ISSN: 2661–3697(Prin); 2661–3700(Online)

基于层次分析法的电商企业量子博弈

张有中[1]　王秀雯[1*]　谢德鑫[2]
1. 厦门大学嘉庚学院信息科学与技术学院　福建漳州　363105
2. 厦门大学嘉庚学院国际商务学院　福建漳州　363105

摘　要：本文针对拥有物流供应链和未拥有物流供应链、使用第三方物流的两类电商企业的商品定价，建立基于层次分析法的量子博弈定价模型。综合考虑影响电商企业盈利的因素，通过层次分析法确定特定商品的替代系数后，使用量子博弈模型可以得到两类电商企业特定商品的均衡售价，为两类电商企业的定价策略提供理论与实践指导。通过数值分析对量子博弈模型的可行性进行验证，发现随着量子纠缠度增加，企业所获利润也将增加。在个案分析与应用方面，选定京东和天猫的笔记本电脑为代表，透过量子博弈模型得到的均衡售价比值，可以提供两类电商调高或降低商品售价以增加利润的策略。
关键词：层次分析法；量子博弈；电商企业；物流；定价策略

Quantum game of e-commerce enterprises based on analytic hierarchy process

Youzhong Zhang[1], Xiuwen Wang[1*], Dexin Xie[2]
1. School of Information Science & Technology, Xiamen University Tan Kah Kee College, Zhangzhou, Fujian, 363105, China
2. Science & Technology, Xiamen University Tan Kah Kee College, International Business, Zhangzhou, Fujian, 363105, China

Abstract: This paper establishes a quantum game pricing model based on the analytic hierarchy process (AHP) for commodity pricing of e-commerce enterprises with and without logistics supply chain and using third-party logistics. After comprehensively considering the factors affecting the profitability of e-commerce enterprises and determining the substitution coefficient of specific commodities through the analytic hierarchy process (AHP), the equilibrium selling price of specific commodities of two types of e-commerce enterprises can be obtained by using the quantum game model, which provides theoretical and practical guidance for the pricing strategies of two types of e-commerce enterprises. Through numerical analysis, the feasibility of the quantum game model is verified, and it is found that with the increase in quantum entanglement degree, the profits of enterprises will also increase. In terms of case analysis and application, the notebook computers of Jingdong and Tmall are selected as representatives. And the equilibrium price ratio obtained through the quantum game model can provide strategies for the two types of e-commerce companies to increase or decrease the price of goods to increase profits.
Keywords: analytic hierarchy process; quantum game; e-commerce enterprises; logistics; pricing strategy

---

基金项目：厦门大学嘉庚学院校级孵化项目（YM2019L06）
作者简介：
张有中（1966-），男，博士，副教授，主要研究方向为物流与供应链管理、应用数学、数理经济学等。
王秀雯（1990-），女，硕士，讲师，主要研究方向为应用数学、图论等
谢德鑫（1965-），男，博士，副教授，主要研究方向为电子商务、跨境电商、国际商务等。

随着科技的进步，我国进入全面信息化的时代，电子商务蓬勃发展，为人们的生活带来了快捷和便利。近年来，电商平台消费规模急遽扩大，易观国际[1]近期发布《中国网络零售B2C市场季度监测报告2020年第1季度》数据显示，2020年第1季度，中国网络零售B2C市场交易规模为12522.6亿元人民币，同比增长6.2%。电商企业的急速发展，使得物流供应链成为了电商企业关注的重点，希望透过物流供应链来保障商品的运送、缩短配送时间、降低成本以获得更大的利润。Ramanathan等[2]学者认为物流在电子商务中发挥着重要的作用，物流服务的重要性与产品的风险特征呈正向关系。Xu在2006年提出供应链成本的降低在于物流链的优化及物流成本的降低[3]。

新冠疫情使很多电商平台的增长陷入了停滞，甚至出现负增长。面对疫情，各平台竭尽所能，努力图存。京东在疫情期间以自身特有的物流支持抗疫前线，为疫情灾区、平台商家和普通用户提供急需的服务，2020年第1季度成交总额较去年同期增长9.4%[1]。因此拥有物流供应链的电商能够有效降低成本并增强市场竞争力，对特定商品将具有较大的价格弹性。在拥有物流供应链与不具物流供应链的两类电商中，如何制定价格进行博弈获取最优利润是值得深思的问题。

经济学家提出许多经典的博弈模型，包括Cournot模型、Bertrand模型、Stackelberg模型等，这些博弈模型的理论及应用研究汗牛充栋。黄伟等（2016）针对售电企业定价策略进行研究，将售电企业分为拥有发电资产的售电企业和不拥有发电资产的售电企业。利用经典Bertrand模型分析两类售电企业的定价策略，发现拥有发电资产的售电企业在购电时有天然的成本优势，而其他售电企业要弥补这种劣势就需要提供更具有竞争性的增值服务以吸引用户[4]。

1999年Meyer结合量子信息与博弈理论，建立了量子博弈的相关理论，发现使用量子策略的博弈者往往能够击败使用经典策略的对手[5]。Eisert等（1999）将量子策略引入囚徒困境模型，利用量子纠缠消除了两难困境，证明量子博弈优于相应的经典博弈[6]。项勇等（2010）研究市场竞争参与主体的决策过程，发现通过量子博弈可以获得使市场竞争主体达到共赢局面的帕累托（Pareto）最优状况下的纳什均衡[7]。孙敏等（2012）发现在量子博弈中，随着纠缠度的增加，收益将递增至达到最优的“合作收益”值[8]。

电商企业中商品的定价问题可以看作是本身具备物流供应链的电商与不具备物流供应链而使用第三方物流的电商间的博弈问题。拥有物流的电商比起使用第三方物流的其他电商具有成本优势，并且其物流人员比较具有维护自家品牌的意识，因此服务意识强，会避免随意乱丢快递或掉包快递的现象，能够提升用户的消费体验，增加用户的粘性及信任感。而不具备物流的电商必须靠增加其他服务或降低售价来竞争。

以博弈理论的观点来看，拥有物流供应链的电商即使稍微提高商品售价，由于用户的粘性高，转而购买不具备物流供应链的电商商品的用户不多，因此如果只考虑电商的最佳利润，而不考虑其社会责任，拥有物流的电商对商品的定价将高于使用第三方物流的电商对商品的定价。

由于博弈模型经过量子化之后，得出的纳什均衡策略比未经过量子化的效果更好，并且经典博弈的策略空间集是量子博弈策略空间集的子集，当量子纠缠度最大时，可以得到优于经典博弈的最优结果[9]。因此本文将尝试以量子博弈的观点进行思考，针对两类电商企业的特定商品定价策略进行分析与比较。

一、两类电商企业的量子博弈定价模型

（一）基本假设

考虑拥有物流供应链的电商企业1和不具有物流供应链、使用第三方物流的电商企业2，两类电商企业都销售某特定商品（例如：笔记本电脑），商品销售价格分别为p_1及p_2，并作以下假设：

假设1：电商企业在运营时没有固定成本，边际成本为$c_i > 0$，$i = 1, 2$；

假设2：由于电商企业1拥有物流，电商企业2未拥有物流，因此边际成本满足条件$c_1 < c_2 < a$，其中a为价格参数，表示潜在的市场需求；

假设3：电商企业经理人是理性的，为保证企业的营利状态，假设$0 < c_i < p_i$，$i = 1, 2$。

（二）两类电商企业的需求与利润函数

假设消费者对电商企业1和电商企业2特定商品的产品需求函数为

$$q_1 = a - p_1 + b_1 p_2, \tag{1}$$

$$q_2 = a - p_2 + b_2 p_1, \tag{2}$$

其中a为价格参数；q_1、q_2分别代表电商企业1和电商企业2的销售量；b_1是消费者选择电商1的产品来替代电商2的产品的替代系数；b_2是消费者选择电商2的产品替代电商1的产品的替代系数。博弈模型中的参与者为电商企业1和电商企业2，参与者的博弈策略为商品销售价格，策略空间为非负实数集

$$S_1 = S_2 = [0, +\infty), \tag{3}$$

电商企业 $i=1,2$ 采用策略 S_i，选择的销售价格为 $p_i>0$。

假设不考虑其他支出或税务，以收益函数为其利润函数，电商企业1和电商企业2的利润函数如下：

$$u_1=(p_1-c_1)(a-p_1+b_1p_2), \qquad (4)$$

$$u_2=(p_2-c_2)(a-p_2+b_2p_1). \qquad (5)$$

（三）两类电商企业的量子博弈

考虑量子化模型如图1，以张量积表示博弈在每个时刻的状态。

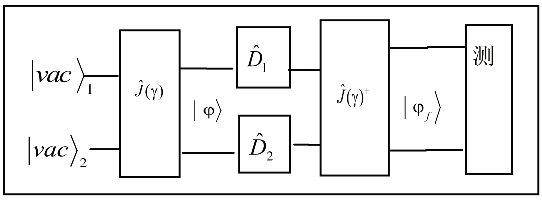

图1　两类电商企业的量子结构

假设电商企业1和电商企业2从量子态

$$|vac\rangle_1\otimes|vac\rangle_2 \qquad (6)$$

开始进行博弈，令 $\hat{P}_j=\frac{\mathrm{i}}{\sqrt{2}}(\hat{a}_j^{+}-a_j)$，$j=1, 2$；并定义么正算子如下：

$$\hat{J}(\gamma)=\exp\left\{\mathrm{i}\,\gamma\left(X_1P_2+X_2P_1\right)\right\} \qquad (7)$$

其中 γ 是量子博弈的纠缠度，为电商企业1和电商企业2之间各种竞合关系与策略反应的程度。初始状态通过么正算子 $\hat{J}(\gamma)$ 转化为量子纠缠状态

$$|\varphi\rangle=\hat{J}(\gamma)(|vac\rangle_1\otimes|vac\rangle_2). \qquad (8)$$

经过博弈者选择策略，策略算子以么正算子 $\hat{D}_1$、$\hat{D}_2$ 表示，其中

$$\hat{D}_j(x_j)=\exp\left(-\mathrm{i}x_jP_j\right). \qquad (9)$$

博弈结束后，经过算子 $\hat{J}(\gamma)^{+}$ 的作用，最终状态为

$$|\varphi_f\rangle=\hat{J}(\gamma)^{+}(D_1\otimes D_2)\cdot J(\gamma)(|vac\rangle_1\otimes|vac\rangle_2). \qquad (10)$$

经过测量装置后，量子策略与价格之间的关系为

$$p_1(x_1,x_2)=x_1\cosh\gamma+x_2\sinh\gamma, \qquad (11)$$

$$p_2(x_1,x_2)=x_2\cosh\gamma+x_1\sinh\gamma, \qquad (12)$$

其中 $\sinh\gamma=\frac{e^{\gamma}-e^{-\gamma}}{2}$，$\cosh\gamma=\frac{e^{\gamma}+e^{-\gamma}}{2}$。

1.量子博弈模型的利润函数：将量子策略与价格的关系（11）、（12）式代入（1）、（2）式可得电商企业1和电商企业2的需求函数：

$$q_1=a+x_1(-\cosh\gamma+b_1\sinh\gamma)+x_2(-\sinh\gamma+b_2\cosh\gamma), \qquad (13)$$

$$q_2=a+x_1(-\sinh\gamma+b_2\cosh\gamma)+x_2(-\cosh\gamma+b_2\sinh\gamma). \qquad (14)$$

因此电商企业1和电商企业2的利润函数，其量子模型的描述如下：

$$u_1(x_1,x_2)=(x_1\cosh\gamma+x_2\sinh\gamma-c_1)\times[a+(b_1x_2-x_1)\cosh\gamma+(b_1x_1-x_2)\sinh\gamma], \qquad (15)$$

$$u_2(x_1,x_2)=(x_2\cosh\gamma+x_1\sinh\gamma-c_2)\times[a+(b_2x_1-x_2)\cosh\gamma+(b_2x_2-x_1)\sinh\gamma], \qquad (16)$$

2.量子博弈模型求解：假设电商企业1和电商企业2以自身利润最大化为目标进行量子博弈，最优价格分别以 p_1^*、p_2^* 表示。根据极值的一阶导数条件 $\frac{\partial u_j}{\partial x_j}=0$，$j=1, 2$，可以得到：

$$\begin{aligned}&x_1(-2\cosh^2\gamma+2b_1\sinh\gamma\cosh\gamma)\\&+x_2(-2\sinh\gamma\cosh\gamma+b_1(\cosh^2\gamma+\sinh^2\gamma))\\&=-a\cosh\gamma+c_1(-\cosh\gamma+b_1\sinh\gamma),\end{aligned} \qquad (17)$$

$$\begin{aligned}&x_1(-2\sinh\gamma\cosh\gamma+b_2(\cosh^2\gamma+\sinh^2\gamma))\\&+x_2(-2\cosh^2\gamma+2b_2\sinh\gamma\cosh\gamma)\\&=-a\cosh\gamma+c_2(-\cosh\gamma+b_2\sinh\gamma).\end{aligned} \qquad (18)$$

各博弈方利润函数的二阶导数为

$$\frac{\partial^2u_j}{\partial x_j^2}=(-2\cosh^2\gamma+2b_j\sinh\gamma\cosh\gamma)=\frac{(b_j-1)e^{2\gamma}-(b_j+1)e^{-2\gamma}-2}{2}.$$

若量子纠缠度 $\gamma>0$，则 $e^{\gamma}-e^{-\gamma}>0$，此时若增加产品的替代系数满足下列条件的假设：

$$b_j<\frac{e^{\gamma}+e^{-\gamma}}{e^{\gamma}-e^{-\gamma}} \qquad (19)$$

则可以得到 $b_j\left(e^{\gamma}-e^{-\gamma}\right)\left(e^{\gamma}+e^{-\gamma}\right)<\left(e^{\gamma}+e^{-\gamma}\right)^2$，意即 $(b_j-1)e^{2\gamma}-(b_j+1)e^{-2\gamma}-2<0$. 因此可以保证利润函数的二阶导数为负值，意即保证最优利润存在。

将一阶导数条件（17）、（18）式，以矩阵形式表示为 $BX=\beta$，亦即

$$\begin{bmatrix}B_{11}&B_{12}\\B_{21}&B_{22}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}x_1\\x_2\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\beta_1\\\beta_2\end{bmatrix},$$

$$B_{11}=2\cosh^2\gamma-2b_1\sinh\gamma\cosh\gamma,$$

$$B_{12}=2\sinh\gamma\cosh\gamma-b_1(\cosh^2\gamma+\sinh^2\gamma),$$

$$B_{21}=2\sinh\gamma\cosh\gamma-b_2(\cosh^2\gamma+\sinh^2\gamma),$$

$$B_{22}=2\cosh^2\gamma-2b_2\sinh\gamma\cosh\gamma.$$

$$\beta_1=a\cosh\gamma-c_1(-\cosh\gamma+b_1\sinh\gamma),$$

$$\beta_2=a\cosh\gamma-c_2(-\cosh\gamma+b_2\sinh\gamma).$$

因为 $\cosh^2\gamma-\sinh^2\gamma=1$，行列式 $|B|$ 经过计算后，可简化如下：

$$\left(1-\frac{(b_1+b_2)}{2}\right)e^{2\gamma}+\left(1+\frac{(b_1+b_2)}{2}\right)e^{-2\gamma}+(2-b_1b_2) \qquad (20)$$

若再增加假设 $|B|\neq0$，亦即（20）式不为0，此时

现代交通技术研究4卷3期: 2022年4卷3期
ISSN: 2661−3697(Prin); 2661−3700(Online)

可以应用克莱姆法则（Cramer’s Rule），求解极值的一阶导数条件（17）、（18）式，得到量子博弈模型的最优策略解

$$x_1^* = \frac{\beta_1 B_{22} - \beta_2 B_{12}}{|B|}$$

$$x_2^* = \frac{\beta_2 B_{11} - \beta_1 B_{21}}{|B|}$$

由量子策略与价格的关系（11）、（12）式，可以得到

$$p_1^* = \frac{1}{|B|}[(\beta_1 B_{22} - \beta_2 B_{12})\cosh\gamma + (\beta_2 B_{11} - \beta_1 B_{21})\sinh\gamma],$$

$$p_2^* = \frac{1}{|B|}[(\beta_2 B_{11} - \beta_1 B_{21})\cosh\gamma + (\beta_1 B_{22} - \beta_2 B_{12})\sinh\gamma],$$

意即电商企业1和电商企业2获得最优利润时的最优价格分别为

$$p_1^* = \frac{e^{-2\gamma}}{4|B|}\{(1+\mathrm{e}^{2\gamma})^2(2a+2c_1+ab_1+b_1c_2)-(1+\mathrm{e}^{2\gamma})(-1+e^{2\tilde{a}})[ab_2+c_1b_2+b_1b_2c_2+2b_1c_1]+b_1b_2c_1(-1+e^{2\tilde{a}})^2\} \quad (21)$$

$$p_2^* = \frac{e^{-2\gamma}}{4|B|}\{(1+\mathrm{e}^{2\gamma})^2(2a+2c_2+ab_2+b_2c_1)-(1+\mathrm{e}^{2\gamma})(-1+e^{2\tilde{a}})[ab_1+c_2b_1+b_1b_2c_1+2b_2c_2]+b_1b_2c_2(-1+e^{2\tilde{a}})^2\}. \quad (22)$$

将前述结果与假设条件综合整理后，可以得到以下定理。

定理1 当电商企业1和电商企业2特定商品的产品替代系数b_1、b_2与量子纠缠度γ满足

$$b_j < \frac{e^{\gamma}+e^{-\gamma}}{e^{\gamma}-e^{-\gamma}},\ j=1,\ 2,$$

且满足条件

$$\left(1-\frac{(b_1+b_2)}{2}\right)e^{2\gamma}+\left(1+\frac{(b_1+b_2)}{2}\right)e^{-2\gamma}+(2-b_1b_2)\neq 0.$$

则电商企业1和电商企业2的特定商品，具有量子博弈的最优价格：

$$p_1^* = \frac{e^{-2\gamma}}{4|B|}\{(1+\mathrm{e}^{2\gamma})^2(2a+2c_1+ab_1+b_1c_2)-(1+\mathrm{e}^{2\gamma})(-1+e^{2\tilde{a}})[ab_2+c_1b_2+b_1b_2c_2+2b_1c_1]+b_1b_2c_1(-1+e^{2\tilde{a}})^2\}$$

$$p_2^* = \frac{e^{-2\gamma}}{4|B|}\{(1+\mathrm{e}^{2\gamma})^2(2a+2c_2+ab_2+b_2c_1)-(1+\mathrm{e}^{2\gamma})(-1+e^{2\tilde{a}})[ab_1+c_2b_1+b_1b_2c_1+2b_2c_2]+b_1b_2c_2(-1+e^{2\tilde{a}})^2\}$$

矩阵$B=\begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} \\ B_{21} & B_{22} \end{bmatrix}$及其行列式值，如前所述。

注：当$\gamma=0$时，即电商企业1和电商企业2不存在量子纠缠状态时，可以得到$|B|==4-b_1b_2$，此时量子博弈与经典博弈的解一致，最优价格如下：

$$p_1^* = \frac{2(a+c_1)+b_1(a+c_2)}{4-b_1b_2} \quad (23)$$

$$p_2^* = \frac{2(a+c_2)+b_2(a+c_1)}{4-b_1b_2} \quad (24)$$

二、层次分析法确定产品替代系数

层次分析法（analytic hierarchy process，AHP）是Saaty（1986）[10]提出的一种多方案或多目标的决策方法，以多层次的结构模型，进行定量分析。本文采用层次分析法AHP来建立两类电商企业量子博弈模型的替代系数，其步骤及方法详述如下。

（一）建立层次结构模型

透过分析影响电商企业用户效用的各种服务后，可以构建一个具有层次结构的用户效用分析框架，如图2所示。层次结构模型的最高层为目标层，其变量为用户效用；层次结构模型的中间层为影响电商企业收益因素的指标层，可以细分为产品价格，电商平台系统（包括搜索功能、推荐系统、购物功能、支付功能），营销活动与电商套餐，物流配送服务，客诉及退、换货业务；层次结构模型的底层为方案层，即拥有和未拥有物流供应链的两类电商企业。

（二）构造判断矩阵

为了确定各层次各因素之间的权重，把所有的因素两两相互比较，构造判断矩阵如（25），其中$a_{ij}=\frac{1}{a_{ji}}$表示第i个因素相对于第j个因素的比较结果。

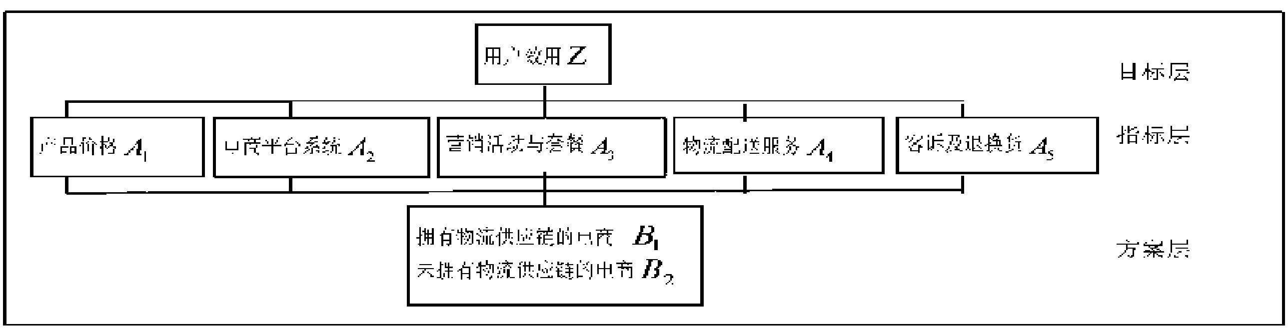

图2 电商用户的效用层次结构模型

$$A=\left(a_{ij}\right)_{n\times n}=\begin{bmatrix}a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n}\\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n}\\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots\\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn}\end{bmatrix} \quad (25)$$

在比较因素时采用相对尺度，第i个因素与第j个因素相比的重要程度，以1–9数值的等级来标度，其意义如表1所示。

表1　AHP各因素相比的重要性比较尺度

数值等级	意义
1	i比j重要程度相同
2	i比j重要程度介于1、3之间
3	i比j稍微重要
4	i比j重要程度介于3、5之间
5	i比j明显重要
6	i比j重要程度介于5、7之间
7	i比j非常重要
8	i比j重要程度介于7、9之间
9	i比j极端重要

（三）层次单排序及其一致性检验

AHP使用层次单排序来确定本层各因素对上一层某因素的重要性权重，其公式如下。

$$AW=\lambda_{\max}W \quad (26)$$

其中$\lambda_{\max}$、W分别表示该层判断矩阵的最大特征值及与其对应的特征向量。对特征向量W的各分量进行归一化处理，可以得到层次单排序的权重向量。

若矩阵满足$a_{ij}=\frac{a_{ik}}{a_{jk}}$，则判断矩阵是严格一致的。当判断矩阵未达到严格一致时，则需要对矩阵进行一致性检验。一致性检验的工具包括定义一致性指标$\delta_{CI}=\frac{\lambda_{\max}-n}{n-1}$，给定随机一致性指标$\delta_{RI}$，数值如表2，并定义两者的比值为一致性比率。当一致性比率$\delta_{CR}=\delta_{CI}/\delta_{RI}<0.1$时，表示判断矩阵的不一致程度在研究的容许范围之内，此时可以使用其归一化特征向量作为权重向量。

表2　一致性指标值

n	δ_{RI}	n	δ_{RI}
1	0.00	6	1.24
2	0.00	7	1.32
3	0.58	8	1.41
4	0.90	9	1.45
5	1.12	10	1.49

（四）总排序及其一致性检验

AHP从层次结构模型的最高层到最低层逐层进行层次总排序。考虑在指标层A中的n个因素$A_1, A_2, \cdots, A_n$，若这n个因素对目标层Z的排序为$a_1, a_2, \cdots, a_n$；方案层B中的m个因素对上层A中因素A_j的层次单排序为$b_{1j}, b_{2j}, \cdots, b_{mj}$，则方案层$B$中的第$i$个因素对目标层$Z$的权值为$\sum_{j=1}^{n}a_j b_{ij}$。

假设方案层B中的m个因素对上层A中的因素A_j的层次单排序一致性指标为δ_{CIj}，随机一致性指标为δ_{RIj}，层次总排序一致性比率定义为

$$\delta_{CR}=\left(\sum_{i=1}^{n}a_i\delta_{CIi}\right)/\left(\sum_{i=1}^{n}a_i\delta_{RIi}\right)$$

当$\delta_{CR}<0.1$时，表示层次总排序不一致程度在研究的容许范围之内，通过一致性检验。

（五）确定产品替代系数

依据市场调研和消费者满意度调查的结果，分析各指标因素影响程度，可得各层级判断矩阵。指标层A层对目标层Z的判断矩阵如表3所示。

表3　指标层A层对目标层Z的判断矩阵

Z	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5
A_1	1	1	3	1	2
A_2	1	1	2	1	2
A_3	1/3	1/2	1	1/5	1/2
A_4	1	1	5	1	3
A_5	1/2	1/2	2	1/3	1

由表3可以计算出一致性比率δ_{CR}为0.020，满足一致性要求。方案层B的层次总排序如表4所示。一致性比率δ_{CR}为0，满足一致性要求。

表4　A层对B层的判断矩阵

Z	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	W
	0.2520	0.2366	0.0809	0.3063	0.1243	
B_1	0.6667	0.5000	0.5000	0.6667	0.5000	0.5931
B_2	0.3333	0.5000	0.5000	0.3333	0.5000	0.4070

透过一致性检验后，可以确定两类电商企业对于用户效用的权重，并进而确定模型中的替代系数分别为$b_1=\frac{WB_1}{WB_2}=1.4573$、$b_2=\frac{WB_2}{WB_1}=0.6862$。

三、量子模型数值分析

（一）量子模型算例分析

两类电商企业的量子博弈定价模型其算例分析的参数取值如表5，代入量子博弈模型得出的均衡价格，如表6。根据量子模型算例分析结果，如果电商企业1和电商企业2的量子纠缠度γ=0.1，则电商企业1和电商企业2的特定商品的定价比为0.6519:0.4965，比值约为1.313。

表5　算例分析的参数取值

符号与意义	取值
价格参数 a	0.4
电商企业1的边际成本 c_1	0.1
电商企业2的边际成本 c_2	0.12
产品1替代2的替代系数 b_1	1.4573
产品2替代1的替代系数 b_2	0.6862

表6　量子模型算例分析的均衡价格

量子纠缠度	均衡价格	
$\gamma=0.01$	p_1^*	0.5919
	p_2^*	0.4642
$\gamma=0.1$	p_1^*	0.6519
	p_2^*	0.4965

（二）敏感度分析

量子纠缠度对模型的均衡价格具有影响，为了解影响的方式和程度，针对模型进行敏感度分析后，发现随着量子纠缠度的提高，两类电商企业特定商品的价格 p_1^* 与 p_2^* 均跟着提高，如图3。

产品替代系数不同，电商企业所获利润明显不同。因此产品替代系数对模型的均衡价格具有影响，进行敏感度分析后，可以得到产品替代系数与利润函数的3D比较图，如图4。

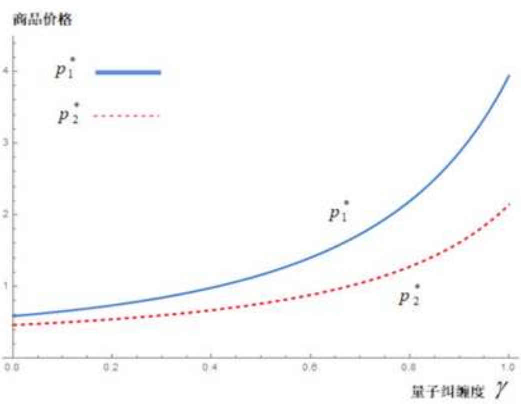

图3　量子博弈的商品价格随纠缠度升高而升高

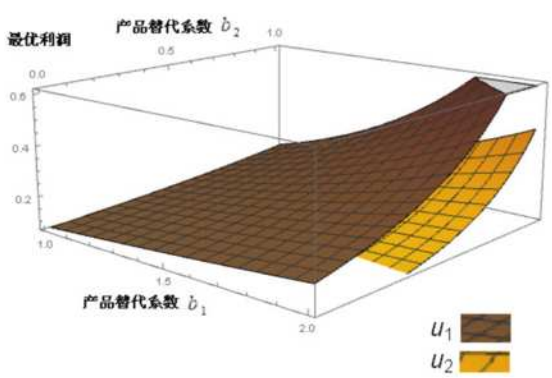

图4　产品替代系数对最优利润的3D比较

一般而言产品的替代系数 $b_1>b_2$，这是因为拥有物流供应链的电商企业1其用户的粘性较高，因此当电商企业1售价提高时，由电商企业1转而购买电商企业2商品的人数较少；而当电商企业2售价提高时，由电商企业2转而购买电商企业1商品的人数较多，亦即以电商企业2商品代替电商企业1商品的产品替代系数小于以电商企业1商品代替电商企业2商品的产品替代系数。由图4产品替代系数对最优利润的3D比较可以发现拥有物流供应链的电商企业1所获利润 u_1 高于未拥有物流供应链的电商企业2所获利润 u_2，并且随着替代系数增大，所获利润将会提高。

四、应用与结论

（一）个案分析与应用

为了将本文建立的两类电商企业的量子博弈定价模型进行实际应用，选取联想小新Air14的2020款锐龙R5六核笔记本电脑为特定商品，拥有物流的电商和未拥有物流使用第三方物流的电商则分别选定京东和天猫，数据来自2020年7月28日的电商网站，如图5和图6。

图5　京东电商特定商品价格

图6　天猫电商特定商品价格

假设两个电商彼此竞合的量子纠缠度γ=0.1，由图5和图6可以发现两个电商的定价分别为4599元和3799元，比值约为1.211，小于1.313。依据量子博弈模型的结果，若在天猫未改变售价的情况下，京东电商的商品定价可以适度提高至大约4988元，以增加利润；而在京东未改变售价的情况下，天猫电商的商品定价可以适度调降至大约3503元，以提高销售量并增加利润。

当京东电商的商品定价提高至4988元时，此时比值接近1.313，由于京东电商拥有物流供应链，其用户的粘性较高，因售价提高转而购买其他电商企业商品的顾客

不多，而商品售价的提高将使得京东电商此项笔记本电脑商品的获利提高。同样的，当天猫的商品定价调降至大约3503元时，售价的降低吸引了一部分原来属于京东电商的顾客，更吸引了原来天猫电商的潜在顾客，这些潜在顾客是因为天猫电商原始售价3799元，超出其预算而采观望态度的顾客。售价的降低吸引这些潜在顾客购买此项笔记本电脑商品，销售量提高所获利润高于因降低价格损失的利润，造成天猫电商此项笔记本电脑商品的获利提高。

（二）结论

本文提出了一种基于量子博弈的电商企业定价模型，其中的替代系数通过层次分析法确定，综合考虑影响电商企业盈利的影响因素，对拥有物流的电商企业和未拥有物流、使用第三方物流的电商企业的定价策略提供了理论与实践指导。模型中的价格参数a，边际成本c_1、c_2，需要具体分析电商企业的特点和组成，根据市场中电商企业的运营成本进行分析。根据建立的量子博弈电商企业定价模型，可以对两类电商企业特定商品的售价提供最优化的策略。

在管理上的意义如下：拥有物流的电商企业和使用第三方物流的电商企业的竞合关系与策略反应的程度形成了量子纠缠的现象，量子博弈模型可以提供电商企业的特定商品定价策略，使博弈者具有最优利润。当量子纠缠度$\gamma=0$时，量子博弈模型的定价与经典博弈模型的定价相同，当量子纠缠度γ增加，量子博弈决策的定价亦随之增加，显示量子博弈模型优于经典博弈模型。

参考文献：

[1]电商行业数字化进程分析——易观：2020年第1季度中国网络零售B2C市场交易规模达12522.6亿元疫情引起增速下滑，各平台纷纷推行抗疫举措https：//www.analysys.cn/article/detail/20019768

[2]Ramanathan R, George J, Ramanathan U. The Role of Logistics in E-commerce Transactions: An Exploratory Study of Customer Feedback and Risk.Supply Chain Strategies[M]. London: Springer，2014: 221 – 233.

[3]Liqun Xu. An Integrated Supply Chain Planning Model for Manufacture Firm based on Logistics Chain [J]. Service Systems and Service Management，2006，(01) : 589 – 593.

[4]黄伟，李玟萱，李宁坤，et al.基于Bertrand模型的2类售电企业定价策略[J].电力建设，2016，v.37；No.426（03）：80–85.

[5]Meyer D A, Quantum strategies [J]. Physical Review Letters，1999，82(5)：1052–1055.

[6]Eisert J, Wilkens M, Lewenstein M, Quantum games and quantum strategies [J]. Physical Review Letters, 1999, 83 (15): 3077–3080.

[7]项勇，任宏.市场竞争行为博弈均衡的量子化分析[J].统计与决策，2010（02）：62–63.

[8]孙敏，鲁大为，居琛勇，et al.可扩展的多人市场模型的量子博弈[J].中国科学技术大学学报，2012，42（4）：259–264.

[9]向淑文，王常春.量子博弈若干问题的研究[D].贵州：贵州大学，2007.

[10]Saaty, T. L. Axiomatic Foundation of the Analytic Hierarchy Process [J]. Management Science, 1986, 32(7):841–855.