

关于时间感知超级酷炫且深刻的脑洞大开之作，横跨神经科学、心理学、哲学、数学、物理学、生物学等诸多领域，打开你对世界崭新认知的大门！

[美] 迪恩·博南诺 (Dean Buonomano) 著 阎佳 译

大脑是台时光机

Y o u r B r a i n
I s A T i m e
M a c h i n e



机械工业出版社
China Machine Press

大脑是台时光机

Your Brain Is A Time Machine

（美）迪恩·博南诺（Dean Buonomano） 著

闫佳 译

ISBN: 978-7-111-64528-3

本书纸版由机械工业出版社于2020年出版，电子版由华章分社（北京华章图文信息有限公司，北京奥维博世图书发行有限公司）在中华人民共和国境内（不包括中国香港、澳门特别行政区及中国台湾地区）制作与发行。

版权所有，侵权必究

客服热线：+ 86-10-68995265

客服信箱：service@bbbvip.com

官方网址：www.hzmedia.com.cn

新浪微博 @华章数媒

微信公众号 华章电子书（微信号：hzebook）

目录

导读

致谢

第一部分 大脑时间

1:00 时间的风味

发现时间

时间和神经科学

现在论与永恒论

多元时间

2:00 最棒的时光机

大脑是台时光机

把时间当成老师

时间的方向和误导

突触因果

判断跨越尺度的时间

3:00 日与夜

隔离实验

视交叉上核

判断时间的细胞

第一台时钟

生物钟力学

时差反应

和时钟做斗争

多时钟原则

4:00 第六感

前瞻和回顾计时

时间的压缩和膨胀

时辰药理学

慢动作效应的原因

在大脑中压缩时间

5:00 时间模式

好玩的时机

妈妈语

摩尔斯电码

学习判断时间

跟上节拍

唱歌的鸟儿

时间的神经解剖学

6:00 时间、神经动力学和混沌

超周期和周期内计时

涟漪

短期突触可塑性

状态依赖网络

群体时钟

事件特异性时钟

大脑动力学

混沌

第二部分 时间的物理和心理性质

7:00 计时

神经元与核武器扩散

日历

第一台时钟

摆钟

石英和铯

贩卖时间

8:00 时间：这到底是什么

重访现在论和永恒论

时间，谁需要它

对当下的无所谓

时间顽固的箭头

双向箭头

9:00 物理学中时间的空间化

狭义相对论

同时性的丧失

时空

我们能调和关于时间的物理学和神经科学吗

块体宇宙与神经科学相容吗

10:00 神经科学中的时间空间化

儿童和时间

空间、时间和语言

星期三

卡帕

是时钟还是记忆

物理和神经科学中的相对性

11:00 精神时间旅行

重访与预访

动物的精神时间旅行

生活在当下

向未来发送消息

时间短视

大脑当中的精神时间旅行

12:00 意识：过去和未来的结合

时间碎片

重新校准时间

意识的相关性

时间和自由意志

人类可以预测吗

罪与罚

注释

导读

让我们假设所有音乐播放器和流媒体的引擎都出现一个问题：每首曲子的时间线都坍塌了，每个音符、每句歌词都拥挤在一个节拍里播放完毕。你还有可能享受音乐吗？音乐是一种基于线性时间的艺术，剥离时间，它的编排会立刻失去意义。

你看电影时是否有使用倍速的习惯？假设影像里人物角色的行动都陡然加速到1.5倍，上下嘴唇快速翻动，全然不是自然的状态。即使他们连珠炮一般地吐出台词，字与字连成一片，你也依然能轻易听懂。这是由于我们的大脑很擅长把语句分块、切片，我们捕捉句子间细微的间断，以准确理解整句话。如果你尝试过2倍速，就会发现虽然略微费点劲，但你仍旧可以适应。

理解话语和欣赏音乐有一个共同点：两项任务都需要有一条人脑能充分体验的时间线。一个运行良好的神经系统能保证人在秒的尺度上分出时间间隔，学会正确地为粘连的信息“下刀”。

记忆也是使人得以理解和运用时间的重要功能。

你或许听说过一类被称为“顺行性遗忘症”的失忆症，患者保留了患病以前的记忆，但不能再形成新的记忆。顺行性遗忘症患者亨利·莫莱森

（Henry Molaison，下文称H.M）在一次颞叶切除手术后永远活在了1953年：他无法记住新的总统是谁，不记得之后的几十年里与他天天见面的医生，也不能在镜子里认出老去的自己。他的记忆保质期是20秒，如此短的记忆时间在脑科学史上也是孤例。换句话说，他失去了感受分钟的能力。

那么世上是否有患者连秒级的时间也无法感受呢？目前尚未有这样的患者记录在案。即使是H.M也能区分秒级的间隔，能进行基本的对话。而这种区分时间的能力能让他进行更复杂但不自知的任务学习。实验人员曾让H.M每天练习做一个小任务，即看着镜像，在纸上描摹一个指定的五角星图案。实验人员每天都重复一遍任务要求。无法储存记忆的H.M每天都欣然接受这个“崭新”的任务，从不记得做过这样的练习。但随着实验进行，H.M竟越发进步，完成任务所需的时间越来越短——他健忘的大脑中的某处仍然能储存对这项任务的工作记忆（working memory），而他丝毫不自知。

我们如此需要理解时间的能力，却很少思考我们是如何感知、记录时间的。神经科学家好奇的正是这一点：究竟是大脑里的哪一块区域在忠实地编码时间？感受时间和感受空间的机制相同吗？作者在书中用了多个比喻来帮你想象这群记录时间的神经元：池塘中的涟漪、夜晚亮着灯的摩天大楼、厨房里煮溏心蛋的计时器……这一策略正对应了人在理解抽象概念时最喜欢的方式：打比方。而在理解时间的概念时，空间正是最好的比方。书中“神经科学中的时间空间化”一章中举了很多准确、生动的例子，让人心服口服。读起来你会频频感到惊奇：平常嘴边用来描述时间的话原来如此忠实地反映了你脑海中对时间的想象。

大脑能做的远不止记录时间。大脑是一台时光机，它不仅允许你穿梭到过去，还让你“改变”它；它也允许你旅行到尚未确定的多个可能的平行宇宙，为自己的未来做打算。科学家将此称为“精神时间旅行”（mental time travel）。写下每一条事项都涉及至少一次精神时间旅行：“上一次我决定读完一本书是什么时候”是诉诸过去的经验；“今天下午我能赶在任务截止时间之前完成任务吗”是思考未来事情发展的多种可能性；“要是没能完成，我只好祈求宽限几天了”是就未发生的可能性做准备。你不仅能分辨过去和当下，推测未来，还有能力“反事实”地思考过去——我要是早点起床就不会错过这班车了。这种反事实思考（counter-factual thinking）能力让人能够避免再次出现错误、身处险境，以求得生存，而反事实思考能力正依赖于我们大脑中铺陈好的时间线。记录和利用大脑中的时间线是日常决策的基础，也是人类文明的基石。

当然，时间不仅仅是神经科学家试图理解的概念。物理学家探究时间的本质，相对论刷新了人们的时空观；历史学家探究和比较各地区的历法和编年；哲学家对时间的本体感到头疼，试图反思时间与存在的复杂关系；社会学家对工业时代以后的人们把时间看作劳动单位和商品尤其感兴趣。他们在各自的学科范畴得出的结论往往互不相容，甚至曾经引发大论战——在发表相对论后，爱因斯坦同哲学家柏格森的世纪之辩至两人离世也没有尘埃落定。在“时间：这到底是什么”一章中，作者毫不吝啬地花大量篇幅向你展示了时间的多个侧面——在时钟、主观感受之外，时间在更深层意义上究竟是什么。

今天，事物的发展、变化、衰败的速度都令人瞠目。工业时代后，时间通过时钟、上班时间表、学年历以某种实体的形式表现出来——它是早晨起床到上班中间的一小时，是会议进行的大半个下午，是“番茄钟”为高效工作定制的25分钟。我们不得不或主动，或被动地学习时间管理，似乎散乱的时间是桌面上没收拾好的物件，需要一块块分类装进抽屉。

我们不仅需要整理时间，还需要把它紧紧抓牢，以防一不留神它就被弹出的通知、吸引眼球的节目和好玩的游戏这些“窃贼”给“偷”走。即使我们睡着了，时间也不会停歇。我们会花费整个早晨回顾“错过”的时间，从躺在被窝里看热门消息，盯着聊天框刷牙，到单手吃早餐以刷新邮件和推送。昨夜今晨发生了什么？报刊、新闻专门开辟这样的栏目，为人们讲述在他们闭上眼睛的时间里都发生了什么新鲜事，缓解“一觉醒来错过整个世界”的焦虑感。

我们已经习惯和数字共处，即便是时间这样看似抽象的概念，也不免成为具体的计量和价值单位。我们总是把时间当作抽象的计量。但其实构成时间流逝这种生命体验的不是抽象的概念，而是稳健的脚步声由近而远，是湿润的风从左半边脸颊滑到右手指尖，是阅读这段话的过程中你的两次眨眼，是长出的胡子，是磕碰出的伤口的逐渐泛青。一些神经科学家认为，与其说是时间在变，不如说是总有在持续变化中的运动。

原则上，任何能以可复制方式重复的物理现象，都能用于判断时间——这也是爱因斯坦和他的同事英费尔德的观点。假如一盆多肉的生长有一条固定的“进度条”，那么一旦掌握这一“进度条”，我们就能用它来判断时间。大脑记录时间使用的就是类似的机制。神经元能响应外界物理现象，用不同的放电频率来编码整个系统的动态变化，从而帮你判断时间。具备这种判断时间能力的神经元很神奇地普遍存在于各个脑区，甚至还包括肝细胞。因此，体验时间更像是全身浸泡在浴缸中，有意识或无意识地、均匀或不均匀地，你的身体各处都在体验时间。换句早就不流行的话说，宇宙是由故事组成的，这里的故事很大一部分就是体验。

但正如前文提到的，这些能判断和存储时间体验的神经元与细胞（又称时间细胞）能做的事情远远不止判断时间。时间细胞组成了一台在你体内运转的“全栈时光机”，不仅能把时间同你所在的空间关联，也能带你回忆，

让你思考未来。这本书不仅是一本大脑时光机的说明手册（虽然这听起来已经足够有趣了），更是一次路线新奇有趣的时光机体验。作者迪恩·博南诺是一位热情又博学的解说人，他将这些有关过去与未来、物理学、文化以及神经科学的故事娓娓道来。相信你在途中一定会不时停下来琢磨某个有意思的科学发现或者论点，回想或推测你的个人体验，然后继续踏上这趟精神的时间旅行。

本文作者

汉那：脑科学媒体“神经现实”撰稿人及播客主理人，本科就读于加州大学圣迭戈分校认知科学专业。写作者、设计实践者。她的博客是<https://hannasoe.typlog.io/>

神经现实

“神经现实”是一家非营利性科学传播组织，专注于神经科学、认知科学和精神病学等领域的深度报道和前沿解读。目前，“神经现实”正在积极促进公众对脑科学的理解，并致力于推动学界的跨学科融合，为脑科学的普及和发展添砖加瓦。你可以在微信公众号、知乎和bilibili等平台关注“神经现实”，并通过泛用型播客客户端订阅他们的播客“神经漫游”。

致谢

时钟时间是终极的平等装置。每个人的每一天，都拥有86400秒。人们写了数之不尽的书来帮助我们充分利用每一天的分分秒秒。心理学家菲利普·津巴多建议，我们应该把自己的时间，尤其是所谓的自由时间，看作包装好的礼物，只送给我们最珍视的人或活动。我要感谢许多把宝贵时间赠送给我的朋友和同事，如果没有他们，本书就不可能出版面世。

我长久以来对大脑怎样判断时间充满兴趣，并投入了大部分科研生涯意图解答。本书就是这种好奇心的产物。在这趟旅途中，我从计时领域无数顶尖研究人员的工作和鼓励中获益匪浅，我尤其感谢以下诸君的支持：Richard Ivry、Michael Mauk和Warren Meck。我还要感谢这一领域另一些朋友的教导与智慧：Domenica Buetti、Catalin Buhusi、Jenny Coull、Mehrddad Jazayeri、Hugo Merchant、Matt Matell、Kia Nobre、Virginie van Wassenhove和Beverly Wright。

写一本书的乐趣之一，是在个人所从事的狭窄科学领域之外的探索之乐。撰写本书时，我决定对简单的时间物理学稍加涉足，感谢那么多物理学家和哲学家耐心地回答我关于时间、相对论、量子力学的天真问题，他们包括Richard Arthur、Vincent Buonomano、Sean Carroll、Craig Callender、Per Kraus、Dennis Lehmkuhl、Terry Sejnowski、Lee Smolin，尤其是Harvey Brown。

本书尝试对一个广阔的科学领域进行通俗易懂的描述，为了追求简洁，我对许多同事和科学工作者的贡献进行了省略或简化。但归根结底，这些简化主要是因为身为科学家和写作者的我本身存在缺陷。因此，我想提前向那些我没有提及，或是没有把功劳合理地归于他们的科学家表示歉意。

许多朋友、同事和合作者曾阅读过个别章节，亦曾就本书的某些内容对我做过指导。我要特别感谢Judy Buonomano、David Burr、Chris Colwell、Jack Feldman、Paul Frankland、Dan Goldreich、Jason Goldsmith、Vishwa Goudar、Sam Harris、Nicholas Hardy、Sheena Josselyn、Rodrigo Laje、Michael Long、Hakwan Lau、Helen Motanis、Joe Pieroni、Carlos Portera-Cailliau、Rafael Núñez和Alcino Silva。

如果没有美国国家心理健康研究所、美国国家科学基金会，以及加州大学洛杉矶分校的神经生物学和心理学系的支持，我自己关于大脑怎样判断时间的研究就不可能完成。我要感谢Annaka Harris和诺顿出版社的编辑Tom Mayer，感谢他们的指导和编辑经验。最后，我要感谢我的妻子Ana，感谢她送给我的礼物——那么多宝贵的时间。

第一部分 大脑时间

1:00 时间的风味

真正属于我们的只有时间，哪怕一无所有的人也拥有时间。

——巴尔塔沙·葛拉西安（Baltasar Gracián, 17世纪西班牙哲学家）

time（时间）

person（人）

year（年）

way（方法，途径）

day（天）

上面这些词语的共同点是什么？

这是英语里最常使用的5个名词¹——要是你不知道也没什么。“时间”排在第一位，“年”和“天”是时间单位，这说明时间在我们生活里扮演着至关重要的角色。就算我们并没有询问时间，我们也会说“节省时间”“消磨时间”“工作时间”“遵守时间”“没时间”“追踪时间”“就寝时间”“时间已到”“争取时间”“美好时光”“时间旅行”“延长时间”“空闲时间”，还有我自己最喜欢的“午餐时间”。

科学家和哲学家则会探讨“主观时间”“客观时间”“本征时间”（proper time）、“坐标时间”“恒星时间”“突现时间”（emergent time）、“时间感知”“编码时间”（encoding time）、“相对论时间”“时间细胞”（time cells）、“时间膨胀”“反应时间”“时空”，以及“授时时间”（zeitgeber time）。

令人意外的是，尽管时间是最常见的名词，但该怎样定义它，人们却尚未达成共识。实际上，早在1600多年前，基督教哲学家圣奥古斯丁就已经发现了尝试定义时间的内在挑战性：“那么，什么是时间呢？如果没人问我，我知道它是什么。如果有人问，而我想向他们解释，我就知道了。”

没有什么问题像与时间相关的问题那样令人困惑而又意义深刻了。哲学家们思考时间是什么，它到底是单一的瞬间，还是完整的维度。物理学家努力设法弄清为什么时间似乎只朝着一个方向流动，时间旅行是否可行，甚至于时间是否真的存在。接下来，神经科学家和心理学家竭力想要理解“感受”到时间的流逝到底意味着什么，大脑怎样判断时间，以及人类为什么具有将自己投射到未来的独特能力。而且，时间还是自由意志问题的核心：未来是一条开放的道路，还是过去已经决定好的？

本书的目标是探索并尽最大可能地回答这些问题。不过，从一开始，我们就必须承认，人解答时间相关问题的能力，受限于提问器官（也就是你的大脑）的性质。你的头骨下面藏着的胶状的1000亿个脑细胞，固然是已知宇宙中最复杂的装置，但它的设计用途并不是理解时间的本质，一如你的笔记本电脑不是设计来为其所用软件编程序的。在我们探索时间问题的过程中，我们将了解到：人类对时间的直觉和理论，不光揭示了时间的性质，还揭示了人类大脑的构造和局限性。

发现时间

时间比空间更复杂。

诚然，空间有着比时间更多的维度：确定空间的位置必须给出3个值（例如，纬度、经度和海拔），而标记时间中的一刻只需要一个数字。所以，在某种意义上，空间更复杂，但我想表达的是，人类的大脑理解时间要难于理解空间。

我们跟脊椎动物有着大致相同的神经硬件，那么，这里就以它们为例吧。脊椎动物能够在空间中导航，创建周围环境的内部地图，在某种意义上，也就是它们“理解”空间的概念。动物能够怀着明确的目标（知道自己要前往的地方在空间上处于什么位置）长距离迁徙；它们记得自己储存食物的地方；哪怕一只幼犬也知道，如果有零食落在沙发背后，可以试着绕过沙发，从左侧、右侧、下方或上方接近零食。我们知道哺乳动物的大脑有一套高度复杂的内部空间地图，因为40多年来，神经科学家一直在记录海马体里所谓的方位细胞（place cell）。方位细胞就是，当动物处在房间里一个特定位置（即空间中一个特定的点）时会产生冲动或“启动”的神经元。这些细胞共同形成一张网络，创建出外部世界的空间地图，有点像GPS系统，但灵活得多。比方说，如果房间的边界改变或物体移动，我们的内部空间地图似乎会即刻更新。

动物不仅能够在空间中导航，还能“看到”空间。²站在山顶，我们可以看到上面的天空、下面的森林，以及蜿蜒入海的河流——所有这些，都在空间中有一个位置。我们还可以“听到”空间——也就是说，在空间中锁定声音传来的位置。触觉（体感）不仅告诉我们物体的位置和形状，还告诉我们自己最重要的“所有物”（我们的四肢）在空间中的位置。

时间就不一样了。动物显然无法在时间里进行身体导航。时间是一条没有任何分岔、交叉、出口或转弯的道路。也许正是出于这个原因，动物能像对待空间那样流畅地映射、表征和理解时间，而没有遭遇太大的进化压力。我们无疑能看到动物判断时间、预测事件在何时发生，但我们的脊椎动物亲属似乎无法像掌握空间的上下左右差异那样，在大脑中理解过去、现在和未

来之间的差异。我们的感知器官并不直接检测时间的流逝。³库尔特·冯内古特（Kurt Vonnegut）在小说《第五号屠宰场》（Slaughterhouse-Five）中虚构了外星人特拉法马铎人（Tralfamadorians），它们能洞穿时间，一眼就看出过去、现在和未来，我们却做不到。

包括人类在内的所有动物的大脑在机能配置上，对空间进行导航、感知、表征和理解的能力，都强于对时间进行同类处理的能力。其实，人类怎样逐渐理解时间概念的理论之一就是，大脑选择了本来用于表征和理解空间的回路。我们在后文会看到，这或许是似乎所有文化都使用空间比喻来讨论时间的一个原因（这是漫长^[1]的一天；我期待^[2]着日食；事后想来^[3]，我不应该大声地把事情说出来）。

对于科学家来说，时间同样比空间更复杂。跟人类一样，科学领域也有着逐渐发展的阶段：在成长中变得成熟并有所变化。在许多领域，这种成熟过程的标志之一就是渐渐地把时间纳入了研究的范畴。

几何学可以说是第一个真正属于现代科学的领域，公元前3世纪，由欧几里得正式确立。按照通常的定义，几何学是“数学的分支，探究点、线、面和立方体的特点与关系”⁴。欧氏几何值得关注，既是因为它是科学史上最简洁、最具变革性的理论之一，也是因为它完全不考虑时间因素就达到了这一高度。几何学也可以叫“空间测量学”（spaceometry）：研究那些冻结在时间里、永不改变的东西。说几何学是第一个真正属于科学的领域，有一个原因：如果人们忽视时间，科学就会变得简单得多。

希腊哲学家和科学家能借助的数学，并不适合研究任何随着时间变化的东西。再说了，在古代，测量距离比测量时间更容易；今天却恰恰相反，因为我们可以比测量空间更精确地测量时间（见第7章）。在欧几里得之后，人们用了差不多两千年的时间才逐渐将时间完全纳入数学和物理学。16世纪末朝着这个方向迈出了重要的一步。据一个可能是杜撰的故事所述，当时，伽利略在百无聊赖中注意到，比萨大教堂里一盏摇晃的灯完成完整一周摆动所需的时间，跟它摆动的幅度无关：也就是说，不管是宽幅摆动还是窄幅摆动，摆动的周期都一样（后来发现，摆动的周期随着振幅增大会小幅变长）。⁵通过研究运动，也就是物体的位置随着时间怎样变化，伽利略助力孵化出了动力学领域。但跟希腊人一样，伽利略同样缺乏能够定义力、运动、

速度和加速度之间关系的数学工具。直到牛顿和莱布尼茨出现，才最终发明了能理解物体怎样随着时间变化的数学工具：微积分。⁶运用微积分，牛顿得以描述是什么样的规律，使得苹果落地，行星绕轨道运动。

牛顿相信绝对时间，“不考虑任何外在因素，依靠自身性质均衡流淌”。在他看来，时间是真实而普遍的，可明确地应用到空间中的所有点上。牛顿的宇宙似乎是一个确定性的宇宙：从原则上讲，只根据当前，即可确定过去和未来的所有时间。但之后出现了更多的科学进步，有两项对我们来说尤其重要。首先，科学家们逐渐认识到，就算是在完全遵循牛顿定律的宇宙里，实践中也不可能预测未来（或倒推过去）。许多科学家（包括法国数学家亨利·庞加莱和美国气象学家爱德华·洛伦茨）的研究都揭示，系统状态的微小差异，有可能导致未来结果的重大差异（最著名的例子就是天气预测里的蝴蝶效应）。这叫作“混沌”，我们后面会看到，在研究人类所知最复杂的动态系统——人类大脑的时候（第6章），混沌初露端倪。其次，阿尔伯特·爱因斯坦扫除了牛顿绝对而普遍的时间概念。爱因斯坦确定（第9章），时间是相对的（尽管这有违一切直觉）。我们将详细讨论这一主题，但眼下，我们想说的关键是，随着物理学领域的成熟，时间问题逐渐成为根本性的深刻问题。当然，也不完全如此。出人意料地，一些角落里出现了一股推动力量，想要从物理学中完全消除时间，⁷让我们回到静态的几何宇宙。物理学家朱利安·巴伯（Julian Barbour）称其为“柏拉图天堂”（Platonia），暗指柏拉图提出的理型概念：理想的几何形式是存在于永恒之境的真实实体。

[1] long，一般用来形容空间上的长，引申为时间长。——译者注

[2] looking forward，直译是“朝前看”的意思，引申为“期待”。——译者注

[3] hindsight，hind意为“后部的”，sight意为“景象”，引申为“后见之明”。——译者注

时间和神经科学

其他诸多科学领域也经历了类似的成熟过程。例如，现代生物学始于18世纪，最初是一种描述性的、静态的生命形式分类学，但后来逐渐以进化和动力的形式将时间融合了进去。达尔文扮演了伽利略的角色——他看到地球上的物种处于恒定的“运动”状态：变异、消失和进化。

神经科学和心理学领域也逐渐融入了时间问题。你大概会觉得颅相学是一种伪科学，但至少颅相学家承认了时间感知的重要性。他们把时间感知划分到了额叶里恰好位于“曲调”和“空间”（“地点”）之间的一个部位（见图1-1）。一篇颅相学文章说：“这一官能的作用，是记录时间的流逝、持续，以及事件的接续，等等。它还记忆日期，维系音乐和跳舞的正确节奏，促使准时履行约定。”⁸

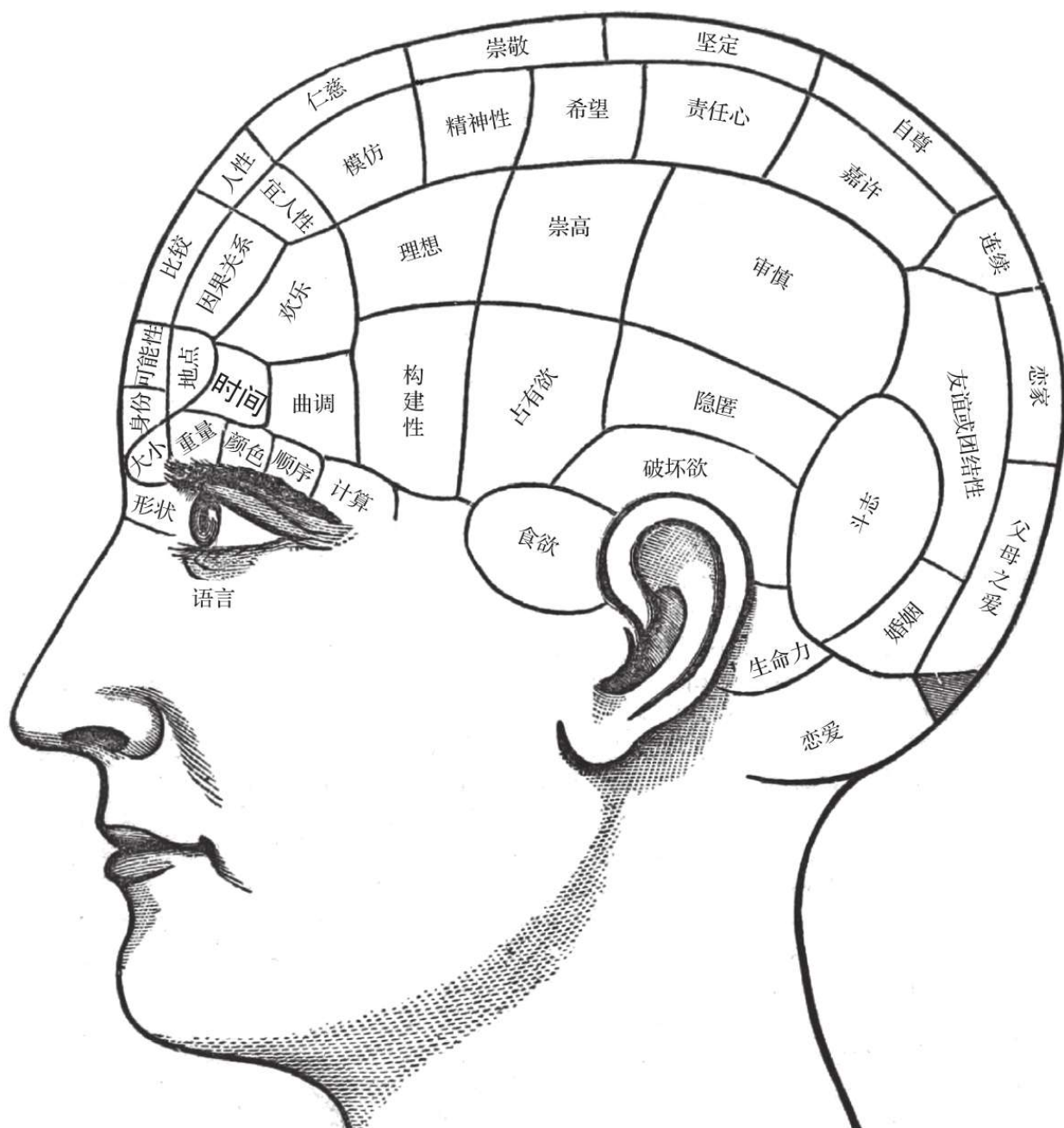


图1-1 一张19世纪的颅相图

威廉·詹姆斯 (William James) 是现代心理学的先驱之一，他同样认识到时间对于理解意识的重要性。实际上，他在自己的重要作品《心理学原理》(The Principles of Psychology) 中用了一整章的篇幅探讨时间知觉。奇怪的是，从那时起，心理学或神经科学中再没有哪一本里程碑式的著作进行过同类探讨。⁹实际上，在20世纪的大部分时间，时间问题遭到了一定程度的忽视，连教科书里也基本上省略了。

这里，我有点过度简化了。首先，神经科学和心理学的“时间”问题不是一个孤立的问题，而是一系列互相联系的问题，涉及大脑怎样判断时间，生成复杂的时间模式，有意识地感知时间的流逝，回忆过去，思考未来。其次，许多与时间心理学和神经科学相关的子领域，都取得了重大进展。例如，时间生物学领域（研究生物节律，尤其是睡眠-清醒周期）在整个20世纪蓬勃发展（第3章）。此外，同一时期，出现了许多先驱者，推进了我们对大脑怎样判断、感知时间的认识。但相对而言，与时间有关的问题遭到了忽视。拿起一本在现代神经科学界有着崇高地位的教科书《神经科学原理》（Principles of Neural Science）^[1]，并在索引里寻找英语里最常见的名词——“时间”，你是找不到的。¹⁰然而，如果你查找“空间”，你会在多个词条里发现它。

心理学和神经科学都是新生的科学领域，它们才刚刚开始充分理解时间和动态的重要性。2008年，加利福尼亚大学伯克利分校的心理学家理查德·艾弗里（Richard Ivry）这样写道：“一代人以前，对时间的研究还很有限，强调的是以时间规律为标志的行为研究。到了最近，时间感知研究重新兴起，研究人员着手考察范围广泛的时间现象。”¹¹

要举出这一转变的例子，我们不妨来看看心理学和神经科学上一个至关重要的问题：大脑怎样存储记忆？由于记忆与过去的经历有关，记忆本身就与时间缠绕在一起。但即使是在这里，科学家也经常忘记把记忆问题放到正确的时间背景中。一直到了21世纪，科学家才开始完全接受如下事实：“关于过去的信息，只是因为能帮助我们预测未来可能会发生什么才有用。”¹²记忆的进化，不是为了让我们缅怀过去的。记忆的唯一进化功能是让动物预测将会发生什么，什么时候发生，以及怎样在发生时给予最佳反应。多亏了持续的概念转变，再加上众多方法学的进步，在神经科学和心理学中，研究者们越发重视时间了。更为关键的是，越来越多的人认识到，不了解大脑怎样判断时间、感知时间和表征时间，就无法理解人类的意识。

[1] 本书第5版影印本已由机械工业出版社出版。——译者注

现在论与永恒论

本书主要关注时间的神经科学和心理学，但我们也将深入探究与时间物理学有关的问题。这里，我们的目标不仅是了解物理学对时间本质提供的一些基本见解，也要探索神经科学和时间物理学相交的地方——或许，我应该说是两者产生冲突的地方（第8章和第9章）。为了达成这一目标，有必要介绍有关时间本质的两个最重要的哲学理论：现在论和永恒论。

顾名思义，现在论（Presentism）认为，只有当下才是真的。在现在论中，过去是曾经存在的宇宙的结构，未来指的是某种尚不确定的结构。与之形成鲜明对比，永恒论认为，过去和未来与现在一样真实。现在没有什么特别之处：在永恒论中，现在之于时间，就如同这里之于空间。就算你当下发现自己位于空间中的某个点，你也知道，空间中还有其他许多的点：不同的房间、城市、星球和星系——这些是同等确然的地方。同样地，就算你感知到自己处在时间中一个叫“现在”的点，时间中也还存在过去和未来的时刻，其他的生命（以及更年轻的你和更年长的你）置身其间（见图1-2）。

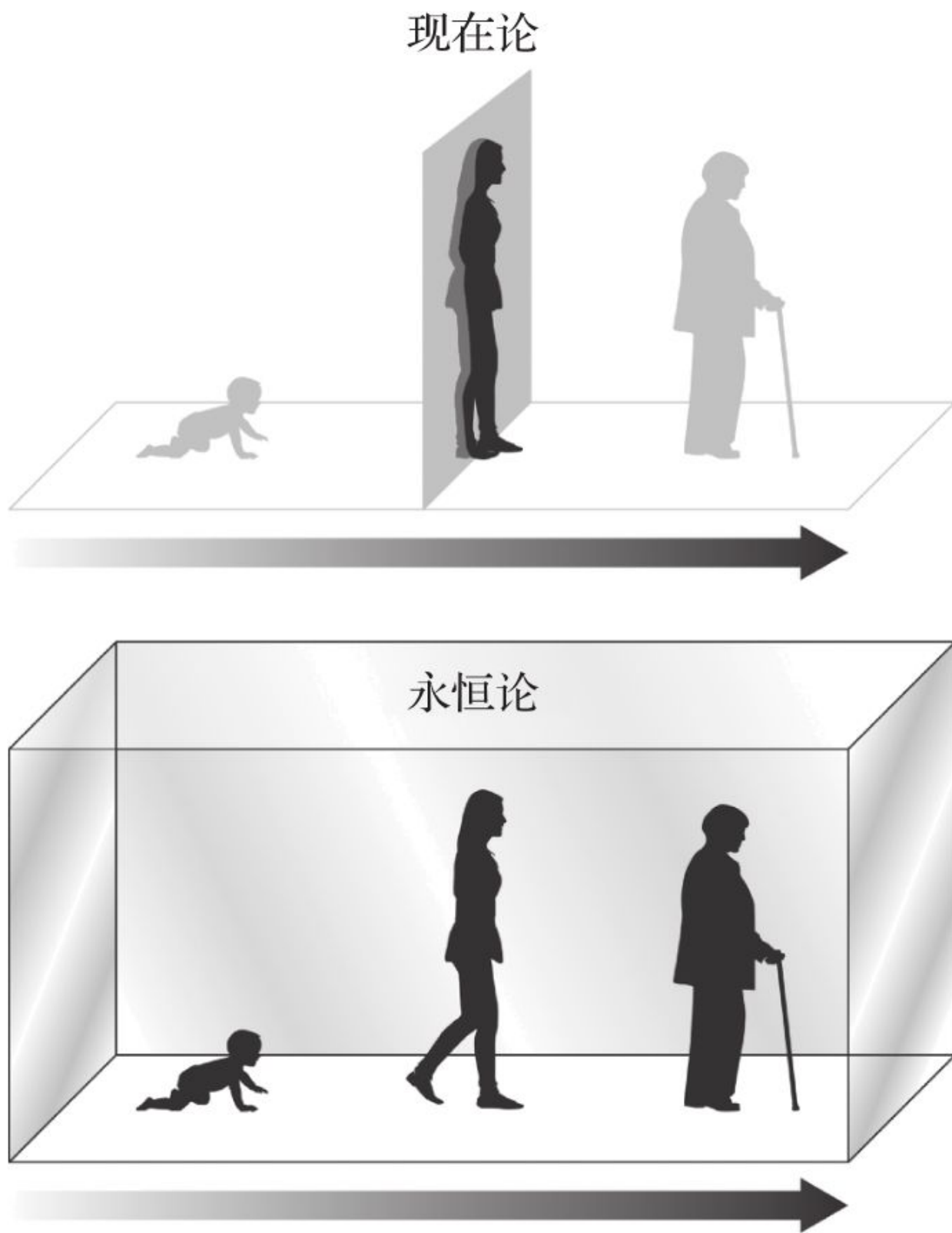


图1-2 对时间本质的两种观点：现在论和永恒论

理解现在论和永恒论的区别，最简单的方法或许是放到时间旅行话题的语境中。¹³按照现在论，真正的时间旅行（在过去和未来之间跳来跳去）是毫无可能的。技术方面的考虑（比如能不能制造出时间机器，或是物理定律是否允许）无关紧要；人就是没办法前往一个并不存在的时间，一如人就是没办法前往一个并不存在的地点。在永恒论看来，时间是一个很像（但并不完全一样）空间的维度，故此，宇宙是一个有着四重维度的“块”：在这个“块”里，你的过去和未来，就如同你的南北位置一样真实存在。虽然永恒论对时间旅行是否可以实现持不可知论立场，但它确认了讨论的有效性，因为时间里有其他“地方”（时刻）可以前往。

现在论肯定符合我们的直觉，随着我们生命中的每一个瞬间转变为一个过去的时刻，它就消失了。无论那个瞬间是否在我们的记忆中留下痕迹，那一瞬间本身已经不复存在。现在论还巩固了我们的控制感：我们的决定和行动，塑造了开放的未来。神经科学家基本不需要应对现在论和永恒论的议题。但在实践中，神经科学家是现在论者，只是不曾明说。他们认为过去、现在和未来有着根本性的区别，因为大脑根据过去的记忆在当下做出决定，提升我们未来的福祉。尽管现在论在直觉上很诱人，但在物理学和哲学里却是弱势理论。

最早版本的永恒论至少可以追溯到2500年前的希腊哲学家巴门尼德（Parmenides），他认为我们生活在一个没有变化的永恒世界。今天，大多数物理学家和哲学家都基于充分的理由，接受了永恒论的立场，即在某种意义上，所有的时间都“已经”分布在了块体宇宙（block universe）之中。把时间作为第四维的概念不光成为一种方便的数学抽象（类似用图像的x轴来表示时间），而且让过去、现在和未来真正站在了平等的立足点上。

不过，在神经科学和物理学之间也存在冲突：如果所有的时刻都同样真实，而且我们过去和未来的所有事件都永恒地嵌入在块体宇宙，那么我们所感知到的时间流动，必定是一种错觉（第9章）。换句话说，如果所有的时间都已经“在那里”了，那么时间就并不是流动的、逝去的，至少跟这些词语的通常意义不同。哲学家杰克·斯马特（Jack Smart）曾这样说：“讨论时间的流动或意识的推进，是一种危险的比喻，不能按字面上理解。”¹⁴故此，表面上看起来最毋庸置疑、最普遍共享的一种主观体验（即“时间过去了”），却必须降级成某种意识思维的花招。这的确是一种常见的观点。例如，哲学家休·普莱斯（Huw Price）在《时间的箭头和阿基米德的点》（Time's Arrow

and Archimedes' Point) 一书中写道：“哲学家在这些问题上大多分为两个阵营。一方认为，流动和‘当下’是世界的客观特征（现在论）；另一方主张，这些东西仅仅是我们对世界主观视角的人为加工（永恒论）……我认同后一种观点。”

数学家和物理学家赫尔曼·外尔（Herman Weyl）针对我们的时间感知与标准块体宇宙观之间的冲突说了一句名言：“客观世界只存在，不发生。只有在我的意识凝视之下，顺着我身体的世界线^[1]往上蠕动，世界的某个部分才变得生动起来，如同空间的一幅飞速变换的图像，在时间中不断变化。”¹⁵

^[1] world line，天文学术语，指物体在时空中经过的路径。——译者注

多元时间

不管是在神经科学、哲学还是物理学领域，但凡讨论起时间，都必然会为一个简单的事实所困扰：“时间”这个词，用来表示多种不同的东西。它是英语中使用最多的名词，原因之一就在于它其实是很多个词。实际上，“时间”这个词的不同用法，因语言而异。在英语中，我们说速度是距离除以时间，我们也会问现在是什么时间。对这两个语境，葡萄牙语使用两个不同的单词。它用“tempo”一词来定义速度，但在询问时间的时候会问“que horas são”（现在是几点钟）。在葡萄牙语中，人们也用“tempo”这个词来询问天气。

我们在日常生活中顺畅无缝地使用时间这个词的不同含义，但倘若试图严谨地探讨与时间相关的问题，这势必会有所影响。因此，对这个词的不同含义加以定义，或稍作限制，将会有所帮助。想想下面这句话：“闵可夫斯基对时间性质的讲演准时结束，但它似乎（在人们脑海里）盘旋了很长时间。”

这个不太自然的句子试图捕捉“时间”一词的三种含义，它们对本书所述目标都极为重要。我按顺序将它们称为“自然时间”“时钟时间”和“主观时间”。

直觉上，我们懂得，时间是一种媒介，人生在此种媒介上展开。我使用“自然时间”这个术语来指代媒介或“维度”概念的时间（如“时间的本质”）。“自然时间”里的时间味道，是现在论与永恒论争论的核心。在实践中，大多数科学家可以忽略与自然时间相关的问题，但归根结底，顺着块体宇宙的时间维度，是否还存在其他版本的“我们”？或者，我们的时间流逝感，是不是真的只是大脑赋予意识的诸多错觉之一？再没有比获得这些问题的答案更加意义深远的了。

出于实用目的，有时候我们把时间定义成时钟所指。尽管表面上看似语义重复，这个定义却非常重要。但这不可避免地又带来一个问题：到底什么是时钟呢？从最普遍的意义上讲，时钟是一种装置，它以某种可重复的方式产生变化，并提供量化这些变化的方法。这些变化可以表现为摆锤的摆动、

石英晶体的振动，甚至化石样品中碳的放射性同位素的数量。时钟时间是科学中最常用的时间含义。然而，爱因斯坦强调说：“如果我们只着眼于在钟表所在的地方定义时间，这样的定义就足够了；但如果我们要把在不同地方发生的系列事件按时间联系起来，这种定义就不足以令人满意了。”¹⁶时钟时间是一种变化的局部衡量尺度，既不是绝对的，也不是普遍的。然而，时钟时间终究规范了我们的生活：它不仅告诉我们什么时候起床、工作和睡觉，还因为身体本身就是一种时钟，时钟时间也掌控着我们的衰老和死亡。

主观时间是指我们有意识的时间感：对时间流逝以及过去了多长时间的主观感受。和所有主观体验一样，主观时间是一种大脑创造的概念：它不存在于头骨的范围之外。我们对颜色的主观感知，能让我们体验到可见光（波长）的物理特点，我们的主观时间感与此差不多：它是一种心智构造，在某种意义上，它使得我们能“感受”到自然时间和时钟时间。



千百年来，哲学家和科学家们一直在思考时间的奥秘。然而，圣奥古斯丁提出时间定义的挑战之后，已经过去了足足1600年，我们仍然不知道过去、现在和未来是否同等真实，我们的时间流逝感是否纯属错觉等最根本问题的答案。

在完全解答这些问题之前，神经科学领域必须进一步发展，并接受如下事实：不描述大脑怎样判断、表征和概念化时间，就不可能理解人类的思维。这是因为，正如我将在下一章论述的，大脑是一台时间机器：这台机器不光能判断时间，预测未来，还能让我们在精神上将自己投射到之后的时间里。我们很容易忘掉，没有在精神上穿越到未来的能力，人类这一物种就永远不可能把一块黑色的石头制成工具，或是理解为什么今天播下种子，能确保未来的生存。

然而，掌握时间概念、窥视遥远未来的独特能力，对我们来说，既是一份礼物，也是一种诅咒。在进化的过程中，我们从被不可预测、反复无常的大自然蹂躏，变得能够制服大自然：我们操纵当下，以保证未来的生存。但我们的千里眼，也使得人必然会意识到：自己的时间有限，稍纵即逝。不管

是礼物还是诅咒，我们现在都要面对一个令人困惑的不解之谜：什么是时间？

2:00 最棒的时光机

任何真实的身体必须在四个方向上延伸：它必须具有长度、宽度、厚度，以及持续时间。但随着肉体的自然衰弱（这一点，我等会儿再解释），我们倾向于忽视这一事实。实际上存在四重维度，其中三者我们称为空间的三个平面，而第四维，是时间。

——H. G. 威尔斯（H. G. Wells），1895年

好莱坞让我们所有人都熟悉了时间旅行的概念。《终结者》《土拨鼠之日》《回到未来》《时间旅行者的妻子》《环形使者》《午夜巴黎》《星际穿越》，以及《星际迷航》系列电影，都向我们展现了在时间里前后跳跃导致的令人费解的悖论——比如回到从前，却一不小心陷入了“祖父悖论”^[1]。

尽管如今电影、书籍和电视里它无处不在，甚至成了一个严肃的物理学研究课题，但时间旅行的概念，在人类历史的大部分阶段显然并不存在。圣经以及其他宗教经文、口头流传的民间传说里，充斥着动物、神和其他超自然生物的故事。它们会讲述动物变成人，或者人变成动物，在庞大的空间距离上进行史诗般的航行，能活上几百年的长寿族，魔法，还有死而复生。但奇怪的是，时间旅行几近于无。就连看似预见到了几乎所有现代电影情节和反转的莎士比亚，也从未曾触及过时间旅行的主题。当然，也有少数例外，比如一首公元前800年流传下来的古印度诗歌《摩诃婆罗多》

（Mahabharata），讲述了一位国王和他的女儿去拜访梵天神，寻找配得上女儿的新郎的故事。他们后来才知道，拜访梵天期间，人间已经辗转了许多代人，国王的财产和宝物早已消散。还有德国的民间故事《温克尔一梦》（Rip Van Winkleish），讲述时间以不同速度流逝的相对论故事，只是没有在时间里来回跳跃的情节。查尔斯·狄更斯的《圣诞颂歌》写于19世纪中期，是时间旅行类故事的先驱。书中吝啬鬼埃比尼泽·斯克鲁奇被鬼魂带到了过去和未来的圣诞节，但这次航行有点像是做梦，是被动的——来自不同时间点的人物之间没有互动。直到19世纪末，时间旅行的概念才真正出现，最著名的作品是H. G. 威尔斯的《时间机器》，主角前往未来，与人类堕落的后代互动，并回到了自己当前的时代。¹

为什么真正的时间旅行小说直到19世纪末才出现？也许是因为人类是天生的现在论者：过去不可逆转地消失，故此不可改变，而未来尚不存在，像这样一目了然的事实实在寥寥无几。又或者，“过去与未来跟此刻同等真实地存在，因而可以作为旅行的目的地”这样的观念太违反直觉、太空幻，甚至无法融入到虚构的内容里。那么，为什么到了19世纪末，在我们的想象中时间旅行的大门就打开了呢？很难回答这个问题，但可以肯定，一场科学革命正在酝酿。

这场革命中的关键事件是爱因斯坦在1905年发表了狭义相对论，它粉碎了我们对时间本质的直觉。爱因斯坦确认，取决于行进速度，时钟嘀嗒的速率会发生变化。两年后，爱因斯坦的数学教授赫尔曼·闵可夫斯基（Hermann Minkowski）证明，从数学上讲，可以把爱因斯坦的理论简洁地放进四维宇宙的框架——也就是说，时间是宇宙的另一维度，就跟空间差不多。

我们将在第9章中探索使四维块体宇宙被人接受的物理学，但现在，我们的重点是：在20世纪，时间旅行逐渐成为物理学研究中被接受的主题。之所以会这样，倒不是说大多数物理学家相信回到过去、前往未来的真正时间旅行切实可行，而是说没人能够证明这做不到。许多物理学家认为，原则上，时间中存在“地点”可以前往，但他们仍然相信，出于实际或理论原因，物理定律禁止在时间“点”之间来回跳跃。²这是因为时间旅行有着相当奇特的要求。虫洞或许是最合乎情理的时间旅行模式。为理解这一概念，我们假设地球的表面就是一层时间与空间，接着，建造一条隧道，作为连接华盛顿和北京之间的捷径。尽管它符合当前的物理定律，但虫洞是一种假设出来的实体。时间旅行不仅需要创建或找到虫洞，还需要以非常高的速度移动虫洞的一端开口。接下来，还要指望虫洞稳定且可穿越，让进入虫洞的人不会被拉长变成空心面条。

我跑题了，因为我在本章的目的不是讨论真正的时间旅行可行不可行，有道理还是没道理，而是要让你相信：你的大脑就是你能拥有的最棒的时光机。这么说吧，你就是有史以来出现过的最棒的时光机。

[1] “祖父悖论”是1943年法国科幻小说家René Barjavel提出的一种设想，假设某人回到过去，在自己的父亲出生前杀死自己的祖父，由于自己的父亲尚未出生，自己也无法出生，从而产生了矛盾。——译者注

大脑是台时光机

诚然，大脑不允许我们在物理上穿越时间，但出于四个互有关联的原因，它本身就称得上是一台时光机。

1. 大脑是一台记住过去以求预测未来的机器。数亿年来，动物们参与了一场预测未来的竞赛。动物预见猎物、天敌和配偶的行为；它们存储食物和筑巢，为未来做准备；它们预见黎明和黄昏，春天和冬天。动物预测未来的成功程度，可转化为生存与繁衍的进化资本。故此，究其核心，大脑是一台预测或预期的机器。³无论你是否意识到这一点，你的大脑每时每刻都会自动尝试预测未来将会怎样。这些短期（短到对未来数秒）的预测，是完全自动的、无意识的。如果一颗弹力球从桌子上滚下来，我们会自动调整动作，在它弹起后抓住它，而要是一块蛋糕从桌子上落下来，我们就不会这么做。

人类和其他动物还在不断尝试做出长期预测。动物审视环境的简单行为，是在尝试窥见未来几分钟或几小时的情况：狼停下来留意周遭的景象、声音和气味，是在搜寻线索，帮助自己避开潜在的天敌，找到猎物和配偶。为了预测未来，大脑存储了大量有关过去的信息；跟苹果设备的备份软件“时光机”一样，它有时会在这些记忆中添加时间标签（日期），让我们可以浏览按时间轴组织的人生片段。

2. 大脑是一台判断时间的机器。你的大脑会执行各种运算，包括那些面部识别或是选择下象棋下一步怎么走所必需的运算。判断时间是大脑执行的另一类运算：不仅仅是测量我们生活中的秒、时和天，还要识别并生成时间模式，如歌曲的复杂节奏，或体操运动员跳出完美后空翻所需要的精准定时的动作序列。

判断时间是预测未来的关键组成部分。所有气象学家都知道，光是预报会下雨还不够，还必须预测什么时候会下雨。一只猫跃至半空捕捉飞行中的鸟儿，它必须预测下一秒鸟儿将飞到什么位置。给花授粉的鸟儿，会记录上一次到访某一朵花之后所流逝的时间量，以便花蜜在自己下一次到访时重新装满。⁴从朝着移动靶子投掷矛、讲笑话时估摸抖包袱时机，或是在钢琴上演

奏贝多芬《月光奏鸣曲》的能力，到调整每天睡眠-清醒周期、每月生殖周期的能力，动物行为和认知的几乎所有方面都要求具备判断时间的能力。

3. **大脑是一台创造时间感知的机器。**与看或听不同，我们没有能够检测时间的感觉器官。时间不是能通过物理测量来检验的能量形式或物质基本属性。然而，就跟我们有意识地感知物体的颜色（反射电磁辐射的波长）差不多，我们也可以有意识地感知时间的流逝。大脑创造了时间流逝的感觉。跟大部分主观体验一样，我们的时间感知存在大量的错觉和扭曲。受多种因素影响，相同的持续时间（外部时钟所测量）似乎能转瞬即逝，也能煎熬难挨。但不管是否扭曲，对时间流逝的有意识感知，以及知道周围的世界处在持续的变化当中，是所有人最熟悉、最无可否认的一种体验。然而，这种时间的流逝感，跟诸多物理学家和哲学家所持有的时间观念，存在根本的不一致。

4. **大脑让我们得以在精神上前前后后地展开时间旅行。**当我们的人类祖先发展出理解时间概念、在精神上将自己向后投射到过去或向前投射到未来（即在精神上进行时间旅行）的能力，我们就在预测未来的竞赛中胜出，并将此种能力代代相传下去（详见第11章）。一如亚伯拉罕·林肯所说，“预测未来的最好方法就是创造未来”，而这正是精神时间之旅赋予我们的能力。我们从预测自然的反复无常，升级到颠覆自然、创造未来。

颇具影响力的加拿大心理学家安道尔·图威（Endel Tulving）解释说：“以未来为导向的想法和计划，其早期表达形式包括学习使用火、保存火，以及接下来的取火、制造工具，再到存储和携带工具。用重要物品装点逝者，种植庄稼、水果和蔬菜，驯养动物作为食物和衣物的来源……这些都代表了人类演化中相对较新的发展。上述每一种行为，都取决于对未来的意识。”⁵

我们所有人都在精神上重新体验过去事件带来的喜悦或悲伤，并对这些事件展开不同的模拟，以探索本来还有可能变成什么情形。反过来，每当我们对兴许将要到来的事情感到恐惧或做白日梦的时候，我们会跳入未来，模拟自己未来生活的多条不同情节线索，以期确定当前的最佳行动方案。人类到底是不是地球上唯一能进行精神时间旅行的生物呢？有可能是，也可能

不是。但我们肯定是唯一能利用这一能力，琢磨真的前往过去或未来可能性的动物。

把时间当成老师

18世纪，苏格兰哲学家大卫·休谟仔细思考了我们怎样理解世界——我们怎样弄清发生在不同空间点和时间点的事件之间的关系。他强调了支撑人类认识的三条基本原则：相似性（物体以及事件之间的相似性）、连续性（事件在时间和空间上的“接近度”），以及因果关系。对因果关系，他提供了若干规则，我们用这些规则来判断两件事是否有因果关系，其中包括：

1. 原因和结果必须在空间和时间上是连续的。
2. 原因必须先于结果。⁶

幸运的是，人们不需要阅读休谟就能将这些规则应用起来，因为它们是以突触和神经元这样的硬件形式，在我们大脑里进行接线的。事件之间的时间关系，是大脑用来理解威廉·詹姆斯所说的“嗡嗡乱响，乱作一团”的各种我们感觉器官接收到的感官信息的最重要线索。一个婴儿是怎么了解到“猫”这个字指的是有四条腿、带着锋利爪子的毛茸茸生物的？因为婴儿看到猫的最初十几次，家长都会轻轻对他说：“看哪，小猫咪。”换句话说，看到猫和听到“猫”这个字之间的时间接近性，使得婴儿的神经回路将这两种不同的刺激联结起来。

经典条件反射，是动物王国中最普遍的一种学习形式，它概括了时间连续性和顺序对大脑功能的基本重要意义。巴甫洛夫的狗是经典条件反射的标准例子：在向狗提供肉（无条件刺激）之前摇响铃铛（条件刺激），最终，狗将习得一听到铃响就分泌出唾液。换个你更熟悉的例子，你家的猫咪一听到开罐器的声音，就会扑进厨房。虽然铃铛声实际上并不是获得食物的原因，但狗理解的似乎就是这样。经典条件反射是动物用来预测接下来会发生什么的原始算法。响尾蛇的滑行引人警觉，是经典条件反射实验的鲜活例子：“嘶嘶”声是条件刺激，暗示响尾蛇（无条件刺激）有可能在附近。

休谟一定从未怀疑过时间连续性对大脑功能的重要性。想一想婴儿识别母亲面孔时大脑所面临的挑战。母亲的面孔有时出现在跟前，故此显得大；有时出现在远处，故此显得小。处在不同的距离，面孔投射到视网膜的图像是完全不同的（正如同一个人的特写和远距离照片，将激活相机上的不同像

素模式，它们也会激活视网膜上感光受体的不同空间模式）。那么，宝宝怎么知道所有这些截然不同的图像都与妈妈相对应呢？这种所谓的“大小不变性”（size invariance）问题非常复杂，我们不知道大脑是怎么解决它的。但有一种理论认为，大脑使用了时间的连续性。婴儿的一部分体验是看到妈妈接近时变大，离开时缩小。如果大脑认为，连续时间里出现在视网膜上的不同模式来自同一个对象，它最终就可以学会大小不变性的一般原则：那些连续出现的模式代表了外部世界中的同一个对象。⁷换句话说，人们预测，如果删除了时间连续性（假设你住在频闪世界，物体的快照每隔10秒就神奇地从小变到大，从大变到小），辨识出不同距离下物体不变的能力就会受损。

经典条件反射，和学习的许多其他形式一样，捕捉到了休谟第二条规则中提到的时间不对称的本质：原因必须先于结果。如果巴甫洛夫在摇铃铛之前就拿出肉，就不会出现条件反射。类似地，经典条件反射对时间的连续程度（更具体地说，是事件之间的间隔）非常敏感。如果巴甫洛夫摇响铃铛之后一个小时才拿出肉，那么，狗是绝对看不出铃铛和食物之间的关系——哪怕铃铛仍然可以预测食物的出现。实际上，在大多数情况下，如果事件隔了几分钟或几个小时才发生，动物似乎没有能力把这些事件的时间点给联系起来。对隔了几天或几个月才发生的事，那就更不可能做到了。⁸两次事件之间的间隔时间越长，发现其关联的难度就越大。经典条件反射是一种短视的学习形式。

理解以天、月和年分隔的事件之间的关系，需要更复杂的认知能力。我们概念化时间、进行精神时间旅行的能力，让我们得以看到性行为与分娩、种子与树木之间的关系。但我们同时也是短视的：如果吸烟一个星期（而不是几十年）后就会患上癌症，烟草行业绝不可能成为一个价值数万亿美元的全球性产业（见第11章）。

时间的方向和误导

认识到我们所体验到的事件之间的时间关系这一认知能力的重要性，再怎么夸张也不为过。例如，认知心理学家史蒂芬·平克（Steven Pinker）就指出，我们通常认为，事件的陈述顺序，反映了它们发生的顺序。因此才有了“他们结婚生了孩子——但不一定是按这样的顺序”这样的俏皮话。在大多数语言中，人们更容易理解按照发生顺序陈述的事件之间的关系⁹：“她微笑着，打开了礼物”就比“打开礼物之前，她微笑了”处理起来要容易。

大脑关于时间顺序和间隔的假设，使得我们能够理解和预测世界上正在发生的事件，但这些假设也可能会带来误导。让我举个魔术花招为例。魔术师用右手从桌上拿起一枚硬币，一边念诵着“阿布拉卡达布拉”，一边夸张地把攥紧的双手使劲一碰，最后摊开手，展示硬币没在任何一只手里。这个花招依赖的是时间误导。¹⁰观众自动认为硬币消失是由“离得最近”的事件引起的：双手一碰，以及夸张的“阿布拉卡达布拉”。事实上，硬币从来就不在任何一只手里，因为魔术师借着拾取它的动作，把硬币从桌子上滑了下去。还是老样子，两件事之间的间隔越长，就越难以看出它们之间的关系。魔术师在硬币消失的真正原因和展示之间插入一个间隔，利用了我们大脑内置的时间假设。

我在自己的前一本书《大脑漏洞》（Brain Bugs）里，描述了我第一次在拉斯维加斯玩21点时所碰到的时间误导案例。我知道21点的规则是，要让你发来的两张牌加起来凑成21点，如果它们没凑成，你要决定是不是再要一张牌，承担“爆”的风险（即超过21点）。发牌的荷官是你的对手，他像自动机器那样，不停地多拿额外的一张牌，直到自己的总和加起来达到17或更多。我认为，如果我按照与荷官相同的策略玩牌，我任何一手牌获胜的概率应该是一半对一半。当然，我知道庄家总有优势，但我看不出优势在哪里。事实证明，庄家的优势非常直白：如果发牌人和我都“爆”了，那算他赢。但为什么我没看出这一点？庄家的优势实际上因为时间误导而藏了起来。以下是它的运作原理：由于是我先出牌，如果我一“爆”，发牌的人会立刻收了我的牌和筹码，让人非常清楚地知道，我的牌局结束了。接着，他继续跟其他赌客完成这一轮，然后才揭开自己的底牌。到这时候，如果我还

在牌桌旁，我可能会发现，荷官也“爆”了——故此我们应该是平手。我看不出荷官的优势，因为它隐藏在未来：正常的因果关系暂时逆转了。从某种意义上说，在我和荷官都“爆”的牌局里，我输的结果先于原因：我的牌和筹码都被拿走了（结果），之后我才知道我跟荷官是打输还是打平。难以看出庄家的优势是因为，我出局以后就不再观察牌局了。通过利用这个暂时的盲点，赌场隐藏了操纵规则为自己谋利的秘密。¹¹

突触因果

无论我们是不是生活在永恒论的固定块体宇宙（即时间的流逝是错觉）里，事件的顺序和间隔，都是我们神经回路创造的作品。休谟概述的规则，其实是控制大脑接线图的算法。例如，因果关系的时间不对称性是编码在大脑内最基本层面的。（免费书享分更多搜索@雅书.）

你的大脑由一张包含了接近1000亿个神经元的网络所构成，这些神经元彼此通过数百万亿个突触进行沟通。¹²跟大多数计算单元（包括计算机的晶体管）一样，神经元获得输入并生成输出（见图2-1）。不过，与晶体管相比，神经元非常外向。普通计算机芯片上的晶体管，可能跟其他数十个晶体管相连，然而，平均每个神经元却跟其他数千个神经元相连。这些连接由突触（两个神经元之间的接口）实现：突触前神经元发送信号，突触后神经元接收信号。任何给定神经元的输入都来自配对的突触前神经元，进行生物电传递。兴奋性突触促使突触后神经元产生动作电位——也就是，向所有下游神经元（也就是跟它配对的所有突触后神经元）发送电信号，生成输出。相反，抑制性突触试图使突触后神经元保持平静。有这么多神经元，神经系统简直可谓一套疯狂的线路图。是什么决定哪个神经元连接到哪个呢？

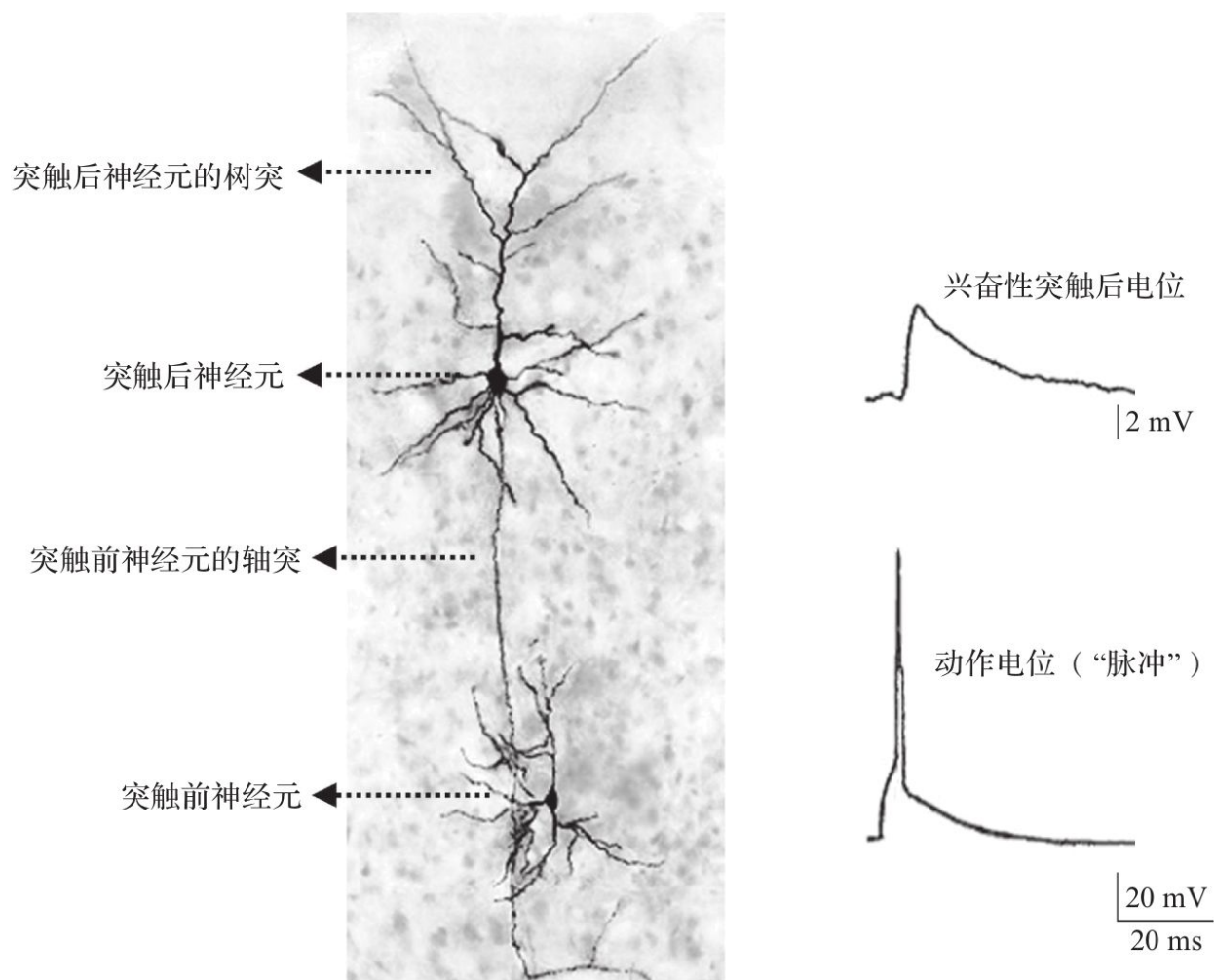


图2-1 神经元和突触，两个皮层神经元的图像。位于下方的神经元（即突触前神经元）的轴突，通过一个突触（图中不可见）与上方神经元（突触后神经元）的树突相连接。突触前神经元产生一个动作电位（即迅速达到峰电位后回落），使得突触后神经元产生电位的小幅度增加（称为兴奋性突触后电位，简称EPSP）。

我们可以用万维网来做一番类比，万维网同样是一个互联元素组成的网络（虽然有些过分简化了）。不妨将网页视为神经元，将其单向链接视为突触。在很大程度上，哪些网页彼此相连，是外部力量（即编写代码的人）强加的。但大脑必须自己接线，它没有主程序员。此外，与万维网不同，对于大脑来说，不仅要考虑哪些元素应该相互连接，还要考虑每个连接的强度应该是多大。突触的强度是指突触前神经元影响突触后神经元行为的程度：神经元A和B之间的强兴奋性突触，意味着A的动作电位有可能导致B的动作电位，而神经元

A和B之间的弱突触，则意味着B对A让自己做的事并不真正在乎。哪些神经元与哪些神经元相连，它们之间突触的强度，部分是由编写进我们基因的突触算法（也叫突触学习规则）决定的。故此，我们的基因并不编码突触的强度，但它们决定了控制突触强度的算法。¹³

有一条学习规则，即脉冲时序依赖可塑性（简称STDP）特别漂亮地说明了因果关系的时间不对称性怎样建立在我们的突触当中。以图2-2中所示的两个神经元为例：神经元A连接到B，而B反过来又连接到A。这样一来就有两个突触： $A \rightarrow B$ 和 $B \rightarrow A$ 。我们会说，这些神经元是循环连接的：神经元A为神经元B提供输入，反之亦然。现在，我们假设每个神经元都受外部世界的不同事件所驱动。也许，这两个神经元的主人，是个叫佐伊（Zoe）的小宝宝，神经元A由字母“Z”的声音所驱动，神经元B由字母“O”的声音所驱动。故此，每当爸爸妈妈叫佐伊的名字，神经元A会先于神经元B产生动作电位，为了便于讨论，我们假设神经元A在神经元B之前持续动作电位25毫秒。突触学习规则的任务是，按照突触前和突触后神经元的活动模式，加强或削弱突触。本例中，脉冲时序依赖可塑性（STDP）将优先强化 $A \rightarrow B$ 突触，削弱 $B \rightarrow A$ 突触。神经科学家花了很长时间才偶然发现这一简单的学习规则。直到20世纪90年代，STDP才获得最终证明。¹⁴休谟会认可这一规则就是神经因果检测器。如果神经元A在神经元B之前产生动作电位，它有可能导致了B的动作电位，故此该突触得到强化。而 $B \rightarrow A$ 总是在白费劲（就像有人总是在你已经锁了门之后才提醒你锁门），所以它遭到削弱（最终还可能彻底消失）。

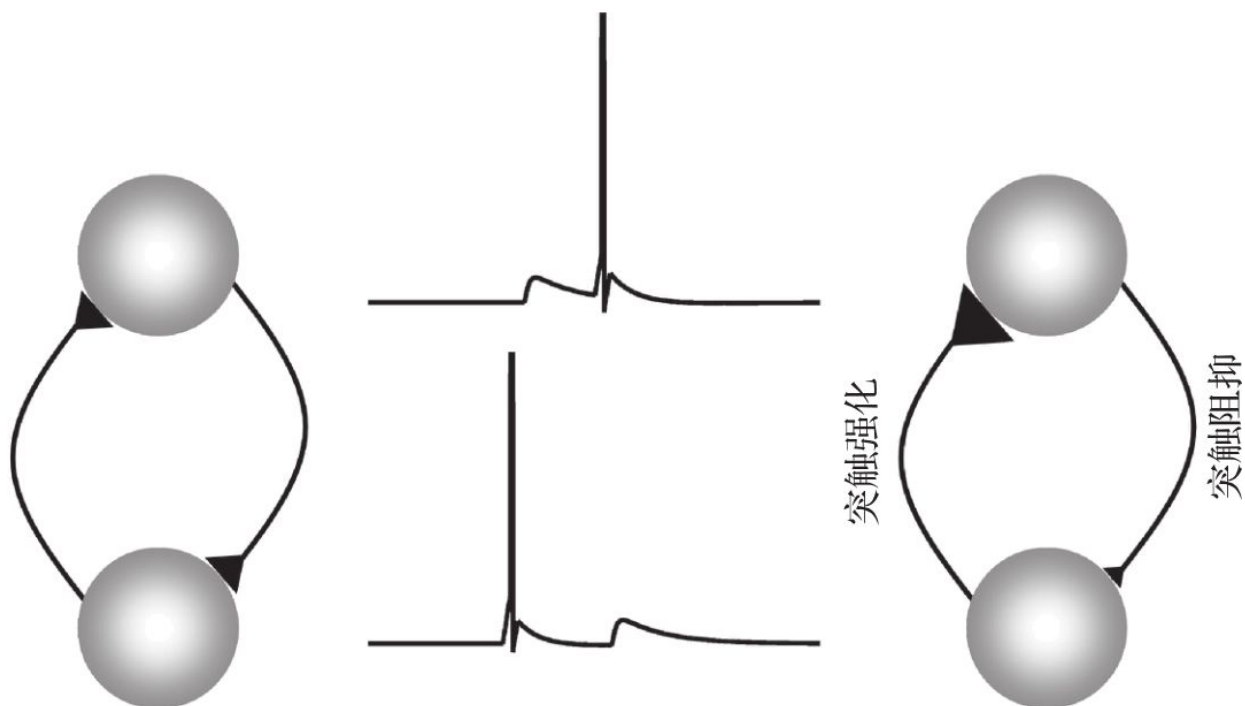


图2-2 脉冲时序依赖可塑性。两个神经元通过两个突触（图中由黑色三角形表示）相互连接。如果下方神经元总是在上方神经元之前产生动作电位，从下方神经元到上方神经元的突触就会变强（突触强化），从上方神经元到下方神经元的突触就会变弱（突触阻抑）。

人们相信，突触学习神经元之间因果关系的能力，部分地导致了大脑对外部世界事件之间关系的学习能力。在我们的例子中，STDP学习规则可以帮助创建神经元响应序列z-o-e，而不是极少听到的e-o-z，从而也就帮助佐伊学会识别自己的名字。但是STDP只是大脑武器库中诸多学习规则中的一条。实际上，STDP是以接近神经系统最精细的时间分辨率来运行的——突触后脉冲时间的几毫秒之差，就可以决定突触是变强，还是变弱。STDP无法捕获以秒或更长时间间隔的事件之间的关系。要达到这一目的，需要一种建立在多个神经元群上（而非单独的两个神经元）的更复杂的机制。然而，不管怎样说，我们大脑中的神经元和突触设法将间隔或长或短的不同事件的点连接了起来，这使得我们能够理解周围发生的事情。

判断跨越尺度的时间

闭上眼睛，将注意力集中在环境中的某个声音上——也许是一台设备的嗡嗡声。你可以轻松判断声音是来自左边还是右边。但你的大脑是怎样弄清声音是从空间中的什么位置来的呢？来自左侧的声音要用稍微长一点的时间抵达右耳。这种所谓的“两耳时间差”（interaural time delay）是头部大小和声音速度的一个函数。对人类而言，可检测到的时间延迟大概在10微秒左右——只有奥运会百米赛跑上所用计时器精度的1/1000。大脑里负责处理声音的部位必须测量此类延迟，以计算声源的位置。声音的速度相对恒定，空间和时间互为补充，大脑便利用了这两点事实，通过判断时间，来“判断”空间。

在略微长一点的时间尺度（从数十毫秒到大约1秒）上，我们判断时间的能力最为强大。在此范围内，我们不仅可以估计两件事的时间间隔，还可以解析、阐释音乐和语音的复杂时间模式。例如，言语中音节或停顿的持续时间，有助于标记词语之间的界限，如“grade A”和“gray day”。词语的持续时间和言语的速度，还形成了韵律，传达了说话人的情绪状态，比如临床抑郁的患者说话缓慢，而兴奋的少年说话像是在放连珠炮。音乐也是一样，正如慢板和快板这两个术语所暗示，或慢或快的音乐节奏分别可以传达悲伤和快乐。一如我们能从乔治·修拉的彩绘画的点的关系里看到一张面孔，我们也能从言语或音乐片段的时间关系里领悟整体。但我们只能在非常窄的时间尺度上（大约1秒）检测到这种时间模式。如果你把语音放得太慢，它就难以理解，而如果你把音乐作品放得太快，它也就不再具备音乐性了（见第5章）。

判断时间跟有意识地感知时间流逝的过程是有区别的。意识的速度太慢，不能对词语之间的停顿进行实时计算，也不可能倒数着等到应该伸手接球的那一刻。但在秒以及比秒稍长的尺度上，我们不光能感知时间的流动，还大致知道不同的事件之间经过了多长时间。我们可以有意识地预测红灯什么时候会变绿。我们感觉到一长串的广告即将结束，正剧即将重新开始。我们焦急地等着自己队伍前面的绅士决定到底要不要炸薯条，内心简直是在读秒。



大脑是自然选择的产物，从“设计”上就是为了在不断变化的严苛世界里实现生存。事实证明，在这样的世界里成功的最佳途径之一，就是能够预测将来会发生什么，什么时候发生。所以大脑既是预测机器，也是判断时间的机器。它能量化尺度超过12种数量级的时间流逝，从声音抵达右耳和左耳的微小时间差异，到某些动物预测季节的能力。

我们的身边充斥着时钟：手腕上、智能手机上、汽车上、家用电器上、墙上、电脑上。但事实证明，我们不光被时钟所包围，我们自己内部也遍布时钟。人类和其他动物的大脑及身体可以测量时间：就连单个的肝细胞也能判断这是一天中的什么时候。但大脑怎样判断时间呢？大脑的哪个部位判断时间呢？我们现在知道，这些问题没有统一的答案。进化赋予了大脑多种机制来判断时间。我把这种“不同的时钟用于不同的尺度”的策略叫作“多时钟原则”，与人造的时钟形成了对比。即使是最简单的数字手表也可以精确测量毫秒、秒、分、时、天和月。然而，在大脑里，负责给贝多芬第五交响曲计时的神经回路没有时针，而控制我们的睡眠-清醒周期的回路没有秒针。虽说乍看起来有违直觉，但我们将看到，考虑到时间对行为与认知各个方面有着根本的重要性，以及大脑解决的时间问题有着不同的设定，我们理当期待它就是如此。

3:00 日与夜

或许，我们直面时间是一种我们恐怕无法定义的东西这一事实也没什么不好……真正重要的不是我们如何定义时间，而是我们如何衡量时间。

——理查德·费曼（Richard Feynman，物理学家）

科学里有一个最不值一提的谜题：为什么老鼠喜欢转轮呢？凡是养过宠物鼠，或是到宠物店里观察过的人，大概都已发现：这种小动物对在转动的轮子里奔跑有着无限的热情。但它们为什么要跑呢？似乎并不单单是因为这些可怜的小家伙没有其他更好玩的事可做。有人讲过这样的故事，说车库里的野生老鼠玩着废弃的转轮；实验室的老鼠从笼子逃出来，却因为决定再在转轮上跑一会儿又被逮住了。这些有趣的观察得到了一项研究的支持。在这项研究中，生物学家在老鼠的自然栖息地放置转轮和隐蔽摄像机，观察到野生老鼠在轮子上跑，跳下来，又再次跳上去。¹就像把辛苦赚来的钱花在街机电玩上的青少年，这些啮齿动物为了跑，甚至愿意“工作”。如果转轮装有制动器，老鼠会按下操纵杆，松开制动器以使转轮旋转。²转轮还有一个阴暗面。如果老鼠的饮食受到限制，在转轮里跑可能会破坏它们的健康。食物受限的老鼠会增加在转轮里跑动的时间，与获得等量食物但不得接近转轮的老鼠相比，前者表现出更多的健康问题和更高的死亡率。³

无论我们能否解开这个微不足道的谜团，大鼠、小鼠和仓鼠都是强迫症般热爱转轮这一事实，极大地增进了我们对大脑怎样判断时间（至少是一天里的时间）的认识。图3-1中展示了一幅“活动图”（actogram）。每当老鼠推动转轮，转完一周，它都会绘制一个垂直刻度，从而记录老鼠在转轮里的模式。为了进行更形象的展现，避免24小时周期内连续绘制出现中断，图表是双重绘制的，也就是说，在前后相继的几天里，后一天活动会记录在前一天的右侧和下方。图表顶部的黑白条表示房间内24小时开灯/熄灯的周期。大鼠和小鼠都是夜行动物，因此更喜欢在夜间跑步——尽管在实验室，它们的“夜间”有可能是我们的白天，因为时间生物学家经常颠倒老鼠所在房间的光暗周期，这样，研究生们就不必熬夜来研究它们了。绘制出的图表显示，当灯熄灭时，老鼠会跳到转轮上开始跑，整晚都在从转轮跳上跳下。几天后，调查人员将设置改成持续黑暗。我们可以看到，就算没有了到底是“白天”还是“夜晚”的外

看出，生物钟的周期并不完全是24小时，但一个周期的自然循环接近23.5小时。⁴因此，相对于我们的星球完成单次旋转所需的时间，生物钟相当准——23.5小时的周期，只偏差2%。夜行动物的生物钟周期大多短于24小时，而昼行生物（比如人类）的生物钟内在周期一般略长于24小时。生物钟的精度更让人印象深刻。我们可以从图3-1中看到这一点。请注意，活动虽然开始得越来越早，但活动的持续时长（不同的行）每天大致是相同的。研究表明，在持续黑暗的几天里，老鼠开始跑的时刻，标准偏差可低至10~20分钟，精度约为时钟23.5小时周期的1%。⁵

生物钟这让人惊讶的精度，或许有助于解释为什么有些人总能在所需时刻差不多的时候醒来。威廉·詹姆斯在巨著《心理学原理》中提到了这一自我唤醒的能力：“一晚又一晚，一日复一日，我总能不偏不倚在同一分钟醒来。这种精准度，让我自己吃惊了一辈子。”然而，在实验室条件下，人们自我唤醒的能力不见得像他们自以为的那么准确——事实上，自我唤醒很可能部分依赖于沉睡的大脑拾取部分外部线索的能力。⁶但不管怎么说，我们将在第7章中看到，1%的精度超过了17世纪之前所有的人造时钟，直到克里斯蒂安·惠更斯（Christiaan Huygens）研究出如何制造出第一座高精度摆锤时钟。

[1] circa的意思是“大约”，dian的意思是“天”，故也译作“昼夜节律钟”。——译者注

隔离实验

据说，在没有任何外部信号的情况下，生理节律是自由运行（free-running）的。然而，研究人类自由运行的生理节律，需要找到愿意让自己完全与外部世界隔离数天甚至几个月的人。此类实验中最著名的一个，是1972年，法国地理学家米歇尔·西佛伊（Michel Siffre）在得克萨斯州的一个洞穴里度过了6个月。该实验得到了美国国家航空航天局（NASA）的支持，NASA预见到，为了未来的星际任务，有必要理解长期隔离对人身心的影响。在洞穴深处，西佛伊有大量的食物和水供给，一顶简单的营地帐篷，还有记录他睡眠模式的设备。外部没有光线变化或大幅的温度波动，无法给他带去时间提示。他是“自由运行的”，可跟实验室里自由活动的小鼠不同，他不是持续地处在黑暗之中，他随时可以给地面单位打电话，让洞穴里的灯开启或关闭。

在老鼠身上进行的隔离实验，似乎不会让受试的老鼠产生异常高水平的生理应激反应或明显的精神痛苦。不难想象，生活在洞穴或地下室的野生老鼠，在一天中有可能跟任何光源隔离。此外，对啮齿动物而言，视力并不像对人类那么重要——夜行动物（大鼠和小鼠）主要依靠听力和极为复杂的胡须排列来导航。隔离实验对人类造成的负担要沉重得多。事实上，抑郁、思维遗失、健忘和自杀念头经常在西佛伊身上发作，他的生物钟变得乱七八糟。最初几天，他的生理节律周期延长到25或26小时，但随着时间的推移，它跳来跳去，有时延长到48小时，其中西佛伊会睡上16小时，同时保持清醒超过32小时。

到第179天，西佛伊听说隔离实验结束了。这令他感到意外，因为按照他的计算，他在洞穴里过了151天——偏差超过了16%。究其本质，时间膨胀了，因为他个人的时间感与客观时间相比放慢了。考虑到隔离那折磨人的沉闷，很难想象他竟会低估了消逝的时间量。但这种时间的膨胀感，在大量的人类隔离实验中都曾观察到。1988年，维罗妮卡·勒古恩（Veronique Le Guen）在法国的一个山洞里与世隔绝地度过了111天，到她出洞时，以为才过了42天！1989年，意大利室内设计师斯特凡尼娅·福里妮（Stefania Follini）在地下15米深的洞穴中度过了4个月。但差不多快到4个月的时候，

她以为只过去了两个月。1993年，一位意大利社会学家在一个山洞中与世隔绝地待了一年，到12月5日离开时，他认为那是6月6日。⁷

这些实验的局限性在于，受试者可能不像看起来那样，完全隔离于昼夜节律线索。洞穴有着包括蝙蝠、昆虫在内的独特生物群系，可以让洞穴居民有意无意地获得一些时间线索。例如，西佛伊讲述了自己尝试与一只洞穴老鼠建立友谊失败的经历，他推测，老鼠晚上出来的可能性更大。为了弥补这些局限性，让受试者和科学家等人不必长时间生活在偏远地区，时间生物学家也在特制的实验室或地下室中进行隔离实验。1985年发表的一项研究调查了42名志愿者，这些人保持了一个星期到一个月不等的隔离状态。受试者独自居住在地下室，无法获得任何有关外界实际时间的信息。他们自己做饭，可以随意开灯和关灯。他们必须报告自己的睡眠和清醒时间，他们的体温会持续受到监控。还是老样子，绝大多数参与者以为的实验持续时间比实际时间要短20%~40%。⁸与洞穴实验一样，受试者的生理节律周期经常跳跃，而不是进入精确和可重复的循环——这与对啮齿动物的研究发现相反。

睡眠-清醒周期并非衡量生物钟准不准的唯一方法。许多生理指标都根据每天的时间而波动。例如，人体温度实际上不是恒定的36.7℃，一天当中，它在这一平均值附近波动，通常傍晚时分会达到峰值。在许多受试者身上，体温节律始终接近24小时，哪怕他们的睡眠-清醒周期短至20小时或长达40小时。有一条重要的线索是这样：我们体内有不是一套生物钟，这些时钟不见得随时保持彼此一致。

视交叉上核

在你大脑底部有一种叫作“下丘脑”的结构。而在下丘脑的底部，悬在承载左右眼信息的神经交叉（即所谓的视交叉）上方的，是恰如其名的“视交叉上核”。

自20世纪70年代以来，我们已经知道，视交叉上核受损的啮齿动物，睡眠模式完全没有生理节律可言。在昼夜之间，它们零零散散地短暂睡眠。这些早期观察带来了一种假设：视交叉上核是主要的生物钟。20世纪80年代，一系列的实验带来了证据，其中最引人注目的是一项脑移植实验⁹。自由活动的仓鼠，睡眠-清醒周期非常接近24小时。然而，有一种突变会让仓鼠的自由运行“日”大幅缩短到20小时。研究人员推断，如果视交叉上核是主生物钟，那么，如果把生物钟周期为24小时的仓鼠的视交叉上核移植给生物钟周期为20小时的仓鼠，能使后者的生物钟变为24小时。一般来说，这种脑区移植仅限于科幻小说，但是视交叉上核相对简单，它是能够有效移植的少数几个大脑部位之一。与许多大脑区域不同，视交叉上核是一个相对独立的结构，它接收来自大脑很少几个区域的输入。并且更重要的是，它不仅通过由精细轴突（此类轴突无法很好再生）介导的电冲动与大脑其余部位沟通，还能直接往血液里释放激素。当研究人员切开仓鼠的视交叉上核，并将细胞从一个品种的仓鼠移植给另一种时，也就把短日仓鼠转变成了长日仓鼠（或是反过来）。视交叉上核的生理节律不受受移植仓鼠的身体或大脑控制；相反，是视交叉神经元（是10000来个神经元的集合，很简陋）进行控制，告诉受移植仓鼠的大脑什么时候该睡觉，什么时候该起床去跑转轮。

判断时间的细胞

拥有大脑，是拥有生理节律的前提条件吗？追踪和预测地球自转引起的光强与温度波动非常重要，几乎所有形式的生命都有生物钟。实际上，第一个自由运行的生物钟实验是对含羞草类植物所展开的，这种植物在白天张开叶子，暴露在太阳下，而晚上闭合叶子。1729年，法国天文学家让-雅克·道托思·麦兰（Jean-Jacques d'Ortous de Mairan）将一株含羞草放在漆黑的房间里，他发现，它能与外部时间同步地继续张开、合上叶子，并持续多天。麦兰本人似乎并不相信这样的结果。在麦兰的时代，最迫切的科学挑战之一是判断海上时间，因此，那个时代的科学家很难接受低矮的植物竟然带有内置时钟这一假说。麦兰认为，含羞草的“行为”必定是受到了其他某种信号的指导，例如温度或是某种未知的磁场，它告诉植物何时张开、合上叶子。科学家们用了两个多世纪才明白，所有植物和动物都有内置的个体时钟，连单个细胞都可以以24小时为周期振荡。

当我们说单个细胞振荡时，并不是说它像石英晶体一样有着实体上的振动，更不是说它像摆锤一样来回摆动。这里的振荡是指细胞内蛋白质的浓度。细胞不是静态的实体，根据细胞当前所处理的任务，细胞内不同蛋白质的浓度会发生显著变化。例如，肠道内的细胞会在用餐期间增加消化酶的产生。同样，血液中的葡萄糖增加时，胰腺中的细胞就会增加必要蛋白质的合成，以增加胰岛素的产生。细胞的开关也不仅仅受外部刺激控制；它们有自己内在的节律。与老鼠一样，单细胞也可以自由运行。如果处于不变生物环境下，温度也恒定，许多细胞都有自身内在的生理节律，可以通过24小时周期内特定蛋白质的浓度升降来测量。依靠少许巧妙的基因工程，便可让这些细胞震荡以视觉化的形式展现出来。萤火虫发光是因为它们产生荧光素酶，荧光素酶放到适当的基质（一种叫荧光素的小分子）里，便以光子的形式释放能量。科学家将荧光素酶基因插入从细菌到霉菌、植物、成纤维细胞，当然还有视交叉上核神经元等细胞里。如果荧光素酶基因的转录受到有着天然昼夜节律的蛋白质的控制，细胞内荧光素酶的浓度也会振荡。最终，细胞逐渐亮起，而后慢慢黯淡，大约24小时后，又再次慢慢亮起。

单个的细菌细胞，怎么追踪一天中的时间呢？在回答这个问题之前，有必要指出，还有一个问题可能同样值得考虑：为什么细菌在乎时间呢？

第一台时钟

我们在第7章会看到，如果准确的人造钟表未能获得广泛应用，工业革命就不可能实现。装配线（在制造过程中，劳动者经分工后，执行连续的步骤）需要协调大量工人的时间。但在工业革命之前（也就比工业革命早10亿年左右吧），进化已经建立了工厂，并随着时间的推移，解决了协调不同流程的问题。地球上最重要的装配线是光合作用：这是一连串的生化步骤，通过一系列的蛋白质引入太阳光子的能量，制造出稳定的、富含能量的生物分子（其中最著名的是葡萄糖）。

蓝藻是光合生物，光合作用是终极的日间工作。一如工厂老板不会花钱招聘员工无所事事地在工厂里坐一晚上，要是蓝藻浪费能量，在晚上合成光合作用所需的蛋白质，那也是白费功夫。然而，要是能确保这些分子在第一缕光线出现之前就准备好干活，以求最充分地利用太阳的能量，这就是莫大的优势了。显然，进化的解决办法，就是一台能预测日出的内部时钟。因此，生物钟进化的一大驱动力量，就是细胞功能与地球自转产生的日夜循环之间的高度适应性协调。

有一项简明的实验，让不同种的蓝藻细菌菌株相互对抗，借此优美地展示了判断时间（拥有一台优秀的生物钟）的进化优势。图3-2展示了实验中所用的两种菌株的昼夜节律，一种是23小时左右的短周期，另一种是大约30小时的长周期。研究人员将两种菌株置于同一培养皿中，观察一种菌株能不能最终占领整个培养皿。实验有一个很巧妙的环节——它在两种条件下进行：一种条件是，灯每隔11小时打开和关闭，制造出22小时的人工日（接近23小时蓝藻的自然周期）；另一种条件是，灯每隔15小时打开和关闭，模拟30小时的一天。研究人员发现，经过一个月的培养，在22小时一天的实验条件下，培养皿里主要是短周期菌株；而在30小时一天的实验条件下，长周期的菌株获胜。¹⁰在30小时一天的条件下维持22小时的节律，或是在22小时一天的条件下维持30小时的节律，使得细胞总是与光线的状态错位，故此从光中提取能量的效率较低。因此，光是拥有生物钟还不够——时钟的周期必须与环境的自然循环存在共鸣，以带来进化优势。

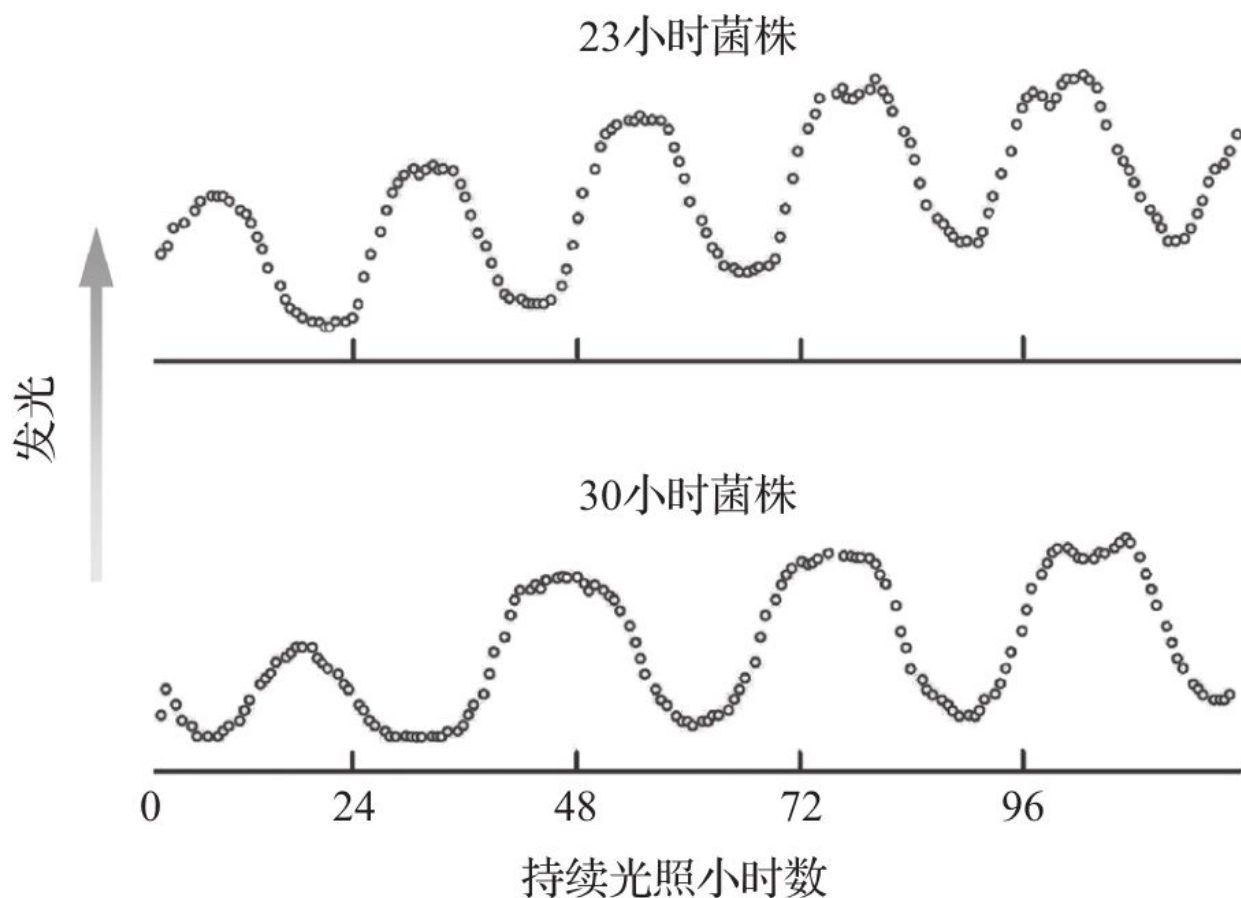


图3-2 蓝藻细菌快慢两种生理节律。两种蓝藻细菌的生理节律分别是大约23小时和大约30小时。这些细菌做过基因工程改造，按照与特定蛋白质浓度成比例的方式发光。如果这些菌株要在23小时明暗周期的环境里争夺资源，23小时菌株将获胜；反过来，如果把它们放置在30小时的明暗周期下，那么30小时菌株会获胜。

优化光合作用，是单细胞生物受益于生物钟的原因之一。但单细胞生物说不定并不是第一个拥有生物钟的。生命的基础在于分裂和繁殖的能力，而细胞分裂的一个关键事件是DNA的复制——DNA，就相当于写有生命秘诀的抄本。众所周知，DNA的复制对紫外线（UV）辐射非常敏感，这就是为什么反复晒伤是人类患上皮肤癌的危险因素，以及为什么防晒霜的标签会吹嘘其吸收紫外线的特性。单细胞生物没有皮肤（皮肤上满是吸收紫外线的黑色素）等保护性器官，紫外线辐射的危害严重得多。在紫外线照射下分裂的细胞，DNA可能会受损，而这种危险，到了晚上就消退了。因此，一些时间生物学家支持所谓的“避光”假说，认为生物钟的演化原动力是帮助细胞在夜间分裂。¹¹

生物钟力学

现在，我们回到主要的问题上：单个细胞怎样实现准确追踪一天中时间的壮举呢？回答这个问题的第一步，在20世纪70年代初，由诺贝尔奖获得者西摩·本泽（Seymour Benzer）和学生罗恩·科诺普卡（Ron Konopka）在加州理工学院迈出。¹²本泽的实验室正在研究著名的黑腹果蝇，这种果蝇，跟所有的蝇一样，出生时的幼虫由蛹包裹着，几天之后，以成年形式破蛹而出。破蛹而出的过程是很讲究时机的，它们要在朝露时分破蛹，以避免阳光导致的脱水。科诺普卡希望找到导致幼虫在错误时间破蛹的突变，理解生物钟的遗传学。他发现了3种突变：一种突变会使得破蛹时间随机出现；另一种导致破蛹时间太早；还有一种导致破蛹时间太迟。放置于持续的黑暗状态下，这些突变体的活性模式受到大致相同的影响：成年果蝇在一天中以随机间隔活动，或表现出仅19小时的自由运行周期，或表现出28小时的异常长周期。科诺普卡确信，这3种突变都来自同一个基因，他称这个基因为“周期”（Period）。10多年后，由迈克尔·罗斯巴什（Michael Rosbash）领导的一支研究小组对“周期”基因做了鉴定和测序。¹³随后的工作确认了其他对生物钟至关重要的基因，这些基因常常会起一些与时间相关的、上口的名字：比如“时钟”（Clock）、“循环”（Cycle）和“永恒”（Timeless）基因。

这些基因及其蛋白质产物怎样相互作用，创造出稳定且高度可靠的生物钟，细节相当复杂，但其中的基本原理却很简单——简单到人们看看抽水马桶的水箱就能大致了解这一原理的实际运作。每次冲马桶，会接通一个负反馈回路，重新装满水箱又不允许溢出。低水位使浮子（连接到马桶阀门的“球”）下降，从而打开水阀，随着水位升起，浮子向上移动并关闭阀门。如果有人故意在水箱上开个小孔，让水慢慢地漏出，浮子最终会下降到足够低的水位，重新打开水阀，为水箱注水。其结果将带来一种振荡：水位的缓慢下降最终打开水阀，带来水位上升，最终关闭水阀。接着水再次缓慢泄漏，整个过程不断重复。实际上，如果你的马桶水箱在半夜神秘地开始发出噪音，兴许就是因为冲水阀门泄漏导致形成振荡。

当然，生物钟比你家的马桶更复杂，但基本原理是一样的，哪怕控制生物钟周期的机制很绕口：转录/翻译自动调节反馈环

（transcription/translation autoregulatory feedback loop）。转录指的是，编码在DNA里的基因要转录成RNA；翻译指的是，这些RNA链要翻译成蛋白质；自动调节反馈环指的是，这些蛋白质抑制导致其合成的基因发生更多的转录（从而关闭水阀）。这些蛋白质里有一种叫作“周期”，它就是前述“周期”基因的产物。随着“周期”蛋白质浓度升高，它最终会关闭合成自身的基因。然后，随着其浓度慢慢降低，“周期”基因重新发挥作用，“周期”蛋白质的浓度再次升高。猜猜整个循环需要花多长时间？

生物钟需要的不仅仅是按大约24小时的频率振荡——它的振荡还必须是稳定的。18世纪，钟摆和机械时钟受温度影响很大，这使得钟表制造商十分纠结。与此同理，进化必须克服生化反应速度随温度变化的问题。我们仍然不完全了解诸如蓝藻、植物和果蝇等外温生物怎样在每日和季节性的温度波动中维持大致24小时的周期。但我们知道，还有大量的蛋白质和基因在与转录/翻译自动调节反馈环的基本分子机制相互作用，这些附加元素，或许有助于温度补偿。¹⁴

时差反应

位于科罗拉多州柯林斯堡附近的WWVB广播电台，是一家尽管非常乏味但也十分重要的电台。它整天都在向北美各地的钟表（特别是那些可以通过无线电信号同步的钟表）发送协调世界时（Coordinated Universal Time）。视交叉上核有着类似的作用。构成生物钟的分子机制存在于大多数哺乳动物的细胞里。因此，“周期”蛋白质的浓度，不仅在你视交叉上神经元里振荡，也在你身体的大多数细胞中振荡。¹⁵视交叉上核的作用是让它们保持同步。白天，视交叉上神经元的活动加剧，向神经系统的下游区域发送信号。¹⁶这些神经元中的神经活动水平，间接转化为我们是处在清醒状态，还是困倦状态；此外，它还充当校准信号，提供有关一天中时间（至少是视交叉上核所认为的时间）的信息。跟你体内的大多数细胞一样，视交叉神经元生活在永恒的黑暗中——在你颅骨内深深的凹陷里。这引出了一个问题：视交叉上核是怎么知道正确的外部时间（也就是说，是白天还是晚上）的？

在时间生物学的术语中，视交叉上核必须受外部线索（即“授时因子”）的引导（entrainment）。阳光自然是最重要的同步器。视交叉上核处在左右视神经交叉处，这并非偶然；这个理想的位置让它能更好地接收来自头骨外部的原始数据（是亮还是暗）。这些信息有助于激活生物钟，确保身体内部的节律与地球的旋转处于适当的相位。但引导说起来容易做起来难。

任何曾因为跨时区旅行而产生精神和身体倦怠感的人，都可以证明重置生物钟是多么大的挑战。完成一趟从洛杉矶到伦敦的旅行之后，重新同步视交叉上核可能需要用上好几天时间——从经验来看，你的生物钟每提前一个小时，你恐怕就要用长达一天的时间来调整。相比之下，我们手表的时钟可以立即重置，匹配当地时区。这种差异反映了人造时钟与生物钟不同的设计原则。大多数手表的石英晶体振荡频率为32768赫兹，因此1小时只需对 $32768 \times 60 \times 60$ 这么多次嘀嗒声计数即可。到达伦敦后重置手表并不需要修改振荡器本身，只需通过推进时针（或数字）来改变当前的刻度数——这纯粹是形式上的。与此形成鲜明对比的是，生物钟的钟摆需要一整天才能完成一次摆动，因此重置它需要对实际的振荡器做更精细的调整，类似推动摆动中的钟摆。这句话里的“摆动”是指我们细胞内生理节律蛋白浓度的升降。就

像我们无法立刻重置半满的沙漏，要立刻重置细胞内生理节律蛋白的浓度更不可能。

在赤道，1小时的时区（跨越经线15度）对应的距离约为1600公里。故此，要在12个小时内跨越相当于洛杉矶到伦敦之旅的8个时区，必须以高于1000公里每小时的平均速度行驶——这比任何动物跑动、游动或者飞翔的速度都要快得多。因此，时差反应是一种独特的现代状况，不光会让游客脾气暴躁，让参加国际科学会议的学者昏昏沉沉，还导致航空公司飞行员、军事人员和外交官做出蹩脚的决策。然而，也不是所有的时差反应都等效。向东旅行比向西旅行明显更难调整。向东旅行需要我们的生物钟相位提前——从洛杉矶前往纽约，我们必须把手表往前调3个小时，而向西旅行则需要相位后延。从西到东海岸的旅行类似于早睡，而从东到西旅行则类似于熬夜——大多数人都觉得早睡比熬夜更难。与这种直观的观点相一致，由于生物钟的相位提前比延迟更困难，向东旅行带来的时差反应一般要严重得多——不过，其背后的机械原因尚不完全清楚。

向东的时差反应，似乎对老鼠来说也更难挨。把年长的老鼠置于模拟长期东向时差反应条件下，每个星期把日夜周期向前推移6小时，8个星期后，这些老鼠的死亡率明显高于日夜周期向后推移6小时（即模拟向西旅行）的老鼠。¹⁷

和时钟做斗争

你是早睡早起的“百灵鸟”，还是晚睡晚起的“猫头鹰”？这些鸟类术语指的是不同的时间类型（chronotype），要判断你是百灵鸟还是猫头鹰，有一套标准化的诊断问卷：它包括人们喜欢什么时候上床、什么时候感觉最为清醒、什么时候更乐意去运动等问题。不同的时间类型反映了个体之间的自然变异，并受环境和年龄的影响。但不管我们的先天倾向是百灵鸟还是猫头鹰，大多数人是可以适应（尽管也会脾气暴躁）不同工作日时间安排的。然而，也有人要是晚上8点不上床，就会困得无法进行正常的社交和职业活动。据说，这些人患有生理节律性睡眠障碍。20世纪90年代后期，专家们对一个5代里生出大量极端百灵鸟型人的家庭做了研究，发现这种障碍中的一部分是有着遗传基础的。该家庭里至少有一名家庭成员（他愿意接受18天自由运行的隔离实验）表现出接近23小时的睡眠-清醒周期，与人类略长于24小时的标准周期形成鲜明对比。2001年，研究人员确定了与家族性睡眠相位提前障碍（advanced sleep-phase disorder）相关的基因突变。研究人员对苍蝇和啮齿动物做了数十年的基础研究，惊人地发现：第一种确认与人类生理节律障碍相关的基因，就是20世纪70年代本泽和科诺普卡所确认的对果蝇昼夜节律至关重要的那种基因——“周期”基因。¹⁸

患有家族性睡眠相位提前综合征的人，在一个24小时的世界里，靠着23小时的内部时钟过活。他们始终在跟自己的内部时钟做斗争。但就算没有“周期”基因突变，人也有可能卷入到类似的时钟斗争当中。在我们现代的全天候（一周7天，一天24小时）世界中，有很大一部分的劳动力是轮班职工：工厂工人、飞行员、护士、医生和警察，他们的工作要求晚上干活白天睡觉。轮班工人的睡眠-清醒周期，大多与他们的自然节律不同步。而且，大多数轮班职工还需要不断调整这一周期：在工作日，他们晚上活动，可到了周末，又是白天活动。这让问题变得更加复杂。毫不奇怪，轮班工作成为大量健康问题的风险因素，包括溃疡、心血管疾病和2型糖尿病。这些问题背后的原因尚不完全清楚，但一部分原因在于，它们是内部生理周期与外部刺激不匹配所导致的。举例来说，胰岛素等激素，一般是在预期的正常进餐时间增加。人体的预期进食和实际就餐时间的长期失调，似乎会促成糖尿病。¹⁹例

如，动物研究表明，从基因上删除胰腺的生物钟，而保留视交叉上核中和其他器官的生物钟，会增加小鼠糖尿病的发病率。这表明，我们体内多套生物钟之间的协调，对生理健康至关重要。²⁰

生活在人自然节律之外的不利影响已得到很好的展示，由此带来了一个问题：彻底没有时钟，会不会比时钟永远不同步更好？出人意料的是，答案可能是肯定的。如上所述，具有生物钟突变的仓鼠，可以有着明显高于或低于24小时的自由运行周期。有一种此类突变，带来了一种有着22小时内部生理节律周期的仓鼠。与野生型同类仓鼠相比，这种突变仓鼠在24小时的世界里，寿命更短。破坏这些仓鼠的视交叉上核，能实实在在地延长它们的寿命。这个神奇的例子说明，在某些情况下大脑的一个部位似乎坏处多过了好处。²¹

准确安排生理功能，预测日出和每日进食膳食的能力，是一种有价值的适应性，但如果生物钟跟我们周围世界的周期不同步，其后果是非常严重的，严重到彻底没有内部时钟反而我们会更好过。在遥远的未来，人类可能会到其他星球拓殖，很有可能，适宜人类生存的星球，其旋转周期跟我们自己的生物钟并不一致。例如，火星的自转周期跟地球足够类似，是24小时又39分钟，但水星上的一“天”持续时间超过58个地球日。因此，如果那一天真的到来，我们说不定会发现，如果不想持续对抗自己的生物钟，最好的办法是彻底关掉它。

多时钟原则

美国国家标准与技术研究院的原子钟是叫人啧啧称奇的设备，不仅因为它们的精度高得不可思议，也因为它们被用来追踪跨多个尺度的时间：从纳秒到年。视交叉上核内的生物钟能否判断不同尺度上的时间呢？我们分辨半音符和全音符，判断自己在咖啡店下的订单是否等待太久、不可接受，管理女性28天的生殖周期——这些能力，是不是都靠它来实现呢？

早期回答这个问题的一种方法，是询问接受自由运行隔离实验的受试者，观察生理节律周期持续时间发生的变化是否会改变人们对较短间隔计时的能力。一组实验要求，每当志愿者认为已经过了一个小时，就按下按钮。在16小时的清醒周期中，一名受试者估计的1小时约为2小时，而在44小时的清醒周期中，他估计的1小时接近3.5小时。总体而言，个体的生理节律周期长度与其对1小时的估计长度之间存在相关性。由此，似乎可以得出结论，生理节律周期用于判断所有的时间间隔，包括歌曲节拍或交通信号灯持续时间等较短的间隔。然而，实际情况并非如此。如果要按下按钮的时间间隔是10~120秒，那么，这就与人的睡眠-清醒周期的持续时间没有显著关系。昼夜节律与在几秒到几分钟的尺度上进行时间判断的能力没有关系，这与大量研究工作所得结论一致：这些研究表明，人有着不同的回路用于判断不同尺度上的时间。²²例如，啮齿动物实验揭示，干扰生物钟的突变，或视交叉上核的病变，不会改变受试动物在秒尺度上的计时能力²³（在下一章，我们将看到科学家究竟怎样询问动物认为过去了多长时间）。

我们对生物钟怎样判断时间的认识，也说明它与秒尺度上的时间判断能力没有关系。生物钟的构建结构和操作原理使得它无法应付短间隔计时。换句话说，生物钟没有分针，自然也没有秒针。在尝试判断红灯会不会马上变成绿灯的时候，翻译/转录反馈环的生化反应速度太慢，根本派不上用场。这并不是说生物钟无法影响其他尺度上的计时：它会。但这只是因为生理节律间接地影响了人的所有生理和认知功能，包括学习、记忆、反应时间和注意力——这就是为什么最好别让还在调整时差反应的飞行员驾驶飞机，或是让睡眠不足的卡车司机继续在高速公路上飞驰。²⁴

那么，更长的间隔又怎样呢？生物钟有助于在更缓慢的节律（所谓的超日节律，*infradian rhythms*）上计时吗？月亮围绕地球旋转的周期约为29.5天。从历史上看，这一循环在人类文化中留下了深刻的印记。大多数日历系统，包括我们现行的公历，都是基于一年中要出现大约12个满月来制定。从词源上看，月份这个词可追溯回月亮。长期以来，人们一直猜想，月相在人体生理学中扮演着重要角色。例如，英语里的“lunacy”^[1]一词，暗示人们相信满月会让人发狂；当代学者认为这种关联的出现是因为满月的光芒，可能会让患有癫痫或双相情感障碍的人精神崩溃。此外，人类的月经周期非常接近阴历月份的事实，暗示了月亮在人类繁殖中的作用。这似乎纯粹是个巧合，因为其他灵长类动物的月经周期有可能明显更短或更长。因此，除了月光可以改变睡眠和社交活动的明显事实之外，几乎没有证据证明月相对人体生理有任何直接的影响。²⁵

然而，在许多动物的生理状况中，月亮实实在在地发挥着重要作用。最值得注意的是，一些海洋无脊椎动物的发育和交配行为，是跟月球周期同步的。在自然环境中，月亮是夜晚的主要光源，满月会增强食肉动物看到潜在猎物的能力，因此一些动物生命周期中最脆弱的阶段，与满月阶段是错开的。其他动物使用月相来同步交配。对体内受精的物种来说，有性繁殖要求雌性和雄性同时出现在同一个地方。体外受精的动物不一定有这个要求，但它需要雄性和雌性在大致相同的时间产生配子。海蠕虫是一种与蚯蚓有关系的分节无脊椎动物，在繁殖季节，它以月相作为同步信号，最大限度地提高卵子受精的机会。这种同步产生配子可能会使数百万蠕虫同时浮出水面，对一些地方的文化来说，这是一场难得的大饱口福的机会。事实上，印度尼西亚有些岛屿上的土著把海蠕虫的产卵视为新年庆祝活动的开始。²⁶

海蠕虫的内部周期时钟，可以通过相当于自由运行的昼夜节律实验来证明，只不过这时的“昼夜”由月亮来定。月节律时钟必然首先依靠月光而非日光（在实验室条件下，则是晚上暴露在昏暗的灯光下若干小时）来引导。如果经过一段时间的引导后，让实验室里的蠕虫处在恒定的日夜循环下，它们仍然表现出30天的生殖节律。蠕虫是怎样追踪30天周期的呢？它们是把自已的生物钟当成摆动一次是1天的钟摆，并数到30吗？如果是这样的话，破坏生物钟一定会改变生殖周期的计时。但事实并非如此：研究人员向海蠕虫注

入改变其生物钟的药物，它们仍然保持30天的月节律周期。²⁷这又是一份支持多时钟原则的证据。

我们看到，身体和大脑内部的计时装置与人造时钟很不一样。同一只手表可以追踪我们生活中的毫秒、秒、分钟、日和月。与此不同，多时钟原则告诉我们，大脑使用不同的机制来追踪这些时间单位。



预见光、温度和食物供应的日常变化是生命基本的能力，几乎所有生命形式，从细菌到智人，都具备高质量的生物钟。但生物钟并不适合预测交通信号灯的时间，就如同日晷不适合用来给百米赛跑计时一样：生理节律时钟只能用来计算“日头”。

生物钟记录的时间，不仅限于追踪一天之内的小时数，也隐藏在意识觉察不到的地方。是的，我们感觉清醒还是疲倦，取决于视交叉上核内特定蛋白质的浓度，但我们对一天之内时间的感觉，与对正午太阳热力的感觉不一样。但我们仍然主观地感受到时间的流逝，敏锐地意识到展开事件的持续时间。很明显（我们接下来就会看到），大脑还有其他途径可以判断时间的流逝。这些途径超越了被动的时间测量，并以某种方式产生主观的时间流逝感。

[1] 意为“癫狂”，其中“luna”指的是月神、月亮。——译者注

4:00 第六感

大概是38年前，在宾夕法尼亚州的一条路上，我睡在汽车的后座。我醒了，发现车的司机同样恹恹欲睡，汽车正朝着路边偏过去，坐在司机旁的乘客，似乎是非常慢地伸出手，抢过方向盘，使劲地拉。我可以在脑海中看到车上正在发生些什么，显然充满了尖叫和嘈杂，我能看到人们张着嘴，但我对声音毫无记忆，她拉着方向盘，汽车转向右边，我们非常慢地撞到护栏上，汽车翻入空中，我内心有个感觉，人生所有的一切都将改变。这段记忆，显然只有一两秒钟，但在我意识里像是永恒。我在医院醒来，那是我最后一次走路。

——约翰·霍肯伯里（John Hockenberry，美国记者兼作家）¹

在危及生命的情况下，我们的主观时间感可以发生彻底的改变，就像切入了慢动作模式。1892年，瑞士地质学家艾伯特·海姆（Albert Heim）发表了关于这种慢动作效应的第一篇学术报告。他从瑞士阿尔卑斯登山俱乐部（Swiss Alpine Club）一些经历过严重下坠或其他濒死体验的会员那里收集了叙述。按照海姆的归纳，95%的人报告说，在濒死的时刻产生了“一种压倒性的精神敏捷和确定感。心理活动变得庞大，上升到百倍速度或强度……时间大大扩展。人准确判断所处的情况，以闪电般的速度行事。在许多案例中，还会突然出现一种对人整个过去的回顾。”²

把人放在危及生命的情况下的实验设定，一定会叫伦理审查委员会大皱眉头，故此，仔细验证和研究慢动作效应十分困难。但一些研究请人们估计高度情绪化或惊悚事件（包括经历地震、观看恐怖影片、从高处跳到安全网里、跳伞等）³的持续时间。这些研究多数证实人们通常会高估事件的持续时间，这跟外部事件缓慢展开的报告（用慢动作看电影，比以正常速度看电影需要花更长时间）是一致的。

不过，就其本身而言，高估情绪事件的持续时间并不特别让人意外，因为事实证明，在很多完全无害的情况下，人同样会高估时间的流逝。⁴实际上，我们的主观时间感相当不准确。死盯着开水壶，它却总是不开；而当你开心的时候，时间飞逝如箭，这正是因为有无数种的情况会扭曲我们主观的

时间感知。比方说，忍受一场极度无聊的讲座，或是在停机坪上等待飞机维修，会带来一种时停错觉——也就是感觉时间凝固了。相反，当你全神贯注地看一本书，沉浸在你最喜欢的爱好里，或完全投入到一项复杂的任务（如编写计算机程序）中，时间就仿佛蒸发了似的，从这个时刻一下跳到下一个时刻。

客观时钟时间与主观时间感之间有什么样的关系呢？为什么在危及生命的情况下时间似乎会放缓？当我们说时间飞逝或停滞不前的时候，大脑里发生了些什么？为解决这些问题，我们必须首先区分两种不同类型的时间。

前瞻和回顾计时

判断时间是一个双向问题。在马拉松比赛开始时触发的秒表，可以连续地测量马拉松运动员的跑步时间，但它无法告诉我们，运动员们用了多久在起跑线前等待比赛开始，也不可能告诉我们他们早上是什么时候起床的。启动秒表是前瞻计时的一个例子：判断从此刻开始到将来某个点流逝了多长时间。与此相对，如果你走进房间，刚好看到沙漏里漏下了最后一粒沙子，你可以推断出从前一事件过后到现在为止过去了多长时间：1个小时之前，有人把沙漏翻了过来。但除非你再次将沙漏翻转，否则，沙漏无法提供你进入房间后经过了多久的信息。这是回顾计时的一个例子：估计从过去的某个时刻到此刻流逝了多长时间。

在一整天的过程中，人们不断进行前瞻和回顾计时。想想以下两种你可能需要仰赖自己估计事件持续时长的能力的情况。假设聚会时，你正跟朋友艾米和伯特说话，艾米请你提醒她5分钟之后离开，因为她还有个地方要去。接下来换一种场景，艾米先告辞了，5分钟后伯特问你：“艾米离开多久了？”在这两种情况下，你都需要估计经过了多长时间，但你的大脑是否使用相同的机制来进行判断呢？不。对大脑而言，这两项计时任务有着根本性的不同。在第一种情况下，你事先知道自己将执行计时任务，你可以在 $t=0$ 时启动假想中的秒表，追踪时间的流逝，直到过去差不多5分钟。但是在第二种情况下（伯特问你艾米是多久前离开的），你的秒表毫无用处，因为你根本不知道什么时候该启动秒表。前瞻计时是一项真正的计时任务，因为它依赖于大脑的计时回路。相比之下，回顾计时完全不是计时任务；它是通过重新构建存储在记忆里的事件，尝试推断时间的流逝。

前瞻和回顾计时的区别，解释了一些关于我们主观时间感的谜团，包括一些人所称的假日悖论⁵。在前往希腊度假的途中因为飞机延误而等待的5个小时，似乎漫漫无绝期；但游览雅典所度过的兴奋一天，却仿佛飞逝而过。然而，一个星期之后，机场的延误仅仅是微不足道的一个片段，而雅典充实忙碌、妙趣横生的一天却似乎相当漫长。

假日悖论并不是现代快节奏高速出行生活方式的伴生产物。1890年，威廉·詹姆斯就写道：“总的来说，变数多的有趣经历，似乎过得很快，但回

看的时候却显得很长。另一方面，一段缺乏经历的时间似乎很长，但回想起来却显得很短。一星期的旅行和观光，在记忆里似乎像是三个星期那么久；生病一个月，带来的回忆却难得超过一天。”⁶

引人入胜的有趣活动在展开过程中似乎转瞬即逝，部分原因在于我们完全没有想到时间。所以，你第一次到访有2500年历史的帕特农神庙，时间一晃而过，但在亚特兰大机场5个小时的等待，却绵延不绝，因为你不断查看手表，想知道这还会再耽搁多久。而回过头去看，这些活动的持续时间部分地是根据记忆里存储的事件数量来估计的。此外，由于我们更有可能记住对个人有意义的新奇事件，到访帕特农神庙比你第一次到访亚特兰大机场洗手间更有可能独占你记忆库的一条插槽。⁷

英国音乐理论家克莱夫·韦尔林（Clive Wearing）的案例深刻地说明了记忆与回顾计时之间的密切关系。韦尔林因为一次严重的脑部感染，失去了创造新的长期记忆的能力。虽然他的许多能力未受损害（包括他演奏音乐和指挥的能力），但他起初在一天中花大量时间在日记里写道：“现在，我真的完全清醒了。”过一会儿又把这句话划掉，再写上“现在，我完全清醒了——第一次。”由于无法形成新记忆，他似乎困在“不变的当下”的无限循环里。他没法理解自己在哪里，怎么到那里去的，故此意识唯一能做出的阐释是，他永远只是刚从睡梦中醒来。他对自己什么时候醒来没有回顾感，因为他对此前的几分钟和几小时里发生了些什么几乎没有任何记忆。

时间的压缩和膨胀

在实验室里可以很方便地研究前瞻和回顾计时之间在秒尺度上的差异。暗中改变人们对时间的感知的最常见方法之一是，改变人所执行的任务的认知负荷。认知负荷（cognitive load）只是描述任务难易程度的一个新鲜术语。在最初进行的此类实验当中，有一次，调查人员给了受试者一叠洗好的扑克牌：一组受试者的任务是，将牌面朝上派成一叠（认知负荷低）；另一组受试者则需要按花色将牌派成4叠（认知负荷高）。所有受试者都要派牌42秒。如果受试者事先知道（前瞻计时条件）研究人员要他们口头估计自己派牌用了多长时间，只把牌派成一叠的受试者平均估计值是53秒，而按花色派牌的受试者是31秒；如果受试者不知道事后会要自己估计时间（回顾计时条件），则受试者报出的数值分别是28秒和33秒。随后的数十项研究确定，前瞻计时受认知负荷的强烈影响：任务越复杂或越具挑战性，受试者对执行任务所花费的时间估计越短（53秒对31秒）。回顾计时恰好相反：认知负荷越高，任务用时似乎就越久（28秒对33秒）。然而，回顾计时受认知负荷的影响，似乎不如前瞻计时那么强烈。⁸

前瞻和回顾计时之间的区别，其重要性不容小觑。例如，在派牌研究的低认知负荷条件下，受试者在完全相同的时长（即42秒）里做完全相同的事情（把牌放进一叠）；然而，前瞻估计是53秒，回顾估计为28秒。研究表明，前瞻和回顾计时估计存在巨大差异，而这些估计对认知负荷又有着极强的敏感性，这揭示了我们流逝时间的判断是多么不准确、不可靠。我们的主观时间感知受大量外部和内部因素的影响，在不同的背景条件下，相同的持续时间很容易在人的意识里被折半或翻倍。研究表明，人们倾向于将自己在商店排队、在银行排队、打电话等待接线所耗费的时长高估25%~100%。事实上，我们拿着电话等待客户服务接入的时候，公司会让我们听悠扬音乐，因为一些研究指出，如果人在等待时听音乐，报告的等待时间会更短。⁹

在实验室中，大多数考察时间估计扭曲的研究都集中在数百毫秒到几秒的范围内。通常，志愿者会坐在电脑前，对图像或声音的持续时间做出判断。认知神经科学家维金尼·范·瓦森霍夫（Virginie van Wassenhove）主持过一项研究，参考刺激是在屏幕上显示500毫秒（半秒）的静态圆圈。接下

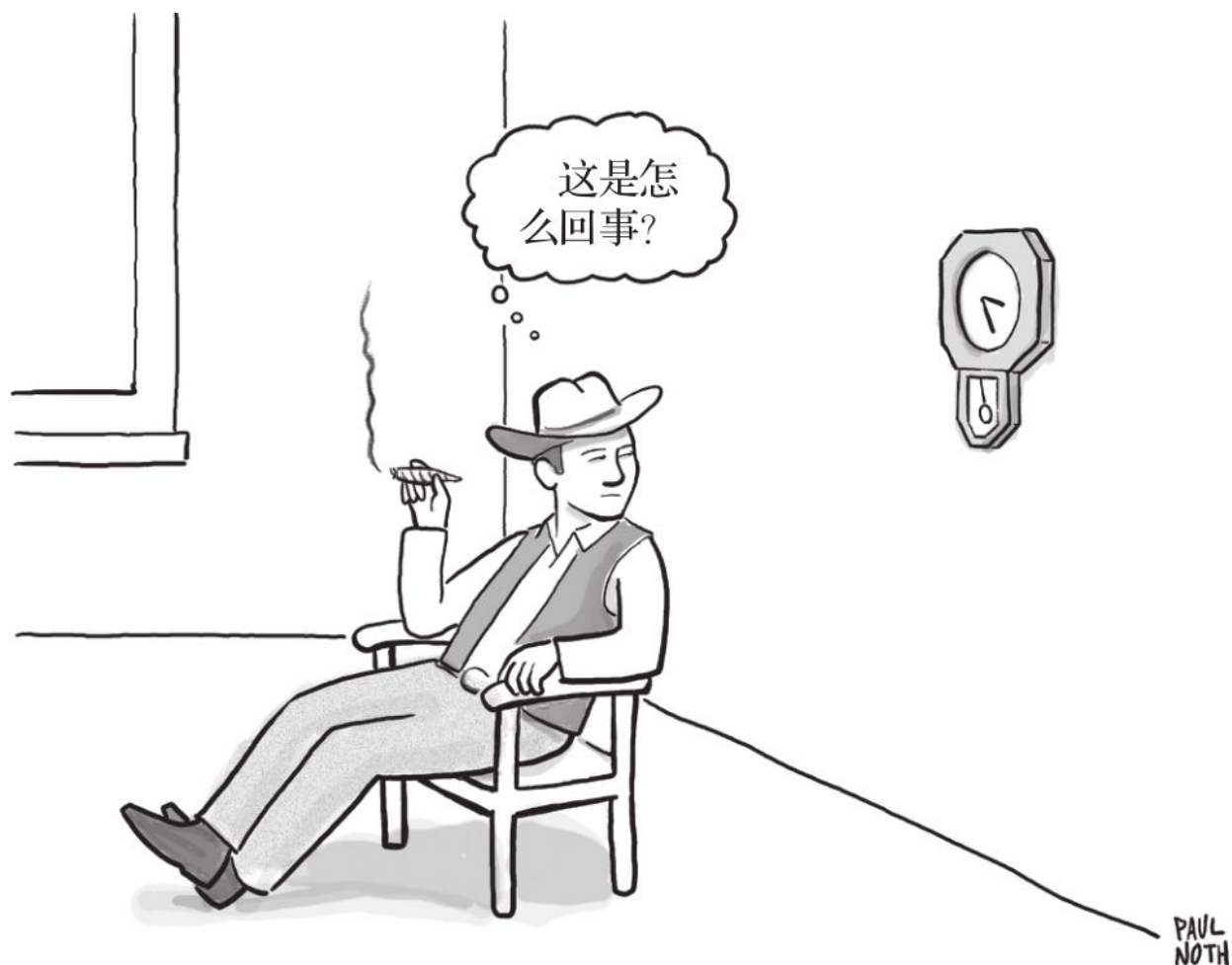
来，相同的圆圈会呈现更短或更长的时间。受试者要按下两个键中的一个，报告该刺激是比参考刺激持续时间长还是短。在这样的条件下，受试者的感知往往相当准确：当比较刺激持续450毫秒时，他们大多能正确地报告它比500毫秒的圆圈持续时间短；而当比较刺激持续550毫秒时，他们通常报告它比参考刺激持续时间长。故此，人们对比较刺激的持续时间感知相当准确。然而，如果比较刺激成了一个面积不断扩大的圆圈，而参考刺激仍为静态圆圈，就会出现一种错觉：这是时停错觉或时间膨胀的一种形式。在人的感知中，不断扩大的圆圈比静态圆圈持续得更久，一个不断扩大的持续450毫秒的圆圈，在人们眼里与500毫秒静态圆圈持续时间相同。¹⁰

在秒尺度上，各种各样的附加物理特征都可以改变我们对时间的感知。例如，听觉刺激大多会被认为比视觉刺激持续时间更长。幅度也可以影响时间判断：一些研究表明，人们甚至会判断，一幅显示数字9的图像持续时间比数字1的图像更长，尽管两者显示的持续时间相同。此外，在人们的感知中，新颖或意外刺激的持续时间比熟悉或意料之中的刺激更长。¹¹

我们的时间感有多么容易扭曲呢？最常见的例子之一是停表错觉。也许，当你把目光投向一台有着嘀嗒作响的秒针的老式模拟钟时，你已经注意到了这种错觉。把目光转移到时钟上那一刻，你也许会想：“遭了，时钟停了下！”但你还没来得及完成这个想法，你就意识到自己错了，因为秒针正在移动。停表错觉的产生是因为，秒针运动的暂停似乎比你大脑里认为一秒钟应该持续的时长要久一些。在一秒或更短的尺度内，我们自己的行为（本例中是目光的转移）可以蒙蔽我们的时间感——停表错觉似乎就是由这一事实所导致。¹²就好像，当我们在转移注意力的时候，大脑内部的一些计时器就开始嘀嗒走动得更快了一些，这样一来，固定的时长里就积累了更多的嘀嗒声，于是高估了流逝的时长。停表错觉和其他时间错觉证明：我们的主观时间感，的的确确是不客观的。

时辰药理学

如图4-1中的漫画所示，我们的时间感会受到精神类药物的剧烈影响。毫不奇怪，这一事实并未逃过威廉·詹姆斯的注意，他通过个人经验暗示道：“大麻中毒时，时间视角会出现一种奇怪的拉长。我们说出一句话，还没说到结束，开头就仿佛已经是无限久之前了。”¹³的确，人们经常报告吸食大麻似乎会导致时间变慢。有这样一件趣事：两个嬉皮士吸大麻上头了，他们坐在金门公园，一架飞机正好从上空飞过；一个人对另一个人说：“伙计，我还以为它再也不会动了呢。”¹⁴



大中午

图4-1

资料来源：Paul Noth/The New Yorker Collection/The Cartoon Bank

在我们继续往下讨论之前，有必要指出：有关时间变慢、飞逝、拉长、膨胀或加速的表述，有可能会让人困惑，¹⁵尤其是人停下来思考这些表述到底是什么意思的时候（这么做真是个错误）。以时间飞逝为例，这是暗示墙上的时钟似乎走得更快还是更慢了？如果有人报告时间飞逝，他的意思是，在固定的客观时钟时长里，他完成的更多还是更少？时间加速或飞逝的表述，在本质上就模棱两可。更快和更慢都是相对的形容词；故此，就像说某样东西在你的左边还是右边一样，你必须提供一个参考点。在谈论时间扭曲时，人们一般的意思是将外部时钟的变化与假想的内部时钟变化进行比较。假设说，这一虚构的内部时钟控制着我们在毫秒、秒和分钟层面上的前瞻计时判断，而且，该时钟每秒钟嘀嗒10次。故此，如果是为了对威胁做出回应，或受药物影响，它每秒加速到嘀嗒20次，结果就是，在5秒的客观时间内，人会产生过去了10秒的印象。内部时钟的这种加速，通常被描述为“时间变慢”“拉长”或“膨胀”，因为我们是以自己为中心的：我们使用内部时钟作为参考点，并注意到外部时间放慢了速度。当然，这种说法取决于人选择的参考时钟：人们还可以说时间加速了，因为内部时钟比外部时钟走得更快。但不管怎么说，在习惯上，关于时间加速或减速的陈述是指外部时钟相对于假设的内部时钟的速度，哪怕正在减速或加速的实际上是内部时钟。在媒体、通俗文学或科学文献中，人们本来的意思是时间加速，但错误地说成时间减速，这样的例子并不罕见。看看图4-1中的漫画就知道：如果大麻的活性成分四氢大麻酚令得人产生了外部时间放缓或拉长的感知（跟威廉·詹姆斯的观察和实验证据相符），等同于内部时钟加速，那么，图中的牛仔难道不该发现时钟是还没到正午才对吗？更一般地说，我必须指出：我们对时间过去得有多快或多慢的感觉，并不必然等同于我们对流逝了多少秒或分钟的明确估计（我可能估计自己在牙医的椅子上待了5分钟，但说不定会报告说，那感觉像是过去了一个小时）。¹⁶

尽管我们不该按字面理解“内部时钟嘀嗒作响”的概念，但在思考我们的时间感知时，它提供了一个非常有用的比喻。实际上，药理学研究通常会在内部时钟速度变化的背景下来阐释时间扭曲。比方说，许多以人类为对象的实验室研究支持受大麻影响导致时间变慢的逸事性报告，这些结果可阐释为内部时钟的加速。一项早期研究曾请受试者在给出开始信号后他们认为过去了60秒时进行报告。接受了一剂口服四氢大麻酚之后，受试者给出的估计明显短于自己

的基准估计：由于四氢大麻酚在他们的神经系统里发挥了作用，受试者平均会在过去42秒之后报告说过去了1分钟；而他们的基准估计是非常接近60秒的。¹⁷这就好像他们的内部时钟运行得更快了——在42秒的客观时间里就计数到了60秒（请注意，受试者估计的时间较短是因为研究对他们提出的要求是“生成”1分钟；如果要他们估计真正的1分钟的持续时间，内部时钟更快将导致高估）。

药物同样会影响动物的时间感。这里有一个问题：人该怎么询问动物觉得过去了多长时间呢？实验室用的大鼠和小鼠能轻松学会按压杠杆来获取食物，这种标准形式的操作性条件反射有一种变体，叫作固定时间间隔程序，它用开灯等线索来表示一轮试验的开始（即 $t=0$ ）。试验开始后，大鼠可以随意按下杠杆，但只有在试验开始达到某个固定的时间间隔后的第一次按下杠杆时，大鼠才获得食物奖励。这样一来，大鼠就能学会在与固定间隔成比例的时间按压杠杆。

因此，如果训练期间采用的固定间隔是10秒，则大鼠更有可能在接近固定间隔的时候（10秒左右）按压杠杆。而接受10秒间隔训练的大鼠，会先于接受30秒间隔训练的大鼠按压杠杆。这是证明啮齿动物和其他动物能够在秒尺度上前瞻性地记录时间的一种方法。问题是如果学会这项任务（可能要花几个星期来训练）之后，大鼠们“嗨上头”了，事情会变成什么呢？在一次以30秒固定间隔训练大鼠的实验中，注射四氢大麻酚之后，大鼠按压杠杆的高峰时间，从34秒上下（无药物）降到了29秒左右（有趣的是，在这一研究中，大鼠接受四氢大麻酚影响后，时间感反而更“准确”了）。这一结果与人类报告相一致，即在大麻影响下，由于假想中的内部时钟运行速度更快了，所以时间变慢了；尽管这种药物引发的对计时的影响并未得到普遍重视（尤其是大麻）。¹⁸

研究得最充分的动物计时时间药理学效应，涉及操纵大脑的多巴胺系统。多巴胺是一种重要的神经递质，是许多不同大脑流程的调制器。最值得注意的是，如果位于脑干的一组生成多巴胺的神经元受到损害，会导致帕金森病的特征性震颤和运动缺陷。杜克大学的心理学家沃伦·梅克（Warren Meck）及其同事提出，多巴胺可能会改变大脑内计时回路的速度。例如，他的实验表明，按20秒固定间隔训练大鼠，之后，对其施加兴奋剂甲基苯丙胺（它会提高大脑内的多巴胺水平），能使大鼠按压杠杆的计时从大约20秒变为17秒。但如果注射甲基苯丙胺数天后再次执行该任务，大鼠又会将自己的计时慢慢重新调整回

20秒：就好像它们学会了应对始终走得快一些的内部时钟，按照20秒的间隔重新校准了内部的嘀嗒声次数。此外，不再给大鼠注射药物之后，它们的计时会矫枉过正：按压杠杆的高峰时间增加到20秒以上。¹⁹

上述药理学研究以及其他许多相关研究，为人类和动物怎样判断和感知时间提供了重要见解。但理解这些研究，始终十分棘手，存在大量争议。首先，结果通常依赖于所用任务的性质、所研究的时间间隔以及受试者怎样报告对流逝时间量感知的细节。其次，由于几乎所有药物都有着多种互相关联的神经生理学效应，故此，很难确定行为改变的真正原因。比方说，大麻素和多巴胺药物能够影响焦虑、记忆、运动活动和生理状态（如饥饿感，可能会影响到动物执行任务的动机）的水平。还有一点更不必说，这些药物还能改变受试人类和动物愿意投入到手头任务的注意程度，而这又有可能带来一系列的不同阐释。此外，某些药物影响的是人对短间隔的判断，不影响长间隔，而另一些药物又是反过来的。²⁰总体而言，从研究精神活性药物对时间感知影响的相关科学文献来看，我们对时间的感知，并不受单独的某一种神经递质控制。此外，由于同一种药物对长短间隔估计的影响有别，药理学研究提供了强有力的证据，表明并没有一台主导性的内部时钟，可在从毫秒到小时的各个尺度上控制计时。因此，这也就提供了证据，支持我们之前所提到的多时钟原则。

慢动作效应的原因

我们现在明白，应该把我们时间感的扭曲视为规律而非例外，这样一来，人在高度情绪化或危及生命的情况下所报告的时间扭曲之谜，也就减少了些许神秘感。尽管如此，危及生命的情况下事情以慢动作展开的报告还是显得极为扎眼，因为它们远远超过了单纯高估流逝时间的概念。这里有若干假说，或许能解释为什么危及生命的事件似乎是按慢动作展开的。²¹我将介绍其中的3种，并分别称之为：超频、超记忆（hypermemory）和元错觉（metatillusion）假说。

超频假说

如果你计算机的CPU以2GHz运转，这意味着它可以在1秒钟内执行20亿次操作。这一速率由计算机的“时钟”控制。这一时钟的功能不是判断时间，而是设置CPU上的操作频率：本例中，指的是每隔0.0000000005秒发送一次电脉冲。每个电脑游戏玩家都知道，通过提高时钟每秒产生的脉冲数，可以让计算机进行超频。超频之后，计算机能够更快地完成各项任务：它可以在给定的时间内接收并处理更多信息（缺点是CPU有可能融化）。说不定，慢动作效应就是由相当于计算机超频的神经活动所导致的：在危及生命的时候，大脑进入超频状态，这可以解释为什么人的反应更快，并以慢动作感知事件。

大脑可以“超频”吗？大脑执行任务所花的时间，由许多不同的因素决定，包括：（1）电信号（动作电位或“脉冲”）沿轴突传导的速度；（2）突触中的电化学信号从突触前神经元传递到突触后神经元所需的时间量——突触延迟；（3）突触电流改变神经元电压，使之足以触发动作电位所需的时间：这部分取决于所谓的神经元时间常数。轴突的传导速度和突触延迟在很大程度上由相当严谨的生物物理和生物化学事件决定，不大可能在“或战或逃”反应中大幅加速。相反，神经元产生动作电位以响应其突触前细胞的大量输入所花的时间，可以通过一系列的机制减少。²²设想这种情况的最简单方法之一是，在“或战或逃”的情况下，充斥大脑的神经调节物质（如去甲肾

上腺素）和血液，可以让大脑里的兴奋神经元去极化（也即减少抑制），从而让神经元更容易、更迅速地产生动作电位。然而，神经元动作电位延迟时间的变化，不太可能实现10%或20%以上的速度提升。例如，据报道，包括咖啡因在内的兴奋剂，可以减少人们对刺激做出响应的时间（反应时），但此类减少的幅度一般不到10%。²³通过一些我们目前对其尚未充分了解的机制，神经调节物质可加强大脑对周围发生的外部事件的关注，变得更为敏锐。实际上，研究人员已确认，注意可以提升绩效和缩短反应时。这一效应大概有助于解释职业运动员让人过目难忘的现场表现，但无法解释当事人“根据准确的判断采取了闪电般迅速的行动”或者“自己的整个过去突然闪现在眼前”等报告。

人们在高度危险的情况下完成了决定生死的复杂举动，这样的报告有可能并不准确。如果真的发生了此类行为，它们可能主要来自训练有素的人：赛车手、战斗机飞行员和极限运动员——他们的神经回路受益于数千小时的训练从而反应更加迅速。正如一位研究人员所说的那样：“熟练的皮划艇运动员可以调整船只、身体和桨叶，以便在穿越急流和瀑布时选择一条让你活下来的路线。技能不够娴熟的参与者只会感到困惑，甚至有可能僵住、恐慌或做出反倒让处境更加危险的行为。”²⁴尽管许多研究人员都重视危及生命的情况下当事人做出超人表现的报告，但人在这样的情况下做出糟糕决定的记录也不少。因此，训练带来的注意力提升和更娴熟的运动技能，可以让专业人员在危及生命的情况下迅速采取行动，而我们其他人，尽管同样在主观上感知到以慢动作展开的事件，面对危险时却只是被动地挥舞手脚，或是动弹不得。

超记忆假说

慢动作效应另一种可能的解释是，它是事后错觉，也就是说，人们在事发当时其实并未真的感觉到事件以慢动作发生，而是在回想起该事件时认为自己当时是这么感知的。在“或战或逃”情况下，大脑可以增强我们记忆的空间和时间分辨率。换句话说，受到威胁的时候，事件发生的感知速度大体上是正常的，但到了回忆的时候，记忆会变得更加详尽，所以事后看来，所

有事情都像是切入了慢动作。在一份关于慢动作效应的描述中，受害者几乎被迎面而来的火车撞死，他报告说：“火车驶来，我看到了工程师的脸。这就像一部电影播放得很慢，每一帧画面都以扭曲的慢动作推进。就这样，我看到了他的脸。”²⁵但我们怎样才能确定这一记叙是回忆的时候才产生的，还是真的在事件发生时产生的呢？此外，我们怎么才能知道，回忆的事件是准确的（这个人真的能辨别出工程师的脸吗）？众所周知，我们对情绪性事件的记忆，有可能是非常不可靠的。例如，我们知道，许多暴力犯罪的受害者在目击证词中都指认的是错误的嫌疑人，这样的例子很多。²⁶

然而，某些版本的超记忆假说，似乎有助于解释慢动作效应，因为在情绪性或危险事件期间释放的神经调节物质，的确可以强化记忆。这就是所谓的“闪光灯记忆”（即人们记得自己在听说“9·11”这类悲惨事件时置身何地）的一种解释。创伤后应激障碍是“或战或逃”反应强化记忆的另一个例子，在这种情况下，人会产生过于强烈、不利于生活的记忆。²⁷

当然，超记忆假说并不能解释“人们动作更迅速、比平时更准确”的报告。它也不能解释“事件发生的瞬间出现了慢动作效应”的神奇主观感受。我忍不住想起了自己亲身经历的一次慢动作效应，我显然受了它的影响。在一次车祸中，我的车侧面受到撞击，它旋转着“砰”的一声撞到电线杆上。我在这次事件中的独特感受，不仅仅是汽车在缓慢旋转，我还在事发当时想：“哇，时间真的变慢了！”但我要强调，此类瞬间当中的感知远非完美，我不记得自己做出了什么迅速反应，也不记得自己想起汽车配置了侧面安全气囊。然而，我记得“想起时间变慢了”这一事实，暗示我确实感知到事故期间事件以慢动作发生，故此超记忆假设不能完全解释慢动作效应。

元错觉假说

超频和超记忆假说的一个不足之处在于，它们未考虑对主观体验的基本观察。无论是颜色、声音还是时间的流逝，我们的意识体验本质上都是错觉：无意识大脑决定外部世界发生的哪些事情与我们相关，而意识体验则对此做了一番方便的叙述。这看似是一个奇怪的概念（我们将在第12章回到这

一概念），但现在，要理解我说的主观体验的错觉本质，最令人信服的方式或许是通过身体知觉的例子。所有主观体验中我们最熟悉的一种是，你的手就是你的手，而不是其他任何人的。如果你用锤子敲钉子，却一不小心砸到了自己的手指，你会感到疼痛。虽然痛感是大脑产生的，但奇怪的是，你不会觉得它发生在大脑里，相反，痛感投射到了你手指所在的地方。身体意识的错觉性质，可以通过幻肢综合征来揭示。一些截肢的人继续清晰地感受到他们失去的肢体，就像我们大多数人所感受到的一样。幻肢告诉我们，大脑坚定地制造一种“我们拥有构成肢体的骨骼、肌肉和神经”的错觉，哪怕肢体消失，它也会不屈不挠地继续制造这种错觉。因此，真正的错觉不是幻肢，而是对我们实际肢体的拥有感。幻肢综合征是一种令人费解的现象，但过分关注幻肢的神秘，也会让我们从真正的谜题上分心。真正的谜题是：一开始，大脑是怎样制造对我们身体的有意识知觉呢？²⁸类似地，过分地聚焦于危及生命的情况下的慢动作效应，妨碍了我们关注真正的谜题：我们对时间流逝的“正常”感知。

想象你坐在一个空荡荡的房间里：一部电影正在播放，你很快意识到速度全错了。嘴唇的运动呈慢动作，物体落地的时间太长。你怎么补救呢？如果你对电影的投影方式或产生投影的机器类型一无所知，那你要怎样才能理解电影为什么会以错误的速度播放呢？毕竟，从投影机的角度来看，“正确”的播放速度只是众多可行设置之一。我们正常的时间感是一种心理构建，似乎同样有着不同的速度设置。元错觉假说强调慢动作效应是一种对错觉的错觉，因此，在不理解我们正常的主观时间感的条件下去解释该效应，就像是在对正确速度怎样生成一无所知的条件下去调整慢速播放电影的速度。

意识不仅是对外部世界正在发生之事的延迟记叙，也是对无意识大脑中正发生之事的延迟记叙。例如，我们会看到（第12章），通过观察大脑内部神经活动，可以在人们实际采取行动之前900毫秒预测他们什么时候自发决定动弹手指，这比受试者本人意识到自己“自由”决定要动弹手指要早上数百毫秒。故此，哪怕危险真的使大脑切入了超频模式（从而带来加速行动），意识也有可能因为速度太慢而无法指导这些行动。因此，“思考速度加快所展现的显著心智敏捷”之类的报告，²⁹兴许只是无意识大脑强加于思维的另一种欺骗。

大脑不仅可以 将痛感投射到我们肢体所处的位置，而且，如果把义肢安装在你的真胳膊附近，大脑可以重新校准投射，把你对胳膊的空间感知调整到义肢所在的位置——就好像大脑倾向于把义肢接受为身体真正的一部分（这被称为橡胶手错觉）。正如大脑能够把我们的肢体位置感投射到空间的不同点上，它似乎也可以灵活地把事件标记为快速展开或缓慢展开。也就是说，我们对时间是流逝得快还是慢的主观判断，说不定是与大脑处理信息的速度（即大脑的内部时钟速度）分离的。³⁰

为了进一步强调元错觉假说的意义，让我们想一想，在危及生命的情况下，人不光只有时间感会扭曲。以下内容节选自一篇事故集合，它收集了1976年发表的100多份事故报告³¹。第一份报告来自一位24岁的赛车手，他本来正以每小时160多公里的速度行驶，但一起事故使他的车飞到了10米高的半空，多次翻转：

整件事情似乎要永远持续下去。一切都是慢动作，在我看来，自己就是舞台上的演员，我可以看到自己在车里反反复复地翻着跟头。就像是我坐在看台上，看到了正在发生的一切。

一名21岁的大学生经历了一场严重车祸，他报告说：

在这一切当中，时间凝固了。似乎永远不会有任何事发生。空间太不真切了。完全像是坐在电影院里，看着事情在屏幕上发生。

在第二次世界大战期间，一名士兵的吉普车被炸毁，他回忆说：

我没有意识到时间的流逝，只有永不改变的那一刻。我也没有任何空间的概念，因为我的存在似乎完全是精神上的。

因此，发生改变的心智能力，好像并不只有时间感：对空间的感知同样发生了变化。实际上，换到任何其他背景中，上述报告将被称为“幻觉”（hallucinations）或变异状态（altered states）。“或战或逃”反应引发的内源性神经化学物质的突然喷涌，有可能使大脑回路过载，产生幻觉。故此，说不定最好的理解方式是 把慢动作效应看成另一种类型的变异状态，更多的是脱离现实，而非依附现实。

在大脑中压缩时间

上述3种有关慢动作效应的假说，并不互相排斥。照我猜测，注意的提升，使训练有素的专业人员能在肾上腺素飙升的情况下迅速采取行动，超记忆或许可以部分解释人们事后对慢动作效应的报告，但归根结底，我们感知事件流逝的速度，是一种主观设置，建立在远远更为神秘的意识错觉基础之上。

我们认为，慢动作效应和其他时间错觉，是人的时间感知（更具体地说，是对事情变化速度的感知）的扭曲，但事实并非如此简单。人压缩时间和使时间膨胀的能力，其实是大脑的一种特点，我们每天都会用到。

你最喜欢的歌曲第一句最后一个字是什么？如果你跟我一样，你必须从头开始哼唱到这一句结束的地方：一个人……要走过多少路……才能成为一个人^[1]。但你肯定不需要按照歌曲原本的节奏，在心理上回放这段歌词。你可以非常快速或缓慢地进行心理回放：对歌词快进，或者玩味每一个音节。实际上，我们用不同的速度执行相同动作的能力，是人类运动系统的一项重要特征。我在跟婴儿说话时会放慢讲话的速度，讲座时要是时间不够用，我就会加快语速。如果你正在教孩子怎样系鞋带，你可以慢慢地系，但要是你急着出门跑步，你会非常迅速地把鞋带系好，你还可以在脑海里，想象自己以比实际更快地系鞋带。我们有效加快或降低运动动作速度的能力，大约5倍的范围之内：举例来说，最慢和最快的音乐节奏通常在每分钟40~200拍之间。但有证据表明，大脑可以以更快的速度回放事件。

我们在第1章中提到了海马体的位置细胞。当一只大鼠处在房间特定位置的时候，这些神经元会选择性地产生动作电位。是以，如果一只大鼠在探索某一开放地区，比方说穿过标记为1-2-3-4-5的位置，那么，在每一个位置，都会有对应的神经元产生动作电位。要是我们将每个位置产生动作电位的神经元依次标记为A到E，我们将观察到位置细胞随着时间启动的模式（我称之为神经轨迹）：A-B-C-D-E。我们可以将这种模式看作是大鼠穿越路径这一体验的神经特征（neural signature）。大鼠可能要用10秒钟通过该路径，因此神经轨迹A-B-C-D-E将在相同的时间内发生。现在，有趣的地方来了：神经科学家在动物睡眠或休息期间，对这些相同的细胞进行记录，他们观察到，

这种A-B-C-D-E的神经活动模式，出现得会比随机状态更多——也就是说，这一特定神经活动模式的出现频率，比大鼠未曾在这一天早些时候穿越1-2-3-4-5路径的情况下要多。对此种结果的一种解释是，大鼠的大脑正在回放它之前体验的事件。但这些回放事件是在完全不同的时间尺度上展开的：回放时，相同的A-B-C-D-E序列启动不需要10秒，而可能仅持续200毫秒。这种回放轨迹可能有助于记忆的形成——帮助在大脑回路中存储体验过的事件（有必要强调，我不是在暗示大鼠在回放期间有意识地重新体验自己穿越的位置；它们很可能并不会）。这种回放还可能代表了对未来行动的计划。例如，当大鼠执行一项任务，在这项任务中，它们必须在小小的“奖励坑”停下获得食物，接着再前往下一个坑，在坑点停留期间观察到的神经活动模式可用于预测大鼠接下来会往哪儿走！³²对这一发现的一种解释是，老鼠的大脑正在短短不到1秒钟的时间内，计划将来某10秒钟可能采取的行动。神经轨迹的压缩回放，以及我们可以在精神上控制意识之耳里一首歌的播放速度，这两个例子揭示了大脑确实可以按不同的速度处理和生成时间模式。然而，大脑功能的这一特点，是否跟时间的主观压缩和膨胀有关，仍然是一个悬而未决的问题。



我们对时间的“感知”，并不像听觉或视觉那样是一种真正的感知。我们没有时间的器官，我们的眼耳口鼻舌或者皮肤上都没有时间受体。由于时间并不具备像光或者空气分子随压力变化那样的物理性质，也不可能存在时间受体。然而，大脑不仅测量时间，还感知到时间的流逝，使我们似乎能感觉到时间的流淌。然而，大量的时间错觉表明，我们时间感的准确性可以极大地偏离客观的时钟时间，而且我们的时间感往往由这些错觉所构成。但存在时间错觉也没什么好惊讶的。事实上，所有主观体验，包括我们对颜色和疼痛的感知，以及我们的身体意识，都会因为背景、学习、注意和药物而发生改变。对心理学家和神经科学家来说，这些错觉为了解大脑的运作方式提供了宝贵的洞见，但说到底，最重要的一课大概是，无论是否扭曲，所有的主观体验，在本质上都是错觉。因此，我们不应为时间错觉而过度分心，偏离了更为根本的谜题：大脑一开始是怎样产生有意识的时间流逝感（就此而言，也可以将时间感替换成其他任何一种感觉）的呢？

[1] 这句歌词来自民谣歌手鲍勃·迪伦著名的歌曲《答案在风中飘》。
——译者注

5:00 时间模式

Excuse me while I kiss this guy. (我亲吻这家伙时请原谅我。)

——据说出自吉米·亨德里克斯 (Jimi Hendrix, 美国歌手)

虽然你可能从未仔细想过，但在任何对话的过程中，你的大脑都在努力计算每个音节的持续时间，每个单词之间的短暂停顿，以及撞击鼓膜的声音流的整体节奏。

音素 (phonemes) 是最小的语音单位：它们构成任何给定语言中的全部声音库（音素和字母之间存在一种近似的对应关系，但同一个字母可以表示不同的音素，例如“gun”（枪）和“gin”（杜松子酒）当中的“g”，发音就是不同的。大多数时候，语义可以通过短语中音素的顺序来确定。但也有时候，相同的音素序列可能有着非常不同的含义，从而带来了模棱两可的单词组和短语：

Great eyes (漂亮的眼睛) —— Gray ties (灰色领带)

A nice man (一个好男人) —— An iceman (一个冰人)

They gave her cat food (他们给了她猫粮) ——

They gave her cat food (他们给她的猫喂了粮) ^[1]

这种模糊性，通常可以通过言语的其他层面来解决，包括音节的持续时间、语调、重音和单词之间的停顿。例如，解除上述短语歧义的最简单方法之一，是强调适当单词之间的停顿。在最后一例中，“cat”和“food”之间的停顿较长，暗示她的猫有了吃的；而在“her”和“cat”之间故意停顿，暗示她获得了猫粮。语速也用于传达意义和信息。以这句话为例：The hostess greeted the girl with a smile^[2]。是谁在笑？研究表明，将“girl with a smile”部分加速（时间压缩），偏向于是女孩在笑；而对这一部分放慢速度（时间膨胀）偏向于是女主人在微笑。¹

这种模棱两可带来了一种可悲的后果：好多人唱自己最喜欢的歌，却唱错了歌词。由于歌手有时必须让短语跟一首歌节拍的结构契合，人们可能误听歌词（反过来说，有些歌词听错了，是因为歌手的唱法有问题）。将一首

歌听出了多种阐释的现象，甚至有特定的名字：空耳（mondegreen）。一个著名的空耳例子，来自吉米·亨德里克斯在《紫雾》（Purple Haze）中的一句歌词：“excuse me while I kiss the sky”（我亲吻天空时请原谅我），人们常听成“excuse me while I kiss this guy”（我亲吻这家伙时请原谅我）。和口语中一样，这种潜在的模糊性，部分地与计时相关，它可以通过用暂停以强调恰当的界限来解决。

计时对区分单个音素也很重要。例如，“b”和“p”之间的区别，部分基于所谓的“发声起始时间”（voice-onset time）：它指的是口腔中的空气爆发性释放与声带振动之间的间隔。如果你将手指放在喉咙上，并说“pa”，你可能会感知到，在张开嘴和你感觉声带开始振动之间，有一个时间间隔。当你在说“ba”时做同样的事情，这个间隔更短，甚至难以察觉。“pa”的发声起始时间通常在30毫秒以上，而“ba”的发声起始时间小于20毫秒。我们能够轻松地听到音节“ba”和“pa”之间的差异，这一事实意味着：听觉系统有着恰当的计时机制，来区分这些非常短的间隔。

在几百毫秒到几秒这一稍长的时间尺度上，计时对韵律（言语的节奏或音乐性）至关重要。我们使用语调，节奏和语速来传达情绪、讽刺，或者我们所说的短语是想提问还是陈述。根据说话人的韵律，“真是个好主意”既可以表达恭维，也可以表达贬低。研究表明，通过让句子在时间上压缩或膨胀来改变语速，可以让人对说话者情绪状态的判断发生变化。一项研究请说德语的受试者听句子并判断说话者的情绪状态。当参与者听到发音清晰的传达悲伤的句子，他们正确地辨认出说话人的情绪状态是伤心。当这些句子加快速度，参与者通常认为说话者处于恐惧或中立状态。重要的是，通过韵律传达的情绪，可以超越语言。当同样的句子，由不通德语的美国人来进行判断，他们对说话者情绪的判断，遵循与德国人相同的模式。类似地，如果对句子进行滤波，个别的单词难以听清，但保留了言语的整体“轮廓”，听众仍可提取出说话者的情绪状态——想想看，这就像是隔着一堵墙听到模糊的对话：哪怕你听不清一个字，大概也能判断他们是在吵架，还是在享受快乐。²

[1] 此处的“her”，在前一句中代表的是“她”的宾格，在后一句中指的是“她的”，故此，两句话写法完全一样，但有着不同的含义。——译者

注

[2] 这句话可以有两种理解：“女主人微笑着对女孩打了招呼”，或是“女主人对那个微笑的女孩打了招呼”。——译者注

好玩的时机

据说，言语的时机同样对喜剧至关重要。这一观察结果是否在实验室（或者动物研究）里经过仔细验证我拿不准，但演员沙查·巴隆-科恩（Sacha Baron-Cohen）在电影《波拉特：为建设伟大祖国哈萨克斯坦而学习美国文化》（Borat: Cultural Learnings of America for Make Benefit Glorious Nation of Kazakhstan）中，对“在喜剧里，时机就是一切”这句格言做了一次妙趣横生的展示。在一个场景中，一位幽默教练正在解释一个有关“不”的笑话里时间有多么复杂。这句话虽然不是特别好笑，但至少滑稽的潜力：

That suit is black. Not!（那套西服是黑色的。不！）

波拉特试着更深入地理解，他说：

That suit is not black.

That suit is black not.

That suit is black. Not!

上面这些说法，幽默的潜力低了很多。为什么时机对精彩的笑话大有意义呢？幽默在一定程度上来自出人意料。一样东西要有趣，它应该是出乎意料的，但又必须合乎情理：“那套西服是黑色的，鹰嘴豆”确实出乎意料，但并不是特别有趣。³幽默的另一个要素，或许是意外必须在恰当的时间发生。大脑不断地实时预测接下来将要发生些什么，什么时候发生：也许，出人意料的妙语，应该在人们饱含期待的时间窗口发生。如果妙语出现得太早，那就无法让人感到意外，因为没有足够的时间生成“接下来会发生些什么”的预测。反之，如果妙语出现得太晚，听众在精神上已经进入下一组预测了——意外的元素居然是什么也没有发生，这令人感到困惑，但并不好笑。

妈妈语

凡是成年后想要学习一门语言的人，可能都抱怨过母语人士语速太快。⁴ 听一门外语，就像是置身疾驰的地铁车厢，又努力想要识别地铁站台上的一张脸——因为所有的脸都融合在一起，大脑很难抓住任何一张特定的脸。放慢语速，可以帮助新手在句法上将音素串解析成独立的单词。

在学习第一门语言时，婴儿可能也存在类似的挣扎，这大概就是为什么成年人在和婴儿说话时，会自动放慢讲话速度，对单词特别强调。我们言语模式的这种变化，叫作“婴儿导向语言”（infant-directed speech），也叫“妈妈语”或“亲子语”。婴儿导向语言，通常以音调升高、元音拖长、单词之间的停顿更长为特征。例如，研究表明，成年人互相交谈时，短语之间的暂停时长约为700毫秒，但成年人对婴儿说话，这个数值会延长到1秒以上。研究还证实，与尝试学习一门新语言的成年人一样，用语速更慢、重音突出、带韵律的妈妈语跟婴儿说话，婴儿能更好地区分单词。⁵ 较慢的言语有助于婴儿和成年人解析语言：了解一个单词从哪儿开始，另一个单词在哪儿结束，避免连续的音素相互干扰。我们将在下一章中看到，这似乎是大脑处理信息流、在数十到数百毫秒尺度上判断时间所带来的结果。

言语是多维度的：多种变量促成了语言，包括音素的序列、音素的间隔、音节的持续时间、单词之间的停顿、语调、重音、语速和整体的韵律。许多这些特点都要求听众的大脑判断时间。类似地，说话人必须参与生成言语时间结构所必需的对应的运动挑战，这就包括卷舌的复杂序列、精密定时的嘴唇运动、声带振动、停顿和定时呼吸。总的来说，听众和说话人的大脑必须解决一整套复杂的计时问题：这项任务，有可能超出了任何单纯时钟类设备的能力。

摩尔斯电码

我们已经看到，人类和其他动物参与各种时间任务，对声音从一只耳朵传到另一只耳朵的延迟计时，对红灯的持续时间计时，或对地球围绕轴线的旋转计时。这些任务依赖于对单个间隔或持续时间的计时，在时间领域也就相当于判断物体的长度。相比之下，言语和音乐识别需要确定复杂时间模式的时间结构：将许多时间片段组合在一起以形成整体。

时间之于言语和音乐识别的意义，一如空间之于视觉对象识别。我们可以把从绘画中识别人脸想成一个空间问题，也就是说，相关的信息，包含在画中所有元素之间的空间关系里。它也是一个层次问题：低层信息（直线与曲线）必须整合到统一的图像当中。一个圆就是一个圆，但是两对并排的同心圆就成了眼睛；把它们放进一个更大的圆里，你又得到了一张脸……依此类推，直到我们看出了一个场景中的人群。从时间的角度来说，言语和音乐就相当于识别视觉场景：它们要求解决一个分层次的嵌入式时间问题。⁶言语需要追踪以下渐次变长的元素的时间特征：音素、音节、单词、短语和句子。从某些方面来说，识别时间模式的层次结构更具挑战性，因为它需要一定的过往记忆。绘画的所有特征同时展现在一张静态的纸上，但言语或音乐的相关特征，需要跨时间的整合；也就是说，每一特征必须放到已经隐没在过去的元素的背景下去阐释。

大脑处理时间模式的能力有多么精妙，摩尔斯电码或许是最合适的例子。言语和音乐依赖于声音时间结构中编码的信息，但声音的音调中同样传递着大量的信息。我们可以将音调视为空间信息，就像纸张上线条的方向。这可能有点让人糊涂，因为音调指的是对声音频率的感知，而频率是以每秒周期数测量的固有时间特性——即声波振动周期重复之间的间隔。然而，声音的频率，是由排列在耳蜗上的听觉感受细胞（毛细胞）的长度在空间上进行再现的。因此，对中枢神经系统而言，区分声音的音调，在本质上是一项空间任务：就类似钢琴上琴键位置的差异。摩尔斯电码不依赖于任何类型的音调或空间信息：在摩尔斯电码中，节奏意味着一切。

摩尔斯电码包括两个基本要素：点和划。两种符号之间唯一的区别是持续时间，故此，摩尔斯电码仅需要单个通信信道，比如一种音调，或是灯以复杂

的时间模式打开或关闭。这种简单的性质，使电码易于传输。甚至，靠着眨眼的快慢就能发送消息了。越南战争期间，美国海军少将杰利米·丹顿

（Jeremiah Denton）就是这么做的。他以战俘身份接受了以宣传为目的的采访，在电视采访中，他这样回答了一个问题：“我得到了足够的食物，只要我提出要求，也能得到足够的衣物和医疗服务。”但他说话时眨着眼睛：T O R T U R E（折磨）。⁷

点和划的持续时间取决于摩尔斯电码的整体速度，以每分钟多少个单词来衡量。按每分钟10个单词的速率，一点一划的持续时间分别为120毫秒和360毫秒。但停顿中同样嵌入着信息：每个字母之间的停顿是360毫秒（点持续时间的3倍），每个单词之间的停顿是840毫秒（点持续时间的7倍）。

· — — — · · · · · — — — — · · · · · — — — — ·

（点和划）

以上模式的意思是“时间是什么”。较长的停顿代表单词之间的中断。所有信息都包含在音调的持续时间、音调的间隔以及它们的整体全局结构中。但和演讲一样，摩尔斯电码也有韵律，专家们似乎能够通过时间的微小不同，通过“口音”来识别说话者。对未经训练的人来说，听一段长长的摩尔斯电码信息就像是听外语：根本听不出哪儿是一个字母的结束、哪儿是另一个字母的开始。每一个传入的音调，都跟前一个音调相堆叠，使得以下两种序列完全无法区分：

* * * * * * * * * * (she)(她)

和

* * * * * * * * * * (his)(他的)

当然，专家不需要像你一样，停下来有意识地数这些点，思考一个字母什么时候结束，下一个字母什么时候开始，在区分“neuron”（神经元）和“neutron”（中子）时也用不着琢磨自己到底听没听到字母“t”。

那么，怎样才能成为摩尔斯电码专家呢？慢慢来。人不可能一开始学习摩尔斯电码就达到每分钟20个单词的速度：他们会从缓慢的速度开始，逐渐提高。一种推荐的方法是使用所谓的法恩斯沃斯方法（Farnsworth timing）：字母以正常速度传输，但字母和单词之间的停顿则通过延长来加以强调。这让学生学会把字母视为单个的“时间对象”，同时强调每个字母和单词之间的界限，以便减少它们的互相干扰。⁸换句话说，人们从摩尔斯电码妈妈语开始学习摩尔斯电码。

学习判断时间

即使对不熟悉摩尔斯电码的人来说，区分360毫秒的划和120毫秒的点也相对容易。类似地，在音乐背景下，区分250毫秒的音符和500毫秒的音符（分别是每分钟120拍下的8分音符和4分音符）也是很容易的。但大脑是怎样实现这些简单形式的时间辨别的呢？依靠练习，人的计时能力会进步吗？解答这些问题，可以为大脑怎样判断时间提供重要的见解。

人们或许会猜测，大脑使用某种通用的神经秒表来对所有范围在几毫秒到1秒的持续时间计时。反之，我们还可以推测，大脑中有许多不同的神经元或回路，专门用于检测给定间隔——就类似有一组沙漏，每一种都用来记录不同的时间间隔。为了在这些假说中试着做出区分，我们可以问一问，人辨别时间间隔的能力，是否会随着练习而改善？怎么改善的？

尽管自从19世纪末以来，人们就在研究时间间隔辨别，但直到20世纪90年代，计时能力会不会随着练习而改善的问题，才有了最终定论。为系统性地解决这一问题，加利福尼亚大学旧金山分校的贝弗利·怀特（Beverly Wright），我，还有我们的同事亨利·芒克（Henry Mahncke）和迈克尔·梅泽尼希（Michael Merzenich）展开了第一波的研究。我们使用了一种标准间隔辨别任务：受试者听到两个不同的间隔，并要判断是第一个还是第二个间隔时间更长。在此任务中，两个简短的音调（每个15毫秒）将每一间隔分界。因此，第一个间隔可能包含两个音调，中间夹着标准的100毫秒空白；而第二个间隔（也叫对照间隔），则可能是两个音调夹着125毫秒的空白（见图5-1）。本例中，标准间隔和对照间隔之间的差异为25毫秒，称为 Δt （ Δt ）。如果听到100毫秒和125毫秒的间隔，参与者总是正确地识别出较长的间隔，那么我们可以得出结论，她的内部计时器有着更佳的分辨率：小于25毫秒。



图5-1 间隔辨别任务

改变 Δt 的值，就有可能估计出大脑计时器的精度。我们首先用50、100、200和500毫秒标准间隔来估计受试者的阈值。值得注意的是，对每一标准区间，这些阈值非常不同，这是人类区分不同量级刺激的方式的一般特点。你大概分辨得出重量为100克和125克的两个物体谁轻谁重，但恐怕分不出1000克和1025克的两个物体谁轻谁重。一般而言，重要的不是两种刺激之间的绝对差异，而是它们之间的相对比例。间隔辨别阈值约为15%~25%。举例来说，对100毫秒的标准间隔，人们的平均间隔辨别阈值是24毫秒，这就是说，平均而言，人们可以可靠地分辨出100毫秒和124毫秒的区别。研究的第一天，我们获得该基线数据之后，受试者接受为期10天的训练，在训练期间，他们练习辨别100毫秒的间隔，每天练1小时。经过练习之后，受试者的计时能力确实有所提高，标准100毫秒间隔的平均阈值从24毫秒降到了10毫秒。这表明，练习的确提高了大脑中计时器的质量。但人类是复杂的生物，有可能练习并没有提高计时本身，但随着时间的推移，志愿者能更专注于任务，所以看起来有了提高。好在我们还有第二个更有趣的问题，它的答案否定了后一种解释。

既然经过训练，人们在100毫秒间隔下的表现有所提高，那么其他间隔下表现也提高了吗？请注意，如果我们相信，大脑中有某种通用神经秒表负责对50毫秒到500毫秒之间的所有间隔计时，并且这块秒表经过练习变得更准确了，那么我就会期待，所有间隔的计时都有所提高，哪怕志愿者只做了100毫秒间隔的练习。相反，如果大脑使用专门的计时器，那么我们可以预测，只针

对100毫秒标准间隔实现的提高，无法扩展到其他间隔。情况果然是后一种：尽管在100毫秒间隔上练习10天，显著提高人们辨别100毫秒间隔的能力，但它并没有改善50、200或500毫秒间隔下的辨别阈值。⁹如果在100毫秒间隔下的学习来自于专注度的提升，那么，受试者就应该在所有间隔上有所改善，但我们并没有观察到。更重要的是，自此以后，这一结果在许多其他研究中得到重复，¹⁰这表明，不管大脑在次秒级范围内怎样判断时间，恐怕都不是采用主秒表机制（即一种机制对任意、所有时间间隔计时）。

有理由认为，如果计时能力随练习而改善，那些需要准确计时的专业人士，比如音乐家，表现应该高于平均水平。当时在俄勒冈大学的理查德·艾弗里和同事们做了一项针对这一问题的早期研究。他们请钢琴家和非钢琴家按一个按钮，要求与每隔400毫秒出现的一系列音调同步，接着，等这些音调停止后，继续以相同的间隔按下按钮。音乐家生成的内在间隔，比非音乐家变动幅度明显要小（即更一致）。同样，钢琴家在标准间隔为400毫秒的间隔辨别任务中表现也更好。¹¹另一项研究证实，音乐家的间隔辨别阈值，在50~1000毫秒的标准间隔内明显更低。不过，就算是音乐家内部，也存在显著的计时差异。例如，鼓手能比弦乐手更好地辨别1秒间隔。¹²总体而言，研究表明，在各种时间任务中，音乐家的整体表现比非音乐家至少高出20%。

跟上节拍

音乐以各种各样的形式在人类文化中普遍存在。音乐的一个关键因素是节拍，也就是间发性的步调，作为一首歌节奏的基础。我们自然而然地拍手或摇头晃脑来呼应歌曲的节拍，这就是人类大脑是预测机器的又一个例子。你不会跺脚响应每一节拍（通常以鼓的敲击为标志），相反，你的大脑提前预料到了几百毫秒后下一节拍的出现，并将动作与之同步。把动作和歌曲的节拍同步非常简单，以至于有时候跟着节奏的引诱摇摆反而比克制这种冲动要简单。然而，大多数动物都不具备跟上节拍的简单能力。

动物不光没有和我们一样的音乐癖好，似乎也没有将动作与间发性刺激同步所必需的感官运动技能。说到这一点，常年浏览YouTube的爱好者大概会表示反对，并指出随处可见可爱宠物随着流行歌曲节拍快乐摇摆的视频。这类的视频，有一些大概是走运的“聪明汉斯”效应所致：动物学会了按主人留下的线索行动，比如“汉斯”这匹名马就是靠着跟随主人不自觉的身体线索，进行数学运算的。不过，另一些视频（尤其是鸟类片段）可能是真实的。

科学家当然不介意从YouTube视频里招募受试者。心理学家阿尼鲁德·帕特尔（Aniruddh Patel）和同事们招募YouTube明星“雪球”（一只可爱的白色凤头鹦鹉）进行了一项研究。¹³在一段视频里，“雪球”进行了一连串的身体和头部运动（只能把这称为跳舞），应和着后街男孩《每个人》

（Everybody）的曲调。为了确定“雪球”是真的跟上了节拍，而不是记住了一系列的固定动作，研究人员将歌曲放慢或加速，以判断“雪球”的动作在什么地方呼应音乐节拍；如果头部在每一拍上总是多多少少地朝前伸，我们就可以说，它的动作是与节拍同步的。“雪球”的动作显然与一系列节奏的节拍同步，这意味着它在预测节拍——尽管它似乎更喜欢跟着更快的节拍跳舞。¹⁴但鸟类其实是例外，猴子可以学会重现由两个听觉音调标记的单轮间隔，但是它们很难执行简单的同步任务。一项研究报告说，即使经过一年的训练，恒河猴也无法跟着周期性出现的音调同步按下按钮，虽然它们能够学会在每一音调出现后稍微滞后地按下按钮。¹⁵

那么，为什么跟上节拍这一看似微不足道的任务，对跟我们同宗的灵长类动物来说这么棘手，但对某些鸟类又不成问题呢？这个问题有一种可能的答案，叫作声乐学习假设。大多数哺乳动物，包括猴子、狗和猫，通过叫喊、嚎叫、咆哮、吠叫或喵喵声相互交流，但这些行为是天生的，反映了一套非常简单而有限的“词汇”：例如，一只狗不需要学习就知道咆哮的意思不是“欢迎啊，请靠近些。”只有相对较少的动物从经验和社交互动中学会了发声。除人类外，能够进行声乐学习的物种包括一些鸟类、鲸鱼和大象。鹦鹉是最明显的例子，因为它们可以学习重现其他鸟类发出的声音，甚至模仿有限的几句海盗的黑话。

声乐学习需要大脑听取声音，然后弄清怎样使用声带和口腔肌肉，再现出相同的声音。这一任务显然要求大脑的听觉和运动中心之间进行大量的合作。同样，根据间发性听觉刺激同步动作的能力，也需要听觉和运动系统之间的紧密合作。有人提出，动物学习发声沟通的大脑布线，同样也是跟随歌曲节拍这一明显更简单的动作的基础。¹⁶

言语和音乐是主动的努力，要求大脑对接下来将发生些什么，创造一种连续发生的期待。音乐是要受引导去期待一个具体的音符出现在具体的时刻；这种期待是得到满足，还是遭到违背，取决于作曲家的意图。¹⁷因此，不足为奇，跟随节拍的能力，是欣赏音乐的最低要求，与间发性刺激同步，是对预测和期待最基本的一项测量指标。

唱歌的鸟儿

鸟不仅能跳舞，有些还能唱歌。至少，我们称之为“唱歌”——它们在互相沟通。鸣禽中的歌曲学习和人类言语之间，有无数的相似之处。这些相似之处，使鸣禽成为人们研究学习、沟通、语言和计时时作为对象的重要物种。¹⁸ 雄性斑马雀（zebra finches）在求偶行为中，会唱极为复杂的歌曲。年轻雄鸟从成年雄鸟处学习此类歌曲，甚或是听另一只雄鸟歌唱的录音。和人类言语一样，斑马雀必须在一个关键的发育窗口期进行发声学习。如果错过了这一早期发育期，鸣禽就永远无法学会像正常的成年鸟那样歌唱：从没听过另一只雄鸟唱歌的雄鸟也能唱，但它唱歌的质量，不大可能吸引任何雌鸟。

就像在言语和音乐中一样，鸟类歌曲里的种种元素，同样存在时间的层次。音符组合形成音节，一系列的音节形成歌曲中的乐句。一个音节可以持续几百毫秒，音节之间的停顿通常持续不到100毫秒，整首歌曲可以持续几秒钟。雌雄斑马雀的大脑完全不同：雄鸟拥有大量对歌曲学习和生成至关重要的大脑区域（雌鸟不唱歌）。有一个此类核状脑区叫作HVC（它什么也不代表，别问了）。这一核状区域，至少部分地负责斑马雀歌曲的计时。HVC中的神经元在歌曲中的特定时间激活，例如，一个神经元在一段乐句中第100毫秒激活，另一个神经元大概在第500毫秒激活。¹⁹ 我们可以认为，这些神经元形成一条神经元链，其中，神经元A激活B，B激活C……（见图5-2）。结果是，一旦神经元A激活，我们就会产生神经元激活的多米诺骨牌效应A-B-C-D-E（实际上，最好将该链中的每一环看成是一组而非单个的神经元）。这就像使用一连串将会倒下的多米诺骨牌作为计时器：如果多米诺骨牌反复按照相同的位置排列，并且每张多米诺骨牌需要100毫秒才倒下，那么我们知道，第5张多米诺骨牌倒下时大约已经过了500毫秒，第10张多米诺骨牌倒下时，就过去了1秒钟……类似地，我们将在下一章更详细地探讨，一种理论认为，在某些情况下，大脑通过确定链条中哪些神经元当前处在活跃状态，进而判断时间。HVC中的神经元好像确实使用此类机制控制鸣禽歌曲中音符的计时。但神经科学里有一项旷日持久的挑战，那就是相关性和因果性：仅仅因为HVC中的神经元似乎负责唱歌，并不意味着它们真的负责唱歌。为解决这一相关性与因果性问题，当时在麻省理工学院的神经科学家迈克尔·朗（Michael Long）和迈克尔

• 费（Michale Fee）推断，如果HVC神经元引发歌曲的计时，那么，要是这些神经元的活动模式放缓，鸟儿就应该以慢动作唱歌。²⁰

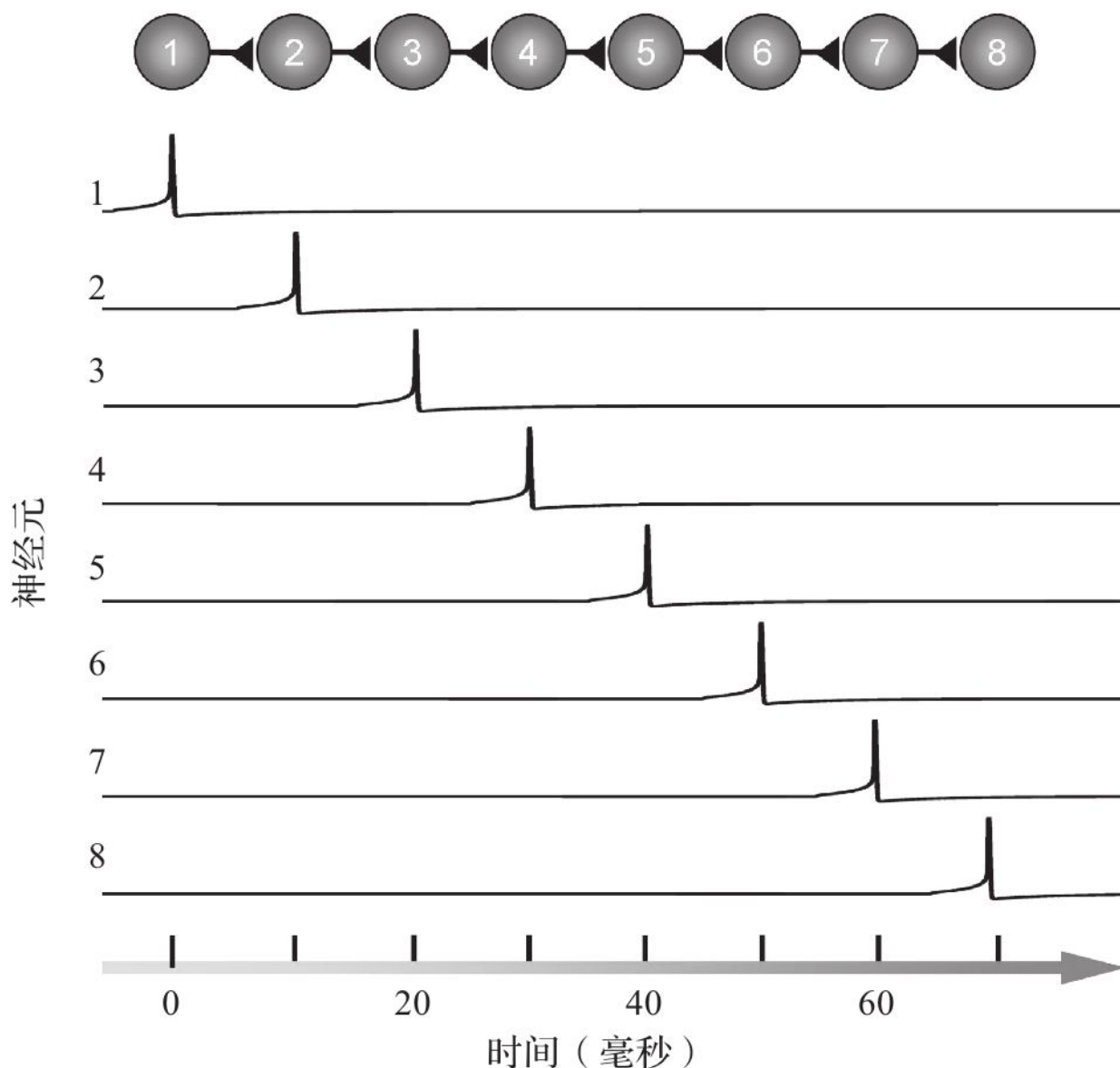


图5-2 同步链（Synfire Chain）。在同步链模型中，各个神经元（或神经元组）以“前馈控制”（feed-forward）的方式连接。神经元活动（以电压“脉冲”为代表的动作电位）在整个网络中传播，就像是多米诺骨牌接连倒下的模式。链条中第一个神经元的激活时间，可以通过哪一个神经元目前处于激活状态来编码。

放慢一组神经元的活动，是一个精妙的尝试，它可以通过操纵大脑目标区域的局部温度来实现。冷却生物组织，通常会减慢其代谢和活动速度，神经元

也是如此。例如，在外温（冷血）动物中，动作电位沿着轴突行进的速度，甚至动作电位本身的持续时间，都有可能取决于外部温度（这是恒温动物通常比外温动物有着更快神经反射的原因之一）。为了降低HVC的温度，朗和费使用了一种微小的冷却元件，可以插入鸟类大脑。这使得他们得以在雄鸟唱歌的时候（通常在隔壁的鸟笼里放一只雌鸟，可以引诱雄鸟唱歌），将其HVC的温度降低低于体温5或6摄氏度。结果很清晰，就唱歌而言，冷却HVC会降低歌唱速度。值得注意的是，节奏减慢在整首歌曲中是统一的；也就是说，音符、音节、停顿和乐句的整体长度，都得到了等量拉伸，最多可达40%。作为一项重要的对照实验，研究人员还冷却了一个对歌曲生产很重要的运动核：该区域从HVC接收输入。冷却该区域不会显著影响歌曲时长，这意味着，使得歌曲放慢的效果，是因为放慢了HVC中神经元的活动模式（神经动力学），在本例中，运动区域多多少少只是HVC的从属。

关于鸟类歌曲的计时还有许多未能得到解答的问题，但上述实验提供了一份证据，即大脑中的某个区域可能有助于（甚至控制了）复杂行为的计时和时间结构。

时间的神经解剖学

动物电生理学研究 and 人类影像学 research 并没有提供令人信服的证据，证明大脑内部存在任何主回路负责在几百毫秒到几秒的尺度上判断时间。事实甚至基本上相反：在大脑中，要找到哪个区域跟所有种类的计时都毫无关系，反而越来越困难。²¹很明显，任何强版本的主时钟策略都是不正确的，但这并不是说，大脑里没有特定的区域负责特定形式的计时。在鸣禽中，HVC 似乎确实是歌曲计时的关键。我们将在下一章中看到，在哺乳动物中，小脑对某些形式的运动计时非常重要。此外，研究还始终表明，人类大脑的某些区域参与时间间隔的辨别。这些区域包括基底神经节（位于大脑皮层下方的一组脑核）和辅助运动区（与运动皮层相邻的区域，有助于运动）。²²然而，要说明这些区域到底是判断时间还是报告时间（也就是说，它们到底是手表里的石英水晶装置，还是数字显示装置），现在还为时过早。此外，这些研究并没有揭示大脑中任意回路如何判断时间——计时的神经机制。

我自己的和其他许多实验室的理论及实验研究都表明，虽然大脑内有特定回路负责某些类型的计时，但大多数神经回路在有需要时本质上都是能够判断时间的。根据任务的特征（如感官计时还是运动计时，间隔还是模式计时，次秒级还是秒级的计时），或许会存在主要负责计时的特定神经回路。所以，听觉回路可能部分地负责区分四分音符和八分音符；视觉回路可能有助于区分视觉呈现的摩尔斯电码的点或划；运动回路可能负责用摩尔斯电码敲出 SOS 求救信号；基底神经节可能有助于我们预测交通信号灯会在何时变色。

这种观点认为，计时是大多数神经回路能够执行的一般性运算，这就使我的实验室提出了一个问题：一块孤立的大脑皮层组织，保存在培养皿里，它能判断时间吗？

在体外（培养皿里）保存活的血细胞或心脏、肝脏组织是做得到的，所以，靠着类似的方法，神经科学家长久以来能够培养从大鼠或小鼠截取的大脑皮层片段。这些体外皮层回路里可包含数万个神经元，并能存活数周到数月。通常，这些回路待在恒温箱里，无法与外部世界进行任何交互。我实验

室的霍普·约翰逊（Hope Johnson）和安努·高尔（Anu Goel）提出这样一个问题：如果这些回路暴露于某种时间模式之下，会出现什么样的情况呢？回路会有所改变或适应吗？回路能在某种意义上“学习”特定的间隔吗？在一系列实验中，来自大鼠听觉皮层的大脑切片，被以100、250或500毫秒的间隔加以电刺激数个小时。²³正常而言，大脑通过感觉器官接收信息，而培养皿中的神经元没有途径接收到来自外界的信号。为了给体外回路提供各种感官体验，研究人员用金属微电极对组织体进行短暂电击，使一小部分神经元产生动作电位。在100、250或500毫秒的时间间隔内，安努·高尔又施加了第二种刺激，这一刺激采用光脉冲的形式，也引起了一部分神经元的动作电位。当然，一般来说，神经元对光没有反应（除了我们眼中的光感受器），因为它们没有检测光的色素。然而，通过所谓的光遗传学方法，可以给培养皿里的神经元转染一种编码对光敏感蛋白质的基因，诱导培养皿里的神经元被光激活。²⁴这样一来，这些皮层回路跟外界有了非常有限的接触：它们全都体验着3种不同时间间隔中的一种。问题是，它们的体验是否以任何方式影响了这些回路的行为。“不通世事”的切片通常会爆发出一股持续数百毫秒的网络活动，响应短暂的电脉冲。之所以发生这种情况，是因为电击直接激活的神经元又激活了其他神经元，其他神经元进一步激活了更多神经元——这一活动将“回荡”几百毫秒，直至活动消失。此活动是网络内部动态的一种标志。根据用于训练皮层切片的间隔，神经元网络内部动态表现出不同的特征。用短暂的间隔训练，神经元的活动持续时间很短；而用250毫秒或500毫秒的间隔训练切片，引发的网络活动平均持续时间更长。因此，不光是切片内部动态会因其体验发生改变，而且内部动态的时间相（temporal profile）也会根据受训间隔发生适应。约翰·霍普金斯大学马歇尔·舒勒（Marshall Shuler）实验室的独立研究也观察到了来自视觉皮层体外切片的时间间隔学习形式。²⁵对这些结果的一种解释是，在某种意义上，就连培养皿里的皮层回路也能够学习判断时间。

这些体外研究有力地支持了如下观念：我们应该把“在数百毫秒范围内计时”的能力，视为神经回路的一种固有特点，而不是要靠专属回路去执行的运算。

人们常常会问，有没有哪种神经系统的疾病会让人失去判断时间的能力呢？这个问题的答案取决于我们所指的时间尺度。我们已经看到失忆症患者

克莱夫·韦尔林的例子，他显然失去了追踪分钟尺度上时间流逝的能力，这就是为什么他似乎卡在了一个永恒的循环里，总以为自己刚刚醒来。这是合乎情理的：哪怕我们的墙上挂着走动的时钟，如果我们不记得任务什么时候开始，也就没法用它来判断一个小时是否已经过去。可韦尔林演奏音乐、理解言语、进行对话的能力仍然不受影响，他在数百毫秒尺度上的时间判断能力显然是完整的。而且很可能，就像著名的失忆症患者H.M一样，他能精确地重复几秒钟的间隔。²⁶ 韦尔林和H.M这类的患者，形成新的长期记忆（具体而言，是有关事实和自己生活事件的记忆）的能力严重受损。这类缺陷为我们理解大脑怎么存储记忆带来了根本上的洞见。我们很自然地想要问，特定的疾病是否会破坏人在一秒左右的尺度上判断时间的能力。答案是：不会。就目前所知，还没有什么样的神经系统状况会让人丧失欣赏音乐节奏、在秒尺度上重复时间间隔、学会在正确的时间眨眼以响应音调等能力。由于不同的时间问题由大脑内部不同的回路解决，也不应该会出现那样的情况。



物体是可以被看到或触摸的有形实体，但是大脑本身永远无法直接看到或触摸到任何东西。所有关于外部世界的知识，都是通过5种感觉器官之一产生的动作电位模式来实现的。根据这些模式，大脑学会识别实际的有形实体，如光剑或木瓜。从视觉上讲，这些物体独立于时间，从快照中就可以识别出它们。但是大脑在外部世界中所识别的大部分信息，存在固有的时间性：手的挥舞、池塘的涟漪、字母……（摩尔斯电码里的“s”）、一首抓耳的曲调、蝙蝠拍打翅膀、说出来的词汇“蝙蝠”和“拍打”。这些都是时间性的“事物”。为了检测和再现此类事件，大脑需要灵敏地察觉时间顺序和计时。

音素的发音开始时间，音符的持续时间，或摩尔斯电码点与划之间的区别，都需要低级别的计时——它们是森林里的树木。而言语、音乐和摩尔斯电码，是更大的时间景观。这一景观，只可能在几十毫秒到几秒的时间尺度上才能看出来。跳出这一范围，就不再有言语和音乐的存在。音乐放慢或加速得太多，它就不再是音乐了。说得太快，音素会相互融合；说话太慢，音素无法辨认，我们会开始忘记句子中的前一个音素和单词。次秒级的计时，是时间加工的黄金区域：我们能够同时理解森林和树木的地方。

如果没有解析复杂时间模式的能力，我们将无法使用人类的两种标志性能力：言语和音乐。但大脑怎样解决言语或音乐固有的复杂计时问题呢？大脑怎样测量音节的持续时间，判断歌曲的节奏呢？

6:00 时间、神经动力学和混沌

什么是时钟？时间流动的天然主观感，让我们能对自己的印象进行排序，判断这件事发生在前，那件事发生在后。但为了表明两件事之间的时间间隔是10秒钟，一台时钟是必要的。借助时钟，时间概念变得客观了。任何物理现象都可以充当时钟，只要它可以按需求准确地重复多次。

——爱因斯坦和英费尔德 (Einstein and Infeld) ¹

人造时钟基于一条无比简单的原理：数出振荡器振荡的周期数。不同振荡器的复杂程度迥然有别：可能是钟摆的摆动，可能是石英晶体的振动，也可能是电磁辐射“振动”的循环——但归根结底，人造时钟就只是在数某种周期性过程的嘀嗒声。考虑到这种计时策略有多么成功，人们很容易假设大脑也依赖类似的原理来判断时间。这么想的诱惑力太大了。

关于大脑怎样在毫秒到秒尺度上判断时间，最有影响力的理论叫作“内部时钟模型”，最初于20世纪60年代初建立框架。²顾名思义，该模型基于一个类似于人造时钟的原理：一个或一组神经元以某一固定频率跳动，另一组神经元则对此进行计数。这看上去似乎是很合乎情理的假设，尤其是当我们知道许多神经元确实在振荡，也就是说，它们能按照相当固定的间隔反复产生动作电位。实际上，振荡的脑电波、呼吸、行走和心跳，都是极有节奏的生理现象的例子，它们依赖于周期在几十毫秒到几秒范围内的生物振荡器。

但人造时钟需要的不仅仅是一款良好的振荡器，它们还需要有一种机制来对每一次振荡计数：机械钟的齿轮和石英表的数字电路就是执行这一功能的。这就带来了一个问题：虽然神经元可以是天然的振荡器，计数却并非它们的强项。

超周期和周期内计时

或许你在想，且慢，我们已经看到了依赖于生物振荡器的生物钟——这里的生物振荡器，取决于转录/翻译自我调节反馈环。此外，我们刚刚提到过，人的呼吸、心跳或行走的计时，都依赖于生物振荡器。故此，身体确实在使用与人造时钟相同的原理来判断时间！这一推理过程只能算部分正确，因为这些例子跟人造时钟之间存在着一个重要差异。在这些生物案例中，计时的相关间隔小于或等于振荡器的周期，而人造时钟恰恰相反：人造时钟只能在超出其基础时间单位的尺度上计时。生物振荡器通常用于计算持续时间小于其周期的事件（周期内计时），而人造时钟测量的是持续时长超出自己周期的流逝时间（超周期计时）。

对本书第3章讨论的生物钟来说，构成这一时钟的分子系统的周期大约为24小时。生物钟蛋白质（比如“周期”蛋白质）的浓度，提供了在这24小时的周期内划分阶段的相关信息——比如这是早晨、下午还是晚上。但你视交叉上核里的生物钟对此刻过去了多少天毫无概念！每一天都完全重置：就像一个孤零零的钟摆，没有挂接到任何的齿轮上，对它已经完成了多少次循环没有记录或记忆。类似地，为呼吸奠定基础的神经振荡器，确保我们以大致相同的频率呼吸，比如0.25赫兹（以4秒为周期）。每一轮呼吸循环都需要许多时机正好的运动事件，包括吸气与呼气的协调控制。因此，可以说，控制呼吸的神经中枢在4秒左右的范围内判断时间，但还是老样子，每一周期基本上都是彻底的重置。³控制呼吸的神经回路不知道自己已经生成了一千次、一百万次，还是一百万零一次呼吸周期。

大脑里有着跨时间整合信息（“计数”）的神经元，但它们没有摆钟时钟的齿轮，或石英钟、原子钟用来计数嘀嗒声的数字电路的那种数字准确性和存储容量。训练有素的人可以区分出100毫秒间隔和105毫秒间隔。但是为了使用超周期计时机制来检测这5毫秒的差异，计时基准必须以200赫兹的频率振荡，累加回路必须能区分20声嘀嗒和21声嘀嗒的区别，考虑到神经元活动的时间特点和精度，这样的要求是很难满足的。与此观察结果一致，几乎没有实验证据支持内部时钟计时模型。

缺乏对内部时钟模型的实证支持，并不一定意味着大脑的振荡器不参与超周期计时。例如，有人提出，某些形式的计时可以依赖一组神经振荡器，其中，每一个振荡器都以不同的频率嘀嗒作响。当这一振荡器阵列运转起来，不同的神经元子群将形成节拍——在若干时刻，部分振荡器短暂地协调一致，而此后的时刻，大部分振荡器彼此呈异相状态。计算模型显示，通过检测这些节拍，只要间隔时间低于上述任意振荡器的周期，神经振荡器模型即可用于区分这样的间隔。⁴

然而，我们已经看到，在几百毫秒到几秒尺度上的计时，是非常特殊的。在此范围内，计时不仅仅是为了测量事件之间的间隔，它更是为了考察时间背景、时间层次和时间模式。在这一模式计时的黄金区间，我们既可以提取事件的持续时长和间隔，也能够提取音素序列、音符、摩尔斯电码点与划的整体时间结构。所以，我们大概想要跳出基于振荡器的传统机制，来思考毫秒和秒范围内的计时。

涟漪

让我们来看看两滴雨点落入池塘中产生的涟漪模式，如图6-1所示。哪一滴雨点是先掉落的呢？本章的目标之一就是要揭示，原则上，任何能以可复制方式重复的物理现象，都能用于判断时间——正如在本章的题词中，爱因斯坦和他的同事英费尔德对我们的点拨。

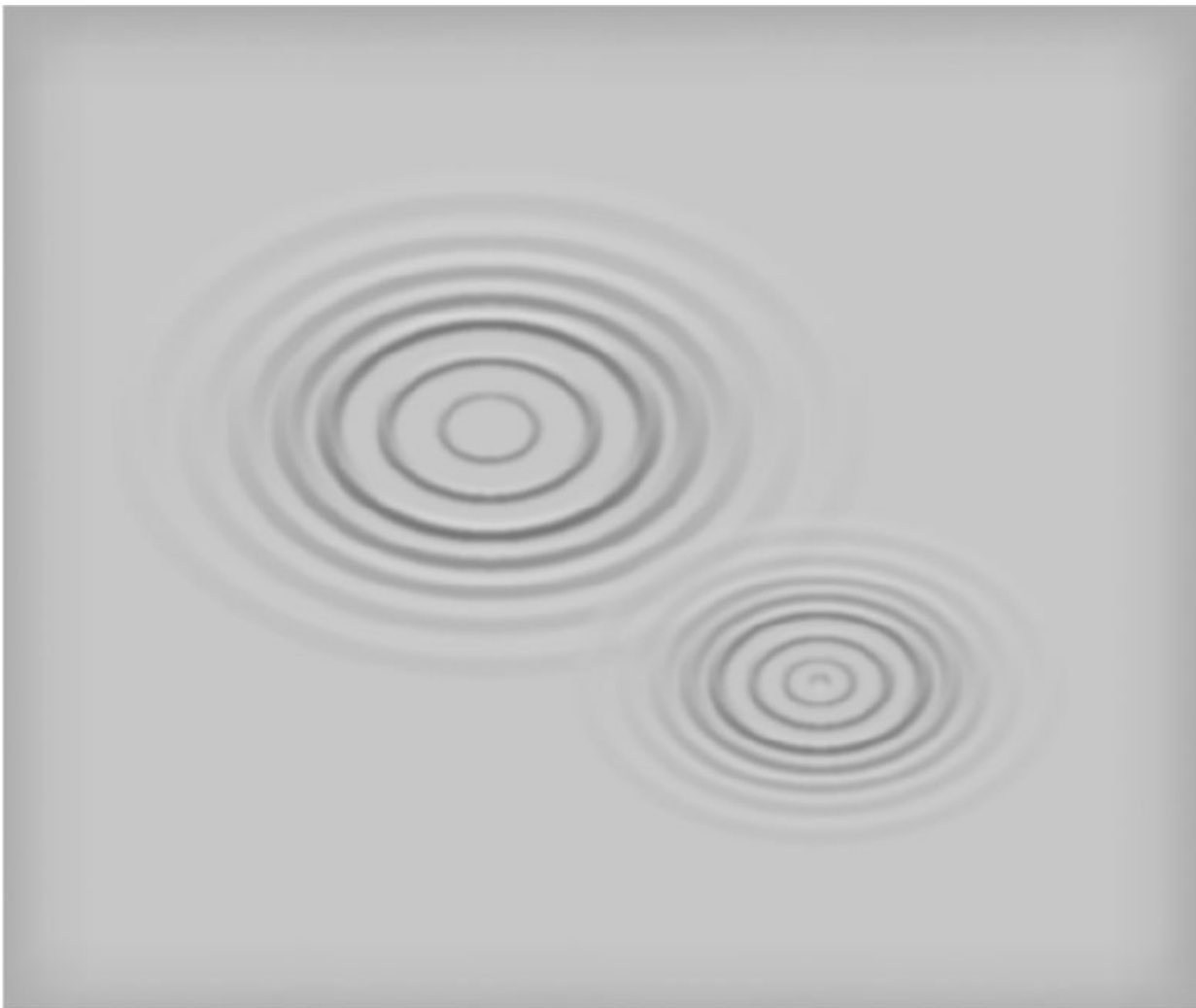


图6-1 涟漪。时间天然地编码在动态系统的状态中。从图中可以明显看出哪一滴雨点先落下，还可以估算出两滴雨点落下的时间间隔。

假设每滴雨点以差不多相同的动量撞击水面，每一滴都产生从内向外扩展的类似的同心波模式。这些涟漪是时空模式的一个例子，也就是说，是一种随

着时间变化的空间模式。任一时刻的空间模式快照，不仅说明了哪一滴雨点先落下，而且，还能让我们稍做数字运算就估计出雨滴落下的时间间隔。

让我们考虑一个更简单的例子，来说明怎样用随着时间改变的物理系统来判断时间。想象一个孩子顺着滑梯往下滑：如果她每次都从相同的初始位置开始往下滑，那么，她将用大致相同的时间到达滑梯底部。因此，我们可以按一秒的间隔来在滑梯上画线，上方每两条线段之间的间隔距离较短，而底部每两条线段的距离更长，这是因为，随着孩子往下滑，她的速度会加快。因此，每当孩子越过每一条线，我们就可以判断从她开始往下滑后流逝了多长时间。

我们的儿童滑梯计时器由重力驱动，跟水钟或沙漏基本上一样。这样的计时器看起来似乎并不太精确，但想想看，在2014年冬季奥运会的高山滑雪比赛里，排名前8位的选手在彼此相差不到半秒的时间里相继完赛。前8名选手所用的时间在从2:06:23到2:06:75的范围内，精度小于0.4%——这比惠更斯摆钟出现之前的任何时钟都要好了。

短期突触可塑性

对大多数物理系统（一名从山坡往下滑的滑雪者、一颗滚下坡道的球、一个细胞内部的生化反应、一口池塘里泛起的涟漪）来说，其时间的展开方式都由物理定律决定，也就是说，它们是原则上可用来判断时间的动态系统。大脑是已知宇宙中最复杂的动态系统，故此，大脑利用内部复杂的动态来判断时间，似乎是很自然的。确实，每当有神经元产生动作电位，它就会产生一连串可重复的变化，与雨滴落入池塘时所发生的变化差不多。

我们在第2章看到，神经元通过突触连接，突触的强度决定了突触前神经元对突触后神经元的影响。此外，突触的强度是可以改变的（弱突触可以变强），突触强度变化的过程（突触可塑性），是大脑学习和存储信息的一种方式。

为了简化我们的生活，神经科学家经常假称，在没有学习的条件下，突触的强度多多少少是恒定的。然而，大多数突触每经使用（即每次突触前脉冲过后），都会短暂地变强或变弱。这种依赖使用的突触强度变化，被称为短期突触可塑性，它们出现在数十毫秒到数秒的范围内。⁵一些大脑皮层突触表现出短期促进作用：例如，如果突触前神经元产生相隔100毫秒的两次连续脉冲，则第二次脉冲将使突触后神经元产生比第一次更大的电压变化（见图6-2）——也就是说，从突触前神经元发送到突触后神经元的信息变得更“响亮”了。不过，大多数皮层突触表现出短期抑制——也就是说，相隔100毫秒的一对脉冲，第二次尖峰将在突触后神经元中产生较小的电压变化。无论哪种方式，电压变化的幅度，取决于一对脉冲之间的间隔；通常，间隔低于100毫秒时效应最大，并在几百毫秒后消失。这一切意味着，一如池塘表面涟漪的主波直径包含了自雨滴落下后流逝了多少时间的信息一样，在任何特定时刻，突触的强度都包含了自该突触上一次使用后过了多久的时间信息。

我已经提出，短期突触可塑性和其他依赖时间的神经元特性，或许对大脑在数百毫秒的尺度上判断时间的能力有帮助。⁶以最简单的神经回路为例：两个神经元通过单个突触连接（见图6-3）。让我们假设突触前神经元按以下3种不同时间模式产生动作电位：两次脉冲，分别相隔50、100或200毫秒的间隔。我们可以把这些间隔视为时间性的刺激——其实，一些动物就是靠着“嘀

嗒”的短促声音来沟通的，传递信息的是“嗒嗒”之间的时间间隔。这3种间隔的第一次脉冲所产生的电压变化均相同，假设这次脉冲的“强度”是1毫伏。由于短期突触可塑性，同一突触的强度在第二次脉冲时会有所不同。具体而言，间隔50毫秒的第二次脉冲产生的电压变化是1.5毫伏，而间隔100和200毫秒的第二次脉冲，强度分别是1.25和1.1毫伏。假设我们构造的回路，其特点是突触后神经元仅在接收到至少1.5毫伏的输入时才会产生动作电位，这样一来，我们就构建了一种计时器：只有当两次输入相隔50毫秒时，才产生动作电位的一种神经元。

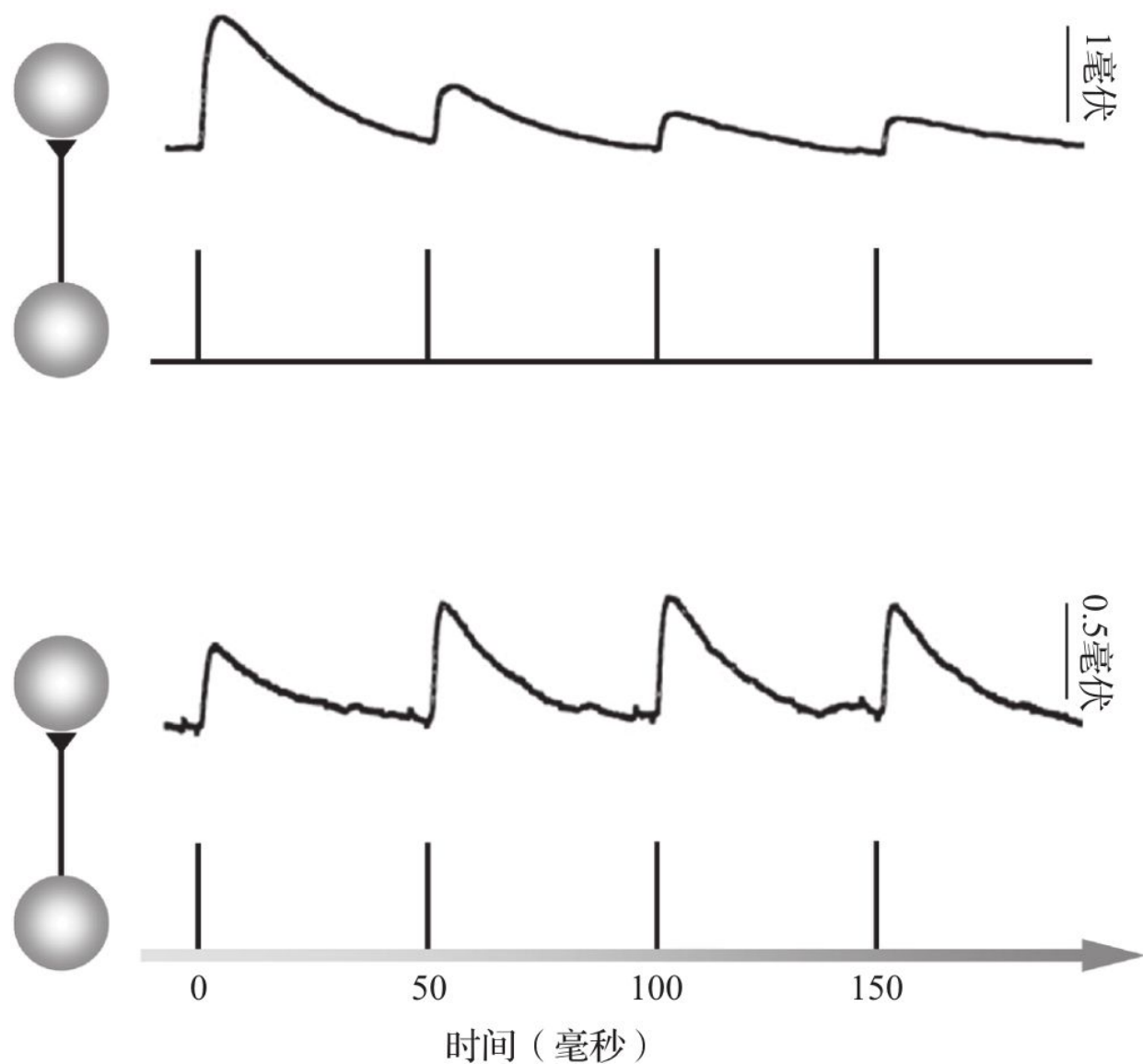


图6-2 短期突触可塑性。在毫秒的时间尺度上，突触强度既可能遭到短期抑制（上图），也可能出现短期促进（下图）。

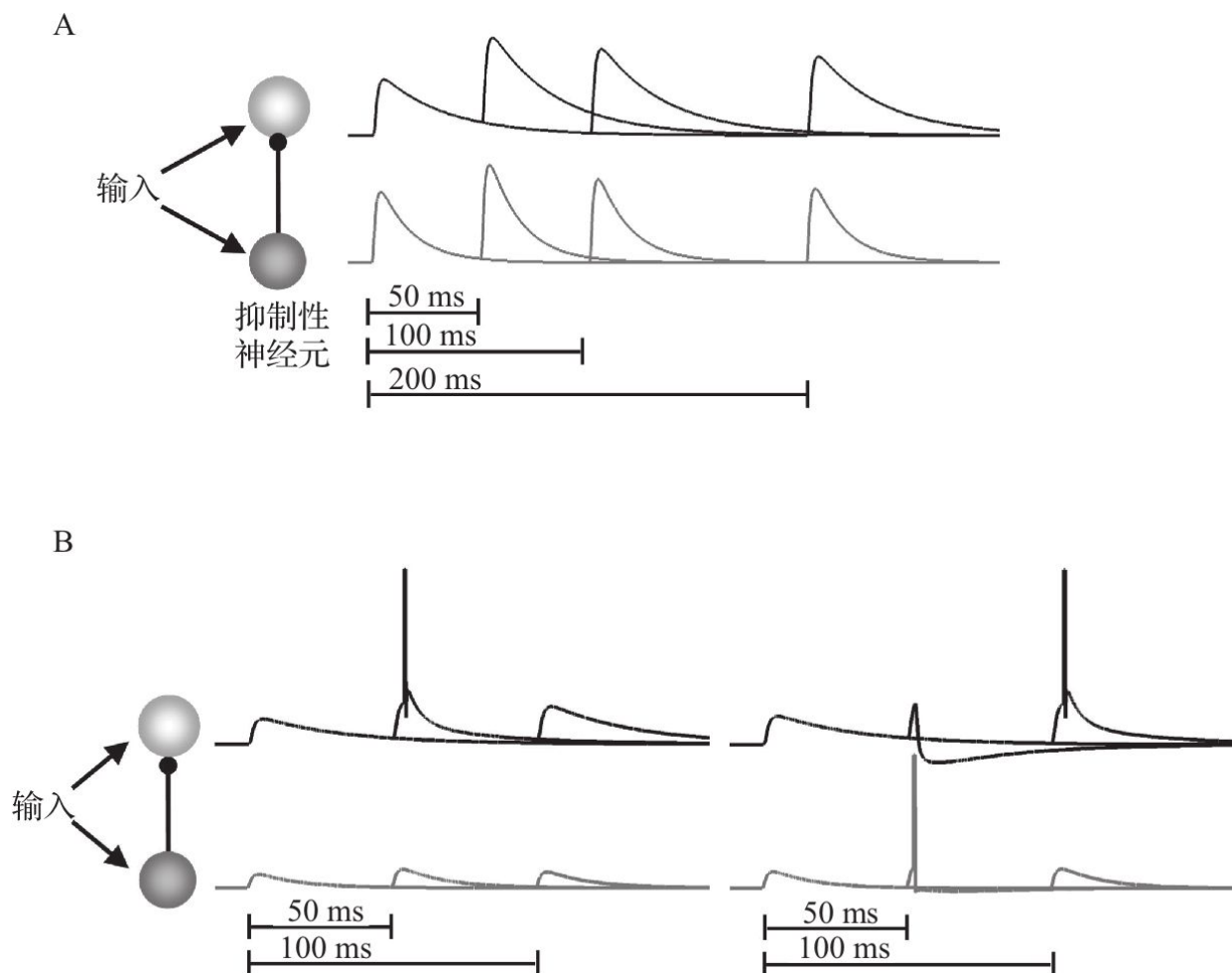


图6-3 基于短期突触可塑性的间隔选择性

A. 在这一简单的神经回路模拟中，单个输入神经元与兴奋性神经元（上）和抑制性神经元（下）接触。这些轨迹捕捉了电压在三种不同时间间隔下的变化：输入神经元按照50、100或200毫秒间隔，发出两次脉冲信号。从输入到两个神经元的突触都表现出短期的促进作用——例如，对50毫秒刺激下第二次脉冲的电压信号响应幅度，大于第一次脉冲引起的电压变化。

B. 根据输入到兴奋性和抑制性神经元的突触强度，兴奋性神经元可以选择性地响应50毫秒（左）或100毫秒（右）的间隔——因此，从某种意义上来说，在这一简单回路中，兴奋性神经元可以判断时间。

神经计算学模型表明，由表现出短期突触可塑性的兴奋性和抑制性神经元所组成的简单回路，可以选择性地响应一定范围内的不同时间间隔：如只响应

100毫秒的间隔，但不响应50或200毫秒的间隔。⁷这种间隔调谐的神经元，可以用于检测音素的语音起始时间、摩尔斯电码符号或音符之间的间隔。

研究发现，许多不同动物——从蟋蟀、电鱼到大鼠，其大脑的神经元都会选择性地响应不同时间间隔。这种时间特异性究竟是怎样产生的，人们尚未完全理解，但一些研究表明，短期突触可塑性至少可以解释部分原因。⁸

状态依赖网络

上文简化的“双神经元回路”，对大脑回路的实际情况来说简直算得上是侮辱。1立方毫米的大脑皮层，就能包含10万个神经元、数亿个突触。⁹对于大脑皮层回路怎样处理的空间和时间模式，人们已经提出了很多一般理论。我和同事，以及晚些时候，奥地利数学家沃尔夫冈·马斯（Wolfgang Maass）和他的同事，提出了一套模型，称为“状态依赖网络”（state-dependent networks）。¹⁰为理解这一理论，有必要先理解皮层回路“状态”的概念。

在物理学中，我们可以将一套系统的状态视为变量的值，这些变量提供有关该系统当前“配置”（状态）的相关信息。假设说，桌子上有若干台球，这一系统的状态可以根据每颗球的位置和动量（质量乘以速度）来界定。原则上，在某个时间点知道台球的状态，我们就掌握了预测未来将发生什么以及了解过去已经发生了什么的必要信息：已知时间 t 的状态，物理定律允许我们确定时间 $t-1$ 和 $t+1$ 的状态。那么，允许我们定义大脑内一组神经元状态的等效变量集合是什么呢？

通常，在给定时刻，神经网络的状态由哪些神经元在产生动作电位来定义。我将此称为活动状态，因为它决定了哪些神经元正在向其伙伴主动传输信息。但对神经网络状态的这一描述是极其不完整的，因为不可能仅仅根据当前的活动状态来预测神经回路在不久的将来会做什么。影响回路将来行为的，还有其他许多相关的神经特性。短期突触可塑性就是此类特性之一。显然，一组神经元接下来会做什么，不仅取决于当前产生动作电位的神经元，还取决于每个突触在任意给定时刻的有效强度，而这取决于这些突触在过去做过什么。短期突触可塑性只是许多能在数百毫秒的时间跨度内变化的不同神经特性中的一种。我将这些特性称为“定义网络的隐藏状态”，使用“隐藏”一词是因为它们是神经科学家的探测电极发现不了的。

网络在给定时间 t 的活动状态，由神经网络的输入和时间 $t-1$ 时它的状态（活动状态和隐藏状态）所控制。“涟漪”的比喻又一次派上了用场。以两滴雨点为例，第一滴在 $t=0$ ，第二滴在 $t=100$ 毫秒时相继落入池塘。池塘在

t=101毫秒时的状态，将取决于输入（第二滴雨点）和当前状态（第一滴雨点留下的水波）之间的相互作用。重要的是，第二滴雨点是在第一滴雨点之后100毫秒还是200毫秒落入池塘的，它产生的水波图案也有所不同。也就是说，如果我们看到了t=400毫秒时池塘水面的涟漪快照，我们不仅可以判断池塘落入了一滴还是两滴雨点，还可以判断，如果落入的是两滴雨点的话，它们之间的时间间隔是多长。池塘中刚刚发生过的事件，存放在它当前的状态中。类似地，神经网络的响应由当前输入和刚刚发生的事件所决定，而刚刚发生的事件，会在当前的网络状态中得到表现或编码。可以说，池塘和神经网络的“响应”是“状态依赖”的。实际上，听觉和视觉皮层中的记录表明，神经元对刺激的响应，受此前刺激以及该刺激多久前发生的强烈影响。¹¹计算机模拟已经表明，原则上，状态依赖网络不光可以辨识简单的间隔，还可以分辨复杂的时空模式，如口语表达。¹²

群体时钟

利用池塘上的涟漪或神经网络变化的状态来判断时间，并未真正解答一个关键问题：编码是什么？也就是说，如何将池塘上的涟漪或神经网络的状态转换为时间单位？实验和理论研究表明，判断哪些神经元在给定时刻激活，是大脑编码时间的一种方式。我们在讨论鸣禽HVC神经元的计时时，已经看到了这一设想的简化版：观察哪些神经元处在激活状态，有可能判断出自从歌曲开始后流逝了多长时间，正如可以通过观察哪一张多米诺骨牌正在倒下，判断第一张多米诺骨牌是多久以前被碰倒的。不过，这是一种非常简单的链式编码。更一般性的设想是，每一时刻都由一个较大的活跃神经元亚群表征。我将把这种时间编码方式称为群体时钟（population clock）。这一重要概念，最先由神经科学家迈克尔·莫克（Michael Mauk）提出，他那时在休斯敦的得克萨斯大学医学院工作。20世纪90年代，莫克提出，某些形式的计时依赖于小脑中一种动态变化的神经元群（小脑在解剖学上是脑的一个独特部分，参与某些类型的运动计时）。¹³举个例子，让我们假设一种刺激（如听觉音调）在 $t=0$ 时触发了小脑中的一种神经活动模式。该设想认为，100毫秒后，可能有一个由数千个神经元构成的亚群呈活跃状态，而到 $t=200$ 毫秒时，活跃的可能是另一个神经元亚群。就算一些神经元在两个时间点都处于活跃状态，并且任何一个神经元都不传达时间，群体时钟仍然让人能判断是过去了100毫秒还是200毫秒。

作为类比，可以想象一下在晚上观察摩天大楼的窗户，通过每扇窗户，你能看到房间里的灯是开着还是关闭的。现在，假设每个房间的人都有自己的独特时间安排，且每晚重复。有一扇窗，太阳一下山立刻亮灯；另一扇窗，在日落后1小时亮灯；还有一扇窗，日落后即亮灯，过1小时后关掉，再过3小时后又亮起。如果有100扇窗，我们可以写下一串二进制数字，来表示每一时刻大厦的状态：日落时是101……，日落后1小时是011……，依此类推——每一位数，都代表特定窗户里的灯是开还是关。在任何给定时刻，哪些窗是“开”（1）还是“关”（0），表示大厦的状态（相当于神经网络的活动状态）。我们可以将此状态表示为图中的点，其中每条轴表示一扇窗。当然，问题是，我们需要一幅包含了100条不同坐标轴的图。图6-4表示的是，如果我们只有三维，其中第一、第二和第三位数字，代表3D图里的 x 、 y 和 z 轴，那么，我们该怎样表示大厦（在每一时间点）的状态。虽然我们不可能绘制出100维空

间的图，但其原理与3D图完全相同。把代表每个时间点的点连接起来，就可对大厦的轨迹进行可视化表示：大厦的状态怎样随着时间变化。故此，哪怕大厦的设计与时钟毫无关系，但你可以看出，只要存在内部动态（灯光的变化模式），我们就能用它来判断时间。

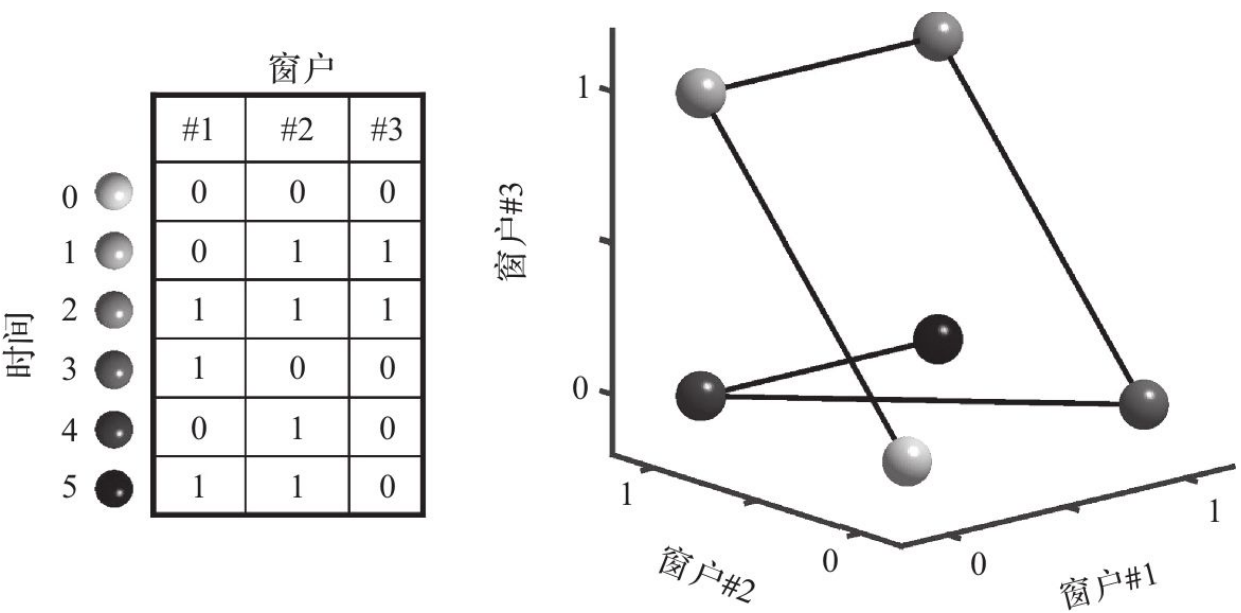


图6-4 用大厦窗户的变化状态来编码时间。每一时间点三扇窗户的状态（左），相当于3D空间里的一条轨迹（右）。

事件特异性时钟

我们现在可以看出，活跃神经元的变化模式可以怎样用作计时器。但迈克尔·莫克的理论提出了一点关键的见解，他认为：大量神经元组成的回路不仅仅是一个计时器，而是很多计时器。让同一回路具备不同计时器的功能，其优势或许一眼看上去并不清楚，但这一策略创建了一套更为强大的运算系统。

你可以在厨房里使用同一台计时器，为煮溏心蛋、意大利面或者烤蛋糕设定不同的时间。而另一种策略是用3台不同的计时器，每台计时器只针对一个目标，而且，每台计时器还可以设定不同的提醒声音。在厨房操作台上同时放上3台计时器，看起来或许有点累赘，但这种针对不同事件使用不同计时器的方法有一个重要优势：如果你走进厨房并听到闹钟响起，你立即就知道该关掉哪部设备，或者从烤箱里取出什么东西。换句话说，事件特异性的计时器，也可以充当当前正在发生的事件的存储器。

为了更好地理解在单个神经回路中拥有多个计时器的价值，让我们想象一棵圣诞树上缠绕着成千上万的LED灯，并假设，每次我们按下开关时，灯的亮暗都会按照某种一致的模式变化。我们可以想象出许多不同类型的模式：简单的闪烁灯链，或者，像前述大厦的窗户一样，有着因时间不同而变化的复杂模式。第一种链条模式的优势在于，它的代码简单易读：第一枚LED灯泡代表 $t=1$ ，第二枚 $t=2$ ……缺点是，这样的模式只有一种：故此只有一个计时器。相比之下，复杂模式难以解读，但同一组灯可用于创建大量的计时器。

假设我们的圣诞灯组有两个开关，一个由爱丽丝控制，另一个由鲍勃控制。爱丽丝的开关以1秒的间隔，激活以下灯组空间模式（其中每个数字代表链条中灯的位置）：

$t=1$ 5 10 15 20

$t=2$ 6 12 18 24

$t=3$ 7 14 21 28

.....

而鲍勃的开关生成以下照明序列（请注意，在此示例中，每一模式都遵循特定算法）：

t=1 1 2 3 4

t=2 1 4 6 8

t=3 1 6 9 12

.....

现在，如果你看到圣诞树的照片，并看到第8162432……号灯是开着的，那么，你不仅知道照片是在按下开关后第4秒拍摄的，还知道是爱丽丝打开了开关。我们的圣诞灯同时说明了时间和空间信息，因为它们测量了开关翻转后流逝了多少时间，以及是哪一个开关打开了。

为什么大脑希望拥有以这种方式运行的计时器呢？因为在几毫秒到几秒的时间尺度上，大脑不仅需要判断时间，还需要在特定时刻及时完成任务。动物运动计时的一个常见例子，跟一种经典的条件反射有关系，叫作“眨眼条件反射”：先呈现一种听觉的音调，250毫秒后朝着人或其他动物的角膜喷一股气，反复多次后，人和动物就能学会在听到该声音后就眨眼睛。但他们不会一听到声音就眨眼睛，眨眼的的时间是在预期到来的喷气之前。换句话说，动物不仅学会了眨眼，还学会了什么时候眨眼。研究人员相信这很重要，因为，如果碰到危险刺激有可能伤害角膜的情况，长久闭着眼睛恐怕不是个好主意。¹⁴但动物能否学会在两种不同的时间眨眼，作为对不同音调的反应呢？这正是迈克尔·莫克所要阐明的。他的实验室揭示，兔子可以学会在低频音调开始后150毫秒左右眨眼，在听到高频音调后750毫秒左右眨眼。此外，如果兔子的小脑受损，这种不同的时间效应就会消失，这表明神经计时器存在于小脑回路中。

关于拥有多台计时器的重要性，还有一个例子。让我们想象一位可以同时钢琴上演奏两首歌的钢琴家。第一首歌曲需要在第1秒时弹奏C音符，而第二首歌曲需要弹奏E音符。一台传统的计时器会很有用，因为它告诉你1秒钟已经过去了，但它并没有告诉你这1秒要按哪个琴键。相比之下，使用不同的动态时空模式作为计时器（比如，爱丽丝和鲍勃所用的不同灯光照明模式）不仅可以解决判断时间的问题，还可以确定每个时间点上该做什么。大

脑可以把第一首歌曲第1秒时激活的神经元群与负责按钢琴C音符的运动神经元连接起来，把第二首歌第1秒时激活的神经元群与负责按E音符的运动神经元连接起来，从而执行上述策略。

大脑动力学

神经科学家观察到了神经活动似乎在编码时间的许多例子，有简单的，也有复杂的。在里斯本的尚帕利莫未知研究中心（Champalimaud Center for the Unknown in Lisbon），神经科学家乔·佩顿（Joe Paton）主持了一项研究，对大鼠进行训练，让它们按照听到的长短听觉间隔，把鼻子伸入两个“舱口”之一。在每次试验中，大鼠听到两种音调，由范围在0.6~2.4秒之间的间隔分开。如果间隔短于1.5秒，将鼻子伸入左侧舱口；如果间隔长于1.5秒，将鼻子伸入右侧舱口。大鼠能够很好地完成任务，比方说，在对1秒和2秒的间隔做出反应时，90%的时候它们都能伸入正确的舱口。而在大鼠执行这项任务期间，研究人员记录了其纹状体（大脑中与运动和某种形式的学习相关的区域）中的数十个神经元活动。这些神经元，有不少都会反复在多个试次中的类似时间点产生动作电位。例如，如果听到的是2.4秒的间隔，一些神经元会早一些激活，另一些神经元稍后激活。要是把神经元的活动按其激活时间分类，就会观察到一种链状的活动模式： $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow E$ ——当然，这种描述，在某种程度上简化了活动模式真正的复杂程度。¹⁵如果实验时大鼠听到的是接近1.5秒边界的间隔，那么，正如研究人员所料，它们更容易出错。有趣的是，按照神经元的动态，我们是有可能预测到这些错误的。举例来说，倘若神经元活动模式属于“快速运行”（即模式的展开比平均值更快），大鼠更可能做出“长”响应，反过来也是一样。总体而言，这些研究提供了令人信服的证据，证明这些神经元有助于动物分辨时间——不过，和神经科学里通常遇见的情况一样，任何一项研究都无法确定，这些神经元是否真的负责对听觉音调之间的间隔计时。

在大脑的其他很多部位，也观察到了类似的链状神经活动模式。例如，大鼠的海马神经元可以在动物开始任务后的特定时刻启动（如在转轮上跑，或等待一段预设的时间后再做出动作响应以获得奖励）。¹⁶有趣的是，大量的研究中，在动物做具体细节不同的任务时，人们观察到了不同的活动链。例如，启动任务的气息不同，相同的神经元可以在不同的时间点启动，这表明，这些神经元不仅仅是追踪绝对时间，而是与爱丽丝和鲍勃的触发轨迹一样，追踪时间，“记下”触发该模式的刺激。

动物执行时间任务时，神经科学家还观察到了更复杂的神经活动时变模式。就这些复杂群体时钟来说，不同的神经元可能会在不同的时间点开始产生动作电位，每次持续不同的时间，有时还会过一会儿又重新开始。¹⁷这种时空模式在试验中是可重复的，但在人类眼里看起来还是显得很随机。在一些例子中，神经活动的时空模式没有明显的韵律或理由，看上去似乎令人费解，但这说不定正是重点。我们在说“随机”模式的时候，有一种意思是，所有神经元在该模式中的任何给定时刻，都有着差不多相同的启动或关闭概率。我们从信息理论领域知道，按相同概率使用所有符号或元素的代码，能带来更大的存储或传输信息的容量。例如，英语不是一种特别高效的代码，因为不同的字母有着非常不同的使用频率：如果你用英文输入，你用到键盘上字母“e”键的频率是所有击键次数的12.5%，而用“q”键的频率仅为0.1%。神经活动复杂随机的时空模式，有时在神经科学家看来或许不够简洁，但说不定为大脑提供了构建大量群体时钟最高效的方法。此外，大脑可能会在某些部位使用复杂模式，驱动其他部位生成更简单的链状模式。

甚至在几百毫秒到几秒的尺度上，大脑也可能采用多种机制来判断时间。事实上，人们已经观察到动物在执行时间任务时出现其他形式的神经活动。或许，与时间流逝相关的神经特征，报告最多的叫“加速放电”（ramping firing rate）：就像是沙漏中随着时间累积起来的沙子的量，一些神经元的放电速度（某一单位时间内的脉冲数）随着时间以线性方式提升。当训练动物在特定延迟后产生运动反应时，通常会观察到这种模式。但目前尚不清楚加速神经元到底是计时器，还是从大脑中其他回路里读取时间，以触发恰当的计时运动反应。¹⁸

混沌

到目前为止，在我们的讨论中，我们理所当然地认为，时钟最关键的一个特性就是：重复性。如果要把神经元群里神经活动的时空模式用作计时器，相同的模式在响应相同的背景和刺激时必须重复发生。来自前文所述研究的实验数据证实，情况的确如此：每次鸣禽唱歌，都会观察到相同的神经轨迹（虽然每个试次间也有不小的变异性）。然而，大脑怎样实现一次次生成相同模式的壮举，正是长久以来的未解之谜。

计算机模型显示，由循环连接的神经元所构成的神经网络，能够创建一种不断演变的活动模式——这些模式，有着非常适合编码时间的潜力。问题在于，这种模式通常是不可重复的——实际上，这些网络的行为往往十分混沌。从数学上讲，“混沌”（chaos）用于描述对噪声和初始条件（即在某一试验开始时的系统状态）高度敏感的系统。典型的例子是天气和所谓的蝴蝶效应：空间中某个点发生的微小事件，例如2月1日中午12点，一只蝴蝶在亚马孙拍打翅膀，会产生多米诺骨牌效应，在一个星期后改变纽约市的天气。自反馈的非线性物理系统（包括天气或台球）中经常观察到混沌。神经网络集中了这两种条件。首先，神经元是非线性的：神经元的输出与其接收的输入是非线性比例的。其次，如上所述，皮层网络的特点就是反馈（或循环）程度高，也就是说，一个神经元在时间 $t=1$ 时所做的事情，将影响其他神经元在 $t=2$ 时所做的事情，而后者反过来会影响第一个神经元在 $t=3$ 时所做的事情。

要理解混沌给利用非线性动力系统判断时间造成了什么样的问题，可以考虑一个简单的数学方程，叫作逻辑斯谛方程（见图6-5）。该方程描述了在渐进的时间步上，某个值 x （以0和1为界）的演变。在每一步，当前值完全由前一时间步的 x 值确定。尽管方程很简单，但却带来了惊人复杂的模式， x 值的微小变化，能让 x 的未来值产生重大差异。

请注意，我们可以使用图6-5中的表作为某种计时器。如果你知道 x 的初始值是0.9900，而且我告诉你当前值是0.5471，你就知道已经过去了16个时间单位。故此，原则上，我们可以使用一种遵从这一逻辑斯谛方程的物理系统作为时钟。然而问题在于，这一系统对噪声或测量中的微小误差极为敏感。例如，如果在我们的运行2中， x 从0.99001开始而不是0.9900，那么，第16时间步时

的值是就是0.7095，而不是0.5471。混沌系统的状态（本例中为x的值），会由于微小的扰动而快速发散，这意味着在实践中，系统不会一次次地生成相同的模式。混沌系统会带来非常蹩脚的时钟。

| 时间步 | 运行1 | 运行2 |
|-----|--------|----------|
| 1 | 0.9900 | 0.990 01 |
| 2 | 0.0386 | 0.0386 |
| 3 | 0.1448 | 0.1446 |
| 4 | 0.4829 | 0.4825 |
| 5 | 0.9739 | 0.9738 |
| 6 | 0.0993 | 0.0995 |
| 7 | 0.3488 | 0.3494 |
| 8 | 0.8859 | 0.8866 |
| 9 | 0.3943 | 0.3922 |
| 10 | 0.9314 | 0.9296 |
| 11 | 0.2492 | 0.2551 |
| 12 | 0.7296 | 0.7410 |
| 13 | 0.7694 | 0.7484 |
| 14 | 0.6920 | 0.7343 |
| 15 | 0.8313 | 0.7609 |
| 16 | 0.5471 | 0.7095 |
| 17 | 0.9664 | 0.8038 |
| 18 | 0.1268 | 0.6150 |

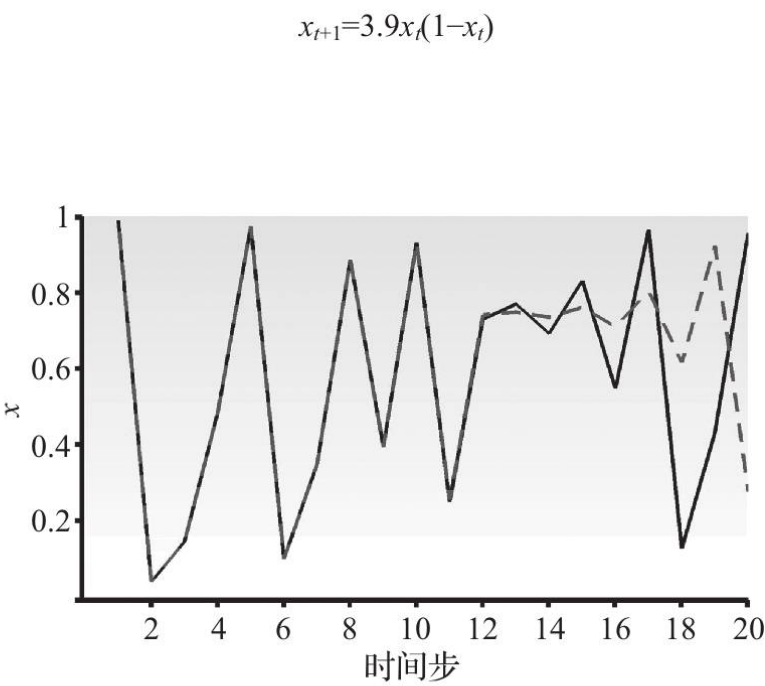


图6-5 表现混沌的方程示例。在这个方程里，x在当前时间步（t）的值，决定了x在随后时间步（t+1）的值。如图所示，哪怕在运行1和运行2中，x的初始值非常相近（分别是0.99和0.99001），x的值将随着时间偏离。一开始，偏离难以觉察，但到18步之后，两次运行中的x值已经互无关系了。

对神经元连接性随机确定的模型的计算机模拟显示，这种随机循环神经网络能生成可自续的活动模式，在每一时间步上，网络都处于不同的状态。原则上，这种时空模式可以用来判断时间。麻烦的地方在于，20世纪80年代，以色列物理学家和计算神经科学家哈依姆·索姆泼林斯基（Haim Sompolinsky）及其同事证明，在许多情况下，从此类随机连接的循环网络中所显现的活动模式，是混沌的。¹⁹这将神经科学家带入了一个严重的困境。一方面，皮层由循环连接的网络组成，这些网络能够产生可重复的神经活动动态模式——如若不

然，我们就没有能力在钢琴上演奏相同的乐曲，或是以可重复的方式签下自己的名字。另一方面，理论研究表明，皮层网络是混沌的。

我们尚未弄清皮层内的回路怎样解决混沌问题。研究人员已经提出了许多理论来解释循环神经网络怎样产生复杂的非混沌（也就是可以一次次地触发）变化模式。有一个此类模型假设，大脑里有突触学习规则，在本质上使网络能够学习怎样不混沌，这些规则允许网络“刻录”特定的模式或神经轨迹。至少从理论上讲，如果对神经网络计算机模型里的突触进行适当调整，就能生成非混沌的复杂轨迹。如图6-6所示，这种方法提供了一种有力的途径，生成复杂的时变运动模式。

该模拟阐释了，在一张由800个相互连接的神经元所组成的网络里，10个神经元在多次运行或试次中的活动模式。每个试次都从一个短输入开始，它设定了该模拟网络中所有神经元的初始状态。从这一初始状态开始，一种动态变化的活动模式随着时间的推移而发展出来——也就是说，该网络顺着一条在800维空间中铺开的轨迹自主行进。我们用图形来表示这一轨迹在多个试次中所生成的三维简化版。现在，为探索这一网络的计算潜力，我们只连接这一循环网络中的两个神经元（一共有800个神经元），并规定它们是控制一支笔在纸张上顺着x轴和y轴移动的运动神经元。虽然相当违反直觉，但只要驱动这两个运动神经元的循环网络生成复杂的时变模式，输出神经元就可以产生几乎任何模式（通过调整循环网络连接到输出神经元的突触强度来实现）。图中展示的是让两个输出神经元“写”下“混沌”一词。重要的是，由于循环连接得到恰当调整，网络不会混沌。在轨迹当中扰乱（或撞击）网络，它也能回到自己正在做的事情上。究其本质，这一系统有着记忆。循环网络有一个有趣的特性，能够记住自己正在做什么：哪怕当它被撞击离开初始轨迹时，也可以“返回”并完成自己正在做的任务。此外，请注意，书写“混沌”一词，需要时机恰当的运动控制，而笔的运动，可用于判断时间。图6-6中的球体其实就是时间标记——知道笔当前的位置，使我们知道自输入以来过去了多长时间。关键在于，通过调整突触连接的强度，可以“驯服”循环神经网络中的混沌。

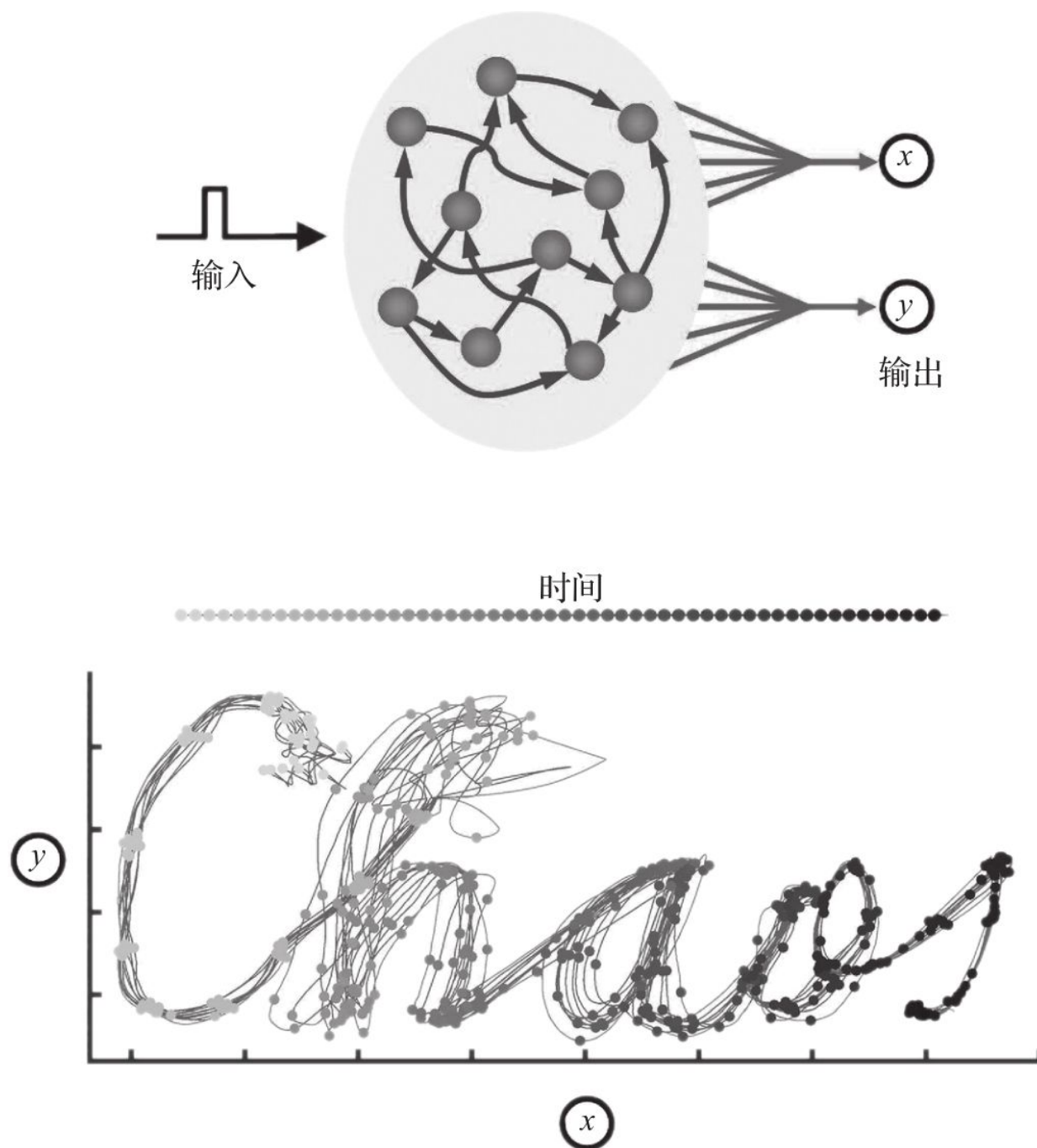


图6-6 循环网络生成时变运动模式。在这一模拟中，循环神经网络由互相连接的单位（代表神经元）构成（用上图中间部分来简要表示）。重现网络中的单位接到一个短促的输入信号，与两个输出单位接触。这两个输出单位的运动，对应着一支笔在图表里x轴和y轴上的位置。训练是按照学习规则，调整循环单位对输出单位的连接力度。经过训练，循环网络对短输入做出反应，生成一种复杂的活动模式，驱动输出单位写出“Chaos”（混沌）一词。运动模

式，比如手写运笔，具有内在的时间性质，故此，网络可以将时间编码。笔画上的阴影点，代表时间。这一网络并非混沌，可由如下事实看出：重现网络在写“h”时遭到干扰之后（经过了额外的10次尝试），最终恢复了原本的轨迹。（改自Laje and Buonomano, 2013）

不妨暂停片刻，问一问：这套网络究竟是怎样写出“混沌”这个词的呢（或者更确切地说，生成使人类大脑将之识别为“混沌”一词的二维模式的信息在哪里）？这是一个非常深刻的问题，需要人的思路暂时跳脱较为传统的运算和记忆模式。生成“混沌”一词的信息，既可以说无处不在，又可以说哪儿也没有。每个突触和每个模拟神经元都为模式出了力，但没有哪一个突触或神经元是必不可少的。模式是一种突现特征：整体大于部分之和。

上面描述的网络只是一种计算机模拟：是一套内置了大量假设的简单网络。就算这一模拟真的捕捉到了皮层功能的一些原理，考虑到大脑学习构成识别、生成言语或音乐的基础的复杂模式的惊人能力，它模拟得也太过简单、太不灵活了。然而，越来越多的实验支持这样的观念：大脑执行的许多运算，尤其是具有时间性质的运算，依赖于大脑生成复杂时变神经轨迹的能力，这些神经轨迹可用于生成时空模式，构成了我们伸出手翻动书页或演奏钢琴的能力的基础。²⁰



判断时间的需求，几乎渗透到大脑必须执行的所有任务当中，不同的任务有着不同的时间要求：有时，需要它区分一个二分音符和一个四分音符，但在另一些情况下，又需要它用摩尔斯电码敲打出一段信息、检测辅音“p”和“b”的发声时间、预测红灯什么时候变绿。为了解决这类时间问题，大脑拥有一套互相关联的计时机制，遍布在所有回路中。但有趣的是，大脑内部的时钟，跟人类大脑设计出来的时钟，几乎毫无雷同之处。

突触的强度随时间变化，神经元的放电速度上下波动，神经元在特定频率上振荡，神经元网络的活动随时间而动态变化——这些都是因为，判断时间是神经元通过进化要做到的一件事情。因此，询问大脑中哪些神经元或神经回路负责判断时间，就有点像是问台式计算机CPU中10亿晶体管中的哪一个负责执行二进制逻辑。它们全都负责，这就是它们的存在意义。

第二部分 时间的物理和心理性质

7:00 计时

时间之于钟表，一如意识之于大脑。

——达娃·索贝尔（Dava Sobel，美国科普作家）

人类的眼睛，看不见神经元的细胞核及其内部的染色体，就如同人类的眼睛也看不到海王星的卫星。在时间领域，我们的感知器官无从觉察蜂鸟翅膀拍打的持续长度，一如我们对大陆板块的漂移没有感觉。对视力空间尺度之外的物体，我们制造了显微镜和望远镜来进行观察；而为了理解远远超出大脑能测量的时间尺度，我们同样设计了方法和机器（如果你愿意的话，可以把它们想象成时间显微镜和望远镜）。时间望远镜让我们得以确定，人类和大猩猩在大约700万年前从共同祖先分道扬镳，并预测数十亿年之后，太阳将扩张成红巨星，最终吞并水星和金星。时间显微镜（高精度的时钟）允许我们把秒分成更小的单位，毫秒、微秒、纳秒、皮秒……每进一步都愈发超出人类感知和理解的范畴。目前的原子钟可在阿托秒（attosecond, 10^{-18} 秒）尺度上准确地追踪时间——准确到科学家们已经没有太多其他的借口使用“atto”前缀了。这种在数十亿年尺度上估计时长、把秒分成阿托秒的能力，是物理学的结果，而物理学，在某种程度上，是我们渴望判断时间带来的结果。

天文学是以物理科学为土壤盛放的种子。天文学的出现，不仅是因为我们需要在空间中自我定位，也是因为我们需要在时间中自我定位。除此之外，早期天文学提供了一种追踪季节、确定一年的长度、判断何时应该拜祭天神的途径。此后我们在判断时间上的进步与物理学革命相重合，这不是巧合。举个例子，钟表制造史上的一大里程碑出现在物理学史上一个最具变革性的时期：1657年，也就是伽利略去世后15年，牛顿尚值少年的时候，荷兰物理学家惠更斯设计出第一台高精度摆钟。

时间和物理有着千丝万缕的联系。不仅时间本质的问题属于物理学范畴，而且我们对物理定律的理解，使科学家得以开发出极其精准的时钟，用

于检验物理定律。在接下来的章节中，我们将研究时间的物理学，看看物理学和神经科学各自对时间性质的看法是否相容。不过，我们先从考察时钟时间的物理学和历史入手吧。

神经元与核武器扩散

一如大脑使用不同的机制来前瞻性和回顾性地判断时间，科学家们也根据不同的需求设计了从根本上不同的方法来判断时间。有时候，他们需要的是确定从过去的某个时间点到当下流逝了多少时间，有时候，他们需要的是确定从当下到未来的某个时刻将用去多少时间。虽然我们一般用传统时钟来前瞻性地判断时间，但要回顾性地判断时间，我们必须依靠一种不同类型的“时钟”。好在自然界里到处都是回顾性时钟，因为宇宙受到物理定律的约束，这些定律使得我们身边（还有我们体内）发生的变化遵从一套明确的规则。故此，池塘水面的涟漪让我们能根据当下所见，窥视到过去几秒。法医病理学家可以根据尸体当前的温度来确定死亡时间，并且根据给定基因的相似程度来判断两种动物何时从共同祖先开始分化演变也是可能的。不过，说到回顾性地判断时间，放射性定年法的发明，带来了一种最具变革性的方法。但放射性定年法具体是怎么运作的呢？原子怎么会“知道”已经过去了多长时间？为了回答这个问题，我们将探讨放射性定年法和核武器扩散怎样推翻了神经科学中一个已有百年历史的教条。

整个20世纪，神经科学家始终确信，与身体里的大部分细胞不一样，新的神经元是绝不会在成年人体内形成的。然而，20世纪90年代在大鼠和小鼠实验中出现了越来越多具有说服力的证据，表明大脑的某些部位会生成新的神经元，这一过程叫作“成年神经发生”（adult neurogenesis）。但人类的神经元通常只有死后才能研究，怎样确定人类也是这样的呢？虽然我们可以知道某个人死亡时的年龄，但单个神经元总不会带着何时出生的标记吧。

20世纪50年代到60年代初，主要由美国和苏联进行的地面原子弹试验，让大气中碳元素的放射性同位素碳14含量几乎增加了一倍。碳14的含量在1963年达到顶峰（这一年签订了《部分禁止核试验条约》），此后便开始下降。大气中碳14的增加，反映在了所有生物体当中，因为通过光合作用，植物将碳纳入自己的生化过程，而我们身体中的碳又来自植物，故此，原子弹试爆使得人类DNA中可检测的碳14增加。细胞“出生”时就整合到DNA里的碳原子，在这个细胞的整段寿命期间，都保留在其DNA里。如果说，新的神经元永远不会在成人体内形成，那么，在原子弹试验时代之前出生的人，其神经

元的碳14含量应该比今天低。但如果神经元继续分裂，有一部分神经元就会拥有更高的碳14含量（因为50年代之后大气中碳14含量增加）。瑞典的研究人员分析了死后人类大脑组织，发现1955年以前出生的人，绝大多数神经元DNA中的碳14含量都很低。¹也就是说，大多数神经元并不是在成年后形成的。但与根据动物数据所做的预测一样，海马体有一个神经元亚群中的碳14含量较高，这证明人类也会出现部分成年神经发生。神经科学与核武器扩散这一神奇的交集，以及利用放射性碳元素作为回顾性时钟的方法，推翻了此前公认的“新神经元绝不会在成人体内形成”这一教条。

现在回到我们的问题上：碳原子是怎样“知道”流逝了多长时间的呢？单个原子能追踪时间的流逝吗？理解放射性定年法的原理，可以提示我们：判断时间有许多种方法，而且就像大脑一样，从技术层面看，我们运用大量从根本上不同的机制来回顾性和前瞻性地判断时间。

元素由其原子核中的质子数量来定义。元素的同位素是指，质子数相同、中子数不同的变体。这些变体中有一些携带放射性，因为它们不稳定：随着时间的推移，它们会衰变成稳定的原子结构。不稳定状态也有可能非常稳定：例如，碳14的半衰期长达5730年。因此，如果一开始，我们有1000个碳14原子，那么到了5730年后，我们就只有500个放射性碳原子了。我们可以看出，剩余放射性碳原子的数量，提供了一种追溯时间的方式，我们可以通过它来确定化石、洞穴壁画、史前文物、古代手稿甚至神经元的时代。但是5730这个数字是从哪儿来的？碳原子怎么“知道”自己什么时候衰变？答案是它不知道。让人意外的是，尽管放射性碳定年法是一种最可靠的回顾性判断时间的方法，但单个碳14原子并不携带任何年龄痕迹。

放射性定年法背后的原理，基于一种最简单的判断时间的方法：概率。想象一下，有1000人被关押在赌场里，每个人都有10枚硬币。喜欢统计学的残忍匪徒告诉他们，获得自由的唯一途径就是掷出10枚硬币，每一枚都是人头像那一面朝上。如果每个人平均用1分钟来完成一轮投掷，那么，根据当前房间内的人质数量，我们可以估计已经过去了多长时间。显然，房间里的人越少，过去的时间就越长；此外，由于我们可以计算掷出10个人头像面朝上的概率，我们可以估计已经过去的时间量。投10枚硬币全是人头像面朝上的概率是 $1/2^{10}$ （ $1/1024$ ）。从这个数字可以计算出，一半人获得自由要花710

轮：710分钟，或者11小时50分钟。²所以每隔12个小时上下，房间里的人数应该减少一半：如果我们在房间里看到250人，很可能他们已经被关押了快一天。

放射性定年法的基础是一个非常类似的概率过程。这里，为了方便我们从直觉上进行理解，可以把一个碳14原子中的中子想成是在努力突破掩盖了原子核的电子云，以从原子核里逃离（实际上，中子释放出电子和反中微子，成为质子，把碳原子转化成氮）。没有嘀嗒嗒嗒时钟走动的声音：每个原子基本上就是坐在那里始终按概率行事。如果我们在今天创造出一个碳14原子，那么，它有可能在5730年里衰变成氮原子。如果我们隔了5730年之后回来发现，它并未衰变，它在未来5730年内会衰变的概率是多少？仍然是50%。就像一次又一次抛出的10枚硬币一样，原子本身绝对并不记忆或追踪自己已经赌了几千年。

使用放射性衰变来判断时间的能力，取决于对群体的统计数据：放射性原子的初始数量越大，我们对时间的估计就越准确。单个元素无法提供有关流逝时间的充分数据，但群体创造了一种判断时间的可靠途径。请注意，这种策略与大脑内部的群体时钟概念有一定的相似性，在大脑里，判断时间的最佳方式是观察特定时刻活跃的神经元亚群。

日历

大多数时候，我们的祖先对前瞻性计时比对回顾性计时更感兴趣。因此，追踪时间的最早尝试本质上主要与历法有关。预测月相、冬季的到来以及潜在猎物的迁徙模式，都对生存至关重要。占卜师、智者、祭司和天文学家使用月亮、星星和动植物的自然节律（外加大量的迷信）来判断哪一天最适合出战、种植和收获、举行宗教仪式、结婚、埋葬死者。能确定这些时间带来了权力，而掌握了权力，自然也就有了权力的滥用。负责历法的罗马祭司，显然不会白白浪费手里的权力，他们运用自己对历法的控制，缩短自己不喜欢的政治家的执政时间。按作家戴维·尤因·邓肯（David Ewing Duncan）的说法：“在政治上派系分明的祭司，有时会增加一年的长度，好让自己喜欢的执政官或元老院议员在位更久，又或者会减少一年，缩短对手的任期。”³

不足为奇，早期预测季节变化的尝试，以天空中最耀眼的两个星体为基础。可令人沮丧的是，太阳和月亮遵循不同的日程表。几千年来，时间的守护者们一直在为一件烦人的事实纠结：太阳年不能被朔望月的持续时间整除。地球绕太阳转一圈要用365又1/4天（尽管在人类历史的大部分时期，人们认为是太阳绕着地球转），而月球绕地球转一圈要花29.53天。因此，在太阳年中有12.4个朔望月。公元前5世纪，巴比伦人想出了一招解决办法：在19年的大周期里，有7年是13个月，另外12年是12个月。埃及人和罗马人则明智地决定，在测量季节节律和一年的持续时间时，忽略月球周期。但还剩下了一项挑战：太阳年的天数也不是整数。换句话说，地球绕着自己的轴旋转一圈所花的时间，不能整除它绕着太阳转一圈所花的时间。如果有人假设这一年由365天构成，那么100年之后，暑假会提前25天开始。

为了让日和年达成某种一致，尤利乌斯·凯撒（Julius Caesar，此处“尤里乌斯”也就是下文“儒略历”中的儒略）召集数学家、哲学家和天文学家共同商榷。他们发明了闰年。儒略历由12个月和365天组成，每4年有一个闰年，闰年为366天。为纪念凯撒，12个月里有一个月起名“儒略”月（Julius，也就是英语中的7月“July”）。尽管这是人类历史上具有里程碑意义的事件，但儒略历并不完美，它还需要进一步调整。过了几百年，日历

的时间与太阳年错位了，因为一年里并不是准确的 $365\frac{1}{4}$ 天，而是接近365.2425天。为了解决这一问题，教皇格里高利十三世（Pope Gregory）于1582年宣布，除非能被400整除，所有的世纪年（能被100整除）都不设闰日。今天我们奉行的是格里历，但为了进一步对应地球自转的不规则性，我们采用闰秒来让太阳日与协调世界时保持一致。自1972年以来，已经有20多个闰秒偷偷插入了我们的时钟。

第一台时钟

日历可以告诉我们这是哪一天，但却不能告诉我们这是一天中的什么时间。为了追踪一天当中的时间，至少早在公元前4000年，人类就开始利用太阳投下的影子。早期的日晷只是在地上垂直地插根棍子，按太阳在一整天里投下的影子划定线段。在大多数日晷上，一天分为12个间隔，但在历史上的大部分时段，这些“小时”不一定就是我们今天所知的小时：当时只分12个日光“小时”——不管是在白天长达15个小时的夏天，还是在白天只有9个小时的冬天。这些日晷说明的是相对时间：“小时”按季节膨胀或收缩。⁴

在罗马帝国时期，日晷无处不在。自此也开始了从自由形式的时间到严谨时钟时间的持续转变。没过多久，牢骚声也传了出来。在公元前2世纪，罗马诗人普劳图斯（Plautus）抗议道：

众神让第一个发现

怎样区分小时的人糊涂了！也叫那个

在这个地方设置了日晷的人，感到糊涂

日晷把我的日子切切砍砍，弄成了支离破碎的

小块！当我年纪还小的时候

我的肚子就是我的日晷——

比别的日晷更真实，更准确。

肚子总是在合适的时候告诉我

该吃饭了，就去吃饭；

但是，现在，为什么就算我肚子饿了，

我也不能去吃，除非太阳落了山。

城里到处都是这样让人糊涂的日晷……

还有另一些判断时间的方法，不是标准的时钟，而是计时器。水钟（clepsydra）让水从一个小孔流过，记录用多久可以装满或排空一个容器，

从而记录下固定的持续时间。13世纪前后，第一批真正的机械时钟出现了。与水钟的水不同，机械时钟冬天也不会冻结；与日晷不同，它不管是阴天还是晚上都能运转。人有理由感到好奇：古人在夜里没有航班要赶，没有电影要看，没有必须打考勤的工作要做，那么，他们在一整天（无论白天还是黑夜）里准确计时的动力是什么呢？是为了一件有些人必须按固定的时间间隔，风雨无阻地去做的事——祈祷。修道院是极为讲究制度的组织，按照教皇萨比尼昂（Pope Sabinianus）在公元7世纪所定下的规矩，修道院必须每天敲钟7次，召唤修士们祈祷。故此，时钟“不仅仅是追踪时间的手段，也是同步人类行为的手段。”⁵修道院和教堂是机械计时技术的早期应用者。教堂修建钟楼，负责看管并敲响教堂时钟，向城镇宣告时间的人，大多是修士和牧师（只要他们没睡过头）：

约翰弟兄，约翰弟兄

你在睡觉吗？你在睡觉吗？

敲响早晨的钟声！敲响早晨的钟声！

叮，铛，咚。叮，铛，咚。⁶

摆钟

悬垂重物完整地一次摆动的时间，跟摆动幅度近乎无关，伽利略似乎是第一个注意到这一现象的人。但直到他去世之后，人们才将他的见解用于制造时钟。不过，伽利略在世期间，世人借助钟摆的特点，发明创造出了最早的一种医疗器械：脉搏计（pulsilogium）。将砝码拴在绳子上，与一把水平标尺绑在一起。标尺可以缩短或延长绳子的长度。通过改变绳子的长度，医生就能利用脉搏计的摆动周期来匹配患者的心跳。因此，绳子的长度就成了一种可重复的心率指标。⁷

惠更斯是第一个利用伽利略的见解，制造出第一台高质量摆钟的人。惠更斯是个比伽利略更优秀的数学家，能够真正理解重物挂在绳上来回摆动的复杂动力学。凭借他的数学技能和大量的技术创新，1657年，他设计出的时钟代表了计时技术的巨大飞跃。此前，最好的时钟每天跑偏大概15分钟；而惠更斯的时钟，每天的误差仅为10秒。⁸10秒相当于一天的24小时总量的0.01%。这一精度是计时历史上的一大里程碑：这是人类大脑设计出的第一批比人类大脑内部时钟更准确的时钟。如我们所见，最好的生物计时器，也就是控制我们睡眠-清醒周期的生物钟，误差大约是1%（15分钟）：也就是说，平均周期为24小时的生物钟，其周期基本上会在23小时45分钟到24小时15分钟之间波动。⁹

然而，惠更斯的摆钟并没有解决文明史上最为迫切的一项科学和技术挑战：经度问题。

从15世纪末到16世纪初，欧洲探险家们忙着跨越大洋，发现新的商业航线、岛屿、大陆，甚至环航地球。由于无法可靠地计算出经度（即顺着东西向轴线，自己正位于什么地方），他们在海上无数次地迷失方向。纬度可以通过太阳在最高点（当地正午）的角度，相当准确地计算出来。但当时的人们不知道有任何方法，可以根据太阳、月亮或星星来计算经度。在葡萄牙、西班牙、法国、英国和意大利争夺新世界财富期间，这造成了深远的经济影响。在寻找陆地的过程中，水手们因坏血病和饥饿而死亡，船只搁浅，庞大的宝藏沉入海底。1707年发生了一场灾难性事故，英国海军上将克劳迪斯利

• 肖维尔爵士（Sir Clowdisley Shovell）率舰队撞上了锡利群岛。5艘船损失了4艘，外加大约2000名水手。部分地因为这场悲剧，英国女王安妮于1714年通过了《经度法》（Longitude Act），倘若有人发明出能在海上准确测量经度的方法或仪器，可获得相当于如今100万美元的赏金。

经度就是要确定一个人在空间中所处的点。你或许会问，这跟时钟有什么关系呢？从数学上讲，空间（距离）是时间和速度的孩子（距离等于时间乘以速度）。故此，凡是以恒定速度运动的东西，只要知道它运动了多久，都可以用来计算距离。很多东西都有恒定的速度，包括光、声和地球的旋转。你的大脑使用近乎恒定的声音速度来计算声音的来源。我们之前看到过，因为人的声音从你的左耳传到右耳大约需要0.6毫秒，你借此便可知道她是在你的左边还是右边。任何声音到达你左右耳都存在延迟，故此，大脑能够判断声音是从左边、右边还是两者之间的位置传来的。

地球以恒定速度旋转——每24小时旋转一周（360度）。因此，经度和时间之间存在直接的对应关系。知道已经过了多少时间，相当于知道地球已经旋转了多少度：如果你坐下来读了本书1小时（一天的1/24），那么，地球已经旋转了15度（360/24）。因此，如果你在当地正午时分坐在大海中间，并且，你知道格林尼治的时间是16:00，那么，你就“距离格林尼治4小时”——也就是说，与格林尼治的经度相差正好60度。问题解决了，只需要一台非常出色的航海计时器就行。

17世纪和18世纪最伟大的科学家，都无法对经度问题视而不见：伽利略、帕斯卡、胡克、惠更斯、莱布尼茨和牛顿都曾关注过它。然而，最终，获得经度奖的人，不是一位伟大的科学家，而是一位全世界最顶尖的工匠。约翰·哈里森（John Harrison, 1693—1776）是一位自学成才的钟表匠，他对这个问题痴迷专注到了极致。

哈里森和其他人都很清楚，如果要用时钟来解决经度问题，时钟就必须靠振荡的金属弹簧（游丝）来机械驱动。钟摆在海上毫无价值，因为船的运动严重会影响其摆动。此外，陆地和海洋之间的温度波动还会改变支撑钟摆摆锤重量的金属杆的长度。事实上，不管是生物的还是人造的，温度变化都是高性能时钟要面对的最大挑战之一。因此，钟表制造商和进化都要解决一项难题：设计出不随温度发生变化的时钟。约翰·哈里森早期发明了一种栅

形补偿摆（gridiron pendulum），用一套由不同种金属铸成的金属杆从相反方向固定组成的系统来支撑摆锤。这样一来，一根金属杆的长度因温度改变而增加，则对面方向上金属杆的长度也增加，两者便可互相抵消，从而让整个钟摆的长度保持不变。不过，哈里森的专长是机械时钟。为此，他发明了双金属片（bimetallic strip），由两种不同金属铸成的金属片（每种金属具有不同的温度膨胀系数）连接在一起。这种对温度敏感的金属片可用于调节游丝，使之在不同的温度下保持恒定周期。

依靠大量此类进步，以及他精湛的工艺，哈里森制造出了第一台航海计时器，达到了经度委员会制定的准度标准。经度问题的解决方案，为日后一股多次重复的技术趋势确定了先例：测量空间的最佳方法是使用时钟。¹⁰

石英和铯

哈里森和其他时钟制造大师，为之后一个多世纪渐进式的测量时钟时间的进步奠定了基础。但随着从19世纪进入20世纪，一场时间革命拉开了序幕。由于每天误差不到1秒的时钟得到了普及，怎样同步所有时钟，越发成为问题。就连判断两台远程时钟是否同步，都同样棘手：如何确定一台在巴黎的时钟和一台在伯尔尼的时钟是否在相同时间响起来？解决方案来自两种新兴的技术：电力和无线电波。20世纪初，电协调一度是人们关注的焦点：利用电力，将位于某处的主时钟的信号，几乎无延迟地发送到其他位置的从属时钟去。协调时间不是一个深奥的学术问题，而是由铁路、电报和金融业务驱动的问题。与大多数实践问题一样，发明者试图为自己的发明申请专利。由于瑞士是时间技术的中心，许多此类专利都提交给了伯尔尼专利局。从1902年到1909年，伯尔尼一位据说颇为勤奋的专利员审查了各种专利，包括一些与时钟电协调有关的专利。1905年，专利员阿尔伯特·爱因斯坦发表了名为《论动体的电动力学》（On the Electrodynamics of Moving Bodies）的论文，它不光彻底否定了绝对时间的概念，还简要地描述了一种远程同步时钟的方法。¹¹

我们将在下一章回到爱因斯坦的研究。现在，我们的焦点暂时只放在如下事实上：经过几个世纪的进步，20世纪初，随着最先进计时装置的出现（这至少是部分原因），摆钟和机械时钟即将过时。20世纪20年代，第一台石英晶体钟问世，20年后，第一台原子钟落成。

时钟的准确性，来自于其时间基准。摆钟的时基是钟摆。不足为奇，石英钟的时基是一块小小的石英晶体。当电压施加于石英晶体，它将进行高频率物理振动。振动的频率取决于许多因素，包括晶体的类型和形状，但通常，石英电子表的石英晶体以32768赫兹（即 2^{15} ，按二进制表示法比较方便，是10000000000000000）的频率振动。数字电路会对这些振动计数，记录流逝的每一秒。

今天，从性能上看，哪怕便宜的石英表，也好过最棒的机械表。然而，严肃用途的计时还是要留给原子钟去做。原子钟的准确程度，对惠更斯或哈

里森来说不可想象。惠更斯的摆钟每天的误差可能达到10秒，而如果一台原子钟在地球形成的45亿年前开始计时，到今天它的误差大概也就不到10秒。¹²

原子钟的时基有点难以想象。原子，比如铯，有一种共振频率，也就是该频率的电磁辐射将导致它“振动”——此处的振动指的是，“绕轨道运行”的电子将跃迁到更高的能量级。用9192631770赫兹精确频率的微波辐射刺激，铯133同位素会共振。可以说这一辐射频率就是原子钟的时间基准，而铯原子充当的是校准器的角色，确保频率正确。1967年，一个国际联盟将1秒定义为：“辐射9192631770个周期的持续时间，对应着铯133原子基态两个超精细能级之间的转换。”¹³时间的基本单位永久地脱离行星可观察的动力学，进入了单个元素的不可察觉行为的范畴。

一如18世纪和19世纪最先进的时钟为航海导航带去了革命性的进步，信息时代的原子钟同样革新了导航。不管是在你的智能手机上还是导弹头上，GPS都可以通过确定至少4颗卫星距离地球端接收器之间的距离，来进行定位。从相隔20000公里的卫星发送光速信号，用大约66毫秒可到达你处。如果你距离卫星移动了10米，信号还要再用33纳秒（0.000000033秒）。GPS接收器必须能捕捉到传输时间和到达时间之间如此微小的差异。为了实现这一目标，GPS不仅需要将数颗卫星送入太空，而且要在每颗卫星上放置一台原子钟（这是美国纳税人和军方为公众提供的一项了不起的服务）。通过测量来自不同卫星的信号到达的时间差，GPS接收器可以使用三角测量法来计算其纬度、经度和海拔高度。¹⁴今天的原子钟和GPS卫星不仅可以告知克劳迪斯利·肖维尔爵士船在什么位置，还能告诉他他正站在船上的哪个地方。

贩卖时间

准确度惊人的时钟，不仅可以用来测量小时和秒的无形流逝，还可以用来测量我们花时间做了什么。伴随着精确时钟的普及，小时工资制也出现了。19世纪末，一位名叫维拉德·邦迪（Willard Bundy）的人领悟了工厂管理人员追踪和记录工人时间的重要性，他发明了一种方法，记下工厂工人的到达和离开时间，考勤打卡机就是这么来的。他创办的国际计时公司

（International Time Recording Company）1911年合并成为计算制表记录公司（Computing Tabulating Recording Company），后来该公司称为IBM公司。¹⁵

本杰明·富兰克林写下“时间就是金钱”的时候，他指的是日薪制：旷一天工，就等于损失了潜在的工资收入。到了今天，“时间就是金钱”这句话变得更加真切了。股票市场交易员可以借助毫秒级的优势，赚取巨大的金钱收益。就连看电视这一单纯的行为，也成了时间-货币交易的一种形式。观众放弃自己的时间做一些本来不愿意做的事情（观看商业广告），换取“免费”娱乐（费用由看了广告后花钱购物的人来负担）。至于基于网络的音乐和视频服务，我们可以花钱付费“把自己的时间买回来”，以不受广告影响。

社会学家刘易斯·芒福德（Lewis Mumford）认为：“现代工业时代的关键机器，是时钟，而不是蒸汽机。”¹⁶如果说时钟是工业时代的关键机器，那么在信息时代，它仍然是关键机器。时钟将我们的生活分割成了越来越小的时间单位。商务会议是按分钟计时；“速配”每3分钟“配”一轮；黄色交通信号灯的持续时间缩短一秒钟，有可能导致闯红灯的人增多，从而引发交通混乱。¹⁷但更重要的是，如果没有现代时钟，定义信息时代的机器——计算机，就无法存在。时钟不仅可以同步人的行为，还可以确定计算机每秒钟执行的数十亿次操作的速度。



在某种意义上，人类对判断时间的追求，可谓是太过成功。几个世纪以前，时钟几乎不必彼此校准。今天，我们已经兜了一整圈又回到原点，但不

是因为时钟不精确，而是因为它们太精确了。爱因斯坦的广义相对论提出，任何时钟所测量的时间都受重力的影响。因此，相同的原子钟，承载在GPS卫星上发射进入太空后，会走得更快些（要让GPS运作起来，必须将这种效应考虑在内）。实际上，两台高精度光学原子钟，一台放在地板上，另一台放在桌子上，它们所测量的时间都会有些许偏差。那么，哪一台时钟判断的才是真正的时间？我们将看到，这个问题本身就提得不正确。

今天，我们对时间的测量，可以比对其他任何东西的测量都更精确。实际上，空间已经包含在了时间里：1米的定义是光在 $1/299792458$ 秒中所传播的距离。¹⁸但现代时钟惊人的地方，还不仅仅体现在它们的分辨率和准确度上；还体现在它们的范围上。为了测量一粒盐、一个人或一辆卡车的重量，我们需要3种类型极为不同的秤。相反，原子钟可以用来测量GPS卫星无线电信号的纳秒级延迟，也可以测量地球每年绕太阳运行的时间，并在地球运行变缓（由于地质和气候事件所导致的地球自转不规律）加上适当的闰秒。人类所构思或创造出来的设备，没有能在准确度或范围上超过时钟的。但除开技术成就，我们衡量时间的能力，并没有让我们在理解时间本质问题上更进一步。为什么时间只朝一个方向流动？过去、未来与现在有什么根本性的不同吗？又或者，时间看起来是这样，只是因为人类大脑的欺骗？这些是我们接下来要解答的问题。

8:00 时间：这到底是什么

在所有妨碍彻底阐释“存在”的东西里，没有一种比“时间”更叫人沮丧了。解释时间？不解释存在就无法解释时间。解释存在？不解释时间就无法解释存在。揭示时间与存在之间深刻而隐秘的联系……是属于未来的任务。

——约翰·惠勒（John Wheeler，美国物理学家）

人类的大脑已经弄清了怎样制造原子钟，怎样剖开原子，怎样前往月球并返回地球，怎样将器官和基因从一种生物移植到另一种，甚至开始解开基因的内部运作之谜。这些引人注目的壮举，有时会让我们忘记自己归根结底不过是异常聪明的猿。

大脑是按照相当无计划的进化原则所“设计”出来的产物。在过去7000万年的大部分时间，进化塑造了灵长类动物的大脑，让它们巧妙地使用与其他手指相对的拇指，识别物体，彼此辨识，发展最终提高了生存和繁殖能力的社交技能和社会纽带。这么说似乎是很稳妥的：在此过程中，没有太大的选择压力要人类学习怎样阅读，怎样推导达哥拉斯定理。我们能够做这些事情，证明了人类大脑的开放式运算能力。然而，大脑存在大量的错误、局限性和固有的偏差。让我们来看一个能充分说明大脑表现不佳的例子。请在脑海里把以下数加起来：

1000 +

40 +

1000 +

30 +

1000 +

20 +

1000 +

10

人们经常会算出答案是5000，而不是正确的4100。为什么做一道简单的数字运算题，大脑的表现这么差劲呢？毕竟，从任何指标来看，识别一张面孔、阅读这句话，都是远比加法更复杂的运算任务啊。这个问题的一个标准答案

是，执行数值运算的选择压力很小，但这只是答案的一部分。完整的答案要深刻得多。任何运算设备（不管是大脑还是数字计算机）的构建模块，都塑造了它适合（或者不适合）执行哪一类的任务。如果是做长除法，没有哪个人类能比一台最简单的计算器更出色，因为神经元是缓慢而嘈杂的计算单元。它们没有构建数字计算机的晶体管那么快的速度，也没有晶体管类似开关的特性。¹

执行数值运算，记忆随机字符串，迅速凭直觉给出朝着空中投掷4枚硬币出现两个人头像朝上的概率——我们在这类事情上的能力都很糟糕，它们也恰恰是人类大脑不擅长执行的几类任务。面对这些事实，我们或许还应该问问，大脑的固有局限性和偏差，在多大程度上限制了科学的进步。有一些问题，大脑在进化中并未获得针对性的解决能力。那么，大脑的结构是怎样塑造着人类解答这些问题的能力的呢？进化显然并未赋予人理解大脑本身的能力，以及理解时间的性质的能力。

重访现在论和永恒论

人类踏上了一场不断提高时间度量准确度的远征。如我们在前一章中看到的那样，我们在这一追求中太过成功，但测量时钟时间的成功，对我们理解自己到底在测量些什么带来的进展并不大。

时间是什么？我指的不是时钟时间或主观时间，而是最深刻意义上的时间：时间的本质。哲学家和物理学家有许多不同的理论。²这些理论中有一些是互相排斥的，有一些对主题做了微妙歪曲。但是，我们在第1章中已经看到，现在论和永恒论捕捉到了两种主要观点。

提醒一下，根据现在论，只有现在才是真实的：所有的存在，都存在于永恒的现在（我用“现在论”这个说法，并非暗示时间是绝对的）。过去指的是不再存在的宇宙结构，而未来代表尚未确定的结构。在永恒论下，时间被空间化为一个完整的维度，过去、现在和未来同样真实。宇宙变成了一种四维的“块”：有一重时间维度和三重空间维度，故此也叫作“块体宇宙”。³

长久以来，语言都妨碍着现在论和永恒论进行一场毫不含糊的对话。例如，在现在论和永恒论下，诸如“真实”和“存在”之类的词语，可能有着非常不同的含义。在现在论的语境里，“恐龙存在”的说法是错的。但在永恒论下，人们可能会争辩说这种说法是正确的，因为恐龙确实曾经存在于其他某个瞬间，而那一个瞬间，跟你认为是现在的这个瞬间同样真实。故此，与其试着从“真实”和“存在”等词语的角度去定义现在论和永恒论，根据现在论或永恒论来定义“真实”和“存在”或许会更好。在现在论下，“真实”意味着它此刻存在，而且只有此刻存在，因为当下是任何东西能够存在的唯一瞬间。相比之下，对永恒论而言，“真实”可以指代在整个块体宇宙中任何地方、任何时间存在过的东西，包括恐龙或者你将来的后代。

语言具有一种固有的现在论视角。与现在论一样，在动词时态中，现在时是个有特权的参考框架。实际上，现在论和永恒论这两个术语，分别与部分哲学家所说的“有时态时间”（tensed time）和“无时态时间”（untensed time）相关。有时态时间总是扎根于现在：“我今天早上和

昨天早上去了健身房”这句话，是根据现在来定义过去发生的时间。这个说法今天是真实的，但明天就不是真的了（相信我），100年前就更不是真的。相反，干巴巴的事件清单，比如“2016年1月1日上午8点，健身房；2016年1月2日上午8点，健身房”，就是无时态时间的例子。如果这张清单今天是真的，那么明天仍然是真的，从某种意义上说，100年前它甚至也是真的。这些事件现在似乎沿着某个连续体共存，就像日历上代表“相邻”日子的相邻方块一样。这就如同时间已经空间化了。

时间，谁需要它

论述时间本质的理论，跟现在论或永恒论并不完全契合。例如，物理学家乔治·埃利斯（George Ellis）等人主张做一番折中：认为宇宙是四维块体，但却只包含过去。在这种所谓的演化块宇宙（evolving block universe）理论下，“现在”是不确定的未来逐渐冻结成不断发展却不可改变的过去的浪潮。⁴

还有人相信，时间仅仅是一种非常有用的抽象概念，有助于解释宇宙怎样运作，但与质量和能量不同，时间不是物理学的基本要素。为了更好地理解这种观点，请记住，在实践中时钟时间总是通过变化来衡量的。无论多么准确或不准确，时钟始终是在量化一些物理现象的变化。这一事实带来的结果是，时间总是能够表达为其他非时间物理量度。例如，石英钟往往用圆形表盘上的刻度来标记时间，当分针从12点方向走到6点方向，我们说，已经过去30分钟，但其实，我们同样也可以说过去了180度，不是吗？又或者，用基准频率为1赫兹的摆钟来举例，过去了30分钟我们也可以说成是过去了1800次摆动。实际上，时间的标准单位（秒）并没有定义成某种纯粹的时间单位，而是说对应着铯133共振频率的9192631770个辐射周期，它大约相当于地球绕自身轴旋转1度的1/240那么久。126个这样的“秒”，对应着2014年冬季奥运会高山滑雪选手从山的最高处冲到最低处所用的时间。这里的要点在于，时钟时间可以看作是我们将变化标准化的一种惯例。时间提供了一种非常有用的方法，将不同物理系统的变化速度建立等效关系（支持这种观点的人，有时被称为关系主义者（relationalist））。19世纪，物理学家恩斯特·马赫（Ernst Mach）说过：“用时间来衡量事物的变化，完全超出了我们的能力。恰恰相反，时间是一种抽象，我们通过事物的变化来实现这种抽象。”⁵

此前论述大脑怎样判断时间的章节，也隐含了“时间是对物理系统状态变化的度量”这一概念。正如我们可以将雨滴落入池塘产生的涟漪作为计时器，我们看到大脑也可以利用神经网络的动态，在内部网络状态和外界所发生改变之间建立相关性。因此，每秒钟敲击手指的任务，最终可概括为将大脑内部的变化与人造时钟的变化相匹配。本质上，我们说大脑在判断时间，就是这个意思。⁶

关于时间的术语和理论五花八门（现在论、永恒论、有时态时间、无时态时间、演化块宇宙、关系主义，等等），其实就是人们对时间到底是什么并没有达成共识的一种表现。尽管如此，如果说物理学和哲学中存在一种优势理论，那一定是永恒论。然而，永恒论不仅仅违反直觉，它还嘲弄了人类体验最普遍的一种特征：现在就是不再存在的过去和尚未形成的开放未来之间的接口。永恒论并不符合时间流动的主观感受，因为时间中所有的瞬间都与空间中所有的位置同样真切。因此，物理学家和哲学家必须要给出充分的理由，才能让人接受永恒论。在本章和下一章，我们将探讨其中的两个原因。让我们先来预览一番：（1）根据物理定律，“现在”是时间中一个任意的瞬间，一如“这里”是空间中的任意一点；（2）爱因斯坦的狭义相对论似乎表明，时间里的所有时刻，都是沿着块体宇宙时间维度永久排列好的。

对当下的无所谓

我们成功地推断出了宇宙的基本规律，这可能是人类物种的最高智力成就了。早期的人类碰到困扰的问题，会向诸神请教答案，而如今的物理定律，已强大到了取代诸神的地步。夜空里闪烁的光点是什么？为什么太阳升起又落下？日食、自然灾害以及天气的反复无常，不再被归因于人类数千年来所崇拜的神灵。

牛顿迈出了第一步。他描述了日常生活中物体行为的规律——从苹果的落地，到行星的运动。爱因斯坦通过狭义和广义相对论，扩展（并纠正了）牛顿定律。爱因斯坦为我们提供的工具，帮助我们理解大爆炸之后的宇宙事件，理解时间和空间并非独立，解释引力本身不是一种力，而是时空的曲率。然而，与行星和恒星不同，亚原子粒子似乎有一套独特的隐秘规律，而这套隐秘的规律，又并不遵守爱因斯坦的定律。20世纪的前几十年，量子力学领域破译了这些规则。在这个阴森可怖的量子世界中，粒子以叠加状态存在（似乎是同时在空间中占据多个点），纠缠的粒子似乎能立刻相互影响，哪怕两者的距离相隔光年之远。

尽管物理定律取得了令人瞩目的成功，对我们生活产生了变革性的影响，但却令人尴尬地无法解释人类有史以来重复性最强的观察现象：当下是特殊的。当代哲学家克雷格·卡伦德（Craig Callender）解释说：“物理方程式并未告诉我们此刻正在发生哪些事件——就像是一张没有‘你在这里’标识的地图。物理定律中不存在当下时刻，故此也不存在时间的流逝。”⁷

物理学的基本定律同样也没有解释，为什么时间孜孜不倦地一味前行。事件到底是向前还是向后展开？牛顿和爱因斯坦写下的方程，以及用来描述电和磁的方程（麦克斯韦方程），用来理解量子世界的方程（薛定谔方程）都觉得这无关紧要。⁸据说，这些方程是时间对称的，也就是说：一如“开车从洛杉矶前往旧金山”跟“开车从旧金山前往洛杉矶”是同等现实的提议，牛顿定律对事件是往前还是往后展开的态度是无所谓。假设有人给你看一部电影，展示的是月球围绕地球转、地球同时又围绕太阳转的奇妙舞蹈。我们

可以用牛顿定律从数学上描述这种舞蹈。也就是说，我们可以写下一组方程式，模拟这3个星体的运动。等我们完成方程式之后，有人突然告诉我们，我们建立方程式所依据的电影，一不小心播放反了。难道说我们要把之前的工作全部抹掉吗？用不着。我们的方程式仍然有效：只需要按照实际向前的轨迹，把变量 t 的正负符号翻转一下就行。⁹同样道理，如果我们后来发现这部电影来自1000年前，我们的方程本身仍然有效。牛顿定律对时间的方向持无所谓态度，不管它们是过去、现在还是未来。相对论和量子力学的方程也是如此。物理定律并没有为时间的方向或任何特定的瞬间赋予任何特殊的意义：过去、现在和未来都有着同等的立足点。

时间顽固的箭头

你可能会想：动力学的方程可以朝前也可以反过来，这我当然能理解；毕竟，一部有关行星运行轨迹的电影，不管是正向播放还是逆向播放，看起来都一样嘛。但对那些我从经验知道不可能的事情，物理定律一定是禁止的吧？气球爆了以后不会还原，落地的玻璃碎了不会重圆，冰茶中融化了的冰块也不会又结成冰块。物理定律应该会确保这些事情不会发生吧！令人惊讶的是，它们并不。

时间箭头之谜的标准答案，出自19世纪的奥地利物理学家路德维希·玻尔兹曼（Ludwig Boltzmann）。他对热力学第二定律做了统计性阐释，指出孤立系统的熵随着时间推移具有不断增加的趋势。我们可以认为熵相当于无序的程度。例如，如果我们将10个骰子扔进一个盒子摇晃，骰子的位置将是无序的或“随机的”，故此，我们可以说盒子处于高熵状态。但如果我们仔细地将所有10个骰子挨个叠成柱状，那么，就可以说整个系统处于高度有序结构，即低熵状态。

为了理解熵与时间箭头究竟有什么关系，让我们首先在盒子左边放置两颗氢原子。过了一阵，我们回来，想知道两颗原子可能性最大的排列是什么样子（位于盒子的左边还是右边）？我们能在盒子里发现的状态（配置）有3种：两颗原子都在左边（LL），两颗都在右边（RR），或者一颗在左一颗在右（由于原子彼此难以区分，LR和RL是同一种状态）。在这些状态中，每一种的概率是 $1/4$ LL， $1/4$ RR和 $1/2$ LR（RL）。所以，概率最大的状态是原子均匀分布，因为达成一边一颗的状态有两种方式。如果等这种均匀分布的状态过去之后，我们再一次偷偷朝盒子瞅一眼，盒子的状态“逆转”回到其初始状态的可能性其实相当高：我们第二次偷看时，盒子有 $1/4$ 的概率返回其初始状态，即两颗原子都在盒子的左侧。如果这个包含两颗原子的盒子就构成了整个宇宙，我们可以说，宇宙在时间上回归了：它恢复了与初始状态难以区分的状态（至少，在这一粗糙的分析层面上是如此，因为我们这里并不考虑原子的准确位置）。

但要是我们把10000颗氢原子（仍然只是极少量的原子）放到盒子左边，等待系统达到盒子左右各有一半原子的状态，这一回，所有原子都回到全在

左边的状态的可能性就小得不可思议了：比一古戈尔分之一还要小（一古戈尔是 10^{100} ，比宇宙中的粒子数还要大）。故此，我们说盒子中的原子不太可能恢复到初始状态，我们所说的不可能的程度，不是赢彩票那种，甚至不是每星期赢一次彩票那种。我们说的是“一个月中每个星期都吹来一阵风把中了大奖的彩票吹进你的卧室”那种程度的不可能（我要承认，我其实没算过这种情况的概率是多大；关键在于它不会发生）。“盒子中的原子极其不可能回到初始状态”这一说法，其实有着深刻的含义，因为它可以解读为，盒子中的原子不会顺着时间“返回”，这样一来，时间就有了方向的箭头。

热力学第二定律，从含义上说有别于能量守恒定律。它是一种统计性的主张：尽管逆转孤立系统的状态近乎荒谬地不可能，但不管怎么说仍然是正当的。因此，如果你把一块玻璃在地板上摔碎了，之后又亲眼看到碎片恢复成一整块玻璃并跳回了桌面，这其实并未违背物理学的基本定律——牛顿和爱因斯坦不需要从坟墓里坐起身。为什么不呢？玻璃落地，来自玻璃撞击地板的势能转化为动能，其形式是空气分子的运动增加（因此玻璃发出破碎的声响）。根据能量守恒定律，总能量得到了保留（没有例外），而且至少在原则上，没有任何东西禁止这些空气分子最终退回之前的配置，将等量的能量施加于玻璃碎片上使其重圆，并把完好无损的玻璃放回桌子。

因此，热力学第二定律并不禁止气球爆了以后还原，落地的碎玻璃重圆，冰茶中融化了的冰块重新结成冰块：它只是做了次优选择——从实际上确保它们不会。因此，所谓的时间熵箭头似乎很好地揭示了为什么世界上所有事件都顺着时间的箭头展开。然而不巧的是，考察熵箭头本身，会发现它并不像是个箭头。

双向箭头

想象一下，我们的盒子里现在共有10颗氢原子，在特定瞬间（我们称之为时间 t ），我们观察到左边有4颗原子，右边有6颗原子——我们将这一状态表示为 $[4, 6]$ 。我们知道最大熵的状态是每边5颗原子 $[5, 5]$ ，因为把10颗原子排列成一组各5颗的两组，分布方法最多。故此，在下一瞬间 $t+1$ ，我们可以猜测，观察到 $[5, 5]$ 状态（熵增）比 $[3, 7]$ 状态的概率要大。但我们不朝未来看，而朝过去看，问问在前一瞬间 $t-1$ 我们最有可能观察到什么状态。那么，按照同样的逻辑，答案必然还是 $[5, 5]$ 。在没有其他任何关于系统的信息的前提下，如果观察到 $[4, 6]$ 排列之后最可能出现的状态是 $[5, 5]$ 对分，那么，先前最可能出现的状态必然也是 $[5, 5]$ 对分。请注意，本例中，我从未说系统是所有原子都处在盒子同一侧的状态开始的——事实上，盒子说不定就是从 $[5, 5]$ 结构开始的， $[4, 6]$ 状态是不可避免的波动。

这有点打击人。如果我们要把热力学第二定律视为时间的箭头，那么它预测熵往前会增加的同时也推演熵还会随着时间反向运行而增加这一点不免叫人失望。时间的熵箭头似乎是双向箭头。对时间为什么是条单行道的热力学解释只有在接受一条隐含假设的条件下才能成立。在上文的第一个例子中，我们是从所有原子都在盒子左侧的状态开始的——也就是说，盒子处在熵极低的状态。如果我们从熵最低的状态开始，那么熵必然只能增加。是以，只有当宇宙从低熵状态开始时，热力学第二定律才能构成时间的箭头。

按通常的看法，时间本身是伴随着140亿年前的宇宙大爆炸开始的，并且，在大爆炸之后的瞬间，宇宙确实处于熵极低的状态。所以现在时间箭头的问题变成了：宇宙是怎样达到这一初始的低熵状态的？路德维希·玻尔兹曼意识到回答这个问题的重要性，他提出了一个巧妙的假设：宇宙的低熵状态是此前高熵宇宙短暂波动的结果。如果说这一设想似乎违背了玻尔兹曼自己的定律，那是因为它确实如此。但我们已经说过，热力学第二定律本质上是统计性的：熵的减少不是没有可能，不是办不到，只要给了足够的时间，看似做不到就变成了有可能做到。低熵之谜还有一个相关但更加现代的假说，那就是多元宇宙假说，我们所在的宇宙，是一个大得多的多元宇宙中的

局部低熵区域。¹⁰尽管如此，宇宙为什么会从低熵状态开始，并没有普遍接受的理论，更不用说，与宇宙起源相关的问题（时间起源的问题包含在内）不大可能很快得到解决。



热力学第二定律提供了一个潜在的解释，为什么时间不停地向前推进（或至少解释了，宇宙为什么从大爆炸时令人费解的低熵状态开始逐渐熵增）。但时间箭头的成因还有其他假说。有一种假说认为，量子力学内含着时间不可逆的过程（“箭头”）。我之前说过，所有已知的物理定律，包括控制量子世界的方程（薛定谔方程），都是时间可逆的，它们的确也是。但是量子力学还有另一个薛定谔方程无法解释的阶段，它已经困扰了科学家将近一个世纪。如果我们向感光板射出单个电子，薛定谔方程给出了时间 t 时任意位置观测到电子的概率。但要真正知道电子的位置，必须进行测量，而薛定谔方程并未描述测量阶段本身会发生什么。在进行测量之前（例如就在电子撞击感光板的时候），电子据说同时处在所有可能的位置。唯有测量电子位置的这一行为，迫使电子落在了一个确定的位置——测量行为，据说会使电子的波函数坍塌。但使波函数坍塌（又或者，根本没有坍塌）的测量过程到底是怎么回事，人们没有达成共识。一些物理学家认为，量子力学的测量阶段会给宇宙施加一个时间箭头。¹¹在这种对量子力学的阐释中，一旦电子的位置得到测量，就再也不能回头。实际上，一旦测量完成，就不可能用薛定谔方程来反推电子穿过的是哪一条狭缝。¹²

即使最终证明量子力学为宇宙加了一个时间箭头（许多人认为不大可能），但事实并未改变：量子力学或任何其他物理定律都没有赋予“现在”特殊的意义。¹³物理方程似乎表明，“现在”之于时间，就如“这里”之于空间一样。这就是许多物理学家和哲学家认为我们生活在永恒论块体宇宙的一个原因。但对包括我自己在内的另一些人来说，这并非支持永恒论最有说服力的论据；相反，我们马上就会看到，爱因斯坦的相对论恐怕才是接受永恒论的最佳理由。

9:00 物理学中时间的空间化

对于我们这些虔诚的物理学家来说，过去、现在和未来的区分，仅仅意味着一种顽固的幻觉。

——阿尔伯特·爱因斯坦¹

篮球比赛令人兴奋的一点是，比赛的最后有时候会出现与时钟的赛跑。在时钟嘀嗒倒数至零、蜂鸣器响起之前，球员必须出手完成最后一记投篮。如果在比赛计时钟归零前离开了手，这次投篮就计入得分。判断这两件事哪一件先发生，似乎是一个完全客观的行为：球要么在蜂鸣器响起前离开手，要么没有。然而，结果却并非如此。

让我们来做一個思想实验：假设裁判判断，制胜的那记投篮确实在球场另一端原子钟倒数至零前离开了球员的手。运用某种高科技设备，裁判稍后证实，球员投出球的时候，时钟上还剩完整的1纳秒（即十亿分之一秒）。现在，让我们假设，由于这是NBA总决赛的第7场比赛，一名宇航员正在通过望远镜观看比赛，此时，他正置身一艘速度飞快的宇宙飞船，其飞行速度达到了 $1/2$ 光速。²宇航员听说这次投篮记入得分，忍不住对裁判骂了脏话，因为宇航员确定，球投出之前，时钟就归零了——也就是这次投篮得分不算数。投篮是否算数，哪支球队是真正的冠军——这些存在分歧的报告与信息传送到宇宙飞船所存在的时间延迟没有关系，我们假设，各方都已考虑到了这些延迟。这两种叙述仅仅是两种同样成立的现实，一种是获胜的球队是凭实力获胜的，另一种是裁判误判了比赛。

怎么会这样呢？两件事的发生顺序，因观察者的不同而不同，这有可能吗？如果真是这样，这对时间的本质会有什么意义呢？为回答这些问题，我们必须深入探究爱因斯坦的狭义相对论。

狭义相对论

光看爱因斯坦谦逊的论文标题《论动体的电动力学》，谁也猜不到这将成为一篇改变科学进程的论文。爱因斯坦从两条原则出发，推导出论文中提出的理论——狭义相对论。第一条是，对所有恒速运动的观察者来说，物理定律保持不变。³这一所谓的相对性原理，爱因斯坦借鉴自伽利略。伽利略指出，在一艘以恒定速度平稳运行的船里，观察者不可能知道自己是否真的在运动——你说不定会联想到，你曾在飞机上摇摇晃晃地醒来，一时分不清自己是在飞行中，滑行中，还是停在跑道上。相对性原理带来的结果是，我们总会根据与另一种东西的相关性来定义速度。当我们说汽车以每小时100公里的速度行驶，我们隐含的意思是，这是相较于地球上的静止物体而言，比如地上插着的80公里限速标志。但严格来说，并没有正确或绝对的参考框架。相对迎面驶来的警车，汽车的速度将远超每小时100公里；而且，说汽车处于静止状态，是限速牌正以每小时100公里的速度移动，也是同样成立的。因此，某一物体行进的速度，是与选中的参考框架相关的。只不过，这里有一种例外的情况……

在真空中光速是恒定的，与光源的运动状态无关。这是爱因斯坦的第二条原则。乍看起来，光速恒定的概念无伤大雅，但跟相对性原则结合到一起，就破坏了绝对时间的概念。为了理解光速恒定的后果，让我们首先在速度的常识概念上达成共识。如果你在以每小时100公里速度行驶的火车上，朝着火车的运动方向射出一颗子弹（枪支射出子弹的速度是每小时300公里），你会观察到，子弹以每小时300公里的速度远离你。如果我站在火车站的平台上目睹这一幕，我会（足够符合直觉）测量到子弹的速度是火车的速度加上子弹的速度，即每小时400公里。⁴接下来，让我们考虑一种类似的情况，只是放入爱因斯坦第二条原则：光速的恒定性。你的火车现在以每秒100000公里（光速的 $\frac{1}{3}$ ）的超高速行驶，你朝着火车前方射出了一束激光。激光的最前端将以每秒300000公里的速度远离你（大致相当于光速，用 c 表示）。按理说，当你观察到以每秒300000公里前进的光束时，我应该观察到它的速度是火车的速度加上光速：每秒400000公里（ $1.33c$ ）。然而，这将严重违反光速恒定的原则，即人人测量的光速都应该等于 c ，不管其自身速度是多少（它还

违背了狭义相对论的一个相关的后果，即任何东西的速度都不会超过光速）。事实上，你和我都将报告说，激光光束完全以相同的速度行进。

在直观的层面上，这十分令人困惑不解。你可以计算出，1秒钟后，激光束的前沿超出你的火车300000公里了。因为观察到光束以相同的速度行进，我能计算出光束在火车站前方300000公里，因为我知道你的火车以100000公里每秒的速度行驶，所以列车应该正位于轨道上的100000公里处。因此，根据我的参考框架，列车和光束之间的距离，应该是两个位置之间的差：300000-100000=200000公里。但你刚刚分明观察到，光束在你前面300000公里！有点不对劲。简单地说，光速的绝对性，是牺牲时间和空间的绝对性换来的！我们的计算不匹配，因为我们并没有以相同的方式体验时间或空间。

1905年是爱因斯坦的“奇迹年”：在伯尔尼担任专利员期间，他发表了4篇开创性论文。在狭义相对论论文中，他得出了一组方程，描述了时间膨胀（和空间收缩）与速度的函数。有趣的是，这些方程式叫作洛伦兹变换，因为它们最先是由荷兰物理学家亨德里克·洛伦兹（Hendrik Lorentz）描述的。但洛伦兹并没有完全理解这些方程的后果，他也没有意识到，它们可以从上文提到的两条原则中推演得出。有必要迅速看一眼洛伦兹时间变换的缩减版⁵，因为它是时间历史上最重要的时间方程式之一。这个等式只涉及代数，它把你搭乘火车期间时钟给出的时间（ t^{you} ），转化成了我站在火车站上时钟给出的时间（ t^{me} ）（假设我们的秒表，都从你超过我的那一瞬间开始计时）。在等式中， v 代表我们之间的速度，而常数 c 还是代表光速：

$$t^{me} = \frac{t^{you}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

因为 c 是极为巨大的数字，在日常速度下， $\frac{v^2}{c^2}$ 将接近于零，并且分母将非常接近 $\sqrt{1}$ ，即1。因此， t^{me} 将近似等于 t^{you} 。这正是我们的正常经验：我们所有的时钟都以相同的速率行进并保持同步，因为即使我们正在移动，我们只

是低速（相对于光速）移动。但在接近光速的速度下，时钟相对于彼此行进的速度不同。回到你在一辆以 $1/3$ 光速行驶的火车上的例子，按你的时钟测量的1秒钟（ $t^{\text{you}}=1$ ）过后， t^{me} 等于1.06秒。这样的差异不算大，但如果你的旅行速度更接近光速，比如说 $v=0.999c$ ，那么你的1年（ $t^{\text{you}}=1$ 年）， t^{me} 就等于22年以上了。我们说，你的时间膨胀了：你才1岁，我就22岁了。⁶

第一批揭示时间膨胀的实验之一，是在商业航班上携带原子钟，并将它们与地球上的原子钟进行比较。航班东向飞行（由于地球的自转，飞行方向很重要），时钟记录了数百个小时。正如狭义相对论所预测，飞行中的时钟比放在华盛顿美国海军天文台的原子钟落后了大约亿分之一秒。⁷

这项实验，以及后续的其他许多实验证实，时间不是绝对的。牛顿是错的——时钟时间并不会“均一流动，无关外部的任何东西”。

同时性的丧失

无论是摆锤的摆动，还是视交叉神经元中的“周期”蛋白质，时钟时间总是通过变化来衡量，而变化是局部现象。某些事物的变化速度，会受局部环境的影响，这一点我们很容易接受。这差不多也就是我们发明冰箱的原因——冰箱里的西红柿，比还留在菜摊上的同胞“老”得慢。实际上，用钟摆时钟或者果蝇生物钟测量的时间，同样会因环境温度而改变。但温度对不同时钟的影响不同——对某些时钟，温度完全没有影响。例如，第7章讨论的放射性同位素的衰减时间，在接近绝对零度时，也与正常情况差不多相同。相反，速度对任何时钟的运行，都有着绝对的、毫无商榷余地的影响。任何物理过程，无论是原子钟还是人体，都会根据自身行进的速度，以更慢或更快的速率变化。这兴许就够让人不解了，但爱因斯坦的狭义相对论还有一个更叫人困惑的后果。

让我们回到列车和站台的思想实验，想象一切都发生在低速运行的常识世界。假设一辆行驶的火车中，射出了两颗方向相反的子弹。你站在200米长的火车的中间，该火车以每秒100米的速度行驶，我站在站台上（见图9-1）。火车车头朝着我的方向驶来，你开了两枪，子弹也以每秒100米的速度行进：一颗子弹朝向火车前窗，另一颗朝向后窗。从你的视角来看，子弹以相同的速度行进，必然会穿过相同的距离，因此，两颗子弹将同时打碎火车前后的窗户——就在你扣动扳机后正好1秒。从我的视角来看，我会看到前进的子弹以每秒200米的速度移动（火车的速度加上子弹的速度），击中前窗为1秒，因为子弹必然行进了200米（火车长度的一半，加上火车在1秒钟行驶的距离）。我将观察到，向后射出的子弹，以每秒100米（列车的速度）减去每秒100米（子弹的速度是负的，因为它跟火车运动的方向相反）的速度行进。换句话说，我看到子弹停在半空中，而火车后面的窗户撞上了子弹（如果我们假设这一切发生在真空状态，发生在引力很小的星球上，那就最好不过了）。这还是需要1秒钟，因为火车的后部距你手枪射击的地方100米。正如牛顿所预料，你和我将看到，火车的前后窗同时破碎。本例中，我们会说同时性是绝对的：你看到同时发生的两件事，在我眼里也是同时发生的。

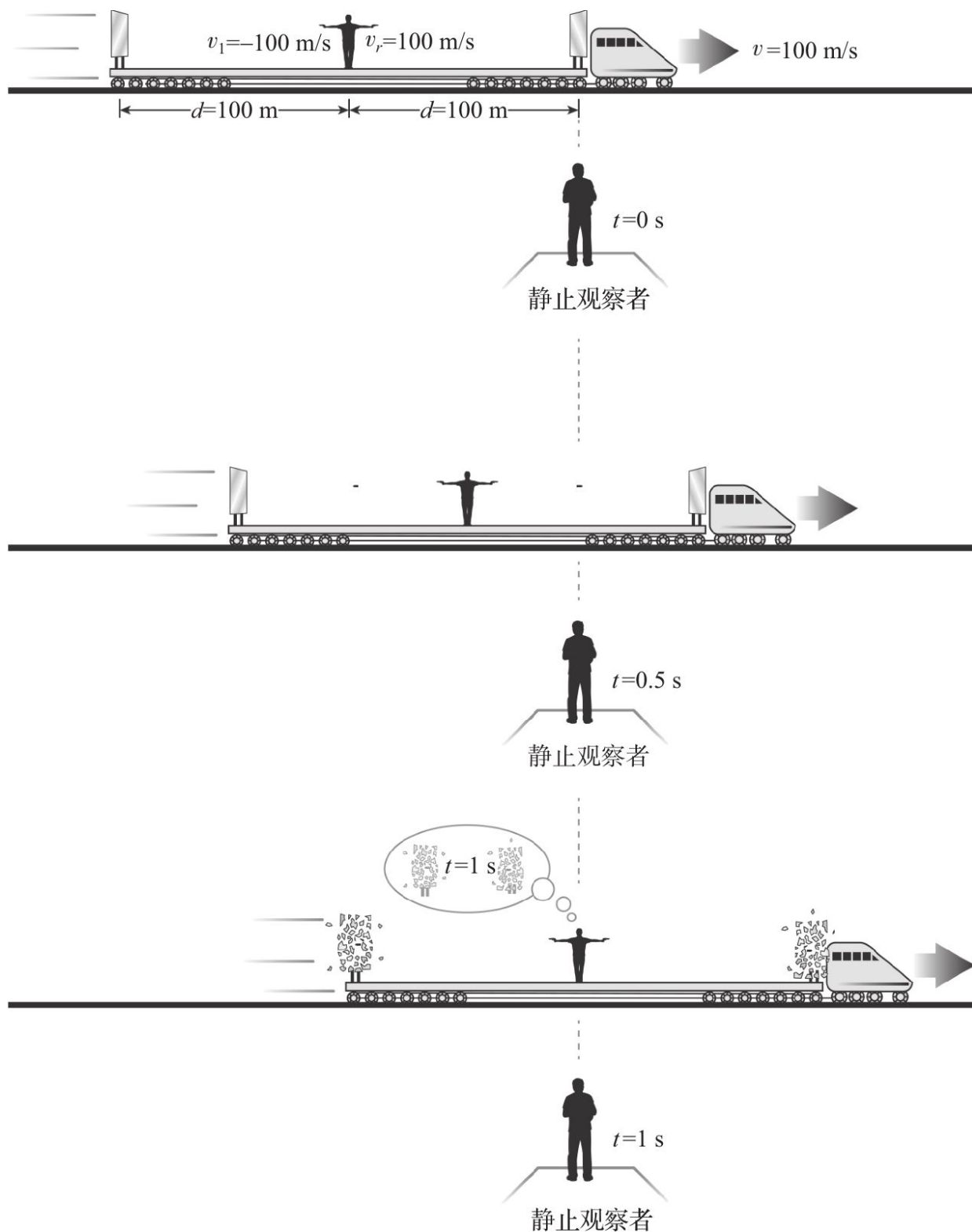


图9-1 牛顿的火车。按照牛顿定律，如果观察者站在行进火车的中间，朝着相反方向射出两发子弹（ $t=0$ ），在所有观察者眼中，火车的前后窗户将在 $t=1$

秒时同时破碎。

现在，让我们再做一次类似的思想实验，只是速度快得多，距离也远得多（见图9-2）。你此刻正搭乘一辆很长很长的火车，你坐在火车中间，测得火车的长度是4400000公里，⁸行驶速度是光速的 $\frac{2}{3}$ ：大约每秒200000公里（ $0.667c$ ）。跟之前一样，当你的火车前端到达我处时，你用如今尚未发明的粒子枪开了两枪，粒子枪的子弹同样以每秒200000公里的速度行进。这些粒子子弹以相反的方向，朝列车两头的窗户行进。再说一遍，因为你的位置是在火车中间，你会看到两扇窗户同时破裂：按照你的时钟，是在你开枪后正好1秒，因为两颗子弹，按每秒200000公里的速度飞行1秒，必然行进了200000公里。对我而言，由于火车后窗正以每秒200000公里的速度向子弹推进，我仍然会看到朝火车后方射出的子弹在半空悬停（因为火车的速度减去子弹的速度等于零）。但在我的观察中，朝前行进的子弹速度是多少呢？为了让两扇窗户在我的视角里同时破碎，朝前的子弹必须在火车后窗到达后方子弹所需的等量时间内，穿过等于火车全长的距离（初始的一半火车长加上火车行进的距离）。由于朝前的子弹必须行进两倍于朝后的子弹的距离，因此，它必须以远高于光速的速度行进。但是，狭义相对论告诉我们，前向子弹的速度大约是每秒277000公里（ $0.92c$ ）。很明显，我不会见证前后窗户同时破裂。也就是说，你看到两扇窗户同时破碎，我却看到后面的窗户先破碎！这种分歧，与所有传输延迟（与火车不同位置的信号到达你或我所需时间不同相关）绝对没关系；⁹相反，这些看似矛盾的体验，代表了两种不同但同样有效的现实。同时性（其实就是两件事发生的顺序）可以是相对的。¹⁰

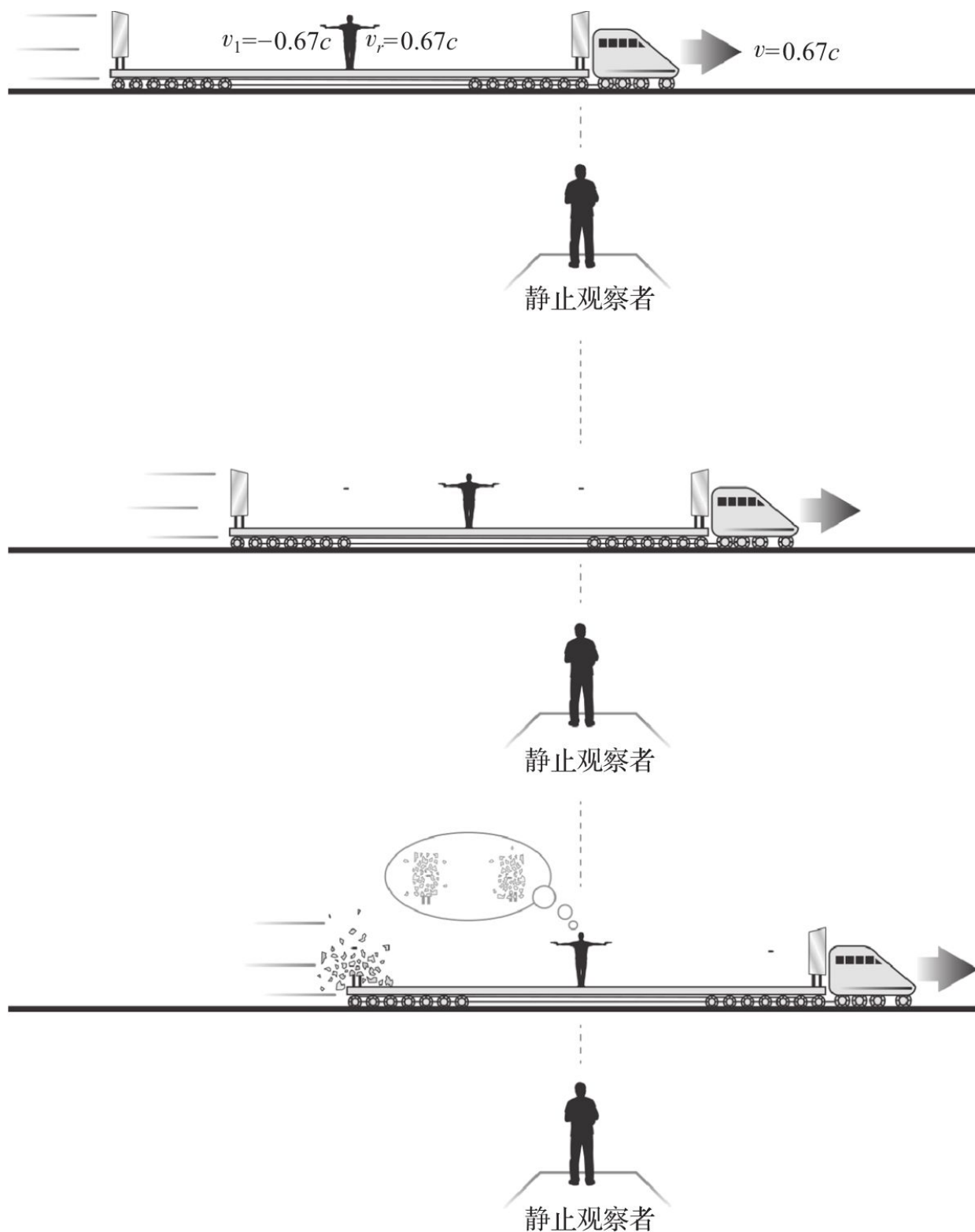


图9-2 爱因斯坦的火车。狭义相对论告诉我们，在极快的速度下，不同的观察者将体验到不同的空间和时间（所以，绘制时空图会非常棘手）。火车前方

窗户抵达站台上的观察者时，将火车和站台上的时钟都设置为 $t=0$ 。当火车上的和站台上的观察者面对面时，火车上的观察者将看到两扇窗户同时破碎，但站台上的观察者将看到后窗先破碎，前窗却仍保持完整。

时空

让我们对这些思想实验的结果再多做些探讨。从你的参考框架看，在每一个瞬间，两扇窗户要么全是好的，要么全碎了。然而，在我看来，有一个瞬间，后窗碎了，前窗没碎。这太让人困惑了。两扇窗户在你看来都碎了，在我看来却还有一扇没碎，这怎么可能呢？就好像我们生活在不同的宇宙中一样。

对这一难题的一种解答是时间的空间化，即块体宇宙。如果我们假设，所有曾经或将要发生的事件，都永久地位于块体宇宙中的某个点（一如永恒论的主张），那么，同时性的相对性看起来也就没那么叫人费解了，这就像空间中的两种物体，取决于你所在的位置，它们看起来有可能处于同一直线，也有可能并非如此。如果你站在高速公路的一侧，同侧的两根电线杆看起来在一条直线上，但如果你站在公路中间，它们就不在一条直线上了——这是个透视问题。同样，两扇窗可以看起来是同时破裂的，因为从你在时空中的视角来看，它们“处于同一直线”，而从我的视角看，它们不“处于同一直线”。这就是为什么狭义相对论为永恒论提供了最具说服力的一种论据。¹¹

有趣的是，爱因斯坦最初发表狭义相对论论文时，并未提出应该把时间想象成块体宇宙的第四维。是爱因斯坦在苏黎世的教授，赫尔曼·闵可夫斯基（据说他认为，爱因斯坦在学生时代是条“懒狗”）最早理解了狭义相对论对时空关系给出的激进暗示。1908年，根据前学生的研究工作，闵可夫斯基大胆宣布：“从此以后，空间本身、时间本身，都注定要退居阴影之下，只有两者的结合，才能维持独立的现实。”

闵可夫斯基把时间和空间融合成了时空。他为爱因斯坦的狭义相对论设计了几何重构：在标准的空间三维度之外，加上了一个时间维度。闵可夫斯基的见解是：虽然空间和时间是相对的，但空间和时间的融合是绝对的。如果你在宇宙飞船上展开了一场曲曲折折的航行，而我在地球上从远处观察你，那么等你回来的时候，对你到底走了多长时间、走了多远距离，我们的时钟是不一致的，但对你在时空里行进了多少“距离”，我们的认识是一致的。我们可以把闵可夫斯基的四维宇宙进行简化，用图表的横轴代表简化后

的单个空间维度，时间维度用纵轴表示。保持静止由沿着纵轴的运动构成——时间在流逝，而我在空间中的位置不变。与此同时，你的宇宙飞船航行则以对角线运动为代表。基于两轴的位置变化，可以计算出时空中的行进距离——一个所有观察者都认同的值。这一距离与所谓的“本征时间”（proper time）有关：你的飞船中时钟所测量的时间。

狭义相对论之所以叫狭义相对论，是因为它适用于忽视了引力影响的简化宇宙。在发表了狭义相对论之后，爱因斯坦用了10年时间，提出了一条更具普遍性的理论。这就是他的杰作——广义相对论，他在其中确立了引力和加速度之间的等效关系。牛顿的万有引力定律描述了引力与质量和距离之间的关系，但他对引力究竟是什么几乎没有提出什么见解。广义相对论给出了一个惊人的答案：引力本身并不是一种力，而是时空的扭曲。闵可夫斯基将空间和时间联姻为时空的做法，在广义相对论中得到了进一步的确立。有人认为，相较于狭义相对论，广义相对论为永恒论提供了更有利的支撑论点，因为广义相对论方程的一些解，给出了时间旅行的可能性——也就是说，从特定假设和初始条件开始，这些方程允许时间之间的前后跳跃。对广义相对论的详细讨论超出了本书的范围——自然也超出了本书作者的专业知识。然而幸运的是，狭义相对论抓住了有利于永恒论和块体宇宙的关键论点，足以满足我们这里探讨的目的。

过去、现在和未来同样真实的观念，嘲弄了我们对现实的感知，故此，如果物理学家和哲学家支持永恒论而非现在论，他们就必须拿出非常令人信服的理由才行。我们现在看到了这些理由中的3个：

1. 物理定律没有提供证据证明“现在”比“这里”更特殊，暗示时间上的所有时刻，都跟空间上的所有位置同样真实。

2. 狭义相对论确定：两桩遥远的事件，在一个观察者眼里同时体验到，在另一个观察者的参考框架内并不同时发生，故此，时间上的所有时刻，在块体宇宙中都是恒久陈列的。¹²

3. 广义相对论方程的一些解暗示时间旅行是有可能的，故此，我们生活在一个永恒论的宇宙中，在某种意义上说，过去和未来已经“存在”了。

不过，尽管这些具有说服力的证据支持永恒论，我们还是必须承认：物理定律无法解释人类有史以来最强烈、最明确的一种观察：“现在”就是很特殊，时间就是在流动。

我们能调和关于时间的物理学和神经科学吗

如本章的题词所暗示，爱因斯坦是一位永恒论者，¹³但他似乎也对“现在”的明显特殊性感到困扰。哲学家鲁道夫·卡尔纳普（Rudolf Carnap）回忆与爱因斯坦进行的一场讨论，对此做了详尽的说明：

有一次，爱因斯坦说起，他为“现在”的问题感到发愁。他解释说，“现在”的体验对人意味着某种特别的事情，某种与过去和将来有着本质不同的事情，但这种重要差异，在物理学中体现不出来，也不可能体现出来。在他看来，科学无法理解这种体验，是一个令人痛苦而又不得不承认的问题。我评论说，客观上发生的一切都可以用科学来描述；一方面，事件的时间顺序在物理学中得到了描述；另一方面，人的时间体验的特点，包括他对待过去、现在和将来的不同态度，可以用心理学来描述和（从原则上）解释。¹⁴

一如卡尔纳普所说，许多物理学家和哲学家都相信，要想把“我们生活在一个时间不会流动的宇宙”的观念与“时间明明就会流动”的事实调和起来，唯一的办法是把我们的时间流逝感归结为一种心智的把戏。

在实践中，物理学家通常可以忽略关于时间的物理学与神经科学之间的分歧。狭义和广义相对论的方程式好到近乎离谱地解释了实验数据——不管运用方程的人持有的是永恒论还是现在论。然而，这种“块体宇宙/时间流逝”悖论，意义非常深刻。数学物理学家罗杰·彭罗斯（Roger Penrose）说：

在我看来，我们对时间流逝的意识感受，以及我们用来断言物理世界现实的（无比准确的）理论之间存在严重的分歧。这些分歧一定在告诉我们某种构成人类意识感知基础的深刻物理知识……¹⁵

物理学家兼作家保罗·戴维斯（Paul Davies）也写过类似的话：

时间在流动、在行进这一无法抵挡的印象（或许是通过精神“后门”产生的）是个极为深刻的谜。它与大脑中的量子过程有关吗？它是否反映了一

种在物质世界中存在却被我们忽视了的客观时间量？或者说，时间的流动完全是一种心理建构——是一种错觉或混淆？¹⁶

像时间流动性这样不言而喻的事情，怎么可能是大脑施展的错觉呢？这个问题有一种答案这样说：我们可以把块体宇宙想成是一系列的静态帧，就像一卷胶卷那样。尽管电影里包含许多不同的帧（每一帧都代表时间里的一个时刻），可以说所有帧都在胶卷里共存。就像家庭电影的帧一样，你出现在块体宇宙的许多帧里。在每一帧，你的意识里都有此前一帧的记忆。有人假设，在一个时刻整合性地存取时间上的多个时刻，带来了我们主观上的时间流逝感。独立物理学家朱利安·巴伯通过观察一种翠鸟（它们是捕鱼的高手）的动作，对此作了解释：

当我们认为自己在某个瞬间看到了运动，潜在的现实是，在那一个瞬间，我们的大脑里包含了运动物体出现在若干不同位置的对应数据。在任何一个瞬间，大脑都一次性地包含着若干“快照”。大脑，通过它将数据呈现给意识的方式，为我“播放起了电影”……按照神经元模式的编码，我看到翠鸟的6或7张快照，使得我认为自己看见了翠鸟正在飞行。这种大脑结构，以及它对若干快照的同时编码，仅属于一个……¹⁷

如第1章所述，巴伯和其他一些物理学家，接受的是时间空间化的一种极端版本。他将永恒论的块体宇宙沿着时间轴切割，又将切片分散在无时间性的宇宙里（他称之为“柏拉图天堂”）。巴伯认为，所有可能的时刻（也就是，构成时间中所有时刻的物质的一切不同配置），都以静态的“现在”形式而存在。

在更为标准的永恒论观点语境中，物理学家布莱恩·葛林（Brian Greene）提出了一个类似的想法，以求解释为什么我们尽管置身块状宇宙的切片中仍能感知到时间的流动：

时空中的每个时刻（每一时间切片）都像是胶卷里的一幅静态帧……对置身此类时刻的你来说，这就是现在，就是你在那一时刻体验到的时刻。而且，它将永远如此。此外，在每一单独的切片中，你的思想和记忆都足够丰富，从而产生了时间是连续流动到那个时刻的感觉。这种感觉，这种时间在流动的感知，不需要先前的时刻（之前的帧）“按顺序播放。”¹⁸

毫无疑问，每个时刻，大脑都拥有前面时刻的记忆。我们在第6章中看到过，大脑是一个动态系统，能在此前事件的背景下对当前事件进行编码——若非如此，它就不可能理解言语，因为每个词语都必须放到之前词语的语境下去阐释（我们在第12章会看到，有时候，还要放到之后词语的语境下）。然而，就算大脑可以从当前帧访问前面的帧，我仍然认为，“时间流动是错觉”的概念太叫人难以置信了。实际上，对块体宇宙/时间流动悖论来说，这种“一个时刻里的多个时刻”式解答是否与神经科学一致，还并不清楚。

块体宇宙与神经科学相容吗

大脑是一座错觉工厂，大多数神经科学家和心理学家或许都认同，我们主观上的时间流逝感是一种错觉。因此，将时间的流动视为心智的把戏没什么不合理的地方。然而问题在于，“错觉”（illusion）这个词在物理学和神经科学中意味着不同的东西。如果物理学家认为时间的流动是错觉，她是在暗示，这一错觉只存在于我们的意识，并非外部世界的特征。而当神经科学家指出，我们对时间流逝的主观感知是错觉时，她是在说，和所有的主观体验一样，它是一种心理建构，但它表征了一种外部世界确实存在的物理现象，尽管并不忠实。

大脑是进化的产物，而成功的进化其实就已对动物内隐的理解、驾驭物理定律（至少是部分物理定律）的能力做了相当严格的测试。例如，要是翠鸟的神经系统不能运用牛顿定律，就不可能飞行：它除了要应用空气动力学原理来控制飞行和俯冲的速度，还必须推断未来，让自己的位置与水中游鱼的预计位置相一致。此外，视觉可能无法传达鱼的真实位置，因为水和空气之间会发生光折射。有些动物会对这一光学效应做一些补偿。¹⁹

这里的要点是，神经系统与物理定律是高度匹配的。它不仅适用于运动控制（比如体操运动员完成空中转体两周半），也适用于我们的主观心理体验。我们对颜色、音乐和气味的感知，就是主观心理建构的例子：即所谓的“感受性”（qualia）。它们确实是错觉，因为它们并不存在于外部世界，但它们是适应性的，因为它们中的每一种都与真实的物理现象相关：我们的色觉、乐感和嗅觉，分别对应着电磁波的长度、声波的特定模式以及分子的化学结构。然而，470纳米的电磁辐射并没有“蓝色”的固有特性，硫分子也并没有固有的腐烂气味——事实上，对同一种气味，不同的动物和人，可能会产生不同的感受：厌恶、中性甚至吸引力。

为了理解我们主观体验的潜在适应性价值，让我们回到大脑赋予意识的错觉中我们最熟悉的一种：身体知觉（body awareness）。我们在第4章讨论过，如果有人要用锤子砸你的手指，你会沉浸在疼痛中；令人惊讶的是，尽管疼痛是大脑内部产生的，但疼痛的感知，并不发生在大脑内部。不知怎么回事，它被投射到外部世界，也就是那块肉（而那块肉又恰好是你的手）的

位置。大脑孜孜不倦地产生错觉，让人以为拥有构成自己肢体的骨骼、肌肉和神经，有时候，哪怕是肢体已经被截断，它仍会持续生成错觉。故此，从疼痛是一种心理建构的意义上说，疼痛是错觉。然而，当你感受到投射在你手指的疼痛时，没人会说锤子是一种错觉，也没人会说它压根就没砸中你的手指。因此，身体知觉的错觉不是无端产生的；外部事件（锤子砸中了你的手指）和内部主观体验（疼痛）有着极强的相关性。要想保护好我们最重要的所有物，还有什么比赋予大脑疼痛感受能力更好的方法吗——身体知觉是意识与身体的终极整合，是能制造出来的最为精妙的计算机和外围设备之间的交互界面。

现在，我们对错觉这个词的不同含义，以及主观体验与物理现象之间的潜在联系有了一些认识，让我们来考察两种反对永恒论概念（即时间是心理建构而非真实存在的物理现象）的论点。

进化

如果我们生活在时间确然流动的现在论宇宙，我们可以想象出无数的原因，说明人为何能适应性地主观感受到时间的流动。我们对颜色或疼痛的意识感知是适应性的，因为它们与外部世界的重要事件相关，出于类似的原因，我们的时间流逝感是适应性的，兴许也是因为与外部世界事件的展开有关系。我们对时间流逝的主观感知，不仅使我们可以体验到翠鸟的俯冲，还让我们能够预测、回放和排练所有随时间推进的外部事件。也许，时间流逝的感觉，对我们将自己投射到遥远未来并在精神上进行时间旅行的能力十分关键（第11章）。但反过来说，如果我们生活在永恒论的宇宙，时间的流动并不是真的，我们产生时间的流逝感怎么会具备进化优势呢？当然，并非每一种生物学特性都必须提供进化上的益处，但事实上，大多数生物学特性都是如此，尤其是那些与时间流逝感同样显著和普遍的特性。从“错觉”这个词最深层的意义出发，说我们的主观时间感是精神错觉，似乎是在暗示这种错觉来得无缘无故。但实际上，时间的流逝感让大脑能够更好地完成预测未来这一重要任务，它是一种强有力的适应性。

意识与神经动力学

针对块体宇宙/时间流动悖论，“一个时刻里的多个时刻”式解答隐含了一种假设：在一帧（一个时刻）内讨论意识是合理的。虽然我们不了解大脑怎样产生意识，但毫无疑问，一些神经特性是与意识状态紧密相连的。例如，当大脑在意识（清醒）和无意识（慢波睡眠和麻醉）之间转换时，大脑产生的最明显变化是它活动的时间模式，尤其是大脑振荡的频率，它是神经活动同步性和计时的全局性指标。睡眠的特点是缓慢振荡，而清醒则与异步神经活动和快速振荡有关。²⁰总的来说，我们对意识神经科学的认识并不多，但这些许的认识已经告诉我们，这是一个高度动态的过程，在单帧的语境下讨论意识，或许有点像是在电影的一帧画面里判断一只猫是死还是活。这只猫在呼吸吗？心脏跳动吗？它每个细胞里的分子积极参与进化对热力学第二定律的解药——新陈代谢了吗？生命是由持续的代谢变化来定义的；如果没有新陈代谢，就不能说动物是活着的。为了判断动物是否还活着，我们不仅需要看电影里的一帧画面，还要看前一帧和后一帧。然而，生命并不代表反对永恒论的论点，因为在判断动物的死活时，我们不必把自己局限在单独的一帧画面里（我们可以多等等，多看几帧画面再做判断）。²¹有一种相关的论点涉及芝诺悖论：如果我们看到的是无限小的时间切片，能说一支箭是在飞行吗？从某种意义上说，答案是肯定的，因为我们可以定义物体的瞬时速度。但与箭不同的是，在这些瞬时帧中，有意识的生物必然知晓自己的“运动”。所以问题变成了：块体宇宙的一帧切片就能维持意识现象吗？还是说，意识需要一定的时间厚度？也就是说，意识是不是只能存在于若干时间切片当中，更类似音乐，而不是动态电影帧里的静态图像？史蒂芬·平克似乎暗示了在静态帧内理解意识的难度。他说：“物质在空间中延伸，但意识必定在时间中存在，一如它从‘我想’前进到了‘我是’。”²²

我们将看到，对在我们身边展开的事件，意识既不提供连续叙述，也不提供线性叙述。相反，它似乎是时断时续生成的，对外部事件的意识知觉，需要数百毫秒才能确立。因此，目前尚不清楚谈论瞬时意识是否有意义，以及意识现象是否与针对块体宇宙/时间流动悖论的“一个时刻里的多个时刻”式解答相容。



物理定律并没有明确地声称我们生活在四维块体宇宙中。块体宇宙诚然提供了最为符合狭义和广义相对论的阐释，但必须承认，就算在物理学界，对时间的本质也并未达成普遍一致。学者们不断尝试在各种物理学中对时间性质创造出一套连贯的阐释。时间在广义相对论和量子力学中的角色，有着根本性的区别，这就是为什么时间代表了一种寻求量子引力理论（即尝试将广义相对论和量子力学统一起来）的绊脚石。而且，没有实验证据能证明过去、现在和未来都是同等真实的。实际上，就连能明确区分永恒论和现在论的明确实验性预测都寥寥无几。最明显的检验是时间旅行：毕竟，任何关于时间旅行的讨论都有着隐含的假设——我们生活在块体宇宙中。²³狭义和广义相对论的方程式允许时间旅行，但只有在非常奇特（哪怕还算不上完全不可能）的条件下。例如，在狭义相对论下，时间旅行需要快过光速的通信；²⁴在广义相对论下，需要靠负能量稳定的虫洞。因此，就目前而言，就算物理定律似乎与永恒论最为相符，我们也没有直接的实验证据来支持永恒论，更别说证明了。

所以，问题变成了这样：是物理定律（或我们对这些定律的阐释）需要调整，以解释我们对时间流逝的意识体验，还是神经科学需要找到方法，把我们对时间流逝的主观体验解释清楚？葛林极富表现力地捕捉到了这一困境：

时间的基本特质，人脑领会它就像肺部吸入空气那么容易，科学是否无法理解它呢？还是说，人脑给时间添加了一重特质，这种特质是人为的，故此无法在物理定理中表现出来？如果你在我的工作时间问我这个问题，我会支持后一种观点，但到了夜幕降临，批判性思维遁入了普通的生活习惯，我也很难完全抵挡前一种观点。²⁵

时间的流动到底是意识创造出来的虚构，还是一种如今尚未被物理定律捕获的东西？这个独特的复杂问题，位于物理学和神经科学的交界处。如果说光是这个谜还不具备足够的挑战性，不妨再想想它蕴含的另一重深意：物理定律和人类大脑并非完全彼此独立。不光人类大脑的内部运作必须遵守物理定律，而且，我们对物理定律的阐释，是经过人类大脑的结构所过滤的。如果说，对时间流动这样看起来不言自明的东西，大脑所做的阐释都不见得

叫人信得过，那么是不是也该怀疑，大脑对当前物理定律的阐释真的不偏不倚吗？我们马上要看到，人类在进化中获得理解时间概念的能力，似乎是借助了专门用来理解空间的大脑回路——换句话说，大脑本身似乎就在将时间空间化。这就带来了一个让人心醉神迷的问题：我们会不会因为大脑表征、思考时间的方式，倾向于对当前物理定律做特定的阐释？

10:00 神经科学中的时间空间化

爱因斯坦理论的一个方面确实在时间心理学中有呼应，至少从语言表达上是这样：时间与空间的深层等价。

——史蒂芬·平克

1928年，阿尔伯特·爱因斯坦参加了在达沃斯举行的一场跨学科会议。一位与会者是瑞士著名心理学家让·皮亚杰（Jean Piaget），他通过研究儿童怎样学习对数量、空间和时间等抽象概念进行推理，彻底改变了发展心理学领域。皮亚杰提出，儿童在理解数字、空间和时间的过程中经历了思维定势的阶段性发展，据说爱因斯坦在引述皮亚杰的理论时称它“这么浅显，只有天才才能想得到。”¹

皮亚杰在《儿童的时间概念》（The Child's Conception of Time）一书中写道：“这本书的创作灵感，来自15年前爱因斯坦在达沃斯主持第一期哲学和心理学国际讲座时友好提出的一些问题。”一个问题是：“我们对时间的直觉理解，是原生的，还是衍生的？”换句话说，我们对时间的概念是天生的，还是后天习得的？很明显，爱因斯坦不仅花时间思考过时间的本质，还思考过我们怎样思考时间——这个问题与其他任何问题同样深刻。

儿童和时间

20世纪最初的一二十年，爱因斯坦的狭义相对论风行一时，影响了包括皮亚杰在内的各个领域科学家的思考。就时间对速度的依赖性而言，皮亚杰想知道心理学和物理学之间是否存在一种平行关系：“我想要捍卫的假说是，心理时间取决于速度或有速度的运动”²（指物体或孩子自身移动的速度）。

为了窥见孩子的意识里怎样表征时间，皮亚杰要孩子们完成一些简单的任务。其中一项任务是，两只玩具蜗牛沿平行线移动几秒钟。例如，一只蓝蜗牛一只黄蜗牛从同一位置、同一时刻开始，并在同一时刻停下，但蓝蜗牛走得远些，因为它的移动速度更快。5~6岁的儿童错误地报告说，走得远的蜗牛是后停下来的。³

皮亚杰和他之后的许多其他研究表明，只有当儿童理解了空间和速度概念后，才能逐渐理解时间——或至少，正确地回答有关事件持续时间的问题。例如，询问孩子玩具火车以不同的持续时间、不同的速度行进不同距离的问题时，较之有关持续时间的问题，5~9岁的孩子在回答有关距离的问题时更有可能做出正确回答。即便是年龄较大的孩子，也经常搞错物体移动的时间量。在一项研究中，42%的11~12岁儿童错误地认为，玩具火车在较短时间内行进了更长距离，是因为火车行进了更长的时间量。⁴

儿童到发育的稍晚些阶段才能理解时间概念，原因之一可能是我们测量和量化时间的方式异乎寻常地复杂。时间单位用一连串复杂而武断的等级来表示：一个月介乎于28~31天；一天是24小时；一小时是60分钟；一分钟是60秒（时间的尺度均非10进制）。此外，相同的时间可以用不同的方式来表示：8点45分和9点差一刻是一个意思。然而，8点45分既可以指上午，也可以指晚上。如果还嫌这不够乱，我们判断时间时用的竟然是模算数^[1]：8:45过30分钟之后，不是8:75。

由于时间的语言，以及我们用来表达时间的习惯，似乎是某个邪恶组织专为搞乱年轻人的脑子而设计出来的，不足为奇，孩子们很难掌握与时间有关的概念。然而有趣的是，孩子们理解速度问题先于时间问题，因为我们一

般会根据看似更为基本的空间和时间概念来定义速度。受狭义相对论的启发，皮亚杰好像认为，速度的心理地位高于时间。他有些晦涩地说：“故此，相对论时间观只是将一个适用于构建物理和心理时间最低层次的原则，简单地扩展到了极快的速度（尤其是光速）上。而如我们所见，这一原则，处在小孩子时间概念最根源的位置。”⁵基于这一点，他认为，孩子能直觉地理解相对论时间观，而且这一理解依赖于速度。

[1] modular math，这是一种整数的算术系统，其中数字超过一定值后，会“卷回”到较小的数值。——译者注

空间、时间和语言

在第1章，我提出非人类动物有着一种较之时间更为基础的空间“认识”。把食物放到嘴里，或是看树的背后有没有藏起来的猎物，这些简单行为都需要某种内部空间表征——这种表征，比应对无法导航、单一维度的时间域所需要的更为复杂。老鼠出了名地能学习跑复杂的迷宫。蜜蜂不仅可以在蜂巢和花朵之间可靠地进行导航，甚至还能把特定花朵区域的位置沟通给其他蜜蜂。动物还能够用比提取时间信息更为直接的方式，从感官中提取距离等空间线索。例如，视网膜上一条蛇的形象大小，传达了关于这条蛇是远还是近的信息，从而可以借此迅速做出决定，采取恰当的行动。动物的神经系统先发展出了复杂的方式来表征空间坐标，如上下左右，此后才发展出了明确表征过去、现在、未来这一时间连续体的能力。

有理论指出，我们理解时间概念的能力，是在为导航、表征、理解空间而进化出的神经回路上增补而来的。⁶上述推理思路，也与此理论一致。认知心理学家拉斐尔·努涅斯（Rafael Nunez）写道：“过去40年来，学者们已经会聚到这一观念，即人类主要用空间来概念化时间——因为空间是个更容易应对的领域。”⁷

人们经常引用来支持这个理论的一个证据是：我们常用空间词汇来谈论时间。语言学家乔治·莱考夫（George Lakoff）和哲学家马克·约翰逊（Mark Johnson）就主张：“时间体验是一种我们完全从比喻角度来理解（通过将时间空间化，以及时间是一种运动物体等比喻）的自然体验。”⁸实际上，不依靠空间形容词和副词，是很难讨论时间的：这是多么叫人耳目一新的广告“短”片；“长”期以来，我们都在研究时间。同样，我们也借用空间术语来谈论过去和未来：我期待（looking FORWARD to）你的回复；按“后”见之明（HINDSIGHT）来看，这是个糟糕的想法；圣诞节跟元旦离得很“近”。

在英语里，我们将时间进行空间化的时候，会把过去放在后面，未来放在前面。但尽管所有的语言都使用空间比喻时间，却并不总采用相同的方式。在玻利维亚西部和智利北部高原上使用的艾马拉语（Aymara），用来指

代过去的词是“nayra”，它还指眼睛或视力，而指代未来的词“qhipa”还有背或背后的意思，这暗示艾玛拉人在运用空间将时间概念化的时候，有着完全不同的视角。拉斐尔·努涅斯通过研究他们说话时的姿势，确认了艾玛拉人时空视角的独特性。土著艾玛拉人说话的视频表明，他们在说“旧时光”的时候大多朝前指，谈及未来时则指向背后。⁹这种颠倒的视角，或许并不像乍看起来那么奇怪。毕竟，一如我们知道过去发生了些什么，我们知道什么东西坐落在我们前面，因为我们能看到它；未来，以及我们身后的东西，则是未知的。

星期三

就算我们生活在凝滞的时空块体里，时间不流动，主观时间似乎也肯定是流动的。语言再次通过从空间领域借用词汇来反映了这一事实。时间在“流逝”，世界末日即将“来临”，一天“飞逝”而过。“流逝”、“来临”或“飞逝”的是什么人或什么东西呢？是我在时间里穿梭，还是我静止不动，时间之河流淌过我？从语言上讲，答案是两者兼而有之。

也许，你曾碰到过这样的窘境：别人告诉你，下星期三的会议朝前推两天。那么，你是星期一还是星期五去开会？“朝前”通常会用在运动方向上。因此，如果你是顺着一条静态的时间轴运动，时间轴朝前移动的话，那么，目标日期会变得更远，也就是变到星期五。但如果你站着不动，我们会把时间本身视为朝着你流动，故此，会议往前推就会让它变得离你更近，也就是星期一。第一种阐释（星期五）叫作自我运动视角，第二种阐释（星期一）叫作时间运动视角（见图10-1）。

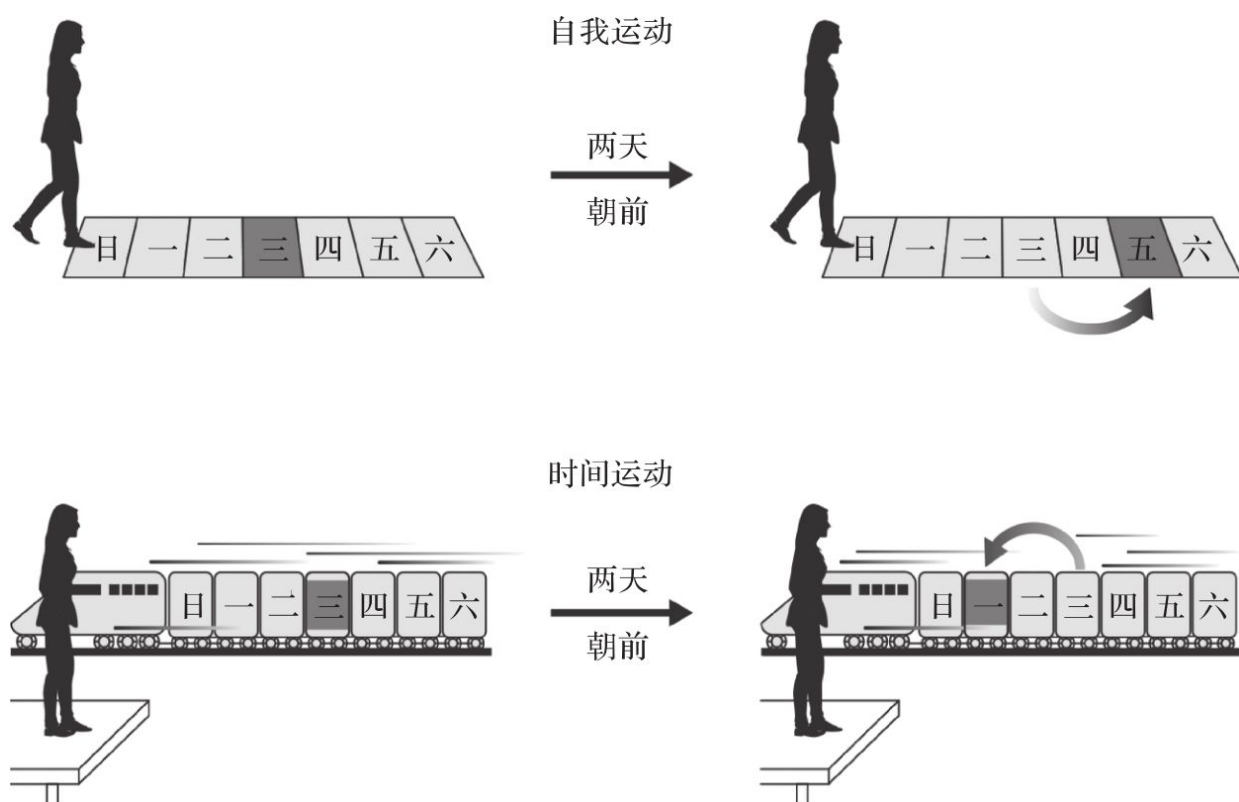


图10-1 自我运动与时间运动视角

这种模糊性，在语言学上就相当于伽利略相对性：运动必须相对于某事物来定义。如我们所见，“你和狮子之间的速度是每小时10公里”的说法，并未确定是谁在运动；实际上，在真空中，试图确定是谁朝着谁运动也没有真正的意义：一切都是相对的。然而在实践中，知道是你还是狮子在主动运动非常有用；故此我们可以说，狮子正以10公里每小时的速度朝你跑来，让上面的说法变得更清楚。这里隐含了一个条件，那就是此处的速度是相较于我们的标准参照系——地面——来说的。可是涉及时间运动的说法并没有标准参照系。研究表明，如果你问人们星期三的会议往前推两天，人们的意见大致是五五开：约有一半的人认为会议在星期一开，其余的一半认为在星期五开。有趣的是，这些观点也并非一成不变。原来，答案取决于人们最近的身体运动。例如，你问在机场接人的人上述星期三问题，51%的人回答是在星期五开会；可刚下飞机的人却有76%认为是在星期五开会。研究人员对此现象给出的阐释是，旅行者处在自我运动的意识状态下，因为他们才刚完成了一场可观的空间运动。还有一些研究表明，实际上，身体运动并非必要条件；只要简单地引导人们思考空间运动，就能影响选择星期一还是星期五的比例。¹⁰

从语言上看，空间与时间的关系是不对称的。人们经常用空间比喻谈论时间，但却很少用时间比喻来描述空间（尽管偶尔我们会使用时间单位来描述空间距离：我离这里10分钟）。这种不对称性提供了证据，说明我们对时间概念化的能力，就建立在我们对空间的理解上。然而，只有语言学证据并不能彻底证明这样的结论。有可能，我们借用空间词汇来谈论时间，是出于一个更为泛化的原因：空间是比喻的普遍源头，因为它是一个更自然、更丰富的领域。实际上，我们使用空间比喻来描述几乎所有的东西¹¹：自从他跟兄弟“疏远”以来，我们变得非常“亲密”。猫有很“高”的标准。我不知道你今天感觉“昂扬”还是“低沉”。然而，事实证明，空间和时间之间的关系，远比语言层面还要深刻。空间会影响我们对时间的实际感知方式，无关比喻或语言。

卡帕

假设有两盏灯，彼此之间相隔一两米。每一盏灯都会短暂地明灭闪烁，闪烁间隔为8秒。这时，有人要你估计持续时间并按下按钮，来重现灯的明灭间隔。问题是：两盏灯之间的距离是否会影响你对时间的感知（更具体地说，你重现感知间隔的尝试）？提出这个问题的第一批研究之一表明，当两盏灯相隔2.4、4.8和9.6米（闪烁间隔始终为8秒），受试者的中位估计值分别是6.5、7.15和8.05秒。¹²所以答案是肯定的，空间（灯之间的距离）确实会影响我们对时间的感知。这种所谓的卡帕效应（kappa effect）已经通过多种形式得到了多次证明。例如，另有一项研究是这样：计算机屏幕上闪现3个点，一个点在左边，一个在中间，另一个在右边。点在时间上均匀展开：第一个点出现在时间 $t_1=0$ ，第二个点出现在 $t_2=0.5$ 秒，第三个点出现在 $t_3=1$ 秒。研究人员询问受试者第一间隔（ t_2-t_1 ）是否长于第二间隔（ t_3-t_2 ）。虽然此时两次间隔时间相同，但人们的反应受点与点之间距离的强烈影响：如果第一个点（左）和第二个点（中间）之间的距离大于第二个点（中间）和第三个点（右）之间的距离，则人们很可能认为前一时间间隔更长。¹³

卡帕效应确定，两件事之间的距离，深刻影响着人们对两件事之间相隔时间量的判断。我们大脑中空间和时间的这种关系，进一步得到了相反现象的支持。两次闪光间的距离始终相同，而增加两次闪光之间的时间延迟，会让人们逐渐提高对闪光之间距离的估计（这种错觉称为托效应（tau effect））。

虽然卡帕效应和托效应似乎暗示空间和时间的关系是对等的，但另一些实验表现出了两者的非对等性。认知心理学家莱拉·波罗迪特斯基（Lera Boroditsky）主持的研究表明，有时候距离对持续时间判断的影响，多过持续时间对距离判断的影响。波罗迪特斯基和她的同事丹尼尔·卡萨桑托

（Daniel Casasanto）请麻省理工学院的学生在电脑屏幕上观察长度逐渐增加的线段。线段在1~5秒的时间段内增加不同的长度。每观察一条线段，参与者就要重现线段出现的总时间量，或线段变化后的长度。结果再次表明，在相同的持续时间内，人们对持续时间的估计，受到线段增加长度的强烈影响。如果一条线段存在3秒，但变长了很多，人们就会正确地判断它的持续时

间是3秒，但要是它只变长了一点，则人们的持续时间估计值接近2.7秒。¹⁴相比之下，线段存在多长时间，对受试者的长度估计影响不大。波罗迪特斯基半开玩笑地说：“皮亚杰认为孩子在9岁之前无法可靠地区分事件的时间和空间成分。和认知科学界与他同时代的许多研究结果一样，我们的发现表明，在他所观察到的现象上，皮亚杰是正确的，但他弄错了孩子们厘清混淆的年龄：很明显，麻省理工学院的本科生也无法可靠地区分自己体验到的空间和时间成分。”

是时钟还是记忆

汽车仪表板上的里程表和时钟是分开的两种设备。不管你1小时里是行驶了100公里，还是堵在洛杉矶的车流中只前进了10公里，车里的钟都会告诉你60分钟过去了（当然，我们忽略了狭义相对论微不足道的影响）。与此形成鲜明对比的是，卡帕效应似乎表明，大脑中负责在秒尺度上计时的时钟，似乎受到大脑里程表（更具体地说，是负责估计距离的神经回路）的影响。但这倒也不一定是大脑里某台时钟在卡帕效应里加快了速度；如我们在前面章节中讨论的一样，时间错觉也可能是记忆扭曲造成的。

用于研究时间感知的实验范式，总是要求参与者判断特定的时间间隔，记住该间隔以与其他间隔做比较。因此，如果你在大脑中某种神经秒表来解决上述第一项任务（两盏灯在不同距离闪烁8秒），你可以用它来计时8秒，并暂时将这一数字存储在记忆中，接着再次使用秒表，重现存储在记忆里的持续时间。故此，卡帕效应的出现，可能不是因为距离改变了时钟速度本身，而可能是因为距离改变了感知到的持续时间的存储或记忆。

有人提出，大脑有一套多功能系统负责处理有关幅度的信息¹⁵：具体而言，顶叶皮层内有用于处理有关数量信息（不管这一数量是关于空间、时间还是数字）的回路。有可能，空间所带来的时间扭曲，是这些回路存储幅度信息方式相互作用的结果。例如，存储小的时间幅度和大的空间幅度，可能会让时间幅度出现上浮误差。我们可以将此视为一种均值回归效应——存储在记忆里的两种量，彼此具备一些相同的特征。与大脑内共享幅度系统的理论一致，时间判断不仅仅受距离的影响：刺激的亮度或大小，也会影响人对刺激持续了多长时间的感知。实际上，如前文所述，研究甚至表明，如果屏幕上一个数字（比方说1）或一个大数字（9）闪烁等量的时间，人们往往倾向于判断大数字持续时间更久。¹⁶

大脑里存在一个同时用于表征时间和空间幅度的脑区的另一些证据来自所谓“心理时间轴”（mental timeline）的概念：在心理上等同于顺着笛卡尔坐标系的一条维度（图表的时间轴）表征时间。我们这些有幸获得过正规教育的人，往往会顺着一条直线来将时间概念化，直线的左边有着较短的时

间间隔（代表过去），右边的间隔较大（代表未来）。这一心理时间轴及其与空间的关系，可以通过多种方式揭示，包括所谓的STEARC效应（这个名字简直像是密码，它是“Spatial-TEmporal Association of Response Codes”的缩写，即“空间-时间反应编码联合效应”）。假设你听到一个由多种持续时间不同的音调组成的序列，每一音调过后，你必须按下按钮，报告这一音调相较于某个参考持续时间是更长还是更短。结果，这一时间任务的成绩，居然取决于按钮的空间位置！如果受试者用左手食指报告短的持续时间，用右手食指报告长的持续时间，那么，与反过来的安排相比（即用右手食指报告“短”、左手食指报告“长”），他们的表现会更快也更好。换句话说，用左手比用右手报告短的持续时间更为自然——这就好像你的神经回路里有一条从左到右排列的心理时间轴。¹⁷更多有关心理时间轴的证据，仍然来自莱拉·波罗迪特斯基的实验室。右下顶叶皮层中风的人经常表现出半侧空间忽略：他们无法完全察觉到自己左侧的物体。例如，患有半侧空间忽略的患者可能不会吃自己盘子左边的食物，甚至不会打理自己的左脸。波罗迪特斯基及其同事提供的证据表明，半侧空间忽略的患者还难以顺着心理时间轴排列有关过去和未来的信息——这使得他们记忆事件时间背景的能力受到损害。¹⁸

还有证据表明，空间和时间在更基本的单个神经元层面上存在混合。¹⁹例如，如前所述，几十年来，神经科学家都在记录表征空间的神经元的活动；具体而言，当动物来到房间里特定位置的时候，海马体内的位置细胞会优先产生工作电位。最近的证据表明，海马体中的一小部分细胞可以编码大鼠在转轮上跑动的距离。举例来说，大鼠跑动5米之后，一个“距离”神经元就有可能启动，它近乎独立于跑步的时长（这也等于是在说，它独立于转轮的速度）。另一些细胞似乎编码了大鼠在转轮上跑动的时间，也许会在它跑动20秒之后启动，同样也与跑动的距离近乎无关。然而，绝大多数细胞的行为更加复杂：它们的启动模式由位置、跑动距离、流逝时间和速度的某种复杂算法所决定。

总的来说，我们还不了解海马体（或大脑里其他任何位置）中的神经元怎样测量、表征或是存储空间和时间幅度。然而，基于语言学、心理学和神经生理学证据，很明显，在我们的神经回路里，空间和时间的确交织在一起。

物理和神经科学中的相对性

在上面几章我们看到，空间与时间的关系，在物理学和神经科学里都存在有趣的类似之处。让我们回顾并扩展一下这些相似之处：

时间是相对的

爱因斯坦告诉我们，虽然光速是绝对的，但时间和空间是相对的：在高速运动之下，时钟会放慢。据说，爱因斯坦还提到过主观时间的相对性：“和漂亮姑娘在公园的长椅上坐一小时就像是一分钟，但在火炉子上坐一分钟就像是坐了一小时。”²⁰我们在第4章讨论过，人对流逝时间的主观感知是相对的，它取决于大量因素，包括背景情境、情绪状态、注意、刺激的特征（例如距离和速度），以及受试者是否处在精神活性化合物的影响之下。

空间和时间不是独立的

狭义相对论认为空间和时间之间存在一种互换关系：在空间中以极快的速度行进，会使时间放缓；而静止不动，是沿着时间轴行进的“最快”方式。从主观上讲，空间和时间也是相互依存的。例如，卡帕效应确认：如果在相同时间间隔下发生的两件事，彼此之间所隔的距离较远（反映出速度较快），那么，人们往往会判断它们之间的时间间隔也较长。²¹

同时性的相对性

狭义相对论带来的最让人震惊的一种后果是，在我视角下看起来同时发生的两件事，在相对于我运动的某人的视角下并不同时发生——也就是说，同时性也是相对而言的。虽然我们尚未讨论这个问题，但从主观的角度来看，同时性同样是相对的。例如，由于光速和音速有着数百万倍的差距，来自同一事件

的视觉和听觉信号，以不同的延迟到达我们的感觉器官。然而，在听交响乐的时候，即使你坐在便宜座位，你也会感到大镲敲击的画面和声音同时发生，哪怕声音的到来有接近100毫秒的延迟。我们将在第12章中看到，为了对周围世界里发生的事情进行方便的叙述，对我们认为应该是同时发生的事情，大脑自由地摆布我们的感知。

皮亚杰就是着迷于这种相似之处的人之一。他似乎相信，儿童固有的相对时间概念与爱因斯坦的相对论时间之间存在更深层的联系。²²但是，狭义相对论与我们对时间的感知之间存在的任何看似类似之处，也就不过是看似罢了。物理学中空间和时间的相互依赖揭示了宇宙的某种深刻内涵，但对人类的时间心理学，未曾揭示一星半点。距离能够影响我们的时间判断，这一事实并未揭示出空间和时间的真实物理本质，但它确实揭示了大脑构建的某种深刻内涵。²³而这究竟是什么呢？毫无疑问，这个问题有多种答案。其一是，从我们的第一次到最后一次呼吸，大脑记录了我们所见、所听和所体验的统计数据，并运用它所找到的模式来理解我们周遭的世界。让我们看看图10-2：

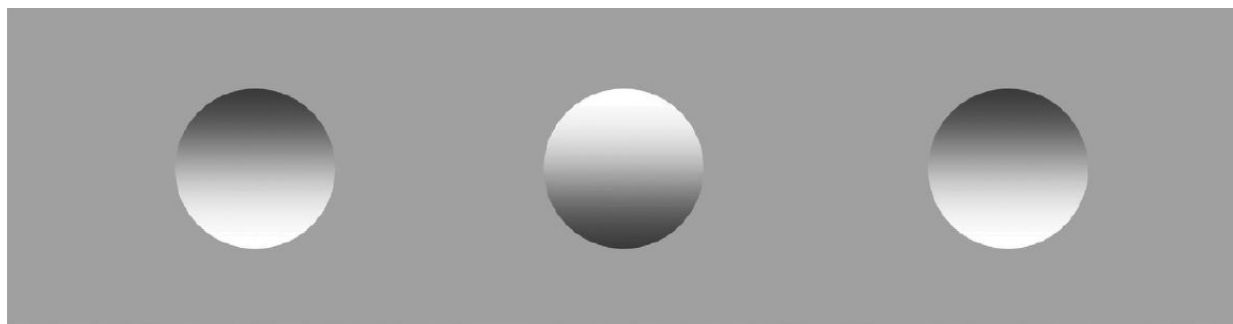


图10-2 凹凸错觉。我们看到中间的圆下半颜色较深，认为它是凸起的（即从页面上拱起），而上半颜色较深就像是凹进去的，这是因为，大脑假定光从上方照射下来。

这3个圆圈里，很可能中间的一个带来了凸起的错觉（就像是从页面中往上浮起来的），而左右两侧的圆圈给人一种凹下的印象（类似在页面中挖了个坑）——如果你把页面翻转过来，圆圈的凹凸也会变得不同，这下中间的圆圈显得像是凹下去的。人存在这种错觉是因为，打从你出生那一天起，你的视觉系统就在对世界的统计数据做采样：光线通常来自上方，所以墙壁上鼓起的部分会朝下投射阴影，而坑则顺着自己的上沿产生阴影。

一如你的大脑会利用先前有关光源的信息来推断三维形状，它也会运用过去的经验来推断时间和空间。对在空间和时间中运动（运动速度一般极为有限）的物体及动物，我们有一套庞大的观察数据库。通过它，我们知道距离和时间是相关的：孩子看着窗户上有雨滴滑落，流逝的时间越久，雨滴滑行的距离越长。大脑中的时钟远非完美，而在没有完美时钟的条件下，我们通过先前的经验来指导自己的判断。实际上，无关信息（例如两次闪光之间的距离）影响时间判断的程度相对较小，多多少少都落在与大脑时钟准确度相当的范围内。这一切意味着，如果你的大脑中有一部不太准确的秒表，你需要知道两列玩具火车行进了多长时间，那么，把每列火车行进的距离考虑在内是有意义的。²⁴

我猜，空间和时间在我们的神经回路里纠缠在一起，至少有两个原因。首先，与进化本身一样，大脑有一套非常机会主义的运作方式：它总是在挪用、再利用现有的功能。我们理解时间概念的能力，很可能部分是靠着与用来导航、概念化空间的神经回路相配合来实现的。其次，大脑是从外部世界模式中提炼信息的专家，由于空间和时间间隔强相关，大脑利用距离来优化对流逝时间的估计。



按照永恒论，时间是空间化的：时间中的所有时刻在块体宇宙里都是排列冻结的。这让我们得出结论：时间的流动是意识创造的错觉。但这种错觉有可能是反过来的吗？大脑的结构能否歪曲我们对物理定律的阐释？

物理学家李·斯莫林（Lee Smolin）认为，物理学中时间越发的空间化歪曲了时间本质的概念：“冻结时间的能力……对科学大有帮助，因为我们不必观察动作实时地展开……但是，除了这种用处之外，这项发明具有深刻的哲学后果，因为它支持了时间是幻觉的观点。冻结时间的方法运转得太好了，使大多数物理学家都不曾察觉，他们对自然的理解被这种方法摆了一道。”²⁵

现在，我们知道大脑本身在空间化时间，那么我们有必要问：如果负责选择永恒论和现在论的器官的结构，与永恒论互有共鸣，这是否促成了我们接受永恒论？²⁶换句话说，鉴于我们构建了理论和数学方法，把时间表示为类似空间的一重维度，我们会不会因为大脑概念化时间的方式，从而感觉接受永恒论

比接受现在论更容易？这个问题很难回答，但我们很快就会看到，人类的意识确实寄居在永恒论的宇宙里：从精神上说，过去和未来不光存在，而且它们还都是可以前往的旅行目的地。事实上，我们在过去、现在和未来之间来回跳跃的精神能力，也部分地定义了我们这一物种。

11:00 精神时间旅行

永生司空见惯；除了人类，所有生物都是永生的，因为它们对死亡一无所知。

——豪尔赫·路易斯·博尔赫斯（Jorge Luis Borges，阿根廷文学家）

2011年3月11日，一场9.0级地震引发大规模海啸，袭击了日本东北沿海。大约有15000人遇害，数十万人无家可归。在随后的清理行动中，出现了许多关于“海啸石”的报道：一些受灾地区出土了几百年前刻有铭文的大石头，铭文警告说“不可在此修建家园”。¹这些警告针对的是具体的地点或具体的城镇。在这些石头上刻下铭文的人，显然在想着遥远的未来，他们想象着，有一天，跟自己差不多的人正面临决定要在哪儿修建房子的困惑。这些刻下铭文的人走进了未来，并根据自己的悲惨遭遇给出了建议。

心理学家托马斯·萨德多夫（Thomas Suddendorf）和迈克尔·科巴利斯（Michael Corballis）把我们在精神上将自己投射到未来的能力，称为精神时间旅行。²如第2章所述，我们把石头制作成工具、撒下种子以确保将来的食物、修建小屋、为了薪水而工作、为了退休而储蓄的能力，都取决于我们设想不同未来、懂得现在采取行动可塑造未来的能力。再次借用安道尔·图威的话来说，展开精神时间旅行的能力，“带来了人与自然关系的根本转变。人类不光用自己的智慧去适应大自然的变幻莫测，包括食物供应、住处、躲避天敌的不确定性，还开始预见这些问题，采取步骤减少它们的不可预测性。”³

包括安道尔·图威、托马斯·萨德多夫在内的许多心理学家都认为，精神时间旅行是一种独特的人类认知能力，事实上，精神时间旅行是身为人类的一项关键因素。

重访与预访

我有一段童年回忆：在罗杰·威廉姆斯公园，我沿着湖边而走。那是在冬天，湖面的一部分已经结冰了。我愚蠢地踏上去想试试冰的硬度，结果冰裂了，我掉进了冷得刺骨的水里。



回忆和在精神上再次体验这一实践的能力，靠的是两种类型不同的记忆：语义记忆（Semantic memory）和情境记忆（Episodic memory）。这两种记忆之间的区别，有时表现为知道和记住之间的区别。语义记忆是指知识，例如公园的名称，公园位于普罗维登斯市，后者又位于罗得岛。语义记忆还包含一些更基本的事实知识，好让这个故事故符合情理：例如水会结成冰，冰水很刺骨。情境记忆是指在精神上重新体验这件事的能力，用我的意识之眼看到冰，唤起很冷的情绪内容，回想起湖水很浅，我相对容易地爬回了岸上。

语义和情境记忆之间有一个常遭忽视的区别之处：是否存在时间标记。你当然知道水会变成冰，但我敢担着风险打赌，你不知道自己是什么时候了解到这一重要信息的。你兴许知道尼泊尔的首都，但你知道自己是什么时候得知是加德满都的吗？我们的语义记忆存储有关世界的知识，但它不存储获取任何特定信息的日期，甚至不存储获取信息的顺序。你最先学到的是什么？腌黄瓜腌的是黄瓜，葡萄干是葡萄做的^[1]。相反，类似计算机上每一个文件都有关联的日期，情境记忆通常会有某种时间标记——不一定是确切的日期，而是近似的年份，你的大致年龄，或者这件事是发生在你生命中另一件难忘事件之前还是之后：如果你还记得自己的初吻和自己发生过的最尴尬事情，你大概知道哪一件发生在前（但愿这是两件不同的事）。

情境记忆和我们在精神上将自己在时间上往前映射的能力，十分依赖我们的语义记忆。如果没有沙滩、太阳、海洋和椰树林的实用知识，就很难在精神上时间旅行，想象计划中的热带海滩度假。语义记忆可以充当搭建情境记忆的基础设施，与这一概念相吻合，发展研究暗示，儿童的语义记忆会先于情境记忆产生。例如，教4岁的孩子新颜色的名字，比如黄绿色和灰褐色，

在拿起相应颜色的物品时，他们很快就学会将这一知识应用起来。但要是问他们是什么时候学到这些颜色名称的，孩子们常常说，自己一直就知道（实际上，他们是几分钟前才学会的）。⁴

患有所谓顺行性遗忘症的人，一般会丧失存储新的语义和情境记忆的能力——尽管他们仍然能够学习新的运动任务，如学习骑自行车，或其他类型的程序记忆或隐性记忆。以前存储的语义记忆（例如，他们的家庭成员或法国首都的名称）基本上是完整的，但部分患者回忆人生中先前发生事件（患上遗忘症之前发生的事情）的能力也很差。⁵

不足为奇，患有遗忘症的人，很难描述自己昨天所做的事情——这几乎正是遗忘症的定义。但遗忘症患者也难于提前计划或描述自己明天要做什么吗？这个问题的答案似乎是肯定的。过去20年的研究逐渐揭示，一些遗忘症患者既难以把自己投射到过去，也难以投射到未来。有一位姓名缩写是K. C. 的此类患者，因摩托车事故导致海马体大面积受损。他除了丧失大部分的情境记忆，在思考自己未来的能力上也明显不足。以下是K. C. 与安道尔·图威之间的对话摘录：

安道尔：让我们再来试试关于未来的那个问题。你明天要做什么？[暂停15秒]

K. C.：我不知道。

安道尔：你还记得这个问题吗？

K. C.：关于明天我要做什么？

安道尔：是的。当你试着思考它的时候，你怎样形容自己的心智状态？[暂停5秒]。

K. C.：我想，是空白吧。⁶

K. C. 当然理解过去、现在和未来的概念。他可以按照时间给事情排出顺序，他还知道自己的哥哥已经去世了。K. C. 的不足似乎仅局限于萨德多夫和科巴利斯眼里的精神时间旅行问题。在时间上前后精神旅行，部分地依赖于我们用来存储、重建有关过去的自传性信息的认知能力，这一观念，与上述（以及另一些）观察所得是相符合的。

[1] 原文是 “That pickles are cucumbers or that raisins are grapes”。在英文里，知道 “pickles” 却不知道它是 “cucumbers”，知道 “raisins” 却不知道它是 “grapes”，这太正常了。这一重意思在中文里不太明显，因为我们当然知道 “腌黄瓜” 是 “黄瓜” 腌制的，“葡萄干” 是 “葡萄” 做的。——译者注

动物的精神时间旅行

在精神上将自己投射到过去或未来的能力，是智人所独有的吗？我们已经看到，所有的动物都判断时间，并自然而然地预测外部事件：它们学会在食物到来之前听到铃声响就分泌唾液，还能在太阳升起前醒来以便出发寻找食物。我们还知道，有些动物似乎会有意识地为将来做准备：鸟筑巢，海狸修筑水坝以保护自己的小屋，松鼠储存坚果。但这些行为，有哪一种表明动物也能在某种意义上思考未来，或是掌握了时间的概念吗？

判断时间当然不等于思考未来。时钟判断时间，但并不理解时间。此外，修筑巢穴或存储食物的行为，并不意味着动物了解其行为的长期后果。没人会说，毛毛虫寻找理想场所固定住自己并变成蛹，它是在想着：“这是我破茧化蝶的理想地点。”动物大多数的长期规划例子，实际上好像是固有的天性。心理学家丹尼尔·吉尔伯特（Daniel Gilbert）说：“在我家院子里藏起一颗坚果的松鼠对未来的‘理解’，就和下落的石头对万有引力定律的‘理解’差不多。”⁷从来没经历过冬天的小松鼠，到了冬天仍然会存储坚果。动物做出各种各样的行为，但并不理解自己为什么要这么做，或是这些事情的长期重要性是什么。就连人类，在从事相当复杂的行为时，也很少想到9个月之后会发生些什么。

诚然，动物做的许多以未来为导向的行为是固有的天性。但这一事实，也并不意味着动物不能展开精神时间旅行。事实上，动物能不能进行精神时间旅行，是动物认知和进化心理学界一个存在激烈争议的问题。

能够精神时间旅行的主要候选动物之一是鸦科的鸟类（松鸦、乌鸦和渡鸦）。英国心理学家尼古拉·克莱顿（Nicola Clayton）领导了相当多的研究，旨在判断一种松鸦（丛鸦）能否参与指向未来的精神时间旅行。丛鸦会将少量食物存储在不同的地方，卓越的空间记忆使它们能够在将来找到存储的食物。如上所述，存储本身并不意味着精神时间旅行，但是克莱顿运用了许多巧妙的设计，从整体上表明丛鸦所做的远远不止是遵循食物储存本能。丛鸦会吃蠕虫（蛾的幼虫）和坚果，但它们更喜欢新鲜蠕虫。例如，如果让它们在新鲜蠕虫和坚果之间进行选择，它们会选择蠕虫，但要是让它们从坚果和腐烂了5天的蠕虫中做选择，它们会拒绝蠕虫，选择坚果。故此，问题变

成，如果让丛鸦存储新鲜蠕虫和坚果，但允许它们回到存储点的时间只有两种，要么4个小时之后返回，要么5天之后返回，那么它们会怎么选择呢——是选蠕虫，还是选坚果？在相隔4小时的情况下，丛鸦有更大可能去寻找存放蠕虫的位置，但如果只允许它们5天之后才回到存储点，它们会优先搜索存放坚果的地方（为确保鸟儿不是根据气味在检索，研究人员会在实验的检索阶段开始之前就取走存储的食物）。例如，在4小时组中，83%的首轮检索事件瞄准了蠕虫更多的位置，而5天组里这一数值是0%。这些鸟似乎意识到，隔了5天，蠕虫已经过期了。

在另一项实验中，克莱顿和同事利用了丛鸦进行的“犯罪活动”。看到另一只丛鸦存储食物的丛鸦，可能会稍后回来偷掉食物。作为反制措施，丛鸦也会重新存储食物：如果它们知道自己在存储食物的过程中被别的鸟看到了，说不定之后会来取出食物，重新藏到另一个地方。克莱顿和同事们发现，如果一只丛鸦知道自己正受到监视，那么，相较于私下里存储食物的情况，它们回来取出食物重新存储的概率会更大。这再次暗示了精神时间旅行，因为你可以说，这些丛鸦预见到有小偷会来偷自己的食物。这些和另一些相关实验，促使克莱顿认为，这些鸟类正在进行真正的前瞻性精神时间旅行。⁸

展开精神时间旅行的动物，丛鸦不是唯一重要的候选人。其他研究曾考察过类人猿（黑猩猩、倭黑猩猩、大猩猩和猩猩）是否也具备我们所谓的前瞻能力。回答这个问题的一种方法，本质上是判断类人猿能否掌握使用金钱的诀窍。有一项对此前学会用代币换取食物的类人猿的研究：它们了解到，训练师会接受某些有价值的代币（如彩色PVC管）来交换食物，而其他代币没有价值。在“前瞻”实验中，类人猿还了解到，获得一堆代币的30分钟后，它们将有机会用有价值的代币来换取食物。故此，实验人员想知道，类人猿在移送等候室之前，会抓取多少此类代币。与对照条件（即不能用代币换食物的情况）相比，受试的8只类人猿里有6只拿到了更多的有价值代币。猩猩的表现似乎比倭黑猩猩好，倭黑猩猩又比黑猩猩好。总体而言，至少有部分类人猿具备足够的前瞻能力，在动身前往市场之前抓住钱包（比我在某些日子里表现还好）。⁹

说这些结果确认了类人猿进行精神时间之旅，一些科学家并不信服。也许猿猴不过是盲目地学习一连串的动作，比老鼠学习按压杠杆获取食物更加复杂罢了。再说了，这些效应往往很弱。例如，通常而言，不是所有的鸟和类人猿在研究中都“洞悉了奥妙”。然而，这些研究提供了令人信服的数据，即一些动物可以灵活地调整其行为，满足未来的需求。但有关动物是否能够进行真正的精神时间旅行，这场争论无疑会持续下去，直到精神时间旅行出现了公认的定义或检验方法。

生活在当下

无论我们的动物近亲能不能进行精神时间旅行，毫无疑问，人类和类人猿在思考、规划未来方面有着鸿沟般的差距。灵长类动物学家珍·古道尔（Jane Goodall）表示：“黑猩猩可以学习手语，但在野外，据我们所知，它们无法就不在场的事物进行交流。除了在某些地点表现出恐惧，它们无法传授100年或10年前发生过的事情。它们肯定无法为此后的5年做计划。”¹⁰

人类不仅可以就过去的事件进行沟通，为将来制订计划，还可以在精神时间线上来回跳跃，表达复杂的时间关系。以这句话为例：上个月，一个传教士预测世界将在3个月里终结，所以，我要在下个月准备把所有的储蓄都花掉。没有语言带来的便利，没有执行简单形式运算的能力，怎么可能有哪种动物能理解在时间上如此复杂的想法呢？

语言、数字和精神时间旅行互相依赖的一些证据，来自对亚马孙一支狩猎-采集原住民部落（皮拉罕人）的研究。皮拉罕人的语言具有简单的过去和将来时态，但没有表达嵌入式时间关系的语法结构，如“下个月我所有的储蓄都已经花完了吧”（此处使用了将来完成时，指的是站在将来某个时间点的角度往过去看）。

从数字上看，皮拉罕人有一套“1-2-许多”式计数系统：两个以上的数量，统统简称为“很多”。他们可以区分物品数目的大小，比如5和10，但很难把两种不同物品的数量匹配起来。比如，给他们看4节7号电池，并要他们拿出与桌上电池数目一样的螺母，他们能相当准确地完成，但要是物品有10种，他们大多就无法完成这桩任务了。毫不奇怪，考虑到他们的“1-2-许多”数字系统，他们似乎对自己的年纪没有什么概念。¹¹

语言学家和前传教士丹尼尔·埃弗里特（Daniel Everett）相信，皮拉罕人以当下为基础：“皮拉罕人不存储食物，一次不会做一天以上的计划，不谈论遥远的未来或遥远的过去——他们似乎主要关注现在。”¹²起初，埃弗里特打算学习皮拉罕人的语言，把圣经翻译成皮拉罕语，让这些原住民皈依基督教。他流利地用起了他们的语言，但传教的愿望却失败了，因为皮拉罕人最终让他变成了无神论者。他认为，失败的部分原因在于，皮拉罕人对自

己没有直接体验（或至少拥有二手知识）的事情缺乏兴趣、持怀疑态度：一旦他们意识到埃弗里特从未真正见过耶稣，皮拉罕人就对耶稣的故事毫无兴趣了。同样，他们似乎并不为未来发愁，也不为自己死后会发生些什么感到烦忧。埃弗里特并不认为皮拉罕人有限的时间观念反映出任何遗传的神经缺陷，因为他们非常聪明，掌握着精湛娴熟的丛林生存技巧：“他们可以赤身裸体地走进丛林，不带工具，不带武器，3天后却带着满篮的水果、坚果和小猎物走出来。”¹³他认为，皮拉罕人以当下为基础的世界观，是其文化的标志。当然，他们的生存环境，以及大体上连续的食物供给，促成了这种“活一天算一天”式的生活状态。在因纽特原住民文化里，这种对未来的漠不关心态度就不利于生存了，因为要想在艰难的冬天里生存，必须做大量的预见和准备工作。

向未来发送消息

对未来付出多少思考和努力，在精神时间旅行中朝着未来走多远，不同的人和文化在这方面有着极大的差异。我们都认识某个似乎是过一天算一天的人（有点像皮拉罕人）。哪怕他们碰到了重大的经济和个人困境，看起来也是一副大体上心满意足的样子。与此形成对照的另一种人，每一个想法和行动，都是为了在遥远未来达成某个目标。¹⁴

还有一些有远见卓识的人构思着未来数十年、数百年的梦想。这种超越任何个体生命的时间旅行能力，说不定正是人类文化的基石。通过民间故事、洞穴壁画、石头和木片，最终通过莎草纸和书籍中的文字，智人与后代进行着单向对话。

2004年，印度洋海啸在14个不同国家的沿海居民区造成23万人死亡。泰国聚居着摩卡原住民（Moka，也叫“海上吉普赛人”）的一个岛屿遭到破坏，但伤亡极少。部落中的老人们知道关于海洋饿灵的故事。他们相信，（海啸之前）大海的退去是来自海洋饥民的警告，这种信念使得摩卡人在巨浪袭击海岸之前就跑上了高地。对他们来说，海啸的发生是因为“大浪太久没吃过人了，它想要再次尝尝他们的味道。”¹⁵过去海啸幸存者讲述的故事，必然流传了几个世纪并存储了下来，而且，它不是按语义记忆下的无聊事实存储的（“当海洋退去，快朝着高地跑”），而是表现为被大海吃掉这一栩栩如生、情节引人入胜的故事，故此非常适合牢牢地存储在摩卡人的情境记忆库里。

归根结底，存储在我们神经回路里的语义和情境记忆，是生存的秘诀。但任何一个特定的人的记忆，容量和准确度都有限，而且最后也会彻底删除。精神时间旅行让我们看到自己的后代有可能得益于此种记忆，并创建外部存储机制，用于在从未面对面见过的人之间传递知识。没有这种指向未来的行为和跨代记忆，现代文化、技术和科学就都不会存在。

时间短视

人类是地球上唯一可以思考和规划遥远未来的生物。只有我们能种下要花上数十年时间才结果的种子，或是修建能经历百年的建筑。然而，现代人（和其他物种）面临的最为严重的问题中，许多恰恰是短视造成的结果。

从个人层面上看，无数的财务和健康问题，都与人的时间短视有关。信用卡债务和退休后收入不足等财务困难，通常是短视行为的结果：要么是花了自己还没挣到的钱，要么是没有存下明知道有一天需要用的钱。¹⁶此外，我们经常屈服于不健康饮食习惯带来的短期满足，或是不愿意经常锻炼，牺牲自己的长期健康。从社会层面上看，引发经济动荡的原因，往往与导致个人陷入财务困境的原因相同，都是同一种缺陷带来的后果。与个人一样，政府往往不能延迟满足或付出短期牺牲，有时选择进一步投入债务而不是增加税收或削减成本。于是，无法维持的债务导致经济崩溃，造成深远的长期后果，包括失业和养老金计划崩溃。就算经济并未崩溃，养老基金也长期资金不足。原因很多，但归根结底，都应了马克·吐温的那句名言：“能拖到后天才做的事，绝不提前到明天做。”¹⁷

我们在社会层面上的时间短视，显著症候之一大概要算对待气候变化的态度。就算我们看到人类行为对地球健康产生的长期后果，也难于采取行动。尽管有能力预见未来，但我们通常很难考虑比自己这一辈子还长的时间框架。

正如赌徒永远认为下一笔赌注将解决自己所有的长期麻烦，我们的短期思维造成了短视行为的恶性循环，进一步加剧了我们的长期问题。时间短视最严重的后果之一或许是，它阻碍了民主过程本身的有效性。假设有这样一种情况：所有的经济学家都认为，实现长期经济健康的途径是立刻提高税收。等到了投票的时候，什么人赢得选举的机会更大呢？是一个采纳了经济学家建议的政客，还是一个鼓吹减税的政客？

真相是：尽管人类在长期规划方面比其他所有动物都好得多，但我们也并不特别精通此道。这应该不算太过出人意料。人类大脑是数亿年进化过程的产物。因此，我们的大部分神经都来自于只活在当下（这是从认知科学的

角度来说的)的动物。因此,作为一个物种,人类仍在学习如何完善自己新获得的技能,更好地平衡即时满足的诱惑和延迟满足的好处。

以下两种选项,你选哪一个:现在就到手1000美元,还是一年以后得到2000美元?这里的选择没有正误之分:尽管只要稍微动动脑筋,就能明白一年翻倍的收益率难以抗拒。这个问题捕捉到了经典的跨期取舍:是立刻获得奖励带来即刻满足,还是为获得更大奖励而延迟满足。我们的生活充斥着这种跨时间的决定。我应该今天掏出信用卡购买一台新奇的电视机(并支付信用卡利息),还是存上几个月的钱,等到有了现金再买?我应该再玩一局电子游戏,还是马上回去工作?我应不应该多花些钱购买对环境友好的汽车,为子孙后代的福祉做出微不足道的小小贡献?

时间折扣(temporal discounting)是指,某物的主观价值随时间而下降。今天到手1000美元,在某种非常真切的意义上,比一年后到手相同数额的钱更加“有价值”。一年以后我说不定已经不在人世了,那么一年后获得1000美元对我来说就是零价值。再举一个更自然的例子:对我们居住在非洲大草原上的祖先来说,如果他有可能在一个月里因饥饿而死,那么,现在就吃少许食物的意义,远大于一个月后吃上丰盛的一餐。在进化的大部分进程中,我们的祖先生活在一个高度不确定的世界:在这个世界里,饥饿、捕食和疾病是持久的威胁。置身此种不稳定状况,短期生存远比担心将来重要。毫无疑问,人类的大脑,本能地强烈偏爱即时满足。

即时满足和延迟满足之间的平衡点,是可以量化的。比方说,你可以像上面那样询问人们,是选即时的小额奖励,还是延迟的大额奖励。调整奖励的大小和延迟的长短,可以计算出人在具体情境下的时间折扣率。毫不奇怪,个体差异很大。例如,在一项研究中,有些人非常有耐心,愿意等待6个月以获得25美元,而不是立刻拿到20美元;还有些人却更加冲动,选择今天领取20美元的报酬,放弃一个月后领取68美元。¹⁸大量研究表明,这些跨期金钱选择所衡量的时间折扣率,与健康、财务稳定性和药物滥用的倾向呈反比。¹⁹也就是说,那些放弃更大延迟奖励而选择即时小额奖励的人,有更大概率遇到健康或经济问题。

如果有机会在现在到手100美元和一个月后到手120美元之间做选择,大多数人会选择立刻拿钱。知道了这一点,你不妨来猜猜:如果两个选项数额

不变，但都是延迟选择，也就是说，一个月之后到手100美元和两个月后到手120美元，人们会怎么选？从逻辑上看，如果人放弃一个月后到手120美元而选择立刻兑现100美元，那么，他们应该也会选择一个月到手100美元而不是两个月到手120美元。毕竟，都是多等30天，也都是多拿20美元。但事实并非如此。²⁰如果两个选项都设定在未来，人们就会变得更有耐心。如果现在能到手100美元，多等30天只多拿到20美元就不值得；但如果都要等，再多等30天就能多拿20美元就很值得。换句话说，我们偏爱即时奖励不是因为我们不愿意为了多拿20美元而多等30天，而是因为我们就是喜欢现在就有东西可拿！

我们对即时满足的偏爱，经常为金融机构和营销人员所利用。举个例子，有了信用卡，“购物”行为和“放弃得来不易的现金”的事实之间，就隔上了一层面纱。研究表明，人们使用信用卡时往往比用现金时花费得更多。在一项研究中，如果可以使用信用卡，学生们愿意为一张体育门票花比用现金多一倍的钱。²¹此外，每当我们使用信用卡购物，信用卡的奖励计划就提供即时“奖励”（航空里程，积分或现金返还），所谓“花更多，得更多”，进一步诱惑我们陷入债务（当然，最终为这些奖励买单的仍是消费者）。²²

人类所取得的惊人的科学、技术和文化成就，有很多都是我们进行精神时间旅行、执行长期规划带来的结果。但我们的许多个人和社会失败，又反映出这样一个事实：我们的不少决策都是以即时满足为指引的。²³幸运的是，我们怎样对长短期结果进行取舍权衡，并未写入我们的基因当中。延迟满足并做出最佳的跨期决策，是一个可以极大得益于实践、教育、斟酌、停下来思考未来的过程。例如，研究表明，让人们在做决定时进行精神时间旅行，就可以延长时间折扣率，从冲动决定转变为更耐心的决定。一项研究中让受试者做一系列跨期选择（如是现在拿20美元，还是一个半月后拿60美元）。在一些试次中，选项还伴随着“去巴黎度假”等措辞，旨在引发对未来事件的心理想象。与对照试次相比，展开精神时间旅行的参与者变得不那么冲动了，更多地选择较大的延迟奖励。²⁴故此，精神时间旅行本身，说不定就提供了一种修正短期满足偏好的途径。

大脑当中的精神时间旅行

是什么让人类有了独特的精神时间旅行能力呢？人类的神经元有什么与众不同之处吗？与我们大脑的体积有关吗？又或者，人类有着别的动物所没有的大脑区域？

光是测量细胞的电活动，神经科学家很难判断一个神经元是属于老鼠还是人类。类似的，在显微镜下，所有哺乳动物的神经元看起来都差不多。当然，人类大脑因体积脱颖而出，但它并非动物王国里最大的。不足为奇，体格较大的动物往往有着较大的大脑，所以大象和鲸鱼的大脑比人类大得多。如果把体重考虑在内，再对比大脑与体重的比例，人类仍然表现突出，但还是无法荣登榜首。小个头的动物，往往有着相较于身体更大的大脑，故此，哪怕是小鼠，大脑与身体之比也比人类要大。排第一的是一种小树鼯：它的大脑占了整个体重（还不到0.25千克）的10%左右，人类的这一数字是2%。只有再进行恰当的调整，以解释大脑与体重并不呈线性关系（也就是所谓的脑指数），这时候，人类大脑才能拔得头筹。考虑到人类的体重，人类大脑比基于所有脊椎动物大脑身体关系所得的预测要大7倍以上。海豚的脑指数高于5，黑猩猩远远落后，在2.5左右，小鼠仅为0.5。²⁵

毫无疑问，按脑指数衡量的大脑体积，对人类独特的认知能力大有帮助。但大脑特定区域的相对体积，或者说，大脑特定脑区的专业化，同样扮演着重要角色。例如，相对于整个大脑，听觉皮层在灵长动物和啮齿动物中大小相似，而其他区域，灵长动物相对较大。前额叶皮层就是这样的一个区域。

位于额头正后方的前额叶皮层，是一个接线四通八达的大脑区域——也就是说，它的位置，很适合监听、影响大脑其他许多区域发生的事情。尽管前额叶皮层在灵长动物中获得了优先扩展，但前额叶皮层的相对体积，在人类大脑中并不比在其他类人猿大脑中更大。²⁶然而，有证据表明，人类的前额叶皮层在其他方面很是不同——例如，人类前额叶皮层中的神经元似乎能接收更多的突触。²⁷

那么，前额叶皮层是做什么用的呢？前额叶皮层受损的人，在初次接触时看起来完全正常。他们的运动技能基本上完好无损；他们能理解言语，进行正常的交谈。然而，根据损伤的确切位置和范围，他们在高阶认知功能方面存在明显的缺陷，包括短时记忆、人格、注意、决策、抑制不当社交行为等。虽然患有前额叶病变的人可以遵循指示，正常执行许多任务，但他们很难执行有着多个步骤、需要根据情况变化灵活调整的计划。²⁸

前额叶皮层还对我们制订长期计划、延迟满足、参与精神时间旅行的能力有帮助——也就是说，患有前额叶病变的人，很难为退休进行储蓄。一项研究使用时间折扣任务来检查前额叶皮层受损的人怎样平衡即时和长期奖励。与健康对照组以及大脑其他部分受损的人相比，前额叶皮层受损的患者，有更大概率放弃较大的延迟奖励，选择较小的短期奖励。²⁹同样，一些脑成像研究表明，前额叶皮层部位的活跃程度，与时间折扣任务中人们愿意延迟满足多久相关。³⁰

健康人的脑成像研究也表明，前额叶皮层对我们参与精神时间旅行的能力有帮助。例如，请人们根据自己认识的人名和地名想象一个未来的场面，前额叶皮层的活跃度会高于用同样的名字造句。此外，研究还表明，相较于回忆过去生活中发生的事情，人们在想象潜在的未来事件时前额叶皮层更加活跃。³¹

虽然前额叶皮层对于精神时间旅行很重要，但要说精神时间旅行就发生在此处，未免太过天真。把任何具体的任务归因到特定的脑区，有点像是一边看足球比赛一边问谁的任务是射门得分——负责攻防的球员固然有着不同的角色，但得分是团队的努力，而且说到底，任何人都能射门得分。指向未来的精神时间旅行是一项复杂任务，需要大量不同的认知功能协调运转，包括接入过去的情境和语义记忆，用这些记忆来唤起未来的场景，理解过去和未来之间的差异，以及判断模拟结果是否可取的能力。此外，光是想象未来的场景还不够：我们必须记住自己想象的东西——换句话说，我们必须从精神模拟中学习。如果你打算去露营，你希望从过往旅行的记忆中取经，判断自己应带上什么装备。你还希望从这些记忆中进行推断，以模拟未来最糟糕的场面：如果我扭伤脚踝，被蛇咬伤了，那会怎么样？一旦你模拟出这些场

面（假设你仍然打算去露营），那么，你就必须从这些模拟中学习，做一些适当的准备工作，以避免此类场景发生。

鉴于精神时间旅行的认知复杂性，我们应该料到，它依赖的是协同工作的不同脑区的集合。实际上，脑损伤和神经影像学研究暗示，大量不同的脑区参与了精神时间旅行。如上所述，失忆症患者K. C. 不仅难以回忆自己生活中过去发生的事件，也很难思考自己将来要做些什么。K. C. 的主要脑损伤区域是颞叶，这一结构包含海马体在内。一项研究请内侧颞叶损伤的患者想象并形容若干不同的未来场景，比如赢了彩票会是什么情形。与健康对照组相比，颞叶病变导致的遗忘症患者在描述时很匮乏，对那样的体验会是什么样给出的细节相对较少。³²

通常而言，复杂的认知任务（如精神时间旅行）依赖的不是任何单一的大脑区域，而是许多不同区域的支持网络，每个脑区都有自己的贡献。就精神时间旅行而言，内侧颞叶可以提供访问过去体验的途径，而前额叶皮层可以灵活地操纵这些记忆，预想、评估新的场景。有趣的是，判断时间的能力，反而并不是精神时间旅行明确需要的一样东西。一如日历表示时间却并不实际判断时间（它不是时钟），负责精神时间的神经回路必须表征过去、现在和未来，但不一定需要主动地测量时间的流逝。



动物预测自然周期，预测天敌、猎物和配偶等的行为的能力，是一种强大的进化适应。精神时间旅行是下一步：它使得单纯地预测外部世界的事件变成了一种过时的技术。有了精神时间旅行，人类得以从被动地预测未来，转变成积极创造未来。没有足够的食物？那就创造依靠农业提供丰富食物的未来。没有足够的农业用水？那就修建水坝、渠道和灌溉系统。

我们的祖先是怎样获得在精神上将自己投射到过去和未来的能力的呢？我们是因为能够进行精神时间旅行而理解了时间的概念，还是说，我们得以进行精神时间旅行恰恰是因为我们理解了过去、现在和未来的概念？动物研究无法带来这些问题的答案。丛鸦和大猩猩固然拥有指引自己当前行为以实现将来理想结果的能力（不管你是否把这叫作精神时间旅行），但它们指向未来的思考能力显然与人类有着巨大的差距。哪怕不考虑其他原因，没有对

日月年的语义理解，没有理解时间概念的能力，很难对未来几天、几个月和几年做计划。精神时间旅行是一种多维认知特质。它可能是无数会聚的进化步骤的产物，包括语义和情境记忆、语言、数字感以及将时间空间化到心理时间线上。

如前所述，精神时间旅行是福也是祸。我们的未来之旅常常把人带到我们自认为优于当前情况的地方，而且其目的也正是为了彻底逃离当下。但就像东方哲学里强调的那样，前往过去或未来可能妨碍我们把此时此地的当下视为幸福和喜悦的主要源头。³³丹尼尔·埃弗里特提到：“皮拉罕人只关注即刻，于是，一下子，他们就排除了困扰我们西方社会不少人的巨大的担忧、恐惧和欲望的根源。”但如果说，活在当下带来了一种更无忧无虑的生活，它所提供的无忧无虑生活也并没有太多内容（不考虑婴儿死亡率的话，皮拉罕人的平均寿命是45岁）。³⁴保障食物的持续供应，提供永久性居所，参与科学和艺术活动，预防和治疗疾病，无不需要大量的远见和规划。而精神时间旅行的悖论正好来自这里：对我们所有的烦恼来说，它似乎既是解决之道，又是根本原因。

12:00 意识：过去和未来的结合

有一种理论认为，如果有人发现了宇宙到底是什么以及为什么它在这里，宇宙就会立刻消失，取而代之以更为怪异和费解的东西。

还有一种理论说，这一切已经发生过了。

——道格拉斯·亚当斯（Douglas Adams，科幻作家）

婴儿第一次睁开眼睛时，会感知到什么呢？如果说看到了什么，那一定是乱糟糟一大堆失焦的图案、线条和光晕，没有意义，也不可能阐释。相比之下，你我放眼世界的时候，我们看到的是对周围世界连贯而绝妙的重构：海浪拍打着沙滩，翠鸟扎入水中，甚至我们自己在水面上的倒影。一般来说，我们会错误地以为这种重构的景象是真实的。但充其量，我们的体验只不过是与外部物理世界有相关。例如，我们看到的颜色，只是一种对电磁辐射波长的阐释，两者的关系，就如字母表中的字母和我们分配给它们的声音。而在最糟糕的情况下，我们看到的是内心强加于意识的虚构：从精神分裂症患者的幻视、药物引起的幻觉到我们每晚所体验到的梦境。此外，还有太多我们看不到的东西：生活在我们皮肤上的细菌、天空中看不见的星系、大气层中产生的微观粒子以及我们周围生物的红外热量信号。

时间流逝的感觉（我们对变化的感知），也是一种心理建构。对神经科学家来说，这一建构与现实相关：我们感知到海浪的拍打、鸟儿扎入水中，因为时间在真正的流动——这些事件在只有当下是真切的宇宙中渐次展开。对许多物理学家和哲学家来说，时间的流动同样是一种心理建构，只是在物理世界里没有相对应的东西。在永恒论的块体宇宙中，我们对时间流逝的感觉，更类似于精神分裂患者的幻视，这种幻象有时只存在于人大脑之内。

这两种观点对时间的本质提出了不相容的概念，但它们都认为，我们的时间流逝感体现了一个基本的问题。然而，事实将证明，解决这个问题是一项艰巨的任务，因为我们的主观时间感处于一连串科学未解之谜的中心：意识、自由意志、相对论、量子力学以及时间本质。

时间碎片

假设我们生活在一个现在论的宇宙里，只有此刻才是真实的。我们对时间的意识感知，与现在论产生共鸣，因为意识似乎为我们周围渐次发生的事件提供了一个接一个的连续报告。但尽管无意识大脑不断地采样并处理在时间中展开的事件信息，意识本身是以高度不连续的方式生成的，从这个意义上来说，上述对时间的意识感知本身就是一种错觉。无意识大脑向断断续续的有意识思维提供故事。

你在一场戏剧表演里听到女演员独白，你不会有意识地感知她话语中每个音节的连续流动。相反，单词和短语的含义，在完全成形之后才进入你的思维。

如果单独听到“po”这个音节，你可以轻松地识别它，但当你听到“hippocampus”（海马体）这个词，你并不会会有意识地意识到“po”音节；你也不会有意识地注意到“hippocampus”这个词里还嵌入着“camp”（营地）一词。显然，对外部世界里渐次发生的原始感官事件，我们的大脑提供的并不是一个接一个的、线性的描述。

意识的时间结构实际上是高度编辑加工版的现实。如果你凝视朋友的眼睛，同时让她来回转动眼球，你可以很容易地看到这些动作随着时间的推移而发生。现在，如果你在照镜子的时候深深凝视自己的眼睛，然后继续来回转动眼球，你会发现自己无法看到眼睛的运动。眼睛的这些快速自发运动叫作“眼跳”，更严谨的实验（相较于对着镜子看自己的眼睛）揭示，眼跳期间，视觉会受到部分抑制。¹举个例子，如果一幅图像在你把眼睛转动到新位置期间闪现在屏幕上，又在你眼睛转动停止之前挪开，你很可能不会有意识地觉察到这幅闪现的图像。即便把意识考虑在内，大脑也经常删除眼球转动过程中出现的帧。同样，每次眨眼，我们都会从视觉系统的原始输入里删除这些空白；这些空白没有被有意识地感知，因为大脑通过在眨眼前后插入帧的方式做了填补。根据一项估计，在一天的过程中，眼跳和眨眼之间会丢失整整1个小时的视觉信息，而我们却并未感知到视觉意识流存在任何空白。²

重新校准时间

雷声和闪电由同一事件引起，但只要稍微碰到个合适的时机，我们就能分别地感知它们，因为光速比音速快近百万倍。闪电产生的光子到达我们的眼睛之后，雷声的轰鸣才响彻我们的耳朵。然而，在其他情况下，大脑不光必须并行地处理来自眼睛和耳朵的输入流，还会尝试协调和同步来自这两种感官形式的输入。如前所述，当管弦乐中钹相撞时，光波和声波会在不同时间到达眼睛和耳朵，但人们不会把它们感知为独立的事件。相反，钹撞击的画面和声音在“传递”给意识之前就整合成了统一的多媒体体验。言语也是如此。当有人说“baby”（婴儿）这个词，我们会看到她的嘴唇抿在一起，接着张开，释放出“ba”的音节，接着又合上。同样，嘴唇张开的画面到达眼睛，先于声音到达耳朵。延迟有可能很明显：在一间大教室，教授的声音可能需要50毫秒才传到教室后面。类似地，对于棒球队里的游击手来说，球棒击中棒球的声音将延迟100毫秒以上。然而，我们通常会将说话者的嘴唇动作和语音（或者击球的画面和声音）视为统一事件。

有人或许会猜，由于大脑的时间分辨率不足以检测到50或100毫秒的差异，所以我们一般才无法察觉视觉和听觉信号之间的延迟。不是这样的。通过练习，人们可以检测出不同频率两个音调开头处大约20毫秒的延迟。³我们在意识上并未登记视觉与听觉信号之间的延迟，原因在于无意识大脑会尽力传送整合好的事件阐释。大脑将视觉和听觉信息整合为一个统一的感知，这之间的时间跨度叫作“整合时间窗口期”（很贴切）。在这一窗口期，从主观上讲，大脑认为听觉和视觉事件是同时发生的。对于语音，窗口期可以超过100毫秒——举例来说，如果电影音频和视频轨道之间的延迟小于100毫秒，我们很难注意到。但窗口期并不对称——如果听觉信号比视觉信号提前了50毫秒，受试者有可能注意到事情不太对劲；但如果听觉信号落后视觉信号50毫秒，受试者就不会注意到。⁴还有一种迹象表明大脑主动尝试协调听觉和视觉形式的信号：整合时间窗口期不是固定不变的，它并不是由视觉系统的固定延迟导致的（尽管视觉信息确实往往要用更长时间才抵达大脑皮层，因为眼睛比耳朵慢⁵）。相反，它是适应性的。研究表明，看到几百次闪光后（每一次闪光200毫秒后都会出现一段声音信号），人们也许会判断相隔20毫

秒发生的闪光和声音是同时发生的。然而，如果数百次闪光-声音配对都是声音在前而闪光在后，那么，他们有可能判断相隔20毫秒的闪光和声音（与前例中相同）并非同时发生。换句话说，不断地把人们暴露在人为的视觉-听觉长延迟条件下，有可能改变或扩大人们的整合时间窗口期——故此，主观同时性也是相对的。基于过去的经验，大脑可以适应性地创造一种叙事，把分开的视觉和听觉信号整合到单一的事件中。⁶

意识反映的是在时间上经过编辑的现实，对此最具说服力的例子大概要数后来的感官事件可以改变我们对早前发生事件的意识感知。言语又一次充当了很好的例子。假设你听到两句话：“The mouse broke”（鼠标坏了）和“The mouse died”（老鼠死了）。这里，“mouse”一词的含义，只能在每一句话结尾时确定。但一般而言，你不会先意识到说的是计算机的鼠标还是地上跑的啮齿动物，接着再等待最后一个词的出现来阐释句子。

这种逆向编辑的标准例子来自所谓的皮肤兔子错觉（cutaneous rabbit illusion）。假设有人在你的手腕附近轻敲你的前臂两次，紧接着轻敲你的肘部两次。人们报告的内容，往往与实际发生的情况不一样。人的感觉不是手腕附近敲击两次接着手肘附近敲击两次，而是4次敲击顺着手臂往上跳：手腕一次，手肘一次，中间还有两次。⁷如果有人在手腕上轻敲两次，并停留在原位，你会正确报告说感到手腕上有两次敲击。但在兔子错觉中，第三和第四次敲击，改变了第二次敲击的感知定位。这里要表达的关键信息是，后发刺激的位置改变了你对前一次刺激的位置感知，故此，意识不可能是对时间流的连续统一描述。相反，无意识大脑似乎连续处理着输入流，但等到关键的特定时刻出现，才把经打磨的叙述发送给意识。⁸

意识的相关性

我们不知道大脑怎样执行这些时间上的壮举，更不知道大脑怎样产生意识。但研究者在尝试确认意识的神经相关性方面取得了进展：发现了可能构成意识感知基础的神经活动的模式。⁹典型的实验使用事件相关电位（EEG）脑电记录，受试者的头皮上插入电极，探测来自皮层的电信号。有一种用于搜索意识神经相关性的策略是，将意识感知的刺激所生成的电信号，与同一刺激只在潜意识中登记时（即大脑检测到了刺激，但刺激并不浮现在意识中）产生的信号进行对比。

在实验室中，为了横跨意识感知的阈值，研究人员可以在计算机屏幕的一个象限里闪烁刺激（比如一条斜线），时间短于100毫秒。有一项研究请受试者迅速指出刺激在哪个象限里闪现（如有必要可以猜），以及他们是否真的看到了斜线——也就是说，受试者是真的感知到了斜线，还是在猜测。在受试者报告自己在猜的试次中，他们的正确率应该在1/4上下。可有趣的是，参与者的正确概率远高于此，这暗示受试者的潜意识其实检测到了刺激——换句话说，无意识大脑知道刺激出现在哪里，但并未将这一信息传给意识思维。现在的问题是，受试者报告看到了刺激的试次中（即回答正确/有意识）大脑所发生的情况，与受试者在“猜测”的试次（回答正确/无意识）中大脑所发生的情况，两者有些什么区别呢？在两种试次中，刺激出现的最初250毫秒，大脑的电活动基本一样——不管受试者是否觉察到了刺激，大脑活动并无可检测出的差异。然而，到了大约300毫秒时，有意识试次中的整个大脑都出现了皮层活动的明显增加。¹⁰此类研究（和无数其他研究）表明，只有当大脑检测到刺激后，对刺激进行意识感知背后的神经机制才出现。法国神经科学家斯坦尼斯拉斯·迪昂（Stanislas Dehaene）解释说：“对轰炸我们的感官信号，我们不光只有意识地感知到了极小一部分，而且在我们产生意识感知的时候，还有着至少长达1/3秒的滞后……我们在意识中视为是‘现在’的信息，至少过时了1/3秒。如果输入过于微弱，需要缓慢地积累证据才能越过意识知觉的阈值，那么这一盲期的持续时间甚至可能超过半秒。”¹¹

这里的要点不仅仅在于意识提供的是颇外世界所发生事件的延迟叙述，更重要的是，这一延迟是可变的。如果有人大喊“火”这个词，它到达意识

的时间或许相对较短，因为无意识大脑可以迅速找到相关叙述发送到意识里。但如果人听到的是“top stopped spinning”（陀螺停止旋转了）或“the top of the mountain”（山顶），无意识大脑大概会等到“top”一词的阐释可以明确后，才创造出意识感知。

大脑剪切、暂停和粘贴现实的胶卷，接着才向意识输送一套有关周围世界所发生事件的方便叙述。然而，除非主动停下来思考，否则我们只会有这样的印象：我们的意识体验反映的是对现实的即时再现。

时间和自由意志

就像时间这个词一样，自由意志也是一个模糊的概念。这里，再次引用圣奥古斯丁的那个说法：“我知道它是什么。但如果有人问，而我想向他们解释，我就知道了。”

如果一棵树在深林里倒下，周围没有人听到，它算是发出了声音吗？这里的谜来自“声音”一词的模糊性：如果将“声音”正确地定义为空气分子的振动，那么倒下的树无疑发出了声音；但如果把“声音”定义为人对这些振动分子的有意识感知，那么答案就是否定的。

自由意志是否存在的谜，同样以“自由意志”定义的模糊性为中心。¹²在《牛津英语词典》里，自由意志的定义之一是“个人做出自由选择的力量，不由天赐的宿命、物理因果关系定律、命运等决定。”¹³这或许是大多数人所说的自由意志，但从科学上讲，这是一个不够成功的定义，因为如果“物理因果关系”指的是物理定律，那么，自由意志唯一残留的可能性就是某种类似灵魂的说不清、道不明的物质或实体的产物了。事实上，正如神经科学家里德·蒙塔古（Read Montague）所说：“自由意志是灵魂观念的近亲——这一观念认为，‘你’、你的想法和感觉，来自一种有别于也独立于构成你身体的物理机制的实体。”¹⁴从好的方面看，坚持这一定义能让我们对上述谜题做出回答：不，自由意志并不存在，因为灵魂的概念是人类思维的创造，而不是人类思维的源头。

另一种限制条件较少的自由意志定义是：在不同行动路线中做出选择的能力，或是不受暗示或胁迫的限制采取行动的能力。但这些同样是模糊极了的定义：它们没有限定选择是有意识的，还是无意识的；而且，还似乎允许存在这样的可能性：计算机国旗象棋程序击败我时就是在施展自由意志。将自由意志与不可预测性等同起来的定义，似乎更有指望。例如，斯蒂芬·霍金说：“我们说人类拥有自由意志的原因是，我们无法预测他们会做什么。”¹⁵类似地，罗杰·彭罗斯说：“自由意志的问题要与决定论联系起来讨论。”¹⁶换句话说，如果物理定律确定，有可能从时间 t 之前的时刻预测任何系统（包括人类大脑）在时间 t 的状态，那么自由意志就不存在。哲学家迈克

尔·洛克伍德（Michael Lockwood）解释说：“宽泛地说起来，普遍决定论与自由意志的存在不相容。对于普遍决定论来说，宇宙受制于一系列严格的定律，这些定律与任何特定时间的宇宙状态相结合，准确地规定了宇宙在随后任何时间的状态。如果宇宙确实在这个意义上是确定性的，那么，紧随其后的就是……所有未来的结果，包括我们所有未来的选择和行动，都已经是固定的了。”¹⁷

在这一语境中，量子力学是一套棘手的理论，因为，与其他探讨确定性的物理学不同，量子力学探讨的是概率。我们知道，在某种程度上，量子事件必然影响大脑的状态——毕竟，你视网膜检测到（或没能检测到）的每一个光子，都受量子力学的概率规律的影响。因此，哪怕仅仅从理论上讲，100%准确地预测人类行为大概也是不可能的。然而，量子力学提供了一种概率决定论形式：它确立了选项的域及其各自概率，在许多哲学家看来，它留给自由意志发挥的空间就几乎没有了。

但对那些认为我们生活在四维块体宇宙中的人来说，物理定律是不是确定性的问题相当次要，因为块体宇宙本身就没有给自由意志留下空间。如果过去、现在和未来都共存于块体宇宙，那么，所有有待做出的决定，都“已经”做出了。

上述所有定义都没能解决自由意志的一个基本方面：“我们控制着自己的选择”这一压制不住的感觉。人是否真的在“自由选择”，这一点我们可以辩论，但我们都同意，感觉上我们像在自由选择。¹⁸故此，说不定我们应该把自由意志定义为：一种感觉。心理学家丹尼尔·韦格纳（Daniel Wegner）一早就阐述过，自由意志“仅仅是人产生的一种感觉。自由意志之于行动，就如同疼痛体验之于因疼痛刺激导致的身体改变。”¹⁹把自由意志定义成与负责做决定的神经过程相关的意识，这并不是什么新想法。大约300年前，哲学家大卫·休谟就指出：“说到‘意志’，我所指的无非是，当我们知道身体特定运动产生或感知到自己思维时，那种有所感、有所意识的内部印象。”²⁰托马斯·赫胥黎也认为：“我们称为意志的感觉，不是自愿行动的成因，而是直接导致该行为的大脑状态的标志。我们是有意识的自动装置，被赋予了自由意志，这是这个遭到滥用的术语唯一可以理解的意义。”²¹

人类可以预测吗

如果我们选择将自由意志定义为大脑做出一个决定后（也就是大脑内无意识神经过程做出决定后）产生的感觉，那么，照理说就有可能在人们意识到这些决定之前检测到这些决定的神经特征。大量研究表明这确实是可能的。只有唯一一种场合可以进行此类实验，那就是当患者接受重度癫痫的一种标准治疗时。顽固癫痫患者有时会接受外科手术，目的是去除大脑触发癫痫发作的部位。为了精确定位癫痫病灶，神经外科医生将电极植入患者大脑，等待癫痫发作。医生在患者癫痫发作期间记录大脑神经活动，得以准确地锁定病理区域，进行手术切除。患者往往同意，在自己植入电极、医生们等待癫痫发作期间，参与科学实验。加州大学洛杉矶分校神经外科医生伊扎克·弗雷德（Itzhak Fried）主持了一项研究，他将电极植入患者额叶中的辅助运动区域。研究请患者执行一项非常简单的任务：随心所欲地按下计算机按键，施展其“自由意志”。在患者按下按键许久之前，不少神经元的活动水平就发生了改变。实际上，基于神经元群的活动，有可能对患者伸出手指的行动做出准确度高达80%的预测，比按键实际被按下提前了整整900毫秒（也比患者自己报告说察觉了决定要采取行动的时间提前了700毫秒）。²²请注意，900毫秒足够大脑执行手指动作了。举例来说，如果有人要你一看到闪光就按下计算机按键，那么，闪光和按键之间的延迟在300毫秒左右。令人惊讶地，这些研究表明，在志愿者察觉自己要按下按键之前，实验人员就有可能知道他即将要按键了。

一系列相关研究证实，至少在某些情况下，在人或动物采取行动之前的几百毫秒甚至几秒之前，就有可能确定他们将要采取什么行动。²³但这些结果并不一定意味着可以从神经活动的模式准确地预测人类行为，也并不是说，意识对我们的决定毫无贡献。在这些研究中要做出的决定非常简单。何时动弹手指的决定，与是否接受工作机会的决定毫无可比之处。所以，尽管选择什么时候弯曲手指，有可能是无意识过程（这一无意识过程的触发了自由意志的意识感觉）决定的，但参与者最初是否参与实验的决定，却有可能依赖的是一套混合的意识和无意识神经过程。

计算机的按键是怎么按下去的？自发按下按键需要手指肌肉收缩，手指肌肉收缩需要一连串的动作电位顺着正中神经向下传导，动作电位的向下传导需要脊椎颈椎段的运动神经元激活，而运动神经元的激活，又来自大脑运动皮层手部映射区域活动的触发。但是什么导致了运动皮层神经元的启动呢？现在事情变得很混乱，但这里最根本的一点是，触发任一神经元的活动，往往需要将突触接入该神经元的神经元（即其突触前神经元）活动激增。不严格地说，这种激增可以采取多个突触前神经元在短短几毫秒的窗口期启动的形式（这叫作“空间总和作用”，有点像是很多桶水同时朝着浴缸里倒，迅速将后者填满），也可以采取若干突触前神经元在数十毫秒或更长的窗口期里连续启动的形式（这叫作“时间总和作用”，就像是用一个水龙头慢慢加满浴缸）。无论哪种形式，我们都可以把它想成是朝着特定决策逐渐积累动力或证据的过程——你决定去看一部电影，有可能是因为在同一场合，有好几个朋友告诉你该去看它（空间总和作用），也可能是因为一个非常执着的朋友在多个不同场合不断劝你去看（时间总和作用）。与此讨论相关的另一个因素是神经元非常“嘈杂”：它们的活动存在自发地波动，也就是没有任何明显原因地上升和下降（当然，这些波动有原因，只不过我们简单地把它们概括为随机背景噪声）。我们可以把按下或不按按钮的简单决定，视为两组神经元之间的“赛跑”——比方说，一组皮层运动神经元负责在计算机按键上压下手指，另一组负责抬起手指。由于随机波动，一组神经元可能抢得先机，而且，在任一试次中，决定按下或不按按键的“意志”决定，都由大脑中特定回路的无意识随机波动所触发——一旦一组神经元赢得“赛跑”，运动动作和自由意志的意识感觉就产生了。故此，为什么神经科学家可以提前数百毫秒预测受试者手指的动作，一种解释是，他们发现了是哪一组神经元抢得先机。

现在就从自由意志神经生理学研究得出明确的结论还为时尚早，但在一个出了名地很难得到实验数据的领域，这些实验充当了一切自由意志讨论的锚点。一如神经科学家帕特里克·哈格德（Patrick Haggard）的总结，人们越来越认可：“虽然从体验上说，似乎是意识决定和想法导致了我们的行为，但实际上，这些体验来自从控制自发行动的大脑区域网络中读取大脑活动。”²⁴我们意识感知为自由意志的东西，有可能发生在负责做出决定的无意识神经计算之后。实际上，很难从现有的实验结果中看出不同的解读。我们

对大脑所知的一切，都符合如下事实：人的所有精神状态，都是由大脑内的一种神经活动模式所产生，任何特定的神经模式，都是由此前的神经状态（本书第6章所讨论的活跃和隐藏状态都包括在内）、当前的外部输入、热力学和量子层面发生的随机波动这三者的互动所产生。

自由意志无非是意识无法接入的大脑回路做出决定之后产生的感觉，这一观念可能会让人不安。事实上，有人认为，如果真是这样，那意识就毫无用处了，“就像是谚语里的后座司机，只能没用地观察着自己永远无法控制的行为。”²⁵但即使意识以及自由意志的感觉真的是一种事后的心理创造，它也并不会带来“意识在决策中不发挥作用”的结论。如果你去相亲，晚餐期间，相亲对象突然拿起叉子把它扎进你手里，你的手迅速往回缩这一动作或许发生得太快，与意识无关——故此，你的行为有可能独立于你对疼痛的有意识感知。但是你对疼痛的有意识感知，可能会影响随后的决定，例如是否继续第二次约会。从进化的角度来看，主观体验和自由意志可能主要是指向未来的现象。例如，或许正是这种自由意志的感觉提供了一种信念，即我们掌握着自己的命运，从而推动了生存所必需的面向未来的长期行动。

罪与罚

自由意志是否存在的争论，对道德责任和司法系统相关问题至关重要。²⁶有人认为，如果我们的决定源于人神经回路里确定性的无意识过程，那么，我们就不为自己的行为负责。换句话说，决定论与道德责任是不相容的。例如，物理学家乔治·埃利斯，他支持演变的块体宇宙论（认为过去是凝固的4D时空块体，但未来尚不存在），并认为永恒论妨碍了道德责任的表达：“如果我们只是活在本就确定的未来里的机器，那么，阿道夫·希特勒也别无选择，只能做他非做不可的事情……在我看来，这是一种站不住脚的观点，会带来巨大的邪恶，因为邪恶发生的时候，人们会袖手旁观。”²⁷调查研究也印证了埃利斯的担心，它们发现，如果事先告诉受试者，我们所有的决定都是确定且无意识事件的结果，受试者就不太可能要求他人对自己的行为负责。²⁸

让我们来思考行人被司机撞伤的3种情况：（1）汽车司机精心设计了一套撞伤行人的方案；（2）司机边开车边看短信，汽车失去控制；（3）司机突然急性癫痫发作，汽车失去控制。²⁹由于这3种情况最终都可追溯到司机大脑里晦涩的内部运作，有些人或许会担心，没有了大多数人视为是自由意志的东西，在这3种情况下，司机“都别无选择，只能做他所做的事。”然而，这种担心，在某种程度上是对灵魂信仰的回归，一种秘密的二元论，认为意识独立于大脑。如果我做出了开车时看短信的决定，那么触发该决定的关键神经事件是无意识的还是有意识的，是可预测的还是不可预测的，是预先确定的还是并非如此，这些真的重要吗？这个决定是我的大脑（也就是我）做出来的，我和我的大脑没有区别！这并不是说，上述3种情况在任何意义上都是等同的；也不是说，在施加惩处时不必考虑司机的精神状态。但我们不应该把惩罚问题与责任问题混为一谈。在上述所有情况中，驾驶员都有责任——不管他是有意识还是无意识地做决定。实际上，司法系统也反映了这一结论：在这3种情况下，司机都要负责（例如他将承担行人的医疗费用）。但是，上述每一种情况下的惩罚都有所不同，因为惩罚应该考虑一整套复杂的因素，包括犯罪是不是有预谋的（确认是否存在伤害意图，不管这一意图来自无意识还是意识过程），以及未来再次犯罪和改过的可能性。

神经科学家、物理学家、哲学家和法律专家将继续就道德责任、决定论以及有意识和无意识过程在决策中扮演的作用等问题展开辩论。但也许，现在是时候运用我们的“自由意志”来接受如下观念了：自由意志是一种意识感觉，与我们决策所依据的神经过程相关；我们对自己的决定要完全负责，因为我们每一个人都是自己无意识和意识自我的总和。



每一个“现在”都立刻消失变成过去，同时打开了充满无穷无尽可能的未来的大门，很少有其他体验比这种感觉更具说服力了。因为这种感觉太强烈，永恒论概念就像是在攻击我们对现实的理解。然而，尽管可能违背直觉，过去、未来和现在同等真切这一观念，是有关时间本质的优势理论。但这种块体宇宙观点也并非没有瑕疵。事实上，学者对时间的本质并没有统一的共识，因为人们普遍认为，时间在不同物理定律中扮演着不同的角色。例如，物理学研究中有一项旷日持久的努力，想要解决所谓的时间问题：时间在广义相对论中所扮演的角色与在量子力学中的角色存在冲突。在广义相对论中，时间（充当时空的组成部分）可以被视为宇宙结构的一部分，而在量子力学中，时间是一个控制量子系统演变的参数。然而，令人费解的是，有人在数学上做了一些尝试，把广义相对论和量子力学结合起来，这样时间在其中竟然不再扮演任何角色了。时间参数从方程里完全消失了³⁰，给人留下一种印象：我们其实是生活在一个仅由三重空间维度组成的块体宇宙里。

永恒论和块体宇宙所面临的挑战，不仅来自物理学，也来自神经科学。最值得注意的一点是，块体宇宙无法解释我们感知到时间流逝的事实，使得一些人认为时间流逝的主观体验纯粹是精神的产物。人类最明显、最普遍的一种体验，竟然是一种最深层面上的幻觉吗？遗传学家西奥多塞斯·多布赞斯基（Theodosius Dobzhansky）说过一句名言：“不从进化的角度看，生物学中的任何东西都没有意义。”如果要我们认真对待这一陈述，有一点就很明显：那些我们意识到的和我们没有意识到的，都是进化压力的产物。³¹故此，大脑的一些功能可产生主观体验大概是因为，意识为这些过程带来了选择优势。我们能意识到疼痛刺激是因为主观疼痛体验相较于僵尸般的受伤反应必定具备选择优势（或许这一优势来自能保护自己免受将来的伤害）。按

照这一思路，时间流逝的感觉也应该具备选择优势。但如果我们生活在永恒论的凝固块体世界中，这种优势会是什么呢？

物理学和神经科学之间的另一重冲突是，如果时间的流逝是由精神产生的幻觉，那么块体宇宙的瞬间切片必然能够维持意识现象。然而，我们并不是意识到了瞬间时刻，而是意识到了那些捕获了有意义且可阐释事件的大块时间——“似是而非的当下”。更令人烦恼的还有一个问题：意识本身是否需要一定的时间厚度。也许意识更类似于演变，从性质上说就是时间的过程，很难用静态的时间框架去形容它。

随着物理学家和哲学家继续努力解决物理学内部的时间问题，我们对时间流逝感知的神经科学应该成为辩论的一部分。我们必须确定时间流逝的主观感觉是反映了一种有待物理学加以解释的物理现象，还是说它是一种少见的与现实无关的主观体验。反过来说，神经科学家和心理学家必须承认大脑究其核心是一种时间器官的事实。如果一个人想用4个字来概述大脑的功能（这当然不是个明智的做法），那么，这4个字可以是“预测未来”。大脑判断时间、生成时间模式、记住过去、赋予我们在精神上将自己投射到日后的能力——所有这一切，都是为了预测未来，为未来做准备。

因为时间对大脑运转至关重要，所以，判断时间内嵌在神经操作系统的最深层——突触、神经元和回路上。询问大脑的哪个部分判断时间毫无意义，因为大脑的大部分回路都在以这样或那样的形式判断时间。多时钟原理告诉我们，大脑不是一块可以追踪从毫秒到年的腕表，而是有着一系列不同的机制，判断不同尺度上的时间。甚至，在给定的时间范围内，也有不同的回路来负责计时，具体取决于手头的任务。为什么人脑中的时钟与人脑设计出的时钟完全不同？答案部分在于人造和神经时钟的构建模块。人造时钟依赖于对振荡器所产生的连续嘀嗒的计数——振荡器周期越快，要数的嘀嗒越多。大脑的构建模块缺乏现代时钟的精确度和数值范围——神经元数不出32768，更别说数出9192631770了。

判断时间是我们与所有动物都拥有的一种共同技能，但是智人的独特之处在于，能够窥视未来并对其加以塑造，以满足我们的需求，超越自然的反复无常。但精神时间旅行既是一份礼物，也是一重诅咒。在窥视未来的过程中，我们祖先所见的必然远超自己所愿：他们见到了必将到来的死亡。这种

令人不安的前景，或许使他们走到了更远的未来，发明出最为极端的精神时间旅行：他们设想了来世。

精神时间旅行需要科学与艺术的微妙平衡：对记得的过去严谨推断，对不可思议之事展开梦想。这种平衡有可能偏斜。我们有时会花太多时间做梦，结果未能处理我们完全有能力预见和预防的情景。今天，我们都很难完全意识到人类所面临的长期经济、健康和环境问题，并加以处理。这种时间短视也不难理解：从进化的角度来说，精神时间旅行是一种新获得的技能。幸运的是，与其他认知技能一样，精神时间旅行也极大地得益于实践和教育。

或许我们生活在一个只有现在才真实的宇宙中，又或许，我们生活在一个“此时”就和“此地”一样可以随意指定的宇宙中。还有可能，时间的本质比我们想象的任何东西都更离奇费解。但无论时间的真正性质如何，没有理由不继续打磨我们的精神时间旅行技巧。我们要学会更好地区分“improbable”（不大可能）和“impossible”（绝无可能）；我们要克服短期满足的诱惑，投入长期回报的怀抱；我们要现在就采取行动，创造届时愿意栖身其中的未来，直至未来最终“成为”当下。

注释

1:00 时间的风味

1 <http://oxforddictionaries.com/words/the-oec-facts-about-the-language>.

2 更准确地说，我们看到物体分布在空间中。

3 有些物种的视网膜确实有细胞可以检测运动——也就是说，一个物体是否在时间（和空间）中“运动”。此外，应该指出，耳蜗在某种意义上确实在判断时间，因为耳蜗的感官耳蜗（内毛细胞）跟空气分子的振荡频率调谐——而频率是对空气分子完成一轮振荡所花时间的一种测量。对于大多数神经元来说，这些频率快得来不及有所反应，这些间隔也快得无法实现意识感知。

4 摘自《牛津英语词典》。

5 对钟摆历史更详尽的讨论见Matthews, 2000。

6 大量通俗科普书籍都对数学和物理学史的进展步骤展开过精彩论述。如Penrose, 1989。

7 Barbour, 1999.

8 Wells, 1860.

9 我在这里做了过度简化，20世纪中期出版过一些影响力极大的书籍和文章，在一定程度上经得起时间检验，如Lashley（1951）和Fraisse（1963）的作品。

10 Kandel et al., 2013. 你找不到“timing”，但会发现“temporal”，但大多数词条指的是“temporal lobe”（“temporal”既可以指太阳穴，也可以指“与时间相关的”。为此，好些人推测，我们判断时间的能力位于颞叶）。请注意，我在这里举这个例子不是要暗示该教科书存在疏漏，而是将之作为一个典型的例子，说明神经科学从整体上对时间问题有所忽视。

11 Ivry and Schlerf, 2008.

12 Dudai and Carruthers, 2005; Tulving, 2005; Schacter and Addis, 2007; Schacter et al., 2007.

13 大多数哲学家和物理学家都同意，制造一台时光机将成为反驳现在论的有力论据。在此处的语境中，我本质上是在指出，时间旅行（更具体地说，时空中的封闭类时曲线）与我所探讨的现在论概念不相容。但也有一些模棱两可的情况。例如，有人可能会争辩说，循环时间，即当下的自循环，既符合现在论，也是一种前往过去的时间旅行（一般来说，这不是我们所说的时间旅行）。但总的来说，正如哲学家迈克尔·洛克伍德所说，“时间旅行和有时态的、常识性的时间观……并不搭配。时间旅行的概念，只在无时态的时间观下才有意义”（Lockwood, 2005）。请注意，洛克伍德使用的术语是有时态（tensed）和无时态（tenseless），我使用的术语分别是现在论和永恒论。

14 Quoted from Davies, 1995, 253. See also Smart, 1964.

15 Weyl, 1949/2009.

16 Einstein, 1905.

2:00 最棒的时光机

1 有几本真正的时间旅行书籍，是《时间机器》的前身，包括西班牙作家恩里克·加斯帕（Enrique Gaspard）的El Anacronopete。应该强调的是，我的文学知识非常有限，也并没有对虚构作品的时间旅行史做过详尽的研究。所以，对“真正的时间旅行小说直到19世纪末才出现”这一说法，可能有一些例外。

2 就算过去、未来和现在同样真实，就算物理定律没有明确禁止时间旅行，它们很可能也会共同确保时间旅行在实践上不可能——斯蒂芬·霍金将这一概念称为“时序保护猜想”。许多优秀的科普书籍和文章都论述过关于时间旅行的可能性和物理学，包括：Davies, 1995; Thorne, 1995; Carroll, 2010; Davies, 2012.

3 Dennett, 1991, 177; Clark, 2013.

4 Henderson et al., 2006.

5 Tulving, 2005.

6 Hume, 1739/2000, 116.

7 Foldiak, 1991; Wiskott and Sejnowski, 2002; DiCarlo and Cox, 2007.

8 在经典条件反射的语境中，有一种例外情况。人类和其他动物会在进食和生病之间产生条件性味觉厌恶，虽然进食和生病之间可能存在数个小时的延迟（Buonomano, 2011）。

9 Pinker, 2014.

10 Fraps, 2014.

11 这里实际上有一种有利于赌客的不对称性。如果我正好拿到21点，我直接就赢了，庄家是否拿到21点与此无关。当然，纸牌加起来正好等于21点的概率小于纸牌加起来大于21点的概率。我还曾在Buonomano, 2011中讲述过这个故事。

12 Beaulieu et al., 1992; Shepherd, 1998; Herculano-Houzel, 2009.

13 我在这里做了一定的简化。大脑中有一些连接和突触强度由基因直接控制，但在皮层里，大多数突触的强度很可能是由突触学习规则和经验之间的相互作用决定的。

14 最早介绍脉冲时序依赖可塑性（STDP）的文献是Debanne et al., 1994; Markram et al., 1997; Bi and Poo, 1998; 但20世纪80年代的一些文献也发现了类似的原则（Levy and Steward, 1983）。实际上，STDP规则有许多不同的版本。但总的来说，在任何一个给定区间内，增强或抑制的程度都可能发生显著的变化，而且通常存在一种不对称性，这意味着在相同的绝对区间内，增强和抑制的程度是不同的（Abbott and Nelson, 2000; Karmarkar等, 2002）。

3:00 日与夜

1 Meijer and Robbers, 2014.

2 Pierce et al., 1986.

3 Routtenberg and Kuznesof, 1967; Morrow et al., 1997; Gutierrez, 2013.

4 Vitaterna et al., 1994.

5 Welsh et al., 1986; Herzog et al., 2004.

6 James, 1890. For laboratory studies on self-awakening see Moorcroft et al., 1997; Born et al., 1999; Ikeda et al., 2014.

7 <http://www.nytimes.com/1989/05/17/us/isolation-researcher-loses-track-of-time-in-cave.html>. San Francisco Chronicle. She spent 111 days alone in a cave. December 1, 1988; <http://www.telegraph.co.uk/news/obituaries/science-obituaries/6216073/Maurizio-Montalbini.html>.

8 Aschoff, 1985. See also Czeisler et al., 1980; Lavie, 2001.

9 Ralph et al., 1990; Weaver, 1998.

10 Johnson et al., 1998; Ouyang et al., 1998. See also Summa and Turek, 2015.

11 Nikaido and Johnson, 2000; Sharma, 2003; Rosbash, 2009. 有一项支持这一观点的证据是，推动生物钟进化的一种早期动力是，让细胞在紫外线辐射有害影响最低的时候分裂，实现分裂的优化。而昆虫身上的昼夜光传感器隐花色素，与一种能够修复紫外线诱发DNA损伤的酶有着高度的同源性。

12 Konopka and Benzer, 1971. 对生物钟的探索，有一本精彩的科普作品，见Reddy et al., 1984; Weiner, 1999.

13 Reddy et al., 1984. 与此同时，另一组研究人员也同时确认了该基因 (Bargiello et al., 1984)。

14 除了温度补偿源于化学反应中与温度相关的平衡变化 (Smolen et al., 2004) 这一概念，蛋白质中的特定氨基酸也有可能带来温度补偿 (按温度的不同改变其结合特性) (Hussain et al., 2014)。

15 果蝇只有一个周期基因，而哺乳动物实际上有3种不同的周期基因。

16 Colwell, 2011.

17 Davidson et al., 2006.

18 Jones et al., 1999; Toh et al., 2001; Jones et al., 2013.

19 Knutsson, 2003; Kivimaki et al., 2011.

20 Summa and Turek, 2015.

21 Sharma, 2003.

22 Aschoff, 1985.

23 有许多证据支持昼夜节律和秒尺度上计时的独立性，包括：时钟基因的突变不会特别影响间隔计时（Cordes and Gallistel, 2008; Papachristos et al., 2011）；对人类的观察表明，昼夜节律周期延长（使得人对1小时的判断发生变化）与秒数计时任务的表现无关（Aschoff, 1985）；显著改变昼夜节律的SCN病变并不会改变对峰值间隔程序的计时（Lewis et al., 2003）。有数据表明，周期基因影响果蝇对求偶歌曲正确计时的能力（Kyriacou and Hall, 1980），但这些结果存在争议（Stern, 2014），并且，与我们对生物钟怎样运转的认识不一致。有可能，生物钟基因可以直接影响神经功能的其他方面，而这些方面对较短尺度上的计时很重要（不过，这种可能性并不大）。参见Golombek et al., 2014。

24 Foster and Wulff, 2005; Loh et al., 2010.

25 Foster and Roenneberg, 2008. 虽然有大量的证据表明，月相并不会影响人类的生理机能，但也有一些例外。例如，一项研究表明，月相会影响睡眠生理学的某些方面，比如人们需要多长时间才能入睡（Cajochen et al., 2013）。

26 Hoskins, 1993.

27 Tessmar-Raible et al., 2011; Zantke et al., 2013.

4:00 第六感

1 <http://www.worldsciencefestival.com/2014/07/brains-twist-time-watch-deceptive-watchman/> (4/18/15) .

2 Noyes and Kletti, 1972.

3 Loftus et al., 1987; Buckhout et al., 1989; Campbell and Bryant, 2007; Stet-son et al., 2007; Buckley, 2014.

4 Matthews and Meck, 2016.

5 Hammond, 2012.

6 James, 1890, 624.

7 记忆中事件的数量决定了回顾性时间判断，这一概念涉及“存储容量”假说 (Ornstein, 1969)；一个相关的观点是，一段时间内“背景变化”的程度增加了回顾时的估计 (Zakay and Block, 1997)。由于背景变化，比如感官刺激、环境或任务的改变，也可能增加事件难忘的程度，这两种假说是高度互补的。

8 Hicks et al., 1976; Block et al., 2010.

9 Tom et al., 1997; Whiting and Donthu, 2009.

10 Van Wassenhove, 2009. 这实际上是对实验的简化叙述；实际上，在与“奇怪”刺激进行比较之前，标准刺激出现了4次。

11 Auditory versus visual stimuli (Wearden et al., 1998; Harrington et al., 2014). Novelty and familiarity (Tse et al., 2004; Pariyadath and Eagleman, 2007; Matthews, 2015). Intensity, size, and magnitude (Oliveri et al., 2008; Chang et al., 2011; Cai and Wang, 2014) .

12 Yarrow et al., 2001; Park et al., 2003; Morrone et al., 2005.

13 James, 1890.

14 Sacks, 2004. Sacks attributes this anecdote to L. J. West (Psychomimetic Drugs) .

15 Wearden et al., 2014; Wearden, 2015.

16 Wearden, 2015.

17 Tinklenberg et al., 1976.

18 在实践中，大多数动物研究使用的是固定间隔流程的变体，称为峰值间隔流程，其中一些试次从未得到强化。大鼠研究由Han和Robinson于2001年进行。对于其他的研究，有些是证实性的，有些是矛盾的，见McClure and McMillan, 1997; Lieving et al., 2006; Atakan et al., 2012; Sewell et al., 2013.

19 Meck, 1996; Coull et al., 2011.

20 Rammsayer, 1992; Rammsayer and Vogel, 1992; Rammsayer, 1999; Coull et al., 2011.

21 Loftus et al., 1987; Sacks, 2004; Stetson et al., 2007; Arstila, 2012.

22 实现这一点的方法有很多，包括：（1）将神经元去极化几毫伏，使它们更接近动作电位阈值；（2）关闭钾离子外流通道，有效降低神经元的时间常数；（3）增加突触前端释放的递质的数量；（4）抑制抑制性神经元（抑制性神经元常抑制和减缓兴奋性神经元的反应）。有人可能会说，甚至有可能通过增加血液流动提高大脑的局部温度，从而潜在地加速神经处理。

23 Martin and Garfield, 2006; Terry et al., 2008; Swann et al., 2013. 超频假说的另一个问题是，就算大脑还有一种高速模式可供使用，也远不清楚它是否能被足够快地触发，用于危及生命的瞬间。大脑要进入假设的超频模式中，携带事态恶化消息的感官信号必须首先从感官传送到大脑处理，接着警报响起，大脑和血液都充斥着“或战或逃”神经调质，包括去甲肾上腺素和肾上腺素。光是进入完全超频模式就可能用去一秒钟。

24 Buckley, 2014.

25 Quoted from Arstila, 2012.

26 Loftus, 1996; Buonomano, 2011.

27 Cahill and McGaugh, 1996; Schacter, 1996.

28 我无意贬低理解幻痛综合征的重要性，这是一种非常严重的临床症状，会给截肢者带来巨大的痛苦。

29 Arstila, 2012.

30 Wearden, 2015.

31 Noyes and Kletti, 1976.

32 大量的文献描述过回放现象，包括：Wilson and McNaughton, 1994; Foster and Kokko, 2009; Karlsson and Frank, 2009.

5:00 时间模式

1 言语是高度冗余的，这意味着通常有许多不同的线索使我们能够消除模棱两可的表达。在自然语言中，计时只是这些线索之一，语境和语调也很重要。研究言语中时间线索作用的论文，见：Lehiste, 1960; Lehiste et al., 1976; Aasland and Baum, 2003; Schwab et al., 2008.

2 Breitenstein et al., 2001a; Breitenstein et al., 2001b; Taler et al., 2008.

3 Brownell and Gardner, 1988.

4 Aasland and Baum, 2003.

5 Grieser and Kuhl, 1988; Bryant and Barrett, 2007; Broesch and Bryant, 2015.

6 Bregman, 1990.

7 http://www.washingtonpost.com/national/jeremiah-a-denton-jr-vietnam-pow-and-us-senator-dies/2014/03/28/1a15343e-b500-11e3-b899-20667de76985_story.html.

8 www.arrrl.org/files/file/Technology/x9004008.pdf (7/8/15) .

9 Wright et al., 1997. 本实验的另一种情况是受试者在“空间”条件下也得到了改善，即当他们用两个1000赫兹的音调以100毫秒为间隔上进行训练时，他们对以4000赫兹音调间隔的100毫秒的辨别能力也得到了改善。随后的研究表明，受试者甚至可以将一种间隔的训练推广到以不同方式呈现的相

同间隔上，例如，躯体感觉形态的训练带来听觉形态的改善（Nagarajan et al., 1998）。我没有在这里详细讨论这些结果，因为似乎这种对不同空间通道的泛化可能与学习无关。具体来说，就听觉形态泛化到不同的间隔，只发生在对受训间隔的学习之后（Wright et al., 2010）。

10 间隔辨别学习仅限于特定的间隔，相关研究概述见Bueti and Buonomano, 2014.

11 Keele et al., 1985.

12 The 50 and 100 ms study was performed by Rammsayer et al., 2012. The drummer study was performed by Cicchini et al., 2012.

13 <https://www.youtube.com/watch?v=utkb1n0JnD4> (7/14/15) .

14 Patel et al., 2009.

15 Zarco et al., 2009. See also Honing et al., 2012.

16 Patel, 2006; Patel et al., 2014.

17 Meyer, 1961.

18 Doupe and Kuhl, 1999.

19 Hahnloser et al., 2002; Long et al., 2010.

20 Long and Fee, 2008.

21 Garcia and Mauk, 1998; Mauk and Buonomano, 2004; Shuler and Bear, 2006; Livesey et al., 2007; Coull et al., 2011; Bueti et al., 2012; Kim et al., 2013; Merchant et al., 2013; Crowe et al., 2014; Eichenbaum, 2014; Goel and Buonomano, 2014; Mello et al., 2015.

22 Wiener et al., 2010; Coull et al., 2011; Merchant et al., 2013; Coull et al., 2015.

23 Johnson et al., 2010; Goel and Buonomano, 2016.

24 为了准确起见，我应该指出，眼睛的光感受器不是被光激活的，实际上是被光关掉了，正常而言，它们在黑暗中大多是“开着”的。

25 Chubykin et al., 2013.

26 Richards, 1973.

6:00 时间，神经动力学和混沌

1 Einstein and Infeld, 1938/1966, 180.

2 Creelman, 1962; Treisman, 1963. 到70年代和80年代，更复杂的内部时钟模型得以开发。最具影响力的理论被称为标量期望理论（SET），它除了一套计步器-累计器计时机制之外，还包括存储和比较持续时长的组件，此外，它还有一套闸门机制，用于捕捉注意对计时的影响（Gibbon, 1977; Gibbon et al., 1984）。

3 Feldman and Del Negro, 2006.

4 Miall, 1989; Matell and Meck, 2004; Buhusi and Meck, 2005.

5 Zucker, 1989; Zucker and Regehr, 2002.

6 Buonomano and Merzenich, 1995; Buonomano, 2000. See also Fortune and Rose, 2001.

7 Buonomano, 2000.

8 Carlson, 2009; Rose et al., 2011; Kostarakos and Hedwig, 2012. 哺乳动物神经元选择性地响应不同时间间隔（更准确地说，间隔敏感性）的例子，见Kilgard and Merzenich, 2002; Bray et al., 2008; Sadagopan and Wang, 2009; Zhou et al., 2010.

9 Beaulieu et al., 1992.

10 Buonomano and Merzenich, 1995; Maass et al., 2002; Buonomano and Maass, 2009.

11 Kilgard and Merzenich, 2002; Rennaker et al., 2007; Nikolic et al., 2009; Sadagopan and Wang, 2009; Zhou et al., 2010; Klampfl et al., 2012.

12 Haeusler and Maass, 2007; Buonomano and Maass, 2009; Lee and Buonomano, 2012.

13 Buonomano and Mauk, 1994; Mauk and Donegan, 1997; Medina et al., 2000) .

14 Perrett et al., 1993; Raymond et al., 1996; Ohyama et al., 2003.

15 Mello et al., 2015.

16 Pastalkova et al., 2008; MacDonald et al., 2011; Kraus et al., 2013; Mac-Donald et al., 2013; Modi et al., 2014.

17 Lebedev et al., 2008; Jin et al., 2009; Crowe et al., 2010; Kim et al., 2013; Stokes et al., 2013; Crowe et al., 2014; Carnevale et al., 2015.

18 许多研究人员报告说，在计时运动任务中（此类任务中，动物在刺激呈现固定时间量之后做出响应），随着时间的推移，产生动作电位的比率，呈近似线性的增长（Quintana and Fuster, 1992; Leon and Shadlen, 2003; Mita et al., 2009; Jazayeri and Shadlen, 2015）。但是由 Michael Shadlen 领导的一项研究表明，活动的这类渐增模式，最好看成是为运动反应做准备，而不是计时器（尽管两者通常紧密相关）。例如，在赛跑之前，可能有3个命令，即“各就各位-预备-跑”。在“预备”命令时，选手可能开始创建一种何时出发的期待，每一个流逝的瞬间，“跑”信号出现的概率都在增加。渐增神经元或许会对这种时间依赖期待进行编码，它与追踪实际时间有点不同，因为如果训练动物期待“跑”信号会在0.15或1.8秒时出现，渐增神经元的活动就会根据这一期待上下波动，而不是根据绝对时间波动（Janssen and Shadlen, 2005）。

19 Sompolinsky et al., 1988.

20 Mante et al., 2013; Rigotti et al., 2013; Sussillo and Barak, 2013; Carnevale et al., 2015.

7:00 计时

1 Bhardwaj et al., 2006; Spalding et al., 2013. 使用不同方法的研究也展示了人类同样有可能出现成年神经发生（Eriksson et al., 1998）。

2 本例中，半衰期是固定的： $t_{50} = \ln(2) \times 2^{10} \text{time units}$.

3 Duncan, 1999.

4 Matthews, 2000, 53.

5 Mumford, 1934/2010, 4.

6 在英语中，第三行一般唱的是“morning bells are ringing”（早晨的钟声敲响），但在原本的法语里，则是“ring the morning bells”（敲响早晨的钟声）。英语版的第一行和第二行同样有区别。

7 Matthews, 2000.

8 Matthews, 2000.

9 啮齿类动物生物钟周期的标准差估计在5~15分钟之间，elsh et al., 1986; Herzog et al., 2004.

10 Landes, 1983, 149-157.

11 Galison, 2003.

12 例如，NIST-F2原子钟可能每3亿年才出现1秒钟的误差。但是新一代的原子晶格时钟可以做得更好（Hinkley et al., 2013; Bloom et al., 2014）。

13 <http://www.bipm.org/en/publications/si-brochure/second.html> (2/10/2015) .

14 你可能会想，如果GPS接收器需要接收30纳秒的延迟，难道它不需要一台原子钟来比较来自卫星信号的延迟吗？原则上需要，但GPS接收器可以通过使用来自多颗卫星的精确时间信号来连续校准自己的时钟，因而只需使用普通石英钟。

15 Levine, 1996, 68.

16 Mumford, 1934/2010, 14.

17 <http://www.chicagotribune.com/news/chi-yellow-light-standard-change-20141010-story.html> (2/17/2015) .

18 Lombardi, 2002.

8:00 时间：这到底是什么

1 我在自己的前一本书里讨论过这个例子和相关问题（Buonomano, 2011）。

2 以下作品对时间本质的诸多不同观点做了精彩综述，见Callender, 2010b。

3 Smolin, 2013.

4 Ellis, 2014.

5 Barbour, 1999, 67.

6 Muller and Nobre, 2014.

7 Callender, 2010a.

8 Penrose, 1989.

9 要翻转电磁学和量子力学中的变化方向，其他参数也需要翻转。

10 以下作品对宇宙起源和时间箭头的谜题和相关理论做了精彩的介绍：Carroll, 2010。

11 物理学家乔治·埃利斯认为量子测量可以为时间加上方向的箭头（Ellis, 2008）。以下作品对量子力学中的测量问题，以及这些测量是否可逆做了精彩讨论，见Penrose, 1989和Greene, 2004。

12 这是对著名的双缝实验的简短描述，该实验表明电子的确同时穿过了两道狭缝。具体而言，就算一次只有一个电子射向了屏障，探测器屏幕上也能观察到干涉图样。例如，要是只打开了一道狭缝，屏幕上会出现某个点P，占x百分比的电子会击中这一点。现在，如果同时打开两道狭缝，我们可以推断出，会有相同百分比的电子（甚至更多）击中P点。奇怪的是，这时却形成了干涉图样，这意味着两道狭缝都打开时，在P点探测到的电子可能少于x。因此，在测量行为（波函数的崩溃）之前，电子的行为似乎是一种自干涉的波。然而，如果把探测器放置在两道狭缝中，电子只能在狭缝之一中被检

测到。有许多优秀的科普书籍对量子世界的奇特性质提供了很好的描述，包括Rae, 1986; Greene, 2004; Carroll, 2010。

13 更糟的是，由量子力学和广义相对论结合而来的惠勒-德维特方程，甚至更进一步地暗示了一个根本不存在时间的宇宙（Barbour, 1999）。

9:00 物理学中时间的空间化

1 Zeh, 1989/2007, 199.

2 这是一项思想实验，所以最好不要深思细节——比如，就与我们定义相关的地方来说，宇宙飞船的速度，地球本身在运动的事实，以及篮球比赛通常不在露天体育场进行。

3 更具体地说，所有相较于惯性坐标系匀速运动的观察者。

4 在低速情况下，考虑到狭义相对论，这一线性总和完美地匹配真实速度，它的速度为399.999999999989公里/小时。

5 该方程假设我们在 $t=0$ 时同步手表，此时，我们置身同一个地方，我们在自己的坐标系中，将各自的位置定义为 $x^{\text{you}}=x^{\text{me}}=0$ 。

6 在这一点上，你可能会想：且慢，既然从任何一个角度看，我们之间的速度都是一样的，所以火车上的人也会计算出我的一年相当于火车上的人的22年。这个问题是所谓的孪生悖论的核心。在空间中的不同位置比较时钟是一种不明智的做法；更有效的做法是等两名观察者都回到空间中的同一位置后比较时钟（年龄）——也就是等你回到站台平台后。回来后，我们会看到火车上的人比站台上的人年轻得多。造成这种不对称的一个原因是，火车上的人必须改变参照系，而站台上的人则保持在同一参照系。总之，站台上的人走过的时空间隔比火车上的人经过的时空间隔要大，而这一时空间隔就是时钟时间（所谓的本征时间）。孪生悖论的讨论见Lockwood, 2005; Lasky, 2012.

7 Hafele and Keating, 1972b, a. 地球当然不是静止的物体：例如，相较于太阳，它在运动。不过，就此处讨论的目的而言，我们可以把地球的中心看作一个有效的固定参照系。但因为地球在旋转，所以东向飞行的飞机的速度应该加上地球的转速；因此，向东走的时钟比陆地上的时钟走得快，

导致时钟变慢。Hafele和Keating也在西向航班上放置了时钟，由于西向飞行有效地抵消了地球的转速，这些时钟产生了狭义相对论所预期的运动加速。由于飞机上的时钟也处于较弱的引力场中，他们还必须考虑到广义相对论的预测，这也在本项研究中得到了证实。

8 因为狭义相对论指出，在极高速度时，时间膨胀而空间收缩，所以，从我的视角来看，火车的长度实际上会更长。我在这一思想实验里忽略了这个事实，简化了实验。但是空间收缩并没有改变结果，因为从我的参照系来看，你仍然站在火车的中间，而向前和向后的子弹仍然分别从火车后部和前部走完相同的距离。

9 本例中，我将两个观察者放在距离列车后部和前部相同的位置，试图表明列车前后的传输延迟应该是相同的。但我们可以假想顺着站台摆上一排同步的时钟，一等临近的车窗破碎就停止。这些时钟会告诉我们，前后车窗是在不同的时间碎掉的。

10 有关同时性的相对性，更侧重技术和历史的讨论请见Brown, 2005。

11 Rietdijk, 1966; Putnam, 1967.

12 值得注意的是，绝对同时性的丧失这一论点，必定支持块体宇宙的概念，但仅此而已。有人可能会说，从狭义相对论中学到的真正一课不是我们生活在块体宇宙，而是同时性的概念是牛顿绝对时间概念的残余。或许，追问两件相隔遥远的事件是否同时发生没有意义：毕竟，确定两件遥远的事件是否同时发生，唯一方法是使用时钟，而时钟只能在局部空间体中测量时间的变化。

13 卡尔·波普尔也回忆过一次讨论，在那次讨论中，爱因斯坦确认他接受了块体宇宙的观点（Popper, 1992）。在谈话中，波普尔称爱因斯坦为古希腊哲学家帕梅尼德斯，帕梅尼德斯认为万物恒久存在。

14 Cited in Prigogine and Stengers, 1984, 214.

15 Penrose, 1989, 394.

16 Davies, 1995, 283.

17 Barbour, 1999, 267.

18 Greene, 2004.

19 Schuster et al., 2004.

20 Panagiotaropoulos et al., 2012; Kandel et al., 2013; Purdon et al., 2013; Baker et al., 2014; Ishizawa et al., 2016.

21 许多物理过程，包括生命、温度或粒子的速度，都是根据系统如何随时间变化来定义的。但重要的是要明白，这些都不代表反对永恒论观点，因为永恒论接受时空时间轴上正在发生的变化！我认为，意识在根本上有所不同，因为根据巴伯和格林的时刻内时刻假设，我们必须在单一的“帧”内有意识。

22 平克的完整引文：“几乎不可能想象从一个人的意识中消除时间，只留下最后部分就像被卡住的汽车喇叭一样一动不动，却还仍然拥有完整的思维。笛卡尔认为肉体和精神的区别就在于此。物质在空间中延伸，但意识必定在时间中存在，一如它从‘我思’前进到了‘我在’。”

23 Lockwood, 2005.

24 空间相对论方程表明，如果真的存在假想中速度超过光速的粒子（tachions），就有可能把信号顺着时间反向发送——有可能改变过去。严格地说，这不是一种时间旅行的形式，而是过去与未来的交流。

25 Greene, 2004.

10:00 神经科学中的时间空间化

1 Quoted from Papert, 1999. 我未能找到对这句引言的独立确认。

2 Quoted from Droit-Volet, 2003.

3 Piaget, 1946/1969.

4 Siegler and Richards, 1979. See also Matsuda, 1996.

5 Piaget, 1946/1969, 279.

6 Walsh, 2003; Nunez and Cooperrider, 2013; Bender and Beller, 2014.

7 Nunez and Cooperrider, 2013.

8 Lakoff and Johnson, 1980/2003.

9 Nunez and Sweetser, 2006.

10 McGlone and Harding, 1998; Boroditsky and Ramscar, 2002.

11 Lakoff and Johnson, 1980/2003.

12 Price-Williams, 1954.

13 Huang and Jones, 1982. 卡帕效应和托效应已在多项包括视觉和躯体感觉模式的不同研究中得到证明 (Helson and King, 1931; Cohen et al., 1953; Sarrazin et al., 2004; Goldreich, 2007; Grondin et al., 2011)。

14 Casasanto and Boroditsky, 2008. 另一项类似的研究也确认距离影响时间判断的不对称关系 (以及反过来的情形)。Coull et al., 2015.

15 Walsh, 2003; Buetti and Walsh, 2009.

16 Xuan et al., 2007; Hayashi et al., 2013; Cai and Wang, 2014.

17 Ishihara et al., 2008; Kiesel and Vierck, 2009.

18 Saj et al., 2014.

19 Pastalkova et al., 2008; Kraus et al., 2013; Genovesio and Tsujimoto, 2014.

20 See Calaprice, 2005.

21 必须指出, 如果我们认为, 卡帕实验中在受试者要在另一参照系中观察快速运动的物体, 她的时钟将有效加快——换言之, 她将测量到流逝了更多的时间, 类似孪生悖论中的那个保持静止的兄弟 (Goldreich, 2007)。从这个意义上说, 卡帕效应类似狭义相对论。但另一方面, 在狭义相对论中, 距离和时间之间存在绝对的权衡。就局部而言, 速度和运行时间是负相关的, 而在卡帕效应中, 感知的持续时间和速度是成比例的。

22 例如, 皮亚杰指出: “虽说看似矛盾, 爱因斯坦理论中相对持续时间和本征时间与绝对时间相关, 一如绝对时间与孩子直觉里的个体时间和局

部时间相关。”引用自Sauer, 2014。然而, “在宏观宇宙中, 时间从属于速度仍然是一种基本关系, 因为在高速状态下, 相对性时间所遭遇的困境, 和小孩子对时间的概念是一样的, 而且它还假设了时间相对于特定速度的从属关系。” (Piaget, 1972)。

23 请注意, 这一点与我在前一章所提及的时间流逝的主观感知观点完全不同。我们对时间流逝的主观感知, 独立于无数时间错觉带来的扭曲, 必须使用一种既符合物理学又符合神经科学的方式来解释。

24 把以往经验和当前最佳估计结合运用的整体策略, 叫作贝叶斯决策理论 (Kording, 2007), 据信可以解释感知和决策的许多方面, 包括做出时间判断 (Collyer, 1976; Goldreich, 2007; Jazayeri and Shadlen, 2010)。

25 Smolin, 2013.

26 这一点, 与我们在直觉上倾向于现在论 (因为只有当下似乎是真切的) 的事实有着微妙的不同。这里的重点是, 鉴于我们把时间在抽象和数学上描述为类似空间的维度, 也许我们会偏向倾向于永恒论, 因为人类似乎把时间概念化为空间。

11:00 精神时间旅行

1

<http://www.nytimes.com/2011/04/21/world/asia/21stones.html> (5/15/2015)。

2 Suddendorf and Corballis, 1997, 2007.

3 Tulving, 2005.

4 Taylor et al., 1994.

5 Hassabis et al., 2007; Race et al., 2011; Kwan et al., 2012.

6 Tulving, 1985.

7 Gilbert, 2007.

8 Clayton and Dickinson, 1999; Raby et al., 2007; Clayton et al., 2009.

9 Osvath and Persson, 2013; Bourjade et al., 2014; Scarf et al., 2014. 讨论动物精神时间旅行的书籍，有两本很通俗的作品：Corballis, 2011; Suddendorf, 2013.

10 <http://www.spectator.co.uk/features/5896113/if-we-have-souls-then-so-do-chimps/> (5/15/2015) .

11 Gordon, 2004. “The Pirahas have no notion of their age, nor of time concepts like ‘how long have you known....’ ” Personal communication from Daniel Everett (3/4/2009) .

12 Everett, 2008, 132.

13 Colapinto, 2007.

14 心理学家试图对人们的时间观进行分类。例如，津巴多时间观量表要求人们用5分制量表来评价自己对以下陈述的认同程度：你真的无法为未来做计划，因为事情变化太大；想到我的过去，我感到快乐；事情很少像我期待中那样进展顺利。根据答案，人们的时间观分为：过去消极观、过去积极观、当下宿命论观、当下享乐主义观、以及未来观（Zimbardo and Boyd, 2008）。

15 <http://www.cbsnews.com/news/sea-gypsies-saw-signs-in-the-waves/> (5/15/2015) .

16 <http://money.usnews.com/money/blogs/the-best-life/2013/06/20/retirement-shortfall-may-top-14-trillion> (12/9/2015) .

17 James Surowiecki简短地讨论过养老基金的长期问题，Surowiecki, 2013。马克·吐温的引言也来自他的这篇文章。

18 Kable and Glimcher, 2007.

19 Critchfield and Kollins, 2001; Wittmann and Paulus, 2007; Seeyave et al., 2009; MacKillop et al., 2011.

20 Frederick et al., 2002.

21 Prelec and Simester, 2001; Raghurir and Srivastava, 2008.

22 我之所以这样说，是因为这些奖励最终是由零售商支付的信用卡费用买单的，故此，零售商在定价时必然会考虑到这些费用。

23 Buonomano, 2011, ch. 4.

24 Peters and Biichel, 2010. See also Hakimi and Hare, 2015.

25 Herculano-Houzel, 2009; Fox, 2011.

26 Purves et al., 2008.

27 Jacobs et al., 2001; Wood and Grafman, 2003; Wise, 2008; Fuster and Bressler, 2014.

28 Atance and O' Neill, 2001; Fuster and Bressler, 2014.

29 Sellitto et al., 2010; Peters, 2011. 我在这里做了过多的简化，因为前额叶皮层实际上还可进一步细分为许多不同的区域，其中一些区域据推测偏向于短期奖赏。

30 McClure et al., 2004.

31 Botzung et al., 2008; Benoit and Schacter, 2015.

32 Hassabis et al., 2007; Race et al., 2011; Kwan et al., 2012.

33 Gilbert, 2007; Killingsworth and Gilbert, 2010.

34 Everett, 2008, 273.

12:00 意识：过去和未来的结合

1 Burr et al., 1994; Yarrow et al., 2001.

2 Koch, 2004.

3 Kanabus et al., 2002; Alais and Cass, 2010.

4 Van Wassenhove et al., 2007; Megevand et al., 2013. 关于耳朵和眼睛处理听觉和视觉信号的延迟，还有一个因素我在这里并未详细说明。与听觉相比，视觉实际上相当缓慢。

5 我把这个故事说得简单化了一点；实际上，视觉系统确实存在内置的延迟。来自视网膜的视觉信息到达视觉皮层，可能比来自耳蜗的信息到达听觉皮层整整慢上50毫秒。这种固有的延迟，主要是由于视网膜的光转导比耳蜗的机械转导慢得多。

6 Fujisaki et al., 2004; Toida et al., 2014; Van der Burg et al., 2015.

7 Geldard and Sherrick, 1972; Kilgard and Merzenich, 1995; Goldreich and Tong, 2013.

8 Dennett, 1991; Buonomano, 2011; Herzog et al., 2016.

9 See for example Dehaene and Changeux, 2011; Kandel, 2013.

10 Lamy et al., 2009). See also Salti et al., 2015.

11 Dehaene, 2014, 126. 滞后操作（刺激出现后400毫秒）能改变对刺激的意识感知，另一个例子可见Scharnowski et al., 2009; Sergent et al., 2013.

12 自由意志这一主题在哲学史上源远流长，最近又出现了关于自由意志的神经科学。作为介绍，我推荐以下文章：Montague, 2008; Haggard, 2011; Nichols, 2011; Smith, 2011; and books: Dennett, 2003; Harris, 2012.

13 Definition#2, <http://www.oed.com/view/Entry/74438> (12/30/2015) .

14 Montague, 2008.

15 Hawking, 1996.

16 Penrose, 1989, 558.

17 Lockwood, 2005.

18 不过，有人认为这种选择的感觉是一种幻觉，一经更仔细的分析就会分崩离析（Harris, 2012）。

19 Wegner, 2002.

20 Hume, 1739/2000.

21 Huxley, 1894/1911, 244.

22 Fried et al., 2011.

23 Libet et al., 1983; Lau et al., 2007; Haggard, 2008; Soon et al., 2008; Murakami et al., 2014.

24 Haggard, 2011.

25 Dehaene, 2014, 91. 作者Adam Gopnik使用发言人的比喻来表达这一概念：“我们所说的意识只是一种幻觉，它与我们真正思维运作的关系，就像白宫新闻发言人之于美国总统掌管下白宫的运作：暗中隐藏的力量产生感觉、做出决策，它冲动、不理性的目的，要到事后很久才能为意识察觉，而意识的作用，就是给前述感觉和决定寻找系统性合理理由的。”（The New Yorker, July 4, 2005）。

26 Gazzaniga and Steven, 2005; Gazzaniga, 2011.

27 引自“Tomorrow never was” by Zeeya Merali (Discover, June 2015)。

28 Nichols, 2011; Shariff and Vohs, 2014.

29 按照《标准刑法典》此处的3种情况可大致对应以下精神状态：故意、鲁莽/疏忽，和无过错责任（也叫严格责任）。

30 这里，我指的是惠勒-德维特方程，它旨在把广义相对论和量子力学结合起来。令许多人困惑的是，这种尝试带来了一个没有时间参数的方程，明显可推出时间本身不存在的结论——这一观点是由Julian Barbour和Carlos Rovelli等物理学家提出的。在量子力学和惠勒-德维特方程中对时间的精彩论述，见Barbour, 1999; Rovelli, 2004; Lockwood, 2005; Callender, 2010a; Smolin, 2013.

31 Koch, 2004; Dehaene, 2014.