

沥青路面结构方案的选择——寿命周期费用分析

许志鸿¹, 刘志远¹, 林 晓²

(1. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海市 200092; 2. 重庆交通学院)

摘 要: 对于路面这种投资期长的工程来说, 应把一定时期内所有的主要费用(包括支出和收益)都考虑在内, 并把不同时间发生的费用以现值表示, 才能对各个方案作出合理的经济比较。该文应用寿命周期费用分析方法对沪宁高速公路试验段的3种路面结构方案进行了分析比较, 可为路面设计提供参考。

关键词: 寿命周期费用分析; 交通量; 贴现率; 现值; 车辙深度

对于路面这种投资期长的工程来说, 初期费用低不一定是经济效益最优, 而应把一定时期内所有的主要费用(包括支出和收益)都考虑在内, 并把不同时间发生的费用以现值表示, 才能对各个方案作出合理的经济比较。这种考虑路面寿命周期内所有费用(包括修建、养护、改建和用户费用等)的分析方法, 称作寿命周期费用分析(Life Cycle Cost Analysis——LCCA)。

寿命周期费用分析(LCCA)法应用于路面经济分析, 出现于上世纪70年代, 被认为是较合理的方法, 根据美国联邦公路管理局(FHWA)1997年的调查, 52个公路机构(涵盖50个州)中有近2/3的州采用了LCCA法来确定新建或改建项目的路面类型。本文尝试采用这种方法来分析沪宁高速公路拓宽工程试验段所采用的路面结构方案。

1 寿命周期费用分析方法

寿命周期费用分析是对具有不同费用流向的投资方案进行比较分析的方法, 它考虑了影响路面投资决策的绝大部分因素。这些因素包括初期修建费或改建费、寿命周期内的养护费用以及用户费用等。其分析过程由8个步骤组成: 制定各种路面设计对策; 确定路面使用性能期, 制定养护和修复活动时限; 估算管理部门费用; 估算使用者费用; 绘制开支(费用)流程图; 计算寿命周期费用; 分析结果; 重新评估方案。

2 路面结构方案的寿命周期费用分析

2.1 交通量

根据中交第二公路勘察设计研究院编制的沪宁高速公路(江苏段)扩建工程——工程可行性研究报告所提供的不考虑超载情况下各阶段年初交通量及阶段交通量增长率、车型构成比例、交通量换算系数(分别见表1、2、3)进行计算与分析。

2.2 路面结构方案

根据上述交通量情况, 沪宁高速公路扩建工程试

表1 各阶段年初交通量及阶段交通量增长率

阶段/年	年初预计交通量 /辆·d ⁻¹	预计交通量 增长率/%
2007~2009	36 712	5.2
2010~2019	42 742	2.9
2020~2026	56 886	1.8

表2 车型构成比例 %

阶段 /年	小 客车	大 客车	客车 合计	小 货车	中 货车	大 货车	集装 箱	货车 合计
2007~ 2009	47.9	11.2	59.1	10.1	11.2	13.5	6.1	40.9
2010~ 2019	49.5	10.1	59.6	9.2	10.4	14.1	6.7	40.4
2020~ 2026	51.5	8.7	60.2	8.4	9.7	14.5	7.2	39.8

表 3 交通量换算系数

小客车	大客车	小货车	中货车	大货车	集装箱
0.019 8	0.946 8	0.003 7	0.194 1	1.358 9	3.108 4

验研究了 3 种路面结构方案。

方案 I: 柔性基层。改性沥青 SMA-13(4 cm)+改性沥青 Sup-20(8 cm)+普通沥青 Sup-20(8 cm)+普通沥青 LSM-25(20 cm)+干压二灰碎石废料(20 cm)+土基。

方案 II: 柔性基层。改性沥青 SMA-13(5 cm)+改性沥青 Sup-20(16 cm)+普通沥青 Sup-25(16 cm)+级配碎石(22 cm)+干压回收废料(20 cm)+石灰稳定土调高层+土基。

方案 III: 半刚性基层。改性沥青 SMA-13(4 cm)+改性沥青 Sup-20(8 cm)+普通沥青 Sup-25(7.5 cm)+普通沥青 Sup-25(7.5 cm)+水泥稳定碎石(36 cm)+石灰土(15 cm)+土基。

2.3 经济分析方法

一般来说,在经济分析时应考虑各方案在效益上的差别。但是对路面而言,效益有时很难准确估算,这时往往假设各方案具有相同的效益,而采用现值法或费用法。本文选用现值法。

2.3.1 贴现率

通常表示为年利率,它反映了钱的时间价值。分析期内发生在不同时间的费用和效益,要转换为现有的费用和效益,以便于在共同基础上进行比较。根据美国资料,贴现率采用 3%~5%。我国国家计委曾建议贴现率为 10%。本文选用 5%、10%、15% 三个贴现率来进行分析。

2.3.2 分析期

进行方案比较的时间段称为分析期。分析期内路面将采用若干次养护和改建措施。分析期要足够长,以便把未来可能发生的影响分析结果的主要费用都考虑在内。对于路面改建项目分析期通常采用 15~25 年。本课题分析期采用 22 年。

2.3.3 现值法

把分析期内不同时间支出的费用,按某一预定的贴现率转换为现在的费用(现值)。通过转换成单一的现值,便可在等值的基础上比较各方案。

现值法包括费用现值和净现值两种。本文用费用现值法,其表达式如下:

$$PWC_{x_1,n} = IC_{x_1} + \sum_{i=0}^n pwf_{i,t}(RC_{x_1,t} +$$

$$MC_{x_1,t} + UC_{x_1,t}) - pwf_{i,n}SV_{x_1,n}$$

式中: $PWC_{x_1,n}$ 为方案 x_1 在分析期 n 年内的总费用现值; IC_{x_1} 为方案 x_1 的初期修建费; $RC_{x_1,t}$ 、 $MC_{x_1,t}$ 、 $UC_{x_1,t}$ 分别为方案 x_1 在 t 年的改建费、养护费和用户费; $SV_{x_1,n}$ 为方案 x_1 在分析期末(n 年)的残值; $pwf_{i,n}$ 为贴现率 i 在年份 n 的现值系数, $pwf_{i,n} = 1/(1+i)^n$ 。

2.4 3 种路面结构方案的寿命周期费用分析

2.4.1 使用寿命和性能预估

使用寿命: 为简便计,路面各方案的使用寿命均取 22 年,分析期亦为 22 年。

性能预估: 路面的使用性能与多项因素有关,如平整度、车辙、纵向裂缝、横向裂缝、块状裂缝、沉陷、坑槽等。由于目前资料不足,本课题仅以重庆交通科研设计院的环境道试验结果为依据。在该试验中,3 种路面结构方案在经受室内 50 万次疲劳加载后,没有明显的疲劳迹象,因此这部分资料难以用上。

根据重庆环境永久变形试验结果,可得 3 种路面结构方案表面永久变形增长规律如下:

(1) 对于方案 I 路面结构(简称 A 方案):

$$R_{u,A} = 3.3075 \ln x - 22.4266 \text{ (mm)}$$

$$R^2 = 0.9739$$

(2) 对于方案 II 路面结构(简称 B 方案):

$$R_{u,B} = 2.3287 \ln x - 14.6675 \text{ (mm)}$$

$$R^2 = 0.9662$$

(3) 对于方案 III 路面结构(简称 C 方案):

$$R_{u,C} = 3.0796 \ln x - 21.1523 \text{ (mm)}$$

$$R^2 = 0.9815$$

根据上述方程式,可得沪宁高速公路拓宽工程试验路段通车后 20 年内各种路面结构方案可能产生的车辙深度(表 4)。

2.4.2 关于车辙深度的指标

在 2002 年 AASHTO 路面结构设计指南中,规定车辙深度标准为 0.3~0.5 英寸(7.62~12.7 mm),我国尚无这方面的标准,但一般认为:在车辙深度 ≥ 20 mm 的路段,病害程度较为严重,应将出现车辙的上面层切削或铣刨并清除干净,铣刨厚度为 4 cm,在铣刨处重铺沥青混合料,摊铺厚度 4 cm。

根据表 4 计算结果可知:A 方案在通车后第 13 年(车辙深度 20.30 mm)、C 方案在通车后第 19 年(车辙深度 20.11 mm)需要进行第一次铣刨;而 B 方案在通车后第 22 年,车辙深度才达到 17.03 mm,故在分析期内不需要铣刨。

表 4 车辙深度变化计算表

通车 年数	年份 /年	日交通量 /辆·日 ⁻¹	每年累计交通量 /辆	每年荷载 作用次数 /次	修正后 作用次数 /次	累计荷载 作用次数 /次	车辙深度/mm		
							A 方案	B 方案	C 方案
1	2005	33 172	12 107 917	6 183 545	1 082 120.3	1 082 120	10.87	8.80	9.85
2	2006	34 897	12 737 529	6 505 089	1 138 390.6	2 220 511	13.25	10.48	12.06
3	2007	36 712	13 399 880	6 843 354	1 197 586.9	3 418 098	14.67	11.48	13.39
4	2008	38 621	14 096 674	7 199 208	1 259 861.4	4 677 959	15.71	12.22	14.36
5	2009	40 629	14 829 701	7 573 567	1 325 374.2	6 003 333	16.54	12.80	15.12
6	2010	42 742	15 600 830	8 203 264	1 435 571.3	7 438 905	17.25	13.30	15.79
7	2011	43 982	16 053 254	8 441 159	1 477 202.8	8 916 107	17.84	13.72	16.34
8	2012	45 257	16 518 798	8 685 953	1 520 041.7	10 436 149	18.37	14.09	16.83
9	2013	46 569	16 997 844	8 937 845	1 564 122.9	12 000 272	18.83	14.42	17.26
10	2014	47 920	17 490 781	9 197 043	1 609 482.5	13 609 754	19.24	14.71	17.65
11	2015	49 310	17 998 014	9 463 757	1 656 157.5	15 265 912	19.62	14.98	18.00
12	2016	50 740	18 519 956	9 738 206	1 704 186	16 970 098	19.97	15.23	18.33
13	2017	52 211	19 057 035	10 020 614	1 753 607.4	18 723 705	20.30	15.46	18.63
14	2018	53 725	19 609 689	10 311 212	1 804 462	20 528 167	20.60	15.67	18.91
15	2019	55 283	20 178 370	10 610 237	1 856 791.4	22 384 959	20.89	15.87	19.18
16	2020	56 886	20 763 390	11 057 593	1 935 078.8	24 320 038	21.16	16.07	19.43
17	2021	57 910	21 137 131	11 256 630	1 969 910.2	26 289 948	21.42	16.25	19.67
18	2022	58 952	21 517 599	11 459 249	2 005 368.6	28 295 317	21.66	16.42	19.90
19	2023	60 013	21 904 916	11 665 516	2 041 465.2	30 336 782	21.89	16.58	20.11
20	2024	61 094	22 299 205	11 875 495	2 078 211.6	32 414 993	22.11	16.74	20.32
21	2025	62 193	22 700 590	12 089 254	2 115 619.4	34 530 613	22.32	16.89	20.51
22	2026	63 313	23 109 201	12 306 860	2 153 700.6	36 684 313	22.52	17.03	20.70

而经过计算,在整个分析期内 A、C 方案都只需一次铣刨,铣刨重铺维修后到分析期结束时的车辙深度分别为 20.16 mm 和 14.08 mm。

2.4.3 寿命周期内费用的计算

(1) 公路部门费用计算

① 修建费:根据当地经验,3 种路面结构方案的修建费见表 5。

表 5 3 种方案路面结构修建费

比较方案	造价/万元·km ⁻¹
A	1 165.25
B	1 282.012
C	1 109.95

② 养护费:各方案的养护费用尚无适当资料可供参考,在本报告中,暂不考虑。

③ 路面残值:分析期末路面的残值按剩余寿命占其使用寿命的比例计。本文是按累计交通量的比例来计算的,具体计算见表 6。

④ 改建费:路面经一次铣刨处理维修的费用如表 7 所示。

表 6 路面残值计算表

方案	车辙深度达到 20 mm 所需交通量/辆	分析期后已累计 交通量/辆	分析期后 残值/%
A	17 107 235	17 960 608	0
B	131 046 009	36 684 313	14.72
C	29 234 187	4 269 320	17.45

表 7 一次铣刨处理维修费用

铣刨费用 /元·m ⁻³	废料运输费用 /元·m ⁻³	SMA 路面重铺费用 /万元·km ⁻¹	总计 /万元·km ⁻¹
112.5	16.86	173.8	20.44

(2) 用户费用计算

用户费用由燃油消耗费、轮胎消耗费和保修材料消耗费 3 项组成。消耗量分别按下列公式计算。即每辆车:

$$\text{油耗: } F_L = a_1 + b_1 IRI \text{ (1/100 km)}$$

$$\text{轮胎耗: } T_C = a_2 + b_2 IRI \text{ (条/1 000 km)}$$

$$\text{材料耗: } P_C = C_0 C_{km} \cdot e^{C_q IRI} \text{ (占新车价比例/1 000 km)(客车)}$$

$$P_C = C_0 C_{km} \cdot (1 + C_q IRI) \text{ (占新车价比例/1 000)}$$

km) (货车)

各计算式中的系数,列于表 8。

表 8 油耗、轮耗和材料消耗公式中的各项参数

车辆类型	a_1	b_1	a_2	b_2	$C_0(\times 10^{-6})$	$C_q(\times 10^{-3})$	k_P	$C_{km}(\times 10^4)$
小客车	9.78	0.182	0.046 6	0.007 1	12.95	17.81	0.308	15
大客车	23.80	0.294	0.739	0.001 6	1.87	4.63	0.483	50
小货车	17.42	0.568	0.066 9	0.010 7	1.87	327.33	0.371	30
中货车	23.00	0.434	0.065 3	0.001 2	1.87	327.33	0.371	30
大货车	19.00	0.298	0.155 6	0.003 4	5.52	45.90	0.371	30
集装箱车	35.39	0.893	0.215 5	0.005 3	5.52	20.35	0.371	30

其中平整度指数 IRI 按已有的使用性能预估模型使用下式预估:

$$IRI = 12.689 - 11.046e^{-0.039y}$$

式中: y 为年数。

燃油的单价取用 4.0 元/L(不分柴油和汽油)。各种轮胎的单价取为:小客车和小货车取 210 元/个,大客车和中货车取 800 元/个,大货车和集装箱车取 1 130 元/个;新车单价取为:小客车取 17.3 万元/辆,

大客车取 7.5 万元/辆,小货车取 3.2 万元/辆,中货车取 5.0 万元/辆,大货车为 11.0 万元/辆,集装箱车取 25.7 万元/辆。

2.4.4 3 种方案的各种费用现值计算

3 个方案在分析期内各年支出的费用,按现值系数换算为现值。贴现率取 5%、10% 和 15% 共 3 种,并将各年各种费用现值的计算结果合计起来列于表 9。

表 9 3 种方案费用现值计算表

方案	初期修建费 /万元·km ⁻¹	改建费/万元·km ⁻¹			用户费/万元·km ⁻¹			残值/万元·km ⁻¹		
		5%	10%	15%	5%	10%	15%	5%	10%	15%
A	1 165.25	10.32	5.38	2.89	17 723.38	11 104.56	7 635.33	0	0	0
B	1 282.01	0	0	0	17 723.38	11 104.56	7 635.33	-5.03	-1.81	-0.68
C	1 109.95	7.34	2.76	1.09	17 723.38	11 104.56	7 635.33	-5.97	-2.14	-0.81

2.5 3 个方案寿命周期内费用现值计算的结果分析

3 个方案的费用现值计算结果示于表 10。

表 10 3 种方案费用现值汇总表

方案	不同贴现率(%)时费用现值汇总/万元·km ⁻¹		
	5	10	15
A	18 898.96	12 275.19	8 803.47
B	19 000.36	12 384.761	8 916.665
C	18 834.70	12 215.13	8 745.56
费用现值 最小方案	C	C	C

由表 10 对比数据可以看出:

(1) 3 个方案的费用略有差别,若由小到大排序则:C 方案<A 方案<B 方案。

(2) 由于沪宁高速公路为双向八车道,如果每次改建(铣刨、重铺)时施工区分为两车道 2 km,那么所造成的用户时间延误费用相对较小,但目前国内尚无这方面的研究成果,所以本项目对改建造成的用户时间延误的费用没有考虑。

(3) B 方案费用虽略大于其他两个方案,但对于沪宁高速公路交通量很大的具体情况,若能在 20 年的分析期内不铣刨处理,保持车辆畅通,其社会效益巨大,应是最佳方案。

3 结 语

我国在路面结构方案选择时还很少在路面的整个寿命周期内应用经济方法进行全面考虑。由于所需资料不全,我国对路面使用的性能预估等也缺乏相应的研究,还不能建立一个适合我国的完整的性能预估的模型,养护费用 and 用户费用的计算也需要更新的统计资料的积累并进一步分析得出合理的公式进行计算,故本文仅是对 LCCA 在路面结构方案选择上的应用做了一个初步的探讨,而 LCCA 在我国真正应用还需要从事道路的工作同行做更多的研究。