

• 研究前沿(Regular Articles) •

从动作模仿到预测加工：运动感染的动态神经机制 与实践应用图景*

刘凯航^{1,3} 朴忠淑² 田英³ 王丽岩⁴ 王洪彪¹

(¹上海健康医学院体育教学部, 上海 201318) (²吉林大学体育学院, 长春 130012)
(³沈阳师范大学体育科学学院, 沈阳 110034) (⁴上海健康医学院 康复学院, 上海 201318)

摘要 运动感染作为人类社会互动中感知与动作系统动态耦合的核心机制, 其神经机制与进化意义长期存在争议。在社会交往中, 个体通过观察他人动作引发的对自身动作的无意识影响被称为运动感染。运动感染构成了人类模仿和社会学习的基础, 在社会认知、群体协同等方面发挥着关键作用。研究认为, 运动感染的本质是感知系统、运动系统与社会认知网络的动态交互。镜像神经系统在动作观察与执行共享表征中发挥基础作用, 但其功能需置于预测误差调控与意识路径竞争的整体框架中理解。预测加工理论通过前馈模型校准内部动作表征, 揭示预测误差对运动感染方向可塑性的调节作用, 阐释从模仿到偏离的行为多样性。社会情境通过前额叶皮层调控感染强度, 表明运动感染具有进化赋予的适应性功能。未来研究需结合心理学、神经科学与计算建模的跨学科整合, 深化动态交互机制的解析, 并探索其在复杂社会场景中的实践路径。

关键词 运动感染, 神经机制, 镜像神经系统, 预测加工, 社会认知

分类号 B842

1 引言

人类作为社会性物种, 其生存与繁衍始终依赖于群体协作。在这一进程中, 个体不仅通过语言传递信息, 更通过非语言的动作同步实现意图理解。从婴儿无意识地模仿父母的面部表情(Meltzoff & Moore, 1977), 到观众席中自发的掌声节奏趋同(Néda et al., 2000), 再到足球比赛角球中所有队员的无意识起跳(Ikegami et al., 2019), 这种跨越时空的同步现象, 本质上是“运动感染(Motor Contagion)”的具象化表达——即观察他人动作引发的对自身动作的无意识影响(Blakemore & Frith, 2005; Ikegami et al., 2018)。

运动感染不仅构成了人类模仿和社会学习的基础, 而且在社会认知、群体协同等方面发挥着

关键作用。从早期对自发模仿行为的观察, 到现代实验科学对神经机制的解析, 运动感染研究历程不仅揭示了感知与动作的深刻耦合, 也为理解社会认知的具身性提供了关键线索。这一现象背后的神经机制与进化意义仍存在重大争议: 运动感染的本质究竟是基于镜像神经系统的“硬编码”模仿, 还是由预测加工动态调控的适应性行为? 对这些问题的探索, 不仅关乎“社会脑(Social Brain)”本质的解析(Adolphs, 2009), 更对体育运动、神经康复等应用场景具有深远意义。

过去30年以来, 运动感染研究经历了从单一神经机制到多系统整合的理论跃迁。研究者通过行为实验、神经影像学以及计算建模等多种手段, 逐步揭示了运动感染背后的神经生理机制和动态调控过程(Hurley, 2008)。在这一理论框架下, 观察与执行之间存在着高度重叠的神经回路, 这些共享回路不仅能够支持直接的动作模仿, 还可能在复杂社交情境下实现预测、评估及调整运动输出的功能。早期突破源自“镜像神经系统(Mirror

收稿日期: 2025-07-03

* 国家社会科学基金项目(24BTY040)。

通信作者: 王洪彪, E-mail: wanghb@sumhs.edu.cn

Neuron System)”)的发现：Rizzolatti 及其同事在猕猴前运动皮层中观察到，同一组神经元在个体执行抓握动作与观察同类动作时均被激活，揭示了一种“观察-执行”的直接匹配机制(di Pellegrino et al., 1992)。后续的神影像学研究进一步证实，人类镜像神经系统相关脑区在观察-执行过程中也会变得活跃(Iacoboni et al., 1999)。然而，单一镜像机制难以解释复杂社会互动中的动态调整。近年来，随着计算神经科学和动态系统理论的发展，研究者开始从计算模型和生态学的角度重新审视运动感染现象。一系列新的研究工作探讨了社交情境下肢体动作与面部表情传递过程中隐含的信息加工与反馈机制(de Gelder & Poyo Solanas, 2021)。这些研究不仅关注静态的模仿现象，更强调动态环境中信息整合和预测的重要性，从而催生了“多层级网络理论(Multilevel Network Theory)”的兴起，强调运动感染可能是低阶镜像系统提供运动共振(Motor Resonance)的启动信号，高阶预测网络通过误差调控赋予行为弹性(Ikegami et al., 2019)。这种“从模仿到预测”的过程显示，运动感染不仅是对外界运动的简单复制，更是一种基于内在预测和反馈机制的动态调控行为。在这一过程中，观察者不仅接收外部动作信息，还将自身以往的运动经验和预期目标通过内在表征进行整合，从而生成对未来运动结果的预测。近年来的研究发现，小脑的功能不仅限于感觉运动控制，还通过“前馈模型(Forward Models)”预测运动和认知任务的结果，并通过比较预测结果和实际结果来调整行为(Sokolov et al., 2017; Popa & Ebner, 2019; Streng et al., 2022)。纹状体多巴胺通过 D1 和 D2 受体的拮抗作用来调节行为(Frank, 2025)。这些发现进一步拓展了理论边界，为理解运动感染中的预测误差和反馈调节提供了新的视角。

尽管现有研究取得显著进展，但目前大多数运动感染的研究比较关注行为、机制解释，忽视社会认知的调节作用。因此，本文旨在回顾以往有关运动感染的研究，梳理运动感染的理论演进与神经机制，并展望其跨学科应用前景。通过整合心理学、神经科学及计算建模等多领域成果，试图构建一个分层动态框架，以揭示运动感染从低阶模仿到高阶预测的连续统本质。这一努力不仅有助于深化对人类动作理解机制的认识，也为

优化运动训练策略、设计神经康复干预及开发自适应人机系统提供科学依据。

2 理论框架的演变：从模仿到预测

运动感染的研究历程是一部从自然现象观察到实验科学解析的认知进化史。早期研究者通过对自发模仿现象的敏锐捕捉，逐步构建起从理论阐释到行为描述的框架，而实验范式的革新又不断推动理论突破。

2.1 模仿的自动性：感知-动作共享表征

运动感染的理论构建围绕“感知-动作循环”的命题展开，其核心在于解析动作观察如何影响动作执行。不同的认知理论都强调感知与动作之间的紧密关系。生态学理论提供了环境交互的哲学基础(Gibson, 1979; Thelen & Smith, 1994)。Gibson (1979)提出的“可供性(Affordances)”概念强调，环境刺激的感知本质上是具身化的动作可能性的识别。当观察者识别出环境中的动作可能性时，这种感知会直接激活相应的运动表征。这种环境与动作执行者的直接耦合关系，为理解动作观察如何转化为动作执行提供了重要的理论框架。心理学研究则通过共同编码理论(Common-Coding Theory)在认知层面深化了这一发现。该理论主张动作感知与动作执行共享相同的表征系统(Prinz, 1997)。Brass 等人(2001)采用简单反应任务进行了一项实验。参与者需要根据屏幕上显示的手指运动执行预设的手指运动。实验中，观察到的手指运动与需要执行的手指运动在某些条件下是兼容的(例如，观察到“敲击”动作时需要执行“敲击”动作)，而在其他条件下是不兼容的(例如，观察到“抬起”动作时需要执行“敲击”动作)。结果发现，当观察到的运动与执行的运动兼容时，反应时间显著减少；观察到的运动与执行的运动不兼容时，反应时间显著增加。

实验结果证实了感知-动作系统的共享表征机制。当观察到一个动作时，大脑中的运动系统会自动激活相应的运动表征，如果观察到的动作与准备执行的动作一致，可促进动作的执行；如果观察到的动作与准备执行的动作不一致，则干扰动作的执行。共同编码理论为理解观察和执行动作之间的复杂关系提供了一个有力的理论基础。在这个过程中，不依赖于动作意图，而是与观

察到的动作和计划执行的动作之间的相似性有关,也被称为“自动模仿(Automatic Imitation)”。

自动模仿是运动感染的一种形式,指的是对观察到的动作的无意识模仿(Heyes, 2011)。为了验证自动模仿的无意识特性,一项研究通过“匹配便士(Matching Pennies)”游戏进行检验。实验要求其中一名参与者在手势匹配时获胜,另一名参与者则在不匹配时获胜。在实验中,参与者被交替蒙上眼睛以测试他们是否会在有激励的情况下不自觉地模仿对手的手势。通过分析有视觉参与者在不同激励条件下的模仿频率,研究者发现,即使在有激励避免模仿的情况下,参与者仍表现出模仿的倾向(Belot et al., 2013)。结果表明,这种模仿行为在很大程度上独立于个体的意图和意识控制,证明了自动模仿的“自动性”。

尽管自动模仿具有一定的自动性,但它并不完全独立于个体的意识和控制(Liepelt & Brass, 2010)。当参与者未被告知动作的生物力学差异时,他们对可能和不可能动作都表现出类似的自动模仿效应,表明动作主要在目标层面被编码,而忽略了动作的具体方式。然而,当参与者被明确告知会看到可能和不可能动作时,自动模仿仅对生物力学上可能的动作产生作用,而不会对不可能动作产生作用。这表明当注意力被引导到动作的具体方式时,动作编码从目标层面转向动作方式层面,从而影响了自动模仿的产生(Longo et al., 2008)。由此可见,注意力可以调节自动模仿的强度,但并不改变其自动性本质。此外,社会态度被发现能够影响自动模仿,这种影响是直接且具有特异性的。研究者通过探讨亲/反社会态度词汇对特定动作的模仿,发现亲社会态度词汇的参与者表现出比反社会态度词汇的参与者更强的模仿行为,并且这种模仿行为是无意识的,即使与任务意图相悖,也会出现模仿行为,这表明模仿行为不仅在无意识的情况下发生,还可能超出有意控制的范围(Leighton et al., 2010)。这些发现显示自动模仿的自动性不仅受到注意力的输入调节,还受到社会认知因素的输出调节,揭示了自动模仿并非完全由刺激驱动,而是受到自上而下的认知控制和任务设定的影响。

Heyes (2011)通过引入双路径模型(Dual-Route Models)来解释这种现象。其中,自动路径在面对刺激时,不需要意识控制或意图,就

能直接激活相应的反应。当观察到一个动作时,自动路径可能会无意识地激活一个与观察到的动作拓扑特征相似的反应,即使这个动作在当前任务中是无关的。换句话说,自动路径无法被有意识过程直接改变,即使受到与任务无关的刺激也会自动驱动。而意识路径是基于当前任务要求和目标导向的思考来选择和执行反应。如果任务要求个体执行一个与观察到的动作不匹配的反应,意识路径将被激活,以执行正确的任务相关反应,这一路径可以解释与任务相关的动作。也就是说,当观察者观察到他人执行某个动作时,无意识路径可能会自动激活与观察到的动作相对应的运动表征,从而产生模仿行为,这种模仿是自动的,不需要观察者有意识地决定模仿。然而,当观察者需要执行与观察到的动作不一致的任务时,有意识路径和无意识路径之间会产生冲突,这种冲突可能导致执行任务时的干扰或错误。通过自动模仿,观察者能够在大脑中无意识的模仿他人的动作,这个过程可能会促进对动作的理解。因此,自动模仿被认为可能是理解他人动作的重要机制。

2.2 意图的优先性:层级化的动作理解

我们是如何理解他人动作的?动作理解作为社会认知的核心能力,有两种主要的假设可以解释大脑是如何实现动作理解的,即“视觉假设(Visual Hypothesis)”和“直接匹配假设(Direct Matching Hypothesis)”。这两种假设分别从不同维度揭示了人类动作理解系统的复杂运作机制。

视觉假设根植于传统认知心理学范式,主张视觉系统对生物运动特征的特异性解码,认为大脑通过分析动作的时空特征(如点光源运动轨迹)即可完成意图推理,无需运动系统参与(Giese & Poggio, 2003; de la Rosa et al., 2016)。该假设为理解动作提供了一个基于视觉信息加工的视角,但其过度依赖视觉模态的局限性逐渐显现。研究发现,先天盲人可通过非视觉途径获得动作表征,并且这些表征能够支持个体在没有视觉经验的情况下有效地与他人互动(Ricciardi et al., 2009),这表明视觉系统虽然可独立解码低阶运动特征,但其无法解释非视觉模态表征或高阶意图推理。而直接匹配假设认为,观察者通过将自己大脑中观察到的动作的视觉表征直接映射到相应的运动表征上,来实现“具身化理解”(Rizzolatti et al., 2001; Gallese et al., 2004)。

一系列研究提供了关键证据。研究者首先证明了目标导向的动作会受到干扰物的无意识影响: 当参与者要抓握的目标与不同大小的干扰物同时出现时, 抓握孔径峰值的振幅会随着干扰物大小的增加而增加。结果表明, 干扰物对目标导向的动作执行产生了无意识的干扰效应。随后, 研究者进一步探讨了干扰效应是否会通过观察在个体间传递: 参与者被分为观察者和执行者, 执行者在特定条件下完成抓握动作, 而观察者则在之后尝试复制这些动作。通过改变干扰物的存在、执行者的视线方向和身体部位的可见性, 来探究这些因素如何影响观察者对动作的感知和执行。结果显示, 干扰效应从执行者转移到了观察者身上, 即使没有实际的动作执行, 观察者也会受到执行者的动作特征和视线方向的无意识影响 (Castiello, 1999; Castiello, 2003)。实验结果揭示了观察者模仿他人动作时, 会优先模仿目标或意图, 而非运动学细节。即使干扰物影响执行者动作, 观察者仍通过视线方向推理动作意图, 且这种推理是无意识的。实验结果支持了直接匹配假设, 在没有直接动作示范的情况下, 观察者通过意图推理也能自动激活运动系统。这种以目标或意图为导向的模仿, 也是运动感染的一种形式。当模仿一个观察到的目标导向的动作时, 个体往往会模仿目标而不是动作运动学, 这揭示了个体会优先模仿层次较高的目标成分, 而非层次较低的动作成分。

上述发现印证了动作理解的层级加工特性: 当高层级意图明确时, 低层级运动学特征的影响减弱。其中, 镜像系统负责处理具身化动作模仿, 通过匹配观察到的动作与自身运动经验, 直接解码低层级运动学特征。而心智化系统 (Mentalizing System) 则负责高层级意图推理, 通过整合社会认知网络推理抽象目标或心理状态 (Van Overwalle & Baetens, 2009)。运动感染可通过层级加工模型解释, 通过提取高阶目标表征触发模仿, 符合层级模型中“自上而下”的意图驱动加工: 视觉系统提供初始动作特征, 而意图推理需运动系统参与具身模拟, 两者通过层级模型实现功能耦合。因此, 运动感染也可能是心智化的第一步。

2.3 预测的调控性: 误差驱动与模型校准

有人提出, 运动感染可能是我们预测他人动作的第一步, 并且这种感染过程可能为理解他人

的动作提供了一个起点 (Blakemore & Frith, 2005; Wilson & Knoblich, 2005)。一种新的范式检查了动作产生和结果预测之间的行为交互作用。研究者要求飞镖专家观察飞镖新手的投掷动作并预测其投掷结果, 在预测后会得到正确结果的反馈。结果发现, 飞镖专家在观看新手投掷飞镖后, 自身飞镖投掷表现逐渐恶化, 而结果预测能力却显著提高。紧接着研究者移除对飞镖专家预测结果的反馈, 结果显示飞镖专家的结果预测能力没有提高, 并且自身飞镖投掷表现没有恶化 (Ikegami & Ganesh, 2014)。这表明结果预测能力的改善是导致运动表现恶化的原因。预测加工理论为解释这一结果提供了新的计算视角。该理论认为, 大脑通过生成内部预测模型来解释外部世界的感知输入。这些预测模型基于过去的经验和知识, 帮助个体预测即将发生的事件。当预测与实际感知输入相一致时, 大脑的加工效率更高; 当预测与实际感知输入不一致时, 产生预测误差, 大脑会调整内部模型以减少这种误差 (Kilner et al., 2007; Hohwy, 2020)。也就是说, 专家在预测他人动作结果时, 其大脑内部模型的调整不仅影响了自身对他人动作的预测准确性, 也影响了自身的动作控制。这种调整是大脑为了更好地理解和预测他人动作而进行的适应性变化, 但这种变化无形中影响了专家对自身动作的感知和控制。在预测加工理论的统合下, 运动感染突破了传统模仿理论框架。在预测过程中, 必须有一个“认知起点”来估计我们正在观察的目标。我们认为, 运动感染正是提供这一起点的关键机制 (Blakemore & Frith, 2005)。运动感染使观察者更“靠近”执行者, 显著降低初始预测的不确定性, 为预测循环提供高精度起点。

为进一步揭示预测精度的层级效应, 研究者进行了一项实验。实验要求链球运动员在观看一位模特分别向左、中和右三个方向投掷链球的动作运动学视频后向场地中心投掷链球。视频展示了两种不同的动作运动学特征: 一种较困难预测投掷方向, 另一种则较容易预测投掷方向。结果显示, 链球运动员的投掷偏向于他们预测的模特投掷方向, 而且这种偏向只在观看较容易预测的视频后才被观察到 (Takeuchi et al., 2018)。尽管参与者的动作运动学变化与观察到的动作变化并不一致, 但他们的投掷方向仍然受到观察到的内容

的无意识影响。这表明,运动感染更多地依赖于对动作结果的预测,而不是对具体动作运动学的模仿。因此,当动作更容易预测时,更容易激活观察者的内部预测模型,从而增强运动感染,这种激活促进了大脑对动作结果的预测,同时增强了运动系统的激活,减少了认知负荷,并提高了动作意图的理解。这些因素的共同作用,使得观察者更容易受到运动感染的影响。

为进一步探讨预测误差是否会对人类的运动行为产生影响,研究者进行了一项棒球投球实验。研究人员将棒球运动员随机分为三组:无预测误差组、预测误差组和对照组。采用交替投球任务和观察任务设计。无预测误差组和预测误差组的参与者在投球时佩戴遮光眼镜,无法看到球击中目标的位置;在观察任务中,他们观看一名投手的视频,并报告球击中目标的位置。通过不同的指令来操纵预测误差:无预测误差组被告知投手的目标位置是变化的,以减少预测误差;而预测误差组被告知投手始终瞄准目标中心,从而引发预测误差。对照组仅进行投球任务,不参与观察任务。结果显示,当观察伴随预测误差时,棒球运动员的行为表现出与传统运动感染不同的模式,他们的动作并非与观察到的动作变得相似,而是逐渐偏离所观察的动作,并且这个过程是无意识的(Ikegami et al., 2018)。这表明预测误差在其中起到了关键作用,它不仅改变了运动感染的方向,还揭示了观察和预测对运动行为的双重影响。这种由预测误差引发的运动感染作为一种新型的感染方式,它类似于运动学习中通过误差纠正来调整动作的过程,这与预测加工理论的核心观点一致,即大脑会通过调整内部模型来纠正预测误差。因此,运动感染并非仅仅是简单的模仿,而是受到预测加工机制的调控。预测加工理论可以解释为什么在某些情况下,观察者的动作会与观察到的动作相似,而在其他情况下则会偏离,这种差异可能取决于预测误差的大小和方向。

基于这些发现,Ikegami 等人(2019)在原始的双路径模型基础上,增加了预测系统的概念,试图整合和解释观察他人动作时在个体中自动激活的运动表征,以及这些表征如何受到预测误差的修正,来解释预测误差引发的感染。首先,观察者通过视觉系统感知他人动作,这些感知信息输入到大脑的运动和感知区域。在执行任务时,观察

者接收到指令或要求。这些指令可以是外部的或内部的。大脑利用观察到的动作和任务指令来预测接下来可能发生的动作特征,这个系统基于以往的经验 and 当前的情境来生成预测。当实际观察到的动作特征与预测系统所预测的不一致时,就会产生预测误差。这种不一致可以是基于动作的运动学、结果或目标的差异。之后,预测误差触发对预测系统的调整,这可能涉及到大脑中运动表征的修正。这种修正是为了减少未来的预测误差,提高预测的准确性。预测误差驱动的运动表征修正导致观察者在执行动作时产生预测误差引发的感染。这些感染可能表现为与观察到的动作特征不相似的动作,甚至可能是相反的动作。经过修正的运动表征最终影响观察者的动作执行,这可能包括调整动作计划、执行和反馈循环。此时,观察者可以通过自我监控来识别和调整自己的动作,以减少预测误差引发的感染的影响,这可能涉及到有意识地改变动作计划或执行策略。通过实践和反馈,观察者可以进一步调整和优化自己的动作表征和执行策略,从而提高动作的准确性和效率。因此,这个模型也为研究动作模仿、运动感染和运动学习提供了一个统一的理论框架。

3 神经机制的层级整合:镜像、共振与预测系统

理论模型的提出,需依托神经科学证据的支持。运动感染的本质在于观察者运动系统与外界刺激的动态耦合。这一现象的理论框架经历了从单一神经表征模型向预测加工模型的演化。运动感染现象起源于对镜像神经系统的早期发现,却逐渐超越生理机制的单一解读,发展成为理解复杂社会交互中“具身认知”的关键线索。

3.1 镜像系统:观察-执行的神经匹配基础

镜像神经元的发现堪称认知神经科学领域的里程碑式突破。最初是在猴子腹侧前运动皮层(F5区)和顶下小叶(PFG区)中被发现,这些神经元在猴子执行特定的手部动作时放电,同时在观察其他猴子或人类执行相似动作时也会放电(Rizzolatti et al., 1996)。这种“观察-执行”双模特性揭示了动作理解的具身化机制,为后续人类镜像神经系统的研究奠定了基石。

人类镜像神经系统的存在通过多模态证据得以确证。神经生理学研究发现,当个体观察他人

动作时,即使没有明显的运动活动,其运动皮层也会变得活跃,表明人类运动系统具有镜像特性(Fadiga et al., 1995; Baldissera et al., 2001; Gangitano et al., 2001; Maeda et al., 2002)。脑成像研究发现,观察他人动作会激活一个复杂的网络,包括枕叶、颞叶和顶叶的视觉区域,以及两个主要的运动相关区域:顶下小叶和额下回,这些区域构成了人类镜像神经系统的核心(Buccino et al., 2001; Schubotz & von Cramon, 2001; Decety et al., 2002; Grèzes et al., 2003; Manthey et al., 2003)。当观察他人动作时会自动激活与被观察动作相对应的运动表征,这种观察与执行的神经重叠导致观察者的运动系统倾向于复制被观察动作的特征,形成运动感染。

此外,研究发现猴子的镜像神经元对动作的视觉特征不敏感,仅对生物体的目标导向动作产生响应。但在人类中,非目标导向动作或单纯的运动观察也可以激活运动系统,这可能是人类模仿能力的基础(Blakemore & Frith, 2005)。这些发现否定了基于视觉信息加工的视觉假设,形成了一个将动作观察和执行相匹配的系统,支持运动系统在动作模仿和动作理解中的作用,为后续的研究奠定了神经机制的基础。

经典的功能性磁共振成像实验揭示了模仿的神经计算机制。研究者使用功能性磁共振成像测量了参与者在观察和模仿手指运动以及根据空间或符号线索执行相同运动时的大脑活动。实验设置三种观察条件和三种观察-执行条件,对比模仿和非模仿行为下的简单手指运动。实验发现左侧额下回和右侧顶上小叶在手指运动时,无论其引发方式如何都会被激活,且在通过观察他人相同运动引发相同运动时激活程度更高(Iacoboni et al., 1999)。这表明大脑中的左侧额下回和右侧顶上小叶分别负责描述观察到的动作和编码运动的精确运动学细节。这种双流(Dual-stream)加工机制完美诠释了直接匹配假说,额下回将视觉输入转化为运动目标表征,顶上小叶则实现运动参数的视动转换。这些发现为人类模仿的神经机制提供了直接的实验证据。

3.2 运动共振:从个体内到人际的神经同步

运动共振作为镜像神经系统的核心功能机制,其研究已从单纯的神经镜像现象拓展为多层级调控的社会认知框架。该机制认为,运动共振是将

观察到的动作的视觉表征映射到观察者自身的运动表征上,从而实现对动作的理解(Rizzolatti et al., 1999)。

Rizzolatti 等人(1999)开创性地将运动共振划分为外显与内隐双模式:外显运动共振表现为前运动皮层与初级运动皮层的 θ - γ 跨频耦合,引发无意识模仿行为;内隐运动共振则体现为布洛卡区与颞顶联合区的功能连接增强,负责动作意图解码。当个体观察他人执行动作时,大脑中产生与该动作相关的神经活动,但这种活动并不直接引发外显的无意识模仿行为。两类运动共振都基于观察动作时运动系统的激活。外显运动共振的基本机制是由运动系统直接激活,主要涉及前运动皮层和初级运动皮层;内隐运动共振虽然不产生明显的运动反应,但在大脑中形成了观察到的动作的运动副本,有助于理解他人的动作意图,主要涉及高级前运动皮层区域。镜像神经元在内隐运动共振中发挥作用,其活动与动作的理解相关,而不仅仅是模仿。这种分类侧重运动共振的神经生理机制及其在模仿和动作理解中的作用。不仅如此,运动共振还可能在人际互动中也发挥重要作用。

在神经振荡层面,Uithol 等人(2011)提出的运动共振双维模型进一步将运动共振分为“个体内部共振(Intrapersonal Resonance)”和“人际共振(Interpersonal Resonance)”。个体内部共振是指观察者的视觉系统和运动系统之间的共振,表现为视觉运动 α 频段功率下降与运动皮层 β 频段事件相关去同步化的相位耦合,其强度受到运动经验调节。当个体观察到的动作首先在视觉系统中形成表征,随后这一表征被传递到运动系统。如果运动系统中存在与观察到的动作相匹配的运动表征,就会发生共振。人际共振是指观察者的运动系统与动作执行者的运动系统之间的功能对应。这种共振更强调观察者和动作执行者之间的“共享表征”。例如,在双人协同任务中,右侧顶叶区域的 α - μ 频段神经同步性显著增强,尤其是在参与者表现出动作同步性时(Dumas et al., 2010)。在这种情况下,观察者的运动系统激活是因为与执行者的运动表征相似,而不是因为观察者的视觉表征直接映射到运动表征上,这种神经同步性可能反映了社会互动中的调节机制。

这些发现支持运动系统在动作理解中的核心

地位,揭示了镜像神经系统在动作观察和执行之间的联系。传统观点认为,运动共振是自下而上的自动过程,依赖低阶运动特征匹配(Rizzolatti & Craighero, 2004)。一项研究发现社会互动能够显著增强运动共振(通过经颅磁刺激诱发的运动诱发电位评估),且在社会互动中表现出模仿行为的参与者在后续观察动作时显示出更强的运动共振(Hogeveen & Obhi, 2012)。这表明社会互动能够增强人类大脑对观察到的人类行为的运动共振,并且这种增强作用是通过调节镜像神经系统实现的,而模仿行为可能进一步放大了这种调节效果。也就是说,运动共振并非自动发生,而是受到自上而下的调节。它不仅受到外部刺激的影响,还受到观察者内部因素的影响。

运动共振作为运动感染的核心机制,为理解其神经机制奠定了基础。在这个过程中不仅限于动作模仿,更涉及深层次的意图推理和社会互动,为解释人类如何通过观察理解他人动作和意图提供了重要的神经科学证据。

3.3 预测框架:前馈模型与误差最小化

在体育运动中,精英运动员不仅需要执行复杂动作,还需要预测其他运动员的行为,这种能力对于运动表现至关重要,使其能够在瞬息万变的竞技场景中抢占先机。研究者通过经颅磁刺激实验发现,精英篮球运动员在观察篮球动作时皮层脊髓兴奋性(表现为运动诱发电位振幅)显著高于观察足球动作及静态图像,且能通过手部运动学特征有效区分投篮成功与失败动作,显示出动作预测的专业特异性。专家观察者虽表现出类似篮球动作敏感模式,却未具备预测动作结果的神经表征。而新手仅能区分动态与静态刺激,无法特异性识别运动类型差异(Aglioti et al., 2008)。这表明,精英运动员在观察篮球投篮时表现出更高的运动皮层兴奋性,特别是在预测错误动作时。这种能力可能与他们的运动经验密切相关,这意味着长期的运动训练能够调节大脑的运动共振系统,使其能够通过观察自动预测他人的动作结果,揭示了运动感染机制在竞技表现中的核心地位。

Schubotz (2007)提出的预测性前馈模型为这些发现提供理论框架,并探讨了人类如何利用运动系统预测外部事件。传统上,运动系统被认为主要负责预编码运动指令和无干扰执行,但该模型强调内部前馈模型(预测器)的重要性,这些模

型模拟身体和环境的动态行为,捕捉动作与其结果之间的因果关系。通过一系列功能磁共振成像研究发现,预测抽象事件会激活前运动皮层及其顶叶投射区域,这些区域的激活模式在不同模态(听觉和视觉)中表现出偏好,但没有特化。即使是我们无法重现的事件,我们也能有效地利用感觉运动系统进行模仿。这种模仿基于感觉运动表征,这些表征不会转化为实际动作,因为它们缺乏本体感觉和其他内感受信息,这也是事件预测与运动表象的本质区别。当观察者无法执行观察到的动作时,他们仍然可以建立感觉运动表征,作为前馈模型。事件预测可以被视为一种贝叶斯策略,通过先验和感觉似然的加权组合来优化预期。预测误差在早期学习阶段被视为感知误差,而在高级学习阶段被视为外部世界的真实变化(Friston & Kiebel, 2009)。这一框架打破了“运动系统仅服务于动作控制”的传统假设,揭示了运动系统在更广泛认知功能中的基础作用。同时,也为理解运动感染提供独特的视角:当观察对象是可执行的人类动作时,预测机制表现为无意识模仿;而当对象是不可执行的自然事件时,则表现为基于部分感觉运动表征的预期生成。这一视角不仅统一了动作与非动作预测的神经机制,也为理解运动感染提供了更广义的框架。

值得注意的是,这种基于非动作线索的感染机制可能解释棒球界长期存在的传统信念——击球手的表现会受到前一位击球手表现的影响。如果前几位击球手成功击中球,当前击球手的成功率也会增加(Ikegami & Ganesh, 2014)。对于这种信念的传统解释多归因于心理因素,如士气的提升。但近期的研究证据表明,运动感染可能在其中起到关键作用,击球手通过观察前击球手挥棒动作的动作运动学特征,从而引发运动感染。但这无法解释为何“牛棚”中的替补球员未直接观察击球动作仍会受到影响。为探究缺乏人体动作观察时,击球手是否仍能通过物理运动规律或符号系统引发感染。研究者考察了棒球击球手观察运动轨迹、结果位置、符号信息三类非动作刺激后的击球表现。结果发现,击球方向会受到无意识的影响。其中,受运动轨迹影响最大,结果位置次之,符号信息无显著作用。且经验丰富的击球手对运动轨迹和结果位置均敏感,反应强度更高且持续时间更长;经验较少者仅受运动轨迹的微弱

影响(Gray & Beilock, 2011)。这表明, 棒球击球手的击球表现可通过非动作物理线索引发运动感染, 且其强度与经验密切相关。经验丰富的击球手不仅能通过球的动态轨迹直接激活运动预测程序, 还能从静态结果位置逆向推导潜在运动规律, 形成多层级前馈模型; 而新手仅依赖显性运动线索, 反映出预测系统对先验知识的依赖性。这一发现为替补球员未观察挥棒动作仍会受到感染的现象提供了解释: 高水平运动员通过观察棒球运动轨迹或结果, 可反向激活前运动皮层储存的动作模式, 实现“结果-动作”的逆向模拟。

研究进一步验证了 Schubotz 的理论框架, 即人类运动系统通过具身模拟机制建立抽象预测模型, 无需实际动作执行或人体动作观察。符号信息的无效性则揭示了预测系统的模态特异性, 其本质依赖于物理动力学表征而非抽象符号。而预测误差的生成与处理是驱动运动感染行为可塑性的核心机制。神经科学证据表明, 小脑在此过程中扮演枢纽角色(Popa & Ebner, 2019; Streng et al., 2022)。小脑通过苔状纤维(Mossy Fibers)接收来自皮层运动区(如前运动皮层、顶叶皮层)的信号, 并与通过攀缘纤维(Climbing Fiber)接收的实际感觉反馈进行实时比较, 如两者存在差异即生成预测误差信号, 该信号可能通过两条路径影响行为: 其中一条路径是上行调节, 即误差信号上传至皮层(如运动皮层、前额叶皮层), 修正预测模型与动作计划; 另外一条路径是内部模型更新, 以驱动小脑内部运动表征的适应性调整, 最小化未来误差(Carey, 2024)。因此, 在运动感染中, 当观察者的预测结果与实际观察到的结果不一致时, 小脑检测到显著的预测误差, 其输出的修正信号直接导致后续动作偏离观察到的运动模式, 而非简单模仿。

综上所述, 小脑可能是实现“预测-误差-修正”循环的重要组成部分, 其中, 内部模型(存储于小脑-皮层环路)作为动作模仿的载体, 而预测误差(小脑计算)是驱动模型更新与行为适应的动力源。这些发现不仅将运动感染机制从传统动作模仿扩展至物理规律预测, 也为运动训练提供了新思路——通过强化运动学线索的感知训练, 可能会优化运动员的预测性表征能力, 从而提升复杂运动情境下的决策效率。

4 实践应用: 社会情境驱动的运动感染调控

运动感染作为连接感知与动作的核心认知机制, 其理论演进与神经机制的解析为跨学科实践提供了深刻的科学支撑。从感知与动作共享表征到内部模型的动态调节, 运动感染的研究已超越现象描述, 深入至神经环路与计算机制的层级。这些发现不仅揭示了人类动作模仿与理解的底层逻辑, 更赋予其广泛的实践潜能。基于此, 以下从体育运动、神经康复及人机协作三个角度阐述各领域的应用路径, 揭示理论向实践转化的科学图景。

4.1 竞技优化: 技能习得与策略性感染

在技能学习中, 运动感染展现出区别于观察学习的独特优势。运动员通过镜像神经系统的自动映射与预测误差的动态校准, 实现动作表征的高效内化。相较于需要意识参与的观察学习, 运动感染通过腹侧前运动皮层与顶下小叶的共振, 直接将视觉输入转化为运动指令, 可有效降低认知负荷(Cattaneo & Rizzolatti, 2009)。

在这个过程中, 大脑网络涉及多个区域的协同活动。颞上沟和颞中回参与提取动作的运动学参数, 并通过背侧视觉流将这些信息投射至前运动皮层, 生成运动指令, 实现视觉-运动映射(Caspers et al., 2010)。这一过程为动作的执行提供了基础的视觉和运动信息整合。小脑则通过预测误差信号动态调整运动表征, 优化动作学习过程, 形成误差校正回路(Galea et al., 2011), 从而提升技能学习效率。

运动感染的实践价值体现在其对复杂情境的适应性。镜像神经系统可同步整合本体感觉、听觉与视觉等多种线索, 形成多模态动作表征, 在高压情境下仍能维持动作流畅性, 显著优于意识主导策略(Gray, 2021)。基于这些机制, 运动训练范式也得以革新。隐性示范设计通过在训练中穿插非常规动作示范, 诱发预测误差以增强前运动皮层-初级运动皮层环路可塑性。尤其在情境要求高度协调的团体运动中, 这种预测与修正的机制显得尤为重要, 因为它能够通过不断更新内部模型, 使得个体行为更具适应性和协调性。此外, 神经反馈训练可通过实时监测和调节 μ 节律功率, 帮助参与者学习如何调节大脑节律, 提高复杂运动技能的水平(Wang et al., 2022)。

与传统学习方式相比, 运动感染在神经通

路、时间效能和情境适应性上均表现出显著优势。其依赖的镜像神经系统自动映射机制避免了前额叶意识控制和海马外显记忆编码的资源消耗,降低认知负荷,同时通过小脑-基底节环路实现动态误差校准。未来研究可通过靶向调控腹侧前运动皮层兴奋性进一步强化感染效应,或利用虚拟运动员数字孪生实时传递精英选手的神经模式,突破传统训练的时空限制。

值得注意的是,运动感染的作用不仅体现在技能习得的过程优化层面,其神经机制在竞技运动场景中的预测与反应系统升级方面同样具有关键价值。研究表明,高水平的篮球运动员在观看罚篮时前运动皮层的激活增加,且能够更早地从动作的运动学特征中提取信息进行预测,而新手则没有这种选择性激活(Aglioti et al., 2008)。这揭示了一种“神经预激活”现象,以更快地对刺激信号做出反应,从而提高反应速度和效率,但同时也意味着高水平运动员有着更强的运动感染能力。

当运动员能够准确预测对手的动作结果时,表现为感染效应的增强,但此时运动员的动作模式并不一定会简单模仿对手,而是可能呈现出更复杂的策略性调整。竞技运动的目的是“竞争”而非“合作”,此时运动感染不仅反映运动共振的强度,更体现观察者对动作来源的元认知评估。一项研究通过亲社会词汇或非社会词汇启动成人参与者,结果观察到其感染方向的反转:亲社会条件下感染效应增强,而非社会条件下感染效应减弱(Sparks et al., 2016)。这表明社会情境可以调节运动感染的强度。功能性磁共振成像研究进一步发现,合作情境与竞争情境均激活了前额叶和顶叶皮层,表明这两种社会互动都需要监控自身和他人的行为。但这两种情境在神经机制上却存在显著差异。合作情境特别激活了左内侧眶额皮质,这一区域与奖励处理和积极反馈相关,反映了合作可能是一种社会奖励过程;而竞争情境则激活了右侧顶叶皮质和内侧前额叶皮质,这些区域与自我-他人区分和心智化能力相关,表明竞争需要更多的自我-他人区分和心智化资源(Decety et al., 2004)。这些结果表明运动员可能通过抑制镜像神经系统活动来削弱对手动作的感染效应。这一调节机制可能具有进化适应性:在资源争夺中,抑制感染可避免被对手预测行为模式。

在竞技运动中,运动员需要通过预测打破对

手节奏,而非被动跟随。而感染效应在其中可能表现为“动作节奏的运动共振”,但高水平运动员会利用预测信息,将这种共振转化为破坏对手节奏的工具。即使在极短时间内的应激反应中,可能会出现短暂的动作模仿,但随后会立即分化。然而,当观察到的动作与自身预测结果不一致时,运动员会基于预测误差修正内部模型,进而会延迟后续动作,从而降低运动表现。

因此,在竞技运动中,运动员的动作模式是否趋同,取决于竞技目标与运动员策略。低水平的运动员可能会导致动作模仿,而高水平运动员通过预测将感染效应转化为“反向控制”,动作模式呈现针对性分化,甚至刻意制造“假同步”以欺骗对手。

4.2 神经康复:镜像疗法与预测性干预

运动感染的神经机制为神经损伤后的运动功能重塑提供了创新性干预策略。基于镜像神经系统的激活特性以及预测加工的动态调节能力,现代康复医学逐步结合传统物理治疗和神经可塑性治疗来提高康复疗效。

动作观察疗法(Action Observation Therapy)是一种镜像疗法。该疗法通过系统性视觉-运动耦合促进神经可塑性,重建受损神经网络,尤其在中风(Stroke)康复中成效显著。一项多中心随机对照试验显示,慢性中风患者接受4周动作观察疗法后,上肢运动功能显著改善,且功能磁共振成像显示,在执行独立运动任务时,双侧腹侧运动前皮层、双侧颞上回、辅助运动区和对侧缘上回的活动显著增加(Buccino, 2014)。这种康复疗法基于镜像神经系统 and 大脑可塑性原理,通过动作观察激活患者大脑中的镜像神经元,促进运动皮层的神重塑和功能重组,帮助患者恢复运动功能,是一种科学且有效的康复治疗手段。

此外,一种基于多感官整合的神经康复方案,通过同步动作观察与声音化技术,靶向调控帕金森病(Parkinson Disease)患者步态冻结(Freezing of Gait)的神经环路。随机对照试验显示,帕金森患者经过8周干预后,步态冻结发作频率显著下降,且步态启动潜伏期明显缩短。疗效持续至3个月随访期,期间运动障碍、日常活动中的运动问题和身体不适等方面也显示出显著的改善(Mezzarobba et al., 2018)。这种通过镜像神经系统整合多模态的康复方法可以减轻认知负荷、增强

感知过程以及促进运动学习, 标志着帕金森康复从症状管理向神经环路重塑的范式转型, 也为开发虚拟现实场景迁移与脑机接口精准调控奠定了科学基础。

自闭症谱系障碍(ASD)是一种神经发育障碍, 其特征是社交沟通困难和兴趣或行为的重复模式受到限制(American Psychiatric Association, 2013)。传统筛查方式依赖临床观察者主观评分或家长访谈(如 ADI-R), 易受报告者偏见的影响, 且对低龄或非语言患者敏感性不足。有研究发现, 与正常发育的儿童相比, 自闭症谱系障碍儿童的运动感染能力缺失(Becchio et al., 2007)。这为自闭症谱系障碍的早期筛查提供了创新方向, 通过运动捕捉系统记录抓握动作的减速时间、最大握距等参数, 可量化“干扰转移效应”的缺失程度, 为自闭症早期筛查提供客观的生物行为标志。基于运动感染范式的客观行为指标(如动作运动学参数、预测误差响应模式)可能弥补传统筛查工具(如 ADI-R 或 ADOS)的局限性。因此, 未来可建立统一的实验协议(如干扰物大小、注视时长), 确保筛查结果的可比性; 并结合脑电图或近红外光谱脑功能成像记录镜像神经系统激活模式(如 μ 节律抑制), 与行为指标共同构建多维筛查模型; 还可利用深度学习分析复杂运动学数据(如握距-减速时间非线性关系), 识别自闭症特异性模式。若能成功转化, 运动感染筛查范式可弥补现有工具的不足, 为自闭症提供更敏感、客观且低侵入性的诊断工具, 同时为个性化康复方案的设计奠定基础。

随着对运动感染机制的进一步研究, 将发现更多有效的治疗方法和手段, 为运动医学的发展提供新的动力。例如, 预测加工理论为运动功能康复提供了动态学习框架。未来可以通过设计预测误差触发的自适应训练程序, 可加速患者内部模型的校准与动作控制的再学习。

4.3 人机协同: 生物启发与伦理挑战

运动感染的理论与机制为人机协作系统的智能化设计提供了革新性思路。通过模仿人类动作理解的生物学基础——如镜像神经系统的共振特性、预测模型的动态调谐能力及多模态感知整合机制——智能体的交互能力得以从被动响应向主动协同进化。

具体而言, 智能体可以通过 3D 卷积神经网络(3D Convolutional Neural Network)提取运动学

特征(如关节轨迹、加速度和力矩分布), 并结合生物力学约束优化算法构建主动推理(Active Inference)的生成模型(Generating Models) (Parr & Pezzulo, 2021), 这种模型不仅能够解析动作的时空特征, 还能通过预测误差最小化动态推理操作者的意图, 从而实现从被动响应到主动协同的行为升级。为进一步模拟人脑的动作意图加工过程, 系统可借鉴腹侧前运动皮层的拓扑映射特性, 设计动态权重调整模块。该模块通过融合视觉、触觉及本体感觉信号, 构建多模态动作表征空间, 从而增强对模糊意图的解析能力。同时, 生物力学约束优化算法可引入多时间尺度分析框架, 结合动作的功能性分类, 优化系统的决策效率。为提高透明度, 解释生成模块可利用贝叶斯推理结果生成自然语言描述, 实时生成对动作意图的解释。

尽管目前技术进步显著, 但仍面临着极大的挑战。首先, 情境泛化能力受限于训练数据的文化特异性与动作多样性, 例如不同地区的语言、手势等差异可能导致意图误判; 其次, 伦理安全风险涉及隐私保护与责任归属问题(Pereira & Lopes, 2020)。未来研究需融合神经科学的可塑性机制与深度强化学习的元学习框架, 开发跨文化自适应模型。例如, 通过迁移学习整合多群体运动数据库, 或引入神经形态计算模拟突触权重动态调整, 最终构建符合共生伦理的人机协作生态系统。

5 争议与范式转型: 从镜像中心到系统交互

5.1 镜像系统的必要性: 必要引擎或可替代节点?

自镜像神经元在猴子腹侧前运动皮层被发现以来, 这一神经系统便被赋予了解读动作模仿与理解的重要功能。镜像神经元在个体执行动作和观察他人执行相同动作时均会激活的特性, 为“观察-执行”共享表征理论提供了生理学基础, 并迅速成为解释运动感染的核心机制。例如, 共同编码理论与直接匹配假设均强调, 运动感染的本质是镜像神经系统将观察到的动作直接映射到自身运动表征上, 从而实现动作模仿或理解(Prinz, 1997; Rizzolatti et al., 2001)。这一观点在早期实验研究中得到证实。然而, 随着认知神经科学的深入发展, 运动感染的解释框架逐渐复杂化。研究发现, 人类不仅能通过生物动作触发感

染, 还可通过非生物线索引发运动感染效应(Gray & Beilock, 2011)。此外, Ikegami 等人(2018)的棒球实验发现, 观察者并非简单模仿动作, 而是通过预测误差调整内部模型, 导致动作偏离。这一过程更多依赖前运动皮层、前额叶和小脑的预测网络, 而非镜像系统的直接映射。若镜像神经元是必要前提, 此类偏离现象将无法被解释。这些发现催生了一个核心争议: 镜像神经元是否为构成运动感染的必要条件? 抑或仅仅是复杂认知网络中的一个可替代组件? 争议的焦点不仅关乎神经机制的解析, 更挑战了运动感染理论从“镜像中心”向“系统动态交互”范式的转型必要性。

传统镜像理论强调运动感染的“自下而上”特性, 即通过视觉输入直接激活对应的运动表征(Rizzolatti & Craighero, 2004)。新兴观点认为, 运动感染是感知、预测、社会认知等多系统竞争与整合的结果(Ikegami et al., 2019)。例如, 双路径模型提出, 运动感染是自动路径(镜像神经系统)与意识路径(前额叶调控)共同作用的结果(Heyes, 2011)。然而, 预测加工理论进一步将运动感染视为内部模型与感知输入的动态调节。在此框架下, 镜像神经元仅仅是信息流中的一个节点, 其作用可能被高阶的调控所覆盖。例如, 链球运动员的投掷偏向与镜像神经系统无关, 而是前运动皮层对动作结果的概率模拟(Takeuchi et al., 2018), 说明高层级感染可通过预测机制独立实现。

当前争议的核心并非否定镜像神经元的作用, 而是重新定位其在复杂认知网络中的角色。因此, 未来的研究可构建分层模型, 区分低层级(镜像驱动)与高层级(预测驱动)感染的神经基础, 量化两者的交互权重。结合神经干预、计算建模与行为分析, 动态追踪感染过程中不同系统的贡献。镜像神经元或许是运动感染的“启动器”, 但绝非“唯一引擎”。只有跳出“必要与否”的框架, 才能更全面地揭示人类运动系统在模仿、预测与创新中的动态本质。

5.2 方法学局限: 实验室范式与生态效度的鸿沟

运动感染研究的理论突破与神经机制解析虽已取得显著进展, 但其方法学设计仍存在诸多局限性, 尤其在实验室范式与真实社会场景的生态效度鸿沟、实验任务简化性及测量工具和解释力局限性等方面亟待反思与优化。

首先, 现有研究多依赖高度控制的实验室任

务, 此类设计虽能精准操纵变量, 却难以模拟真实场景的动态性与复杂性。例如, Ikegami 等人(2018)的棒球实验通过遮光眼镜隔离视觉反馈, 人为制造预测误差条件, 这种控制可能削弱参与者对真实比赛中多模态信息的整合能力。类似地, Gray 和 Beilock (2011)通过非动作物理线索研究感染效应, 虽揭示了预测系统的灵活性, 却未涉及真实人际互动中的社会认知因素。这些简化设计可能导致实验结果与真实情境中的感染机制存在系统性偏差, 限制其外部效度。

其次, 当前研究常将动作观察与执行任务割裂为孤立事件, 忽视社会互动中的动态反馈循环。例如, Sparks 等人(2016)通过词汇启动调节感染效应, 虽揭示了社会情境的调节作用, 但其静态启动范式难以反映真实情境中瞬息万变的策略调整。此外, 多数实验聚焦短时行为反应(如反应时间或运动诱发电位), 缺乏对长期训练或经验积累的追踪。这种去情境化的任务设计可能低估了运动感染的适应性与可塑性。

此外, 现有研究依赖反应时间、运动学参数或脑成像技术捕捉感染效应, 但这些指标难以全面反映多层次认知过程。例如, 镜像神经系统的激活虽为共同编码理论提供证据, 却无法区分自动模仿与策略性调整的神经表征差异。类似地, 预测误差引发的动作偏离可能涉及前额叶调控与小脑介导的误差调整的交互, 但现有范式多未整合多模态生理指标, 导致机制解释碎片化。

针对上述局限性, 未来的研究需从多维度革新方法学设计。通过虚拟现实技术模拟真实场景, 整合多感官输入(如视觉、听觉或触觉), 动态追踪感染效应在连续互动中的演化, 以提升生态效度。其次, 设计纵向研究对比新手与专家的长期行为与神经可塑性变化, 揭示感染机制的发展轨迹与群体异质性。此外, 融合脑成像、生理信号与行为建模, 构建计算模型量化自动路径与意识路径的竞争权重, 将有助于突破单一指标的局限。还可引入自然主义范式弥补实验室控制的过度简化, 使研究更贴近实际情境。

总之, 方法学的局限并非否定已有成果, 而是揭示理论深化与技术创新的潜在空间。唯有跨越实验室与真实世界的鸿沟, 运动感染研究方能从“现象描述”迈向“机制预测”, 为跨学科应用奠定更坚实的科学基石。

6 总结与展望

运动感染作为人类社会性互动的神经基础, 其研究不仅揭示了动作系统与社会认知的深层耦合机制, 更在哲学层面挑战了传统的身心二元论框架。作为连接感知与动作的核心认知机制, 其理论演进与神经机制的解析揭示了人类动作理解与模仿的复杂本质。本文系统梳理了运动感染从低阶模仿到高阶预测的动态框架, 强调了镜像神经系统、预测加工模型及多层级网络交互的理论整合(图 1)。研究发现, 运动感染并非单一神经机制的产物, 而是感知系统、运动系统与社会认知网络动态耦合的结果。镜像神经系统虽在动作观察与执行共享表征中发挥基础作用, 但其功能需置于预测误差调控与意识路径竞争的整体框架中理解。预测加工理论为解释感染效应的方向性差异提供了计算视角, 揭示了内部模型校准在动作调整中的核心地位。而社会情境可以调控感染强度, 揭示运动感染可能具有进化赋予的适应性功能。

运动感染的研究经过多年的发展, 从单一理论解释迈向多学科交叉的整合范式, 构建了多层次解释链, 更推动了方法论革新, 如虚拟现实与生物力学反馈的结合、多智能体模型的战术优化,

以及基于脑机接口的神经调控技术。未来需构建动态权重模型, 量化情境复杂度、情感状态与社会认知对神经资源分配的交互效应。此外, 现有研究多基于西方工业化社会的样本, 忽视了文化背景对运动感染的塑造作用。当前跨文化研究存在“西方中心主义”倾向, 实验范式多基于西方社会情境, 未能涵盖本土化互动形式(例如, 中国太极拳的集体意蕴)。未来需开展全球多中心合作, 结合人类学田野调查与神经影像技术, 构建文化敏感的理论模型。

运动感染研究正处于学科交叉的快速发展阶段, 在其理论重构与应用拓展过程中, 离不开神经科学的不断深入解码, 同时也需兼顾社会科学的人文关怀以及技术伦理的审慎考量, 以促进多学科深度融合与协同发展。从婴儿的模仿本能到全球化的虚拟协作, 从进化赋予的共振能力到文明驯化的抑制策略, 运动感染深刻映射了人类作为社会性物种的生存智慧。未来的探索须置于动态交互的认知框架下进行解构。运动感染既体现为神经回路的生物编码机制, 又体现为社会认知的塑造过程。更深刻的是, 它揭示了人类生存境遇中个体自由与群体依存之间的永恒辩证关系。只有突破生物决定论与文化建构论的二元对

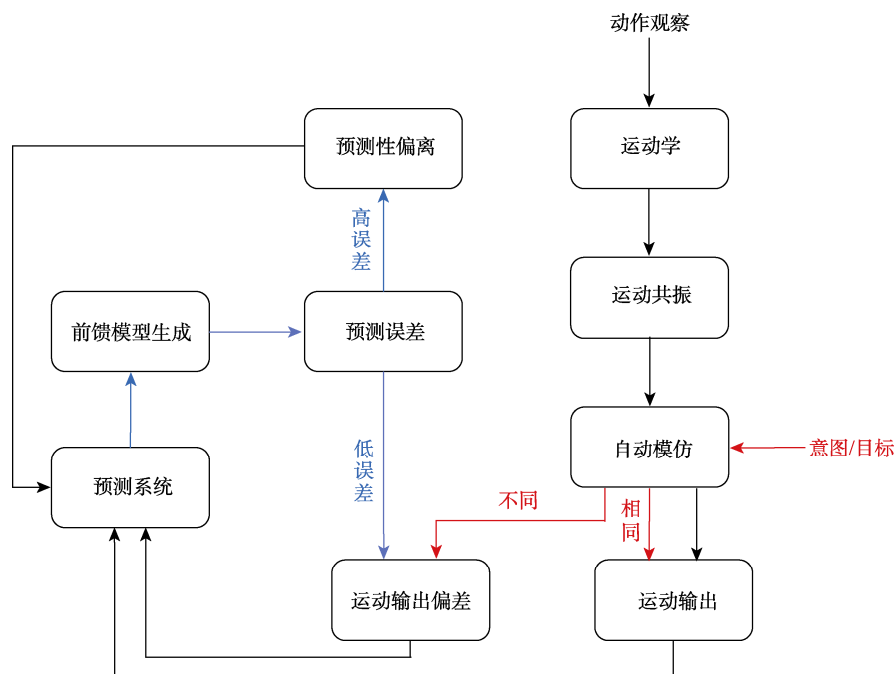


图 1 运动感染的层级关系示意图

立,才能建构完整的认知图式。这种多维度的本体论特征要求研究者必须建立跨学科的分析模型,在具身认知与文化表征的互动中,重新审视人类行为模式的双重生逻辑。

参考文献

- Adolphs, R. (2009). The social brain: Neural basis of social knowledge. *Annual Review of Psychology*, 60, 693–716.
- Aglioti, S. M., Cesari, P., Romani, M., & Urgesi, C. (2008). Action anticipation and motor resonance in elite basketball players. *Nature Neuroscience*, 11(9), 1109–1116.
- American Psychiatric Association. (2013). *Diagnostic and statistical manual of mental disorders* (5th ed.). <https://doi.org/10.1176/appi.books.9780890425596>
- Baldissera, F., Cavallari, P., Craighero, L., & Fadiga, L. (2001). Modulation of spinal excitability during observation of hand actions in humans. *The European Journal of Neuroscience*, 13(1), 190–194.
- Becchio, C., Pierno, A., Mari, M., Lusher, D., & Castiello, U. (2007). Motor contagion from gaze: The case of autism. *Brain*, 130(Pt 9), 2401–2411.
- Belot, M., Crawford, V. P., & Heyes, C. (2013). Players of Matching Pennies automatically imitate opponents' gestures against strong incentives. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 110(8), 2763–2768.
- Blakemore, S. J., & Frith, C. (2005). The role of motor contagion in the prediction of action. *Neuropsychologia*, 43(2), 260–267.
- Brass, M., Bekkering, H., & Prinz, W. (2001). Movement observation affects movement execution in a simple response task. *Acta Psychologica*, 106(1-2), 3–22.
- Buccino, G. (2014). Action observation treatment: A novel tool in neurorehabilitation. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, 369(1644), 20130185. <https://doi.org/10.1098/rstb.2013.0185>
- Buccino, G., Binkofski, F., Fink, G. R., Fadiga, L., Fogassi, L., Gallese, V., Seitz, R. J., Zilles, K., Rizzolatti, G., & Freund, H. J. (2001). Action observation activates premotor and parietal areas in a somatotopic manner: An fMRI study. *The European Journal of Neuroscience*, 13(2), 400–404.
- Carey, M. R. (2024). The cerebellum. *Current Biology*, 34(1), R7–R11.
- Caspers, S., Zilles, K., Laird, A. R., & Eickhoff, S. B. (2010). ALE meta-analysis of action observation and imitation in the human brain. *NeuroImage*, 50(3), 1148–1167.
- Castiello, U. (1999). Mechanisms of selection for the control of hand action. *Trends in Cognitive Sciences*, 3(7), 264–271.
- Castiello, U. (2003). Understanding other people's actions: Intention and attention. *Journal of Experimental Psychology. Human Perception and Performance*, 29(2), 416–430.
- Cattaneo, L., & Rizzolatti, G. (2009). The mirror neuron system. *Archives of Neurology*, 66(5), 557–560.
- Decety, J., Chaminade, T., Grèzes, J., & Meltzoff, A. N. (2002). A PET exploration of the neural mechanisms involved in reciprocal imitation. *NeuroImage*, 15(1), 265–272.
- Decety, J., Jackson, P. L., Sommerville, J. A., Chaminade, T., & Meltzoff, A. N. (2004). The neural bases of cooperation and competition: An fMRI investigation. *NeuroImage*, 23(2), 744–751.
- de Gelder, B., & Poyo Solanas, M. (2021). A computational neuroethology perspective on body and expression perception. *Trends in Cognitive Sciences*, 25(9), 744–756.
- de la Rosa, S., Ferstl, Y., & Bülthoff, H. H. (2016). Visual adaptation dominates bimodal visual-motor action adaptation. *Scientific Reports*, 6, 23829.
- di Pellegrino, G., Fadiga, L., Fogassi, L., Gallese, V., & Rizzolatti, G. (1992). Understanding motor events: A neurophysiological study. *Experimental Brain Research*, 91(1), 176–180.
- Dumas, G., Nadel, J., Soussignan, R., Martinerie, J., & Garnero, L. (2010). Inter-brain synchronization during social interaction. *Plos One*, 5(8), e12166. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0012166>
- Fadiga, L., Fogassi, L., Pavesi, G., & Rizzolatti, G. (1995). Motor facilitation during action observation: A magnetic stimulation study. *Journal of Neurophysiology*, 73(6), 2608–2611.
- Frank, M. J. (2025). Adaptive cost-benefit control fueled by striatal dopamine. *Annual Review of Neuroscience*, <https://doi.org/10.1146/annurev-neuro-112723-025228>
- Friston, K., & Kiebel, S. (2009). Predictive coding under the free-energy principle. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, 364(1521), 1211–1221.
- Galea, J. M., Vazquez, A., Pasricha, N., de Xivry, J. J. O., & Celnik, P. (2011). Dissociating the roles of the cerebellum and motor cortex during adaptive learning: The motor cortex retains what the cerebellum learns. *Cerebral Cortex*, 21(8), 1761–1770.
- Gallese, V., Keysers, C., & Rizzolatti, G. (2004). A unifying view of the basis of social cognition. *Trends in Cognitive Sciences*, 8(9), 396–403.
- Gangitano, M., Mottaghy, F. M., & Pascual-Leone, A. (2001). Phase-specific modulation of cortical motor output during movement observation. *Neuroreport*, 12(7), 1489–1492.
- Gibson, J. J. (1979). *The ecological approach to visual perception: Classic edition*. Houghton Mifflin.
- Giese, M. A., & Poggio, T. (2003). Neural mechanisms for the recognition of biological movements. *Nature Reviews. Neuroscience*, 4(3), 179–192.
- Gray, R. (2021). Review: Approaches to visual-motor control

- in baseball batting. *Optometry and Vision Science*, 98(7), 738–749.
- Gray, R., & Beilock, S. L. (2011). Hitting is contagious: Experience and action induction. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, 17(1), 49–59.
- Grèzes, J., Armony, J. L., Rowe, J., & Passingham, R. E. (2003). Activations related to "mirror" and "canonical" neurones in the human brain: An fMRI study. *NeuroImage*, 18(4), 928–937.
- Heyes, C. (2011). Automatic imitation. *Psychological Bulletin*, 137(3), 463–483.
- Hogeveen, J., & Obhi, S. S. (2012). Social interaction enhances motor resonance for observed human actions. *The Journal of Neuroscience*, 32(17), 5984–5989.
- Hohwy, J. (2020). New directions in predictive processing. *Mind & Language*, 35(2), 209–223.
- Hurley, S. (2008). The shared circuits model (SCM): How control, mirroring, and simulation can enable imitation, deliberation, and mindreading. *The Behavioral and Brain Sciences*, 31(1), 1–22.
- Iacoboni, M., Woods, R. P., Brass, M., Bekkering, H., Mazziotta, J. C., & Rizzolatti, G. (1999). Cortical mechanisms of human imitation. *Science*, 286(5449), 2526–2528.
- Ikegami, T., & Ganesh, G. (2014). Watching novice action degrades expert motor performance: Causation between action production and outcome prediction of observed actions by humans. *Scientific Reports*, 4, 6989.
- Ikegami, T., Ganesh, G., Takeuchi, T., & Nakamoto, H. (2018). Prediction error induced motor contagions in human behaviors. *eLife*, 7, e33392. <https://doi.org/10.7554/eLife.33392>
- Ikegami, T., Nakamoto, H., & Ganesh, G. (2019). Action imitative and prediction error-induced contagions in human actions. In M. L. Cappuccio (Ed.), *Handbook of Embodied Cognition and Sport Psychology* (pp. 381–412). The MIT Press.
- Kilner, J. M., Friston, K. J., & Frith, C. D. (2007). Predictive coding: An account of the mirror neuron system. *Cognitive Processing*, 8(3), 159–166.
- Leighton, J., Bird, G., Orsini, C., & Heyes, C. (2010). Social attitudes modulate automatic imitation. *Journal of Experimental Social Psychology*, 46(6), 905–910.
- Liepelt, R., & Brass, M. (2010). Automatic imitation of physically impossible movements. *Social Cognition*, 28(1), 59–73.
- Longo, M. R., Kosobud, A., & Bertenthal, B. I. (2008). Automatic imitation of biomechanically possible and impossible actions: Effects of priming movements versus goals. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 34(2), 489–501.
- Maeda, F., Kleiner-Fisman, G., & Pascual-Leone, A. (2002). Motor facilitation while observing hand actions: Specificity of the effect and role of observer's orientation. *Journal of Neurophysiology*, 87(3), 1329–1335.
- Manthey, S., Schubotz, R. I., & von Cramon, D. Y. (2003). Premotor cortex in observing erroneous action: An fMRI study. *Brain Research. Cognitive Brain Research*, 15(3), 296–307.
- Meltzoff, A. N., & Moore, M. K. (1977). Imitation of facial and manual gestures by human neonates. *Science*, 198(4312), 74–78.
- Mezzarobba, S., Grassi, M., Pellegrini, L., Catalan, M., Kruger, B., Furlanis, G., Manganotti, P., & Bernardis, P. (2018). Action observation plus sonification. A novel therapeutic protocol for Parkinson's patient with freezing of gait. *Frontiers in Neurology*, 8, 723.
- Néda, Z., Ravasz, E., Brechet, Y., Vicsek, T., & Barabási, A. L. (2000). The sound of many hands clapping. *Nature*, 403(6772), 849–850.
- Parr, T., & Pezzulo, G. (2021). Understanding, explanation, and active inference. *Frontiers in Systems Neuroscience*, 15, 772641.
- Pereira, L. M., & Lopes, A. B. (2020). *Machine ethics: From machine morals to the machinery of morality*. Cham, Switzerland: Springer.
- Popa, L. S., & Ebner, T. J. (2019). Cerebellum, predictions and errors. *Frontiers in Cellular Neuroscience*, 12, 524.
- Prinz, W. (1997). Perception and action planning. *European Journal of Cognitive Psychology*, 9(2), 129–154.
- Ricciardi, E., Bonino, D., Sani, L., Vecchi, T., Guazzelli, M., Haxby, J. V., Fadiga, L., & Pietrini, P. (2009). Do we really need vision? How blind people "see" the actions of others. *The Journal of Neuroscience*, 29(31), 9719–9724.
- Rizzolatti, G., & Craighero, L. (2004). The mirror-neuron system. *Annual Review of Neuroscience*, 27, 169–192.
- Rizzolatti, G., Fadiga, L., Fogassi, L., & Gallese, V. (1999). Resonance behaviors and mirror neurons. *Archives Italiennes De Biologie*, 137(2-3), 85–100.
- Rizzolatti, G., Fadiga, L., Gallese, V., & Fogassi, L. (1996). Premotor cortex and the recognition of motor actions. *Brain Research. Cognitive Brain Research*, 3(2), 131–141.
- Rizzolatti, G., Fogassi, L., & Gallese, V. (2001). Neurophysiological mechanisms underlying the understanding and imitation of action. *Nature Reviews. Neuroscience*, 2(9), 661–670.
- Schubotz, R. I. (2007). Prediction of external events with our motor system: Towards a new framework. *Trends in Cognitive Sciences*, 11(5), 211–218.
- Schubotz, R. I., & von Cramon, D. Y. (2001). Functional organization of the lateral premotor cortex: fMRI reveals different regions activated by anticipation of object properties, location and speed. *Brain Research. Cognitive Brain Research*, 11(1), 97–112.
- Sokolov, A. A., Miall, R. C., & Ivry, R. B. (2017). The cerebellum: Adaptive prediction for movement and cognition. *Trends in Cognitive Sciences*, 21(5), 313–332.
- Sparks, S., Douglas, T., & Kritikos, A. (2016). Verbal social

- primes alter motor contagion during action observation. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 69(6), 1041–1048.
- Streng, M. L., Popa, L. S., & Ebner, T. J. (2022). Cerebellar representations of errors and internal models. *Cerebellum*, 21(5), 814–820.
- Takeuchi, T., Ikudome, S., Unenaka, S., Ishii, Y., Mori, S., Mann, D. L., & Nakamoto, H. (2018). The inhibition of motor contagion induced by action observation. *Plos One*, 13(10), e0205725. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0205725>
- Thelen, E., & Smith, L. B. (1994). *A dynamic systems approach to the development of cognition and action*. MIT Press.
- Uithol, S., van Rooij, I., Bekkering, H., & Haselager, P. (2011). Understanding motor resonance. *Social Neuroscience*, 6(4), 388–397.
- Van Overwalle, F., & Baetens, K. (2009). Understanding others' actions and goals by mirror and mentalizing systems: A meta-analysis. *NeuroImage*, 48(3), 564–584.
- Wang, K. P., Frank, C., Hung, T. M., & Schack, T. (2022). Neurofeedback training: Decreases in Mu rhythm lead to improved motor performance in complex visuomotor skills. *Current Psychology*, 1–12. doi: 10.1007/s12144-022-03190-z
- Wilson, M., & Knoblich, G. (2005). The case for motor involvement in perceiving conspecifics. *Psychological Bulletin*, 131(3), 460–473.

From action imitation to predictive processing: The dynamic neural mechanism and practical application prospect of motor contagion

LIU Kaihang^{1,3}, PIAO Zhongshu², TIAN Ying³, WANG Liyan⁴, WANG Hongbiao¹

(¹ Department of Physical Education, Shanghai University of Medicine and Health Sciences, Shanghai 201318, China)

(² Physical Education College, Jilin University, Changchun 130012, China) (³ College of Sports Science,

Shenyang Normal University, Shenyang 110034, China) (⁴ College of Rehabilitation Sciences,

Shanghai University of Medicine and Health Sciences, Shanghai 201318, China)

Abstract: Motor contagion, as a core mechanism for the dynamic coupling of the perception and action systems in human social interaction, has long been subject to controversy regarding its neural mechanisms and evolutionary significance. In social communication, the unconscious influence on one's own actions triggered by observing others' actions is termed motor contagion. It forms the foundation of human imitation and social learning, playing a critical role in social cognition, group coordination, and other domains. Research suggests that the essence of motor contagion lies in the dynamic interaction among the perceptual system, motor system, and social cognitive networks. While the mirror neuron system serves as a foundational role in the shared representation of action observation and execution, its function must be understood within the broader framework of predictive error regulation and competition between conscious pathways. The predictive processing theory calibrates internal action representations through forward models, revealing how predictive errors modulate the directional plasticity of motor contagion and explaining the behavioral diversity from imitation to deviation. Social contexts regulate the intensity of contagion via the prefrontal cortex, indicating that motor contagion possesses adaptive functions endowed by evolution. Future research should integrate interdisciplinary approaches from psychology, neuroscience, and computational modeling to deepen the analysis of dynamic interaction mechanisms and explore practical implementations in complex social scenarios.

Keywords: motor contagion, neural mechanisms, mirror neuron system, predictive processing, social cognition