

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2020.01.056

基于分数阶拓展算子 GM(1,1)模型的高速公路养护成本预测

向红艳, 徐莲怡*

(重庆交通大学 交通运输学院, 重庆市 400074)

摘要: 通过分析高速公路养护成本构成,探讨日常养护、专修养护、大修养护成本随运营时间的变化规律,分析成本影响因素及相互关系。基于灰色系统理论,探讨养护成本随高速公路运营时间的变化规律。对成本历史数据进行数据关联性和特征分析,构建分数阶拓展算子灰色预测模型,并设计分子阶数和迭代过程,提高预测精度。最后,以某高速公路运营成本数据为实例,对模型进行了参数标定和应用效果分析。结果表明:该模型对高速公路日常养护成本的预测效果最佳,相对误差为5.17%。

关键词: 高速公路; 养护成本; 灰色预测模型; 分子阶数; 迭代

随着中国高速公路里程的快速增长,未来将全面进入高速公路网络化运营。高速公路的大量建设必然带来后期巨大的公路养护和维护任务。该文通过对历年高速公路养护成本数据的分析,尝试对养护成本的复杂性和随机性进行研究,探索各类别养护成本的变化趋势,对未来的养护成本进行预测。对高速公路运营管理具有重要意义,有利于成本管理从事后核算向事前、事中控制逐步转变。

目前,国内外研究人员在高速公路养护成本预测方面开展了广泛的研究。朱合利等运用系统工程学方法,对高速公路养护成本影响因素进行了识别,构建了养护成本分析的解构结构模型(ISM)和多级递阶因素结构模型,对成本要素的逻辑关系进行了研究;于英等运用边际成本原理,将高速公路划分为若干单元,建立了高速公路交通流量、道路长度、车道数、匝道数、材料设备与养护成本之间的多元回归分析数学模型,结果

表明,养护成本随交通流量和道路长度成对数变化;邱兆文等在高速公路养护费用测算方法中,构建了养护维修率指标体系,提出了基于综合路况的单公里养护维修费用计算模型,为养护经费的合理分配提供决策依据。

上述模型对养护成本的构成和影响因素进行了充分研究,但由于影响因素的量化和数据收集十分困难,模型精度有限。该文基于大量历史成本数据,运用灰色模型处理数据,建立更为精准的养护成本预测模型,以利于解析养护成本的变化趋势,提高预测精度。

1 高速公路养护成本的特征分析

高速公路建设的技术标准高,其养护工作涉及面广、工作量大,往往需要使用多种设备,机械费用高,以上因素造成高速公路养护综合成本较高。随着高速公

[5] JTG H20—2007 公路技术状况评定标准[S].

[6] 附件 中华人民共和国国家标准 公路路线标识规则 命名、编号和编码 GB 917.1—2000(代替 GB 917.1—1989)(摘要)[J].交通标准化,2001(5).

[7] 孙黎莹.国标《公路路线命名编号和编码规则》的说明[J].

交通标准化,1989(2).

[8] 修林岩.Excel2次开发技术在公路技术状况评定系统中的应用[J].公路交通技术,2010(1).

[9] 康俊涛,郑冰,秦世强,等.银川滨河黄河大桥养护管理系统的研究与开发[J].公路,2017(4).

收稿日期:2019-05-10

基金项目:重庆交通大学研究生教育创新基金资助项目(编号:CYS18222)

作者简介:向红艳,女,副教授.E-mail:xiang_@126.com

*通信作者:徐莲怡,女,硕士研究生.E-mail:354403979@qq.com

路运营时间增长,交通量逐年增加、大型货车超载行驶,对高速公路的破坏不断增多,给养护工作带来很大困难。

1.1 养护成本构成分析

高速公路养护是对路基工程、路面工程、桥梁隧道工程、交通工程、绿化工程、收费设施工程等附属设施

的养护,通过养护维修保养使得高速公路达到较好的服务水平。通过多部门数据进行汇总整理,按不同性质归类口径,形成有研究价值的成本数据。主要养护成本可分为:公路日常养护成本、公路专项中修养护成本、公路大修养护成本 3 类,其养护分类、养护主要内容、特点见表 1。

表 1 高速公路养护成本的构成分析

序号	类别	养护内容	成本占比/%	特点
1	公路日常 养护成本	路基、路面、桥涵、隧道	18.92	预防性、频繁性、周期性,能及时发现新问题,较强的随机性和时效性
2		安全设施维护	10.06	
3		通讯及监控设施维护	6.75	
4		公路绿化	4.24	
5		公路灾害防御及抢修	3.62	
6		收费系统维护	3.55	
7		水电设施维护	3.42	
8		房屋维修	2.67	
9		其他	6.31	
10	公路专项中 修养护成本	路基、路面专项工程	3.54	定期性、非应急性
11		桥涵、隧道专项工程	3.56	
12		绿化专项工程	2.24	
13		服务区、收费站维护专项工程	2.05	
14		改扩建工程(干线网改造、新收费站、电子不停车收费(ETC)设施、视频事件检测及 UPS 电源等)	1.70	
15	公路大修养护成本	大修工程	27.37	应急性、周期性、维修费用较大

1.2 养护成本变化趋势及特征

高速公路投资周期长,为了使高速公路保持一定的服务水平,在公路运营期间,需不断投入资金,对公路进行定期的日常养护与大、中修养护。高速公路养护成本具有大规模、多类别、低价值密度和多变化等特点,其成本构成复杂、涉及面广、影响因素较多。

(1) 日常养护费用特征

一般情况下,公路运营初期,车流量较小,无专项中修、大修养护成本支出,日常养护成本的路基、路面、桥涵、隧道的养护费用呈逐年缓慢增加趋势,占日常养护费用约 30%,安全设施维护占日常养护费用约 20%,公路灾害防御及抢修费用仅在发生年限支出,具有不可抗性和不可预测性。

(2) 专项中修费用特征

随着运营年限增长,交通量亦快速增长。高速公

路病害越来越多,需定期对公路进行专项中修,专修费用在总养护费用中所占比例越来越大。专项中修所产生的费用跟交通量、建设时期的技术水平、施工水平、材料及养护管理水平有关。

(3) 大修费用特征

大修工程费用一般在公路运营 10 年后产生,随着运营后期高速公路及其附属设施达到其服务周期,一般按照 12~15 年一次的频率考虑综合修理,使之全面恢复至原设计状态。

2 基于分数阶拓展算子的养护成本预测灰色模型

2.1 建模思路

高速公路养护成本预测,其影响因素十分复杂,且

数据在记录过程中存在计算误差、人工误差、设备误差等多种误差。灰色预测模型在应对数据缺失或信息不足方面,较之其他预测方法具有先天的优势,对高速公路大数据养护成本预测优势更为明显。

灰色模型是邓聚龙教授于 1984 年首次提出,随后陈锦云、刘思峰、李宝林、宋中民、王义闹、谢乃明、王正新、崔杰等研究人员以经典 GM(1,1)模型为基础,将单序列拓展到多序列,将一阶拓展到多阶,形成以 GM(n,h)模型为主要类型的灰色预测模型。如今,灰色预测模型灰色预测已经在农业、工业、社会、经济、交通、能源、医疗等众多领域得到广泛应用,成功地解决了生产、科研、管理中的大量现实问题。灰色模型是通过原始数据的挖掘、整理来寻求其变化规律,避免了各因素之间的影响,只考虑总体的发展趋势,且灰色序列生成可弱化表象复杂、数据离散的客观系统的随机性,挖掘出其蕴含的内在规律。高速公路养护成本影响因素多而复杂,考虑成本的构成体系、各因素对成本的影响,以历史数据为基础,通过对数据关联性和内在特征的分析,提取有显著规律的成本初始数据,采用分数阶拓展算子的灰色预测模型,得到精度更高的预测结果。建模过程中设置调节分子阶数和迭代算法,不断生成新的目标成本序列,并多次迭代得到预测结果,可大大提高养护成本预测值的准确度。

2.2 养护成本预测建模

基于灰色理论的养护成本预测算法是将实测数据 $X^{(0)}$ 作为输入,将 $X^{(0)}$ 的 r 分数阶累加生成序列 $X^{(r)}$ 进行均值处理后的 $Z^{(r)}$ 作为建模数据, $X^{(r)}$ 预测值经过 r 分数阶累减还原为原始序列 $X^{(0)}$ 的预测值。

假设 $X^{(0)} = \{x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), \dots, x^{(0)}(n)\}$ 为原始养护成本数据,其中 n 为序列长度,对其进行 r 阶累加生成处理:

$$X^{(r)} = \{x^{(r)}(1), x^{(r)}(2), \dots, x^{(r)}(n)\} \quad (1)$$

其中:

$$x^{(r)}(k) = \sum_{i=1}^k \frac{\tau(r+k-i)}{\tau(k-i+1)} x^{(0)}(i), k=1, 2, \dots, n \quad (2)$$

$$x^{(r)}(k) + ax^{(r)}(k) = b \quad (3)$$

当 $r=1$ 时, $x^{(0)}(k) + ax^{(r)}(k) = b$ 变为 $x^{(0)}(k) + ax^{(1)}(k) = b$ 。

使用 $X^{(0)}$ 的 r 分数阶累加生成序列 $X^{(r)}$ 、进行均值处理的 $Z^{(r)} = \{z^{(0)}(1), z^{(0)}(2), \dots, z^{(0)}(n)\}$ 作为建模数据,其中:

$$Z^{(r)} = \frac{x^{(r)}(k) + x^{(r)}(k-1)}{2}, k=2, 3, \dots, n \quad (4)$$

$$x^{(r-1)}(k) + az^{(r)}(k) = b \quad (5)$$

当 $r=1$ 时, $x^{(r-1)}(k) + az^{(r)}(k) = b$ 变为 $x^{(0)}(k) + az^{(1)}(k) = b$ $X^{(-r)} = \{x^{(-r)}(1), x^{(-r)}(2), \dots, x^{(-r)}(n)\}$ 为 $X^{(0)}$ 的 r 阶累减生成算子,其中:

$$x^{(-r)}(k) = \sum_{i=0}^{k-1} (-1)^i \frac{\tau(r+k-i)}{\tau(k-i+1)\tau(k)} x^{(0)}(k-i), k=1, 2, \dots, n \quad (6)$$

2.3 参数标定

分数阶拓展算子 GM(1,1) 模型 $x^{(r-1)}(k) + az^{(r)}(k) = b$ 中的参数向量 $\hat{a} = [a, b]^T$ 可运用最小二乘法估计:

$$\hat{a} = (B^T B)^{-1} B^T Y \quad (7)$$

其中 Y, B 分别为:

$$Y = \begin{bmatrix} x^{(r-1)}(2) \\ x^{(r-1)}(3) \\ \vdots \\ x^{(r-1)}(n) \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} -z^{(r)}(2) & 1 \\ -z^{(r)}(3) & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -z^{(r)}(n) & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

则分数阶拓展算子 GM(1,1) 模型 $x^{(r-1)}(k) + az^{(r)}(k) = b$ 的白化微分方程 $\frac{dx^{(r)}}{dt} + ax^{(r)} = b$ 由最小二乘求解,即时间响应函数为:

$$\hat{x}^{(r)}(t) = \left[x^{(r)}(1) - \frac{b}{a} \right] e^{-at} + \frac{b}{a} \quad (9)$$

分数阶拓展算子 GM(1,1) 模型 $x^{(r-1)}(k) + az^{(r)}(k) = b$ 的时间响应序列为:

$$\hat{x}^{(r)}(k) = \left[x^{(0)}(1) - \frac{b}{a} \right] e^{-a(k-1)} + \frac{b}{a}, k=2, 3, \dots, n \quad (10)$$

还原值为:

$$\hat{x}^{(r)}(k) = [\hat{x}^{(r)}]^{(-r)}(k) = \sum_{i=0}^{k-1} (-1)^i \cdot \frac{\tau(r+1)}{\tau(i+1)\tau(r-i+1)} \hat{x}^{(r)}(k-i), k=2, 3, \dots, n \quad (11)$$

$$\hat{x}^{(0)}(1) = x^{(0)}(1) \quad (12)$$

2.4 预测效果评价

为评价模型的预测效果,该文运用结果比较法,即通过观测数据与预测数据相比较,计算预测误差。设 $\varepsilon(k)$ 表示预测误差,则:

$$\varepsilon(k) = x^{(0)}(k) - \hat{x}^{(0)}(k), k=1, 2, \dots, n \quad (13)$$

式中: $\hat{x}^{(0)}(k)$ 为预测年限养护成本值; $x^{(0)}(k)$ 为第 k 年的养护成本。

令 Δ_k 为相对误差, Δ 为养护成本序列的平均相

对误差,则 $x^{(0)}(k)$ 序列的平均相对误差检验公式为:

$$\Delta_k = \frac{|\epsilon(k)|}{x^{(0)}(k)}$$

(14)

$$\Delta = \frac{1}{n-1} \sum_{k=2}^n \Delta_k$$

(15)

令 $S(X)$ 为序列均方根误差,则 $x^{(0)}(k)$ 序列的均方根误差检验公式为:

$$S(X) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n [x^{(0)}(k) - \hat{x}^{(0)}(k)]^2}$$

(16)

3 实证分析

3.1 数据来源

以某高速公路历年养护成本数据为例,按照 1.1 节中所述成本结构进行统计。得到 18 类共 8 年的数据。利用缺失数据填补和异常数据剔除等方法对数据进行预处理,得到初始成本时间序列。选取数据样本较多且具有周期性变化的日常养护成本数据,除去具

有不可抗性的公路灾害防御及抢修和其他两类成本,剩余 10 类成本分类数据见表 2。利用 10 组数据建立灰色预测模型,得到预测结果并分析。

3.2 预测结果及分析

以路面养护成本预测为例,取 $r=0.9$,用分数阶拓展算子 GM(1,1) 模型对其进行模拟,得: $X^{(0.9)} = \{21.80, 199.78, 199.76, 297.65, 418.09, 553.56, 707.13, 846.59\}$; 计算发展系数和灰色作用量,取 $a = -0.094\ 5, b = 81.100\ 4$, 计算 GM(1,1) 模型对应的微分方程,得:

$$\frac{dx^{(0.9)}}{dt} - 0.07x^{(0.9)} = 81.100\ 4$$

计算 $\hat{x}^{(0.9)}(k)$ 的时间响应式,得:

$$\hat{x}^{(0.9)}(k) = 880.005\ 29e^{0.094\ 5(k-1)} - 858.205\ 29, k$$

$= 2, 3, \dots, n$, 代入式(12)即得 $x^{(0)}(k)$ 的预测值 $\hat{X}^{(0)}$ 。

同理,可计算 $r=1$ 时的预测值 $\hat{X}_1^{(0)}$, 并计算未来 5 年的路面养护成本,结果见表 3。

表 2 相关养护成本数据

年份/ 年	路基/ 万元	路面/ 万元	桥涵/ 万元	隧道/ 万元	安全设施 维护/万元	通讯及监控设 施维护/万元	公路绿 化/万元	收费系统 维护/万元	水电设施 维护/万元	房屋维 修/万元
2009	70.13	21.80	20.26	5.67	40.39	90.76	8.24	13.80	9.19	5.48
2010	89.75	90.01	25.24	5.60	100.98	100.01	104.34	20.48	12.17	9.64
2011	90.56	100.11	29.91	7.47	120.64	105.25	162.57	25.78	25.13	12.98
2012	83.10	112.57	34.02	11.49	189.41	140.06	204.96	27.36	21.80	15.74
2013	92.46	139.22	25.34	14.90	212.87	138.30	181.31	37.18	26.19	27.54
2014	87.74	159.52	27.65	11.56	186.63	155.51	136.93	48.11	30.12	25.19
2015	77.22	182.81	31.51	14.83	197.95	118.89	140.83	58.78	35.26	39.39
2016	86.53	174.25	37.64	16.64	219.35	116.51	190.10	63.49	39.72	35.26

表 3 预测结果及误差分析

序号	年份/ 年	$x^{(0)}(k)/$ 万元	分数阶拓展算子 GM(1,1)模型					
			$r=0.9$			$r=1$		
			$\hat{X}^{(0)}/$ 万元	ϵ/k	$\Delta_k/\%$	$\hat{X}^{(0)}/$ 万元	ϵ/k	$\Delta_k/\%$
1	2009	21.80	21.80	0	0	21.80	0	0
2	2010	90.01	89.39	0.62	0.68	93.62	-3.61	4.01
3	2011	100.11	105.78	-5.67	5.67	105.35	-5.24	5.23
4	2012	112.57	120.59	-8.02	7.12	118.55	-5.98	5.31
5	2013	139.22	135.63	3.59	2.58	133.40	5.82	4.18
6	2014	159.52	151.49	8.03	5.03	150.11	9.41	5.90
7	2015	182.81	168.51	14.30	7.82	168.91	13.90	7.60
8	2016	174.25	186.93	-12.68	7.28	190.08	-15.83	9.08
平均相对误差 $\Delta/\%$			5.17			5.90		
均方根误差 $S(X)$			8.77			9.58		

由表 3 可知: $r=1$ 的 GM(1,1)模型平均相对误差、均方根误差略大于 $r=0.9$ 的分数阶拓展算子 GM(1,1)模型。总体来说,经过残差检验,分数阶算子 GM(1,1)模型预测精度都达到了合格标准,拟合精度较好,预测模型的可信度较高,可用此模型预测高速公路运营期养护维修保养费用(图 1)。

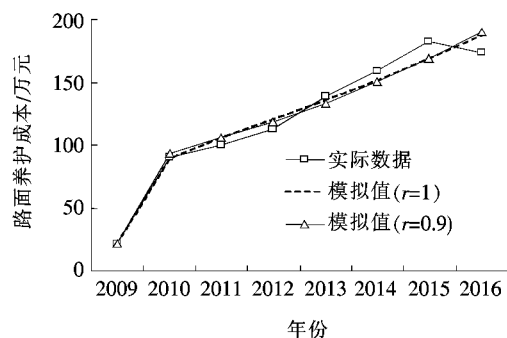


图 1 路面养护成本预测结果

由图 1 可知:分数阶拓展算子 GM(1,1)模型对高速公路隧道养护成本的预测较准确。总体来看,路面维修保养费用不断增加,且递增幅度在不断提高。 $r=0.9$ 时,2010 年养护成本预测值与实际值误差最小,相对误差为 0.68%;2015 年预测误差较大,最大相对误差约为 14.30%。预测结果为高速公路养护计划的制定与成本控制提供了科学依据。

4 结论

中国未来的高速公路养护任务重,难度高。该文通过建立多类别、结构化公路养护成本体系,分析成本的影响因素和特征。建立了基于历史数据的高速公路养护成本 GM(1,1)灰色预测模型,设计了分子阶数调整方法和预测迭代过程,其模型精度提高,并得到以下研究结论:

(1) 高速公路养护成本表现出明显的增长趋势,随着运营时间增长,递增幅度不断增大。

(2) 日常养护成本、专项中修成本、大修成本具有不同的变化趋势,与高速公路自身交通量构成、使用年限有关。

(3) 灰色 GM(1,1)模型对路面日常养护成本的预测效果良好,初期预测误差较小,随着预测时间增长,精度下降。

参考文献:

- [1] 朱合利,芮夕捷.基于 ISM 的高速公路养护成本影响因素分析[J].中外公路,2013(1).
- [2] 于英,王麒麟.高速公路养护成本预测模型[J].交通运输工程学报,2007(3).
- [3] 邱兆文,冯美军,李玲洁.高速公路养护经费测算方法研究[J].筑路机械与施工机械化,2010(4).
- [4] 邓聚龙.社会经济灰色系统的理论与方法[J].中国社会科学,1984(6).
- [5] 谢乃明,刘思峰.离散灰色模型的拓展及其最优化求解[J].系统工程理论与实践,2006(6).
- [6] 崔杰,刘思峰,谢乃明,等.灰色 Verhulst 预测模型的病态特性[J].系统工程理论与实践,2014(2).
- [7] Li G D, Yamaguchi D, Nagai M, et al. The Prediction of Asphalt Pavement Permanent Deformation by T-GM(1, 2) Dynamic Model[J]. International Journal of Systems Science, 2008; 39(10): 959-967.
- [8] Wu L, Liu S, Chen D, et al. Using Gray Model with Fractional Order Accumulation to Predict Gas Emission[J]. Natural Hazards, 2014, 71(3): 2 231-2 236.
- [9] 刘思峰.灰色系统理论的产生与发展[J].南京航空航天大学学报,2004(2).
- [10] Liu S F, Forrest J, Vallee R. Emergence and Development of Grey Systems Theory[J]. Kybernetes, 2009, 39(7): 1 246-1 256.
- [11] Lin Y, Chen M Y, Liu S F. Theory of Grey Systems: Capturing Uncertainties of Grey Information[J]. Kybernetes, 2004, 33(2): 169-218.
- [12] 白炳东,朱浩然,蔡海泉.基于平整度的沥青路面养护减排能力分析[J].中外公路,2019(2).
- [13] 王静,李波,李鹏,等.编译.基于主成分分析法的网级路面养护管理[J].中外公路,2018(2).
- [14] 陈亮,鲁泽康,李巧茹.高速公路养护需求分析方法研究[J].中外公路,2018(6).