

基于变权组合模型的地铁车辆车轮踏面磨损预测*

陶汉卿¹ 蔡 煊² 周 咏³

(1. 柳州铁道职业技术学院电子技术学院, 545616, 柳州;

2. 成都工业学院汽车与交通学院, 611730, 成都; 3. 成都工业学院电子工程学院, 611730, 成都//第一作者, 副教授)

摘 要 为准确获取地铁车辆车轮踏面随列车运行里程的磨损变化情况, 选取灰色新陈代谢模型、二次指数平滑模型以及一元线性回归模型为单项预测模型, 以样本点处组合预测误差绝对值最小为最优准则, 建立了地铁车辆车轮踏面磨损变化趋势的最优非负变权组合预测模型。通过实例检验变权组合模型和各单项模型的预测性能, 结果表明, 构建的变权组合预测模型能够有效克服各单项预测模型的缺陷, 预测精度及稳定性明显优于各单项预测模型, 可为地铁车辆在实际运行过程中车轮踏面磨损趋势的准确预测提供了一种可行的求解方法。

关键词 地铁车辆; 车轮踏面; 磨损量; 组合预测; 最优非负变权重

中图分类号 U270.331+1

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2020.06.014

Prediction of Metro Wheel Tread Wear Based on Variable Weight Combination Model

TAO Hanqing, CAI Xuan, ZHOU Yong

Abstract In order to obtain the accurate wear conditions of metro wheel tread with the running mileage, the gray metabolism model, quadratic exponential smoothing model and unary linear regression model are selected as the single prediction model, the minimum absolute value of combined prediction error at the sample points is taken as the optimal criterion, an optimal non-negative variable weight combination forecasting model is established for the wheel tread wear changing trend. The prediction performance of the variable weight combination model and that of each individual model are tested by practical cases, the results show that this model can effectively overcome the defects of single prediction models, the accuracy and stability of the variable weight combination prediction model are significantly better. It provides a feasible solution for the accurate prediction of wheel tread wear trend for metro trains in actual operation.

Key words metro train; wheel tread; wear loss; combina-

tion forecasting; optimal non-negative variable weight

First-author's address School of Electronic Engineering, Liuzhou Railway Vocational Technical College, 545616, Liuzhou, China

地铁车辆由于起动和制动频繁、载荷波动范围大等特点, 车轮磨损问题日益突出。轮对作为地铁车辆的易磨损部件和关键走行部件, 其状态好坏直接影响到列车运行的品质和安全, 其磨损状况直接关系到车轮的剩余寿命和维修时机。现有的各种车轮磨损检测方法大多是基于硬件设备的轮对几何参数检测法^[1-3], 普遍存在结构复杂、成本高, 以及需安装在轨道沿线特定地点等缺点。针对传统检测方法存在的缺陷, 一些学者从预测的角度出发, 从车轮踏面磨损变化量本身来寻找有用信息, 基于预测算法实现对车轮踏面磨损变化趋势的正确描述。文献[4]提出了一种基于灰色预测算法的车轮踏面磨损量预测方法。文献[5]研究了最小二乘支持向量机预测方法在车轮踏面磨损预测中的应用。但以上研究均是基于单一预测算法对列车运行中的车轮踏面磨损量进行的在线预测, 缺乏对多模型、多机理的综合研究。

单一预测算法往往原理简单、易于实现, 可以从不同角度反映预测对象的变化特征, 但也普遍存在反映信息不全面、适用范围有限等缺点。如果将多个单一预测方法进行组合, 构成组合预测模型, 综合利用不同方法的优点, 降低和分散各方法的预测风险和不确定性, 则可有效提高预测的精度和可信度^[6-7]。本文选取3种适用的单一预测模型, 构建了最优非负变权组合模型, 并将其应用于地铁车轮踏面磨损预测中。通过实例将组合模型与各种单一预测模型进行性能对比分析, 验证了变权组合模型用于地铁列车车轮踏面磨损趋势预测的优越性。

* 2016 年度广西高校中青年教师基础能力提升项目 (KY2016YB763); 2018 年广西高等学校高水平创新团队项目 (桂教人[2018]35 号)

1 组合预测模型

目前组合预测模型主要有方法片段的组合以及各单一预测方法预测结果的组合2种形式。方法片段的组合有灰色神经网络预测模型^[8]、灰色马尔可夫预测模型^[9]等,其原理是将不同的单一预测方法深度结合,从而构造出一个新的预测模型,但该方法的应用条件较为苛刻,需根据具体预测对象的特点进行组合搭配,不恰当的模型搭配反而会使预测效果更差。更为常用的是结果型组合预测模型,具有计算简便、精度较高等特点,其原理是通过给各单一预测方法的预测结果分配适当的组合权重,从而计算得到最终的组合预测结果。本文采用结果型组合模型预测地铁列车车轮踏面随运行里程增加而呈现的磨损变化趋势。

设地铁列车车轮踏面磨损量实际变化序列为 $X = \{x_k, k=1, 2, \dots, n\}$, 其中 x_k 为第 k 期的磨损量实测数据。如果采用 m 种单一预测算法对其变化趋势进行预测, 设第 i 种算法在第 k 期的预测结果和组合权重分别为 $\hat{x}_{i,k}$ 、 $\omega_{i,k}$, 则对应于 x_k 的组合预测值为:

$$\hat{x}_k = \sum_{i=1}^m \hat{x}_{i,k} \omega_{i,k}, \quad (k=1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

式(1)中 $\omega_{i,k}$ 满足 $\sum_{i=1}^m \omega_{i,k} = 1, \omega_{i,k} \geq 0$ 。设第 i 种单一预测模型以及组合预测模型在第 k 期的预测误差分别为 $e_{i,k}$ 、 e_k , 则有:

$$e_{i,k} = x_k - \hat{x}_{i,k} \quad (2)$$

$$e_k = x_k - \hat{x}_k = \sum_{i=1}^m \omega_{i,k} e_{i,k} \quad (3)$$

结果型组合模型通过寻找一个关于 e_k 的目标函数 y , 在使得 y 极小化的基础上来求取各单一预测模型的组合权重, 其一般形式可表达为:

$$\begin{cases} \min y = f(e_1, e_2, \dots, e_n) \\ \text{s. t. } \sum_{i=1}^m \omega_{i,k} = 1, \quad (\omega_{i,k} \geq 0) \end{cases} \quad (4)$$

2 最优非负变权组合预测模型

由各单一预测模型分配权重方式的不同, 结果型组合预测模型又可分为定权组合模型和变权组合模型。变权组合模型中每个单一模型的组合权重是随时间变化的函数, 能实时反映预测对象的实际变化, 因而能有效弥补定权组合模型的缺陷。如

何合理确定各单一预测模型的组合变权重是变权组合模型的关键问题。学者们提出了多种求取组合变权重的方法, 其中以样本点处组合预测误差平方和最小为最优准则求取组合变权重最为常用^[10-11]。但该方法存在问题也较为明显, 如果单一预测模型的预测结果存在异常值, 平方后误差会进一步增大, 求取的组合变权重受异常值的影响较大。针对该问题, 本文以样本点处组合预测误差绝对值最小为最优准则^[12-13], 用以求取各单一预测模型的组合变权重。该最优非负变权组合模型可表达为:

$$\begin{cases} \min y_k = |e_k| = \sum_{k=1}^n \omega_{i,k} e_{i,k} \\ \text{s. t. } \sum_{i=1}^m \omega_{i,k} = 1, \quad (\omega_{i,k} \geq 0; k=1, 2, \dots, n) \end{cases} \quad (5)$$

分2种情况对式(5)进行求解。如果在第 k 期 m 种单一预测模型均有 $e_{i,k} \geq 0$ 或 $e_{i,k} \leq 0$, 即各单一模型在第 k 期误差同向。假设在第 k 期第 j 种单一模型的预测误差绝对值最小, 则式(5)的解为:

$$\begin{cases} \omega_{j,k} = 1 \\ \omega_{i,k} = 0, \quad (k=1, 2, \dots, n; i \neq j) \end{cases} \quad (6)$$

如果在第 k 期某些模型的 $e_{i,k} \geq 0$, 另外某些模型的 $e_{i,k} \leq 0$, 即各单一模型的预测误差不完全同向。假设在所有误差非负的单一模型中, 第 j_1 种模型的预测误差绝对值最小; 再假设在所有误差为负的模型中, 第 j_2 种单一模型的预测误差绝对值最小。则式(5)的解为:

$$\begin{cases} \omega_{j_1,k} = \frac{|e_{j_2,k}|}{|e_{j_1,k}| + |e_{j_2,k}|} \\ \omega_{j_2,k} = \frac{|e_{j_1,k}|}{|e_{j_1,k}| + |e_{j_2,k}|} \end{cases} \quad (7)$$

通过以上方法即可求得各单一预测模型在样本点的组合变权重。要对预测对象的将来值进行预测, 还需计算各单一模型在预测点的组合变权重 $\omega_{i,n+p}$ ($i=1, 2, \dots, m; p=1, 2, \dots$)。文献[14]给出了2种求取各单一模型在预测点的组合变权重的方法。本文根据实际样本数据较少的情况, 各单一预测模型在第 $n+p$ 期的组合变权重采用其前 n 期组合变权重的平均值, 即:

$$\begin{aligned} \omega_{i,n+1} &= \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \omega_{i,k}, \quad \omega_{i,n+2} = \frac{1}{n} \sum_{k=2}^{n+1} \omega_{i,k}, \dots, \\ \omega_{i,n+p} &= \frac{1}{n} \sum_{k=p}^{n+p-1} \omega_{i,k} \end{aligned} \quad (8)$$

式中：
 n ——样本数据个数。

3 单一预测模型选取方案

随着列车运行里程的增加,车轮踏面磨损量具有逐渐增大的单调变化趋势。因此,在充分分析各种单一预测算法优缺点及适用性基础上,选取灰色新陈代谢模型、二次指数平滑模型以及一元线性回归模型 3 种适合用于预测单调变化趋势的单一预测算法作为构建变权组合模型的单一预测模型。

3.1 灰色新陈代谢模型

传统的灰色 GM(1,1)模型在机械设备的磨损趋势预测中有较好应用效果,但从预测的角度看,新陈代谢模型是更为理想的模型^[15]。随着预测对象的发展,老数据刻画系统演化的作用将逐步降低,灰色新陈代谢模型在不断补充新信息的同时及时去掉老信息,其建模序列更能反映系统当前的行为特征。

3.2 二次指数平滑模型

指数平滑预测属于时间序列预测方法的一种,该模型认为预测对象的演变具有规律性和连续性,因此可以对各期样本数据赋予相应的权值来预测其发展趋势。不同次数的指数平滑适用于不同类型的时间序列。本文选取对单调变化趋势的时间序列有较好预测性能的二次指数平滑模型作为单项预测的模型之一^[16]。指数平滑预测的关键是平滑系数和初值的选取。由于本文样本数据较少,初值对预测结果有一定影响,因此选取前 3 个数据的算术平均值作为初值。根据不同平滑系数下预测结果均方误差最小准则求解最优平滑系数,得到平滑系数 $\alpha = 0.86$ 。

3.3 一元线性回归模型

对近似线性变化趋势的数据,一元线性回归是最常用的预测方法之一^[17]。样本散点序列 $\{(t_1, y_1), (t_2, y_2), \cdots, (t_n, y_n)\}$ 的一元线性回归预测方程为:

$$\hat{y}_k = \hat{a}t_k + \hat{b} \tag{9}$$

式(9)中, \hat{y}_k 为第 k 期的预测值, t_k 为预测期数。其中,参数 \hat{a} 、 \hat{b} 可通过最小二乘法求解。

4 实例验证

某地铁车辆车轮踏面磨损量的历史实测数据见表 1。将其中 1~6 期数据作为建立预测模型的样本数据,第 7 期数据作为模型预测性能的检验数据。

表 1 某地铁列车车轮踏面磨损量实测数据

数据类型	期次						
	1	2	3	4	5	6	7
运行里程 /km	1 000	1 500	2 000	2 500	3 000	3 500	4 000
磨损量 /μm	38.9	61.5	82.2	86.8	103.6	121.0	135.7

采用表 1 中 1~6 期数据,建立选取的 3 种单一预测模型并对实测数据进行预测,得到各单一模型的预测结果(见表 2),然后可计算得到各单一预测模型在各个样本点的预测误差(见表 3)。根据表 3 中的数据,结合式(5)一式(8),可计算得到各单一预测模型在各个样本点及预测点的最优非负组合变权重(见表 4)。为直观反映各预测模型的预测效果,利用预测精度评价指标^[7]按照下列各式分别计算各模型预测结果的平方和误差(E_{ss})、平均绝对

表 2 各模型对车轮轮经磨损的预测结果

列车运行里程 /km	轮径磨损实际值 /μm	各单一模型的预测磨损/μm			变权组合模型的 预测磨损/μm
		灰色新陈代谢模型	二次指数平滑模型	一元线性回归模型	
1 000	38.90			43.66	
1 500	61.50		59.45	59.13	
2 000	82.20	80.29	77.46	74.60	80.29
2 500	86.80	91.17	85.08	90.07	86.80
3 000	103.60	101.63	99.85	105.54	103.60
3 500	121.00	123.44	116.78	121.01	121.02
4 000	135.70	134.52	134.87	136.48	135.48

表3 各模型的预测精度及预测误差

模型	不同运行里程时的预测精度				预测误差		
	2 000 km	2 500 km	3 000 km	3 500 km	$E_{SS}/\mu\text{m}$	$E_{MA}/\mu\text{m}$	$E_{MAP}/\mu\text{m}$
灰色新陈 代谢模型	1.91	-4.37	1.97	-2.44	32.580	2.673	0.028
二次指数 平滑模型	4.74	1.72	3.75	4.22	57.300	3.608	0.037
一元线性 回归模型	7.60	-3.27	-1.94	-0.01	72.220	3.205	0.037
变权组合 预测模型	1.91	0	0	-0.02	3.650	0.483	0.009

表4 各单一预测模型的组合变权重

模型	不同运行里程时的组合变权重				
	2 000 km	2 500 km	3 000 km	3 500 km	4 000 km
灰色新陈 代谢模型	1.000	0	0.496	0.004	0.375
二次指数 平滑模型	1.000	0.655	0	0	0.164
一元线性 回归模型	1.000	0.345	0.504	0.996	0.461

值误差(E_{MA})、平均绝对值百分比误差(E_{MAP}),计算结果如表3所示。精度评价指标越小,则表明模型预测精度越高。

$$E_{SS} = \sum_{k=1}^n (x_k - \hat{x}_k)^2$$

(10)

$$E_{MA} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n |x_k - \hat{x}_k|$$

(11)

$$E_{MAP} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n |(x_k - \hat{x}_k)/x_k|$$

(12)

由于灰色新陈代谢模型从第3期开始才能获取预测值,因此各单一模型的组合变权重以及各模型的拟合误差均从第3期开始计算。因而,此处 $n=4$ 。

由表2中各单一预测模型的预测结果和表4中各单一预测模型的组合变权重,可计算得到各期变权组合模型的预测结果,见表2。然后再计算变权组合模型的预测精度指标,见表3。根据表2数据可作出第3~7期各模型预测值与车轮踏面磨损量实际值的拟合曲线,如图1所示。

1) 由表3中数据可知,本文选取的3种单一预测模型在各期的预测误差没有固定的大小关系,即

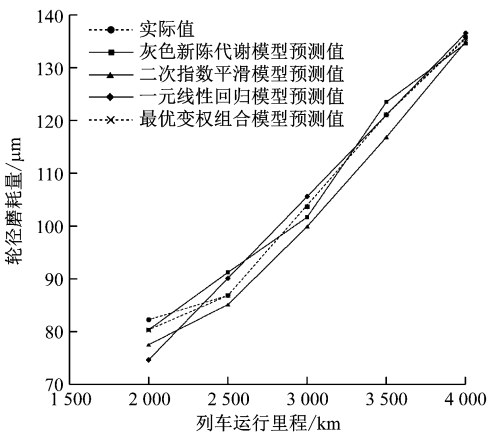


图1 各模型预测值与实际值的拟合曲线

表明各单一预测模型互为非劣模型,因此可以采用它们构建组合模型进行预测,实现各单一模型的优势互补。

2) 由表3中数据可见,灰色新陈代谢模型的最大预测残差为-4.37 μm ,二次指数平滑模型的最大预测残差为4.74 μm ,一元线性回归模型的最大预测残差为7.60 μm ,而变权组合模型的最大预测残差仅为1.91 μm ,可见变权组合模型的局部预测精度明显优于各单一模型。变权组合模型的 E_{SS} 、 E_{MA} 和 E_{MAP} 分别为3.650、0.483、0.009,均明显小于各单一预测模型的误差,表明变权组合模型也具有比各单一模型更优的全局预测精度。

3) 由图1可以看出,选取的3种单一预测模型的预测值拟合曲线均为单调曲线,表明这3种单一模型均能正确反映实际车轮踏面磨损量数据的变化趋势。但在第3~5期,当实际数据发生较明显非线性波动时,灰色新陈代谢模型和一元线性回归模型的预测值误差较大,而二次指数平滑模型虽然能够较好跟踪实际值数列的波动变化,但其每期的预

测值总是滞后于实际值。变权组合模型的预测值拟合曲线在每一期都非常接近实际值曲线,这表明了变权组合模型能有效处理实际预测中出现的异常值问题,具有比单一预测模型更好的稳定性。

4) 由表 2 中数据可见,采用各模型预测的第 7 期车轮踏面磨耗量分别为 $134.52\ \mu\text{m}$ 、 $134.87\ \mu\text{m}$ 、 $136.48\ \mu\text{m}$ 、 $135.48\ \mu\text{m}$ 。其中,变权组合模型的预测值 $135.48\ \mu\text{m}$ 与第 7 期实际值 $135.70\ \mu\text{m}$ 间的误差最小,预测精度达到了 99.8%,从而进一步验证了采用变权组合模型用于预测车辆车轮踏面磨耗变化的可靠性和优越性。

5 结语

针对地铁车辆车轮踏面磨耗变化趋势的预测问题,基于选取的 3 种单一预测模型建立了最优非负变权组合预测模型,并将其应用于车轮踏面磨耗变化趋势的预测中。实例验证结果表明,本文提出的变权组合预测方法具有比各单一预测方法更高的预测精度和稳定性,模型实用性更强,可为地铁车辆在实际运行过程中车轮踏面磨耗量的准确预测提供了一种可行的求解方法。

参考文献

- [1] 冯其波,张志峰,陈士谦,等. 一种激光位移传感器动态测量列车车轮直径的新方法[J]. 中国激光,2008,35(7):1059.
- [2] 方宇,王振龙,田中玉,等. 一种城市轨道交通车辆轮对参数动态检测新方法[J]. 哈尔滨工业大学学报,2012,44(9):132.
- [3] 高岩. 轮对几何尺寸自动与动态在线测量方法的研究[D]. 北京:北京交通大学,2014.

(上接第 57 页)

2) 轨道板翘曲通过温度、日照等方式与外界进行能量交换。轨道板板面是能量交换的源面,但受混凝土热传导率的影响,板的变形与环境温度变化存在着一定的滞后性,板面下 20 mm 深处和 180 mm 深处的温度变化存在 3 h 的滞后时长。

3) 夏季时随环境温度升高,板面温度升高更为迅速,二者关联存在非线性;而在冬季,环境温度和板面温度的关联性呈现为线性。

4) 轨道板在环境温度影响下的整体翘曲位移变化情况中,板的向下位移量大于板的向上位移量。

- [4] 汤旻安,李滢. 灰色系统理论在地铁轮对踏面磨耗预测中的应用[J]. 铁道学报,2014,36(12):35.
- [5] 衷路生,陈立勇,龚锦红,等. 基于耦合模拟退火优化最小二乘支持向量机的车轮踏面磨耗量预测[J]. 计算机应用研究,2015,32(2):397.
- [6] 尹柯,蒋军成. 预测法在安全生产中的应用研究评述及展望[J]. 中国安全科学学报,2012,22(6):111.
- [7] 陈华友. 组合预测方法有效性理论及其应用[M]. 北京:科学出版社,2008:31.
- [8] 邵梦汝,程天伦,马晓晨. 基于灰色神经网络的铁路货运量组合预测[J]. 交通运输工程与信息学报,2016,14(3):129.
- [9] 张昌娟,焦锋,赵波,等. 基于灰色-马尔可夫模型的刀具磨耗预测[J]. 河南理工大学学报(自然科学版),2015,34(6):807.
- [10] 谢朋朋,黄腾,刘阳. 变权组合预测模型在大坝沉降监测中的应用[J]. 测绘工程,2015,24(4):74.
- [11] 任超,梁月吉,庞光锋,等. 最优非负变权组合模型在大坝变形中的应用[J]. 大地测量与地球动力学,2014,34(6):162.
- [12] 王永刚,郑红运. 基于最优变权组合模型的航空运输事故征候预测[J]. 中国安全科学学报,2013,23(4):26.
- [13] 李志涛,张宇峰,姚藩照,等. 变权重组合预测模型在生活垃圾产量预测计算中的应用[J]. 南京工业大学学报(自然科学版),2009,31(2):97.
- [14] 王新民,崔巍. 变权组合预测模型在地下水水位预测中的应用[J]. 吉林大学学报(地球科学版),2009,39(6):1101.
- [15] 刘思峰,杨英杰,吴利丰,等. 灰色系统理论及其应用(第 7 版)[M]. 北京:科学出版社,2014:25.
- [16] 谌小丽,陈景雅,王坤. 基于指数平滑法对我国私家车保有量的预测[J]. 华东交通大学学报,2013,30(1):58.
- [17] 刘晓叙. 灰色预测与一元线性回归预测的比较[J]. 四川理工学院学报(自然科学版),2009,22(1):107.

(收稿日期:2018-07-24)

参考文献

- [1] 王继军,尤瑞林,王梦,等. 单元板式无砟轨道结构轨道板温度翘曲变形研究[J]. 中国铁道科学,2010,31(3):9.
- [2] 易图兵,赵勤俭,肖伟. 哈大铁路客运专线 CRTS I 型轨道板温度变形及应力数值分析[J]. 铁道标准设计,2012(5):37.
- [3] 郭超,陆征然,吕菲,等. 严寒地区 CRTS II 型无砟轨道板温度特性研究[J]. 铁道工程学报,2016,33(9):29.
- [4] 戴公连,苏海霞,闫斌. 圆曲线段无砟轨道横竖向温度梯度研究[J]. 铁道工程学报,2014,31(9):40.
- [5] 李健. 双块式无砟轨道温度场试验研究及数值分析[D]. 成都:西南交通大学,2015.

(收稿日期:2019-05-28)