

PPP 模式下地下综合管廊入廊定价激励机制研究\*

韦海民,刘武岩

(西安建筑科技大学 管理学院,西安 710055)

**摘 要:**地下综合管廊建设难以推广的主要原因在于前期需要巨大的建设投资和后期需要较高的运营成本。在分析 PPP 模式相关理论和地下综合管廊相关知识的基础上,提出了适合于我国地下综合管廊建设的 PPP 融资模式,即基于 URM(使用者付费模式)的建设期补偿模式和运营期补偿模式,予以解决前期投资需求问题。继而选取了运营期补偿模式作为研究基础,运用委托-代理理论作为理论支撑,设计了一种激励相容的入廊定价机制,予以解决运营收费问题。该机制的实现,不但可以维护管线单位和消费大众的利益,还可以在满足投资方利润的基础上激励投资方真实申报成本,降低管廊运营成本,减轻政府财政负担。

**关键词:**PPP 模式;地下综合管廊;定价管制;激励机制

中图分类号:O319.56      文献标识码:A      文章编号:1673-0836(2018)03-0585-10

Incentive Mechanism Study on the Pricing Control of Underground Pipe Gallery under PPP Model

Wei Haimin,Liu Wuyan

(School of Management, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, P.R.China)

**Abstract:** The main reason for the extended construction of the underground comprehensive pipe gallery is the need for the huge investment in construction and the high cost of operation. On the basis of analyzing the relevant theory of PPP mode and the related knowledge of underground comprehensive pipe gallery, the paper puts forward the PPP financing mode, compensation mode of construction period and operation period compensation mode based on URM (User Reimbursement Model), which is suitable for our country's underground comprehensive pipe gallery, and can solve the problem of pre huge investment demand. The meaning of compensation mode of operation period is that the government gives some subsidies to the investors in the process of the underground comprehensive pipe gallery operation to meet the basic operation income. Choosing the compensation mode of operation period as the research foundation, using the principal-agent theory as the theoretical support, a kind of incentive compatible pricing controlling mechanism is designed, aims to solve the problem of operating charges. The realization of the mechanism, not only can maintain the interests of pipeline units and the consuming public, but also can encourage investors to declare the real cost on the basis of meeting the investment profits, reduce operating costs and reduce the financial burden of the government.

**Keywords:** PPP model; underground pipe gallery; pricing control; incentive mechanism

\* 收稿日期:2017-12-12(修改稿)  
作者简介:韦海民(1971-),男,陕西澄城人,博士生,副教授,主要从事工程经济与管理等领域的教学与科研工作。  
E-mail:lwy19910118@126.com  
通讯作者:刘武岩(1991-),男,山东济宁人,研究生,主要从事工程经济与管理方面的研究。  
E-mail:lwy19910118@126.com  
基金项目:陕西省社会科学基金(2017S012);陕西省教育厅专项科研项目(11JK0069)

## 0 引言

地下综合管廊是指在城市地下用于集中敷设电力、通信、给水、排水、燃气等两类以上市政管线的构筑物及附属设施<sup>[1]</sup>。作为一种集约化的市政基础设施,与传统管线相比,地下综合管廊的建设不但可以有效地解决道路反复开挖所引起的交通堵塞、环境污染等问题,而且可在综合考虑城市整体发展,预计未来所需管线增加的情况下,规划设计城市地下空间,以此减少不必要的地下空间浪费。地下综合管廊虽具有较高的效益,但在我国却没有得到大规模的建设推广,究其主要原因在于地下综合管廊的建设与传统的管线相比需要巨大的前期建设投资和较高的后期运营成本。而目前我国,地下综合管廊一般是由政府投资建设,对于管廊的日常维护基本处于不收费或者很少收费的情况。因此,主要依靠政府的财政能力是难以推进地下综合管廊的建设的,解决好地下综合管廊投资及运营收费的问题是推动地下综合管廊建设的必要条件。

近几年,关于地下综合管廊的研究文献逐渐增多,描述内容主要集中在:分析地下综合管廊的建设现状以及所面临的问题,并针对其问题提出完善管廊管理、运营维护等方面的对策和建议<sup>[2-4]</sup>。对比建设综合管廊和直埋管线的成本及效益,探讨综合管廊的收费对策,论述建设综合管廊的优势<sup>[5-6]</sup>,并初步探讨了PPP模式在综合管廊投融资过程中运用的可行性<sup>[7-8]</sup>。

尽管诸多学者从不同方面研究了地下综合管廊,但关于地下综合管廊定价的文献非常少,且更多的是建议采用空间比例法和直埋成本法进行定价<sup>[9]</sup>,定价方法的科学性、合理性欠考虑,而对于地下综合管廊PPP项目的定价方法的研究却仍是空白。基于此,本文首先在对PPP模式相关理论及地下综合管廊相关知识研究分析的基础上,选择了适合于我国地下综合管廊建设的PPP模式,即基于URM(使用者付费模式)的建设期补偿模式和运营期补偿模式;然后选取了运营期补偿模式作为研究基础,运用了委托-代理理论作为理论支撑,设计了一种激励相容的入廊定价激励机制。该机制可以在实现资源的最优化利用、维持管线单位的运营成本、维护消费大众的利益的利益的基础上,激励投资

方真实申报成本,降低管廊运营成本。

## 1 地下综合管廊项目PPP模式的选择分析

### 1.1 地下综合管廊的属性分析

经济学上根据物品的生产是否具有垄断性、消费是否具有排他性及效用是内部效益还是外部效益这三个方面的特点,将社会生产的消费品分为三大类别:公共物品、准公共物品和私人物品<sup>[10]</sup>。地下综合管廊因其生产具有一定的垄断性、消费具有一定的排他性、效益可兼有内部效益和外部效益,而属于准公共物品的范畴。而在考虑项目资金时间价值的基础上,地下综合管廊项目作为准公共物品,虽可通过其建成后向入廊的管线单位收取租金作为其利润来源,但具体的收费标准受到管线单位等多利益方的限制,私人单位如若出资建设很有可能无法收回项目成本或者达不到预期的收益水平,基于此,其又具有准经营性的特征。

### 1.2 PPP模式概述

PPP(Public-Private-Partnership)直译为公共部门与私人部门之间的合作伙伴关系,简译为公私合营。目前各国对于PPP的定义还未统一,但核心内容基本一致,可概括为:公共部门与私人部门通过合作,发挥各自的优势,提供基础设施、公用事业、自然资源等建设与服务<sup>[11]</sup>。PPP模式的分类有很多,包括BOT、BOO、TOT等,但在我国基础设施行业的融资实践中,应用最多的是基于URM(使用者付费模式)的BOT融资模式<sup>[12]</sup>,即政府通过竞争性磋商方式选定社会投资人,并与其签订特许经营协议,由其投资建设基础设施项目,社会投资人在特许经营权授予的期限内经营基础设施项目,并从基础设施使用者手中收取相应使用费用作为其回收成本和获取利润的来源,经营期满后,项目交由政府。

### 1.3 地下综合管廊项目PPP模式的选择

以上分析可得知,在我国基础设施行业的融资实践中,应用最多的PPP模式是基于URM的BOT模式。然而这一模式应用于地下综合管廊项目中会存在一些问题。地下综合管廊作为准公共用品,在具有一定可经营性的同时,其本身建设和运营的过程中会产生巨大的正外部效益,基于URM的BOT模式过度依赖市场手段,忽略了其可能产生

的市场失灵现象,使得单纯依靠管线单位缴纳の入廊和运营维护费用是难以补贴巨额的建设成本和运营成本的,这就使得地下综合管廊项目的可经营性降低,进而影响 PPP 融资模式的可行性。设置相应的激励机制,通过政府补贴等方式,将综合管廊项目所产生的正的外部效益内部化,便成为了解决该模式弊端的有效途径。基于此,根据激励补贴的时间的不同,地下综合管廊项目 PPP 模式可分为基于 URM(使用者付费模式)的建设期补偿模式和运营期补偿模式。

PPP 模式的选择是解决管廊投资困难的关键,科学、合理的入廊定价是解决管廊运营收费难题的基础。本文拟选取基于 URM(使用者付费模式)的运营期补偿模式作为研究基础,对地下综合管廊入廊定价机制进行研究,如图 1 所示。

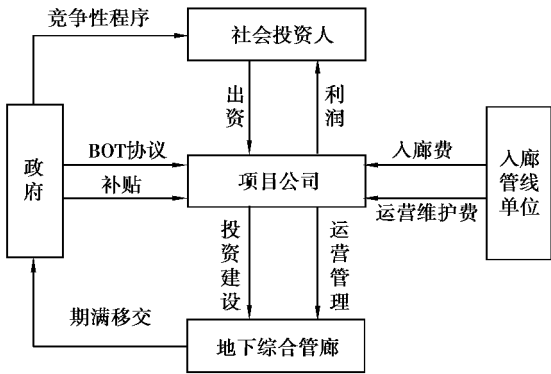


图 1 地下综合管廊项目可采用的 PPP 模式

Fig. 1 PPP mode of underground pipe gallery project

## 2 地下综合管廊入廊定价激励模型

### 2.1 理论的引入

委托-代理理论是非对称信息博弈论在经济学上的一个重要应用,主要研究在某些参与人拥有但另一些参与人不拥有的信息(即非对称信息)的情况下,参与人(委托人和代理人)的博弈行为<sup>[13]</sup>。

在地下综合管廊项目整体运作的过程中,政府通过招投标的方式选择投资方进行地下综合管廊项目的运作,双方之间形成了委托代理关系。政府作为委托方,以实现社会利益作为目标。投资方作为代理方,以实现自身利益的最大化作为目标。代理方目标的实现主要依靠收取管线单位入廊、运营维护费用和获取政府的补贴来实现。管线单位入廊、运营维护费用的大小,不仅仅涉及管线单位、政

府部门的利益,而更多地涉及公众的利益;代理方获取补贴的大小取决于其上报的成本。为了能够有效地发挥地下综合管廊的综合效益,实现社会利益的最大化,政府部门应该对入廊费用进行管制,并构建完善的激励机制,以激励投资方真实申报成本、降低政府财政负担。

### 2.2 模型的构建

#### 2.2.1 模型的基本假设

为了分析的严谨和客观,在传统的委托代理模型的基础上,根据地下综合管廊 PPP 项目的特性,现作如下假设:

假设 1:委托代理双方-政府和企业,都是理性人。政府要保证实现社会利益,而企业则在满足政府委托合同的要求下,追求自身收益的最大化。

假设 2:地下综合管廊 PPP 项目运营期的服务规模为  $Q$ 。 $Q$  由项目所服务的管线数量所决定。

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_i \quad (1)$$

式中: $Q_i$  为项目运营期为各管线提供的服务规模( $i = 1, 2, 3, \dots$ )。

假设 3:投资方的成本为  $C$ 。 $C$  由投资成本  $C_t$  和运营维护成本  $C_y$  组成。运营维护成本  $C_y$  主要包括固定成本  $F_{cy}$  和边际成本  $V_{cy}$ 。 $F_{cy} = a_0 + a_{1\theta}$ 。 $V_{cy}$  由实际成本参数  $\theta$  决定, $V_{cy} = (b_0 + b_1\theta)Q$ 。投资方的成本可表示为:

$$C = C_t + C_y \quad (2)$$

$$C_y(Q\theta) = a_0 + a_{1\theta} + (b_0 + b_1\theta)Q \quad (3)$$

$$(Q > 0; a_0, a_1, b_0, b_1 \geq 0)$$

假设 4:投资方为了获取自身利益的最大化,可能会利用成本信息的优势,对政府进行成本虚报,以获取更多的补贴。

假设 5:虽然政府在成本信息拥有上占劣势,但政府可以知道  $\theta$  的取值区间为  $[\theta_1, \theta_2]$ ,相应的概率分布的密度函数与累积分布函数分别为  $f(\theta)$  和  $F(\theta)$ 。在区间  $[\theta_1, \theta_2]$ ,  $f(\theta)$  为  $\theta$  的连续函数,且  $f(\theta) > 0$ 。

假设 6:投资方的年收益为  $W_t$ 。投资方收益主要包括两个部分:一是管廊项目运营收益  $S$ ,二是在不能满足投资方最低收益的情况下,政府给予的补贴  $B$ 。运营收益主要包括对管线单位收取的入廊费用  $S_1$  和运营维护费用  $S_2$ 。投资方的收益  $W_t$  可表示为:

(1)投资方真实申报成本参数时:

$$W_i(\theta) = \sum_{i=1}^n (S_{li} + S_{2i}) + B(\theta) - (a_0 + a_1\theta) + (b_0 + b_1\theta)Q(\theta) - A_c \tag{4}$$

(2)投资方虚假申报成本参数时:

$$W_i(\theta, \theta') = \sum_{i=1}^n (S_{li} + S_{2i}) + B(\theta') - (a_0 + a_1\theta) - (b_0 + b_1\theta)Q(\theta') - A_c \tag{5}$$

式中: $S_{li}$ 为各管线单位入廊缴纳的年入廊费用; $S_{2i}$ 为各管线单位入廊后缴纳的的年运营维护费用; $B(\theta)$ 、 $B(\theta')$ 为政府依据项目公司所申报的成本参数确定的年补贴; $\theta$ 为真实成本参数; $\theta'$ 为项目公司所申报的成本参数; $A_c$ 为年分摊投资, $i=1,2,3,\cdots$ ;  $n$ 为入廊管线数量。

假设 7:政府面临的主要问题是确定各管线的入廊费用  $S_{li}$ 、入廊运营维护费用  $S_{2i}$ 和补贴  $B$ ,使得项目公司在提供真实的运营成本信息时获取的收入大于提供虚假成本信息的获取的收入,管线单位入廊后在缴纳入廊费用和入廊运营维护费用的情况下能获取其生存所必需的基本利润。

2.2.2 约束设计

(1)参与约束设计:为了使项目顺利的运营实施,政府在制定入廊费用、运营维护费用和补贴时必须权衡投资方和入廊管线单位利益,使得他们可获取合理的利润。

对于投资方而言,参与约束设置为:

$$\sum_{i=1}^n (S_{li} + S_{2i}) + B(\theta') - (a_0 + a_1\theta) - (b_0 + b_1\theta)Q(\theta') - A_c \geq U_i \tag{6}$$

式中: $U_i$ 为投资方的保留效用( $i=1,2,3,\cdots$ )。

对于管线单位而言,参与约束设置为:

$$C_{rw} - C_{rh} \geq U_i (i=1,2,3,\cdots) \tag{7}$$

式中: $U_i$ 为各管线单位的保留效用; $C_{rw}$ 为各管线入廊前的成本; $C_{rh}$ 为各管线入廊后的成本。

(2)激励相容约束设计:政府激励机制的设计是建立在入廊费用  $S_{li}$ 、入廊运营维护费用  $S_{2i}$ 和政府补贴  $B$  的基础上。①入廊费用的确定。各管线入廊费用  $S_{li}$ 原则上依据于管线单独直埋敷设的成本  $S_{lzi}$ 、管廊设计寿命周期内,各管线在不进入管廊情况下所需的重复单独敷设成本  $S_{lci}$ 和管廊设计寿命周期内,各入廊管线与不进入管廊的情况相比,因管线破损率等漏损率降低而节省的管线维护成

本  $S_{lwi}$ 等确定。管线入廊费用可一次性缴纳,但考虑到费用数额较大,为增加管线单位入廊的积极性,入廊费用也可分年缴纳。各管线入廊费用  $S_{li}$ 可表示为:

$$S_{li} = S_{lzi} + S_{lci} + S_{lwi} \tag{8}$$
$$(i=1,2,3,\cdots)$$

②入廊运营维护费用的确定。为了实现资源达到最优配置,在综合考虑各管线所占用管廊空间的基础上,管线入廊运营维护费用应该等于管线的运营维护边际成本,即  $\sum_{i=1}^n S_{2i} = (b_0 + b_1\theta)Q$ 。因此,各管线入廊运营维护费用  $S_{2i}$ 依据于各管线所占用的空间  $V_i$ 及各管线的运营维护边际成本  $V_i(N)$ 确定。为了较为客观地对管廊的运营维护费进行分摊,本文借用修正增量配置法。修正增量配置法是增量配置法的完善和补充,其核心思想是将地下综合管廊的共同成本在各入廊管线之间再分配,而不是由先收容的管线完全承担。下面以入廊的管线数量为 3 进行运营维护边际成本的分摊,如图 2 所示。

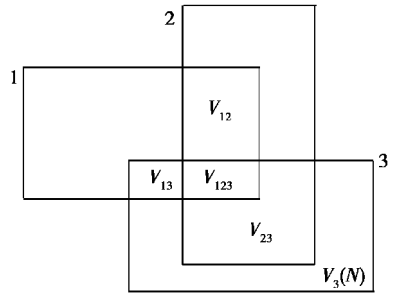


图 2 管廊运营维护边际成本分摊示意图  
Fig. 2 Schematic diagram of marginal cost allocation for the operation and maintenance of pipe gallery

图 2 中交集的部分说明了地下综合管廊具有规模经济的特性,各交集部分成本定义为:

$$V_{12} = C(N) - C(3) - V_1(N) - V_2(N)$$
$$V_{13} = C(N) - C(2) - V_1(N) - V_3(N)$$
$$V_{23} = C(N) - C(1) - V_2(N) - V_3(N)$$
$$V_{123} = C(N) - V_1(N) - V_2(N) - V_3(N) - V_{12} - V_{13} - V_{23}$$

式中: $V_i(N)$ 为各管线的运营维护边际成本; $V_i(N) = C(N) - C(N-i)$ ;  $C(N)$ 为管廊的总运营维护成本; $C(N-i)$ 为收容了除管线  $i$  以外其他所有管线时的成本; $C(i)$ 为仅收容管线  $i$  时的成本。



令  $f_1, f_2, f_3$  分别为 3 种管线的分摊因子,则修正后的各管线对运营维护费得分摊成本为:

$$\begin{aligned} S_{21} &= V_1(N) + (f_1/(f_1 + f_2))V_{12} + \\ &(f_1/(f_1 + f_3))V_{13} + (f_1/(f_1 + f_2 + f_3))V_{123} \\ S_{22} &= V_2(N) + (f_2/(f_1 + f_2))V_{12} + \\ &(f_2/(f_2 + f_3))V_{23} + (f_2/(f_1 + f_2 + f_3))V_{123} \\ S_{23} &= V_3(N) + (f_3/(f_1 + f_3))V_{13} + \\ &(f_3/(f_2 + f_3))V_{23} + (f_3/(f_1 + f_2 + f_3))V_{123} \end{aligned}$$

式中:  $f_1, f_2, f_3$  在本文中设定为各管线占用管廊的空间,  $f_1 = V_1, f_2 = V_2, f_3 = V_3$ 。

当管线是数量为  $i$  时,令  $f_1, f_2, f_3 \cdots f_i$  分别为 3 种管线的分摊因子,则修正后的各管线对运营维护费得分摊成本为:

$$\begin{aligned} S_{21} &= V_1(N) + (f_1/(f_1 + f_2))V_{12} + \\ &(f_1/(f_1 + f_3))V_{13} + \cdots + \\ &(f_1/(f_1 + f_i))V_{1i} + \\ &(f_1/(f_1 + f_2 + f_3))V_{123} + \\ &(f_1/(f_1 + f_2 + f_4))V_{124} \cdots + \\ &(f_1/(f_1 + f_2 + \dots + f_i))V_{12i} \cdots + \\ &(f_1/(f_1 + f_2 + \cdots + f_i))V_{123 \cdots i} \\ S_{22} &= V_2(N) + (f_2/(f_1 + f_2))V_{21} + \\ &(f_2/(f_2 + f_3))V_{23} + \cdots + \\ &(f_2/(f_2 + f_i))V_{2i} + \\ &(f_2/(f_1 + f_2 + f_3))V_{213} + \\ &(f_2/(f_1 + f_2 + f_4))V_{214} \cdots + \\ &(f_2/(f_1 + f_2 + \dots + f_i))V_{21i} \cdots + \\ &(f_2/f_1 + f_2 + \cdots + f_i))V_{213 \cdots i} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S_{23} &= V_3(N) + (f_3/(f_1 + f_3))V_{13} + \\ &(f_3/(f_2 + f_3))V_{23} + \cdots + \\ &(f_3/(f_3 + f_i))V_{3i} + \\ &(f_3/(f_1 + f_2 + f_3))V_{312} + \\ &(f_3/(f_3 + f_1 + f_4))V_{314} \cdots + \\ &(f_3/(f_1 + f_2 + \dots + f_i))V_{31i} \cdots + \\ &(f_3/(f_1 + f_2 + \cdots + f_i))V_{312 \cdots i} \\ &\dots \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S_{2i} &= V_i(N) + (f_i/(f_1 + f_i))V_{1i} + \\ &(f_i/(f_2 + f_i))V_{2i} + \cdots + \\ &(f_i/(f_{i-1} + f_i))V_{i-1i} + \\ &(f_i/(f_1 + f_2 + \dots + f_i))V_{12i} + \\ &(f_i/(f_1 + f_3 + f_i))V_{13i} \cdots + \\ &(f_i/(f_1 + f_{i-1} + \dots + f_i))V_{1i-1i} \cdots + \end{aligned}$$

$$(f_i/(f_1 + f_2 + \cdots + f_i))V_{123 \cdots i} \tag{9}$$

其中  $f_1, f_2, f_3 \cdots f_i$  在本文中设定为各管线占用管廊的空间。  $f_1 = V_1, f_2 = V_2, f_3 = V_3 \cdots f_i = V_i$ 。

(3) 政府补贴的设定。政府对于投资方的补贴主要分为两个部分: ①  $B_1$ : 年分摊投资  $A_c$ 、年投资利润  $U_1$  和运营固定成本  $F_{cy}$  与年入廊费用  $S_1$  的差值, 即  $A_c + U_1 + F_{cy} - \sum_{i=1}^n (S_{1zi} + S_{1ci} + S_{1wi})$ 。对于这一部分的补贴, 政府能确切地知道  $A_c, U_1, a_0, S_{1zi}, S_{1ci}$  和  $S_{1wi}$  的实际值, 应给予完全的补贴, 对于政府不确切知道的  $a_1\theta$ , 其补贴额度取决于政府掌握的信息, 尤其是运营成本参数上限  $\theta_2$ 。②  $B_2$ : 边际成本的补贴, 这一部分补贴也取决于政府对于运营成本参数  $\theta$  的掌握, 尤其是运营成本参数的上限  $\theta_2$ 。补贴的额度为投资方所申报的成本参数  $\theta$ , 政府所掌握的最高成本参数  $\theta_2$ , 参数  $a_1, b_1$ , 以及关于  $Q$  的函数所围成的面积。政府对于投资方的补贴确定如下:

$$\begin{aligned} B(\theta) &= A_c + U_1 + F_{cy} - \sum_{i=1}^n (S_{1zi} + S_{1ci} + S_{1wi}) + \\ &\int_{\theta}^{\theta_2} a_1 + b_1 Q(\theta) d\theta \end{aligned} \tag{10}$$

(4) 补贴激励的验证。当政府对于投资方的补贴确定时, 依据上述的分析, 投资方实报成本参数的预期收益  $W_i(\theta)$  和虚报成本参数的预期收益  $W_i(\theta, \theta')$  为:

$$W_i(\theta) = U_1 + \int_{\theta}^{\theta_2} a_1 + b_1 Q(\theta) d\theta \tag{11}$$

$$\begin{aligned} W_i(\theta, \theta') &= U_1 + \int_{\theta}^{\theta_2} a_1 + b_1 Q(\theta) d\theta + \\ &[a_1 + b_1 Q(\theta)](\theta' - \theta) \end{aligned} \tag{12}$$

再将真实申报成本参数时的预期收益与虚假申报成本时的预期收益进行比较:

$$\begin{aligned} W_i(\theta) - W_i(\theta, \theta') &= -[a_1 + b_1 Q(\theta')] \\ &(\theta' - \theta) + \int_{\theta}^{\theta'} a_1 + b_1 Q(\theta) d\theta \end{aligned}$$

由积分中值定理得:

$$\begin{aligned} W_i(\theta) - W_i(\theta, \theta') &= -[a_1 + b_1 Q(\theta')](\theta' - \theta) + \\ &[b_1 Q(\xi) + a_1](\theta' - \theta) = b_1[Q(\theta') - Q(\xi)](\theta' - \theta) \end{aligned}$$

式中,  $\xi$  介于  $\theta$  和  $\theta'$  之间, 投资方对成本参数的虚报  $\theta'$  一般会大于真实成本  $\theta$ , 即  $\theta' > \theta$ ; 对于管廊的服务规模而言, 成本参数越大, 其能为管线服务的规模较小, 为递减函数, 即当  $\theta' > \xi$  时,  $Q(\theta') <$

$Q(\xi)$ 。因此,易得  $W_i(\theta) - W_i(\theta, \theta') > 0$ , 即说明投资方真实呈报成本的预期收益大于虚报成本的预期收益。

上述政府补贴激励机制是建立在考虑投资方的保留效用的基础之上, 因此, 可满足其参与约束的条件。对于各管线而言, 对于其入廊费用的定价, 是建立在管线单独敷设的所需成本的基础上, 对于运营维护费确定为运营维护的边际成本, 不但可使资源得到最优配置, 而且可使管线单位实现最优效用。

2.2.3 模型简化验算

通过以上分析, 在给定成本函数的基础上对模型进行简化验算分析。

(1) 参数假设: 假设 1: 管廊运营维护的真实的成本参数为  $\theta$ , 申报的成本参数  $\theta', \theta' \in [\theta_1, \theta_2]$ 。令  $b_0 = a_1 = 0, b_1 = 1$ , 则成本函数

$$C_y(Q, \theta) = a_0 + \theta Q$$

假设 2: 成本参数  $\theta$  在区间  $[\theta_1, \theta_2]$  上呈均匀分布, 则密度函数为  $f(\theta) = 1/(\theta_2 - \theta_1)$ , 需求函数为

$$Q = \alpha - \beta \sum_{i=1}^n S_{2i}(\theta) \quad (\alpha > 0, \beta > 0)$$

(2) 模型验算: 根据运营维护费的定价的准则

$$\sum_{i=1}^n S_{2i}(\theta) = b_{0i} + b_1 \theta, \text{ 结合上述参数假设确定}$$
$$\sum_{i=1}^n S_{2i}(\theta) = \theta。$$

则投资方真实申报成本参数  $\theta$  时获取到的预期收益  $W_i(\theta)$  可确定为

$$W_i(\theta) = U_1 + \alpha(\theta_2 - \theta) - 1/2\beta(\theta_2^2 - \theta^2) \tag{13}$$

则投资方虚假申报成本参数  $\theta'$  时获取到的预期收益  $W_i(\theta, \theta')$  可确定为

$$W_i(\theta, \theta') = U_1 + \alpha(\theta_2 - \theta) - 1/2\beta(\theta_2^2 + \theta'^2) + \beta\theta\theta' \tag{14}$$

解函数  $W_i(\theta, \theta')$  在  $[\theta_1, \theta_2]$  上取最大值的一阶条件, 可得当  $\theta = \theta'$  时投资方利润最大。也就是说, 投资方在真实申报成本的情况下可获得最大利润。

3 算例分析

某一地下综合管廊工程全长 10 km, 将给水、供电、供水和通气 4 种管线全部入廊铺设并统一布局。经前期计算, 该工程需投资 2 亿元, 政府因财政资金紧张, 决定采用 PPP 模式, 通过特许经营、投资补贴等形式, 鼓励社会资本组建项目公司参与城市地下综合管廊建设和运营管理。政府通过竞争性磋商方式选定社会投资人, 并签订特许经营协议, 特许经营期限为 12 年(含建设期 2 年), 社会投资人以收取入廊费、运营维护费和政府补贴的方式获取投资回报。

假设政府预先设定的成本先验区间为  $[0.15, 0.45]$ , 取  $\alpha = 4, \beta = 1$  则

$$Q(\theta) = 4 - \theta;$$
$$V_{cy} = (4 - \theta)\theta;$$
$$W_i(\theta, \theta') = U_1 + \theta\theta' - 4\theta - 0.5\theta'^2 + 1.699$$

当成本参数  $\theta, \theta'$  在区间  $[0.15, 0.45]$  取不同值时, 依据上式  $W_i(\theta, \theta')$  对投资方的预期利润计算确认。计算结果见表 1。

表 1 投资方利润核算							百万元
Table 1 The profit accounting of investors							million Yuan
$\theta'$	$\theta = 0.150$	$\theta = 0.200$	$\theta = 0.250$	$\theta = 0.300$	$\theta = 0.350$	$\theta = 0.400$	$\theta = 0.450$
0.150	14.110 3	13.917 8	13.725 3	13.532 8	13.340 3	13.147 8	12.955 3
0.155	14.110 2	13.918 0	13.725 7	13.533 5	13.341 2	13.149 0	12.956 7
0.200	14.109 0	13.919 0	13.729 0	13.539 0	13.349 0	13.159 0	12.969 0
0.225	14.107 4	13.918 7	13.729 9	13.541 2	13.352 4	13.163 7	12.974 9
0.250	14.105 3	13.917 8	13.730 3	13.542 8	13.355 3	13.167 8	12.980 3
0.275	14.102 4	13.916 2	13.729 9	13.543 7	13.357 4	13.171 2	12.984 9

续表1							
$\theta'$	$\theta=0.150$	$\theta=0.200$	$\theta=0.250$	$\theta=0.300$	$\theta=0.350$	$\theta=0.400$	$\theta=0.450$
0.300	14.099 0	13.914 0	13.729 0	13.544 0	13.359 0	13.174 0	12.989 0
0.325	14.094 9	13.911 2	13.727 4	13.543 7	13.359 9	13.176 2	12.992 4
0.350	14.090 3	13.907 8	13.725 3	13.542 8	13.360 3	13.177 8	12.995 3
0.375	14.084 9	13.903 7	13.722 4	13.541 2	13.359 9	13.178 7	12.997 4
0.400	14.079 0	13.899 0	13.719 0	13.539 0	13.359 0	13.179 0	12.999 0
0.425	14.072 4	13.893 7	13.714 9	13.536 2	13.357 4	13.178 7	12.999 9
0.450	14.065 3	13.887 8	13.710 3	13.532 8	13.355 3	13.177 8	13.000 3

通过表 1 对投资方利润的核算,可以确认,当成本参数  $\theta,\theta'$  在区间  $[0.15,0.45]$ ,取不同值时,投资方预期利润达到最大值的条件为  $\theta=\theta'$ 。

敷设的建设成本确定  $S_{1z},S_{1c}$  和  $S_{1w}$ ,依据公式(8)确定各管线的年入廊费用,即年分摊成本  $S_{1i}$ 。计算结果见表 2。

依据相关规范<sup>[14-16]</sup>,参照国内已建管线直埋

表 2 管线直埋敷设的建设成本  
Table 2 Buried pipeline construction costs

管线	规格	单价/ (元·m <sup>-1</sup> )	总长/ km	重复敷设 次数	敷设成本 合计/万元	年分摊敷设 成本 /万元	年节省维修 费用/万元	年分摊成本 合计/万元
给水管线	DN600	1881	10	7	13 167	134.36	50	184.36
电力电缆	DN500	4120	10	5	20 600	210.20	50	260.20
通信电缆	14 回路	4 020	10	5	20 100	205.10	50	255.10
天然气管线	DN500	1 624	10	7	11 368	116.00	50	166.00
合计		11645	40	24	65235	665.66	200	865.66

当  $\alpha=4,\beta=1$  时,管廊的运营边际成本  $V_{cy}=4\theta+1.699$ 。依据  $V_{cy}$  和  $B_2$  分别计算年维护运营成本  $F_{cy}$  和年边际成本的补贴  $B_2$ ,计算结果见表 3。

表 3 管廊运营维护边际成本  
Table 3 Operation and maintenance marginal cost of pipe gallery

百万元  
million Yuan

年限 $n$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
成本参数 $\theta$	0.20	0.20	0.21	0.21	0.23	0.25	0.27	0.30	0.31	0.32
运营维护边际成本 $F_{cy}$	0.76	0.76	0.80	0.80	0.87	0.94	1.01	1.11	1.14	1.18
政边际成本的补贴 $B_2$	0.919	0.919	0.881	0.881	0.805	0.730	0.655	0.544	0.507	0.470

依据表 3 计算所得年维护运营成本  $F_{cy}$  结合管廊项目运营经验所得交集边际成本所占比例值,计算管线的交集边际成本  $V_{ij}$ ,计算结果见表 4。

表 4 运营维护交集边际成本											百万元	
Table 4 The intersection marginal cost of operation and maintenance											million Yuan	
年限 $n$		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
交集边际成本	比例划分	0.20	0.20	0.21	0.21	0.23	0.25	0.27	0.30	0.31	0.32	
	$V_{12}$	7%	0.053 2	0.053 2	0.055 7	0.055 7	0.060 7	0.065 6	0.070 5	0.077 7	0.080 1	0.082 4
	$V_{13}$	8%	0.060 8	0.060 8	0.063 7	0.063 7	0.069 4	0.075 0	0.080 6	0.088 8	0.091 5	0.094 2
	$V_{14}$	7%	0.053 2	0.053 2	0.055 7	0.055 7	0.060 7	0.065 6	0.070 5	0.077 7	0.080 1	0.082 4
	$V_{23}$	6%	0.045 6	0.045 6	0.047 8	0.047 8	0.052 0	0.056 3	0.060 4	0.066 6	0.068 6	0.070 7
	$V_{24}$	6%	0.045 6	0.045 6	0.047 8	0.047 8	0.052 0	0.056 3	0.060 4	0.066 6	0.068 6	0.070 7
	$V_{34}$	7%	0.053 2	0.053 2	0.055 7	0.055 7	0.060 7	0.065 6	0.070 5	0.077 7	0.080 1	0.082 4
	$V_{123}$	4%	0.030 4	0.030 4	0.031 8	0.031 8	0.034 7	0.037 5	0.040 3	0.044 4	0.045 8	0.047 1
	$V_{124}$	3%	0.022 8	0.022 8	0.023 9	0.023 9	0.026 0	0.028 1	0.030 2	0.033 3	0.034 3	0.035 3
	$V_{134}$	4%	0.030 4	0.030 4	0.031 8	0.031 8	0.034 7	0.037 5	0.040 3	0.044 4	0.045 8	0.047 1
	$V_{234}$	3%	0.022 8	0.022 8	0.023 9	0.023 9	0.026 0	0.028 1	0.030 2	0.033 3	0.034 3	0.035 3
	$V_{1\ 234}$	3%	0.022 8	0.022 8	0.023 9	0.023 9	0.026 0	0.028 1	0.030 2	0.033 3	0.034 3	0.035 3
	$V_1$	9%	0.068 4	0.068 4	0.071 6	0.071 6	0.078 0	0.084 4	0.090 6	0.099 9	0.103 0	0.106 0
	$V_2$	10%	0.076 0	0.076 0	0.079 6	0.079 6	0.086 7	0.093 8	0.100 7	0.111 0	0.114 4	0.117 8
	$V_3$	11%	0.083 6	0.083 6	0.087 5	0.087 5	0.095 4	0.103 1	0.110 8	0.122 1	0.125 8	0.129 5
	$V_4$	12%	0.091 2	0.091 2	0.095 5	0.095 5	0.104 1	0.112 5	0.120 9	0.133 2	0.137 3	0.141 3

依据表 4 计算所得交集边际成本  $V_{ij}$  结合运用 计算结果见表 5。  
公式(9),计算各管线入廊的年运营维护成本  $S_{2i}$ ,

表 5 管线入廊运营成本分摊											百万元
Table 5 Pipeline corridor operating cost sharing											million Yuan
管线	占用空间 比例 V/%	管线入廊维护运营成本分摊									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
		0.20	0.20	0.21	0.21	0.23	0.25	0.27	0.30	0.31	0.32
给水管线 $f_1$	12.70	0.138 0	0.138 0	0.144 5	0.144 5	0.157 4	0.170 2	0.182 8	0.201 5	0.206 9	0.213 5
电力电缆 $f_2$	35.45	0.210 7	0.210 7	0.220 6	0.220 6	0.240 4	0.259 9	0.279 2	0.307 7	0.317 1	0.326 4
通信电缆 $f_3$	25.40	0.204 1	0.204 1	0.213 2	0.213 8	0.232 9	0.251 8	0.270 5	0.298 1	0.307 2	0.316 3
天然气管线 $f_4$	26.45	0.207 2	0.207 2	0.217 0	0.217 0	0.236 5	0.254 9	0.274 6	0.301 5	0.311 9	0.321 1



依据上述计算所得  $F_{ey}$ 、 $V_{ey}$ 、 $S_1$ 、 $S_2$ 、 $B_2$  结合总投资额的年分摊成本  $A_e$  运用公式 (10) 计算固定成本补贴  $B_1$  和补贴合计  $B_1 + B_2$ , 运用公式 (4) 计算投资方利润  $W_i$ , 计算结果见表 6。

表 6 投资方利润和政府补贴

Table 6 Investor profit and government subsidies

年限 $n$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
运营维护成本 $C_y$	226.00	226.00	229.59	229.59	236.71	243.75	250.71	261.00	264.39	267.76
运营维护固定成本 $F_{ey}$	150.00	150.00	150.00	150.00	150.00	150.00	150.00	150.00	150.00	150.00
运营维护边际成本 $V_{ey}$	76.00	76.00	79.59	79.59	86.71	93.75	100.71	111.00	114.39	117.76
入廊费用 $S_1$	865.66	865.66	865.66	865.66	865.66	865.66	865.66	865.66	865.66	865.66
入廊运营维护费用 $S_2$	76.00	76.00	79.59	79.59	86.71	93.75	100.71	111.00	114.39	117.76
年分摊投资成本 $A_e$	2 000.00	2 000.00	2 000.00	2 000.00	2 000.00	2 000.00	2 000.00	2 000.00	2 000.00	2 000.00
投资方年利润 $U_i$	1 300.00	1 300.00	1 300.00	1 300.00	1 300.00	1 300.00	1 300.00	1 300.00	1 300.00	1 300.00
固定成本补贴 $B_1$	2 584.34	2 584.34	2 584.34	2 584.34	2 584.34	2 584.34	2 584.34	2 584.34	2 584.34	2 584.34
边际成本补贴 $B_2$	91.88	91.88	88.08	88.08	80.52	73.00	65.52	54.38	50.68	47.00
补贴合计 $B_1+B_2$	2 676.21	2 676.21	2 672.42	2 672.42	2 664.86	2 657.34	2 649.86	2 638.71	2 635.02	2 631.33
预期利润 $W_i$	1 391.88	1 391.88	1 388.08	1 388.08	1 380.52	1 373.00	1 365.52	1 354.38	1 350.68	1 347.00

4 结语

PPP 模式下地下综合管廊入廊定价激励机制研究主要解决两个问题,这也是本文研究创新所在。

首先,在综合分析论述 PPP 模式相关理论和地下综合管廊相关知识的基础上,提出适合我国管廊建设的 URM(使用者付费模式)的建设期补偿模式和运营期补偿模式,解决管廊建设投资困难问题。继而,以运营期补偿模式为基础,在综合考虑管线单位、政府单位和社会大众的利益的利益的基础上,设计定价激励模型,解决管廊运营收费困难问题。

而对于 PPP 模式下入廊费用、运营维护费用和补贴费用确定管制,主要基于以下几点:①费用的确定不能加重管线单位的运营成本,以使管线单位入廊后所提供服务的价格不能对当前的市场价格构成冲击,以维护消费大众的利益;②不能使投资方以成本信息的优势获取过多利润,加重政府补贴负担,但同时要保证投资方的合理利润,以维持

其正常运营。

文中模型实例验证过程中,对于交集边际成本占比值,主要依据现有运营项目经验确定,其准确度有待提高,这是本研究的不足之处,其后作者欲结合相关专家意见采用蒙特卡洛模拟方法进一步进行模拟计算,以期提高其准确度。

参考文献(References)

[1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 城市综合管廊工程技术规范(GB 50838—2015)[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015. (Housing and Urban Rural Development Department of People’s Republic of China. Technical specification for urban underground pipe gallery (GB 50838—2015)[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015. (in Chinese))

[2] 刘晨晨,杨志强,马骥,等.地下综合管廊建设的若干问题研究[J].测绘通报,2015(增1): 31-33. (Liu Chenchen, Yang Zhiqiang, Ma Ji, et al. Research on

- some problem related to underground pipe gallery construction[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2015(Supp.1): 31-33. (in Chinese))
- [3] 郑立宁,罗春燕,王建.综合管廊智能化运维管理技术综述[J].地下空间与工程学报,2017,13(增1):1-10. (Zheng Lining, Luo Chunyan, Wang Jian. Review on intelligent operation and maintenance management of utility tunnel[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2017, 13(S1): 1-10. (in Chinese))
- [4] 钱七虎,陈晓强.国内外地下综合管线廊道发展的现状、问题及对策[J].地下空间与工程学报, 2007, 3(2), 191-194. (Qian Qihu, Chen Xiaoqiang. The present situation, problems and countermeasures of the development of underground pipe gallery at home and abroad [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2007, 3(2): 191-194. (in Chinese))
- [5] 田强,薛国洲,田建波,等.城市地下综合管廊经济效益研究[J].地下空间与工程学报,2015,11(增2): 373-377. (Tian Qiang, Xue Guozhou, Tian Jianbo, et al. Economic benefits research of urban underground pipe gallery [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2015, 11 (Supp. 2): 373-377. (in Chinese))
- [6] 王曦,祝付玲.基于博弈分析的城市综合管廊收费对策研究[J].地下空间与工程学报,2013,9(1):197-203. (Wang Xi, Zhu Fuling. Research of charge strategy for urban underground pipe gallery based on game theory analysis [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2013, 9(1): 197-203. (in Chinese))
- [7] 谭春晓.我国城市地下管线综合管廊建设前景展望[J].价值工程, 2015(4): 93-94. (Tan Cunxiao. Prospects for the construction of urban underground pipe gallery in China [J]. Value Engineering, 2015(4): 93-94. (in Chinese))
- [8] 赵佳,覃英豪,王建波,等.城市地下综合管廊 PPP 模式融资风险管理研究[J].地下空间与工程学报, 2018, 14(2): 315-322, 331. (Zhao Jia, Qin Yinghao, Wang Jianbo, et al. Research on the risk management of PPP mode financing of utility Tunnel [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2018, 14(2): 315-322, 331. (in Chinese))
- [9] 王建.城市地下市政综合管廊建设费分摊探讨[J].上海建设科技, 2008(10): 66-67. (Wang Jian. Investigation on construction fee of urban underground pipe gallery [J]. Shanghai Construction Science and Technology, 2008(10): 66-67. (in Chinese))
- [10] 陈倬.地下空间大规模开发的投融资路径选择[J].地下空间与工程学报, 2011, 7(2): 207-213. (Chen Zhuo. The route choice of investment and financing for the large-scale development of underground space [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2011, 7(2): 207-213. (in Chinese))
- [11] 伍迪,王守清. PPP 模式在中国的研究发展与趋势[J].工程管理学报, 2014, 28(6): 75-80. (Wu Di, Wang Shouqing. Research development and trend of PPP model in China [J]. Chinese Journal of Engineering Management, 2014, 28(6): 75-80. (in Chinese))
- [12] 王东波,王薇.基础设施项目 PPP 模式选择研究述评[J].项目管理技术, 2013, 11(12): 39-45. (Wang Dongbo, Wang Wei. Review on the research of PPP model selection for infrastructure projects [J]. Project Management Technology, 2013, 11(12): 39-50. (in Chinese))
- [13] 因内恩·马可-斯达德勒,大卫·佩雷斯-卡斯特里罗著,管毅平译.信息经济学引论:激励与合约[M].上海:上海财经大学出版社,2004. (Marco Nain Stadler, David Peres Luo Castries, (translated by Guan Yiping). The introduction to the economics of information: incentives and contracts [M]. Shanghai: Shanghai University of Finance and Economics Press, 2004. (in Chinese))
- [14] 中华人民共和国住房和城乡建设部.市政工程投资估算指标(HGZ47-109-2007)[S].北京:中国计划出版社, 2007. (Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Municipal engineering investment estimate (HGZ47-109-2007) [S]. Beijing: China Planning Press, 2007. (in Chinese))
- [15] 《电力建设工程预算定额》[Z]. 2013. (Budget quota of electric power construction project [Z]. 2013. (in Chinese))
- [16] 《通信建设工程预算定额》[Z]. 2008. (Communication construction project budget quota [Z]. 2008. (in Chinese))