，向上拉长，烛尖发黄。为什么往上窜？因为火焰加热了周围空气，热空气密度小、变轻，被下面涌来的冷空气「顶」上去——这就是浮力对流：热的东西浮起来，冷的东西沉下去。火焰的形状，一半属于化学反应，另一半属于重力导演的这场空气升降。

到失重里点蜡烛：热空气不「轻」了——失重环境里密度差异不产生任何沉浮。没有对流，火焰不再需要往上逃，氧气只能靠缓慢的分子扩散（分子随机乱撞、一点点挪过去）从四面八方均匀渗进来。结果是：火焰缩成一个**安静的、对称的圆球**，颜色从黄转蓝——黄色本来是被烧得发光的小碳粒，碳粒是燃烧「供氧跟不上」的产物，对流消失后燃烧模式整个变了。

大白话

大白话：地面火焰的形状是「重力+燃烧」的合著；失重把重力这个作者撤了，你才第一次读到燃烧自己写的版本。

这还不是最怪的。NASA 的实验里还发现过「冷焰」：火焰在常规意义上「熄灭」之后，燃料其实还在以一种肉眼完全看不见的低温反应继续烧——温度只有几百度，不发光，靠仪器才能探测。在地面上，对流会立刻把残余热量和反应物搅散，冷焰没有存活的机会；失重撤掉对流，这个隐藏了人类点火史上百万年的燃烧阶段才第一次被看见。

水：不再服从「低处」

地面上，水的行为准则一个字：下。倒进杯子沉底，泼出去落地，江河往低处流。到了失重，「下」没了，水的行为改由另一套平时被重力压制的力接管：表面张力——水分子彼此拉扯、把表面积缩到最小的那股劲。

于是：脱离容器的水聚成近乎完美的圆球，悬在舱里像水晶珠子；往毛巾里倒水，水不滴落，而是顺着织物纤维爬满整块毛巾——宇航员克里斯·哈德菲尔德在空间站表演过拧湿毛巾，水像胶水一样裹在他手上甩不掉；杯子失去意义（水倒不出来也不待在杯底），于是有了带吸管的饮料袋，以及一只被故意做成飞机机翼截面形状的「太空咖啡杯」——液体沿毛细槽自己爬到杯口，让宇航员体面地啜饮而不是吸。

这些既是奇观，也是工程噩梦的反面教材：空间站的水箱、燃料箱、冷却管路，全都要重新设计——没有「沉底」可以利用，液体和气泡混成一锅，泵吸不到纯液体就会空转。工程师靠刻意利用毛细结构，才把「水不听话」变成「水自己走到该去的地方」。

一间撤掉重力的材料实验室

对流和沉浮一消失，材料科学家得到了两样地面上花多少钱都买不到的东西：

真正的「慢」。在地面上观察一团熔化的金属或一团蛋白质溶液结晶，对流总在搅动，像试图在颠簸的车厢里用胶水粘模型。失重里，结晶可以安静、缓慢、均匀地长大——蛋白质晶体长得更大更完整，让科学家更容易解析蛋白质的三维结构（这是理解疾病、设计药物的关键一步）；半导体和合金的晶体缺陷更少。

真正的「混」。很多金属像油和水一样不肯互溶——倒在一起，重的沉底轻的浮上，永远分层。失重里没有沉浮，它们终于能在熔化状态下均匀混合再凝固，造出地面不存在的「泡沫金属」、超均匀的合金。

第八章开头的说法现在可以说全了：失重是一间独一无二的实验室，实验项目是「把 g 从方程里拿掉，看世界剩什么」。剩下的东西出乎意料地丰富——燃烧的另一张面孔、水的另一套行为准则、材料的另一种活法。

当然，人体不在「剩下的东西」之列——第七章已经领教过。所以载人航天的下一步绕不开一个问题：能不能人为造一个 g 出来？不靠引力，用旋转。这是第九章的工程账。

第九章 · 转出一个「下」来

第七章的账单摆在那儿：人体是三亿年重力世界的造物，失重半年，骨头、肌肉、心血管、眼球逐个出问题。如果人类要当真去火星，方案不是把宇航员练成超人，而是——把「下」造出来。

怎么造？第二章的等效原理早就给了答案：有重量 $\equiv$ 被加速。火箭不能全程烧燃料（推进剂不够），但有一种加速可以免费、永不停歇地维持：转圈。

甩干机原理

坐过旋转木马或者见过滚筒甩干机，你就懂原理：转起来的东西被「往外甩」。更精确的说法是，圆周运动需要持续把物体「往圆心拽」，拽它的力由舱壁（地板）提供——地板顶着你的脚底往圆心方向推，于是你被压在地板上。这份压力，就是重量感。看，又是第一章那句：**重量感 = 支撑力**。只不过这次的支撑力来自旋转，而不是地球。

所以科幻片里的空间站都是旋转的环或轮子（《2001 太空漫游》里那个巨大的轮形站是影史经典）：圆环的「外壁」就是地板，人沿环的内壁行走，头指向轴心。整个舱是一台巨大的甩干机，人是筒壁上的水珠。

这笔账很好算，就一个式子：人造重力 = 转速平方 $\times$ 半径 ($a = \omega^2 r$)。想要多大 g ，要么转快点，要么造大点。问题来了：两头都有约束。

约束一：人受不了转太快

旋转系里生活，有一种地面上不存在的捣蛋力：科里奥利力——大白话说，在旋转的房间里，只要你不是站着不动，而是沿径向（朝轴心或背轴心）走动、甚至只是转头，就会感到一股把你往侧面推的力。倒的水不直着「落」，而是斜着划弧线；头稍微一歪，内耳就会收到矛盾信号——耳石器这次有重量了，可你转头的每个动作都和耳石的读数对不上，于是：吐。又回到第五章的老朋友。

科里奥利捣蛋的强度正比于**转速**，和半径大小关系不大。地面旋转舱实验（海军和 NASA 在六七十年代真做过，志愿者在旋转房里一住几天）给出的经验值是：转速压到每分钟 2 圈以

内，大多数人可以适应；每分钟 4 圈以上，几乎人人要难受好几天；更快，则有人永远无法适应。

约束二：每分钟 2 圈 $\times$ 1 个 g = 一座小镇

现在把两条约束拼起来。要 1 个 g 的人造重力，转速又不能超过每分钟 2 圈，代入式子反推半径：**约 225 米**。直径 450 米——一座横跨四个足球场的巨型环。这就是科幻里环形空间站都那么庞大的原因：不是美学，是生理学。

妥协方案是把要求降低。火星重力（约 0.38 g ）可能已经够用（去火星的旅程，也许只需按火星标准「预适应」）——半径降到约 85 米。月球标准（0.16 g ）只要 36 米。再退一步：用一根缆绳把两个舱段拴在一起对转，省掉刚性的环形结构——几百米长的缆绳，比几百米直径的环便宜几个数量级，这是多年来论文里反复出现、却始终没人造的方案。

还有一个微妙问题：哪怕环造好了，人造重力也不是均匀的——你头和脚离轴心距离不同，受到的「重力」就不同；半径 225 米时这点差异微乎其微，半径 20 米的小舱里，头部和脚部的「重量」可以差出百分之十几，扔东西轨迹诡异，血液分布奇怪。小半径方案省下的钱，都要用生理不适还回去。

为什么到今天还没有一个

把账加总：能住人的旋转空间站，要么大（数百米直径的结构，在轨组装，预算堪比造一艘航母）、要么晕（小半径带来的科里奥利问题）、要么怪（缆绳方案没人敢第一个上）。而国际空间站的任务书从头到尾是「微重力实验室」——它的目标恰恰是**没有**重力。所以迄今为止，所有载人航天器都在 0 g 和 1 g 之间硬切换，「中间档的人造重力」从未在真人身上验证过：0.38 g 的火星重力够不够保住骨骼？没人知道。这个实验，大概率要等第一艘去火星的船自己成为实验。

回头看，这章从头到尾都在用第二章那句等价关系当工程手册：重量 $\equiv$ 加速，旋转 $\equiv$ 持续加速，所以旋转 $\equiv$ 重量。一句话从思想实验变成了一座想象中的城市。等效原理还有最后一层、也是最深的一层含义没有揭开：为什么「加速」和「引力」会等价到这种地步？爱因斯坦的答案是：因为引力根本不是一种力。第十章，收官。

第十章 · 失重才是自然状态

整本书我们一路向下挖：失重不是没引力（第一章），是失去支撑（第一、二章），是自由下落（第三章），靠的是万物同速下落（第四章）。每一层都成立，但有一个问题始终没回答：**为什么「被加速」和「在引力场里站着」会等价到实验都分不出来的地步？**世上哪有这种巧合？

爱因斯坦用八年（1907 到 1915）给出了答案，这个答案把「引力」这个概念整个换掉了：引力根本不是一种力。

先看一个「伪力」的经典案例

两个徒步者从赤道上相距 100 公里的两点出发，都严格朝正北走，都发誓走的是直线——不左偏不右偏。几个月后，他们会**发现彼此越走越近**。如果不知道地球是球，他们会得出结论：「我俩之间存在一种神秘的吸引力，随距离变强。」

你知道真相：根本没有什么力。是**地面本身的几何**——球面上所有「直线」（大圆）注定汇聚。力是幻觉，几何是真相。

爱因斯坦说，引力和这是一回事。

把「地面」换成「时空」

爱因斯坦的框架里，空间和时间是织在一起的一块四维「布」，叫时空。有质量的东西（地球、太阳）会把这块布压弯。物体在其中运动时，走的永远是「最直的路」——叫测地线，大白话说，就是弯曲面上「尽可能直」的那条线，就像球面上的大圆。

被扔出去的苹果、绕轨道的空间站、月球，全都只是沿着自己被压弯的时空里的「最直路」走。没有谁在「拉」它们。苹果坠地不是被拽下来的，是沿着弯曲时空的直线滑下来的——就像一个认为自己在走直线的徒步者，最后发现自己到了北极。

大白话：牛顿说「地球对苹果施加了一个力」；爱因斯坦说「苹果一直在走直线，是地球把『直』的定义给掰弯了」。两种说法在弱引力场里算出来的答案几乎一样，所以牛顿体系三百年没露馅。

失重：唯一「什么都不受」的状态

现在可以给全书的问题一个终极答案了。在这一图景里，「受力」的名单要重新排：

自由下落的人不受任何力。他沿测地线走，这是弯曲时空里最自然、最「省事」的运动，就像光滑平面上的匀速直线运动。失重者感觉不到重量，因为他真的什么都没受——他的感觉是对的，比我们的感觉诚实。

站在地面上的你，反而时刻在受力。地面顶着你的脚，把你推离你的测地线——如果没有地面拦着，你本该沿测地线向地心滑。此刻坐在椅子上的你，正在被一个椅子持续「加速」，方向向上。你感觉到的重量，就是你偏离自然轨道时被推的那把劲。

第二章的等价关系至此真相大白：「站在地球上」和「被火箭以 1 g 加速」无法区分，**因为它们本来就是同一种处境**——都是「被推离自己的测地线」。等效原理不是发现了两个现象巧合地相似，而是指出它们是同一件事的两个名字。

那潮汐力是什么？

第六章留了个扣：密封舱再大，也消不掉潮汐力——舱内高处的物体缓慢上漂，低处的下漂。在新图景里，这正是**几何的直接证据**：不同位置的测地线以不同方式弯曲、汇聚（或者发散），舱内不同位置的「最直的路」彼此不平行。力可以被坐标变换「变没」（自由下落即可），而几何抹不掉。所以物理学家说：潮汐效应才是引力的真身，「引力」只是它的化名。

回看一眼来路：潮汐力拉长空间站上一滴水（第六章），拉长地球两侧的海（潮汐），把靠得太近的星星撕成条（意大利面条化）——全是同一件事：弯曲时空里，邻居的测地线们不平行。

失重：从现象到世界观

这本书始于一个误解——「太空里没引力」。走到这里，可以看到这个误解翻出来的东西有多深：

失重 = 自由下落 = 沿测地线走 = **宇宙里唯一「什么都不受」的诚实状态**。我们一辈子习惯的那种「脚踩实地」的感觉，才是被支撑力持续「打断」的状态。宇航员飘在舱里的样子，不是人在异常环境里的奇观，而是万物本来的运动方式第一次不被地板、空气和习惯干扰地呈现在我们眼前。

牛顿的苹果和月亮是同一种下落；爱因斯坦把这同一种下落升级为「沿弯曲时空的直线滑行」。下一次看到宇航员在镜头前翻跟头，你可以跟自己说一句：此刻，整个舱里只有他，是这个星球上极少数正沿着直线前进的人——而我们这些「脚踏实地」的，全都在被大地推着，偏离各自那条安静的线。

这，就是失重。

失重 · 王建硕