

# 基于系统动力学的高速公路 PPP 项目收益研究

刘祖容 潘睿

广西大学土木建筑工程学院

DOI:10.12238/btr.v7i2.4254

**[摘要]** 在我国公共交通运输基础设施建设中,高速公路PPP项目作为我国交通运输业重要的一部分,如何保证高速公路PPP项目的合理利润是高速公路PPP项目运营成功的关键。本文通过搭建高速公路PPP项目的收益框架,对项目收益影响因素进行分析,利用系统动力学和Vensim PLE软件构建考虑交通量对维护成本的影响的高速公路PPP项目收益系统动力学模型,并借助实际案例进行模拟仿真,以验证模型的有效性,为高速公路PPP项目中政府和社会资本在投资决策时提供更准确的参考。

**[关键词]** 高速公路; PPP项目; 收益; 系统动力学

中图分类号: U412.36+6 文献标识码: A

## Research on the Benefits of Expressway PPP Projects Based on System Dynamics

Zurong Liu Rui Pan

School Of Civil Engineering and Architecture, Guangxi University

**[Abstract]** In the construction of public transportation infrastructure in China, expressway PPP projects are an important part of the transportation industry. How to ensure the reasonable profits of expressway PPP projects is the key to the successful operation of expressway PPP projects. This article analyzes the factors that affect the revenue of highway PPP projects by building a revenue framework. It uses system dynamics and Vensim PLE software to construct a revenue system dynamics model for highway PPP projects, and uses actual cases for simulation to verify the effectiveness of the model. This provides relevant references for the government and social capital in investment decision-making in highway PPP projects.

**[Key words]** Expressway; PPP project; Benefits; System Dynamics

### 引言

随着我国经济的快速发展,高速公路建设成为了国家基础设施建设的重要组成部分。高速公路作为现代社会的经济命脉,对于促进区域协调发展、提高交通运输效率、缓解城市交通压力等方面起到了积极作用。然而,受国家财政投入能力和债务风险等因素制约,传统的高速公路投资模式已经无法满足日益增长的基础设施需求。在此背景下,引入社会资本参与高速公路建设,通过PPP模式进行项目投资与运营,逐渐成为高速公路建设与运营的一种重要方式。PPP模式在高速公路建设中的应用,既可以有效减轻政府的财政压力,又可以充分调动民间资本的积极性,实现公共资源的优化配置。然而,高速公路PPP项目在实际运作过程中,面临诸多挑战,特别是在项目盈利控制方面。由于高速公路建设所涉及的资金规模较大,投资回报周期较长,这使得项目在运营的阶段往往难以把握项目的盈利情况。

由此可见,要实现双方利益的兼顾,需要合理地预测和评估项目的收益,确保项目收益在合理范围内。这样才能吸引社会投资者按照市场规则长期参与高速公路的建设和运营,从而促进

高速公路的可持续发展。

### 1 基于系统动力学研究PPP项目收益的相关理论

宋金波<sup>[1]</sup>等人的研究目标是构建垃圾焚烧发电BOT项目收益的系统动力学模型。他们通过分析此类项目收益系统的影响因素,基于系统动力学方法构建了项目收益模型,并运用模糊逻辑方法研究了地区经济发展水平和政府履约程度等定性因素对模型的影响。薛朝改和周金库<sup>[2]</sup>的研究首先构建了一个基于PPP项目绩效的系统动力学模型。然后,他们以某高速公路为例,进行模型的有效性检验、仿真分析以及灵敏度分析。他们的研究结果表明,提高政府信用、公众信用和公众满意度对PPP项目的绩效具有促进作用。闫文周和曹丽娜<sup>[3]</sup>构建了公路PPP项目经济效益的系统动力学模型,结果表明,年交通量对公路PPP项目的经济效益影响最大,但维护成本、路面性能和政府补贴等因素对经济效益的动态调节作用也不容小觑。钟浩<sup>[4]</sup>提出了一种基于系统动力学的高速公路PPP项目成本与效益研究模型。结果表明,高速公路PPP项目的成本增加会抑制项目建设的积极性,而交通量和收费标准是影响项目的重要因素。

目前针对高速公路PPP项目收益影响因素的研究较为单一和简单,多数学者未综合考虑交通量、日常维护等因素的相互影响、相互作用,忽视了当某一变量发生改变时,与之相关联的变量也将随之改变,进而导致对项目收益的预测缺乏准确性,容易导致决策失误。鉴于此,本文将以道路日常维护成本与交通量之间的动态影响关系为侧重点展开研究,探究这些影响因素对高速公路PPP项目收益的影响情况,以期为政府和社会投资者在筹资、建设、运营和管理高速公路PPP项目时提供更准确的参考依据。

高速公路PPP项目收入的主要来源为车辆通行收入,而交通量是影响车辆通行收入的重要因素。当交通量增加时,车辆通行收入提高,同时也会加速高速公路的磨损,高速公路路面状况会随着车流量和环境等因素的作用而逐渐变差。当路面状况达到一定的阈值时,管理者便需要对路面采取日常维护以及中大修等维护措施,以使路面性能在项目运行期间能维持在较高水平。由此可知高速公路交通量越高,道路磨损越严重,日常维护成本和中大维修费用也越高。

在考虑交通量与日常维护成本之间作用关系的基础上,构建高速公路日常维护成本增量与交通量增量之间的函数关系为:

$$\Delta R_t = \alpha \cdot \Delta Q_t^\beta$$

式中:  $\Delta R_t$  为第t年的高速公路日常维护成本增加量(单位:元km年);  $\Delta Q_t$  为第t年的平均每日交通量增加量(单位:辆);  $\alpha$ 、 $\beta$  为关系系数,参照《公路养护预算编制办法及定额》(DB45/T 2228.2-2020)的标准,通过回归拟合分析可测得约为0.03,  $\beta$  约为1.26。该函数反映了高速公路日常维护成本增量与交通量增量之间的关系,为后文的系统动力学建模奠定基础。

### 2 高速公路PPP项目收益系统动力学模型构建

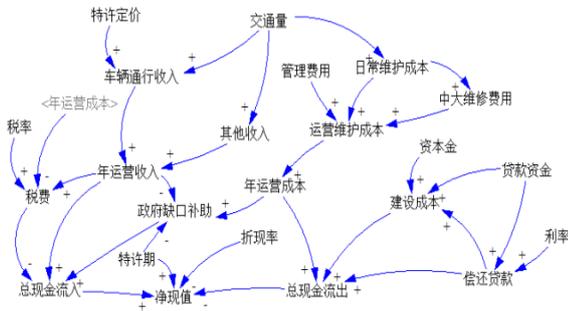


图1 高速公路PPP项目收益因果关系图

2.1高速公路PPP项目收益系统构成及因果关系分析。高速公路PPP项目收益系统由两个部分构成:总现金流入子系统、总现金流出子系统。项目收益由总现金流入子系统和总现金流出子系统产生的收益净现值来体现。总现金流入由政府缺口补助及扣除相关税费后的年运营收入构成。年运营收入主要包括车辆通行收入和其他收入。总现金流出由建设成本、年运营成本和每年偿还的贷款构成。建设成本由项目资本金、贷款资金和建设期利息构成。年运营成本包括日常维护成本、中大维修费用、管理费用<sup>[5]</sup>,其中日常维护成本会受到交通量的影响,即交通量越高,项目的日常维护成本也越高。偿还贷款由贷款资金和贷款利率构成。这两个非线性的子系统之间相互独立、相互联

系、相互影响。根据对影响高速公路PPP项目收益的各个要素的分析,绘制高速公路PPP项目收益系统的因果关系图,如图1所示。

2.2高速公路PPP项目收益系统变量分析。根据梳理高速公路PPP项目各个变量要素的因果关系,得出收益系统中的流量和存量的变化关系,进而高速公路PPP项目的收益系统动力学存量流量图如图2所示,其主要变量如下:

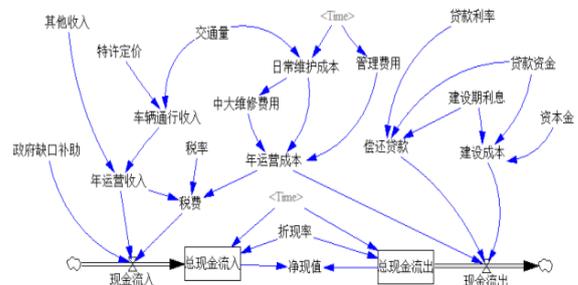


图2 高速公路PPP项目收益存量流量图

2.2.1状态变量。在高速公路PPP项目收益系统动力学模型中,项目总现金流入和项目总现金流出是项目特许期内连续的各个年份累计值,然后得到收益净现值为最终输出值,采用系统动力学中INTEG(m, n)函数计算,m为变化量,n为初始值,Time代表项目运营期<sup>[5]</sup>。

$$\begin{aligned} \text{总现金流入现值} &= \text{INTEG} \left( \frac{\text{年运营收入} + \text{政府缺口补助} - \text{税费}}{(1 + \text{折现率})^{\text{Time}}} \right) \\ \text{总现金流出现值} &= \text{INTEG} \left( \frac{\text{年运营成本} + \text{建设成本} + \text{偿还贷款}}{(1 + \text{折现率})^{\text{Time}}} \right) \\ \text{收益净现值} &= \text{总现金流入现值} - \text{总现金流出现值} \end{aligned}$$

2.2.2辅助变量。

$$\begin{aligned} \text{建设成本} &= \text{资本金} + \text{贷款资金} + \text{建设期利息} \\ \text{每年偿还贷款} &= \frac{\text{贷款资金} \times \text{贷款利率} \times (1 + \text{贷款利率})^{\text{Time}}}{(1 + \text{贷款利率})^{\text{Time}} - 1} \\ \text{年运营成本} &= \text{中大维修费用} + \text{日常维护费用} + \text{管理费用} \\ \text{年运营收入} &= \text{交通量} \times \text{特许定价} + \text{其他收入} \\ \text{税费} &= (\text{年运营收入} - \text{年运营成本}) \times \text{综合税率} \end{aligned}$$

### 3 高速公路PPP项目收益仿真模拟

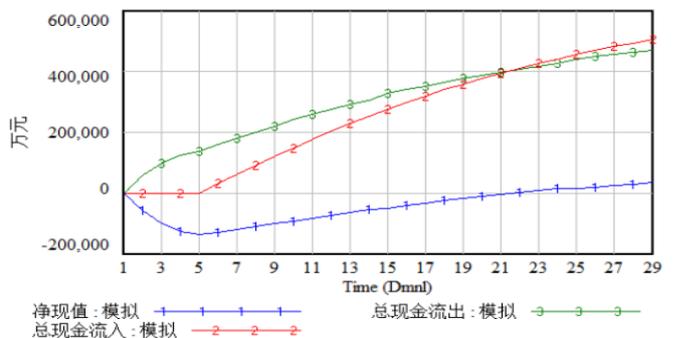


图3 高速公路PPP项目净现值模拟图

深圳某段双向六车道高速公路PPP项目建设成本484928.5万元,其中资本金为153328.5万元,贷款资金为331600万元,政

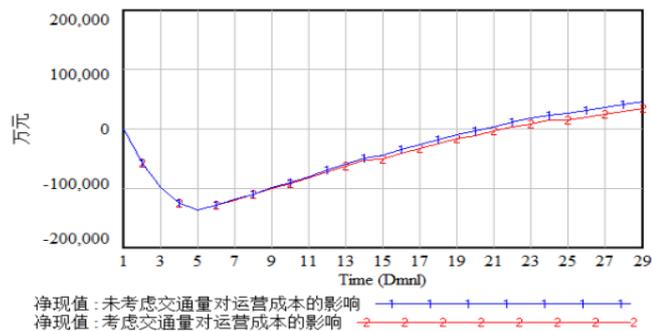
府每年补助24736万元。该项目特许期共29年,包括4年建设期和25年项目运营期。项目建成后,由项目公司负责本项目的运营维护工作,待期满后按合同上约定的本项目的资产全部无偿移交给政府。运用Vensim PLE软件进行仿真模拟,项目收益模拟结果如表1,项目净现值变化趋势如图3。

表1 高速公路PPP项目净现值表

特许期 (年)	项目净现值 (万元)	特许期 (年)	项目净现值 (万元)	特许期 (年)	项目净现值 (万元)
1	0	11	-82216	21	-4048.34
2	-57859.8	12	-72114.7	22	2609.94
3	-98798.4	13	-62257.3	23	8921.97
4	-124546	14	-52650.8	24	14903.6
5	-136691	15	-50439	25	14791.6
6	-128402	16	-41348.5	26	20157.2
7	-119531	17	-32708.3	27	25236
8	-110173	18	-24498.5	28	30041.3
9	-100413	19	-16699.8	29	34585.9
10	-92552.8	20	-11069.3		

根据模拟仿真可知,项目特许经营期为29年时,项目收益净现值约为34585.9万元,项目内部收益率为8.09%。社会资本能够得到合理的利润。

为验证本研究评估方法的有效性,将上述模拟结果与未考虑交通量对运营成本的影响的项目收益模拟结果进行对比分析,具体情况如图4所示。



由图4可知,考虑了交通量对项目维护成本的影响,模拟得出的收益结果较未考虑交通量对维护成本的影响时要低,符合预期的理论结果,也更符合项目运营的真实情况。

#### 4 考虑交通量对高速公路PPP项目运营成本影响的敏感性分析

为分析交通量对项目日常维护成本的作用关系对高速公路PPP项目收益的影响情况,在特许定价以及特许期不变的前提下,在对交通量分别调整±10%,±20%的情况下,对比分析它们对项

目净现值的影响效果,模拟结果如表2所示。

表2 交通量对维护成本的影响的敏感性分析

交通量变化率	-20%	-10%	0%	10%	20%
不考虑交通量对维护成本的影响的项目净现值(万元)	-4955.34	20457.4	45870.1	71282.8	96695.5
净现值增长量(万元)	/	25412.7	25412.7	25412.7	25412.7
考虑交通量对维护成本的影响的项目净现值(万元)	-13473.8	10576	34585.9	58558.8	82497.1
净现值增长量(万元)	/	24049.8	24009.9	23972.9	23938.3

由表2可以看出,交通量对项目的收益起到显著的影响作用,而随着交通量的提高,在不考虑交通量对维护成本的影响时,项目特许期结束时项目的净现值增长量一致;而在考虑了交通量对维护成本的影响后,项目特许期结束时项目的净现值增长量逐渐减少,说明随着交通量的提高,会加速道路的磨损,使得道路日常维护成本增长加快。

#### 5 研究结论

本文以高速公路PPP项目收益为研究对象,运用系统动力学方法分析项目收益的因果关系,构建考虑交通量对维护成本的影响的项目收益系统动力学模型,运用Vensim PLE软件结合某高速公路案例进行仿真模拟与分析,得出以下研究结论:

①传统的高速公路PPP项目收益预测方法往往忽视了交通量与道路维护成本之间的作用关系,很有可能造成预测出的项目收益偏高,而在实际运营中却远远达不到预期的收益。而本文在考虑了交通量与道路维护成本之间的作用关系的基础上建立的系统动力学模型,会更贴合实际情况,也更具有可借鉴性。②高速公路PPP项目在运营过程中,管理者应关注道路交通量的增长情况,必要时可提高收费标准,以避免交通量过多而加速道路的磨损,减少使用寿命。

高速公路PPP项目建设周期长、资金需求大、人员设备投入多,运营情况多样化,因此,高速公路PPP项目的收益是一个复杂的系统,在未来研究中,可以进一步分析其他影响因素的相互作用,例如:收费标准对交通量的影响、人员技术水平对建设成本的影响等对项目收益系统的影响。

#### [参考文献]

[1]宋金波,宋丹荣,付亚楠.垃圾焚烧发电BOT项目收益的系统动力学模型[J].管理评论,2015,27(03):67-74.  
 [2]薛朝改,周金库.PPP项目绩效的系统动力学建模与分析——以某高速公路为例[J].财会月刊,2019,(08):171-176.  
 [3]闫文周,曹丽娜.基于系统动力学的公路PPP项目经济效益评估[J].土木工程与管理学报,2021,38(03):8-14.  
 [4]钟浩.高速公路PPP项目成本与效益动态管理研究[J].黑龙江交通科技,2023,46(04):178-181.  
 [5]刘秋林,贾立敏.基于系统动力学的高速公路PPP项目收益研究——以田林至西林(滇桂界)高速公路为例[J].价值工程,2019,38(16):20-23.