

# 基于资源互补与复用的 IaaS 云产品捆绑定价与容量规划

朱晨波<sup>1†</sup>, 胡莹<sup>2,1</sup>, 童骏<sup>1</sup>

(1. 浙江工业大学 管理学院, 杭州 310023; 2. 黄山职业技术学院 大数据与智能工程学院, 安徽 黄山 245000)

**摘要:** IaaS 云产品定价与容量规划问题近年来引起广泛关注, 但现有文献尚未在资源互补与复用及捆绑销售的视角下研究该问题. 考察一个提供预留类与现货类云产品、具有两种互补性资源的 IaaS 提供商, 将资源复用纳入容量规划考量, 通过比较单独、捆绑和混合销售预留类产品时各模式下的最优定价、容量规划及 IaaS 提供商的利润, 分析 IaaS 提供商和用户最偏好的销售模式. 研究发现: 1) IaaS 提供商选择混合销售能实现最大利润, 若只能选择非混合销售, 则在面临具有较强互补性的资源和对捆绑折扣价格较敏感的用户时, 选择捆绑销售; 反之, 选择单独销售. 2) 捆绑产品用户获益最大的模式是捆绑销售, 非捆绑产品用户获益最大的模式是混合销售. 3) 资源间互补性越弱, 捆绑销售的价格折扣越明显. 4) 资源复用使预留类产品定价更低、需求更大, 也使 IaaS 提供商利润更高, 因此资源复用能使 IaaS 提供商和用户实现双赢. 研究结果为基于资源互补与复用的 IaaS 云产品捆绑定价与容量规划决策提供了理论支持和实践建议.

**关键词:** 捆绑销售; 基础设施即服务; 互补资源; 复用资源; 定价; 容量规划

中图分类号: F49 文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2024.0851

引用格式: 朱晨波, 胡莹, 童骏. 基于资源互补与复用的 IaaS 云产品捆绑定价与容量规划 [J]. 控制与决策.

## Bundle pricing and capacity planning of iaas cloud products with complementary and multiplexed resources

ZHU Chen-bo<sup>1†</sup>, HU Ying<sup>2,1</sup>, TONG Jun<sup>1</sup>

(1. School of Management, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China; 2. School of Big Data and Intelligent Engineering, Huangshan Vocational and Technical College, Anhui Huangshan 245000, China)

**Abstract:** The pricing and capacity planning problem of IaaS cloud products has received widespread attention in recent years, however, this problem has not been studied from the perspectives of complementary and multiplexed resources as well as bundle sales. Considering an IaaS provider with two complementary resources and two cloud products (reserved instances and spot instances), and incorporating resource multiplexing into resource capacity planning, this paper first compares optimal pricing, capacity planning decisions and profits of the IaaS provider in three sales models of reserved instances (individual sales, bundle sales, and hybrid sales), and then investigates both the IaaS provider and the cloud users' preferred sales models. The results show that: (1) For the IaaS provider, its profit reaches maximum when it selects the model of hybrid sales, if only the models of individual sales and bundle sales are allowed, then when both the degree of complementary and the bundling discount price sensitivity are relatively large, it would select the model of bundle sales, otherwise, it would select the model of individual sales. (2) For cloud users, bundled product users prefer the model of bundle sales, and unbundled product users prefer the model of hybrid sales. (3) The smaller the degree of complementary of the products, the greater the bundle discount. (4) Multiplexing resources makes the price of reserved instances lower, and the demand of reserved instances and the profit of the IaaS provider greater, therefore, it enables a win-win situation for both the IaaS provider and cloud users. This paper provides theoretical support and practical suggestions for bundle pricing and capacity planning decisions of IaaS cloud products with complementary and multiplexed resources.

**Keywords:** bundle sales; Infrastructure as a service; complementary resources; multiplexed resources; pricing; capacity planning

收稿日期: 2024-07-17; 录用日期: 2024-12-05.

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (72271221); 国家自然科学基金重点国际 (地区) 合作研究项目 (71720107003); 教育部人文社会科学基金项目 (23YJC630164); 浙江省哲学社会科学规划课题项目 (23NDJC094YB).

†通讯作者. E-mail: chenbozhu@zjut.edu.cn.

## 0 引言

自上世纪 90 年代末以来, 云计算服务从无到有, 目前仍在高速发展. 近年来, 国务院及工信部高度重视云计算产业的发展, 先后多次颁布相关政策规划, 大力支持企业上云, 比如云制造服务平台就为中小微企业上云提供了有力的支持<sup>[1]</sup>. 基础设施即服务 (Infrastructure as a Service, IaaS) 是一种重要的云服务模式. 在激烈的竞争中, IaaS 提供商对云产品的定价与资源容量规划决策显得尤为重要, 不管是全球知名的云服务商 Nirvanix 的破产倒闭, 还是国内小有名气的创宇云的停止服务, 都与其不合理的产品设计、定价及计算机基础设施的盲目投入有关, 优化云服务的定价和容量规划已受到研究者的重视.

为了满足云服务市场的不同需求, IaaS 云服务产品具有多样性, 现货类、按需类和预留类是最常见的 IaaS 云产品<sup>[2-4]</sup>, 它们的区别主要体现在价格和服务水平目标 (Service Level Objectives, SLO) 上. 其中, 现货类产品没有 SLO 规定, 也没有预留资源的保障, 其定价方式为按需付费. 按需类产品虽然没有为用户预先保留资源, 但是用户只要购买了该类产品, 也享受一定的 SLO 保障, 一般也采取按需付费定价. 预留类产品承诺为用户预先保留其预定容量的计算资源, 且有 SLO 保障, 一般采取订阅式定价或者订阅式+按需付费 (即付即用) 混合定价. 按需类和预留类产品的 SLO 的数值往往在 99.9% 以上, 即: IaaS 提供商承诺其单位时间内 (比如每个月) 正常运行时间百分比至少为 99.9%, 一旦无法达成承诺的 SLO 则会启动相应的补偿程序<sup>[5]</sup>.

在制造业领域, 已有学者研究如何通过产能分享平台利用企业空闲产能, 解决资源浪费和分布不均的问题<sup>[6]</sup>. 同样地, IaaS 提供商也面临着云计算资源空闲浪费的问题. Carvalho 等<sup>[7]</sup>分析了谷歌云预留类产品用户使用预留资源的情况, 发现预留给这些用户的资源的平均使用率只有 43%. 若能把空闲的预留资源匀给其他类型产品的用户使用 (即资源复用), 则对于云提供商们增加利润、降低成本、减少社会资源和能源消耗具有深远的意义. 另一方面, 不同计算资源的利用率通常具有互补性, 利用好资源的互补性, 研究其对云产品销售模式选择的影响也具有重要的价值. 在实践中, 各大云服务提供商均充分利用了资源的互补与复用, 为用户提供了品种丰富的 IaaS 云产品. 以亚马逊云为例, 从付费和使用模式的角度, 其提供的 IaaS 云产品可以分为现货类、按需类、预留类等类型, 其中现货类产品用户复用按

需类和预留类产品用户所购买的云计算资源, 同时, 部分 SLO 小于 100% 的按需类和预留类产品也复用这两类产品本身的云计算资源. 从产品组合的角度, 亚马逊云既提供单纯的对象云存储服务 (Amazon S3)、虚拟网络服务 (Amazon VPC) 等独立资源产品, 也提供诸如 Amazon EC2 这种包含处理器、存储、网络等资源在内的组合资源产品, 并且用户可以选择超过 750 个不同的实例 (资源组合), 如此诸多不同的资源组合充分利用了资源之间的互补关系<sup>[8]</sup>.

## 1 文献综述

本文的研究与下述两个领域的文献相关: (1) IaaS 云服务定价与容量规划研究; (2) 一般产品和信息产品的捆绑销售研究.

关于 IaaS 云服务定价与容量规划研究领域, 大量文献使用各种拍卖算法对云服务产品的价格以及资源在不同用户间的分配决策进行优化, 比如 Mashayekhy 等<sup>[9]</sup>、Li 等<sup>[10]</sup>, 这方面的研究与本文的相关性较低, 因此不做展开讨论. 该领域的另一部分文献通过经济分析研究云服务产品的定价与容量规划. 比如, Pal 等<sup>[11]</sup>面向需求确定的多个云服务提供商, 使用排队论研究联合资源定价和服务水平博弈, 以及容量分配博弈. 马滔等<sup>[12]</sup>在构建云服务产品的定价模型时考虑用户交易成本, 研究了云服务产品的最优定价及其定价与用户交易成本之间的关系.

但上述文献未考虑资源的复用. Carvalho 等<sup>[7]</sup>通过分析 Google 云的数据发现云计算资源的使用率通常在 55% 到 75% 之间, 因此, Meng 等<sup>[13]</sup>提出了云提供商出售的资源容量可以高于自身拥有资源的物理容量, 从而实现资源复用. Marshall<sup>[4]</sup>提出云提供商可以通过销售无服务水平目标承诺的机会类云产品实现资源复用. Carvalho<sup>[7]</sup>则在 Marshall<sup>[4]</sup>的基础上提出云提供商可以再增加经济类产品, 该产品与预留类产品相比, 只有在服务水平目标承诺上有区别. Dierks 等<sup>[14]</sup>基于排队论和博弈论给出了现货类产品可以复用预留类产品资源的条件.

然而, 文献当中只有少数的研究是通过建模优化考虑资源复用的 IaaS 云服务产品定价与容量规划问题的. 比如, Toosi 等<sup>[15]</sup>为云计算资源在按需类、预留类和现货类产品之间的分配构建了随机动态规划模型, 并设计了两种求解算法. Xu 等<sup>[16]</sup>为云计算资源在预留类、经济类和现货类产品之间的分配构建了优化模型来联合优化预留类和经济类产品的定价及资源复用率. Zhu 等<sup>[17]</sup>在 Xu 等<sup>[16]</sup>所提模型的基础上, 把固定的罚金修改成阶梯型的罚金函数.

Nunez等<sup>[18]</sup>考虑同时提供预留类和现货类产品的云计算服务运营商的定价和容量分配问题。

在现有文献中,关于一般产品的捆绑销售研究起步较早、数量较多,但关于信息产品的捆绑销售研究数量还不多。对于一般产品的捆绑销售研究,这里只对与本文最相关的文献做阐述, Yan等<sup>[19]</sup>针对一个销售两种互补产品的公司,构建了优化模型寻找最优的捆绑销售定价策略。Yan等<sup>[20]</sup>在Yan等<sup>[19]</sup>的基础上进一步证明了产品间互补系数和广告对捆绑产品销售的影响。本文在市场需求假设和销售策略设定上参考了上述文献。

对于信息产品的捆绑销售研究, Zhang等<sup>[21]</sup>研究了软件盗版现象、云软件与本地软件的互补性等因素对软件提供商捆绑策略的影响。Zhang等<sup>[22]</sup>在没有盗版、存在盗版以及存在盗版但公司做数字版权管理等三种情况下,研究捆绑销售模式的选择。Zhang等<sup>[23]</sup>研究了本地软件与云软件服务的集成问题,通过优化模型给出了软件产品的最优定价、捆绑决策以及集成选择。Cao等<sup>[24]</sup>考察了由一个制造商与一个零售商组成的市场,假设制造商提供两类数字产品,使用博弈方法分析了渠道结构对于数字产品捆绑策略的影响。Hemmati等<sup>[25]</sup>研究了自定价机制下的最优销售策略选择问题。朱晨波等<sup>[26]</sup>针对两种具有互补关系的云计算资源,研究了IaaS提供商的产品捆绑定价决策和销售模式选择,他们没有考虑云计算资源的复用,也没有对云计算资源的容量规划做决策。Mondal等<sup>[27]</sup>在闭环供应链的绿色创新和再制造决策中考虑了产品的捆绑策略。

综上所述,对于考虑资源互补与复用的IaaS云产品捆绑定价与容量规划问题还未有相关研究,本文通过优化数学模型,探索性地研究了该问题。

## 2 模型构建与求解

针对一个IaaS提供商,仅考察单个销售周期,假设其拥有两种云计算资源:资源A和B,且两种资源的使用率存在互补性。IaaS提供商基于每种资源均提供两类云服务产品,分别为预留类与现货类产品。预留类产品的定价为订阅式,其SLO是100%,每单位资源*i*的售价为 $p_i^r, i \in \{A, B\}$ 。假设市场对现货类产品的需求足够大。现货类产品为按需定价,每单位资源*i*收费为 $p_i^s, i \in \{A, B\}$ 。再假设IaaS提供商对资源*i*的容量规划为 $\alpha_i, i \in \{A, B\}$ ,每单位资源*i*的运维成本为 $c_i$ 。对于资源*i*,预留类产品用户的使用率为 $u_i, i \in \{A, B\}$ , $u_i$ 为定义在 $[0, 1]$ 上的、均值为 $\bar{u}_i$ 的随机变量,其概率密度和累积分布函数分别为 $f_i(\cdot)$ 和 $F_i(\cdot)$ 。因为预留类产品的用户对资源的使用

率不会总在100%,所以IaaS提供商考虑对资源进行复用以降本增效,即在运营中没有为预留类产品的用户规划足额的资源容量,这意味着资源*i*在预留类产品上的售出量要低于其容量规划 $\alpha_i$ 。当预留类产品用户对资源的整体使用率较高时,会出现预留类产品用户对资源*i*的使用请求无法被满足的情况,此时,IaaS提供商需要向其支付单位惩罚成本 $Y_i, i \in \{A, B\}$ 。IaaS提供商向预留类产品用户销售资源有三种模式,即:单独销售,捆绑销售和混合销售,向现货类产品用户销售资源的模式只有单独销售。基于上述三种销售模式,本文构建三个模型如下:

(1) 单独销售A、B两种资源。参考Yan等<sup>[19]</sup>的假设,令基于A、B两种资源的预留类产品的市场需求函数分别为: $D_{i1} = 1 - p_i^r - \gamma p_j^r, i, j \in \{A, B\}, i \neq j$ ,其中, $\gamma(0 < \gamma < 1)$ 为A、B两种资源的互补系数。IaaS提供商要做两种资源的预留类产品的定价 $p_A^r, p_B^r$ 以及容量 $\alpha_A, \alpha_B$ 决策。

(2) 捆绑销售A、B两种资源。参考Yan等<sup>[19]</sup>的假设,令基于资源包C的预留类产品的市场需求函数为: $D_{C2} = 1 - p_C^r + \lambda(p_A^r + p_B^r - p_C^r)$ ,其中, $\lambda$ 是捆绑折扣价格敏感系数, $0 < \lambda < 1$ 。IaaS提供商要做资源包C的预留类产品的定价 $p_C^r$ 以及容量 $\alpha_C$ 决策。

(3) 混合销售。该模式下,既可以选择单买资源A或B,也可以选择购买资源包C。参考Yan等<sup>[20]</sup>的假设,令基于资源A、资源B和资源包C的预留类产品的市场需求函数分别为: $D_{i3} = 1 - p_i^r - \gamma p_j^r + \lambda(p_C^r - p_i^r - p_j^r), i, j \in \{A, B\}, i \neq j, D_{C3} = D_{C2}$ 。IaaS提供商需要做两种资源的预留类产品的定价 $p_A^r, p_B^r$ 和容量规划 $\alpha_A, \alpha_B$ 决策,以及资源包C的预留类产品的定价 $p_C^r$ 和容量规划 $\alpha_C$ 决策。

为了方便起见,再假设:(1) A、B两种资源按照1:1的比例捆绑组成资源包C,基于资源包C的预留类产品单位售价为 $p_C^r$ 。(2) 不失一般性,资源的单位惩罚成本、运维成本及现货类产品单价满足以下关系: $0 < p_A^s < c_A < Y_A < 1, 0 < p_B^s < c_B < Y_B < 1$ 。注意到,现货类产品用户使用的资源实际上是卖给预留类产品用户的暂时空闲的资源,因此,假设现货类产品用户支付的单价 $p_A^s$ 和 $p_B^s$ 分别小于资源的单位维护成本 $c_A$ 和 $c_B$ 是合理的(这些资源运维成本已由预留类产品用户支付的使用价格所覆盖)。

$$\begin{aligned} \text{令 } R(i, j, k) = & p_i^s \int_0^{\frac{\alpha_j}{D_{jk}}} (\alpha_j - D_{jk} u_i) f_i(u_i) du_i - \\ & Y_i \int_{\frac{\alpha_j}{D_{jk}}}^1 (D_{jk} u_i - \alpha_j) f_i(u_i) du_i - c_i \alpha_j, \quad i \in \{A, B\}, \end{aligned}$$

$j \in \{A, B, C\}$ ,  $k \in \{1, 2, 3\}$ . 首先考察单独销售  $A$ 、 $B$  两种资源的情形, IaaS 提供商的期望利润如下:

$$\pi_1 = \sum_{x \in A, B} [p_x^r D_{x1} + R(x, x, 1)].$$

对  $\pi_1$  分别关于  $p_A^r$ 、 $p_B^r$ 、 $\alpha_A$  和  $\alpha_B$  求一阶偏导, 再由其 Hessian 矩阵负定, 可得  $\pi_1$  是  $p_A^r$ 、 $p_B^r$ 、 $\alpha_A$  和  $\alpha_B$  的联合凹函数, 令上述一阶偏导等于 0, 可得最优的  $p_A^r$ 、 $p_B^r$ 、 $\alpha_A$  和  $\alpha_B$ . 综上可得命题 1, 其证明见附录 A.

**命题 1** 若 IaaS 提供商选择单独销售模式, 其期望利润  $\pi_1(p_A^r, p_B^r, \alpha_A, \alpha_B)$  是关于  $p_A^r$ 、 $p_B^r$ 、 $\alpha_A$  和  $\alpha_B$  的联合凹函数, 其最优定价和容量规划决策为:

$$p_{i1}^{r*} = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{1 + \gamma} + p_i^s \bar{u}_i + (c_i - p_i^s) \hat{u}_i \right),$$

$$\alpha_{i1}^* = (1 - p_{i1}^{r*} - \gamma p_{j1}^{r*}) F_i^{-1} \left( \frac{Y_i - c_i}{Y_i - p_i^s} \right).$$

其中,  $\hat{u}_i = \frac{\int_{\alpha_{i1}^*/D_{i1}^*}^1 u_i f_i(u_i) du_i}{\int_{\alpha_{i1}^*/D_{i1}^*}^1 f_i(u_i) du_i}$ ,  $\hat{u}_i \in [\frac{\alpha_{i1}^*}{D_{i1}^*}, 1]$ ,  $D_{i1}^* =$

$1 - p_{i1}^{r*} - \gamma p_{j1}^{r*}$ ,  $i, j \in \{A, B\}$ ,  $i \neq j$ . 再考察捆绑销售  $A$ 、 $B$  两种资源的情形, 此时  $D_{C2}$  中的  $p_A^r = p_{A1}^r$ ,  $p_B^r = p_{B1}^r$ , IaaS 提供商的期望利润如下:

$$\pi_2 = p_C^r D_{C2} + \sum_{x \in A, B} R(x, C, 2).$$

对  $\pi_2$  分别关于  $p_C^r$  和  $\alpha_C$  求一阶偏导, 再由其 Hessian 矩阵负定, 可得  $\pi_2$  是  $p_C^r$  和  $\alpha_C$  的联合凹函数, 令上述一阶偏导等于 0, 可得最优的  $p_C^r$  和  $\alpha_C$ . 综上可得命题 2, 其证明见附录 B.

**命题 2** 若 IaaS 提供商选择捆绑销售模式, 其期望利润  $\pi_2(p_C^r, \alpha_C)$  是关于  $p_C^r$  和  $\alpha_C$  的联合凹函数, 其最优定价和容量规划决策为:

$$p_{C2}^{r*} = \frac{1 + \lambda(p_{A1}^{r*} + p_{B1}^{r*})}{2(1 + \lambda)} + \frac{1}{2}(p_A^s \bar{u}_A + p_B^s \bar{u}_B + L),$$

$$\alpha_{C2}^* = \arg_{\alpha_C} \left\{ \sum_{i \in \{A, B\}} [(Y_i - p_i^s) \int_{\frac{\alpha_C}{D_C}}^1 f_i(u_i) du_i + p_i^s - c_i] = 0 \right\}.$$

其中,  $L = \sum_{i \in \{A, B\}} (Y_i - p_i^s) \tilde{u}_i \int_{\frac{\alpha_{C2}^*}{D_{C2}^*}}^1 f_i(u_i) du_i$ ,  $\tilde{u}_i = \frac{\int_{\frac{\alpha_{C2}^*}{D_{C2}^*}}^1 u_i f_i(u_i) du_i}{\int_{\frac{\alpha_{C2}^*}{D_{C2}^*}}^1 f_i(u_i) du_i}$ ,  $\tilde{u}_i \in [\frac{\alpha_{C2}^*}{D_{C2}^*}, 1]$ ,  $i \in \{A, B\}$ ,  $D_{C2}^* = 1 - p_{C2}^{r*} + \lambda(p_{A1}^{r*} + p_{B1}^{r*} - p_{C2}^{r*})$ . 最后考察混

合销售的情形, IaaS 提供商的期望利润如下:

$$\pi_3 = p_C^r D_{C3} + \sum_{x \in A, B} [p_x^r D_{x3} + R(x, x, 3) + R(x, C, 3)].$$

对  $\pi_3$  分别关于  $p_A^r$ 、 $p_B^r$ 、 $p_C^r$ 、 $\alpha_A$ 、 $\alpha_B$  和  $\alpha_C$  求一

阶偏导, 再由其 Hessian 矩阵负定, 可得  $\pi_3$  是  $p_A^r$ 、 $p_B^r$ 、 $p_C^r$ 、 $\alpha_A$ 、 $\alpha_B$  和  $\alpha_C$  的联合凹函数, 令上述一阶偏导等于 0, 可得最优的  $p_A^r$ 、 $p_B^r$ 、 $p_C^r$ 、 $\alpha_A$ 、 $\alpha_B$  和  $\alpha_C$ . 综上可得命题 3.

**命题 3** 若 IaaS 提供商选择混合销售模式, 其期望利润  $\pi_3(p_A^r, p_B^r, p_C^r, \alpha_A, \alpha_B, \alpha_C)$  是关于  $p_A^r$ 、 $p_B^r$ 、 $p_C^r$ 、 $\alpha_A$ 、 $\alpha_B$  和  $\alpha_C$  的联合凹函数, 其最优定价和容量规划决策为:

$$p_{i3}^{r*} = K_1 + \frac{1}{2}(p_i^s \bar{u}_i + (c_i - p_i^s) \hat{u}_i),$$

$$p_{C3}^{r*} = K_2 + \frac{1}{2}(p_A^s \bar{u}_A + p_B^s \bar{u}_B + L),$$

$$\alpha_{i3}^* = (1 + \lambda p_{C3}^{r*} - (1 + \lambda) p_{i3}^{r*} - (\gamma + \lambda) p_{j3}^{r*}) \times F_i^{-1} \left( \frac{Y_i - c_i}{Y_i - p_i^s} \right),$$

$$\alpha_{C3}^* = \arg_{\alpha_C} \left\{ \sum_{i \in \{A, B\}} [(Y_i - p_i^s) \int_{\frac{\alpha_C}{D_C}}^1 f_i(u_i) du_i + p_i^s - c_i] = 0 \right\}.$$

其中,  $i, j \in \{A, B\}$ ,  $i \neq j$ ,  $K_1 = \frac{1 + 2\lambda}{2(3\lambda + \gamma + 1 + \gamma\lambda)}$ ,

$K_2 = \frac{1 + \gamma + 4\lambda}{2(3\lambda + \gamma + 1 + \gamma\lambda)}$ . 令  $D_{C3}^* = 1 - p_{C3}^{r*} +$

$\lambda(p_{A3}^{r*} + p_{B3}^{r*} - p_{C3}^{r*})$ . 由命题 1-3 可得推论 1, 命题 3 和推论 1 的证明见附录 C.

**推论 1**  $\frac{\alpha_{A1}^*}{D_{A1}^*} = \frac{\alpha_{A3}^*}{D_{A3}^*} = \beta_A$ ,  $\frac{\alpha_{B1}^*}{D_{B1}^*} = \frac{\alpha_{B3}^*}{D_{B3}^*} = \beta_B$ ,  $\frac{\alpha_{C2}^*}{D_{C2}^*} = \frac{\alpha_{C3}^*}{D_{C3}^*} = \beta_C$ , 且  $\beta_A, \beta_B, \beta_C$  为常数.

### 3 模型比较与分析

本节比较了三种销售模式, 对 IaaS 提供商的最优定价和容量决策做了分析, 并研究了  $\gamma$  和  $\lambda$  对上述最优决策的影响. 令  $M = p_A^s \bar{u}_A + p_B^s \bar{u}_B$ ,  $N = (c_A - p_A^s) \hat{u}_A + (c_B - p_B^s) \hat{u}_B$ .

**性质 1** 混合销售模式下, 基于资源  $A$ 、 $B$  的预留类产品的最优容量规划不小于单独销售模式下的最优容量规划, 而基于资源包  $C$  的预留类产品的最优容量规划则不大于捆绑销售模式下的最优容量规划, 即:  $\alpha_{A3}^* \geq \alpha_{A1}^*$ ,  $\alpha_{B3}^* \geq \alpha_{B1}^*$ ,  $\alpha_{C3}^* \leq \alpha_{C2}^*$ .

**推论 2.1**  $\alpha_{i3}^* - \alpha_{i1}^*$ ,  $i \in \{A, B\}$  与  $\gamma$  无关, 随着  $\lambda$  的增大而升高.  $\alpha_{C3}^* - \alpha_{C2}^*$  随着  $\gamma$  的增大而升高, 随着  $\lambda$  的增大而降低.

**推论 2.2** 非混合销售模式下的  $\alpha_{A1}^* + \alpha_{B1}^* - \alpha_{C2}^*$  随着  $\lambda$  的增大而降低, 当  $\gamma < \sqrt{\frac{\lambda}{M + N}} - 1$  时,  $\alpha_{A1}^* + \alpha_{B1}^* - \alpha_{C2}^*$  随着  $\gamma$  的增大而升高, 当  $\gamma \geq \sqrt{\frac{\lambda}{M + N}} - 1$  时,  $\alpha_{A1}^* + \alpha_{B1}^* - \alpha_{C2}^*$  随着  $\gamma$  的增大而降低. 混合销售模式下的  $\alpha_{A3}^* + \alpha_{B3}^* - \alpha_{C3}^*$  随着  $\gamma$  的

增大而降低,随着 $\lambda$ 的增大而升高.

**性质 2** 混合销售模式下,基于资源A、B的预留类产品的最优定价低于单独销售模式下的最优定价,而基于资源包C的预留类产品的最优定价则高于捆绑销售模式下的最优定价,即:  $p_{A3}^{r*} < p_{A1}^{r*}$ ,  $p_{B3}^{r*} < p_{B1}^{r*}$ ,  $p_{C3}^{r*} > p_{C2}^{r*}$ .

**推论 3.1**  $p_{i3}^{r*} - p_{i1}^{r*}$ ,  $i \in \{A, B\}$  随着 $\gamma$ 增大而升高,随着 $\lambda$ 增大而降低.  $p_{C3}^{r*} - p_{C2}^{r*}$  随着 $\gamma$ 增大而降低.

**推论 3.2** 非混合销售模式下的捆绑折扣价格  $p_{A1}^{r*} + p_{B1}^{r*} - p_{C2}^{r*}$  随着 $\gamma$ 的增大而降低,当  $\gamma \geq \frac{M+N}{2-M-N}$  时,  $p_{A1}^{r*} + p_{B1}^{r*} - p_{C2}^{r*}$  随着 $\lambda$ 的增大而增大,当  $\gamma < \frac{M+N}{2-M-N}$  时,  $p_{A1}^{r*} + p_{B1}^{r*} - p_{C2}^{r*}$  随着 $\lambda$ 的增大而降低. 混合销售模式下的捆绑折扣价格  $p_{A3}^{r*} + p_{B3}^{r*} - p_{C3}^{r*}$  随着 $\gamma$ 、 $\lambda$ 的增大而降低.

性质 1 和性质 2 的证明分别见附录 D 和附录 F, 推论 2.1, 2.2 和推论 3.1, 3.2 的证明分别见附录 E 和附录 G. 由性质 1 和性质 2, 可以分析得到评述 1. 而由推论 2.1, 2.2 和推论 3.1, 3.2, 可以分析得到评述 2.

**评述 1** 捆绑产品用户在捆绑销售模式下获益最大, 非捆绑产品用户在混合销售模式下获益最大, 因此, 捆绑产品用户最偏好捆绑销售模式, 非捆绑产品用户最偏好混合销售模式.

**评述 2** 若云计算资源之间的互补性减弱, 则云产品捆绑销售的价格折扣反而增大, 捆绑产品用户在所偏好的捆绑销售模式下的获益增大, 非捆绑产品用户在所偏好的混合销售模式下的获益也增大.

由性质 2 有  $M+N < 1$ . 再分析 $\gamma$ 和 $\lambda$ 对 IaaS 提供商的最优定价和容量规划决策的影响, 结果归纳在性质 3 和性质 4 中, 其证明分别见附录 H 和附录 I.

**性质 3** 在单独销售、捆绑销售和混合销售三种销售模式下, 只有混合销售模式下的基于资源包 C 的预留类产品的最优容量规划 ( $\alpha_{C3}^*$ ) 与 $\gamma$ 无关, 其他所有预留类产品的最优销售价格 ( $p_{A1}^{r*}$ ,  $p_{B1}^{r*}$ ,  $p_{C2}^{r*}$ ,  $p_{A3}^{r*}$ ,  $p_{B3}^{r*}$ ,  $p_{C3}^{r*}$ ) 和最优容量规划 ( $\alpha_{A1}^*$ ,  $\alpha_{B1}^*$ ,  $\alpha_{C2}^*$ ,  $\alpha_{A3}^*$ ,  $\alpha_{B3}^*$ ) 均随着 $\gamma$ 的增大而降低.

由性质 3,  $\gamma$ 越大, 虽然产品的捆绑折扣越不明显, 但几乎所有捆绑和非捆绑产品的价格都越低, 它们的需求(容量规划)也越低, 原因在于较高的 $\gamma$ 会导致产品的需求下降, 为了避免需求的大幅下降, 各产品会竞相降价以期刺激需求上升, 但是, 最终 $\gamma$ 上升对需求下降的影响仍然高于降价对需求提升的影响. 有意思的是, 在混合销售模式下, 基于资源包 C 的预留类产品的最终需求(最优容量规划)与 $\gamma$ 无关.

**性质 4** 单独销售模式下的基于资源 A 和资源 B 的预留类产品的最优销售价格 ( $p_{A1}^{r*}$ ,  $p_{B1}^{r*}$ ) 和最优容量规划 ( $\alpha_{A1}^*$ ,  $\alpha_{B1}^*$ ) 均与 $\lambda$ 无关. 在捆绑销售模式下, 基于资源包 C 的预留类产品的最优容量规划 ( $\alpha_{C2}^*$ ) 随着 $\lambda$ 的增大而升高, 当  $\gamma < \frac{M+N}{2-M-N}$  时, 最优销售价格 ( $p_{C2}^{r*}$ ) 随着 $\lambda$ 的增大而升高, 当  $\gamma \geq \frac{M+N}{2-M-N}$  时, 最优销售价格 ( $p_{C2}^{r*}$ ) 随着 $\lambda$ 的增大而降低. 在混合销售模式下, 基于资源 A 和资源 B 的预留类产品的最优销售价格 ( $p_{A3}^{r*}$ ,  $p_{B3}^{r*}$ ) 随着 $\lambda$ 的增大而降低, 最优容量规划 ( $\alpha_{A3}^*$ ,  $\alpha_{B3}^*$ ) 随着 $\lambda$ 的增大而升高, 基于资源包 C 的预留类产品的最优销售价格 ( $p_{C3}^{r*}$ ) 随着 $\lambda$ 的增大而升高, 最优容量规划 ( $\alpha_{C3}^*$ ) 随着 $\lambda$ 的增大而降低.

由性质 4, 因为在单独销售模式下不存在捆绑产品, 因此, 此时非捆绑产品的定价和容量规划不受 $\lambda$ 的影响. 在捆绑销售模式下,  $\lambda$ 越大, 捆绑产品的需求(容量规划)也越大, 这是显然的, 因为此时越大的 $\lambda$ 使用户对捆绑折扣价格越敏感, 捆绑折扣越发有利于刺激需求. 在捆绑销售模式下, 捆绑产品的定价与捆绑折扣价格有关, 捆绑折扣价格 ( $p_{A1}^{r*} + p_{B1}^{r*} - p_{C2}^{r*}$ ) 在  $\gamma < \frac{M+N}{2-M-N}$  时, 随着 $\lambda$ 增大而降低, 这伴随着需求  $D_{C2}^*$  的下降和价格  $p_{C2}^{r*}$  的升高; 反之, 捆绑折扣价格在  $\gamma \geq \frac{M+N}{2-M-N}$  时, 随着 $\lambda$ 增大而升高, 这伴随着需求  $D_{C2}^*$  的上升和价格  $p_{C2}^{r*}$  的降低. 在混合销售模式下,  $\lambda$ 越大, 非捆绑产品的定价越低、容量规划越大, 而捆绑产品的定价越高、容量规划越小, 原因当捆绑折扣价格敏感系数变大时, 非捆绑产品用户需求会变小, 而捆绑产品用户需求则会变大, IaaS 提供商对此的应对措施是: 降低非捆绑产品价格以刺激其需求, 提高捆绑产品价格以平抑其需求, 同时, 该措施引起捆绑折扣变小, 也促使非捆绑产品需求变大, 捆绑产品需求变小, 从而影响到非捆绑产品的容量规划变大, 捆绑产品的容量规划变小.

#### 4 基于特例的分析

由于模型复杂, 上一节未比较不同模式下的利润. 本节假设  $u_A$  和  $u_B$  是  $[0, 1]$  上的均匀分布, 比较分析 IaaS 提供商最优决策与利润. 令  $\theta_A = \frac{Y_A - c_A}{Y_A - p_A^s}$ ,  $\theta_B = \frac{Y_B - c_B}{Y_B - p_B^s}$ ,  $\theta_C = \frac{Y_A + Y_B - c_A - c_B}{Y_A + Y_B - p_A^s - p_B^s}$ ,  $T_A = Y_A - \theta_A(Y_A - c_A)$ ,  $T_B = Y_B - \theta_B(Y_B - c_B)$ ,  $T_C = Y_A + Y_B - \theta_C(Y_A + Y_B - c_A - c_B)$ . 表 1 总结了特例下的最优定价与容量规划决策, 并得到利润表达式如下:

表1 三种销售模式下 IaaS 提供商的预留类产品最优定价与容量规划决策 ( $u_A, u_B \sim U[0, 1]$ )

	销售模式		
	单独销售	捆绑销售	混合销售
$p_A^r$	$\frac{1}{2(1+\gamma)} + \frac{1}{4}T_A$	/	$K_1 + \frac{1}{4}T_A$
$p_B^r$	$\frac{1}{2(1+\gamma)} + \frac{1}{4}T_B$	/	$K_1 + \frac{1}{4}T_B$
$p_C^r$	/	$\frac{1}{2(1+\lambda)}(1 + \lambda(\frac{1}{1+\gamma} + \frac{1}{4}T_A + \frac{1}{4}T_B) + \frac{1+\lambda}{2}T_C)$	$K_2 + \frac{1}{4}T_C$
$\alpha_A$	$\theta_A(\frac{1}{2} - \frac{1}{4}T_A - \frac{\gamma}{4}T_B)$	/	$\theta_A(\frac{1}{2} - \frac{1+\lambda}{4}T_A - \frac{\gamma+\lambda}{4}T_B + \frac{\lambda}{4}T_C)$
$\alpha_B$	$\theta_B(\frac{1}{2} - \frac{\gamma}{4}T_A - \frac{1}{4}T_B)$	/	$\theta_B(\frac{1}{2} - \frac{\gamma+\lambda}{4}T_A - \frac{1+\lambda}{4}T_B + \frac{\lambda}{4}T_C)$
$\alpha_C$	/	$\theta_C(\frac{1}{2} + \frac{\lambda}{2}(\frac{1}{1+\gamma} + \frac{1}{4}T_A + \frac{1}{4}T_B) - \frac{1+\lambda}{4}T_C)$	$\theta_C(\frac{1}{2} + \frac{\lambda}{4}(T_A + T_B) - \frac{1+\lambda}{4}T_C)$

## (1) 单独销售模式

$$\pi_1^* = [\frac{1}{2(1+\gamma)} - \frac{1}{4}T_A][\frac{1}{2} - \frac{1}{4}T_A - \frac{\gamma}{4}T_B] + [\frac{1}{2(1+\gamma)} - \frac{1}{4}T_B][\frac{1}{2} - \frac{1}{4}T_B - \frac{\gamma}{4}T_A],$$

## (2) 捆绑销售模式

$$\pi_2^* = \frac{[1 + \lambda(\frac{1}{1+\gamma} + \frac{1}{4}T_A + \frac{1}{4}T_B) - \frac{1+\lambda}{2}T_C]^2}{4(1+\lambda)},$$

## (3) 混合销售模式

$$\begin{aligned} \pi_3^* &= p_{A3}^{r*}(\frac{1}{2} - \frac{1+\lambda}{4}T_A - \frac{\gamma+\lambda}{4}T_B + \frac{\lambda}{4}T_C) + \\ & p_{B3}^{r*}(\frac{1}{2} - \frac{\gamma+\lambda}{4}T_A - \frac{1+\lambda}{4}T_B + \frac{\lambda}{4}T_C) + \\ & p_{C3}^{r*}(\frac{1}{2} + \frac{\lambda}{4}(T_A + T_B) - \frac{1+\lambda}{4}T_C). \end{aligned}$$

基于表1, 可以比较 IaaS 提供商在三种销售模式下对预留类产品的最优定价与容量规划, 结果如性质5和性质6所述, 其证明见附录J和附录K, 可见其结论与第3节的性质1和性质2的结论一致.

**性质5** 若  $u_A, u_B \sim U[0, 1]$ , 混合销售模式下, 基于资源A、B的预留类产品的最优容量规划大于单独销售模式下的最优容量规划, 而基于资源包C的预留类产品的最优容量规划小于捆绑销售模式下的最优容量规划, 即:  $\alpha_{A3}^* > \alpha_{A1}^*$ ,  $\alpha_{B3}^* > \alpha_{B1}^*$ ,  $\alpha_{C3}^* < \alpha_{C2}^*$ .

**性质6** 若  $u_A, u_B \sim U[0, 1]$ , 在混合销售模式下, 基于资源A、B的预留类产品的最优定价低于单独销售模式下的最优定价, 而基于资源包C的预留类产品的最优定价高于捆绑销售模式下的最优定价, 即:  $p_{A3}^{r*} < p_{A1}^{r*}$ ,  $p_{B3}^{r*} < p_{B1}^{r*}$ ,  $p_{C3}^{r*} > p_{C2}^{r*}$ .

为了比较三种模式下 IaaS 提供商的利润情况, 进一步假设资源A和B对称, 即: 除了  $u_A, u_B \sim$

$U[0, 1]$ 之外, 还有  $Y_A = Y_B = Y$ ,  $c_A = c_B = c$ ,  $p_A^s = p_B^s = p^s$ , 因此  $T_A = T_B = T$ ,  $T_C = 2T$ . 若资源A和B对称, 三种模式下的利润比较结果如性质7和性质8所述, 其证明见附录L和附录M.

**性质7** 若  $u_A, u_B \sim U[0, 1]$ , 同时资源A和B是对称的,  $\exists \gamma_1 \in (0, 1)$ ,

(1) 当  $\gamma \in (0, \gamma_1)$ 时, 单独销售模式下的利润高于捆绑销售模式下的利润, 即:  $\pi_1^* > \pi_2^*$ ;

(2) 当  $\gamma \in [\gamma_1, 1)$ 时, 则  $\exists \lambda_1 \in (0, 1)$ , 使得当  $\lambda < \lambda_1$ 时,  $\pi_1^* > \pi_2^*$ ; 当  $\lambda \geq \lambda_1$ 时,  $\pi_1^* \leq \pi_2^*$ .

其中,  $\gamma_1$ 是  $\frac{\gamma^2}{8(1+\gamma)^2} + \frac{T}{8} - \frac{3T}{8(1+\gamma)} + (\frac{9}{32} - \frac{1+\gamma}{8})T^2 = 0$ 的解,  $\lambda_1$ 是  $\frac{1}{4(1+\lambda)}(1 + \lambda(\frac{1}{1+\gamma_1} + \frac{T}{2}) - (1+\lambda)T)^2 = (\frac{1}{1+\gamma_1} - \frac{T}{2})(\frac{1}{2} - \frac{(1+\gamma_1)T}{4})$ 的解. 性质7说明捆绑销售模式下利润高于单独销售模式下利润的情况只会发生在  $\gamma$ 和  $\lambda$ 都比较大的时候, 否则, 单独销售模式下的利润会高于捆绑销售模式下的利润.

**性质8** 若  $u_A, u_B \sim U[0, 1]$ 且资源A和B对称, 混合销售模式下 IaaS 提供商的利润比单独销售和捆绑销售模式下的利润都要高, 即:  $\pi_3^* > \pi_1^*$ ,  $\pi_3^* > \pi_2^*$ .

性质8表明, 在三种模式中, IaaS 提供商利润最大的为混合销售模式. 由性质7和性质8, 有评述3如下.

**评述3** 对 IaaS 提供商而言, 选择混合销售模式能实现最大利润, 在只能选择非混合销售模式时, 若资源间互补性较强、用户对捆绑折扣价格较敏感, 则选择捆绑销售模式, 否则, 选择单独销售模式.

## 5 资源复用对定价和利润的影响

本节探讨资源复用对预留类产品定价和 IaaS 提

供商利润的影响. 朱晨波等<sup>[26]</sup>研究了不考虑资源复用的情形, 此时, 单独销售模式下的最优价格为 $\dot{p}_{i1}^{r*}$ , 最优期望利润为 $\dot{\pi}_1^*$ , 对应的需求为 $\dot{D}_{i1}^*$ ,  $i \in \{A, B\}$ ; 捆绑销售模式下的最优价格为 $\dot{p}_{C2}^{r*}$ , 最优期望利润为 $\dot{\pi}_2^*$ , 对应的需求为 $\dot{D}_{C2}^*$ ; 混合销售模式下的最优价格为 $\dot{p}_{i3}^{r*}$ , 最优期望利润为 $\dot{\pi}_3^*$ , 对应的需求为 $\dot{D}_{i3}^*$ ,  $i \in \{A, B, C\}$ . 上述最优价格与期望利润及需求的表达式可见朱晨波等<sup>[26]</sup>或附录 N. 接下来比较分析考虑资源复用和不考虑资源复用下的最优价格决策和相应需求, 可得性质 9 和性质 10, 其证明见附录 O.

**性质 9** 考虑资源复用的预留类产品的最优定价总是低于不考虑资源复用时的最优定价, 即:  $p_{A1}^{r*} < \dot{p}_{A1}^{r*}$ ,  $p_{B1}^{r*} < \dot{p}_{B1}^{r*}$ ,  $p_{C2}^{r*} < \dot{p}_{C2}^{r*}$ ,  $p_{A3}^{r*} < \dot{p}_{A3}^{r*}$ ,  $p_{B3}^{r*} < \dot{p}_{B3}^{r*}$ ,  $p_{C3}^{r*} < \dot{p}_{C3}^{r*}$ .

**性质 10** 针对基于资源 A 和 B 的预留类产品, 考虑资源复用时的需求总是高于不考虑资源复用时的需求, 即:  $D_{A1}^* > \dot{D}_{A1}^*$ ,  $D_{B1}^* > \dot{D}_{B1}^*$ ,  $D_{A3}^* > \dot{D}_{A3}^*$ ,  $D_{B3}^* > \dot{D}_{B3}^*$ . 针对基于资源包 C 的预留类产品, 若  $\beta_A = \beta_B = \beta_C$ , 则考虑资源复用时的需求也是高于不考虑资源复用时的需求, 即:  $D_{C2}^* > \dot{D}_{C2}^*$ ,  $D_{C3}^* > \dot{D}_{C3}^*$ .

最后, 在第 4 节所提特例的背景下, 比较分析考虑资源复用和不考虑资源复用下的最优期望利润情况, 可得性质 11, 其证明见附录 P.

**性质 11** 若  $u_A, u_B \sim U[0, 1]$  且资源 A 和 B 对称, 则考虑资源复用时的期望利润高于不考虑资源复用时的期望利润, 即:  $\pi_1^* > \dot{\pi}_1^*$ ,  $\pi_2^* > \dot{\pi}_2^*$ ,  $\pi_3^* > \dot{\pi}_3^*$ .

性质 9-11 表明, 与不考虑资源复用的情形相比, IaaS 提供商在考虑资源复用时提供的预留类产品的价格更低, 从而激发需求增大, 有利于用户, IaaS 提供商也能获得更高的利润. 由此, 有评述 4 如下.

**评述 4** 资源复用能使预留类产品定价更低、需求更大, 也能使 IaaS 提供商利润更高, 因此资源复

用能使 IaaS 提供商和用户实现双赢.

## 6 数值算例

### 6.1 最优决策及利润的比较分析

本节通过算例比较 IaaS 提供商的最优决策及利润. Carvalho 等<sup>[7]</sup>指出 Amazon EC2 现货类产品的单价在 0.154 到 0.599 之间, Carvalho 等<sup>[7]</sup>和 Zhu 等<sup>[17]</sup>把单位惩罚成本设在 0.3 和 0.5 两个值. 以上述文献的数据为基础, 我们做了些调整, 对  $\{p_A^s, Y_A, c_A\}$  赋以 4 组数值:  $\{0.10, 0.20, 0.40\}$ ,  $\{0.15, 0.25, 0.50\}$ ,  $\{0.20, 0.40, 0.70\}$ ,  $\{0.30, 0.45, 0.80\}$ , 对  $\{p_B^s, Y_B, c_B\}$  也赋以 4 组数值:  $\{0.05, 0.15, 0.30\}$ ,  $\{0.10, 0.25, 0.45\}$ ,  $\{0.25, 0.40, 0.65\}$ ,  $\{0.25, 0.50, 0.90\}$ , 对  $\gamma$  赋以 2 个值:  $\{0.20, 0.90\}$ , 对  $\lambda$  也赋以 2 个值:  $\{0.30, 0.85\}$ . 再假设预留类产品用户的资源利用率都为  $[0, 1]$  上的截断正态分布. Carvalho 等<sup>[7]</sup>的调查显示谷歌云的计算资源利用率处于 40% ~ 60% 之间, 因此, 本节将预留类产品资源利用率的均值设定在  $[0.40, 0.60]$  的范围内, 其具体设定如表 2 所示:

表2  $u_i, i = A, B$  的概率分布

资源 A	资源 B
$u_A \sim N(0.60, 0.15^2)$	$u_B \sim N(0.40, 0.10^2)$
$u_A \sim N(0.50, 0.10^2)$	$u_B \sim N(0.45, 0.05^2)$

上述参数值给出了  $4 \times 4 \times 2 \times 2 \times 2 \times 2 = 256$  个场景, 基于这些场景, 针对考虑资源互补与复用的 IaaS 云产品捆绑定价与容量规划问题, 本节通过数值试验, 得到的结果如表 3 所示, 可以得到以下结论:

(1)  $\alpha_{A1}^* < \alpha_{A3}^*$ ,  $\alpha_{B1}^* < \alpha_{B3}^*$ ,  $\alpha_{C2}^* > \alpha_{C3}^*$  在所有场景下均成立, 与性质 1 的结论一致,  $\alpha_{A3}^* - \alpha_{A1}^*$  的最小值为 0.0001, 最大值为 0.0071, 平均值为 0.0018;  $\alpha_{B3}^* - \alpha_{B1}^*$  的最小值为 0.0001, 最大值为 0.0045, 平均值为 0.0012;  $\alpha_{C2}^* - \alpha_{C3}^*$  的最小值为

表3 考虑资源复用时预留类产品的定价、容量规划和利润的数值结果

销售模式		$p_A^r$	$p_B^r$	$p_C^r$	$\alpha_A$	$\alpha_B$	$\alpha_C$	$D_A$	$D_B$	$D_C$	$\pi$
单独销售	均值	0.4386	0.4149	/	0.2175	0.1647	/	0.3601	0.3707	/	0.1917
	最大值	0.5647	0.5354	/	0.2824	0.2095	/	0.4376	0.4541	/	0.3314
	最小值	0.3186	0.2980	/	0.1489	0.1092	/	0.2452	0.2481	/	0.0641
捆绑销售	均值	/	/	0.6532	/	/	0.2398	/	/	0.4642	0.1405
	最大值	/	/	0.8008	/	/	0.3916	/	/	0.7223	0.2820
	最小值	/	/	0.5039	/	/	0.1344	/	/	0.2578	0.0511
混合销售	均值	0.4072	0.3836	0.7174	0.2193	0.1660	0.1646	0.3629	0.3735	0.3187	0.2852
	最大值	0.5184	0.4891	0.8646	0.2855	0.2103	0.2169	0.4390	0.4563	0.4075	0.4794
	最小值	0.3143	0.2937	0.5969	0.1491	0.1108	0.1109	0.2485	0.2514	0.2127	0.1133

0.0203, 最大值为 0.1769, 平均值为 0.0752, 与非捆绑产品相比, 不同销售模式对捆绑产品的容量规划影响更大. 由  $\alpha_i$  和  $D_i (i \in \{A, B, C\})$  的均值, 可以求得  $\beta_A$  的均值为 0.6040,  $\beta_B$  的均值为 0.4444,  $\beta_C$  的均值为 0.5165, 可见复用资源可以节约大量的资源. 资源容量规划和需求的均值、最大值和最小值结果见表 3 的 6-11 列.

(2) 在所有场景下,  $p_{A3}^{r*} < p_{A1}^{r*}$ ,  $p_{B3}^{r*} < p_{B1}^{r*}$ ,  $p_{C3}^{r*} > p_{C2}^{r*}$  均成立, 与性质 2 的结论一致,  $p_{A1}^{r*} - p_{A3}^{r*}$  和  $p_{B1}^{r*} - p_{B3}^{r*}$  的最小值为 0.0026, 最大值为 0.0723, 平均值为 0.0314;  $p_{C3}^{r*} - p_{C2}^{r*}$  的最小值为 0.0288, 最大值为 0.1043, 平均值为 0.0641, 同样地, 与非捆绑产品相比, 不同销售模式对捆绑产品的定价影响更大. 产品定价的均值、最大值和最小值结果见表 3 的 3-5 列.

(3) 在 256 个场景下, 有 34 个场景出现  $\pi_1^* < \pi_2^*$ , 在这 34 个场景下, 均有  $\gamma = 0.90$ ,  $\lambda = 0.85$ ; 其余 222 个场景则是  $\pi_1^* > \pi_2^*$ , 在这 222 个场景下,  $\gamma$  的均值为 0.4964,  $\lambda$  的均值为 0.5329, 可见出现  $\pi_1^* < \pi_2^*$  的场景均有较大数值的  $\gamma$  和  $\lambda$ . 在所有场景下,  $\pi_1^* - \pi_2^*$  的最小值为 -0.0093, 最大值为 0.1326, 平均值为 0.0512. 在所有场景下,  $\pi_2^* < \pi_3^*$ ,  $\pi_1^* < \pi_3^*$  均成立,  $\pi_3^* - \pi_2^*$  的最小值为 0.0569, 最大值为 0.2722, 平均值为 0.1447;  $\pi_3^* - \pi_1^*$  的最小值为 0.0206, 最大值为 0.1663, 平均值为 0.0935. 上述在一般情形下的数值结论与特例下的性质 7 和性质 8 的结论一致. IaaS 提供商期望利润的均值、最大值和最小值结果见表 3 的第 12 列.

## 6.2 $\gamma$ 和 $\lambda$ 对利润的影响

最后, 我们考察参数  $\gamma$  和  $\lambda$  对 IaaS 提供商利润的影响. 我们验证了  $\gamma$  和  $\lambda$  对利润的影响结果在 256 个场景中都是一致的, 因此, 我们任意选择了 256 个场景中的一组参数 ( $p_A^s = 0.2$ ,  $c_A = 0.4$ ,  $Y_A = 0.7$ ,  $p_B^s = 0.1$ ,  $c_B = 0.25$ ,  $Y_B = 0.45$ ) 作为 6.2 节的固定参数. 因为  $\gamma$  和  $\lambda$  对 IaaS 提供商最优决策的影响在性质 3 和性质 4 中已有解析的分析结论, 所以在数值算例中只研究  $\gamma$  (固定  $\lambda = 0.9$ ) 和  $\lambda$  (固定  $\gamma = 0.6$ ) 对 IaaS 提供商利润的影响, 结果见图 1 和图 2: 不管在哪种销售模式下, IaaS 提供商的利润均随着  $\gamma$  的增大而单调下降. 另一方面, 在单独销售模式下, IaaS 提供商的利润不受  $\lambda$  的影响, 但是, 捆绑销售模式下的利润随着  $\lambda$  的增大而增大, 而混合销售模式下的利润变化则正好相反, 不过, 混合销售模式下的利润一直是三种销售模式中最大的. 由此, 有评述 5 如下.

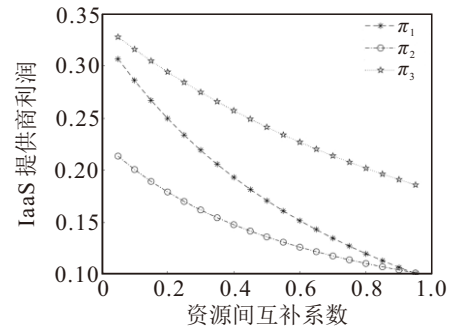


图1 资源间互补系数  $\gamma$  对 IaaS 提供商利润的影响

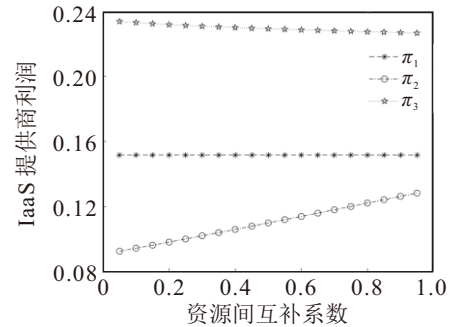


图2 捆绑折扣价格敏感系数  $\lambda$  对 IaaS 提供商利润的影响

**评述 5** 资源间互补性越弱, IaaS 提供商的利润越大, 混合销售模式的优势越不明显.

## 7 结论

本文研究了考虑资源互补与复用的 IaaS 云产品捆绑定价与容量规划问题, 研究表明: (1) 非捆绑产品在混合销售模式下的定价低于在单独销售模式下的定价, 从而在混合销售模式下的容量规划 (市场需求) 高于在单独销售模式下的容量规划 (市场需求); 捆绑产品在捆绑销售模式下的定价低于在混合销售模式下的定价, 从而在捆绑销售模式下的容量规划 (市场需求) 高于在混合销售模式下的容量规划 (市场需求). (2) 从 IaaS 提供商角度来看, 选择混合销售模式能实现最大利润, 在只能选择非混合销售模式时, 若资源间互补性较强、用户对捆绑折扣价格较敏感, 则选择捆绑销售模式, 否则, 选择单独销售模式. 一般而言, 捆绑产品需要与非捆绑产品同时销售才能为 IaaS 提供商带来更高的利润, 只销售捆绑产品而不同时销售非捆绑产品虽然有利于捆绑产品用户, 但是对于 IaaS 提供商而言, 在多数情况下不如选择单独销售非捆绑产品. (3) 从用户角度来看, 捆绑产品用户获益最大的是捆绑销售模式, 非捆绑产品用户获益最大的是混合销售模式, 所以, 捆绑销售模式是捆绑产品用户的最优选择, 混合销售模式是非捆绑产品用户的最优选择. (4) 随着资源之间的互补性减弱, IaaS 提供商的盈利增大, 混合销售的盈利优势更加不明显, 而捆绑销售的价格折扣则更加明显, 捆



绑用户更加青睐捆绑销售模式,而非捆绑用户则更加青睐混合销售模式;随着用户对捆绑折扣价格的敏感性增强,IaaS 提供商在混合销售和捆绑销售模式下的盈利差距会缩小,非捆绑产品用户会更倾向于选择混合销售模式。(5) 资源复用能使预留类产品定价更低、需求更大,也能使 IaaS 提供商利润更高,因此资源复用能使 IaaS 提供商和用户实现双赢。

#### 参考文献 (References)

- [1] 李凯,肖巍,朱晓曦. 基于云平台的共享制造模式定价策略[J]. 控制与决策, 2022, 37(4): 1056-1066.  
(Li K, Xiao W, Zhu X. Pricing strategies for sharing manufacturing model based on cloud platform[J]. Control and Decision, 2022, 37(4): 1056-1066.)
- [2] Amazon. Amazon EC2 定价 [EB/OL]. [2024-9-15]. <https://aws.amazon.com/cn/ec2/pricing/>.
- [3] 刘征驰,李慧子,马滔. 用户适应度、交易成本与云服务混合定价[J]. 系统工程理论与实践, 2019, 39(3): 749-765.  
(Liu Z C, Li H Z, Ma T. User fitness, transaction cost and the mixed pricing scheme of cloud services[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2019, 39(3): 749-765.)
- [4] Marshall P, Keahey K, Freeman T. Improving utilization of infrastructure clouds[C]. 2011 11th IEEE/ACM International Symposium on Cluster, Cloud and Grid Computing. Newport Beach, 2011: 205-214.
- [5] Amazon. Amazon 计算服务水平协议 [EB/OL]. [2024-9-15]. <https://aws.amazon.com/cn/compute/sla/>.
- [6] 赵道致,周仁杰,杨爽. 考虑服务水平的产能分享平台定价策略[J]. 控制与决策, 2023, 38(3): 805-814.  
(Zhao D Z, Zhou R J, Yang S. Pricing strategy of capacity sharing platform considering service level[J]. Control and Decision, 2023, 38(3): 805-814.)
- [7] Carvalho M, Cirne W, Brasileiro F, et al. Long-term SLOs for reclaimed cloud computing resources[C]. Proceedings of the ACM Symposium on Cloud Computing. Seattle, 2014: 1-13.
- [8] Amazon. 亚马逊云官网 [EB/OL]. [2024-9-15]. <https://aws.amazon.com/cn/>.
- [9] Mashayekhy L, Nejad M M, Grosu D, et al. An online mechanism for resource allocation and pricing in clouds[J]. IEEE Transactions on Computers, 2016, 65(4): 1172-1184.
- [10] Li S Y, Huang J W, Cheng B. Resource pricing and demand allocation for revenue maximization in IaaS clouds: A market-oriented approach[J]. IEEE Transactions on Network and Service Management, 2021, 18(3): 3460-3475.
- [11] Pal R, Hui P. Economic models for cloud service markets: Pricing and capacity planning[J]. Theoretical Computer Science, 2013, 496: 113-124.
- [12] 马滔,刘征驰,周莎. 交易成本、不确定性与云服务定价机制[J]. 系统工程理论与实践, 2023, 43(4): 1101-1115.  
(Ma T, Liu Z C, Zhou S. Transaction cost, uncertainty and cloud services pricing mechanism[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2023, 43(4): 1101-1115.)
- [13] Meng X Q, Isci C, Kephart J, et al. Efficient resource provisioning in compute clouds via VM multiplexing[C]. Proceedings of the 7th international conference on Autonomic computing. Washington DC, 2010: 11-20.
- [14] Dierks L, Seuken S. Cloud pricing: The spot market strikes back[J]. Management Science, 2022, 68(1): 105-122.
- [15] Toosi A N, Vanmechelen K, Ramamohanarao K, et al. Revenue maximization with optimal capacity control in infrastructure as a service cloud markets[J]. IEEE Transactions on Cloud Computing, 2015, 3(3): 261-274.
- [16] Xu J, Zhu C B. Optimal pricing and capacity planning of a new economy cloud computing service class[C]. 2015 International Conference on Cloud and Autonomic Computing. Boston, 2015: 149-157.
- [17] Zhu C B, Shen H Y, Xu J. An economic analysis of cloud computing service using reclaimed resources[C]. 2019 IEEE 12th International Conference on Cloud Computing. Milan, 2019: 50-57.
- [18] Nunez M A, Bai X, Du L N. Leveraging slack capacity in IaaS contract cloud services[J]. Production and Operations Management, 2021, 30(4): 883-901.
- [19] Yan R L, Bandyopadhyay S. The profit benefits of bundle pricing of complementary products[J]. Journal of Retailing and Consumer Services, 2011, 18(4): 355-361.
- [20] Yan R L, Myers C, Wang J, et al. Bundling products to success: The influence of complementarity and advertising[J]. Journal of Retailing and Consumer Services, 2014, 21(1): 48-53.
- [21] Zhang X, Yue W T, Hui W. Software piracy and bundling in the cloud-based software era[J]. Information Technology & People, 2019, 32(4): 1085-1122.
- [22] Zhang X, Yue W T, Hui W. Bundling cloud software to fight piracy: An economic analysis[J]. Internet Research, 2019, 30(1): 191-241.
- [23] Zhang X, Yue W. Integration of on-premises and cloud-based software: The product bundling perspective[J]. Journal of the Association for Information Systems, 2020, 21: 1507-1551.
- [24] Cao Q N, Geng X J, Zhang J. Impact of channel structure on a manufacturer's bundling decision with an application to digital goods[J]. Production and Operations Management, 2022, 31(4): 1679-1697.
- [25] Hemmati M, Fatemi Ghomi S M T, Sajadieh M S. Separate and bundling selling strategies for complementary products in a participative pricing mechanism[J]. Computers & Industrial Engineering, 2023, 177: 109018.
- [26] 朱晨波,胡莹,童骏. 基于资源互补的 IaaS 云产品捆绑定价决策[J]. 上海管理科学, 2024, 2024(4): 82-89.

((Zhu C, Hu Y, Tong J. Bundle pricing of IaaS cloud products with resource complementarity[J]. [Shanghai Management Science](#), 2024, 2024(4): 82-89.)

- [27] Mondal C, Giri B C. Pricing and bundling strategies for complementary products in a closed-loop green supply chain under manufacturers' different behaviors[J]. [Expert Systems with Applications](#), 2024, 238: 121960.

#### 作者简介

朱晨波 (1983–), 男, 副教授, 博士生导师, 从事数字经济运营管理、物流与供应链管理、优化算法等研究, E-mail: [chenbozhu@zjut.edu.cn](mailto:chenbozhu@zjut.edu.cn);

胡莹 (1999–), 女, 硕士, 从事物流与供应链管理的研究, E-mail: [hying0227@163.com](mailto:hying0227@163.com);

童骏 (1983–), 男, 讲师, 博士生导师, 从事随机优化、物流与供应链管理的研究, E-mail: [tongjun20@zjut.edu.cn](mailto:tongjun20@zjut.edu.cn).