

# 《心理学报》审稿意见与作者回应

题目：三维虚拟空间中转头选中远离和靠近运动目标的操作特性差异

作者：邓成龙，耿鹏，蒯曙光

## 第一轮

### 审稿人 1 意见：

文章主要探究了 VR 中转头选中远离运动目标和靠近运动目标的影响因素和操作特性差异，从操作时间和移动过程两个方面进行分析，且具体地建立了运动的操作时间与影响因素的函数模型，量化了任务难度。但文章也存在一些问题。

**意见 1：**选中远离运动目标和选中靠近运动目标本身就是两种动作模式，一个是追踪一个是碰撞，是否有必要再验证二者的操作性差异值得探讨。

**回应：**非常感谢审稿专家提出的宝贵意见。针对审稿人的意见，我们重新梳理了引言部分，强调了探索远离与靠近运动差异的重要性。虽然远离和靠近运动是两种不同的运动模式，但是它们的操作特性是完全不同还是存在部分差异，一直没有得到答案。过往研究主要独立分析远离或者靠近运动，只有少量的研究同时对比了两者的差异(Hajri, Fels, Miller, & Ilich, 2011; Ilich, 2009)，并且在这些直接比较研究中，也存在不少缺陷。首先，这些研究采用的远离运动任务可能包含了靠近运动过程。在 Ilich(2009)和 Hajri 等人(2011)的研究任务中，目标在移动的过程中碰到屏幕后反弹，沿着反方向移动，如果目标在碰壁之前没有被选中，那么整个过程就包含了远离和靠近运动两部分操作过程，因此他们的研究结果可能并不能很好地说明远离与靠近运动的差异。其次，这些研究虽然设置了一些因素，比如目标速度和目标大小，但是并没有详细比较这些因素是否对远离和靠近运动造成了不同的影响，并且这些研究并没有设置初始距离(光标与目标的距离)这个重要的因素。我们的研究结果显示，初始距离和目标速度对远离和靠近运动造成了不同的影响，但是目标大小对远离运动的影响是一致的，说明了远离和靠近运动只是存在部分差异。此外，我们还发现，远离运动与靠近运动的操作时间差异主要体现在加速阶段和减速阶段，两者的调整时间非常接近。同时对比远离和靠近运动有重要的理论和实际意义。在理论上，研究结果可以帮助我们更加深入地了解远离运动与靠近运动控制过程的异同。在应用上，了解远离与靠近运动的操作特性异同可以帮助 VR 应用的设计人员有针对性对远离运动和靠近运动造成不同影响的因素，比如移动距离、

目标速度等选择各自适合的参数范围,而不需要分开考虑有相同影响的因素,比如目标大小。综上所述,我们认为同时比较远离和靠近运动非常重要而且非常有必要。

**意见 2:** 对于动作三个阶段划分问题,“减速阶段”和“调整阶段”的阶段分界点不清晰,若有多个点满足“三个标准”中的几个,例如光标速度变为小于目标速度的点,与光标加速度值变为正数的点不为同一个点,则按照第几个标准选取分界点。此外,减速阶段时也在调整接近目标,为何不能看作调整阶段的一部分。

**回应:** 非常感谢审稿专家的宝贵意见。我们在文章中确实没有表述清楚“减速阶段”与“调整阶段”的阶段分界点三个标准的使用顺序,减速阶段与调整阶段的分界点为第一个满足三个标准中的任意一个的点,且速度小于目标速度与光标最大速度的中点值(远离运动)或者速度小于光标最大速度的一半(靠近运动),我们已在正文中修改(“2.5 数据分析”章节,行 217 – 行 219)。

此外,虽然光标在减速阶段也在接近目标,但是减速阶段并没有参与目标调整过程。在 1899 年的时候,Woodworth 首先提出了指向目标的移动过程包含两个阶段:初始的弹射阶段和随后的调整阶段(Woodworth, 1899)。在弹射阶段,光标以很快的速度从起点移动到目标附近,代表了运动计划执行过程,不需要实时视觉反馈,而在调整阶段,光标则是以很慢的速度指向目标,并根据实时的视觉反馈控制光标进行微小的调整(Chen, Hoffmann, & Goonetilleke, 2015; Elliott, Helsen, & Chua, 2001)。Meyer 等人进一步地将弹射阶段和调整阶段细化,他们发现移动过程由多个子运动组成,每个子运动包含了速度上升和下降的过程。第一个子运动代表了弹射阶段,覆盖了大部分的移动距离,如果第一次光标落点不在目标内,将会进行第二次、第三次甚至更多的子运动,进行微小的调整,直到光标完全落在目标内(Meyer, Abrams, Kornblum, Wright, & Keith Smith, 1988; Meyer, Keith-Smith, Kornblum, Abrams, & Wright, 1990)。两个阶段由多个子运动组成也得到了很多后续研究的支持,并且发现弹射阶段只与移动距离相关,与目标大小无关,调整阶段则同时与移动距离和目标大小有关(Chen et al., 2015; Liu, van Liere, Nieuwenhuizen, & Martens, 2009)。Deng 等人(2019)进一步将弹射阶段划分成了速度不断增大的加速阶段和速度逐渐减小的减速阶段,并且他们的结果显示减速阶段不受目标大小的影响,但是调整阶段与目标大小显著相关(Deng, Geng, Hu, & Kuai, 2019)。由于我们参照 Deng 等人(2019)的方法将移动过程划分成三个阶段,也获得了相似的结果,因此将减速阶段与调整阶段分开独立分析是合理的。

**意见 3:** 目标大小和光标大小可能对正确率影响很大, 光标小更容易成功, 选取标准是否有依据。

**回应:** 非常感谢审稿专家的宝贵意见。选中静止目标的研究发现光标大小和目标大小对任务的完成时间和错误率有显著影响(Deng et al., 2019; Pastel, 2011)。为了确定两者是否对选中运动目标的操作表现也产生重要影响, 我们在正式实验前进行了一项预实验, 采集了 16 名被试(8 名男性)的数据, 设置了 5 个自变量: 光标的直径大小(2°, 4°, 6°, 8°)、初始距离(16°, 24°, 32°, 40°)、目标容差(2°, 4°, 6°, 8°)、转头方向(从左向右, 从右向左)和目标的运动方向(远离运动, 靠近运动), 并设置目标的移动速度为 1.5m/s。目标容差指的是目标与光标的直径差值, 因此目标大小等于光标大小与目标容差大小的总和。这里需要强调的是, 当使用的光标尺寸固定时, 目标大小或者目标容差对完成任务的表现的影响本质上是一样的, 因为目标容差与目标大小一一对应。但是当光标的大小变化时, 目标大小与目标容差不再一一对应, 此时操作表现受到目标容差而不是目标大小的规律性影响(MacKenzie & Teather, 2012; Pastel, 2011)。举个例子, 假设条件 1 设置光标大小为 2°和目标大小为 5°, 则目标容差为 3°; 条件 2 设置光标大小为 4°和目标大小为 6°, 则目标容差为 2°, 那么条件 1 的任务完成时间和错误率将优于条件 2 的结果, 因为条件 1 的目标容差更大, 操作难度更低, 即使条件 2 的目标更大。因此, 当光标的大小发生变化或者不能被忽略时, 主要采用目标容差大小作为变量。

预实验的结果显示光标的大小对错误率(远离运动: 15.89%, 15.69%, 16.05%和 16.02%; 靠近运动: 11.26%, 10.25%, 10.51%, 12.40%)和操作总时间(远离运动: 1153ms, 1128ms, 1129ms, 1142ms; 靠近运动: 900ms, 865ms, 855ms, 856ms)的影响非常小(图 1 和图 2), 因此我们认为光标大小不是影响选中运动目标过程的重要因素。为了减少总试次的数量, 我们只选择了一个光标的大小。同时考虑到目标的最大值以及远离运动中光标的可见程度, 经过调试, 我们认为光标大小设置为 4°是比较合适的。目标容差对错误率和完成时间有显著影响, 因此作为本研究的主要影响因素之一, 目标容差的选取范围依据请参见“回应 1-4”部分。参数的选取依据已经添加在了正中的“2.3 实验刺激和设计”章节(行 155 - 行 186)。

**意见 4:** 方法部分(173 行), 4 个目标移动速度、2 个初始距离、3 个目标容差分别是如何确定和选取的, 文章对此没有解释。

**回应:** 非常感谢审稿专家的宝贵意见。在正式实验开始前, 我们进行了一项预实验用于确定光标大小和转头方向是否对选中运动目标有重要影响以及初始距离、目标容差和目标速度的

取值范围，实验设计和结果请见“回应 1 - 3”部分，参数的选取依据已经在“2.3 实验刺激和设计”章节进行了添加(行 155 - 行 186)，具体内容如下：

预实验结果显示，光标大小和转头方向对总操作时间和正确率没有显著影响，因此不作為本实验的研究因素，考虑到目标的最大值以及远离运动中光标的可见程度，我们固定光标的大小为 4°。我们发现当目标容差为 2°时，靠近运动的平均错误率超过了 35%，远离运动的错误率超过了 45%，然而当目标容差增大到 4°时，远离和靠近运动的错误率都降低到了 15%以下。为了在最大速度下，被试依然能够比较好地完成任務(错误率低于 30%)，经过我们的调试，确定了最大速度为 2m/s，并且目标容差的最小值不低于 4°。为了能够快速识别出目标是静止还是运动的，经过调试，我们将目标的最小速度设置为 0.5m/s。本研究的目的一是想探究人的操作表现如何随着目标的移动速度的变化而变化，因此设置了 4 个目标移动速度水平，在 0.5m/s 与 2m/s 之间进行了四等分。

此外，我们将目标容差的最大值设置为 8°，一方面是因为经过观察后，目标已经足够大(12°)，另一方面是因为选中目标的难度比较低了。在远离运动中，为了确保被试能够在最大速度情况下(2m/s)仍然能够比较好地选中目标，经过调试，初始距离的最大值设置为 40°。在靠近运动中，为了确保在最大速度情况下能够大概率成功拦截目标，初始距离的最小值设置为 20°。考虑到总的试次数量和疲劳程度，因此设置了 3 个水平的目标容差和 2 个水平的初始距离。

综上所述，本实验采用了 2(目标运动方向：远离运动，靠近运动) × 4(目标移动速度：0.5m/s, 1m/s, 1.5m/s, 2m/s) × 2(初始距离：20°, 40°) × 3(目标容差：4°, 6°, 8°)的 4 因素被试内重复实验设计。光标直径为 4°(0.22m)，目标容差的线性量大小分别约 0.22m、0.33m 和 0.43m，目标大小为目标容差与光标大小之和，直径为 8°(0.43m)、10°(0.54m)和 12°(0.65m)，初始距离的线性距离为 1.06m 和 2.18m。

**意见 5：**方法部分，既然初始距离和目标容差以角度为单位，但文章的目标速度以 m/s 为单位，则结论只适用于被试和屏幕距离为实验中的固定值。是否可以用角速度表示。

**回应：**非常感谢审稿专家提出的宝贵意见。线性单位(m)和角度单位(°)是常用的表示距离和目标容差大小的两种方式，由于在三维空间中，选中静止目标的研究显示角度单位包含了深度因素对操作时间的影响(Kopper, Bowman, Silva, & McMahan, 2010; Qian & Teather, 2017)，因此本研究采用角度量设置初始距离、目标容差以及光标的大小。为了更全面地描述参数，我们在正文中增加了参数的线性量，具体见“2.3 实验刺激和设计”章节(行 181 - 行 185)，

内容如下：“光标直径为 4 °(0.22m)，目标容差的线性量大小分别约 0.22m、0.33m 和 0.43m，目标大小为目标容差与光标大小之和，直径为 8 °(0.43m)、10 °(0.54m)和 12 °(0.65m)，初始距离的线性距离为 1.06m 和 2.18m”。

由于在本研究中，目标是沿着水平方向移动，而不是以人为中心的圆周运动，因此目标速度用线速度(m/s)比角速度(°/s)表示速度大小更合理。由于本研究没有设置不同的深度，相同的目标线速度在不同深度情况下对远离和靠近运动的影响是否相同还未验证。因此正如审稿专家所说，本研究的结论目前还只适用于深度为 3m 的情况，也是本研究的不足之处，该内容已在“4 讨论”章节(行 496 – 行 499)中添加，未来我们将进一步探讨不同深度下目标速度对远离运动和靠近运动的影响，扩展本研究的结论。

**意见 6:** 结果部分，3.1 分析错误率、3.2 完成任务的总时间、3.3 光标移动过程的最大速度、3.4 光标移动过程的三阶段操作时间中，目标运动方向、目标容差、目标速度、初始距离是否存在三因素或四因素交互作用，文章没有列出数据和结果。

**回应:** 非常感谢评审专家提出的宝贵意见。本研究部分结果存在显著的三因素交互作用，但是所有结果都不存在显著的四因素交互作用，相关结果已添加在正文的“3 结果”章节。增加的有显著三因素交互作用的结果包括：

(1)错误率：目标运动方向 × 目标速度 × 初始距离：  $F(1.57, 25.15) = 11.94, p = 0.001, \eta_p^2 = 0.43$  (3.1 错误率，行 257 – 行 259)。

(2)完成任务的总时间：目标运动方向 × 目标速度 × 初始距离：  $F(1.86, 29.82) = 4.03, p = 0.031, \eta_p^2 = 0.20$  (3.2 完成任务总时间，行 282 – 行 284)。

(3)加速阶段时间：目标运动方向 × 目标速度 × 初始距离：  $F(1.46, 23.42) = 55.82, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.78$  (3.4 光标移动过程的三阶段操作时间，行 300 – 行 303)。

(4)减速阶段时间：目标运动方向 × 目标速度 × 初始距离：  $(F(3, 48) = 4.37, p = 0.008, \eta_p^2 = 0.21$  (3.4 光标移动过程的三阶段操作时间，行 313 – 行 315)。

**意见 7:** 结果和讨论部分，远离运动和靠近运动的总时间差异、最大速度差异、三阶段操作时间差异，可能是由于光标实际移动距离不同导致的(364 行)。文章控制了远离运动和靠近运动的初始距离，但没有控制实际移动距离，因此远离运动和靠近运动的时间差异显著，和最大速度的差异显著本身就是可以预料的。

回应：非常感谢评审专家的重要意见。由于目标是运动的，具有不同的速度，光标与目标又处于同一个维度，每一位被试控制光标移动的速度也存在差异，因此光标的实际移动距离将由初始距离、目标速度、目标方向以及光标的速度共同决定，在本研究的任务中无法控制光标的实际移动距离。然而由于实际移动距离的主要影响因素是目标速度和方向，因此靠近运动中光标实际移动的距离短于远离运动的距离是能够预料的。但是基于此信息，我们并不能完全预测远离运动与靠近运动的总时间差异、最大速度差异和三阶段操作时间差异。首先，不能准确预测总时间和三阶段操作时间。**Hajri** 等人(2011)的研究显示，目标在一维上运动时，远离运动的总操作时间高于靠近运动，但是目标在二维上移动时，靠近运动的操作时间则超过了远离运动(**Hajri et al.**, 2011)。虽然本研究的结果显示，总体上远离运动的操作时间大于靠近运动，但是当目标速度为 0.5m/s 时，远离和靠近运动的时间非常接近，随着目标速度的增大，远离运动的操作时间才逐渐大于靠近运动。其次，不能准确预测三阶段的操作时间。加速阶段和减速阶段的操作时间受到实际移动距离的影响很大，但是调整阶段主要受目标容差和目标速度的影响，因此我们的结果显示，在本研究设置的参数范围内，远离运动的加速时间和减速时间大于靠近运动，但是两者的调整时间非常接近。最后，如审稿专家所言，最大速度的差异确实是可以被预测，由于最大速度主要与移动距离相关，移动的距离越远，最大速度越大，因此远离运动的最大速度大于靠近运动的最大速度，基于此，我们删除了上一版本中的最大速度结果，并把该结果放在本回应中(图 3)，供审稿专家查看。

综上所述，我们可以预测出远离运动的实际移动距离大于靠近运动，基于此，可以预测最大移动速度差异，但是不能预测总时间和三阶段时间的差异。相关的讨论也在“4 讨论”章节中进行了修改。

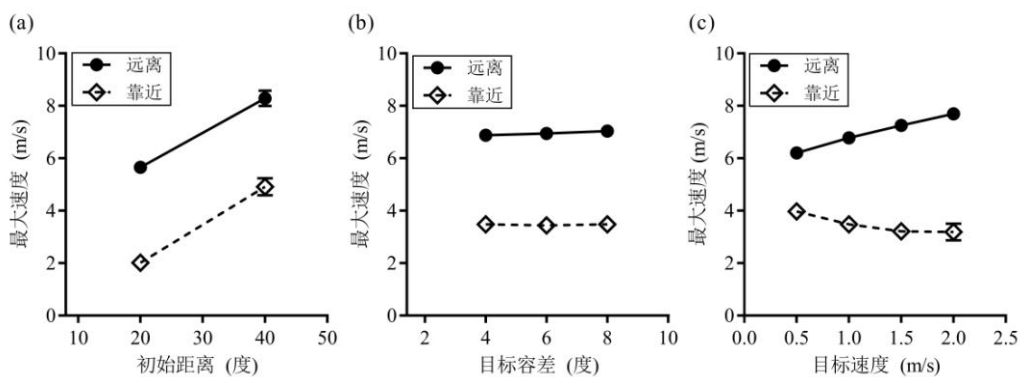


图 3 远离和靠近运动中光标移动的最大速度结果

意见 8：接近运动是否光标不动也可以完成任务？这样被试随意运动的可能加大。

回应：非常感谢审稿专家的宝贵意见。首先，在实验中，我们要求被试又快又准地完成任  
务，避免出现随意地完成任任务。其次，我们分析了在靠近运动中被试是否存在光标停在起  
始点等待目标靠近完成选中的等待策略。如果光标的移动范围在起始点左右 0.5 倍光标大小  
范围内(约 0.22m)，则判定为等待策略。结果显示当初始距离为 20°，目标速度超过 0.5m/s  
后，出现等待策略的比例超过了 15%，并且随着目标速度的增大而增加(图 4， $F(1.60,$   
 $25.60) = 17.11$ ， $p < 0.001$ ， $\eta_p^2 = 0.52$ )。但是我们认为等待策略是权衡操作效率高低后的结  
果而非随意的行为。当初始距离为 20°时，由于目标可以很快移动到光标的初始点位置，被  
试主动拦截目标成功的概率不高，反而增加追击的过程，造成总操作时间增加，因此被试  
选择在原地等待目标接近然后完成选中目标可能更高效。然而，当初始距离增加到 40°时，  
由于等待目标靠近光标的时间太长，导致操作效率低下，因此被试选择主动拦截目标(等待  
策略概率低于 5%)。综述所述，我们认为被试在完成任任务的过程中并不会随意运动。等待  
策略的结果已在正文中增加，请见正文“3.6 靠近运动的等待策略”章节(行 367 - 行  
371)。

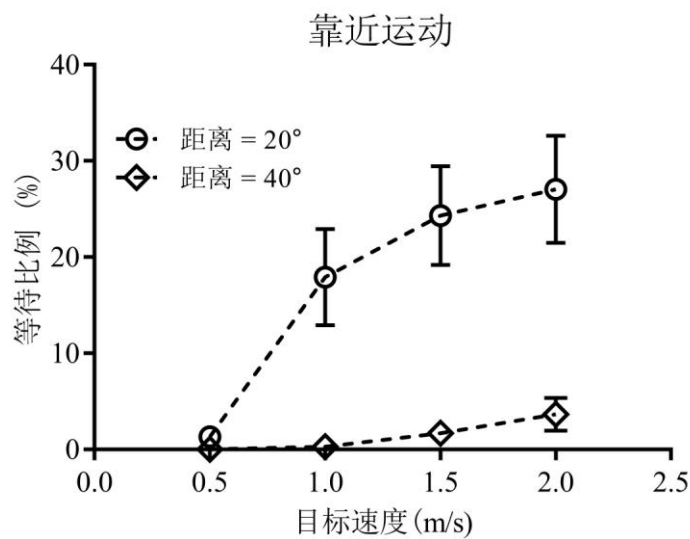


图 4 靠近运动中出现等待策略的比例

意见 9：前面已经指出，由于转头主要是角度问题，而后面又采用速度和物体大小等进行建  
模，导致建模结果具有偶然性。

回应：非常感谢审稿专家提出的重要意见。首先，由于目标在水平方向上移动，而不是以人为中心的圆周运动，因此目标速度使用线速度比角速度更合理。其次，为了与目标速度单位(m/s)保持一致，我们将初始距离和目标容差的角度量转换成了线性量(单位 m)，然后进行模型拟合。然后，虽然转头操作主要是角度，但是在转头选中静止目标的研究中，Hoffmann 等人(2017)比较了采用角度量与采用线性量的模型拟合，结果显示两者的拟合结果都非常好，并且没有显著差异(Hoffmann, Chan, & Heung, 2017)。Deng 等人(2019)也使用线性量拟合了转头操作的数据，并取得了很好的拟合结果(Deng et al., 2019)，因此本研究的模型拟合使用线性量数据是合适的。最后，为了验证模型的稳定性，我们将被试的数据随机分成训练集和测试集。训练集由随机挑选出的 2/3 被试(11 人)的数据组成，然后使用我们提出的模型对训练集进行拟合，用获得的模型参数预测剩下的 1/3 被试(6 人)的数据。我们重复这个过程 1000 次，获得了训练集数据的模型拟合  $R^2$  结果以及对测试集数据的模型预测  $R^2$  结果的分布(图 5)。靠近运动和远离运动的测试集  $R^2$  非常高，平均  $R^2$  分别为 0.940 和 0.966，与所有数据的拟合结果(远离运动： $R^2 = 0.971$ ；靠近运动： $R^2 = 0.952$ )非常接近。远离运动中，模型预测的  $R^2$  全部超过了 0.8，平均值达到了 0.941。虽然靠近运动的模型预测结果低于远离运动模型的预测结果，但是 75% 的靠近运动模型的预测  $R^2$  超过了 0.82，平均值仍然达到了 0.855。本结果说明我们提出的模型不仅稳定，还能够很好地对数据进行预测。训练集和测试集的结果已添加在正文中的“3.7 模型拟合”章节(行 413 - 行 420)。

但是我们的模型目前只是建立在当前的任务环境中，模型是否符合其他交互方式比如手控和眼控，或者其他的参数条件，比如不同深度等，还需要通过未来的工作进一步验证。

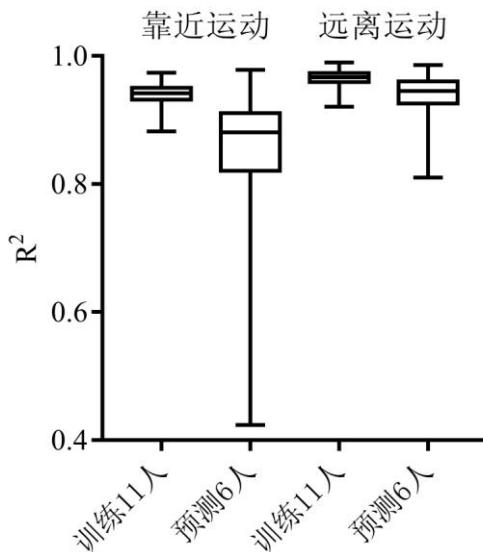


图 5 模型对训练集的拟合结果和模型对测试集的预测结果箱型分布图。训练集是随机选择 2/3 被试(11 人)



的数据，测试集是剩余的 1/3 被试 (6 人)的数据。图中“训练 11 人”是模型拟合训练集 1000 次的  $R^2$  结果，“预测 6 人”是使用训练集获得的模型去预测测试集数据的 1000 次的  $R^2$  结果。图中最顶端和最低端的两条线分别表示结果的最大值和最小值，箱子的上边线和下边线分别代表结果的上四分位数和下四分位数，箱子内的线表示结果的中位数。

.....

#### 审稿人 2 意见：

本文研究了虚拟现实场景中转头选中运动目标的影响因素，并进一步探讨了运动方向(即远离和靠近运动)之间的操作特性差异。本文的研究问题比较有意义，但是存在较多的问题，尤其是理论贡献比较有限。

**意见 1：**文章的中文摘要存在很多异议，不容易理解。例如，移动过程上，远离运动和靠近运动的三个阶段存在差异且受不同因素的影响。哪三个阶段呢？同样的，我们构建了总操作时间与三因素的函数模型，哪三个因素呢？

**回应：**非常感谢审稿专家的重要意见。非常抱歉上一版文稿的摘要省略了很多重要信息，导致信息不完整，给审稿人的理解造成异议，我们重新编辑了中英文摘要，请审稿专家再次审阅。本研究中移动过程的三个阶段指的是：加速阶段、减速阶段和调整阶段，三个阶段的分段标准请见正文 2.5 章节。三个重要因素指的是初始距离(光标中心与目标中心之间的直线距离)、目标容差(目标与光标的直径差值)和目标速度。

**意见 2：**本文的核心文献除了 Deng 等人 2019 年发表的一篇关于选中静止目标的文章，其余绝大多数为 10 年，甚至是 30 年前(1987)的文献。转头选中运动目标在 VR 应用场景，尤其是游戏中应用较多，为何技术在不断地进步，而相应的基础研究却出现大跨度空白？

**回应：**非常感谢审稿专家提出的宝贵意见，同时也为我们没有在上版文稿中提供详细的基础研究背景感到抱歉。首先，在近 10 年内，我们没有找到三维空间中关于选中运动目标的相关研究，但是有很多研究者在二维电脑屏幕上采用手控的方式从多个方面对选中运动目标过程进行了探索，比如不同因素如移动距离和目标大小等对选中运动目标时落点分布的影响(Huang, Tian, Fan, Zhang, & Zhai, 2018; Huang, Tian, Li, & Fan, 2019)，视觉反馈和延时对选中运动目标的操作表现的影响(Claypool, Cockburn, & Gutwin, 2019; Mould & Gutwin, 2004)，以及提高选定运动目标效率的方法探索(Gunn, Irani, & Anderson, 2009; Hasan, Grossman, &

Irani, 2011; Ortega, 2013; Ragan, Pachui, Goodall, & Bacim, 2020)。由于这些研究不是主要关注初始距离、目标速度和目标大小对操作时间的影响，与本研究的主题不是密切相关，因此没有放入上一版文稿的研究背景介绍中。为了让审稿专家和读者更全面地了解当前研究的进展，我们在“1 引言”章节添加了上述近 10 年内的比较新的研究(行 88 - 行 94)。其次，我们没有找到三维空间中关于选中运动目标的操作特性的研究，原因可能与 VR 设备被广泛使用的时间短有关。VR 技术真正开始被大家熟知是从 2012 年 Oculus 公司发布的第一款开发者产品 Oculus DK1 开始，而广泛应用于游戏娱乐、仿真、教育等行业则是从 2016 年消费级别的 VR 产品比如 Oculus Rift CV1 和 HTC VIVE 的面世开始，因此使用良好的 VR 设备进行三维空间中相关研究的时间实际上只有近 5 年的时间，而转头操作主要发生在 VR 领域，在二维平面空间应用较少，因此我们推测基于转头选中运动目标相关的基础研究存在一定的延后。

**意见 3：**在理论背景的相关介绍中，作者提到 VR 场景中的运动目标选中比静止目标选中存在多个维度上的差异(移动范围、深度距离等)，但是，作者为何只是考虑了目标运动的速度和方向？另一方面，既然转头对运动目标的选中系统中，包括运动目标和头部两个运动主体，而且不同个体的头部转动速度也可能是不同的，在操作时间上为何不考虑头部运动速度的变量。根据作者最后得出的公式，只是在前人选中静止目标的公式中，单纯的添加了速度变量，与真实的运动目标选中仍存在较大的距离，对现实应用的指导意义也极为有限。

**回应：**非常感谢审稿专家提出的宝贵意见。针对审稿专家的第一个问题，首先，我们在背景部分介绍到 VR 中转头选中静止目标与选中运动目标过程存在差异和二维平面与三维空间存在差异，目的是说明选中静止目标的操作特性不能用于解释选中运动目标的操作特性(比如选中运动目标要受到目标速度大小的影响，而选中静止目标则不需要考虑目标速度)以及在二维平面中选中运动目标的操作特性可能与三维空间中选中运动目标的操作特性存在不同(比如，相比二维平面，三维空间的移动范围更广，目标位置的深度更远等)，以此说明单独研究 VR 中转头选中运动目标的必要性。其次，影响选中运动目标的影响因素很多，比如目标移动的维度(水平方向、垂直方向和纵深方向)、目标的深度等，但是目标运动方向和速度是目标的两个最基本和最重要的两个因素。大部分关于运动目标的研究都设置了不同的目标移动速度。远离运动和靠近运动是两类典型的目标运动模式，其他运动目标相关的研究基本都属于远离或者靠近运动中的一种。但是由于远离运动与靠近运动的操作过程不同，过往研究很少同时比较两者，特别是缺乏目标速度对远离运动和靠近运动的影响异同，到目前为

止，远离与靠近运动的操作特性差异还不清楚。因此本文的主要目的是详细探索远离运动与靠近运动的操作特性异同。其他相关因素对远离和靠近运动目标的影响差异探索可以作为将来的工作，进一步完善研究结果。

针对审稿专家的第二个问题，在本研究中头部运动速度与光标的运动速度实际上是等价的，因为光标的移动是通过头的转动控制的，因此头的转动速度轨迹与光标的速度轨迹在形态上是一致的，我们对光标的速度轨迹的分析结果本质上就是反映了头部转动的速度特性。

针对审稿专家的第三个关于模型的问题，确实如审稿专家所说，我们建立的模型从形式上看比较简单，特别是与其他研究建立的复杂模型相比，我们的模型更简洁，但是我们建立这样的模型的理由有两个，第一，由于选中运动目标是选中静止目标的延伸，我们的结果显示初始距离和目标容差对选中运动目标与选中静止目标的操作时间产生了相似的影响，因此我们认为当目标速度不变时，选中运动目标的操作时间与初始距离和目标容差的关系仍然满足费茨定律： $MT = a + b \log_2(2A/TT)$ ，其中  $a$  和  $b$  是拟合常数， $MT$  是总操作时间， $A$  是初始距离， $TT$  是目标容差。第二，由于远离运动的完成时间随着目标速度的增大而线性增加，而靠近运动的完成时间随着目标速度的增大而下降，并且目标速度与初始距离和目标容差不存在强交互效应，因此我们在费茨定律基础上加入独立的目标速度参数，建立了新的模型： $MT = a + b[v^k + c \log_2(2A/TT)]$ ，当  $k = 1$  时，模型代表远离运动模型；当  $k = -1$  时，模型代表靠近运动模型。我们的模型很好地解释了本研究的远离和靠近运动的数据。此外，为了验证模型的稳定性，我们还将被试的数据随机分成训练集和测试集。我们的模型对训练集的拟合结果以及模型对测试集的预测结果都非常好，详细结果请查看“回应 1-9”和正文中的“3.6 模型拟合”章节(行 413 - 行 420)，说明我们提出的模型不仅稳定，还能够很好地对数据进行预测。

同时，我们也非常同意审稿专家的观点，我们的模型是建立在比较简单的任务环境中，是否符合真实环境中的运动目标选中过程还有待验证，真实环境更加复杂，目标可能在多个维度上进行曲线运动，甚至是变速运动，因此操作难度更大，操作特性也可能存在差异。但是我们的模型仍然对目标在水平方向上进行匀速移动的现实应用具有几个方面重要的指导意义。第一，我们的模型量化了任务难度，由于多个因素都对任务难度产生了重要影响，我们的模型不仅显示了不同参数的大小对任务难度的影响，而且还提供了统一的难度量化指标，可以帮助交互设计人员有效地选择参数范围。第二，我们的模型能对任务的完成时间进行预测，通过采集足量的数据获得稳定的模型参数，然后预测任务的完成时间。第三，我们的模型还进一步丰富了比较 VR 中不同交互方式操作效率的方法。尽管现在很多研究采用费

茨定律比较不同交互设备的效率(Hansen, Rajanna, MacKenzie, & Bækgaard, 2018; Qian & Teather, 2017), 但是费茨定律只能适用于选中静止目标任务, 我们的模型增加了选中运动目标任务的评估方法, 使得不同交互方式的对比更加全面。

**意见 4:** 在研究方法中, 作者选择目标运动速度以及初始距离等参数的依据是什么?

**回应:** 感谢审稿专家的意见。我们在正式实验前进行了一项预实验, 根据预实验的结果设置了目标移动速度、初始距离和目标容差的范围, 详情请查看“回应 1-3”和“回应 1-4”, 我们在正文的“2.3 实验刺激和设计”章节也进行了相应的描述(行 158 - 行 180)。

**意见 5:** 实验设计为何要分两天进行? 8 个组块的练习是否是足够的, 被试间是否存在练习熟悉程度上的差异。学习能力是否会影响其结果。实验中, 被试可以在试次间随时休息, 那么不同被试休息的次数是否不同, 脖子的疲劳状态是否会对结果产生影响(即头部转动的速度)? 希望可以提供被试视野角度的示意图。

**回应:** 感谢审稿专家的宝贵意见。第一, 本研究分两天进行是为了避免长时间使用 VR 头盔导致的视觉疲劳、脖子疲劳以及眩晕。本实验一共包含 23 个组块, 每个组块包含所有的 48 种实验条件组合。完成所有的 23 个组块需要大约 1.5-2 小时, 但是相关研究建议 VR 的连续使用时间小于 1 小时(Smith & Burd, 2019), 因此本实验分两天进行。第一天为练习, 了解实验要求和完成 8 个组块, 第二天为正式实验, 完成剩下的 15 个组块, 练习和正式测试的总时间分别约 1 小时。我们允许被试在试次间隙随时休息, 是因为不同人对虚拟现实引起的眩晕敏感性不同, 为了确保数据不受眩晕的影响, 因此我们在测试的过程中允许被试休息。虽然我们没有记录每位被试在试次间的休息次数, 但是据我们的观察, 由于每个组块包含的试次数量不是很多, 不容易引起眩晕, 基本没有被试选择在试次间隙休息。我们在正文中的“2.3 实验刺激和设计”章节补充了这部分内容 (行 186 - 行 192)。

第二, 我们没有记录 8 个练习组块的数据, 但是我们分析了 15 个正式测试组块的平均时间。结果显示, 虽然组块顺序的主效应显著( $F(3.10, 49.59) = 6.12, p = 0.001, \eta_p^2 = 0.28$ , Greenhouse-Geisser 矫正), 但是随着测试数量的增加, 操作时间即没有逐渐减少, 也没有逐渐增加。我们进一步对组块顺序进行 Bonferroni 事后检验, 发现只有组块 1 的完成时间( $984\text{ms} \pm 161\text{ms}$ )显著高于组块 12( $857\text{ms} \pm 121\text{ms}, p = 0.005$ )和组块 13( $842\text{ms} \pm 101\text{ms}, p = 0.030$ ), 其他组块之间的平均完成时间差异不显著(图 6)。该结果说明正式测试不存在练习效应, 被试在第一天通过 8 个练习组块已经熟练地掌握了任务的操作过程, 因此 8 个组块的练习是足

够的。该结果还说明 15 个组块没有造成被试显著的疲劳效应，操作时间没有受到疲劳的影响。我们在正文中的“2.5 数据分析”章节添加了这部分数据分析和结果。

第三，被试视野角度的示意图如图 7 所示。我们在一个虚拟的空间中竖直放置了一块 2000m × 2000m 的灰色平面作为背景，在平面前方呈现了一个黄色小球作为光标和一个白色半透明小球作为目标。光标和目标分别随机出现在被试正前方 3m 的左(右)侧和右(左)侧区域，高度为被试的眼高。由于我们采用的 VR 头盔的斜对角最大视角(FOV)只有 110°，因此当被试看向光标和目标时，只能看到如图 7 所示的场景。

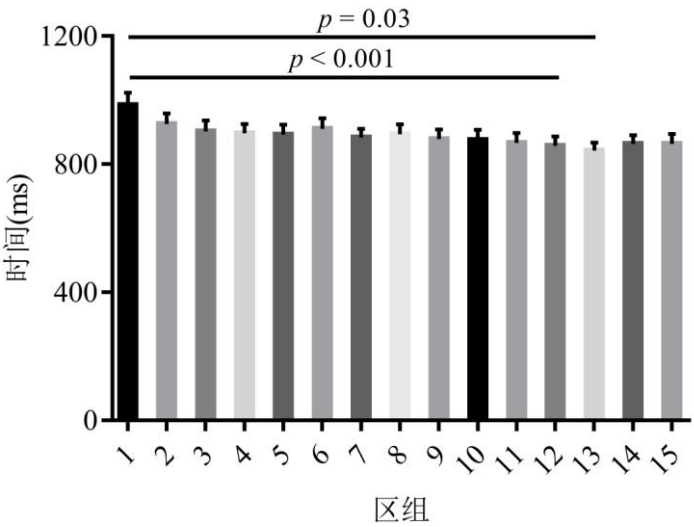


图 6 正式测试的 15 个区组平均时间

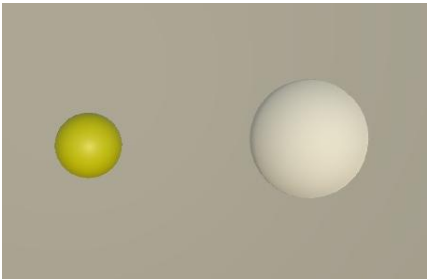


图 7 被试视野角度的刺激和场景图

意见 6：作者删除数据的标准，大于 2.5s 或者小于 0.3s 是如何确定的？

回应：感谢审稿专家的问题。在本研究中，大于 2500ms 或者小于 300ms 的删除数据标准是根据经验选取的。根据测试经验，在正常操作情况下，完成任务的总时间在 300ms 至 2500ms 之间。在本研究中，最难的任务(远离运动，初始距离 = 40°，目标速度 = 2m/s，

目标容差 = 4°的操作总时间为  $1212\text{ms} \pm 176\text{ms}$ ，最简单的任务(靠近运动， $A = 20^\circ$ ；目标速度 = 1.5m/s)的操作总时间为  $559\text{ms} \pm 108\text{ms}$ 。完成时间大于 2500ms 可能是由于程序卡顿导致，而完成时间小于 300ms 可能是被试误操作比如双击按键导致，因此我们将总完成时间大于 2500ms 和小于 300ms 的试次剔除，共计删除 25 个试次，只占总试次的 0.20%。本部分内容已经在正文的“2.5 数据分析”章节进行了添加(行 205 - 行 210)。

**意见 7：**作者对于目标移动速度对远离运动和靠近运动的不同影响的讨论不够清晰。对于靠近运动，本研究的结果与前人研究的结果相反的原因是什么？如果两者的实验任务完全不同，那结果根本不具备比较的条件。即使在本研究中，调整阶段的时间增加是否也与目标容差存在关系(除了移动速度)？

**回应：**非常感谢审稿专家的宝贵意见。首先，在上一版文稿中，目标移动速度对远离运动和靠近运动的不同影响的讨论确实不够清晰，我们将该讨论在正文的“4 讨论”章节(行 429 - 行 438)进行了重新梳理，内容如下：加速阶段和减速阶段过程是将光标从起点快速移动到目标附近，与实际移动距离相关，由于在靠近运动中目标朝向光标运动，导致光标实际移动距离变短，相反，远离运动中光标实际移动距离增加，因此靠近运动的加速时间和减速时间更短。由于目标速度的增加进一步缩短了靠近运动的实际距离和增大了远离运动中的实际距离，导致目标速度对远离运动和靠近运动的加速时间造成了相反的影响，两者的加速和减速时间差异逐渐增大。远离与靠近运动的调整时间非常接近，并且由于目标速度的增大增加了光标对准目标的难度，导致两者的调整时间都增加了。因此随着目标速度的增大，远离运动的总操作时间逐渐增加，但是在靠近运动中，由于加速阶段与减速阶段减少的时间大于调整阶段增加的时间，导致靠近运动的总体时间降低。

其次，二维平面的研究结果显示靠近运动的操作时间随着目标速度的增大而增加(Hajri et al., 2011; Jagacinski, Repperger, Ward, & Moran, 1980)，与我们的结果不同，原因可能存在两个方面。第一，正如审稿专家所言，我们采用的任务与他们的任务存在部分差异，可能导致了结果不同。在 Hajri 等人(2011)的研究中，他们在电脑屏幕上让被试使用鼠标完成捕捉运动的精灵任务，精灵由一个白色的圆环表示，在水平方向上移动。由于二维电脑屏幕的移动范围非常有限，目标移动到屏幕边缘后将反弹，因此远离运动和靠近运动不能完全分开，他们的结果不能完全反映远离运动与靠近运动的差异。相反，本研究采用的三维空间的移动范围无限大，远离运动与靠近运动完全独立。另一方面，操作方式不同也可能导致不同的结果。以往研究主要采用鼠标或者摇杆等操作方式完成任务，然而选中静止目标的结果显示，

转头操作的表现与摇杆和鼠标操作存在差异(Jagacinski & Monk, 1985; Jalaliniya, Mardanbeigi, Pederson, & Hansen, 2014; Lin, Radwin, & Vanderheiden, 1992)。因此, 这两方面的差异可能导致了我们与他们的研究结果的不同。这部分内容我们也在正文的“4 讨论”章节(行 439 – 行 448)进行了添加。

最后, 在本研究中, 目标容差对远离和靠近运动的调整时间造成了一致的影响, 从正文中图 6c 的中图可以看出, 随着目标容差的减小, 远离和靠近运动的调整时间快速增加, 因为光标对准目标的难度增大了。

**意见 8:** 作者在讨论公式 3 和公式 4 时, 没有对公式参数进行解释, 也没有对公式的应用背景进行解释, 又如何与本研究的结果进行比较呢?

**回应:** 感谢审稿人提出的重要意见。非常抱歉在上一版本的文稿中遗漏了对公式 3 和公式 4 的重要信息介绍, 我们已经添加了两个公式产生的研究任务背景和参数解释, 相关修改请见正文的“4 讨论”章节(行 467 – 行 482)。此外, 上一版文稿中的公式 3 和公式 4 分别对应修改版文稿中的公式 2 和公式 3, 具体内容如下:

Jagacinski 等人让参与者在二维电脑屏幕上使用摇杆采用位置映射法控制一条竖直的直线放入逐渐靠近的由两条竖直直线组成的目标内, 他们改变了初始距离(2.75°, 4.81°, 8.42°), 目标宽度(0.3°, 0.53°, 0.92°)和目标速度(0 %s, 1.77 %s, 3.14 %s), 他们发现费茨定律不能很好解释选中运动目标的操作时间, 然后提出了公式 2 对靠近运动的操作时间进行拟合(Jagacinski et al., 1980), 公式如下:

$$MT = c + dA + e(V + 1)(1/W - 1) \quad (2)$$

其中 c、d 和 e 是拟合常数, MT 是总完成时间, A、V 和 W 分别是初始距离、目标速度和目标宽度, 新模型对数据的拟合结果  $R^2$  达到了 0.98。后来 Hoffmann 在 Welford 等人(1969)提出的两部分模型( $MT = a + b \log_2(A) - c \log_2(W/2)$ )基础上进行修改, 提出了新的解释选中运动目标操作时间的公式 3(Hoffmann, 1991), 如下:

$$MT = a + b \log_2[A + V/K] - c \log_2[W/2 - V/K] \quad (3)$$

其中 a、b、c 和 K 是拟合常数, 他们认为 $\log_2[A + V/K]$ 主要反映了移动距离覆盖阶段, 即加速和减速阶段, 而 $\log_2[W/2 - V/K]$ 则反映了调整阶段, 新模型能够很好地解释 Jagacinski 等人的位置映射数据( $R^2 = 0.97$ )。然而, 由于这些模型只适合靠近运动, 并且都是建立在二维屏幕基于手操作的任务上, 因此不能同时很好地解释本研究的靠近运动(公式 2:  $R^2 =$

0.449; 公式 3:  $R^2 = 0.628$ )和远离运动(公式 2:  $R^2 = 0.900$ ; 公式 3:  $R^2 = 0.610$ )的数据。

**意见 9:** 作者根据 Deng 等人(2019)对静止目标选中研究的方法, 把选中运动目标的操作过程也分为加速阶段, 减速阶段, 以及调整阶段是否合适? 选中运动目标的过程中是否会存在几个阶段的循环出现的情况?

**回应:** 非常感谢审稿专家的重要意见。针对第一个问题, 我们认为根据选中静止目标的移动过程划分方法将选中运动目标的操作过程也分为加速阶段、减速阶段以及调整阶段是合理的, 原因有两点。第一, 选中运动目标与选中静止目标的光标速度轨迹非常相似, 都存在速度快速上升、快速下降和微小波动阶段。第二, 本研究的结果显示远离运动和靠近运动在每个阶段的影响因素都不同。初始距离主要影响靠近运动的加速和减速阶段, 但是对远离运动的整个过程都有重要影响, 目标速度影响远离和靠近运动整个过程, 然而目标容差只显著影响调整阶段, 并且对远离和靠近运动的影响相同, 该结果与选中静止目标的分段结果一致(Chen et al., 2015; Deng et al., 2019)。综上所述, 本研究将选中运动目标移动过程划分成三个阶段是合理的。

针对第二个问题, 光标移动过程是由多个子运动组成, 依据本研究的划分方法, 当减速阶段结束时, 光标已经非常接近目标了(三个阶段的详细含义请查看“回应 1-2”), 此后再出现速度很大的子运动的概率很小, 因为快速移动光标不利于快速对准目标, 因此再循环出现加速、减速和调整阶段的可能性很小。

.....

**审稿人 3 意见:**

这篇研究聚焦 VR 环境中转头运动分别选中远离和靠近运动目标的操作过程, 分析在不同的初始目标距离、不同的小球运动速度和目标容差度下错误率、最大速度、总操作时间的变化规律, 并将光标移动分成加速、减速和调整三个阶段, 进一步探索两类运动操作特征差异, 最后提出模型拟合了两类运动在操作总时长上的数据。文章研究问题明确清晰, 有一定的理论创新性和应用价值。下面提出一些问题, 希望可以辅助研究者更好的完善。

**意见 1:** 中文摘要似乎太简略了, 缺少了很多关键信息, 和英文摘要不匹配, 如被试、任务简单介绍、三个阶段是指什么, 三因素是哪三因素等。

**回应:** 非常感谢审稿专家的重要意见。非常抱歉上一版的摘要缺失了很多关键信息, 现已对



中英文摘要进行了重新编辑，添加了被试、任务、三个阶段和三因素描述，请审稿专家再次审阅。

**意见 2：**为什么研究头动控制，在自然的高效的人机交互过程中，不同的控制方式可能更有其优劣，最好能够取长补短整合匹配运用，那么头动控制的优势是什么，更适用于哪些交互场景？

**回应：**非常感谢审稿专家的宝贵意见。本研究选择转头的交互方式是因为转头交互是虚拟现实(VR)环境中常见的交互方式之一，因具有易获得性和诸多应用场景等优点得到了广泛关注和使用。首先，通过头盔自带的惯性测量单元非常容易获得头在三维空间中的转动信息 (Atienza, Blonna, Saldaña, Casimiro, & Fuentes, 2016; Blattgerste, Renner, & Pfeiffer, 2018; Hansen et al., 2018)。其次，转头交互是很多不提供交互手柄的便携式 VR 和 AR 头盔的主要交互方式，比如 Samsung Gear VR, Google Cardboard, Microsoft HoloLens 等(Blattgerste et al., 2018; Pathmanathan et al., 2020)。然后，头控交互还可以在双手被占用时提供额外的交互方式，比如在手术训练中使用头控与显示屏交互(Hatscher et al., 2017)。因此了解转头交互的操作特性，对 VR 的交互设计有重要的意义。我们对头控的重要性和应用场合在“1 引言”章节进行了补充(行 69 – 行 72)。

**意见 3：**远离运动和靠近运动似乎不是在描述操控任务的实质，采用不同的策略或不同的阶段，例如靠近运动中初始是相遇运动，随后可能会变成追击运动，相似的远离运动也可能存在追击或相遇。追击还是相遇，有不同的操控特征，为何不将相遇运动和追击运动作为分析研究的核心呢？

**回应：**非常感谢审稿专家的宝贵意见。在本研究中，远离运动与追击运动以及靠近运动与拦截运动(相遇运动)基本是等价的，理由有如下几点。首先，我们在设置参数范围时，特别是初始距离和目标速度，考虑了被试在选中靠近运动目标时能够大概率成功拦截目标。其次，我们计算了靠近运动中出现追击和远离运动中出现拦截的试次占总试次的比例，我们对光标的移动过程进行了分析。在远离运动中，光标首先追击目标，如果光标超过目标边缘 2 倍光标大小的距离(约 0.43m)，则认为存在拦截。在靠近运动中，光标首先迎向并拦截目标，如果拦截失败，光标开始反方向回追光标，如果回追的距离超过 2 倍光标的大小，则认为存在追击。结果显示，在远离运动中，只有  $0.96\% \pm 3.67\%$  的试次发生了拦截运动。虽然拦截的比例随着目标速度的增大而缓慢增加，但是统计结果没有达到显著，并且

拦截比例的最大值也只有  $3.529\% \pm 12.93\%$ (目标速度 = 2m/s, 初始距离 = 20°, 目标容差 = 4°), 说明在远离运动中主要是追击运动(图 8a)。对于靠近运动, 出现追击的比例仍然不高, 只有  $10.98\% \pm 16.82\%$ 。追击比例随着目标容差的减小而增加( $F(1.08, 17.29) = 7.06, p = 0.015, \eta_p^2 = 0.31$ )。当目标速度低于 1m/s 时, 追击的比例非常低, 目标速度超过 1m/s 后, 追击比例随着目标速度的增大而快速增加( $F(1.08, 17.28) = 7.93, p = 0.011, \eta_p^2 = 0.33$ ), 但是最大值仍然没有超过 50%。并且即使出现了追击, 被试仍然是先选择拦截, 拦截失败之后才出现追击, 因此, 在本研究设置的参数范围内, 选中靠近运动目标的过程主要还是拦截运动(图 8b 和 8c)。

综上所述, 本研究中的分析远离运动和靠近运动的操作特性主要分别代表了追击和拦截两种操作特性。但是由于目标做远离运动和靠近运动是直观的任务形态, 因此用远离和靠近运动表达更直观。

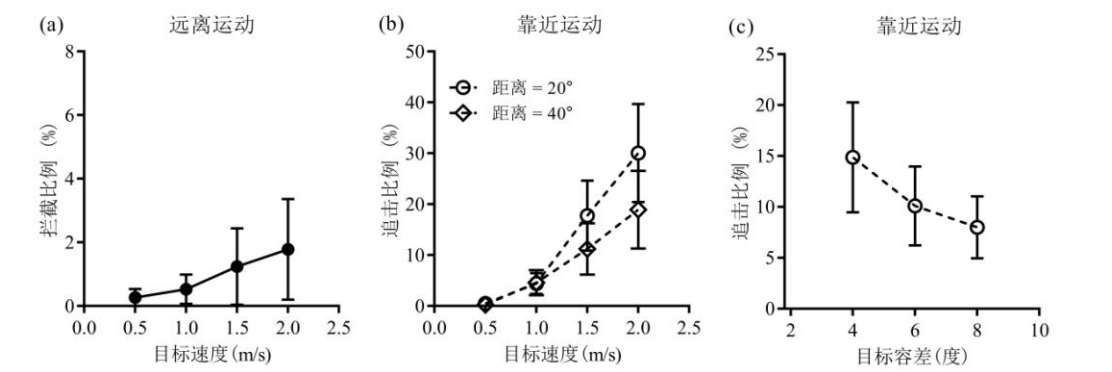


图 8 远离运动的拦截比例和靠近运动的追击比例

意见 4: 目标容差这个核心自变量希望能在前言中更清晰的分析引出;

回应:感谢审稿人的宝贵意见。目标容差的概念已经在引言部分进行了添加(行 117 – 行 119)。目标容差指的是目标与光标的大小差异, 本研究采用的光标和目标都是球体, 因此目标容差即为两者的直径差值, 目标大小就等于光标大小与目标容差大小的总和。目标大小与目标容差大小对操作表现的影响差异请查看“回应 1-3”。

意见 5: 前言中不需要写结果和结论;

回应: 非常感谢审稿专家, 已经删除前言中的结果和结论。

**意见 6:** 目标运动方向在空间里是水平还是纵深,可能结果会不同,这个研究中的空间运动方向是怎样的?

**回应:** 感谢审稿人提出的宝贵意见。本研究只考虑了目标在水平方向上的移动,没有验证在垂直方向和纵深方向上的结果。我们选择水平方向的原因是二维平面关于运动目标的研究和选中静止目标的研究也主要采用水平移动方向,我们的研究结果可以与这些研究的结果进行对比。当目标在不同维度上移动时,比如垂直方向和纵深方向,头的转动方向不同,研究显示头朝不同方向转动的操作表现存在差异(Jagacinski & Monk, 1985; Radwin, Vanderheiden, & Lin, 1990),因此不同的目标运动维度可能导致不同的结果。不同运动维度之间的结果差异可以作为将来的工作,进一步完善远离运动与靠近运动之间的操作特性对比。

**意见 7:** 图 2 靠近运动的三阶段是如何划分的? 图中没有呈现;

**回应:** 非常感谢审稿专家提出的重要问题。靠近运动的三阶段划分方法与远离运动的三阶段划分方法一致,已在正文中补上(图 9)。加速阶段与减速阶段的分界点为光标移动的最大速度对应位置,减速阶段与调整阶段的分界点为第一个满足下面三个标准中的任意一个的点,且速度小于目标速度与光标最大速度的中点值(远离运动)或者速度小于光标最大速度的一半(靠近运动)(图 9):

- (1) 远离运动: 光标速度从大于目标移动速度变为小于目标移动速度的第一个点; 靠近运动: 光标移动速度的正负方向改变的第一个点。
- (2) 光标的加速度值从负数变为正数的第一个点,即光标速度从减速变为加速的点,且光标速度小于目标速度与光标最大速度的中点值(远离运动)或者小于光标最大速度的一半(靠近运动)。
- (3) 光标的加速度一直为负值,但其绝对值小于加速度最大值 0.1 倍的点。

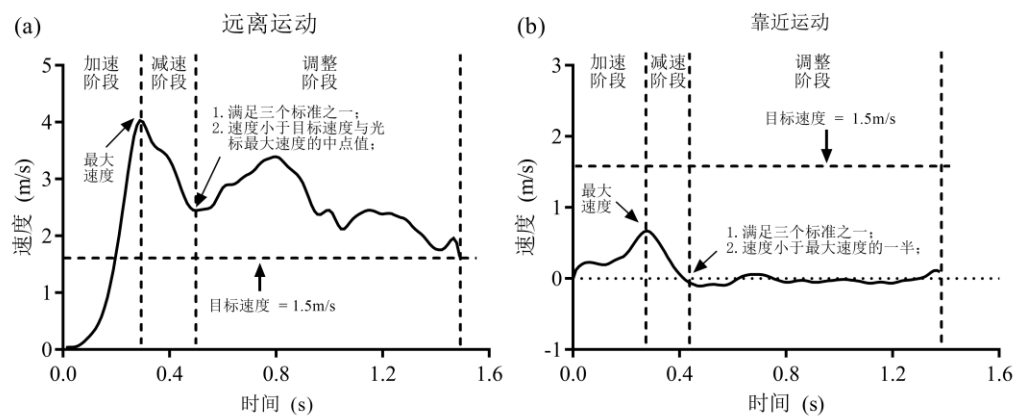


图 9 一位被试选中远离运动目标(a)和靠近运动目标(b)过程的光标速度轨迹和三个阶段的划分样例

**意见 8:** 实验中，被试完成远离运动时是否都是在追击小球，完成靠近运动时是否都在和小球相遇运动？如果不是，什么情况下会引起相遇和追击的转变？

**回应:** 非常感谢审稿专家提出的宝贵意见。我们对远离运动和靠近运动中是否存在拦截和追击进行了分析，具体分析方法和结果请查看正文中的“2.5 数据分析”和“3.5 拦截和追击”章节。我们的结果显示，被试在完成远离运动时基本都是在追击小球，只有  $0.96\% \pm 3.67\%$  的试次出现了拦截，但是我们发现随着目标速度的增大，拦截的概率在缓慢增加(统计结果不显著)，我们猜测当目标速度进一步增大时，可能会出现更高概率的拦截情况。然而，被试在完成靠近运动时在部分条件下出现了从拦截到追击的转变，目标速度越快和目标容差越小越容易导致拦截失败，出现追击的情形，相关描述请查看“回应 3-3”。

**意见 9:** 将运动的过程进一步分为加速阶段、减速阶段和调整阶段是很好的切入视角，但是是否可以再用百分比来表征三个阶段，从不同视角发现远离运动与靠近运动在追击和相遇中的不同特征差异？

**回应:** 非常感谢审稿专家提出新的分析视角。我们对三阶段操作时间占总时间的比例进行了分析(图 10)，分析结果请查看正文的“3.4 光标移动过程的三阶段操作时间比例”章节(行 333 - 行 353)。与三阶段的绝对时间相比，三阶段时间占比呈现出如下几个不同的结果：

- (1) 在加速阶段，远离运动和靠近运动的加速时间占比都随着初始距离的增大而降低，但是靠近运动的加速时间却是随着初始距离的增大而增加。
- (2) 在加速阶段，目标速度对远离运动和靠近运动的加速时间造成了相反的影响，但是两者的加速时间比例却基本不受目标速度的影响。
- (3) 在调整阶段，靠近运动的调整时间受目标速度的影响比远离运动小，但是两者的调整时间比例随着目标速度的变化却基本一致。

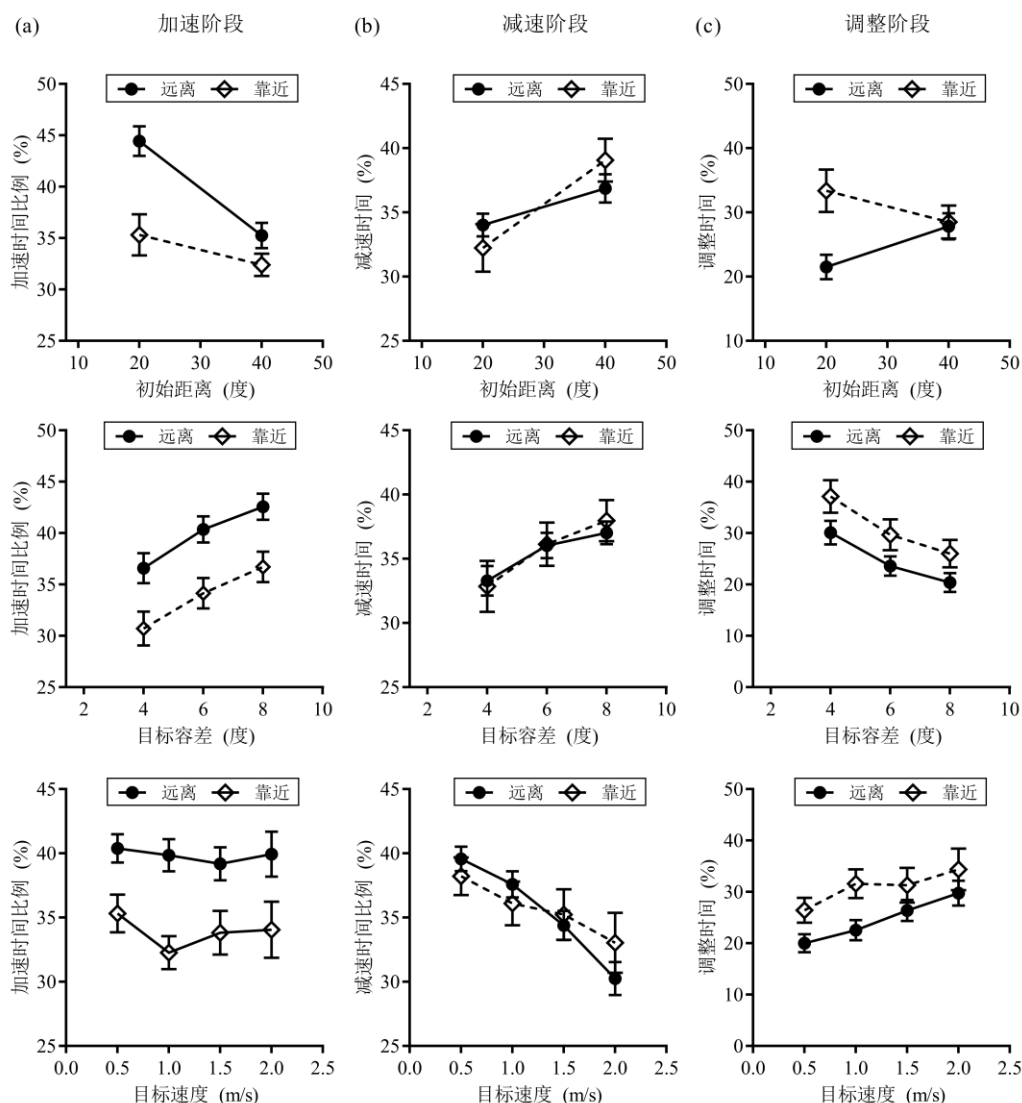


图 10 光标移动过程的三阶段操作时间占总时间的比例结果

意见 10：致谢部分补充完整(编辑注：在审稿阶段暂不需要补充致谢部分)。

回应：非常感谢审稿专家。由于致谢部分有人名和基金号，根据规则，在审稿阶段暂不能提供作者相关信息。如果本研究有幸被录取，我们将补充完整的致谢。

## 参考文献

- Atienza, R. O., Blonna, R. A., Saldares, M. I. S., Casimiro, J., & Fuentes, V. C. (2016). *Interaction techniques using head gaze for virtual reality*. Paper presented at the 2016 IEEE Region 10 Symposium (TENSYP), Bali, Indonesia.  
<https://doi.org/10.1109/TENCONSpring.2016.7519387>.
- Blattgerste, J., Renner, P., & Pfeiffer, T. (2018). *Advantages of eye-gaze over head-gaze-based selection in virtual and augmented reality under varying field of views*. Paper presented at the

- Workshop on Communication by Gaze Interaction, Warsaw, Poland.  
<https://doi.org/10.1145/3206343.3206349>.
- Chen, Y., Hoffmann, E. R., & Goonetilleke, R. S. (2015). Structure of hand/mouse movements. *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, 45(6), 790-798.
- Claypool, M., Cockburn, A., & Gutwin, C. (2019). *Game input with delay: moving target selection parameters*. Paper presented at the 10th ACM Multimedia Systems Conference, Amherst, Massachusetts. <https://doi.org/10.1145/3304109.3306232>
- Deng, C. L., Geng, P., Hu, Y. F., & Kuai, S. G. (2019). Beyond Fitts's Law: A Three-Phase Model Predicts Movement Time to Position an Object in an Immersive 3D Virtual Environment. *Human factors*, 61(6), 879-894. <https://doi.org/10.1177/0018720819831517>.
- Elliott, D., Helsen, W. F., & Chua, R. (2001). A century later: Woodworth's (1899) two-component model of goal-directed aiming. *Psychological bulletin*, 127(3), 342.
- Gunn, T. J., Irani, P., & Anderson, J. (2009). *An evaluation of techniques for selecting moving targets*. Paper presented at the CHI'09 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems, Boston, MA, USA. <https://doi.org/10.1145/1520340.1520481>
- Hajri, A. A., Fels, S., Miller, G., & Ilich, M. (2011). *Moving target selection in 2D graphical user interfaces*. Paper presented at the 13th IFIP TC13 International Conference on Human-Computer Interaction, Lisbon, Portugal.  
[https://doi.org/10.1007/978-3-642-23771-3\\_12](https://doi.org/10.1007/978-3-642-23771-3_12)
- Hansen, J. P., Rajanna, V., MacKenzie, I. S., & Bækgaard, P. (2018). *A Fitts' law study of click and dwell interaction by gaze, head and mouse with a head-mounted display*. Paper presented at the Proceedings of the Workshop on Communication by Gaze Interaction, Warsaw, Poland.  
<https://doi.org/10.1145/3206343.3206344>.
- Hasan, K., Grossman, T., & Irani, P. (2011). *Comet and target ghost: techniques for selecting moving targets*. Paper presented at the Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, Vancouver, BC, Canada. <https://doi.org/10.1145/1978942.1979065>
- Hatscher, B., Luz, M., Nacke, L. E., Elkmann, N., Müller, V., & Hansen, C. (2017). *GazeTap: towards hands-free interaction in the operating room*. Paper presented at the Proceedings of the 19th ACM international conference on multimodal interaction.
- Hoffmann, E. R. (1991). Capture of moving targets: A modification of Fitts' law. *Ergonomics*, 34(2), 211-220.
- Hoffmann, E. R., Chan, A. H., & Heung, P. (2017). Head Rotation Movement Times. *Human factors*, 59(6), 986-994.
- Huang, J., Tian, F., Fan, X., Zhang, X., & Zhai, S. (2018). *Understanding the uncertainty in 1D unidirectional moving target selection*. Paper presented at the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, Montreal, Canada.  
<https://doi.org/10.1145/3173574.3173811>
- Huang, J., Tian, F., Li, N., & Fan, X. (2019). *Modeling the Uncertainty in 2D Moving Target Selection*. Paper presented at the 32nd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, <https://doi.org/10.1145/3332165.3347880>.
- Ilich, M. V. (2009). *Moving target selection in interactive video*. (Unpublished master's thesis), University of British Columbia. Retrieved from <http://hdl.handle.net/2429/17444>
- Jagacinski, R. J., & Monk, D. L. (1985). Fitts' Law in Two dimensions with hand and head movements. *Journal of motor behavior*, 17(1), 77-95.

- Jagacinski, R. J., Repperger, D. W., Ward, S. L., & Moran, M. S. (1980). A test of Fitts' law with moving targets. *Human factors*, 22(2), 225-233.
- Jalaliniya, S., Mardanbeigi, D., Pederson, T., & Hansen, D. W. (2014). *Head and eye movement as pointing modalities for eyewear computers*. Paper presented at the 2014 11th International Conference on Wearable and Implantable Body Sensor Networks Workshops, Zurich, Switzerland. <https://doi.org/10.1109/BSN.Workshops.2014.14>.
- Kopper, R., Bowman, D. A., Silva, M. G., & McMahan, R. P. (2010). A human motor behavior model for distal pointing tasks. *International journal of human-computer studies*, 68(10), 603-615.
- Lin, M. L., Radwin, R. G., & Vanderheiden, G. C. (1992). Gain effects on performance using a head-controlled computer input device. *Ergonomics*, 35(2), 159-175.
- Liu, L., van Liere, R., Nieuwenhuizen, C., & Martens, J.-B. (2009). *Comparing aimed movements in the real world and in virtual reality*. Paper presented at the 2009 IEEE Virtual Reality Conference, Lafayette, LA, USA.
- MacKenzie, I. S., & Teather, R. J. (2012). *FittsTilt: the application of Fitts' law to tilt-based interaction*. Paper presented at the 7th Nordic Conference on Human-Computer Interaction: Making Sense Through Design, Denver, Colorado, USA. <https://doi.org/10.1145/3027063.3053213>
- Meyer, D. E., Abrams, R. A., Kornblum, S., Wright, C. E., & Keith Smith, J. (1988). Optimality in human motor performance: ideal control of rapid aimed movements. *Psychological review*, 95(3), 340.
- Meyer, D. E., Keith-Smith, J., Kornblum, S., Abrams, R. A., & Wright, C. E. (1990). Speed-accuracy tradeoffs in aimed movements: Toward a theory of rapid voluntary action.
- Mould, D., & Gutwin, C. (2004). *The effects of feedback on targeting with multiple moving targets*. Paper presented at the 2004 Graphics Interface Conference, London, Ontario, Canada.
- Ortega, M. (2013). *Hook: Heuristics for selecting 3D moving objects in dense target environments*. Paper presented at the 2013 IEEE Symposium on 3D User Interfaces (3DUI), Orlando, FL, USA. <https://doi.org/10.1109/3DUI.2013.6550208>
- Pastel, R. (2011). Positioning graphical objects on computer screens: A three-phase model. *Human factors*, 53(1), 22-37.
- Pathmanathan, N., Becher, M., Rodrigues, N., Reina, G., Ertl, T., Weiskopf, D., & Sedlmair, M. (2020). *Eye vs. Head: Comparing Gaze Methods for Interaction in Augmented Reality*. Paper presented at the ACM Symposium on Eye Tracking Research and Applications, Stuttgart, Germany. <https://doi.org/10.1145/3379156.3391829>.
- Qian, Y. Y., & Teather, R. J. (2017). *The eyes don't have it: an empirical comparison of head-based and eye-based selection in virtual reality*. Paper presented at the 5th Symposium on Spatial User Interaction, Brighton, United Kingdom. <https://doi.org/10.1145/3131277.3132182>.
- Radwin, R. G., Vanderheiden, G. C., & Lin, M.-L. (1990). A method for evaluating head-controlled computer input devices using Fitts' law. *Human factors*, 32(4), 423-438.
- Ragan, E. D., Pachuiro, A., Goodall, J. R., & Bacim, F. (2020). *Preserving Contextual Awareness during Selection of Moving Targets in Animated Stream Visualizations*. Paper presented at the International Conference on Advanced Visual Interfaces, Salerno, Italy. <https://doi.org/10.1145/3399715.3399832>
- Smith, S. P., & Burd, E. L. (2019). Response activation and inhibition after exposure to virtual reality. *Array*, 3-4, 100010. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.array.2019.100010>
- Woodworth, R. S. (1899). Accuracy of voluntary movement. *The Psychological Review: Monograph*

---

## 第二轮

### 审稿人 2 意见

**意见 1:** 在汇报每一部分结果之前，建议先阐明分析目的和分析方法，然后响应的介绍分析结果。而在在汇报结果的时候，应该先汇报分析方法，再汇报主效应以及交互效应。目前的结果部分缺乏逻辑且结果不完整。

**回应:** 非常感谢审稿专家的宝贵意见。根据审稿专家提出的问题，我们仔细检查了结果部分，并进行了重新梳理和完善。首先，我们重新梳理了引言部分，提出了过往研究存在的重要问题 and 研究推测，详情请见后面的“回应 1-3”。其次，我们在每项结果，特别是总时间和三阶段时间结果，的前面增加了分析目的和分析方法，并写明了主效应和交互效应情况，然后响应的对结果进行描述和解释。本研究的分析方法主要采用被试内重复测量方差分析法，并使用 Greenhouse-Geisser 方法对不满足球形假设检验的结果进行校正，我们在“2.5 数据分析”章节也进行了描述(p46, 行 282 - 行 292)。由于结果部分内容较多，放在这里会占用较多的篇幅，我们选择“3.2 完成任务的总时间”结果作为样例供审稿专家查看，其他结果请审稿专家审阅“3 实验结果”章节(p47 - p55)，总时间结果如下：

“对正确试次的总完成时间进行四因素重复测量方差分析，探索三个因素如何影响选中运动目标的操作时间以及远离与靠近运动的差异。结果如图 4 所示，目标运动方向的主效应显著( $F(1, 16) = 99.64, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.86$ )，远离运动的平均总完成时间( $986\text{ms} \pm 29\text{ms}$ )高于靠近运动的完成时间( $784\text{ms} \pm 30\text{ms}$ )，说明选中远离运动目标的难度更大，证明了我们的推测 3。初始距离( $F(1, 16) = 221.85, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.93$ )和目标容差( $F(1.04, 16.61) = 69.94, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.81$ )的主效应显著，该两个因素对远离和靠近运动造成了相似的影响，两类运动的完成时间都随着初始距离的增大而增加，随着目标容差的增大而减少，表明增大初始距离和减小目标容差都会增加选中运动目标的难度。但是目标运动方向与初始距离存在显著的交互效应( $F(1, 16) = 8.59, p = 0.01, \eta_p^2 = 0.35$ )，靠近运动的时间增长速度稍快于远离运动，说明初始距离对靠近运动的影响更大。目标运动方向与目标容差的交互效应不显著( $F(1.13, 18.07) = 1.60, p = 0.225$ )，说明目标容差对远离和靠近运



动的影响一致。目标速度对远离运动和靠近运动造成了相反的影响，目标速度与目标运动方向存在显著的交互效应( $F(1.44, 22.96) = 60.74, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.79$ )。对远离和靠近运动单独进行方差分析发现，随着目标速度的增大，远离运动的操作时间快速增加( $F(1.38, 22.11) = 48.49, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.75$ )，支持了以前的研究结果，相反，靠近运动的操作时间快速下降( $F(1.16, 18.59) = 12.43, p = 0.002, \eta_p^2 = 0.44$ )，与以往的研究结果不同。该结果说明目标速度的增大增加了选中远离运动目标的难度，降低了选中靠近运动目标的难度。但是当目标的速度降低到 0.5m/s 时，两类运动的完成时间没有显著差异( $p = 0.996$ )，表明当目标移动速度很慢时，选中运动目标的难度不再受目标运动方向的影响。此外，目标运动方向、目标速度和初始距离还存在显著的三因素交互效应( $F(1.86, 29.82) = 4.03, p = 0.031, \eta_p^2 = 0.20$ )，独立分析两类运动发现，靠近运动中初始距离与目标速度的交互效应显著( $F(1.79, 28.57) = 3.72, p = 0.041, \eta_p^2 = 0.19$ )，当初始距离为 20 时，靠近运动的操作时间表现出了微弱的 U 型曲线，目标速度从 0.5m/s 增加到 1.5m/s 再增加到 2m/s，操作时间先快速下降后缓慢上升，证明了我们的推测 1。然而，我们没有发现 U 型曲线的拐点速度受到目标容差的影响，目标容差与目标速度不存在显著的交互效应( $F(3.07, 49.13) = 0.70, p = 0.563$ )，否定了我们的推测 2。除此之外，不存在其他显著的交互效应。”

**意见 2：**另外，作者只汇报了正确试次的的数据，如果错误试次的数量足够的话，尤其是错误率比较高的条件，建议分析比较一下错误试次和正确试次之间的操作特性差异，其结果对后续的建模可能有更好的指导意义。

**回应：**非常感谢审稿专家的宝贵意见。本研究分析远离运动和靠近运动的操作特性时只采用了正确试次的的数据，一方面是因为被试完成任务的平均错误率很低，远离运动和靠近运动的错误率分别只有  $7.61\% \pm 3.38\%$  和  $5.96\% \pm 3.26\%$ ；另一方面是参考了其他类似的研究也只采用正确试次的的数据进行分析(Deng, Geng, Hu, & Kuai, 2019; Hoffmann, Chan, & Heung, 2017)。但是在本研究中，我们也发现错误率主要受到目标容差和目标速度的影响，目标容差越小，目标速度越快，错误率越高。因此我们选取错误率最大的情况(目标容差 = 4°，目标移动速度 = 2m/s，初始距离包含 20°和 40°，平均错误率超过 10%)，比较正确试次与错误试次的总操作时间是否存在差异。由于不是所有被试都出现了错误试次，因此我们排除全部正确完成任务的被试，共计 4 名被试，用剩下的 13 名被试的数据进行 2(试次类别：正

确，错误) × 2(初始距离：20°，40°)的重复测量方差分析。结果如图 1 所示，在远离和靠近运动中，错误试次与正确试次的平均操作时间都非常接近，试次类别的主效应(远离运动： $F(1, 12) = 0.27, p = 0.612$ ；靠近运动： $F(1, 12) = 0.68, p = 0.427$ )，以及试次类别与初始距离的交互效应(远离运动： $F(1, 12) = 0.36, p = 0.56$ ；靠近运动： $F(1, 12) = 0.65, p = 0.435$ )都不显著，说明错误试次与正确试次在总操作时间上没有显著差异。

在描述选中静止目标操作时间特性的建模方法中，一些研究者采用有效目标宽度( $W_e$ )代替目标实际宽度进入模型拟合。有效目标宽度根据任务结束时相同条件的所有光标的落点分布计算得出： $W_e = \sqrt{2\pi e} \sigma = 4.133\sigma$ ， $\sigma$ 表示所有落点位置的标准差，包含了任务的错误试次，研究者认为有效目标宽度更能准确反映操作过程的时间-准确率权衡(MacKenzie, 1992; Soukoreff & MacKenzie, 2004)。因此，我们也计算出每种条件的有效目标容差( $TT_e$ )，并代入我们的模型公式 4。结果显示，远离运动和靠近运动的模型拟合结果分别为  $R^2 = 0.799$  和  $R^2 = 0.858$ ，低于采用实际目标容差参数的拟合结果(远离运动： $R^2 = 0.971$ ；靠近运动： $R^2 = 0.952$ )，该结果说明有效目标宽度参数可能不适合选中运动目标任务的模型。由于本研究的错误率比较低，因此我们认为采用正确试次数据进入模型拟合能够更好地描述选中运动目标的时间特性。但是当错误率很高时，比如超过 50%，则必须要考虑错误试次，未来我们将关注如何将错误试次数据融入到模型中。我们在“4 讨论”章节也增加了本部分关于有效目标宽度的说明(p60，行 585 - 行 593)。

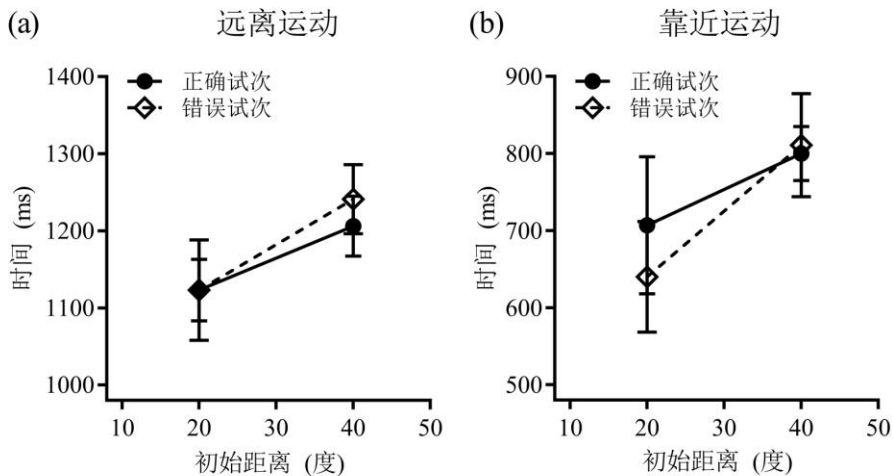


图 1 远离运动(a)和靠近运动(b)的正确试次与错误试次的总操作时间对比。选取的实验条件：目标容差 = 4°，目标移动速度 = 2m/s。

意见 3：讨论部分关于选中运动目标的函数模型部分建议放到引言中，并且增加响应的理论

探讨。目前的引言部分只是说明了该研究和前人研究的不同点是什么。尚缺乏基于理论的假设推导过程。虽然无法推导所有变量对选中运动目标操作的影响，但是前人研究中的理论和函数模型仍然可以推导部分核心结果。这样一来可以增加该研究的理论性，否则完全基于数据的解释，更像是研究报告。

**回应：**非常感谢审稿专家的宝贵意见。我们评估了讨论中关于 Jagacinski 等人(1980)和 Hoffmann(1991)提出的函数模型介绍内容，正如审稿专家所言，放置到引言中更好，因此我们将该部分内容转移到了“1 引言”章节(p40, 行 104 - 行 109)。此外，根据审稿的专家的建议，我们对引言部分进行了重新梳理，增加了理论的推导。一方面，我们写明了目标速度和目标大小对选中远离运动目标的影响(p39, 行 101 – 行 103)。另一方面，我们增加了一段新的内容，描述过往研究存在的重要问题，以及我们的理论推导和推测(p41 - p42, 行 141-行 166)。请审稿专家再次审阅“1 引言”章节。为了方便审稿专家阅读，我们将增加的段落内容摘录如下：

“至今为止，选中远离运动目标与选中靠近运动目标的操作时间差异还存在很多不清楚的地方。第一，初始距离是影响选中静止目标的重要因素，但是过往研究很少关注初始距离对选中运动目标的影响，因此初始距离是否对远离运动和靠近运动的影响存在差异还未可知。第二，虽然增大目标大小都会降低选中远离运动目标和靠近运动目标的难度，但是目标大小对两者的影响是否一致并不清楚。第三，虽然已经确定增大目标速度会增加选中远离运动目标的难度，但是目标速度如何影响选中靠近运动目标的表现还没有统一结论，原因与选中靠近运动目标的复杂过程有关。首先，选中静止目标的研究显示，完成时间由两部分组成：快速的弹射阶段和慢速调整阶段。在弹射阶段，光标从起点快速移动到目标附近，表示了对运动计划的执行，没有视觉反馈参与，主要与初始距离相关，调整阶段则是根据视觉反馈实时调整光标的位置并对准目标，同时受到目标大小和移动距离的影响(Deng et al., 2019; Elliott, Helsen, & Chua, 2001; Liu, van Liere, Nieuwenhuizen, & Martens, 2009; Meyer, Abrams, Kornblum, Wright, & Keith Smith, 1988)。虽然目前还没有研究者探讨过选中运动目标过程的弹射阶段和调整阶段，但是一些研究者认为目标大小和目标速度仍然是影响光标对准目标的主要因素，减小目标尺寸和增加目标速度都将加大对准目标的难度，增加调整时间。但是目标速度增加也使得目标在相同时间内更接近光标，导致光标实际移动的距离变短，减少弹射阶段的时间。其次，当目标速度太快，操作者来不及在目标靠近阶段完成拦截操作，之后将变成追击远离运动目标模式，也使得操作时间增加。因此，选中靠近运动目标的操作时间与目标速度之间可能不是单一的变化关系。以往研究显

示头控操作具有移动速度慢但是稳定性高的特点，头控在弹射阶段花费的时间比调整时间更长(Bates & Istance, 2003; Deng et al., 2019)。因此我们推测，目标速度的小幅度增加对弹射阶段的帮助更大，导致总操作时间下降，但是目标速度进一步增加将导致调整时间快速增加，导致总时间上升，因此操作时间将呈现先下降后上升的 U 型变化趋势(推测 1)。此外，我们还推测 U 型曲线拐点速度还受到目标大小的影响，目标越小，调整难度越高，拐点速度越小(推测 2)。第四，远离和靠近运动的操作难度差异还不清楚。由于在远离运动中，光标移动的距离更远，目标的位置离操作者也更远，因此远离运动在弹射阶段和调整阶段的难度都可能更大，我们推测，远离运动的操作时间更长(推测 3)。”

审稿人 3 意见：没有其他意见，同意发表。

回应：谢谢审稿专家的肯定。

#### 参考文献：

- Bates, R., & Istance, H. O. (2003). Why are eye mice unpopular? A detailed comparison of head and eye controlled assistive technology pointing devices. *Universal Access in the Information Society*, 2(3), 280-290. <https://doi.org/10.1007/s10209-003-0053-y>.
- Deng, C. L., Geng, P., Hu, Y. F., & Kuai, S. G. (2019). Beyond Fitts's Law: A Three-Phase Model Predicts Movement Time to Position an Object in an Immersive 3D Virtual Environment. *Human factors*, 61(6), 879-894. <https://doi.org/10.1177/0018720819831517>.
- Elliott, D., Helsen, W. F., & Chua, R. (2001). A century later: Woodworth's (1899) two-component model of goal-directed aiming. *Psychological bulletin*, 127(3), 342.
- Hoffmann, E. R., Chan, A. H., & Heung, P. (2017). Head Rotation Movement Times. *Human factors*, 59(6), 986-994.
- Liu, L., van Liere, R., Nieuwenhuizen, C., & Martens, J.-B. (2009). *Comparing aimed movements in the real world and in virtual reality*. Paper presented at the 2009 IEEE Virtual Reality Conference, Lafayette, LA, USA.
- MacKenzie, I. S. (1992). Fitts' law as a research and design tool in human-computer interaction. *Human-computer interaction*, 7(1), 91-139.
- Meyer, D. E., Abrams, R. A., Kornblum, S., Wright, C. E., & Keith Smith, J. (1988). Optimality in human motor performance: ideal control of rapid aimed movements. *Psychological review*, 95(3), 340.
- Soukoreff, R. W., & MacKenzie, I. S. (2004). Towards a standard for pointing device evaluation, perspectives on 27 years of Fitts' law research in HCI. *International journal of human-computer studies*, 61(6), 751-789.
-

### 第三轮

**审稿人 2 意见：**谢谢作者的修改，已无问题，同意发表。

**回应：**非常感谢审稿专家的肯定。

**编委意见：**审稿人已无其他修改意见，同意发表。

**主编意见：**同意接受。目前字数略多，在不影响原意的基础上，请做一些文字精简，并将正文中的批注去掉。