

轨道几何不平顺的预测研究进展

常 惠¹ 饶志强^{1,2} 赵玉林²

(北京联合大学北京市信息服务工程重点实验室 北京 100101)¹

(北京联合大学城市轨道交通与物流学院 北京 100101)²

摘 要 轨道几何形状的质量是铁路工程中的一个重要方面,对铁路运输的安全性、乘客乘车的舒适性以及工务部门的维护成本有着重大影响。通过对轨道几何不平顺数据的研究和分析,深入挖掘轨道质量状态的恶化规律,建立数学模型对未来趋势进行预测,并通过比较预测值和实际值来分析预测的效果,同时应用预测值来编制综合养护计划。目前,国内外轨道几何不平顺预测方法主要包括传统预测方法和机器学习预测方法两大类,机器学习预测方法又可分为概率预测、神经网络预测、支持向量机预测和基于灰色模型的组合预测等。通过对相关文献进行分析,概括并总结了各种预测方法的优缺点和适用性,并提出了未来可能的研究方向。该文可作为从业人员和研究人员的参考,为今后的研究方向提供借鉴。

关键词 铁路,轨道几何不平顺,恶化规律,传统预测,机器学习预测

Advances in Prediction of Track Geometry Irregularity

CHANG Hui¹ RAO Zhi-qiang^{1,2} ZHAO Yu-lin²

(Beijing Key Laboratory of Information Service Engineering, Beijing Union University,
Beijing 100101, China)¹

(College of Urban Rail Transit and Logistics, Beijing Union University, Beijing 100101, China)²

Abstract The quality of the orbital geometry is an important aspect of railway engineering and has a profound impact on the safety of rail transport, the comfort of passengers and the maintenance costs of the public works. Through the research and analysis of the track geometry irregularity data, the excavation law of the track quality state is deeply explored, the mathematical model is established to predict the future trend, and the predicted value and the actual value are compared. Then, the prediction effect is analyzed, and the predicted value is used to compile the comprehensive Maintenance plan. At present, the prediction methods of orbital geometric irregularity at home and abroad mainly include traditional prediction methods and machine learning prediction methods. Machine learning prediction methods can be divided into probabilistic prediction, neural network prediction, support vector machine prediction and combined forecasting based on gray model. Through the analysis of related literatures, the advantages and disadvantages and applicability of various prediction methods are summarized, and the possible research directions in the future are proposed. This review can serve as a reference for practitioners and researchers, and provide some lessons for future research directions.

Keywords Railway, Track geometry irregularity, Deteriorating law, Traditional prediction, Machine learning prediction

本文受北京联合大学校级科研项目(12213991929010114)资助。

常 惠(1995—),女,硕士生,主要研究方向为轨道交通安全,E-mail:752315483@qq.com;饶志强(1976—),男,博士,副教授,主要研究方向为列车控制系统,E-mail:rao_hual@163.com(通信作者)。

1 引言

近年来,我国铁路在 6 次大提速的背景下,客、货运均呈现出高速化、重载化的趋势,由此导致的轨道几何不平顺日益恶化也影响着行车安全和乘车体验,防止其进一步恶化成为了保障铁路运输的重要基础。传统的轨道养护方法主要分为“故障修”和“周期修”,已经无法满足铁路高速运行的需要。为了适应铁路运输的高速化趋势,提高轨道质量管理的效率,工务部门开始转变轨道维修养护计划的安排方式,提出了“状态修”的轨道线路管理模式。其主要内容是基于已有的轨道几何质量状态的历史样本数据,对其进行研究总结,得到相应的轨道几何不平顺的变化规律,对其恶化规律进行分析和挖掘,并对未来发展趋势进行预测,从而实现轨道质量状态均衡的状态性养护维修方案,科学合理地根据轨道几何质量状态的优劣程度编排养护维修计划,对实现维修资源的合理配置、提高维修效率等具有极其重要的现实意义和理论价值。

2 研究现状

轨道几何不平顺是引起机车车辆产生振动和轮轨作用力的主要原因,是轨道结构综合性能和承载能力的重要体现。近年来,国内外有大量的学者在对轨道状态变化规律挖掘和预测方面开展了大量的研究工作,也取得了不少成果。已有轨道几何不平顺预测的方法大致可分为两类:传统的预测方法和机器学习的预测方法。

2.1 传统的预测方法

根据轨道不平顺状态呈线性变化趋势的假设,结合轨检车的实测数据,文献[1]提出了基于指数平滑系数对未来某一时刻的轨道状态进行预测的方法。文献[2]根据实际养护作业的经验提出基于 Logistic 分布的特征值推移法来对轨道几何质量进行预测,从而指导大型养路机械的作业。文献[3]以轨检车采集得到的轨向不平顺数据为基础,提出了一种非线性恶化模型来对铁路轨道的轨向不平顺趋势做出预测。文献[4]针对诸多影响因素具有无法量化和无法穷举等特征,通过综合考虑各影响因素相互作用后的表现,提出了一种基于信号处理理论

和数字统计理论的综合因子法。文献[5]结合我国铁路的实际情况,引入日本学者杉山德平提出的 S 式,研究建立适合中国铁路的高低不平顺非线性多元回归模型。文献[6]针对轨道不平顺的随机性,对轨道的动态不平顺检测数据进行统计分析,在轨道不平顺概率分布特性分析的基础上,利用指数平滑预测方法解决轨道不平顺发展预测的问题。文献[7]提出了一个多级线性模型来预测轨道不平顺的变化。另外,Guo 等^[8]通过假设轨道几何恶化的 3 个特性,即循环、多阶段和指数变化,使用一些线性模型模拟了在 TQI 变化的不同阶段轨道恶化的过程。

该类方法是对历史轨检车的检测数据进行统计分析和预测,如果需要得到更为完整的预测公式,必须对更多区段的不平顺状况进行检测,收集更多样本数据;多阶段的预测比单一阶段的预测精度要高;当原始的轨道几何质量序列中包含有异常点时,预测结果会出现较大的误差,预测的时间越长,误差越大;并且只能针对特定条件的线路,具有较大的局限性。

2.2 机器学习的预测方法

2.2.1 概率模型的预测方法

文献[9-11]提出利用贝叶斯模型来预测短期内铁路轨道几何质量的不规则性,假设两次检查之间的 TQI 差异代表不同因素对轨道不规则性的影响,与前 4 次检查间隔相关的历史数据用于预测下一次检查的不规则性。文献[12-15]使用马尔可夫模型研究描述铁路轨道恶化过程的马尔可夫转移概率。该模型是基于轨道几何质量的检测数据整体上服从概率分布的假设,充分利用了大量的检测数据,并结合特征矩阵的特性综合分析不同类型轨道几何参数的动静态特征,对轨道几何质量状况进行预测。文献[16]提出蒙特卡洛模拟方法求不平顺恶化量的随机近似解,从而对轨道几何质量进行预测。文献[17]提出粒子滤波的方法对轨道不平顺的纵向标准偏差恶化规律进行挖掘,并推导出维修极限交叉点的预测。文献[18]提出利用随机森林的方法预测轨道几何质量发生缺陷的概率,然后建立马尔可夫链来模拟聚合轨道恶化,最后开发马尔可夫决策过程用于轨道维护决策,并通过使用值迭代算法进行优化。

该类方法对小规模的数据表现很好,对缺失数据不太敏感,算法也比较简单,具有较高的准确性和适应性;但对于原始动态检测数据的依赖性较强,当检测的数据存在异常数据时,预测结果会有较大的偏差。

2.2.2 神经网络的预测方法

文献[19]提出了使用人工神经网络对轨道恶化进行更详细的建模,对不同铁路的全面视觉和自动检查获得的大量现场数据进行预测,通过考虑大量输入来预测轨道几何随时间的近似行为,用这种方法来模拟不同轨道几何参数的倾角,它具有很好的建立轨道几何缺陷与轨道结构问题之间相关性的能力。文献[20]将人工神经网络(ANN)和支持向量回归(SVR)结合,基于维护历史选择了轨道劣化的影响参数,利用2年的轨道几何质量检测数据对稳定轨道恶化进行稳定的预测。文献[21]根据轨道不平顺变化的特点,利用递推合成BP网络对轨道不平顺状态分周期进行预测,减小了对轨道进行维修作业带来的误差。文献[22]提出基于BP神经网络的铁路轨道不平顺预测方法,以均方预测误差平均值和平均相对误差为指标,对比了双隐层、单隐层BP网络模型和多元回归分析模型,结果表明双隐层BP网络模型的预测精度更高。

由于神经网络模型的初始连接权值和阈值是随机赋值的,且一般在数据样本较大时拟合效果较好,对小样本数据的预测能力较差,因此对轨道几何不平顺进行预测时,预测模型的稳定性和预测精度不够。结合灰色模型可提高预测精度。

2.2.3 支持向量机的预测方法

文献[23]利用支持向量机的预测方法建立轨道质量指数预测模型,采用实际轨检车检测数据对模型进行验证,并将预测结果与递推合成BP网络进行对比,以平均相对误差为评价指标,预测精度有所提高。文献[24]对轨道高低不平顺的预测随机模型建立了一种支持向量机——蒙特卡洛(SVM-MC)两阶段求解方法,第一阶段利用 ϵ -SVM算法确定属于小样本集的模式参数,第二阶段运用蒙特卡洛模拟对随机过程进行仿真,得到高低不平顺标准差的预测值。

利用支持向量机对轨道几何不平顺进行预测相对于人工神经网络来说收敛速度提升很大,局部极

小点的问题也能解决,因为对于SVM来说,只有全局最优解。SVM预测方法的不足之处是该方法对存储需求量大,模型的建立及程序的实现比较复杂,不便在实际应用中推广,而且对于数据中的知识是否冗余也不能通过SVM确定。

2.2.4 基于灰色模型的组合预测方法

近年来,灰色预测法凭借在解决不确定因素问题中的优越性被广泛应用于很多领域。通过进行关联分析,并对原始数据进行生成处理来寻找系统变动的规律,生成有较强规律性的数据序列,以此预测事物未来的发展趋势。将轨道不平顺历史数据作为“白色信息”输入到新构建的非等间距灰色模型当中,同时结合新的残差校正模型对初步预测结果进行残差校正,对轨道质量的发展趋势进行充分的挖掘,提高预测序列的精度。文献[25]提出了基于非等间距灰色理论和BP神经网络残差校正的预测方法。文献[26]利用灰色区间预测模型,对单元区段范围内随时间变化的TQI进行建模,并与传统的非等间距GM(1,1)预测模型进行比较,实证结果表明灰色区间模型的预测精度更高。文献[27]提出灰色傅里叶级数和灰色马尔可夫链组合的预测模型,实验证明灰色傅里叶级数组合预测模型的预测精度更高。文献[28]提出改进的灰色和Elman神经网络组合的预测模型;文献[29]提出灰色和PSVM组合的预测模型;文献[30]提出灰色和WOA-LSSVM组合的预测模型。

该类方法利用灰色模型预测轨道质量指数时间序列中的趋势项,通过残差校正模型对灰色系统进行修正,弥补了单一灰色模型的不足,充分考虑了轨道不平顺发展趋势中的趋势性和随机性,大幅提高了预测精度。其不足之处在于预测模型比较复杂,考虑的相关因素较多,计算量较大。

3 总结与展望

在众多专家学者的努力下,轨道几何质量预测问题的研究已取得了一些成果,但也存在一些不足。(1)轨道质量影响因素既多又杂,发展过程又伴随着比较强的随机性特征,众多影响因素之间的关系比较复杂,并非简单的线性相关,很多时候模型在比较理想的环境下预测效果较好,但建立的模型适用性

差;(2)所建立的模型无法全面反映轨道质量影响因素的作用,甚至部分影响因素的作用机理尚不明确,由此建立的模型局限性较大,实际意义不大;(3)应该从多个角度深入分析引起轨道不平顺发展变化的相关因素,研究轨道不平顺的发展规律,进一步研究从单项轨道几何不平顺方向如高低、轨向等研究和构建相应的预测模型,分析单项轨道不平顺的发展变化规律。

在现有预测模型中,传统的预测方法仅考虑或量化了部分影响因素,导致建立的模型预测时期较短、预测精度较低,且只能针对特定条件的线路,具有较大的局限性;概率预测模型对小规模的数据表现很好,具有较高的准确性和适应性,但当检测的数据存在异常数据时,预测结果会有较大的偏差;神经网络预测方法在数据样本比较大时才会呈现较好的拟合效果,这也就影响了神经网络的预测性能;另外,支持向量机的预测方法对于人工神经网络来说收敛速度提升很大,局部极小点的问题也能解决,但对于数据中的知识是否冗余不能通过 SVM 确定,不便在实际应用中推广。基于灰色系统的组合预测模型相对传统的方法以及机器学习的其他方法来说,对小样本且随机波动性较大的轨道几何数据序列的拟合性更佳,预测效果也更好,能够实现对轨道几何不平顺的有效预测。

结束语 我国轨道交通呈高速发展的趋势,由此导致的轨道质量日益恶化影响着行车安全和乘车体验,防止其进一步恶化成为了保障铁路运输的重要基础。本文总结分析了国内外多个学者在轨道几何不平顺预测领域的研究成果,挖掘出检测数据中很难发现的关系,找出影响轨道几何质量状态恶化的主要因素。在轨道状态趋势预测方面,单一的算法已经不能很好地满足需求,未来更趋向于将多种算法结合,从而提高轨道几何不平顺的预测精度,建立一套结合轨道几何质量检测、轨道状态预测和辅助决策的统一系统,以期在提高铁路工务部门工作效率的同时,保证轨道状态最优,使得列车行车更加安全。

参考文献

- [1] TENG M, SANHEYAFU. Exponential smoothing method for orbit state prediction[C]// Civil Engineering Society 52nd Annual Academic Lecture. 1997:692-693.
- [2] MIWA M, ISHIKAWA T, OYAMA T. Modeling The Transition Process of Railway Track Irregularity and All Integer Mathematical[J]. Doboku Gakkai Ronbunshu, 2001(681):51-65.
- [3] KAWAGUCHI A, MIWA M, TERADA K. Actual Data Analysis of Alignment Irregularity Growth and Its Prediction Model[J]. Quarterly Report of RTRI, 2005, 46(4):262-268.
- [4] 陈宪麦,王澜,杨凤春,等. 用于铁路轨道不平顺预测的综合因子法[J]. 中国铁道科学, 2006, 27(6):27-31.
- [5] 周宇,许玉德,李浩然. 轨道不平顺非线性预测模型[J]. 交通运输工程学报, 2004, 4(4):21-24.
- [6] 高建敏,翟婉明,徐涌,等. 基于概率分布的轨道不平顺发展统计预测[J]. 铁道科学与工程学报, 2006, 3(6):55-60.
- [7] CHANG H, LIU R, LI Q. A multi-stage linear prediction model for the irregularity of the longitudinal level over unit railway sections[J]. WIT Transactions on The Built Environment, 2010, 114:641-650.
- [8] GUO R, HAN B M. Multi-stage linear prediction model for railway track irregularity[C]// Applied Mechanics and Materials. Trans Tech Publications, 2013: 1811-1816.
- [9] ANDRADE A R, TEIXEIRA P F. A Bayesian model to assess rail track geometry degradation through its life-cycle[J]. Research in Transportation Economics, 2012, 36(1):1-8.
- [10] ANDRADE A R, TEIXEIRA P F. Hierarchical Bayesian modelling of rail track geometry degradation[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2013, 227(4):364-375.
- [11] ANDRADE A R, TEIXEIRA P F. Statistical modelling of railway track geometry degradation using Hierarchical Bayesian models[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2015, 142:169-183.
- [12] BAI L, LIU R, SUN Q, et al. Markov-based model for the prediction of railway track irregularities[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2015, 229(2):150-159.
- [13] PRESCOTT D, ANDREWS J. Modelling maintenance

- in railway infrastructure management[C]// 2013 Proceedings Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS). IEEE, 2013: 1-6.
- [14] ANDRADE A R, TEIXEIRA P F. Uncertainty in rail-track geometry degradation: Lisbon-Oporto line case study[J]. *Journal of Transportation Engineering*, 2011, 137(3): 193-200.
- [15] CHAOLONG J, WEIXIANG X, FUTIAN W, et al. Track irregularity time series analysis and trend forecasting[J]. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, 2012, 2012.
- [16] QUIROGA L M, SCHNIEDER E. Monte Carlo simulation of railway track geometry deterioration and restoration[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability*, 2012, 226(3): 274-282.
- [17] MISHRA M, ODELIUS J, THADURI A, et al. Particle filter-based prognostic approach for railway track geometry[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2017, 96: 226-238.
- [18] SHARMA S, CUI Y, HE Q, et al. Data-driven optimization of Railway maintenance for track geometry[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2018, 90: 34-58.
- [19] SADEGHI J, ASKARINEJAD H. Application of neural networks in evaluation of railway track quality condition[J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2012, 26(1): 113-122.
- [20] LEE J S, HWANG S H, CHOI I Y, et al. Prediction of track deterioration using maintenance data and machine learning schemes[J]. *Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems*, 2018, 144(9): 04018045.
- [21] 白文飞, 王福田, 郭玉坤. 基于递推合成 BP 网络的轨道不平顺预测研究[J]. *交通信息与安全*, 2013(5): 62-67.
- [22] 彭丽宇, 张进川, 苟娟琼, 等. 基于 BP 神经网络的铁路轨道几何不平顺预测方法[J]. *铁道学报*, 2018(9): 22.
- [23] 于瑶, 刘仍奎, 王福田. 基于支持向量机的轨道不平顺预测研究[J]. *铁道科学与工程学报*, 2018, 15(7): 1671-1677.
- [24] 许玉德, 刘一鸣, 沈坚锋. 轨道不平顺预测随机模型的 SVM-MC 求解方法[J]. *华东交通大学学报*, 2018(3): 1.
- [25] 韩晋, 杨岳, 陈峰, 等. 基于非等时距加权灰色模型与神经网络的轨道不平顺预测[J]. *铁道学报*, 2014, 36(1): 82-87.
- [26] 王乃珍, 王福田. 基于灰色区间预测模型的轨道不平顺状态预测[J]. *铁路计算机应用*, 2015, 24(1): 1-3.
- [27] XIN T, FAMUREWA S M, GAO L, et al. Grey-system-theory-based model for the prediction of track geometry quality[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 2016, 230(7): 1735-1744.
- [28] 马子骥, 唐涛, 刘宏立, 等. 基于非等间距灰色模型和 Elman 神经网络的轨道质量预测[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2018(5): 20.
- [29] 马子骥, 郭帅锋, 李元良. 基于改进非等间距灰色模型和 PSVM 的轨道质量指数预测[J]. *铁道学报*, 2018(6): 21.
- [30] 冯超, 余朝刚, 孙雷, 等. 基于改进 GM(1,1) 与 WOA-LSSVM 组合预测模型的轨道不平顺预测[J]. *铁道标准设计*, 2019, 63(4): 1-8.