

潮汐能并非可再生能源

刘正荣

ZJL@CS.Stanford.EDU

此内容由人工智能(AI)辅助翻译, 若未达意, 请查阅[原文](#)

摘要

将潮汐能归类为可再生能源是一种错误认知。事实上, 大规模开采潮汐能可能带来比化石燃料更为严重的环境影响。潮汐产生于地球自转与月球和太阳对海水的引力相互作用。尽管潮汐现象在地球观察者看来似乎在移动, 但潮汐隆起相对于这些天体几乎保持固定。这种相对运动的潮汐隆起施加在地球自转上一个制动力矩, 使其自转动能逐渐耗散、昼长逐渐增加。在过去的4亿年中, 这一自然过程已将地球自转速度从每年约420天减缓到如今的365天。利用潮汐能将进一步消耗地球的自转动能、加速这一减速过程。本研究通过量化分析, 表明即便只是适度依赖潮汐能, 也可能在较短的地质时间尺度上造成显著的环境破坏。根据过去50年全球能源消耗趋势推算, 若利用潮汐能仅满足1%的全球能源需求, 地球可能在大约1000年内与月球发生潮汐锁定。在这种状态下, 一天的长度将与一个朔望月相同, 一侧半球将持续暴露在阳光下并经历极端升温, 而另一侧则陷入永久黑暗和严寒。如此极端的温度反差将使地球大片区域无法居住, 并可能引发大规模生态系统崩溃, 最终导致地球上大多数生命的灭绝。

前言

气候暖化是人类大量消耗化石燃料所带来的后果, 已经引起了公众的广泛关注。作为应对之策, 潮汐能逐渐成为替代能源的热门话题, 吸引了越来越多的关注。相关技术的进步也使得开发潮汐能以补充日益增长的能源需求成为可能。然而, 出人意料的是, 潮汐能并不是一种可再生能源。恰恰相反, 利用潮汐能可能带来比全球变暖更加严重的环境问题。

许多人误认为潮汐能是一种可持续的绿色能源^[1-4]。试想象一下, 如果我们在一个世纪前谈论全球变暖, 可能会遭遇普遍的质疑。同样地, 当我在1990年向一群研究生介绍替代能源时, 便将潮汐能归类为“不可再生能源”, 这场演讲也引发了热烈的讨论与质疑。反复被提及的问题是: “开发潮汐能怎么会危害环境?” 自那时起, 我便感到有责任深入说明这一问题, 并将这一观点传达给更广泛的公众。

1993年, 第一款网页浏览器Mosaic问世, 我随即建立了一个专题网站来介绍这一问题。但最初并未引起太多关注, 直到几年后Google将这些网页收录。一些潮汐涡轮公司甚至要求我下架相关内容, 理由是这些信息对其商业前景不利。遗憾的是, 在我离开原先托管网站的学校后, 该站点未能得到妥善维护。如今, 当我搜索“潮汐能”时, 已经找不到自己撰写的内容, 取而代之的是许多将潮汐能与风能、太阳能等绿色能源并列的网站。

随着气候暖化问题日益严峻, 各国政府政策推动各行各业寻找替代化石燃料的绿色能源。潮汐能因此被列为候选选项之一, 然而这实际上是一个错误的方向。正因如此, 我比以往任何时候都更感到有义务和紧迫感, 在一切为时过晚之前, 向公众发出警示。接下来的章节中, 我将尽可能以通俗易懂的方式, 结合相关的物理与数学原理, 详细说明潮汐原理, 以及不当利用潮汐能隐藏的环境风险。

潮汐能的采集

潮汐是海平面周期性的升降现象，几乎在所有沿海地区都能观察到。潮汐能是一种水力发电形式，它将潮汐中蕴含的能量或势能转化为可用的动力，主要用于发电。最常见的潮汐能采集方式，是通过修建带有拦河坝(堤坝)的人造蓄水库^[5]。在涨潮时，海水通过水道流入水库；随后关闭水道闸门，将海水拦截在坝内，从而在高、低潮之间形成水位落差。在退潮期间，水库中的水通过水压驱动涡轮机发电。

除了蓄水发电，还有其他技术可用于开发潮汐能。例如，**潮流发电机**利用海水流动的动能驱动涡轮机，其原理类似于风力发电^[6]。在狭窄水道，如海峡或港湾入口等地，常形成高速潮流，是安装潮流发电设备的理想地点。**动态潮汐能**则利用潮汐流中势能与动能的相互作用：在沿海地区修建一条长坝直插海中，制造潮汐相位差，从而在浅海区域产生显著的水位差。这种结构尤其适用于中国、韩国等具有强沿岸振荡潮流的地区。

世界首座大型潮汐发电站是法国的**朗斯潮汐电站**，于1966年投入运营。目前全球规模最大的潮汐电站是韩国的**始华湖潮汐电站**，自2011年启用以来，装机容量达254兆瓦。随着化石燃料日益枯竭，未来预计将建设更多大型、效率更高的潮汐发电站，以满足全球不断增长的能源需求。然而，正如全球气候暖化带来的问题，如果缺乏科学评估与有效监管，另一场环境危机可能难以避免。

潮汐是如何形成的？

潮汐由月球和太阳的引力与地球自转共同作用产生。如图1所示，这种作用在地球两侧形成潮汐力，拉动海水形成潮汐隆起。随着地球自转，这些潮汐隆起相对于月球和太阳基本保持静止。因此，地面上的观察者会周期性地经历海平面的涨落。

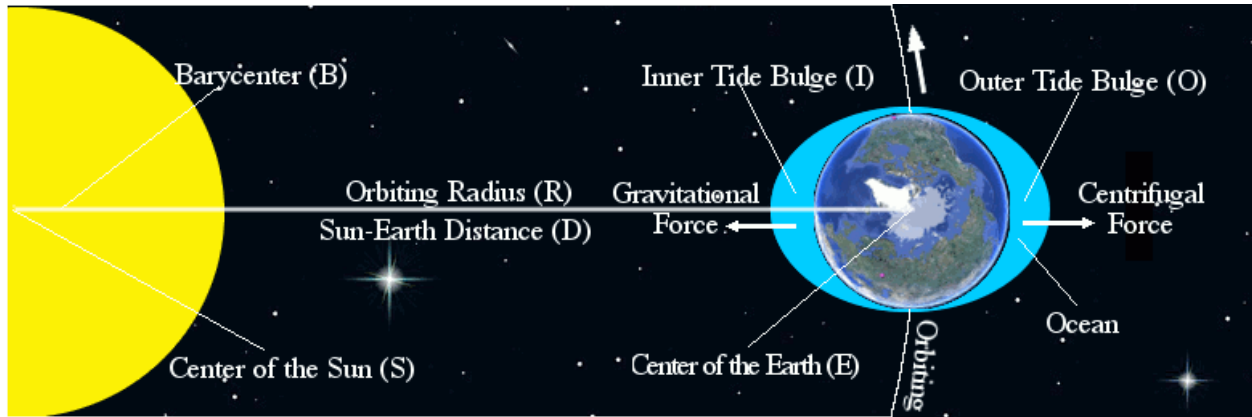


图1:潮汐的形成

下面，我们将进一步探讨潮汐力背后的物理机制。引力是两个物体之间的相互吸引力，其大小由**牛顿万有引力定律**描述^[7]：

$$(1) \quad F_g = \frac{GM_1M_2}{D^2}$$

这里， F_g 表示引力， G 是引力常数， M_1 和 M_2 分别是两个物体的质量， D 是两物体质心之间的距离。该引力使地球保持绕太阳的轨道运行。地球绕太阳的运动产生离心力，这是一种惯性力，作用于轨道上的物体，推动其远离轨道中心：

$$(2) \quad F_c = mRW^2$$

这里， F_c 代表离心力， m 是物体的质量， W 是物体的轨道运动角速度， R 是轨道半径。从北极上空俯视，地球其实绕着质心B运转，该质心是太阳与地球质量的共同中心，位于太阳内部。半径 R 表示地球中心E到质心B的距离， D 则是地球中心E到太阳中心S的距离，略大于 R 。地球之所以能够稳定地绕太阳运行，是因为引力 F_g 与离心力 F_c 相互平衡。具体而言，如果将地球视为位于中心的质点质量 m ，则引力 F_{gc} 等于离心力 F_{cc} 。因此，可以得到以下方程：

$$(3) \quad mRW^2 = F_{cc} = F_{gc} = \frac{GMm}{D^2}$$

重新整理这个方程得到：

$$(4) \quad RW^2 = \frac{GM}{D^2}$$

现在，考虑轨道内侧（即朝向太阳一侧）距离轨道中心为 $R-r$ 的质点质量 m_i 。此时，其公转半径为 $R-r$ ，引力作用距离为 $D-r$ ，其中 r 为地球半径。由于以下不等式，质点 m_i 所受的引力 F_{gi} 大于离心力 F_{ci} ：

$$(5) \quad F_{ci} = m_i(R-r)W^2 < m_iRW^2 = \frac{GMm_i}{D^2} < \frac{GMm_i}{(D-r)^2} = F_{gi}$$

其中，中间的等式基于上面的公式(4)，第一个等式来自离心力公式(2)，最后一个等式则依据引力公式(1)。因此，该不等式可进一步简化为：

$$(6) \quad F_{ci} < F_{gi}$$

引力与离心力之差($F_{gi} - F_{ci}$)被称为潮汐力，根据上述不等式(6)，该值大于零($F_{gi} - F_{ci} > 0$)。这一力将海水向太阳方向拉动，形成图1中所示的内侧潮汐隆起。类似地，对于轨道外侧的质点质量 m_o ，其绕转半径为 $R+r$ ，引力作用距离为 $D+r$ 。在这种情况下，由于以下不等式，离心力 F_{co} 大于引力 F_{go} ：

$$(7) \quad F_{co} = m_o(R+r)W^2 < m_oRW^2 = \frac{GMm_o}{D^2} < \frac{GMm_o}{(D+r)^2} = F_{go}$$

或者

$$(8) \quad F_{co} < F_{go}$$

潮汐力($F_{co} - F_{go} > 0$)将海水推离太阳方向，形成外侧的潮汐隆起。这些潮汐隆起相对于地球和太阳的连线保持固定。随着地球绕自转轴旋转，隆起相对于地球运动，形成地面观察者所感受到的潮汐现象，这就是所谓的太阳潮汐。

月球同样对地球施加类似的潮汐力，产生月潮。由于月球距离地球比太阳更近，月潮的影响通常大于太阳潮。当地球、月球和太阳三者处于同一直线时，太阳潮与月潮叠加，形成最大潮汐效应，称为大潮或王潮。

地球自转减速

地球的自转速度正在自然地逐渐减慢^[8]。为了理解这一过程，我们可以借鉴汽车刹车系统的工作原理。如图2所示，汽车刹车系统中，刹车转盘安装在车轮上，刹车钳固定在车身上。正常行驶时，刹车片与转盘保持分离，车轮自由旋转；当踩下刹车踏板时，活塞推动刹车钳夹紧转盘，刹车片产生摩擦，令汽车减速或停车。

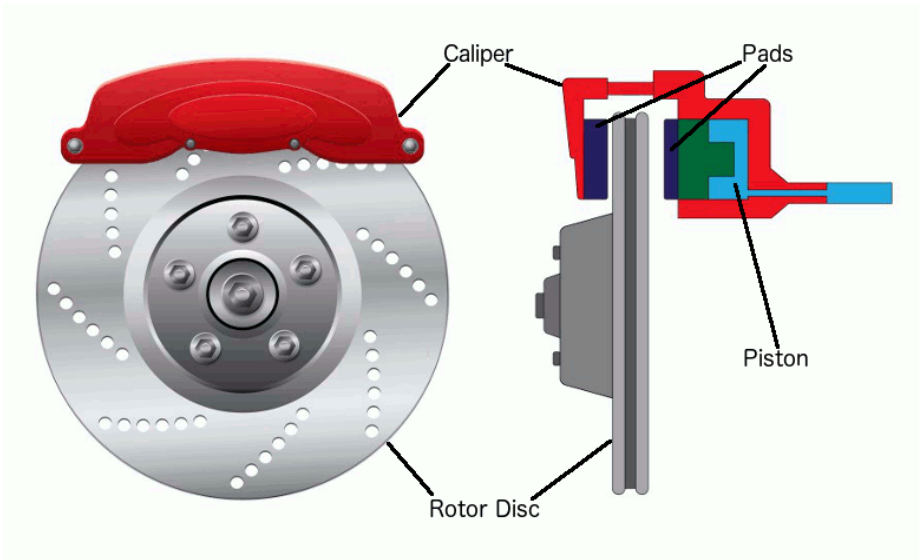


图2: 汽车刹车系统

在这一类比中，刹车转盘代表旋转的地球，而刹车片则类似于相对静止的潮汐隆起。随着地球向东自转，潮汐隆起相对于地球向西移动。潮汐流即海水相对于地球的运动，类似于刹车片与转盘之间的相对滑动。海水的黏性造成潮汐流与海底之间产生阻力，从而逐渐减缓地球的自转速度。在北半球，陆地阻碍了潮汐隆起的运动，使地球自转减速更加显著。由于陆地和岛屿的海岸线复杂，潮汐流的方向也因此变得多变复杂。

因此，地球的自转能量通过潮汐作用逐渐流失。在地球漫长的历史进程中，这一自然过程使得地球自转速度逐渐减慢，导致每年的天数逐渐增加，这一现象已通过珊瑚化石研究得到了证实。

此外，地球对月球施加的潮汐加速效应会将地球的自转能量传递给月球，推动月球逐渐远离地球。该过程同样导致地球自转减速，但其影响远小于潮汐作用，仅占地球自转能量损失的约4%^[9-11]。

潮汐锁定

你见过月球的背面吗？月球总是以同一面朝向地球，这种现象称为潮汐锁定，正是由潮汐效应引起的^[12-13]。正如月球对地球施加潮汐力，地球也对月球施加潮汐力。尽管月球表面没有海水，地球的潮汐力仍会在月球固体部分产生潮汐隆起，使月球形状被拉伸成类似橄榄球的形状。科学家称这种现象为“固体潮汐”。这一效应逐渐减缓了月球的自转速度，最终使月球的自

转周期与其绕地球的公转周期同步，从而使月球始终以同一面朝向地球^[14]。引潮力不仅使自转减速也阻止其加速，这一现象被称为潮汐锁定或引力锁定，也称为自转同步或自转捕获。同理，地球的自转也将逐渐减慢，最终与月球实现潮汐锁定。届时，地球与月球将面对面，共同绕它们的质心旋转，形成一个双星系统^[15]。

自转动能

正如运动物体具有动量和动能，旋转物体也拥有角动量和旋转能量。地球的总旋转能量约为 [2.138x10²⁹](#) 焦耳。要估算地球的旋转能量，首先需计算地球的转动惯量。对于一个实体球体，转动惯量 I 可通过以下公式计算：

$$(9) \quad I = \frac{2}{5}MR^2$$

这里，R 表示球体的半径，地球的平均半径约为 6.371×10^6 米^[16]。M 是质量，目前对地球质量的最佳估计为 5.9722×10^{24} 公斤^[17]。根据上述公式对转动惯量进行简单估算，结果约为 9.696×10^{37} 公斤平方米。然而，该公式适用于均匀球体，而地球内部由于重力作用和对流交换，高密度物质逐渐沉入地核。因此，地球的实际转动惯量应小于这一估算值。更准确的地球转动惯量估计值为 [8.04x10³⁷](#) 公斤平方米。有了这个数值，我们现在可以计算地球的总旋转能量：

$$(10) \quad K = \frac{1}{2}IW^2$$

这里，K 表示旋转动能，W 为角速度。地球的自转周期约为 23.93 小时，对应的角速度为 7.29×10^{-5} 弧度每秒。结合已知的转动惯量和角速度，利用公式 (10) 计算，可得地球的总旋转能量约为 2.138×10^{29} 焦耳。

人类还有多长时间？

汽车刹车时，汽车的动能通过刹车转盘与刹车片之间的摩擦转化为热能。同理，地球的旋转能量因潮汐与海底之间的摩擦逐渐耗散并转化为热量。由于地球的旋转能量有限，预计将在数十亿年内耗尽，最终导致地球自转与月球发生潮汐锁定。

一个粗略估算地球旋转能量减少速率的方法是研究珊瑚礁的季节性和日生长层，这些生长层类似于树木的年轮。科学家研究了早期至中期志留纪（约 4.44 亿至 4.19 亿年前）的珊瑚化石，发现当时一年约有 [420](#) 天。中期泥盆纪早期（约 4.19 亿至 3.58 亿年前）一年约有 410 天，早期石炭纪（约 3.5 亿年前）的研究显示一年约有 [385](#) 天。更多相关研究见 [Deines 和 Williams](#) 著作。

过去 4 亿年中，地球质量和轨道变化不大，因此合理假设地球公转周期基本稳定，年天数减少主要源于自转速度减慢。根据上述数据，约 4.3 亿年前地球角速度约为 8.39×10^{-5} 弧度/秒，利用公式 (10) 计算当时的总旋转能量约为 2.83×10^{29} 焦耳。

目前地球旋转能量估计为 2.138×10^{29} 焦耳，过去 4.3 亿年间能量损失约为 6.92×10^{28} 焦耳，平均每年损失约 1.73×10^{20} 焦耳。若按线性速率计算，现有旋转能量将在约 12.4 亿年内耗尽。但由于摩擦力与相对速度的平方成正比，随着自转减慢，能量耗散速率应逐渐降低。因此，更准确的估算需考虑旋转速度递减对耗散速率的影响。因潮汐相对运动速度与地球自转速度成正比，能量耗散率应与自转速度的平方成反比。

$$(11) \quad \frac{dK}{dt} = -aW^2$$

其中, a表示旋转能量的耗散系数。结合公式(10), 我们可以建立以下微分方程:

(12) $\frac{dK}{dt} = - \frac{2a}{I} K$

或

(13) $\frac{dK}{dt} = - bK$

其中, b = 2a/I。接下来, 对该微分方程进行求解如下:

(14) $\ln(K) = c - bt$

其中, c为积分常数。假设地球将在未来某一年t₀与月球实现潮汐锁定。届时, 由于地球和月球将作为一个双星系统绕其共同质心每月旋转一周, 一年将大约仅有12天。到那时, 地球的角速度将减至0.24x10⁻⁵弧度/秒, 相应的自旋转能量约为2.32x10²⁶焦耳。若设地球从现在起还需x年才能完成与月球的锁定, 则方程(14)可应用于三个时间节点: 未来的锁定时刻t₀, 当前时刻, 以及4.3亿年前的过去时刻, 分别表示如下:

(15) $\ln(2.32 \times 10^{26}) = c - bt_0$

(16) $\ln(2.138 \times 10^{29}) = c - b(t_0 - x)$

(17) $\ln(2.83 \times 10^{29}) = c - b(t_0 - x - 430,000,000)$

解方程组(15)、(16)和(17), 以求得x的值:

(18) $x = 430,000,000 \times \frac{\ln(\frac{2.138 \times 10^{29}}{2.32 \times 10^{26}})}{\ln(\frac{2.83 \times 10^{29}}{2.138 \times 10^{29}})} \approx 10,468,000,000$

因此, 根据历史能量耗散的速率推算, 地球将在约104.68亿年后与月球发生潮汐锁定。这一时间跨度应足以让人类未来的世代有充分机会研发应对或规避这一潜在灾难的解决方案。

千年内摧毁地球

然而, 如果人类开始开发潮汐能, 历史将会发生剧烈改变。一旦我们开始利用潮汐能, 地球自转的减缓将被显著加速。仅仅为了提供全球能源需求的1%, 就可能在大约1000年内使地球与月球发生潮汐锁定。以下是这个时间的估算过程。

首先, 我们来估算采集能量的速度。2013年全球能源消耗约为5.67x10²⁰焦耳^[18]。在过去50年中, 这一数值年均增长超过2%。而全球经济在此期间的[年均增长率约为3%](#), 这需要与能源需求增长相当。考虑到工业能效的提升, 假设未来全球能源消耗继续以2%的年均速率增长, 是一个合理的前提。

在这一增长趋势下，若我们利用潮汐能来提供1%的全球能源需求，地球每年将损失约 5.67×10^{18} 焦耳的旋转能量。假设在未来N年内，地球的旋转能量从当前的 2.138×10^{29} 焦耳降低至潮汐锁定时的 2.32×10^{26} 焦耳，我们可以利用公式(19)和(20)对N进行估算：

(19) $2.138 \times 10^{29} - 2.32 \times 10^{26} = 5.67 \times 10^{18} \times (1.02^1 + 1.02^2 + \dots + 1.02^N)$

或

(20) $2.136 \times 10^{29} = \frac{5.67 \times 10^{18} \times (1.02^{N+1} - 1.02)}{0.02}$

解方程(20)可得 $N \approx 1031$ 年。因此，在这种能源消耗速率下，地球将在约1031年后与月球发生潮汐锁定。尽管这一估算较为粗略，但它清楚地揭示出：一旦人类开始大规模利用潮汐能，将可能极大加快地球自转减缓的速度。

地球宿命

潮汐摩擦的最终结果是地球自转的消失，类似于月球目前的状态。最终，地球和月球将相互潮汐锁定，作为一个双星系统绕共同质心每月旋转一周。届时，地球上的一天将与现在一个月的时间相同。

由于潮汐加速作用，月球正以每年约38.247毫米的速度远离地球，这使得地月系统的转动惯量增加，旋转速度减慢。结果，一个月的时间会比现在还要稍长，因此一年中的月份数将少于12个月。

当地球与月球发生锁定后，地球上的一天将比现在长30多倍。地球的一侧将长时间面向太阳，导致极高的温度，而另一侧则长时间处于极寒之中。这种巨大的温差将产生强烈的气压梯度，导致强劲的气流，形成巨大的风暴。这种严酷的环境将使大多数地球生命难以生存，许多物种可能面临灭绝。

预言

基于这一认知，有一项重要预测认为地球内核的旋转速度快于整体地球自转，这一现象被称为内核超转动。我们对地球内部结构的了解主要来源于对地震波的研究。当地震发生时，地震波会穿过地球，主要有两种类型：纵波(P波)，其地面振动方向与波的传播方向一致；以及横波(S波)，其振动方向垂直于传播方向。由于S波需要介质具有剪切应力，而液体无法承受这种变形，S波无法通过液态介质传播。

液态外核的存在使得地核与地幔的旋转可以相对独立。随着潮汐力作用拖拽地幔和地壳，内核的减速可能与地幔不同步，导致内核旋转速度快于地幔。由于外核的粘滞性，内核旋转速度会逐渐减慢，内核与地幔之间的转速差异也会随着地球自转的减缓而减小。

多项观测结果支持了这一预测。来自拉蒙特–多尔蒂地球观测站的科学家宋晓东和保罗·理查兹提出，内核的超转动速率约为每年0.4至1.8度^[19]，另一项研究则估计该速率约为每年3度^[19]。

结论

开发利用潮汐能可能带来的风险甚至超过燃烧化石燃料。伴随全球经济的快速发展, 工业不断推动高效机械与基础设施的建设, 能源需求也持续攀升。若为了满足这一需求而大规模开发潮汐能, 地球的旋转能量可能在短短1000年内被耗尽, 其速度远远快于自然耗散过程。一个世纪前, 几乎没有人能相信使用化石燃料会引发全球变暖; 如今, 这已成为一场严重的环境危机。历史或将重演。目前最紧迫的问题在于, 许多人仍未意识到潮汐能的潜在危害, 仍误以为它是安全、可再生的能源。为了保护地球, 我们必须停止对潮汐能的开发, 给予未来世代更多时间和机会, 去探索更可持续的解决方案, 避免这场迫在眉睫的灾难。

版本更新

- [05/30/2019: 本文在斯坦福初始发布](#)
- [11/02/2025: 在Zenodo上发表](#)
- [11/17/2025: 摘要更新版](#)
- [12/18/2025: 增加相关文章摘要连接](#)

相关文章摘要链接

- <https://cs.stanford.edu/people/zjl/abstractc.html>, [PDF](#)
- <https://sites.google.com/view/zjlc/>, [PDF](#)
- <https://xenon.stanford.edu/~zjl/abstractc.html>, [PDF](#)
- <https://doi.org/10.5281/zenodo.17972005>, [PDF](#)

相关文献

- [热力学中的错误概念 \(PDF: DOI\) \(中文: DOI\)](#)
- [克鲁克斯辐射计旋转的驱动机制 \(PDF: DOI\) \(中文: DOI\)](#)
- [布朗运动的原动力 \(PDF: DOI\) \(中文: DOI\)](#)
- [温度是分子平均动能的标志吗? \(PDF: DOI\) \(中文: DOI\)](#)
- [绝对零度的本质 \(PDF: DOI\) \(中文: DOI\)](#)
- [能量转换三角 \(PDF: DOI\) \(中文: DOI\)](#)
- [热膨胀是由于粒子振动引起的吗? \(PDF: DOI\) \(中文: DOI\)](#)
- [超流体不是流体 \(PDF: DOI\) \(中文: DOI\)](#)
- [为什么相变温度保持恒定 \(PDF: DOI\) \(中文: DOI\)](#)
- [摩擦为何会产生热量? \(PDF: DOI\) \(中文: DOI\)](#)
- [简明熵概念 \(PDF: DOI\) \(中文: DOI\)](#)
- [熵可以减少 \(PDF: DOI\) \(中文: DOI\)](#)
- [回归原理 \(PDF: DOI\) \(中文: DOI\)](#)
- [金属中是否存在自由电子海? \(PDF: DOI\) \(中文: DOI\)](#)
- [电子通道: 导体超导统一论 \(PDF: DOI\) \(中文: DOI\)](#)

- [低温和高温超导统一理论 \(PDF: DOI\) \(中文: DOI\)](#)
- [LK-99的局限和意义 \(PDF: DOI\) \(中文: DOI\)](#)
- [地球磁场超导起源说 \(PDF: DOI\) \(中文: DOI\)](#)
- [关于质量的本质问题 \(PDF: DOI\) \(中文: DOI\)](#)
- [从万有引力定律到广义相对论的演化 \(PDF: DOI\) \(中文: DOI\)](#)
- [爱因斯坦质能方程的最简单推导 \(PDF: DOI\) \(中文: DOI\)](#)
- [如何理解相对论 \(PDF: DOI\) \(中文: DOI\)](#)
- [数学并非科学 \(PDF: DOI\) \(中文: DOI\)](#)
- [潮汐能并非可再生能源 \(PDF: DOI\) \(中文: DOI\)](#)
- [AI 知识污染 \(PDF\) \(中文\)](#)
- [DeepSeek pk ChatGPT \(PDF\) \(中文\)](#)

参考文献

1. DiCerto, J.J. (1976). *"The Electric Wishing Well: The Solution to the Energy Crisis"*. New York: Macmillan.
2. Evans, R. (2007). *"Fueling Our Future: An Introduction to Sustainable Energy"*. New York: Cambridge University Press.
3. Chang, J. (2008), ["Hydrodynamic Modeling and Feasibility Study of Harnessing Tidal Power at the Bay of Fundy"](#), Los Angeles: University of Southern California.
4. Martin-Short, R.; et al. (2015). ["Tidal resource extraction in the Pentland Firth, UK: Potential impacts on flow regime and sediment transport in the Inner Sound of Stroma"](#). Renewable Energy. **76**: 596–607. doi:[10.1016/j.renene.2014.11.079](#).
5. Minchinton, W.E. (1979). *"Early Tide Mills: Some Problems"*. Technology and Culture. **20** (4): 777–786. doi:[10.2307/3103639](#).
6. Lewis, M.; et al. (2015). *"Resource assessment for future generations of tidal-stream energy arrays"*. Energy. **83**: 403–415. doi:[10.1016/j.energy.2015.02.038](#).
7. Weinberg, S. (1972). *"Gravitation and cosmology"*. John Wiley & Sons. Quote, p. 192.
8. Zahn, J.P. (1977). *"Tidal Friction in Close Binary Stars"*. Astron. Astrophys. **57**: 383–394.
9. Murray, C.D.; Dermott, S.F. (1999). *"Solar System Dynamics"*. Cambridge University Press. p. 184.
10. Jean, O.D. (1995): *"Earth Rotation Variations from Hours to Centuries"*. In: I. Appenzeller (ed.): Highlights of Astronomy. Vol. 10 pp.17..44.
11. Schröder, K.P.; Smith, R.C. (2008). *"Distant future of the Sun and Earth revisited"*. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. **386** (1): 155–163. arXiv:[0801.4031](#).
12. Gladman, B.; et al. (1996). *"Synchronous Locking of Tidally Evolving Satellites"*. Icarus. **122** (1): 166–192. doi:[10.1006/icar.1996.0117](#).
13. Efroimsky, M. (2015). *"Tidal Evolution of Asteroidal Binaries. Ruled by Viscosity. Ignorant of Rigidity"*. The Astronomical Journal. **150** (4): 12. arXiv:[1506.09157](#).
14. Barnes, R. (2010). *"Formation and Evolution of Exoplanets"*. John Wiley & Sons. p. 248.
15. Ray, R. (2001). ["Ocean Tides and the Earth's Rotation"](#). IERS Special Bureau for Tides.
16. Chambat, B.V. (2001). ["Mean radius, mass, and inertia for reference Earth models"](#) Physics of the Earth and Planetary Interiors. **124**. pp. 234–253.

17. Pitjeva, E.V.; Standish, E.M. (2009). "*Proposals for the masses of the three largest asteroids, the Moon-Earth mass ratio and the Astronomical Unit*". *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*. **103** (4): 365–372. doi:[10.1007/s10569-009-9203-8](https://doi.org/10.1007/s10569-009-9203-8).
18. Desbrosses, N. (2011). "[World Energy Expenditures](#)", Leonardo Energy, Nov. 28.
19. Song, X.; Richards, P.G. (1996). "*Seismological evidence for differential rotation of the Earth's inner core*". *Nature*. **382** (6588): 221–224. doi:[10.1038/382221a0](https://doi.org/10.1038/382221a0). S2CID [4315218](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/4315218/).
20. Su, W.J.; Dziewonski, A.M.; Jeanloz, R. (1996). "*Planet Within a Planet: Rotation of the Inner Core of Earth*". *Science*. **274** (5294): 1883–1887. doi:[10.1126/science.274.5294.1883](https://doi.org/10.1126/science.274.5294.1883).