

郑州地铁钢轨扣件使用寿命评估模型组研究^{*}

张兴凯¹ 白磊^{2**} 张家涛¹ 李现鹏¹ 许大伟¹ 敬航天¹ 丁明²

(1. 郑州地铁集团有限公司运营分公司, 450046, 郑州;

2. 北京九州一轨环境科技股份有限公司智慧运维中心, 100070, 北京//第一作者, 高级工程师)

摘要 准确评估钢轨扣件使用寿命,对轨道维修资源合理利用以及运维生产提质增效具有重要意义。针对郑州地铁钢轨扣件特点,依据影响钢轨扣件使用寿命的异质性因素,将线路轨道划分为不同类型的区段。针对不同类型的轨道区段,构建不同的钢轨扣件使用寿命评估模型,形成钢轨扣件使用寿命评估模型组。该模型组采用双参数威布尔分布函数,描述钢轨扣件状态的劣化规律。选取郑州地铁1号线钢轨扣件近5年的历史病害数据,构建极大似然函数,确定模型组的待估参数,验证所提模型组的有效性。计算结果表明,评估出的钢轨扣件使用寿命对现场管理人员科学组织轨道运维生产具有重要价值。

关键词 城市轨道交通; 钢轨扣件; 使用寿命评估模型组; 威布尔分布模型

中图分类号 U213.5⁺3

DOI:10.16037/j.1007-869x.2023.01.019

Service Lifespan Estimation Model Set for Rail Fastener in Zhengzhou Metro

ZHANG Xingkai, BAI Lei, ZHANG Jiatao, LI Xianpeng, XU Dawei, JING Hangtian, DING Ming

Abstract Accurately estimating service lifespan for rail fasteners is of great significance to the efficient use of track maintenance resources and the improvement of operation and maintenance quality and efficiency. Targeting the characteristics of rail fastener in Zhengzhou Metro, based on the heterogeneity factors affecting fastener service lifespan, the rail line is divided into different types of track sections. According to the division, different fastener service lifespan estimation models are proposed and the model set for fastener lifespan estimation is formed. The model set uses a dual parameter Weibull distribution function to describe the deterioration law of fastener condition. Historical disease data of the last 5 years of Zhengzhou Metro Line 1 fastener are selected, and the maximum likelihood function is built. The estimated parameters of the model

set are determined, and the proposed model set is verified. Calculation results show that the estimated rail fastener service lifespan is of great value for the site administrators to organize track operation and maintenance activities scientifically.

Key words urban rail transit; rail fastener; service lifespan estimation model set; Weibull distribution model

First-author's address Operating Branch of Zhengzhou Metro Group Co., Ltd., 450046, Zhengzhou, China

钢轨扣件是一类重要的轨道部件,作为钢轨中间联结零件,将钢轨与轨枕联结为整体,并将钢轨承受的力传递至轨枕,为轨道结构提供一定的弹性。弹条是钢轨扣件的重要组成部分。不同类型钢轨扣件的弹条设计要求、安装工艺各不相同。由于轨道设备状态劣化的联动性^[1],钢轨扣件的弹条断裂等病害的发生,极易加速钢轨不平顺状态劣化,影响列车安全运行。准确评估钢轨扣件的使用寿命,对编制钢轨扣件维修策略、优化轨道维修计划具有重要意义。

目前,国内外专家学者对数据驱动的钢轨扣件使用寿命评估的研究较少,多侧重于研究钢轨不平顺状态预测^[2]、钢轨使用寿命评估^[3-6]、曲线钢轨廓形优化设计^[7-9]、钢轨扣件病害智能化识别^[10]、钢轨扣件疲劳损伤机理^[11-12]等。文献[4]等利用多阶段指数 Markov 模型评估线路钢轨使用寿命。文献[6]利用威布尔分布模型描述直线段钢轨累计重伤率与累计通过总重关系,来估计钢轨使用寿命。

不同于机理研究与有限元分析等方法,本文基于可靠性理论,提出一个新的 SLEMS-RF(钢轨扣件使用寿命评估模型组)。其利用钢轨扣件历史病害数据,评估钢轨扣件实际使用寿命,为大修计划

^{*} 国家自然科学基金项目(62132003);郑州地铁集团有限公司运营分公司科研项目(ZGYY-10TFY-D21065);北京市房山区科技计划项目(20210003)

^{**} 通信作者

编制提供决策支持;可提升钢轨扣件的精细化管理水平,确保轨道设备的高平顺性和高可靠性。

1 钢轨扣件中弹条断裂的影响因素分析

弹条断裂是一类常见的钢轨扣件类故障。郑州地铁线网近 5 年的轨道专业故障中,扣件类故障约占轨道专业故障的 79.5%,而钢轨扣件的弹条断裂占钢轨扣件类故障的 82.4%。

1.1 使用寿命定义

本文的钢轨扣件使用寿命 L 是指钢轨扣件从上道服役开始至更换报废的时间范围。钢轨扣件达到如下伤损标准应进行更换:①弹条折断或失效、锈蚀严重;②螺旋道钉折断或锈蚀严重;③轨下垫板压溃、严重变形或丧失作用;④其他零部件状态不良、锈蚀或伤损严重。

依据郑州地铁的《轨道专业大修规程》,钢轨扣件成段更换的间隔时间定义为钢轨扣件大修周期 T_{TK} 。故在本文中,钢轨扣件使用寿命评估与钢轨扣件大修周期评估是等同的,即 $T_{TK} = L$ 。根据郑州地铁《轨道专业大修规程》,钢轨扣件设计寿命 L_d 是 25 年,钢轨扣件实际使用寿命 L_r 的判定阈值是每公里累计失效率达 8% 及以上。此外,在成段更换钢轨(即换轨大修)时,会同步更换相应的钢轨扣件,这也会影响钢轨扣件的使用寿命。

1.2 设计因素

郑州地铁 1 号线(以下简称“1 号线”)普通整体道床、钢弹簧浮置板道床、橡胶隔振垫道床均采用相同型号的钢轨扣件,即单趾弹条钢轨扣件,如图 1 所示。一般减振道床采用双层非线性减振钢轨扣件。单趾弹条是单趾弹条扣件的重要组成部分,其作用是将钢轨压在铁垫板上并提供一定的弹性,其材质为 60Si2MnA 热轧弹簧钢。该钢轨扣件中肢小弯处与铁垫板容易出现两点接触,导致应力集中在较短的中肢外露部分,在其他外因不利条件下,易出现疲劳伤损,乃至断裂。

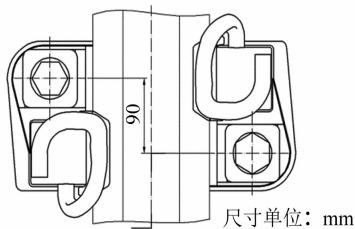


图 1 单趾弹条钢轨扣件平面图

Fig. 1 Plan of single elastic strip fastener

1.3 生产制造因素

在钢轨扣件的弹条生产制造阶段,如果存在弹条表面缺陷、拉伤沟和氧化皮嵌入基体内部等状况,会破坏材料的连续性,降低材料的强度和塑性,容易在较低的平均应力水平及较少的疲劳循环周期下产生疲劳微裂纹,成为疲劳裂纹的起始位置,在受周期性荷载的作用下,疲劳循环达到极限时会发生脆断现象。

1.4 养护维修因素

1) 钢轨波磨。列车经过曲线地段时,曲线半径越小,钢轨越易出现异常波磨。现场钢轨波磨波长如果较短,在列车反复荷载作用下,钢轨易产生高频振动,作为约束钢轨振动的钢轨扣件必将承受高频荷载,当荷载超过钢轨扣件强度、变形超过其弹程时,将会产生伤损。

2) 轨底空吊。在施工安装时,由于弹条安装工艺等原因,当轨底缺少轨下垫板时,会导致钢轨与轨枕之间存在空隙。在列车行进时,弹条的振动幅度较大,弹条所受剪力及冲击较大,当达到弹条本身的极限强度时,会发生疲劳脆断的现象。

3) 安装过紧。在施工安装时,由于弹条安装工艺等原因,弹条安装过紧不标准,也易发生疲劳脆断的现象。

4) 钢轨扣件生锈。弹条本身有防锈涂层,但是由于出厂或施工原因导致弹条断裂部位中肢与根端小圆弧连接区防锈涂层脱落,在空气潮湿的情况下会出现锈蚀,若锈蚀严重会导致弹条扣压力性能下降,并且容易发生断裂。

2 使用寿命评估模型构建

通过上述分析可知,钢轨扣件的弹条断裂受设计因素、生产制造因素、养护维修因素等异质性因素的影响。这造成处于线路不同空间位置钢轨扣件的状态劣化规律不同、使用寿命分布规律不同。为准确描述钢轨扣件状态劣化趋势,本文根据异质性因素的不同,将线路轨道划分为不同类型区段;针对不同类型区段、不同类型钢轨扣件,建立不同的钢轨扣件使用寿命评估模型,形成一个钢轨扣件使用寿命评估 SLEMS-RF 模型,用以描述线路不同空间位置的钢轨扣件使用寿命分布规律。

城市轨道交通基础设施的劣化具有典型的浴盆曲线特征,可以划分为早期失效期、偶然失效期

和磨损失效期 3 个阶段。SLEMS-RF 模型采用双参数威布尔分布 (Weibull distribution) 模型,描述钢轨扣件实际使用寿命分布规律。随着形状参数不同,威布尔分布的失效率函数可以描述“浴盆曲线”中早期失效期、偶然失效期和磨损失效期阶段的失效率变化趋势。

假设地铁全线的钢轨扣件根据异质性因素不同,划分为 I 类。第 i 类钢轨扣件的双参数威布尔分布的概率密度函数 $f_i(x)$ 、累计分布函数 $F_i(x)$ 、可靠度函数 $R_i(x)$ 和失效率函数 $r_i(x)$ 分别可以表示为:

$$f_i(x) = \frac{k_i}{\lambda_i} \left(\frac{x}{\lambda_i} \right)^{k_i-1} e^{-(x/\lambda_i)^{k_i}} \tag{1}$$

$$F_i(x) = 1 - e^{-(x/\lambda_i)^{k_i}} \tag{2}$$

$$R_i(x) = e^{-(x/\lambda_i)^{k_i}} \tag{3}$$

$$r_i(x) = \frac{k_i}{\lambda_i} \left(\frac{x}{\lambda_i} \right)^{k_i-1} \tag{4}$$

式中:

- x ——钢轨扣件上道服役时间;

λ_i ——第 i 类钢轨扣件寿命分布函数的尺度参数;

k_i ——第 i 类钢轨扣件寿命分布函数的形状参数。

采集某一轨道区段第 i 类钢轨扣件历史发生断裂的时间点,构成相应的时间序列 $\{x_1, x_2, \cdots, x_n\}$ 。通过该时间序列数据,总可以找到一个合适的 k_i 和 λ_i ,使得失效率函数 $r_i(x)$ 随时间的变化趋势与该轨道区段第 i 类钢轨扣件实际失效率变化趋势最为接近。根据采集到的时间序列数据 $\{x_1, x_3, \cdots, x_n\}$,构建相应的似然函数 $L(k_i, \lambda_i)$ 和对数似然函数 $\ln[L(k_i, \lambda_i)]$,可以表示为:

$$L(k_i, \lambda_i) = \prod_{j=1}^n f(x_j; k_i, \lambda_i) \tag{5}$$

$$\ln[L(k_i, \lambda_i)] = n \ln(k_i) - n k_i \ln(\lambda_i) + (k_i - 1) \sum_{j=1}^n \ln(x_j) - \sum_{j=1}^n (x_j/\lambda_i)^{k_i} \tag{6}$$

采用极大似然估计方法可以确定待估参数 k_i 和 λ_i 。

3 实例验证

3.1 实例背景

1 号线是郑州市的第 1 条地铁线路,也是河南省开通的第 1 条地铁线路。1 号线运营里程为 41.2 km,共设 30 座车站,全部为地下线。1 号线的钢轨扣

件类型包括单趾弹条钢轨扣件和双层非线性钢轨扣件。其中,普通整体道床、钢弹簧浮置板道床、橡胶隔振垫道床采用相同型号的钢轨扣件,即单趾弹条扣件。钢轨扣件每公里单线安装约 6 400 个。根据 41.2 km 的运营长度估算,全线上下行钢轨扣件的总数量约为 527 360 套。1 号线的钢轨扣件故障失效主要是由于弹条断裂引起的。故本文利用采集到的 1 号线 2017 年 1 月至 2021 年 7 月时间范围内的 489 条弹条断裂数据,近似替代钢轨扣件故障失效数据,对所提 SLEMS-RF 模型的有效性进行验证。

3.2 地铁轨道区段划分

基于采集到的 1 号线钢轨扣件的弹条断裂历史数据,本节将通过统计弹条断裂次数与不同线型、道床类型的关系,对 1 号线全线轨道进行划分,针对不同类别轨道区段构建不同的钢轨扣件使用寿命评估模型。

1) 不同线型的平均每公里弹条断裂次数对比:曲线地段弹条断裂次数>直线地段弹条断裂次数,如表 1 所示。不同的线型对弹条实际使用寿命有影响,但差距不大。曲线地段扣件的弹条断裂次数略高于直线地段。

表 1 弹条断裂次数按线型统计分析表

Tab. 1 Statistical analysis of elastic strip breakage times according to line types

线型	弹条断裂次数/次	弹条平均断裂次数/(次/km)
曲线	220	7.014
直线	269	5.271

2) 不同道床类型的平均每公里弹条断裂次数对比:钢弹簧浮置板弹条断裂次数>橡胶隔振垫弹条断裂次数>普通整体道床弹条断裂次数>双层非线性钢轨扣件弹条断裂次数,如表 2 所示。不同的道床类型对钢轨扣件实际使用寿命影响较大。钢弹簧浮置板、橡胶隔振垫钢轨扣件的弹条平均每公里断裂次数约是普通整体道床的两倍。双层非线性钢轨扣件平均每公里断裂次数最小。

表 2 弹条断裂次数按道床类型统计分析表

Tab. 2 Statistical analysis of elastic strip breakage times according to track bed types

道床类型	弹条断裂次数/次	弹条平均断裂次数/(次/km)
橡胶隔振垫道床	115	12.826
钢弹簧浮置板道床	50	13.877
双层非线性钢轨扣件道床	9	0.654
普通整体道床	315	5.617

综合分析,本实例将针对道床类型的不同,将 1 号线全线轨道划分为三类(见表 3),分别建立钢轨扣件使用寿命评估模型。橡胶隔振垫、钢弹簧浮置板钢轨扣件的弹条平均每公里断裂次数接近,故本文将橡胶隔振垫、钢弹簧浮置板的钢轨扣件合并为一类。

表 3 1 号线全线轨道区段划分

Tab. 3 Whole line track section division of Metro Line 1

轨道区段分类	说明	区段全长/km
A	橡胶隔振垫道床、钢弹簧浮置板道床	12.804
B	普通整体道床	55.843
C	双层非线性钢轨扣件道床	13.753

3.3 结果分析

3.3.1 待估参数确定

根据 3.2 节的分析结果,本文针对不同的道床类型,将 1 号线钢轨扣件分为三大类,分别构建相应的使用寿命评估模型。本文利用 1stopt (Version 7.0) 软件,采用通用全局优化法 (UGO1),求解极大似然函数,以得到待估参数。相应的计算结果如表 4 所示。

表 4 SLEMS-RF 模型的计算结果

Tab. 4 Calculation results of SLEMS-RF model set

评估对象	计算的 实际使用寿命/年	尺度参数	形状参数
1 号线整体钢轨扣件	24.6	581.443	3.677
A 类钢轨扣件	22.3	576.224	3.244
B 类钢轨扣件	25.1	585.251	3.750

1 号线整体钢轨扣件寿命分布模型的尺度参数 λ 为 581.443,形状参数 k 为 3.677。真实值与计算值间的均方差值 R_{MSE} 为 8.65×10^{-5} ,相关系数值 R 为 0.965,表明模型拟合效果很好。累计失效概率真实值与计算值的折线图,如图 2 所示。图 2 中的横坐标表示累计失效概率的真实值,可根据采集到的 5 年钢轨扣件的弹条断裂数据计算得到;纵坐标表示累计失效概率的计算值,可根据累计分布函数式(7)计算得到。图 2 中的虚直线表示累计失效概率的计算值等于真实值。折线越靠近虚直线,说明模型拟合效果越好。根据第 1.1 节提及的郑州地铁《轨道专业大修规程》规定的阈值条件“每公里失效率达 8% 及以上”以及累积分布函数式(7),计算出的地铁 1 号线整体钢轨扣件实际使用寿命 L_r 为 24.6 年。

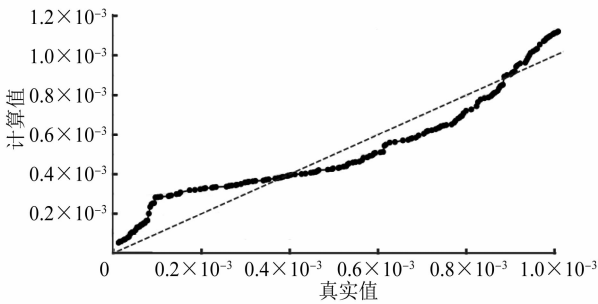


图 2 累计失效概率真实值与计算值的折线图

Fig. 2 Line graph for true value and calculated value of accumulated invalid probability

相应的累积分布函数 $F(x)$ 和失效率函数 $r(x)$ 可以表示为:

$$F(x) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{x}{581.443}\right)^{3.677}\right] \tag{7}$$

$$r(x) = \frac{3.677}{581.433}\left(\frac{x}{581.433}\right)^{2.677} \tag{8}$$

A 类钢轨扣件(橡胶隔振垫道床、钢弹簧浮置板道床)的寿命分布模型的尺度参数 λ_a 为 576.224,形状参数 k_a 为 3.244。真实值与计算值间的均方差值 $R_{MSE,a}$ 为 2.23×10^{-4} ,相关系数值 R_a 为 0.945。计算出的钢轨扣件实际使用寿命 $L_{r,a}$ 为 22.3 年。

B 类钢轨扣件(普通整体道床)的寿命分布模型的尺度参数 λ_b 为 585.251,形状参数 k_b 为 3.750。真实值与计算值间的均方差值 $R_{MSE,b}$ 为 8.24×10^{-5} ,相关系数值 R_b 为 0.976。计算出的钢轨扣件实际使用寿命 $L_{r,b}$ 为 25.1 年。

C 类钢轨扣件(双层非线性钢轨扣件道床)由于采集的历史断裂数据较少(9 条),无法确定可信的使用寿命分布模型待估参数。

3.3.2 结果对比分析

通过表 4 可知:

1) A 类钢轨扣件的实际使用寿命 $L_{r,a}$ 小于 B 类钢轨扣件实际使用寿命(22.3 年<25.1 年)。这反映出相对于 B 类钢轨扣件,A 类钢轨扣件状态劣化速度较快,与 3.2 节的计算统计结果相符合。

2) 与 1 号线规定的钢轨扣件设计寿命 L_d 为 25 年相比,A 类钢轨扣件的实际使用寿命 $L_{r,a}$ 低于 L_d 。这是由于 A 类钢轨扣件所在的部分地段线路条件复杂、易引起弹条的频繁断裂,导致计算出的实际使用寿命 $L_{r,a}$ 偏小。相对于 B 类钢轨扣件,建议在日常维保中应重点关注 A 类钢轨扣件。

3) 与 1 号线规定的钢轨扣件设计寿命 $L_{r,a}$ 为

25 年相比,B 类钢轨扣件的实际使用寿命 $L_{r,b}$ 与 L_d 近似相等。

综上所述,本文提出的 SLEMS-RF 模型可有效描述钢轨扣件的寿命分布规律。

4 结语

本文梳理了影响地铁钢轨扣件状态劣化的设计因素、生产制造因素和养护维修因素等。基于可靠性理论,提出采用钢轨扣件使用寿命评估 SLEMS-RF 模型,描述地铁线路不同位置钢轨扣件的使用寿命分布规律。采用 1 号线近 5 年的实际数据验证了所提模型的有效性,并与 1 号线钢轨扣件的设计寿命进行了对比分析。提出 SLEMS-RF 模型可对钢轨扣件使用寿命作出更有效、更具针对性的评估。如何综合考虑不同的影响钢轨扣件失效异质性因素,评定全线不同地段钢轨扣件失效的风险可能性,将是下一步的研究方向。

参考文献

- [1] LIU R, BAI L, WANG F, et al. Grid: a new theory for high-speed railway infrastructure management [C] //Transportation Research Board 94th Annual Meeting. Washington D.C.: TRB, 2015.
- [2] BAI L, LIU R, SUN Q, et al. Classification-learning-based framework for predicting railway track irregularities [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2016, 230(2): 598.
- [3] GHOFrani F, CHAVA N K, HE Q. Forecasting risk of service failures between successive rail inspections: a data-driven approach [J]. Journal of Big Data Analytics in Transportation, 2020, 2(1): 17.
- [4] BAI L, LIU R, WANG F, et al. Estimating railway rail service life: a rail-grid-based approach [J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2017, 105: 54.
- [5] 白磊,李擎,刘仍奎,等. 基于 LMDP 的铁路钢轨网格化维修规划编制模型 [J]. 铁道学报, 2019, 41(10): 17.

BAI Lei, LI Qing, LIU Rengkui, et al. LMDP-based optimal repair planning model for railway rail grids [J]. Journal of the China Railway Society, 2019, 41(10): 17.

- [6] 习年生,周清跃. 钢轨的疲劳重伤率分布规律与疲劳寿命预测 [J]. 中国铁道科学, 2004, 25(5): 53.
- XI Niansheng, ZHOU Qingyue. Distribution and prediction of rail fatigue failures [J]. China Railway Science, 2004, 25(5): 53.
- [7] 李金良. 周期性钢轨廓形打磨对小半径曲线寿命的影响 [J]. 铁道建筑, 2019, 59(8): 154.
- LI Jinliang. Influence of periodic rail profile grinding on life of small radius curve [J]. Railway Engineering, 2019, 59(8): 154.
- [8] 周清跃,刘丰收,张银花,等. 高速铁路轮轨匹配存在问题及对策 [J]. 中国铁道科学, 2017, 38(5): 78.
- ZHOU Qingyue, LIU Fengshou, ZHANG Yinhua, et al. Solutions for problems at wheel-rail interface in high speed railway [J]. China Railway Science, 2017, 38(5): 78.
- [9] 时光明,丁明,袁健,等. 个性化钢轨廓形打磨在北京地铁的应用分析 [J]. 城市轨道交通研究, 2021, 24(12): 114.
- SHI Guangming, DING Ming, YUAN Jian, et al. Application analysis of personalized rail profile grinding in Beijing Metro [J]. Urban Mass Transit, 2021, 24(12): 114.
- [10] 朱澎程,苏圣超,陈兴杰,等. 潘得罗钢轨扣件的弹条状态识别算法 [J]. 城市轨道交通研究, 2021, 24(6): 46.
- ZHU Pengcheng, SU Shengchao, CHEN Xingjie, et al. Multi-feature fusion of Pandrol rapid elastic strip fastener state recognition algorithm [J]. Urban Mass Transit, 2021, 24(6): 46.
- [11] 吴浩,韦凯,王显,等. 地铁曲线波磨段 e 型弹条大圆弧共振断裂因素研究 [J]. 铁道科学与工程学报, 2022, 19(7): 1862.
- WU Hao, WEI Kai, WANG Xian, et al. Large arc resonance fracture factors of e-type clip in metro curve wave corrugation section [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2022, 19(7): 1862.
- [12] 吴浩,韦凯,郭恭兵,等. 地铁钢轨扣件 e 型弹条受载特征分析 [J]. 铁道科学与工程学报, 2022, 19(3): 665.
- WU Hao, WEI Kai, GUO Gongbing, et al. Analysis on loading characteristics of e-type clip of rail fastener [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2022, 19(3): 665.

(收稿日期:2022-03-16)

(上接第 94 页)

- [4] 刘炯,胡华,刘志钢,等. 城市轨道交通停车场/车辆段的列车出段能力分析与计算 [J]. 城市轨道交通研究, 2020, 23(11): 63.
- LIU Xian, HU Hua, LIU Zhigang, et al. Analysis and calculation of train exit capacity of urban rail transit stabling yard and depot [J]. Urban Mass Transit, 2020, 23(11): 63.

(收稿日期:2022-04-28)