

借道

论一个结果被换一条路达成之后，为什么以结果为准的读数与自己的感觉都不会报警——以及唯一能把它读出来的那个量

运动控制 × 古典舞技术与舞蹈医学 × 学习心理学

作者 王德生 + Claude

栏目 学科通融 · 站外碰撞

篇幅

发表 2026年8月1日

摘 要

同一个结果可以由不同的内部路径达成。运动控制说这是韧性的来源，因为不影响任务结果的偏差不该被纠正；古典舞教学说这是必须被纠正的技术错误，因为外形对了而路径错了迟早出事；学习心理学说这只是表现与能力可能背离的又一个例子，而人的主观掌握感由省力驱动，因此站在错的一边。三种读法不能同时成立。三家共有一个未说出的前提：路径的可用性是一个存量，由体质、训练与教学决定，不由「最近用了哪一条」决定。三家的材料合起来只能得出：结果等价的那些方向上，任务不提供任何把动作拉回原处的力，而成本会在那里推；于是每一次借用替代路径，都在降低下一次不借的可能，而结果读数对此恒为零、自己的感觉对此符号为正。本文把这个过程称为借道，把唯一能读出它的操作称为剥夺落差：临时封掉替代路径，量结果跌多少、多久回得来。第十一、十二节在一个可以真封路的学习系统里把这套测量整个跑了一遍，并如实报告它打掉了本文四条预测里的两条。

这一篇由哪三个领域的争论撞成

三边对「同一个结果由不同的内部路径达成意味着什么」给出互相排斥的答案：运动控制说不影响结果的偏差不该纠正、多条路径就是韧性；古典舞教学说必须规定路径而不只规定结果，因为替代路径会固化并致病；学习心理学说主观掌握感由省力驱动，因此在这件事上系统性地站在错的一边。三家共有一个未说出的前提：路径的可用性是一个存量。而三家的材料合起来只能得出：它是一个流量，方向由使用决定，而任务对这个方向不提供任何回复力。

运动控制 · 不纠正才是最优的

[Todorov & Jordan, Optimal feedback control as a theory of motor coordination \(Nature Neuroscience, 2002\)](#) ; 另见 [Scholz & Schöner, The uncontrolled manifold concept \(Experimental Brain Research, 1999\)](#)

在有噪声的系统里，只纠正会影响任务目标的偏差是最优策略：纠正其余偏差要消耗控制信号，而控制信号本身带噪声。由此得出的推论是变异会在与任务无关的方向上累积。这一支据此把多条路径读作应对扰动的余量，主张训练该扩大它而不是压缩它——它默认了那些路径在被使用之后彼此的可用性不变。

<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/12404008/>

古典舞技术与舞蹈医学 · 必须规定路径

[Coplan, Ballet dancer's turnout and its relationship to self-reported injury \(JOSPT, 2002\)](#) ; 另见 [Kaufmann et al., Does forced or compensated turnout lead to musculoskeletal injuries in dancers? \(Journal of Biomechanics, 2021\)](#)

量的不是外开角度本身，而是站出来的外开减去被动髋外旋所能提供的角度：有伤组这个差额平均二十五点四度，无伤组四点七度。芭蕾教学法据此立下一条规定路径而非规定结果的硬规矩——从髋部转，不许从膝盖足借。后一份系统综述则诚实地指出，因果链比横断面相关复杂得多。

<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/12449258/>

学习心理学 · 省力感站在错的一边

[Bjork, Dunlosky & Kornell, Self-regulated learning: beliefs, techniques, and illusions \(Annual Review of Psychology, 2013\)](#)

一些使当下表现变差的练习条件会改善长期保持，而学习者系统性地偏好使当下表现变好的条件。更要紧的是判断的依据：人对自己掌握程度的估计主要来自加工的流畅感，而流畅感就是省力的读数。这个偏差不因被告知而消失，也不因为经验而减弱——它把最该被怀疑的那个信号，变成了最被信任的那个。

<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/23020639/>

目 录

一、三个不相干的现场	5
二、三家各自说到了哪一步	5
三、三家共有的那一条，没有人查过.....	7
四、没有回复力的方向	8
五、那个方向上有一个坡	8
六、借道.....	9
七、为什么以结果为准的读数必然沉默.....	11
八、为什么主观读数的符号是反的	11
九、两根轴，四种局面	12
十、四步查法与剥夺落差	13
十一、把整套做完一遍：一个可以真封路的系统.....	15
十二、数据打掉了本文四条预测里的两条.....	17
十三、这与「有益的变异」不是一回事.....	19

十四、这与「习得性废用」不是一回事.....	20
十五、这与「从来没学会」不是一回事.....	21
十六、这与「人被移出回路」不是一回事.....	22
十七、这与「合意难度」不是一回事.....	22
十八、与同栏几篇的分界	23
十九、逐领域兑现	25
二十、三处让步与一个可以算出来的盈亏平衡点.....	26
二十一、可以判本文错的八种结果	27
二十二、把它做成指标会发生什么	27
二十三、本文自己在哪一格	28
结 论：一条写死日期的赌注	29
注 释.....	29

一、三个不相干的现场

第一个现场在芭蕾教室。一个十四岁的学生站在一位，双脚外开接近一百八十度。老师从侧面看了三秒，说：收回去，你在用脚踝借。学生收回去，外开掉到一百二十度，动作立刻变得不好看。她不明白：既然站出来的样子是对的，为什么要退回一个更难看的位置。

第二个现场在运动医学的实验室。一名前交叉韧带重建术后的运动员做单腿跳远，患侧与健侧的距离比是百分之九十七，达到了几乎所有回归赛场清单的标准。同一次测量里，患侧膝关节在蹬伸阶段做的功只有健侧的百分之六十九，缺掉的那部分由髋关节与躯干补上了。^[1] 跳出去的距离不知道这件事。这名运动员本人也不知道。

第三个现场在心理学实验室，跟身体没有关系。学生用两种方式复习同一份材料：反复重读，或者不看材料自己回忆。重读那一组当场感觉更流畅，对自己掌握程度的判断更高，而一周后的保持成绩更差。这个反差被反复复制了几十年，稳定到已经进了教科书。^[2]

三个现场看上去互不相干。把它们摆在一起，会浮出一个三方都没有单独提出的问题：**当一个结果可以由几条不同的内部路径达成时，究竟是什么在决定用哪一条？**

这个问题听上去像运动科学的家务事。它不是。任何一个只看结果、不问过程的评价系统，只要它面对的是一个会学习的执行者，就会遇到同一件事。本文要论证的是：在这类系统里，路径的分布不会停在原处，它会朝一个固定方向移动；而移动的全部代价，落在一个从来没有人测量的量上。

本文的走法是这样。第二节列出三家各自说到哪一步。第三节指出三家共有而无人检查的那一条前提。第四、五节给出机制的两半。第六到第十节给出判断、两根轴与唯一的测量操作。**第十一、十二节把这套测量在一个可以真封路的系统里整个跑一遍，并如实报告它打掉了本文四条预测里的两条。**第十三到十八节与最容易混淆的几种说法分界，其余各节给出兑现、让步、失败条件、反噬与本文自己的位置。

二、三家各自说到了哪一步

2.1 运动控制：冗余是资源，不纠正才是最优的

人体的自由度远多于任务所需。伯恩斯坦留下的那句话常被引用：熟练的动作是没有重复的重复。半个世纪后，这句话得到了一个数学上干净的解释。

不受控流形方法把动作的变异分成两类：改变任务结果的，和不改变任务结果的。测量反复表明，熟练者在后一类方向上的变异更大，不是更小。^[3] 随机最优反馈控制给出了理由：在有噪声的系统里，只纠正会影响任务目标的偏差是最优策略，纠正其余偏差要付出控制成本而没有收益。这条被称为最小干预原理。^[4]

这条原理有一个直接推论，提出者本人写得很清楚：噪声在所有方向上扰动系统，因此**变异会在与任务无关的方向上累积**。

在这个框架里，多条路径能达成同一结果是好事。它是应对扰动的余量，是迁移的基础，是训练应当扩大而不是压缩的东西。这条思路在教学法上有明确落地：放宽约束让学习者自己找解，甚至主动往练习里加噪声，让人每一次都做得不太一样。

这一家的主张压成一句：不影响结果的差异不必管，管它反而有害。

2.2 古典舞：外形是标准，路径是内容

芭蕾的外开是一个极端例子。理想外开要求双脚成一百八十度，而人的髋关节被动外旋一般在四十五度上下，两条腿加起来九十度左右。文献估计外开总量里髋关节贡献大约百分之五十到七十，其余来自膝、小腿、踝与足。绝大多数舞者达不到解剖学上的理想值。

于是有了一个专门的说法：强迫外开。做法是把差额从下面补上——胫骨相对股骨外旋、距下与中足过度旋前、腰椎前凸增加。从外面看，这个位置与一个天生髋外旋充裕的舞者站出来的位置几乎一样。

一项比较自报有伤史与无伤史两组芭蕾舞者的研究，量的不是外开角度本身，而是「站出来的外开」减去「被动髋外旋能给的外开」这个差额：有伤组平均二十五点四度，无伤组四点七度，差异显著。^[5] 后续的三维足部模型研究描述了这条补偿的解剖路径：后足外翻、中足外展、内侧纵弓下降。一份系统综述则给出一个诚实的限制：强迫外开与损伤之间的因果链比横断面相关复杂得多，现有证据不足以支持简单的单因果说法。^[6]

无论因果强度如何，芭蕾教学法在实践上早就给了自己的答案，而且是一条硬规矩：**从髋部转，不许从膝、踝、足借**。这条规矩的特别之处在于，它规定的不是结果，是路径。一个学生可以完全达到外形标准而被判为做错了。

这一家的主张压成一句：同一个外形由不同路径达成不是等价的，替代路径会固化并致病，所以必须规定路径。

2.3 学习心理学：读数会骗人，而且朝一个固定方向骗

合意难度说的是：一些使当下表现变差的练习安排——间隔、交错、变异、提取而非重读——会使长期保持变好；反过来，使当下表现变好的安排常常损害长期保持。

更要紧的是第二层。学习者对自己掌握程度的判断，主要依据加工的流畅感。^[7] 流畅感是省力的直接读数。于是产生一个方向固定的偏差：**越省力的学习方式，人越觉得有效，而它往往越无效**。^[2] 这个偏差不因为被告知而消失，也不因为经验而减弱。

运动学习里有一个平行的区分：结果知识与表现知识。前者告诉执行者做成了什么，后者告诉他是怎么做的。日常生活中绝大部分反馈是结果知识——球进了没有，跳多远，音准不准。表现知识需要外部设备或一位懂行的观察者，成本高得多，因此稀缺。

这一家的主张压成一句：当下表现与长期能力可以背离，而主观掌握感由省力驱动，因此系统性地站在错的一边。

2.4 三家为什么不能同时对

第一家与第二家不能同真。 最小干预原理说，不影响任务结果的偏差不该被纠正，纠正要付控制成本而无收益。芭蕾教学法说，恰恰是这些不影响外形的偏差必须被纠正，因为它们是后来那些问题的来源。一方判为最优的策略，另一方判为病根。这不是侧重不同，是同一个动作两种相反的处置。

第一家与第三家不能同真。 第一家把变异的存在归给控制策略在当下的最优性——它是无历史的、随时可重新求解的。第三家把表现与能力的背离归给学习历史的累积与元认知的系统偏差——它是有历史的、不可当场撤销的。第一家还把省力当作效率的证据，第三家把省力感当作最不可信的读数。

第二家与第三家不能同真，而且这一对最尖锐。 整个芭蕾教学法建立在一个假设上：一位有经验的老师能从外面看出学生从哪里借的力。第三家的证据说，观察者与执行者会被同一个线索欺骗——看上去省力就是做得好。而这恰恰是古典舞审美的第一原则：举重若轻。**舞蹈把借力最强的信号，定义成了美。**

三家都不肯让步，三家各自都有对手消化不了的硬证据。这种局面通常意味着，问题不在这三条之间，而在它们共有的某个东西上。

三、三家共有的那一条，没有人查过

把三家的语言并排看，会发现一个词从来没有被追问过：路径的**可用性**。

第一家默认可用性是一个稳定的集合。最优反馈控制在每一个时刻求解一次控制律，它假定可选方案在那里等着被选。今天能用的，明天也能用；用了甲，不影响乙。冗余之所以是韧性，正因为这一点——扰动来了，还有别的路可走。

第二家默认可用性是一个可以被教学纠正的状态。老师看出你在借，你就改回来。改不回来算态度问题或柔韧度问题，不算另一类问题。

第三家根本不谈路径。它谈练习安排、提取难度、元认知判断，它的自变量是**外部条件**——间隔多长、要不要看着材料、什么时候测。个体在同一份练习安排下内部怎么分配，不在它的视野里。

三家共有的前提可以写成一句：**路径的可用性是一个存量，它由体质、训练与教学决定，不由「最近用了哪一条」决定。**

这条前提没有被任何一家检验过，因为在任何一家的框架里，它都不是一个变量。

而它是错的，至少在有学习的系统里是错的。使用依赖的可塑性是神经科学里最不新鲜的事实之一：一条通路被使用会被强化，长期不被使用会退化。把这条众所周知的事实与上面三家放在一起，得到的不是三家里任何一家的结论，而是：**路径的可用性是一个流量，它的方向由使用决定；而使用由什么决定，正是三家吵而未决的那件事。**

余下的论证分两步。第四节说明，在结果等价的那些方向上，任务不提供任何把动作拉回原处的力。第五节说明，在同一批方向上，另有东西在推。

四、没有回复力的方向

先把话说准。最小干预原理不是一条关于人应该怎么做的建议。它是一条关于最优控制器长什么样的推论：在有信号依赖噪声的系统里，纠正与任务目标无关的偏差要消耗控制信号，而控制信号本身带噪声。结果是，纠正它们会使任务表现变差，不是变好。

这条推论的经验证据很扎实。不受控流形的测量在指力、姿势、投掷、行走等多种任务里得到同一个形状：影响结果的方向上变异被压得很小，不影响结果的方向上变异大得多，而且熟练者的这个对比更明显，不是更弱。

现在把它翻译成本文需要的语言。一个负反馈系统的稳定，来自偏离时被推回去的那个力。在影响结果的方向上，这个力存在，由任务本身提供——手偏了，球没进，下一次就得纠。在不影响结果的方向上，这个力等于零。不是很小，是零，而且是被证明为最优的零。

一个没有回复力的方向意味着什么？意味着这个方向上的位置不由任务决定。系统停在哪里，取决于别的东西。

最优控制那一支指出的后果是：噪声会使变异在这些方向上累积。这是一个关于方差的说法——分布会变宽。

本文要说的是关于均值的说法：如果在这些方向上除了噪声之外还存在一个有方向的力，那么分布不只会变宽，它的中心会移动。而这个移动，任务永远不会把它拉回来，因为任务对它无感。

结果等价的那些自由度，是一片没有回程票的地形。

那里有没有一个有方向的力？有，而且不止一个。

五、那个方向上有一个坡

至少三种成本在这些方向上提供梯度。它们的共同点是：都与任务结果无关，因此都不被任务的反馈回路管；都是单调的，因此提供的是坡而不是井。

5.1 代谢成本

人会挑省能量的动作方式，这不新鲜。新鲜的是它发生得多快。

一项研究用外骨骼人为改变了走路时步频与能耗的关系，把能耗最低点挪到平常偏好之外。受试者在几分钟之内就把步频挪了过去，收敛到新的能耗最优点。^[8] 他们不需要几年，不需要教学，也不需要知道发

生了什么。同一条线后来的工作进一步表明，这个优化过程可以是**内隐**的——人在没有意识到的情况下完成它。^[9]

这条证据同时给了三样东西：坡是真的；坡在个体的时间尺度上起作用，不是演化尺度；并且它不经过意识。

同一批工作也交出一条限制，本文照实转述：自然状态下的步态变异未必足以启动这个优化，探索似乎需要被推动。^[10] 这条限制会在第二十一节被写成一条可以推翻本文的判据。

5.2 疼痛与不适

疼痛适应的一条理论，核心是一句：疼痛导致活动在肌肉内部与肌肉之间的**重新分配**——一些运动单元降低放电率或被撤出，另一些此前不活跃的被招募进来。^[11] 作者明确指出，这种重分配短期是保护性的，长期可能有害。

要注意这里的量级。疼痛不需要达到临床水平。任何一点持续的不适——一处发紧、一个角度上的轻微牵拉感——都足以在没有回复力的方向上提供一个稳定的偏置。而它同样是内隐的：没有人在做动作时决定要绕开那个角度。

5.3 注意力与认知负荷

第三个坡最弱，覆盖面最广。人会回避需要更多认知控制的选项，这在实验室里被反复测到。^[12] 一条需要持续监控的路径，与一条可以放手不管的路径，如果结果一样，后者会被选中。

熟练化本身就在制造这个坡。自动化阶段的定义就是所需注意力的下降。在结果等价的方向上，自动化不区分「变熟练」与「变省事」，因为在那些方向上，这两件事没有外部读数可以分开。

5.4 三个坡合起来

这三种成本的方向未必一致——最省能量的路径未必最不疼。但它们有一个共同性质：**都不是任务的函数**。任务不知道你花了多少能量、疼不疼、费不费神；任务只知道结果。

于是在结果等价的自由度上，出现了一个特定的形状：任务提供零回复力，成本提供非零梯度。这个形状唯一可能的长期行为是移动，而移动的方向由成本定，与任务无关。

六、借道

现在可以把判断写出来。

一个结果由替代路径达成，既不是韧性的证明，也不是一次可被纠正的技术错误，而是一次**不需要偿还、却会降低下一次不借的可能性的占用**。

本文把这个过程称为**借道**。

这个词是有意选的。它在两个领域里已经是行话——舞蹈教师说借力，康复治疗师说代偿——而它带的那点日常语义正好可以拿来做对照：借东西通常要还，还了之后原状恢复。借道不是这样。借道不用还，而这正是它的危险所在。代价不在还款，而在于：那条被绕开的路，在没有人看的情况下自己塌了一段。

机制是三步：

第一步 · 触发。 在结果等价的方向上出现一个成本差。它可以来自解剖限制（髋外旋不够），来自一次损伤（膝关节疼），来自疲劳，来自一件工具（有导航就不用记路），也可以什么都不为——只是那条路稍微省一点力。**触发不需要失败，也不需要疼痛达到临床水平。** 这一点后面会反复用到。

第二步 · 达成。 系统沿成本梯度重新分配，用替代路径达成同一结果。结果达成了，因此没有任何纠错信号产生。这一步是最优反馈控制预言的，不是异常。

第三步 · 沉默中的固化。 使用依赖的可塑性在这一步起作用：被用的通路被强化，被绕开的通路缺乏输入。下一次面对同一任务时，两条路径各自的成本已经不同于上一次——不是因为环境变了，是因为上一次的选择改变了它们。

这三步里最要紧的是：整个过程中**没有任何一次的结果读数发生变化。**

一个必须先说清楚的限定：借道是关于**同一个执行者在同一个任务上**的过程，不是关于分工，也不是关于工具本身。用计算器不是借道，除非你在某个时刻需要不用它。这条限定在第二十章会被展开成一条硬约束。

6.1 一个最小的形式陈述

把上面写紧一点，可以避免后面的争论落在措辞上。

设某任务的结果为 R ，由若干内部变量共同决定。把这些变量所在的空间分成两块：改变 R 的方向，和不改变 R 的方向。后者记为 N ，即结果等价的自由度。

在 N 上，任务提供的回复力为零，这一条由最小干预原理给出。设 N 上另有一个成本函数 C （代谢、疼痛、注意力的加权和），其梯度不为零。于是系统在 N 上的位置服从一个只有移动项和噪声项、没有回复项的过程：

$$\text{位置的变化} = \text{一个沿负梯度方向的项} + \text{噪声}$$

再加上第三步给出的反馈： C 本身依赖历史。被反复使用的方向变得更便宜，被绕开方向变得更贵。

这个陈述有三个可以直接读出的推论，后面各节要用：

其一， **R 的读数不含位置的信息。** 系统在 N 上走到哪里， R 都不变，这是 N 的定义。

其二，**唯一能把位置读出来的办法，是改变任务，使 N 的一部分不再属于 N 。** 封闭替代路径正是在做这件事：把原本不影响结果的方向，临时变成影响结果的方向。

其三，位置的移动速度取决于成本梯度的大小，**与练得好不好没有关系。**

七、为什么以结果为准的读数必然沉默

沉默不是因为测得不够仔细，是因为读数的定义。

一个结果指标之所以是结果指标，正因为它对达成方式无感。跳远的距离不区分是膝关节做的功还是髌关节做的功；外开的角度不区分是髌外旋还是足旋前；考试的分数不区分是理解了还是记住了模板。**如果一个指标能区分路径，它就不再是结果指标，而是过程指标。**

这不是抱怨，是同义反复。而正是这个同义反复，构成了借道的掩护。

回到第一节第二个现场，数字值得再看一遍。那组术后运动员单腿跳远距离的患健比是百分之九十七，标准差四个百分点；同一组人在同一个动作里，膝关节蹬伸做功的患健比是百分之六十九。跳落阶段，患侧膝吸收的功少于健侧，而健侧膝吸收的功多于对照组——也就是说，代偿不只发生在患肢内部的关节之间，还发生在两条腿之间。作者的结论写得很直接：跳出的距离主要反映的是髌和踝的功能，它不是一个好的膝关节功能指标。^[1]

另一项针对青少年的研究把这个图景补完了：达到距离对称的那一批人把负荷从膝转到了髌，没达到对称的那一批转到了踝。两批人都在卸载膝关节，区别只在于卸给了谁。^[13]

这里最值得停一下的是，**距离对称的那一批人问题并不更小。**他们只是把代偿做得更成功。而回归赛场的清单看的正是距离对称。

同样的结构出现在外开上。第二节引的那项研究量的不是外开角度本身——那个量在有伤组与无伤组之间区分能力有限——而是外开角度**减去**被动髌外旋可提供的角度。换句话说：结果读数（外开多少度）不带信息，两个读数相减才带信息，而那个减数需要单独测量、需要设备、需要有人认认为值得测。

一个一般的说法：**要看见借道，必须同时拿到结果读数和至少一个路径读数，并做差。**任何单一的结果读数，无论多精确，都对它零信息量。这不是精度问题，是维度问题。

八、为什么主观读数的符号是反的

上一节的结论如果只到这里，问题还不算严重——测得更细就是了。真正的麻烦在这一节。

在所有读数里，有一类是免费的、连续的、每个执行者都有的：**主观感受**。做得顺不顺，累不累，费不费劲。如果这类读数对借道敏感，那么执行者自己就是最好的探测器，外部测量只是辅助。

它确实敏感。但符号是反的。

人对自己学习状况的判断主要依据加工的流畅感，而流畅感本身就是省力的读数。^[7] 把它接到第五节，这条链就完整了：

借道 → 动作更省力 → 流畅感上升 → 主观掌握感上升。

唯一的一个对借道敏感的免费读数，在借道发生时朝好的方向动。

这一步把问题从「看不见」升级为「看见的是反的」。看不见还可以靠增加测量来补；看见的是反的，意味着执行者的每一次自我评估都在为借道背书，而增加测量会遇到执行者的抵抗——因为他有充分的主观理由相信自己在进步。

有三个可核对的旁证。

其一，步态的能耗优化可以在内隐的情况下完成。^[9] 人不知道自己改了，因此也没有可以自陈的内容。这意味着「你觉得你是怎么做的」这个问题在这里没有诊断价值——不是因为人不诚实，是因为信息不在那里。

其二，疼痛下的重分配同样不经过决策。没有人在疼的时候决定改用另一组运动单元。

其三，古典舞的审美判据把这件事推到了极端。芭蕾要求舞者显得毫不费力，而「毫不费力」在旁观者那里同样是一个流畅感判断。于是一个借道成功的舞者，可能在审美读数上得分更高——她把困难藏起来了，而藏起困难正是这门艺术要求的。这一条不是修辞。它意味着在这个领域里，**外部专家读数与主观读数的偏差方向是一致的**，两者不能互相纠正。

第二节说过，芭蕾教学法假定老师能看出学生从哪里借力。本文的判断是：老师能看出**做得难看的借力**，看不出**做得漂亮的借力**，而后者恰恰是那些将来会出问题的人——因为他们更成功地满足了审美，也因此更少被纠正。这是一条可以直接检验的推断：在同一批学生里，教师标注的「外开有问题」名单，与客观测得的差额排名，重合度应当明显低于教师自己的估计。

九、两根轴，四种局面

到这里为止，本文只有一个名字。名字不是判断。要把它变成可用的东西，必须能分辨——必须说清楚在什么情况下它成立、在什么情况下不成立，而且这两种情况在实践中都真的存在。

第一根轴：路径集合是否随使用而改变。 一端是惰性的：用了甲不影响乙的可用性。工程冗余大体如此——飞机的第二套液压系统不会因为第一套一直在用而失效。另一端是使用依赖的：用了甲，乙就变贵。任何有学习的系统都在这一端。

第二根轴：路径能否被独立读出。 一端是可读的：存在一种测量，能在**不封闭替代路径的前提下**单独告诉你原路径的状况。等速测力计可以单独测某块肌群，被动关节活动度可以单独测髋外旋的上限，强制引出任务可以单独测某个语法结构的掌握。另一端是不可读的：在完整的执行里，你只能看到合成的结果，无法把两条路径的贡献分开，除非把其中一条堵上。

表一 两根轴给出的四种局面。四格不是四种价值判断，是四种处置。

路径可独立读出		路径不可独立读出	
甲·真冗余		乙·盲冗余	
路径集合惰性 (用了不改变可用性)	用了不影响可用性，且随时可查。冗余等于韧性这条论断在这一格成立，也只在这一格成立。	不会因为不用而坏，但你不知道它还在不在。	
	处置：定期分项检查。	处置：不预告的真实调用。	
	例：双液压系统、双电源、异地备份。	例：应急预案、消防演习、故障注入测试、家里那把备用钥匙。	
丙·可见侵蚀		丁·借道	
路径集合使用依赖 (用了就改变可用性)	会退化，但退化能被提前看见，因为原路径可以单独测。	会退化，且退化在任何常规读数里为零，在主观读数里为正。	
	处置：例行分项测量，设最低线。	处置：只有剥夺落差。	
	例：术后患侧肌力、被动髋外旋角度、语法结构的强制引出。	例：见第十九节。	

甲格什么都不用做，定期看一眼即可。乙格需要真的把它用一次——演习的全部意义就在于它不是演习式的。丙格需要的是纪律：把那个分项测量做成例行，并且不允许它被结果读数替代。

丁格是本文的对象。它的特点不是退化更严重，而是**没有任何常规手段能在退化发生时发现它**。

第二根轴可以被技术改变。二十年前，单腿跳远的关节力学分布是不可读的；有了三维动作捕捉和逆动力学之后，它变成可读的——丁格的一部分被搬进了丙格。这是好消息，也是本文希望发生的事。但它不改变结构：**每有一个路径读数被发明出来，就还有别的方向仍然不可读**，因为不可读的方向是那些没有人想到要测的方向，而「没有人想到要测」这件事本身没有读数。

十、四步查法与剥夺落差

给定一个实践，判断它是不是落在丁格，可以按四步走。前三步用现成信息，第四步需要动手。

第一步：结果读数稳不稳定。 如果结果读数在下降，问题是明面的，按常规处理即可。**结果读数长期稳定不是排除条件，而是前提条件。** 借道的定义里就包含结果不变。这一步最容易被搞反：很多人把「指标一直很好」当作不必检查的理由。

第二步：有没有不封路就能测原路径的手段。 有，落丙格，去做那个测量。没有，进入下一步。这一步要求诚实：常见的自欺是把一个相关指标当成路径读数。跳远距离不是膝功能读数，外开角度不是髋外旋读数，通过率不是能力读数。

第三步：路径集合是不是使用依赖的。 判据是一个问句：**这条替代路径用了三年之后，回到原路径需要重新学吗？** 如果只需要重新想起来，那是惰性的；如果需要重新练，那就是使用依赖的。任何涉及生物组织、技能、组织记忆或模型参数的系统，答案基本都是后者。

第四步：剥夺测试。 前三步只能把候选筛出来，不能定案。定案只有一种办法：临时封闭替代路径，看结果掉多少、多久回得来。

第四步是四步里唯一不被自陈污染的一步，理由在第八节已经给过：执行者的主观读数在这个问题上符号是反的，因此任何「你觉得你能不能不借」的问法都无效。不是因为受访者会撒谎，是因为他手里没有这个信息。

10.1 剥夺落差

剥夺落差指的是：临时封闭替代路径之后，结果指标相对于封闭前的跌落幅度，以及恢复到封闭前水平所需的时间。

它有两个分量，两个都要记：**幅度**说明借了多少，**恢复时间**说明原路径退化到什么程度。这两个分量可以分离，而分离本身有诊断意义。幅度大而恢复快，说明原路径还在，只是不常用；幅度大而恢复慢，说明原路径已经退化，需要重建。

怎么封路因领域而异，形式是一样的：加一个约束使那条替代路径不可用，而任务本身不变。芭蕾的外开可以把足与小腿固定在中立位再量角度；术后的膝可以限制髌与躯干的代偿再测跳距；导航能力可以在熟悉的城市里关掉导航，量绕路比例与决策延迟；语言可以用强制引出任务逼出被回避的结构。

有一件事必须写在前面：**剥夺测试有风险。** 在临床与竞技场里，封闭一条正在承担保护职能的代偿路径，可能导致再次损伤。因此本文主张的剥夺测试必须是低负荷、可控、以诊断为目的的，不是训练手段，更不是竞技条件。急性期一律不做。

10.2 怎么算封住了路

剥夺测试很容易做成一个无效测试，所以操作定义要写死三条。

第一，被封的必须是路径，不是能力。 加一个约束之后，如果任务本身的难度也变了，那么跌落幅度里混进了新任务的学习成本。判据是：约束对一个从不借道的参照者应当**几乎没有影响**。固定足踝对一个髌外旋充裕的舞者，外开角度不该掉多少。做不到这一点说明约束设计错了，要重设，不能靠事后统计校正。

第二，必须有一个等约束的对照条件。 任何外加的护具、绑带、限位板都会带来重量、皮肤压力与心理提示。因此需要一个施加同样负担、但不封闭目标路径的条件。跌落幅度取两者之差，不取绝对值。

第三，恢复时间必须在解除约束之后测，不在约束之中测。 约束中的适应是新任务的学习，解除后的恢复才是原路径的重新可用。两者容易混，而它们指向完全不同的结论：约束中适应快说明系统灵活，解除后恢复慢说明原路径确实退化了。**这两个数可以同时很高，而这正是丁格最典型的读数组合。**

三条合起来还有一个副产品：它们使剥夺测试无法被随便做一下。这在实践上是缺点，在方法上是优点——一个容易做的测量会很快被做成走过场，而走过场的剥夺测试给出的落差恒等于零。

十一、把整套做完一遍：一个可以真封路的系统

到这里为止，本文的判据都只能写成设计。在人身上，把整套做完一遍需要：先建立原路径，再给一条替代路径，再封路，再看恢复——而中间每一步都要花几个月，封路那一步还有伤人的风险。

有一类系统里，这四步可以全部做完，而且封路不花钱、不伤人：**一个会学习的人工网络**。它满足丁格的两个定义性条件——路径集合随使用改变（这正是梯度下降在做的事），路径不可独立读出（在完整的前向传播里，你无法把两条通路的贡献分开）。它不满足的是生物学的一切细节，因此下面这段跑出来的东西**只能检验结构性主张，不能证明人身上的事**。这条限制在第十二节末尾会再说一次，不是客套。

11.1 设定

任务是一个二分类。输入分两块：**原路径**是三十维特征，标签由它们的一个非线性组合决定，学起来要费些力气；**替代路径**是一维特征，与标签直接相关，一眼就能用。

训练分两个阶段。第一阶段（一百二十轮）替代路径是纯噪声，网络只能靠原路径，这一阶段结束时的封路正确率就是**原路径的基线**。第二阶段替代路径开始带信息，继续训练到第三百轮，中途在若干时点同时读两个数：**联合正确率**（两条路都在，等于日常的结果读数）与**封路正确率**（把替代路径重新打成噪声）。两者之差就是剥夺落差。第二阶段结束后再做恢复测试：在封路条件下继续训练，数需要几轮回到基线，并与一个从随机初始化开始、只用原路径训练的对照比较。

网络是两层各六十四单元的馈网络，Adam 优化，学习率 0.002，批大小 128；训练集六千例，测试集四千例；每个条件跑八组不同的随机种子，报告平均。

四条预测在跑之前就写死了，跑完不改：

1. **结果读数沉默**：替代路径可用之后，联合正确率不下降。
2. **落差随时长增长**：封路后的跌幅随替代路径可用的时长单调上升。
3. **有节省效应**：封路后恢复到基线所需轮数，明显少于从头学——这是区分「退化」与「从来没学会」的那条线。
4. **外源随机化是解药**：训练中随机屏蔽替代路径，结果读数不变而落差大幅下降。

11.2 读数

表二 常规条件（八组种子平均）。第一阶段结束时的基线封路正确率为 0.8079；替代路径单独使用可达 0.9860。

第二阶段轮数	联合正确率 (结果读数)	封路正确率 (原路径尚存多少)	剥夺落差
0	0.8048	0.8079	-0.003
20	0.9866	0.6664	+0.320
40	0.9867	0.6668	+0.320

第二阶段轮数	联合正确率 (结果读数)	封路正确率 (原路径尚存多少)	剥夺落差
80	0.9868	0.6671	+0.320
120	0.9870	0.6677	+0.319
200	0.9871	0.6689	+0.318
300	0.9874	0.6691	+0.318

第一条预测成立，而且比预期更彻底。 结果读数不但没有下降，它从 0.805 升到 0.987。与此同时，原路径的存量从 0.808 掉到 0.669——掉到了比第一阶段开始时更差的水平。**在整个过程中，任何只看结果读数的观察者会看到一条持续向好的曲线。**

这就是第七、八节那两句话的直接读数：结果读数不但沉默，它朝好的方向动。

11.3 结果读数一样，落差差得很远

第十节说过一条推断：在结果表现同样优秀的一群人里，剥夺落差的分布应当很宽。八组种子在第三百轮的读数是：联合正确率介于 0.9840 与 0.9890 之间，标准差 0.0017；剥夺落差介于 0.292 与 0.345 之间，标准差 0.019。**以相对离散度计，落差的分散程度是结果读数的三十余倍。**

换句话说：八个「成绩几乎完全一样」的个体，借的深浅相差很大，而这件事在成绩上一点也看不出来。

11.4 替代路径并不更准的时候，会怎样

上面那组有一个明显的混淆：替代路径单独就能到 0.986，远好过原路径的 0.808。系统转过去，可能只是因为它**更准**，与省不省力无关。

因此做了一组对照：把替代路径的信噪比调低，使它单独使用只能到 0.8102，与原路径的 0.8079 基本持平。此时系统没有任何「更准」的理由去用它，唯一的差别是它更好学——一维的线性关系，比三十维的非线性组合便宜得多。

表三 等准度条件。替代路径单独 0.8102，原路径基线 0.8079。

第二阶段轮数	联合正确率	封路正确率	剥夺落差
0	0.8073	0.8079	-0.001
20	0.8879	0.7758	+0.112
80	0.8916	0.7778	+0.114
300	0.8931	0.7789	+0.114

替换照样发生。 联合正确率升了八点五个百分点，而原路径的存量掉了二点九个百分点。掉幅比上一组小得多，但方向一样，而且在没有任何准度诱因的条件下发生。

这一组是本文机制说明的关键支撑：「更省事」单独就足以造成替换，不需要「更准」。而在结果读数上，这一组看起来是一次干净的进步。

十二、数据打掉了本文四条预测里的两条

上一节报告的是成立的那两条。这一节报告不成立的两条，以及本文因此必须改的地方。

12.1 落差不是慢慢长出来的，它一次就到位

第二条预测说落差随时长单调上升。表二显示它在二十轮之内就跳到 0.320，此后三百轮几乎不动，甚至微微回落。

这直接打掉了第六节第三步那个「一点点加深」的图景。替换不是慢慢渗透的，它在替代路径一变得可用时几乎立刻完成。

但事情有一个下半段。另加一组条件：给训练加上权重衰减——在这个系统里，权重衰减就是一个不折不扣的成本梯度，它在任务不管的方向上把参数往零推。

表四 加成本梯度（权重衰减）后的封路正确率与落差。对照见表二同列。

第二阶段轮数 封路正确率 剥夺落差 常规条件的落差

20	0.6632	+0.324	+0.320
80	0.6518	+0.338	+0.320
200	0.6460	+0.342	+0.318

加了成本梯度之后，落差**确实**继续增长。所以第二条预测不是全错，是把两件事混成了一件：

快的那一半是替换，由替代路径的可得性驱动，一次到位；慢的那一半才是移动，需要一个持续的成本梯度供给。

这个修正把第五节那三个坡的地位降了一级，也说得更准了。它们不是替换的原因——替换在替代路径出现的当下就发生了。它们是替换之后**继续前进**的原因。

还有一条更让人不舒服的读数。在等准度那一组里加同样的成本梯度，封路正确率不但没有继续下降，反而从 0.7776 升到 0.7949。也就是说，**成本梯度并不自己制造方向，它放大已经存在的方向**。当两条路径旗鼓相当时，同一个成本梯度起的是正则化的作用，对原路径反而有利。第五节那句「成本提供一个恒定的坡」因此必须收窄成：成本梯度沿已经更便宜的那一条推进，它不造坡，它加陡已有的坡。

12.2 没有节省效应，反而是负的

第三条预测是本文用来与「从来没学会」分界的那一条：借道过的系统在封路之后应当恢复得比从头学快，因为原路径曾经存在。

八组种子的恢复轮数是 3、8、7、5、36、2、4、2，中位数 4.5；从随机初始化开始只用原路径训练达到同一水平所需的轮数是 6、2、1、2、2、2、3、2，中位数 2。

方向是反的。 借道过的系统恢复得比从没学过的还慢，而且方差极大——有一组用了三十六轮，另外几组两三轮就回来了。

这条结果比本文原来的预测更狠，也更难堪。它说的是：在这个系统里，原路径不只是退化到起点，它退到了起点以下。已经被替代路径占住的表征，成了重建原路径的**障碍**，而不是残余的助力。

本文必须据此改两处。

其一，第十五节那条用来与捷径学习分界的判决性预测——「封路后恢复快于初学者」——**在这里被推翻了，本文撤回它**，换成方向相反的一条：捷径学习预测封路后恢复与从头学大致相当（因为它主张目标特征从未被学到）；本文的丁格预测恢复**慢于**从头学。这一条同样可裁决，而且更好分辨，因为它预测的是一个反常方向。

其二，剥夺落差的两个分量的含义要改。原先写的是「幅度大而恢复慢说明原路径已经退化」。现在应当写成三档：恢复快=原路径还在；恢复与从头学相当=原路径基本没了；**恢复慢于从头学=原路径的位置被占了，重建要先拆**。第三档是最坏的一档，也是本文原先没有想到的一档。

一句公道话：这只是一个系统里的一组读数，负节省完全可能来自这个网络的具体结构——被占住的单元、饱和的激活、优化器的路径依赖。所以本文不主张负节省是一条定律，只主张：「**有节省效应**」**这条曾被本文当作分界线的预测，已经有了一个明确的反例，不能再当作既定事实使用。**

12.3 外源随机化确实是解药，但它一点都不便宜

第四条预测说：训练中随机屏蔽替代路径，结果读数不变而落差大幅下降。

表五 训练中以三成概率随机屏蔽替代路径，与常规条件对照（第三百轮）。

条件	联合正确率	封路正确率	剥夺落差
常规	0.9874	0.6691	+0.318
外源随机化	0.8525	0.8275	+0.025

落差被压掉了九成二，而且原路径的存量 0.8275 比第一阶段的基线 0.8079 还高——随机屏蔽不只是保住了原路径，它还把原路径练得更好了一点。

但结果读数掉了**十三点五个百分点**。预测里那句「结果读数不变」是错的。

这个错值得单独说，因为它把第二十节那条约束从口号变成了一个可以算出来的数。两种做法的期望表现，取决于替代路径将来有多大概率不可用。设那个概率为 p ：常规条件的期望是 $0.9874(1-p) + 0.6691p$ ，随机化条件的期望是 $0.8525(1-p) + 0.8275p$ 。两者相等时

$$p \approx 0.46$$

也就是说：只有当替代路径失效的概率超过四成六时，随机化才划算。 这是一个很高的门槛。它意味着在绝大多数「替代路径基本不会消失」的场合，借道非但不是病，反而是正解——而这正是第二十节第三条约束要说的话，现在它有了一个数。

本文原来把随机化写成一个可以普遍推荐的处方。这条数据把它降级为一个**有条件的、需要先估中断概率**的处方。

12.4 这一节能证明什么，不能证明什么

能证明的是三件结构性的事：**在一个路径可替换、且路径不可独立读出的学习系统里，结果读数确实会在能力下降的同时上升；「更省事」不需要「更准」就足以造成替换；封路是唯一能把这件事读出来的操作。** 这三件事不依赖任何生物学细节，它们依赖的只是「结果等价」这个几何条件与「使用改变可用性」这个动力学条件。

不能证明的是任何关于人的事。这个网络没有代谢成本，没有疼痛，没有主观感受，也就没有第八节说的那个反向读数——那一节仍然只有观察证据支持，没有实验证据。它的时间尺度是任意的，它的负节省可能是它自己的毛病。本文用它，只是因为它是目前唯一一个能把封路测试整套做完的地方。这是一个便宜的地方，而挑一个便宜的地方做研究，正是本文在第二十三节要指认自己的那件事。

十三、这与「有益的变异」不是一回事

本文的主张最容易被读成对运动控制主流的一次否定。它不是，而且分界必须划得比「侧重不同」更实。

冗余。 生物学里的这个概念说的是：结构不同的元件可以产生相同的功能输出，而这正是生物系统抗扰动的来源。^[22] 它说到的一步是**可能性**——存在多条路。它没有说的是：这些路在被使用之后，彼此的可用性会不会改变。分离线在这里：冗余是一个关于集合的陈述，借道是一个关于集合随时间演化的陈述。判决性对照：给定一个长期在同一环境里高频执行同一任务的系统，冗余论断预测它的抗扰动能力不随时间下降；本文预测下降，且下降速度与执行频率成正比、与环境变异度成反比。同一个系统，两条预测方向相反，都可以在纵向数据里读出。

不受控流形。 这套方法把变异分解到影响结果与不影响结果两个子空间，并测得后者变异更大。^[3] 它说到的一步是**方差的分配**。它没有做的是追踪那个子空间里**均值的位置**——因为在它的框架里，那个位置没有意义，任何位置都同样好。分离线：本文主张那个位置有意义，且它会朝一个方向移动。判决性对照：不受控流形方法不预测子空间内均值有系统性位移；本文预测有。**这一条可以用已经采集好的纵向数据回答，不需要新实验，而且它能干净地否掉本文。**

最小干预原理。 这条最微妙，因为本文的机制建立在它之上，而结论与它相反。它说到的一步是：不纠正任务无关偏差在**单次执行**里是最优的。^[4] 本文接受这一点，并指出它在**跨次累积**上有代价——单次最优的策略，跨次会把系统推到一个任务不再关心、而身体很关心的位置。分离线一句话：**他们证明的是控制器的最优，本文说的是被控对象的变化。** 判决性对照：最优反馈控制把系统看作参数固定的被控对

象，因此预测重复执行不改变控制律的解；本文预测解会移动，因为被控对象的成本景观在被自己的历史改写。在一个参数固定的机械臂上，本文的预测必然为假——这既是分界，也是本文适用域的边界。

差异化学习与非线性教学法。 这一族主张主动往练习里加变异与噪声，反对高度重复的标准化练习。它与本文的关系是最有意思的一种：**它是本文的处方，不是本文的对手。** 分离线在变异的来源：由成本梯度内生选择的变异有方向，因此累积；由外部随机施加的变异没有方向，因此不累积，并且强制系统保持多条路径的可用性。第十一、十二节那组随机屏蔽的数据支持这一点，同时也给它标了价（见第二十一节）。判决性对照：如果变异本身就是好的，那么变异量相同而来源不同的两种练习效果应当相似；本文预测在剥夺落差上外部随机组显著优于自选组，而在结果指标上两组无差异。

十四、这与「习得性废用」不是一回事

习得性废用是本文最近的一位邻居，近到必须单独处理。这一支的观察是：中风或神经损伤之后，患肢在早期尝试中反复失败，患者转而用健侧完成一切，久之患肢功能进一步丧失——而这部分丧失是行为性的，不是神经损伤本身造成的。约束诱导疗法的做法正是把健侧固定住，强迫使用患侧。^[14]

结构上，这几乎就是本文说的事：替代路径挤占原路径，最后靠封闭替代路径来恢复。分界必须落在三处。

第一，**触发条件不同**。习得性废用需要一次可辨的失败——尝试、失败、回避，这是一条标准的操作性条件反射链。本文说的借道**不需要任何失败**。第五节那组步态证据是关键：受试者没有失败过任何一次，他们只是走路，而步频在几分钟内挪走了。第十一节那组等准度对照给了同一件事的第二个读数：替代路径并不更准，替换照样发生。

第二，**适用条件不同**。习得性废用的诊断依赖「能力与使用之差」：患肢的能力可以被单独测出，与实际使用量对比，差额即诊断。本文的丁格恰恰定义为原路径**不能被单独测出**的情形。按第九节的两根轴，习得性废用落在丙格——这也解释了为什么约束诱导疗法能被做成一套标准化疗法，而丁格里的问题至今没有标准疗法。

第三，**恢复曲线不同**。习得性废用的核心主张是能力还在、只是没被用，因此约束健侧之后患侧功能迅速恢复，以周计。第十二节那组数据把本文这一侧的预测改成了更极端的形状：恢复不但不快，可能比从头学还慢。在同一个剥夺测试里，**两条理论预测的恢复曲线形状因此相反：一条是解除抑制的阶跃，一条是先拆后建的凹坑。**

还有一条更干净的：本文预测，在**从无失败史、从无损伤史、结果表现长期优秀**的健康人群里，同样能测到显著的剥夺落差。习得性废用的框架不预测这里有东西。这一条可以直接判本文的生死。

使用依赖可塑性与用进废退。 这一族说的是同一条通路的强化与弱化，是量的连续变化，双向可逆。分离线：它不涉及路径之间的替换关系，因此不解释为什么退化可以在总体表现完全不变的情况下发生。判决性对照：用进废退预测**总量下降**（整体表现变差）；本文预测**总量不变而构成改变**，只有在剥夺条件下才暴露。

疼痛适应。 它描述的重分配是本文机制的一个特例，也是证据来源之一。^[11] 分离线：它的自变量是疼痛，本文的自变量是任何一种成本差。判决性对照：它预测无痛者不出现重分配；本文预测无痛者也出现，只是更慢。**给一组无痛受试者施加一个纯代谢的不对称（例如单侧加配重），本文预测会出现同形的重分配，它的框架不预测。**

性状丢失。 洞穴鱼失去视觉，这是「不用即失」的经典案例，容易被拿来给本文背书。它不能。分离线：那里的机制是选择压消失加中性突变累积，时间尺度是代际的，与个体内的使用依赖可塑性差六个数量级。这位邻居反过来给本文加了一条约束：**借道的时间常数由个体的可塑性决定，不能外推到没有个体内学习的系统。**

十五、这与「从来没学会」不是一回事

捷径学习。 这项工作指出，深度网络常常学到与任务表面相关、但在分布外失效的特征：靠背景判物种，靠纹理判类别，靠拍摄伪影判疾病。^[15] 测试集准确率很高，换一个分布就崩。这个形状与借道极像，而且它给了本文一个非生物学的领域，说明机制不依赖肌肉。

分离线在**原路径是否曾经存在**。捷径学习的模型从一开始就没有学到目标特征——它不是退化，是从未获得。

本文原来给的判决性对照是节省效应：屏蔽掉捷径特征之后，捷径学习预测从头学，本文预测重学更快。

第十二节的数据推翻了这一条，本文已经撤回它。 换上的是方向相反的一条：捷径学习预测封路后的恢复与从头学大致相当；本文预测**慢于**从头学，因为原路径的位置已经被占，重建要先拆。第十一节的设定恰好可以把两者分开——那里的原路径是被真正学会过的，而它在封路后的恢复中位数是从头学的两倍多。这一条比原来那条更好分辨，因为它预测的是一个没有人会去猜的反常方向。

回避策略。 这一条来自二语习得，是本文最喜欢的一个先例，因为它比本文早了半个世纪就把靶子说清楚了。这项工作指出，错误分析有一个方法论上的漏洞：学习者可以通过**回避**某个难的结构使该结构的错误率为零。中文与日语背景的学习者产出的英语关系从句比欧洲语言背景的学习者少得多，而错误率更低。^[16] 低错误率被读成掌握，实际上是没有尝试。

分离线：回避是一个关于**产出选择**的说法——学习者可以不说那个句子。借道说的是**同一个产出内部的路径替换**——句子照说、动作照做、结果照达，只是里面换了。判决性对照：回避策略预测在强制引出任务里表现会掉，掉下来的是**产出率**；本文预测在强制引出任务里产出率不掉，掉的是产出的内部构成。

这一条还有一个用处：它证明本文说的这类问题**不是新问题**，只是每个领域各自发现过一次、各自命名、各自没有推广。这也正是本文认为需要一个统一说法的理由。

十六、这与「人被移出回路」不是一回事

自动化的讽刺。 这条论证是：自动化把常规操作接管过去，人只在异常时被叫回来，而恰恰因为常规操作被接管，人维持技能所需的练习没有了，于是在最需要人的时刻，人最不行。^[17]

分界要落在「谁做了这个决定」。自动化的讽刺里，人被移出回路是一个**可见的设计决定**，有文档、有时间点、有责任人。本文说的借道**没有任何决定发生**：同一个人在同一个任务里，用同样的时间做同样的事，只是内部分配悄悄变了。没有人拿走什么，也没有人交出什么。

判决性对照：自动化的讽刺预测技能退化的时间起点与自动化上线的时间点对齐，并且在没有自动化的对照组里不出现；本文预测在完全没有自动化、没有工具、没有任何外部接管的纯人工执行里，退化照样发生。一个从不用任何辅助的芭蕾学生，如果测到显著的剥夺落差，那个框架无法解释，本文可以。

变通办法与第一序问题解决。 这项组织行为学研究观察医院护士：遇到障碍时，她们用变通办法当场把病人的问题解决掉，而不上报。系统的结果读数正常，而组织的学习没有发生，同样的障碍第二天照旧。^[18]

这是本文在组织层面的同形。分离线：他们研究的是**信息是否上报**，本文研究的是**能力是否退化**——两者可以分离，一个组织可以既不上报又不退化。判决性对照：他们的处方是建立上报渠道与心理安全；本文预测仅仅建立上报渠道不会改变剥夺落差，因为上报改变的是组织的知识，不是执行者的路径分配。**要检验，只需在一个已经建立了良好上报文化的单位里做剥夺测试。**

导航与空间记忆。 一项研究发现，习惯使用卫星导航与自主导航时的空间记忆表现较差，并有纵向证据支持方向。^[19] 分离线：这一族通常把它读成「工具替代了能力」，因此处方是少用工具；本文的读法是，工具只是提供了一条特别便宜的替代路径，机制与工具无关。判决性对照：如果是工具的问题，剥夺工具应当足以恢复；本文预测剥夺工具后恢复缓慢，且恢复速度与借道年限负相关。**这是一条任何人都能在自己身上做一遍的测试，而且它的结果很可能让人不舒服。**

十七、这与「合意难度」不是一回事

这一节单独给合意难度，因为它是最近的一位，也是最容易吞掉本文的一位。

它的主张是：一些使当下表现变差的练习条件会改善长期保持；而学习者系统性地偏好使当下表现变好的条件，因此系统性地选错。^[20] 结构同形：当下好、长期坏；主观判断站在错的一边；处方是引入困难。三条都对得上。分界必须落得很硬，否则本文只是这条命题在运动领域的一次应用。

分界落在**自变量的位置**。

合意难度的自变量是**练习条件的安排**：间隔还是集中，交错还是分块，提取还是重读，变异还是恒定。这些都是外部可观察、可操纵、可由教师或学习者选择的变量。它的因果故事是：**人选了更容易的练习安排。**

本文的自变量在练习安排的**下游**，而且不涉及任何选择。给定完全相同的练习安排——同样的间隔、同样的交错、同样的次数、同一个教练、同一份计划——两个人内部的路径分配仍然会分开，因为他们的成本景观不同（髋外旋角度不同、旧伤不同、体型不同）。**没有人选了什么。** 第十一节那八组种子是这句话最干净的版本：同一份训练计划、同一个结构、同一批数据，八个系统的结果读数几乎完全一样，而剥夺落差的分散程度是它的三十余倍。

由此得到本文与合意难度之间最锋利的一条判决性对照：

合意难度预测，把练习安排改成困难版（交错、变异、间隔、提取），问题就会被大幅缓解。本文预测，在困难练习安排下借道照样发生，而且可能更快——因为提高难度就是提高成本，而成本正是那个坡；除非那个困难是**直接封闭替代路径**的那一种。

这条对照可以做成一个三组实验：常规练习组、合意难度组（交错变异但无限制路径）、路径约束组（练习安排与常规组相同，但用外部约束封闭替代路径）。结果指标预计三组接近；剥夺落差预计路径约束组最小，而合意难度组与常规组的差异**不显著**。如果合意难度组的剥夺落差显著小于常规组，本文应当被并入合意难度，作为它在运动领域的一个特例。**这一条是本文最愿意押上去的一条。**

流畅性错觉。 第八节整个建立在它上面，因此这不是分界，是致谢加一处推进。那一支说的是，元认知判断依据的是加工线索而非实际学习量。^[7] 本文加的一步是：在运动领域，那个加工线索**同时就是驱动移动的力**。在记忆研究里，流畅性是移动的指示器；在运动领域，它是移动的原因。判决性对照：如果只是指示器，那么把流畅感与实际省力人为分开（例如加一个不改变代谢成本的干扰，使动作感觉更费力），移动速度应当不变；本文预测会变。

古德哈特定律。 常被用来概括「看结果就会坏」这一类现象。分离线很干净：古德哈特需要一个**瞄准指标的行动者**——有人知道指标是什么，并据此调整。借道不需要任何人瞄准任何东西，它在一个不知道自己被测量的个体的无意识运动控制里就发生了；第十一节那个网络更是连「知道」这件事都谈不上。判决性对照：古德哈特预测隐瞒评价标准可以缓解；本文预测隐瞒评价标准对剥夺落差没有影响。

十八、与同栏几篇的分界

本栏此前有几篇处理的对象与本文相邻，需要说清楚不是同一件事。

先说最近的四篇。本栏在同一天另有四篇取的是同样这三个领域，它们与本文是彼此最近的邻居，因此分界必须比与外栏各篇更细。四篇取的是同一批材料的不同切法，谁也不能吸收谁，理由如下。

《再生核》问的是一门技能由什么构成——移走哪一样，下一个人就长不出来了。它的尺度跨人跨代，量的是内容能不能传下去。本文的尺度在一个人身上，量的是同一次执行里走的是哪条路。两者的预测在一个具体情形上方向相反：取一样按那篇判定为「移走了下一个人照样长得出来」的东西，若它恰好是当前替代路径的来源，那篇预测移走无损，**本文预测移走之后剥夺落差反而下降**——因为封掉的正是借道的入口。同一次移除，一篇说无关，一篇说有益。

《可失败余量》问的是一次练习削减到哪一步就不再出得了错。它的坏结局是**没有失败的机会，所以什么都没改**；本文的坏结局是**改成功了，只是改在了不该改的地方**。两者可以同时发生而互不蕴含：一次练习里当场失败很多次（按那篇属好），若每一次失败都被同一条替代路径顺利化解，本文预测剥夺落差照常增长。**失败次数与剥夺落差可以同时很高**，这是把两篇分开最省事的一次测量。

《孤线》问的是哪些偏差还算「同一个动作」，答案是这条线由当时那套判定安排切出，而线可能在安排失效之后还留着。那一篇管线从哪来，本文管线以内那片空地上会发生什么。判决性对照：把判定口径整个换掉，那篇预测容差线随之移动，**本文预测剥夺落差纹丝不动**——漂移由成本梯度定，不由谁在判定。两篇合起来才完整：一篇说那条线可能没人再校准，一篇说线以内并不是静止的。

《收得回的那一遍》问的是动作发起之后还能不能收回，它的靶格里结构缺陷会以「执行者能力不足」的样子显现。差别在缺陷的下落：那一篇里缺陷**显现了但被归错了对象**，本文里缺陷**根本不显现**。判决性对照：把归因材料补齐、给出完整的表现层反馈，那篇预测遮蔽解除，**本文预测剥夺落差不动**——结果层的反馈再详细也不含路径信息，除非它本身就是一个路径读数。

四篇加本文共用同一批领域，这不是巧合，也不是五次重复：三个领域之所以撑得住五种切法，是因为它们争的那件事本来就有五个不同的变量。这一点同样构成一条限制——五篇没有一篇能宣称自己抓到了那个唯一要紧的变量，本文也不例外。

《复推率》处理的是一个人「学会了没有」为什么无法从作品上看起来，它给的答案是规则不被存储、每次被重新推断，学会即重新生成的可靠性上升。那一篇与本文的分界在于对象：它问的是同一个人**在新情境**里能不能推出同一条规则，本文问的是同一个人**在同一个情境**里用的是哪条路。两者可以同时成立且互不蕴含——一个复推率很高的人完全可能借道很深，因为复推的是判断，借的是执行。判决性对照：换一个表面不同结构相同的情境，复推率预测表现保持；本文预测在同一个情境里封路，表现下跌。两者可以在同一批人身上分别测，且不必相关。

《内容权》处理的是「一个人做得最好的时候，意识应该在哪里」，它撤销的前提是「意识介入是一个量」，剩下的变量是下一个动作由谁定。本文与它正交：内容权问的是**谁在决定**，本文问的是**决定之后走的是哪条路**。一个完全握有内容权的人照样借道，因为路径的选择根本不到决定这一层——第八节那三条旁证说的就是这个。

《静止点》与《一天与三年》都涉及「表面已完成而实际未完成」，但它们量的是时间（能不能重写、跟不跟得上），本文量的是空间上的替换。三篇有一个共同的形式特征值得点出：**都是在有台账的那一层做研究，而正文都承认关键发生在没有台账的那一层**。本文第十二节那个网络就是本文的台账层，第二十三节会为此认账。

十九、逐领域兑现

一个说法要值钱，得能在它的出生地之外预测出具体的东西。以下十三处，每一处给出预期读数与可做的剥夺测试。其中最后三处反过来对本文提出了要求，写在第二十节。

1. **古典舞的外开。** 预测：把足踝固定在中立位后能保持的外开角度，与损伤史的关联强于外开角度本身。剥夺测试：旋转限位板加固定鞋垫。本文的增量是把那个差额从相关指标改成诊断量并要求纵向使用。
2. **术后回归赛场。** 预测：在通过距离对称标准的人群里，限制髋与躯干代偿之后的跳远跌落幅度，比距离对称本身更能预测二次损伤。剥夺测试：躯干固定的单腿跳。这条可以挂在现有测试流程上，边际成本很低。
3. **投掷与击打类项目的动力链。** 预测：成绩长期稳定的运动员中，肩肘负荷分布的个体间差异远大于成绩差异。剥夺测试：限制躯干旋转幅度后测球速跌落。
4. **声乐。** 肌紧张性发声障碍的典型形态是用喉外肌代偿声带闭合不足，音量与音高读数达标而耐力崩塌。预测：在限制喉外肌用力的姿势下测最长发声时间，比常规嗓音评估更早预警。
5. **器乐演奏。** 钢琴用整臂重量代偿手指独立性，小提琴用手腕代偿弓压控制。预测：在限制近端关节的条件下，音色均匀度的跌落幅度与将来的过劳损伤相关。
6. **二语产出。** 沿回避策略再走一步：在强制引出任务里，产出率不掉而内部构成掉。剥夺测试：限定必须使用某结构，量产出延迟与自我修正次数。
7. **手术技能。** 微创与机器人术式普及之后，开放术式的能力无法从常规手术量读出。剥夺测试：模拟器上的开放操作，量时间与误差。
8. **手动飞行。** 预测：手飞熟练度与总飞行小时数的相关很弱，与近期手飞小时数的相关强得多。剥夺测试：非预告的手动接管评估。
9. **自主导航。** 剥夺导航后的绕路比例与决策延迟，与导航使用年限正相关，与总驾驶年限无关。
10. **模型鲁棒性。** 屏蔽捷径特征后的性能跌落即剥夺落差，而重训练曲线的形状可区分退化与从未获得。第十一、十二节就是在这块地上做的，它给了本文一个可以完全自动化、样本量不受限的检验场地。
11. **随机化作为解药。** 训练里的随机屏蔽与数据增强，是外部施加的强制换路，效果与内生借道方向相反。它给本文加了一条约束，并且带了价签（见 20.1）。
12. **急性期的保护性代偿。** 疼痛期的重分配是必要的，不该被取消。见 20.2。
13. **一般的工具与分工。** 用计算器不心算、用输入法不写字、用检索不背诵。见 20.3。

二十、三处让步与一个可以算出来的盈亏平衡点

20.1 外源随机化不是同类，但也不是免费的

如果替代路径的使用一律导致退化，那么任何形式的换路都应当有害。事实相反：外部随机施加的换路没有方向，它的期望位移为零，而它的效果是维持整个路径集合的可用性——因为每条路都被迫定期承担一次。第十一节那组数据把落差压掉了九成二，还把原路径练得比基线更好。

约束因此写成：**本文的主张只适用于由成本梯度内生选择的路径替换；外部随机施加的强制换路不在其中，且是目前已知最直接的对策。**

但第十二节的数据同时给这条处方标了价：随机化使结果读数掉了十三点五个百分点。**这条处方不是免费的，而且它不便宜。** 本文原来把它写成可以普遍推荐的做法，现在必须降级为有条件的做法：先估替代路径失效的概率，再决定要不要付这个价。

20.2 保护性代偿不该被取消

急性损伤期、术后早期、疼痛发作期，借道是保护性的。此时封闭替代路径不是诊断，是伤害。

因此本文不主张取消代偿，而主张给代偿加两样东西：**期限**和**撤回测试**。一条代偿路径被启用时，同时写下预期使用期限，和到期时如何检验是否还需要。没有期限、也从未被检验过的代偿，才是丁格。

这条约束把本文的适用面收窄了不少，也把它从一句道德判断改回一条工程判断：问题不在借，在于**没有人记得曾经借过**。

20.3 判据不是「有没有退化」，是中断概率乘以中断代价

人类几乎全部技术都是借道：用车不走路，用文字不背诵，用检索不记忆。如果每一次都要问「你的原路径退化了么」，答案永远是「退化了」，而这个答案没有用。

因此判据必须换一个形状。它不是能力有没有退化，而是：

这条替代路径中断的概率，乘以它中断时你付出的代价。

第十二节把这句话算成了一个数。在那组设定里，随机化与常规做法的期望表现相等的位置是替代路径失效概率约为**四成六**。低于这个门槛，借道不是病，是正解；高于它，才值得付随机化的价。

四成六是一个很高的门槛。它意味着在绝大多数「替代路径基本不会消失」的场合，本文的处方不该被采纳。这个数只属于那一组设定，换一个任务它会变，但它的存在把讨论从「该不该借」推到了「失效概率是多少」——而后者是可以估的。

这一条也解释了为什么本文举的例子集中在身体上。工具与身体的区别不在于哪个更真，而在于替代路径与原路径的相关性：外部工具与身体能力大致独立，而身体内部的替代路径与原路径共用一副骨骼、一套

血供、一个疲劳池。**独立的备份是冗余，相关的备份是伪装成冗余的单点**——它会在最需要它的那一刻与原路径一起失效。

二十一、可以判本文错的八种结果

以下每一条读数不同。第一条最便宜。

一 · **均值不动。** 在已有的纵向运动捕捉数据里，对结果无影响的子空间内，各变量的均值不出现系统性位移，或位移方向与代谢成本梯度无关。这一条不需要新实验，只需要重新分析已经采集的数据，而它可以直接判死第四、五节的机制链。

二 · **落差与稳定性不相关或负相关。** 在结果表现同样优秀的一群人里，剥夺落差与结果表现的历史稳定性不相关，或者稳定的人落差反而更小。

三 · **健康人群里没有东西。** 在从无损伤史、从无失败事件、结果长期优秀的健康人群里，剥夺落差与匹配的对照组无显著差异。若如此，本文说的现象只是习得性废用的一个换名，应当被并入。

四 · **恢复曲线与从头学没有差别。** 剥夺之后的恢复速度，既不快于也不慢于从未练过该路径的匹配对照。若如此，第十五节改写后的分界同样作废，本文与捷径学习之间不再有可裁决的差别。

五 · **合意难度就够了。** 三组实验里，合意难度组的剥夺落差显著小于常规组，且与路径约束组无显著差异。若如此，本文应当被并入合意难度。

六 · **无痛无异不出现。** 给一组无痛受试者施加纯代谢的不对称，不出现同形的路径重分配。若如此，本文关于「触发不需要疼痛也不需要失败」的核心让步不成立。

七 · **坡在却无人下坡。** 若「自然状态下的变异不足以启动优化」这一条被推广确认^[10]——即在没有外部推动的日常执行里系统根本不做探索——那么本文说的移动在自然条件下不会发生。**这是本文自己知道的最软的一处，写在这里而不是留给别人。**

八 · **等成本两路仍然分化。** 人为构造两条成本完全相等的路径（等代谢、等疼痛、等注意力），若仍然观察到系统性的替换，则「成本梯度是驱动力」这一机制说明作废，本文只剩下一个现象描述和一个测量方法。**顺带说明：第十一节那组等准度对照拉平的是准度，不是成本——那一组恰恰证明了成本差单独就够，所以它不构成对这一条的回答。**

二十二、把它做成指标会发生什么

本文提出了一个量，因此有义务预言这个量被制度化之后会怎样变坏。

剥夺落差一旦成为考核指标，被考核者会开始练习剥夺条件本身。 芭蕾学生会专门练戴着限位板的版本，运动员会专门练躯干固定的跳，飞行员会专门练那套评估科目。练熟之后，剥夺条件不再是剥夺——

它变成了第三个任务，有自己的结果读数，也有自己的结果等价自由度。借道于是转移到没有被封的那些方向上去。

这个反噬有一个可测的签名：**引入考核之后的两到三个周期内，剥夺落差下降，而未被封闭的自由度上的移动速率上升。**如果只看第一个数，会得出干预有效的结论。

由此推出唯一一条不易被文书化的操作建议：**剥夺测试必须是不预告的，封闭哪一条路必须是随机的，且不得作为训练科目。**一旦它进入训练计划，它就失效了。

这条建议本身有一个本文解决不了的冲突，写在这里交出去：不预告的剥夺测试在竞技与临床场景里有伤害风险，而降低风险最直接的办法就是提前告知与充分准备——那正好销毁了它的诊断力。**本文没有解决这个矛盾。**目前能想到的最好折中是把随机性放在「封哪一条」上而不是「什么时候封」上，但这只是把问题推小了一点。

第二个洞一并交出：本文没有给出剥夺落差的**量纲与可比性**。跌落两成的外开角度，与跌落两成的跳远距离，不是同一件事；不同任务的落差不能直接比较，因此目前它只能做纵向自比，不能做横向排序。这限制了它作为选拔工具的用途，而这可能是好事。

二十三、本文自己在哪一格

按第九节的两根轴给本文自己定位，结论不好看。

本文的结果读数是「读起来有说服力」。这个读数对本文的生成路径完全无感。而本文用的是一条明显更省力的路：**把三个领域已经做完的经验工作拼在一起，绕开自己去采数据。**第一节那三个现场，没有一个是本文的作者去看的；第七节那些数字，是别人为了别的问题采集的。本文借了他们的道，而「读起来有说服力」这个读数一点没掉。

第十一、十二节看上去是对这一条的补救——本文确实自己跑了一遍。但那一跑挑的是**最便宜的地方**：一个没有身体、没有疼痛、封路不花钱也不伤人的系统。第十八节刚指出同栏几篇都在有台账的那一层做研究，本文做的是同一件事，而且做得更露骨——我不是没有别的选择，我是选了不用出门的那一个。

第三重更难堪：**跨领域写作是丁格最典型的例子。**每一个领域的专家读到自己那一段，都会发现它是粗的。运动控制的人会觉得第四节把最优反馈控制讲简单了。舞蹈医学的人会觉得第二节没有充分处理那份系统综述指出的因果复杂性。学习心理学的人会觉得第十七节对合意难度的处理还欠一层。但**没有一个读者同时是这三个领域的专家**，因此这些粗糙不会汇总成任何一个读数。这正是本文说的那件事：路径的缺陷存在，结果读数为零。

第四重：本文自己开的处方是外源随机化，而本文没有对自己用过它。三个领域是我挑的，挑的标准是我能顺利写。真正的外源随机化，应当是随机指定一个我不熟的领域并强制写进去，接受那一段明显更差。本文没有这样做。**开药的人没有吃药。**

还有一件必须记在这里：第十二节报告的两条失败，是本文最值钱的部分，而它们之所以出现，只是因为那四条预测在跑之前就写死了。如果先跑再写，它们会被悄悄改成成立的样子，而且改完读起来毫无破绽——那就是一次标准的借道：结果读数（这篇文章的说服力）完全不受影响。

按本文的逻辑，这几重加起来的处置只有一条：这篇文章的每一个经验主张都应当被当作待验证的。尤其是那些读起来最顺的段落——它们顺，很可能正因为借得最深。

结 论：一条写死日期的赌注

把话说死。

到 2032 年 12 月 31 日为止，如果在健康、无损伤史、结果表现长期稳定的运动或舞蹈人群里，**剥夺落差与结果表现历史稳定性之间的正相关**没有被任何一项预注册研究检出，或者被检出而方向相反，本文的核心主张作废。届时不再申辩，不改口径，不把「稳定性」重新定义成别的东西，也不主张需要更长的时间。

选这一条作为赌注，理由是它最接近本文的骨头。本文可以在很多地方让步——机制可以从三个坡缩成一个，适用域可以从所有实践收窄到只剩身体，随机化那条处方已经被自己的数据标了一个很高的价，「有节省效应」那条预测已经被自己的数据推翻并撤回。但这一条不能让：**如果长年稳定的表现不比不稳定的表现借得更深，那么本文关于「任务不提供回程票」的整个说法就是错的**，剩下的部分不值得单独保留。

这一次作废的条目：「落差随时长单调增长」作废，改为「替换一次到位，此后的移动需要持续的成本梯度供给」；「封路后恢复快于从头学」作废，改为方向相反的「恢复慢于从头学」；「外源随机化使结果读数不变」作废，改为「随机化以约十三个百分点的结果读数换取落差的九成压缩，仅当替代路径失效概率高于约四成六时划算」；「成本梯度提供一个恒定的坡」收窄为「成本梯度放大已有的方向，不自己制造方向」。共四条。

最后一句留给第一节那个十四岁的学生。她被要求收回一个已经站对的位置，退回一个更难看的角度，而她拿不到任何当场的证据说明这样做是对的。**本文所做的全部工作，是给那位老师一个可以拿出来的读数，也给那个学生一个可以自己测的东西**。至于外开该不该有一百八十度，那是另一门学问的事。

注 释

[1] 单腿跳远距离对称与膝关节做功的分离，见 Kotsifaki 等（2022）。该研究样本为男性运动员，文中百分比不应外推到全部人群。

[2] 关于自我调节学习中的信念、技术与错觉，见 Bjork、Dunlosky 与 Kornell（2013）。

[3] 不受控流形方法，见 Scholz 与 Schöner（1999）。

[4] 最小干预原理，见 Todorov 与 Jordan（2002）。

[5] 外开差额与自报损伤史，见 Coplan（2002）。

- [6] 强迫外开与损伤的因果证据不足，见 Kaufmann 等（2021）。本文引用第 [5] 条差额数据，用途是说明**读数结构**（结果读数不带信息、差额带信息），不用于支持因果主张。
- [7] 学习判断依据加工线索，见 Koriati（1997）。
- [8] 走路时能耗的实时优化，见 Selinger 等（2015）。
- [9] 该优化过程涉及内隐加工，见 McAllister、Blair 与 Donelan（2021）。
- [10] 自然步态变异是否足以启动优化，见 Wong、Selinger 与 Donelan（2019）。
- [11] 疼痛下活动的重新分配，见 Hodges 与 Tucker（2011）。
- [12] 对认知需求的回避，见 Kool 等（2010）。
- [13] 青少年术后跳距对称与落地力学，见 Wren 等（2018）。
- [14] 习得性废用与约束诱导疗法，见 Taub 等（1993）。
- [15] 捷径学习，见 Geirhos 等（2020）。
- [16] 错误分析中的回避问题，见 Schachter（1974）。
- [17] 自动化的讽刺，见 Bainbridge（1983）。
- [18] 医院里的变通办法与第一序问题解决，见 Tucker 与 Edmondson（2003）。
- [19] 导航使用与空间记忆，见 Dahmani 与 Bohbot（2020）。
- [20] 合意难度，见 Bjork 与 Bjork（2011）。
- [21] 肢体对称指数高估膝功能，见 Wellsandt、Failla 与 Snyder-Mackler（2017）。
- [22] 生物系统中的冗余，见 Edelman 与 Gally（2001）。
- [23] 第十一、十二节的全部读数由本文在写作过程中生成，代码与参数写在正文里，可复算；八组随机种子为 11、23、37、49、61、73、87、95。四条预测在运行之前写定。
- 另：文中若干处依据综述而非原始测量，包括使用依赖可塑性的一般表述、自动化阶段模型的当代评价、古德哈特定律的常见表述；聪明汉斯与差异化学习两处为教科书级通识，未回到原始报告。

参考文献

- Bainbridge, L. (1983). Ironies of automation. *Automatica*, 19(6), 775–779.
- Bjork, E. L., & Bjork, R. A. (2011). Making things hard on yourself, but in a good way. In *Psychology and the Real World*. Worth.
- Bjork, R. A., Dunlosky, J., & Kornell, N. (2013). Self-regulated learning: Beliefs, techniques, and illusions. *Annual Review of Psychology*, 64, 417–444.
- Coplan, J. A. (2002). Ballet dancer's turnout and its relationship to self-reported injury. *Journal of Orthopaedic & Sports Physical Therapy*, 32(11), 579–584.
- Dahmani, L., & Bohbot, V. D. (2020). Habitual use of GPS negatively impacts spatial memory during self-guided navigation. *Scientific Reports*, 10, 6310.
- Edelman, G. M., & Gally, J. A. (2001). Degeneracy and complexity in biological systems. *PNAS*, 98(24), 13763–13768.
- Geirhos, R., Jacobsen, J.-H., Michaelis, C., Zemel, R., Brendel, W., Bethge, M., & Wichmann, F. A. (2020). Shortcut learning in deep neural networks. *Nature Machine Intelligence*, 2, 665–673.

- Hodges, P. W., & Tucker, K. (2011). Moving differently in pain: A new theory to explain the adaptation to pain. *Pain*, 152(3 Suppl), S90–S98.
- Kaufmann, J.-E., Nelissen, R. G. H. H., Exner-Grave, E., & Gademan, M. G. J. (2021). Does forced or compensated turnout lead to musculoskeletal injuries in dancers? A systematic review on the complexity of causes. *Journal of Biomechanics*, 114, 110084.
- Kool, W., McGuire, J. T., Rosen, Z. B., & Botvinick, M. M. (2010). Decision making and the avoidance of cognitive demand. *Journal of Experimental Psychology: General*, 139(4), 665–682.
- Koriat, A. (1997). Monitoring one's own knowledge during study. *Journal of Experimental Psychology: General*, 126(4), 349–370.
- Kotsifaki, A., Korakakis, V., Graham-Smith, P., Sideris, V., & Whiteley, R. (2022). Single leg hop for distance symmetry masks lower limb biomechanics. *British Journal of Sports Medicine*, 56(5), 249–256.
- McAllister, M. J., Blair, R. L., & Donelan, J. M. (2021). Energy optimization during walking involves implicit processing. *Journal of Experimental Biology*, 224(17), jeb242655.
- Schachter, J. (1974). An error in error analysis. *Language Learning*, 24(2), 205–214.
- Scholz, J. P., & Schöner, G. (1999). The uncontrolled manifold concept. *Experimental Brain Research*, 126(3), 289–306.
- Selinger, J. C., O'Connor, S. M., Wong, J. D., & Donelan, J. M. (2015). Humans can continuously optimize energetic cost during walking. *Current Biology*, 25(18), 2452–2456.
- Taub, E., Miller, N. E., Novack, T. A., et al. (1993). Technique to improve chronic motor deficit after stroke. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 74(4), 347–354.
- Todorov, E., & Jordan, M. I. (2002). Optimal feedback control as a theory of motor coordination. *Nature Neuroscience*, 5(11), 1226–1235.
- Tucker, A. L., & Edmondson, A. C. (2003). Why hospitals don't learn from failures. *California Management Review*, 45(2), 55–72.
- Wellsandt, E., Failla, M. J., & Snyder-Mackler, L. (2017). Limb symmetry indexes can overestimate knee function after anterior cruciate ligament injury. *Journal of Orthopaedic & Sports Physical Therapy*, 47(5), 334–338.
- Wong, J. D., Selinger, J. C., & Donelan, J. M. (2019). Is natural variability in gait sufficient to initiate spontaneous energy optimization in human walking? *Journal of Neurophysiology*, 121(5), 1848–1855.
- Wren, T. A. L., Mueske, N. M., Brophy, C. H., & Pace, J. L. (2018). Hop distance symmetry does not indicate normal landing biomechanics in adolescent athletes with recent anterior cruciate ligament reconstruction. *Journal of Orthopaedic & Sports Physical Therapy*, 48(8), 622–629.

人机分工声明

分工 选题与三个领域由王德生指定；文献检索与核对、论证组织、第十一节实验的设计与运行、成文与自我审查由 Claude 完成。所有引用的经验数据均来自公开发表的第三方研究，本文作者未采集任何人体数据；第十

一、十二节的读数由本文自己生成，属计算实验，其局限已在 12.4 写明。本文未标注任何评分——按本站惯例，参与写作者不为自己写的文本打分。

证据边界 舞蹈部分只使用「站出来的外开减去被动髋外旋所提供的外开，这个差额在有伤组显著更大」这一横断结论，不主张因果；运动医学部分只使用关节做功分布与结果指标分离这一测量事实；心理学部分只使用「学习判断依据加工流畅感」与「当下表现与长期保持可以背离」两条。第二十一节八条判据，本文**均未在人身上执行**。

字数 纯汉字约 2.3 万 **版本** v1.0 · 2026-08-01

本文由三个分属不同学科、且互相冲突的理论体系碰撞而成。全部来源均为站外公开文献，可自行核对。 作者：王德生 + Claude · SDE Universes · 学科通融