

## 《心理学报》审稿意见与作者回应

题目：一种齐当别思想下的量子决策模型：对囚徒困境中的分离效应的解释

作者：辛潇洋 李 瑛 毕研玲 晏碧华

---

### 第一轮

**审稿人 1 意见：**该篇论文因为涉及到量子力学理论及高等数学，比较难懂，本人对于其中的公式运用也没有完全明白，可能有疏漏。但总体上，本人感觉这是一篇高水平的理论文章，创造性地把启发式性质的齐当别决策模型与计算性量子模型结合，非常难得。仔细阅读了全文，除了修正个别错别字，对不理解或者没有说明充分的地方用批注的方式一一注明，仅供作者参考。可能的话，请对文中一些数学处理适当增加简单的解释，以方便读者理解。最后，既然作者提出了一个新模型，那为了方便记忆和表达，给新理论一个新的冠名是不是更好？例如，取名齐当别量子决策模型。

**意见 1：**建议在摘要中说明“困难”的具体内涵。

**回应：**感谢审稿专家的建议，我们已经在摘要中加入了“困难”的具体内容，并用蓝色字体标记。

**意见 2：**在 2.1 中什么是信念行为状态？B 和 A 分别代表什么？ $i$  和  $j$  是否都是自然数？定义的问题空间最后一项与第 3 项重复，似乎应为  $B_D A_C$ 。

**回应：**感谢审稿专家的意见，让我们发现文中这一部分的描述存在不足之处，我们已经根据意见在文中做出了相应的补充：

- (1) 信念行为状态  $B_i A_j$  表示决策者处于认为对方会采取  $i$  行动的信念状态(Belief state)，但其自身决定采取  $j$  行动的行为状态(Action state)中。
- (2) B 代表信念状态(Belief state)，A 代表行为状态(Action state)。
- (3) 在本研究中， $i$  和  $j$  的取值为 C 和 D（D 表示背叛，C 表示合作）。
- (4) 感谢审稿专家细致的洞察，这里确实有误，我们已将最后一项已经改正为  $B_C A_C$ 。

**意见 3：**在 2.1 中解释  $\psi_1(0) = [\sqrt{2}/2, \sqrt{2}/2, 0, 0]^T$  中的数值是怎么来的或者什么含义。

**回应：**感谢审稿专家的建议，我们已经在文中进行了补充说明，并用蓝色字体标记。

**意见 4:** 在 2.1 请注明薛定谔方程各个符号的含义。

**回应:** 感谢审稿专家的建议，我们在文中脚注 1 中对此进行了补充，并用蓝色字体标记。

**意见 5:** 在 2.1 中前后用了三个术语：四维标准量子模型、标准的四维量子模型及标准四维量子模型。他们是否完全同义？请统一用语。

**回应:** 感谢审稿专家的细致地阅读，这一部分用语确实有些混乱，我们已将其同一为四维标准量子模型。

**意见 6:** 在 2.1 中提出我个人不理解的几个问题，作者可以不回答：

1. “一是在不同的条件下，决策者接受到的条件是不同的”这句话中，前后二个“条件”同义吗？所谓“接受到”是感知还是前文所述的信念？

2. 自己的收益与“自己维度的收益”同义吗？

3. 不同条件下哈密顿矩阵假定相同的实际意义是什么？决策者不仅考虑自己维度的收益也考虑对方维度的收益，这与哈密顿矩阵界定不同条件下收益无差别有何关系？

**回应:** 感谢审稿专家对这一部分认真的阅读，我们发现这一部分确实有表达不妥之处，并在文中用蓝色笔迹做出了修改。其中：

(1)“一是在不同的条件下，决策者接受到的条件是不同的”这句话表述啰嗦且不明确，我们已在文中做出了修改。其中第一个条件是指决策条件（确定或不确定），第二个条件指决策者所参考的收益。

(2) 自己的收益与“自己维度的收益”是不同义的，由于作者的马虎，在文中将两者混用，我们已经在文中做出了修改。

(3) 不同条件下哈密顿矩阵假定相同的实际意义，是指在先前的量子模型中假定在不同决策条件下决策者所参考的收益维度都是自身的收益维度。在量子模型中，哈密顿矩阵能够反映决策者对收益矩阵的参考或理解，由于不同决策条件下决策者参考的收益维度是不同的，其对应的哈密顿矩阵也应不同，但是先前的量子模型中在不同决策条件下哈密顿矩阵却是无差别的，说明这是原先模型的一个缺点。

**意见 7:** 在 2.2 中请说明模型参数  $u$  和  $\gamma$  的含义及其直观意义。

**回应:** 感谢审稿专家的建议，我们已经在文中相应部分补充说明了这两个参数的含义，修改部分已在论文中用蓝色字体标记。

**意见 8:** 在 4.2 中第一句话中的齐当别模型是指原来的理论，还是本文修正后的理论？——后文解释感觉上是后者，建议注明。

**回应:** 感谢审稿专家细致地阅读，这部分的确是指原先的理论，已在文中注明参考文献，并用蓝色字体标记。

**意见 9:** 在 4.2 中第二句话中的这一部分在这里是特指选择利他的人，还是任意一部分人的泛指？

**回应:** 感谢审稿专家的建议，这一点描述确实有些不严谨，我们已经在文中指出，这一部分人“很可能是那些利他性较高的被试”，并用蓝色字体标记。

**意见 10:** 在 4.2 中波尔与爱因斯坦争论的是观测者，而本文所讨论的是决策者，是否需要说明一下这两者在什么意义上同一的？

**回应:** 感谢审稿专家富有洞见的质疑，此处讨论的跨度确实过大，我们已经重写了这一部分，并在文中用蓝色字体标记。

.....

**审稿人 2 意见:** 本文作者能够将齐当别思想和量子决策模型相结合，提出新的模型来解释囚徒困境博弈中的分离效应，是很难能可贵的。但是，在技术层面上作者似乎犯了一个根本性错误，所以本文的结论很可能是错的。建议作者仔细检查数据分析流程后，根据实际情况再行决定是否大修后再审。详细审稿意见请见上传的文件。

**意见 1:** 在介绍量子决策模型时，作者提到此类模型的形式相比于传统决策模型更为灵活。关于这一点，在学界仍有争议。就审稿人所了解的情况，量子决策模型的主要提出者 Busemeyer 教授并不认同量子决策模型是比传统模型更为灵活的模型。例如，Busemeyer & Bruza (2012) 一书提到，量子模型和传统模型需要满足的是不同的限制条件，而且前者往往能够给出独立于模型参数和实证数据的预测，因此，并不存在前者比后者更加灵活的问题。建议作者修改相关论述，使之与量子决策模型的实际情况相符。

**回应:** 感谢审稿专家宝贵的建议，我们已经引言中对此处进行了修改，并在文中用蓝色字体标记。

**意见 2:** 在介绍量子模型时，文中的某些说法仍然带有基于集合论的传统概率论的意味，建

议作者给出更加符合量子概率论观点的论述。例如，作者提到，在标准一次性囚徒困境博弈中，问题空间可以定义为 $\Omega = \{B_D A_D, B_D A_C, B_C A_D, B_C A_C\}$ 。使用常见于集合论的符号 $\Omega$ 以及集合形式来表达四种信念行为状态，对于描述量子决策模型是不恰当的。更合理的方式是将 $B_D A_D, B_D A_C, B_C A_D$ 和 $B_C A_C$ 描述为决策者可能处于的四种状态，它们对应的分别是一个四维希尔伯特空间中的基矢量。类似的，作者提到，在 $\psi_0(0)$ 状态下，决策者处于每一种信念行为状态的概率相等。从量子论角度来说， $\psi_0(0)$ 本身是一个量子叠加态，这一状态是不同于任何一个纯信念行为状态的。合理的表述方式是，在进行观测（或者从心理的角度，在要求被试报告决策结果）的情况下，从这一量子叠加态转变为任意一种信念行动状态的概率是相等的。在对 $H_B$ 这一哈密顿矩阵进行描述时，也存在欠妥的问题。

**回应：**感谢审稿专家宝贵的建议，我们已经在 2.1 中对此类表述进行了修改，并在文中用蓝色字体标记。

**意见 3：**在对哈密顿矩阵的数学元素进行界定时，作者多次提到预期价值这一概念。此处，在对手策略已知时，决策者的收益在给定策略的条件下是确定的，所以预期二字似乎可以去掉。

**回应：**感谢审稿专家意见，我们已在介绍确定条件下哈密顿矩阵时删去了预期二字。

**意见 4：**在公式 13-15 中，有一个参数  $t$ 。本文在介绍模型拟合方法时，并未提及  $t$  值是如何确定的。Busemeyer 教授的惯常做法是将  $t$  设定为  $\pi/2$ ，不知道作者在进行模型拟合时，是否也采用了相同的方式。

**回应：**在文中，我们原先将  $t$  值设定为 $\sqrt{\pi/2}$ ，感谢审稿专家富有洞见的质疑，让我们发现这一不严谨之处。先前的研究指出，将  $t$  设定为  $\pi/2$  是为了使  $p(D)$ 达到最大值(Pothos & Busemeyer, 2009; Busemeyer & Bruza, 2012)，但我们发现，当加入纠缠矩阵 $H_B$ 后， $p(D)$ 达到最大值时的  $t$  值与纠缠矩阵中的参数 $\gamma$ 也有关系。由于本文中 $\gamma$ 值与 Busemeyer 教授所提出模型的 $\gamma$ 值取值不同，因而  $t$  的取值也应有所不同。经过分析后，我们将原先模型的  $t$  值设定为  $\pi/2$ ，而将本模型的  $t$  值设定为  $3\pi/8$ 。我们也据此重新绘制了文中的图形，并将分析过程（Mathematica 的.nb 文件）以附件的形式上传，请审稿专家批评指正。

**意见 5：**作者在解释公式 13-15 时，提到  $M=[1\ 0\ 1\ 0]^T \cdot [1\ 0\ 1\ 0]$ ，并指出它的作用是将  $\psi(t)$  中的第一个第三个元素选取出来。但是， $M$  的正确形式应当是 $\begin{Bmatrix} M_1 & 0 \\ 0 & M_2 \end{Bmatrix}$ ，其中 $M_1 = \begin{Bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{Bmatrix}$ ，

$M_2 = \begin{Bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{Bmatrix}$  (Busemeyer & Bruza, p.272)。如果作者在建立模型的时候的确使用了  $M=[1 \ 0 \ 1 \ 0]^T \cdot [1 \ 0 \ 1 \ 0]$ , 那么在数学上是错误的, 因此由此得到的结论也很可能是错误的。这是本文可能存在的最大问题, 希望作者仔细核对所用的矩阵是否正确。

**回应:** 感谢审稿专家富有洞见的质疑, 这里出错的原因是由于作者粗心大意导致的笔误, 而在实际计算中, 作者是通过 Matlab 中的矩阵操作直接提取的矩阵中的元素, 所以并未出现这一错误。我们将模型计算代码 (Matlab 的 m 文件) 以附件形式上传, 供审稿专家审阅与检查。在此, 作者想为自己的粗心大意向两位审稿专家致以歉意, 并对两位审稿专家严谨负责的态度致以由衷的敬意!

**意见 6:** 根据表 2, Pothos & Busemeyer 的模型对于 Shafir & Tversky(1992)以及 Busemeyer et al. (2006)的数据在三种情况下的预测值都是一样的, 对此本人持怀疑态度。即使 Pothos & Busemeyer 的模型不能完全复制实证数据, 但是一般情况下应该可以预测一定的分离效应。建议作者对模型拟合的代码进行检查, 以确定所得结果的正确性。

**回应:** 感谢审稿专家富有洞见的质疑, 原先模型不能拟合分离效应的原因是  $t$  值得选取不严谨。我们重新设置  $t$  值后进行了拟合 (拟合结果如表 2 所示), 发现原先的量子模型已经可以预测一定的分离效应。此外, 基于拟合的结果我们修改了 4.3 中的部分内容, 修改部分用蓝色字体标记。我们将拟合代码也以附件形式上传, 供审稿专家检查。

**意见 7:** 除了以上所述的主要问题外, 本文在文字方面, 以及其他一些细节上, 也有值得改进之处。例如“增加不必要的复杂”, “量子决策模型的所持观点”, “不同条件下薛定谔方程的哈密顿矩阵都是相同”, 等等。此外, 在 4.2 节中, 作者提到, “那么, 我们便可以说, 量子决策模型描述是符合客观规律的”。从波尔的不确定观点的客观真实性, 直接引申到量子决策模型与客观规律的一致性, 是一个跨度很大的推论, 即使 Busemeyer 教授本人, 恐怕也不会下此论断。最后, 本文的英文摘要总体上写得不错, 但是也存在一些细节问题, 比如单复数和第三人称问题。建议作者对全文再进行一次仔细的阅读, 以去除各种细节上的语病。

**回应:** 感谢审稿专家宝贵的建议, 我们已经对文中不恰当的表达做出了修改, 并且重写了 4.2 中的第三段, 修改部分使用蓝色笔迹标出。

---

## 第二轮

**审稿人 2 意见：**相比初稿而言，此次修改后的论文在各方面都有所改善。但是，此稿在诸多细节方面，仍有欠缺，还未达到可以出版的程度。以下是本人认为仍需改进的方面，希望作者能够认真对待。

**意见 1：**中文摘要最后两句中的“研究”一词建议改为“本研究”，以使中文表达更为合理。

**回应：**感谢审稿专家的建议，我们已在摘要中更正，并用绿色字体标出（本轮修改所用文本的颜色都为绿色），同时，我们也通读了全文，对文中存在的一些语病进行了修改。

**意见 2：**文中多次提到两阶段赌博博弈，这里存在翻译错误，英文原文为 two-stage gambling (task)，应该翻译成两阶段赌博（任务），不存在博弈一词。

**回应：**感谢审稿专家的建议，我们已在文中更正。

**意见 3：**在 2.1 节介绍四维标准量子决策模型的时候，作者提出问题空间包含四种决策者可能处于的状态。实际上，希尔伯特空间是一个连续空间，包含无限多种可能状态（包括量子叠加态）。四种可能的状态应该成为纯态(pure state)或者基态(basis state)。类似地，在后文描述对手策略为止情况下的量子叠加态的时候，称从这一叠加态转变为任意一种信念行为状态概率相等也是不妥当的，应该是转变为任意一种确定的基态的概率相等。

**回应：**感谢审稿专家宝贵的建议，此处我们原先的描述确实不严谨，我们已经在文中做出了修正。

**意见 4：**在描述已知对手背叛条件下的量子叠加态时，作者指出此时决策者处于 $B_C A_D$ 和 $B_C A_C$ 状态的概率均为 1/2，这又是对于叠加态的理解错误。“处于”二字应该改为“报告”，因为“处于”不涉及测量，而“报告”涉及测量。只有测量后，决策者的状态才坍缩到基态。

**回应：**感谢审稿专家宝贵的建议，我们已在文中将“处于”改为“报告”。

**意见 5：**在同一段有关已知对手背叛条件下的两个基态的下标还是错的，而且前面的“处于”一词同样不够妥当。关于下标以及相关错误，希望在下一轮的修改稿中不要再出现，这些都是完全可以避免的问题，不应重复出现。

**回应：**感谢审稿严谨而细致的审稿态度，我们已在文中做出了改正。

**意见 6:** 下一段中的第一句表达有问题,“量子决策”不会“认为”,是错误的拟人化,建议改为“根据量子决策模型”。

**回应:** 感谢审稿专家细致的审稿工作,我们已在文中按照建议做出了改正。

**意见 7:** 在描述薛定谔方程的时候,请使用正确的点乘号。同一段里的蓝字部分,应该是“所有可能基态”而不是“所有可能状态”。

**回应:** 感谢审稿专家细致的审稿工作,我们已在文中做出了改正。

**意见 8:** 在描述效用函数时, $x_{ij}$ 应该是当对手行为为  $i$ ,决策者行为为  $j$  时决策者的收益,而非当对手行为为  $j$ ,决策者行为为  $i$  时决策者的收益。这样的小错误,请一定要避免,否则对于不了解相关文献的读者,会造成很多困惑。

**回应:** 感谢审稿专家严谨的审稿态度,我们已在文中做出了更正。

**意见 9:** 在同一段的蓝字中有一表述“从最终信念状态行为转变为……”,信念状态行为应该是信念行为状态吧,又是很容易发现也很不应该出现的错误。另外,蓝字的末尾是否应该有“之和”二字。

**回应:** 感谢审稿专家宝贵的建议,诚如您所言,末尾处应加入“之和”,已在文中做出了修正。

**意见 10:** 下一段开头,又出现“标准四维量子决策模型”,既然选择统一使用“四维标准量子模型”,就要一以贯之,还是一个很容易发现也很不应该出现的错误。

**回应:** 感谢审稿专家宝贵的建议,我们已经检查全文,将文中的表述统一为“四维标准量子模型”。

**意见 11:** 在同一段中,作者提到“根据期望理论”,指的是否是 prospect theory? 如果是,后文又提到了前景理论,请使用统一的中文翻译。此外, $u_d$ 和 $u_c$ 所采用的的表达式并不受限于 prospect theory,不知道作者这里想说的什么意思。

**回应:** 感谢审稿专家宝贵的建议,我们查阅了相关文献,将 prospect theory 的翻译统一为预期理论(李纾, 2016)。此外,我们在表述有关原模型效用函数这一部分时,的确中心不明确,作者在这一部分想说明原模型中 $u_d$ 等于 $u_c$ 的这种设定是不严谨的,我们已经在文中进行了改正。

**意见 12:** 图 1 上方的文字有一个多余的“取”字。

**回应:** 感谢审稿专家细致的审稿工作，我们已经在文中删除了“取”字。

**意见 13:** 根据脚注 2，分离效应量是由  $p(\text{背叛}) - (p(\text{背叛}|\text{对手合作}) + p(\text{背叛}|\text{对手背叛}))/2$  来定义的。但是在正文中多出提到分离效应时，仍然使用  $p(\text{背叛}) - p(\text{背叛}|\text{对手合作})$ 。请统一对分离效应以及分离效应量的界定，并对文稿做相应修改。

**回应:** 感谢审稿专家细致的审稿工作，我们已在文中将相关表述统一为“分离效应量”。

**意见 14:** 有关第三个困难一段，首句第二个逗号后面可以添加一个“即”字。

**回应:** 感谢审稿专家宝贵的建议，我们已经在文中按照建议做出了修改。

**意见 15:** 既然引入齐当别思想的模型仍然保留了 Busemeyer 等人改进后的量子模型中的 HB，而且三个困难也是针对改进后模型的，那么提引入齐当别思想的模型，应该针对 Busemeyer 等人的改进模型才更合理。换句话说，有关需要使用不同的效用函数，以及需要考虑他人收益这两点改进，是针对 Busemeyer 的改进模型的。因此，相关陈述应该放在介绍改进模型之后。

**回应:** 感谢审稿专家宝贵的建议，我们已经在文中将相关陈述移至介绍 Pothos & Busemeyer (2009) 所提出的改进模型之后。

**意见 16:** 文中同时出现了“1 次性标准囚徒困境”和“一次性标准囚徒困境”，请统一使用中文或者阿拉伯数字。

**回应:** 感谢审稿专家宝贵的建议和严谨的审稿态度，我们已经在文中统一为“一次性标准囚徒困境”。

**意见 17:** 既然根据齐当别理论，在对手策略不确定条件下，个体可能在齐同掉自身收益的情况下依据对手收益做决策，为什么在引入齐当别思想的量子模型中，不确定条件下仍然同时考虑了自身收益和对手收益？这是一个理论上的问题，需要进一步解释。

**回应:** 感谢审稿专家的宝贵建议，我们在 3.1 中对这一点做了进一步的解释。

**意见 18:** 在介绍基于齐当别思想的模型时，作者提到双曲正切变换并不改变原先价值函数的凹凸性，这里有两个问题。第一，为什么不改变凹凸性，需要证明。第二，为什么不改变凹凸性是当前情境所需要的，需要解释。

**回应:** 感谢审稿专家的宝贵建议,我们在附录中对不改变凹凸性这一命题进行了证明,同时在 3.2.1 中对为何需要保持原先价值函数的凹凸性进行了解释。

**意见 19:** 公式 12 下面一段首句有一个多余的“其中”。

**回应:** 感谢审稿专家细致的审稿工作,我们已将多余的“其中”删去。

**意见 20:** 同一段中,作者提到因为决策者更加看重自身的收益,所以自身收益维度上的价值函数的导数应大于他人收益维度上的价值函数的导数。但是,导数的现实含义是对变化的敏感度,而更看重自身收益,应该表现为等量的自身收益和他人收益应该有不同价值,和敏感度并不一致。希望作者提供必要的解释,或者改用更合理的数学推导( $0 < b < a < 1$  的结论还是成立的)。

**回应:** 感谢审稿专家富有洞见的质疑,我们查阅校对了相关的中英文文献(Li & Taplin, 2002; Li, Taplin, & Zhang, 2007; 李纾, 2016),发现此处的表达确实不妥,根据相关的中文文献(李纾, 2016),已将其改为“效用函数的曲率”,并对  $0 < b < a < 1$  这一设定进行了说明。

**意见 21:** 图 2 说明文字中的“ $u$  和  $\gamma$ ”应该是“ $a$  和  $\gamma$ ”。

**回应:** 感谢审稿专家的建议,此处确实有误,已经在文中进行了更正。

**意见 22:** 关于  $\Delta\pi$  和预测的分离效应量之间的关系(图 3)也请下次提交时提供计算代码。

**回应:** 由于作者只能上传上传后缀为 pdf 或 doc 的文件,因此我们将代码发至编辑部,请编辑部老师转发给审稿专家。

**意见 23:** 在 4.2 节的讨论中,作者还是没能准确地表达量子动力学的含义。作者提到“随着时间的推移,决策者可能一时间处于自身的收益维度,倾向于选择背叛,另一时间处于那人的收益维度,倾向于选择合作”。首先,随着时间的推移,变化的是量子叠加态,一般量子叠加态不是基态,所以不能确定是否处于一种纯粹状态。其次,相关模型的基态是信念行为状态,而非收益维度状态,所以也不能说收益维度来表达基态。建议作者删除相关论述。

**回应:** 感谢审稿专家的建议,作者认识到 4.2 中关于动力学的讨论确实有误,且其中心观点与文中 3.1 节是重复的,因此,作者将 4.2 节讨论删去。在此,作者想再次对审稿专家认真负责的审稿态度表示感谢!

---

### 第三轮

**审稿人 2 意见：**这一稿在上一稿的基础上又有很大改进，审稿人认为已经基本达到了可发表的程度。以下是一些仍可改进的地方，希望作者予以考虑。

**意见 1：**2.2 节的标题中的四维标准决策模型，建议改为四维标准量子模型。

**回应：**感谢审稿专家的建议，我们已在文中改正（本轮修改所用文本的颜色都为红色）。

**意见 2：**图 1 下方提到，分离效应是能够存在的，即存在  $\rho(\text{背叛})$  小于  $\rho(\text{背叛}|\text{对手合作})$  这一关系。这一陈述同图 1(a) 所采用的分离效应量定义不一致，应该是“存在  $\rho(\text{背叛})$  小于  $\rho(\text{背叛}|\text{对手合作})$  和  $\rho(\text{背叛}|\text{对手背叛})$  的平均值”。

**回应：**感谢审稿专家宝贵的建议，此处确实表述不妥，我们已在文中做出了修改。

**意见 3：**第 3 节上方段落的首句，建议改为“Pothos 和 Busemeyer（2009）提出的改进模型在解释囚徒困境中的分离效应时仍存在困难，究其原因……”。

**回应：**感谢审稿专家宝贵的建议，我们已在文中按照建议做出了修改。

**意见 4：**同一段中有关效用函数非线性的陈述，建议改为“由于效用函数一般是非线性的”。

**回应：**感谢审稿专家细致的审稿工作，我们已在文中做出了改正。

**意见 5：**3.2.1 节中有关双曲正切变换的性质介绍，一方面本身不影响此处采用该变换的必要性，另一方面相关证明存在缺陷，建议删除相关陈述和附录（包括脚注 3 和脚注 4）。

**回应：**感谢审稿专家宝贵的建议，我们已在文中删除了相关内容。

**意见 6：**关于效用函数曲率的陈述，方向反了。自身维度上的效用函数应该曲率较小。另外，由曲率差异即可得出  $a > b$ ，和单调性无关。

**回应：**感谢审稿专家严谨的审稿态度，我们已在文中做出了改正。