

3 定价模型的构建

3.1 多归属行为的描述与基本假设

3.1.1 平台多归属行为的描述与特性

在众包物流平台中,消费者和配送员的多归属行为显著影响了平台的运作效率与市场竞争力。消费者的需求决定了平台的订单量,而配送员的服务供给则保障了订单的及时履约。两者之间存在相互作用:一方面,平台需要通过合理定价吸引消费者并满足其需求;另一方面,平台也需激励配送员积极参与,为满足订单提供充足的供给。

消费者和配送员的多归属行为加剧了平台之间的竞争。消费者可以自由切换平台,根据价格和服务质量做出选择;配送员则根据报酬水平和工作稳定性在多个平台之间动态分配服务时间。因此,平台不仅要制定合理的定价策略以吸引消费者,还需要平衡供需,确保配送员的积极参与。

接下来,分别从消费者需求的非线性变化和配送员的多平台服务选择两个角度展开分析

(1) 消费者的多平台需求决策

消费者在选择平台时基于效用最大化原则,并在多个平台的定价和服务质量之间动态调整其选择策略。研究平台定价与需求之间的关系时,需要综合考虑两个主要因素:一是平台自身价格对需求的直接影响,二是竞争平台价格对需求的间接干扰。为描述这两个因素的作用,提出了以下需求的基本表达式: $n_i^d(p_i, p_j) = f(p_i) + g(p_j)$

其中, $n_i^d(p_i, p_j)$ 表示平台 i 的需求量。该需求量取决于平台 i 的自身价格 p_i 和竞争平台 j 的价格 p_j 。 $f(p_i)$ 表示消费者对本平台价格变化的响应, $g(p_j)$ 则描述竞争平台的定价如何干扰平台 i 的需求。这两个因素被假设是独立作用的,因此需求可以拆解为两部分进行建模。

价格与需求之间存在非线性关系。在实际市场中,当价格较低时,消费者对价格变化的敏感性较弱,即需求不会随价格小幅变动而剧烈变化;然而,当价格超过某个临界点后,需求会显著下降。这种非线性关系要求平台在制定定价策略时取得平衡:既要保证价格竞争力,又需避免因价格过高而导致需求迅速下滑。为刻画这种特性,设定 $f(p_i)$ 的具体形式如下

$$f(p_i) = a \left(1 - \frac{bp_i}{1 + \alpha p_i} \right)$$

其中, a 表示平台 i 的初始需求规模, 反映在无竞争情况下平台所能获得的最大市场份额; b 衡量消费者对价格变动的敏感度, 值越大表示消费者对价格变化的响应越强; α 控制需求对价格变化的反应幅度, 较大的 α 会降低需求对价格变化的敏感性; 竞争平台的价格对本平台的需求产生重要干扰。

该表达式描述了平台 i 的需求量如何随价格 p_i 的变动而变化。当 p_i 较小时, 分数项 $\frac{bp_i}{1 + \alpha p_i}$ 近似呈线性增长, 此时需求对价格的变化较敏感。但随着价格上升, 分母 $1 + \alpha p_i$ 的增长导致该项增速放缓, 表现出需求对价格的非线性弹性。这意味着当价格升高到一定程度时, 需求减少的速度会变慢。为描述这种干扰效应, 定义如下表达式:

$$g(p_j) = k \cdot \frac{p_j}{1 + \alpha p_j}$$

该表达式表示, 当竞争平台 j 的价格 p_j 上升时, 平台 i 的需求量将增加。这反映了消费者在多个平台之间迁移的倾向: 竞争对手的高价促使更多消费者转向价格较低的平台 i 。干扰系数 k 衡量价格迁移效应的强度, k 越大, 说明竞争对手的价格变化对本平台需求的影响越显著。为了模拟需求随时间的自然衰减, 引入指数衰减项 e^{-at} 。这种衰减可能源于市场逐渐饱和、新竞争者的加入或消费者偏好的变化。基于以上分析, 需求模型扩展为时间相关的形式:

$$n_i^d(p_i, p_j, t) = ae^{-at} \cdot \left(1 - \frac{bp_i(t)}{1 + \alpha p_i(t)} \right) + k \cdot \frac{p_j(t)}{1 + \alpha p_j(t)} \quad (3-1)$$

其中, $n_i^d(p_i, p_j, t)$ 表示平台 i 在时刻 t 的需求量; a 表示初始需求规模, 反映平台在无竞争环境中的最大市场份额; b 表示消费者对价格变动的敏感度, 数值越大则消费者更容易因价格变化而调整选择; k 表示竞争平台的价格对需求的干扰系数, 表明竞争平台的价格变化对本平台需求的影响强度; α 表示价格弹性参数, 调节价格变化对需求的非线性影响; e^{-at} 表示指数衰减项, 模拟需求随时间推移而衰减的趋势, 反映市场动态变化的影响。

这一模型表达了平台在制定定价策略时需要平衡的因素。平台需要通过合理定价保持市场需求, 同时监控竞争对手的价格动态, 及时调整自身策略, 时间因素的引入展示了市场需

求在长期竞争中的变化趋势。

(2) 配送员的多平台服务选择

与消费者类似，配送员也可以选择为多个平台提供服务。配送员根据各平台的报酬水平和订单量的稳定性等因素，动态调整其服务选择。这种行为使配送员在不同平台之间灵活分配劳动时间和精力，为平台供需管理带来挑战。为描述配送员的选择行为，构建如下供给表达式：

$$N_i^s(p_i, p_j, t) = \epsilon \cdot \frac{W_i(p_i, t)}{1 + \lambda W_i(p_i, t)} + \beta \cdot \frac{n_i^d(p_i, p_j, t)}{1 + \mu n_i^d(p_i, p_j, t)} \quad (3-2)$$

其中， $N_i^s(p_i, p_j, t)$ 表示平台 i 在时刻 t 的供给量，即愿意为平台 i 提供服务的配送员数量； ϵ 表示配送员对平台 i 报酬的敏感度； $W_i(p_i, t)$ 表示平台 i 在时刻 t 的报酬，假设与定价成正比，即 $W_i(p_i, t) = \gamma_i p_i(t)$ ，其中 γ_i 为报酬比例系数； λ 为报酬的非线性弹性参数，反映报酬增加对供给影响的逐渐减弱； β 表示消费者需求对供给的影响权重，反映需求如何驱动配送员的供给； μ 为需求弹性参数，控制需求对供给的非线性影响

配送员的供给行为由两部分驱动：其一是平台的报酬水平，其二是消费者的需求。下面分别说明这两部分的具体影响。

报酬水平对供给的影响体现在表达式的第一项 $\frac{W_i(p_i, t)}{1 + \lambda W_i(p_i, t)}$ 中。

报酬的增加通常会吸引更多配送员为平台提供服务。然而，由于边际效应递减，随着报酬逐渐提高，供给的增长速度也会逐渐放缓。参数 λ 用于控制这种递减效应，反映了报酬对供给的非线性影响。

消费者需求对供给的影响则体现在表达式的第二项 $\beta \cdot \frac{n_i^d(p_i, p_j, t)}{1 + \mu n_i^d(p_i, p_j, t)}$ 中。

平台需求上升通常会吸引更多配送员参与服务，以满足市场需求。然而，随着需求进一步增长，供给的增长速度也会逐步放缓。这一非线性效应通过参数 μ 加以控制。

通过将需求的驱动作用纳入模型，可以更全面地刻画供需之间的动态关系。该模型反映了配送员对市场供求关系的敏感性，能够帮助平台在制定激励政策时平衡需求与供给。平台需要综合考虑报酬和需求对配送员行为的影响，以优化供给管理策略。

3.1.2 基本假设

为了在平台多归属行为的背景下，全面刻画消费者和配送员的动态决策，分别分析了消费者的多平台需求决策与配送员的多平台服务选择。消费者的大致需求模型表明，其需求不仅受到本平台价格的影响，还受到其他竞争平台的价格干扰，同时具有非线性弹性特性。当价格较低时，需求对价格的变化较不敏感，但当价格超过某一临界点后，需求会迅速下降。这种需求波动给平台的定价策略带来了挑战，需要在竞争压力下保持价格优势。

另一方面，配送员的供给选择受平台报酬水平和消费者需求的双重驱动。配送员根据各平台的激励和订单需求在多个平台之间灵活分配工作时间。供给的非线性响应反映出随着报酬或需求的增长，供给的边际增速会逐渐递减。这意味着平台必须在报酬激励与利润控制之间取得平衡。

为了将上述需求与供给模型应用于实际的定价策略分析，必须对市场的关键因素——如需求、供给、报酬与成本——进行一系列合理的假设。这些假设有利于更准确地模拟市场环境下的多归属行为。下面提出的基本假设将为模型的构建提供理论支撑。

(1) 假设 1：双平台竞争下的需求函数

在众包物流市场中，消费者的需求不仅取决于自身所选平台的价格，还会受到其他竞争平台价格的影响。这种双重依赖性使得需求函数变得复杂化。在现实市场中，消费者常常会在多个平台之间比较价格、服务质量以及配送时间，从而做出最优选择。基于这一逻辑，平台 i 的需求函数可表示为：

$$n_i^d(p_i, p_j, t) = ae^{-at} \left(\frac{1}{1 + \alpha(t)p_i(t)} \right) + k \cdot \frac{p_j(t)}{1 + \alpha(t)p_j(t)} + \delta_i(t) \quad (3-3)$$

在上述表达式中， $n_i^d(p_i, p_j, t)$ 表示平台 i 在时刻 t 的需求量。该需求量受到多个因素的共同作用：平台 i 的初始需求规模 a 、时间依赖的价格弹性系数 $\alpha(t)$ 、竞争对手价格干扰系数 k 以及需求的波动项 $\delta_i(t)$ 。为了更加准确地描述这些因素如何影响需求，对每一项进行详细解释。

首先， a 表示平台 i 的初始需求规模，这一参数反映了在无竞争情况下平台的基础市场份额。随着时间的推移，市场可能逐渐趋于饱和，因此引入了指数衰减项 e^{-at} ，模拟需求的自然衰减趋势。该项表明，平台在早期阶段的需求较高，但随着市场逐渐稳定，需求会逐步减少。这种衰减现象符合实际市场中的普遍规律。

需求对价格的敏感性通过非线性弹性项 $\frac{1}{1+\alpha(t)p_i(t)}$ 进行描述。

当价格较低时，需求对价格的变化不太敏感，因此小幅的价格调整不会导致需求剧烈波动；而当价格超过一定水平后，需求会显著下降。这种非线性关系表明平台在制定价格策略时需要找到一个合理的平衡点，避免因价格过高导致需求急剧下滑。

竞争对手平台的价格对需求的干扰通过 $k \cdot \frac{p_j(t)}{1+\alpha(t)p_j(t)}$ 表达。

该项说明，当竞争平台 j 的价格 $p_j(t)$ 上升时，平台 i 的需求将随之增加。这反映了消费者在多个平台间的迁移倾向：当竞争对手的价格上升时，部分消费者会转向价格更有吸引力的平台 i 。其中，干扰系数 k 表示竞争平台价格变化对本平台需求的影响程度， k 越大，表明竞争价格的变化对消费者选择的干扰越明显。

为了捕捉市场中的不确定性，在模型中引入了需求波动项 $\delta_i(t)$ ，其形式为 $\delta_i(t) = \sigma_d \cdot dB_d^i(t)$ ，其中 $dB_d^i(t)$ 表示布朗运动。这一项模拟了市场中的随机需求变化，例如由于节假日、天气或促销活动等不可控因素导致的需求激增或下降。通过引入这项波动因素，模型能够更加全面地刻画需求的动态变化。

价格弹性系数 $\alpha(t)$ 在模型中假设为时间依赖的，其变化趋势表示为： $\alpha(t) = \alpha_0 + \alpha_1 t$

这里， α_0 是初始弹性系数，反映了市场初期消费者对价格变化的敏感性较低； α_1 则代表了价格弹性随时间的增长率。随着市场逐渐成熟和竞争的加剧，消费者对价格的敏感性会逐步增加。这意味着在市场的初期阶段，平台可以设定较高的价格以获取利润；而在市场成熟之后，平台需要适当降低价格以应对竞争对手的压力，并满足价格敏感度增加的消费者需求。

这一时间依赖的价格弹性设计使得需求函数更加灵活，能够适应市场在不同阶段的动态变化。平台在不同的市场阶段需要采用不同的定价策略：在市场初期，平台可以通过较高价格获得较大的利润空间；而随着竞争对手的进入和市场环境的变化，平台需要逐渐调整价格，以保持市场竞争力并吸引更多的消费者。

(2) 假设 2：配送员供给函数与动态选择

配送员的供给在多平台竞争环境中具有动态性。供给量不仅受到平台支付报酬的影响，还取决于平台的需求量。配送员供给的基本函数形式为：

$$N_i^s(p_i, p_j, t) = \epsilon \cdot \frac{W_i(p_i, t)}{1 + \lambda W_i(p_i, t)} + \beta \cdot \frac{n_i^d(p_i, p_j, t)}{1 + \mu n_i^d(p_i, p_j, t)} + \sigma_s^i \cdot dB_s^i(t) \quad (3-4)$$

在该模型中, $N_i^s(p_i, p_j, t)$ 表示平台 i 在时刻 t 的配送员供给量。供给量由报酬水平、需求量以及市场中的随机波动共同决定。模型中的关键参数解释如下:

ϵ 表示配送员对平台报酬的敏感性, 衡量经济激励对供给的驱动程度。 $W_i(p_i, t)$ 为平台 i 提供的报酬, 假设与定价成正比, 即 $W_i(p_i, t) = \gamma_i p_i(t)$, 其中 γ_i 是报酬比例系数。

报酬的非线性弹性通过 $\frac{W_i(p_i, t)}{1 + \lambda W_i(p_i, t)}$ 表达。

当平台报酬较低时, 供给量对报酬的增加非常敏感, 但随着报酬水平的进一步提升, 边际效应逐渐减弱。这一形式反映了在现实中提高报酬对供给的有限激励作用。

消费者需求对供给的影响则通过 $\frac{n_i^d(p_i, p_j, t)}{1 + \mu n_i^d(p_i, p_j, t)}$ 描述。

当需求增加时, 更多配送员会参与服务以满足市场需求。然而, 当需求进一步增长时, 供给的增加会逐步放缓, 原因可能是配送员的工作负荷增加或市场上配送员数量的限制。

随机波动项 $\sigma_s^i \cdot dB_s^i(t)$ 用于描述市场中的不确定性对供给的影响, 其中 $dB_s^i(t)$ 表示布朗运动。这一项模拟了市场环境中的随机因素, 例如天气变化、交通状况或节假日高峰期对供给的干扰。

该供给模型展示了在不同报酬水平和市场需求条件下配送员的动态响应, 并通过随机波动项捕捉市场的不确定性。供需关系的平衡需要通过适当的报酬水平和需求管理来实现, 以应对市场变化和外部不确定性带来的挑战。

(3) 假设 3: 报酬与价格的动态关系

在众包物流平台中, 配送员的报酬通常与平台定价策略直接相关。报酬的增加意味着平台定价的提高。假设报酬 $W_i(p_i, t)$ 与平台价格成正比关系: $W_i(p_i, t) = \gamma_i p_i(t)$

该表达式描述了配送员的报酬 $W_i(p_i, t)$ 如何随着平台 i 的价格 $p_i(t)$ 变化。 γ_i 为报酬比例系数, 决定了每单位价格所对应的报酬金额。假设中的比例系数 γ_i 反映了平台在报酬和价格之间的平衡机制。 γ_i 的取值范围介于 0 和 1 之间, 以确保平台能够在提高价格的同时控制整体报酬成本。当 γ_i 较大时, 平台会将更多的收入用于支付配送员报酬, 以激励更多配送员参与; 反之, 当 γ_i 较小时, 平台将更多的收益保留为利润。

这一假设捕捉了平台通过调整价格来影响配送员报酬的动态关系。在实际市场中, 平台

通常在高需求时期（如节假日或高峰时段）提高价格以吸引更多的配送员应对需求增加。在这些情况下，平台需要仔细平衡价格与报酬之间的关系，以确保在提高价格吸引配送员的同时不会造成过高的运营成本。

通过调整 γ_i ，平台能够根据市场状况灵活控制报酬水平。例如，在低需求时段， γ_i 可以较小以降低成本；而在高需求时段， γ_i 可以增大以激励配送员的积极参与。报酬与价格之间的这种动态关系使得平台可以根据市场需求的变化及时调整定价与激励策略，从而实现供需平衡并优化运营效率。

(4) 假设 4：动态定价与利润最大化问题

为了在竞争中获胜，平台必须通过动态调整价格来实现利润最大化。平台 i 的利润函数定义如下：

$$\Pi_i(p_i, p_j, t) = p_i(t)n_i^d(p_i, p_j, t) - W_i(p_i, t)N_i^s(p_i, p_j, t) - C_i(n_i^d, N_i^s) \quad (3-5)$$

该利润函数由三部分构成，分别对应收入、报酬成本以及运营成本。

$p_i(t)n_i^d(p_i, p_j, t)$ 表示平台 i 在时刻 t 通过消费者支付的费用所获得的收入。收入取决于平台的价格 $p_i(t)$ 以及由需求函数 $n_i^d(p_i, p_j, t)$ 决定的订单量。随着平台提高价格，收入可能增加，但需求会出现下降趋势，影响整体收入。

$W_i(p_i, t)N_i^s(p_i, p_j, t)$ 表示平台支付给配送员的报酬成本。报酬与供给量成正比关系，而供给量 $N_i^s(p_i, p_j, t)$ 由需求和报酬水平共同驱动。报酬成本反映了平台为了吸引足够的配送员参与而必须支付的代价。提高报酬可以增加供给，但也会显著提升成本。

$C_i(n_i^d, N_i^s)$ 表示平台的运营成本。该部分成本主要来源于供需不平衡所导致的延迟成本和调度管理成本。在利润最大化问题中，平台需要在价格、报酬和需求之间找到一个最佳的平衡点，以实现利润的优化。

动态定价的挑战在于，过低的价格会提高订单需求，但会使平台承担更高的配送成本；而过高的价格可能会导致需求骤减，进而影响平台的收入。因此，平台需要根据市场竞争状况不断调整定价策略，以确保利润最大化。

(5) 假设 5：延迟成本与供需平衡

总运营成本 $C_i(n_i^d, N_i^s)$ 由延迟成本和调度管理成本两部分构成：

$$C_i(n_i^d, N_i^s) = \theta \cdot \max(n_i^d(p_i, p_j, t) - N_i^s(p_i, p_j, t), 0) + \eta(N_i^s(p_i, p_j, t))^2 \quad (3-6)$$

其中， η 是调度成本系数，用于描述随着供给量增加而导致的管理和调度费用上升。

平台需要在维持足够的供给以满足需求的同时控制调度成本，以实现高效运营。

在实际运营中，供需不平衡会导致服务延迟，从而产生额外的运营成本。延迟成本的计算表达式为： $L_i(t) = \theta \cdot \max(n_i^d(p_i, p_j, t) - N_i^s(p_i, p_j, t), 0)$

这一表达式表明，当需求 $n_i^d(p_i, p_j, t)$ 超过供给 $N_i^s(p_i, p_j, t)$ 时，平台将承担额外的延迟成本 θ 。如果供给大于需求，延迟成本为零。该延迟成本反映了由于配送员数量不足而导致的服务质量下降或订单延迟。

延迟成本和调度成本的平衡对平台运营至关重要。合理的定价和报酬策略可以减少供需失衡，从而降低延迟成本。同时，控制调度成本可以在保持服务质量的同时提高运营效率。供需平衡的优化是平台实现利润最大化的关键。

(6) 假设 6：动态博弈与纳什均衡

众包物流平台之间的竞争可以看作是一个动态博弈。每个平台的目标是在给定的市场环境下，通过合理的定价策略实现长期利润最大化。平台 i 的定价策略可通过以下期望最大化问题表示：

$$\max_{p_i(t)} \mathbb{E} \left[\int_0^T (\Pi_i(p_i, p_j, t) - \rho_i Y_i^2(t)) dt \right] \quad (3-7)$$

在上述模型中，平台 i 通过动态调整价格 $p_i(t)$ ，使其在竞争环境和市场不确定性条件下最大化累积利润。目标是在整个时间区间 $[0, T]$ 内最大化利润的期望值。由于市场处于持续变化之中，该模型采用随机控制的方法捕捉市场波动的影响。

利润函数 $\Pi_i(p_i, p_j, t)$ 描述了平台 i 在时刻 t 的利润水平。通过动态博弈框架，平台的定价策略需要与竞争对手平台 j 的价格 $p_j(t)$ 相互影响。任何平台在优化其利润时，必须同时考虑竞争对手的策略，从而形成一个相互依赖的优化问题。

其中， $Y_i(t)$ 表示市场中的随机因素，例如市场需求波动、物流延误或供应链中断。这些不确定因素对平台的运营绩效产生直接影响。为了量化这些风险，模型引入了 $\rho_i Y_i^2(t)$ 项，其中 ρ_i 是与平台运营相关的风险成本系数，表示平台对市场波动的容忍度。较高的 ρ_i 表明平台更加保守，倾向于降低市场不确定性对利润的影响；较低的 ρ_i 则表明平台更愿意承担风险以追求更高利润。

平台的目标是在控制风险成本的同时，最大化利润的期望值。这一优化问题的求解需要在给定时间范围内选择最优的价格路径 $p_i(t)$ 。

纳什均衡条件描述了在竞争市场中，所有平台的策略相互依赖且最优的状态。对于平台

i 来说，纳什均衡意味着在给定竞争对手平台 j 的定价策略 $p_j(t)$ 下，平台 i 的定价策略 $p_i(t)$ 是使其自身利润最大化的。如果平台 i 假设对手 j 的定价不变，那么通过单方面改变其定价策略无法进一步提升自身利润。具体而言，纳什均衡的条件可表示为：对于每个平台 i 和 j ，都有：

$$\frac{\partial}{\partial p_i} \mathbb{E} \left[\int_0^T (\Pi_i(p_i, p_j, t) - \rho_i Y_i^2(t)) dt \right] = 0$$

该条件表明，当每个平台都采用其最优定价策略时，没有任何一个平台可以通过单方面调整定价来进一步提升其利润。这种均衡状态是市场的稳定解，描述了在复杂的竞争环境下平台间的相互适应过程。

动态博弈模型提供了一个框架，使平台能够根据市场动态灵活调整定价。纳什均衡的求解需要考虑市场的不确定性和竞争对手的反应，以确保平台在实现长期利润最大化的同时，有效应对市场风险。