

• 研究前沿(Regular Articles) •

注意力在基于价值决策中的计算机制： 加法模型与乘法模型的动态调控*

周雨璇¹ 杨依琳² 黄建平¹

(¹ 苏州大学教育学院心理学系, 苏州 215123)

(² 荷兰格罗宁根大学语言与认知中心, 格罗宁根 9712 EK, 荷兰)

摘要 在价值决策中, 个体不可能同时以同等权重处理所有选项信息, 注意因而成为塑造选择的关键机制。当前争议集中在: 注意究竟通过放大被关注信息的价值权重(乘法机制), 还是通过为当前关注选项提供额外推动(加法机制)来影响证据积累。本文系统梳理行为、计算建模与神经证据后提出, 两种机制并非竞争关系, 而是同一决策过程在不同阶段与层级上的功能性分工。在此基础上, 本文提出注意的计算机制在决策过程中呈现乘法向加法的动态转变。具体而言, 决策早期与信息的属性层(价格、收益等)以及选项层(主观价值), 注意以乘法调节为主, 表现为放大价值信号的权重; 决策后期与整合层(证据积累)上, 注意则更可能表现为对选择方向的额外推动。基于此, 本文提出“时间×信息层级”的整合框架, 以统一解释既有研究分歧, 并揭示注意在价值决策中如何通过多路径动态调控证据积累过程, 从而为构建更具解释力的决策模型提供新的理论基础。该框架进一步强调, 注意并非单一作用机制, 而是一个跨时间与信息层级协同运作的动态调控系统。

关键词 注意, 价值决策, 证据积累, 加法机制, 乘法机制

分类号 B842

1 引言

价值决策并非对既定效用的静态读取, 而是在有限时间与认知资源约束下, 对多种信息进行采样、比较与整合的动态过程。在此过程中, 个体无法同时以同等权重处理所有选项与属性, 因而必须在不同信息之间进行选择关注。在信息丰富而注意资源有限的情境中, 注意不仅被视为一种有限的认知资源, 还在从复杂的环境中筛选与建构价值相关信息的过程中发挥核心作用(De Martino & Cortese, 2023)。因此, 个体在选择食物、商品或风险方案时, 不仅需要评估各选项的主观价值, 还必须决定此刻优先处理哪些信息, 即“先看什么、再比什么”。与此同时, 主观价值本

身并非固定, 而是依赖个体当前目标与内部状态, 并在不同情境中动态变化(Juechems & Summerfield, 2019)。神经证据表明, 大脑中的价值表征会随行为目标改变而发生重构, 即相同选项在不同目标下可被赋予不同价值(Castegnetti et al., 2021)。然而, 相比于价值本身如何被建构, 更为核心的是, 这些价值信息如何进入比较过程, 并在后续证据积累过程中持续影响最终选择。

序列抽样模型为回答这一问题提供了核心框架。该类模型认为, 决策不是一次性完成的, 而是通过对证据的持续采样与积累逐步形成, 当某一选项的累积证据达到阈值时即产生选择(Busemeyer & Townsend, 1992; Forstmann et al., 2016; 刘逸康, 胡传鹏, 2024; Usher & McClelland, 2001)。该框架不仅适用于传统的二选一任务, 也被广泛应用于多属性、多选项决策情境。在这些情境中, 个体需要在属性比较、选项比较与证据积累之间不断切换(Busemeyer et al., 2019;

收稿日期: 2026-04-24

* 国家自然科学基金项目(32471128)。

通信作者: 黄建平, E-mail: jphuang@suda.edu.cn

Ratcliff et al., 2016)。在价值决策中, 进入积累过程的并非刺激强度本身, 而是选项或属性的主观价值。不同属性可能以不同顺序和速度进入比较, 从而使决策表现出明显的时间结构(Busemeyer & Townsend, 1992; Shadlen & Shohamy, 2016; Zylberberg et al., 2024)。多属性研究进一步表明, 不同属性(如审美与热量、价格与质量)不仅可以通过调节漂移率进入证据积累过程, 而且注意在属性与选项之间的分配会共同决定哪些信息被优先整合、哪些信息被相对折扣(Fisher, 2021; 刘梦颖等, 2024)。这一视角将研究重点从“单一的价值比较过程”扩展至“价值在决策过程的不同阶段”, 并凸显了注意在连接信息采样与决策形成中的关键作用。

越来越多的研究表明, 注意并不仅仅是在形成主观偏好之后的被动结果, 而可能主动参与信息采样、价值构建与最终选择形成过程。现实决策中, 个体不断在选项之间转移目光, 在属性之间切换加工重心, 而非同时处理全部信息。一系列眼动研究发现, 注视时间更长——尤其在决策末段被持续注视的选项——更可能被最终选择(Bhatnagar & Orquin, 2022; Lupkin & McGinty, 2023; Shimojo et al., 2003)。进一步操控注视顺序或持续时间也会系统性改变选择概率(Eum et al., 2023; Tavares et al., 2017)。这些结果表明, 注意不仅仅是偏好的反映性信号, 也可能直接参与偏好的形成过程。但需要注意的是, 视觉注视并不完全等同于注意本身, 个体即使未直接注视某一位置, 也可能通过隐性注意(covert attention)优先加工未被注视的信息(Carrasco, 2011; Posner, 1980)。这意味着当前大量基于眼动研究捕捉到的内容, 可能只是注意动态过程中的一部分外显表现。在互动情境中, 个体还可以有目的地调节自身的注视模式, 以传递或隐藏信息。这进一步表明注意与选择之间的关系具有情境依赖性(Hausfeld et al., 2021)。进一步研究指出, 注意分配本身还可能反映最优信息采样策略, 即个体倾向于优先关注价值较高且不确定性较大的选项(Callaway et al., 2021)。在此基础上, Krajbich 等(2010)提出的注意力漂移扩散模型(attentional drift diffusion model, aDDM)将注意正式纳入证据积累过程: 被当前注视的选项在积累中获得更大权重, 而未被注视选项的价值则被打折扣。围绕这一模型, 研究逐

渐分化出两种解释路径。其一, Smith 和 Krajbich (2019)将其称为乘法模型(multiplicative model), 即注意通过放大被关注信息的价值作用而影响漂移率, 这一过程可以被表示为注意对证据权重的调节机制(Zilker & Pachur, 2022)。多选项研究进一步表明, 注视不仅反映信息采样, 还会主动提升被注视选项的主观价值, 从而改变其相对优势(Thomas et al., 2021), 因此注意效应依赖于价值大小(Krajbich et al., 2010; Smith & Krajbich, 2019)。其二, Smith 和 Krajbich (2019)将其命名为加法模型(additive model), 即注意作为一种额外的方向性推动, 直接使决策变量朝当前被关注的选项方向偏移, 其作用相对独立于价值大小(Cavanagh et al., 2014; Frömer & Shenhav, 2022)。两种机制分别强调注意对价值表征与证据整合的不同作用。已有研究从行为表现、计算建模与神经机制等多个层面为其提供了支持, 但单一机制难以同时解释早期的信息采样、后期的最终注视偏向以及多属性决策中的跨层级加工。

基于此, 本文聚焦一个更具体的问题: 注意究竟在价值决策的哪一阶段、以何种计算方式、作用于哪一层级的信息? 围绕这一问题, 本文首先梳理乘法机制与加法机制的理论假设及其证据基础, 提出一个“时间×信息层级”的整合框架: 在决策早期与较低信息层级上, 注意更可能表现为对价值信号的增益调节, 这一过程与注意在信息采样阶段优先分配于高价值与高不确定性信息的现象相一致(Callaway et al., 2021), 而在决策后期与较高整合层级上, 注意更可能表现为对选择方向的额外推动力。本文的目标并非在两种机制之间简单裁决, 而是解释它们为何在不同研究中得到不同支持, 并据此推进对价值决策中注意机制的结构化理解。

2 注意的乘法机制: 通过价值增益影响决策

2.1 乘法机制的核心假设: 注意放大价值信号

乘法机制的核心假设是, 注意并非直接推动选择, 而是通过改变价值信号在证据积累中的作用来影响最终决策。在这一框架下, 被注意的信息更容易影响决策, 并不是因为它获得了额外的推动作用, 而是因为其原有价值在比较过程中被放大了。注意效应表现为对价值的依赖性, 相同

的注视时长, 对高价值选项的推动更强, 而对低价值选项的影响相对较弱。

基于这一思想, Krajbich 等(2010)提出注意力漂移扩散模型(attentional drift diffusion model, aDDM), 首次在计算层面将注意纳入证据积累过程。该模型认为, 在任意时刻, 被注意的选项在证据积累中权重更高, 而未被注意的选项相对被削弱, 从而使当前注视选项更具优势(Krajbich, 2019; Krajbich et al., 2010)。从计算角度看, 这一机制可理解为: 注意并不改变选项本身的价值, 而是改变该价值在比较过程中所占的权重。

这一交互特性使乘法机制能够自然解释总体价值效应: 当整体价值较高时, 被注意信息所带来的增益更容易转化为更快的证据积累和更强的选择优势。同时, 这一机制也可扩展至多属性决策情境。在此类情境中, 注意不仅在选项之间分配, 也在属性之间分配, 从而改变不同属性进入整体价值计算的相对权重(Fisher, 2017; Yang & Krajbich, 2023)。因此, 乘法机制不仅适用于简单的二选一任务, 也能够解释复杂价值构建过程中注意对信息权重的系统性调节。

2.2 乘法机制的行为与计算证据

在基于价值的决策中, 个体通常需要在多个选项之间进行比较, 其中最基本的情境是二选一决策。在这一过程中, 决策并非瞬时完成, 而是通过在不同选项之间不断转移注意, 对信息进行逐步采样并积累证据, 从而形成最终选择。换言之, 个体会在选项之间交替注视, 并在这一过程中持续更新比较结果。基于这一动态过程, 早期眼动研究发现, 个体更有可能选择长时间注视的选项, 这一现象被称为注视偏向效应(Shimojo et al., 2003)。进一步通过操控两选项的相对注视时间发现, 该效应具有因果性: 当某一选项被强制注视更长时间时, 其被选择的概率显著提高。相关元分析也表明, 通过改变注意分配影响选择的效应具有稳定性, 其中停留时间的操控尤为显著(Bhatnagar & Orquin, 2022)。

然而, 这些结果主要说明注意会影响选择, 但并不能区分其具体作用机制。若注意通过乘法机制起作用, 则高价值选项在被注视时应表现出更强的选择优势与更快的决策速度; 若注意仅提供固定偏置, 则这一优势不应依赖价值大小。现有行为与计算建模研究整体上更支持前一种解

释。aDDM 相关研究显示, 注视效应在总体价值较高或价值差异较小的条件下更为显著, 这表明注意并非简单将选择推向当前注视项, 而是通过改变价值进入比较过程的强度发挥作用(Krajbich, 2019; Krajbich et al., 2021; Smith & Krajbich, 2019)。

这一机制在更复杂的决策情境中同样得到支持。多选项研究表明, 视觉显著性与价值信息需要被联合建模, 注意通过改变信息采样与比较顺序间接影响选择; 在多属性决策中, 注意还会在属性层面重新分配权重, 使某些属性在最终价值计算中占据更大比重(Fisher, 2017; Yang & Krajbich, 2023)。此外, 注意的作用还可能跨越不同决策, 影响后续选择中的信息采样与权重重新分配。已有研究发现, 前一任务中形成的注意偏向可以迁移到后续价值选择中, 进而改变个体的信息采样习惯与权重分配(Gwinn et al., 2019)。这些研究共同表明, 注意会影响不同价值信息在比较过程中的权重, 从而影响最终选择。

2.3 乘法机制的认知神经机制

在神经层面上, 乘法机制的关键预测可以归结为一个核心命题: 注意并非提供一个与价值无关的固定推动力, 而是通过增强价值信号本身, 从而改变其在比较过程中的作用强度。因此, 其关键特征并不仅仅是神经活动增强, 而是这种增强会依赖于信息本身的价值大小。

首先, 来自价值编码区域的研究表明, 注意会直接调节价值信号的表达强度。在腹内侧前额叶皮层(ventromedial prefrontal cortex, vmPFC)和眶额皮层(orbitofrontal cortex, OFC)中, 神经活动不仅反映选项价值, 还会随注意分配发生系统性变化。例如, Lim 等(2011)发现, vmPFC 中的价值信号会随着注意状态发生改变; McGinty 等(2016)进一步表明, 在自由观看条件下, OFC 对价值的编码不仅取决于选项本身的价值, 还会受到当前注视位置的调节。这些结果显示, 注意影响的并非信息是否被编码, 而是价值信号本身的表达强度。更重要的是, 这种调节并非对所有信息的统一增强, 而更可能依赖于选项的相对价值大小, 即高价值信息在获得注意后, 其价值表征会被进一步放大(Pearson et al., 2022)。因此, 注意效应会随着价值差异变化而动态改变, 这更接近于对价值信号的增益调节, 而不是一个与价值无关的固

定推动力。

进一步的研究表明,这种价值增益过程可能并不完全依赖外显注视。从神经计算视角看,主观价值编码受到有限认知资源约束(Polania et al., 2019),因此注意可以被理解作为一种资源分配机制,使被关注的信息获得更高编码精度,从而在比较过程中产生更大影响。与此同时,价值导向注意研究发现,高价值刺激即使未被直接注视,仍可以优先获得注意资源(Anderson et al., 2011)。进一步地,隐性注意同样可以调节 OFC 中的价值编码(Xie et al., 2018),而 Li 等(2026)研究也发现,高价值与隐性注意之间也存在相互关系——在选项未被直接注视的时候,高价值的选项就已经开始吸引注意。这些结果表明,价值与注意之间的相互作用可能在外显注视发生之前便已经开始,因此乘法机制更可能体现为一种依赖价值大小的信息增益过程。

2.4 乘法机制的局限与关键争议

乘法机制的优势在于能够将注意效应清晰嵌入价值比较过程,但其局限也源于这一设定:一旦注意效应不依赖价值大小,或主要发生在价值比较之后,单一的乘法解释便难以成立。

第一,因果方向并非始终单向。乘法机制通常假定“注意引起价值放大进而产生选择”,但实际决策中,注意与选择之间可能存在双向动态关系,正在形成的选择倾向也可能反过来牵引注意,使个体在临近决策时更频繁地注视即将被选中的选项。因此,注视与选择之间的关联,并不一定说明注意在选择形成之前就对价值产生了调节作用。有研究指出,注意不仅可以影响偏好的形成,正在形成的选择倾向同样会反过来引导注意分配(Ting & Gluth, 2024)。

第二,注意并非始终跟随选项的主观价值。研究表明,注意优先指向的往往是与当前目标或任务相关,或具有更高诊断性的信息,而不一定是主观价值最高的信息(Sepulveda et al., 2020; Vanunu et al., 2021)。这表明,注意在决策过程中可能首先服务于目标匹配与信息筛选。具体而言,个体可能通过学习形成对任务相关特征的选择偏好,从而优先关注这些信息,使其进入后续的价值计算过程(Jahn et al., 2024)。因此,注意对决策的作用并不是简单地放大价值,而是更可能通过影响信息输入间接塑造价值。

第三,单纯依赖乘法增益机制,难以解释那些不依赖价值大小的后期偏向。例如,即使是低价值选项,被持续注视也可能获得额外选择优势;而决策末段出现的最终注视偏向,也可能更多反映了对已经形成的选择倾向逐步稳定化,而不仅仅是对价值信号的持续放大(Cavanagh et al., 2014; Westbrook et al., 2020)。因此,决策的后期注意效应可能不仅涉及价值权重调节,还可能与选择收敛、决策承诺或方向性偏移有关。

3 注意的加法机制:通过固定增益推动决策

3.1 加法机制的提出:对价值放大解释的补充

如果说乘法机制强调注意如何调节价值信号的权重,那么加法机制关注的则是:在价值已进入积累过程之后,注意是否仍作为独立输入继续推动选择。该机制正是为解释那些难以用“价值放大”说明的注意效应而提出,尤其是决策后期持续注视与最终选择高度重合的现象(Mormann & Russo, 2021)。

在加法框架下,注意并不改变选项本身的价值,而是在证据积累过程中引入一个与当前关注对象对应的固定推动项。该推动项不涉及“选项有多好”,而是决定“积累更容易朝哪一方向推进”。因此,即使两个选项价值相当,甚至当前被注意选项价值较低,只要注意持续集中在某一选项上,决策变量仍可能被推向该选项(Cavanagh et al., 2014; Frömer & Shenhav, 2022)。加法机制的重要意义在于,注意不仅调节价值的作用,还会直接参与选择的形成。这一视角尤其适用于解释这样一类选择结果:仅凭选项之间的价值差异难以预测个体选择,而注意在时间中的分配却能够提供显著的预测信息,同时也为理解注意在决策后期如何推动选择倾向提供了直接的理论路径。

3.2 加法机制的行为与计算机制

从行为现象看,加法机制的直接证据来自那些注视效应较少依赖或不依赖价值大小的结果。更关键的是,在某些任务中,即使在控制选项之间的价值差异之后,被注视更多的选项仍更容易被选择。如果注意仅通过调节价值权重起作用,那么在控制价值之后这一效应应当减弱或消失。然而事实并非如此,这表明注意对选择的影响并不总能还原为价值权重变化。

在建模层面, Cavanagh 等(2014)基于漂移扩散模型(drift diffusion model, DDM), 将单次注视时间作为回归变量引入证据积累过程, 发现其主要预测的是漂移率向当前注视选项方向的偏移, 而非通过放大该选项的价值信号影响决策。由此, 加法机制能够解释低价值甚至负价值选项在被持续关注时仍更可能被选中的现象。在更复杂的多属性与多选项情境中, 这种独立推动作用同样存在。注意在属性之间的切换不仅决定信息采样顺序, 还会改变积累路径, 使当前被关注的信息更容易影响后续的整合结果(Frömer & Shenhav, 2022)。

进一步的实验研究通过操纵决策过程中的注视时间, 发现增加对某一选项的注视会显著提高其被选择的概率, 从而为注意作为独立因素直接推动选择提供了行为层面的因果证据。同时, 该研究表明, 注视效应主要发生在决策后期阶段, 支持证据积累过程中存在近因效应(刘洪志 等, 2022)。但值得注意的是, 后期注意偏向也并非完全依赖显性眼动本身。已有研究发现, 即使未发生直接注视, 也依然能够对最终选择产生系统性影响(Eum et al., 2023)。这一结果提示, 决策后期的偏向过程可能不仅涉及外显注视的持续停留, 还可能包含隐性注意对特定信息的优先加工。

3.3 加法机制的认知神经机制

加法机制的神经预测可以归结为一个核心命题: 在决策后期, 除价值信号本身之外, 还存在一种额外的方向性输入, 推动决策系统逐渐收敛于某一选择。围绕这一命题, 现有证据主要来自于对决策后期整合阶段的神经记录。

首先, 单神经元研究提供了较为直接的支持。Sampson 等(2025)在前辅助运动区(pre-supplementary motor area, pre-SMA)的记录发现, 当前被采样的选项的神经活动会随注意分配而增强, 并且这种增强并不完全依赖其主观价值的大小。同时, 未被关注的选项仍保持一定程度的神经表征。这一结果提示, 决策后期可能存在一种不完全依赖价值大小的方向性偏移过程。然而, 需要注意的是, 前辅助运动区本身也广泛参与动作准备、反应选择与行为承诺等过程, 因此这些晚期活动未必完全反映注意对价值整合的直接推动, 也可能包含决策收敛后的动作规划成分。因而, 我们更倾向于将其理解为一种与后期

方向性推动相关的候选神经信号。进一步的证据来自于对决策时间结构的研究。Aquino 等(2023)的人类颅内记录显示, 前辅助运动区(pre-SMA)中的神经活动先反映价值整合信号, 随后才编码最终选择结果, 表明价值计算与选择承诺在时间上存在分离。这一时间上的先后关系意味着, 在价值整合完成之后, 决策系统可能仍存在一个与选择收敛相关的后期阶段。不过, 该阶段究竟反映注意偏向、反应承诺, 还是更一般性的紧迫性过程, 目前仍需进一步研究加以区分。

3.4 加法机制的边界条件

尽管加法机制弥补了乘法解释的部分不足, 但将注意简化为一种固定推动作用同样会带来新的问题。首先, 加法机制可能低估价值对注意以及注意对选项的制约作用。大量研究表明, 注视并非单独决定选择的因素, 被关注的高价值选项通常比低价值选项更容易获得最终优势(Krajbich et al., 2010; Smith & Krajbich, 2019), 说明注意的推动往往嵌入在既有价值结构之中。

其次, 加法机制难以解释多属性决策中注意与属性权重之间的系统关系。若注意仅提供恒定推动力, 则难以说明其为何会稳定改变某些属性在最终价值计算中的作用大小, 而这类现象更接近乘法式或交互式调节(Yang & Krajbich, 2023)。最后, 神经证据同样表明, 注意不仅影响选择方向, 还会改变价值编码本身。腹内侧前额叶(vmPFC)、眶额皮层(OFC)及相关网络中的价值信号会随注意状态而变化(Lim et al., 2011; McGinty et al., 2016; Xie et al., 2018), 这超出了单纯“固定推动”的解释范围。

因此, 加法机制更适合被理解为注意在特定阶段和特定层级上的一种作用形式, 而非对全部注意效应的统一解释。只有将其置于更长的决策时间过程与更复杂的信息加工结构中, 才能准确界定其适用边界。

4 时间×信息层级: 整合两类机制

4.1 为什么需要整合: 两类机制解释的是不同问题

将乘法与加法机制简单理解为非此即彼, 容易把原本属于不同层级与不同阶段的现象置于同一维度上竞争。实际上, 两类机制分别反映了注意作用的不同侧面: 乘法机制强调注意如何改变价值信息的作用, 而加法机制则强调注意如何在

临近选择时推动决策朝某一方向积累。因此,二者并非替代关系,而是功能互补。前者回答“被关注的信息为何更有分量”,后者回答“当前关注为何持续推动选择”。若不加区分,同一结果既可能被解释为价值放大,也可能被解释为方向性推动,而造成表面上的理论对立。

近年的模型与神经研究已开始为这种互补性提供支持。He 和 Bhatia (2023)提出交互性影响,指出注意并非被动跟随单一属性,而是在属性之间递归互动,从而改变后续采样与整合路径;Sampson 等(2025)的神经发现也为多种注意作用方式的可能性提供了经验依据,这些结果可与乘法与加法机制的不同解释相对应。基于此,研究重点不应停留在“哪种机制更优”,而应转向“在何种条件下不同机制分别占主导”,这也构成了本文提出整合框架的理论出发点。

4.2 时间维度:从价值增益到选择偏向

一个自然的整合路径是从时间维度来理解这一问题。从计算建模角度看,决策并非在单一时点完成,而是证据积累在时间中的展开过程。在序列抽样模型中,决策变量随时间逐步累积,并在达到预设阈值时形成选择。神经影像研究进一步表明,这种随时间演化的决策信号在不同情境(如社会与非社会决策)中呈现出高度一致的动态特征,表明其可能依赖统一的神经计算机制(Arabadzhiyska et al., 2021)。HajiHosseini 和 Hutcherson (2021)通过结合计算模型与 EEG 信号,区分了属性构建与证据积累在时间上的先后关系:属性相关信号在决策早期达到峰值,而证据积累信号则在更晚阶段逐渐增强,并在接近反应时达到最大。这一结果表明,决策过程呈现出从信息构建到证据收敛的动态演化过程。

因此,价值决策更适理解为一个随时间动态展开的连续过程,而非单一时点完成的结果。这一过程通常包括信息采样、比较整合以及选择输出等阶段。Westbrook 等人(2020)认为,注意在决策过程中会根据时间进程逐渐变化,由乘法逐渐过渡到加法。此外,多属性漂移扩散模型表明,不同属性不仅在证据积累中的权重不同,其进入积累过程的时间也存在差异(即“漂移潜伏期”)。这意味着,不同信息并非同时进入比较,而是在时间进程中被逐步引入并整合。从操作性角度看,决策早期通常对应证据尚未接近阈值、系统仍处

于广泛信息采样与权重分配的阶段;而在决策后期,随着证据逐渐逼近阈值,系统内部的选择倾向开始稳定,决策过程也逐渐由开放式比较转向收敛性选择(刘逸康,胡传鹏,2024)。与此一致,证据积累过程中的参数(如漂移率)也可能随时间动态变化(Lombardi & Hare, 2021)。与此同时,决策推进还伴随着系统不确定性的逐渐降低,个体对于选项价值及其属性的确定性会在比较过程中不断细化(Lee & Hare, 2023)。需要强调的是,选项间的价值差异本身并不随时间改变,但其对行为的影响会随着证据积累过程逐渐展开。因此,在决策早期,由于偏好尚未稳定,系统通常表现出较高不确定性;而在后期,随着证据不断接近决策边界,系统对价值差异的利用增强,决策也逐渐收敛。这一时间结构为理解注意的作用提供了新的视角。在决策早期,高价值信息更容易优先获得注意资源,无论这种注意体现为显性注视还是隐性注意,都可能通过提高价值信息进入积累系统时的权重,放大其对后续选择的影响。因此,乘法机制更接近一种“注意调节价值信号增益”的过程,而不仅仅是“看向哪里”的眼动现象。此时,被关注选项或属性的价值信息更容易进入积累系统,并在证据积累过程中获得更高权重,因此这一阶段更容易表现为乘法机制,即注意通过改变价值信号在漂移率中的权重影响后续决策(Fisher, 2023; Krajbich et al., 2010; Yang & Krajbich, 2023)。需要说明的是,在 aDDM 中,注意折扣因子 θ 并非仅在决策早期发挥作用,而是在整个试次中持续调节被注视与未被注视选项的价值贡献,直至决策变量达到边界。因此,本文所说“早期更接近乘法机制”,并不意味着乘法机制在后期完全消失,而是指在不确定性较高、信息仍在被采样与加权的阶段,价值增益效应在行为上更容易被观察到。随着证据积累持续推进,系统内部的不确定性逐渐下降,注意分配也开始由早期较为分散的信息采样,逐渐转向对少数关键选项与属性的集中比较(Lee & Hare, 2023; Sullivan & Huettel, 2021)。随着决策进一步推进,注意会逐渐由在不同选项之间来回分配,转向集中于最终被选择的选项。此时,注意的行为效应更可能表现为一种与当前选择方向一致的偏移过程,因此后期注意更接近一种与决策收敛相关的加法性偏移,而不再仅仅体现为对价值信号的持

续放大(Lupkin & McGinty, 2023; Westbrook et al., 2020; Zylberberg et al., 2026)。

需要注意的是, 已有部分计算模型实际上已经开始尝试同时整合乘法与加法机制。例如, 注视加权线性累加器模型(Gaze-weighted Linear Accumulator Model, GLAM)强调视觉注视对价值信息进入证据积累过程方式的调节, 认为注视能够改变不同选项证据积累的相对速率(Molter et al., 2019; Thomas et al., 2019)。此外, Rieskamp 和 Hadian Rasanan (2023)提出的注视加权优势竞争扩散模型(Gaze-weighted Advantage Race Diffusion, GARD)也尝试在决策的过程中, 同时考虑注意与价值之间存在着乘法与加法的交互作用。这说明, 已有研究事实上已经开始意识到, 注意对决策的影响可能并不局限于单一机制, 而可能同时涉及价值增益与方向偏移两类过程。

然而, 现有模型更多关注的是在同一计算框架中同时纳入乘法与加法成分, 以提高对行为数据的拟合, 并未进一步强调两类机制在决策时间进程中的动态主导性变化。

4.3 信息层级: 从价值表征到证据整合

但是, 仅有时间维度仍不足以解释所有分歧, 因为注意作用的对象本身并非单一。更完整的解释还需要回答: 注意究竟作用于属性、选项, 还是作用于选项之间的整合与比较?

从信息层级看, 价值决策至少可以区分为三个相互关联的层面: 属性层、选项层与整合层。属性层涉及价格、概率、收益等局部信息, 选项层对应单个方案形成的整体主观价值, 而整合层则涉及不同选项之间的竞争、证据累积与最终选择。此外, 多属性决策研究也表明, 视觉显著性可能影响不同属性与选项进入比较过程的优先顺序, 从而进一步影响后续证据积累与最终选择(Hasan & Trueblood, 2024)。行为与模型研究表明, 在简单情境中, 个体往往倾向于在选项内部整合概率与收益, 而非逐属性比较, 这提示较高层级的整合过程可能遵循不同于属性层的计算原则(Glickman et al., 2019)。神经证据同样表明, 不同属性信息首先在较低层级被编码, 并在更高层级整合为整体价值, 体现出明确的层级加工结构(Suzuki et al., 2017)。在较低层级上(属性层与选项层), 注意的核心功能是选择并放大输入信息。个

体更关注某一属性时, 该属性在最终主观价值中的权重会上升; 更关注某一选项时, 该选项的价值信号也更容易在比较中占优。这类作用本质上是对信息权重的调节, 更贴近乘法机制(Yang & Krajbich, 2023)。而在较高层级上(整合层), 注意的作用则不再局限于改变输入权重, 而是影响证据如何被整合、何时逼近阈值以及哪一侧更可能先完成选择。计算建模研究表明, 不同情境因素可以通过改变扩散模型中的多个参数(如起始点、漂移率与决策阈值)来系统性影响选择行为, 从而对应于不同加工机制(Zhao et al., 2022)。在这一层级中, 持续注意可以为当前选项提供额外的方向性推动, 即使其不再直接等同于价值本身, 这也使加法机制具有更强解释力(Cavanagh et al., 2014; Frömer & Shenhav, 2022)。

神经证据进一步支持这一分层理解。Sampson 等(2025)的研究表明, 注意既可以增强当前选项的表征, 也可以调节整合过程中的增益; Sepulveda 等(2020)则发现, 注意优先整合的是与目标相关的信息, 而不必然是绝对价值最高的信息。这些结果说明, 注意可以在不同信息层级上发挥不同作用。因此, 乘法与加法机制并非作用于同一加工过程, 而更可能分别对应注意在不同信息层级上的主导作用。

4.4 时间×信息层级的整合框架

综合时间与信息层级, 本文提出一个“时间×信息层级”的整合框架(见图 1)。本文的核心目标并非提出一种新的单一机制, 而是尝试解释在整个决策过程中, 注意随时间以及信息层级的变化过程承担何种作用。基于这一视角, 注意对价值决策的影响至少包含两类可能共同存在并动态变化的过程: 一类是对价值信息的增益调节, 另一类则是对决策方向的额外推动。

在决策早期, 由于系统内部的不确定性较高, 证据尚未接近决策边界, 个体需要在多个属性与选项之间进行广泛的信息采样与权重分配。此时, 注意主要作用于属性层与选项层, 更容易表现为乘法式调节, 即通过影响哪些信息优先进入比较过程、哪些价值信号获得更高增益, 以及哪些属性在主观价值计算中占据更高权重, 改变后续证据积累的方向与速度(Krajbich et al., 2010; Smith & Krajbich, 2019; Yang & Krajbich, 2023)。与此同

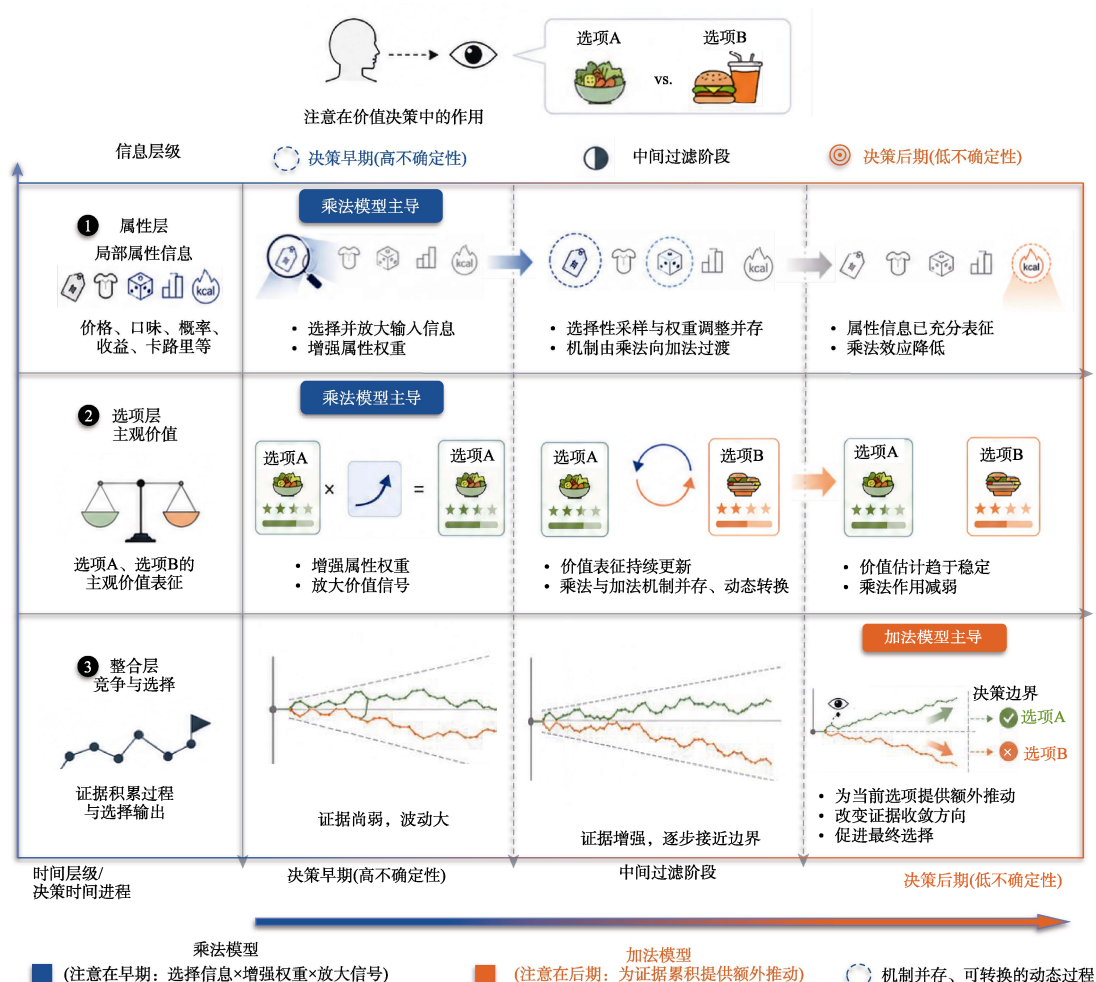


图1 信息层级与时间层级的整合框架

注: 彩图见电子版

时, 越来越多研究表明, 这种价值增益过程并不完全依赖外显注视。价值导向注意研究发现, 高价值刺激即使未被直接注视, 也更容易优先吸引注意资源(Anderson et al., 2011)。这些结果提示, 在决策较早阶段, 隐性注意也可能通过优先增强高价值信息的加工与积累, 参与乘法式的价值增益过程。随着证据积累持续推进, 系统内部的不确定性逐渐下降, 注意分配也开始由早期较为分散的信息采样, 逐渐转向对少数关键选项与属性的集中比较(Lee & Hare, 2023; Sullivan & Huettel, 2021)。在这一过程中, 部分低相关或低权重信息会逐渐被过滤, 决策系统也逐渐由开放式比较转向选择收敛。因此, 中间过滤阶段并不意味着乘

法机制已经消失, 而更可能表现为: 价值增益过程仍在继续, 但与当前选择方向一致的偏移过程开始逐渐增强。换言之, 这一阶段更接近一种乘法与加法机制并存的动态状态, 而非两类机制在固定时间点上的突然切换。当证据逐渐接近决策边界, 且注意更多作用于整合层时, 其行为效应则更容易表现为一种与当前选择方向一致的加法性偏移, 即不再主要通过持续放大价值信号影响决策, 而是更多参与推动证据积累向某一方向收敛, 并稳定已经逐渐形成的选择倾向(Cavanagh et al., 2014; Westbrook et al., 2020)。但要注意的是, 决策后期并非只包含显性注意。Eum 等人(2023)的研究进一步发现, 即使未直接操控中心注视位

置, 未注视的信息, 仍能够对最终选择产生系统性影响。这说明, 后期决策偏向并不完全依赖显性眼动本身, 而可能还涉及未被直接注视信息所引发的隐性注意分配过程。

值得进一步讨论的是, 在后期加法机制主导的过程中, 究竟是注意推动选择, 还是选择影响注意。具体来说, 在决策早期, 注意直接作用于选项价值, 被注视选项的价值会在积累过程中获得更高权重, 因此注意影响选项 (Krajbich et al., 2010; Smith & Krajbich, 2019)。然而, 随着证据逐渐积累并接近决策阈值, 注意效应的性质可能发生变化。Shimojo 等(2003)提出的“凝视级联效应”表明, 在决策临近时, 个体注视会迅速集中于最终被选择的选项。Westbrook 等(2020)进一步指出, 后期注视与价值的关系可能由早期偏向乘法交互, 逐渐转向更接近加法的偏移。也就是说, 在决策后期, 注视行为可能不再主要体现为对价值信号的持续放大, 而更多反映系统内部已经形成的选择倾向。但这一过程并不意味着隐性注意完全退出决策过程, 而更可能表现为隐性注意、选择收敛与动作准备等多个过程之间的共同作用。与此同时, 部分后期注意效应也可能与选择收敛、决策承诺以及动作准备等过程相关, 而不仅仅体现为持续性的价值增益 (Cavanagh et al., 2014; Lupkin & McGinty, 2023)。需要强调的是, 这种由乘法增益逐渐过渡到加法偏移的变化, 并不是一个瞬时完成的离散切换过程, 而更可能表现为随着证据积累逐渐接近阈值, 系统内部不同计算机制相对贡献的动态变化。

从计算建模角度看, 乘法与加法机制可分别对应于 DDM 类模型中不同形式的漂移率调节。前者主要表现为注意对价值信号权重的交互性调节, 而后者则更接近于独立于价值差异之外的方向性偏移。乘法机制指注意通过调节价值信号在证据积累中的相对权重影响漂移率, 其概念化表达可写为:

$$v_t = \beta_0 + \beta_1(\text{Value} \times \text{Gaze}) \quad (1)$$

其中, 注视(gaze)与 价值(value)之间表现为交互关系, 即被关注选项的价值会在积累过程中获得更高权重 (Krajbich et al., 2010; Smith & Krajbich, 2019)。在经典 aDDM 中, 这种乘法式调节通常通过注意折扣因子 θ 表达:

$$V_t = V_t - 1 + d(r_{\text{left}} - \theta r_{\text{right}}) + \xi \quad (2)$$

其中 V_t 表示时刻 t 的证据积累状态, d 为漂移缩放参数 r_{left} 与 r_{right} 分别表示左右选项的主观价值, θ 表示未被注视选项的价值折扣程度, ξ 为随机噪声项。当个体注视某一选项时, 未被注视选项的价值贡献会受到折扣, 因此注意主要通过改变价值信号在证据积累中的相对权重影响决策。

相比之下, 加法机制则更接近一种独立于价值差异之外的方向性偏移, 即注意除了调节价值权重之外, 还会直接影响证据积累方向, 其概念化表达可写为:

$$v_t = \beta_0 + \beta_1(\text{Value}) + \beta_2(\text{Gaze}) \quad (3)$$

其中, v_t 表示时刻 t 的漂移率, β_0 为基线漂移率截距, $\beta_1(\text{Value})$ 表示价值差异对漂移率的影响, $\beta_2(\text{Gaze})$ 表示由当前注视状态产生的额外方向性偏移。与乘法机制不同, 在该模型中, 注视对漂移率的影响并不依赖于价值大小, 而是作为独立输入直接推动证据积累向某一方收敛。因此, 即使在控制价值差异之后, 被持续关注选项仍可能更容易获得最终选择 (Cavanagh et al., 2014; Thomas et al., 2021)。

需要强调的是, 已有部分模型(如 GLAM)已经开始尝试在同一计算框架中同时纳入价值加权与方向偏移成分 (Thomas et al., 2019)。然而, 这些模型更多关注的是如何提高对行为数据的整体拟合, 而较少进一步讨论两类机制在决策时间进程中的动态主导性变化。相比之下, 本文更强调从“时间×信息层级”的角度理解这种差异, 即在决策早期, 注意更容易表现为对价值信息的乘法增益调节; 而随着证据积累、不确定性降低以及选择倾向逐渐稳定, 注意的行为效应则可能逐渐转向与决策收敛相关的加法偏移。这一框架的意义在于, 它既保留了乘法机制对价值权重调节的解释力, 也吸收了加法机制对后期选择偏向的解释力, 从而把看似矛盾的证据重新组织为同一决策过程中的不同切面。近期关于交互性注意、动态注视效应以及多属性神经编码的研究都与这一框架相容 (He & Bhatia, 2023; Sampson et al., 2025; Westbrook et al., 2020)。

5 小结

本文围绕一个核心问题展开: 注意究竟通过何种计算方式塑造价值决策? 对现有证据的梳理表明, 将注意简单理解为“价值放大器”或“固定的

方向性推动”，都不足以解释全部现象。

乘法机制主要体现为注意对价值信号权重的调节，因此更适用于解释决策早期的信息采样与价值比较过程；相比之下，加法机制则表现为在价值整合之后对选择方向的额外推动，更能解释决策后期的最终注视偏向与选择承诺。据此，本文提出“时间×信息层级”的整合框架，认为两类机制并非相互排斥，而是注意在不同阶段与不同层级上发挥主导作用的不同表现。这一框架的意义并非为了对某一机制进行最终裁决，而是将分散于行为、建模与神经层面的证据整合为一个统一且可检验的理论结构。在这一视角下，注意不仅塑造价值的计算方式，也参与选择的提交过程，从而在决策的不同阶段发挥层级化的调控作用。

在此基础上，未来研究可沿以下路径进一步推进：其一，利用更精细的时序分析区分早期增加权重调节与后期额外方向性推动，检验注意机制是否存在时间演变的动态转变；其二，在多属性任务中同时操控注意目标、任务目标与价值结构，以检验注意作用是否会随信息层级变化呈现不同计算形式；其三，可在同一范式中结合眼动、神经记录与计算建模，对两类机制的决策过程进行联合检验，从而更系统地刻画注意对选择形成的动态调控过程。最后，可以重点关注隐性注意的变化过程，运用实证实验去证明隐性注意是否也遵循加法机制以及乘法机制。

除此之外，本研究的应用价值，可以从计算建模与消费者决策等多个层面加以说明。首先，在计算建模层面，传统漂移扩散模型及其扩展形式(如 aDDM、GLAM 等)通常假定注意对证据积累过程的影响较为稳定，难以刻画其在决策过程中随时间变化的动态特征。本文提出的“时间×信息层级”框架为理解这一问题提供了新的视角，即注意对决策过程的作用可能并非固定不变，而是会随着时间推进以及信息加工阶段的变化而发生调整：在决策早期，注意更可能通过增强价值信息的权重来影响证据积累过程；而在决策后期，其作用则更可能表现为对选择方向的引导，从而促进决策收敛。这一观点为进一步发展具有时间结构的动态决策模型以及改进模型比较方法提供了参考。

其次，在消费者决策情境中，决策早期个体

通常处于多选项比较与信息整合阶段，此时通过突出价格优惠、用户评分以及核心性能参数等关键信息，可以增强相关信息在决策过程中的影响，从而强化目标选项的相对优势。例如，在广告页面前端呈现折扣信息或用户评价，有助于提升商品的吸引力。而在决策后期，当消费者逐渐缩小选择范围并接近最终决策时，通过优化界面布局、提高购买按钮的可见性或设置默认推荐选项等方式引导注意集中，则可能进一步促进最终购买行为的形成。

参考文献

- 刘洪志, 魏子晗, 盈嘉, 贺祉秋, 李东启. (2022). 因果与权重: 决策的眼动模型. *心理科学*, 45(1), 242-249. <https://doi.org/10.16719/j.cnki.1671-6981.20220133>
- 刘梦颖, 蒋婧怡, 杨依琳, 江波, 黄建平. (2024). 古典美还是表现美: 摆盘美学影响健康饮食决策的计算与神经机制. *心理学报*, 56(8), 1061-1075. <https://doi.org/10.3724/SP.J.1041.2024.01061>
- 刘逸康, 胡传鹏. (2024). 证据积累模型的行为与认知神经证据. *科学通报*, 69(8), 1068-1081. <https://doi.org/10.1360/TB-2023-1080>
- Anderson, B. A., Laurent, P. A., & Yantis, S. (2011). Value-driven attentional capture. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(25), 10367-10371. <https://doi.org/10.1073/pnas.1104047108>
- Aquino, T. G., Cockburn, J., Mamelak, A. N., Rutishauser, U., & O'Doherty, J. P. (2023). Neurons in human pre-supplementary motor area encode key computations for value-based choice. *Nature Human Behaviour*, 7(6), 970-985. <https://doi.org/10.1038/s41562-023-01548-2>
- Arabadzhiyska, D. H., Garrod, O. G., Fouragnan, E., De Luca, E., Schyns, P. G., & Philiastrides, M. G. (2021). A common neural currency account for social and non-social decisions. *BioRxiv*, 2021-10. <https://doi.org/10.1101/2021.10.18.464762>
- Bhatnagar, R., & Orquin, J. L. (2022). A meta-analysis on the effect of visual attention on choice. *Journal of Experimental Psychology: General*, 151(10), 2265-2283. <https://doi.org/10.1037/xge0001204>
- Bussemeyer, J. R., Gluth, S., Rieskamp, J., & Turner, B. M. (2019). Cognitive and neural bases of multi-attribute, multi-alternative, value-based decisions. *Trends in Cognitive Sciences*, 23(3), 251-263. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2018.12.003>
- Bussemeyer, J. R., & Townsend, J. T. (1992). Fundamental derivations from decision field theory. *Mathematical Social Sciences*, 23(3), 255-282. [https://doi.org/10.1016/0165-4896\(92\)90043-5](https://doi.org/10.1016/0165-4896(92)90043-5)
- Callaway, F., Rangel, A., & Griffiths, T. L. (2021). Fixation patterns in simple choice reflect optimal information

- sampling. *PLOS Computational Biology*, 17(3), e1008863. <https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1008863>
- Carrasco, M. (2011). Visual attention: The past 25 years. *Vision Research*, 51(13), 1484–1525. <https://doi.org/10.1016/j.visres.2011.04.012>
- Castegnetti, G., Zurita, M., & De Martino, B. (2021). How usefulness shapes neural representations during goal-directed behavior. *Science Advances*, 7(15), eabd5363. <https://doi.org/10.1126/sciadv.abd5363>
- Cavanagh, J. F., Wiecki, T. V., Kochar, A., & Frank, M. J. (2014). Eye tracking and pupillometry are indicators of dissociable latent decision processes. *Journal of Experimental Psychology: General*, 143(4), 1476–1488. <https://doi.org/10.1037/a0035813>
- De Martino, B., & Cortese, A. (2023). Goals, usefulness and abstraction in value-based choice. *Trends in Cognitive Sciences*, 27(1), 65–80. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2022.11.001>
- Eum, B., Dolbier, S., & Rangel, A. (2023). Peripheral visual information halves attentional choice biases. *Psychological Science*, 34(9), 984–998. <https://doi.org/10.1177/09567976231184878>
- Fisher, G. (2017). An attentional drift diffusion model over binary-attribute choice. *Cognition*, 168, 34–45. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2017.06.007>
- Fisher, G. (2021). A multiattribute attentional drift diffusion model. *Organizational Behavior and Human Decision Processes*, 165, 167–182. <https://doi.org/10.1016/j.obhdp.2021.04.004>
- Fisher, G. (2023). Measuring the factors influencing purchasing decisions: Evidence from cursor tracking and cognitive modeling. *Management Science*, 69(8), 4558–4578. <https://doi.org/10.1287/mnsc.2022.4598>
- Forstmann, B. U., Ratcliff, R., & Wagenmakers, E. -J. (2016). Sequential sampling models in cognitive neuroscience: Advantages, applications, and extensions. *Annual Review of Psychology*, 67, 641–666. <https://doi.org/10.1146/annurev-psych-122414-033645>
- Frömer, R., & Shenhav, A. (2022). Filling the gaps: Cognitive control as a critical lens for understanding mechanisms of value-based decision-making. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 134, 104483. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2021.12.006>
- Glickman, M., Shari, O., Levy, D. J., Niebur, E., Stuphorn, V., & Usher, M. (2019). The formation of preference in risky choice. *PLOS Computational Biology*, 15(8), e1007201. <https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1007201>
- Gwinn, R., Leber, A. B., & Krajbich, I. (2019). The spillover effects of attentional learning on value-based choice. *Cognition*, 182, 294–306. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2018.10.012>
- HajiHosseini, A., & Hutcherson, C. A. (2021). Alpha oscillations and event-related potentials reflect distinct dynamics of attribute construction and evidence accumulation in dietary decision making. *eLife*, 10, e60874. <https://doi.org/10.7554/eLife.60874>
- Hasan, E., & Trueblood, J. S. (2024). The role of salience in multialternative multiattribute choice. *PsyArXiv*. <https://doi.org/10.31234/osf.io/6fbt4>
- Hausfeld, J., Von Hesler, K., & Goldlücke, S. (2021). Strategic gaze: An interactive eye-tracking study. *Experimental Economics*, 24(1), 177–205. <https://doi.org/10.1007/s10683-020-09655-x>
- He, L., & Bhatia, S. (2023). Complex economic decisions from simple neurocognitive processes: The role of interactive attention. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 290(1992), 20221593. <https://doi.org/10.1098/rspb.2022.1593>
- Jahn, C. I., Markov, N. T., Morea, B., Daw, N. D., Ebitz, R. B., & Buschman, T. J. (2024). Learning attentional templates for value-based decision-making. *Cell*, 187(6), 1476–1489.e21. <https://doi.org/10.1016/j.cell.2024.01.041>
- Juechems, K., & Summerfield, C. (2019). Where does value come from? *Trends in Cognitive Sciences*, 23(10), 836–850. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2019.07.012>
- Krajbich, I. (2019). Accounting for attention in sequential sampling models of decision making. *Current Opinion in Psychology*, 29, 6–11. <https://doi.org/10.1016/j.copsyc.2018.10.008>
- Krajbich, I., Armel, C., & Rangel, A. (2010). Visual fixations and the computation and comparison of value in simple choice. *Nature Neuroscience*, 13(10), 1292–1298. <https://doi.org/10.1038/nn.2635>
- Krajbich, I., Mitsumasu, A., Polania, R., Ruff, C. C., & Fehr, E. (2021). A causal role for the right frontal eye fields in value comparison. *eLife*, 10, e67477. <https://doi.org/10.7554/eLife.67477>
- Lee, D. G., & Hare, T. A. (2023). Value certainty and choice confidence are multidimensional constructs that guide decision-making. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*, 23(3), 503–521. <https://doi.org/10.3758/s13415-022-01054-4>
- Li, A. X., Chan, B., Donets, S., Boettcher, S. E. P., & Hunt, L. T. (2026). Covert attention dynamically shapes decision making. *PsyArXiv*. https://doi.org/10.31234/osf.io/edaxh_v3
- Lim, S. L., O'Doherty, J. P., & Rangel, A. (2011). The decision value computations in the vmPFC and striatum use a relative value code that is guided by visual attention. *Journal of Neuroscience*, 31(37), 13214–13223. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.1246-11.2011>
- Lombardi, G., & Hare, T. (2021). Piecewise constant averaging methods allow for fast and accurate hierarchical Bayesian estimation of drift diffusion models with time-varying evidence accumulation rates. *PsyArXiv*. <https://doi.org/10.31234/osf.io/5azyx>
- Lupkin, S. M., & McGinty, V. B. (2023). Monkeys exhibit human-like gaze biases in economic decisions. *eLife*, 12, e78205. <https://doi.org/10.7554/eLife.78205>

- McGinty, V. B., Rangel, A., & Newsome, W. T. (2016). Orbitofrontal cortex value signals depend on fixation location during free viewing. *Neuron*, 90(6), 1299–1311. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2016.04.045>
- Molter, F., Thomas, A. W., Heekeren, H. R., & Mohr, P. N. (2019). GLAMbox: A Python toolbox for investigating the association between gaze allocation and decision behaviour. *PLOS ONE*, 14(12), e0226428. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0226428>
- Mormann, M., & Russo, J. E. (2021). Does attention increase the value of choice alternatives? *Trends in Cognitive Sciences*, 25(4), 305–315. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2021.01.004>
- Pearson, D., Watson, P., Albertella, L., & Le Pelley, M. E. (2022). Attentional economics links value-modulated attentional capture and decision-making. *Nature Reviews Psychology*, 1(6), 320–333. <https://doi.org/10.1038/s44159-022-00053-z>
- Polania, R., Woodford, M., & Ruff, C. C. (2019). Efficient coding of subjective value. *Nature Neuroscience*, 22(1), 134–142. <https://doi.org/10.1038/s41593-018-0292-0>
- Posner, M. I. (1980). Orienting of attention. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 32(1), 3–25. <https://doi.org/10.1080/0033558008248231>
- Ratcliff, R., Smith, P. L., Brown, S. D., & McKoon, G. (2016). Diffusion decision model: Current issues and history. *Trends in Cognitive Sciences*, 20(4), 260–281. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2016.01.007>
- Rieskamp, J., & Hadian Rasanian, A. (2023, July). *Improving decision making models by considering attention processes: The gaze-weighted advantage race diffusion model*. Paper presented at the MathPsych/ICCM/EMPG 2023, University of Amsterdam, Amsterdam, Netherlands.
- Sampson, A. L., Yang, Y. -P., Usher, M., Levy, D. J., Niebur, E., & Stuphorn, V. (2025). The role of attention in multi attribute decision making. *Nature Communications*, 17(1), Article 23. <https://doi.org/10.1038/s41467-025-66579-x>
- Sepulveda, P., Usher, M., Davies, N., Benson, A. A., Ortoleva, P., & De Martino, B. (2020). Visual attention modulates the integration of goal-relevant evidence and not value. *eLife*, 9, e60705. <https://doi.org/10.7554/eLife.60705>
- Shadlen, M. N., & Shohamy, D. (2016). Decision making and sequential sampling from memory. *Neuron*, 90(5), 927–939. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2016.04.036>
- Shimojo, S., Simion, C., Shimojo, E., & Scheier, C. (2003). Gaze bias both reflects and influences preference. *Nature Neuroscience*, 6(12), 1317–1322. <https://doi.org/10.1038/nn1150>
- Smith, S. M., & Krajbich, I. (2019). Gaze amplifies value in decision making. *Psychological Science*, 30(1), 116–128. <https://doi.org/10.1177/0956797618810521>
- Sullivan, N. J., & Huettel, S. A. (2021). Healthful choices depend on the latency and rate of information accumulation. *Nature Human Behaviour*, 5(12), 1698–1706. <https://doi.org/10.1038/s41562-021-01154-0>
- Suzuki, S., Cross, L., & O'Doherty, J. P. (2017). Elucidating the underlying components of food valuation in the human orbitofrontal cortex. *Nature Neuroscience*, 20(12), 1780–1786. <https://doi.org/10.1038/s41593-017-0008-x>
- Tavares, G., Perona, P., & Rangel, A. (2017). The attentional drift diffusion model of simple perceptual decision-making. *Frontiers in Neuroscience*, 11, 468. <https://doi.org/10.3389/fnins.2017.00468>
- Thomas, A. W., Molter, F., & Krajbich, I. (2021). Uncovering the computational mechanisms underlying many-alternative choice. *eLife*, 10, e57012. <https://doi.org/10.7554/eLife.57012>
- Thomas, A. W., Molter, F., Krajbich, I., Heekeren, H. R., & Mohr, P. N. C. (2019). Gaze bias differences capture individual choice behaviour. *Nature Human Behaviour*, 3(6), 625–635. <https://doi.org/10.1038/s41562-019-0584-8>
- Ting, C. -C., & Gluth, S. (2024). Unraveling information processes of decision-making with eye-tracking data. *Frontiers in Behavioral Economics*, 3, 1384713. <https://doi.org/10.3389/frbhe.2024.1384713>
- Usher, M., & McClelland, J. L. (2001). The time course of perceptual choice: The leaky, competing accumulator model. *Psychological Review*, 108(3), 550–592. <https://doi.org/10.1037/0033-295X.108.3.550>
- Vanunu, Y., Hotaling, J. M., Le Pelley, M. E., & Newell, B. R. (2021). How top-down and bottom-up attention modulate risky choice. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 118(39), e2025646118. <https://doi.org/10.1073/pnas.2025646118>
- Westbrook, A., van den Bosch, R., Määttä, J. I., Hofmans, L., Papadopetraki, D., Cools, R., & Frank, M. J. (2020). Dopamine promotes cognitive effort by biasing the benefits versus costs of cognitive work. *Science*, 367(6484), 1362–1366. <https://doi.org/10.1126/science.aaz5891>
- Xie, Y., Nie, C., & Yang, T. (2018). Covert shift of attention modulates the value encoding in the orbitofrontal cortex. *eLife*, 7, e31507. <https://doi.org/10.7554/eLife.31507>
- Yang, X., & Krajbich, I. (2023). A dynamic computational model of gaze and choice in multi-attribute decisions. *Psychological Review*, 130(1), 52–70. <https://doi.org/10.1037/rev0000350>
- Zhao, W. J., Coady, A., & Bhatia, S. (2022). Computational mechanisms for context-based behavioral interventions: A large-scale analysis. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 119(15), e2114914119. <https://doi.org/10.1073/pnas.2114914119>
- Zilker, V., & Pachur, T. (2022). Nonlinear probability weighting can reflect attentional biases in sequential sampling. *Psychological Review*, 129(5), 949–975. <https://doi.org/10.1037/rev0000304>
- Zylberberg, A., Bakkour, A., Shohamy, D., & Shadlen, M. N. (2024). Value construction through sequential sampling

explains serial dependencies in decision making. *eLife*, 13, RP96997. <https://doi.org/10.7554/eLife.96997>
Zylberberg, A., Krajbich, I., & Shadlen, M. N. (2026).

Behavioral signatures of post-decisional attention in preferential choice. *eLife*, 15, Article RP110729. <https://doi.org/10.64898/2026.01.10.698805>

Computational mechanisms of attention in value-based decision making: Dynamic regulation of additive and multiplicative models

ZHOU Yuxuan¹, YANG Yilin², HUANG Jianping¹

(¹ Department of Psychology, Soochow University, Suzhou 215123, China)

(² Center for Language and Cognition Groningen, University of Groningen, Groningen 9712 EK, the Netherlands)

Abstract: In value-based decision making, individuals cannot process all available information with equal weight, making attention a key mechanism that shapes choice. A central debate concerns whether attention influences evidence accumulation by amplifying the value of attended information (multiplicative mechanism) or by providing an additional directional push toward the currently attended option (additive mechanism). Based on a systematic review of behavioral, computational, and neural evidence, this paper proposes that these two mechanisms are not mutually exclusive, but instead reflect a functional division within the same decision process across different stages and hierarchical levels of information representation. Furthermore, we propose that the computational role of attention exhibits a dynamic transition from a multiplicative to an additive mechanism during decision making. Specifically, in early stages, when information is represented at the attribute level (e.g., price and reward) and option level (subjective value), attention primarily functions as a multiplicative gain modulation that amplifies the weight of value signals. In later stages, when information is integrated into accumulated evidence, attention is more likely to exert an additive directional influence on the emerging choice. Building on this perspective, we propose an integrative “time $\times$ information hierarchy” framework to reconcile existing discrepancies in the literature. This framework highlights how attention dynamically modulates evidence accumulation through multiple pathways, thereby providing a new theoretical foundation for developing more explanatory models of value-based decision making. Furthermore, the framework emphasizes that attention is not a unitary mechanism, but a dynamic control system operating across time and hierarchical levels of information representation.

Keywords: attention, value-based decision-making, evidence accumulation, additive mechanism, multiplicative mechanism