

闰秒的由来

袁海波

(中国科学院国家授时中心 中国科学院时间频率基准重点实验室 710600)

1. 时间是什么

悠悠岁月，时光荏苒，人类社会千百年来的发展都是沿着一个重要的参考轴线连续进行的，这个参考轴线就是时间。那么到底什么是时间，人们如何来计量时间呢？

时间的产生与人类生活无关，但时间计量和应用都是源自于生活、应用于生活。人类最早认识的时间单位不是“年”，也不是“月”，而是周期性更加明显的“日”，人们对黑暗有着与生俱来的恐惧，因此太阳的东升西落在人们认知中就尤为深刻，人类通过观测太阳的东升西落现象逐渐产生了“日”的概念。

“日”的概念形成后，随着人类社会的发展，人们通过对日的累加计数产生了“日期”的概念，进而通过对“日”的细化形成更加精细的时间间隔，比如时辰、时、分、秒等。那么什么是时间，虽然哲学意义上时间是物质存在的形式，但到底时间的概念如何定义，直到如今仍然没有一个可以让广大科学家普遍接受的描述，不过我们日常生活中可以将时间理解为时刻和间隔两部分，间隔就是一个计时单位，时刻就是间隔的累加值。

现代的时间保持以原子钟产生的秒长为基础，通过秒长的累加实现标准时间的时刻，而原子时秒长作为基本单位的确定是源自于人类社会生活，通过天文观测实现的。原子时秒长标准一旦确定下来，就应该保持不变，由于原子时秒长不受地球自转周期变化的影响而可以做到连续稳定的运行，就会使原子时和天文观测的时间系统逐渐脱离联系，在天文观测、深空探测、航空航天等领域造成诸多不便。为了解决这个问题，使得以原子时秒长为基础的时间系统可以适用各类用户的需求，并延续时间测量与天文观测的渊源，国际社会通过对原子时的修正，也就是通过闰秒机制（增加或减少）使得基于原子时秒长保持的时间与基

于天文观测保持的时间尽可能协调一致。

2. 原子时秒长缘何而来

原子钟是近代科技发展的产物，目前常用的原子钟有氢原子钟、铯原子钟和铷原子钟，其中地面守时型原子钟一般采用氢原子钟和铯原子钟，铷原子钟更多的应用于卫星或其他对性能指标要求略低、体积和功耗要求苛刻的环境。无论哪一种类型原子钟最终给出的原子时尺度都是以标准秒长为参考，那么这个标准秒长是如何确定的？当前国际单位制中秒是如何定义的？

回答上述问题，必须先了解几个重要的时间系统，这些时间系统包括以地球自转为基础的真太阳时、平太阳时和世界时，以及以地球公转为基础的历书时。

2.1 真太阳时和平太阳时^{①②}

在古代，通过观测太阳得到的时间叫做真太阳时，例如古人发明的观测太阳常用的圭表、日晷古天文仪器。在天文学上，把真太阳连续两次通过观测地点子午线的时间间隔称为一个真太阳日。然后向上累加获得月和年，再向下细分获得时、分、秒，形成真太阳时。

最初人们认为地球自转运动是均匀的，而事实上地球绕太阳运动的轨迹并不是一个圆，而是一个椭圆，太阳位于其中的一个焦点上，这样导致的地球公转速度并不是均匀的。另外，地球自转轴与地球公转轨道面也不垂直，这使得地球在公转轨道的不同地点反映到太阳的位置变化速度不同。因此，在这一年当中，真太阳日就不会一样长，秒长也就没有固定值。

人类认识到这个问题大约是在17~18世纪。当时时间计量精度已经达到秒级，人类发现地球自转运动并非均匀，也就是真太阳时是不均匀的。不过这一问题的合理解决直到19世纪才由法国科学家完成。1789年，法国针对当时度量衡存在的混乱状况，建议法国科学院成立特设科学委员会，确定新的计量标准。

这一倡议得到了许多著名科学家的支持与响应。该委员会经过 30 多年的研究，于 1820 年正式提出了秒长的定义：全年中所有真太阳日平均长度的 $1/86400$ 为 1s。也就是说，把全年中所有的真太阳日加起来，然后除以 365，得到一个平均的日长，就是所谓的“平太阳日”。当时人们认为这样得到的平太阳日是固定不变的，就把它称作“平太阳时”。

法国科学家提出的上述定义似乎解决了一秒有多长的问题，但是在实际的操作中，这种秒并不能够实时得到，必须利用一年的观测，最后取平均才能够得到秒长。为了解决这一问题，人们引进了一个假想的参考点——平太阳。它在天赤道上作匀速运动，其速度与真太阳的平均速度相一致，并且尽可能地靠近真太阳。平太阳参考点是由美国天文学家纽康 (S. Newcomb, 1835 ~ 1909 年) 在 19 世纪末引入的一个假想参考点，在此之前，人类已经通过在地球上观测天球上的某些参考点，得到以地球自转为基础的时间系统。以春分点作为基本参考点，由春分点周日视（连续两次上中天）运动确定的时间，称为恒星时（简称 ST）。某一地点的地方恒星时，在数值上等于春分点相对于这一地方子午圈的时角。而在纽康提出平太阳的定义以后，平太阳时和平恒星时不再是独立的时间测量系统，可以利用严格的分析表达式把它们联系起来，进行精确地相互转换。

2.2 世界时

世界时 (Universal Time, 简称 UT) 曾经被定义为真太阳时的简单平均，自有了平太阳时概念后，其定义就有了变化：世界时是一种以格林尼治子夜起算的平太阳时。世界时是以地球自转为基准得到的时间尺度（见图 1），其精度受到地球自转不均匀变化和极移的影响，为了解决这种影响，1955 年国际天文联合会定义了 UT0、UT1 和 UT2 三个时间系统：

UT0 系统是由天文观测直接测定的世界时，未经任何改正。该系统曾长期被认为是稳定均匀的时间计量系统，并且得到过广泛应用；UT1 系统是在 UT0 的基础上加入了极移改正数（地球自转极移见图 2）；UT2 系统是在 UT1 基础上加入了地球自转速率的季节性改正数。

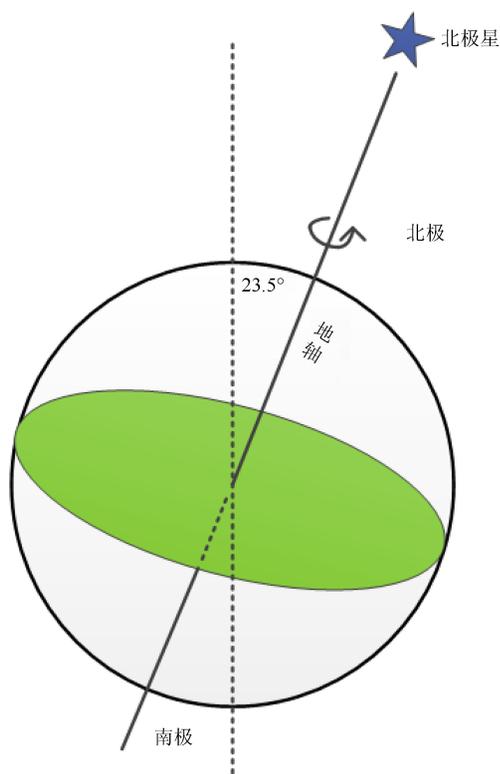


图 1 地球自转示意图

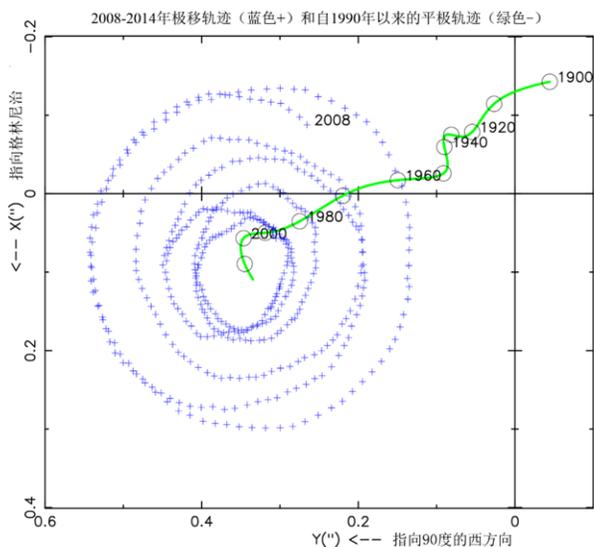


图 2 平均极移 IERS C04 测站 2008 至 2014 极轨迹（来自于 IERS 网站）

在现代守时中，人们更多的应用是 UT1 而不是 UT0 和 UT2。UT0 由天文观测直接获得，具有可测性和较高的实时性，其物理意义为地球自转相对于太阳的周日长度，但由于 UT0 受到地球极移的影响明显，必须经过相应改正，改正后获得的 UT1 相对于 UT0

大约滞后一周时间，但其稳定度和准确度相较 UT0 更好。UT2 是在 UT1 的基础上再扣除季节变化的影响后获得的，其需要一年以上的数据进行计算，虽然精度更高，但其实时性太差，且不利于天文观测、深空探测等应用。

2.3 历书时

描述天体运动的方程式中采用的时间，或天体历表中应用的时间就是历书时，简称 ET。它是由天体力学的定律确定的均匀时间，又称牛顿时。由于地球自转的不均匀性，1958 年国际天文学联合会 IAU 决议，自 1960 年开始用历书时代替世界时作为基本的时间计量系统，并规定世界各国天文年历的太阳、月球、行星历表，都以历书时为准进行计算。

原则上，对于太阳系中任何一个天体，只要精确地掌握了它的运动规律，都可以用来规定历书时。19 世纪末，纽康根据地球绕太阳的公转运动，编制了太阳历表，至今仍是最基本的太阳历表。因此，人们把纽康太阳历表作为历书时定义的基础。历书时秒的定义为 1900 年 1 月 0 日 12 时正，回归年长度的 $1/31\,556\,925.974\,7$ ；历书时起点与纽康计算太阳几何平黄经的起始历元相同，即取 1900 年初太阳几何平黄经为 $279^{\circ}41'48''.04$ 的瞬间，作为历书时 1900 年 1 月 0 日 12 时正。历书时秒长实际上等于理想化了的平太阳时的秒长。

2.4 原子时秒长确定与秒长定义

原子时秒长是通过原子钟产生的，原子钟又是基于原子能级跃迁对外辐射频率计数方式实现标准秒长，那么这个计数应该是多少，用什么标准来确定这个计数便是问题的关键。

成功研制第一台铯原子钟（或叫铯束原子频率标准）的科学家是英国皇家物理实验室的艾森（L.Essen）和帕利（J. V. L. Parry），并开创了基于原子钟进行时间保持的新纪元。在艾森、帕利等人研制成功第一台铯原子钟频率标准后，电子物理学家就希望用它进行时间保持，位于美国华盛顿的海军天文台科学家马克维奇（W. Markowitz）等人从 1955 至 1958 通过 3 年多的测试，将原子钟谐振频率值与历书时（ET）秒长进行比对，最终给出了一个对应历书时秒的铯束谐振

器的谐振频率为 $9192631770 \pm 20\text{Hz}$ ，并指出 $\pm 20\text{Hz}$ 的不确定度来源于历书时秒长的不确定性。

3. 现代常用的时间系统

现代常用的时间系统包括世界时（UT1）、国际原子时（TAI）和协调世界时（UTC），其中 UT1 就是上节 2.2 中介绍的带有极移修正的世界时，TAI 是国际原子时的法语 Temps Atomique International 的缩写，UTC 即为现在国际通用的官方时间，是以 TAI 为基础通过闰秒调整和 UT1 保持在一定偏差范围内的时间系统。

3.1 国际原子时

国际原子时（TAI）产生于 1967 年，但其起点却在 1958 年 1 月 1 日 0 时 0 分 0 秒，这是为什么呢？实际上 1955 年就研发出了铯原子钟，但由于当时时间产生和保持主要通过天文观测获得，且天文学研究更多的依赖于以地球自转为基础的世界时，另外就原子时本身而言，由于原子钟产生秒长稳定度还不够高，不足以完全替代世界时。为了检验原子时的性能，国际上几个重要实验室将其运行的原子钟进行联合解算，形成一个跨越国界的“原子时系统”，这个系统从 1958 年 1 月 1 日 0 时 0 分 0 秒起和当时的世界时对齐同步运行。直到 1967 年，原子钟的性能有了较大的提高，而科学技术的各个领域的应用也越来越需要高稳定、实时的时间频率信号。1967 年 10 月，在印度新德里召开的第十三届国际计量大会正式把由铯原子钟确定的原子时定义为国际时间标准，取代了天文学的秒长的定义。新秒长规定为：位于海平面上的铯原子基态的两个超精细能级间在零磁场中跃迁振荡 9192631770 个周期所持续的时间为一个原子时秒。在这个定义中实际还含有来自历书时秒长的 $\pm 20\text{Hz}$ 的不确定度。新的秒长定义产生后，就把先前的“原子时系统”改称“国际原子时”，并简称为 TAI。TAI 的起点自然就是 1958 年 1 月 1 日 0 时 0 分 0 秒。

3.2 闰秒与协调世界时

“闰”在字典上解释：每四年加一日，称“闰日”。有闰日的这一年称“闰年”。这是公历的“闰”。中国的农历，2 年或 3 年，需要加 1 个月，所加的这个月称“闰月”，平均 19 年有 7 个闰月。实际上“闰”

在中文中具有增加的含义。英语中 leap 即为闰，解释为飞跃、跳跃或快速移动，闰秒实际上就是跳秒。闰秒就是增加 1s，但在应用中，可能出现增加或减少 1s 的现象，那么就把增加 1s 叫正闰秒或闰秒，减少 1s 叫做负闰秒。

原子时秒长稳定，但时刻没有与现实世界相对应的物理内涵；世界时恰好相反，它的秒长不稳定，但它的时刻对应于太阳在天空中的位置，反映地球在空间旋转时地轴方位的变化，这不仅与人们的日常生活密切相关，而且具有重要科学应用价值。在大地计量、天文导航和空间飞行体的跟踪、定位等领域，需要知道瞬间地球自转轴在空间中的角位置，即世界时时刻；而精密校频、信息传输等应用领域，则要求均匀的时间间隔，即需要秒长稳定的原子时。因此需要一个即稳定又具有物理意义，并且可以满足各类应用需求的时间系统，这个时间系统就是协调世界时（UTC），其可以简单地理解为以原子时秒长为基准、以世界时（UT1）时刻为参考的时间系统。“协调”实际就是两种时间尺度的协调和两种守时技术的协调。

4. 闰秒的实现

闰秒就是在 UTC 中插入 1s，但为什么要插入 1s 呢？还有要按照怎样的规则插入这 1s 呢？

我们知道当前国际通用的官方时间 UTC 是以原子时的秒长为基准，以世界时 UT1 的时刻为参考，通过闰秒调整后得到的。当秒长确定了以后，影响 UTC 时刻值就只有 UT1 了，而 UT1 是基于地球自转加上极移改正后得到时间尺度，地球自转周期直接决定了 UT1 的秒长和时刻。实际上地球自转的变化是不规则的，具体表现在每过几年或几十年，地球自转速度就会变快或变慢，但长期趋势是变慢。图 3 是将近 40 年内一天长度的变化，横坐标是年，纵坐标是一天的长度与 86400s 的偏差。可以看出，地球自转速度有明显变慢的趋势。

地球自转变慢的原因，有人认为是由潮汐摩擦力引起的，还有人认为与地球两极的自然条件变化有关。地球平均温度有上升的趋势，这样，两极地区巨大的冰川慢慢融化了，两极的冰块在减少，地球赤道附近的海平面上升，地球要保持原来的转速，就要增加转

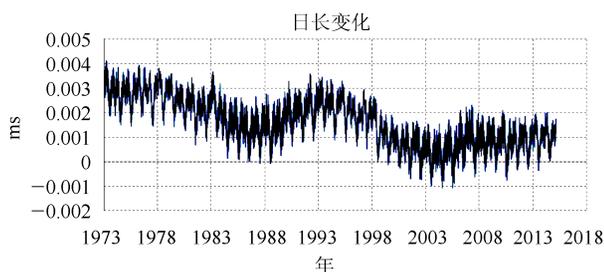


图 3 天平均长度的变化

动力矩。地球的转动力矩是由太阳、月亮、地球按照它们自身的规律形成的，相对来说是不变的，只有使地球转动速度变慢才能达到力的平衡。由于上述种种原因，按照地球自转制定的世界时秒长仍有较大误差，有时可达 1×10^{-7} 量级偏差，相当于 1s 产生 $0.1 \mu\text{s}$ 的误差。20 世纪 60 年代之前，世界各国共同采用世界时为时间标准，但是在现代科技飞速发展的情况下， 1×10^{-7} 量级的误差已不能满足人们对时间高精度的应用要求了，无论采用什么办法修正，总是不够理想，促使科学家去寻找新的时间标准。

从 1959 年 8 月开始，美国和英国的授时部门以原子时为标准发播时号，不定期地对发射信号的载频实施时刻阶跃为 50 ms 的调偏改正，以确保发播时间与 UT1 之间的偏差在一定范围内。这样做的最大好处是实现了时间信号实时发播。这个办法很快被其他一些国家的授时部门所采用。1960 年，国际电信联盟向国际时间局提出建议固定实施频率调偏改正的日期，最好在一年当中保持不变，这一建议得到了采纳。自 1963 年起，频率调偏引起的阶跃由 50 ms 变为 100 ms，以保证发播的时间（即是后来的 TAI）TAI-UT1 的差值不超过 0.1s，调偏日期一般规定为每月的月初。

原子时与 UT1 协调方法几经改变，最终于 1975



图 4 宇宙星河（地球只是沧海一粟）

年1月1日开始实行闰秒调整，并且沿用至今。具体调整方案是当原子时与世界时的时差超过0.9s后，人为拨动原子钟，使其增加或减少1s，即实行所谓的“闰秒制”，协调后得到的时间尺度即为协调世界时（Coordinated Universal Time, UTC）。可以看出UTC在本质上是一种原子时，因为它的秒长规定要和原子时秒长相等，只是在时刻上，通过人工干预，尽量靠近世界时，满足式（1）的要求。

$$UTC = TAI - \text{闰秒}, \quad UTC - UT1 < 0.9s \quad (1)$$

到2014年底，闰秒数累计已经达到了35s，最近一次闰秒的时间是2012年6月30日。图5给出了50多年来闰秒调整情况。从图中可以看出，UTC与UT1在1958年1月1日被设定同步，但是直到1972年才采用闰秒的方式来修正UTC和UT1的时差。图6给出了最近一次闰秒调整的软件界面图。最近一次闰秒是在UTC时间2012年6月30日23:59:59后插入1s，即出现23:59:60后进入2012年7月1日00:00:00。由于北京时间和UTC之间的时差为8小时，即北京时间提前于UTC时间8小时。那么这次闰秒对应的北京时间为2012年7月1日07:59:59后插入1s，变成07:59:60，之后进入08:00:00。

通过上述描述，我们了解了闰秒的调整方法，但

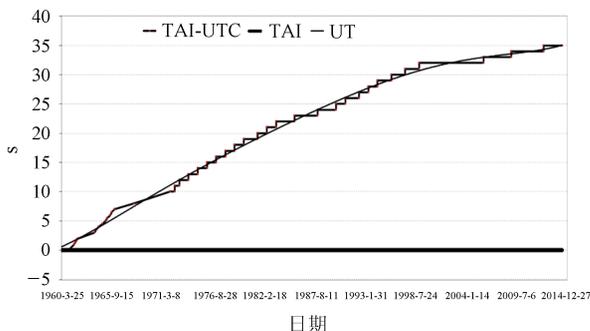


图5 TAI与UTC之间的关系

是闰秒调整的决定是由什么机构测量并发布的？目前闰秒增加与否是由国际地球自转服务中心局（IERS）组织测量并决定。设在法国巴黎天文台的国际地球自转服务中心局，每6个月发布一次公报，预告下一个可能的闰秒日期的闰秒情况，或确认不发生闰秒。

按照1975年开始实施的闰秒调整方案，一般设置闰秒在协调世界时年末12月31日或者年中6月30日。正常情况下一分钟是60s，从第0s到第59s，然



图6 最近一次闰秒调整

后进入下一分钟的第0秒。如果是正闰秒，则在闰秒当天的23时59分59秒后插入1s，对应北京时间下一天的7点59分59秒，插入后的时序是：…58s, 59s, 60s, 0s, …，这表示地球自转慢了，这一天不是86400s，而是86401s；如果是负闰秒，则把闰秒当天23时59分中的第59s去掉，去掉后的时序是：…57s, 58s, 0s, …，这一天是86399s。

据IERS的最新公报，UTC时间2015年6月30日将再次进行闰秒，出现23:59:60，中国将在北京时间2015年7月1日上午出现7:59:60，届时增加1s闰秒后国际原子时与协调世界时的时差将达到36s。

5. 闰秒的未来

闰秒的出现，使得原子时具有了实际的物理意义，并以协调世界时的形式满足了实时性要求强、相对于世界时准确度要求较高的应用需求，在实施的初期UTC可谓实用、有效，但由于其不定期插入闰秒使得UTC不是一个连续的时间尺度，在诸多领域的应用出现了一些困难——例如卫星导航系统、现代通信系统等，并且在闰秒操作的过程中也会出现人力物力的耗费等，鉴于采用闰秒的弊端越来越显现，国际电信联盟（ITU）和国际权度局（BIPM）组织了关于闰秒未来的研究和讨论，认真研究了闰秒的去留和改革方案，现在还处于研究和讨论阶段，当前对于闰秒的去留和改革方案主要有^②：

（1）保持现状

就是保持现有的闰秒机制，不做调整，这主要是基于闰秒已经实行多年，并且在软硬件方面已经有较完整的支持；另外一个重要的原因就是天文研究、卫星运控等还需要与UT1相关的UTC；

(2) 增大 UTC 和 UT1 之间的差值

通过增大 UTC 与 UT1 之间的差值，拉长闰秒调整的时间间隔，当前为 0.9s，大约 1 年多就进行一次闰秒，如果将这个值扩大，进而通过一次闰几秒或闰分等方式实现 UTC 与 UT1 之间的时差控制；

(3) 重新定义秒长

这种方案认为当初在定义秒长时定义的太短，需要重新定义秒长。这种方案乍一听似乎可行，但实际上秒长作为基本单位，计量学中一旦确定就不可轻易改变，并且秒长在 7 个基本物理单位中的地位相当特殊，它和其他几个基本物理单位都有联系，因此秒长一旦改变将会对度量衡产生很大影响。例如长度基本单位米的定义就是光在光速分之一秒所走的距离。因此，笔者认为这个方案可被直接否定。

(4) 中止闰秒

在当前 UTC 和 TAI 时差的基础上，不再进行闰秒，持续保持 UTC 和 TAI 两个时间尺度，两者之差从此将成为常数，不再改变，UTC 将变成一个连续的时间系统。采用这样方案将使得 UTC 具有 TAI 的各项优点，但问题是 UTC 和 UT1 之间的偏差将越来越大，到 21 世纪末将达到 2.5min。这样的偏差不会对人类的生产生活造成影响，但是在以地球自转为参考和以平太阳

时为参考的应用中将会造成混乱；

关于闰秒改革方案涉及全球多个国家、多种应用，它不仅仅是一个技术问题，而且还是一个政治问题，其改革是复杂的，因此当前闰秒机制的改革方案的最终确定还需要度过一个漫长而复杂的协调过程。

作者简介

袁海波 男，1974 出生，理学博士，副研究员，毕业于西北大学，2005 年和 2009 年分别获得中科院研究生院理学硕士和博士学位。现主要从事原子时尺度算法、原子钟频率驾驭技术等研究。先后负责或参加了来自国家自然科学基金、中科院青年人才专项、中科院西部之光人才培养专项、总装备部等多个项目，取得了一批重要成果。多年来共获得专利 2 项，软件著作权 7 项，发表文章 30 余篇，其中 SCI 收录 2 篇，EI 收录 6 篇。

① Beehler R E. 1967. A historical review of atomic frequency standard [J]. IEEE, 6(55), 792 ~ 805

② 漆贯荣. 2006. 时间科学基础 [M]. 北京: 高等教育出版社, 37 ~ 49

③ 董绍武, 吴海涛. 2008. 关于闰秒及未来问题的讨论 [J]. 仪器仪表学报, 8(29), 22 ~ 25



科苑快讯

新织物让你冬日暖洋洋

未来的冬装已经到来，保暖效果甚至超过你全身裹在电热毯里直到春天降临。研究者研制出一种织物，只需一点点电力就可比普通棉纤维更有效地保暖。科学家将普通棉服浸入银纳米线粒子溶液中，使衣物形成一个传导网络。通过改变溶液的浓度，研究者可以控制网络的粒子间隙，最终找到一个能够保存人体 80% 的热量同时又能允许水分子通过的最佳间隙。他们在《纳米快报》(Nano Letters) 上做了报告。

该织物保持了材料的透气性，有可能被制成舒适的冬装。在极端寒冷的日子里，电力还可提供额外支持：只需 0.9V 的电压就能使衣物维持在 40℃ 左右。研究者说，穿上如此暖和的服装将有助于减少住宅取



暖的能源消耗。据估计，在室外平均温度约为 10℃ 的 4 个月间，如果穿上这样的衣服过冬，平均每年将节省 1000kW·h 的能量或 300L 的天然气。

(高凌云编译自 2014 年 1 月 8 日 www.sciencemag.org)