

《连线》科学版流行网站物理学博主、
路易斯安那州立大学物理学教授 瑞特·阿莱恩 口碑之作！

极客物理学 Geek Physics

*Surprising Answers to the Planet's
Most Interesting Questions*

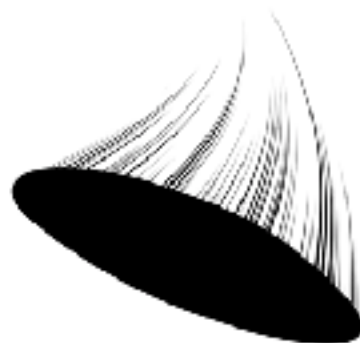
地球上最有趣的问题和最出人意料的答案



雷神的锤子真能帮他飞吗？

超人可以一拳把人
打飞到太空里去吗？

绿巨人浩克跳起来
会砸坏地面吗？



【美】瑞特·阿莱恩◎著

杜磊 肖维青 刘中飞◎译

湖南文艺出版社
湖南文艺出版社

Geek Physics

*Surprising Answers to the Planet's
Most Interesting Questions*

极客物理学

地球上最有精神的问题和出人意料的答案

[美] 迈特·阿莱恩·霍夫
杜西 周德青 邓中飞 译



图书在版编目 (CIP) 数据

极客物理学：地球上最有趣的问题和最出人意料的答案 / (美) 瑞特·阿莱恩著；杜磊，肖维青，刘中飞译. -- 北京：北京时代华文书局，2016.8

书名原文：Geek Physics: Surprising Answers to the Planet's Most Interesting Questions

ISBN 978-7-5699-1046-9

I. ①极… II. ①瑞… ②杜… ③肖… ④刘… III. ①物理学—普及读物 IV. ①O4-49

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 160333 号
北京版权保护中心外国图书合同登记号：01-2015-7196

Copyright © 2015 by Rhett Allain. Licensed by Turner Publishing Company. All rights reserved.
The simplified Chinese translation rights arranged through Rightol Media

(本书中文简体版权经由锐拓传媒取得 Email:copyright@rightol.com)

极客物理学：地球上最有趣的问题和最出人意料的答案

著 者 | (美) 瑞特·阿莱恩 著
译 者 | 杜 磊 肖维青 刘中飞

出 版 人 | 杨红卫
选题策划 | 阳光博客
责任编辑 | 陈丽杰 袁思远
装帧设计 | 阳光博客
责任印制 | 刘社涛

出版发行 | 时代出版传媒股份有限公司 <http://www.press-mart.com>
北京时代华文书局 <http://www.bjsdsj.com.cn>
北京市东城区安定门外大街 136 号皇城国际大厦 A 座 8 楼
邮编：100011 电话：010-64267120 64267397

印 刷 | 三河市华成印务有限公司 电话：0316-3521288
(如发现印装质量问题，请与印厂联系调换)

开 本 | 710×1000mm 1/16
印 张 | 17.5
字 数 | 300 千字
版 次 | 2016 年 8 月第 1 版 2016 年 8 月第 1 次印刷
书 号 | ISBN 978-7-5699-1046-9

定 价 | 42.00 元

版权所有，侵权必究

“这本书里讲到根据金属熔融态的颜色反推光剑^①的温度，读到这里，这本书打动了我的心。”

——扎克·维纳史密斯，网络漫画《周六早晨的谷物早餐》的作者、插画师

“《极客物理学》向我们展示了运用简单模型和物理定律更深一步地理解从体育运动到漫画电影的大千世界的快乐。正如这本书所表明的，增添一点物理元素让所有一切都变得更为有趣。”

——查德·奥兹，《如何教你的狗量子物理学》的作者

“任何发生在这个世界里的事情都是通过物理学加以描述的。更有趣的是，甚至那些现实中不会发生的事情也可以通过物理学来描述。在这本令人愉悦的书里，从汉^②的出拳到超人拳头的力量，瑞特·阿莱恩揭示了隐藏在一些我们可能问到的最有趣的假设性问题背后的科学。”

——西恩·卡罗尔，理论物理学家，《宇宙终结时的粒子》的作者

① 光剑（lightsaber），电影《星球大战》里的一件占有举足轻重地位的武器，后面章节中将进一步介绍。

② 《星球大战》中的一个人物，在后续的章节中会谈到。

“《极客物理学》这本书会让你明白物理与隐藏在生活中的那些日常问题之间的相关性。这本书里交错着好莱坞、流言终结者^①、YouTube、物理学的万象，里面有趣的问题都由作者瑞特·阿莱恩运用巧妙的手法呈现在读者眼前。”

—— 艾伦·提图斯，博士 WebAssign 的合作开发者

^①《流言终结者》(MythBusters), 美国的一个电视科普节目, 在探索频道播出。由特效专家亚当萨维奇和杰米·海纳曼主持, 他们利用自身的专业 and 技巧, 针对各种广为流传的谣言和都市传奇, 进行实际而精巧的实验来验证。

学者也许会无休无止地讨论“极客”（geek）和“书虫”（nerd）这两个词之间的差别。于我而言，两者并没有什么区别。这两个光荣的头衔都是用来褒奖一群致力于某一个特殊领域并为自己感到骄傲的男人和女人的。一个极客或许对吞噬一头奶牛尸体的所有不同类型的昆虫很有研究。也许一个书虫能辨认出绝地武士^①使用的各种不同类型的光剑。极客可以构建出一流的东西，在他笔下，一桩桩事情都妙趣横生。他们中有些人又和我如出一辙：喜欢把东西统统拆开，来弄明白里面的部件如何运作，但回过头来又不一定能装回去。

我认为极客和书虫已经不再是与什么消极事物相联系的标签了。无论谁都很喜欢别人以极客来称呼自己。极客实在是太酷了，如果看过《生活大爆炸》^②或者《流言终结者》这样流行的电视节目你必定能领悟。事实上，在我们内心深处，都至少藏着这么一棵极客、书虫的萌芽，这种存在对我

① 绝地武士是美国著名导演乔治·卢卡斯拍摄的科幻系列电影《星球大战》中的虚幻角色。他们可以使用一种超自然的感应力量，称为原力。他们使用的主要武器被称为光剑（lightsaber）。

② 《生活大爆炸》（*The Big Bang Theory*）是由查克·洛尔和比尔·普拉迪创作的一出美国情景喜剧，剧中主要人物谢尔顿和雷纳德是一对好朋友，他们的智商高人一等，精通量子物理学理论，熟悉物理各领域的问题。

们自身意义非凡。

那我又是谁？我也是极客吗？当然。在我还很小的时候，我就对极客类的东西颇感兴趣了：宇宙空间、漫画读物和科幻小说。我也自己动手制作过一些东西，在青少年时期我完成了一个早期项目：一个小型的电子设备，由两节光电池和一个发动机组成，用来记录下光束的运动轨迹。那时，这件小东西我喜欢极了。此后，我继续学习物理，最终成为了路易斯安那州立大学的一名教员。然而对于那些过去玩过的极客类的东西，我的喜爱自然丝毫不减半分。在这个世界上，还有什么能比把我学到的物理知识和极客文化结合起来的乐趣能让我更感到愉快的呢？或许只有一罐花生黄油或一个果酱三明治吧，不过这也只是可能罢了。

所以，我做的就是这个事情。我用两个基本思路来观察周遭的世界。第一，基本的物理概念，比如：动量定理，动能定理，或者电与磁之间的关系（我们把这种关系叫作麦克斯韦方程）。但这个并不是我在分析真实和虚拟现象时所用到的全部手段。我还用到第二个——构建模型。模型是什么？难道就是我在孩提时代玩过的汽车模型玩具吗？没错！模型是任何一件用来代表其他物体的物体。万有引力定律引出的数学公式诠释了两个物体的质量和相互吸引力之间的关系。我们也可以构建一个从来没人做过的模型。在一个国家里，一条推特^①消息的传播速度能有多快？只要找到相关数据并找到一个能清楚解释这种现象的数学表达式，就算完成这个模型了。通过解决这些问题，一个模型就成功建好了。模型也许千变万化很复杂，但创建模型的这个思路本身很直截明了。

^① 推特（Twitter）是美国一家社交网络及微博客服务的网站，是全球互联网访问量最大的十个网站之一。

为什么有人会浪费时间阅读星球大战电影里的物理学？为什么有人会关注咕噜^①需要吃多少鱼才可以保持它的体温？如果我能精确计算出冰一罐啤酒要用多少冰，我实际会不多不少地用那么多冰吗？难道我没有别的更重要的事情要做吗？那么，到底什么才算“浪费时间”？看电影算浪费时间吗？阅读和绘画又算什么呢？一个人觉得多此一举、浪费生命的活动也许正是另外一个人觉得对自己大有裨益的事情。

对所有不现实的事物加以分析，难道全无半点用处吗？我们来打个比方吧，以“愤怒的小鸟”这个流行的视频游戏为例。就我自己而言，我很喜欢这个游戏，但它带给我最大的愉悦是能让我尝试着寻找其中的秘诀在哪里：小鸟在地球上也是这样飞翔的吗？又有什么特殊的物理法则蕴藏在这个游戏里？我分析这个游戏运作的方式和我在现实世界里面搞的物理研究大同小异。在研究这款游戏上使用到的方法和工具时，我也会在研究物理的其他领域里一样使用到。使用物理知识来分析视频游戏和模拟攀岩很相似。在攀岩壁的过程中你学到了攀岩的技巧，但爬到顶并不会得到什么。不过，要是你下一次真的去爬山，你就会很自然地使用到那些在模拟攀岩过程中学到的攀爬技巧，唯一不同的是，现在你可以爬到一座真正的山巅。因此，为刚才打的那个比方下个结论：真正的物理研究和真正的爬山一样，分析“愤怒的小鸟”里的物理就像模拟攀岩。

接下来，让我们步入正题。我将分享一些我最喜欢的构想给你们。所有的这些构想都体现了物理学和极客文化的融合，因此本书命名为《极客物理学》。

^① 咕噜（Gollum）是英国作家托尔金（J. R. R. Tolkien）小说内的虚构角色，也是电影《指环王》里的角色。

在我们开始之前，我想再做一些补充说明：

在回答这些令人啧啧称奇的问题的同时，我希望和你们分享一下构建模型的思维过程。这意味着我也将描述一些模型建立起来所依赖的基本物理概念。然而，有一些基础概念不止在一个问题里面出现。我选择在每次使用这些概念时迅速地过一遍，这样就会让同一个概念反复在好几章内容里出现。不要担心，这是有两点好处的：首先，物理科学很复杂，一个内容复习一遍以上对你而言只会有益无害；其次，因为同样的概念解释在书中不止出现一次，假如你希望跳读的话也没有问题。

第一章 真实的物理

失重到底是什么？ / 002

两车相撞和开车撞墙，谁的破坏力更大？ / 011

为什么冰雹那么可怕？ / 016

浮在水中的小球怎么称重？ / 020

π 会出现在与圆无关的场合吗？ / 025

世界人口增长，会把月球拉近地球吗？ / 029

为什么镜子成像是左右颠倒，而非上下？ / 032

第二章 超级英雄

绿巨人浩克跳起来会砸坏路面吗？ / 036

雷神的锤子真能带他飞吗？ / 043

如何计算美国队长的盾有多重？ / 050

超人可以一拳把人打飞到太空里去吗？ / 054

第三章 真实世界的物理

你需要用多少冰来冷却你的啤酒？ / 064

一栋房子能产生死亡射线吗？ / 068

一把扫帚如何做到直立不倒？ / 071

车坠入湖，亚当的自救方式会不会反倒断送了自己的性命？ / 075

造一架人力直升机难吗？ / 079

移动一辆车要多少水？ / 087

第四章 星球大战

光剑的能量源自何处？ / 092

飞船越大，推进器就越大吗？ / 098

如果 R2-D2 能飞翔，他的重量是多少？ / 102

爆能枪的速度有多快？ / 107

汉先发制人了吗？他能否后开枪？ / 116

第五章 技术

光按键可以为手机充电吗？ / 120

推特波能赶上地震波的速度吗？ / 125

愤怒的小鸟 TM 里的物理有多真实？ / 130

iPad 代替纸质飞行手册，能替航空公司节约多少成本？ / 143

第六章 体育运动与物理

跳水究竟有多难？ / 150

人能拉动卡车吗？ / 153

8.9m 的跳远世界纪录受重力和空气影响有多大？ / 158

能用线性回归来解释跳远世界纪录吗？ / 163

十项全能如何统一计分标准？ / 167

为什么游得越快越难？ / 172

对于公路自行车赛而言，最陡的斜坡是多少度？ / 175

第七章 真实的空间

- 宇宙飞船和潜水艇之间的区别在哪里？ / 180
- 把额外的糖果送入太空，需要多少能量？ / 184
- 用自动转移飞行器来建造死星并提供补给，可行吗？ / 189

第八章 疯狂的推算

- 冰激凌可以冷到一点食物热量都没有吗？ / 194
- 多少张纸币叠在一起能从地球叠到月球上去？ / 197
- 把火鸡从空中丢下去，能把火鸡烧熟吗？ / 201
- 你能按比例造出一个死星的乐高模型吗？ / 205
- 裹多少气泡垫从六楼跳下去才不会摔死？ / 209
- 香蕉真的可以发电吗？ / 214
- 你愿意和一只像马那么大的鸭子打架吗？ / 218

第九章 科幻巨制

- 你能开车撞开多少个僵尸？ / 222
- 为什么我们不能获得真正的飞行滑板？ / 228
- 如何给一个穿越时空的德劳瑞恩充电？ / 232
- 咕嚕如何在黑暗中看见东西？它吃什么？ / 235

第十章 这会是真的吗？

- 人类能够像鸟儿一样用翅膀飞行吗？ / 248
- 阿诺·施瓦辛格到底是什么做的？ / 251
- 人下落的速度能比音速快吗？ / 257



GEEK

PHYSICS



第一章

真实的物理



$$x_2 + 1x_3y_2$$



失重到底是什么？

当我还是一名大学生的时候，学习真实的物理内容之前，我都要阅读一本正儿八经教科书里的相关材料。然后，教授就会讲授专题，也许会讲解一些例子来加以辅助。最后，我们会去物理实验室和仪器打成一片，更深地探索这些物理概念。这个学习方法本身固然无可厚非，但难道就没有更好的方法了吗？如果我们倒过来，从实验而非阅读开始我们的物理学习，又会如何？我们现在就以这样的方式开始吧。

如果你用身边智能手机上的应用程序 Google search 开始的话，这个实验做起来是最有趣的。打开这个程序，在里面搜索框里输入：为什么宇航员在太空里面会处于漂浮状态？输入完毕后开始搜索，我的手机上会得到这样的一个官方答案，也许你和我得到的搜索结果雷同：

Astronauts float around in space because there is no gravity in space.
Everyone knows that the farther you get from Earth, the less the gravitational force is. Well, **astronauts** are so far from the Earth that gravity is so small. This is why NASA calls it microgravity.

Why Do Astronauts Float Around in Space? | WIRED

www.wired.com/2011/07/why-do-astronauts-float-around-in-space/ Wired ~

宇航员在太空里面漂浮的原因是太空里面没有引力。我们都知道，离开地球越远，地心引力就越小。宇航员离开地球的距离已经非常远了，以至于引力变得非常小。这就是美国宇航局把这种情况称为微重力的原因。网 址：www.wired.com/2011/07/why-do-astronauts-float-around-in-space/ Wired

点击这个链接，你会直接看到我写的博客。没错，是我就这个问题写的一番完全错误的解释。先别急，我这样是有目的的。解释失重问题时，很多人用的就是这个 Google 引擎通过了的说法，可以说这是一个解释失重问题颇为流行的答案版本。而我就以这样一个错误的答案来开始对“失重”问题的探讨。上述这个 Google 引擎给出的答案是站不住脚的，除此之外，我还有另外一个一样广泛为人所接受但也一样错误的答案“宇航员在太空里面失重是因为太空里面没有空气”。

这两个为大众普遍接受的关于引力问题的概念到底哪里有问题？我们就从真空开始谈起吧。

月球就是一个存在引力但处于真空状态的绝佳例子。看一下阿波罗登月的录像你就会明白了。如果还不明白，需要稍微给点提示，那么你搜索一下约翰·杨^①有名的“跳跃式致敬”即可。月球上根本没有空气，但宇航员却不因真空而漂浮移动。月球自身的引力仍然能给宇航员以一个向下的拉力而不至于任其到处漂浮。但考虑到月球本身质量较小，引力也相对较小，所以总让人误以为宇航员在月球上是漂浮着的，这直接导致我们认为

^① 约翰·杨 (John Young)，美国航天员，于 1969 年 7 月 20 日首次登陆月球。在登月过程中，他插好美国国旗，并跳跃式地向国旗敬礼。

“宇航员在太空里面失重是因为太空里面没有空气”。

也许，宇航员在太空里漂浮不定，是因为他们离开地球太过遥远，地心引力在大小上不足以对宇航员产生显著的作用。为了回答这个问题，我们来了解一下引力。引力的经典模型是由牛顿提出的，它表明引力是存在于两个有质量的物体间相互吸引的一种作用力。这种力和两个物体质量的乘积成正比，和物体间距离的平方成反比，写成公式是这样的：

$$F_G = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

万有引力常数 G 是适合于任意两个物体之间的普适量，其值为 $6.67 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2 / \text{kg}^2$ 。那么那个著名的 $g=9.8 \text{ N/kg}$ （经常记作 9.8 m/s^2 ）又是怎么回事？后者是单位质量地心引力的值，其适用范围仅限于地球表面，并不是一个“普适”的计算重力的值。

假如地面上有个物体与地球发生相互作用，地球的质量为： $5.97 \times 10^{24} \text{ kg}$ ，地心到地表的距离为 $6.38 \times 10^6 \text{ m}$ （即地球半径）。把这些量代入上述公式，读者自己也可以算一下。得出结果了吗？计算结果 $6.67 \times 10^{-11} \times 5.97 \times 10^{24} \div (6.38 \times 10^6)^2$ 正是单位 kg 质量上引力大小为 9.8 N 。

那么，万有引力公式不是说距离地球越远地心引力越弱吗？没错，但事实上并不如你想象的那样会减少那么多。普通绕地球做匀速圆周运行的航天飞船距离地球约 360 km 。假如一名航天员的体重为 75 kg ，他在地球表面和在环绕地球的轨道上分别受到的重力（或引力）分别为多少？两个答案在数值上的唯一差距，在于宇航员与地心之间距离不同造成的差异。

如果加以确切比较，他受到的重力在地球表面为 734 N ，在轨道上运行的时候为 657 N 。引力作用在轨道运行时变小了吗？变小是没错，但小到可以称之为“失重”吗？显而易见不是，轨道上的引力居然也达到了地面上引力值的 89.5% 。所以，“距离变大、引力变小导致宇航员失重”这

一说法是没有根据的，不能正确解释这种所谓的“失重”现象。

请你想一下我们平时是如何感受重力的。我可以直接告诉你，你现在感受到的并不是完整意义上的重力（假设你现在处于地球表面）。这里以两个电梯情景为例，进一步说明人在不同情景下对重力^①的感知。

例 1: 在电梯里面站立，不要去按键，让电梯处于静止状态。你会有什么感受？尴尬别扭吗？请看以下图示：

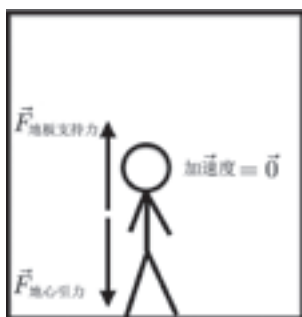


图1

因为你在静止状态下并且保持了这个状态，所以你处于平衡状态，加速度为 0，则合外力也为 0（技术上，矢量为 0）。做受力分析，竖直方向上一共存在两个力：一个是作用在人身上的电梯地板向上的支持力，另一个是地球施加给人向下的引力，两个力大小一致、方向相反，结果互相抵消，合外力为 0。

例 2: 现在按下电梯的“向上”按钮。在电梯加速向上运动的短暂瞬间，你感觉如何？焦虑？也许你会感到身体变得比原来更重了一点。如果你坐的电梯也和我家那部令人讨厌的电梯一样运行缓慢，也许你还会感到不舒服。那么到底有趣特别的地方在哪里？以下是你在电梯里面向上加速的图示：

^① 重力是指近地表的物体受到的竖直向下、垂直地表的引力，实质上是地心引力的一个分力。



图2

就力而言，它和例 1 的区别在哪里？如果人加速向上，那么合外力方向也一定向上。用上述图示中的两种力，合外力可以分别用两种方式表述：地板对你的支持力更大，或者地球对你向下的引力更小。由于地心引力的大小取决于你的质量、地球的质量、人和地球的距离。地心引力在大小上没有发生变化。这意味着地板一定对你施加了比例 1 里更大的且方向向上的作用力，你因此感到体重变大，有趣的是，虽然如此但地心引力的大小仍没有发生变化。

例 3: 现在你已经乘电梯到达顶楼，电梯必须停下。由于电梯正在向上运动，但必须减速，因此加速度方向必须向下。

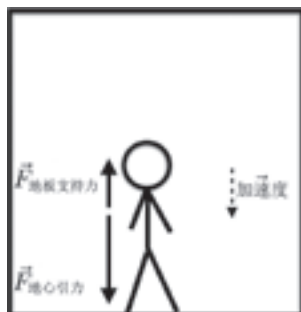


图3

合外力方向此时向下。地心引力的大小还是没有变化，唯一变化的是

地板的支撑力减小，让你感到体重更轻了。

例 4: 假设电梯缆绳断裂，电梯加速下坠。在这种情况下，电梯的加速度必然是 -9.8m/s^2 (和任何自由落体的物体一样)。这样，地板要施加在人身上多少大小的力才能保证加速度为 -9.8m/s^2 ？这时地板根本无须对你进行任何支撑。你感受如何？你一定会感到十分恐惧，毕竟你现在坐的电梯缆绳已经断裂。你还会有什么样的感受？如果你还没来得及吃早餐的话，恐惧之外你也会觉得有点儿饿。哦，还有你会感受到失重。这种情况真的能发生吗？绝对可能！事实上，有人会花钱来做这样的事情。在游乐场，有多少人故意坐“摔下去”的车，比如“恐怖之塔”这样的过山车。

我们来总结下目前得出的结论：

- 所有这些情况里面，引力大小始终不变；
- 对于不同的情况，加速度大小不同；
- 地板对你的支持力越小，你感到体重越轻；
- 如果地板对你的支持力为 0，你感到失重。

我们暂且把电梯的情景搁置一边，转而来看看本文探讨的最后一个关于地球上失重的例子：呕吐彗星机^①。没错，确实存在这样的仪器。呕吐彗星机的原理是一架向下加速飞行的飞行器，跟下坠失控的电梯一样。但是，呕吐彗星机并不像电梯那样直接坠落到地面上。为了防止坠机，飞行器在完成失重之后会立即提升飞行高度再交替失重操作，反复进行。这些操

① 为使宇航员能顺利度过在太空中“难熬”的日日夜夜，美国宇航局的医学专家研制出了一种名叫“呕吐彗星机”的治疗仪，这是一种专门负责帮助宇航员防止失重呕吐的训练设备，宇航员只要在这里面待上 100 多小时，并不断地旋转，那么进入太空后他便会如在地面上的感觉一样了。

作的效果让不少受试者感到运动眩晕，故此飞行器得名“呕吐彗星机”。

在电影《阿波罗 13 号》中，失重的情况正是在呕吐彗星机里拍摄的。那些失重镜头不只是电影拍摄效果而是真实的失重状态。当然，根据呕吐彗星机的设计原理，每次拍摄只能维持 30 秒左右。

回到我们对太空的探讨。我们知道宇航员乘坐着航天飞机绕地球运行。但是它加速了吗？没错，它处于加速状态中。航天飞机绕地球做匀速圆周运动时所需要的向心力正是由地球通过万有引力提供的。虽然它做的是匀速圆周运动，但是它仍然在加速。你也可以说航天飞机确实在下坠因为它的运行是由指向地球球心的引力决定的，是引力将它向地球拉。然而，因为它的运动不一定会使得它更靠近地球，所以更加切合实际的说法是说它“绕轨道”运行。

你也可以这样考察这个问题：让一根绳子的一端系着一桶水，你抡起绳子以垂直圆周的方式让水桶做圆周运动，你得用多大的力气才足以使得水不洒落？让我们来分析一下。水桶在最高点位置上水非但不会洒落，圆周运动指向绳端的加速度还使得水向水桶底部挤压，获得一个来自于桶底部方向向内的压力。现在，想象一下如果你的自身引力足够大，以至于将水吸引出来，会是怎样的画面呢——这便是宇航员在太空里的情况。宇航员正如同桶里的水，做圆周运动时，并没有一个由桶底部施加的一个指向地球的力，而是地球对宇航员的引力承担了这个向心力。

如果你真的处于一个万有引力为零的地方（譬如说一个远离其他大质量物体的地方）情况又会如何？在这种情形下，你能让自己如同大多数科幻影片里展示的那样还保持一定的体重不漂浮不定吗？答案是：可以！在例 2 里，电梯加速向上就可以产生这样的效果。假设在没有地心引力的条件下，你身在一部向上加速运动着的电梯里面，你就会感到加速度的存在。

此时电梯地板的支持力增加，即使没有引力你也不会感到失重。这种情况实质上 and 轨道上航天飞机运行的那个例子恰恰相反。如果你能让航天飞机以大小为 9.8 m/s^2 的加速度上行，即使离开地球的引力，你的感受在效果上和在地球表面依旧完全等同。

运载着火箭的航天飞机不断加速，这时在航天飞机上人的感受和地心引力的效果是相似的，这段时间里航天员一直会感受到重力，但也许宇航员只想绕地球轨道运转即可而不希望一直加速到另外一颗行星之上^①。在绕地球运行的航天飞机上，由于有向心加速度的缘故，宇航员处于失重的状态。那么宇航员在航天器里有没有其他方式可以获得加速度并显著产生重量呢？要做到这点，你可以制造一架会自转的航天飞机。由于航天飞机时刻处于自转（非绕地球转），其圆周运动^②也需要向心加速度，人就在航天器的内表面上获得一个方向指向自转圆心的合外力。拿现实中自转的水桶实验做类比，假设在没有地心引力的条件下（效果等同于航天飞机绕地运行失重的情况），水桶里的水仍停留在桶中不会移动^③。人这时如果在这样一只自转着的水桶里，一样也会感到重力的存在^④。同理，宇航员在这样自转的飞船里一样能感受到重力——地板对他的压力和他站在电梯里面得到的重力感受完全一样。对两种情况的感受在本质上是毫无区别的，但又不是绝对相同，因为这时候宇航员由于脚贴在宇航器的内面做自转，头部旋

① 如果宇宙飞船要突破地心引力的束缚到达其他行星，需要达到第二宇宙速度 $1.12 \times 10^4 \text{ m/s}$ 。

② 航天器在这种情况下，既绕地球做圆周运动，自转也在做圆周运动。

③ 在没有地心重力的环境下，这时由于匀速圆周运动需要向心力维持的关系，承担向心力的是桶壁对水，方向指向自转圆心的压力，根据牛顿第三定律，水也会给桶壁一个压力，因此水不会移动。

④ 合外力指向圆心，桶壁给人一个指向圆心的力，人也会给桶壁一个反作用力。

转头盔的运动轨迹和脚部的运动轨迹就完全不一致了。

事实上，如果你能回忆得起《2001：太空漫游》这部电影，如果你观察细致，里面有一幕正是我在文章上一段里提到的：电影里的两个人物正是在一个自转着的航天飞机里面走动的。

总结一下：在太空里面有引力吗？答案是有的，除非你距离任何行星般大小的物体足够遥远。航天员之所以看上去失重，是因为他们和航天飞机在做匀速圆周运动，其所需的向心力正好由地心引力提供。要想在宇宙飞船里制造出和地球表面一样的重力效果，需要借助外力让它获得额外的加速度。

两车相撞和开车撞墙，谁的破坏力更大？

在《流言终结者》的某一集里模拟了这样一个场景：两辆以相反方向运行的车，同时夹击处于它们中间第三辆较小的车。从实验角度来看，这个情景要想设置成功难度颇大（特别是如果你只有两辆车可供报废）。第一次试验里，两位流言终结者亚当和杰米发动两辆十八轮大卡车，以 50mph^① 同时冲向一辆静止不动的汽车。试验的结果让人印象深刻，但静止的车辆并没有受到完全撞击。当车辆对撞的时候，中间遭到夹击的第三辆车被突如其来的冲击力撞偏了方位，因而没有遭到彻底的破坏。

由于车容易被撞偏，预计的实验效果不能完全体现，他们于是就设计了第二个试验，他们改变了方案，改用火箭滑车^②去撞静止的汽车，这次他们在汽车后面固定了一面墙。其中一位声称：如果一辆车以 100mph 速度撞击墙体，其破坏效果就等价于第一次试验里两个 50mph 车相撞。他这样说有没有问题？从直觉上来判断，好像说得通。但是，开车以 50mph 的速度撞墙和开车以 50mph 的速度对撞 50mph 迎面开来的车，在这两者要让你选一个破坏程度相对较轻的，难道你的选择不会是前者吗？这位流言终结

① 速度计量单位，表示英里 / 小时，俗称“迈”，1 迈 ≈ 0.447 m/s

② 火箭滑车：一般由车体、滑块、动力系统和制动系统组成。滑车的前后滑块包住轨道的钢轨凸缘，用以支撑滑车和在滑轨上滑行。

者的说法果不其然在网上一石激起千层浪，很多人有不同的看法，这档节目最终决定再专门开辟一集对这个问题加以处理。

为了得到这个问题的答案，我们先看看另外一集里处理的一个物理现象。那集节目里有待验证的一个说法是这样的：如果把两本电话簿的页面一张张交叉叠在一起，那么要把这两个本子分开是不可能办到的。为了验证，两人按要求把书叠了起来，然后拔河，试图分开这两本书。图示是这样的：



这个实验看似十分到位，但拉的方式是否存在问题？如果像这样拉，两位试验者对书的作用力只有 320 磅^①，他们的力原本可达到两倍之多。

如果两人以相反方向拉书，根据受力分析，书的速度没有变化，受到的合外力必然为 0。本质上，杰米施加了 320 磅大小的力，而亚当的作用只相当于让书本保持在原地不动而已（反之亦然）。如果把杰米对面的亚当换作一面墙，并由绳子牵住，情况又会如何？结果跟刚才完全一样。墙和亚当一样可以施加拉力。更近一步来看，除了拉以外，墙可以推吗？当然也可以。你有推墙的经验吗？你推墙，墙也会把你施加给它的推力向你推回来。如果亚当和杰米这样拉呢？



^① 这里的“磅”指磅力，工程单位制中表示一磅的物体在纬度 45° 海平面上所受的重力，1 磅力=4.448 牛顿。

在这种情况下，亚当和杰米各自的拉力达到 320 磅，墙就以 640 磅的力反方向拉。在节目里，流言终结者用两辆相反方向运行的卡车来试着把电话簿拉开，记录下来的拉力值为 4 800 磅。最终，他们用两辆军用车把拉力提高到 8 000 磅，才把书分开。如果一开始他们用两辆民用车往一个方向拉书，而把书的另一端和一棵大树绑定，那么他们能获得的力可以达到 9 600 磅，这样一来，力的大小已经完全能够把书分开。看来流言终结者在这件事情上还不够明智，只好动用军用车来完成实验。如果没有经过这样一番思考，我也会跟他们一样。

回到我们一开始讨论的这个话题：两辆车以相同的速度对撞和一辆车以两倍的速度开车撞一面固定的墙，到底两者的破坏程度哪个更厉害？让我们来看一下：假设在一个外太空里运行着两辆车，速度相同迎面驶向同一物体。为什么假设在一个外太空里？因为这个理想化的设定使得车在行驶过程中没有受到其他任何的额外力，速度恒定。同时这样也假设车远离任何大质量的物体，引力就可以忽略不计；空气阻力与地表摩擦力也忽略不计，因为车并不是在推动空气或者地面，这样建立模型相对容易。



在这样的情景下，两点必然是成立的：第一，动量的矢量和在撞击前后必然相等。为什么要说“矢量”，因为矢量非常重要，它带有方向性，两辆车以相反方向开来矢量和必然为 0。撞车停止以后，矢量和仍然为 0；第二，撞击前后能量守恒。如果没有撞击目标以外的物体对整个系统做功，那么系统将能量守恒。必须将撞击目标也算进去，这样相互作用的所有物体都被考虑到了。显然，在太空里这些条件都能成立。在撞击前，所有的

能量是动能，撞击后能量一部分为车的动能，另一部分我把它叫作结构性能量，它体现在车辆的变形中。

好了，现在来看一个特殊极端的例子。假设两辆橡皮车以同样的初始速度相向而行，相撞之后以不变的速度弹开。显而易见，在这种情况下，动量和动能两者都守恒了，初始的动能和最终的动能大小一样。这就说明，能量没有发生形式上的变化——车没有发生结构上的改变或者损坏。这种情况让人觉得很单调乏味。



那么两辆车以同样的速度发动，同时相向而行然后停下来，情况又是怎么样？这种情况下，动量仍然守恒，因为相向而行的车初始状态动量为0，停下来时的最终动量也为0。

搞清楚了动量之后，对于能量我们现在清楚吗？显然，动能在撞车前后发生了变化，因为车在撞击后静止了。车的动能^①和动量之间有关键性的区别：动能是一个标量，没有方向，永远是正的，它不因为车相向而抵消。那么这些动能又跑到哪里去了呢？动能转化成了车辆碰撞时的“损伤”。就这么简单，对吧？

现在我们回到《流言终结者》里用到的实验方法，一辆车用两倍的速度去撞一辆静止的车。



在这种情况下，最初的动量不为0，如果两车充分相撞之后必然是不

① 动能的大小等于 $\frac{1}{2}mv^2$ ，其中 m 为物体的质量， v 为物体的速度。

会静止的。如果碰撞之后两车“黏着”在一起，它们会一起向右边运动，因为那就是初始动量的方向。

那么开始的能量又会发生什么改变？如果一车的速度达到原来的两倍，另外一车静止，那么能量不会是原来的两倍。为什么？因为动能的大小取决于速度值的平方。这样即便一车是静止的，另一辆以两倍的速度运行所具有的能量仍然大于两车都以原速度运行时的能量。问题的关键是这些能量不会全部转化为“损伤”，因为当初始动量不为 0，最终相撞后车仍然不会处于静止状态。

以上所谈论的碰撞都是在一个没有外力作用的绝对空间里发生的，这种情况是很特殊的例子（为了讨论简便而设定的）。那么假如静止的车后固定了一面墙，结果又会如何？

加上墙体之后产生的外力会极大的改变原来的情况。在新的情景里，和墙连为一体的地面对静止车辆所施加的力非常重要——因为这个力的存在使两车构成的系统的初始动量和最终动量不同了。

在这种新的情况下能量又发生了什么变化？即便系统有外力，但却没有增加任何能量。因为这个外力没有移动（来自于墙体的力并不做功）。功是力与沿着力方向移动的距离的乘积。如果没有外力做功，相撞后的总能量和初始状态的动能大小一致，仍然不变的是一辆车以原速度两倍运行，其总能量的大小两倍于两车以原速相向而行而具有的能量。

因此，只将一辆车的车速提高为原速的两倍并保持另外一辆车静止，不同于两辆车均以一样的速度运动。流言终结者的第二次火箭滑车的想法听起来好像很不错，实验也会很容易做到。为了观察车辆的破坏状态，第二个实验和第一个实验是完全不一样的。

不必担心，《流言终结者》依旧是一档很棒的节目。出现了这样的错误说明亚当和杰米两人在尝试着完成壮举，但他们也不过是普通人。

为什么冰雹那么可怕？

每年春季，国外的 YouTube^① 网站上都会上传一波雹灾的视频，其中有一段视频是 2012 年 4 月发生在圣路易斯的一场雹灾。现在随处可见人们使用手机相机拍摄视频，并上传到 YouTube 上和别人共享，这使得大家更加方便地看到像这样的极端气候所带来的灾难效应。雹灾最为可怕的一面是冰雹之大足以砸破车窗玻璃。

为什么大冰雹构成了这样一个严重的问题？显然，冰雹的体积越大，质量就越大。但还有一个关键因素更可能被忽视：冰雹越大，其下落的速度就越大，而我们要在本文里研究的就是冰雹下落的速度和它体积之间的关系。

首先，我们先假设所有冰雹的密度大小一致。如所有物理假设一样，这个假设在严格意义上来讲并不成立，但如果要得出一个可靠的计算结果，这样的假设是完全容许的。冰雹只是冰，它的密度大小在 917kg/m^3 左右。其密度小于水，水的密度为 $1\,000\text{kg/m}^3$ 。拿水的密度来衡量冰的密度是很好的办法，因为我们很清楚：冰的密度小于水，它和任何密度低于水的物体一样，是浮在水面上的。

^① YouTube 是世界上最大的视频网站，为全球成千上万的用户提供视频上传、分发、展示、浏览的服务。

当冰雹在空气里面下落，有两个力对它起到作用。首先是地心引力，它使冰雹下坠，大小等于冰雹的质量和重力加速度的乘积。前面已经讲过：冰雹的体积越大，质量就越大。质量取决于体积与密度，对于球形的冰雹而言，如果半径增加一倍，质量则变为原来的 8 倍，因为体积与半径的三次方成正比。

除了引力以外，还有一个力施加在冰雹上——空气阻力。空气阻力的经典模型认为空气阻力的大小取决于物体的形状、空气的密度、物体迎风面的大小与运动时速度的平方^①。如果将冰雹的半径增大一倍，那么横截面就是原来的 4 倍，因为物体的横截面与半径的平方成正比。可能你已经可以看出点问题的端倪了：重力将冰雹向下拉而空气阻力则把冰雹向上托。如果冰雹更大，空气阻力和地心引力两者都会增加。然而两者的增加量却不同。

如果冰雹一直下落，那么它的速度将不断增加。当然，与此同时空气阻力也会不断变大。最终，冰雹的速度会达到一个平衡的极限速度。在到达极限速度时，空气阻力与地心引力在大小上相同，冰雹的合外力为 0，加速度为 0，速度也不再变化。假如已知冰雹的体积（通过密度可以得出质量），可以算出极限速度为多少。

让我们来观察一下两种体积大小的冰雹：豌豆与棒球体积大小的冰雹，并比较它们最终的速度。如果豌豆大小的冰雹的半径为 0.2 厘米，那么它最终达到的速度差不多是 10m/s（约 22mph）。把半径提高到 3.5 厘米的棒球大小，那么速度会达到 40m/s（约 90mph）。两者速度大小上区别很大。

① 空气阻力的公式： $F = \frac{1}{2} C \rho S V^2$ 计算。式中： C 为空气阻力系数； ρ 为空气密度； S 为物体迎风面积； V 为物体与空气的相对运动速度。

当然，冰雹的破坏力不只在于它的速度。当它撞击物体的时候，我们要考察一下两个方面：动量和动能。考虑哪个更合适？这个问题就不简单了，首先我们来看一下动能。

因为我已经得出了两种体积大小的冰雹的极限速度，我所要做的就是把这些速度、质量代入到动能的公式里（ $1/2$ 质量与速度平方的乘积）就可以得出动能的大小了。豌豆大小的冰雹的动能是 0.001J ，棒球大小的冰雹速度更快，质量更大，因而动能达到 122J 。

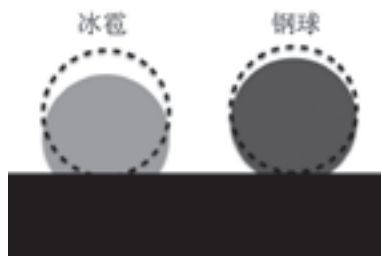
对于这些能量该如何加以认识？我们把它们与子弹的动能相比较怎么样？一把 0.22 英寸^①口径的手枪射出的子弹的动能达到 100J ，而 0.45 英寸的射出的子弹动能可以达到 $500\sim 800\text{J}$ 。这样的比较可否就认为如果被棒球大小的冰雹击中和被 0.22 英寸口径的手枪射出的子弹击中一样？并非如此，我们还要看一下冰雹的动量，然后再对这个比较下一个结论。

棒球大小的冰雹的动量在 $6\text{kg}\cdot\text{m/s}$ 左右，而 0.45 英寸口径的手枪射出的子弹的动量为 $4.5\text{kg}\cdot\text{m/s}$ ， 0.22 英寸口径的则为 $1\text{kg}\cdot\text{m/s}$ 。事实上，这样大小的冰雹从动量角度来看，更像一个从联盟主投手手里掷出的一个棒球。

如果一个圆形铁制，重量、体积相同的钢球和一个棒球大小的冰雹相比呢？当然，这样制作出来的钢球必须是空心的。如果我让这样的钢球和冰雹一起坠落，它们最终会达到一样的极限速度，一样的动量与动能。然而，如果两者击中你车前的挡风玻璃，结果会怎么样？它们造成的结果会大不一样。为什么？最主要的原因是冰雹比钢球更容易在撞击中变形。下面这张图展示了最初碰撞之后未停止时两个圆形物体各自的形状：

冰雹在撞击过程中比钢球更容易受到挤压，这就说明两点：首先，更多的

① 长度单位。1 英寸 = 2.54 厘米。



挤压意味着作用时间需要更长——如果冰雹和车窗表面撞击发生的作用时间越长，那么作用力相对就越小。本质上，合外力的大小等于动量改变量与时间之比^①。钢质小球和冰雹都需要把动量减少为0，如果钢球完成这个过程的时间较短，那么所需要的力就更大。因此，两者具有相同的动能与动量并不表示它们的撞击力也一样。

这个冰雹的例子是一个和物体大小有关的问题。我们经常误以为大的物体和小的物体一样，但是现实中这种情况很少发生。在冰雹这一例中，空气的阻力和重力都和物体半径的次方有关系，物体大小具有很大的影响。大冰雹的极限速度较大，撞击时具有更大的动能。这就是为什么大冰雹会造成人身伤害。遇到这样的天气，最好还是待在室内，并把你的车盖好，以防受损。

^① 动量定理是动力学的普遍定理之一，其内容为物体动量的增量等于它所受合外力的冲量， $Ft = m \Delta v$ ，即所有外力的冲量的矢量和。

浮在水中的小球怎么称重？

我的一位博客读者向我提出这样一个问题：

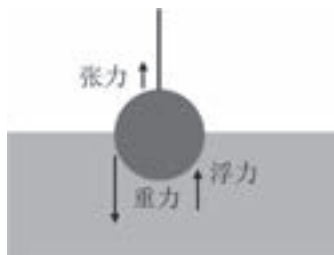
“一个奥林匹克场馆大小的泳池里注满了660000美制加仑^①的水。假设有一架秤位于整个泳池底部，称得的数据显示为5511556磅——水的重量。现用起重机一端吊住一颗质量为12000磅、宽5英尺^②的圆形钢球缓缓放入水中，球体的一半位于水面之上，一半浸没在水中，问这时秤的读数为多少？”

首先，让我来告诉你一个错误的答案：5 511 556 磅。得出这个答案的思维过程并不复杂：如果起重机仍然支撑着球体的重量，那么球就不会施加任何重量给秤。这是错误的。另一个错误的答案认为是6 000 磅。毕竟铁球一半露出水面，这一半并不是整体质量中的一部分。对吗？也不对。还有一个答案听上去似乎高明些：5 511 556 磅，得出这个答案的依据是牛顿定律：如果球对水有向下的压力，那么这个力会被水的浮力抵消掉，所以秤的读数没有发生变化，是这样吗？这个答案有点接近了，但还是不正确。

①1 美制加仑 $\approx 3.785 \times 10^{-3}$ 立方米

②1 英尺 ≈ 30.48 厘米 $= 0.3048$ 米

当钢球一半置入水中时，对钢球做受力分析，以下为受力示意图：



作用在球体上的力一共有 3 个：

1. 水的表面张力, 它对球体的作用力向上 (一颗实心的钢球不会浮起来)；
2. 重力 $G_{\text{重}}(mg, g$ 为重力场强度) ；
3. 浮力 $F_{\text{浮}}$ ，本质上，这是一个水对球向上的推力；

浮力的值如何计算？假设球的部分像这样由水替换掉：



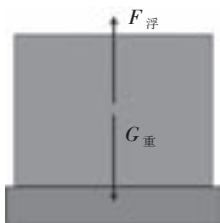
这张图显示，如果不是球让这部分水偏离原来的空间，水就会留在原处。对于这部分水而言，没有绳索拉扯的它受到一个向下的地心引力和一个向上的浮力。假设这部分水是静止的，那这两个力在大小上是相同的。

那么浮力是如何产生的？要想通浮力存在的原因，可以想像物体排开的那部分水有回到原空间的趋势因而对物体形成一个撞击力。进一步，这里有一个很酷的知识点：由于排开水而造成的撞击力是不因物体材质变化而变化的。只要物体体积相同，不论钢球还是其他材质，这种撞击力不

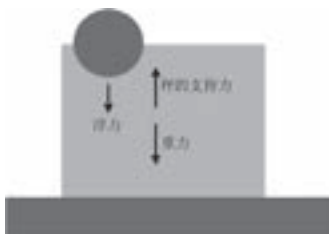
变^①。这个想法妙在我会很清楚这部分水提供的浮力是多少。结合上面的叙述，浮力的大小等于这块被排开的水的重力。因为这一部分的水的体积和球体的体积完全一样，两者的浮力也是相同的。这样一来，浮力的大小自然就是水的密度、物体的体积和重力常数 g 的乘积。

上述这些和泳池底部的秤能建立什么关系呢？首先让我说明，我个人倾向于把牛顿第三定律称为“对于力的定义”。基本上，它表达了力是物体间相互作用的这样一种思考。如果说水以浮力 $F_{\text{浮}}$ 将球撑起，根据牛顿第三定律就可以反推，球对水也存在一个大小一样的向下压力，即为重力。

前面我讲的内容聚焦于对球体上力的分析，现在转向假设所有的水都放在一架秤上称重，在钢球放入水中之前，图式如下：



此时没有什么容器把水盛起来，水只是为了分析的简便起见简单“坐”在秤上。现把球放入水中，由于水以浮力向上推球，球就向下压水，其力的大小等于浮力，图式如下：



① 浸入静止流体中的物体受到一个浮力，其大小等于该物体所排开的流体重量，方向垂直向上并通过所排开流体的形心。这结论是阿基米德首先提出的，浮力 = 液体的密度 × 在液体中的体积。

随着这个作用在水上，大小等于浮力的力，情况又发生了什么变化？水还是保持静止，这意味着合外力依旧是0（矢量为0）。既然增加了一个力，为什么合外力仍然为0？水的质量也没有变化，因为水并没有减少或者增加。唯一发生变化的是秤对于水的支持力。秤的支持力的增加就使得秤的读数必然也随之上升。上升了多少？上升的量就等于物体排开的那部分水的重量。

这里有两点是很耐人寻味的：首先，秤的读数变化和放置于水中的物体的材质无关，不管材料是钢还是轻木。物体排开的相等体积的水的重量就是秤读数的变化量。当然要轻木球沉得像钢球那样，必须施力向下摁住它。

另外一点是，从秤的读数角度而言，本质上到底是什么使得秤上的水看起来似乎增加了？我们知道，用秤的时候我们是不需要关注这些问题的。在正常情况下，秤的使用是十分简单的，用的时候只要注意事先读数清零，要插上电，不用的时候锁好即可。但有时候你也需要关注此类表象性的问题。如果我把一颗体积为 1m^3 的球放入水中，排开的水会导致整个泳池的水位上升 1cm ，从池底开始算，似乎水增加了（水位变深了），读数也增加了，而事实上水的总量没有变化。

很多人会觉得这样一个答案难以置信，为了帮助他们理解，我做了一个小实验。我把烧杯中注上适量的水后放在秤上，烧杯的重量加上水的重量一共是 254g ，我把一个球一半没入水中，下一步为了测量到保持这个球的位置所需要的拉力，我改用弹簧秤来拉球。

实验结果：随着一半球放入水中，大秤的读数从 254g 增加到了 268g ；在弹簧秤上球的质量从没入水之前的 206g 变化为 192g 。弹簧秤上读数的减少正好是大秤读数的增加。假如把这个球用同等体积的木球替换

情况又会如何？依上述原理，秤的读数变化还会是那么多。

二次试验结果：大秤读数果然上升了约 14g（实际是 13g）。现在你明白了其中的道理了吗？当然这个问题你也可以动手自行解答，找到一台秤和一瓶水并不困难，只要把球放进水中，记录好秤的读数就可以验证了。

这个问题不失为一个好问题，而我们的回答则更为出彩。

π 会出现在与圆无关的场合吗？

我个人十分偏爱 π 这个数学符号，对于这点，我丝毫不隐瞒。连一个数学符号也喜欢？有什么特殊原因吗？我们来做一件有趣的事情，请你拿出计算器，把 π 这个值做平方，可以用计算器本身自带的 π 或者也可以取 3.1415，或者任意一个计算器位数容得下的值。

计算完成了吗？有没有觉得这个值看起来很眼熟—— π 的平方是 9.869，看起来正好和牛顿力学里讲的地球表面重力场内每千克物体所受到的地心引力值 g 很接近，这下你发现什么了吗？

且慢，到底你说的重力场是什么意思？由地心引力引起的 9.8，难道单位不是 m/s^2 吗？说的没错。很多人是以这样一种方式来认识它的，但它所谓的这个“名字”其实并不那么合适。我们来观察一本简简单单放在圆桌上的书，书放在桌面上是静止的，对吗？这说明它的动量改变为 0，而动量定理认为物体所受的合外力等于动量的改变值与时间之比。所以书所受到的合外力为 0，只有两个大小相同、方向相反的力作用在这本书上：向下的地心引力与桌子向上的支持力。

因此，用这个单位 m/s^2 地心引力的大小是多少？一般认为地心引力就等于书的质量与 g 的乘积。在地球表面，这样计算是成立的。但何谓 g ？假如你的回答是： g 是重力引起的加速度的值，就会产生一个问题，书在

这个时候并没有加速运动，对吧？

现在，如果你让书自由落体，那么作用在书上唯一的力就是地心引力。在这种情况下，它以 9.8m/s^2 的加速度向下加速。但做自由落体运动只是物体发生的一种非常特殊的状态，这种情况并不能涵盖物体的其他状态，故不宜把 g 称为是重力引起的加速度，而应该称之为引力场的强度。

那么 g 的单位也应该随之变化吧？如果 g 是引力场强度，那么它的单位应该是单位质量上所受到力的大小，可以把它类比为电场里单位库伦所受的力的大小。把 g 称为重力场并不只是物理叫法上的正本清源，它还能帮助初学物理的学生理解“场”的概念，当有这个重力场的概念作为铺垫，以后学习到电场，理解起来就不会很费力。

言归正传，回到 π 的平方。也许你会认为 π^2 的值和 g 相近只不过是世界上万千巧合里的一桩而已。然而，两者数值上的接近实际并非凑巧。但如果这件事不是巧合，那又为什么 π 的平方并不是完全和 g 相等？这是因为 g 本身也不是一个确值，它在地球表面的值是由很多因素决定的。首先， g 是个近似值，是我们在地球表面测得的，由于受到地球自转的影响，它把参考系的加速度也考虑在内了，离赤道越近， g 的值就越小。

另外一个影响 g 的因素来源于地球表面并不统一的地理条件。在一个由密度较大的岩石构成的区域， g 的值会增加，其值随着地理区域的不同而发生变化，并没有一个统一的定值。

关于 g ，比前面还要有趣的来了：为什么两个看似毫不相关的 π 和 g 是有联系的？这个和长度单位“米”也有关系^①。具体阐述这个问题前，我们先来认识一下秒摆。秒摆是一种钟摆，重物从一头运动到另外一头耗时

①1790年，法国国民议会将会“米”定义为：“纬度45度的海平面上半周期为1秒的单摆的摆长”。

正好是 1s（或周期为 2s）。

你肯定见过秒摆，家里祖父的钟摆就是一个秒摆（周期为 2s）。但从技术上来讲，祖父的钟摆并不是严格意义上的一个秒摆。秒摆^①一端用一根质量极轻的细线拴上一个质点（线可以在你家附近的五金店购买到）。而祖父的秒摆则完全不同，它有一根硬棒作为来回摆动的工具，棒有质心，它和秒摆的质心不一样。测量一下后者钟摆的长度，你会发现它的长度大致为 1m。而真正意义上的一个秒摆的长度实际就是 1m。当然如果你和你的朋友在地球上不同的区域各自制作一个秒摆，用到的线长度可能稍有不同。

去试一下，找来一颗质量较小的物体比如坚果，或者一颗金属球。金属球的效果会比较好，因为它的重力远远大于空气的阻力以致于后者可以被忽略。现在，令金属球质心与支点的一端之间的距离为一米，并让它以小角度摆动（大约 10° ）。你可以用视频记录下来或者用秒表来测时间。不管怎么测，小球从一边摆到另一边，两种方式测得的时间都应为 1s。

在此，我不加以推导直接给出小角度摆动的秒摆周期公式，但要从实验角度得出这个结果并不是特别困难^②：

$$T=2\pi\sqrt{\frac{L}{g}}$$

如果你希望周期达到 2s，你可以通过公式自己调整线的长度。此时线的长度 L 正好可以由 g 和 π^2 来表示。更进一步，如果长度如秒摆一样取 1m，那么得出的结果 g 的值为 π^2 ，约等于 9.8m/s^2 。等一下，刚才不是说

① 秒摆是一种单摆，在细线的一端拴上一个小球，另外一端固定在一个悬点上，如果线的伸缩和质量可以忽略，球的摆幅之间比线长短的多，这样的装置就叫单摆，单摆做“简谐振动”。

② 荷兰物理学家惠更斯（1629-1695）研究了单摆的振动，最终提出这个公式。

g 的单位是 N/kg 吗？好了，现在通过运算你该明白了为什么说这两个单位是等价了吧？

但是为什么 π 会出现在单摆的周期公式里？这个问题问得好。这是因为单摆的路线和圆形一样吗？不对。在弹簧下端挂一重物，用手拉一下，重物就以原来静止的位置为中心上下做往复运动，这同样也是简谐振动，它的周期公式和小角度的单摆周期公式在形式上一样。那么到底为什么 π 会在这个公式里？我认为最佳答案是描述简谐运动需要用到正弦与余弦函数，因为这个缘故，周期公式里才有了 π 。

很多表面看起来毫不相关的事物原来有着我们意想不到的联系。 g 和 π 就是这样一种情况，当然，有时候在其他没有圆的场合 π 依旧会出现。

世界人口增长，会把月球拉近地球吗？

这又是一个问得很到位的问题（我把问题简述如下，为了叙述上清晰，措辞稍有改动）：

我明白地球对月球施加的引力场取决于地球本身的质量。那么，我可不可以就此推断：随着人类人口的增加，我们会让月球越来越靠近地球？

下面我们将以不同的角度来考察这个问题。首先，到底人类体重的总质量是多少？当我写下这些文字的时候，全世界大约有 70 亿人口生活在地球之上。当这本书得以最终付梓之时，我希望人类人口还是 70 亿左右。到底怎么样，我们还是等着瞧吧。

如果已知人的平均体重，我就可以得出人类质量的总和，打这里开始我们就算做猜想了，当然这不是一个毫无凭据天马行空的胡乱猜测，因为我们的这个想法有着很明确的依据。一个男性的平均体重大概是 70kg，一个女性的体重约为 50kg，这两数据可能对于所有的成年人而言偏高，美国的成年人比世界其他地区的成年人体重肯定要大一些，我们还没有把孩童的体重计算在内，如果假设男人和女人在数量上大致相等，这样平均体重

即为 60kg，把孩童的体重也考虑进去，平均体重就下降到 40kg 左右。

40kg 只是一个估值，并没有十分偏离实际。因为如果我真的跑遍世界把每个人都放在秤上，会怎样？秤会坏掉，但是我能得到确切的平均值。我认为质量绝不会低于 20kg，同样也不可能高过 60kg（除非我们在某个地方发现一个新的巨人种族）。因此，40kg 的猜想是有根有据的。如果说是 100kg，那就脱离实际太远而只能贻笑大方了。

已知人类的平均体重，那么人类的总体重自然就等于人口数量乘以人的平均体重，得出的总体重是 2 800 亿（即 2.8×10^9 ）kg。这个质量很大，但与地球的质量相比呢？地球的质量是 6×10^{24} kg，人类的总质量和地球质量相比天悬地隔，不可同日而语（只占 $4.7 \times 10^{-14}\%$ ）。

人类的质量与地球总质量相比是微不足道的，但究竟微小到什么程度，要理解起来还不容易。如果我另外用一个例子来加以说明，或许你就稍微明白一点。地球上人体的质量总和和地球质量相比只相当于一个 60kg 体重的人身上一颗酵母细胞，可见人类的总体重和地球的总质量相比是多么微小。

这个问题到此还不算结束，地球上的“东西”质量会不会发生变化？“东西”这个词我用在这里，是想表达任何生命体和任何可以被消耗的东西，如空气与水。简而言之，这个问题的答案是否定的。人类从哪里来？或者我换一种问法：构成人体的所有物质从哪里而来？人的出生、生长所需要的“新材料”无非是从 3 个地方而来：空气、水和食物。对于空气里的元素构成人体质量的百分比，我并不确定，但可能占有小部分比重。

继续刨根问底：食物又从何而来？如果每个人都是素食，食物的来源就是植物，植物的质量又从何而来？它主要来自于空气。对的，空气。植物光合作用吸收二氧化碳制造出氧气，并把碳、水以及其他物质贮存起来，

以供生长所需。听上去尽管有点不可思议，却是真实的。

这至少间接说明，人体质量中有一部分真真切切来源于空气。当人死去，身体就被分解，产生更多的二氧化碳。这个循环无穷无尽，基本上人身体里面的所有东西都来源于地球上业已存在的东西，注意我说的是“基本上”。

有什么东西是一开始就不存在于地球上的呢？有什么东西增加了地球的质量吗？对于这两个问题，答案是肯定的。

什么时候地球的质量会损耗？首先，大气里面的气体会流失。想象我们的空气是一团彼此碰撞的气体，其中有一部分分子（氧气或者氮气分子）比其他分子运行的速度更快。如果它们的速度快到一定程度，并且位于大气层表面，它们就可以摆脱地心引力而散逸到外太空中去。这种情况的确在发生，但规模很小。第二种地球损耗质量的方式是人类把物体送到太空里去，但同样所有被人类送到外太空的人造天体的质量总和也是极其微小的。

地球也会增加它的质量——根据美国宇航局，每天有 100 多吨重的彗星撞击地球。如果经过一年的时间，质量总和可以达到 $3 \times 10^7 \text{kg}$ ，100 多年后留在地球表面的彗星的质量足以与人类总质量相匹敌。但是，我们的数学知识告诉我们，如果只有一个极小的量翻倍，得到的量并无质的变化，还是极小值。

总而言之，地球的质量的确是在变化，但是造成质量变化的因素并非人类。地球质量的变化和地球的总质量相比是非常之小的，因此对于地球的重力场来说并无大的影响。即使在未来，人类的质量比现在要多得多的情况下，地球质量的总和仍然是很稳定的。

为什么镜子成像是左右颠倒，而非上下？

我所有的孩子在他们生活的某一刻都注意到一个现象：当他们看着镜子的时候，一些东西看上去颠倒了。对，当你看着镜子里的自己，你的左手“跑”到了右边，镜子好像颠倒了左右。然而，在镜子里你的头还在原处，并没有出现在脚的位置。那为什么镜子没有把头 and 脚倒过来？这里有一个简短的回答：

镜子是不会把左右倒过来的，也不会把上下倒过来。如果答案就此打住，我何乐而不为呢？

但是你们了解我的，我不是一个会轻易放弃问题的人。

首先，去站到一面镜子前。在镜子前你看到什么了？你的头在镜子里面的位置正好是在镜子的顶端，你的右手在镜子的右边，左手在左边。没有什么转变，那这里面又有什么可以值得探究的呢？

问题在于，如果你跑进镜子里的世界（并不是指在镜子里的成像），这时候你的右手从镜子外面的你看来就是在镜子的左边，左手在镜子的右边。网上就有相貌十分相近的双胞胎为电视节目进行类似表演。两间完全相同的房间中间用一面玻璃隔开，双胞胎分别位于两边。让人觉得有趣的是，其他任何人进入房间都无法看见自己在所谓的“镜子”里的影像，但一旦看到那边有一个一模一样的孩子，他们就错误地认为这是镜子里的像。

视频里面，双胞胎中的一个孩子举起右手，另外一个孩子就举起左手。这就是我们觉得镜子颠倒了左右的原因。

让我们产生这种错觉的另一个原因可能和刚才讲的那个一样，看上去像但实质也不是一个物理问题。我们很清楚，显微镜、望远镜，哪怕照相机的镜头都会成一个倒过来的像，于是乎新手用起望远镜来就会感到不适，不知到底要如何调整自己的位置才算使用正确。事实上，双筒望远镜已经把倒过来的像再次颠倒，因为谁也不想用它来看一场天在下地在上棒球赛或者一只头朝下飞的鸟。理论上，当光线透过你眼睛的晶状体，就在眼底成一个颠倒的像，我们的大脑在这个方面起作用——对图像进行加工，这才成了我们所见到并不颠倒的世界。为什么会发生这种情况？答案：根据透镜原理，外界从上部射下来的光线穿过晶状体的焦点，在眼底下方成像，而从外界下部射上的光线则穿过晶状体的焦点，在眼底的上方成像。

这种情况和镜子成像的道理完全不同。镜子是把你射向它的光线直接反射回来给你，如果你绕一圈走到镜子里面，左边就是原来的右边，右边也变成左边，当然头的部位还在上面，只有你跑到镜子里才会发生这种现象。但是假如你一跳越过镜子跑到镜子里头，头是朝地，脚是朝天的，想想看，原来的左边还在左边，右边这在右边。这时候，上下是颠倒了，左右还是不变，这让你想得脑袋快爆炸了吧？可是，我还没说完。

现在我们就知道问题症结所在了。镜子问题的根源所在是我们的文化背景。我们脑子里面想的镜子成像就好比是我们跑到镜子里面一样，是我们的大脑自己定义了左右。如果我们脑子里的成像是头在下的，那么我要回答的就不是原来那个颠倒左右的问题了，该会是：为什么镜子把上下颠倒了？

镜子的确是颠倒了方位，镜子颠倒的是前与后。想象下如果你可以大

摇大摆地走进镜子里，右手的位置还在右边，左手在左边，头还在上面，这时你则背对着穿过的镜子，而不是你的正面，可这样你和像就根本无法重合，因此镜子颠倒的是前后^①。

① 这个问题的核心在于各个方向的定义，为此需要做一个区分，物理上和感官上的定义其实是有区别的。物理上，镜子真正颠倒了的方向只有前后，而上下、左右都没有颠倒。说得更严谨一点，如果设 x 为垂直于并指向镜面的方向， y 为上， z 为右，则镜子的作用是： x 变为 $-x$ ， y 变为 y ， z 变为 z 。



GEEK

PHYSICS

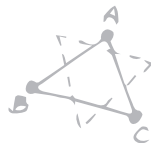


第二章

超级英雄

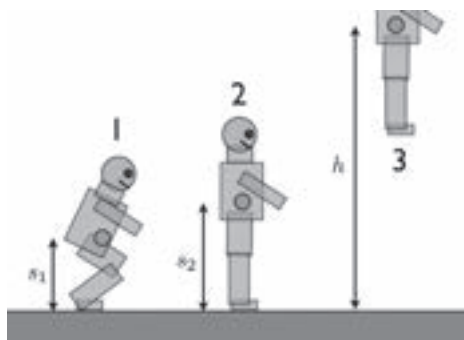


$$x_2 + 1x_3y_2$$



绿巨人浩克跳起来会砸坏路面吗？

绿巨人浩克^①不会飞，但无论是从漫画里还是电影《复仇者联盟》里所见，浩克肯定能跳得很高。当他一跃而起的时候，给地面施加了何种力？在解答这个问题前，让我以绿巨人跳跃这个案例开始，从它的跳跃过程中取 3 个位置加以分析：



我没有标明其中的力。在跳跃的过程中，它会受到地心引力以及地表给予它的支持力。对这类问题最好的解决办法是用动能定理（动能定理更

① 绿巨人浩克 (Hulk) 形象出自漫威漫画，有电影《绿巨人浩克》，由李安执导于 2003 年 6 月 20 日在美国上映。影片讲述科学家布鲁斯·班纳（后文也有涉及）在命运安排下成了父亲基因改造实验的试验品，每当情绪激动就变身成拥有超能力的绿色巨人，这使他成为美国军方的缉捕对象。

适用于物体位置上的变化，而不是时间上的变化）。动能定理的概念是外界对系统做的功等于这个系统动能的变化量。如何定义“功”？简单来说，功是力与其作用点位移的标积（技术上可能比这个要复杂一点，但目前我先简单地定义一下）。能量又是什么？如果我把绿巨人与地球看成整个系统的话，这个系统具有动能（描述运动物体的能量）和重力势能。

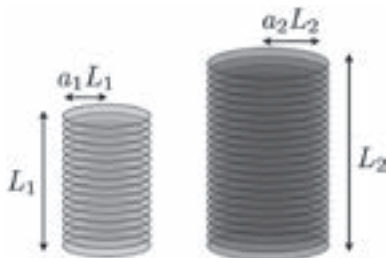
功和能往往以下述方式加以定义：能量就是做功的能力，功是改变能量的东西。没错，这有点循环定义的感觉，为什么？因为动能定理事实上只不过是我們用来计算的一个参考框架而已，它并不必然是具体化了的东西，只是对于我们所观察的任一系统，动能定理的计算方式是有效的。

回到绿巨人。为了观察重要的跳跃阶段，我们必须倒回去从第 1 个位置到第 2 个位置，绿巨人的运动简单而言就是一个竖直抛体运动，因为它的运动完全受到地心引力的支配。除了向上运动并且逐渐放慢速度，不涉及其他动作。当它到达最高点的一瞬间，它的速度为 0，这时所有的动能转变为重力势能。通过测量跳跃的高度，我可以计算出维持跳跃到最高点过程中所需要的功（从位置 1 到位置 2），如果已知激发跳跃发生的那段距离（即和地面接触直到离开地面瞬间的那段时间内），我能算出地表对于绿巨人施加的力的大小^①。

现在为了顺利计算，需要一些估值的帮助。首先，我需要绿巨人的体重。这项估算不太容易。绿巨人在电影里面以很多不同方式出现过，质量估算起来的范围比较大。让我们简单地认为它的密度和正常人类的一样，体积则和《复仇者联盟》里的相仿。

① 已知弹跳高度 h ，可知重力势能 $mgh = 1/2mv^2$ ， $v^2 = 2gh$ ，根据动量定理 $mv_2 - mv_1 = ft$ ，速度由 $2gh$ 减少到 0，最终可得 $f = 2gh/m$ 。

有一幕里面，绿巨人和鹰眼^①站在一道。如果鹰眼是一个身高正常的人类（约 1.8m 高），那么绿巨人的身高有 2.5m 左右那么高。这只是一个大致的估算，因为绿巨人身体是微屈的，但我还是用这个数据。那么到底绿巨人的体重是多少？很明显，绿巨人不仅比鹰眼高，身体也更加宽厚。假设绿巨人和人类一样是圆柱体，我可以这样把他们画出来：



在图示里，我用圆柱体来代表躯体。一般而言，身高越高，人的横截面就越大。圆柱体的高度和半径有相关性，我以常数 a 来联系两个量，代表高度与半径之比。绿巨人不是正常人类，他身高更高，体积更为庞大，据此，我粗略地认为代表绿巨人的圆柱体半径与高度之比 a_2 是鹰眼 a_1 的 1.25 倍。因此如果鹰眼的重量为 70kg，那么密度相当的绿巨人的体重则达 293kg。

这是个超级体重。在这里，重要的是要记住绿巨人的身高比常人要高 40%，并不简单地意味着他的质量就比常人大 40%。

对于这些圆柱体，我也有未竟之言。我可以想象有人会这样提出异议：“人可不是什么圆柱体啊！”这样说当然无可指摘，但以圆柱体模型大致地描述躯体大小这种特殊的做法并非毫无道理。这让我回想起著名的“球

^① 《复仇者联盟》中的人物，真名：克林特·巴顿，代号鹰眼（Clint Barton aka Hawkeye），官方排出的 50 大复仇者第二位，没有超能力的普通人。

形奶牛”^①的典故。如果你在物理学家身边待一段时间，一定会有人谈论到“球形奶牛”。到底什么是“球形奶牛”？

对此我可以快速作答。假如我在房间里面，丢出一根铅笔。为什么我要丢铅笔？不要担心，我有时候做事情只凭自己的喜欢，毫无缘由可寻。然而，假设我想为我抛一根铅笔这个动作建立一个模型，我该怎么做？我要考虑下述这些因素：

- 是不是应该认为它是一个弹性物体？如果是这样，我丢的时候它就会震动，收缩。

- 作为一个半刚性物体，我还是需要考虑它在3个方向上的转动，这个想法应该不算琐碎。

- 空气阻力怎么办？

- 房间空气的密度会不会有变化？

- 房间内的重力场恒定吗？

- 大桌子和铅笔之间有没有万有引力？

- 铅笔带有电荷吗？会不会和其他物体产生静电作用？或者和地球磁场产生电磁作用？

上述这些问题已经足够让你理解这个问题潜在的复杂性了。但如果我只想得出铅笔在水平距离上的初速度，需要这么麻烦吗？为了得到这个值，我可以把上述的问题抛诸脑后，一概不做理会。这样做不甚精确，但是我却能得到一个确实有价值、有信度的答案。事实上，我要做的就是把这个复杂问题以下列方式简单化：

^① 人们常用这个“球形奶牛”打比方，来说明物理学经常用不切实际的假想中的模型来解决实际问题，脱离实践的假设，其实是为了更好地实践。

- 质点
- 只有和地球才有的万有引力作用，并且引力场大小恒定。

这样一来这个问题就一下变得很好操作了。在物理（科学）领域里，我们试图建立起模型，这种模型未必就一定完美无缺，事实上它们也从来不是完美无缺的，我所需要的无非是一个可以起到作用的模型。如果我假设铅笔只是质点，这个模型就可以助我们解决问题。

再回到之前提到的那个“球形奶牛”的典故，我不知道这个笑话出自哪里，但我一直记得这个故事：

有一个奶场主有着奶牛和其他一切所需的工具。她想增加牛奶的产量，就问计于她聘请来的 3 位顾问：一个工程师、一个心理学家、一个物理学家。一周之后，工程师带着自己的报告归来，他说道：“假如你想增加牛奶的产量，必须用更大的泵、更粗的管子，来吸取牛奶。”

不久，心理学家也回来了。他这样向奶场主建议：“你想让奶牛产更多的牛奶，首要的就是设法让它们心情平静、快乐。快乐的奶牛才能产出优质的牛奶。把牛棚漆成绿色，这样奶牛就会觉得置身于草场和愉悦的田野，这样他们就会快乐了。”

最后，姗姗来迟的物理学家也来献计献策了，而她一开口说的却是：“假设这个牛是球形的……”

也许，对于不是物理学家的人来说这明显是一个笑话，不管如何，我还是觉得它对我是很有启发的。

有点儿跑偏了，我们回到对绿巨人浩克的体重讨论中来吧。有一点总

是令我颇为费解。布鲁斯·班纳^①是个英俊帅气的正常人类，是吧？但是他变成了绿巨人了。如果他从 70kg 的人变到将近 300kg 的绿巨人，那部分增加的质量从何而来？难道是像爱因斯坦的质能方程^②所说的那样，从能量转化成为质量了？那需要 $2.7 \times 10^{19} \text{J}$ 的能量，这么大的能量从哪里得到？太阳的能量输出总和是 $4 \times 10^{26} \text{W}$ 。然而，只有 $1.7 \times 10^{17} \text{W}$ 最终到达了地球。如果绿巨人能充分使用这些到达地球表面的所有太阳能，它也需要花上 2.5 分钟才能积累到足够“转变”成质量的所有能量。我想这些时间对于绿巨人而言太长了，弄不好转变之前绿巨人已经等不及而“大发雷霆”了。

但是，如果绿巨人的质量没有发生改变呢？在这种情况下，它的质量还是 70kg，但是它的密度就不一样了。就密度而言，他只有人体密度的 0.24 倍。对于人类身体密度的估算最简便的方法是利用水的密度—— $1000 \text{kg} / \text{m}^3$ ，绿巨人的密度只有 $240 \text{kg} / \text{m}^3$ ，这个密度值和瓶塞很接近，不可思议吧。

下一步做什么？我得估算出绿巨人的跳跃的高度。如果你看过《复仇者联盟》的预告，你就会感觉到布景里用的都是真实建筑的模型。我用 google earth 不断地搜寻，最终找到了一些我认为可能是影片里绿巨人进行跳跃的真实地点。从地图上来看，根据周遭建筑物的高度，我判断出来绿巨人的跳跃高度可能达到 120m。

至此，我们只要把数值代入公式就大功告成了。我计算的结果是 $4.08 \times 10^5 \text{N}$ 。这个力就是浩克在跳跃时施加给地面的强度，也是地面给浩

① 布鲁斯·班纳 (Bruce Banner)，《复仇者联盟》中的角色，核子物理学家，受到激怒之后即成为绿巨人浩克。

② 质能方程 $E=mc^2$ ，E 表示能量，m 代表质量，而 c 则表示光速（常量， $c=299792.458 \text{km/s}$ ）。由阿尔伯特·爱因斯坦提出。

克的支持力。没错，这只是一个平均值。但是这这也是一个最小的整体数值。如果我把非常力也纳入考虑，那么跳跃过程中有些力会小于这个值，有些则超过这个值。这个案例中分析的跳跃是最可能发生的，其值也是最小的整体数值。

那么，绿巨人浩克会把水泥地踩破吗？我的目标就是要回答这个问题。我倾向于认为，在跳跃过程中，浩克对于地面的压力足以使得水泥地开裂。我能弄清楚水泥地（不管是什么材料）到底碎了没有吗？我需要了解地面压缩力的大小，因为这是一种材料在破碎前能承受的最大压强值。

有了绿巨人浩克脚尺码的大小的保守估算，我得出压强值是 2.9MPa 。根据工程工具箱^①，水泥地所能承受的压缩力是 10MPa 。这样算来，绿巨人也许不会压碎马路了，难道不是吗？我怀疑这个力和浩克的移动曲线并不是均匀恒定的，而是有一个峰值的。

如果峰值超过这个力，就会产生较大的压强，路面便会碎裂，并且我将浩克脚的全部范围都计算在内了，因为万一他是平足跳跃呢？一般人不会这样跳起的，而是利用他们脚部的跖骨施加力，这样就会减少与地面的接触面，从而加大压强。

综上，我倾向于认为绿巨人浩克跳到哪里，哪里的路面就会碎裂，但是马路还不至于被他毁的一塌糊涂。

^①http://www.ergineeringtoolbox.com/compression-tension-strength-d_1352.html，国外一个为从业者提供工程学所需的专业资料、工具和基本信息的实用型网站。

雷神的锤子真能带他飞吗？

在我十几岁的时候，有人向我介绍了雷神托尔^①这个角色。在那个时候，我花了很多时间来看漫画书。我不喜欢表现出对事物的喜乐好恶，但我得说，令我最为着迷的还是漫威漫画公司^②的作品，我很少翻看 DC 漫画公司^③的作品。在惊奇宇宙^④里，雷神并不是我最喜欢的超级英雄，但我承认他真的很酷，也很有型。

哦？你以前从没有听说过雷神这个名字？你甚至没有看过《复仇者联盟》？好吧，让我带着你快速了解一下。在漫威漫画的那个称为“惊奇宇宙”的空间，雷神是一位北欧神，他被暂时地放逐到地球。也许，他是外星人，

① 雷神托尔（Thor）是漫威漫画公司旗下的超级英雄，其原形为北欧神话中的托尔，是众神之父奥丁的长子。他常成为好友钢铁侠的对比，特显了科学与神话的差别。

② 漫威漫画公司（Marvel Comics）旧译为“惊奇漫画”，是与美国 DC 漫画公司（DC Comics）齐名的漫画巨头。它创建于 1939 年，于 1961 年正式定名为 Marvel，旗下拥有蜘蛛侠、钢铁侠、美国队长、黑寡妇、雷神托尔、绿巨人、金刚狼、超胆侠、恶灵骑士、蚁人等 8000 多名漫画角色和复仇者联盟、神奇四侠、X 战警、银河护卫队等超级英雄团队。2010 年 9 月，Marvel 宣布其正式中文名称为“漫威”。

③ DC 漫画公司（DC Comics）是美国与漫威漫画公司（Marvel Comics）齐名的漫画巨头，创建于 1934 年。1938 年 6 月，公司在《动作漫画》创刊号上创造出世界上第一位超级英雄——超人，从此改写了美国漫画史。

④ 惊奇宇宙（Marvel Universe）是惊奇漫画的英雄居住的宇宙。

我不记得电影是否交代过这方面的背景。关键的一点是他有超能力，随身带着一把名叫 MJölnir 的超级锤^①。这名字里面的字母是北欧语言里的，很特殊，写起来很费劲，因此这个锤的名字我就不再在文章里面赘述了。

关于这把锤子的起源，有一个版本是这样的：奥丁神^②命令矮人铁匠用恒星核铸造了这把铁锤。请注意，即使在漫威的惊奇宇宙里，还有很多关于 MJölnir 起源的故事。但如果我采纳这把铁锤是用恒星核打造的这个版本，那我就可以计算出这把锤子的质量，我接下来要完成的事情就更容易被理解了。

如果你从一颗恒星核心提取一些样本，那这个样本会以一个什么样的面貌呈现出来？会不会是高温灼热态的？答案是肯定的，温度会极其高。密度也会很高吗？我想也是的。行文到这里，我想该是时候谈谈恒星了。

简而言之，一颗恒星也就像一颗行星。说它像一颗行星是因为行星和恒星都是由物质积累起来的。假设在太空里有一个由巨大的氢气构成的云，氢气又来自哪里？让我们简单假设此刻氢气就在太空的那个地方。由于所有的氢原子具备质量，彼此之间相互产生万有引力，这种引力作用是很小的，但随着时间的推移，它会导致氢云坍缩。

通常，这团坍缩的气体云可以形成一个太阳系（一颗恒星与数颗行星并行）。但我们只观察恒星。如果这个巨大的氢气团行成了一颗恒星大小的球体，伴随这个过程必然会发生什么情况？为什么它不继续缩小？难道有什么阻止了这个坍缩的过程？我想这其中的原因和海洋为什么不坍缩成

① 雷神托尔的著名武器为妙尔尼尔（MJölnir），就是“雷神之锤”的意思。

② 诸神之父奥丁（又译奥汀、欧丁）北欧神话中的至高神，阿萨神族的神王、天空的人格化、世界的统治者，被称为诸神之父，司掌战争、权力、智慧、魔法和死亡。在北欧神话中，雷神托尔是奥丁的长子。

为海底薄薄的一层水的道理是如出一辙的。

海洋中的水分子通过与其他下层的水分子的碰撞形成一种斥力而获得一种向上的支撑。海洋中水层所处的位置越深，那里的水分子就越需要与它更深处的水分子产生更多碰撞，这样才能有更强大的斥力支撑所有上层水分子。这意味着水层越深，水压越强。如果情况不如我所言，那么整个海洋的水就会坍缩到一个令人咋舌的高密度，最终在海洋底部形成一片薄层。

本质上，恒星上的情形和上述海洋的是一致的。恒星和海洋之间的巨大差别在于恒星体积上要大得多，并且并不是由水构成的。液态水有一个有趣的特性^①使其密度在大的水体中基本为一常量。但如果你取组成恒星的氢气并增加压强，密度是会增加的。一片海洋的深度可以是几英里^②。与之相比，一颗较小的恒星，如我们的太阳，半径就可以达到约 400 000 英里。这样大的体积意味着内部有超高的压力，可以阻止其由于万有引力而造成的崩坍。同时伴随着这个压力，密度也会达到一个异常高的值。

假设打造 MJölnir 的材料正是从在我们附近的一颗恒星——太阳中找来的。它的密度约为 150g/cm^3 。那是相当高的。记得一立方厘米的水的重量是 1g，铅的质量是 11.4g。太阳不仅密度高，温度也非常之高，约为 15 000 000K（灯泡丝约等于 3 000K）。

如此致密又灼热的东西是一种什么样的材料？它主要是自由的质子和离子氦。在这个温度下，氢原子是不会存在的。因为氢原子内部的电子能量太多，太活跃，已经无法再待在某个特定的原子内部。相反，它们可以

① 水的压缩比很小（不像空气），因此海洋表面与海洋底部之间的密度差别不大。

② 1 英里 \approx 1.609 千米 \approx 1 609 米

自由地在周边活动。对于氦而言也是这样一个情况，有 2 个质子和 2 个中子结合在一起，但没有电子。

怎样才能做到把这种材料从恒星核中取出？我不知道。但如果你能把它拿出来，它显然是灼热态的。这样倒是正好，因为此时你可以趁热打铁将它锻造成你所希望的任何形状，也许你想把它做成一把锤子。但也有几个问题：首先，这个原锤会很热，任何东西靠近它便会融化，那样事情就很难办到了。但真正的问题是，当你想把材料冷却的时候，带正电荷的质子与其他带正电荷的质子会出现相斥的现象，因为它们都具有相同的正电荷。当它们还处在太阳的核心时，这些质子并没有真正其他的选择，它们只能被束缚在一起，要知道它们是被 400 000 英里厚的物质挤在核心位置。一旦你把这些物质从核心处取出来，质子和氦原子将纷纷从物质块上跳离。简而言之，这些物质会蒸发。

你不能把氦作为固体物质保留下来，氢也是如此。最终，这块核心材料会融化殆尽。

那我可以拿其他类型的恒星作为星锤的材料吗？在更大质量恒星体中，氢气和氦气可以通过核聚变形成质量更大的元素，甚至可以形成铁原子。铁这个材料就很理想了，它可以在室温的条件下以固体的形式存在。所以这个选择很好。但也有几件事情需要考虑。首先，如果恒星具有较大的质量的话，其内核心也将有较高的密度。密度究竟有多大则取决于恒星的大小。当一颗恒星处在形成铁原子的过程中时，它的核心密度可以高达 $1 \times 10^8 \text{g/cm}^3$ 。这是无法想象的。此外，温度将约为 20 亿开尔文。

当然，当该材料冷却下来（这将需要相当长的时间），它将膨胀。一旦它返回到室温，它应该有铁的密度，地球上的铁每立方厘米大约 7.8 克。最终，这也只是一把普普通通的铁榔头。

若以正常思维来想，就太无聊了。如果你有一个由恒星核制作完成了的密度高达每立方厘米 1 亿克的锤子，会发生什么情况？这是一个相当高的质量。假设锤子是一个长方形的立方体，具有约 $15\text{cm} \times 15\text{cm} \times 8\text{cm}$ 的尺寸（不包括手柄）。它的体积会达到 $1\,800\text{cm}^3$ 。因为密度是质量与体积之比，质量是密度乘以体积。这样这把锤子的质量为 $1.8 \times 10^{11}\text{g}$ （在地球的表面上）。如果要把这把锤子捡起来，你可以想象一下，我只好祝你好运了。

如果在地球表面，雷神用力将这把锤子举到离你头顶 50cm 的位置会怎么样？在这种情况下，将有两个万有引力作用在你身上。地球对你有一个向下的引力（对我来说，这将是约 160 磅力），同时锤子也会对你施加向上的引力，因为它也有一个大质量。而通常情况下，我们会忽略这个引力。

利用万有引力公式，我们可以计算出锤子对你拉了 0.33 磅的力。并没有让我们觉得高到难以置信。但你仍然可能会对此有所察觉。当然，越接近这把锤子，引力越大。如果在距这把锤子中心 3.5cm 处的位置放置一块物体，锤子对这块物体引力与地球对这块物体的引力相同。而实际上，锤子的厚度超过 3.5cm ，你很难做到这一点。

我想这巨大的质量可以解释为什么没有人能拿起它，除了认为真值得那样去做的人以外。

好了，有关锤子的构成问题已经谈论得够多了。还有另外一件有趣的事情，雷神是如何飞行的？在某个地方，我误认为雷神甚至能飞。显然，这是错误的，他并不会飞。相反，雷神抛出他的锤子，拉住手柄任由锤子拉住他飞行。这是怎么发生的？

让我们从一个简单的模型开始。假设 MJölnir 和托尔具有相同的尺寸和质量。如果两者彼此靠得很近，那么质心将是在两者的中心位置。现在，如果抛出雷神锤又会如何？要做到这一点，他会在一段时间内对锤子施加

力，随之锤子的动量将增加。然而，力总是两个物体之间的相互作用。这就意味着，无论托尔施加在锤上多少力，锤都会在相反的方向施给托尔一个大小一样的力，且作用的时间和托尔施力的时间长短一致。因此，当托尔抛掷铁锤，锤的动量增加，托尔的动量则在相反方向增加。

但如果雷神抛出铁锤之后又把它抓住，情况又会如何？本质上会发生和上述情况完全一样的事情。通过抓住锤子，托尔将施加力，锤子也将施加一个力在他身上。所以，通过抛掷这把锤子，他可以让自己的身体移动起来，但当他抓住锤子之后，他又会马上回到原来的位置上，实在称不上是“飞行”。哦，在这种状况下，即便是锤子的质量再大一些也一样无济于事。

一般情况下，我们称这种现象为“动量守恒”。如果一个系统里有两个对象，没有外力，质心的动量是不会改变的。如果一个物体在一个方向上具有动量，另外一个物体则将在相反的方向具有同样大小的动量，这样就会使总动量不变。

然而，还是有办法可以改变的。只有一种方式可以使总动量改变。答案就是依靠外力。如果雷神垂直向上抛出铁锤，将有一个外力作用在雷神－铁锤组成的系统上：地面。在地面的作用下托尔和铁锤被抛起来了。同样，也可以在水平方向由摩擦力来完成这项动作。所以，铁锤可以在某种意义上帮助托尔在空气中移动，却不能帮助他飞行。但要想在空气中移动，也很困难，需要你能够让你跳起来一样的强度和大小的力才能做到，而且用的是你的手臂，不是你的腿。

还有一个问题有待解决。在空中如何转向？假设托尔扔出铁锤之后能升到空中，要想改变方向就一定需要某个外力的作用。他可以完成在空中转的唯一方法是扔出这把铁锤，但身体却脱离它。如果他把铁锤往左边丢

掷，那么他就会被推向右边，这样动量守恒，他却不得不丢掉铁锤。

你们不同意的声音我已经听到了：“MJölnir 也有回到他主人手里的能力”。如此说来，必须有一定的外力作用。我弄不明白这把铁锤是如何做到这点的。我所能做的，就是把已知的物理模型比如力和动量运用到那些虚构的，诸如雷神之锤类的东西。我能做的很有限，但我觉得仍不失为一件妙趣横生的事情。

如何计算美国队长的盾有多重？

让我们来看看《美国队长》^①。我得事先说清楚，我要看的是《美国队长》系列的第二部《美国队长 2》的电影版“冬日战士”，而非《美国队长》的漫画版。这两个世界（漫画书和电影）并不总是一致。

在一个场景中，美国队长向冬日战士抛出了他的盾（因为这是美国队长常做的动作）。别急，冬日战士截住抛向他的盾，紧接着把它反扔给了美国队长。整个动作很酷的那部分是，当他抓住时出现了这样一幕。盾的力量十分强大，这让他接住以后身体向后退了一点距离。能不能就此计算出这枚盾的质量？我想是可以的。

这种计算涉及两个部分。在第一个部分中，我需要搞明白盾在和美国队长碰撞前的运行速度是多少？这样我才能把盾和美国队长之间的碰撞看作正常的物理碰撞来加以处理解决。第二个部分，我需要知道盾和美国队长一起向后退的速度是多少。

由于计算的顺序并不重要，让我们来看看美国队长在碰撞后获得的共同后坐速度。

你如何从视频里测量后坐速度？最简单的方法是使用某种类型的视频

^① 美国队长（Captain America）是漫威漫画公司旗下的超级英雄，首次登场于 1941 年 3 月出版的《美国队长》漫画第一期（*Captain America Comics* #1），他被视为美国精神的象征。

分析工具，在视频的每一帧里确定美国队长的位置，从位置和时间数据，可以很容易计算出后坐速度。但是，在这种情况下行不通，为什么呢？其原因是，要想视频把数据呈现出来谈何容易。在一个理想的视频里，电影场景将美国队长连同一些物体一同在银幕里展现出来，这些物体可以被用来确定其他物体的体积大小。最重要的是，所有的运动将和摄像机的视场成垂直视角。朝向和远离摄像机的运动会产生一定的问题，因为由于透视的关系，物体的大小会出现变化。遗憾的是，这部影片不能给我们提供一个用于分析的良好视角。

还有什么办法可以断定后坐速度？也可以通过假定美国队长开始滑动时具有一个初速度（后坐速度），然后以恒定的反向加速度不断减速，我可以从摩擦系数计算求得这个加速度。

如果我估计摩擦系数为 0.3（砾石在硬表面上就是这个数值），并从视频上得出滑动时间为 1.08s 的滑动时间，这样得出的后坐速度是 3.24m/s。请记住，这是美国队长抓住盾之后和盾的共同速率。

为了得到盾牌的质量我需要做两件事。首先，我需要美国队长的质量。这应该是很容易估测的，因为他只是一个人（是的，一个完美的人）。比方说，他重约 100kg，那现在盾的碰撞速度是多少？我将必须从视频里得到这个值。

有短暂的一幕展示了冬日战士抛出后的盾牌。根据维基百科，盾牌直径为 0.76m。我可以使用这个比例尺来给盾牌绘制出位置和时间关系。由此，我得到 19.5m/s 的盾牌速度。这是一块运行速度相当快的挡箭牌，但我想这对于超级英雄而言是小菜一碟。

我如何使用这一切信息得出盾牌的质量？这是关于碰撞和力的特性。当盾与美国队长相互碰撞，盾必将推动他，他也用力推回盾，力的大小

是相等的。为什么这些力是一样的？答案很简单，就是力是两个物体之间的相互作用。当你用力推墙，它也用同样大小的力推回你。你和墙壁之间如此，美国队长和盾牌之间也是如此。此外，实际还有一些别的关于碰撞的方面。盾牌向美国队长作用力的时间等于美国队长反推盾牌的时间。

为了把这些想法善加使用，我们首先需要看看动量原则。这是说当一个力作用在一个物体之上会改变该物体的动量。鉴于对美国队长施加的力和盾牌受到的力大小相同（但方向相反），美国队长的动量变化和盾的动量变化也将是彼此相反的。显然，这样的说法我也可以换一种角度来讲，那就是：碰撞前美国队长和盾牌的动量和碰撞后美国队长和盾牌的动量相同。我们称之为动量守恒（因为它是在前后一样）。

在这个特殊的碰撞里，美国队长和盾牌在碰撞之后合并为一个物体在移动。我们把这称为非弹性碰撞。这种碰撞是很容易计算的，因为两个物体碰撞之后具有相同的速度。在美国队长和盾碰撞这情况下，计算甚至更为简便。因为，在碰撞之前，仅是盾牌在运动。这意味着碰撞前盾牌的动量等于之后的动量。

现在，我们已经准备好使用我们得到的一些值了。我们已经估计了盾和美国队长碰撞后的速度，而且我们也知道盾和美国队长碰撞后的共同速度。把这些值都放在一起，我就可以把一个未知的量求解出来——盾的质量。

你准备好得到答案了吗？凭借 3.24m/s 的后坐速度和 19.5m/s 的盾的速度，得到盾的质量 19.9kg （假设美国队长质量是 100kg ），这是一个相当庞大的 43.9 磅的盾。与此同时，我们也可以计算这个盾的密度。如果我

假定它是一个扁平的圆盘，直径 0.76m，0.5~1.0cm 的厚度（只是猜测），密度的范围将是 $4\,383\sim 8\,767\text{kg/m}^3$ 。这个答案似乎是合理的，因为铁的密度是 $7\,800\text{kg/m}^3$ ，钛的密度是 $4\,500\text{kg/m}^3$ 。

它还是一个相当沉重的盾牌。要把这个大块头投出去，需要很扎实的身体素质。和抛出一个棒球或足球相比，把这枚盾牌抛出去是很困难的。我想这就是美国队长是一名超级英雄的原因。

超人可以一拳把人打飞到太空里去吗？

超人如此强大，天底下罕有什么事情他办不到，不是吗？那他能不能大手挥出一拳，把人打飞到太空里去？让我们通过一些估算来回答这个问题吧。

当我说到空间，你很可能会想到“外太空”。但这“外太空”的天到底有多高？包围在地球周围的大气层^①并不仅仅停留在某个高度就不存在了，它自上而下由密度不同的气层组成。事实上，高度越高空气的密度就越低，不断上升，最后大气层里的空气就会稀薄到荡然无存。就因为这个道理，我们需要选定一个我们能称之为“太空”的高度。我会挑地球表面以上 420km 处的位置为“太空”。为什么是这个高度？而不是其他数值？因为 420km 是国际空间站的轨道高度，选这个高度是有理有据的。

一个人若要想直达太空得以多快的速度向着天空直行？我先申明，这就是文章一开始提出的超人挥出拳头痛击一个人之后的情形。当然，如果超人击中一个正常人，这人的躯体大概就难逃厄运了。为了避免这种问题发生，让我们首先假设超人打的是跟自己一模一样的克隆人，这个克隆人我在文章里称为“超人 B”。当超人 B 飞起来的时候，只有两个作用于他

^① 整个大气层随高度不同表现出不同的特点，分为对流层、平流层、中间层、暖层和散逸层，再上面就是星际空间了。

身上的力——一个是会随着他高度不断上升而减少，但减少幅度不大的重力；另一个则是大气对超人 B 的空气阻力。一般的情况下，尤其是取近似值的时候，我们都把空气阻力忽略不计。要知道，也许在先前的一场战斗里，所有的空气早已经从地球被吸尽了，这是未为可知的。

如果我们要考察涉及位置变化的运动（从地球表面到 420km 高空），那么我们首选动能定理。动能定理告诉我们，对系统所做的功等于该系统能量的变化量。如果我把那个被打的人（超人 B）加上地球看作一个系统，那么系统之外就没有其他力对系统做功了（请记住，这是从超人挥拳之后），该系统的能量的变化量为 0。在这种情况下，存在两种形式的能量：动能与重力势能。

我们尚不知道这个被打的人的初速度，但我们知道他的末速度。在运动轨迹的最高点，此人的瞬时速度为 0，然后马上坠落下来，这也就意味着最后的动能也为零。那么重力势能的变化呢？对于两个相互作用的物体，重力势能与它们的质心之间的距离成反比，它也取决于两个物体的质量和万有引力常数。已知这些量，我就可以解决一个刚才不知道的量——那个人的初速度。

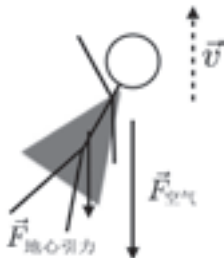
$$\begin{aligned}
 W &= \Delta K + \Delta U_g = 0 \\
 0 &= 0 - \frac{1}{2} m_h v_1^2 - G \frac{m_h M_E}{R_E + h} + G \frac{m_h M_E}{R_E} \\
 v_1^2 &= 2GM_E \left(\frac{1}{R_E} - \frac{1}{R_E + h} \right)
 \end{aligned}$$

把所有已知量代入公式^①，那么我可以计算出他一开始的“发射”速

① 如果考虑 g 是变量的话，那么重力势能 $E_p = mgh$ 就过渡到引力势能，引力势能表达式是 $-GMm/r$ ，零势能处在无穷远，r 是物体质心与地心之间的距离。

度是 2778m/s。是的，这个速度已经极快了，但超人 B 必须比这个速度还要快，为什么呢？有空气阻力，这就是原因。

这是超人 B 被击中后的受力分析：



我用以下两个公式来得出重力的大小与空气阻力的大小：

$$F_{\text{gravity}} = G \frac{M_E m_s}{r^2}$$

$$F_{\text{air}} = \frac{1}{2} \rho A C v^2$$

万有引力公式里包括地球的质量 M_E 和超人 B 的质量 m_s ， r 是介于超人 B 和地心之间的距离。万有引力会随着超人 B 上升的高度而相应减少。

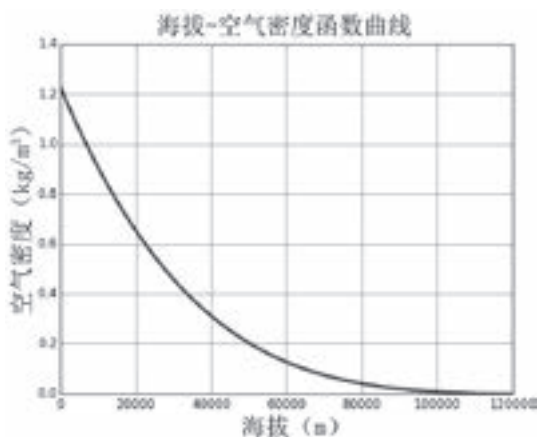
在空气阻力公式里， A 是物体的横截面^①面积， C 是阻力系数，取决于物体的形状。 ρ 是空气的密度，高度越高，密度将降低。正如你所知，空气阻力会随着速度和海拔高度而变化。事实上，阻力系数 C 也是取决于速度的，但我会暂且不考虑这个因素而认为这个阻力系数是恒定的。诚如你所见，如果再考虑阻力系数的变化，问题就不简单了。

我来做些估算，假设超人 B 和常人具有一样的身体尺寸和形态，质量相仿为 70kg。假设有个跳伞运动员自由落体，那么阻力模型中 AC 的乘积就可以根据这位跳伞运动员的最终的速度 v 算得。如果一个跳伞运动员以 54m/s 的速度落下来，做匀速直线运动，合外力就为 0，那么空气阻力就

^① 横截面是物体的迎风面。

将等于该跳伞运动员最后的身体的重量。经计算， AC 的乘积是 0.392m^2 ^①。在超人 B 这个案例中我取的是 0.05m^2 的 AC 值。为什么呢？因为前面的计算考虑到的只是一个跳伞运动员以一般自由落体下落，而超人 B 是以一个头朝天的位置被“发射”，他的横截面积将小得多， 0.05 的估值可能稍低，但是合理的。

另一个问题是处理空气密度的变化。幸好，我已经了解过高海拔地区的空气阻力问题——红牛斯特拉托斯太空跳伞^②开始的位置，空气密度比在地球表面的空气密度要低得多。在跳伞运动速度不断降低的过程中，我用下述曲线函数来表示这个密度变化的过程：



可见，这个模型对于海拔超高的情况并不适用。所以对这个模型，我使用的有效范围大概在 100km ，超过这个限值之后空气的密度忽略不计。是的，我知道这种忽略是不精确的，但它仍然可以帮助我们得出想要的结果。对于这项忽略，首先，我要表明超人 B 的初速度是非常大的，

① 计算过程中常温下空气的密度 ρ 可以取 1.19kg/m^3 。

②Red Bull Stratos Space Jump 红牛斯特拉托斯太空跳伞是红牛公司的一个营销活动。

在高海拔忽略空气密度的条件下会使得计算出的初始速度偏小（因为实际上超人同时需要克服空气阻力）；此外，当超人 B 到达这些高海拔地区后，即便有一些空气，可由于密度很小，运行的速度再快，空气阻力仍然会很小。

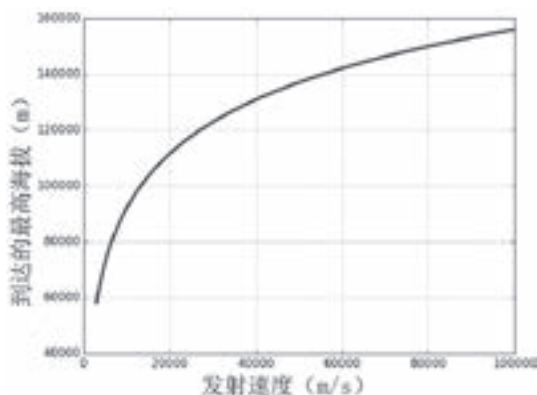
现在怎么办？我不能直接计算出所需的初速度。不过我可以随意选择一个初速度，然后创建一个数学模型以确定超人 B 能到达的高度。然后，通过不断增加初速度，代入公式直到我得到我想要的高度。对于每一个初速度的选择，我会将整个运动过程分解为几个时间段。每一个时间段里，我将按部就班地完成：

- 根据高度计算出空气的密度；
- 通过高度、空气密度和速度分别计算出地心引力和空气阻力的大小；
- 有了这个合力，计算出这段时间动量的变化；
- 基于动量计算出这段时间高度的变化^①；
- 重复上述步骤。

这些步骤看似复杂异常，但也不难完成。运用这个公式，我可以算出被击中的超人 B 以 2 778m/s 的初速度能达到约海拔 6 500m 的高空，但这甚至还没有摸到我们刚才划定好了的 420km 位置的“外太空”的边呢！

如果我继续增加速度来进行模拟，并结合空气阻力加以计算，那结果又将如何？最终速度如果足够高，是可以到达外太空的。这里我以初始速度为自变量（至 10^5m/s 为止），到达的最高海拔为因变量，绘制了一张两者的函数关系图：

① 动量定理可以计算出时间，最高位移可以根据 $\frac{1}{2}gt^2$ 计算出来。

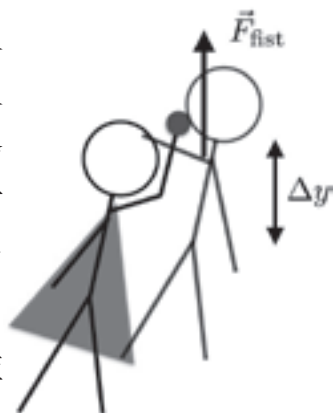


由图可见，即使以 10^5 m/s 这样的高速，超人 B 也只能到达大约 13km 的高度。对此，我本人也有点失望。我本来以为超人 B 应该可以到达一个高于这个海拔的高度。这样算下来，就算让超人在珠穆朗玛峰顶端挥拳痛击，也很难把超人 B 送入太空。可问题在于有空气阻力，为了抵消空气阻力做的那部分功，你需要给超人 B 一个更高的初速度。但是，如果初速度变大了，也就意味着空气阻力更大。一旦以一个超级速度启动，那么空气阻力模型也就不成立了。

超人真的能把人打入外太空吗？也许可以吧，但那可不是简单的一拳。这事就算让超人来做，也有点儿麻烦。

但是，这一拳之击到底如何？比方说超人用尽全力向超人 B 挥拳一击，力量之大让超人 B 被打飞的最初一瞬间的速度达到 10^5 m/s ，又会怎么样？会发生什么？比方说，一拳正好击中下巴——漂亮的一记曲臂挥拳上击，超人 B 被击中瞬间的受力分析为：

在这里，超人 B 进入太空的速度经过一段距



离 ΔY 从 0m/s 陡然增加到 10^5m/s 。达到这样的效果，超人的打击力需要多大？我将忽略重力（重力效果在这种情况下微乎其微），并使用动能定理。如果超人 B 是我的分析对象，那么只有超人能完成这个动作。为了计算功，需要拿超人拳头的力的大小去乘以位移距离。这个功产生了什么样结果？它改变了超人 B 的动能（它也改变了重力势能，但相对于动能的变化这个量是非常小的）。

如果我已知最终速度和挥拳的距离，我便可以计算出这一记超级拳力量大小的平均值。目前唯一没有估算的就是这记挥拳作用的力的距离是多大。我的估计是 0.75m ，这个数值对于这个动作而言是比较宽松、略大的。如此，最终力的平均值为 $4.67 \times 10^{11}\text{N}$ 。

假设超人拳头的接触面积为 70cm^2 （我测量了一下我的拳头的正面，得出这项估算，当然超人的拳头肯定更大一点），在超人 B 的皮肤上会产生多大的压强？

$$P = \frac{F}{A}$$

$$P = \frac{4.67 \times 10^{11}\text{N}}{0.007\text{m}^2} = 6.67 \times 10^{13}\text{Pa} = 9.67 \times 10^9\text{psi}$$

这是一个很高的压强。一个普通的潜水箱内部有 $3\,000\text{psi}$ ^① 的压强，一架钢制坦克的钢壁有 0.75 英寸厚。我这样说的目的何在？我此刻在想，如果超人可以以这样的强度去击打超人 B，那这么一拳足以打穿头颅。我很清楚，这么说肯定让人感到不舒服。

那么超人的脚和地面之间的压强有多大呢？超人对地面的压力大致应该等于他打超人 B 拳头的力量。当然，他脚的接触面积比他的拳头的接触

①psi 英文全称为 pounds per square inch。其中，p 指磅 pound，s 指平方 square，i 指英寸 inch。美国习惯使用 psi 作单位， $1\text{psi}=6.895\text{kPa}$ 。

面积要大，但这个压强仍然是巨大的。我敢肯定拳头打出去的同时超人自己也会陷进地面。

这么大的力作用在超人 B 上，会有什么样的效果呢？如果超人 B 的体重为 70kg，我就可以计算出他受到打击的过程中加速度的平均值，即力除以质量（对比而言，地心引力太小再次可以忽略不计）。经计算，平均加速度为 $6.67 \times 10^9 \text{m/s}^2$ 。

假想超人 B 由两部分组成：头部质量为 7kg，身体其他部分的质量为 63kg。超人打的恰好是超人 B 的头，为什么他身体的其余部分也随之加速呢？当然了，头和身体是连在一起的嘛，超人 B 的头部通过脖子把整个身体连带拉起来。但为了使身体和头部一样获得加速度，则必须用 $4.2 \times 10^{11} \text{N}$ 的力。

一尼米兹级航空母舰^①的重量约 $9 \times 10^7 \text{kg}$ 。如果要产生上述大小的力，你可以把超人 B 头朝下脚朝上倒挂起来，然后在头部挂上 4 500 艘航母。我无法断定你的头能否承受，但我认为他的头是肯定保不住了（还有，整个世界也拿不出 4 500 艘航母来）。

综上所述，我们明确一点：超人没法送任何人上天。如果他真的使尽浑身力气动手打了某人，那么那个品尝他拳头滋味的人很可能头已不保了（模样也可能更加惨烈）。还有，如果超人打出这样力大无穷一计拳的同时，自己也该陷进地里去了。

也许超人应该吹一口气，狂风乍起，一下就可以将人吹飞吧。

① 尼米兹级航空母舰（英语：Nimitz-class aircraft carrier）。尼米兹号得名自第二次世界大战太平洋舰队司令切斯特·威廉·尼米兹，是美国海军隶下的一艘现役核动力多用途航空母舰，作为美国海军远洋战斗群的核心力量，搭载多种不同用途的舰载机对敌方飞机、船只、潜艇和陆地目标发动攻击。



GEEK

PHYSICS



第三章



真实世界的物理

$$x_2 + 1x_3y_2$$



你需要用多少冰来冷却你的啤酒？

如果你打算花上一些时间在外面避避暑，喝点冷饮是个明智之举。选什么样的饮料？苏打水还是啤酒？无论喝哪种，冷却饮料的最好方式就是把饮料放入一个含有冰的冷藏箱内。

问题如下：

你实际需要多少冰才能让你的饮料冷却下来？

让我从一些量的预设入手这个问题：

- 假设室温下你有 n 罐饮料，它们的温度与室内温度均为 22°C 。
- 你既有冰块又有饮料，冰正好为 0°C 。
- 假设这些饮料罐里充满的是水。罐装水是最受青睐的饮料，对于这点，实际上我挺惊讶，因为你可以思考一下，罐子里是水，恰好让我可以利用到水的比热容。
 - 用多少水？标准量为 12 液体盎司，也就是 355 ml 或 355g 的水。
 - 罐是铝制的，重量约 15g。
 - 冷藏箱本身没有质量。是的，就是那些你在超市里随意可以买到的无质量冷却器。另外，当冷却作用发生的时候，传递的能量是很小的。

那么实验该如何开始？其中涉及哪些物理定理？一开始，我想告诉大家：物体是具备热能的，物体温度越高，体积越大，热能就越高。我想做到的就是把饮料的热能传递到冰上。有一个关于温度的有趣事实——当两个物体接触一段时间后，它们会达到相同的温度。要小心，不要把热能和温度混淆。如果你把比萨放在铝箔上一起放到炉子里面加热，比萨和铝箔最终会达到相同的温度。但即使比萨和铝箔最后具有相同的温度，你更容易被比萨烫伤，而不是铝箔，因为比萨所含的热量大大地高于铝箔，另外，比萨的味道也更佳。

如果你把一罐饮料倒到 0°C 的水里^①，最明显的变化就是冰在形态上从固相转变为液相。这种状态变化要求饮料把能量输送到冰，水（刚才的冰）的温度将增加，饮料的温度将降低，最后冰完全融化，看到的就是饮料和水了。这一结果可能不是你想要的，但要实行冷却用的原理就是这个。

随着温度的变化，有多少能量参与其中？事实证明，物体热能的变化取决于温度的变化、质量和比热容。

$$\Delta E_{\text{thermal}} = mC \Delta T$$

这里， m 是物体的质量， ΔT 为温度变化， C 是比热容。此外，不同的物质有不同的比热容。这就是为什么一杯热气腾腾、满是泡沫的咖啡杯子不会使你烫伤，但里面的咖啡（大约和咖啡杯是相同的温度）却会了。

如果物体是改变状态，从固体到液体，这也需要能量。所需的能量取决于质量和混合物的熔化潜热^②。

① 零摄氏度水的状态可能是液态（水），可能是固态（冰），也可能是固液共存的状态（冰水混合物）。

② 熔化潜热是指当物质加热到熔点后，从固态变为液态或由液态变为固态时吸收或放出的热量。在物理、化学中为重要的概念。

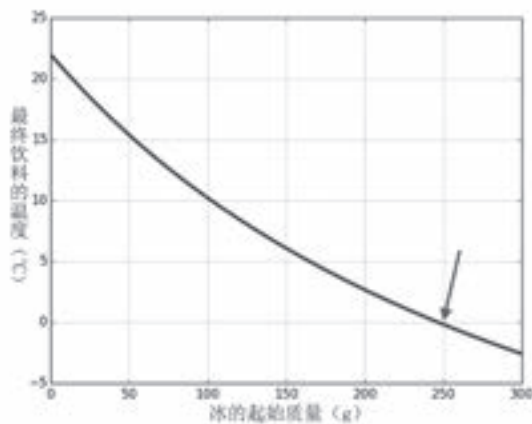
现在来做些估算。比方说，我有一罐汽水或啤酒。我需要多少冰才能把它冷却下来？你需要它冷却到一个什么样的程度？如果你暂时不能决定也没关系。我会帮你画出一张以冰的起始质量和饮料的最终温度之间的函数关系图。请记住，我假设饮料（和铝罐）的起始温度为 22°C 。

这里关键的一点是，冰的能量的变化（转变成水）和饮料的能量的变化之和必为零。

问题出在冰能量的变化上，如果假设所有的冰全部融化，融化过程中所需的热量全部来源于饮料，那饮料可能最终比冰的起始温度更低。虽然从能量守恒角度来讲是合理的，但这种情况不会真正地发生。

这是问题的关键，因为在这种情况下物体的温度会发生改变，直到它们的温度相同为止。

因此，通过上面的思路，我可以绘制一张以冰起始质量（在 0°C ）为自变量，一罐饮料的最终温度为因变量的函数关系图。



箭头指示的位置是你可以把饮料降到的最低温度——这个温度是永远不会比冰的起始温度更低的。100g 冰可以最终让你得到 0°C 的水和 0°C 的饮料，

把这一结论推广到 6 罐（饮料，不是我的肚子^①）就需要 600g 的冰。

这张图，让我以更现实的方式来加以说明。上面的计算其实默认所有的热能都从饮料进入到冰水中。事实上，这是理想的状态，因为一些其他的热能也将进入冰内（从冷藏箱和冷藏箱外部）。假设冰得到的热能中有 60% 来源于饮料以外。在这种情况下，那么每罐饮料则需要 250g 的冰，6 罐装的饮料则需要 1500g 的冰，12 装的饮料需要 3 000g 的冰。

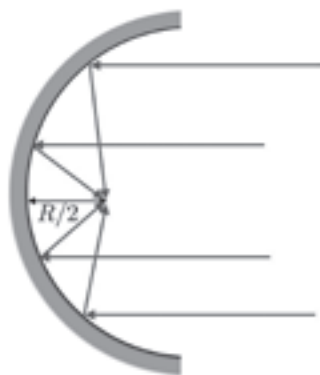
如果我倒过来思考这个问题又会如何？我先不决定我用多少冰，而先去购买 4500g 重的袋装冰，这么多冰能冷却多少饮料？使用上述计算方法，计算得出是 18 罐。

那么，到底答案是什么？我想我会推荐每 12 罐饮料用 4500g 重的袋装冰来冷却。这样一来，最终不是所有的冰都会融化，你也可以借助余下没有融化的冰来保持饮料在较长的一段时间内仍处于冷却状态。

^① 在英语里 a six-pack 原本指的是 6 罐包装的饮料，但现在这个表达变成了一个俚语，意思是 6 块腹肌，作者在这里这样说是担心误解。

一栋房子能产生死亡射线吗？

前段时间，有报道说，坐落在拉斯韦加斯的韦达拉宾馆能产生死亡射线^①，这则故事一时间流传甚广。一般而言，一幢表面光亮、曲线型的建筑物会反射太阳光线，并将太阳光线聚焦成一个太阳能热点。其原理与用一面放大镜汇聚太阳光将蚂蚁杀死的原理异曲同工，只不过太阳能热点灼烧的是汽车和人。这种现象是因何而成的？建筑物成了一面二维的曲面镜。当远处有一个光源（譬如太阳）照射到这面曲面镜时，所有的光线都被反射汇聚到一点，这个点就被称为焦点。



如果光束平行（比如从一个遥远的光源），那么焦点将集中在一个距

① 死亡射线现象特指因建筑物汇聚太阳光而造成物体燃烧、人被灼伤的事件。

离曲面中心 $1/2$ 半径处。但建筑物不是一个二维结构，它更像一个庞大的曲面圆柱体，而不是一条线。如果我想依照这样一个建筑建立一个物理模型，我必须以某种方式加以分解。

如果只用一面单一的、垂直而立的矩形镜子又会如何？有了这些垂直的镜子沿着一条曲线路径排列，这样一下子我就把这种特殊形状的建筑模型建好了。

对于单一的一面矩形镜子，阳光照射下会形成一块形状为矩形的反射光线，如果镜面正朝太阳，反射后落到地面上的光线也将是矩形的。地面上的光亮区域的大小将取决于反射镜的大小和太阳在地平线上的角度。当太阳位于低空，反射面积要大一些，反之当太阳处在高空，光亮区域将变得较小。

为什么经过反射之后光亮区域的大小那么重要？光强，这就是原因。光强表示的是光每秒在单位面积上的能量，太阳光照射在地球表面的光强约是 $1\,000\text{W}/\text{m}^2$ 。

如果反射镜是平面的，所有照射在矩形镜面上的太阳光能量将均匀地分布在反射区域中。因此，地面上一块很小的反射面积接受到的光强会比只有太阳直射的情况要高得多。

你想起来了吧？现在还只是一块矩形镜面的反射，更为关键的是，现在有许多这样的平面镜，它们以一种特殊的曲面方式排列组合在了一起，地面反射光区域必然会有交叉重叠。

为了估算在该重叠点的光强，我需要更多的关于建筑物的细节。我假设这栋建筑高度是 300 英尺^①，可以容纳假想的 30 面镜子，每面 10 英尺宽。

① 英制长度计量单位。1 英尺 ≈ 0.3048 米。

我进一步假设太阳光中的 70% 经由建筑物反射到地面，造成一块面积大小为 10×15 英尺的热点，这块热点的光强可以达到 $17\,000\text{W/m}^2$ 那么大。

$17\,000\text{W/m}^2$ 的光强会造成哪些危害？我可以告诉你，在这个强度下，塑料会轻而易举地熔化。那和太阳能热狗电饭煲比呢？你还记得这个东西吗？基本上，它就是在内侧贴上反射层的一个纸箱而已，盒子的一侧开有一个透明的塑料盖。阳光照射进来以后对箱体内部进行加热。对于这种器具，工作原理就像温室效应一样：太阳的可见光可以穿过塑料盖。一旦加热热狗，热狗就散发出红外辐射，然而红外线是透不过塑料盖散逸到箱外的。

这样一架太阳灶的功率达到多少？如果你认为没有从太阳光聚焦光线，那这纯粹就是标准的 1kW/m^2 的功率。但如果你假设所有的日光集中在热狗大小的区域里，单位面积的功率将取决于炉子的大小和热狗的大小。假设太阳灶的大小为 $30\text{cm} \times 30\text{cm}$ ，热狗是 $1\text{cm} \times 10\text{cm}$ ，即面积比为 $90 : 1$ 。所以，如果所有的能量集中在热狗上，那强度就会达到每平方米 $90\,000\text{W}$ 。我估算实际值的功率是 $20\,000\text{W/m}^2$ ，这与我们刚才计算出来建筑物达到的 $17\,000\text{W}$ 每平方米的功率接近。

一栋建筑物真能形成一束死亡射线吗？是的，是完全可以的。我想建筑设计师在建造房屋的时候并不总是把这些与周围环境（如太阳）有关的互动因素纳入考虑。

一把扫帚如何做到直立不倒？

如果你从未见过一把扫帚直立不倒，那么我可以告诉你，一把扫帚完全可以站立起来。在派对聚会上你可以大显身手，放开手，让它竖直站立在地面之上。随之而来，旁观者会这样说道：

哦，今天十字连星^①，是个特别的日子，你才可以让一把扫帚保持平衡，直立不倒！

今天也许确实是个特殊的日子（这个派对是为了庆祝你的生日或者别的什么），但行星的位置对于任何事情其实是起不了任何作用的。

让我从重力入手。这里重力可不是你爸爸讲的“质量乘以 g ”得出的那个重力。我要讲的是真正的引力——牛顿引力（除非你的爸爸恰好是牛顿，那他说的才是我们要讲的）。万有引力是物体之间因质量而产生的相互作用，它不仅仅是物体与地球之间的相互作用，因为这种相互作用只是两个物体间发生的最为显著的相互作用中的一例而已。假设我有两个物体，一个质量为 M_1 ，另一个质量为 m_2 ，两者之间的距离间隔为 r （由质心之间

^① 天空中太阳、月亮和九行星将组成“十字架”形状，故称为十字连星。宗教传说往往认为十字连星会给世界带来灾难。

实测得出)，那么两者之间的万有引力的大小是：

$$F_G = G \frac{M_1 m_2}{r^2}$$

M_1 、 m_2 表示物体的质量， G 是引力常数，值为 $6.67 \times 10^{-11} \text{N} \cdot \text{m}^2/\text{kg}^2$ 。对不起，我不得不把这个数字写下来，要知道这个数值是非常之小的。

扫帚呢？扫帚的质量我估计是 1kg，这个重要的数值后面会用到。什么物体在与这把扫帚产生相互作用？显然，那是地球，地球的质量大约为 $6 \times 10^{24} \text{kg}$ ，而扫帚距离地球的球心大约为 6 000km（地球的半径）。既然我已经了解了所有的数值，现在我就把这些值代入到这个万有引力公式里，我最后经计算得到重力为 9.8N（我故意为地球质量和半径取个整数值）。现在你终于知道为什么有一个“质量和 g 之间的乘积”这一公式了吧？因为它算出来与万有引力正好是一致的，也就是说地球表面每 kg 物体受到的地心引力为 9.8N，9.8N/kg 即来自于此，地球表面的物体都可以用“质量和 g 之间的乘积”这个算法来简单算出所受到的重力大小。

现在，那行星的问题又该如何解释呢？此刻，金星在夜空中正闪闪发亮，但它离我们有多远？用互联网的方式来解答这个问题真是再好不过了，我建议使用 wolframalpha^① 这个网站，因为该网站提供给我们金星的质量以及我们和金星之间的距离。使用这两个值来取代刚才代入公式里的地球质量和物体距离地球球心之间的距离，我们算得万有引力为 $2 \times 10^{-8} \text{N}$ 。与地球的引力相比，这个力确实是很小的。为什么会这样？原因出在距离，虽然金星的质量和地球的质量非常相似，但两者在距离上实在是相去甚远。

那换另一个不同的星球呢？我们也有类似木星这样质量大一点的星球啊？木星的质量约为金星质量的 1 000 倍，当然距离上则更为遥不可及了。

① <http://www.wolframalpha.com>

根据它的质量和距离，最终我计算出的引力为 $2 \times 10^{-7} \text{N}$ 。这个力还是跟刚才那个一样也微乎其微。

让我们再换一个对象来加以研究。你和扫帚之间的引力是多少？假设你的体重为 65kg ，身体的重心和扫帚的质心之间距离为 0.3m ，这将产生一个 $4.8 \times 10^{-8} \text{N}$ 的引力。是的，这也是很小的力。但是，这个力显然比你和金星之间的引力要更大一些。所以这便是你该有的答案——就连在扫帚周围走的人都可以和扫帚之间产生一个引力，而且这个引力和行星与扫帚之间的引力在大小上还相差无几（或许还是人和扫帚之间的引力大一点呢），那么就算十字连星又能怎么样呢？

还是回到这个问题，假如不是由于行星的引力让你把扫帚直立起来的话，你又是如何做到让扫帚平衡的？其实这并不困难。有十分重要的两点需要考虑。首先，一把扫帚的质心是相当低的，其位置比许多人估计的还要更加接近地面，因为扫帚前部的刷件在扫帚底部，又比扫帚柄要来的宽大，所以整个扫帚的质心很低。

质心和平衡一把扫帚之间又有什么关系？如果扫帚的质心并不是位于对扫帚的某个支撑之上，那扫帚就要倾倒。因此，在这种情况下，扫帚的支撑区域已经被扫帚前部的刷件覆盖掉了；还有一点，也许是最重要的一点：刷件是会弯曲的，它像一个弹簧，具有回复力。这就意味着你不必在放手之前就非得让它平衡。你只需要靠近扫帚去尝试一下。一旦你让扫帚真的直立起来，你可以尝试去做另外一件异曲同工之妙的事：让一个鸡蛋直立。好不好直立与月球、太阳和行星一概无关。一年中任何一天只要你会小心翼翼地去做都是可以做到的。关键是要把鸡蛋玩转，这些鸡蛋蛋壳表面通常都有一些小疙瘩，恰恰可以被用来使鸡蛋直立起来。这件事看起来极酷，做起来也不像你听到的那么难。

平衡一个扫帚是个很酷、很好玩的游戏，但它不是由什么十字连星造成的。你不必相信别人告诉你的一切，有时候他们甚至不知道真相是什么。

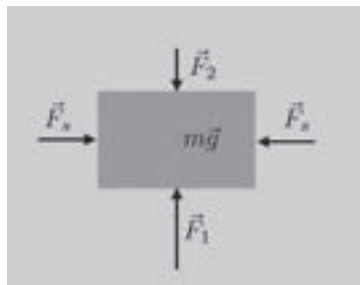
车坠入湖，亚当的自救方式会不会反倒断送了自己的性命？

在其中一集《流言终结者》里，亚当和杰米以亲身实战的方法来检验车辆沉湖之后的逃生办法。我不得不说，这一集内容是相当惊险刺激令人激动的。他们把亚当放在一辆汽车里（配一个潜水安全员），一下把亚当连车带人倾倒在湖里。虽然车上吊有缆绳，以防汽车沉入湖底的深度超过 4.6m，但这仍然算是一个相当惊悚的“流言”。我觉得我在水下可以算是游刃有余的了，但看了亚当的这个情况，我还是为他大捏一把汗，看起来真的太让人提心吊胆了。

第一幕展示了亚当如何在水中弃车而逃，这一切看上去还没有什么问题。然而，正是在这个时候我发现他作弊了：他不得不使用应急潜水员给他带来的氧气罐。这也是我担心的部分，带水肺^①潜水时最重要的规则之一就是不要在上升的时候屏住呼吸。我不是说亚当屏住呼吸了，只是我也看不清楚他到底屏息了没有。我要说清楚，如果你的车坠入一个湖里，你也没有水肺呼吸器，那你只要屏住呼吸、使劲游上来就万事大吉了（好吧，至少这一部分这么行事尚属安全）。亚当的问题出在，可能他带着水肺往上游的过程中屏住呼吸了。

^① 水肺（英文缩写为 SCUBA）又叫自携式水下呼吸装置，人们潜入水中，可凭借它来自由呼吸。

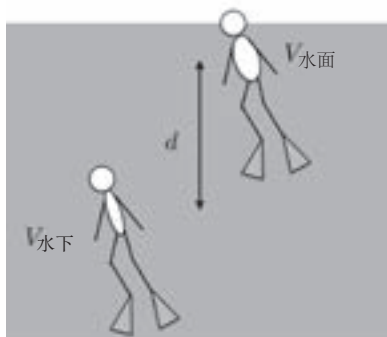
为什么会有这么一个“勿屏息”的规则制约着水肺潜水？你回忆得起来我说过压强是单位面积上受到的压力吗（压力除以面积）？当你潜入水里更深处，流体的压力增加。为什么压力会增加？嗯，有几种方法来思考这个问题。假设我们从浮力的角度来考虑这一问题。一块在水里的水块应该在水中浮起来，对吗？这就是一张水块在水里浮动的图：



在水里越深，水压就越大。假设我有一个装满水的气球，沉没在水里并在下端拉住球。看上去，球体和在水面之上没有什么差别，大小也一样。这是因为水的特性决定着水并不能被压缩很多。但是，如果球是用空气填满的，情况就完全不同了，气球会产生压缩的现象。球位置越低，水压越大，气球的体积就越小。球体会不断收缩到内外压强一致时为止。

当你把气球压得越来越深时，压力增大，球体积减小。现在想象一下这个气球就是你的肺。这个想象是合适的，因为它们在水里的表现很相似。事实是这样的：如果在水面之上我深吸一口气，憋着气潜到水下 5m 的深度，我的肺部体积会压缩减少（肺里有一定量的空气）。

现在稍微改变一下你在水中的动作。你潜到 5m 的深度，然后用水肺呼吸器呼吸。水肺呼吸器配备有一个调节器（它与呼吸器连接在一起），它把空气的压力调节之后再空气送入潜水员口中。为什么要经过调节？这样做十分关键。下次去游泳池，你可以按以下描述试试看：取一条 2 英



尺长的管子（聚氯乙烯 PVC 或类似的都可以），潜入水中，管子一端用嘴含住，一端跟水池外面的空气相联通，这时尝试在水下用管呼吸。这时你会发现你很难呼吸。为什么不能通过管子呼吸？请看图示：



吸气时，你的肺部需要相应扩张。问题在于，肺部外边的气压本来就高于肺内部的气压，空气会主动进入你的肺部，你的肌肉必须进行反推来呼吸。如果你的肺不再扩张，就不能带来更多的空气，这样就好像有人坐在你的胸口一样。水肺呼吸器之所以能让你在水下无论多深的地方都自由呼吸，是因为有一个配套的调节器已经平衡了潜水员肺部内外的压强。我时常告诫那些初次潜水的人用水肺调节器而不用通气管来呼吸，就是因为前者比后者呼吸起来要自由无阻得多。

我还没有完整地回答这个问题，是不是？为什么带着水肺呼吸器潜水不能屏住呼吸？我们再回到亚当的那个亲身实验来看看。假设他被困在水下 5m 一辆完全倾翻的车内，困住之后他从水肺呼吸器那里呼吸了几口气。这时他肺里的空气压力与 5m 深的水下压力相同。现在，他屏住呼吸，全力向水面游上去的过程中会发生什么现象？和他向下潜水肺收缩的过程正好相反，他的肺部扩张了——如果肺部能做到的话。然而，肺部极有可能已经不能再扩张，尤其当他刚刚还满满吸了一口气之后。一旦需要扩张，就意味着肺部还需要承受额外的压力来接受增加的空气压力，说到这里恐怕你已经有所明了了。

一名屏住呼吸向着水面游去的潜水员可能面临两个危及生命的伤害：第一个是空气栓塞。基本上，空气会从肺部被推进入血液。血液中有气泡可不是什么好事，这些气泡可引起各种不良反应，专业所限我们就说到这里为止。第二个可能称为肺气压伤，即肺部破裂或撕裂。当然，这也一样是种非常严重的伤害。

潜水员可以在使用水肺呼吸器时屏住呼吸吗？可以的，只要他们不改变位置，不往上潜就没什么问题。因为屏住呼吸再加上上潜的伤害足以致命，潜水员干脆就被简而化之地告诫“永远不要屏住呼吸”。如果你确实需要屏住呼吸往上潜，至少你应该吐气。这样，原来会让你肺部扩张的那部分空气会从你肺部离开。实际上，比较被认可的方法就是在上升过程中口里发出一些轻微的嗡嗡声，空气如此就缓缓从口中散逸开去。虽说这样做很不自然，但如果你不想死，就应该通过这个手段保存你肺里的空气。

我确信亚当的安全员事先向他解释了这一切，但这仍然让我心有余悸。

造一架人力直升机难吗？

是否有可能造一架人力驱动的直升机盘旋于空中？嗯，是的，有可能。有一个马里兰大学 GameraII^①项目就成功做到了。这架人力驱动的直升机成功地在空中盘旋了约 50 秒的时间。好奇的观众很可能会马上问这样一个问题：要完成这个项目有多难？

直升机的操作是很不容易的。你有没有见过在直升机上的那些控制按钮？它们的复杂程度足以令人望而却步。但是，某个事物异常复杂并不意味着我们就不能为之创造出一个简单化的模型来分析它。我想要分析一下的正是直升机在空中悬停需要多少能量。

我们从最基本的原理说起。一架直升机能悬停在空中是因为它向下“抛出”空气。火箭用的也几乎是一模一样的工作原理，只不过火箭自身并没有携带任何空气^②。如果你想向下“抛球”，你必须用力拍球，同时球也会向你回弹。如果你用手拍球的力度足够大，在球给你的回弹力的作用下，你就可能离开

① 参看 <http://www.agrc.umd.edu/gamera/gamera2/index.html>，艾尔弗雷德旋翼机中心网站。

② 火箭是靠火箭发动机向前推进的。火箭发动机点火以后，推进剂（液体的或固体的燃烧剂加氧化剂）在发动机的燃烧室里燃烧，产生大量高压燃气；高压燃气从发动机喷管高速喷出，所产生的对燃烧室（也就是对火箭）的反作用力，就使火箭沿燃气喷射的反方向前进。火箭推进原理依据的是牛顿第三定律：作用力和反作用力大小相等，方向相反。

地面。当然，如果使劲推球，回弹到你手中的球又会马上脱离你的手。如果你开过枪，感觉过射击时的后座力，你就会明白这个道理——开枪之后子弹以难以置信的高速从枪膛射出，形成一个与子弹方向相反的后座力。

同理，直升机也通过向下不断“抛球”来解决这个悬停的力的问题，只不过对于直升机来说，现在的“球”变成了空气。

让我们为这个向下“抛空气”的直升机建立一个模型，假设直升机的螺旋桨下排的空气形成了一个圆柱体的空气结构，空气的最终速度是 v 。我可以简单地了解到这个气柱的长度，然后根据空气密度（大约 $1.2\text{kg}/\text{m}^3$ ）计算出空气的质量。如果空气的初始状态是静止的，那么要把空气的速度增加到 v 所需力的大小就取决于这段加速时间的长短。

由于该空气柱的长度取决于速度和时间，我可以给出一个只由“推速”决定的力的表达式^①。

$$F_{\text{air}} = \frac{\rho A v^2}{2}$$

这里 ρ 表示空气密度， A 为螺旋桨转起来扫过的面积（就是被向下排的空气柱的横截面积）， v 是向下排的空气的速度（就是我才说的“推速”）。为什么“2”会出现在分母部位？这是因为我假定空气开始时静止，加速到 v ，整个过程的空气柱平均速度就是 $v/2$ 。

如果你对这个公式不放心想查验一下。你看一下，该公式的计算结果是牛顿，即力大小的单位，恰是施加到空气上的力的单位。此外，如果增加螺旋桨的尺寸或者空气被下排的速度，所得结果也会相应增加。这些结果都从侧面验证了这个公式的正确性。反过来，如果速度增加，算出来的力大小减少，那就不对了，是吧？

① 由动量定理得 $f=mv/t$ ，空气柱的长度 $L = \frac{1}{2}vt$ ， $m = \rho LA$ ，代入最终计算得出该表达式。

根据牛顿第三定律，这个力在大小上必须能够支撑整个直升机。这个论断是很重要的一个条件。如果已知直升机的质量和螺旋桨的尺寸，我就可以算出空气“推速”的大小了^①。

直升机的功率需要达到多少？如果你还记得，功率指的是物体在单位时间内所做的功的大小。在此例中，直升机所做的功就是不断使得空气圆柱的速度从零增加到“推速”过程中的动能，中间所花的时间则由空气的速度决定。将这些量放在一起，我得出了一个直升机能在空中悬停的所需功率的数学表达式：

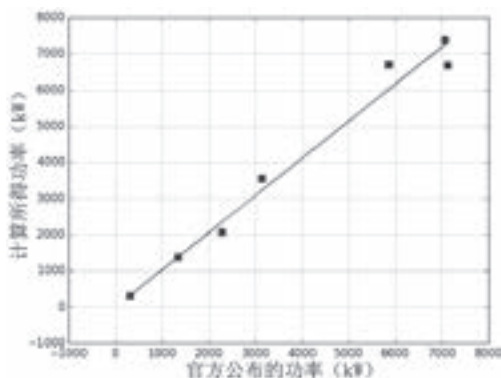
$$P = \frac{\rho A v^3}{4}$$

请记住，这仅仅是悬停所需的功率，它并没有把地面效应^②纳入考虑，也忽略了直升机在空中的向前运动或者其他因素。但你怎么才能判断一个模型是否合理？我把这个模型用到真正的直升机上试验一下如何？如果你查看一下维基百科，你可以找到很多有用的直升机数据。我找到了直升机各种各样的数据，包括：质量、螺旋桨的尺寸和发动机功率等。

鉴于推速可以根据螺旋桨的尺寸和飞机的质量来计算，我可以用这两个量来得出一个直升机悬停所需的功率。这是我的计算得到悬停功率(y轴)与实际在维基百科上列出的真实的直升机发动机功率(x轴)之间的对比图：

① 根据力的平衡可以列出 $(m_{\text{直升机}} + m_{\text{螺旋桨}})g = F_{\text{空气}}$ ，代入第一个公式即可以算出空气下排的速度 v 。

② 空气的动能和压力是可以相互转化的能量形式。当气流加速时，压力降低；当气流减速时，压力升高。机翼是一个上下不对称的面状物体，机翼上下的压力差形成的向上升力支撑飞行器在空中飞行，当飞行器贴近地面或水面、在低于翼展的高度以下飞行时，机翼下面的气流会被逐渐充塞，作用在整个机翼下面的压力明显增大，使升力陡然增大，这种奇特的空气动力特性就是“地面效应”。



显然，整个图看起来具有线性^①关系，不是吗？这就说明我建立的直升机悬停功率模型并没有和实际偏离得很远。而且，我还发现，关于维基百科上直升机的真实数据还有一个相当有趣的地方：假如你按质量和空气“推速” v 来做图，两者之间你会根本找不到任何相关性。因为事实上，所有现实的直升机的“推速” v 都在28m/s左右。根据上述公式来看，这就意味着直升机越大，质量越大，只有增长螺旋桨才能维持一个较大的功率供给，因为空气被向下排的速度即“推速”基本上都维持在恒定的28m/s。

那么，我们如何使用我们已知的这些物理知识来建造一架人力驱动的直升机呢？首先，让我们先来分析一下 GameraII 项目的实测数据。这架人力驱动的直升机（或者干脆就叫它人力直升机^②）质量为32kg，有4个螺旋桨，每个半径为6.5m。对于飞行员的质量，取60kg为宜。我建议你去看看拍摄这架直升机时的镜头，我这里先把要点总结给你：首先，4个约12m长的螺旋桨就意味着要占据一个很大的空间，看上去就像用农具做

① 指量与量之间按比例、成直线的关系，该图显示计算功率与官方公布的功率具有一定程度上的一致性，即符合函数 $y=x$ 。

② 英文原文是 humacopter，即是把 human 和 helicopter 进行组合之后构成的一个新词，即人力直升机。

成的一把用在池塘上的大网勺一样，而且重量也得出奇得轻；此外，飞行 50s 便能在室内离开地板，在理想条件下悬停一分钟不到。这样如同鸡肋般的效果，恐怕詹姆斯·邦德或蝙蝠侠^①都是不会觉得有什么用处的。

大型的螺旋桨对直升机意义也很大。螺旋桨扫过的面积大、功率一定时，空气“推速”就可以低得多。第二个表达式有两个因素对功率产生影响：螺旋桨的尺寸和“推速 v ”。进一步分析这个公式的数学特性，我们可以看出：功率 P 和螺旋桨扫过的面积 A 成直接正比关系，但和“推速 v ”的三次方成正比。如果你把“推速 v ”加倍，功率就增加 8 倍，而面积加倍，功率也只是一样加倍。因此，要尽量降低制造的难度，螺旋桨要尽可能的大而轻，这样对于由人力维持的“推速”的要求就可以减轻。

如果我使用这些 GameraII 项目里的数值代入到第一个、第二个公式来计算所需要的“推速 v ”，我得到结果是 1.68m/s，功率 P 为 755W，比一个马力稍高。虽然这已经是一个相当高的功率要求，但也并非高到人力所至的范围之外。根据维基百科^②的描述，优秀的自行车运动员的功率输出可以以 2 000W 维持很短一段时间。755W 自然也不轻松，但还是有可能做到的。另外，这人力直升机的飞行员是手脚并用的，他的手和脚同时在曲轴上做功。根据我们的计算这个项目是可以成功完成的。

我不得不指出，整架项目制造出来的带有 4 个大螺旋桨的人力直升机

① 詹姆斯·邦德 (James Bond)，是《007》系列小说、电影的主角。小说原作者是英国作家伊恩·弗莱明 (Ian Fleming)。在故事里，他是英国情报机构军情六处的特工，代号 007，被授权可以干掉任何妨碍行动的人；蝙蝠侠 (Batman) 是 DC 漫画公司旗下的超级英雄，1939 年 5 月于《侦探漫画》(Detective Comics) 第 27 期首次登场，是漫画史上第一位没有超能力的超级英雄。

② 参见 http://en.wikipedia.org/wiki/Human-powered_transport

看起来颇有点像神盾局^①里的“天空航母”^②。“天空航母”是什么？在《复仇者联盟》里面，有一艘叫“天空航母”的航空母舰，飞起来也是用4个巨型螺旋桨。那么，现实中运用这样的设计能成功吗？这个飞行器能悬停于空中吗？让我先以一些假设入手来解答这个问题。

- 我只会采用《复仇者联盟》里面那个天空航母的样式。在漫画里面，它还有其他的样式。

- 不存在特殊的空气动力学效应的问题，如地面效应，来协助天空航母悬停。直升机近地而飞，对于能量的需求其实并不大。这是因为，螺旋桨下排的空气和地面产生相互作用，反过来又和直升机产生相互作用，这就形成了所谓的地面效应。

- 在电影里的“天空航母”的大小和质量和一个真正的航母所差无几。

- 该“天空航母”在螺旋桨的气流作用下悬停，它并不像一架质量轻于空气、处于漂浮状态的飞行器^③。我想这和我在电影中看到的情况不谋而合，因为电影的拍摄者所展示的“天空航母”就是放在水上的，和一架普通的航母一样浮在水面上。

如果“天空航母”和尼米兹级航母有一样的长度和质量，那么查到的资料显示它的质量约 10^8kg ，长度 333m，螺旋桨面积将达到 $4\,000\text{m}^2$ 。

运用同样的模型，我可以把这些值代入前面的公式来估算出航母所需

① 神盾局 (S.H.I.E.L.D.) 全称为国土战略防御攻击与后勤保障局 (Strategic Homeland Intervention, Enforcement and Logistics Division)。是 Marvel 漫画中的组织，它帮助钢铁侠组建了由众多超级英雄组成的复仇者联盟。主要对手为二战时期德国组建并延续至今的秘密恐怖组织九头蛇。

② 天空航母，英文 *helicarrier*。天空航母是神盾局的标志性设备，经常出现在漫威漫画中，它的出现象征着神盾局总部。

③ 气球就是一种质量轻于空气的飞行器。

的“推速”。经计算，速度是 640m/s。需要澄清一下，这个速度比声速更快，虽然还比不上航天飞机上固体火箭助推器里的气体速度。从固体火箭助推器里出来的火箭燃气一般具有 5 000~10 000 英里的时速。你可以明白螺旋桨太小就会出问题的原因了。为了保持飞行状态，需要很大的推速。请记住，真正的直升机的推速在 30m/s 以下。

功率的问题怎么办？这又是另一个问题。极高的推速对功率要求非常高。在上述情况下，悬停所需的功率是 $3.17 \times 10^{11} \text{W}$ (4.26×10^8 马力^①)。这个马力已经相当大了，需要很多“马”来开拉。相比之下，尼米兹级航母的推动功率官方公布的数据是 $1.94 \times 10^8 \text{W}$ 。我认为这已经是功率的极大值了，但还不足以让“天空航母”离开地面。显然，神盾局一定为天空航母制造了更优良的能源供给系统，我想操控天空航母必须至少具备 $2 \times 10^9 \text{W}$ 的功率，因为最大功率如果还不足以使航母动起来那就等于坐以待毙了。

如果我想改造一下神盾局的天空航母呢？让螺旋桨的气流推速为 50m/s（这个速度比普通的直升机还要大一点）？在这种情况下，螺旋桨扫过的面积将达到 $650\,000 \text{m}^2$ 。螺旋桨将从 18 米的半径（如在电影中所见）一下扩展到 220 多米。没错，光想象画面就觉得很有趣。

我们何妨换一个角度来思考呢？如果螺旋桨的大小真如电影里所示，能升起多大的重量？使用相同的计算方法，求解出重量为 600 000kg。这大约是 100 英尺长的一艘拖船的质量。一个只有拖船大小的天空航母就不会那么让人惊叹了。

①“马力”的来源虽然是对照马的工作能力来决定的，但是马的能力各有不同，普通的马，一般说来只有 0.4 至 0.6 马力。现在，“马力”已经成为发动机功率的专用名词了。

最后，要用人力驱动直升机，看起来是困难重重，却是有可能的。之所以具有可能性，是因为别人已经做到了。如果你自己想用直升机的螺旋桨来制造一个大型的飞行器，最好还是能配备一个大型的电源或非常大的螺旋桨。

移动一辆车要多少水？

灾难时不时会发生，有时洪水泛滥成灾。在洪水期间，你经常会看到车辆被水冲走。要移动一辆车要多少水？

首先，车为什么会移动？如果汽车处于静止状态，它会从零转变到非零速度。这意味着有一个不为零的合外力让汽车移动了。这里有个特大的警示：你需要一个合外力将它移动，而不是保持它的移动状态。如果它处于移动状态，合外力是零也没问题。

假设有一辆车处于一定量的水的冲击之中。有 5 个显著的因素需要考虑。首先是重力。基本上，重力的数值为质量乘以重力场 (9.8N/kg)。重力是非常简单明了的一个力。唯一改变重力的方式就是改变地球。让我们这样做出假设：即使洪水滔天，地球还是地球，不会有什么变化。

第二个要考虑的是地面对于车的支持力。这就是所谓的法向力^①，因为它是与地面垂直的。法向力的特性是它会尽可能地向车辆提供支持，而使车辆不至于从地面上陷落下去。对于汽车在平坦道路上的静止不动的典型状态，法向力将与重力在大小上相同方向相反，两者的合外力为零。

① 法向力 (Normal force) 在物理学中，是一股垂直于物体接触面的力。以物体放置于水平的面上，物体的正向力与重量相同，但方向则相反 (仅限于放置在水平的面上)，相加后合力 $=0$ ，使物体能静止放置而不会陷下去。

第三个是水。水呢？水也会对车施加力吗？比方说，有一些 h 深度的水，以 v 速度移动，水拍打车身就如同空气对车的行进构成阻力一样。事实上，我将使用已经使用过了的空气阻力模型来探讨这个问题。我们把该模型迁移过来使用，认为阻力是以下因素的乘积：

- 水的密度（这是相当恒定的，大约 $1\,000\text{kg/m}^3$ ）
- 水击打物体时的表面积大小（不是所有的车都必须是在水下才能移动）
- 汽车的形状
- 运动水流速度的平方

由此可见，水流的速度越快对车击打的力就越大。这似乎是显而易见的。然而，水越深则对于车身的推力也会增加，因为水越深也就意味着对车撞击的水也会越多。

第四个是摩擦力。我们知道仅仅水对车有推击力并不意味着车就会开始移动。为什么不移动？因为有摩擦力可以防止汽车滑动。轮胎和道路之间有摩擦力。摩擦力最基本的模型认为最大静摩擦力^①取决于两个因素：一个是接触面的材料类型，在此例中是沥青或水泥与湿橡胶；另一个因素是接触面之间的压力，这个压力就是地面提供给汽车的支持力。请注意，最大静摩擦力不取决于轮胎和路面之间的接触面积的大小。我们仅仅是粗略地对摩擦力进行近似计算，当然，轮胎很大可能有一定差别，但此例中的

① 静滑动摩擦力与一般约束反力不同，它并不随外力的增大而无限地增大。当外力的大小达到一定数值时，物体处于将要滑动，但又未开始滑动的临界状态。此时，只要外力再大一点，物体就开始滑动。当物体处于平衡的临界状态时，静摩擦力达到最大值，即为最大静滑动摩擦力，简称最大静摩擦力。

我们考虑的只是一般使用的轮胎。

还有另外一个很重要的力，即第五个因素：浮力。随着水位上升，水将给车一个向上的推力。这将造成什么结果？主要是降低地面对车的支持力。这个法向力越小，最大静摩擦力也会越小。但你如何计算浮力？最简单的方法就是看车排开的水的体积，浮力即等于被排开水的重力。要获得浮力汽车不必完全浸没到水中。如果你去过游泳池，就会意识到这一点。即使在泳池的浅水区，要举起一个部分身体没在水中的人也比在地面上要容易。

现在我们来做些运算。首先让我来挑一辆车。我有一个丰田锡耶纳厢式旅行车，为方便起见，我就选这辆车好了。如果它只是静止地停在平路上，路面和轮胎之间的最大静摩擦力是多少？首先，我需要车的重量数据。这款车所列出的数据显示车的质量约 2 000kg。那么轮胎呢？假设路面是湿的但没有被水淹没，那么轮胎和路面之间的摩擦系数值为 0.4。这意味着这款车的最大静摩擦力^①将是近 8 000N。可见，如果你想在这样潮湿的路面上推动这辆车，你需要用很大的劲。

如果水位达 0.5m 深，对该车将可能产生一个很显著的浮力作用。如果要我做出猜想的话（我确实猜了），我会认为车的主要部分，位于水位之上漂浮的部分高出水面约 0.3m。这意味着对于 0.5m 深的水，该车下部的 0.2m 是位于水面以下的。当然，这都是建立在车不漏水的条件之下的（车当然会漏水），但即使是漏水，只要过程缓慢也不会有什么問題，不会对计算结果造成影响。如果车体长 5m，宽 2m，车体排开的水约 2m³。由于

① 最大静摩擦力与使物体发生运动趋向的力的方向相反，大小与两物体间的正压力（即法向反力）的大小成正比，即 $F = \mu F_n$ 。式中 F 为最大静摩擦力， μ 为静摩擦系数。

水具有 $1\,000\text{kg/m}^3$ 的密度， 2m^3 的水重量将达到 $2\,000\text{kg}$ ，产生约 $20\,000\text{N}$ 的浮力。此时此刻，要使汽车浮起来这个力已经足够了，所以我认为假如水要移动它也将是不费吹灰之力的。

那么水位再低一点呢？如果只有 0.4m 深？这时候浮力不足以抵消汽车的重力，就要靠水流的击打力了，水运行的速度要达到多大才能保证让汽车动起来？我所要做的就是将“水的抗力”设置到和“最大静摩擦力”大小相等即可。我先说说清楚，这两种力都取决于水的深度。我尚剩一个阻力因素没有明确。我选择使用的值为 1.0 ，接近立方体的空气阻力系数。是的，我明白在水里的阻力系数和在空气里的阻力系数两者有很大的不同。然而，这个不同并不影响我使用这个模型来粗略计算下这个力的大小。

现在，所有的值我都已经得出了，经过计算水的速度是 6.2m/s ，这个速度相当快。但如果将水位提高 5cm 呢？根据新的数值，我算得水速的最小值为 3.6m/s 。这个速度还是有点快，在这样的水流速度下，你很可能连站都站不起来。

这样的水速难道真的存在吗？当然存在。你见过这种戏剧化的一幕吗？大坝决堤了或是建在地表以上的池塘破开、水流出来的时候，水流就会达到很高的速度。由于平时在新闻里看到过或是 YouTube 趣味视频里看到过这种情形，我们也明白这种情况平时是会发生的。



GEEK PHYSICS



第四章

星球大战^①



$$x_2 + 1x_3 y_2$$



① 星球大战系列电影是由卢卡斯电影公司出品的科幻电影。卢卡斯电影公司首先于 1977 年推出了星球大战，之后又分别在 1980 年和 1983 年推出了星球大战 2 和星球大战 3。之后又推出了星球大战前传系列，1、2、3 分别于 1999 年、2002 年和 2005 年上映。

光剑^①的能量源自何处？

这个问题已经萦绕在我心上很久了，不吐不快：

使用一把光剑需要什么样的能量源？

看过探索频道的《科幻科学》^② 这档节目之后，我就开始思考上面这个问题了。在其中一集里，理论物理学家、未来主义者米基奥·卡库谈到了如何打造一把光剑的问题。这一集看起来有点让人觉得傻，但里面的科学内容还是颇有看点的。节目到最后，米基奥·卡库决定制造一把手握式的等离子体火炬^③。在做出决定的时候，他同时认为要做这么一把光剑能量功

① 光剑（英语：lightsaber）在《星球大战》的世界中是一种占有举足轻重地位的武器，无论是有关《星球大战》的电影、小说或是游戏中都经常可以见到。在星战的世界中，光剑的概念即是传统的金属剑身被某种以纯粹能量形式存在的物质所代替，而这种能量可以被凝聚成长度一米左右的剑刃形状，并发出特定颜色的光芒。

② 《科幻科学》是探索频道的一档节目，由物理学家米基奥·卡库担任节目解说。

③ 物质有四态（固态、液态、气态和等离子态）。等离子态是气体与电弧接触而产生的一种高温、离子化和传导性的气体状态。由于电离气体的导电性，使电弧能量迅速转移并变成气体的热能，形成一种高温气体射流（温度达 5500℃ 以上）和高强度热源。等离子体火炬（亦称等离子体发生器或等离子体加热系统）就是依据这一原理研制的专门设备。



率级为兆瓦^①。

电视节目并没有按我的方向去深入探索这个问题。我关注的是《星球大战前传 1：幽灵的威胁》^②开篇里的那一幕：魁刚^③尝试着用他手中的光剑戳穿一扇门。因为金属门实质已经开始熔化了，我完全可以凭借这一幕镜头就来预估一下光剑内部必须存储多少能量才能完成这样一个动作。那么要多少能量呢？

我承认光剑这种东西并不真实存在。哦，或者真有这类东西，但用的是有某种特殊力量的水晶也未尝不可。当然即便这样也不能阻止我继续这个问题。在讨论之前，我先给大家做一些背景铺垫？首先，我们先讲一下黑体辐射。

黑体^④是物理学里定义的一种理想物体，当黑体处于高温态的时候（即便没有处于高温态），黑体会发出电磁波。简而言之，黑体会因自身温度不同而散发出不同颜色的光线，并且它发出的光并非因为反射外界光线。黑体辐射随着温度的不同而变化，由于光谱分布的峰值波长^⑤的不同会呈现出各种颜色。黑体的这种现象对于密度高的固体适用，但对于低密度的气体而言并不适用。

根据黑体的原理，当物体温度升高，会发生两种变化：第一，物体会发出更多的光；第二，最高强度的光的颜色朝光谱中蓝色部分移动。

① 兆瓦（英文：megawatt，通常缩略为 MW），是一种表示功率的单位，兆瓦的定义是每秒做功 10^6 焦耳。

② 《星球大战前传 1：幽灵的威胁》讲述的是《星球大战》系列电影传奇最开始的时候。

③ 魁刚是《星球大战》中的一个角色，是一名绝地武士。

④ 物理学家们定义了一种理想物体——黑体 (black body)，以此作为热辐射研究的标准物体。它能够吸收外来的全部电磁辐射，并且不会有任何的反射与透射，因此得名“黑体”。

⑤ 某一波长的光的能量相对其它波长的光能量都大，则这一波长就是该束光的峰值波长。

在日常生活中有两个黑体的绝佳例子：第一个是太阳和白炽灯泡的灯丝，另一个例子是在电热炉的炉丝。当炉子里的炉芯在加热，它产生的光主要是在红外区（所以你不能看到它）。由于炉芯温度升高，它所产生的光谱开始偏向短波并且开始看上去发红（但千万不要去碰触）。如果温度继续升高，炉芯的颜色就会偏黄。

关键是你可以通过黑体发光的颜色反向判断出黑体的温度。我就说到这里吧（它有可能更为复杂）。从《幽灵的威胁》的一些剪辑中，我会用门熔化时的颜色来判断其温度。

那么热能呢？需要多少能量才能增加材料的温度？这取决于温度的变化，物体的质量与该材料的比热容。

我们常说物体热能的变化量等于进入物体的那部分热量（热量通常由字母 Q 表示）。在讨论热能的时候，我想先明确一下，大家都见过烤箱里放在铝箔上的比萨吧？假设你把比萨放进烤箱，加热直到温度为约 180°C 为止。打开烤箱，你可以触摸铝箔吗？可以，但请千万不要触摸比萨！铝箔的质量非常低，不会吸收并储存多少热能（所以摸了它不会烫伤你的手），对于比萨而言可完全不是这样。

还有一点有关热能的因素要加以考虑。如果该材料形态上出现变化，比如，从固体变成了液体？促成这种变化产生所需要的能量还是一样取决于物体的质量与材料的种类（比热容）。一种材料从固体变成液体所需的能量等于物体熔融态^①的潜热^②乘以物体的质量。

现在就《星球大战》里的一些场景做些测量与估算。根据在电影里观

① 熔融（fusion）是指固液共存的物理状态。

② 融化潜热参注解 50，一般指的是每单位质量的物质或每摩尔物质在相变时所吸收或放出的热量。

察到的一帧画面，我可以调整在线的黑体模拟器^①，直到它显示的颜色和我在电影里看的颜色一样时为止。经调试该模拟器的金属温度在较低处大约为 2 700K，靠近光剑处的温度为 5 200K。

再要估算质量呢？这一个比较难了。首先，整个门温度很高（你知道，因为热传导的缘故），所以让我从温度相对较高的部分开始。魁刚使用他的光剑划出一条长度为 2m，宽为 7cm 的口子，这条融化了的金属切口有多深？观察一下他从门的另外一面用光剑戳进去的情况，我估算大概切口的深度是 20cm。这样划开部位的金属总体积就是 0.028m^3 。对于门上还有的其他部分，我可以大致认为温度较低（但仍旧烫）的部分是融化部分质量的两倍。

假如我知道这是什么类型的材料制成的门，我就能知道金属的密度和质量。在考虑材料的问题上，我能想象有人马上会有异议：

嘿，朋友，物体的能量你是怎么算出来的啊？这根本就是贸易联盟^②从别的地方窃取来的神秘透明铝材料，这种材料的密度是很轻很轻的哦！

我同意，这种门的材质可能是闻所未闻的。但是，要为一种完全不知名的材料计算热能或者密度我也会束手无策了。倒还不如就让我假定这就是一种为人们已知的材料。因此，什么金属材料熔化温度大约是 5 000K 或至少熔点高于 2 700K（因为较热的那一部分也许比熔点要高）？如果它是一种元素，最有可能就是钨或碳。然而，这些材料似乎都不太可能。钽的熔点是 1 930K。如果它的确是一种元素，我就会选钽，因为这种金属材质颇合乎情理，复仇者联盟使用的也只会是这种高级材料。

^①<http://phet.colorado.edu/en/simulation/blackbody-spectrum>，该网站是美国科罗拉多大学波尔得分校网站上关于“黑体光谱”的交互式仿真模拟。

^② 贸易联盟是电影里一个商业和运输业的财团，它有效控制了整个银河系的货运贸易。

把这些数字全部放到一起，并假设光剑划开门花了 9s 时间，我算出光剑的最小输出功率是 28 000W。

现在，我上哪里可以得到这 28kW？该庆幸至少它不是 1.21 万 kW，这将需要一个闪电或核聚变^①切割那道门需要的能量透露出了光剑的能量来源的一点蛛丝马迹（但并不是所有）。我想估算出能量源的能量密度。要做到这一点，我先要估计一下光剑在不充能量的状态下能运行多久。这个问题也不容易。也许这些光剑根本无需补充能量就可以永远运行下去，但我不这样认为，因为这样一来这个话题多少也就会失去趣味了。因此，光剑能维持多久？要我说，至少可以维持两个小时的使用吧。这个答案看起来似乎是合理的，不是吗？那会涉及到多少能量？功率（W）是能量（J）除以时间（s），所以总能量将超过 $3 \times 10^6 \text{J}$ 。

为了最后弄清楚光剑的能量来源到底是什么，我还需要知道光剑的尺寸。宽松地估算一下，我会认为光剑圆柱体半径是 3cm，长度是 15cm。这肯定已经足够大了。如果这样的话，那么这个能量来源的能量密度将会是 $8 \times 10^9 \text{J/m}^3$ 。为了做下对比明确一下能量的大小，维基百科有能量强度表很实用^②。对照一下，这把光剑的能量密度大小位于八硝基立方烷（不知道那是什么）和铍氧（同样不知道）之间。就目前所知的地球上的电池，好像最高的能量密度是氟离子的 2.8 MJ / L^③。

也许你想用普通的旧 AA 电池运行光剑？一节正常的 AA 电池具有约

① 核聚变能释放出巨大的能量，但目前人们只能在氢弹爆炸的一瞬间实现非受控的人工核聚变。

② http://en.wikipedia.org/wiki/Energy_density

③ 电池的单位：容积能量密度 (MJ/L) 是总能量除以这些能量存在的空间的体积大小所得的结果。

$1.08 \times 10^4 \text{J}$ 的储存能量。如果我想运行 28 000W 光剑持续 2 小时，那它就需要 $2.016 \times 10^8 \text{J}$ 的能量。要多少 AA 电池？超过 18 000 节 AA 电池。我想光剑应该不会自己带上那么多电池吧。

好吧，这下我算是明白了，原来绝地武士真的有一种神秘的电源在源源不断地提供能量。

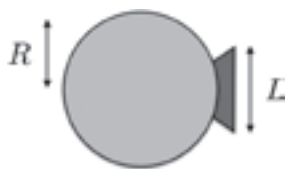
飞船越大，推进器就越大吗？

如果你是一个书虫，平时也喜欢在网络上冲浪，你一定已经见过这个很棒的网站：<http://www.merzo.net/>，这个由杰夫·罗素创建的网站展示了许多科幻小说里的（有些是真实的）飞船。这些飞船造型不同、大小各异，非常有趣。我强烈建议你花点时间去网站上亲眼目睹一番。

当然，当我看到这样的图片，我已不能仅仅用“酷”来表示惊叹了。有一件事我一直认为很有趣：思考不同大小的物体间的区别。也许一般人的想法是尺寸上多大多小关系不大。但事实并非如此。让我先谈谈我自己脑海中的飞船吧——一个背面装有推进器，里面只能容纳一个人的球体。

R ：单人船的半径

L ：推进器的直径



现在，如果我想把我的飞船变得大一些会怎么样？让我继续这个话题，把一些相关的因素都挖掘出来。

推进器做的是什工作呢？这是一个很大的问题。在真正的航天器里，推进器是用来改变航天器动量的。你可以把推进器理解为一种对航天器施力使其加速的仪器。如果你把推进器打开一段很长的时间会怎么样？它会

继续保持加速。你看出问题所在了吗？因为空气阻力的缘故，大多数科幻小说里出现的航天器使用了推进器，却以恒定的速度飞行。

问题的关键是，虽然和电影里的情节矛盾，我将依然假设推进器对飞船进行加速，现在我继续。

还需要做一些其他的假设吗？当然，一些科幻迷可能无法认同所有的假设，但即使他们不予赞同也不能让我停止探索这个问题。这些假设中有一些实际上可能并不成立，但是，它们和真实情况是很接近的，也能很好地展示我的观点。

- 推进器力的大小和推进器的面积是成正比的。你可以用各种各样的原因来跟我辩驳说真实情况不是这样的，但我仍然坚持我的假设。

- 大大小小的宇宙飞船的密度是一样的。是的，你说的对，如果所有飞船的船壁的密度是一样的，那么大船作为一整艘船的密度就变低了。但是不要忘了大船内部也有隔层。

- 小的宇宙飞船和大的宇宙飞船都产生相同（或相似）的加速度。

- 下面的术语都指同样的一件东西：飞船、星际飞船、航天器，但不包括“星船”（starship），这个词我们只用来代表一个乐队，那个唱了“我们建立了这个城市”摇滚曲的乐队。

现在，我们再来谈一些物理。如果作用在飞船上的力只由推进器提供，则加速度将与推进器上的力成正比。加速度也将取决于飞船的质量。对于相同的力，质量越大，加速度越小。这就是牛顿第二定律的本质。

我想象出来的单人船的半径为 R ，推进器的直径为 L 。如果推力与推进器的面积成正比，那么对飞船的推力就应该是一个常数与 L^2 的乘积。

那么质量呢？因为此宇宙飞船是球形的，所以质量将是一个常数（在

此情况下是 $4/3 \pi$) 与 R^3 的乘积。因为加速度等于力比上质量，因此它与 L^2/R^3 成正比。我可以说，推进器的直径与 $R^{3/2}$ 成正比，其他常量并不重要。

现在，让我建造一艘更大的飞船。它将是第一个飞船半径的 10 倍，密度相同，加速度也一样。那么它需要多大的推进器？如果飞船其他的参数是相同的，并且我将半径扩大为原来的 10 倍，那么推进器的直径将会是原来的 31.6 倍。

更加确切地说，让飞船长度上扩大到原来的 10 倍，体积就会是原来的 1 000 倍（质量也会因此变化）。为了保证原来的加速度，我不得不把推进器扩大到 10 倍以上，因为推力和面积成正比。其结果是，更大的飞船并不是原来的小飞船按比例放大得到的。我这里用一个对比图可以加以说明：左边这个是个人的飞船，右边这个是直径扩大过了的飞船。

推进器的大小比飞船大小攀升得要快。

现在，我们从《星球大战》里面来寻求一些例子，有两艘飞船正好可以供我们为推进器尺寸做“案例研究”：歼星舰和超级歼星舰^①。为什么要选这两艘飞船进行对比呢？因为它们同在一个宇宙里，它们形状相同，我也可以肯定地认为它们的密度相同。最后，如果它们将要在同一个舰队里的话，它们需要齐头并进，加速度也必须是一样的。杰夫·罗素的太空飞船网页上就有这两艘飞船的并列比较图，你可以去看一下。



^① 歼星舰，又名星际驱逐舰 (Star Destroyer)，是《星球大战》系列中出现的太空航行战斗飞船，是作品中不可或缺的重要军事武器之一。

显然，有一些关于超级歼星舰大小的讨论（例如：<http://www.theforce.net/swtc/ssd.html>）。这方面我站在杰夫·罗素一边，同意他在网站上公布出来的数据：歼星舰长 1.6km，超级歼星舰长 19km。

推进器呢？根据 theforce.net 网页显示，超级歼星舰背面有 13 个推进器，普通的歼星舰背面只有 3 个推进器。通过图表，我还发现，歼星舰的推进器的直径大约是 0.126 千米。因为我已经了解到歼星舰推进器的长度和尺寸，以此类推，我就能确定超级歼星舰上安装的推进器是多大。

准备好了吧。考虑到超级歼星舰上有更多的推进器这一事实，我发现每个推进器的直径都得在 2.48km。所以呢？这意味着整只舰大概一半的地方需要为推进器腾地方，根本不是原来设想的那样，飞船上到处分布着类似喷嘴式的零零星星设备，它看起来再也不似那个气势凌人的死亡机器，取而代之的是一艘看起来像沼泽上行进的风扇艇^①了。

① 风扇艇 (Fanboat、Airboat)，或称风扇船、风扇舟，是一种由引擎驱动螺旋桨来推进的平底船，它的引擎和螺旋桨被封闭在一个金属笼里，避免对船只、野生动物或乘客造成伤害。螺旋桨向后产生一道气流来推进船只，以位于风扇后方的方向舵来控制方向，常被用于沼泽和浅滩等水下螺旋桨不适应的地方。

如果 R2-D2^① 能飞翔，他的重量是多少？

让我先从小测验的问题开始。

在《星球大战 2：克隆人的进攻》里，R2-D2 展现了他飞翔的能力。R2-D2 会飞，有什么不对的吗？对于这个问题，可能的答案如下：

(1) 没有。乔治·卢卡斯^②的本意就是让他在《星球大战》的一开始就大显身手一番，可惜当时 Commodore 64^③ 号计算机不能制作 R2 这种数码飞行的特效，所以只能作罢。

(2) 如果 R2 能飞，为什么原来的三部曲里面不见他飞呢？

(3) 他不会以那种方式飞。

(4) 机器人不应被允许飞行。

这里，你看 (1) 这个选项很容易让人上当。为什么 (1) 不对？因为 Commodore 64 直到 1982 年才发行，《星球大战》电影（那时候《星球大战》

①R2-D2 是《星球大战》里面一个典型的机智、勇敢、而又鲁莽的宇航技工机器人，他憨态可掬和忠主的表现是让人最容易记住的星球大战中的机器人。R2 不止一次在关键时刻扭转乾坤。他那小巧的身体只有 0.96m 高，却塞满了装有各种工具的附加臂，这使他成为了一个了不起的太空船技工和电脑接口专家。

②《星球大战》的导演。

③Commodore 64 是出产于 1982 年 8 月的一款 8 位家用电脑，作为苹果电脑同时期的电脑公司，在当时极富盛名。

还只是被称为《星球大战》) 最早发行年代是 1977 年, 所以 (1) 答案肯定不是正确的。

正确答案是 (3): R2-D2 不会以那种方式飞。

不以那种方式飞, 那他是怎么飞的呢? 如果你仔细看电影, 你会发现虽然 R2 (所有和他关系很铁的朋友都叫他 R2 而不是 R2-D2——他的全名) 在飞行时, 他的推进器并不是和行进方向在一条直线上的, 推进器是倾斜的, 一半向后伸, 一半往下降。下面这张图用另外一个机器人来模拟 R2-D2 的飞行方式:



这就是 R2 以一个恒定速度飞行时的方式。你可能会想: 咦, 这有什么不对的呢? 看起来丝毫没有问题啊! 但我觉得这才是真正的问题。R2 的飞行方式是按照大多数人对于力量与运动的思考来进行的, 所以没有人会认为这里面有问题。

啊, 但现在我们正在谈论的就是力和运动。让我以这一领域里的两位专家来引入我们的讨论: 亚里士多德和艾萨克·牛顿。

亚里士多德对于力和运动有什么见解? 对他来说, 恒力是维持物体不断运动的原因。说实话, 对于大多数人来说, 这样的想法是很有道理的。即使亚里士多德讲的是希腊语, 很多人也会认同他。这样的想法在现实中不是得到了印证吗? 如果我在桌面上移动一本书, 这本书动起来了, 如果我加大我的推力, 它动起来的速度就更快了。如果我停下来不再推, 这本书也将停止运动。这种想法很简单明了。

根据亚里士多德, R2-D2 应该以上述方式飞行。要以恒定的速度飞行,

他需要把推进器的角度向后调整一下。这样一来，推进器的一部分可以在后面给予一个向上的推进力，让他免于下坠，另外一部分可以给予一个向前的推进力支持他水平飞行。

现在，牛顿呢？关于力和运动的更完备的理论不只是牛顿个人提出来的。只不过人们把这些理论一律归结在牛顿运动定律的“账”下。牛顿说，力是改变物体运动状态的原因。关键词是“改变”。如果对一个物体施加一个恒力，它会持续改变其运动。这也就是说在一个恒力的作用下物体的速度会不断攀升。

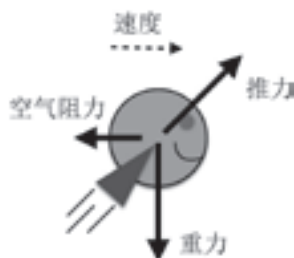
考虑下面这个例子。保龄球静止地停在光滑的保龄球道上。如果你轻轻一推，它就开始移动，继续滚动一段时间，但最终会停止。这是因为球道在保龄球上施加了一个大多数人都会忘记的一个力：摩擦力。因此推球后，使球慢下来的只有这个力。但是，如果你在球后面追着它不断地推着它跑，你可以以很小的一点推力使它以匀速继续运动下去，因为你的推力正是起到了平衡摩擦力的作用。如果使用长棒，施加一个比摩擦力更大的持续力，球的运动速度会越来越快。

假设有一个方法可以从一个移动物体上移除所有的力。对于这样的一个物体，速度将保持不变。我知道这很难想象，因为我们在地球上看到的一切物体都受到某种摩擦力的影响。

好吧，如果你看一下 R2 飞行的方式，这种方式和亚里士多德或者 90% 的人的想法是不谋而合的。但有没有什么办法，可以使这个 R2-D2 的飞行方式和牛顿运动定律相一致呢？换句话说，在什么情况下，这种飞行方式符合牛顿物理学？

空气阻力就是我们在这个时候的最佳选择。假设 R2 飞行空气阻力是不可忽略的。在这种情况下，他就必须调整一下推进器的角度，让它与飞

行器成一直线的方向上偏离一点，起到平衡水平方向上空气阻力的作用。实际上，我们可以根据这种关系计算出 R2 的重量。其过程为：假设已知空气阻力与它飞行的速度，计算出用于推进的推力也不在话下了。如果知道推力有多大，我们就可以方便地算出推力在竖直方向上提起他的力的大小。如果我画一张 R2 的受力分析图，应该是这样的：



如果我能通过模拟算出空气阻力的大小，我就可以估算出推力进而得到 R2 的重量。

首先，做一些假设：

- 我将假设存在类似于地心引力的引力场。为什么这么做呢？为什么不？如果你看看人物在电影里面是如何活蹦乱跳的，你就会明白他们好像就是在地球上（他们确实是在地球上）。

- 存在类似地球上的空气的环境。这个有点难以自圆其说了。我怎么知道空气是不是超密度的？或相反密度非常低？我不知道。但因为我没有太多的选择，权宜之计下，我只好假设这颗星球上的空气和地球上的空气密度一样。

- 对于这种具体的情况，我也将使用 2.3m/s 这个速度。这就不是一个假设了。通过使用视频分析，我绘制了一张 R2 在不同时刻位于不同位置的坐标图，我再把不同位置与时间连成一条直线。这条直线的斜率就是速度。

- 该推进器角度与 R2 的角度约为 43° 。这也是从视频里测量得到的。
- 最后，我将必须对 R2-D2 的物理尺寸做出估计。

接下来我的事情就是评估一下空气阻力的大小。对于低速运动的物体（像这样的）空气阻力与速度的平方、物体的大小和形状、空气的密度成正比。有了这些估值，每一个 R2 的单元质量大约为 100g，这使得他的密度跟空气自身的密度所差无几了。如果密度这么低，他会飘浮起来。说真的，他甚至不需要用什么向上调整推进器来抵消空气阻力。

最后，R2-D2 不可能那么轻。他只是飞行的方式错了而已。

爆能枪^①的速度有多快？

你并不知道其实很久以前我就已经打算好好研究一下《星球大战》里的爆能枪了。但是，直到2012年——《星球大战》35周年庆典的时候，我才下决心要认认真真地完成我的这项研究（之前那次我还没开始着手做这件事呢）。我想要在我的研究里解答这些问题：《星球大战》里的这些爆能枪到底是什么？这些爆能枪发射的冲击波的速度是多少？飞船上的爆能枪和手持式的爆能枪的速度是否一致？为什么人们会认为爆能枪其实是“激光枪”？

我可以肯定（几乎）《星球大战》整部影片里没有哪个角色在哪个场合把这些武器称为“激光枪”的（即使是在第一集里）。这个问题并没有太多的讨论空间，因为这个话题恐怕过去已经被讨论上千遍了。但简言之，有两点需要注意：

第一点，如果它们是激光器，你根本不可能从侧面把光束看清。你见过红色的激光笔吗？除非偶尔透过粉笔灰尘，否则你也许根本看不到那条激光束。我相信会有极客在这个时候站出来为我们好好解释一番在电影里

① 爆能枪是一种科幻武器。首次出现于电影作品《星球大战》中。为银河系普遍所使用的武器。但相比光剑，爆能枪显得粗野、不准确。在星战的世界中，爆能枪的概念即是传统的实体弹丸被某种以能量形式存在的物质所代替，并具有特定颜色的光芒。

能看见激光束的各种可能的条件（比如，那里的整个大气层根本就和地球的大气层不一样，或者所有的情景事实上都发生在水底）。然而，这些解释讲得再天花乱坠也无用，因为事实就是人从侧面看不到激光，如是而已。

第二点：激光是以光的速度行进的。但在电影里，显然你可以看到这些冲击波运动得比光速要缓慢得许多。具体小多少？我不知道，但我会找到具体的答案。

如何得出一把爆能枪发出冲击波的速度？我不认为这个问题只有一个标准答案那么简单。相反，答案取决于具体的场景——那些爆能枪被发射时的场景。好了，让我们开始吧。我选择的第一幕的场景是莱娅公主^①的封锁穿越舰^②试图从歼星舰的追击之下逃跑。当然，两架飞船彼此相互射击了。

如何得出这两艘飞船发射出的冲击波速度？一般情况下，如果已知冲击波行进的距离与完成这段距离所花的时间，我就可以通过距离除以时间的比值来得出平均速度。你可以通过计算视频的帧数来计算出时间，如果影片被录制到DVD格式上，帧速率是30fps^③，表明每帧仅有0.033s的间隔。首先需要考虑的是较小飞船的尺寸。

我需要根据《星球大战》这第一幕里的情况对距离进行估算。歼星舰在追击封锁穿越舰的时候，两者之间的距离会是多少？透视的问题会不会形成干扰？在这种复杂情况下，我的假设就会略微大胆一些。我直接去飞

① 电影《星球大战》中的重要角色。

② 封锁穿越舰是重量比较轻的，在战时用于应对对方海峡或者港口封锁的小型突围舰艇。

③ 每秒所运行的帧数（简称fps, Frames Per Second）和视频一样，fps越大，在屏幕上的视频就越平滑。

船尺寸网^①上查看一下。没错，上次查看飞船推进器的尺寸，我上的也是这个网站。

从飞船尺寸网上看，反叛军的封锁穿越舰长度为 150m。由于透视和拍摄角度的问题，我估算两艘舰之间的距离大约是 10 艘穿越舰那么长，即 1 500m (+/-500m)。这个距离似乎很远，但也只能估算出一个大致。

根据电影里带有爆能枪射击的每一帧画面所显示，冲击波的行进时间是 0.08s，根据估算的距离，经计算爆能枪的速度是 180km/s。

那么在那些非太空场景的击打镜头里呢？紧接着的第二幕里，帝国冲锋队爆破进入了封锁穿越舰，给叛军展示谁才是真正的“上级”。对于这一幕，分析就有点不同了。摄像距离似乎已经足够远了，我也许可以尝试来一次真正的基于视频的分析。我可以使用某种软件^②在视频的每一帧里标记好物体的位置。一旦确定好了一个比例尺，程序会自动给出物体的 x、y 坐标和时间数据。假设冲锋队的队员从腰带到头顶部的距离为 0.71m（一个站立的冲锋队员身高约 1.78m）。获得这些数据之后，我算得爆能枪的冲击波速度是 15m/s。你或许已经看出问题所在了：在太空中使用比手持使用爆能枪的速度要快得多。好吧，也许这就是这些冲击波并非激光的佐证，如果是激光，不管以何种方式发射速度应该是保持一致的。

这只是两则例子而已。《星球大战》里面可不乏这种射击的镜头（我还没算上刚刚看完的《星球大战 4: 新的希望》里的那一部分射击镜头）。让我来看看，我是否可以从此其余的场景中获取更多有用的数据。

^①<http://www.merzo.net/>

^② 我喜欢使用那个免费且功能强大的分析软件——Tracker Video Analysis，下载的网址为：
<https://www.cabrillo.edu/~dbrown/tracker/>（作者注）

向你展示其余部分的数据之前，我们来看一下一个特例“死星”^①。我不知道“死星”发射出来的冲击波是不是和爆能枪的一样。但我分析一下倒也无妨。如果死星的直径为 160km，当它摧毁奥德兰（一颗和平、没有武器的行星）的时候，我可以就此粗略估算出冲击波的速度。实际上，死星的射击涉及两个阶段的速度。首先，一些东西从死星上的一个庞大圈体里被释放出来，然后这些东西混合在一起形成一个巨大的冲击波。

经过快速分析，我发现，冲击波在第一阶段的速度是 600km/s，一旦混合在一起，所得到的冲击波的速度是 1 000km/s。这两个值都是从只有死星存在的镜头里算出来的。

下面这个场景就失之离奇了：在接下来的镜头里，冲击波直冲向奥德兰，大约 0.2s 之后，冲击波击中星球。如果速度是恒定的，奥德兰和死星之间的距离仅 196km。我不知道奥德兰有多大，但国际空间站距离地球表面约 300km，所以……可想而知了。

现在，来看一下采自第 4、5、6 集的其余部分数据。为什么不包括第 1、2、3 集的数据？好了，很多人会认为 1、2、3 集都不是真正的《星球大战》系列电影，主要是因为这几集里有加·加·宾克斯^②。然而，还有另外一个原因：1、2、3 集里有爆能枪的射击镜头比 4、5、6 集要多，这样可供我参考的镜头实在是过于庞杂了。看完最初的三部曲^③之后，我认为我对于数据

① 死星（Death Star）是银河帝国建造的强大可怕的超级武器的代号。这座巨大的空间站上装有能够摧毁一颗行星的光炮。

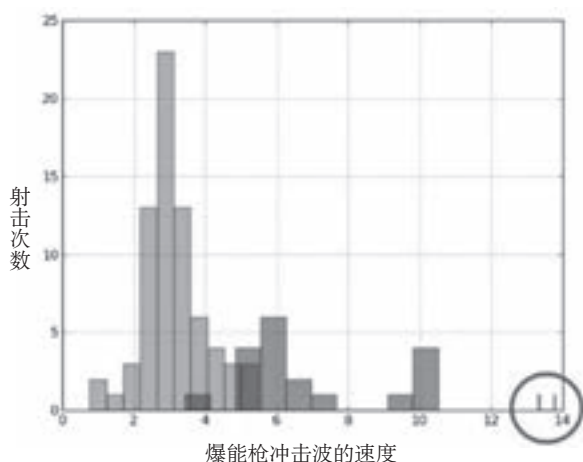
② 加·加·宾克斯是《星球大战》中的一个角色，他拙劣、混乱的表现总会让自己陷入困境，可他天性善良忠诚。

③ 星球大战三部曲即：1.1977 年 星球大战（也名：星球大战—曙光乍现）；2.1980 年 帝国反击战（也名：星球大战—帝国反击战）；3.1983 年 绝地大反攻。

的研究包括了所有射击镜头的 10%到 15%。1、2、3 集电影里有许多场景并不能提供一副完整的爆能枪射击的视图，或者无法让我能在射击点附近找到一个合适的比例尺。某些射击镜头还是朝向或者远离摄像机，造成很突出的透视问题。因此，在最后，经过删选，我从 4、5、6 集搜集到的 91 次射击中得出了的数据中有 19 次是太空镜头。

现在只有一个办法可以向你展示爆能枪冲击波速度的分布情况——建立柱状图。但一张普通的柱状图是无法正常使用的。为什么呢？因为我试图记录的速度跨度在 $10\sim 10^6\text{m/s}$ ，这张图显然容纳不了这样大的数据跨度。因此，我不如取速度的自然对数来解决这个问题，这样最终得到的图形也不是一个线性的比例图了。

下面这张图表示的就是分别在地面、太空和死星上使用爆能枪时光束的速度：



该圆形区域显示的是死星的数据，只有两个值，但在速度方面和其他数据大相径庭。地面使用和太空使用爆能枪的速度有些重叠。为什么呢？因为有几个地面射击的镜头离摄像机较远，几个靠的很近的特写镜头的场

景却是在外太空（比如当他们表现出 X 翼战斗机中的 R2 呼啸而过的镜头时）。但这张图似乎仍然很清楚地说明了地面和太空的镜头之间的差异。

另一个方面，我也注意到了：当飞船发射一个冲击波的时候，一些飞船发射的是红色的波，另外一些飞船发射的是绿色的冲击波。手持式的爆能枪发射的全是红色的，我不知道为什么没有手持式爆能枪发射的是绿色的波。

为什么速度千差万别？别担心，我的目的并不是为了破坏科幻作品的气氛。我知道，《星球大战》只是一部电影。我也知道，汉·索罗^①的冲击波除了空气之外并没有真正打到什么。为什么要对场景做一番分析，分成地面和太空两种？制作电影的人实际上是在电脑屏幕上用手把这些冲击波绘制出来的，他们在制作的过程中往往只是考虑上一帧与下一帧要取得一致，而不顾及具体场景的变化。如果你在分析过程中也按上述的思路没有恰当地把场景的透视比例尺考虑在内，那么所有冲击波看起来必然就会有相同的速度了。也就是说，尽管场景各异，结果冲击波的速度全部一模一样。

好吧，《星球大战》里的大师们只是犯了人类会犯的错误。是的，但有什么办法可以解决这一问题？首先，让我对地面冲击波射击发表一下评论。地面冲击波的平均速度是 34.9m/s，这好比我们身处一个棒球球场一般。与约 10m/s 的 Nerf 枪^②的子弹的速度相比，可以说明以下两个方面：

- 绝地武士用光剑把冲击波挡回去的过程和一个棒球手击中一个棒球相仿。

- 在家中院子里玩 Nerf 枪、塑料制作的光剑和电影里差距不大。

①《星球大战》中的主要人物。

② Nerf 是“非膨胀海绵”（英语：Non-Expanding Recreational Foam）的缩写，Nerf 是美国著名玩具公司孩之宝公司推出的一种玩具。

实际上，对于任何一个正常人要想躲避开冲击波的射击并不是一件很困难的事情，尤其是如果它是从那么远的地方发射过来的。也许这可以解释为什么大家都觉得冲锋队在对抗冲击波的时候表现得那么逊色。不是他们弱，只不过汉、楚巴卡和卢克^①可以很轻而易举地躲避这些冲击波，而那些冲锋队员相反却难逃一击。为什么？因为这些防爆头盔阻碍了他们的视线。前方有东西打过来，但如果你看不见，当然你也无法闪避了（除了路加以外）。

那么太空里的爆能枪和手持式爆能枪之间有没有差异？我认为这不算问题。它们毕竟不是一种武器，不是吗？由于不是一种武器，它们发射的冲击波也不必具有相同的速度。唯一需要解决的事情就是让这些太空远镜头里的发射的冲击波速度取得一致。那么，在电影里也就不必展现诸如冲击波擦过 R2 这样的近景镜头了，如果要与远镜头速度上取得一致，冲击波在这样的近距离下速度就会快到捕捉不到。

另一个你可以想到的办法就是增加了手持式爆能枪的速度。如果你想要速度是如 500m/s 子弹般的速度，电影中会发生哪些改变？好了，第一个变化就是在连续的两帧画面里将看不到同一颗子弹。这个变化很简单——你会看到枪射击了，但冲击波你却看不到。如果想看到冲击波“嗖嗖呼啸而过”，你就展示一个镜头装装样就好了。这样一来，像我这样的科普博客写手就捉襟见肘了，再也不会会有什么好办法得出什么数据了。问题解决，大功告成！

还有一点：到底爆能枪是什么东西？不是激光，对不对？我的猜测是这是某种超热形式的东西。也许是受热被激发的等离子气体，但是问题是

^①《星球大战》中的主要人物。

它会受到空气阻力。如果冲击波质量很小，我认为它根本传不太远（尤其是在低速状态下）。也许气体的温度已经足够电离它前面的空气了。或者，也许这是某种类型非常小，温度很高的子弹。老实说，我也不确定。

你很清楚一谈起《星球大战》会发生什么状况吧？极客思维立即会爆棚。让我先小试身手给出一些答案吧。但请你看了这些我脑袋一拍假想出来的评论之后不要觉得生气，我只是想打趣一番而已。

“此话当真？你费劲周折分析了半天的东西原来是不现实的？”我不确定这算不算是个问题，但没错，事实的确如此。这样的事也会发生在你身上，而且千真万确——你刚刚浪费了8个小时玩电脑游戏吗？游戏也算不上现实。

“你一定没什么个人生活。你干嘛不出门干点其他的事情？”这个说法和刚刚那个实质上也没什么区别。

“难道真的有人花钱让你这样浪费时间吗？”我不确定是不是真的有人会花钱让我来做这么一番确实的分析。但是我真的认为这件事情值得我发一个帖子。因为，它展示了从某样事物上取得数据（即使这样事物明显就是不真实的）并进行分析的整个过程。

“你说死星直径达到160km。但事实上，原始计划中，死星的直径却达到180km。但是最后，为了如期竣工以摧毁亚汶四号上的叛军基地，还是改为160km。”

没错。

“在太空里怎么会听到爆能枪的声音？”

如果你有神力，自然有本事听清楚了。

“每一束爆能枪的光束有多少能量？”

算是又一个问到点子上的问题。你可以估算一下一条射线的大致体积，

并假设这是某个温度值下的一团气体。你进而可以猜想出这团气体的密度值，但那只是计算能量大小的一种办法。

“我原来设想可能你会在计算爆能枪的速度方面更模糊一些。”我也这么认为。

汉先发制人了吗？他能否后开枪？

偶尔看到一件 T 恤上印了这样的字：“汉先发制人”。在极客 / 书虫文化里，这可是一个不容小觑的大问题。容我长话短说，先做一番交代。1977 年，乔治·卢卡斯发布了《星球大战》电影的第一集。这部电影的某个场景，汉·索罗和一个叫葛瑞多的赏金猎人^①正面交锋，因为前者欠了后者钱，后者来追债了。于是乎，葛瑞多猛然射出一道冲击波想要置汉于死地。可是，等等！千钧一发之际，汉挥拳痛击了葛瑞多，并飞快地从桌下开了枪。一声巨响过后，葛瑞多就毙命了。

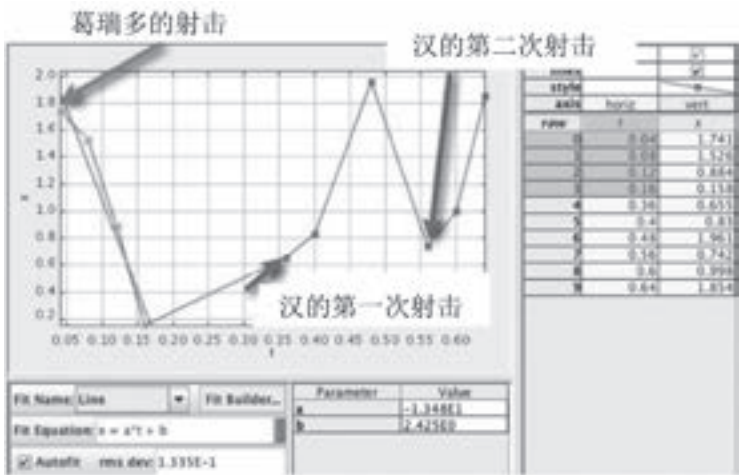
对于大多数的星战迷，这一幕多多少少道出点汉的性格特质。他是一个刀刃舔血的武士，会不惜一切代价地让自己渡过难关。而且看来他还颇有些战斗经验，知道如果自己不先出手形势是不会利于自己的。所以，他毫不犹豫就动手了。他坏吗？够得上“坏蛋”这个名号吗？从法律角度来思考，汉当然称不上什么英雄名士。只是可怜葛瑞多，横尸弹下，再也没有什么机会了。

1997 年，乔治·卢卡斯又重新发布《星球大战 IV》。这次他做了一些小改动。当然，特效成了重头戏。新版本中，葛瑞多向汉射击但未能击中（只

^① 葛瑞多 (Greedo) 一个为赫特人贾霸服务的笨拙赏金猎人，即拿赏金做事的人。

有约 2m 远的距离)。当然，汉也别无选择，只能还击，这只算自卫罢了，对吗？

让我们来仔细看看 1997 年版本里的事件顺序。使用视频分析，得到以下汉和葛瑞多射击的剧情解析：



首先，你可能会注意到汉是射击了两次。第一枪没有击中，他随即补了一枪，想用武力确保葛瑞多完命。

使用上面的精细的视频分析软件，我得到如下的事件时间表：

- 在 $t = 0.04\text{s}$ 时，葛瑞多射击。
- 在 $t = 0.36\text{s}$ 时，汉打出第一枪。
- 在 $t = 0.567\text{s}$ 时，汉打出第二枪。
- 葛瑞多被击中殒命。
- 汉做了点小动作，借此混淆视听。

这里有个真正的问题：汉有没有足够的时间对葛瑞多的射击作出反应？汉是真的想开枪吗？如果汉只是对葛瑞多那失败的一枪做出反应，他

原本就会立马决定，并在短短 0.32s 内射击。当然，前提是他已经瞄准了葛瑞多。或者，汉并不是对葛瑞多那一枪做出反应，而只是想赶在葛瑞多开枪之前先发制人。不管哪种情况，事情还是发生了，爆能枪就在 0.32s 的时间内响了。我们如果假设手指扣动扳机和子弹射出需要 0.2s 的时间，那么留给汉做出反应的时间就剩下 0.12s 了。

合理的反应时间是多久？根据维基百科上^①快枪手网页上的文章显示，最优秀的快速射击手拔出枪射击的时间需要 0.145s。好了，汉的枪就在面前不必拔出来了，我想即使 0.12s 的反应时间也合情合理。

真讨厌。我原本想证明的是汉没有办法开枪向葛瑞多报复，除非他有某种绝地武士才有的神力。不过，也许他就是绝地武士。也许他身体里面就潜藏着一种未知的只有绝地武士才有的力量，这才让葛瑞多打偏了枪，也许汉甚至连自己也不知道他有这种力量吧。或许，汉就是这样一种人，他想的是：

“哦，这就是葛瑞多那家伙了。我知道他的来历：是贾霸把他派来让他速速带我回去的。好吧，他可能骨子里也未必是个十恶不赦的人。他不会开枪的，我知道他不会。但是你要知道，我也得备好我的枪，以防万一……”

什么？！难道他想杀了我吗？没打中？好，葛瑞多，我要开枪了。开一次枪也许对付不了你这样的人渣，所以我得再来一枪，砰，怎么回事？”

没有人知道究竟发生了什么，当然除了楚巴卡。

他什么都知道的。

① 参见维基百科的解释，http://en.wikipedia.org/wiki/Fast_Draw



GEEK

PHYSICS



第五章

技术



$$x_2 + 1x_3y_2$$



光按键可以为手机充电吗？

我喜欢听播客。“Buzz Out Loud”^①是我最爱的播客节目之一。有一次，节目里探讨了用手按键的方法进行手机充电的可能性。带有压电装置的手机在触屏之后能否把产生的能量添加到电池内呢？

有没有什么办法可以检验一下这个想法是否有实现的可能呢？哦，有可能的。

什么是压电装置呢？这个装置确实存在。你可能一直与这个装置接触但从来没有感受到它的存在。一般而言，一个压电材料在挤压时两端电势会产生变化。为什么会产生这种现象？我猜想你的回答是当压力施加到材料时材料产生电极化，电极化产生内部电场，因此两个侧面即产生了电势的变化。简而言之，当施加压力，就会产生电流。

这些压电材料最常见的两项用途是燃气灶和生日贺卡上那个令人烦恼的音乐播放元件（我们稍后会谈及它）。你有没有想过里面没有一节电池，燃气灶上的红色按钮是怎样产生火花并把燃气灶点燃的？没有想过吗？不管怎样，当你按下按钮，从你的手指上产生的压力使得内部材料变形，就产生火花点燃气体。压电材料还用在扩音器上，比如装在木吉他上。木吉

^① 一档科技 podcast，DJ 诙谐幽默，探讨科技新闻趣闻很有深度，是众多科技从业者和爱好者了解最新最前沿科技的好去处。

他在演奏时弦会发生振动，传导到元件后产生电信号推动扩音器。

那些烦人的生日贺卡又是怎么回事？压电材料以另一种倒过来的方式工作：如果通电，便会产生压力。如果使用它两端的电势差，你可以让材料稍微扩张。如果用电场，就可以使材料改变电极，以至改变它的大小（但只发生稍许改变）。我知道事实情况远比这个要复杂得多，但我想简而言之来进行探讨。

对于一张不受人欢迎的生日贺卡，带有一个微型的扬声器是必须的。卡片使用的不是由线圈和磁铁构成的传统扬声器，而是一个压电扬声器。变化的电压被施加到材料之上导致它膨胀和收缩，从而播放出所需的音乐和曲调。也许它不是最好的扬声器，但他们的确能起到一定的作用。它本身也足够薄而轻巧，你可随意从卡片上扯下来藏到隔壁的办公室里，但我是绝不会那么做的。

打字能产生多少能量呢？让我们先搞清楚，手指在打字的时候能产生的能量值。在这一点上，我认为重要的不是知道手指的能量转换成电能效率的大小。我想象不出有哪个材料已经被用于或者将来会被用于制造一个效率接近 100% 的电池充电设备。现在，我先假设有人已经成功研制出了这种系统了，而且下一步就是要检测一下这种系统是否能被用于设备充电。了解清楚用手打字产生的能量你就可以给这一装置的充电能力设定一个理论上理想的上限。

让我们来想想这个系统的工作原理。设想一下：手指按压屏幕，哪怕只是稍微一下轻按，屏幕也发生了收缩形变。如果你知道手指的位移和力，你就可以计算出手指做的功了。

现在，记住我要算的是手指所做的功，而你希望得到的是作用在压电装置上的功。这两个功一样吗？不一样。手指移动的距离比压电元件压缩

得多，因为手指要做的不仅仅是压缩手机而已。让我给你描绘一下充电设备在最佳状态下力和位移的情况。为了估算，我用了力传感器来做实验。这基本上是一个小黑匣子，有一根杆从它里面伸出来，你可以用它来衡量较小的推力与拉力。为了模拟手指，我把橡胶塞在杆的一端，开始用大致按屏幕的力气来按橡皮。

我发现，我的手指推力大约为 3N ，位移是 0.0015m 。在继续之前，让我们回忆一下在高中物理里我们是如何测力和牛顿的定律的。其中一个测量力的最简单的方法是用弹簧秤，这基本上是在一根带有标记的管内放置一根弹簧。弹簧的特性就是你越用力，它就会越伸展。因为力和位移之间存在线性关系，我们就可以通过查看位移来确定使它延伸的力的大小。

如果你不熟悉 N 的单位意义，这样想， 1 单位牛顿相当于一本精装书的重量。为什么用 N 来表示？力的命名是为了纪念艾萨克·牛顿。他是最早思考力与运动之间关系的科学家中的一位。其他的科学家也在这个问题上做过研究，但牛顿做的贡献最大，因此力的单位就以他的名字命名。

有了这两个值，我估算出手指按一下做的功是 0.0045J 。焦是科学家共同使用的能量单位。如果你想感受一下，你可以把一本书从地板上拿开并放到桌上，这大约会用上你体内 10J 的能量。是的， 0.0045J 似乎很小，但请记住，很可能现实中更小。为什么会比这更小？为此我指出以下几个方面：

- 我用的是峰值力，并认为按压过程中始终保持这个力，事实上整个过程中不可能一直保持峰值力的水平。

- 这是由手指所做的工作。在计算过程中，手指距离被默认为设备压缩的距离，实际上可能要小得多。想想看，屏幕厚度不足 0.1cm ，因此压缩的程度不可能很大。

- 设备的效率可能远远不到 100%。

现在，我们需要考虑用手指给手机充电需要按多长时间。第一个问题是：有多少能量被储存在手机电池上？你可以上网去看看给苹果手机换个电池，这个电池的标称是多少？我找到的是 1 420mA 时，电压是 3.7V。这个标称说明该电池能够维持 1 420mA 3.7 伏的电流 1 小时。

有两点你需要知道：在电路中，电能等于电流和电压的乘积；电能是能量变化的速率。

由此，我可以转换的能量等级为 1 890J。因为我知道，每“按”一下是 0.0045J，我可以计算出充完电要按多少次。经计算，这将需要按 420 万次。

因此，这意味着要键入超过四百多万字。这需要多久？你输入的速度是多少？单从我的经验来看，似乎每秒两个字将是相当快的。这意味着打 400 000 字将需要 2 000 000s。如果一天不间断地按 12 小时，其他时间留给睡觉、吃饭、处理其他麻烦的任务，要按一个半月才能充满电池。这几乎已经是最理想的情况了。要说明的是，我可能做出很多假设，让我可以用假想的方式做很多事情，但这仍然不能让我免去这一周复一周的打字。因为你消耗的电量远远快于你充电的速度，打字这个办法永远无法奏效。

这是否意味着使用压电装置过时了呢？只通过按触摸屏给手机进行充电，这是行不通的。还有另一种可行的办法：用你的鞋子装上压电设备来充电。这为什么就不同了？因为施加在你鞋底上的力远远比你的手指在屏幕上施加的力要大。此外，你的鞋可以轻松地压缩至少 1cm。如果开始有大约 500N 的冲力以及 25% 的效率，每一步就将产生 12.5J 的能量。如果你想给手机充电，将需要大约 150 步，这个距离不太远。当然，这是一个相当高的假定效率，在现实中，它可能会低很多。

太阳能充电呢？蓄电池的理想替代品将是一块太阳能电池板。而苹果

6 代的机身是 $138.1\text{mm} \times 67\text{mm}$ 。如果在手机背面大部分的地方安装上一块太阳能电池板（比方说 80% 的面积），该太阳能电池板的最佳位置将是完全和阳光垂直。

只知道太阳能面板的尺寸还不够。由于手机不可能完全与太阳光线垂直，总是有点倾斜，它并没有得到全部的太阳能，因此我假定平均和最佳角度成 30° 。

为了以太阳能电池板来计算能量，我需要两个假设条件。首先，我会假设太阳通量是约 $1\,000\text{W}/\text{m}^2$ 并假设太阳能电池板将太阳能转换为电能的效率大约是 25%。

有了这些数据，我得出如果苹果手机的背面由太阳能充电，功率是 1W，这似乎是一个比在手机上输入文字来充电更好的解决方案。如果我估计了每秒两个字的键入速度（或任何形式按键）的功率是 0.009W，两者的区别就很大。如果让阳光直射手机 4 个小时，电就充好了，这个方案貌似更可信。

所以，让我们总结一下：通过打字充电是行不通的，步行给手机充电或太阳能充电则有可能奏效。但是，真的，我们的手机需要性能更强的电池。

推特波能赶上地震波的速度吗？

如果你喜欢科学，喜欢幽默，应该去阅读一下 xkcd 漫画（在线网址：<http://xkcd.com>）。这系列漫画内容上活色生香，传递的也不仅仅是一些引人捧腹的内容，更有一些观点颇有见地。

前段时间漫画里就提出了一个这样的说法（<https://xkcd.com/723/>）：地震发生时，如果靠近震中的人发出一条推特^①，其他人可能在实际有震感之前就收到那条推特警报。

人们喜欢使用推特来发布一些消息。这些信息可以小到琐碎的“吃什么三明治了”，大到令人毛骨悚然的“地震来了”。在地球表面，我们已知推特的速度是快于地震波的，但地震波一开始就比推特波超前了一段距离，因为人们不可能在地震一发生之后就毫无时差地发送推特，他们总还要花点时间去键入“地震”两个字。但是在某些条件下，“推特波”最终会超过地震波而先期到达某个地方。

一个人需要离开地震多远才可以使得推特先于地震到达他所在的位置？粗略地看这个问题，直观的经验告诉我这似乎是一个恒速问题，即两物体以不同的速度前进发生追赶，颇有点类似于“一列火车离开芝加

^① 英语 Twitter（非官方汉语通称推特）是一家美国社交网络及微博客服务的网站，是全球互联网上访问量最大的十个网站之一。

哥……”这样的老问题，但显然地震和推特的速度追及问题更有意思。

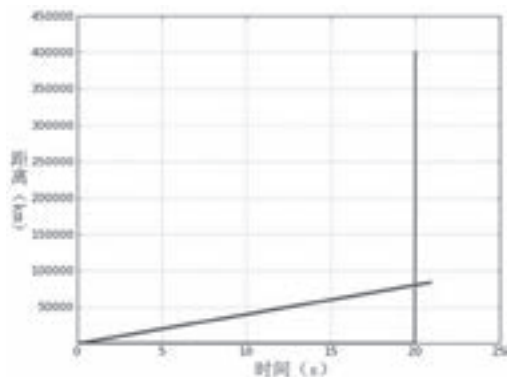
要解决这个问题，我需要一些原始数据。下面是 xkcd 系列漫画里给我们提供的数值（它难道真的仅仅被认为是漫画吗？）：

- 地震波的速度为 $3\sim 5\text{km/s}$ （我将这个记作 V_s ）。
- 接收到地震的感觉和第一条推特发出之间有一个做出响应的延迟时间。让我把这个时间称为 t ，并认为它为 $20\sim 30\text{s}$ 。
- 推特的速度是多少？这将是 V_t ，我将以 $2\times 10^8\text{m/s}$ 的值来计算。

现在来讲一点数学知识。我们知道距离等于速率乘以时间，因此要想知道地震波领先于“推特波”多少距离即地震波的位移，我们的算法就是拿波速乘以时间；至于“推特波”的位移函数，“推特波”的速度和地震波不同，并且前者是在稍后的时间才开始传播的，除此之外其位移函数和地震波的位移函数在形式上毫无二致。

通过求解两个波的追及时间，可以得出为了使推特先于地震到达需要离开地震中心的距离。

解决这个问题的一种方法是绘制这两种波的函数图，看看它们在哪个位置交叉。请看图示：



在这里，你可以看到问题所在。如图所示，推特的速度比地震波的速度快太多了，以至于关键就是要算出在反应时间里地震波的位移。根据两个图线的交叉点所示，地震波在这段延迟时间内传播的距离是 80km。

最近发生在弗吉尼亚州的矿产区的地震是这样的：



在红色圈以外的任何人都将有机会提前收到一个地震的推特警报。

回到对地震波的探讨。有没有什么办法来估算一下而不只是简单的猜测一下（或查找相关数据）地震波的速度？事实证明，有一种可行的方式。2011 年弗吉尼亚的这场地震中，有一个视频显示了在美国各地不同的探测器的情况（如果你观想看一下视频，地址是：<http://youtu.be/IKE7MLNdtcg>）。

有了这个视频，我可以使用的视频分析工具，通过时间计算出地震波的超前距离，同时也计算出地震波的速度为 7 000 m/s。

那么，推特的速度可不可以再精确一点？让我以一个简单实验来推测一下。我先在网上发一条推特，观察一下回复的速度有多快。这就是我的那条测试推特：



这里有个实验，请回复这条推特：a) 你的电脑收到它的时间；b) 你看到它的时间；c) 你所在的国家 and 城市。

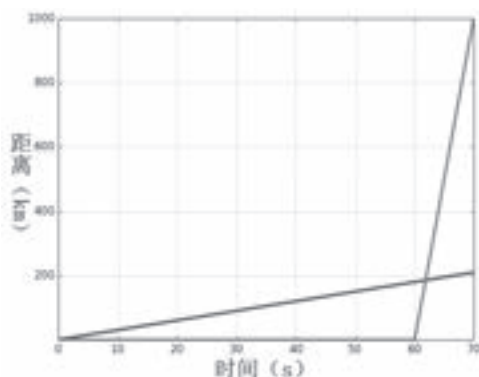
推特在最初被发送的时间与实际被别人收到的时间之间存在一个时间差，这个时间差可以让我计算出速度（因为我知道它们的位置）。这似乎是一个简单的实验，对不对？好了，有一个小问题。我发出推特的时间为中部时间 1 : 48。大多数人反馈的消息说他们是在下午 1 : 48 读到这条推特的，有些人甚至说他们是在下午 1 : 47 收到的，种种迹象表明：我们的时钟似乎不同步。最麻烦的是，波的运行时间小于 1 min。

然而，一些人距离我相当远。有一个在德国（距离大约 8 200km），一个在南非（13 000km）。用这种方法，我给推特的速度下限定为 $2.17 \times 10^5 \text{ m/s}$ 。

这是一个要比我最初设定 $2 \times 10^8 \text{ m/s}$ 小得多的数值。也许我需要追加一个实验。在我兄弟的帮助下，我测量了我的推特发送与他收到推特之间的时间差。根据他给我的数据 $3.5 \times 10^4 \text{ m/s}$ ，最终实验结果是 10^5 m/s ，也许 10^5 m/s 的速度是比较合适的。

现在，随着推特和地震波速度的再次测定，我们就可以根据新的数据重新来绘制一张图。

我假设反应（延迟）时间为 1 分钟，图如下所示：



图中斜率较高的线表示推特波。

根据图示的交叉点，围绕地震中心形成了一个半径约 180km 的圆形。这个圆形以外的人已经距离足够远，以至于影响不大，并不需要警报了。所以，看来推特不会给你一个很有效的地震警示。

愤怒的小鸟™里的物理有多真实？

力对于物体产生什么作用？对于物体而言，力到底起到什么样的作用？我们知道，力是物体间的相互作用。在最基本的层面，我们可以把世界上各种各样的力划分为4种：引力，是有质量的物体间的相互作用力；电磁力，是带有电荷的物体间的相互作用力；强核力，是像质子和中子这样的粒子之间的短程相互作用力；弱核力，是亚原子粒子之间的相互作用力。最后两个力和这节我们要讲的愤怒的小鸟™这个游戏并不相关，所以暂时不讨论。

如果一颗球被某人一扔，不小心砸到我的头，我头上挨了一下。挨了一下，这是个什么力？从物理技术上来讲，这属于电磁力。球的原子和我头部的原子里都含有电子和质子，当它们相互接近时，有这些带电粒子之间形成相互作用的电磁力。表面上，我是被球击中了，但真的是“我”被击中的吗？在原子水平上，很难界定“碰撞”这一概念，我们只能说，球的原子和我头部的原子发生了相互作用。

好吧，我越来越偏离正题了。回到引力，引力是一种什么样的力？引力是任何有质量的物体与其他任何有质量的物体之间发生的一种相互作用力。然而，这种相互作用力很弱。通常情况下，除非两个物体中的一个物体具有非常大的质量，不然，我们甚至不会注意到这种相互作用的引力。

为了加以说明，给大家举一个例子。假设我拿起铅笔再放开手。铅笔和地球都有质量，我也有质量，但铅笔的质量和我的质量并不大，这就决定了铅笔和我之间虽然有引力作用，但非常小，也不会产生什么显著作用，因而无须加以测量。但是地球就不一样了，它的质量是非常巨大的，它造成的引力足以影响到我放手之后铅笔的运动，于是铅笔就产生自由落体的物理现象了。

回到一开始提到的第二个问题上——力到底对物体产生了什么作用？简而言之，力改变物体的运动。在这句简单的话中，“运动”这个概念举足轻重，我们千万不要落入别的大多数人都会落入的圈套里。大多数人会说的是：力是导致物体运动的原因。在某种意义上，他们可能也有一定的道理，但是在大多数情况下他们的认识是错误的。在这里，我准备了一个很好的问题正好可以测试一下你的家人和朋友是不是也持有这种错误的想法，这个“试金石”式的问题是：如果在物体上施加一个单一的大小不变的力，物体会发生什么物理现象？我敢打赌，96.7%的应答者会这样回答你：“大小不变的力当然让物体以不变的速度运动啊。”

但不幸的是，这种恒力导致恒速运动的想法是完全错误的。这个错误的源头在亚里士多德。之所以包括亚里士多德在内的人都这样认为是因为这个观点虽然谬误，但却很符合我们日常生活经验，而在现实中我们又很难理想地做到只让一个力单独地作用在物体上。假设你真的在现实中能够做到只让一个力单独地作用在物体上，你会发现一个恒力事实上是在不断地改变着物体的运动状态的。并且，如果只在一个方向上对原本静止的物体维持着这样一个恒力，该物体的速度还会不断增加。

那么在一个恒力的作用下，物体运动的变化程度是怎么样的？让我继

续来讲述这个问题。我先把这种“运动的变化”称为“加速”。一个物体的加速度取决于两个因素：力的强度和物体的质量。力越大，加速度越大；物体的质量越大，加速度就越小。可能你知道这等同于牛顿第二定律的表述，用数学公式即“合外力 = 质量 × 加速度”。

关于力，还有一方面需要我们加以清晰地认识。还记得之前提到的铅笔自由落体吗？铅笔具有质量，地球也有质量，铅笔会不会对地球也施加了一个力？是的，它也会对地球施加一个力，并且这个力在大小上等于地球对铅笔施加的力。两个力虽然相同，但结果区别很大，原因就在于质量。就像我之前说的，地球的质量是巨大的，这表明如果地球要获得一个显著的加速度，力还需要足够大才能起到效果。所以，尽管作用在铅笔上和地球上的力具有相同大小，但一个力产生了很大的加速效果，另一个却丝毫没有。

以上所讲的就是物理里的运动学在我们这个世界里的运作方式。让我们用这些物理知识为基础来研究一下愤怒的小鸟™，分析一下在这款游戏创建的世界里的物理学是不是和我们的现实世界具有相同的运作方式？我还是等等，可能你还是不知道愤怒的小鸟™是什么？请告诉我这不是真的。唉，还是先让我为这款非常流行的游戏铺垫一下，为还没玩过的人做一番简要说明。

从原理上讲，游戏的玩法很简单。玩家将弹弓上的小鸟弹出去，砸到被猪棚保护的绿色肥猪，将肥猪全部砸倒就能通关。猪棚可以由玻璃，木材或石材制成。为什么向猪射击？为什么小鸟会生气？为什么它们不能直接一飞了之？很遗憾，我并不知道这些问题的答案。但我知道这个游戏非常神奇，能让人上瘾。你可以在几乎所有的智能手机和PC上玩这个游戏（甚至在谷歌的 Chrome 网络浏览器上）。

我想我应该再稍微具体地讲一下游戏的玩法。愤怒的小鸟™里有不同种类的鸟可供你射击。不用挑到底使用哪种鸟，你要射击前，游戏已经为你事先设定好了。不过，不同的鸟完成的任务却大相径庭。

如果你刚开始玩愤怒的小鸟™，第一关为你提供的是红色鸟（以下我会简单地叫它小红）。如果把小红弹出去会发生什么？小红在空气中以抛物线的路径运行。原来这正是我们称为抛体运动的一种物理运动形式。那么究竟小红它为什么会以这样一种方式运动呢？

当小红离开弹弓以后，只有一个有意义的力作用在小红之上，那个来自于弹弓的力只是瞬间完成其作用。尽管你的直觉可能促使你思考是不是应该把这个力也添到物体上，但请不要添加，因为事实是小红在离开弹弓以后，这个力并没有始终伴随着小红在空中移动。假设你把这个力添上了，你就是在和亚里士多德交谈了，这个问题上你千万对他要闭耳塞听啊。为什么会只有一种力？试着这样去思考：你可以在这时把力统一划分为两大类：有一种力是由物体“接触”了一下另外一个物体而产生的效果，是瞬时性的，而另外一种力则恰恰相反，它是因长时间而非一时“接触”另一物体而产生的作用效果。当小红离开了弹弓之后，你分析一下会有什么力在“接触”小红呢？你认为是“空气”？但来源于空气的那个阻力实在太小了，在这种情况下几乎可以忽略不计。那还有什么力呢？没有任何力“接触”小红了。会不会有别的长时间发生“接触”的力呢？有，那正是地心引力。小红在空中的独特飞行方式正是在弹弓瞬时施力之后与地心引力共同的作用下造成的结果。

因为小红的飞行只受到引力作用的影响，那我应该进一步探讨的是重力。在地球表面，我们完全可以为引力建模。引力大小恒定，方向竖直向下，这个力的大小是物体的质量和引力场的乘积，其中引力场大小

为 9.8N/kg 。

重力仅在垂直方向上起到作用，因此只改变了鸟在垂直方向上的运动。那么水平方向上呢？因为重力不改变鸟在水平方向上的运动，那么在水平方向上速度就保持恒定了。抛体运动经过这样分解为垂直方向与水平方向之后，就符合物理书里对抛体运动的描述，那么愤怒的小鸟™的运动是这样的吗？

你如何测量小红在水平方向上的运动？嗯，有多种方法供你参考。你可以使用屏幕捕捉工具或者在游戏视频前架设一个视频摄像头拍摄游戏过程。然后，你就可以清楚地观察到图像里小鸟在水平方向上每帧的移动情况；另一种方法也很有用——使用视频分析软件。正如我在前一章中给大家演示的，这种方法的基本思路是在视频的每一帧里标记好对象坐标位置，得到的 x , y 坐标数据与对应的时间数据。有很多的软件包都可以为你做到这一点，很多课堂上用于分析运动所使用的是一款 Venier 公司的 Logger Pro（游标记录专业版）软件。我个人更喜欢免费的（更强大的）Doug Brown 公司出品的 Tracker Video（视频跟踪）软件^①。

根据视频软件的分析，小红在被弹射以后，在从图像的一帧跨到另一帧的过程中，水平方向上的位移均是相等的，或许你可以说水平方向上的速度是恒定不变的。

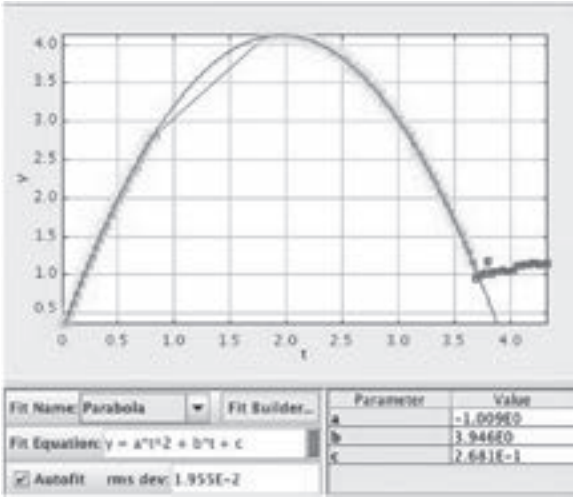
经视频进一步分析，小红的运动速度是每秒 2.46 “距离单位”。恩，什么是“距离单位”？这个“距离单位”并不是标准单位“米”。在游戏的情景下，这是愤怒的小鸟™这一款游戏世界里专门使用的单位（我称

^① 可登录 <http://www.cabrillo.edu/~dbrown/tracker/> 下载。

为 AB，而不是 m）。在分析视频时，我要往软件里输入的是实际场景与游戏场景之间的比例尺，即屏幕上的每个像素对应真实世界的大小。但很遗憾，我无法确定真正的现实距离为多少，因此，我只能退而求其次，暂时将 1 个单位的 AB 定义为弹弓一次发射的长度。

可是，我还是不甘心，到底有没有什么方法可以让我把愤怒的小鸟™ 游戏世界里的距离还原到真实世界里？答案是也许可以。让我从观察小红在垂直方向上的运动入手来试图破解这个难题。重力是作用在小红上唯一的恒力，这也决定了小红在垂直方向上的加速度是恒定的。恒定的垂直加速度意味着恒定的速度在垂直方向上的变化。如果速度不断地发生变化，反映在函数图上即是斜率不断地变大，那么在电脑上呈现的图形会是一个什么模样？答案是抛物线。下面这张图以时间为自变量，垂直方向的位移为因变量，斜率为速度，可以很好地展示小红这种特殊的运动形式：

Fit Name: 匹配的运动名称
Fit Equation: 匹配的公式
Autofit: 自动匹配
Parameter: 参数
Value: 数值



为了不打断我们研究的思路，该公式的推导从略，如果一个物体以恒定加速度运动，那么它的位移函数应如下：

$$y = y_0 + v_{y0}t + \frac{1}{2}at^2$$

幸好 Tracker Video 兼容了抛物线函数的数据，所以我可以看到在 t^2 前的数值显示为 $a = -1.0AB/s^2$ （请记住 AB 是愤怒的小鸟™ 世界里的长度单位）。这样，根据函数反推小鸟在垂直方向上的加速度是 $-2AB/s^2$ 。

这个计算加速度的技巧实在是再神奇不过了！如果我认为愤怒的小鸟™ 这款游戏真实地发生在地球上，又会怎么样？在这种假设下，小鸟仅受重力作用的影响，垂直方向的加速度应为 $-9.8m/s^2$ 。垂直方向的运动把游戏里和游戏外的世界联系起来了，我因此就可以很方便地把这两个值设置为相等，我于是可以很顺利地得到 AB 和长度单位之间的比例关系。简单的转换以后我得到 $1AB = 4.9m$ ，根据一开始把 AB 定义为弹弓的射程，于是弹弓射击的高度在现实世界里应该近 5m。那么小红呢？使用相同的比例尺，小红的高度为 70cm 左右。经过这么一计算，我们才知道这原来是一种体型巨大的鸟，一只超大的愤怒的鸟。

让我们再来看另外一种鸟：蓝鸟。这种蓝色鸟类也需要一个别称，我就简易地称它为小蓝。小蓝身怀绝技，如果你对它还不熟悉，那你必须先了解一下小蓝的特殊本领——在空中一分为三。这种能力实在是强大无比啊。除了这项本领以外，蓝鸟比任何其他的鸟类更善于打破玻璃结构的猪棚。

这里就有一个问题出现了：小蓝一分为三的时候，质量上发生了什么变化？分出的新鸟的质量是原来大鸟的三分之一？也许不是的，会不会每只新产生的蓝鸟具有和原来相同的质量（这说明愤怒的小鸟™ 游戏世界里的质量并不守恒）？

刚才我们通过重力加速度巧妙地解决了长度的问题，现在我开始着手质量的问题，那么我将如何测量愤怒的小鸟™ 游戏世界里的质量？我

有没有一个可供参考的比例尺？没有，不过那也没关系。对我的研究而言，愤怒的小鸟™这款游戏的有趣之处就在这里——你想尝试回答一个问题，但你找不到任何切入点，你必须拿出一些替代性的实验证据。这种有趣的挑战正是你在实际的科学工作里会遇到的。

让我举一个真实的例子加以说明我的上述观点。假设你要测量像电子一般大小的微粒质量，你能不能准备一台秤，然后就按部就班地进入下一步骤？不，当然不行啊。相反，你必须找到一些其他的方式来确定质量。事实上，对于这种情况，可以首先为带电粒子确定质荷比^①，然后追加另外一个实验来最终确定电荷的质量。诚然，过程很复杂，但我知道那就是科学开展的正确方式，就是科学能带来如此多乐趣的原因。设想如果攀登珠穆朗玛峰对于登山者来说不费吹灰之力，那还有多少登山者会乐此不疲，因攀登而觉得有趣？没错，假如做某件事轻而易举情况会完全不一样。

重新回到愤怒的小鸟™。我们如何调查质量？有什么运动和质量相关吗？我马上想到的就是游戏里面的碰撞。好吧，我们首先来学习一下碰撞。假设我有两个物体发生相互作用（A 物体和 B 物体），在相互作用的过程中，A 物体推动了 B 物体，B 物体也反推了 A 物体，这两个力大小相同，但其力的大小跟各自拥有的质量是无关的。

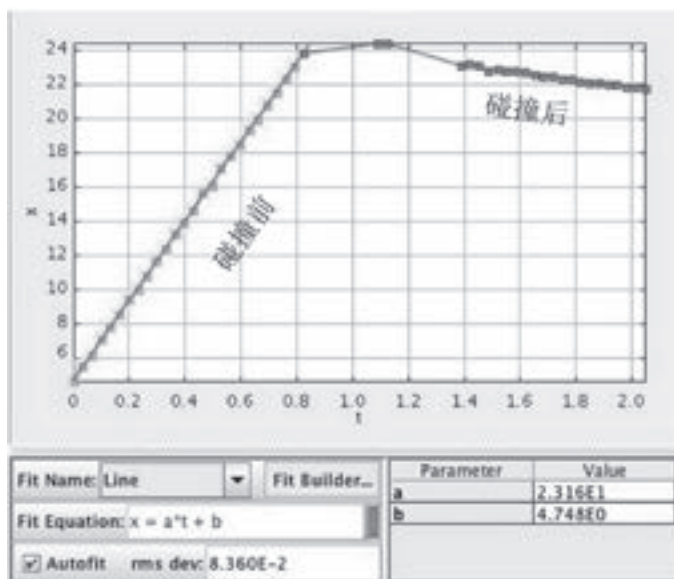
所以力是相同的（力是矢量，当然指的是大小上的一样）。但到底力做了什么呢？力改变了动量。关于动量，有两个重要的因素需要我们牢记（有很多关于动量的知识需要学习，我可以花一整个学期来教授动量）：动量是质量和速度的乘积。动量也是矢量（动量有方向）。

^① 质荷比（mass-to-charge ratio）指带电粒子的质量与所带电荷之比值，以 m/e 表示，是质谱分析中的一个重要参数。

在碰撞时，两个质量块具有相同的力，发生相互作用力的时间也相同。它们的动量改变量相同（但方向相反）。不要忘了“改变量”这个术语，这一点至关重要。这个问题的关键是，如果假设动量守恒，我可以根据速率的变化推导出质量。

现在，为愤怒的小鸟™做一个实验。我需要做的是找准游戏里的一关，这一关力的任务正好可以让我为蓝鸟找到一个合适的撞击目标。如果你仔细观察，会发现游戏里有一关的场景是这样的：一块短板上放着一块岩石。例如，愤怒的小鸟™原版的3-3关里就有这么一个游戏场景设置，这块放在短板上的石头看上去有点像一个支架上放了一颗软式垒球。我可以用小蓝来射击这块石头，并使用视频分析软件来测量鸟和岩石碰撞后的速度。

通过测量碰撞后的物体的速度，我可以得到物体的质量比（假设动量守恒）。为了进行比较，让我先分析小红。我展示一下我是如何得出碰撞前后速率之比的。



这是在水平方向上的速度图形。碰撞发生（至少是相互作用力）在 x 方向，所以我并不需要担心垂直方向（ y 方向）上的运动。这样是合适的，由于重力，动量不会在垂直方向上守恒。

得出小红在碰撞前后的速度之后，我可以用同样的方式求解出岩石在碰撞后的速度。如果动量守恒那么小红的质量为岩石质量的 0.31 倍。是的，请原谅我在这里省却了许多代数计算的细节。也许我应该把小红的质量作为愤怒的小鸟™里质量的标准单位。那么在这种设定下，我设置小红的质量是 $1mr$ （ mr 是愤怒的小鸟的质量单位，代表小红的质量），岩石的质量就是 $3.1mr$ 。鉴于游戏里面根本找不到愤怒的小鸟和现实中的小鸟之间的任何质量上的联系，为了破解这一难题，这已经是我能做到的极限了。

那么小蓝呢？在这里，我需要做两件事情。首先，在小蓝不分为 3 只鸟的前提下，我将用它来打击同一块岩石。之后，我把小蓝分为 3 只新鸟，使这 3 只中的一只再去击打岩石。

在一只小蓝（未经过分解）撞击岩石后，我发现它的质量是小红的质量的 0.019 倍（ $0.019mr$ ）。多么小的一只雏鸟，小红的质量是它的 60 倍。

现在，我把小蓝分为 3 只新鸟，使这 3 只中的一只再去击打岩石，我也可以得到它的质量。经过计算，我发现它的质量为 $0.29mr$ 。

这很奇怪，不是吗？这个新生的蓝鸟倒比原来的那只大了 15 倍。如果你把所有 3 只新生的蓝色小鸟的质量加在一起，总质量会是原始质量的 45 倍。坦率地说，我有点惊讶。我起初的想法是新生的蓝鸟可能会和原来的那只质量一样。这样的结果就大大超过我的预料了。

好了，我该如何去解释这种不遵守质量守恒定律的物理现象呢？是的，我知道这只不过是一个视频游戏罢了，又不是真实生活的世界，何必如此

认真呢？但我还是想尝试着用物理知识去验证游戏世界是不是运用着一套和我们现实世界相同的物理法则。对此，第一种解释是愤怒的小鸟™里动量是不守恒的。为什么要守恒呢？它不必和我们生活的世界遵循相同的规则，对吧？第二个解释是，当你点击屏幕，你就等于敲开了一个全新世界的大门，原来的小蓝分身进入了这个新世界。这些新鸟只是看起来像以前的小蓝，但它们已经脱胎换骨，摇身一变成了用金属钛或其他什么材料打造的新鸟了。

这说明什么呢？这说明通过“经过碰撞过的”小蓝你可以在游戏里面获得极大的优势。如果游戏时冷落了小蓝，不善加使用，那就有点不划算了。记得送它去另一个世界。

在继续研究黄色小鸟的物理现象之前，也许我们应该停下来先读一首日本俳句^①：

太阳当空照，绿豕尾巴翘着笑，木板顶头断。

哦，当然，俳句用什么样的形式是个仁者见仁的话题，但对于黄色的鸟有什么本领大家的意见是统一的，没有争论。首先，黄鸟可以比大多数鸟类更好地粉碎木头。第二，当你在黄鸟运动的时候点击屏幕，会出现变化，到底发生了什么变化呢？

我多年以前第一次开始玩愤怒的小鸟™的时候，第一个感觉就是点击屏幕后黄鸟的速度会保持不变。后来有一天，我不小心把黄鸟打得过高了，结果它的高度没有不断上升，看上去简直就像一条抛物线。我这会儿

^① 俳句是日本古典短诗，由十七字音组成。

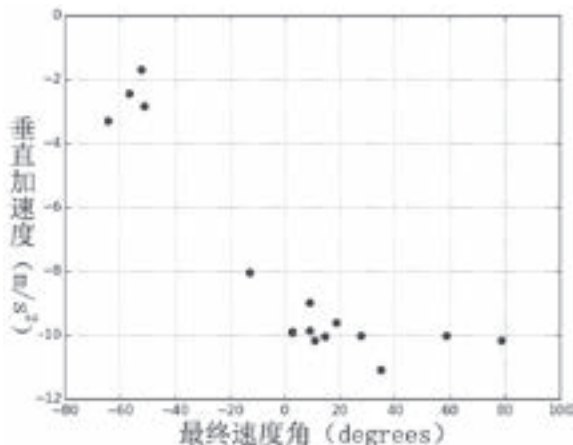
才意识到我一开始的感觉出了问题。下一步该怎么做？收集数据。

点击黄鸟之前，它有一定的速度。显然，点击后它的速度不同了。也许在黄鸟飞行的方向上点击产生了一个加速度，使得它不断地朝着一个方向运动。

视频分析之后，你可以更深入地了解黄鸟在点击前后发生的变化。经过计算机软件作图后，我发现无论是水平方向还是垂直方向上点击后的速度都提升了。此外，在水平方向上是没有加速的（仅在短时的点击瞬间才有）。对于垂直方向的运动而言，在非点击时间段里的加速似乎是恒定的，整个过程因此就像个纯粹的抛物线运动。

但在点击过程中具体发生了什么还是不明确。如果你再多观察几次不同的黄鸟的射击并加以纪录，有一点会很清楚：点击的效果持续时间为 0.067s，在这么短的一段时间里，加速度在发生变化，x 和 y 方向上速度也随之产生变化了。

几次射击过后，所有的这些射击造成的加速度都是不一致的，看上去加速度几乎每次都是随机不断在调整的，但是不管怎样，加速度目的只有一个——黄鸟的速度在点击后达到 30m/s。



请注意,我用的是“几乎”一词,因为实际上最终速度也并不总是 30m/s 。在某些情况下很奇怪,黄鸟的行为在点击后会变得十分异常。比如,如果黄鸟已经处于下降过程中,你再点击,它的垂直加速度就不是原来那个值了。下面这幅图说明的正是在点击后垂直方向的加速度和黄鸟移动时与地平线角度之间的关系:

请注意,大多数鸟的加速度约为 -9.8m/s^2 ,和你预想的一样。然而,正如图所示,如果鸟运动的时候向下与水平方向构成 $50 \sim 60^\circ$ 角时,垂直加速度只有大约 -3m/s^2 。这种现象颇让人费解。也许游戏开发商认为如果小鸟的飞行角度太陡,黄鸟最终会飞行得过快。毕竟,这是他们发明的游戏,规则自然也只由他们来制定。

到这里,愤怒的小鸟™这款游戏的“物理学”规律终于水落石出了。我想有时候,我们探索得到的答案是明确的,但也有时候,我们苦苦地探索,换来的只是更多的命题,但后者对于科学更有意义。

iPad 代替纸质飞行手册，能替航空公司节约多少成本？

最近有一则新闻吸引了我的注意。这则新闻报道了美国航空公司决定在飞机上使用 iPad 的消息。据悉，该公司获得了 FAA^① 的批准，可以在飞机上使用 iPad，从而取代原来厚重的纸质飞行手册。根据我在飞机上的阅读经历，一本纸质飞行手册的内容包罗万象，含有乘客想要知道的关于飞行的一切知识与信息，但重量上却达到了 35 磅。美国航空公司在新闻里是这样宣称的：从纸质手册到 iPad 这一重大转变使得公司在一年内一下就节省了约 120 万美元的燃料费。

我们先来讨论一下。首先，飞机是如何飞行的？这是一个大家热衷于讨论的话题。但正是这个问题让我们对这则新闻的内容产生了警觉。让我先非常简单的介绍一下飞行的原理吧，飞机飞行的原理并不复杂，你甚至可能会因为这个原理那么简单而略觉扫兴。

想象一下，一架飞机在空中移动。我们不要把空气假想为一种连续体。相反，我们应该把空气看作由体型微小的球组成的一个环境。飞机的机翼是怎么样？机翼仅仅是一块简简单单倾斜的板吗？是的，虽然角度很微小，但机翼的确是倾斜的。机翼在飞机飞行过程中穿过由微小的球构成的空气，

① 全称为：Federal Aviation Administration（简称 FAA），美国联邦航空管理局。

并与它们发生碰撞。

这些小球中的一个与机翼发生碰撞后，机翼改变了它的动量。动量的变化说明必然有一个合外力。这个导致空气小球动量变化的合外力来自于机翼。又因为力是物体之间的相互作用，空气小球也必然会施加给机翼一个大小相等的力。当无数空气小球与机翼发生碰撞时，最终结果就导致空气与机翼产生一个“阻力”，同时空气小球也会给机翼一个“升力”效果。

当然，这还存在另一个力。如果你希望飞机以一个恒定的速度飞行，你就需要一个拉力去平衡那个水平方向的阻力。那飞机的重量呢？如果你增加飞机的重量，你也必须相应增加“升力”。你怎样才能做到增加“升力”呢？有两种方法可供你选用。首先，你可以让飞机飞得更快些，飞得更快意味着机翼与空气小球产生更多的碰撞，以及空气小球有更大的动量变化。这两个因素都会使得空气小球对机翼提供一个更大的“升力”。

还有一种方法是改变机翼的角度。如果机翼朝着垂直方向倾斜，在数量上将会有更多的空气小球与机翼碰撞后偏转向下，于是就产生更大的“升力”。当然，由于机翼板与空气的接触面更大了，同时也将产生更大的水平方向的阻力。但是两种办法无论以哪种方式，有一点是一定的，那就是更多的“升力”就意味着更多的水平方向的“阻力”，不管采用什么办法都不能逃脱这种平衡。

但是，关于飞机飞行，我们不是还有伯努利原理^①吗？！是的，你说的一点都不错。我谈了“升力”，但没有谈到压力。为什么没有呢？好吧，如果我们把空气看成微粒，就不必处理压力，空气流动产生压力是伯努利原理的内容。假如你把空气看作是连续的流体，你就可以使用这个原理来

^①1726年，丹尼尔·伯努利提出该原理，其实质是流体的机械能守恒。

解释飞机的飞行了。我们刚才为了说明飞行原理而建立起来的空气小球碰撞模型还是很不完美的。然而，不管运用哪一种原理，我们有一点很明确——飞机的质量越大，消耗的燃料就越多。

我们来分析一下燃料，首先了解一下燃料的费用问题。美国航空公司的说法是更换 35 磅重的飞行手册，改用 iPad，一年将节省 120 万美元。现在，我不知道有多少飞行手册被替换下来了，但一本手册的质量显然比一个 iPad 的质量要大很多。如果一个 iPad 重约 1.5 磅，那么对于每本手册净重将节省 14.5kg。由此，我得出一个重要数据：每减少 1kg 质量，整个美国航空公司年度燃料成本将下降 82 000 美元。

我们也可以利用这个数值，再来看看其他质量下降所带来的效应。这个假设很有效，因为尽管所谈论的这种质量变化和飞机总质量相比是微乎其微的，但毕竟是官方公布给公众的权威数据，它一定是能比较精确地反映实际情况的。

换作一包花生米呢？假设美国航空公司每次从航班中减少一包花生的供应（航空公司不再向你提供这种食物），那每年节省的燃油费会是多少？首先，我需要知道一包花生的质量，我不用去搜索一袋花生的精确质量，我可以粗略地估计为一袋 25g，这应该和实际情况出入不大。按上述数据来计算，如果每一趟美国航空公司的航班都减少了 25g 的有效负载量，他们将每年节省 2 069 美元的开支。

每次飞行减少一袋花生的质量，仅此一项一年就将节省开支达 2 000 美元。如果一年内彻底取消全部花生的供应呢？我需要快速地估算一下，每趟航班会把多少袋花生米带到飞机上。这个问题丝毫不简单，因为我想要的是一个平均值。假设平均每次飞行有 300 个座位，每次飞行前需要事先准备好平均 400 袋的花生。如何？听起来，这个量已经相当多了。算一下，

每次航班取消 400 袋花生的供应，一年内一共会削减约 800 000 美元的燃料成本！这项节省成果和纸质飞行手册已经不相上下了。因此如果要厉行节约，航空公司还可以索性把花生的供应也一并取消，彻底地做到节省燃油开支。

还有行李呢？跟大多数航空公司一样，美国航空公司会为你带上飞机的行李收取一定的费用。据美航规定，你可以免费随身携带质量不超过 23kg 的行李^①，如果超重则需收取额外费用。那么，跟超过的那部分质量所消耗的燃油费相比，航空公司收取的费用合理吗？好吧，这个话题更富有挑战。当然，我会偏向难中行。

以下摘录的是美航关于费用做出的规定：

- 美国境内飞行：第一件行李 25 美元。
- 美国境内飞行：第二件行李 35 美元。
- 美国境内飞行：更多的行李 150 美元。哇，这个规定听上去似乎非常苛刻。

- 从美国起飞并经过欧洲，第二件为 60 美元，如果你在欧洲各地旅行呢，情况又是如何？

我会在这里暂停一下。第一件托运行李的价格是 25 美元，这似乎是航空公司的通行做法。现在我需要做一些估算。每个航班托运行李的平均件数是多少？托运行李平均每件的质量是多少？让我给出一个范围值吧。

托运的行李的质量是 9 ~ 14kg，这个数值如何？请记住，我只是猜测一下。那么每个航班托运行李的平均件数到底是多少？如果我坚持认为每次飞行有 300 个座位，可能仅小于一半的乘客每人会托运一件行李。总数就是

^① 参见美国航空官网，<https://www.aa.com/i18n/travelInformation/baggage/baggageAllowance.jsp>。

120 ~ 180 件。哦，这些都是“首件托运”，总质量介于 1 080 ~ 2 520kg。有了这个数值，我可以估算燃料成本了。根据上面的估算，燃料开销在一年内在 0.89 亿 ~ 2.08 亿美元之间。

所以 25 美元一件是否超额收取了？这个问题就更让人难以回答了。以上计算只着眼于年度平均值，它不看每件的成本。我需要知道一年有多少人付费托运行李。根据美国航空公司的信息页显示，每年有 275 000 人次乘坐飞机旅行^①，平均搭乘航班数是 3 400 班，运载的行李数量达 30 万件。

根据信息，平均每次飞行有 80 名乘客，我刚才一开始估算的乘客数量就不是那么准确了。但这个数字还说明，每位乘客的平均行李件数是 1.09 件。如果每个航班 80 名乘客，每位乘客携带半件行李的重量，燃料成本会削减到每年 3 000 万 ~ 4 600 万美元。

航空公司收取多少行李托运费才算合理？假设只有一半的乘客支付 25 美元的行李费。在这种情况下，美国航空公司将会增加 125 亿美元的收入。这个收入是相当高的，已经大大高于估计的燃料成本。

也许这项收费涵盖了所有的行李，包括免费随身携带行李。比方说，每年这 1 亿乘客每人携带的总行李质量平均为 30kg，年度燃料成本将达到 1.98 亿美元，但这仍然大大低于 25 美元的人均托运费。

合理的行李托运费该是多少呢？好了，首先你要思考一下这个费用到底在支付什么。航空公司需要支付很多和行李有关的费用，包括支付给处理行李的员工，造成的飞机空间成本和其他方面的考虑。让我们回到那个 4 600 万美元的估计值。如果我依旧认为乘客中 50% 将托运一件行李，这

① 参见美国航空官网，<http://www.aa.com/i18n/amrcorp/corporateInformation/facts/amr.jsp>。

将有 5 000 万人次，这样一来计算就很容易了，每件托运行李收取一美元。好了，将其更改为每件托运行李 2 美元，没有人会介意为此支付区区 2 美元的。

还有一点很重要，这一点考虑可能让我刚才的计算全部无效——我的计算是建立在这样的假设基础上的：为 14.5kg 的质量差造成的燃料成本变化和为 2000kg 的质量变化造成的燃料成本变化构成相同的线性函数关系。尽管燃料－质量函数不太可能形成完整的线性关系，这一假设还是有一定道理的。但请记住，我只是估计，但我仍然认为，2 美元一件行李是合情合理的。

好了，回到节省燃料这个话题上。如果美国航空公司可以通过用 iPad 替换手册的办法每年节省 120 万美元，还有没有在飞机上进一步的剔除重量的办法了呢？有的，我有新的办法可以做到这点。如果所有乘客必须在飞行前减轻身体上多余的液体会怎么样？我说的是通过排尿的办法。

让我们回到每次航班 80 名乘客的实际情况上来。假设每个人在上过厕所后才能上飞机。整个过程质量上将总共减少多少？平均而言，一个人可能会产生 300ml 尿液。哦，当然，有些人可以达到 1l，但也有可能是一些乘客临时有些怯场，在飞行前不能排尿。所以综合考虑，我认为折中的人均 300ml 是可行的，且估值稍微有点偏低。按理说，尿液的密度和水类似（虽然我没有用实验验证这一点）。

使用 1000kg/m^3 尿液密度时，可以得到 0.3kg 的平均尿液的质量。80 名乘客可以节约 24kg 的总液体质量。使用相同的 iPad 模式，每年将节省 198 万美元的燃油费用。这项规定还有一点好处，可以使乘客在起飞前就提前上了厕所，飞行途中就不用再起身去洗手间，这也是有效的节省资金的办法，因此应该形成这样一个新规。



GEEK

PHYSICS

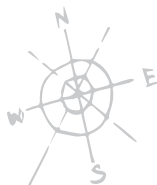


第六章

体育运动与物理



$$x_2 + 1x_3y_2$$



跳水究竟有多难？

让我们来欣赏一下 10 米跳台跳水比赛。面容冷静、身形矫健的运动员站上 10 米跳台，陡然从平台上一跃而下，跳入水中。随后，裁判将为运动员评分。得分是基于几个因素综合起来的，其中主要项目包括跳跃的高度和跳跃的难度系数。在本文中我们只关注跳水运动中的一个动作——旋转。我们将观察跳水运动员是如何实现旋转的，并分析旋转运动获得成功有哪些关键因素。

首先，一次 10 米跳台跳水持续多长时间？这个问题不太难回答。如果我们假设跳水运动员的垂直加速度是恒定的，那么我们就可以使用典型运动学方程来求解加速运动完成特定位移所需要的时间。以 9.8m/s^2 的垂直加速度，完成 10 米跳台跳水运动需要 1.42s 的时间。可见，运动员纵身一跃，一眨眼的时间内一次 10 米跳台跳水就完成了。

那么角动量呢？大多数人没有意识到的是，一旦跳水运动员身体开始下落，角动量基本保持不变。什么是角动量？也许我们首先应该看看线动量（通常只是被称为“动量”）。

动量在大小上是一个物体的质量和速度的乘积。我只说“大小”，是因为动量是一个矢量，是一个有方向的量。为了让概念理解变得更简便，我会假设我们需要处理的只是这个量在大小上的变化。那么，你如何改变

物体动量的大小呢？总之，物体动量的变化是由于作用在物体上的合外力造成的。如果作用在物体上的合外力为 0N，则动量是不会发生改变的。其次，“改变”是这里的关键概念。如果我们把这个原理应用于一个身体下落的运动员上，则垂直方向上的合外力确实改变了动量。当运动员下降，动量增加。

那么角动量呢？从某种意义上说，角动量和线动量很相像，不同之处在于前者处理的是旋转运动，也许对于这种运动而言更合适的称谓是“旋转动量”。角动量（我依旧使用其传统的称谓）还取决于两个要素：角速度和转动惯量^①。

角速度很容易理解，因为它是测量物体转动的一个度量。但是转动惯量又如何理解呢？如果把它称为“旋转质量”可能更具有意义，因为后者描述一种物体的固有属性，由于这种属性的存在使得物体的角速度难以改变。如何改变角动量？改变的方法不是运用一个合外力，而是需要一个净扭矩。

扭矩和力不同。在本文里我们不对扭矩展开太多。我只想说明一点，即对于跳水运动员而言，一旦身体离开跳台，扭矩就不复存在了。尽管跳水运动员身上始终存在一个地心引力，但它不会引起旋转。

让我稍作解释，我最喜欢的演示实验是惯性演示，在我给你演示完毕之后你可以自己来一遍。在这个演示中，我准备了两根 PVC 管，并用果汁盒贴住管子从而使得管子附加有一定的重量。

果汁盒贴在管子上的位置不同。其中一根上，两个果汁盒都靠近管子的中心；另外一根管子上两个果汁盒固定在管的两端。虽然这些物体的质

① 刚体绕轴转动时惯性（回转物体保持其匀速圆周运动或静止的特性）的度量。

量相同，但如果你手持在管中心，来回如拨浪鼓一般旋转起来，你会发现果汁盒在两端的那根管更难来回转动。所以，转动惯量不仅取决于质量，也取决于质量相对于旋转点的位置。质量离开旋转点越远，转动惯量则更大。

这跟跳水运动员有什么联系呢？在跳转过程中，跳水运动员要通过跳跃的力量使得自己的身体离开平台。以这样的方式，运动员身体的扭矩从零增加到一定的扭矩值。跳水运动员同时也成功地将身体旋转起来。现在假设跳水运动员想做一个团身抱膝三周的动作。跳水运动员应该如何在不两秒钟的时间内完成这个动作呢？你不能改变角动量，但你可以改变转动惯量。

通过拉动腿和手臂使得这些身体部位接近旋转点，转动惯量就减小了，角速度会增大。团身抱膝地越紧密则意味着旋转的速度越快。但你如何做到停止转动直接入水呢？你的转动是停不下来的，因为你的身体没有能力停下来。这时候要想停下来最好的办法就是重新摆直自己的身体，再次增加转动惯量并降低角速度。是的，这个动作要在一瞬间内完成，难度系数是很大的，但他们是奥运会跳水运动员，能够完成这样高难度动作。

人能拉动卡车吗？

现在的电视屏幕上充斥着让人眼花缭乱的节目“秀”，其中不乏一些声称自己是科学节目的，但也许它们真的只是一些娱乐节目罢了，根本算不上什么科学。我看过的众多所谓的“科学节目”中就有一个这样的节目，它美其名曰“运动科学”。很显然，我可不是这个节目的粉丝。虽然这档节目的图像制作堪称精良，但谈论运动原理的时候却缺乏了运动的“科学性”。

“运动科学”中有一集里描述了马肖恩·林奇^①，他是一位美式橄榄球运动员，力大无穷。那期节目的主题就是把他的力量和卡车的力量相比较，并展示给观众看。在我的这本书里你自然是无法看到视频的，所以在此让我先简要介绍一下在这场特殊的表演活动中的一系列步骤：

- 马肖恩·林奇的形象真是酷呆了（可能确实如此吧）。
- 马肖恩·林奇身上配备了无线运动传感器，以测量他身体的一举一动，节目组还为他创建了身体的实时动画骨架。其实除了这个动画之外，那个传感器没有什么作用。

^① 马肖恩·林奇（Marshawn Lynch），1986年4月22日出生于美国加利福尼亚州奥克兰市，美国职业橄榄球运动员，效力于西雅图海鹰队，司职跑卫。

- 马肖恩·林奇在一块人工草皮上拉一块 585 磅^①重的雪橇，拉动的距离为 5 码（约合 4.572m），耗时大约 11 秒。节目组就使用这些数据来计算马肖恩·林奇的力量。

- 然后，他们准备了一个由一个 325 马力的引擎发动的 6 700 磅重的柴油车，在沥青马路上试图拉一块重达 17 000 磅重的混凝土块。在进行这个比较试验之前，他们预先设定了卡车和混凝土块的重量之比，这个比率和马肖恩·林奇的体重和雪橇的重量之比是相同的。

- 货车拉不动混凝土块，这个也许不奇怪吧。在试图拉动的时候，卡车只有一个车轮在旋转（他们甚至没有动用一辆四轮的卡车）。

上述就是整个一期的内容情节。

这一集在内容上有两个致命弱点。首先，功率。你是如何计算功率的？功率是做功的速度。所以，取那个人做的功的总量除以他需要做功的时间，你就可以得出功率了。如果一个人拉动某样物体，这个人所做的功将是拉力乘以物体移动的位移（前提是力的方向和运动方向一致）。

“运动科学”声称马肖恩·林奇身体每千克体重的功率为 573W。他们怎么得到这个数据的？起初，我还以为他们是把雪橇的质量和轮胎的质量（2 600N）加到一起然后乘以距离 4.6m，然后除以 11s 的时间算出来的。这样计算的功率结果是 1 000W，因为马肖恩·林奇的体重大约为 100kg，即每 kg 体重约 10W。

真奇怪啊，这个数值和他们声称的每千克体重功率 573W 相差甚远，简直风马牛不相及。根据他们计算的结果，马肖恩·林奇总功率（根据运动科学）将达到 57 000W。这个数值之大简直是无稽之谈了。要接近这一

^① 参见第 012 页的注释。

功率值，他必须拉着这些重量的物体在 11s 内跑完两个足球场的距离。

即使马肖恩·林奇在 5s 内（我想通过缩短时间来帮助提高功率）拉动雪橇 4.6m，他将不得不以 62 000N 的力来完成这件事。我相信马肖恩·林奇的的确确是一个身强体健之人，但再强健也不可能有这样大的力气，所以我实在是不知道节目组是怎么算出这个超人功率的。

虽然以上问题我都解决了，我还想指出另一个谬误。功的大小取决于马肖恩·林奇施加在雪橇上的力，但请注意力的大小跟雪橇的重量其实不相干。任何人都可以移动一件重量为 585 磅重的东西。其实，我那个 6 周岁的孩子还能拉动一辆家用汽车呢。她在同龄人里可以算得上力量出众了，但如果车是在水平地面上，要拉动它也并非那么困难。只要确保有个成年人能待在车里及时刹车，千万别让汽车被拉跑了就行了。

如果没有太多的摩擦，即使是很小的力都可以改变物体的运动。要加速到特定速度也只需要一点时间就可以完成了。绝对不该使用整个汽车的重量来计算所作的功，因此计算功率则是错上加错之举，除非你是在垂直提起车辆。

那么，如何计算摩擦呢？让我们再回到马肖恩·林奇用雪橇拉动轮胎的那场“秀”。假设他在某一小段时间内以恒定速度拉雪橇（这样一个假设非常合适）。那在这种情况下，雪橇上的合外力就必须为零。如果合外力不为零，雪橇就将加速。因此，作用在雪橇之上的是什么力？雪橇受到地球的地心引力和地面对雪橇的支持力。如果没有其它的力，这两个力大小是相等的。最后，还有一个力，即与马肖恩·林奇拉动方向相反的一个摩擦力。

如果马肖恩·林奇拉成一定角度，情形就有点复杂了。我暂且认为他拉力的方向和地板保持水平，大小等于雪橇受到的摩擦力。雪橇的摩擦力

取决于两种材料（金属雪橇和人工草皮）界面间的相互摩擦以及地面对雪橇的支持力。

作用在马肖恩·林奇上的力呢？无论他对雪橇施加多大的力，雪橇都会原封不动地还给他。就马肖恩·林奇做受力分析，由于合外力必须为零，地面对他的摩擦力必须和他的拉力相等。但是请记住，这个结论仅限于绳子水平的情况下。如果他向上拉动绳子一点点，就会增加地面推他的力，这将反过来增加摩擦力。同时，这将减少地面对雪橇的支撑力，并减少地面对雪橇的摩擦力。你也必须考虑不同类型的地面与雪橇、鞋之间的接触面之间的摩擦系数问题。如果马肖恩·林奇穿着皮革鞋底的礼服鞋，不管他力量是多么强大他都不能拉动雪橇，相反，他还会滑倒。同样道理，如果雪橇底部覆盖着和真皮鞋子相同的防滑材料，他也会滑倒。他之所以会滑倒是因为雪橇上的摩擦力大于他的拉力。

在“运动科学”里，他们试图将马肖恩·林奇的力量和卡车的力量做对比。为了让对比显得更加公平合理，节目组希望找到一个与马肖恩·林奇拉雪橇的相称的动作来进行比较。马肖恩·林奇拉的轮胎质量是其体重的2.6倍，于是，他们找来一个6700磅的卡车，拉动一个重量为卡车重量2.6倍约为17000磅重的物体。这样就显得很公平了，对吗？当然不是！首先，卡车是停在沥青路面上的，并且也是在沥青路上拉混凝土块的。第二，马肖恩·林奇拉动时轮胎是在转动的。这样的比较你认为能称其为相称吗？

为了和卡车每千克质量的功率相匹配，你甚至连手指头都不需要动一动。据视频里说该卡车具有325马力的发动机功率，除以卡车的质量，卡车的每千克质量的功率为80W。

节目最后想证明按单位质量（kg）计，马肖恩·林奇比一辆卡车力量更大。在短距离内这个说法可能成立。因为他的质量大约为100kg，他只

需要产生 800W 功率就可以取胜了。但这是很困难的，但也并非完全不可能。如果他在 10s 内能拉动雪橇移动 4.6m ，他将须以 1739N 的力来拉。这么大的力非一般人力可为，但理论上还是有一定可能性的。

你知道吗？其实你可以直接测量他拉雪橇的力。你需要做的就是把手一把弹簧秤放在他和雪橇之间，再加上秒表，你就可以迅速方便地计算出你想要的数值了。当然，你的技术还没有办法跟节目一样制作出一个令人印象深刻的动画骨架图形，但你却可以做一些内容精彩、真正的科学节目。

8.9m 的跳远世界纪录受重力和空气影响有多大？

鲍勃·比蒙^①于 1968 年创下了 8.9m 的世界跳远纪录。但是即使到现在，还有一些人认为，他之所以会打破该项目的世界纪录是因为比赛地点的缘故，他是在墨西哥城比赛的，那是一个海拔高于 8 000 英尺的城市。他们提出这个说法的依据是，在墨西哥城里空气更稀薄，空气阻力更小。此外，墨西哥城离地心距离更远，所以人受到的重力也较小。这些因素真的能起到这些作用吗？如果真有的话，这些因素有那么重要吗？

首先，让我们来看看引力。在地球的表面上，地心引力通常是物体的质量乘以重力场 (g)，其中 g 是约 9.8N/kg。因此，1kg 的物体受到地心引力的大小为 9.8N（竖直向下）。

但是，如果你离开地球表面太远这种模式是不能运用的。引力是两个有质量的物体间的相互作用，而这种力的大小随着两个物体之间距离的增大而减小，这通常被称为引力的普遍规律，所有宇宙空间里的物体无一例外地遵循这个规律。根据引力模型，引力的大小正比于两个物体的质量乘积，反比于物体之间距离的平方。

如果计算地球表面的万有引力，你就会把地球的质量作为两个物体中

^① 鲍勃·比蒙 (Bob Beamon)，1946 年 8 月 25 日出生于美国纽约。他经过刻苦的训练，身体素质达到了世界超一流水平，100 米的成绩是 10.3s，跳高 2.05m，三级跳远达到 15.76m。

一个的质量,把地球的半径作为物体之间的距离。按上述定义,最终数学的计算结果会是每千克物体受到的引力的值为 9.8N ,这一计算结果和我们的认知很相符,假如换用另外一个办法来计算万有引力,得到的数值也会是 9.8N 。但如果用这两种方法分别计算,得出的结果并不一致,你会不会觉得不可思议?

如果位置不在地球表面呢?如果你正在海拔为 $2\,240\text{m}$ 的墨西哥城呢?在这样高的海拔的条件下,物体的重力应为其在海平面的 99.93% 。造成的区别不算很大,对,不算大,但难道足以影响到一项世界纪录的产生吗?

假如重力是所有要素中唯一一个起到决定性作用的,那么比较上述的海平面与海拔高度的重力是很有意义的。就表观重力而言^①,也有其他两个因素要纳入考虑。首先,地球不是密度均匀的标准球体。如果你附近有一座山,即使你位于海平面,但山体的质量也会影响到你所在位置的引力场。

第二个考虑因素是地球的自转。位置越接近赤道,由于地球自转,该位置点的转速也越快。墨西哥城距赤道约 19.5° ,所以它的转动速度是相当快的。当然,如果你在一个圆周上进行运动,你就不是在惯性参照系^②内了。为了把圆周运动也看作是一个惯性参考系(就像我们在地球表面一样),你就必须增加一个“假想”的力——离心力,其方向指向旋转轴的中心。离心力和实际重力一起纳入考虑,才是所谓的表观重力。

如果墨西哥城处在海平面位置,这个旋转运动将导致表观重力达到地球在未自转时 99.69% 的值。加上重力和自转效应,在墨西哥城的海拔位

① 重力是一个表观的概念,实际重力还受到其他因素的影响。

② 牛顿运动定律在其中是有效的参考系,简称惯性系。

置的重力达到海平面在地球不自转条件下的 99.62%，所以实际效果上并没有太大的区别。

好了，所以引力差异和自转效应似乎作用并不很大。那么其他因素呢？那么空气的密度呢？当你从地球表面逐渐远离，大气圈的密度逐渐降低。随着空气密度的降低，跳跃运动受到的空气阻力就会减小。

最常用的空气阻力模型认为一个运动的物体受到的空气阻力与物体的速度的平方成正比，与空气的密度成正比。如果你将空气的密度减小两倍，速度保持不变，空气阻力为原来的一半。

事实证明，空气的密度不是可以直接为之建模的物理概念，它就像“天气”一样复杂而捉摸不定，难以准确测量。但是，我们有一个简单的模型可以粗略地加以测定^①。

使用该参考模型，我发现在海平面空气的密度是 1.22kg/m^3 ，与之相比，在 2 240m 海拔处，空气密度只有 0.98kg/m^3 。难道这个空气密度上的下降和引力一样对跳远有影响吗？

空气中物体受到空气阻力的运动不是一个简单的问题。是什么让它如此复杂？没有空气阻力，该物体的加速度将是恒定的。如果你思考一下简单的抛体运动就可以明白这点，在空中，只有一个力作用在物体之上：引力。这意味着垂直方向的运动具有恒定的加速度，而水平方向的运动有一个恒定的速度。为了解决这种类型的问题，所需要的数学知识不算困难。事实上，这个问题在几乎所有的高中层次的物理课中都是一个标准化的问题。

有了空气阻力就不一样了，空气阻力的大小则取决于物体的速度。当然，

^① 关于空气密度与空气阻力之间的关系，参见 http://en.wikipedia.org/wiki/Density_of_air#Altitude.

速度又取决于加速度，所以这里存在一个相互依存的循环圈。速度越大，空气阻力越大，加速度越大，速度的变化也更加大。这是一个十分棘手的问题。

有一个解决方案。方法就是创建运动的数学计算式。这个问题的解析解^①（就像在没有空气阻力的情况下一样）是运用一些代数运算，或微积分。该解析解是什么，你通常会在介绍性的物理教科书内查看到。对于数值计算，需要把整个运动过程按时间分割成一系列微小的步骤块。对于每个分步骤，你可以假定力和加速度是恒定的。这就使得典型的、恒定加速度的解决方案奏效。

分割的步骤越小，问题的解决则越有效。当然，如果你把整个跳远过程分割到长度为一纳秒，那么一秒钟的跳跃你将不得不为此计算 10 亿多次。如果分割为 0.01s，你也将需要 100 次运算，即使这样也大大超过一个普通人的运算能力，极不合理。最好的办法是使用计算机，因为计算机只会埋头运算，很少能听到它们抱怨什么。

为了观察重力和空气密度的变化在多大程度上会影响一个跳远运动员，我们需要从一个基本模型入手。如果我们仔细观察一下比蒙那创纪录的一跳，我们可以得到关于初始速度的一些信息（假设没有空气阻力的）。从视频（通过计算帧数），我们知道比蒙在空中的时间为 0.93s，水平方向的运动距离是 8.39m，从而水平速度为 10.1m/s。

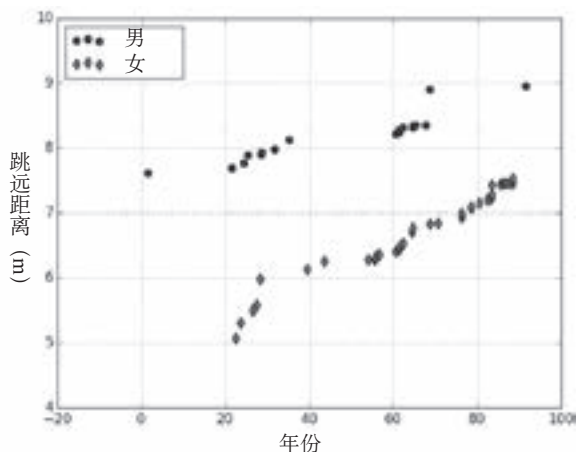
我可以使用类似的方法来分析垂直运动，以确定所述初始垂直速度。比蒙的垂直速度大约是 4.5m/s。现在我便可以使用这些水平和垂直速度，加上空气阻力和重力变化的影响。如果你把这 3 种情况的轨迹图画出

① 解析解 (analytical solution) 就是一些严格的公式，给出任意的自变量就可以求出其因变量，也就是问题的解，他人可以利用这些公式计算各自的问题。所谓的解析解是一种包含分式、三角函数、指数、对数甚至无限级数等基本函数的解的形式。用来求得解析解的方法称为解析法。

来——没有空气阻力的海平面，有空气阻力的海平面，有空气阻力、重力稍降低的墨西哥城，你会注意到一些新的情况。三种情况之间的区别并没有多大，但有一个区别还是值得注意的：有空气阻力的海平面的跳远距离达到了 8.89m，而有空气阻力、重力稍降低的墨西哥城的跳远距离达到了 8.96m，后者较前者之间虽然只有 7cm 之差，但这一点距离就成就了世界纪录。就比蒙而言，无论他是在海平面还是在海拔达到 5 000 英尺的地方跳，都是一样的。他以 8.9m 打破了自己原有的纪录，取得了骄人的成绩。鲍勃·比蒙是一个实至名归的奥运冠军。

能用线性回归^①来解释跳远世界纪录吗？

我们还有另外一种方式，可以考察鲍勃·比蒙在 1968 年夏季奥运会创造的跳远纪录。假设我以每次纪录被打破的日期与当日成绩对应作图，会得到如下这张男性运动员与女性运动员的散点图。



让我一直很惊讶的是世界纪录的推进几乎是以一种线性回归的方式进行的。让我从女性运动员的数据开始解读。为了让解读更具有说服力，我先找到能反应这些数据的函数，这一过程即是线性回归。

① 线性回归，是利用数理统计中回归分析，来确定两种或两种以上变量间相互依赖的定量关系的一种统计分析方法，运用十分广泛。其表达式为 $y = wx + e$, e 为误差服从均值为 0 的正态分布。

如果我能够找到代入这些数据的线性公式，我得到的函数如下：

$$s_w(t) = (0.0314 \text{ m/year})t + 4.656 \text{ m}$$

这个线性模型和数据的吻合程度很高。如果你代入年份数据，这个模型很快就会为你预测该年份跳远的世界纪录（1967 年为 67，2012 年为 112）。公式里的 4.656m 呢？这个是由模型计算而得出的数据，反映的是 1900 年当时的运动员水平。显然，在那个年代还没有任何记录，因此我认为那时候人们的实际运动水平应该远不止于此。

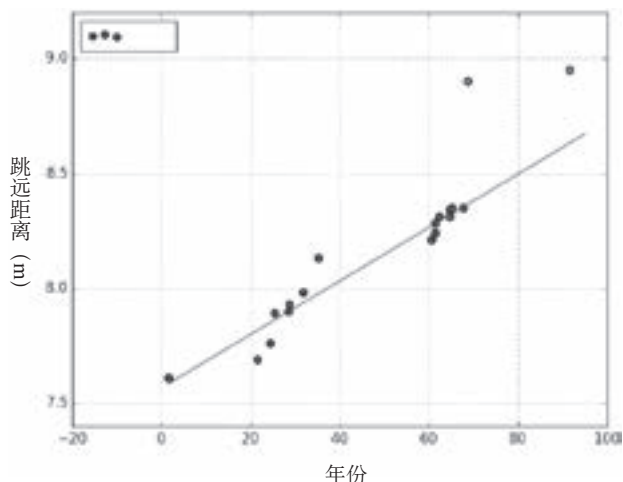
这里还有一个很有趣的现象：我用这个模型推导出 0.0m 这个成绩产生的年代，结果公式给出的是 1885 年。没错，这个结果让人贻笑大方，这也就从侧面说明这只不过是一个简单的、并非万能的模型而已。

还有一个现象也值得注意：我同时也计算了一下反映这个线性模型与这些数据吻合程度的相关性系数。这些数据的相关性系数^①为 0.98。我们知道相关性系数为 1.0 的时候，数据与模型的吻合程度是最佳的。0.98 说明了数据和线性模型之间的相关性非常高。

现在转而解读一下男性运动员的纪录。假设我找到一个可以覆盖掉除最后两个数据以外所有数据的函数，我注意到鲍勃·比蒙在 1968 年创造的纪录在图中仅次于最后一个纪录——1991 年由迈克·鲍威尔创造的跳远纪录^②。如果我把这两个数据予以忽略，我就可以暂时忽略掉鲍勃·比蒙那次超常规的比赛成绩。

① 相关表和相关图可反映两个变量之间的相互关系及其相关方向，但无法确切地表明两个变量之间相关的程度。于是，著名统计学家卡尔·皮尔逊设计了统计指标——相关系数 (Correlation coefficient)。相关系数是用以反映变量之间相关关系密切程度的统计指标。

② 迈克·鲍威尔 (Mike Powell) 是美国优秀的男子跳远运动员，1991 年他以 8.95 米的成绩打破了鲍勃·比蒙保持了近 23 年的男子跳远世界纪录。



假如忽略掉最后两个数据，你可以发现这条线性函数与前面的数据吻合程度很高。有了这个函数，我可以算出它的斜率为每年 0.0116m ，截距^①为 7.57m 。

显然，如果把两人的纪录“舍弃”在函数之外，所有的数据都可以被这个函数纳入进来，并且可以做出这样的预测：跳远成绩要达到 8.95m 将要到 2018 年才能被人类取得。

虽然这些模型在大多数情况下都能够起到作用，但如果有时一种运动上的新技术一旦出现就可以完全改变模型。举个例子——著名的背越式跳高，跳高运动员的跳法是以垂直的方式跳过一根水平的杆子。在 1965 年以前，人类一直是使用普通的方法跳高，且效果不错。然而在 1965 年，迪克·福斯贝里^②率先使用了背越式跳高技术，在动作上不再以面朝杆脚先

① 直线的截距分为横截距和纵截距，横截距是直线与 X 轴交点的横坐标，纵截距是直线与 Y 轴交点的纵坐标。

② 1968 年在第 19 届奥运会上，美国运动员福斯贝里采用了与众不同的弧线助跑，背向横杆的背越式技术，以 2.24m 成绩一举夺得男子跳高桂冠。他的技术使人耳目一新，从此，背越式跳高技术很快在全球风行起来。

着地的方式过杆，而是扭转身体让背部朝杆头先着地的方式过杆。他的这种新技术使他迅速打破了原先的世界纪录，同时也使得以前已经确立好的世界纪录产生趋势瞬间得以改变。

我不清楚比蒙和鲍威尔打破纪录是否使用了不同的跳高技术，但是他们各自都属于不同的阵营。让我们等到 2018 年再来看看原来的模型是否还是具有预测的效果，因为根据模型，2018 年该是有人出来打破鲍威尔纪录的年份。

最后，我们来观察一下男性纪录的斜率（0.0116 米 / 年），女性的斜率（0.0314 米 / 年）。两者之间差距巨大。女性运动员成绩新纪录产生的速度要远远快于男性运动员。如果两个模型仍然可以起到一定的预测效果，那还要多长时间女性的跳远能力才能和男性平起平坐呢？

我所要做的就是让男性与女性跳远的距离相等，然后求解出具体年份就可以了。这个问题很简单，是二元一次的方程组问题，所以我就不劳你费力计算了，我直接告诉你答案就可以了。

如果我把 147 年这个时间数值代入两个公式，两个公式最终显示的成绩都是 9.27m。由于我设定当 $t=0$ 代表 1900 年，所以这个纪录应产生于 2047 年。

当然，我自己也很怀疑到底这些模型能不能预测那么多年以后的未来。根据电影《终结者》^①我们已经知道 2029 年整个地球都会受机器人统治，也许到了那个时候我们会决定让机器人来代替我们参加奥林匹克，那数据就得完全改写了。

①1984 年由詹姆斯·卡梅隆导演，阿诺·施瓦辛格主演的科幻电影。

十项全能如何统一计分标准？

在十项全能比赛里，运动员要参加 10 个赛事的争夺（所以有“十项”之说）。然而，会存在一个问题——多人同场竞技，每个人要参加 10 个之多的项目，他们之间如何一较高下？还有更成问题的问题：10 项比赛中有 4 项是以秒计算的，其他 6 项则用米来计成绩。再有，即便是以距离为比拼的项目中也还有问题，因为要把跳远的距离拿来和标枪投掷的距离相比也是一件棘手的事情。

所以要怎么样才能把这些成绩拿来相比？有一个办法就是提出一种公式，可以代入各种比赛的成绩，经过公式处理之后给出一个数值。为了公平起见，十个项目需要保证相互之间的权重相同。这个目标说起来容易，实行起来很难。然而，确实存在一个可以为每项比赛计算得分的公式，这个公式是这样的：

$$\text{时间项目的比赛分值 } S_T = A(B-P)^C$$

$$\text{距离项目的比赛分值 } S_D = A(P-B)^C$$

其中， P 是比赛获得的成绩， A 、 B 、 C 分别是根据比赛不同而改变的常数。你可以观察到这里有两个不同的公式。对于时间项目比赛而言，时间越短分值越高，因为有某个常数减去这个时间，对于以距离长度取胜的比赛，情况恰好相反。

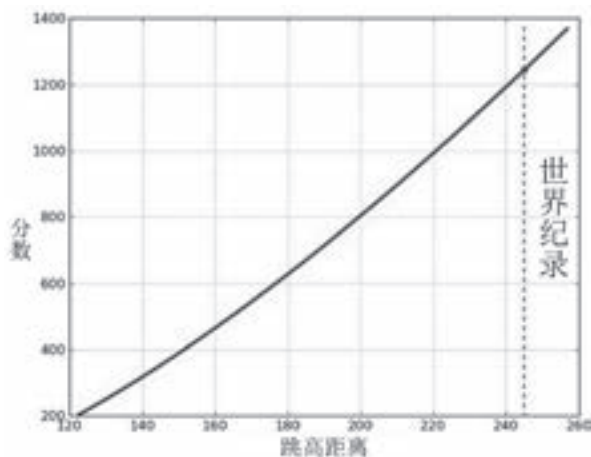
单位呢？没错，你第一眼看过过去这的确像是一个麻烦，但事实却是你担心过度了。首先，让 B 和 P 的单位统一为秒或者米没有多大的意义，即便你这样做可以给 B 和 P 做减法（单位不统一无法进行减法）。如果你真的让 B 也有了单位，最终又要是一个无单位的数值，那常数 A 的单位就需要变得像 $\text{m}^{-1.81}$ 那么离谱（因为 C 可能是 1.81）才能消掉单位。因此，我的建议是换一种方式， A 设置成一个 p/k 形式，并令其中 k 变成 1m 。这样一来，你马上就可以消掉这个单位了。

有一个关于十项全能得分的视频，非常有趣，它向我们展示了一个现象：对于任何一项很差的成绩，最终得出的分是你想都想不到的，比方说为一个负数开立方根。事实上，你得到的是一个很复杂的结果（其中一半是真的，一半是虚的）。

很可惜，我很确定地说官方条例已经考虑到了这点，并且规定好了凭这种出奇的方式是无法取胜的。如果真的有谁能靠这个方式来赢得比赛，那倒真是一件奇事了。

到底哪个项目最为紧要？就像我刚才说的，我们的目标是让所有的比赛项目权重相当。但是，如果你以 0.01s 的微弱优势打破了世界纪录呢？这种情况下，你的分数怎么体现？还有，如果你以同样的 0.01s 时间打破的不是 100 米的纪录而是 400 米的纪录，得分又会有什么变化？对于你的总分而言是好是坏？

首先，还是让我们集中于一个项目来考察——跳高。不同的距离怎么得出不同的分数？世界跳高纪录是 245cm 。以下这幅图表示的是达到世界水平 $50\% \sim 105\%$ 区间内的分数情况。

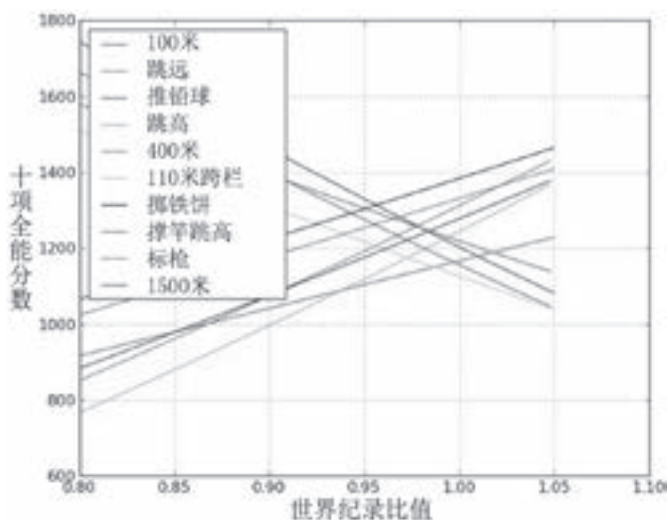


对于这项世界纪录，达到的运动员能取得 1244 分。这个分数很可观，因为整个十项全能的分数也只有 9000 分而已。跳高这个项目很能说明问题，因为它的相关系数 C 不如推铅球项目的相关系数那样接近一个数值。

所有运动项目得分分布如何比较？有一个办法是拿世界纪录比上比赛的成绩，得到一个比值。这样，100 米的世界纪录 9.58s 最终就是一个无单位的表现值：1.0。假如你以 9.57s 打破世界纪录，你的表现值是 1.001。如果你对其他项目也以同样的方式处理，所有的比赛成绩就可以相互比较了。

下面这张图展现的就是十项全能比赛的每一项成绩与得分之间的关系。请注意对于以时间项目比赛来说，花的时间越少，分数值越高，这也就是表示这种运动的线的斜率是负值的原因。

你从这幅图里能看出什么来吗？如果你能打破一项世界纪录，你最佳的方式是把这项纪录放在掷铁饼这个项目上，因为这个世界纪录一旦获取将会给予你 1 382 分，比较一下 110 米跨栏，你会发现打破世界纪录给你的比分只有 1 123 分。



那成绩进步呢？你可以在距离和时间方面都取得了进步，选哪一种运动更划算？本质上，这是一个分析表现变化会导致分数相应变化程度的一个过程，这就意味着我要算每一个值的导数^①。将导数代入两个公式（关于 P ），会得到：

$$\frac{dS_T}{dP} = -AC(B-P)^{(C-1)}$$

$$\frac{dS_D}{dP} = AC(P-B)^{(C-1)}$$

当然，你可以代入 A 、 B 、 C 的值来决定分数的变化率。这个变化率不是一个常量，而是一个取决于运动员表现的值。所以每次计算你得代入不同的值，比如你的时间成绩和世界纪录的时间成绩。然而，有一个更为简便的近似方法。以上项目的图里，在世界纪录附近斜率最高的是哪项运动？对于时间项目运动而言，是 100 米短跑，对于距离项目来说是跳远。但请

① 导数是函数的局部性质，一个函数在某一点的导数描述了这个函数在这一点附近的变化率。

你记住，这张图体现的是基于世界纪录的比赛成绩变化引起的得分变化。在 100 米短跑中取得 5% 的进步和 1500 米长跑中取得 5% 进步难易程度相同吗？也许不同吧。这也是为什么对于任何一个项目要想夺得高分没那么容易的原因。

为什么游得越快越难？

要拿第一名不易，要创纪录则难上加难。让我们来分析一下一项特殊的运动——50m 自由泳。

这个项目里，游泳运动员一般完成的距离是一个泳道那么长。比赛开始时他们一头猛扎入水中，过程中没有回头，除非运动员使用的是 25m 长的泳道。50m 泳道与 25m 泳道对运动员的成绩是有影响的，就男子比赛而论，50m 泳道的世界纪录是 20.91s，而 25m 泳道却是 20.30s。显而易见，25m 泳道的速度更快，因为运动员在掉头的时候利用泳池壁获得了一记强有力的反推力，这个现象非常有趣。

使用 2009 年塞萨尔·西埃洛^①在巴西创造的男子纪录，我可以轻易地算出他在比赛过程中的平均速度——他以 20.91s 的速度完成了 50m，平均速度达到 2.39m/s。

你可能选择不一样的单位来表达这个速度。如果是这样，这个速度也可以转换为 5.3mph。当然，这也包括了在比赛一开始时运动员跳离运动台时的那个较高的速度。所以，50 米自由泳奥林匹克运动员在水中的速度可能为 2.2 m/s。

^① 塞萨尔·西埃洛于 2009 年 7 月 31 日，夺得世锦赛男子 50m 自由泳决赛金牌。

话说回来，每个人都希望游得更快，但有什么办法可以做到呢？我们来想象一下一个运动员以匀速游泳的情景。在这个模型里，游泳运动员以恒定的速度运动，他身上的合外力必须为零（技术上讲，矢量为 0）。在垂直方向上的力在本讨论中不重要，但是我还是要提醒一下这个“向上”的托举力是浮力和运动员运动导致的“升力”的合力。

其他的力包括运动员在水里运动与水碰撞发生的阻力。这是运动员不能全程加速的原因。阻力和速度有关，方向和运动方向相反。并且，运动员使用他们的手臂和腿部的力量在水中推进身体也造成一个推动力。

推力是运动员奋力运动或者使用能量在水中穿梭的结果，这是问题的关键。整个过程都可以用功率的概念来理解。其中一个计算功率的办法就是拿所做的功去除以时间。在此例中，功就是运动中施加的力（推力）乘以做功的距离。没错，功的概念实际比这个还要复杂一些，但这个定义在这里已经足够了（我刚才是想说这个定义能奏效，懂了吗？）。

如果你根据功的定义把功写成 S 与 F 的乘积，并代入到功率的表达式中，最终你会得出功率其实也等于速度 V 乘以力 F ，也就是说在游泳比赛过程中功率和实际完成的距离没有关系。

现在回到推力上。推力和阻力的大小是一致的。但根据阻力如何为推力建模？阻力在某种程度上和运动员的速率有关。要如何来为这个和速率有关的阻力建模呢？最好的办法是开展一个实验从而来确立测量的方法。对于这种情况，我假设阻力和速度是成线性相关的。

如果推力取决于速度，功率是速度与力的乘积，那功率应该正比于速度的平方。因此，如果你想游泳的速度加倍，功率加倍是不够的，功率要达到原来的 4 倍才行。正如我所言，游泳游得快可真不简单。

现在我们来看一些数据。首先，在短程依靠爆发力的运动员的功率能

达到多少？这个问题很难回答，因为答案取决于人运动的方式。并且，功率可不是一个轻轻松松就可以随便测出来的数据。这篇《实验室测量人在极限强度训练中的功率》^①文章中，作者认为人在短时间内能爆发出的最大功率为 1 200W。如果我用这个数据，再加上西埃洛创造的世界纪录速度，我就能够得出阻力系数的值了 (b)。阻力系数是计算功率时用在速率平方前的物理量，它是由运动员的形体、体型大小以及游泳服共同决定的。经过计算，我得出阻力系数约为 248kg/s。

现在，假设你想要以 2.21m/s 的速度打破西埃洛的 2.2m/s 的纪录。你的功率要达到多少才行？使用这个阻力系数，你的功率需要从原来的 1200W 增大到 1210W。如果你只是看速度增加不过 0.5%，但功率却增大了 0.8%。你的教练也许会安慰你说这点进步你肯定能行，但当你真正在水中试图突破人体极限的时候，这个难度可真不是和你开玩笑的。这就是为什么要打破纪录，特别是在游泳项目中会这么困难的原因。

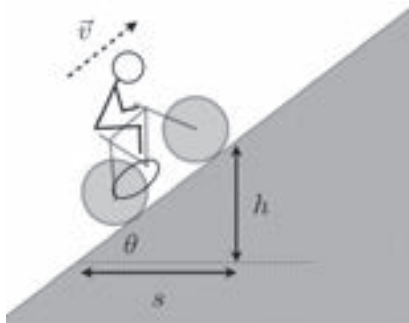
^①<http://iopscience.iop.org/0031-9120/28/6/007;jsessionid=50E7DB2CEEC-8594B07A311CE28D51D17.c2>，这是来自英国皇家物理协会的期刊平台的文章。

对于公路自行车赛而言，最陡的斜坡是多少度？

为什么自行车赛运动员会从自行车上下来推行？最近的双海赛^①中，全程有 3 个赛段的坡度超过 27%，这让很多运动员不得不从他们的自行车上下来推行上坡。没错，27% 的坡对于一辆自行车而言已经是很陡的坡了。这就引出一个问题：你可以骑车上多陡坡度的斜坡？

我认为有两个原因使得斜坡过于陡峭。有很多种情况可以探究分析，但我假定斜坡之所以陡峭难上，首先因为这是一个长坡。你不可能积聚了很高的速度但在斜坡上维持这种疾行状态。如果你真可以做到的话，就可以直接骑车上墙了（当然很短一段时间内是可以的）。

首先我来观察一下人力所能到达的坡度极限。以下图片将有助于你进行分析：



^① 意大利语 Tirreno-Adriatico，一个在意大利颇受欢迎的自行车比赛。

在我们开始前，先来简单认识一下坡度这个概念。30% 的坡度是什么意思？假如你沿坡上行，上行的竖直方向和水平方向长度比值再乘以 100 得出的值就是坡度。我们通常是以角度来表示坡度，但坡级本质上也是做了一件相同的事。我不确定国际上有没有通行表示坡度的字母，我就以 r 来表示，值等于高程差与其水平距离的百分比，其计算公式如下：坡度 = (高程差 / 水平距离) \times 100%。

我们假设运动员以某个速度 v 前行。这个速度并不高，所以空气阻力不构成一个重要的考虑因素。要消耗多少能量才能以一个恒定的速度上坡？在此例中，我可以这样考虑：要消耗的能量等于自行车与运动员两者重力势能的变化量。整个过程中的能量变化涉及三个方面：自行车和运动员的质量、竖直方向的距离与我们称之为重力场的 g 。

当然，我关心的重点不是能量上的变化，我关心的是功率。功率的定义是能量的变化率（能量的变化与时间变化的比值）。你知道还有什么物理量取决于时间？没错，速度也取决于时间。因此，如果你把这两个量放在一个表达式内，功率就等于竖直方向上的速率与自行车的重力的乘积。你上行得越快，所需功率就越高，且路面越陡峭则速度对整体功率值的贡献越大。

如果只是移动自行车呢？功率是多少？当然，还有其他因素使得人要对自行车施力。车内部齿轮、踏板之间有摩擦力。不仅如此，运行中的轮胎也受到摩擦力和空气阻力的作用。但本次计算我要算出的最陡的坡度，运行的速度应保持缓慢，空气阻力可以忽略不计，其他因素产生的效应与爬坡所需的功率相比也很微小，故不用做考虑。

现在，我需要做一些估算来求解这个最陡坡度。假设运动员和赛车的质量和为 75kg，运行的平均速度为 2m/s。假如坡度为 30° ，功率要达到

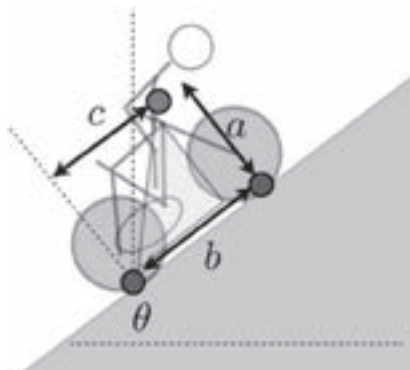
422W。这个功率可不是开玩笑说的，我很肯定我也能产生 422W 的功率，但只能维持很短一段时间。

我的兄弟非常喜欢自行车。他告诉我他能以 280W 的功率维持很长一段距离的骑行。你看我们能不能把这个平均功率增加到 300W（你知道，专业自行车运动员肯定更厉害）？有了这个平均功率，只剩下两个关键因素了：速度与坡度。如果自行车运动员的速度只为 1m/s，那么最陡的坡度就是 45%。如果增加到 4m/s，最陡坡度就下降到 10%。

如果我要来设计一条自行车赛道，我不会让任何部分的坡度超过 20%。如果超过 20%，运动员倒不如下车推行来得更好。但请记住，这是一个自行车比赛不是竞走比赛。为什么在陡坡上行走反倒更容易？当你行走的时候，你的行进是不由速度决定的。你可以缓慢前行（功率因此也下降）不至于从车上掉下来。

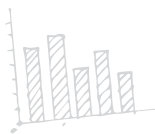
现在，再来考虑另外一个问题：质心。对于一辆上坡的自行车，质心必然位于两个支持力的水平方向之间。在这种情况下，支持力就是两个轮胎与地面之间的接触部位产生的力。

这里有一张图表示的是自行车上山时的情况——当然，假如你爬坡，你的身体就会有点前倾。



有 3 个位置很重要。第一个是上面的点，代表车与人的质心。另外下面的两点代表轮胎与地面的接触点。最重要的一点是质心在后轮胎接触点之前。

斜坡要多陡才能使得质心刚好不超过后轮胎？让我做一番假设。我假设质心的高度是 0.8m，质心离后轮胎接触点的距离是 0.75m。这就意味着如果坡度为 43° ，质心就会直接移过后轮胎。稍微再陡一点，车手就会向后翻倒。如果你把这个坡度用百分比坡度表示，数值是 93.7%。当然，我已经计算出来了，人力是无论如何无法骑行在这样一个陡坡之上的。



GEEK

PHYSICS

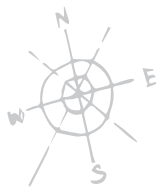


第七章

真实的空间



$$x_2^2 + 1x_3y_2$$



宇宙飞船和潜水艇之间的区别在哪里？

在《星际迷航》^①第二部里，有一个镜头是联邦宇宙飞船^②潜入水底。那么宇宙飞船能下水吗？也许你会认为可以。宇宙飞船到底是派什么用场的？这是一条用于人类在一个他们无法生存的环境里开展旅行的飞船。一艘潜水艇的功用也相似，对吧？

人类是如何活下来的？好吧，人类需要一些基本物质。我们需要食物、水和因特网。还有呢？空气。从技术上来讲，我们需要氧气。然而，氧气的压力在一个范围内对人类反而是有害的。一般而言，如果氧气的分压达到 1.4 个大气压^③，会产生一定的危害。相反，如果分压低于 0.16 个大气压，人类就会开始产生晕厥的现象。

氧气的分压是个什么概念。让我们拿空气中的氧气为例来考察一下这个概念。我们先做好假设：空气是由 79% 的氮气和 21% 的氧气组成的（仅

①《星际迷航》（*Star Trek*，又译作《星际旅行》等）是由美国派拉蒙影视制作的科幻影视系列。由 5 部电视剧、1 部动画片、12 部电影组成。经过近 40 年的不断发展而逐步完善，成为全世界最著名的科幻影视系列之一。

② 星际联邦（United Federation of Planets）简称星联（UFP）或联邦（The Federation），又译行星同盟，是《星际迷航》科幻系列中虚构的一个星际间联邦制共和国。

③ 空气中氧气的分压，由分压定律 $P_{O_2} = P \times X$ ，其 P 为大气压， $P = 101\,325\text{Pa}$ ， X 为氧气在大气中的摩尔分数。

仅是近似值)。在一个大气压强下，氧气的分压是 0.21 个大气压。因此，分压指的就是当容器中只有该气体排除其他气体时的压强。氮气的部分压强在这种情况下是 0.79 个大气压。

现在，我给潜艇预先加压到 2 个大气压强值，这样氧气的分压就是 0.42Bar^①（我把压力单位转换成 bar，1bar 约等于一个大气压强）。但是问题是：你为什么要在潜艇里面增加气压？人类要活下来还有一个关键要素——人类需要潜艇仓壁不会被压塌而祸及他们。假如你在潜艇里面增加了压强，仓壁就不需要被制造得那么结实了。

假设潜艇是个正方体形，容积为 $1\text{m} \times 1\text{m} \times 1\text{m}$ 。对的，空间很狭小，但没有人跟你提过潜艇员在里面很舒服吧？现在，我就把这个空间局促的正方体放入到 10 米深的水中。在这个深度，水压对这艘了不起的潜艇仓壁造成的压强是 2bar。其中有 1bar 是由水面上的大气压制造的，10m 深的水正好等于附加上去的另外 1bar 压强。因此，这样总共 2bar 的压强在 1m^2 上的作用力大小是 200 000N。没错，对于一艘小小的潜艇这样的压力可不小了。假设潜艇里有空气对潜艇壁起到向外支撑的 1Bar 的压强作用，这就意味着有 200 000N 的力由外向内压向潜艇，有 100 000N 的力由内向外支撑住潜艇，两个力相减，合外力就剩下 100 000N。

现在，假设我的潜艇壁非常薄。如果我在潜艇里面加压，我还是可以潜入到 10m 深的水底的。如果潜艇内的压强和外面的压强一样大小，那么仓壁上的合外力就等于零。为什么不对所有潜艇都这样统一处理呢？好吧，这种主张会造成两个不利的结果。首先，当潜艇要潜入到 60m 那么深

① 巴（符号 bar）因为巴与大气压强相似，所以被广泛用于描述压强。它在欧洲联盟国家的律法上被承认。在中国，压强单位是帕斯卡（Pa），1 巴 = 10^5 帕斯卡。

呢？在这种情况下，潜艇内部的压强需要达到 7bar。空气里的氧分压这时为 1.4bar。据前文所述，这个氧分压已经到了产生危害的临界点了。如果还要继续下潜，氧分压的增大会让你冒更大的风险。

我曾经说过在潜艇里面加压还有一个问题，不是吗？你的身体不断吸收你呼吸进来的氮气，维持身体组织内的压强，使之和外界环境的压强一致，就是这个问题。然而，这个还不是问题的真正所在。问题的真正所在是当你降低压强的时候，身体组织内部的那个更大的压强将迫使氮气进入你的血液。这个过程发生的速度如果过快，结果会很糟糕。靠水肺呼吸的潜水员需要每时每刻注意这个问题，正是由于这个问题，对这类潜水员在水下作业时间是有所限定的，对他们回到水面的用时也有限定。当潜水艇改变内部压强，你就不得不考虑这个问题。并且只是要你知道，真的有潜艇是这样做的，潜艇制造起来不怎么耗费财力，但使用起来得非常谨慎，通常它们不会潜入得太深。

还有什么办法可以解决这个气压差的问题？还有一个办法，就是设法为你的宇宙飞船制造出更薄、更坚固的外壳。如果仓壁足够坚固，你大可以让内部环境保持为一个大气压。当然，更坚固的仓壁就需要更多的材料，同时会导致质量增大。如果你想将这艘潜艇当太空飞船来使用，这样做也许也存在问题。质量越大就需要为火箭提供更多的燃料才将飞船送入太空。当谈到火箭的时候，我们知道每千克的重量都需要斤斤计较。

如果潜水艇要摇身一变成为一艘宇宙飞船不太容易，那么倒过来呢？宇宙飞船能变成一艘性能优良的潜水艇吗？不，也做不到。正如我刚才说的，宇宙飞船的质量要比较小才能顺利进入轨道。并且，你试想一下飞船是怎么样让里面的人生存下来的。飞船内部需要保持一个大气压，而飞船外界是没有任何气体的，刚才设计的正方体在这种状态下从内部就会有

100 000N 向外的而不是向内的力。你必须将空气压力的方向转变纳入考虑，因此你的设计和一般的潜水艇肯定是不同的。

现在回到那艘潜入水底的联邦宇宙飞船上来。有什么不对头的吗？我要说的是“没有”。首先，从那段短片里可以看出这艘宇宙飞船下潜的深度并不太深，因此压力就不会有那么大。其次，这是一艘联邦宇宙飞船，上面配备了光子鱼雷^①和曲速引擎^②。我很肯定它的外壳也一定固若金汤。有谁知道这个外壳是什么做的吗？也许随着飞船下沉入水，飞船内部的气压也相应增大。我很理解有些人对这个做法有反对情绪，但我认为这是一个有效的办法。

① 光子鱼雷 (Photon Torpedo) 是科幻剧集《星际迷航》中虚构的一种武器，在多个种族的飞船、空间站上均有部署。

② 曲速引擎 (Warp drive)，也译为曲率引擎，是一种超光速 (faster-than-light, FTL) 推进系统，和跳跃引擎、超光速引擎、星际传送器等都是科幻作品中相似但理论不同的常见设备。

把额外的糖果送入太空，需要多少能量？

欧洲航天局^①有一种宇宙飞船是自动转移飞行器（简称 ATV）。ATV 的主要功用是为国际航空站提供包括食物、水、氧气、科学设备和散装糖在内的补给。是的，我把食物两次列在名单之上。虽然糖果也属于食品中的一种，但我把它单独列开，为的是方便我在太空条件下考察它。

想想看，假设有航天员要求 ATV 额外送一包散装糖。要把糖送入轨道意味着要消耗更多能量，但需要多少能量才够呢？

首先，让我来得出一些原始数据。其中有一些数据是我大胆假设的成果，但或许也是合乎情理的。假想国际空间站^②的轨道位于地球表面 420km 处，运行速度是 7 700m/s。要计算运送补给消耗的能量值，纬度和速度是两个非常重要的因素。

还有另外一个信息也是我们所需要的：ATV 发射台的位置。这个位置是在法属圭亚那的库鲁，纬度仅高于赤道 5°，这个地理位置的选取背后

① 欧洲航天局 (European Space Agency, ESA) 是一个欧洲数国政府间的空间探测和开发组织，总部设在法国首都巴黎。

② 国际空间站 (International Space Station)，简称 ISS，是一个由六个国际主要太空机构联合推进的国际合作计划。这六个太空机构分别是美国宇航、俄罗斯联邦航天局、欧洲航天局、日本宇宙航空研究开发机构、加拿大国家航天局和巴西航天局。

是有道理的，我们稍后再回到这个点上来。

哦，最后还有一个方面。一包散装糖的质量是多少？我可不想单独指名道姓地选定某个品牌的糖果，所以我索性就取一包普通巧克力糖的质量——50g，250cal（先说明一下，这里指的是食物卡路里，即大卡，和化学卡路里不一样）。

食物卡路里和化学卡路里有什么区别？两者都是用来衡量能量的，但是1食物卡路里等于1000真实卡路里。能量有两种表述方式：卡路里和焦耳，我不知道为什么一个物理量存在两种单位，但是我个人倾向于认为这和食物和吃食物的人有密切的关系。对于卡路里的标准定义为（有时被称为化学卡路里）1cal就是让1g水温度升高1℃的能量大小。这个定义对于化学而言是合适的，但是在物理里面，我们一般选择J作为能量单位。两个单位之间的转化是 $1\text{cal} = 4.187\text{J}$ 。

现在，我们再来学学相关的物理学知识。为什么运送东西到国际空间站会需要能量？好吧，为了让空间站的宇航员能吃上糖，你需要完成两项任务。首先，你需要将糖果运送到国际空间站的高度；其次，你需要增加糖果的速度，让它和国际空间站的速度同步你才能顺利地把食物对接上空间站。让我来分别分析一下这两项任务到底要怎么去完成。

假设你在地面上看到这50g重的糖，捡起来到1m的高度，再放上圆桌。整个过程需要你对糖果做功，改变它的能量状态。但到底需要多少能量？其中有一个办法就是通过计算重力势能差来计算。在地球表面，重力势能的变化可以通过下列公式来计算：

$$\Delta U_g = mg \Delta y$$

其中 g 是当地的引力常数，一般取 9.8N/kg 。把一包糖果提升1m需要0.49J的能量。这个量并不多。

假如我要把糖果的高度增加到国际空间站的高度呢？我能否用相同的计算方法直接把距离从 1m 改为 420km 就算大功告成了？不行。以上计算重力势能的前提是物体的重力是恒定的。这个前提对于近地表的物体是成立的，但是随着高度增加适用性越来越低（尽管国际空间站的高度还不致于让你的计算结果那么不精确）。

如果我们考虑到上述因素换用一个更好的模型，这个重力势能模型应该如下：

$$\Delta U_g = -G \frac{mM_E}{R_E + h_{ISS}} + G \frac{mM_E}{R_E}$$

公式里， G 是万有引力常数，两个质量分别为糖果的质量与地球的质量。分母是距离地心的距离。糖果的最终位置是国际空间站海拔高度（我称之为 h_{ISS} ），起始位置是距离地心距离为地球半径 R_E 的位置。

如果把 G 的数值、地球的半径和质量代入公式，计算结果为 $1.93 \times 10^5 \text{J}$ ，即需要这么多能量才能把糖果送上指定的位置。

尽管如此，这还不算是运送糖果所需要的全部能量。因为假如你花那么多能量只是把糖果运送到某个位置就不再理会了，最终它还是会从太空坠回地球。要完成整个任务，糖果还需要动能，即运动的能量。物体的动能是质量与速度的两次方相乘得数的 1/2。

国际空间站的速度是已知的，所以计算起来很简便吧？如果我把糖果的质量 0.05kg 和 7 700m/s 的速度代入，其结果就是 $1.48 \times 10^6 \text{J}$ 。事实上，这个答案还是不对的。为什么？考虑不够全面。因为我们的计算方式默认是将糖果从零速度状态下开始加速，而在开始加速前，糖果已经处于运动状态了，因为它是在自转的地球表面上的。

地球的自转周期是 24 小时（更精确地说也不是这个时间，24 小时只

是太阳回到原来位置的时间，但这个时间对于我们的运算在精度上已经足够了）。所以我们的计算方法就是拿发射地纬度的圆周长去除以 24 小时，从而得到糖果的速度。

为什么纬度也很重要？想象一下糖果在地球表面随着地球自转做圆周运动，运动的圆周半径是多少？在赤道，圆周半径和地球半径是一致的。然而，在北极圈的中心位置，糖果根本就不会做圆周运动了，只是在原地自转而已。圣诞老人酷爱甜食，希望圣诞老人不会选择去北极上空的位置吃糖果，那样给他老人家送上去就未免太强人所难了。

如果和地球赤道离得很近，运动的圆周半径基本上和地球半径相等，初始速度就达到 464m/s。这个速度和国际空间站的速度相比很小，但不能否定它还是有点微弱作用的。这就是欧洲航天局选择从库鲁而不是在欧洲其他的地方发射 ATV 的原因。

行了，糖果自身有动能，抵消之后还需要多少动能？从赤道发射你需要 $1.47 \times 10^6 \text{J}$ 的动能。

把糖果运送到国际空间站所需的能量总和，来自于两个我们已经计算出的结果：动能的变化量与重力势能的变化量，两者之和是 $1.66 \times 10^6 \text{J}$ 。要把一小包糖果送上天居然要消耗掉百万焦以上的能量值，并且我们的计算效率还是理想化的——即在运送过程中没有任何能量的损失，百分之百的能量都被用于把糖果送至轨道。大概我们不住在太空的原因就是这个，要送点东西实在是代价高昂。

要对百万级的能量有个感性认识很不容易。我不妨就拿糖来类比一下。这包糖被吃掉之后会产生 250 食物卡路里。1 食物卡路里等于 1 000cal，4 180J。

让我们回到问题上来。假如我们要耗费 $1.66 \times 10^6 \text{J}$ 的能量把糖送上轨

道，这么多能量是多少食物卡路里呢？显然，这个就只要把单位转换一下就可以算出来了。记住单位转化的秘诀在于做乘法运算的时候要保持一标准单位的量。举个例子，1 英尺 \approx 0.3048 米，所以 1.2 英尺要化成米就是把 1.2×0.3048 。这个分数的分母为一个标准单位，实际长度大小不变，只是单位转化了。

根据单位转化的结果，我计算出能量是 1.6 包糖。好吧，这个结果还在可接受的范围之内。原来真要把糖送上国际空间站，消耗的能量只不过 1 包多的糖的能量那么多而已，没有想到居然那么少。

最后还有一个问题：如果我只用糖作为能量把所有 ATV 上的货物统统都送上站行吗？ATV 满载货物时质量为 20 吨，即 20 000kg。如果货物全部是由糖构成的，那总量就会有 400 000 包糖了，可如果你要想着把那么多糖一次性送上站，那总共需要 640 000 包糖的能量那么多。

用自动转移飞行器来建造死星并提供补给，可行吗？

最近，美国政府否决了一项在线请愿计划^①。该项请愿要求美国政府建造一颗死星。是的，这项否决在很多方面让人大跌眼镜，但我们暂定有人真的想建造一颗死星，你可以使用 ATV 做到吗？好吧，你肯定能行，但怎么做才能成功呢？

如果你想估算一下需要多少架 ATV 才能完成对死星的建造与补给，你首先总得对死星有所了解吧？我可以对死星的情况做一些大胆的估测，但我这次就不这么做了。这次我会对已有两项有趣的估测加以评估。其中第一项来源于一个经济学博客的文章：一开始，作者就先假定死星是航空母舰。这一想法是对的，要我也会这样假定。有了这个假定作为标准，我就可以得到要建造的这颗死星的质量了，建造的材料总共有 10^{18}kg 重，直径为 140km。快速地了解一下（仅作为提醒）：目前存在两颗死星，根据星战百科（Wookieepedia）^②，第一颗的直径为 160km，第二颗直径还要大。我考虑按第一颗较小的死星的标准来建造（但我不会为排气预留出位置，

^①<http://www.popsci.com/science/article/2013-01/white-house-shoots-down-death-star-petition-and-its-awesome>, 本文来自美国《大众科学》杂志网站, 该杂志一直是全球销量第一的生活科技信息杂志。

^② 关于死星的介绍请看: http://starwars.wikia.com/wiki/Death_Star, 文章来自维客 (Wiki) 社群群组网站。

因为那样做就没有地方可以放质子鱼雷^①了，那样做是欠考虑的）。

行了，现在还有一个死星质量的问题。一个很有名的网站 io9^②认为死星不可能是由像钢材那样的东西建造的。现代战船由于作战时需要经受大风大浪的考验，还要抵挡鱼雷的袭击所以整体需要很坚固，只能用钢材来建。死星是在太空里的，没有水压不必担心会被水压压垮，所以没必要达到战舰那样坚不可摧。并且，死星也会受某种特殊力量场的保护，可以不受敌军的火力攻击。也许死星会使用钢材，但可能只限于外部的表面，内部只需要使用一些密度较低的诸如碳纤维类似的材料就足够了。

让我们为死星的质量做下列估算：如果它的外壳厚度为 10cm 的钢材，那么质量就是 $6 \times 10^{13} \text{kg}$ 。

内部呢？我们就这样讲吧：死星的内部构造的密度和国际空间站相仿，这样说的过去吧？国际空间站加压后的体积容量是 837m^3 ，质量为 $4.5 \times 10^5 \text{kg}$ ，平均密度为 550kg/m^3 。当然这个计算结果不正确，因为国际空间站的质量不止加压后的内部质量，但至少我们的数据给解决这个问题开了一个头。如果我继续将这个密度推广到死星的内部构造上来，得到的质量是 10^{18}kg 。这一结果和之前的估测多多少少是吻合的（外部钢材的质量与内部构造的质量相比可以忽略不计）。

ATV 呢？目前技术水平下的 ATV 的负载量是 7 200kg。要几架这样的 ATV 才能把所有需要的材料运送到轨道上呢（假设死星和国际空间站建造在同一轨道上）？

①《星球大战》里的一种杀伤力很大的超级武器。

②<http://io9.com/5979110/how-much-would-a-death-star-really-cost>，io9 是每日科幻信息网，一个以科幻为主题的综合信息站点，提供有关科学、小说、图片、娱乐、视频、漫画等多种信息，供人们在生活中寻找更多的乐趣。

$$N = \frac{m_{\text{Death Star}}}{m_{\text{ATV payload}}} = \frac{10^{18} \text{kg}}{7.2 \times 10^3 \text{kg}} = 1.39 \times 10^{14}$$

计算结果你看到了吗？原来要求这么高，没有人能找来这么多架 ATV。以每月发射一架（已经有点好高骛远了）来计，总共需要 10^{13} 年才能发射完成。比较一下，地球的年龄可能还不足 50 亿年，我们的太阳最多还能维持的年限也可能不足 50 亿年。 10^{13} 年来造一颗死星，实在是遥不可及的事情了。可能死星这里还没竣工，那边的太阳已经寿终正寝了。明白吗？这个玩笑开大了。

我们换一个角度来看问题。假设我们想在 10 年内将死星建造完毕。我们如果还是使用 ATV，我们还是需要那么多架，要做到平均发射升空，发射频率是多少？每年要发射 1.38×10^{13} 架。很难想象一年之内要进行那么多次发射会是什么状况。单位转换一下，即每秒钟要发射 4 架。显然，以目前 ATV 的基础建设水准是无法应付这样沉重的压力的。假如整个人类都共同参与到运送工作中来呢？一架 ATV 的工作周期或许是两星期，在这个两星期里将有 480 万架不同的 ATV 接续这项工作，这个数字实在是太庞大了。

ATV 最主要的工作是为国际空间站提供补给。如果死星已经在轨道上了，需要多少架 ATV 才能为它服务呢？下面要来一些大胆的估算了，请你先准备一下。首先，我得确定死星上有多少工作人员？我们可以假设它和尼米兹级航空母舰上的工作人员的密度一样吗？为什么要选尼米兹级航空母舰为参考呢？有什么理由不呢？根据这个网站上的信息^①，尼米兹级航空母舰的容量达到 200 万 m^3 ，工作人员数量超过 6 000 人，因此每立方米空间内的密度是 0.003 人。在这个密度下，死星上还要添置 6×10^{12} 人。

① 具体参见 <http://www.naval-technology.com/projects/nimitz>。

这个结果太出人意料了，因为整个地球上的人口也只不过 70 亿人而已。

对于工作人员数量这个问题，我们还是回归现实一点好了。死星上可能有很大一部分空间和航空母舰不一样，这部分空间是用不到的。我明白这种说法虽然有点像自欺欺人，但为了现实一点，我还是将人数设定为 100 万吧。

所以，给 100 万人口提供服务需要 ATV 完成多少任务量呢？国际空间站每隔 6 个月就为上面工作的 6 位航天员提供一次补给，也就是说人均一个月需要补给一次。如果拿这个任务强度给死星上的人员服务，一个月就需要 100 万次发射。

当然了，像月球那么大的空间站是可以生产一些资源供自己使用的。也许会有温室、面包房或者生产蜡烛的工人。也许他们只要在网上购物，ATV 就可以把货运到他们的家门口了。



GEEK

PHYSICS



第八章

疯狂的推算



$$x_2 + 1x_3y_2$$



冰激凌可以冷到一点食物热量都没有吗？

克里斯托弗·尼曼从物理学得到灵感并创作了一套有趣的漫画，这些漫画曾经刊登在《纽约时报》上。我们来详细解读其中的一幅。

这幅漫画的大意是，当冰激凌的温度足够低时，你的身体会做两件事。首先它会消化冰激凌从而得到热量。然后身体要把冰激凌加热到人体温度，就得消耗热量。如果得到的热量和消耗的热量相当，那么热量的净变化就为零。很简单吧？尼曼声称，要想达到这样的效果，冰激凌的温度必须低至约 $-2\ 000^{\circ}\text{C}$ ，不过这是不可能的。下面我来重新计算一下，看看结果如何。

首先，我们需要了解一下温度和热能。什么是温度？你也许会吃惊，不过要给温度下个定义的确没你想的那么容易。温度常常被描述为对某一物体中所有粒子的平均动能的度量。这种描述也没问题，但不是我最喜欢的。我更喜欢把温度看作两个物体在接触了相当长的一段时间后所共同拥有的物理数值。没错，如果把一小块木头和一大块金属放在一起，它们最终会达到同样的温度。

热能又是什么呢？热能是对物体由于温度而拥有能量大小的精确度量。想象一下，有一小块温度为 26°C 的木头，和一块大得多的温度为 12°C 的金属。尽管木头的温度更高，但是可能金属拥有的热能更多。一个

物体拥有的热能取决于它的温度、质量和材料。能量的多少取决于材料的种类，这种关系叫作比热容。

这种关于热能变化的模型有两个问题。首先，假定比热容在温度大幅变化的时候保持恒定是不合理的。另外，模型并不包括物体进行相变时所需的能量，比如从固态变为液态。我当然可以引入相变储能的概念，不过我想继续假定比热容是恒定的。所以，假设你消耗了质量为 m 的冰激凌，并从食物中吸收了 E_F 的能量（ F 代表食物）。要使能量的净变化为零，那么这里的能量要做两件事：加热以及融化冰激凌。

现在我要做的就是求出一个温度的值，使得这一能量等于身体消化冰激凌后得到的能量。就是这样。我只需要估算几个数值。首先，假设冰激凌像水一样，只是多了味道和热量。这意味着比热容可能是一卡路里每克，而潜在的熔化热可能约为八卡路里每克。顺便说一句，我不喜欢用卡路里作为能量的单位。对我来说，这就像是用斯勒格作为质量的单位一样。然而在这个场合下，卡路里就是食物热量的常用单位。可是，一个食物卡路里（大卡，Kcal）等于 1 000 卡路里。不知道这是哪位天才想出来的主意。

现在我们来考虑冰激凌的问题。吃冰激凌能获得多少食物热量？根据某个在线热量计算器列举的数据表明，72g 的香草冰激凌包含 145Kcal 的热量，即 1.45×10^5 cal（约合 6.07×10^5 J）。利用这个数据，加上一个最终温度 37°C ，可以得到一个初始温度 $-1\,900^\circ\text{C}$ 。这么低的温度当然是不可能达到的，因为 -273°C 是所能达到的最低温度。

接下来要考虑两件事情：首先，这个数值和尼曼所给出的数值有什么关系？其次，怎么才能让这个计算成立。

尼曼给出的冰激凌初始温度大约是 $-2\,000^\circ\text{C}$ 。他也许没有考虑到相变，

所以如果我剔除相变的因素，得到的数值就差不多是 $-2\,000^{\circ}\text{C}$ 。

那怎样让这个计算成立呢？已知人体给冰激凌加温要消耗的能量大小，我只需要使其等于从食物中获取的能量就可以了。将初始温度设为 -273°C ，那么冰激凌可以获得 $2.8 \times 10^4 \text{cal}$ ，即 28Kcal 的热量。看一下 thecaloriecounter.com 上列出的其他种类的冰激凌，即使是最清淡的、无糖的冰激凌，包含的热量也不止 28Kcal。看来想让科学帮我们达成这一伟大的愿望，只有再等等了。

多少张纸币叠在一起能从地球叠到月球上去？

我偶尔会瞥一眼电视上的政论节目。有一次，我看的一档节目讨论的是国债和对不同项目的资助问题。一位参与者提出这样一个说法：如果把 1 兆美元的纸币（我猜是面值一美元的）叠起来，可以在地球和月球之间打 4 个来回。

我并非不相信电视上的人所说的话，只是我想验证一下，而且这个数值看起来也是能估算出来的。

一张 1 美元的纸币有多厚？我的钱包里不经常装现金，不过当我装的时候，我就测量一下。一共有 5 张纸币。我测量了一张纸币的厚度，然后测量了 2 张的厚度，依此类推。以纸币的张数为自变量，以纸币叠在一起的厚度为因变量，可以画出一条直线，这条直线的斜率为 $0.1\text{mm} / \text{张}$ 。这就对一张 1 美元纸币的厚度做了一个不错的估算。

那么 1 兆的 1 美元纸币叠在一起有多厚呢？首先，1 兆是多少？很不幸，大家观点并不统一。在美国，1 兆等于 1 000 个 10 亿，也就是 10^{12} 。而在某些国家，1 兆等于 10 亿个 10 亿，也就是 10^{18} 。很容易混淆，我知道。我在这里计算的时候，取 1 兆等于 10^{12} ，因为这档节目是在美国播出的嘛。

那么 10^{12} 张一美元纸币叠在一起有多高？首先我们假设纸币的厚度不会被压缩。为什么要这样假设呢？我不知道，可是总要从某个地方入手吧。

这叠纸币的高度就等于 1 张纸币的厚度乘以 10^{12} ，也就是 10^8m 。

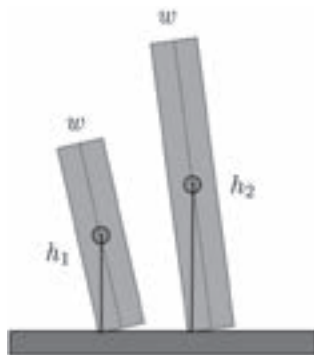
地球到月球的距离大约是 $4 \times 10^8\text{m}$ 。好的，那么问题就来了。根据我的计算， 10^{12} 张 1 美元纸币叠在一起的高度是地月距离的 $1/4$ 。而节目里说这些纸币叠在一起能在地球和月球之间走 4 个来回，也就是 $3.2 \times 10^9\text{m}$ 。

现在我来算算另一个问题。如果 10^{12} 张 1 美元纸币叠在一起，真的能在地球和月球之间走 4 个来回，那 1 张纸币得有多厚？我只要把地月距离乘以 4 倍，再除以 10^{12} 张，得到每张纸币的厚度为 3.2mm 。

1 张纸币有 3mm 厚，那也太不方便了吧。所以我认为他们关于 10^{12} 张纸币的说法是不对的。再聪明的人也会犯错。

好，既然他们错了，那么针对 10^{12} 张叠在一起的纸币，我们还能做些什么呢？我在想究竟能不能把某件物品叠得那么高。

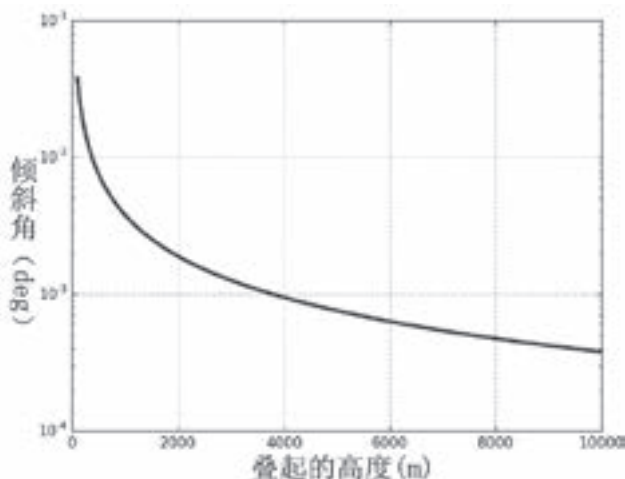
假设可以把纸币完美地叠起来，随着纸币越叠越高，这叠纸币被轻轻一碰就倒掉的可能性也越来越高。请看一张示意图：



每叠钱上的那个点代表这叠钱的质量中心。如果这叠钱倾斜到使其质量中心偏出底面边缘，那这叠钱就会倒塌。是的，我假设所有的纸币都粘在一起。不过你会发现，纸币叠得越高，倒塌所需的倾斜角度就越小。

通过计算不同高度的纸币的“翻倒角度”，我发现一叠 10m 高的纸币

只需要倾斜 0.37° 就会达到倒塌的临界点。如果叠得再高一些呢（你知道也不能再高多少了）？如果把纸币一直叠到 10^4m 的高度，会得到下面这张坐标图：



要是把纸币叠到 10^6m 那么高，翻倒所需的倾斜角度为 $3.8 \times 10^{-60}^\circ$ 。而一万亿张纸币叠起来的话（假设整叠纸币处在恒定的引力场中，现实中这是不可能的），其倒塌所需的的角度仅为 $3.8 \times 10^{-80}^\circ$ 。这么小的角度相当于在水平方向上移动区区 6.6cm 。

就算这叠纸币不倒下，有没有可能叠这么高呢？处在底部的纸币能承受住上面所有纸币的重量吗？这就和所谓的“抗压强度”有关了。大体上，纸张要保持完好，只能承受那么多的压力。

纸张我不了解，不过木头的抗压强度是 3 到 37MPa 。我们随机取 20MPa 作为一张美元纸币的抗压强度。

这叠钱的底部要承受多大的压强？这等于上面所有东西的重量除以纸币的面积（约为 $6.6\text{cm} \times 15.6\text{cm}$ ）。这说明压强会随着高度线性地增加（假设引力场恒定，尽管这不太真实）。

利用这个压强和纸币密度的估值 958kg/m^3 ， 10^{12} 张 1 美元纸币叠起来后，底部的压强会达到 $9.7 \times 10^5\text{MPa}$ 。不过其实应该小于这个值，因为海拔越高，地球引力越小。我认为这一点可以忽略不计。底部的压强远远大于 20MPa 这个我估计的纸币抗压强度。

好吧，既然把这些纸币叠起来不可行，我就用 10^{12} 张纸币造一个小行星。已知 1 张 1 美元纸币的密度，可算出 10^{12} 张纸币的质量。干吗要用现金造出一个庞大的球体？干吗不呢？你可以把它叫作“钱星”。首先我来算一下质量。如果每张纸币的质量为 $6.91 \times 10^{-3}\text{kg}$ ，那么 10^{12} 张纸币的质量为 $6.91 \times 10^9\text{kg}$ 。假设密度恒定，那么这个球的体积为 $7.2 \times 10^6\text{m}^3$ 。

如果这个“钱星”是个正球体，那它的半径就是 120m 。看上去这好像不是一大笔钱，不过这个球体的直径可是长达 240m 。你可能对这个没有什么概念。我再打个比方，这大概是 4 艘尼米兹级航空母舰的体积之和。

或许节目里的人应该转述一下桃乐丝·帕克^①的话：如果政府把它拥有的所有的钱全叠起来，那景象我看了也不会太吃惊。

^① 桃乐丝·帕克 (Dorothy Parker, 1893—1967) 文学和戏剧评论家。她的诗歌经常犀利直率地讽刺当代美国人性格上的弱点。

把火鸡从空中丢下去，能把火鸡烧熟吗？

最好的问题都是网络上问出来的。比如一个叫作“最后的话”（The Last Word）的网站上有这样一个问题：

“把一只冷冻的火鸡从多高的空中丢下去，火鸡落地的时候能被烧熟？”

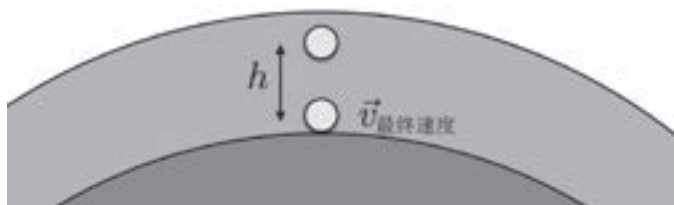
好问题都要有几个初始假设，比如：

- 火鸡由水组成，开始降落的时候是 0°C 的冰。
- 火鸡是一个球体，半径为 15cm （或者就用 r 表示）。
- 当火鸡穿过大气的时候，消耗的能量一半进入火鸡，一半进入大气。
- 我会忽略火鸡撞击地面产生的热量，我只想知道火鸡在撞击地面变成碎片之前的一瞬间有没有被烧熟。
- 火鸡温度达到 82°C 的时候就算是烧熟了。

为什么我要从假设入手？因为这是把复杂问题简单化的一种手段。这看起来像是作弊，但其实不是的。比方说，以我的假设为前提，我算出要把火鸡烧熟，得从 100m 的空中把火鸡扔下去。这表明，对于一只真的火鸡来说，答案可能是 $50\sim 200\text{m}$ 之间的任何一个数值。但肯定不会

是 100 000 米。这样的答案尽管不准确，但还是有用的。没错，这些数字都是我瞎编的。

既然有了假设，那么我来画张图说明一下。这是一只从高海拔的地方扔下去的球形火鸡：



这只落下来的火鸡怎么会被烧熟呢？原因就是空气阻力。当火鸡降落的时候，空气会撞击火鸡，产生类似摩擦力的效果。实际上，火鸡的温度上升源自空气撞击，和火鸡下方空气的压缩生热。是的，空气摩擦生热是个复杂的问题。不过可以肯定的一点是，物体穿过空气时一定会升温。就像双手合在一起摩擦会变热，下落的火鸡也一样。

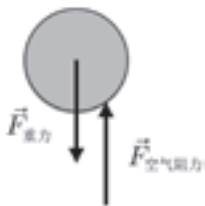
这个温度的增加值要怎么计算呢？当处理物体运动一段距离的问题时，最有用的就是功能原理。该原理表述为，对一个系统所做的功，等于这个系统的能量变化。如果这个系统由地球、火鸡和空气组成，那么就可以考虑下面几种能量：

- 动能：来源于物体的运动（主要是运动中的火鸡）。
- 热能：随着火鸡的降落，火鸡和空气都会升温。
- 重力势能：势能随着地球和火鸡之间距离的缩短而减少。

那么，对这个系统做功的是什么呢？在这个系统中，只有空气阻力对降落中的火鸡做功。在经典模型中，空气阻力的大小取决于空气密度、物体的形状和大小，以及物体的速度。

在行进中的汽车里把手伸出车窗，你就能自己测试一下空气阻力的性质。显然，空气会推动你的手。当你的速度变快（ v 的数值增加），这个推力也会增加。如果你把手握拳，手的形状就变了，横截面积也减小了，你感受到的推力也就变小了。

对于降落中的火鸡来说，随着降落的速度越来越快，空气阻力也会变大。然而，当火鸡降落到某一点时，空气阻力会和地球引力持平。这时火鸡受到的合力为零，降落速度趋于恒定，达到所谓的终极速度。下图表示的就是这只匀速运动中的火鸡：



那么这只火鸡降落的终极速度是多少？如果这只火鸡是个正球体，那它受到的引力和质量成正比。如果火鸡的密度均匀，那么质量和其半径的立方成正比。空气阻力和这个球体的横截面积成正比（横截面是圆形）。所以空气阻力和火鸡半径的平方成正比。最终结果就是火鸡的大小起到决定作用，因为大小所产生的效果不会被抵消掉。火鸡越大，终极速度也越大。

不知道为什么，我总是会惊讶于尺寸大小的这种决定性作用。也许我们都倾向于把这个世界看成一张铁路模型的图片。物体变小后，还是原来的物体，仅仅是变小了而已。但事实并非如此，大小真的很重要。

现在我们回到能量的问题上。重力势能是多少？大体上讲，物体所处的位置越高，它拥有的重力势能越大。当物体与地球表面的距离比较近的时候，势能随着高度的增加呈线性增长。如果距离非常远的话，问题就复杂了。保险起见，我会采用复杂情况下的重力势能。

要解决问题，还差一块拼图：热能和温度之间的关系。这两个数值有区别吗？当然。看一下这个常见的例子（我在之前的某一章用过这个例子，主要因为我很爱吃披萨）。假设你想要加热一些吃剩的披萨。如果你把披萨放在铝箔上，然后放进烤箱，最终披萨和铝箔会达到同样的温度（比如 65°C ）。披萨热好后，你可以很轻松地直接用手拿起铝箔。不过千万别直接用手去拿披萨，你会被烫着的。从根本上说，这两件物体拥有的热能不同。

当丢下火鸡的时候，我们希望火鸡能达到一定的温度（比如 80°C ）。火鸡越大，达到这一温度所需的热能就越大。

关于热能，还有一点要记住：火鸡和空气的热能都会增加。为方便起见，我假设热能一半进入火鸡，一半进入空气。为什么是一半呢？火鸡得到一大半的热能行不行呢？不，一半就好。其实这只是一个近似值，所以一半或是其他任何比例都是合理的。

把上述条件综合起来，再取一只正常大小的火鸡，我算出要把火鸡烧熟，降落的高度应该是 $142\,000\text{m}$ 。这个答案合适吗？不合适。为什么呢？因为这真的挺高的。可以把这个高度和国际空间站的轨道高度做个比较，国际空间站的轨道高度是 300km 。

除了高度很荒谬之外，还有什么问题不？首先，你也许会觉得应该考虑到空气密度不均，特别是因为火鸡要从那样一个高度降落。那么又来了，空气密度不均也许并不要紧。如果高海拔的地方空气密度很低，那么火鸡降落达到的终极速度会高得多。然而高海拔的地方空气做功更少，但是火鸡降到低处的时候运动的速度更高，这就弥补了高处空气做功的不足。

那受热不均会是个问题吗？当然。如果你从 100km 的空中把火鸡丢下去，用不了多长时间火鸡就会掉到地面，基本上不会超过十分钟。如果你想在十分钟内把火鸡烧熟会怎样呢？火鸡外面会烧焦的。

所以下次你家复活节聚会的时候，还是用普通的烤箱来烤火鸡比较明智。这你可得相信我。

你能按比例造出一个死星的乐高模型吗？

里海大学的几位学生对建造一艘死星飞船的成本做了一次了不起的估算^①，这给了我一些灵感。

地球上没人能真的造出一艘死星来验证他们的估算是否准确。不过用乐高积木确实能造出另一个版本的死星，尽管可能并不符合比例。里面都塞不下几个长着黄色圆形脑袋的乐高人偶，更不要说出现在电影《星战：新希望》中的死星飞船上的全体人员了。乐高的确出过许多《星战》里飞船的等比例模型，包括一款老版的已经不再售卖的千年隼（最好的版本）。不过有可能做得出死星的等比例模型吗？

首先，真实的死星有多大？死星一共有两艘，分别出现在《星战》的第四集和第六集。这两艘死星的大小显然不一样。根据星战百科^②的数据，第一艘死星的直径为 160km。一个克隆兵人偶的高度是 38.6mm，不包括头发、头盔还有顶部用来连接头发和头盔的小装置。假设人的平均身高为 1.77m，那么这个人偶和真人的比就是 0.022。

所以，第一个版本的死星的等比例乐高模型直径为“真”死星直径的

① 参见 <http://www.centives.net/S/2012/how-much-would-it-cost-to-build-the-death-star/>。

② 星战百科 (Wookieepedia) 是一个以《星球大战》为主题的百科网站，网站上有各种对于人物、武器等科幻内容的介绍。关于死星的介绍请参看：http://starwars.wikia.com/wiki/Death_Star。

0.022 倍。那么这个乐高模型的直径就是 3.52km，也就是刚刚超过两英里，这样一个乐高模型真的挺大的。

如果这个版本的死星出一套等比例模型的话，得有多少块积木？这个问题可不好回答。我们要解决的第一个问题是，这艘乐高死星的内部是什么样子的？内部总要有东西来支撑起外部结构。如果你想要一个等比例的死星模型，你可能希望这里面应有尽有，包括垃圾压缩机什么的。

假设模型内部拥有结构，我需要估算一下它的密度。我们先来看一下千年隼的模型。根据网站 brickset.com 的数据，千年隼模型包含 5 195 块积木，体积为 $84\text{cm} \times 56\text{cm} \times 21\text{cm}$ ；假设模型的形状是长方形的话，可以用积木的块数除以体积，求得乐高积木的块数密度为 $52\,400 \text{ 块}/\text{m}^3$ 。

这只是个估计值，不过我已经很满意了。的确，千年隼模型里有一些大块的积木，不过也有一些小块的。我想如果死星模型里包含更多大块积木的话，那它的块数密度会小一些。

利用这个密度，和上文中提到的终极死星模型的体积，可以求得这套模型里积木的数量。要想拼出一个半径为 1.76km 的球形乐高模型，需要 1.2×10^{15} 块积木。终极死星模型里可能包含更多大块的积木，所以块数密度会更小。我就取 10^{14} 作为这套模型中所包含的积木的块数吧。

这个等比例模型的质量是多少呢？这时需要知道的就不是块数密度而是质量密度了。同样地，我可以通过考查另一个模型来估计这个质量密度。千年隼列出的装箱重量是 24.2 磅。这肯定包括了包装箱和说明书。所以可能积木的净重大约 9.5kg。那么模型的质量密度就是 $96.2\text{kg}/\text{m}^3$ 。快速地查看一下出现在《星战》第 6 集《绝地反攻》中的死星二号的乐高模型，它的质量密度是 $85\text{kg}/\text{m}^3$ 。数据并不完整，但是完全够用了。

假设死星模型的质量密度是 $90\text{kg}/\text{m}^3$ ，那么我的超级无敌乐高死星的

质量就是 $2.1 \times 10^{12} \text{kg}$ 。

好的，那么这艘死星的成本是多少呢？我就利用现有的数据来估算。因为我之前是把一套乐高积木的成本作为积木块数的因变量，我知道一套积木的平均成本是每块 0.098 美元。

这可能有点牵强，不过，如果我假设每套积木的成本价随着积木套装的体积始终呈线性变化，那么这套积木的成本价在 10^{13} 美元左右（不包括装运的费用）。

还要考虑一点，这个死星的等比例模型要往哪搁呢？放在地球表面可不是个好主意。最难解决的是支撑物的问题。假设我建造一个底座来放这个跨度为 0.3km 的死星模型。它最宽的地方可能有 3.5km，但请记住这是一个球体。这个底座会支撑起模型的全部重量，这会产生 240MPa 的压强。

我带你简单回顾一下压强的概念。假设你把手放在地板上，一个人不穿鞋子踩在你的手上。这样可能只有一点点疼对吧？现在假设同一个人穿着高跟鞋踩在你的脚上，而且还是用细高跟踩的。想象一下就好了，别真这么干，因为真的挺疼的。所以两种情况有什么区别？施加在你手上的力的大小是一样的，但是作用的面积不同。用细高跟踩的时候，因为力的作用面积很小，所以压强更大。那帕斯卡又是什么？帕斯卡 (Pa) 是计量压强的一个单位，1Pa 等于 1N/m^2 。

那最大抗压强度又是什么？最大抗压强度指的是一种材料在破裂之前以某种方式所能承受的最大压强。比如你用牙签戳一块石头，石头可能毫发无伤。要是用同样的力去戳一块果冻，果冻就“破裂”了。所以当死星模型给底座施加 240MPa 的压强时会发生什么？这个压强超过了大理石的最大抗压强度。大部分材料做这个底座的话都会破裂，要模型底部的乐高积木保持结构完整就更不可能了。

唯一可行的办法是把模型放入环绕地球的轨道，比如距离地球表面 300km 的近地轨道。300km 外的一个直径为 3.5km 的物体，视直径为 0.67° ，比月球的视直径大一点点。

这样很棒吧？大家会像汉·索罗那样，把乐高死星错当成月亮。

裹多少气泡垫从六楼跳下去才不会摔死？

要裹着多少气泡垫从六楼跳下去才不会摔死？我大致将高度定为 20 米。

解决这个问题要从哪里入手呢？首先我们需要一些气泡垫。我们可以测量气泡垫的哪些性质呢？

首先，我可以测量气泡垫的厚度。没错，气泡垫有许多种，不过我就测量我的这种（总得从某处开始着手吧）。我不是只测量一张气泡垫的厚度，而是把若干张叠在一起测出总的厚度，然后画出坐标图。

我每加一张气泡垫就量一下总的高度，然后画了一张坐标图，坐标轴分别是气泡垫的张数和高度。这个线性拟合方程的斜率为每张 0.432cm，这样就能很好地估算出一张气泡垫的厚度了。

其次，我需要知道气泡垫有多“弹”。像弹簧一样吗？如果是像弹簧一样，那它有多硬呢？如果是一个真实的弹簧，那我就对其施加重量，看看它会被压缩多少。就这么干。

如果画出图像，那它看起来基本是线性的，收缩的程度和施加的力的大小成正比。所以可以说气泡垫的性质的确很像弹簧。气泡垫像弹簧一样对外物（比如人）施力，我可以为这个力建一个模型。这个力的大小和气泡垫被压缩的程度成正比。

从上面的数据可以得出这个规格的气泡垫的有效弹性常量。那其他规

格的呢？假设我把两张气泡垫叠在一起，而不是单独一张，在上面施加一个重量后，每张气泡垫各自的压缩程度和单独一张气泡垫是一样的，因为它们承受的重量相同。但是两张气泡垫叠在一起的话，压缩程度的总和比单独一张气泡垫的大。

一张小的气泡垫和一张大一些的气泡垫相比的话，又有什么不同呢？这就像把两张气泡垫并列拼在一起。当在上面施加重量的时候，它们同时支撑起这个重量，所以各自承受一半的挤压力。所以两张气泡垫拼在一起时的压缩程度会比单独一张的小。

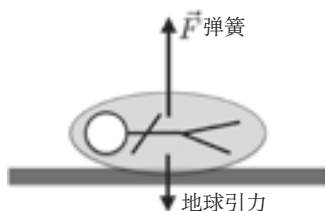
简单地说，面积越大的气泡垫，性质越接近一个更硬的（弹性常量更高的）弹簧。气泡垫叠得越厚，有效弹性常量越小。一种材料拥有的和其实际尺寸无关的硬度属性，叫作杨氏模量。已知我这种气泡垫的规格，可以得到这种气泡垫的杨氏模量为 $4\,319\text{N/m}^3$ 。

那么跳落的情况是怎么样的呢？跳落本身不会造成危险，危险的是落地。估计落地安全性的最好方法是考查重力加速度。NASA 已经采集过人体所能承受的最大重力加速度的相关数据：

时间（分钟）	+ G_x （向前加速） 眼球向内	- G_x （向后加速） 眼球向外	+ G_z （血液流向脚步）	- G_z （血液流向头部）
.01(<1 秒)	35	28	18	8
.03(2 秒)	28	22	14	7
0.1	20	17	11	5
0.3	15	12	9	4.5
1	11	9	7	3.3
3	9	8	6	2.5
10	6	5	4.5	2
30	4.5	4	3.5	1.8

从这里可以看出，采用向前加速（眼球向内）的姿势时，普通人体能够承受最大的重力加速度。这种情况下重力加速度会把眼球向头部里面推，这意味着在跳落之后是用背部着地。

这里有个小问题。一位裹着气泡垫的跳落者在与地面撞击的时候，其重力加速度不是恒定的。下图表示的是一个裹着气泡垫的人与地面撞击的过程：



所以，这时候人体主要受到两个力的作用：来自气泡垫的力（像弹簧一样）和地球引力。要想使跳落者停下来，重力加速度的方向必须朝上，而气泡垫所施加的力必须大于地球引力。

重力加速度的大小取决于弹性常量以及弹簧被挤压的长度。这两个值我都不知道。不过，我可以利用功能原理来考查整个降落过程。在降落的起点和终点，动能都为零。在降落的过程中重力势能会减小，而在撞击的过程中气泡垫的弹性势能会增加。由于没有外力对这个系统做功，我可以建立一个跳落高度和所需的弹性常量（以使重力加速度在可接受范围内）的关系。

要求出 k 的值，我还需要知道其他一些值。下面是我做的假设：

跳落者加上气泡垫的总质量为 70kg 。这里我假设气泡垫的质量比跳落者小。

最大重力加速度为 300m/s^2 ，撞击过程的持续时间不超过 1s 。

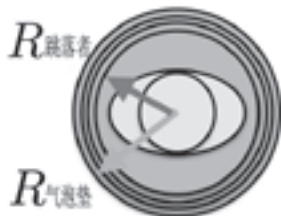
跳落的高度是 20m 。

这样的话，要使落地时的重力加速度不超过 NASA 所给出的人体超重耐力，气泡垫的弹性常量应该为 $1.7 \times 10^4 \text{N/m}$ 。

现在我知道要使跳落者停下来所需的弹性常量，我离知道需要裹多少层气泡垫又近了一步。首先，我需要估算一下地面和气泡垫的接触面积。我知道在撞击过程中，这个面积其实是会变化的，所以我只能估算一下。假设撞击时地面和气泡垫接触的面是一个 0.75m 见方的正方形，接触面积就是 0.56m^2 。

已知气泡垫的杨氏模量，可以算出所需的厚度（我任性地用 L 来表示）为 0.142m 。因为每张气泡垫的厚度为 0.432cm ，所以我一共需要 39 张。

39 张气泡垫也许看起来有点少，我来计算一下气泡垫的质量还有它看起来有多大。我假设气泡垫在跳落者周围裹成一个圆柱体，那它看起来差不多是这样的：



从上往下看，这个人看起来大体上是一个半径为 0.3m 的圆柱体（只是猜测）。如果气泡垫额外地延伸出 0.142m ，那么气泡垫的体积是多少？哦，对了，我还要设这个人的身高为 1.6m （也是猜测）。这样气泡垫的体积就是 0.53m^3 。

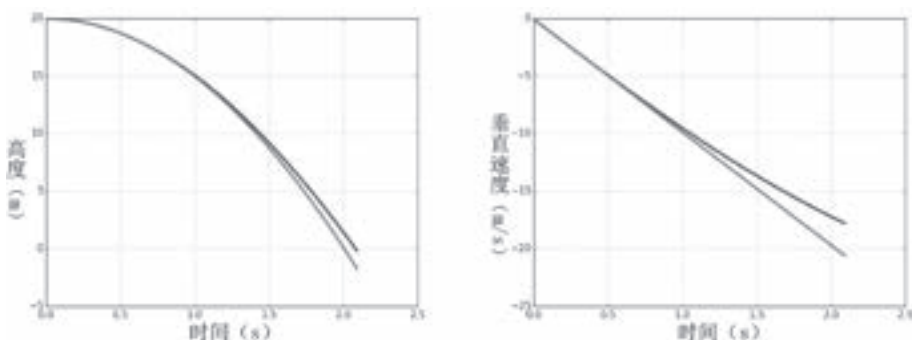
我可以利用气泡垫的厚度和质量的数据算出气泡垫的密度。这么大体积的气泡垫的质量就是 9kg ——还不错。不过，严格来说这会改变落地所需的气泡垫的数量。或许为了保险起见，我可以再加几层气泡垫，以抵消气泡垫本身的重量。

既然知道了人裹上气泡垫后的体积，我可以考虑一下降落时的空气阻

力。在空气阻力的经典模型中，阻力大小与物体的横截面积以及物体降落速度的平方都成正比。

因为当速度变化时，阻力大小也会随之变化，所以这个问题在纸面上不太容易解决。不过，要是用计算机把这个问题划分成许多短的时间间隔，那么这个问题计算起来就很直观了。

在做这个数值计算的时候，我得到下面两个关于降落物体位置高度和垂直速度的坐标图。



上图表明，考虑到空气阻力的话，降落物体在撞击地面之前的速度会稍微低一些（为 17.8m/s，而不是大约 20m/s）。我可以把全部数据重新算一遍，但是我不会算了。不过你可以把这个较低的速度考虑为安全极限范围（尽管我绝不会认为这种事情是“安全”的）。

再留一道附加题给你当家庭作业怎么样？要从一架飞机上跳下去而不摔死，你得裹多少气泡垫？我猜不会比从楼上跳下去多太多。如果你再加几层气泡垫，就会降低物体降落的终极速度。

不过我们真的要用气泡垫来保证人的安全吗？这显然不是一个好主意。

香蕉真的可以发电吗？

香蕉。你喜欢香蕉。我知道你喜欢香蕉。说真的，这不是你的错。香蕉谁不喜欢呢？就连“香蕉”这个名字叫起来都那么有趣。哦，我懂了，你讨厌香蕉的味道。好吧，也许你不喜欢吃香蕉，但你还是喜欢香蕉。香蕉很了不起，原因如下：

香蕉的第一个了不起的地方和物理没有关系。不过，在聚会上或是在操场上的时候和孩子们分享这个事情还是挺有趣的。聊天气很没劲，聊香蕉就有趣多了。这个事情就是，香蕉都是克隆的。

实际上野生的香蕉味道不是很好，吃起来不都是甜的，而且籽还特别大。不过人类时不时会交上好运，碰到变异的香蕉，没有籽，味道还特别好。问题是你没办法种植出更多的这种变异香蕉，因为它们没有籽。为了解决这个问题，人们从一棵现有的变异香蕉树上取出一部分来移栽，于是“嗖”地一下，你就有了更多香蕉树。它们都是克隆出来的变异香蕉树。

不幸的是，香蕉树被克隆出来就意味着所有的香蕉都拥有相同的基因。如果有一个变异性的疾病完全契合了第一棵香蕉树，那就糟糕了，因为所有的香蕉树都会被毁掉。这种事情会发生吗？是的，以前就发生过。你听过一首名叫《对！我们没香蕉了》（*Yes! We have No Bananas*）的歌吗？猜猜作者为什么写这首歌。

关于克隆香蕉，我就说这么多。这些足以让你能够愉快地聊天了，但是还不够深入，因为我还要说一件彻头彻尾错误的事情。

如果你觉得克隆和变异让香蕉看起来很酷，那你只对了一半。还有更酷的事情。香蕉具有放射性。放心，香蕉你还是但吃无妨。许多东西都有放射性，这不代表它们就达到核废料的级别，但是放射性的确有。香蕉的放射性来自于其中含有的钾元素。

具有放射性是什么意思呢？这表示物质中正在进行某种形式的核反应。在核反应中，某种元素的原子核转化为其他元素。如果新元素的质量不一样（通常都会这样），那么最起码会有能量产生，而且很可能会出现一些其他种类的粒子。

钾元素为什么会有放射性呢？实际上，钾元素有三种类型。所有钾原子的原子核中都有 19 个质子，正是这一点决定了它是钾元素。但是钾原子的原子核中有多少个中子呢？钾最常见的同位素是钾-39（你会看到它被写做 ^{39}K ，其中 39 代表原子核中质子和中子的数量之和，K 表示它是原子核内拥有 19 个质子的钾元素）。所以， ^{39}K 的原子核内有 19 个质子和 20 个中子。这种大体上稳定的钾元素构成了香蕉中 93% 的钾含量。剩下的钾元素中，大部分是 ^{41}K ，它也是稳定的。还剩下极小的一部分（0.012%）是 ^{40}K ，有放射性的就是这种钾元素。

^{40}K 的衰变有 3 种途径，其中最常见的一种叫作 β 衰变，这种情况下，钾原子产生一个电子，原子核转化成钙原子；第二种常见的衰变是通过获得电子实现的，自由电子与原子核相互作用产生氩原子；最后，还有一小部分属于会产生一个正电子的 β 衰变，原子核也是转化为氩原子。

说明一下：正电子是电子的反物质形态。没错，就是《星际迷航》里的那种反物质。这表示它的质量和正物质的电子相同，但是拥有的电荷相反。

如果你计算一下（有人已经做过计算^①），可以算出正常大小的香蕉平均每 75 分钟产生一个正电子。

让我来总结一下目前提到的香蕉的特性，它们包括变异、克隆、放射性和反物质。

现在我们换个话题。用香蕉能造出一台核能发动机吗？如果可以，那这台发电机需要多少香蕉才能为我的房子供电呢？首先，核能发电机是如何工作的？基本上核能发电就是利用核反应产生的热量来烧水。水烧开产生的蒸汽再驱动连接到发电机上的涡轮。这和火力发电厂的工作原理完全一样，只不过火力发电厂给水加热烧的是煤。

我来描述一下我这个版本的发电机：我会找来许多香蕉，把它们做成一个大的球体，外面包围着薄薄的一层水。香蕉产生的正电子会和电子发生湮灭并产生热量。这些热量会把水烧开，从而产生蒸汽来驱动涡轮。多么简单，我不懂为什么现在还没出现这些东西。是的，我知道实际情况会更加复杂。假设我的这层水足够厚，就能保证正电子不会逃逸。而且我会忽略其他形式的衰变产生的能量。为什么要忽略其他形式的衰变？因为“香蕉能反物质发电机”听起来很酷。把它叫作靠香蕉腐烂^②运行的发电机感觉怪恶心的。

真正的问题来了：我需要多少香蕉？我们先看一下一根香蕉包含的能量。如果一根香蕉每 75 分钟产生一个正电子，我可以用这个正电子产生的能量除以 75 分钟来算出一根香蕉的能量。当一个正电子湮灭的时候，能量来自于这个正电子和一个电子的质量之和。然后能量等于 mc^2 ， c 代表

① 详细计算参见 <http://tertiarysource.net/ts.cgi/anti-banana>。

② 原文中的“decay”同时拥有“衰变”和“腐烂”的意思。

光速。我们从一次湮灭中可以获得 $1.64 \times 10^{-13} \text{J}$ 的能量。这些能量没有多少。如果每 75 分钟产生这么多能量，那么我们可以获得 $9.11 \times 10^{-18} \text{W}$ 的平均功率。

现在我只要确定需要多少根这种小小的瓦特香蕉能够产生 2 000W 的功率（这差不多就能让我家里的所有电器运转起来）。用 2 000W 除以一个香蕉的功率，可知我们需要 2.2×10^{20} 根香蕉来为房子供电。

好吧，需要挺多香蕉的。我的香蕉发电机实际会有多大呢？我来估算一下。假设一根香蕉重 150g (0.15kg)，密度为 1g/cm^3 (1000kg/m^3)。这么多香蕉的质量就是 $0.15 \text{kg} \times$ 香蕉的数量，等于 $3.3 \times 10^{19} \text{kg}$ 。已知香蕉的密度，可算出香蕉的体积为 $3.3 \times 10^{16} \text{m}^3$ 。把这些香蕉打碎做成一个球，这个“香蕉球”的半径为 $2 \times 10^5 \text{m}$ ，放到太空中都会清晰可见。

或许这不是个好主意。我怀疑地球上有没有那么多香蕉来造这样一台发电机。也许我用香蕉来喂几只猴子，然后做个猴子能发电机效果会更好一些。

你愿意和一只像马那么大的鸭子打架吗？

网上有这样一道经常被问及的著名问题：

“ 有一只和马一样大的鸭子，和一百匹和鸭子一样大的马，你更愿意和哪个打架？ ”

我跟我的孩子说了这个问题，他们愉快地进行了探讨。我的答案是跟马一样大的鸭子打。下面我说说物理学是如何帮我做出这个决定的。

首先，跟马一样大的鸭子到底有多大？这个问题就不好回答。什么样的马？什么样的鸭子？鸭子和马是高度一样还是体重一样？鸭子的高度指的是自然直立状态下的，还是脖子伸长以后的？没人知道。

当我想起鸭子的时候，脑中总是浮现出一只常见的绿头鸭。根据维基百科，绿头鸭体长 50~65cm，体重 0.72kg~1.58kg。不过，我不确定这里的“体长”是指什么，是把鸭子伸长了量的，还是正常状态下量的？维基百科还列出了鸭嘴的长度为 4.5cm。通过一张鸭子的照片，我得出鸭子的身高为 27cm。

好了，那么马的情况如何呢？是的，维基百科上也有关于马的页面。通过查阅网页，我了解到一匹普通的马的肩部高度为 1.57m，体重为 500kg。



如果一只鸭子和一匹马一样大会怎样？如上图所示，我假设这只鸭子和这匹马的头顶距离地面的垂直高度相同。通过这幅图我也对鸭子身体侧面的宽度做了估计。

我为什么需要测量这只跟马一样大的鸭子的水平宽度呢？我需要用某种方式估算一下鸭子的体重。假设一只普通的鸭子就像一个球，一只球形鸭子。这时，我估算出这个球体的半径大概是7cm。已知鸭子的体重为1.2kg（我从给出范围内选了一个数值），可以算出鸭子的密度为 835kg/m^3 。

有两点需要说明：这并非鸭子真正的密度，要知道，我用的是整只鸭子的质量和球形身体的体积。另外，即使是用这种方式，算出来鸭子的密度还是小于水的（ $1\,000\text{kg/m}^3$ ）。这意味着鸭子可以浮在水面上。谁都知道鸭子、木头、肉汤还有小石头都可以浮在水面上。

于是我利用这个鸭子的密度可以算出一只跟马一样大的鸭子有多重。鸭子跟马一样大的话，密度还一样吗？我不知道。我没考虑过这个问题。不过，如果你想要这只“马鸭”能浮在水上的话，那它的密度必须小于水的密度。已知一个和马一样大的球形的体积，以及鸭子的密度，可以算出其质量为3000kg。

这是挺大的一只鸭子对吧？为什么鸭子的体重是马的六倍？如果你从正面观察一匹马和一只鸭子你就明白了。比起鸭子，马相对其身高而言要瘦得多

看到这里你可能要说，“可别去惹这只大鸭子！”但是请等一下，我

说过我宁愿和这只跟马一样大的鸭子打架，是吧？我为什么会这么说呢？我认为这只鸭子没法行动。这么大的一只鸭子显然飞不起来。不过我认为它根本动都动不了。

鸭子能不能飞的起来不要紧。要紧的是鸭子的腿。一只正常大小的鸭子有两条近似于圆柱形的腿。通过观察鸭子的图片，我测出鸭子的一条腿的半径为 0.005 米。一只普通鸭子两条腿的压缩力有多大？这等于鸭子的体重除以两条腿的横截面积之和。我来考查一下一条腿的情况（比如一只正在走路的鸭子），鸭子必须把全部体重都放到一条腿上。这个压强有 $150\,000\text{N/m}^2$ 。

这看起来是挺大的一个压强，其实不然。骨头的抗压强度是它的一千倍。所以，鸭子能走，不过这个我们本来就知道。

如果一只鸭子变得跟马一样大，会发生什么呢？质量会增加，腿的横截面积也会增加。鸭子变得和马一样大的话，体积会增加到原来的 6.85 倍，腿的大小也是原来的 6.85 倍。这样一来，跟马一样大的鸭子的压缩力就是 $8 \times 10^6\text{N/m}^2$ ，差不多是一只普通鸭子的一百倍。也不是说这样的压力就一定会压断骨头，可是，开什么玩笑！这样的话想走起路来就太难了。我认为这只鸭子只会坐在那里嘎嘎叫，只不过叫的声音真的会特别大。我尽可以朝它丢几块石头，直到我被宣布为胜方。

不过要是我理解错了题目的意思怎么办呢？如果鸭子不是和马一样高，而是和马一样重，会是什么情况呢？

假设鸭子的质量和马一样是 500kg。如果它的密度和普通鸭子一样，再假设它是一个球体，那么这个球体的半径为 0.52m，和一只鸵鸟差不多大。这样的话，我还是更愿意和一百匹和鸭子一样大的马打架。我的理解是，最好别惹不会飞的大型鸟类。芝麻街里的大鸟我不敢保证，不过我一直认为他是个和平主义者。



GEEK

PHYSICS



第九章

科幻巨制



$$x_2 + 1x_3y_2$$



你能开车撞开多少个僵尸？

伟大的问题总是由伟大的人物提出来的。但遗憾的是，这个问题我就不知道出处了。我得好好想想，应该是在一次地球物理系的会议中听到的。鉴于我可能是在那次会议中记录下了这个问题，所以请允许我让这个系好好露一把脸，请在以下地球物理系的网站上查询更多的信息：<http://globalphysicsdept.org>。

好的，现在回到这个问题中来吧。似乎现在人人都非常热衷于讨论僵尸这个话题。我不知道此中缘由，但你不妨思考一下，设想如果你处于这样一种境地，你会怎么办？一大波僵尸正向你袭来，此时你正好待在一辆加满汽油的车里。现在只有你一个人还活着，可眼前早已僵尸密布，把整条路都牢牢地封堵死了，整个街道一时间成了僵尸狂欢的地方。现在，情况十万火急，为了保命你有办法开车从这些僵尸中拼出一条路逃命吗？现在，恐怕只有物理学才可以救你一命了。

怎么办？这个问题一开始就让人觉得胆战心惊。你可以首先在脑海里虚构一下你开车撞到一个僵尸时的情景。车会撞到僵尸让它加速。由于力是物体间的作用力，僵尸也会反给车施加一个力。在撞击过程中，僵尸和车之间产生的力大小相同、方向相反；并且，僵尸撞车的时间和车撞击僵尸的时间两者长度相同。根据作用力与反作用力原理，这两个时间会不一

样长吗？不可能。

因为你知道车和僵尸之间相互作用的时间和力是一样的，所以两者在动量上的变化也是一致的。但是，撞击僵尸和一般的撞击可不一样，僵尸在受到撞击之后会附着在车上，和车成为一个共同体。这个共同体的动量和撞击前车的动量是一致的，因为僵尸在撞击前是静止不动的。碰撞后，因为有僵尸黏附在车上，车可以被认为质量增大了。所以，根据动量守恒原则，要让车和僵尸在碰撞后保持动量不变，只有一个途径：车速降低。

因此，车和僵尸之间撞击之后导致的结果就是车速会下降。但问题就在于这个预测是错误的。还有一个方面没有考虑进去：车并不是单纯地在转动，别忘了车里还有一个引擎。如果开车的司机及时给车补给燃料，那撞击过程中同时还会产生另外一个推动车辆向前进的力。

让我们暂且撇开僵尸来讨论一下车吧。首先，引擎是如何做到推动车辆向前的？好吧，从技术上来讲，它其实并没有这样做。引擎推动车轮，车轮和路面发生接触产生交互作用。你甚至可以说是路面让车向前进了。想象一下车在结冰的路面上行驶的情景就可以理解我这个说法了。如果车轮在冰面上打滑，虽然引擎还是一样在工作，但车不再向前行驶了。也许对于这个问题最好的陈述方式是：正是轮胎和路面之间的摩擦力推动了车辆前进。如果你尝试着让车轮过快转动——快到车加速需要的力超过车轮的摩擦力时，轮子就会空转而达不到过高的速度增幅要求了。

在了解了驱动摩擦力之后，试想为什么需要有这样的摩擦力来推动车辆前进呢？如果你在一个物体之上施加一个前进方向的恒力，物体会一直加速。因此，为什么不直接加速到你想要的速度然后直接关闭引擎呢？不，这样不行。这种办法只能使用在没有别的力作用在车辆上的那种情况。对于一辆真实行驶在路面上的车而言，一共有两个力需要加以处理。首先是

车辆行驶中的摩擦力，力的方向在车辆运动的时候与车辆的运行方向相反，是由轮胎与地面的压缩以及车轴中的摩擦造成的。另外一个力是空气阻力。车行驶的速度越快，这个阻力在相反方向对车的推力就越大。有了这两个力的作用，来自于轮胎上的摩擦力必须继续推动轮胎向前，以使得车以恒定的速度行进，并使得汽车受到的合外力为零。

当然，这些知识你早已经具备了。所以回到刚才那个问题，你就会明白当你把脚从油门上挪开以后，车速度就会放慢。

好了，再回到僵尸上来。要在僵尸群里开出一条路，我前面已经讨论了要注意到的两个方面：首先，撞击到僵尸会让车辆的速度放缓；其次，如果有摩擦力让车继续向前进，车的速度就不会变慢。这就导致了如果你撞到一个僵尸，车的速度只会减少很少一部分，但马上会加速回到原来的速度。除非僵尸给车造成了毁灭性的破坏，车的状态都和原来没有什么区别。

单个僵尸的撞击问题也许很简单，但你如何处理很多僵尸同时撞击的问题呢？为了解决这个问题，我会从观察单一的僵尸一车之间的撞击现象转而过渡到另外一个模型——车与僵尸群的撞击可以类比撞击空气，唯一的区别就在于僵尸的质量更大，僵尸和僵尸之间的间距更大。

如果你回想的起来，阻力的一个理想模型认为阻力的大小正比于空气密度、横截面积大小（车）和阻力系数的乘积。其中阻力系数取决于车辆的形状、车速的平方。我如何调整这个模型以适用于撞击僵尸群这一物理过程呢？

第一个要调整的就是密度。空气的密度为 1.2kg/m^3 。僵尸的密度呢？让我们来假设一下。一个真人的质量在 $50\sim 70\text{kg}$ 之间，那僵尸呢？我认为僵尸的质量会略微小于人的质量，因为僵尸体内已经没有流质和那些附属器官了。所以我猜想僵尸的平均体重为 60kg 左右。如果每平方米的路面上有

n 个僵尸，那么每平方米区域内僵尸的密度就是 $60\text{kg} \times n$ 。啊，你感到有点不习惯吧？平时的密度都是由 kg/m^3 来表述的，现在怎么出现了一个 kg/m^2 的单位？我能理解你的困惑，但请你相信我这样表述自有我的道理。

在此，对于密度问题我是这样加以解决的。我知道僵尸的阻力和其他任何力一样应该用 N 这一单位来表示。假如僵尸的密度我取的度量单位是 kg/m^2 ，那么空气阻力的公式就用不上了，因为最终得到的数值单位很显然不正确。但是，假如我把汽车的横截面积调整为汽车的线性宽度呢？如果在一次撞击之后，汽车的高度变高了，那就无法再撞击到更多的僵尸了。所以，归根结底，关键的只是汽车的宽度。这一调整也会很巧妙地解决最终结果在单位上的问题。密度以 kg/m^2 计，宽度则以米为单位。我们的僵尸群阻力表达式就和空气阻力的表达式取得统一了，最终两者的单位也统一为牛顿了。

还有一个因素也需要我们纳入考虑：阻力系数。阻力系数是常数，对于在空气中移动的物体，阻力系数取决于物体的空气动力形态。一个圆锥体形的物体比一个扁圆形的物体的阻力系数要来的低，即便两者从横截面的视角上来观察并没有什么区别。那么僵尸群的阻力系数到底应该如何确定呢？很遗憾，我们并没有一群僵尸可以供我们来做撞击实验。但那也关系不大，我们大可以对这一阻力系数做一番猜想。阻力系数是 0，僵尸和车之间就等于没有发生过任何相互作用；如果阻力系数为 1，那么撞击就类似于一个非弹性过程，所有的僵尸在撞击后都会和车黏在一起。虽然我脑海里常常把僵尸想象为一种黏糊糊的东西，但也没有黏性那么强。所以，我们就把僵尸的阻力系数设定在 0.8 吧。

下面，我还要继续做一些假设。我会以每平方米的僵尸数量开始计算。如果一平方米的面积上只有 1 个僵尸就显得僵尸群太松散了，如果 1m^2 上的数量为 4 个，就达到最大饱和的密度了。

现在唯一还有待解决的是车的宽度问题。让我来以一辆真车的标准来看。当这样一场僵尸灾难爆发的时候，我本人会想象我自己在一辆丰田^①车里。我也不知道我为什么会选择这种车，可能是由于这种车比较符合那种场景的缘故吧。如果你上网去查一下这种车的数据，你会查到车的宽度是 1.9m，质量为 2 000kg，请把质量先记下来，后面会用到的。

好了，到底僵尸的阻力会是多大？我需要知道汽车速度的大小。让我设定为介于 25~50mph 之间。在这种紧急的状况下，速度低于 25mph 你可能会很着急，如果超过 50mph，你也会无法控制车辆。以每平方米 1 个僵尸的密度和 25mph 的速度来计算，阻力达到了 5 700N，如果车速增加到 50mph，阻力就达到 23 000N。显然，我所做的只是将速度加倍，僵尸一车的阻力却增加了 4 倍，这是因为阻力取决于速度的平方。

僵尸的问题我还没有完全解决。我到底可以撞开几个僵尸？好吧，首先我先来计算一下，在正常稳定的速度状态下，我可以撞开的僵尸密度大小。如果车的驱动摩擦力和僵尸阻力大小相等，车速将以一个恒定值行驶。因此，车的驱动摩擦力最大是多少？摩擦力的经典模型认为最大静摩擦等于某个摩擦系数乘以支撑两个摩擦接触表面的力。一般而言，我们把这个力称为支持力，因为它和表面是垂直的。如果车在一个平坦的路面上，支持力和车的重力相等。并且，对于普通路面上的一般的轮胎，在干燥的路面上摩擦系数是 0.7，根据我的车的质量，可以得到最大静摩擦力为 13 700N。

如果我假定车速是 25mph，我可以求解出抵消这个汽车的撞击力每平方米区域内需要几个僵尸。使用以上相同的数值，我求解出的答案为 2.4 个僵尸。这个结果对我而言不算太糟糕。我想我是能够应对的。当然，当

① 世界十大汽车工业公司之一，日本最大的汽车公司。

速度增加到 50mph，我就会出现麻烦了，在这个速度下，我只能撞开每平方米 0.6 个僵尸。没错，速度越高，数值反倒越低了，这是为什么？因为我们的计算是基于这样一个条件：一辆车要以匀速撞开无数僵尸。如果车速增加，阻力变大，撞击程度就会增加，撞击的惨烈程度也会攀升。

好了，还有一个方面。如果僵尸的数量不是无限多个，只是一个高中足球队的运动员那么多，群起而攻之，上街堵路，情况又会如何？这下你能撞开多少僵尸？如果我假设每平方米 3 个僵尸，你也可以撞开一条路。你得这样去做：快开车。如果僵尸群不是无限的长，发生撞击后车辆的速度会放慢。但是，只要你最后能把车速控制在足以保证自身安全的速度之上（大概 10mph），你就会安全无虞。

现在，问题是：你是怎么计算的？这个计算比上个计算要更难一些。为什么计算会更难？因为僵尸阻力会出现变化，一旦车速下降，阻力也就随之下降。你需要经过数学计算来确定在速度下降前你可以开出的距离。我个人认为，要对付僵尸这样的灾祸，我得做好一切准备才行，所以我还是会为这种情况再仔细运算一下，以保证那种情况一旦发生不会手足无措。

使用每平方米 3 个僵尸的密度值（低于这个我就不会降速到 25mph），以及 50mph 的初始速度，我计算出的距离是 20.6m。这个就是降速到 25mph 之前我能行驶的距离长度。

里面有多少个僵尸呢？一个居住区的街道宽 9m，如果我开车行进 20.6m，覆盖的僵尸区面积就达到 185.4m^2 ，根据每平方米 3 个僵尸的密度，一路上撞开的僵尸数量一共有 556 个僵尸。这个数量超过了一所高中足球队员人数，跟一所中学学生人数相差无几了。好吧，我的关注点并不是他们的身份，他们现在成了僵尸，而我开车从他们中间穿越而过，重点是我要在他们的魔爪之下活命。

为什么我们不能获得真正的飞行滑板？

我年轻的时候，有几部电影对我的影响很大。《回到未来》^①三部曲就属于这类电影。让我很快地向你介绍一下电影，以免因你从未看过而不知所云。电影讲述了一个科学家创造了一台时光机器。有了这台机器，主人公马蒂·麦克弗莱回到了过去。由于事件总是环环相扣地发生，他在过去世界一出场就开始改写历史，一些阴差阳错之后他面临着消失的危险。当然，为了保全自己，他又进入了未来得以成功地纠正历史。可以了，故事情节就讲到这里。但是，电影里还有一个更重要的元素：第二部里，马蒂·麦克弗莱和科学家穿越时空来到遥远的 2015 年，这个情节非常有意思。

在那个未来里，马蒂发现人人都有一块“飞行滑板”。它的形状和普通滑板的样子相差无几，只不过前者能在地面之上漂浮起来。因为那是 2015 年，所以现在我们也该有我们自己的飞行滑板了吧？我的滑板呢？它在哪里？

最近，一些人听信别人的话，误以为真的有飞行滑板这种东西。网上甚至还有一个视频，向轻信的人展现滑板传奇人物托尼·霍克是怎样用飞

^①《回到未来》是一个美国科幻电影系列，共有三部，分别拍摄于 1985 年、1989 年和 1990 年。它告诉人们未来不是一成不变的，是掌握在自己手中的，每部电影充满喜剧性的同时也有很深的寓意，发人深省。

行滑板自如飞行的。然而，如果你认为这个视频是真的，以下我有几个小贴士应该可以帮助你视频的真伪产生些许疑问：

- 整个视频根本没有任何技术细节上的呈现，看的人根本没法知道飞行滑板的工作原理，里面甚至就连一点不着边际、让人幻想一下的工作原理解释也不存在。

- 视频里有一句话是这样的：“以下展示完全是真实的。”还有什么语言比这句话更能表明视频是伪造的这一事实呢？

- 视频里的飞行滑板的造型看上去和电影里面的一模一样。

- 视频里的飞行滑板的效果也和电影里的很相像，事实上，整个过程就好像人在一根钢丝上不断来回晃动一般（因为他们确实是在一根钢丝上来回晃动）。

- 视频还展现了一些人是如何试验“飞行滑板”的。试验者均无人摔倒，每个人都能轻而易举地跳上滑板，离开地面，绝尘而去。

所以，根本无需再去进一步考查里面的细节来敲定这个视频的虚假性。它原原本本就是个伪造之大作。

真正的问题来了：现实世界里真的可能有飞行滑板这种东西吗？怎样才能使这块滑板飞起来？假如你希望有这样一块滑板，有一个功能它是必须做到的——无论如何，滑板必须能在竖直方向承载人的重量，并使得垂直方向的合外力为 0。也就是说，滑板必须能够产生一个足以支撑人和滑板自身重量之和的力。现在我们就来思考一下滑板如何实现这个功能。

打造成一架迷你直升机：如果滑板上安装两个小型的直升机用的引擎来支撑人的体重可行吗？我认为这是打造真正的一块飞行滑板最合理的方法了。当然，小型引擎要发动起来支撑一个人的重量，会消耗很多能量，但这是最佳方案。如果你有一种超高效的能量源，你就可以发动引擎了。

但是如果真这样去设计滑板的话，滑板看上去就跟在电影里看到的大相径庭了，因为板上会安装一些类似于风扇的东西。

使用反重力：有没有可能在板底部安装一种反重力盘？可行吗？好吧，如果世上真的有反重力，那就可行。我肯定有人会冒出来做一番物理学解释，论证两个有质量的物体会相互排斥而非相互吸引。然而，滑板真的要做到的是能够和地面相斥而非和人体相斥。假如真能行，恐怕这就是为什么用飞行板的人要系上安全带的原因。

利用磁力：用重力，永远是一个相吸的概念，而用磁力则既可以吸引又可以排斥。一块磁铁的北极吸引另一块磁铁的南极，但却排斥这块磁铁的北极。我们都具备这个物理知识，对吧？没错，但是用磁铁也有两个问题有待解决。第一，如果你只使用一般（甚至磁力强大）的磁铁，它们无法以一种平稳的方式悬浮。两块原来排斥的磁铁会翻倒之后又吸住。有一个办法可以解决，那就是用超导磁铁。

第二，第二块磁铁的问题。即便你使用超导磁铁，你也必须为此在地面上配备一些可以让滑板悬浮起来的设施。这么一来，整个装置看上去就更像是一条铁路而非一块滑板了。

静电排斥：这个想法遇到的困难和磁铁相仿。同种电荷相斥，异种电荷相吸。但滑板和地面都需要你同时配备电源设备。空气也会成问题。如果你的通电量的电场强度超过 $3 \times 10^6 \text{V/m}$ 。空气就会成为导体，这就解释了为什么你有时会看到电火花了。

离子推进器：离子推进器是真实存在的。它的工作原理是利用巨大电势差来给离子加速。因为离子加速了，因此就给物体一个推力。事实上，化学火箭的工作原理就是离子加速，但化学火箭使用的离子数量要少，持续时间要长。

离子推进器的问题在于力的大小。即使是功效最强大的离子推进器，推力也只在 1N 上下（这比一个人重力的 650N 差得很远）。电势差也构成很大的技术难题。然而，我相信这种方法至少未来还是有在技术上实现的空间的。我们努力的方向是尽量把推进器制造得推力更大而体型更小，这个做起来就没有那么困难重重了。科学的进步一日千里，我们只要回顾一下计算机在 40 年前的大小和计算速度就可以打消顾虑了。以前会有谁想到我们还能用上智能手机这种东西呢？

如何给一个穿越时空的德劳瑞恩^①充电？

只要我们一谈起《回到未来》，就免不了说到德劳瑞恩时光机器。电影里面马蒂回到了 20 世纪 50 年代，他急于给未来亲手发明时光机器的布朗博士展现他未来 80 年代的成果。为此，马蒂给布朗博士放了一则视频。视频里讲到这台时光机器的发动功率为 $1.21 \times 10^9 \text{W}$ ，他们之间的对话如下：

布朗博士：1.21 千兆瓦 (gigawatts)？1.21 千兆瓦？好家伙！
马蒂：什么？千兆瓦是什么东西啊？

对话里面最有趣的是念“千兆瓦”（英文 gigawatts）这个英文词时的发音。一般发硬 g^②，但是他却发成了 jiga。

到底何为“千兆瓦”？瓦特是功率的单位。功率是什么？功率可以是下面几个意思里中的一个。功率最常用的含义是指在某一段时间里能量的变化。如果能量是用焦这个单位来衡量的，时间是以秒为单位，功率就是瓦。

① 全称 DeLorean Motor Company，德劳瑞恩汽车公司（下面简称 DMC）是美国的一家富有神秘色彩的汽车公司。该公司的特殊之处在于，它只生产过一个型号的汽车，称作 DeLorean，具体型号为 DeLorean DMC-12。

② 字母 g 后面接 a,o,u 的时候，所发的音叫作“hard g sound”。

因此，1 瓦就是每秒 1 焦。马力也是一个功率单位，1 马力等于 746 瓦。

兆瓦里的“兆”呢？兆通常用于单位前表示 10^6 。因此 1.21 千兆瓦等于 $1.21 \times 10^9 \text{W}$ 。这个数量大吗？很大。我可以给你拿另外一个概念来做下对比，尼米兹级航空母舰里的核反应堆产能为 194 兆瓦（megawatts）即 $1.94 \times 10^8 \text{W}$ 。

布朗博士说时光机器需要耗能，这话是什么意思？好吧， $1.21 \times 10^9 \text{W}$ 有多少？于我而言，这就等于问我制作吐司要耗费多少能量。没错，你可以用一个 500W 的面包机做吐司。然而，如果你用一个 250W 功率的，你耗费的时间就要增加一倍。也许时光机器有点特别，它需要能量，而且还需要在一段时间内持续的能量。这就是我假设的内容。

如果我需要计算时光机器的能耗量，我就要知道能量（已知量）与时间。也就是说，我需要了解时光穿梭的时间。你说的没错，这看起来有点像无稽之谈。事实上，我的意思是我得弄明白在使用能量的时光旅行过程中德劳瑞恩用了多少时间。

我仔细地研究了《回到未来》中的一些片段，发现有两种时间间隔。一种是把德劳瑞恩加速到 88mph，紧接着轰隆轰隆一声，他就来到了过去。假如你根据帧数来计算开始直到结束的时间，结果是 4.3s。但等一下，回到未来呢？在这种情况下，他们使用闪电来为汽车充电。根据我基于片段做出的估计，闪电和汽车的相互作用时间为 0.46s。我想我得为两种情况分别计算出时光旅行的耗能情况。

有了功率和时间，计算能量就是轻而易举的事情了，只要把功率和时间相乘就可以了。利用上面的时间间隔，我计算出的能量值是 $5.2 \times 10^8 \text{J}$ 或 $5.56 \times 10^8 \text{J}$ 。这个答案是合理的。

但是你要从哪里获得这 $5 \times 10^8 \text{J}$ 的能量呢？布朗博士的第一选择就是

使用钚^①。尽管他也没给出具体的细节，但是我猜想他用的正是钚-239。钚-239是一种放射性元素，但是我认为在这种情况下钚不是以放射性来提供能量的。相反，我认为里面肯定有一种核裂变将原子核分裂为更小的微粒的过程，分裂出来的微粒比原来要小，过程中释放出能量 ($E = MC^2$)。我们可以跳过其中的细节，而直接计算这种元素裂变释放出的能量大小。一个裂变的原子能产生 200MeV(兆电子伏特)^② 的能量，相当于 $3.2 \times 10^{-11} \text{J}$ 的能量。

在普通的核反应堆里（很可能使用的不是钚-239），这一能量被用于加热水产生蒸汽开启涡轮机发电。显然，电影里肯定不是靠这种方式来获取电能的。我也很肯定这个过程的效率并不高，只有 50%。

为了得到 $5 \times 10^8 \text{J}$ 的能量（最低限度），我要用到 3.1×10^{19} 个原子。因为一个钚-239 原子的质量是 3.29×10^{-25} 单位，燃料质量要 1.2×10^{-5} 单位，这样才有可能获得那么多的能量。

闪电呢？你能从闪电里面得到那么多能量吗？根据维基百科，一次闪电的能量是 $5 \times 10^9 \text{J}$ 。足够时光机器使用了。如果你觉得闪电和钚-239 的猜想有点枯燥无味，也许 AA 电池对你的胃口。平均而言，一节干电池产生 10 000J 的储能电量。为了得到 $5 \times 10^9 \text{J}$ 的总能量，一共需要 50 000 节 AA 电池。当然，要实现功能还有一个条件——要在一瞬间里把所有的电量一次性耗尽才行。如果真的那么做，电流输出会非常高，电池也会变的过热。所以，钚-239 的想法更实际一点。

① 钚：是一种放射性元素，是原子能工业的一种重要原料，可作为核燃料和核武器的裂变剂。投于日本长崎的原子弹，使用了钚制作内核部分。其也是放射性同位素热电机的热量来源。

② 能量单位。电子伏特 (eV) 与 SI 制的能量单位焦耳 (J) 的换算关系是 $1\text{eV}=1.602176565(35) \times 10^{-19}\text{J}$ 。

咕嚕如何在黑暗中看见东西？它吃什么？

有没有觉得在《霍比特人》中咕嚕才是最酷的角色？也许吧，只是也许。好吧，在我继续讲之前我要给你们发出警告——我要剧透了。我可是提前预警了哦。也许我也不需要给你来什么剧透，毕竟这本书出版 70 年之久了。就好像对于从没看过《罗密欧与朱丽叶》的人来说，我在讲这对恋人双双殉情而死的结局之前总得发个警告吧？哦，不，也许刚刚我已经一不小心连带把《罗密欧与朱丽叶》也剧透了。

好吧，现在正式开始剧透。在《霍比特人》图书版里，比尔博^①在山中的地道里与他的伙伴们走失了。书中是这么描写的：

“当比尔博张开双眼，他也不知道自己到底是不是睁开了，因为周围漆黑一团，伸手不见五指，什么人也没有。不难想象他心中早已恐惧之极。除了地上的石头，他什么也感受不到，什么都看不到，听不见。”^②

① 比尔博·巴金斯 (Bilbo Baggins)，电影《指环王》和《霍比特人》中的人物，邦哥·巴金斯及贝拉多娜·图克之子，他的祖父是长寿的“老图克”杰龙提斯·图克。他是中土历史里首位（也是唯一的一位）能以自己的意志放弃魔戒的魔戒持有者。

② 摘自 J.R.R. Tolkien 的《霍比特人》(New York, NY: Houghton Mifflin Harcourt, 1978), p83

凭着这一小段文章，你可以在脑海中再现电影中这一场景。这是一幅除了黑色以外什么也没有的画面。你看不到任何东西。这在物理中被称为“超暗”。不久，比尔博发现他的剑倒能发出点微弱的光亮，他便靠这点光寻找烟斗。霍比特人往往能在紧急情况下明确他们的首要目标，所以他得先找到烟斗才行。

我们的视觉到底是如何产生的呢？假如白天你看见室外有一块石头，石头之所以能被看见是因为石头把射向它的光线反射到比尔博的眼中。那么这光来自哪儿？当然来自比尔博的剑，来自剑的光线射在石头上，再反射进入比尔博的眼睛。同时，比尔博的眼球处理了送来的光线，并把信息传输到大脑，于是大脑上形成那块石头的图像。

人类的视觉方式有两种。人类之所以能看是因为某样东西发出光，或者这样东西对光进行了反射。不管哪种方式，人要能看见就必须有光线进入眼睛才行。假如没有光剑，也没有光线，那么什么也看不到。当我们什么光线都没看到的时候，大脑就会给我们发出黑色的信号。

让我们尝试一下这个试验。找你的朋友们（或去交些朋友）并询问他们以下问题：

“假设你进入了一个没有窗户、房门紧闭的房间。房间里，桌子上放着个红苹果。紧接着，有人关了房间里仅有的灯。现在当你在没有光线的条件下再看向苹果，你还能看到什么吗？”

以下是一些可能会听到的回答：

只能看到一片黑暗，根本看不见苹果。

起先眼前一片黑暗，但是过了一会儿眼睛开始适应，能看到苹果的形状，颜色是灰黑色。

所有的答案都与以上两者接近，我发现 20% 的人会给出第一种回答，

80% 会给出第二种回答。你去问那 20% 给出这个答案的原因，大部分都说他们曾去过没有光亮的洞穴。要是你有过这种经历，你就会明白那是一种多么令人恐惧的黑暗（跟“超暗”是一回事）。这 20% 的受访者中也有一部分人曾在另一些地方体验过这种情景，例如洗照片的暗房里。你也去找找看有没有类似这种地方吧。祝你好运！

可为什么有那么多人都会给出错误的答案？那是因为他们所认为的黑暗的环境，通常还是有一些光线的。可以或多或少看到一些，哪怕只有一点点微弱的光亮。晚上走到树林里，你能模糊地看到一些周围的环境。若是满月，你就能清楚地看清周围的一切。再举个例子，关掉你房间的灯后，由于街道上的亮光能穿过你的窗户，你还能看到屋子里的东西。

好了，以上就是人类的视觉方式。那咕噜又是怎么在一片漆黑中看东西的呢？现在我们就来分析一下它的视觉方式。

想想猫头鹰的视觉方式是怎么样的？它们如何做到在夜晚看清周围一切的呢？有些动物的眼睛就好比我们的望远镜。我们的望远镜不仅具有放大远处物体图像的功能，还可以提高聚光能力。猫头鹰的视觉系统基本上也是这样运作的。如果你有一双更大的眼睛（或瞳孔），你的眼睛可以接受到更多的光线来由大脑加工形成物体的图像。

试着去找一副双筒望远镜，观察透镜的大小，比你的眼睛大多了，对吗？现在先用你的肉眼看夜空中的星星，再使用望远镜观察，你可以看到更多的星星了。这并不是因为望远镜有放大物体的作用，而是因为它使得你的眼能接收到更多来自夜空的光线。

在洞穴中，眼睛更大或是拿一个望远镜会起作用吗？显然不会。这种“夜视”的方法只会通过接收更多的光线而起作用，如果没有光线（相信我，这个洞穴中没有光线）那也就没有什么能聚起来的了。

如果猫头鹰式的眼睛在洞穴里也顶不上用，军用夜视镜呢？虽然我也不希望扫你们的兴，但我还是得告诉你军用夜视镜和望远镜（在本质上）是一样的。夜视镜上配置着图像感应器和微型摄像监视器。感应器接收到光线（正如摄像机），接着图像被进行加工处理直到能被人眼所见。除了普通可见光谱，这类嵌入式相机也能收集靠近可见光谱的红外线。事实上，多数相机能拍摄出人眼所看不见的物质。一般情况下我们会称这种光谱为“临近”红外线。你家里的电视机遥控使用的也是这个范围的光谱。试试用不同的相机观察遥控器，在一些相机上能够看到遥控器前跳动的光点。因为你的眼睛看不到这一频谱的光线，所以还有些相机索性把红外线过滤器放置在镜头前把这个频谱的光阻挡在相机之外。

夜视镜能帮到比尔博吗？当然不会。夜视镜需要电池供能，在中土世界不可能出现电池。



如果你换台相机使它能看到更远的光谱呢？我们把这样的相机称为热成像相机。为什么它叫“热成像”这个名字？好吧，我解释给你听。一切物质会发光，光的波长取决于物体的温度，对大部分物体来说，这个波长的光落在“远”红外线范围内。因此，一台热成像相机探测到这个范围的波长并将其转化为颜色虚拟的图像。在以上的图像上，不同颜色代表物体不同的温度（通常情况下）。

在上面那张图中显示出了两个坐在地上的小孩。由于他们背后的墙与

室内温度差不多（也许 20℃），使得墙体显示出的颜色比他们两个的颜色要深得多。然而两个小孩的温度要高一些（体温），所以他们显示出的颜色不同，明显要亮一些。那么在他们面前的地板呢？为什么地板的颜色会比墙体显示出的颜色亮呢？地板的温度与墙接近，但是由于地板反射了来自小孩的红外线，于是就会呈现这样的颜色。

那么这种热成像相机能在洞穴中帮助到比尔博吗？好吧，让我们假设他找来了些干电池，这下可能会起作用。如果所有墙壁的温度均相同（通常温度的确是相同的），在洞穴中相机不会显示洞穴中的任何细节。要是比尔博能把相机靠得更近一点，它便能探测到来自比尔博身体反射的红外线。他也可以移动相机，把能发光的显示屏当作迷你手电筒来用。要是一个人在这个时候和他擦身而过，他也许能在地上看到光点。这得取决于相机的感应能力或留下脚印的人刚刚走过去的時間间隔。

他还有一个方法：取出电池，利用金属和电池生火。

接着让我们探讨一下蝙蝠。对，蝙蝠也居住在洞穴中。然而，它们并不会生活在漆黑一片的洞穴深处，但是他们的确有不同“视觉”方式：回声定位。原理是利用超声波。你（对，你就是蝙蝠）发出高频率的吱吱叫声，这些声音会立刻在周围环境里传播并反弹到你的耳朵里，使你能听见。通过这个声音，基于声音的返回时间，你可以估计出物体和你之间的距离。我猜你还能根据回声的类型推测出物体的形状呢。是的，这算不上真正的“视觉”，而属于“感知”。

如果比尔博也想到了这种办法（且之前多次尝试），他就能利用超声波。可是他发出的吱吱叫算不上是超声波，并且哥布林^①也许也能听到比尔博能

① 哥布林（Goblin）是一种传说中的类人生物，一般都有长长的尖耳。

听到的任何声音。

看来黑暗的确是一个难以解决的问题。托尔金^①是如何想办法解决的呢？显然，从上面《霍比特人》的引文来看，比尔博并没有在黑暗中的“视觉”能力。那么咕噜呢？比尔博四处游荡，最后找到了一个住着咕噜的地下湖泊。咕噜在它湖中的小岛上观察着比尔博。它是怎么做到的？若比尔博拔出了他的剑，产生一些光亮，也许已足以让咕噜看清他了。

于是咕噜决定接近比尔博观察。在他们扭打后（咕噜认为它能吃掉比尔博），比尔博戴上了他的魔戒隐身了。咕噜却误以为他朝出口逃走了，而其实想不到比尔博正坐在他的面前，但是处于隐身的状态。咕噜从比尔博身边擦肩而过的时候小说里这样描写的：

“这是怎么回事？咕噜可以在黑暗中看清，而比尔博甚至能从咕噜的背后看到他那双发着暗淡光亮的眼睛——它还在那里——拥有敏锐视觉的咕噜离比尔博仅仅一码的距离却擦身而过。”

这是什么意思呢？谁能准确地解释？当我读到这里，看上去是咕噜能在黑暗中看清是因为他的眼睛散发光线，比尔博也能看到他眼睛发出的光亮。如果托尔金是在他青年时代写下这个小说的，我敢说他大概是受了《兔八哥》^②一类的动画片中的黑暗场景的影响。如果你在黑暗中看到兔八哥，你就能看到它的眼睛。但是托尔金早在《兔八哥》问世之前就去世了。所以反过来，没准是《兔八哥》受到了托尔金的影响也不得而知。

① 《霍比特人》小说的作者。

② 《兔巴哥》（*Looney Tunes*）系列卡通形象由被誉为“好莱坞最伟大的动画大师”之一的查克·琼斯（Chuck Jones）创造，其创造的形象还有被人们广为流传的《猫和老鼠》、《太菲鸭》等。

咕噜的夜间视觉方法与我们大多数人的想法是相符的，这点非常有趣。那些认为可以在完全黑暗的房间内看见东西的人也许认为人的视觉和眼睛有关。当然，和眼睛的确是有关联的。但是大多数人认为之所以你能看见东西是因为有“东西”从你的眼睛里出来了，这东西或许是光线，或是“视野”，抑或是其他什么东西。总之，这个观点把眼睛当作了灵敏的声波定位仪或回声定位器，是眼睛主动发出某些东西才让人有视觉功能的。

然而，那个关于咕噜的眼睛会发出光线的观点听起来还是不免有些离谱。还有什么方法能让咕噜在黑暗中看得清呢？

首先，红外线眼是有可能的。我们假设它的眼睛能够探测到近距离和远距离的红外线。就如我之前所分析的，这种红外线眼睛在某种程度上是能让人看到东西的，但还是无法让他看到洞穴里离他较远的物体，他只能用来来自自身的红外线看到离自己很近的东西。

其他还有什么选择的方法吗？会不会是因为中微子呢？因为来自地下湖泊的光？如果是这样，中微子和水之间相互作用会产生光线。中微子是什么？中微子是低质量、无电荷的微粒。它很难被探测到，但当中微子穿过如水这种材料的时候会产生光，如果要探测中微子，就可以利用它的这个特性。

以这种方式产生的光线并不多，但足以让你捕捉到。或许在中土世界里有大量流入的中微子，使得湖水能产生很多光。咕噜居住在那里的原因可能和中微子也有关系。

趁着我们还在讨论咕噜的话题，让我们看看另一个有关他在洞穴里生活的物理现象。咕噜居住在地下湖泊中的一个小岛上，对吧？他靠吃鱼或是其他它从哥布林那儿偷来的东西为生。他隔多久进食一次呢？这是我想分析一下的问题。

对于新手来说，这个问题看上去难以入手。但如果你小心谨慎地来解决这个问题，你也许就会对这个问题有些初步的设想。这就是普通人和一个理学专家之间的差异。没有什么问题可以让我望而却步。

你想从哪里开始？首先，咕噜真的需要进食吗？好吧，它需要能量。我们是哺乳动物（我假设咕噜也是哺乳动物），需要进食，呼吸，喝水（有时还需要啤酒）。我们需要消化这些东西并为我们的身体提供能量。咕噜也需要能量来四处移动，攻击比尔博，这是肯定的。它也需要能量使自己的体温达到一个正常的范围。我们都必须这样做。然而，咕噜是一种体温维持在很低的地下生物。如果它不吃东西，它的身体温度会最终达到与周围环境相同。我认为这个结果很不利。对于人类来说，我们要将体温保持在 29°C 以上才能维持生命。太阳光也能帮助我们增加体温。

为了着手解决这个问题，首先我要通过这两个方式得到一些数值。我会先做出一些猜想，但是接下去会以一种象征性的方式继续。用这种方式，最后我能够得到关于咕噜进食频率的数据表达式，代入随意不同的起始数值，这个表达式就可以给出相应的计算结果。以下是我们所需数值：

- 洞穴中的温度： T 。如果我来做出估算，我认为这个洞穴、包括里面岩石和水的温度均为 10°C 。这完全是我的推测而已。我唯一的凭据就是比尔博在他不小心碰到湖水时说这水非常冷。

- 咕噜的体温： T 。我感觉霍比特人更接近人类，由于咕噜以前曾是一个类霍比特人，它的体温应该与霍比特人相似。但是他并不是一个真的霍比特人，虽然他已在那座山上居住了很长时间。我们不妨认定它的体温为 29°C 。

- 咕噜的质量： m 。好吧，我们假设一个霍比特人大约有 1m 高，这接近于正常人类身高的一半。那么体重呢？我认为它的体重没有人的一半

那么重。事实上，我曾估计过绿巨人的体重。这里我就略过其中的细节，直接给出 20kg 这一推测结果了。我觉得这个体重偏轻，但是我还是打算一直用下去。

- 咕噜的比热容： C 。我想这个值接近水的热容量，约为 $4.19 \text{ J}/(\text{g} \cdot \text{K})$ 。

- 消化一条一般尺寸的鱼带来能量： E_f 。我得查找一些相关数据。我随便挑了个网站 (<http://www.alfitness.com.au/>)，查到 100g 生鱼的能量大约是 427KJ。因此， $E_f = m_f \times (4.27 \text{ KJ/g})$ ，其中鱼的质量是以 g 衡量的。我们假定地下湖泊里一条鱼的平均质量为 500g。那就是说消化一条鱼会带来 $2.13 \times 10^6 \text{ J}$ 的能量。看吧，大胆推测其实并没有那么让人望而却步，过程还挺有趣的。

现在假设已经都完成了。我觉得可能还需要一些信息，但就让我们继续前进吧。如果咕噜没有进食，无法保持正常的体温，这就能解释它为什么体温会下降了。所以咕噜一定是因为失去了热量而导致体温下降。以下为 3 个基本相互作用可以对热能散失做出解释。

第一，存在传导作用。这是在两个相互接触的物体之间的能量传输。能量从温度较高的物体传导到另一个温度较低的物体。对于咕噜来说，由于咕噜的体温比空气的温度高，传导作用大多发生在咕噜与空气之间。因为空气的比热容相当低，我就假设空气中的热传导作用很弱（比任何一种能量传输的形式都要弱）。噢，对了，水呢？显然，如果咕噜要在水中待着，它会比在空气中更快地消耗完他的能量。我想这就是他划船回到家园小岛的缘故。我们假设咕噜没有碰水。

第二，存在蒸发作用。如果你流汗或者皮肤上有水，水分就会从液体变为气态。这个阶段的转变需要消耗热能。热能会来自哪里呢？没错，来

自身体，蒸发导致热能与体温的下降。好，我说过咕噜身上没有一点水。如果我们同样也假设它没有出汗（或许它悄悄使用了止汗剂），那就不用担心蒸发带来的作用了。

第三，存在散热作用。一切物体都会散发能量。能量散失的速度取决于物体的表面积和温度。温度较高的物体散失热能的速度更快。这就是我所要考虑的咕噜身上的能量转移情况。为什么？因为这是我可以估计出的数据。如果一个房间里所有的物体的温度都相同会如何？热量还会散失吗？是的，但由于散失过程同样伴随着吸收过程，彼此处于平衡状态，温度就不会降低了。

物体散失能量的速率是多少呢？散失能量的典型例子来自斯蒂芬 (Stefan)- 玻耳兹曼 (Boltzmann) 定律：一个物体散失的热量取决于物体表面积和温度（以卡尔文温标计算）四次方乘积。实际上，我们也要考虑到外界向咕噜散发的能量。这样，咕噜散失的热量就正比于它体温的四次方减去环境温度的四次方，这个数据是我们能够计算得出的。

对于咕噜的体温与环境温度我已经估算出来了，现在我要知道咕噜的身体的表面积就可以了。我们可以把咕噜的体型类比为一个高为 1m、半径为 15cm 的圆柱体。当然，咕噜的身体实际上并不是一个标准的圆柱体，对吧？假设你能把咕噜的皮肤完全展开，整个面积比圆柱体更大。但是你想过这个问题么：咕噜皮肤表面中有一部分皮肤可能会将热量散发到其他皮肤上。比如手臂部位。如果你将手臂保持在你身体的一侧，手臂上的一部分皮肤会贴住身体的两侧。当然，如果把身体蜷缩成球状，暴露在空气里的皮肤面积会还要小。

所有需要的数值已经假设完毕，接着让我们把它们代入斯蒂芬 (Stefan)- 玻耳兹曼 (Boltzmann) 定律。我求得能量散失功率为 117W。鱼不是能提

供能量吗？咕噜的关键任务是要通过食用鱼以把体温维持在一个稳定的状态。考虑到这点，我不妨把这里散热的功率用不同的单位来表述。通常，功率的单位是 J/s，让我把这个单位转化成每秒消耗鱼的质量数。如果利用上面我已经给出的数据(单位是 J/每条鱼)，计算结果会是每秒 55mg^① 鱼，或者每秒 55 个百万分之一单位的鱼。

这难道是说咕噜每秒钟都得坐着吃一小片鱼吗？当然不是。这个数据指的是它吃鱼的平均速度而已。我觉得咕噜必然储备着一定的脂肪，至少它得有个胃，胃里的鱼要消化也需要一定的时间。这样一天下来需消耗的鱼的质量是多少呢？把秒换算成天，我最终得到的答案是每天 4.7 条。

地下湖泊中看似有许多鱼。那鱼要吃什么呢？好吧，我听到你说什么了。咕噜不仅仅靠吃鱼而活，它也会从哥布林那儿偷食物来吃（或者直接吃哥布林）。设定咕噜的 25% 的食物来源是鱼，那咕噜还是得一天吃 1 条鱼（或者一天吃 500g 左右的鱼）。这个食用量真不算小。

鱼的能量呢？难道鱼每天都不吃东西吗？好吧，我真的是在大发空论了，因为我从没见过地下湖泊里有鱼。不过我以前倒是在洞穴里见过有小龙虾，那真的是好久以前了，而且是在洞穴里！有两个关键要素：第一，鱼和小龙虾都不是恒温动物，它们的体温与水温一致，所以不需要进食来维持身体的热量。第二，洞穴中的小龙虾不会经常性地进食，它们只吃从地表过滤进入洞穴的东西，量也很少，所以这些洞穴里的小龙虾也很罕见。行了，刚刚我说的那一大通全是在说小龙虾以什么为食，确切答案我也不知道。

① 微克，1 μg 等于一百万分之一克。



GEEK

PHYSICS



第十章

这会是真的吗？



$$x_2 + 1x_3y_2$$



人类能够像鸟儿一样用翅膀飞行吗？

人类一直都希望自己像鸟儿一样飞，这个想法貌似很可行。不过，我倒是悲观地认为人类注定只能在地面上活动。当然，人类借助外来动力的飞行和滑翔是要排除在外的。

那么为什么人类就不能飞行呢？大概最简单的答案就是“我们太大了”。哦，你说咱们太大了？可是我们肯定还不算很大很大呀。或许如果我们有了大的翅膀，飞行还是会有希望的吧。不，还是不可能，或者说，多半不可能。这个问题实际上不属于人类直觉可以判断的范畴，或者我该说“大的东西和小的东西就是不一样的”。

大肌肉是要强壮一些，但大肌肉需要承担肌肉本身更多重量。在一个直观的肌肉模型里，我们可以看到，肌肉的力量是和肌肉截面面积成正比的。如果你把肌肉的大小增加一倍（比例保持不变），肌肉的力量增加四倍，但是肌肉的重量也增加了，而且是八倍。

大概你已经开始明白我的意思了。一个东西，变得强壮的同时，会变得更重，而且后者增速更明显。这就是为什么我八岁的女儿做引体向上比我做的更多，她自以为很强壮，但是她会开车吗？不，会开车的是我。

我们再回到飞行这个问题上来。我认为，人类的体型大小要适应飞翔是非常尴尬的。这也就是为什么我们不大看到巨型的鸟类。

我们不妨研究一下那些飞行的鸟类。你大概会想到类似翼龙般的巨型飞行恐龙，最大型的大概算得上是披羽蛇翼龙。科学家对披羽蛇翼龙到底有多大并没有定论，估计翼展有 10.7m，重量在 70~200kg。披羽蛇翼龙到底能不能飞？谁知道呢，说不定只是滑翔而已，说不定它就是因为太大而无法飞行呢。情况究竟是怎么样的，只有等时光机成为现实，我们穿越到史前去亲眼看一看了。

还是研究一下我们确知能够飞翔的大型鸟类吧。比方说，漂泊信天翁。这种鸟大概是现存的最大鸟类之一，翼展 3.7m，重量 12kg。要不咱们这么办吧——浏览维基百科中鸟类的数据，这有点像观鸟，但又不是观鸟。把每一种鸟类的翼展和重量记录下来，并寻找两者之间的联系。请注意：不同鸟类在维基百科上的信息不是完全一样的，不一定都有完整的翼展和重量数据。

我马上就给诸位展示这些数据了，现在少安勿躁。我们先来说说这个“鸟人”计划，大概你们以前也听说过，这里我提纲挈领地总结一下吧。

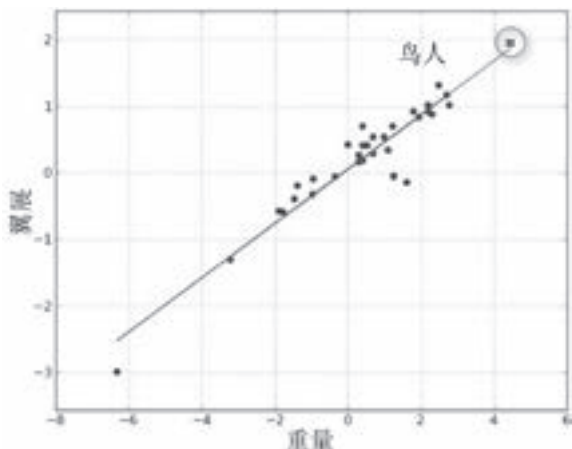
简而言之，有一个荷兰人，拍了一堆展示机械翅膀的录像，开始的录像是他自己做实验的录像，最后拍出来的就是他用翅膀飞行的录像了。结果呢，整件事情从头到尾都是假的，是个精心设计的骗局。我说是假的，连始作俑者也承认说是假的（那是因为越来越多的网民要对他的实验做事实审核）。

尽管那是假的，我还是在我的数据里包括了鸟人计划的翼展和重量。

数据我都有了，那么到底我是打了个什么主意呢？我怀疑飞行的能力是要依靠翅膀的大小和鸟（或人）的重量。如果我只是检验重量和翼展，或者重量和翼展的平方数（反正飞行大概是要受制于翅膀的表面面积的），那么有一堆数据你就看不到了。我们怎么能够在同一张图表上既调研小小

的蜂鸟又调研大大的鸟人呢？数据的跨度太大了。

最好的办法就是假设重量和翼展之间存在某种关系。如果确实存在的话（只是并非线性关系），我会假设重量的几次幂和翼展的几次幂之间有某种关系，如果我取重量和翼展的自然对数，这个幂就会是一个常量。是啊，我知道这听起来挺疯狂的，不过大家一起来看看吧。



数据表明了某种联系，我太高兴了。

关键是鸟人的翼展重量模式似乎和真的鸟类是一致的，当然，这不是说我们人就能飞了，这说明人类和鸟类的肌肉分布是差不多的。但是，我们人类和鸟类外形是不一样的。如果我们用胳膊来飞行，我们还是需要托着其他那些沉重的我们称之为“腿”的肌肉。会飞的鸟腿部肌肉却小得多啊。

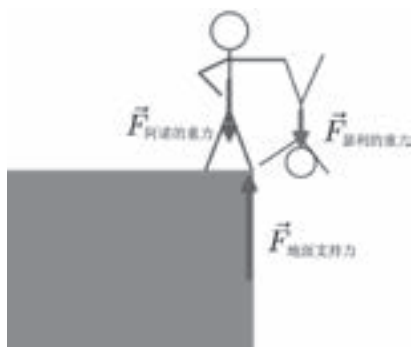
总之，人类是不可能飞行的，至少不能像鸟儿那样飞行，不是说人类不想飞，而是因为人类太大太大了。

阿诺·施瓦辛格到底是什么做的？

阿诺·施瓦辛格最初是个健美运动员，后来，就开始在硬汉偶像电影里当演员了。我记得他有一部电影叫作《独闯龙潭》^①，具体什么故事倒是无所谓的，我要说的只是其中一个小情节。

连我也记不清楚突击队员阿诺为什么要去追捕一个坏蛋，总之，坏蛋抓住了，阿诺要从他嘴里问出一些重要信息。要让这家伙开口，还有什么比把他倒挂在悬崖边上吓唬更有效呢？！所以，阿诺就用一只手把坏蛋倒吊在悬崖边。

显然，阿诺是很有力气的，不过这里不仅仅关乎力气。以下就是阿诺拽着坏蛋的一幅简图。



^① 电影《独闯龙潭》(Commando) 又名《魔鬼司令》，是阿诺施瓦辛格首部银幕喜剧，马克莱斯特担任导演，是一部集动作和喜剧于一身的欧美动作片。

可以这样认为：阿诺和坏蛋组成的这个系统里，一共有三种重要的力。让我们假设，阿诺非常强壮（这可能是事实，也可能不是），他能够以这个姿势牢牢拽住“受害者”（剧中这家伙叫作瑟利）。这就意味着我们可以把阿诺 - 瑟利组合当作一个刚性物体即牢固不变形的物体。有三种基本的力作用在这个物体上。一个是把阿诺拽向地面的重力，一个是把瑟利拽向地面的重力，还有一个是地面支撑阿诺的反作用力。让我们假设，阿诺拉着瑟利是在悬崖边的临界点，也就是说他只要稍微一挪步，就会跌落万丈深渊。

如果阿诺 - 瑟利物体的运动是平衡的、没有移动的，那么我们可以确定：合外力为 0，净扭矩也为 0。

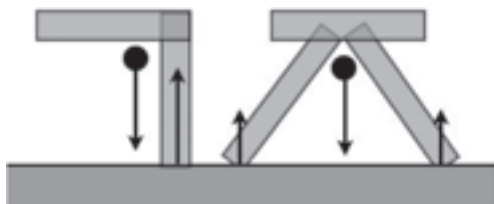
有一点可能不太容易理解：一般情况下，使用了力，物体本身则被认为是没有大小的。比方说，一本书竖放在桌子上，我们就可以画出两个作用于书的力，一个是重力，一个是桌子托住书的力。要是我来画，把两个力的作用点都画在这本书的重心处会比较简单。

地心引力是有质量的物体之间的相互作用。像书本那样的东西，是由很多很多块小的物体构成的，重力作用于每一块物体上。显然，没有人会愿意考查作用于书本每一块构成物上的力的情况。那么我们就投机取巧一下：作用于书本所有微小构成物的微小重力之和与作用于书本中心即“重心”的那个重力是相等的。

所以，如果构成物是刚性物体，不变形、不位移，那么 1 个大重力和 4 个小点的力就是一回事儿。

一旦我们开始把物体当作真的物体而不是质点，那么作用于该物体上的其他力的位置就显得很重要。举个例子来说，我们设想有两个阿诺人物模型——物体质量一样。作用于这两个物体的重力相同，但是一个模型是

把双腿撑开的样子，另一个是在弯腰的样子，如下图。



一旦我把这两个模型摆在桌面上，作用于每个模型上的合外力都是 0，也就是桌子支持力和向下拽的重力是相等的。但是，弯腰的那个模型会倒，为什么呢？我们只要一开始讨论刚性物体，我们就要考虑物体的旋转，也就是要考虑扭矩的问题了。如果我们认为力可以改变物体的线性运动，那么扭矩就像是改变物体旋转运动的旋转力。扭矩不仅有赖于使用的力是什么，而且有赖于力作用的位置。要不我还是来举个例子吧。

比方说你要开个门，开门就意味着门会转动。但是你是怎么使门转动的呢？一种方法就是推门。你会推门的中间部位，还是推靠近铰链的部位，还是推门把手附近的部位呢？要是你开门的经验和我一样丰富，那么毫无疑问你会推离铰链最远的部分，这就是为什么那里会装个门把手。离开旋转点的距离越远，扭矩就会越大，我就是要说明这个问题。

再回到鞠躬弯腰的阿诺模型。很明显，重力的扭矩并不能抵消地面托举力的扭矩，结果就得到了非零扭矩，那么，这个物体就会翻倒。而两脚撑开的战斗式阿诺模型，地面托举力的扭矩抵消了重力的扭矩，净扭矩是零，因此也就不会改变物体的旋转运动，物体也就不会翻倒。

总的来说，如果一个物体重心的位置在它的支撑点之间，这个物体就不会翻倒。我本来可以直接说出结论，不用提及扭矩的，不过那就不会像现在解释得这么有趣。

再回到现实中悬崖边的阿诺 - 瑟利吧。地面支持力必须要等于这两个

男人重力之和。那么这个系统中的扭矩呢？扭矩取决于很多因素，在这个场景中我们可以认为两个因素会产生更大的扭矩：更大的力以及离枢轴点更大的距离。想想跷跷板吧。如果阿诺和瑟利分别坐在跷跷板的两端，但是跷跷板会向阿诺这端沉，因为阿诺体重更重一些。如果两个人还想继续玩跷跷板，那么阿诺就必须朝枢轴点移动一点，直到两边平衡。不过，阿诺可不想陪别人玩跷跷板哦。

为了使悬崖边上的阿诺 - 瑟利这个系统稳定，地面支持力的位置就应该更靠近阿诺而不是瑟利。这是因为阿诺质量大，重量也就更大。如果瑟利重量产生的扭矩能和阿诺的扭矩平衡的话，瑟利就应该离枢轴点更远一些。这样的话，瑟利较小的重量乘上较大的距离，才能产生和阿诺相同的扭矩。

接下来咱们看看一些数据。根据维基百科，阿诺·施瓦辛格身高 1.88m。根据《独闯龙潭》里的影像，我们可以估计悬崖边与阿诺之间大概距离 0.15m，而瑟利离悬崖边大概 0.44m。

如果我们假设瑟利是一个体型普通的人，他的体重大约是 68kg。这就意味着阿诺 - 瑟利系统如果要在悬崖边上平衡住，阿诺的体重就必须达到 199kg。

把这个重量和阿诺在维基百科^①上的信息一对比，维基百科上他的体重只有 250 磅啊。不管是谁编辑的维基百科这个页面，不过就是用阿诺的体积和一个正常人的密度来估测他的体重。但是，谁会相信肌肉男阿诺是一般人呢？如果我假设体积是正确的（阿诺外形上看起来还是像人类的），这就意味着如果阿诺的体重要达到 200kg 的话，他的密度必须是常人的 1.76 倍。

① 参见 https://en.wikipedia.org/wiki/Arnold_Schwarzenegger.

人的密度和水的密度差不多，也就是 $1\,000\text{kg/m}^3$ ，现在阿诺的密度是 $1\,750\text{kg/m}^3$ 。那么到底阿诺是什么做的呢？铝的密度是 $2\,700\text{kg/m}^3$ ，钛的密度是 $4\,500\text{kg/m}^3$ ，我估计阿诺既不是纯铝也不是纯钛的，四分之一钛倒是有可能。或者他就是由某种未来物质构成的，别忘了，他是“魔鬼终结者”啊。这下终于说得通了。不过他没办法竞选美国总统了，因为要竞选总统，候选人必须是人类，是通过自然出生的美国公民。

除了阿诺，其它人都应该不是由未来物质构成的吧，不过，婴儿安全车座的制造厂商可能不这么想。我不是有意要攻击生产婴儿车座的行业。我肯定不少人是很喜欢这种东西的。在我看来，把婴儿车座拿出汽车，只有两种情况比较有利。第一种是在餐馆，婴儿车座能放进餐馆的儿童用餐椅里；第二种就是零售店，因为婴儿车座能放进购物车里。

不管是餐馆还是零售店，大人都需要用双手，婴儿车座确实能省不少事。其他情况下，我倒觉得抱着婴儿比提着婴儿车座更便当。为什么我会这么说呢？这些时髦的车座有什么问题吗？其实，这里还是物理问题，还是有关于重心的问题。

如果你曾经提过这种婴儿车座，下图中大人的姿势，你一定不陌生。



婴儿车座是有重量的，所以有一个作用于它的重力，因为车座不可能直接提在大人的脚的正上方，所以它一定会产生一个非零的扭矩。这个扭矩必须要和另外一个方向的扭矩相抵消。我是亲眼看到一些大人是怎么提

车座的，特别是体型不大的人，他们需要更多地增加自己这边的扭矩，才能产生一个相抵消的扭矩。我知道你是怎么想的了，这幅图看起来不太真实。说的没错。图中的人应该不会微笑。提着这么一个笨重的东西，谁还笑得出来呢。你大概终于明白了手提婴儿车座的问题所在了吧。想好好走路，能行吗？要是你不是侧边提着，而是在人的正前方双手提婴儿车座呢？如果是那样的话，你大概就要向后倒着才行，那种姿势估计也很别扭吧。

要是婴儿安全座椅能够再轻一点（当然安全性上不能打折扣），或者我们能制造出“钛人”，那一切就好办了。如果这些都不现实，那么我还是建议用婴儿背兜。用婴儿背兜的好处就在于婴儿更靠近你的双脚，那么大人就不用向反方向倾斜了。

人下落的速度能比音速快吗?

2012 年 10 月 14 日, 菲利克斯·鲍姆加特纳^①干了一件了不起的事情。他乘坐氢气球到达 128 000ft 的高空, 然后纵身一跳, 4 分多钟后他打开降落伞, 最后降落在新墨西哥州罗斯维尔附近的开阔地带。这就是红牛公司^②赞助的极限跳伞。这次极限跳伞和 1962 年乔·凯腾格的 102 000ft 的极限跳伞很相似, 都是很了不起的。

关于极限跳伞有不少问题要回答, 咱们这就开始吧。

大多数媒体会问的第一个问题就是: 我们从这样一次极限跳伞中能学到什么科学知识? 我可不认为问这样的问题很高明。这足以表明人们对科学的本质还是存在误解的。我认为, 已故的大物理学家理查德·费曼^③对此有一个很好的回答 (尽管他说的是物理, 不是极限跳伞):

① 菲利克斯鲍姆加特纳 (Felix Baumgartner), 奥地利人, 极限运动员。曾是美军跳伞表演队员, 多年从事飞机和摩天楼上跳伞表演, 达 2 500 次。他背后捆绑碳纤维翅膀以滑翔方式飞越英吉利海峡, 成为飞越英吉利海峡第一人。

② “红牛” (Red Bull) 是全球首先推出且被人熟知的能量饮品之一。

③ 理查德·费曼 (Richard Feynman), (1918 年 5 月 11 日 - 1988 年 2 月 15 日), 美国物理学家。1965 年诺贝尔物理学奖得主。

“物理就像爱情，确实会有一些实际的结果，但不是我们研究物理的全部理由。”

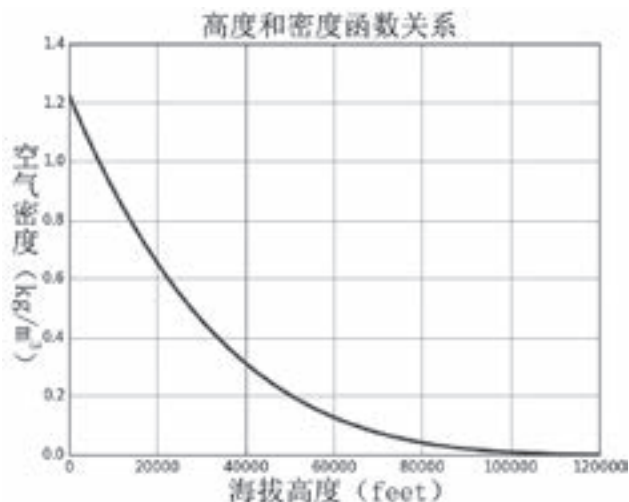
红牛极限跳伞也是一样的。我们能从一次极限跳伞中学到什么吗？当然会，我们从这类活动中总是会学有所得，但是学习新知识只是这种活动的副产品，也就是说我们不是为了科学研究才去极限跳伞的，而是因为我们是活生生的人，人就是会去做那些稀奇古怪乱七八糟的事儿，比如我们画画、我们搞音乐、我们从气球上往下跳等等。作为人我们不需要理由，但是说不定无事可干时，我们不妨也可以为做人找点理由。

现在回到物理问题上来。菲利克斯是从外太空起跳的吗？我估计问题的答案取决于我们如何定义“外太空”，大概“外太空”最通用的定义是“没有空气的区域”。可是地球的大气层不是在某个区域就突然消失了的，从太空到大气层的过渡更像是山坡而不是台阶。

大家可能需要一些数据来帮助理解。大多数人都认为国际空间站是在外太空的，空间站在距离地球 300km 的轨道上环绕地球运行。我们可以这么认为，从 300km 到距地球 100km 的区域都应该算是太空，这么说来，极限跳的 120 000ft 就太近了些，别误会我，这个距离还是很高很高的。

处在这样高度位置的大气的密度有多大？在地球表面，空气的密度约为 1.2kg/m^3 ，而在 120 000ft 上空，大气的密度则是 $7.3 \times 10^{-4}\text{kg/m}^3$ 。因为人人都喜欢看图表，这里我就用一张图来表示海拔高度与空气密度之间的函数关系。

如果你还是要把极限跳的高度定义为“太空”，也不算太离谱，因为从那么高往下跳，肯定需要穿太空服的，所以就算是太空吧。



那么真的乘气球能到达那样的高度吗？最先想到的当然是乘火箭，但是为什么不乘飞机呢？嗯，大多数飞机的运行是需要空气的。通过之前的问题，我们已经知道，那样的高度空气是不多的，所以除了火箭就是选择气球了。但是，等一下，不是说过那样的高度空气不多吗，气球不是也需要空气吗？呃，如果气球足够大，还是能行的。

在某一个高度的气球，一般有两种力作用在气球上：一个是重力，一个是浮力。浮力怎么来的？空气与气球的底部摩擦要比空气与气球的顶部摩擦多，这就产生了浮力。气球越大，摩擦越大，浮力也就越大。但是，有个问题。倘若气球里装的是一般的空气，作用于气球的重力就会随着气球大小的增大而增加。所以，关键是要让气球里充满比空气密度小的气体，这种情况下，当然首选氢气咯。

从上文我们可以得知，120 000ft 高空的空气密度是很低的，空气密度低，空气和气球之间的摩擦就不是很大，所以我们就需要一个很大很大的气球（当然重量也比较大）。这个气球直径大约为 80m，能够装载一个极

限跳运动员和一个运动员赖以维生的太空舱，一直升到 120 000ft 的高空。

在那个高度，空气是很稀薄的，那么重力情况呢？重力主要取决于物体（特别是天体）之间的距离。如果我们把一个行星的中心和一艘宇宙飞船之间的距离加倍，那么重力就只有原来的四分之一。关键是怎么理解行星的中心。所以如果我离地表 10ft 高，假设把这个高度加倍到 20ft，那么我离地球的中心有多远了呢？答案是根本没有移动。原因呢？因为地球太大太大了，它的半径大约 $6.38 \times 10^6 \text{m}$ ($2.09 \times 10^7 \text{ft}$)。

在地球表面，重力是没有什么变化的。那么如果是离地表 120 000ft 的高空呢？在地球表面，1kg 重量的物体受大约 9.8N 的重力作用；在 120 000ft 的高空，重力就是 9.68N，是地表上重力的 98.8%。那么答案就是地表和 120 000ft 高空的重力相差不大。

红牛极限跳伞，让人感觉最酷的就是人有可能以超音速的速度下落。嗯，音速是多少来着？如果大家还记得在初级物理里学的，音速一般被表述成 340m/s，这是常温常压下的音速值（近地球表面）。音速和光速不一样，它不是常量。声音是空气分子之间相互作用产生的，所以就要取决于空气分子的情况，其实并不简单。但是有个模型，它认为音速和周围温度成一定比例，这只是一个模型，不过很管用。

你升得越高，气温（在一定范围内）越低。对于空气密度，我们也采用刚才那个模型，如果能测得温度，那么就能算出音速。120 000ft 的高空中，音速只有 200m/s。

菲利克斯下落的速度真的比音速还快吗？答案是肯定的（或者说，肯定的可能性非常大）。为了搞清楚，我们一起来看看菲利克斯离开气球后的那一瞬间，有哪些力作用在他身上。因为那一刻他还没有真的发生位移，而且那样的高空空气也很稀薄，作用在他身上的只有重力。重力的方向向

下，所以他开始越来越快地向下落。

一旦他开始下落，就有了空气阻力。如果你把手伸出正在行驶的汽车的车窗外，你就能感觉到什么是空气阻力。你速度越快，阻力也越大。但是，空气阻力也取决于空气密度。所以，下落的开始阶段，向下的重力比向上的空气阻力大得多，这就意味着合力方向向下，因为他的运动方向是向下的，所以向下的合力增加了他下落的速度。然而，空气阻力还是使得合力小了一些，所以他下落速度的增幅也并不是那么大。

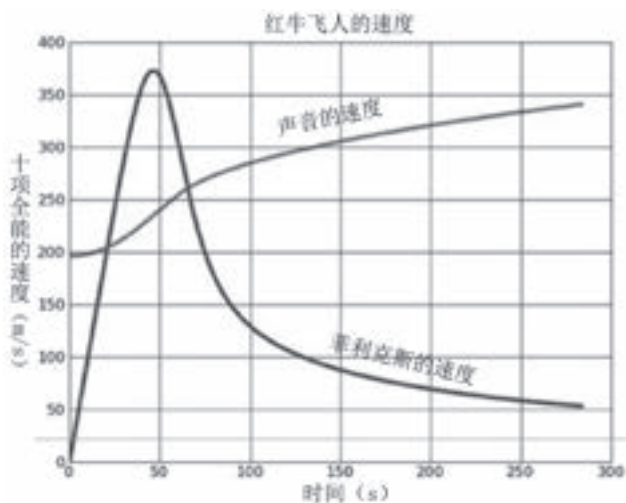
菲利克斯不可能一直加速下落。最后，他的速度已经非常快了，随着他的下落，空气密度也开始增加。在某一个点上，空气阻力会比重力大。一旦空气阻力大于重力，合力方向就是向上的，但他还是向下运动的。但是合力方向与物体运动方向相反时，物体的运动就减慢了。

菲利克斯的减速下落，一直持续到空气阻力和重力变得相当。这时合力为零，菲利克斯既不加速也不减速，他就匀速下落，这叫作终速，即自由沉降速度。

我知道我还是没有回答问题。和音速的关系呢？说实话，确定确切的速度不是那么简单的事情。最好把整个过程化解成许许多多小的步骤，然后由电脑来计算。

我制作了一张菲利克斯的速度和时间的函数图表，其中有一条曲线便是他所在高度的音速情况。

等一下，不是说极限跳伞运动员（即延缓张伞跳伞运动员）的下落速度是每小时 120 英里吗？是的，极限跳伞运动员的极限速度是大约每小时 120 英里，不过，我们的菲利克斯和一般的极限跳伞运动员还不大一样。他下落的整个过程，大气密度和空气阻力是在变化的。在他下落的最初阶段，他呆在同一空气密度的时间不够长，不足以使得他的下落速度降到极



限速度。当然，后来他还是达到极限速度了。最重要的是，通过图表和计算，我们发现菲利克斯很快就超过了声音的速度。菲利克斯成为超音速极限跳伞运动员了。

实际上，我们并不需要依赖模型和估算，红牛极限跳伞是实实在在发生了的，专业团队精确地测量了下落中的菲利克斯的速度。最终，菲利克斯达到了 1.25 马赫的最高速度，比音速快了 1/4 呢。

太精彩了，菲利克斯，太精彩了！

延伸阅读



书 名：《写给全人类的数学魔法书》
作 者：【日】永野祐之
出版社：新世界出版社
定 价：32.00 元

- ☆ 创建全日本“最佳数学培训学校”之一的校长——永野祐之的全新力作！
- ☆ 百度 10 万会员贴吧“数学吧”吧主幸福_狐狸真诚推荐！台湾 180 余所中学指定阅读！
- ☆ 冲破惯常的数学学习法，告诉你为什么“越是死记硬背公式，就越学不好数学”。
- ☆ 对数学公式和定理进行推理验证，启发读者抛开刻板的学习方法，真正了解数学，对数学开窍。
- ☆ 详尽介绍 10 种基本解题思路，只要熟练掌握，就能轻松应对各种类型的数学题，尤其是难度较高的高考真题！



书 名：《数学好的人是如何思考的》
作 者：【日】永野祐之
出版社：北京时代华文书局
定 价：38.00 元

- ☆ 创建全日本“最佳数学培训学校”之一的校长——永野祐之的经典作品！
- ☆ 系统地整理了基础数学知识，并从中总结了隐藏在其背后、几乎可以解决所有数学问题的 7 种思考技巧。
- ☆ 不仅可以帮助你在数学科目上轻松突破，还可以帮助已经进入社会的成年读者应对生活中的问题，大大提升思维能力，让你的人生受益无穷！
- ☆ 以简明的初中数学知识为框架，同时配以幽默的漫画插图，让你的学习过程轻松有趣，并发现“数学原来这么有用！”



书 名：《这才是最好的数学书》
作 者：【日】笹部贞市郎
出 版 社：北京时代华文书局
定 价：68.00元（全2册）

日本“数学之圣”“武藏学院”创始人笹部贞市郎传世作品！
探究数学本源之作，畅销 40 年，日本有史以来最畅销的数学经典！
台湾 100 余所重点中学选定阅读！

你还在“谈数学色变”？笹部贞市郎先生将换个角度与你聊数学，
带领你发现数学的魅力，绝对让你大呼“妙哉”，彻底颠覆对数学的
看法！

本书中，只有小学学历的数学大师告诉你：

- ☆ 古埃及和古巴比伦的数学长什么样；
- ☆ 在古代，数学好可以当官；
- ☆ 时间是怎么推算出来的；
- ☆ 古印度的数学题都是诗歌形式的；
- ☆ 古代地图上的距离是如何测量出来的；
- ☆ 《易经》中的卦象和二进制有关；
- ☆ 光靠数学计算，如何发现新行星；
- ☆ 数学“读心术”怎么玩……



书 名：《如何唤醒数学脑》
作 者：【日】永野裕之
出 版 社：北京时代华文书局
定 价：38.00元

- ☆ 继《写给全人类的数学魔法书》《数学好的人是如何思考的》之后，
全日本“数学强劲私塾”校长永野裕之又一力作！
- ☆ 做数学题的目的是为了训练数学思维，一旦掌握数学思维，解题就
很简单了。
- ☆ 那些把一道题用不同方法做很多遍的人，之所以往往比把很多道题
只做一遍的人成绩好，关键在于他们掌握了数学思维。
- ☆ 本书将告诉你如何通过学数学来培养自己的逻辑思维能力，如何通
过掌握“整理、顺序、转换、抽象化、具体化、逆向思维和对称性”
等 7 种思维方式来“解决几乎所有数学问题”！
- ☆ 数学力是所有人人生俱来的能力，任何人都可以把数学思维用于日
常生活，用数学逻辑思考问题不需要任何天分，我们每个人都可以
做到！