

阻断范式中时间结构线索对预测运动的影响*

秦奎元^{1,2} 刘 煜^{3,4} 刘赛芳^{3,4} 王 朔^{3,4}
刘 鹏^{1,2} 游旭群^{3,4} 李 苑^{3,4}

(¹ 西北大学公共管理学院; ² 西北大学应急管理學院, 西安 710127)

(³ 陕西师范大学心理学院; ⁴ 陕西省行为与认知神经科学重点实验室, 西安 710062)

摘 要 判断被遮挡的运动客体何时到达某一目标位置的任务称为预测运动任务。目前, 时间结构在阻断范式中
对预测运动任务的影响机制尚不清楚。实验 1 采用连续实验探究时间结构对预测运动的影响, 结果显示相较于时
间结构不同条件, 时间结构相同能够显著提高被试的任务绩效; 实验 2 使用闪烁实验分离了视觉速度对预测运动
的影响, 结果显示时间结构相同也能够提高被试的任务绩效; 实验 3 通过随机实验探究干扰条件下时间结构对预
测运动的影响, 结果显示时间结构相同也增加了被试判断的准确性。本研究表明在预测运动任务中, 时间结构相同
是提高个体任务绩效的关键因素, 且在视觉通道内其作用具有稳定性。

关键词 预测运动, 节律, 时间结构, 阻断范式

分类号 B842

1 引言

在日常生活中, 人们通常需要准确估计运动客
体何时到达某一位置, 进而来指导其未来的运动行
为(Teichmann et al., 2021), 例如接球、过马路或刹
车以避免障碍物等, 判断运动客体何时到达某一目
标位置的任务称为视觉运动推断任务。在实验室中,
研究者通常使用预测运动(prediction motion)范式
来探究视觉运动推断任务的加工机制。在预测运动
范式中, 个体需要判断被遮挡的运动客体何时到达
目标位置, 然后进行按键反应(Makin, 2018)。

人类是如何对遮挡后的运动客体进行加工的?
最初, 研究者使用 tau 理论(郭秀艳 等, 2000; Lee,
1976; Lee et al., 1983)来解释个体在预测运动任
务中的加工机制。Tau 理论认为运动刺激在个体视
网膜上成像的夹角与这个夹角的变化率之间的比值(τ)
可以推断出刺激到达个体的剩余时间(唐日新 等,
2010)。例如, 当运动刺激向观察者运动时, 从某一
时刻起刺激到达个体的剩余时间可以通过该公式

$\tau = 2\theta/d \cdot (2\theta)/d(t)$ 来获得(其中 θ 为物体在视网膜上
成像的夹角, $d(2\theta)/d(t)$ 为夹角的变化率)。然而该理
论只适用于刺激与个体之间发生相对运动, 并且需
要运动刺激与个体的眼睛发生碰撞。自然界中需要
做出反应的运动多数都不是正对个体的眼睛, 因此
这在很大程度上限制了 tau 策略的应用。目前, 越
来越多的研究者开始使用认知策略来解释个体对
预测运动任务的加工过程(Baurès et al., 2021; Law
et al., 1993)。认知策略指出个体在对运动任务进
行时间估计时会依据客体的运动信息建立一种运
动表征来模拟其运动规律, 然后推测未来某一时
间点运动客体到达的位置(Watamaniuk & McKee,
1995)。例如, Makin 和 Poliakoff (2011)发现个体在
可见阶段对运动刺激的速度表征能够决定其在预
测运动任务中的绩效。刘瑞光和黄希庭(1991)的研
究指出, 距离、速度和加速度等因素会显著影响个
体的任务绩效。具体表现为, 较短的遮挡距离能够
提升个体的任务绩效; 在速度方面, 个体在快速运
动条件下的任务绩效显著高于慢速条件; 而当客体

收稿日期: 2024-10-26

* 陕西省教育厅科研计划项目(24JK0233)资助。

通信作者: 游旭群, E-mail: youxuqun@snnu.edu.cn 李苑, E-mail: liyuan001@snnu.edu.cn

处于加速运动状态时, 同样能显著提高个体的任务绩效。根据认知策略模型, 随着刺激在可见部分运动距离的增加, 个体对其视觉速度信息的表征将会越来越准确, 因此任务绩效会随着可见部分运动距离的增加而提高。然而, 有研究发现当刺激在可见部分和遮挡部分的距离相同时, 被试的反应偏差更小, 绩效更高(Baurès, Balestra, et al., 2018)。这一结果暗示着时间这一变量在预测运动任务中可能发挥着重要作用, 且认知策略难以对此进行有效解释。

时间作为运动客体的一种重要属性, 长期以来一直没有得到预测运动领域研究者的直接关注。广义上的时间结构(time structure, T)是指信息在时间维度上的分布模式。在认知心理学领域, 时间结构的分类方式对于解释其在运动任务中的作用至关重要(Spencer et al., 2003; Zelaznik et al., 2002)。其中, 基于刺激呈现时间规律的结构, 常见于实验室中以固定频率呈现的单音或视觉刺激。这种结构为个体提供了稳定的时间预期线索, 有助于个体在运动任务中进行节奏性的感知与反应调节(Hove et al., 2010)。例如在研究中, 以固定频率闪烁的视觉刺激可作为时间参考, 帮助被试调整运动节奏。基于刺激变化规律的结构, 如周期性地调制刺激的某一物理属性, 其变化的周期性和规律性使得个体能够依据先前的刺激变化模式来预测后续变化, 从而在运动任务中提前规划动作, 体现了时间结构的可预测性特征(Hove et al., 2013)。以往研究发现, 不论是基于刺激呈现还是基于刺激变化规律的时间结构都具有节律性、层级性和可预测性三种基本特性(胡瑞晨 等, 2019), 并且个体能够利用时间结构的这些特性来促进客体识别(Miller et al., 2013)、知觉组织(Alais & Blake, 1998)、无意识加工(Bauer et al., 2009)及注意分配(Jones & Boltz, 1989)等认知过程。尽管在其他情境中还存在基于句法规律的时间结构(如自然语言和音乐等), 但不在本研究涉及的运动任务范畴内, 因此本文不过多讨论。

在预测运动领域, 研究者根据刺激的运动规律提出了时间结构的操作性定义——时间结构是指刺激在可见和遮挡部分运动时间的比值(秦奎元等, 2022; Chang & Jazayeri, 2018)。时间结构相同($T = 1.0$)是指刺激在可见阶段运动的时间与遮挡阶段运动的时间相等; 时间结构不相同($T \neq 1.0$)是指刺激在可见阶段运动时间和遮挡部分运动时间不等。已有研究表明时间结构对预测运动任务表现具

有显著影响(Qin et al., 2022), 当时间结构相同时($T = 1.0$), 个体的任务绩效会显著优于时间结构不同的条件($T \neq 1.0$)。预测运动范式中的时间结构相同与时间估计任务中的时间间隔被等距分割在形式上存在相似性。研究发现, 在时间估计任务中当时间间隔被等距分割时被试的时间估计绩效更好(Jazayeri & Shadlen, 2010)。在预测运动任务中, 时间结构相同也能够提升被试的任务绩效(秦奎元等, 2022)。这表明在这两种情形下个体可能使用了相似的加工方式。然而两者之间也存在明显的差异, 其中时间间隔侧重于探讨在一般的计时任务中不同时间间隔分割方式对绩效的影响, 其应用范围较为广泛; 而本研究的时间结构相同概念是在预测运动任务情境下, 基于刺激可见与遮挡部分运动时间的特定关系提出的, 聚焦于运动过程中不同阶段时间的比例关系, 更具任务特异性。

预测运动任务有两种常见的任务范式: 遮挡范式或阻断范式。在遮挡范式中, 个体需要判断被遮挡的运动刺激何时到达某一目标位置, 并及时按键; 在阻断范式中, 个体需要判断被遮挡后重新出现在目标位置上的刺激在时间上是提前还是延迟。遮挡范式任务简单直接, 需要的试次数量也相对较小, 因此以往研究大都采用遮挡范式来探究时间结构对预测运动的影响(例如 Baurès, Balestra, et al., 2018; Qin et al., 2024)。然而, 研究者发现在遮挡范式中个体有可能利用刺激运动方向信息与注视方向形成的夹角的变化率来估计运动刺激的到达时间, 这意味着遮挡范式中时间结构对个体任务绩效的提升作用, 可能受到了运动方向与注视方向夹角变化率的干扰。与之不同的是, 阻断范式具有独特的性质, 在该范式中运动刺激从被遮挡到出现在目标位置之间的时间间隔处于动态变化之中。这种变化使得运动方向与注视方向形成的夹角的变化率难以对预测运动任务产生影响, 从而有效避免了这一干扰因素。该设计克服了遮挡范式的局限, 能够更精准地揭示时间结构的作用。

因此, 本研究拟采用阻断范式探究时间结构对预测运动任务的影响。由于目前尚未有研究者使用阻断范式来探究时间结构在预测运动任务中的作用, 因此实验 1 首先采用经典的阻断范式任务, 运动刺激从起点向目标位置运动, 当其到达遮挡点后被遮挡, 一段时间后运动刺激出现在目标位置, 此时被试需要判断运动刺激是提前还是延后到达了

目标位置。然而,经典的阻断范式无法避免视觉运动速度对被试任务绩效的干扰。因此在实验 2 中,我们剥离了视觉速度线索,探究时间结构线索对预测运动任务的影响。实验 3 采用随机呈现范式来探索时间结构线索对预测运动任务影响的稳定性,进一步证明时间结构线索在预测运动任务中的作用。综上,本研究通过阻断范式首次系统考察时间结构对预测运动任务的影响,其创新性体现在以下两方面:在研究视角上,时间作为运动客体重要属性,在预测运动领域长期未得到直接关注。本研究聚焦于时间结构在预测运动任务中的作用,丰富了预测运动领域的研究视角。在研究范式上,本研究采用阻断范式,其运动刺激从被遮挡到出现在目标位置之间的时间间隔动态变化,有效避免了运动方向与注视方向夹角变化率对任务的干扰,能更精准地揭示时间结构的作用。在理论层面,本研究补充和完善了认知策略理论。认知策略指出个体依据客体运动信息建立运动表征来推测其未来位置,但难以解释时间在预测运动任务中的作用。本研究想要验证时间对个体在预测运动任务中判断准确性和敏感性的影响,这拓展了认知策略模型的时间维度解释,为构建统一的时空整合框架奠定了实证研究的基础。此外,本研究也拓展了时间结构在认知领域的应用。以往研究表明时间结构在客体识别、知觉组织等认知过程中发挥作用。本研究进一步验证了时间结构在预测运动任务中的作用,拓展了时间结构在认知心理学领域的应用范围,有助于深入理解时

间结构在不同认知任务中的作用机制和共性特征。

2 实验 1: 在阻断范式中探究时间结构对预测运动任务的影响

2.1 方法

2.1.1 被试

采用 G*Power 3.1 软件计算样本数量,参考以前的研究,设置中等效应量 $f=0.30$,当样本量达到 20 人时,时间结构效应的统计检验力在 $\alpha=0.05$ 时可以达到 0.80。为了防止样本流失,本实验招募 25 名在校大学生作为被试,其中男性 11 名,女性 14 名,年龄范围为 19~22 岁。所有被试视力或矫正视力正常,均为右利手,且均没有参加过类似实验。该研究通过了陕西师范大学关于人类被试研究的学术伦理委员会审批,被试在实验开始之前签署了知情同意书,实验后给予相应报酬。2 名被试因总正确率低于 70%且单个条件正确率低于 60%被剔除,因此本实验共收集 23 名被试的数据。

2.1.2 实验任务

在本实验中(连续实验)中,一个蓝色小方块由起点向右侧目标位置运动,当运动到遮挡点后蓝色方块被遮挡,一段时间后蓝色方块出现在目标位置(如图 1 左图)。被试需要判断蓝色小方块是提前还是延迟到达目标位置,并按下对应的按键。在该任务中,遮挡部分的长度始终保持为 8° 视角的长度,可见部分的长度分别为 4° 、 8° 和 12° 视角。蓝色方块的运动速度在每个试次中都保持不变,因此其在可

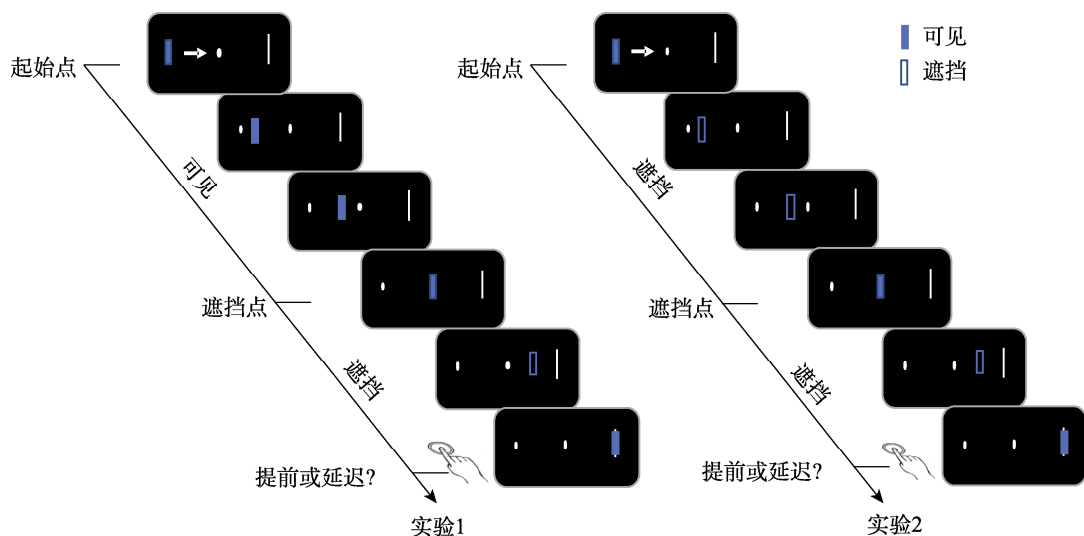


图 1 实验 1 和实验 2 示意图。实验 1 中运动刺激从起始点向目标位置运动,当其到达遮挡点后被遮挡,一段时间后运动刺激出现在目标位置,被试需要判断运动刺激提前还是延后到达该位置。实验 2 任务形式与实验 1 相似,不同之处在于运动刺激在起始点和遮挡点之间的运动过程也被遮挡。图中都是以时间结构相同($T=1.0$)为例。彩图见电子版,下同

见阶段和遮挡阶段运动时间的比值(时间结构)分别为 0.5、1.0 和 1.5。

2.1.3 实验设计和程序

实验程序用 Psychopy 3.0 编制。本实验采用单因素 3 水平(T : 0.5, 1.0, 1.5)被试内实验设计。其中 $T = 1.0$ 为时间结构相同条件, $T = 0.5$ 和 $T = 1.5$ 为时间结构不相同条件。在该任务中, 每个试次开始后屏幕上首先呈现黑色背景, 包含运动的起点, 遮挡点和目标位置(右侧竖线)。经过 0.2~0.5 s 的随机延迟后, 蓝色小方块从起点开始向目标位置匀速运动, 当其到达遮挡点后被遮挡, 遮挡一段时间后, 蓝色方块出现在目标位置。被试需要判断蓝色方块是提前还是延后到达了目标位置, 提前按“F”键, 延后按“J”键。在该任务中, 三种时间结构条件下遮挡点前的长度分别为 4° 、 8° 和 12° 视角, 遮挡点后的长度固定为 8° 视角, 同时将蓝色小方块的运动速度固定为 $5.33^\circ/\text{s}$, 因此, 运动刺激在可见阶段的运动时间分别为 0.75、1.5 和 2.25 s, 在遮挡阶段的运动时间为 1.5 s (理论到达时间), 因此产生三种时间结构, 分别为 0.5、1.0、1.5。然而在实验中, 蓝色小方块进入遮挡阶段后 0.8、1.1、1.2、1.45、1.55、1.8、1.9 和 2.2 s (实际到达时间)会出现在目标位置。其中 0.8、1.1、1.2 和 1.45 s 表示蓝色小方块提前出现在目标位置, 1.55、1.8、1.9 和 2.2 s 表示蓝色小方块延后出现在目标位置, 实际到达时间和理论到达时间的差异分别为 -0.7、-0.4、-0.3、-0.05、0.05、0.3、0.4 和 0.7 s。三种时间结构中都包含以上 8 种遮挡时间, 因此本实验共包括 24 种处理, 每个处理重复 20 次, 因此正式实验共包含 480 个试次。在正式实验开始之前, 被试先进行练习, 每种处理练习一次, 共 24 个练习试次。完成实验 1 平均需要 80 分钟。

2.1.4 数据分析

计算每个被试在不同时间结构条件下按“J”键(延后反应)的百分比, 使用 R 语言的逻辑回归来拟合被试的反应曲线(Linares & López-Moliner, 2016), 进而计算每个被试的主观相同点(point of subjective equality, PSE)和最小可觉差(just noticeable difference, JND)。PSE 是指拟合曲线的 y 轴为 50% 时对应的 x 轴的数值, 当 PSE 等于 0 时说明被试反应与理论值相同, 与 0 的距离越大说明被试的偏差越大。当 PSE 为正值时表示被试倾向于提前按键, 低估运动刺激的到达时间; 当 PSE 为负值时表示被试倾向于延迟按键, 高估运动刺激的到达时间。然而, PSE 值只能说明被试反应的倾向性, 并不能代表被试在预测运动任务中判断的准确程度, 因此使用被试 PSE 值的绝对值(absolute PSE, aPSE)来代表被试任务估计的准确程度, 其值越小代表被试的估计越准确, 并对其进行统计检验, 探究不同时间结构条件下被试任务绩效的高低。JND 是指拟合曲线的 75% 和 25% 对应的 x 轴的差异的一半, 也被称为半四分位差(semi-interquartile difference)。JND 反应了被试对不同时间结构的敏感程度, 其值越小说明被试对该条件下的时间结构敏感性越高。在对本实验进行单因素三水平重复测量方差分析时, 使用 Mauchly 球形检验检查数据是否满足球形假设, 当违反球形假设时使用 Greenhouse-Geisser 进行校正。

2.2 实验结果

被试在实验 1 中的 PSE 如图 2A 所示, 对被试的 PSE 值进行单因素重复测量方差分析发现, 被试在不同时间结构条件下的 PSE 值差异显著, $F(2, 44) = 27.64, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.557$ 。事后检验显示, 被试在 $T = 0.5$ 时的 PSE 值显著大于 $T = 1.0$ ($p < 0.001$)和

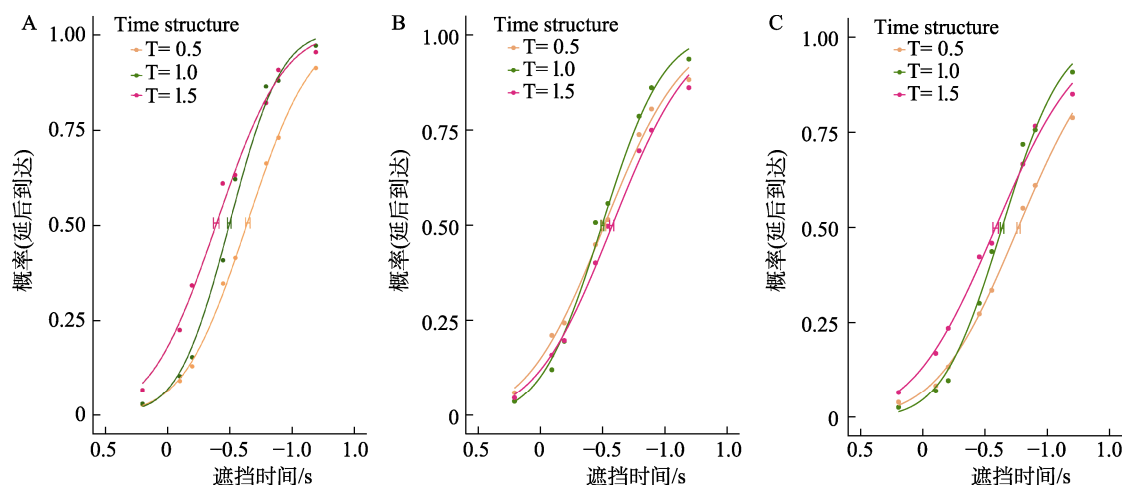


图2 被试按键为“延后到达”百分比的逻辑函数拟合曲线图。A、B、C 分别代表实验 1, 实验 2 和实验 3

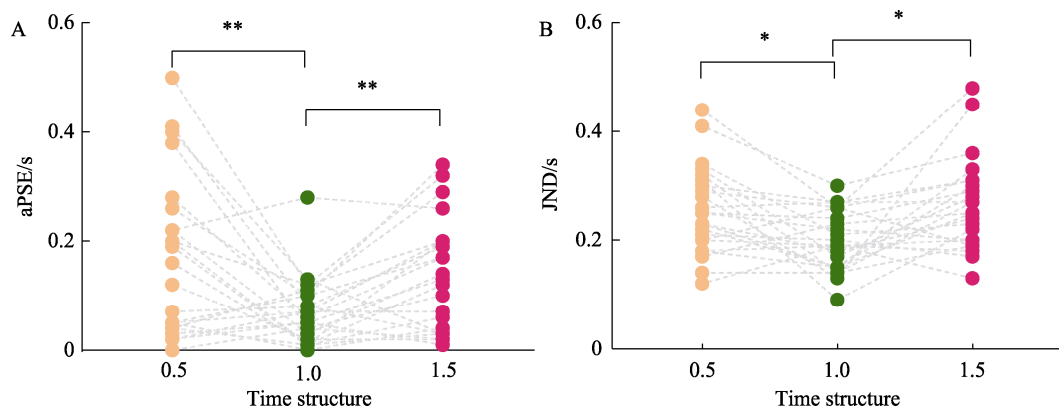


图3 A图为被试在实验1中三种时间结构条件下的aPSE对比图, B图是被试在实验1中三种时间结构条件下的JND对比图。* $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$, 以下同。

$T = 1.5$ ($p < 0.001$); 被试在 $T = 1.0$ 和 $T = 1.5$ 时的PSE差异也显著, $p = 0.002$, 表明被试在不同时间结构条件下的反应倾向性差异显著。

对被试在不同时间结构条件下的aPSE值进行单因素重复测量方差分析, 探究其在不同时间结构条件下的绩效差异, 结果显示被试在不同时间结构条件下的绩效存在显著差异(如图3A), $F(2, 44) = 6.38$, $p = 0.010$, $\eta_p^2 = 0.225$ 。事后检验显示, 被试在 $T = 1.0$ 时的aPSE显著小于 $T = 0.5$ ($p = 0.002$) 和 $T = 1.5$ ($p = 0.001$), 这表明被试在时间结构相同条件下的任务绩效显著高于时间结构不同时的绩效; 被试在 $T = 0.5$ 和 $T = 1.5$ 时的aPSE差异不显著, $p = 0.348$, 表明被试在两种时间结构不同条件下的绩效差异不显著。

对被试在不同时间结构条件下的JND进行单因素方差分析发现, 被试在不同时间结构条件下的JND差异显著(图3B), $F(2, 44) = 5.33$, $p = 0.015$, $\eta_p^2 = 0.195$ 。事后检验显示被试在 $T = 1.0$ 时的JND显著小于 $T = 0.5$ ($p = 0.007$) 和 $T = 1.5$ ($p = 0.017$), 表明被试对时间结构相同条件更敏感, 更能觉察在时间结构相同条件下任务的变化; 然而JND在 $T = 0.5$ 和 $T = 1.5$ 条件下的差异不显著, $p = 0.363$ 。表示被试对两种时间结构不同条件下的敏感度没有显著差异。

2.3 讨论

实验1发现时间结构线索能够显著影响被试在预测运动任务中的绩效。对PSE分析发现当 $T = 0.5$ 时, 相较于 $T = 1.0$ 和 $T = 1.5$, 个体倾向于提前按键, 低估运动刺激的到达时间; 当 $T = 1.5$ 时, 相较于 $T = 1.0$ 时, 个体倾向于延迟按键, 高估运动刺激的到达时间。该结果显示时间结构能够影响被试的反

应倾向, 时间结构相同为被试提供了明确且稳定的外部节奏线索, 减少了被试估计的不确定性, 因此其偏差较小。而当 $T = 0.5$ 时, 被试可能过度依赖可见段形成的表征, 而忽略了遮挡部分可能更长的运动时间, 从而低估了运动时间; 当 $T = 1.5$ 时则相反, 因此高估了运动时间。

对被试的aPSE分析发现, 与时间结构不同相比, 时间结构相同能够显著提高个体在预测运动任务中的绩效, 这与我们之前的研究结果一致(Qin et al., 2024)。JND的分析表明, 在时间结构相同条件下被试的JND值显著小于时间结构不同条件, 表明在时间结构相同条件下, 被试对不同遮挡时间的判断更为敏感, 这也说明当任务线索可靠时个体更能区分不同的时间间隔。上述结果显示时间结构相同提高了被试的任务绩效。当刺激以固定的频率或相同间隔时长呈现时, 个体就能够根据刺激的节律性来进行任务估计。在本实验中, 在时间结构相同条件下, 刺激从任务起点运动到遮挡点的时间与从遮挡点运动到目标位置的时间相同, 因此具有一定的节律性。时间结构的这种节律性能够通过诱发预期来调节注意资源的分布, 基于时间规律的预期将个体的注意资源引导至特定的时间点(胡瑞晨等, 2019)。研究发现人们通常对处于预期将出现在正拍的时间点上的目标刺激产生更高的探测绩效。因此本实验中, 当时间结构相同时被试可能采用了运动刺激的节律性特性进行任务估计, 根据刺激在遮挡点前的运动时间, 将注意资源分布到何时到达目标位置的这一时刻; 而当时间结构不不同时, 个体无法根据有效的任务线索来分布其注意资源, 从而导致其任务绩效低于时间结构相同时的绩效。

根据上述分析结果, 本实验表明时间结构对预

测运动有显著的影响。然而, Barnes (2008)在视觉追踪运动任务中发现, 个体能够将刺激的视觉运动速度储存在工作记忆系统中, 当运动刺激被遮挡后, 个体能够根据工作记忆系统中的速度表征继续追踪刺激。也有研究使用遮挡范式发现, 个体能够根据储存在工作记忆系统中的速度表征引导其注视点, 直至刺激运动到目标位置(Makin & Poliakoff, 2011)。Chang 和 Jazayeri (2018)在遮挡范式的研究中也发现当运动刺激在遮挡点之前可见时, 个体不但能够利用时间结构信息, 还能够整合视觉运动速度来提高其任务绩效。由于实验 1 的结果可能受到视觉速度信息的干扰, 实验 2 采用闪烁范式, 通过掩蔽运动刺激的可见轨迹来分离视觉速度信息, 从而更准确地考察时间结构对预测运动的影响。

3 实验 2: 时间结构在缺少视觉速度条件下对预测运动任务的影响

3.1 方法

3.1.1 被试

本实验另外招募大学本科生 29 名, 其中男性 13 名, 女性 16 名, 年龄范围为 19~21 岁, 所有被试均为右利手, 视力或矫正视力正常, 且均没有参加过类似实验, 实验结束后给予一定的报酬。3 名被试因总正确率低于 70%且单个条件正确率低于 60%被剔除, 所以本实验共收集 26 名被试的数据。

3.1.2 实验任务, 设计和程序

本实验任务(闪烁实验)与实验 1 相似, 不同之处在于蓝色小方块由起点向遮挡点运动过程中也被掩蔽(如图 1 右图), 这样做的目的是剥离视觉速度对预测运动任务绩效的干扰。实验流程如下: 当被试按下空格键后刺激出现并停留在任务起点 0.1 s, 随后被掩蔽, 当其到达遮挡点后再次出现 0.1 s, 然

后继续向目标位置运动, 一段时间后蓝色方块出现在目标位置。被试需要判断蓝色小方块是提前还是延迟到达目标位置, 并按相应的按键。实验设计, 程序 and 数据分析都与实验 1 一致。本实验的主要目的是分离视觉速度的影响, 进一步考察时间结构线索在阻断范式中预测运动任务的影响。

3.2 实验结果

被试在实验 2 中的 PSE 如图 2B 所示, 对被试的 PSE 值进行单因素重复测量方差分析发现, 被试在不同时间结构条件下的 PSE 值差异显著, $F(2, 50) = 1.13, p = 0.333$, 表明被试在不同时间结构条件下的反应倾向性差异不显著。

对被试在不同条件下的 aPSE 值进行的单因素重复测量方差分析发现, 被试在不同时间结构条件下的 aPSE 值存在显著差异(如图 4A), $F(2, 50) = 3.90, p = 0.027, \eta_p^2 = 0.135$ 。事后检验显示, 被试在 $T = 1.0$ 时的 aPSE 显著小于 $T = 0.5$ ($p = 0.035$)和 $T = 1.5$ ($p = 0.012$), 这表明被试在时间结构相同条件下的任务绩效显著高于时间结构不同时的绩效; 被试在 $T = 0.5$ 和 $T = 1.5$ 时的 aPSE 差异不显著, $p = 0.628$, 表明被试在两种时间结构不同条件下的绩效差异不显著。

对被试在不同条件下的 JND 值进行单因素重复测量方差分析发现, 被试在不同时间结构条件下的 JND 值存在显著差异(如图 4B), $F(2, 50) = 4.87, p = 0.019, \eta_p^2 = 0.163$ 。事后检验显示, 被试在 $T = 1.0$ 时的 JND 显著小于 $T = 0.5$ ($p = 0.017$)和 $T = 1.5$ ($p = 0.019$), 表明被试对时间结构相同条件更敏感, 更能觉察在时间结构相同条件下任务的变化; 然而 JND 在 $T = 0.5$ 和 $T = 1.5$ 条件下的差异不显著, $p = 0.281$ 。表示被试对两种时间结构不同条件下的敏感度没有显著差异。

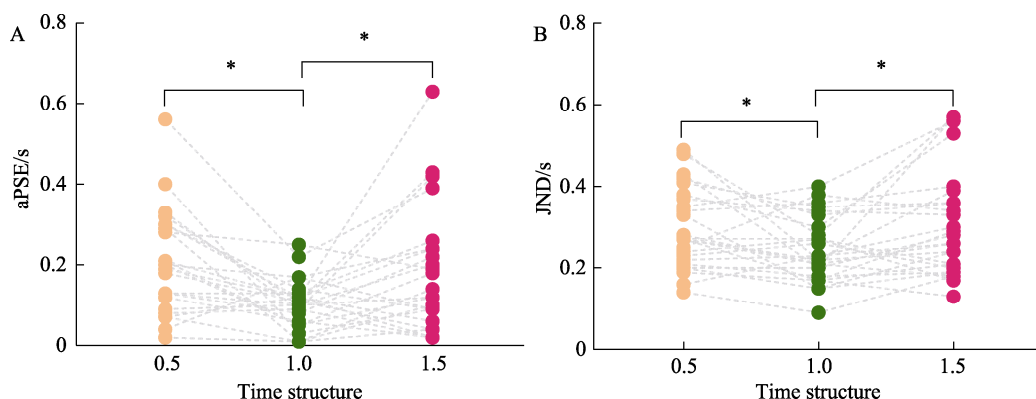


图 4 A 图为被试在实验 2 中三种时间结构条件下的 aPSE 对比图, B 图是被试在实验 2 中三种时间结构条件下的 JND 对比图。

3.3 讨论

为了分离视觉速度的影响,实验 2 采用闪烁范式探究时间结构线索在预测运动任务中的作用。对被试的 PSE 分析发现,被试在不同时间结构条件下的反应没有明显的倾向性。以往研究指出,被试倾向于在快速条件下低估运动刺激的到达时间,在慢速条件下高估运动刺激的到达时间,这说明被试反应的倾向性可能受到了视觉速度的影响。然而在没有视觉速度线索的情况下,时间结构信息成为被试判断的主要依据。被试在这种条件下可能需要更多的认知资源来处理时间结构信息,从而导致其在反应倾向性上的表现不稳定。相比于实验 1 中相对直观的速度-时间关系,实验 2 中的时间结构信息单独作用时,被试难以快速准确地利用其来形成明确的反应倾向。这可能使得被试在不同时间结构条件下的反应变得更加随机,从而掩盖了时间结构本身可能对反应倾向性产生的影响,最终导致 PSE 无显著差异。

对被试的 aPSE 分析发现,当时间结构相同时被试的 aPSE 显著高于时间结构不同条件,这说明被试在时间结构相同时的准确性高于时间结构不同条件。JND 的分析结果显示,当缺少视觉速度线索时个体对时间结构相同条件的敏感性也显著高于时间结构不同条件,该结果与实验 1 的结果一致。本实验不存在视觉速度线索,时间结构信息是被试判断的主要依据。当时间结构相同时,被试同样能够根据时间结构的节律性进行任务估计,这使得被试在时间结构相同条件下不但表现出更为高的绩效,而且展现出更高的时间结构敏感性。该结果进一步表明时间结构可能是影响被试任务估计准确性和敏感性的主要因素。

实验 2 通过分离视觉速度信息来探究时间结构对预测运动任务的影响,PSE 的结果与实验 1 不同,但 aPSE 和 JND 的结果与实验 1 相同。这说明被试反应倾向性可能受到了视觉速度和时间结构的交互影响,而任务估计的准确性和敏感性受到时间结构的影响。在接下来的实验 3 中,我们想要探究时间结构对预测运动任务影响的稳定性。时间结构的稳定性主要体现在其受到干扰后仍然保持和不存在干扰时存在相似的任务绩效,因此实验 3 采用随机实验来干扰被试对时间结构的加工。当存在干扰时,如果被试的绩效仍然在时间结构相同条件下保持相对优势,这就说明时间结构在预测运动任务中存在一定的稳定性。以往的研究大多使用双任务范

式来探究干扰对不同任务绩效的影响。然而,Kerzel (2003)指出注意是影响视觉运动任务的关键因素之一,使用双任务范式时个体必须将一部分注意资源分配到次任务中,则该范式无法在完全注意条件下探究时间结构的稳定性。我们之前在数字预测运动任务发现,在可见阶段随机呈现运动刺激的位置也能够降低被试的任务绩效,干扰其对预测运动任务的反应(Qin et al., 2023)。因此,本研究采用随机实验探究时间结构在预测运动任务中的稳定性。

4 实验 3: 干扰条件下时间结构相同能否提高预测运动任务的绩效?

4.1 方法

4.1.1 被试

本实验另外招募大学本科生 26 名,其中男性 10 名,女性 16 名,年龄范围为 19~22 岁,所有被试均为右利手,视力或矫正视力正常,且均没有参加过类似实验,实验结束后给予一定的报酬。1 名被试因总正确率低于 70%且单个条件正确率低于 60%被剔除,所以本实验共收集 25 名被试的数据。

4.1.2 实验任务,设计和程序

本实验任务(随机实验)与实验 2 相似,不同之处在于在每个试次中,蓝色小方块运动到遮挡点之前都会闪烁出现,并且其闪烁的位置是随机呈现的,这样做的目的是干扰被试根据起点到遮挡点的时间形成稳定的时间结构(Qin et al., 2023)。当 $T = 0.5$ 时,运动刺激在起点和遮挡点之间随机呈现 1 次;当 $T = 1.0$ 时,刺激在起点和遮挡点之间随机呈现 3 次;当 $T = 1.5$ 时,刺激在起点和遮挡点之间随机呈现 5 次。实验流程如下:当被试按下空格键后刺激出现在任务起点,随后蓝色方块匀速向遮挡点运动,在其到达遮挡点之前会随机出现 1 次($T = 0.5$),3 次($T = 1.0$)和 5 次($T = 1.5$),当其到达遮挡点后再次出现,然后继续向目标位置运动,一段时间后蓝色方块出现在目标位置。被试需要判断蓝色小方块是提前还是延迟到达目标位置,并按相应的按键。实验设计,程序和数据分析都与实验 1 一致。本实验想要探究在干扰条件下时间结构相同是否还能够提高预测运动任务的绩效,进而探究时间结构的稳定性。

4.2 实验结果

被试在实验 3 中的 PSE 如图 2C 所示,对每个被试的 PSE 值进行分析发现,被试在不同时间结构条件下的 PSE 值差异显著, $F(2, 48) = 4.06$, $p = 0.039$, $\eta_p^2 = 0.145$ 。事后检验显示,被试在 $T = 0.5$

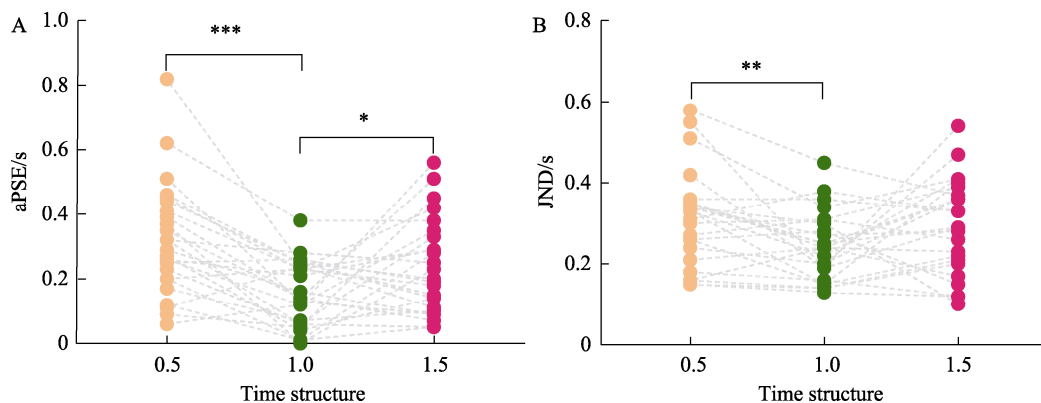


图5 A图是被试在实验3中三种时间结构条件下的aPSE对比图,B图是被试在实验3中三种时间结构条件下的JND对比图。

时的PSE值显著大于 $T = 1.0$ ($p = 0.025$)和 $T = 1.5$ ($p = 0.040$);被试在 $T = 1.0$ 和 $T = 1.5$ 时的PSE差异不显著, $p = 0.335$,表明被试在不同时间结构条件下的反应倾向性差异显著。

对被试在不同条件下的aPSE值进行的单因素重复测量方差分析发现,被试在不同时间结构条件下的aPSE值存在显著差异(如图5A), $F(2, 48) = 9.21, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.277$ 。事后检验显示,被试在 $T = 1.0$ 时的aPSE显著小于 $T = 0.5$ ($p < 0.001$)和 $T = 1.5$ ($p = 0.019$),这表明被试在时间结构相同条件下的任务绩效显著高于时间结构不同时的绩效;被试在 $T = 0.5$ 和 $T = 1.5$ 时的aPSE差异不显著, $p = 0.094$,表明被试在两种时间结构不同条件下的绩效差异不显著。对被试在不同条件下的JND值进行单因素重复测量方差分析发现,被试在不同时间结构条件下的JND值存在边缘显著(如图5B), $F(2, 48) = 3.45, p = 0.055, \eta_p^2 = 0.126$ 。事后检验显示,当 $T = 1.0$ 时,被试的JND显著小于 $T = 0.5$ ($p = 0.006$)时的值,但与 $T = 1.5$ ($p = 0.084$)时差异不显著;被试的JND在 $T = 0.5$ 和 $T = 1.5$ 条件下差异不显著, $p = 0.951$,表明在时间结构不相同条件下被试的敏感性不存在显著差异。

4.3 讨论

为了探究时间结构作用的稳定性,实验3在干扰条件下探究了时间结构对预测运动的影响。对被试的PSE值分析发现当 $T = 0.5$ 时,相较于 $T = 1.0$ 和 $T = 1.5$ 时,被试倾向于提前按键;而被试在 $T = 1.0$ 和 $T = 1.5$ 时的按键没有显著的倾向性。随机干扰导致被试在该任务中出现了认知资源的分配失衡。被试的注意资源被随机闪烁的刺激位置信息吸引,需要在不同位置间频繁切换注意力,这使得分

配给时间结构信息处理的认知资源减少,从而导致被试的反应具有更大的随机性。在 $T = 1.0$ 和 $T = 1.5$ 条件下,被试可能通过重新分配认知资源来补偿随机干扰的影响,使得PSE变化不显著。而在 $T = 0.5$ 条件下,短间隔高度依赖快速的时间期待更新,随机干扰破坏了这一机制,导致显著的PSE偏差。

为了进一步证明被试在不同时间结构条件下的绩效差异,对其aPSE值进行分析,结果显示被试在时间结构相同条件下的任务绩效显著高于时间结构不同条件,这与前两个实验的结果一致,即时间结构能提高个体在预测运动任务中的绩效。根据时间结构的特征,基本的时间结构单元能够通过重复产生节律,也可能嵌套在更大尺度的结构单元中产生层级(胡瑞晨等,2019)。在本实验中,随机出现在任务起点和遮挡点之间的运动刺激的位置能够产生较小的时间结构单元,然而这些时间结构单元无法为被试提供有效的任务线索。因此在本实验中被试可能需要抑制或忽略这些时间结构单元,根据更大尺度时间结构这一线索进行任务估计。当时间结构相同时,被试根据刺激从任务起点运动到遮挡点的时间间隔来诱发其预期,进而将注意资源集中到刺激何时从遮挡点到达目标位置;当时间结构不同时,时间结构无法为被试提高有效的任务线索,因此绩效更低。然而,JND的分析显示被试在 $T = 1.0$ 和 $T = 1.5$ 条件间的差异不显著($p = 0.084$),这有可能是本实验的样本量不足导致的统计功效偏低。虽然在干扰条件下被试也能够根据时间结构的节律性进行任务估计,但是干扰会造成被试在该条件下的任务绩效在一定程度上出现下降,导致 $T = 1.0$ 和 $T = 1.5$ 这两种条件的区分度变小,未来的研究可以增加样本量来进一步探究这种差异。

5 综合分析

本研究通过 3 个实验分别从不同的任务形式探究了时间结构在预测运动任务中的作用, 为了减少数据误差, 进一步分析时间结构对预测运动任务的影响, 我们将实验 1, 实验 2 和实验 3 结合, 形成 3 (实验条件: 连续实验, 闪烁实验, 随机实验) $\times$ 3 (时间结构: 0.5, 1.0, 1.5) 混合实验实验设计, 其中实验条件为被试间变量, 时间结构为被试内变量。

对 PSE 进行重复测量方差分析发现(图 6A), 时间结构主效应显著, $F(1.41, 100.27) = 5.63, p = 0.040, \eta_p^2 = 0.073$ 。实验条件主效应显著, $F(2, 71) = 8.46, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.192$ 。时间结构与实验条件的交互作用也显著, $F(4, 142) = 4.65, p = 0.001, \eta_p^2 = 0.116$ 。简单效应分析显示当 $T = 0.5$ 时, 与闪烁实验相比, 被试在随机实验中的 PSE 值显著更大($p = 0.005$); 当 $T = 1.0$ 时, 被试在随机实验中的 PSE 值显著大于连续实验($p = 0.002$)和闪烁实验($p = 0.001$); 当 $T = 1.5$ 时, 被试在连续实验中的 PSE 值显著小于闪烁实验($p = 0.008$)和随机实验($p = 0.023$)。结果显示在不同实验条件下, 被试的 PSE 值在不同的时间结构条件下存在显著差异。

对被试的 aPSE 进行重复测量方差分析发现(图 6B), 时间结构的主效应显著, $F(2, 71) = 16.42, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.188$ 。事后检验显示, 当 $T = 1.0$ 时, 被试的 aPSE 值显著小于 $T = 0.5$ ($p < 0.001$)和 $T = 1.5$ ($p < 0.001$)条件, 而 $T = 0.5$ 和 $T = 1.5$ 时被试的 aPSE 值差异不显著, $p = 0.224$ 。并且实验条件的主效应也显著, $F(2, 72) = 6.76, p = 0.002, \eta_p^2 = 0.160$ 。事后检验显示, 被试在连续实验中的 aPSE 值显著小于随机实验($p = 0.001$), 但与闪烁实验的差异不显著($p = 0.090$), 闪烁实验与随机实验中的 aPSE 值

差异不显著, $p = 0.404$ 。时间结构与实验条件之间的交互作用不显著, $F(4, 142) = 0.50, p = 0.712$ 。

对被试的 JND 进行分析发现(图 6C), 时间结构的主效应显著, $F(2, 71) = 13.28, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.158$ 。事后检验显示, 当 $T = 1.0$ 时, 被试的 JND 值显著小于 $T = 0.5$ ($p < 0.001$)和 $T = 1.5$ ($p < 0.001$)条件, 而 $T = 0.5$ 和 $T = 1.5$ 时被试的 JND 值差异不显著, $p = 0.800$ 。但实验条件的主效应不显著, $F(2, 71) = 1.20, p = 0.308$ 。时间结构和实验条件的交互作用也不显著, $F(4, 142) = 0.26, p = 0.902$ 。

6 总讨论

本研究在阻断范式中探究时间结构线索在不同任务背景下对预测运动任务的影响。实验 1 发现时间结构相同能够显著提高被试在预测运动任务中的准确性。然而该结果有可能受到运动刺激的视觉速度的干扰, 因此实验 2 采用闪烁实验分离了视觉速度, 结果显示时间结构相同也能增加被试估计的准确性。基于前两个实验的结果, 实验 3 我们使用随机实验探究时间结构作用的稳定性。结果显示即使存在干扰因素, 时间结构相同也提高了被试估计的准确性, 这表明在视觉通道内时间结构在预测运动任务中具有稳定性。上述实验支持了在阻断范式中时间结构能够影响个体在预测运动任务中绩效的假设。

研究表明时间结构能够影响个体对预测运动任务判断的准确性。以往的研究也发现时间信息能够影响个体在预测运动任务中绩效, 例如 Tresilian (1995) 使用计时策略来解释个体在预测运动任务中的绩效。计时策略认为个体在可见阶段能够依据运动刺激在视网膜上成像的变化率来预测物体到达

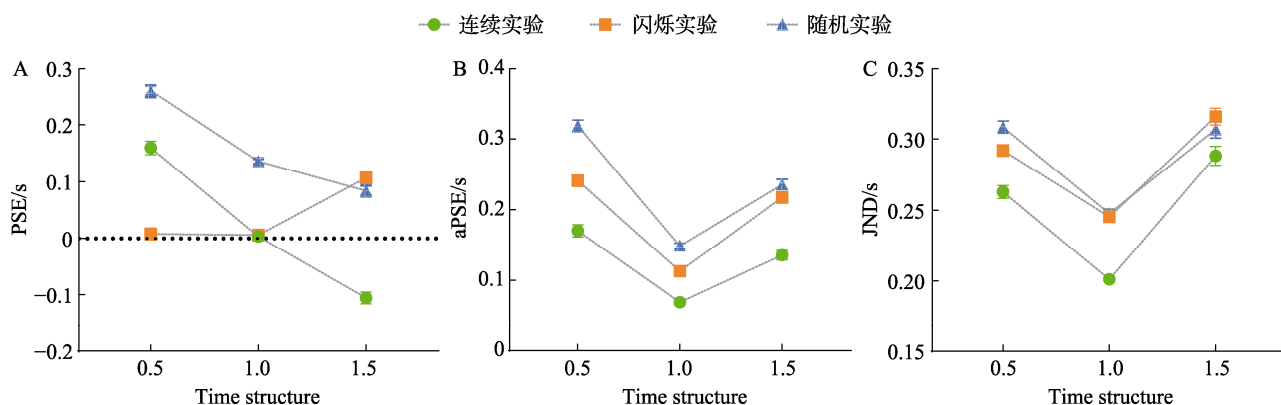


图 6 A 图为被试在 3 个实验中不同时间结构条件下 PSE 的对比, B 图为被试在 3 个实验中不同时间结构条件下 aPSE 的对比, C 图为被试在 3 个实验中不同时间结构条件下 PSE 的对比。误差棒为标准误

目标位置所需的时间,而一旦物体进入视线被遮挡的区域,个体就开始对这个预测的时间点进行倒计时(Bennett et al., 2010)。计时策略强调当运动刺激被遮挡后个体将无法感知到刺激的运动信息,从而将被动使用时间信息进行任务估计(Chang & Jazayeri, 2018)。然而在本研究中,我们发现在时间结构相同条件下被试不但估计的准确性显著高于时间结构不同条件,其敏感性也显著提高,这说明被试能够主动使用时间结构这一线索来进行了任务估计,而不是被动地接受时间线索的影响(Qin et al., 2024)。

我们认为当时间结构相同时,个体可能依据时间结构相同条件的节律性来进行任务估计。以往的研究发现当刺激以固定频率或相同间隔时长呈现时,个体能够根据刺激的节律性特征来进行任务估计(Herrmann, 2001)。Jones 等人(2006)的研究指出等时呈现的听觉节律信息能够提高个体对随后出现的听觉刺激的敏感性;在视觉通道内,Miller 等人(2013)的研究也发现节律信息提高了个体在目标探测任务中的绩效。上述研究表明人们对处于预期将出现在正拍的时间点上的目标刺激产生更高的探测绩效。在预测运动任务中,当时间结构相同时,刺激从任务起点运动到遮挡点的时间与从遮挡点运动到目标位置的理论时间间隔相同,所以时间结构相同条件具有一定的节律性。这种节律性能够通过诱发预期来调节个体的注意资源的分布(Jones et al., 2002),将注意引导至特定时间点。因此,当刺激早于个体根据节律信息产生的时间点出现在目标位置时被试倾向于将其判断为提前到达,而当刺激晚于该时间点出现在目标位置时被试倾向于将其判断为延后到达。时间结构不同时个体无法使用这一线索,因此被试在时间结构相同条件下的任务绩效显著高于时间结构不同条件。然而,也有研究认为时间结构相同有可能激活了个体的内源性时间期待(Qin et al., 2024)。内源性时间期待是指个体能够主动利用前置的时间线索将注意力集中到未来某一时间点上(Cotti et al., 2011; Coull & Nobre, 2008)。在时间定向任务中,研究者发现当为被试提供刺激何时出现的前置任务线索时,不但能提高任务正确率还能提高被试的反应速度(Correa et al., 2004)。在预测运动任务中,相较于时间结构不相同条件,时间结构相同时的任务背景能够为被试提供更有效的前置任务线索,因此时间结构相同也可能诱发了个体的内源性时间期待。以往的研究表明,

任务的节律性通常能够激活大脑的基底神经节(Grahn & Brett, 2007)、辅助运动区(Chen et al., 2008)、前运动区(Bengtsson et al., 2009)以及小脑(O'Reilly et al., 2008)等脑区,而内源性时间期待主要激活大脑的右侧背外侧前额叶皮层(Pfeuty et al., 2003)和左侧下顶叶皮层(Cotti et al., 2011),因此未来研究可以使用阻断范式结合脑成像技术对该假设进行检验。

实验2分离了视觉速度的干扰来探究时间结构信息对预测运动任务的影响。结果显示时间结构相同仍然能提高个体判断的准确性,该结果进一步证明时间结构在预测运动任务中的作用。在实验2中当时间结构相同时,被试同样能够根据时间结构的节律性进行任务估计,因此在时间结构相同时其绩效显著高于时间结构不同条件(Chang & Jazayeri, 2018)。然而综合分析的结果显示被试在实验1和实验2判断的准确性没有显著差异。当不存在视觉速度线索时,运动刺激在遮挡点之前的运动过程被遮挡,仅在起点和遮挡点处闪烁呈现,这增加了任务知觉的模糊性。这种知觉模糊性的增加可能会促进个体对时间结构的加工,进而放大时间结构的作用。认知资源理论认为当任务难度增加时,个体会将有限的认知资源有限优先分配给更关键、更可靠的信息(Gepshtein & Banks, 2003),对这些信息的加工也更为精细。这可能是个体在存在视觉速度线索和不存在视觉速度线索实验中没有出现显著差异的原因。

为了探究时间结构作用的稳定性,我们使用随机实验探究了时间结构对预测运动的影响。根据时间结构的层级性特征,任务起点、遮挡点以及随机出现在起点和遮挡点之间的运动刺激的位置能够产生较小的结构单元(胡瑞晨 等, 2019),然而这些较小的层级无法为被试提供有效的任务线索,甚至随机呈现的刺激位置干扰了对时间结构的加工。因此当个体根据时间结构进行任务估计时,需要消耗一定的注意资源来抑制或忽略这些基本的结构单元。虽然随机呈现的位置干扰了被试对时间结构的加工,然而以往研究发现个体对节律性信息加工属于自动化过程(Capizzi et al., 2012)。当个体使用节律性线索进行任务估计时,其绩效不受注意控制的影响(Sanabria & Correa, 2013)。前额叶皮层通常被认为是注意控制的神经基础,研究者发现右侧前额叶皮层受损的个体依然能够使用节律信息进行任务估计(Triviño et al., 2011)。也有研究发现使用

TMS 抑制背外侧前额叶的兴奋性不影响个体利用节律线索(Correa et al., 2014)。因此在实验 3 中, 虽然随机干扰通过打乱刺激呈现的规律来占用被试的注意资源, 但时间结构相同时的节律性仍使被试能够在一定程度上保持对运动刺激到达时间的相对准确判断。另外, 综合分析的结果也显示, 实验 3 中随机干扰虽然消耗了被试的注意资源, 但其判断的准确性和闪烁实验没有显著差异, 这说明在视觉通道内干扰信息并没有影响个体在视觉运动任务中判断的准确性。基于上述分析, 我们推断在视觉通道中时间结构对预测运动的影响具有一定的稳定性。

以前的研究发现干扰刺激通常能够显著影响预测运动的任务绩效, 例如 Lyon 和 Waag (1995)在其研究中发现当运动刺激被遮挡后, 相同或相反方向运动的干扰刺激都能够降低被试的任务绩效。也有研究发现在进行预测运动任务估计时要求被试对工作记忆任务进行反应也能影响其任务绩效(Baurès, Maquestiaux, et al., 2018)。然而以往研究大多采用双任务范式来探究分心刺激对预测运动任务的影响。在双任务范式中, 被试需要在两个任务之间分配认知资源, 在处理预测运动任务的同时兼顾另一个任务的要求, 这会分散对预测运动任务本身的认知资源(Oberfeld & Hecht, 2008)。因此, 该范式无法探究被试在注意资源集中在实验任务时时间结构作用的稳定性。与双任务干扰不同, 随机干扰通过打乱刺激的呈现位置, 因此研究者能够观察到在时间结构受到实验任务自身干扰的情况下(Qin et al., 2023), 被试的任务绩效如何变化。这有助于了解时间结构在预测运动任务中的特性, 以及被试在面对不稳定时间结构时的应对策略。综合上述分析, 本研究发现时间结构在预测运动任务的作用具有稳定性, 这对时间结构的三种基本特性进行了补充。

本文的 3 个实验也发现, 不同的实验中时间结构对个体反应倾向性的影响并不一致。实验 1 发现时间结构不同会导致被试反应倾向性的显著差异, 实验 2 发现分离视觉速度干扰后时间结构单独作用时被试反应倾向性相对稳定, 实验 3 则证明在干扰条件下时间结构仍能影响被试反应, 尽管方式和程度有所变化。这一系列结果共同表明时间结构对个体反应倾向性的影响具有复杂性, 未来需要研究者进一步梳理时间结构在不同任务形式中对个体反应倾向性的影响。

7 结论

本研究通过 3 个实验系统验证了阻断范式中时间结构在预测运动任务中的作用。研究结果显示与时间结构不同相比, 时间结构相同能够提高个体的任务绩效。并且在视觉通道中, 时间结构对预测运动任务的影响具有一定的稳定性。

参 考 文 献

- Alais, D., & Blake, R. (1998). Interactions between global motion and local binocular rivalry. *Vision Research*, 38(5), 637–644.
- Barnes, G. R. (2008). Cognitive processes involved in smooth pursuit eye movements. *Brain and Cognition*, 68(3), 309–326.
- Bauer, F., Cheadle, S. W., Parton, A., Müller, H. J., & Usher, M. (2009). Gamma flicker triggers attentional selection without awareness. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 106(5), 1666–1671.
- Baurès, R., Balestra, M., Rosito, M., & VanRullen, R. (2018). The detrimental influence of attention on time-to-contact perception. *Attention, Perception, and Psychophysics*, 80(6), 1591–1598.
- Baurès, R., Fourteau, M., Thébault, S., Gazard, C., Pasquio, L., Meneghini, G., ... Roux, F. E. (2021). Time-to-contact perception in the brain. *Journal of Neuroscience Research*, 99(2), 455–466.
- Baurès, R., Maquestiaux, F., DeLucia, P. R., Defer, A., & Prigent, E. (2018). Availability of attention affects time-to-contact estimation. *Experimental Brain Research*, 236(7), 1971–1984.
- Bengtsson, S. L., Ullén, F., Henrik Ehrsson, H., Hashimoto, T., Kito, T., Naito, E., Forssberg, H., & Sadato, N. (2009). Listening to rhythms activates motor and premotor cortices. *Cortex*, 45(1), 62–71.
- Bennett, S. J., Baures, R., Hecht, H., & Benguigui, N. (2010). Eye movements influence estimation of time-to-contact in prediction motion. *Experimental Brain Research*, 206(4), 399–407.
- Capizzi, M., Sanabria, D., & Correa, Á. (2012). Dissociating controlled from automatic processing in temporal preparation. *Cognition*, 123(2), 293–302.
- Chang, C. J., & Jazayeri, M. (2018). Integration of speed and time for estimating time to contact. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(12), E2879–E2887.
- Chen, J. L., Penhune, V. B., & Zatorre, R. J. (2008). Listening to musical rhythms recruits motor regions of the brain. *Cerebral Cortex*, 18(12), 2844–2854.
- Correa, Á., Cona, G., Arbula, S., Vallesi, A., & Bisiacchi, P. (2014). Neural dissociation of automatic and controlled temporal preparation by transcranial magnetic stimulation. *Neuropsychologia*, 65, 131–136.
- Correa, Á., Lupiáñez, J., Milliken, B., & Tudela, P. (2004). Endogenous temporal orienting of attention in detection and discrimination tasks. *Perception & Psychophysics*, 66(2), 264–278.
- Cotti, J., Rohenkohl, G., Stokes, M., Nobre, A. C., & Coull, J. T. (2011). Functionally dissociating temporal and motor components of response preparation in left intraparietal sulcus. *NeuroImage*, 54(2), 1221–1230.

- Coull, J. T., & Nobre, A. C. (2008). Dissociating explicit timing from temporal expectation with fMRI. *Current Opinion in Neurobiology*, 18(2), 137–144.
- Gepshtein, S., & Banks, M. S. (2003). Viewing geometry determines how vision and haptics combine in size perception. *Current Biology*, 13(6), 483–488.
- Grahn, J. A., & Brett, M. (2007). Rhythm and beat perception in motor areas of the brain. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 19(5), 893–906.
- Guo, X., Gong, Y., Xue, Q., & Yuan, X. (2000). Time-to-collision estimation in the occlusion paradigm. *Journal of Psychological Science*, 23(1), 34–37.
- [郭秀艳, 贡晔, 薛庆国, 袁小芸. (2000). 遮挡范式下对碰撞时间的估计. *心理科学*, 23(1), 34–37.]
- Herrmann, C. S. (2001). Human EEG responses to 1–100 Hz flicker: Resonance phenomena in visual cortex and their potential correlation to cognitive phenomena. *Experimental Brain Research*, 137(3–4), 346–353.
- Hove, M. J., Fairhurst, M. T., Kotz, S. A., & Keller, P. E. (2013). Synchronizing with auditory and visual rhythms: An fMRI assessment of modality differences and modality appropriateness. *NeuroImage*, 67, 313–321.
- Hove, M. J., Spivey, M. J., & Krumhansl, C. L. (2010). Compatibility of motion facilitates visuomotor synchronization. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 36(6), 1525–1534.
- Hu, R., Yuan, P., Jiang, Y., & Wang, Y. (2019). The functional role of temporal structure in human perception: Behavioral evidence and neural correlates. *Acta Physiologica Sinica*, 71(1), 105–116.
- [胡瑞晨, 袁佩君, 蒋毅, 王莹. (2019). 时间结构信息在人类知觉中的作用及其脑机制. *生理学报*, 71(1), 105–116.]
- Jazayeri, M., & Shadlen, M. N. (2010). Temporal context calibrates interval timing. *Nature Neuroscience*, 13(8), 1020–1026.
- Jones, M. R., & Boltz, M. (1989). Dynamic attending and responses to time. *Psychological Review*, 96(3), 459–491.
- Jones, M. R., Johnston, H. M., & Puente, J. (2006). Effects of auditory pattern structure on anticipatory and reactive attending. *Cognitive Psychology*, 53(1), 59–96.
- Jones, M. R., Moynihan, H., MacKenzie, N., & Puente, J. (2002). Temporal aspects of stimulus-driven attending in dynamic arrays. *Psychological Science*, 13(4), 313–319.
- Kerzel, D. (2003). Attention maintains mental extrapolation of target position: Irrelevant distractors eliminate forward displacement after implied motion. *Cognition*, 88(1), 109–131.
- Law, D. J., Pellegrino, J. W., Mitchell, S. R., Fischer, S. C., McDonald, T. P., & Hunt, E. B. (1993). Perceptual and cognitive factors governing performance in comparative arrival-time judgments. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 19(6), 1183–1199.
- Lee, D. N. (1976). A theory of visual control of braking based on information about time-to-collision. *Perception*, 5(4), 437–459.
- Lee, D. N., Young, D. S., Reddish, P. E., Lough, S., & Clayton, T. M. H. (1983). Visual timing in hitting an accelerating ball. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology Section A*, 35(2), 333–346.
- Linares, D., & López-Moliner, J. (2016). Quickpsy: An R package to fit psychometric functions for multiple groups. *R Journal*, 8(1), 122–131.
- Liu, R., & Huang, X. (1991). A study on time-perceptual cues in visual motion information. *Acta Psychologica Sinica*, 31(1), 15–20.
- [刘瑞光, 黄希庭. (1991). 运动视觉信息中时间知觉线索的实验研究. *心理学报*, 31(1), 15–20.]
- Lyon, D. R., & Waag, W. L. (1995). Time course of visual extrapolation accuracy. *Acta Psychologica*, 89(3), 239–260.
- Makin, A. D. J. (2018). The common rate control account of prediction motion. *Psychonomic Bulletin and Review*, 25(5), 1784–1797.
- Makin, A. D. J., & Poliakoff, E. (2011). Do common systems control eye movements and motion extrapolation? *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 64(7), 1327–1343.
- Miller, J. E., Carlson, L. A., & McAuley, J. D. (2013). When what you hear influences when you see: Listening to an auditory rhythm influences the temporal allocation of visual attention. *Psychological Science*, 24(1), 11–18.
- O'Reilly, J. X., Mesulam, M. M., & Nobre, A. C. (2008). The cerebellum predicts the timing of perceptual events. *Journal of Neuroscience*, 28(9), 2252–2260.
- Oberfeld, D., & Hecht, H. (2008). Effects of a moving distractor object on time-to-contact judgments. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 34(3), 605–623.
- Pfeuty, M., Ragot, R., & Pouthas, V. (2003). When time is up: CNV time course differentiates the roles of the hemispheres in the discrimination of short tone durations. *Experimental Brain Research*, 151(3), 372–379.
- Qin, K., Chen, W., Cui, J., Zeng, X., Li, Y., Li, Y., & You, X. (2022). The influence of time structure on prediction motion in visual and auditory modalities. *Attention, Perception, and Psychophysics*, 84(6), 1994–2001.
- Qin, K., Li, Y., Chen, W., Li, Y., & You, X. (2022). Effects of time structure and velocity cues on time to collision. *Journal of Psychological Science*, 45(4), 803–810.
- [秦奎元, 李瑛, 陈文翔, 李苑, 游旭群. (2022). 时间结构和速度线索对碰撞时间估计的影响. *心理科学*, 45(4), 803–810.]
- Qin, K., Liu, Y., Li, Y., Li, Y., & You, X. (2023). The influence of time structure on number prediction motion. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 76(8), 1862–1871.
- Qin, K., Liu, Y., Liu, S., Li, Y., Li, Y., & You, X. (2024). Neural mechanisms for integrating time and visual velocity cues in a prediction motion task: An fNIRS study. *Psychophysiology*, 61(1), e14425.
- Sanabria, D., & Correa, Á. (2013). Electrophysiological evidence of temporal preparation driven by rhythms in audition. *Biological Psychology*, 92(2), 98–105.
- Spencer, R. M. C., Zelaznik, H. N., Diedrichsen, J., & Ivry, R. B. (2003). Disrupted timing of discontinuous but not continuous movements by cerebellar lesions. *Science*, 300(5624), 1437–1439.
- Tang, R., Zhang, Z., Liu, Y., & Zhao, Y. (2010). What kinds of information are used in the onset of interception with hand? *Acta Psychologica Sinica*, 42(4), 507–517.
- [唐日新, 张智君, 刘玉丽, 赵亚军. (2010). 伸手拦截启动中的信息利用. *心理学报*, 42(4), 507–517.]
- Teichmann, L., Edwards, G., & Baker, C. I. (2021). Resolving visual motion through perceptual gaps. *Trends in Cognitive Sciences*, 25(11), 978–991.
- Tresilian, J. R. (1995). Perceptual and cognitive processes in time-to-contact estimation: Analysis of prediction-motion and relative judgment tasks. *Perception & Psychophysics*, 57(2), 231–245.
- Triviño, M., Arnedo, M., Lupiáñez, J., Chirivella, J., & Correa, Á. (2011). Rhythms can overcome temporal orienting deficit after right frontal damage. *Neuropsychologia*, 49(14),

3917–3930.

Watamaniuk, S. N. J., & McKee, S. P. (1995). Seeing motion behind occluders. *Nature*, 377(6551), 729–730.

Zelaznik, H. N., Spencer, R. M. C., & Ivry, R. B. (2002).

Dissociation of explicit and implicit timing in repetitive tapping and drawing movements. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 28(3), 575–588.

The impact of time structure cues on prediction motion tasks in the interruption paradigm

QIN Kuiyuan^{1,2}, LIU Yu^{3,4}, LIU Saifang^{3,4}, WANG Shuo^{3,4}, LIU Peng^{1,2}, YOU Xuqun^{3,4}, LI Yuan^{3,4}

(¹ School of Public Administration; ² School of Emergency Management, Northwest University, Xi'an 710127, China)

(³ School of Psychology, Shaanxi Normal University; ⁴ Shaanxi Key Laboratory of Behavior and Cognitive Neuroscience, Xi'an 710062, China)

Abstract

The capacity to precisely estimate the arrival time of a moving object at a designated point plays a crucial role in numerous daily activities, including catching a thrown ball or avoiding obstacles during driving. This process, referred to as a prediction motion (PM) task, requires estimating the moment at which a moving stimulus reaches a specific target. The present research explores the influence of time structure on performance within the interruption paradigm of PM tasks, focusing on the effect of timing patterns on the accuracy of motion prediction.

Experiment 1 employed a continuous test to explore the influence of time structure on performance in PM tasks. 25 university students participated in a task where a blue square moved from an initial location toward a target, became temporarily hidden at an interception point, and then reappeared at the designated target. Participants were instructed to determine whether the square arrived earlier or later than expected. Findings indicated that task accuracy significantly improved under a uniform time structure ($T = 1.0$) compared to variable structures ($T \neq 1.0$). These results imply that a stable time structure provides a reliable reference, enhancing the precision of motion prediction.

Experiment 2 was designed to separate the effect of visual speed on PM task performance by incorporating a flicker condition, wherein the moving stimulus became occluded before reaching the interception point. This setup eliminated access to visual speed cues, allowing for an examination of the predictive role of time structure alone. Results were consistent with those of Experiment 1, demonstrating that a stable time structure enhanced task accuracy even when visual speed data was unavailable. These outcomes indicate the significant influence of time structure on PM task performance, regardless of the availability of visual speed information.

Experiment 3 extended the investigation into the stability of the time structure effect by implementing random interference conditions. In this setup, the moving stimulus flickered unpredictably between the starting point and the interception point, thereby interrupting the formation of a stable time structure. Despite these disruptions, findings revealed that performance remained superior under a consistent time structure ($T = 1.0$), demonstrating the stability of this effect. These results indicate that, even in the presence of distractions or irregularities, the regularity of time structure continues to play a critical role in enhancing predictive accuracy.

In summary, the three experiments presented in this study consistently revealed that maintaining a uniform time structure enhances performance in prediction motion tasks. This improvement is robust across varying experimental conditions, demonstrating a notable level of stability. The results provide empirical evidence for the influence of cognitive processes in such tasks, indicating that individuals may rely on temporal rhythm to form expectations and improve accuracy. Further neuroimaging investigations may help uncover the neural processes involved, exploring how the brain incorporates temporal cues to anticipate motion and regulate behavior.

Keywords prediction motion task, rhythm, time structure, interruption paradigm