DOI：10.13890/j.issn.1000-128X.2023.02.009　　文章编号：1000-128X(2023)02-0078-12

动车组全列车轮运维全过程退化数值模拟方法研究

陈伯清[1]，曾元辰[1]，宋冬利[1,2]，张卫华[1]，傅双波[3]，姜　陈[3]
（1.西南交通大学 牵引动力国家重点实验室，四川 成都　610031；
2.湖南省轨道交通装备智能感知与运维工程技术研究中心，湖南 株洲　412001；
3.中国铁路上海局集团有限公司 高铁运维技术中心，上海　201812）

摘　要：车轮是动车组的关键零部件，在长期服役过程中会发生状态退化，影响动车组的安全平稳运行；同时，动车组的全列车轮均是成组运行、成组检修，各车轮的退化具有整体同步性和个体差异性，并且邻近车轮在运用和检修过程中相互影响。车轮退化具有影响因素多样、参数互相影响、随机性强的特点，因此提出一种动车组全列车轮运维全过程退化数值模拟方法。针对车轮磨耗、缺陷和镟修等运维过程的关键环节，采用了考虑各环节相关因素、退化规律及其不确定性的概率模型，再通过闭环迭代实现车轮退化过程的数值模拟；为模拟动车组全列车轮在不同随机环节影响下的退化过程，提出了基于Monte Carlo仿真的车轮退化数值模拟方法；最后，基于我国动车组运维数据，给出了建模与模拟算例。结果表明，该方法能够有效预测动车组全列车轮退化过程的平均水平及其不确定性，进而实现车轮剩余寿命预测，并结合车轮运维成本评估，支撑车轮高级修限值优化，降低车轮运维全过程成本，改善动车组维修经济性。

关键词：动车组；车轮；磨耗；镟修；运维；退化过程；数值模拟
中图分类号：U270.331^{+}.1　　**文献标识码：**A

Research on numerical simulation method for degradation of whole-train wheels of EMU in full-process O&M

CHEN Boqing[1], ZENG Yuanchen[1], SONG Dongli[1,2], ZHANG Weihua[1], FU Shuangbo[3], JIANG Chen[3]

(1. State Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China; 2. Hunan Rail Transit Equipment Intelligent Perception and Operation Engineering Technology Research Center, Zhuzhou, Hunan 412001, China; 3. Operation and Maintenance of High-speed Railway Technical Center, China Railway Shanghai Group Co., Ltd., Shanghai 201812, China)

Abstract: Wheels are the key components of EMU and degradation occurs on wheels after long-term service, impeding the operation safety and stability of EMU. In addition, the wheels of the entire train of EMU are operated and maintained in groups, so the degradation of each wheel has overall synchronization and individual differences, and adjacent wheels affect each other in the operation and maintenance (O&M) processes. Wheel degradation is characterized by diverse influencing factors, mutual influence of parameters and high randomness, so a numerical simulation method was proposed for the degradation of whole-train wheels of EMU in full-process O&M. A probabilistic model that incorporated the relevant factors, degradation laws and uncertainties is used to simulate the key factors in the operation and maintenance process, such as wheel wear, defects and reprofiling, and then the numerical simulation of the wheel degradation process was realized through closed-loop iteration. Then, a numerical simulation method of wheel degradation based on

基金项目：中国国家铁路集团有限公司科技研究开发计划项目(N2021J020)；国际（地区）合作与交流项目（P110520G02004）
通信作者：宋冬利（1971—），女，博士，高级实验师，博士生导师，主要从事动车组转向架故障预测与健康管理研究；E-mail: sdl.cds@163.com
引用格式：陈伯清, 曾元辰, 宋冬利, 等. 动车组全列车轮运维全过程退化数值模拟方法研究[J]. 机车电传动, 2023(2): 78-89.
Citation: CHEN Boqing, ZENG Yuanchen, SONG Dongli, et al. Research on numerical simulation method for degradation of whole-train wheels of EMU in full-process O&M[J]. Electric Drive for Locomotives,2023(2): 78-89.

Monte Carlo simulation is proposed to simulate the degradation process of whole-train wheels of EMU under the influence in random links. Finally, based on the operation and maintenance data of EMU in China, modeling and simulation examples were given. The results show that the method can effectively predict the average level and uncertainties of degradation of whole-train wheels of EMU, enabling forecast of the remaining service life of wheels. The method can also be used to optimize of the overhaul limits of wheels based on the wheel operation and maintenance cost evaluation, so as to reduce the cost in the whole process of wheel operation and maintenance and improve the economy of EMU maintenance.

Keywords: EMU; wheel; wear; reprofiling; operation and maintenance; degradation process; numerical simulation

0　引言

车轮是动车组的关键零部件，在长期服役过程中会发生状态退化，进而影响动车组的稳定性、安全性和舒适性[1]。同时，频繁的车轮检测、维修和更换，不仅花费大量成本，而且影响动车组运用效率。因此，对车轮状态退化过程进行预测和有效建模，可以更好地支撑制定车轮检修计划，优化车轮维修策略，进而改善车轮检修经济效益，提升动车组运用管理水平。

围绕这个目标，国内外学者开展了一定的研究。文献[2-3]采用统计方法建立了地铁车轮磨耗模型，并以镟修次数最少、使用寿命最长为目标，优化了轮缘厚镟修策略；文献[4]采用状态转移过程和统计方法建立轮缘厚和轮径磨耗模型，并针对单个车轮对比了单级和多级镟修控制策略的成本；文献[5]基于拟合和统计方法对动车组轮缘厚和轮径磨耗进行建模，并基于Monte Carlo方法找到了经济性最优的轮缘厚镟修限值组合；文献[6]针对单个车轮采用Markov决策过程建立了考虑车轮全生命周期成本的车轮退化过程模型，实现了对运用修镟修策略和高级修限值的全面优化；文献[7]采用Semi-Markov决策过程建立了车轮直径和轮缘厚退化模型，并提出一种轮缘厚镟修量动态决策方法，以节约车轮维修成本；文献[8]采用Markov决策过程建立了车轮运维决策模型，并进一步优化了不同轮径和运行里程车轮的运维策略；文献[9]开发了一个轮对管理模型，对比了采取不同镟修策略的车轮全生命周期成本；文献[10]提出了基于Petri网的车轮维修建模分析方法，并对维修措施的可用性和经济性进行了综合评估；文献[11-13]以整列轮对为研究对象，提出了综合考虑整车轮径差与轮缘厚镟修限值的轮对镟修策略，实现了整车总轮径镟修量的节约；文献[14-16]建立了考虑磨耗、损伤、镟修的车轮全生命周期成本模型，证明了经济镟修策略的经济效益。

动车组是固定编组运行的，动车组的全列车轮退化具有整体同步性和个体差异性，并且邻近车轮在运用和检修过程中相互影响。上述研究大多针对单个车轮或轮对，没有考虑整列车不同车轮退化的关系，少数研究[11-13]仅考虑了整车轮径差，而忽略了不同车轮类型和位置的影响。同时，车轮在长期服役过程中会发生多种退化模式，上述研究鲜有能同时覆盖磨耗、缺陷、镟修、高级修、换轮等环节的方法。为此，本文以动车组全列车轮为对象，在综合考虑车轮磨耗、缺陷、镟修、高级修的基础上，提出一种车轮运维全过程退化的数值模拟方法，并将其应用于我国某动车运用所，进一步实现了动车组全列车轮剩余寿命预测，支撑了以综合检修成本最低为目标的车轮维修优化策略。

1　全列车轮退化数值模拟方法

我国动车组广泛采用8节（或16节）固定编组，如图1所示。其中，1车和8车称为头车和尾车，其他车厢称为中间车。同时，根据车厢是否配置动力单元，各车厢可分为动车和拖车。每个车厢都装配有4条轮对（8个车轮）。动车组的全列车轮成组运行、成组检修，因而不同车轮的退化具有同步性，但由于不同位置和不同类型的车轮动力学性能差异，不同车轮的退化又具有差异性。此外，各车轮的退化过程并非独立，在运用和检修过程中相互影响。

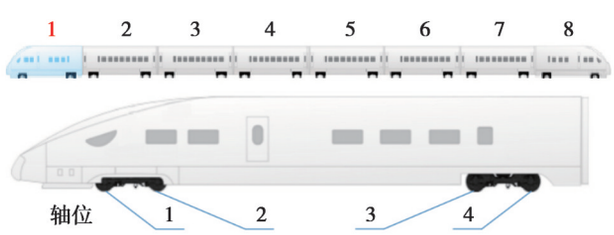


图1　动车组车厢编号示意

Fig. 1　Diagram of EMU coach number

在动车组车轮服役过程中，受到磨耗、缺陷和镟修等关键因素的影响，车轮尺寸参数（包括轮径、轮缘厚等）不断退化，当轮径低于规定的限值后，车轮因寿命到限而报废。车轮退化具有影响因素多样、参数互相影响、随机性强的特点。对此，本文以动车组全列车轮为对象，提出车轮退化关键环节模型，并进一步提出车轮运维全过程数值模拟方法。

1.1　车轮磨耗模型

车轮磨耗指车轮受轮轨相互作用所产生的材料损耗，主要包括踏面磨耗和轮缘磨耗，分别采用轮径磨耗量w_d和轮缘厚磨耗量w_f表征。在动车组运行过程

中，受到内外多重因素的影响，轮轨接触状态时刻发生变化，车轮磨耗特性也不断变化，因此车轮磨耗建模需充分考虑多重因素的共同影响。综合既有研究结果[3, 15, 17-18]，本文考虑车轮类型与装车位置p、磨耗前轮径d、磨耗前轮缘厚f、运行里程m等因素，记轮径w_d和轮缘厚磨耗量w_f为：

$$w_d=\psi_{wd}(p,d,m,e_d) \tag{1}$$

$$w_f=\psi_{wf}(p,d,f,m,e_f) \tag{2}$$

式中：e_d, e_f为磨耗量的不确定性，包括了载重、线路、环境等时变且不易测因素的影响；$\psi_{wd}(\ )$, $\psi_{wf}(\ )$为以各相关因素为输入、以磨耗量为输出的数学模型，具体建模方法需根据具体数据结构和数量等选取。

1.2 车轮缺陷模型

车轮缺陷泛指车轮在运用过程中表面或内部出现的各种问题，其中我国动车组最典型的车轮缺陷是车轮多边形化和滚动接触疲劳。车轮多边形化指车轮半径沿圆周方向的周期性不圆顺，其会加剧轮轨相互作用。综合既有研究结果[19-20]和实际经验，考虑车轮类型与装车位置p、轮径d、季节s、运行里程m、历史车轮多边形情况h_p，记车轮多边形的发生概率为

$$P_p=\psi_p(p,d,s,m,h_p) \tag{3}$$

式中：$\psi_p(\ )$为以各相关因素为输入、以车轮多边形发生概率为输出的数学模型，具体建模方法需根据具体数据结构、数量等选取。

滚动接触疲劳是动车组车轮最典型的疲劳缺陷，常发生在表面或次表面，会危害动车组高速运行的安全性和可靠性[21]。综合既有研究结果[15, 22]和实际经验，考虑车轮类型与装车位置p、轮径d、轮径磨耗速率ω_d、运行里程m、季节s、历史车轮疲劳缺陷情况h_f，记车轮疲劳缺陷的发生概率为

$$P_f=\psi_f(p,d,\omega_d,s,m,h_f) \tag{4}$$

式中：$\psi_f(\ )$为以各相关因素为输入、以车轮疲劳缺陷发生概率为输出的数学模型，具体建模方法需根据具体数据结构和数量等选取。

1.3 车轮镟修模型

车轮镟修是恢复车轮廓形、去除车轮缺陷的有效手段，我国动车组车轮镟修主要包括运用修镟修和高级修镟修。前者是指按照一定里程间隔对动车组全列所有车轮进行不落轮镟修，后者是指在动车组全列高级修时对所有车轮进行落轮镟修。

镟修周期的长短不仅影响动车组的运用检修效率，而且影响车轮的服役状态。在计划预防性镟修模式下，镟修间隔里程m通常采用固定的周期，但实际运用中受维修能力、上线率要求等因素的影响，实际镟修周期一般围绕某一固定里程m_c在一定范围内波动，记实际镟修周期m（运行里程）为

$$m=\psi_m(m_c,\sigma_m) \tag{5}$$

式中：σ_m为车轮镟修周期的不确定性；$\psi_m(\ )$为以所有相关因素为输入，以镟修周期为输出的数学模型，具体建模方法需根据具体数据结构和数量等选取。

如图2所示，车轮镟修会造成轮径和轮缘厚的变化，并且轮径镟修量c_d和轮缘厚镟修量c_f互相影响，轮缘厚增量越大，轮径镟修损耗越大。在计划预防性镟修模式下，首先选定一基础轮径镟修量c_{bd}，其受到车轮多边形化发生情况y_p、疲劳缺陷发生情况y_f等影响，记该基础轮径镟修量c_{bd}为

$$c_{bd}=\psi_{bd}(y_p,y_f,\sigma_{bd}) \tag{6}$$

式中：σ_{bd}为基础轮径镟修量的不确定性，包括镟轮人员偏好等因素的影响[16]；$\psi_{bd}(\ )$为以所有相关因素为输入，以基础轮径镟修量为输出的数学模型，具体建模方法需根据具体数据结构和数量等选取。

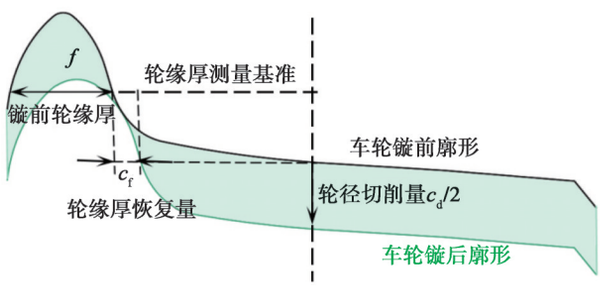


图2 车轮镟修示意图

Fig. 2 Diagram of wheel reprofiling

轮缘厚镟修量主要由镟前轮缘厚f和基础轮径镟修量c_{bd}决定，同时由于动车组运用过程中要求轮缘厚不得低于限值L_f，因此当采用基础轮径镟修量c_{bd}得到的轮缘厚接近或低于L_f时，需增大轮径镟修量以补偿轮缘厚至满足限值。综上所述，记轮缘厚镟修量目标值c_{tf}为

$$c_{tf}=\psi_{tf}(c_{bd},f,L_f,\sigma_{tf}) \tag{7}$$

式中：σ_{tf}为轮缘厚镟修量的不确定性，包括车轮不均匀磨耗、镟轮人员偏好等因素的影响；$\psi_{tf}(\ )$为以所有相关因素为输入、以轮缘厚镟修量目标值为输出的数学模型，具体建模方法需根据具体数据结构和数量等选取。

在车轮镟修时，除了要恢复单个车轮的廓形和尺寸外，还需满足规定的镟修后同轴、同架、同车辆轮径差限度L_{dd}。因此，在基础轮径镟修量c_{bd}的前提下，考虑补偿轮缘厚、匹配轮径差所需的轮径镟修量，记轮径镟修量目标值c_{td}为

$$c_{td}=\psi_{td}(c_{bd},c_{tf},L_{dd}) \tag{8}$$

式中：$\psi_{td}(\ )$为以所有相关因素为输入、以轮径镟修量目标值为输出的数学模型，具体建模方法需根据具体数据结构和数量等选取。

此外，由于镟修机床的测量误差和加工误差，实际的镟后轮径和轮缘厚与目标值难免存在随机偏差，

分别记为ε_d, ε_f，则最终的轮径镟修量和轮缘镟修量为：

$$c_d = c_{td} + \varepsilon_d \tag{9}$$

$$c_f = c_{tf} + \varepsilon_f \tag{10}$$

1.4　运维全过程模拟方法

在动车组运维过程中，车轮磨耗、发生缺陷和镟修是循环往复的，并且各环节在遵循各自退化规律的同时又相互影响，例如轮径与轮缘厚在磨耗和镟修时相互影响，镟修后车轮尺寸影响车轮磨耗和车轮缺陷，磨耗后车轮廓形及尺寸影响车轮镟修量，车轮缺陷与历史状态有关且影响车轮镟修量。同时，对动车组全列车轮而言，不同车轮类型和位置有不同的磨耗和发生缺陷的规律，在车轮镟修时不同位置的车轮相互影响。此外，高级修作为车轮运维全过程的关键节点，需要遵守动车组高级修周期的同时，还通常采用与运用中不同的镟修量和维修限值。

综上所述，动车组全列车轮退化具有离散性、耦合性和不确定性，很难采用解析法直接对车轮退化进行模拟和预测。为此，本文提出一种基于闭环迭代的动车组全列车轮退化数值模拟方法，如图3所示。以整列动车组为对象，以某时刻的车轮状态为起始，首先预测下一次镟修时机及其对应的运行里程，然后对车轮逐个进行模拟，模拟其轮径磨耗、轮缘厚磨耗、多边形化、疲劳缺陷情况，预测得到所有车轮镟修前状态，其中需考虑磨耗前状态、装车位置，以及各变量间的相互影响；再进一步，逐个车轮模拟其轮径镟修量、轮缘厚镟修量，其中需考虑车轮多边形状态、缺陷情况，以及轮径与轮缘厚镟修量的相互影响，并考虑同轴、同架、同车镟修量和轮径差要求，预测得到镟后车轮状态；如此循环迭代即可模拟动车组全列车轮退化过程，直至所有车轮寿命到限，其间如遇到动车组计划的高级修，则模拟高级修镟修过程。

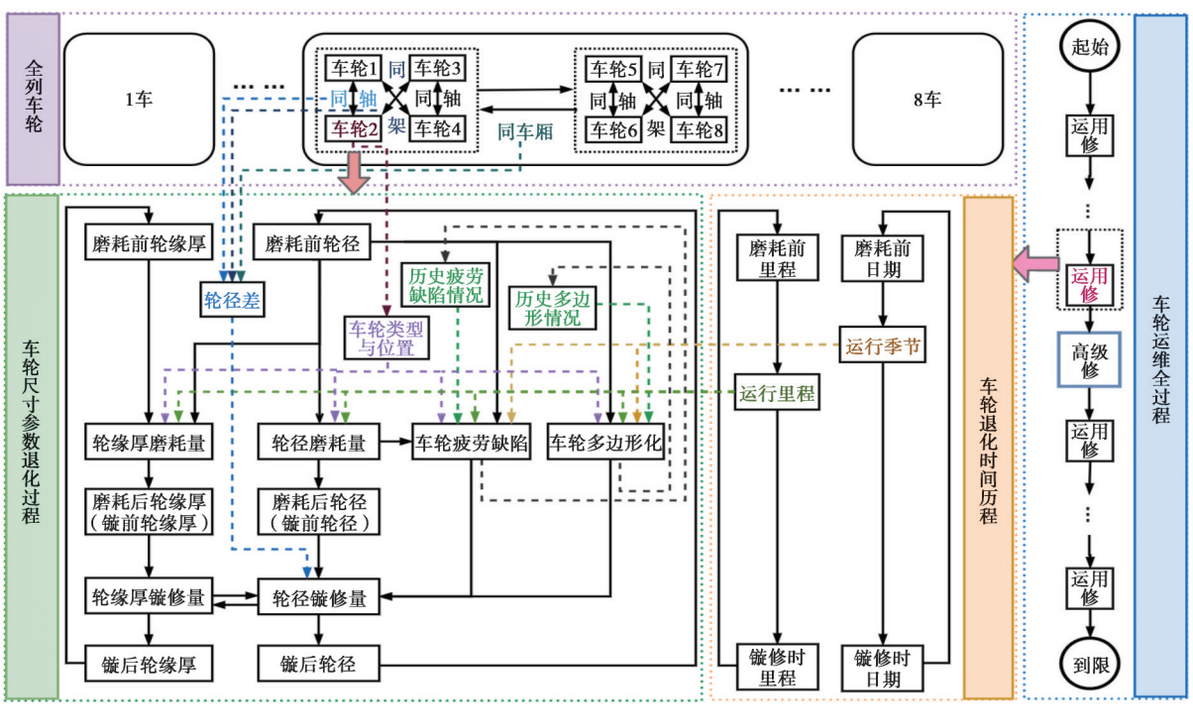


图3　全列车轮退化过程数值模拟示意图

Fig. 3　Numerical simulation of the degradation process of whole-train wheel of EMU

在上述闭环迭代方法的基础上，本文进一步提出基于Monte Carlo仿真的车轮退化数值模拟方法[5, 23]，通过历次在车轮磨耗、缺陷和镟修环节分别生成符合预设规律的随机数，模拟车轮退化环节及其不确定性，并通过大量重复该过程得到动车组全列车轮在不同随机环节影响下的退化过程。

2　全列车轮退化数值模拟算例

在上述建模与模拟方法的基础上，以我国某动车运用所配属的某一车型动车组为例，采用其在2019—2021年由镟修机床实测的车轮磨耗、缺陷和镟修数据，建立车轮各退化环节模型，对车轮运维全过程退化进程进行数值模拟，并与实测退化过程进行对比验证。

2.1　车轮磨耗模型算例

根据式(1)和式(2)，车轮磨耗模型为：

$$w_d = \omega_d \cdot m \tag{11}$$

$$w_f = \omega_f \cdot m \tag{12}$$

式中：w_d为轮径磨耗量；w_f为轮缘厚磨耗量；ω_d为单位里程下轮径磨耗量（磨耗速率）；ω_f为单位里程下轮缘厚磨耗量（磨耗速率）。

两者服从下列分布：

$$w_d \sim N\left(a_{p0} + a_{p1}/d, \sigma_{dp}^2\right) \tag{13}$$

$$w_{\mathrm{f}} \sim N\left(b_{p0}+b_{p1}d+b_{p2}f,\sigma_{\mathrm{fp}}^{2}\right) \tag{14}$$

式中：a_{p0}, a_{p1}, b_{p0}, b_{p1}, b_{p2} 为常数，用于确定不同位置车轮轮径和轮缘厚磨耗速率均值；σ_{dp}, σ_{fp} 为不同位置车轮轮径和轮缘厚磨耗速率标准差。

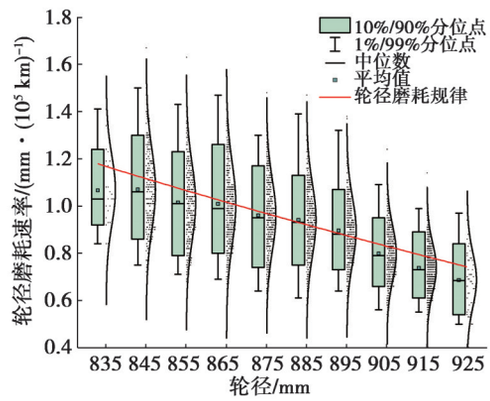
采用车轮镟修前后的测量数据，对上述车轮磨耗模型进行拟合，结果如图4所示。由图4可知，轮径越小，轮径磨耗速率越大、轮缘磨耗速率越小；轮缘磨耗速率随轮缘厚减小而减小；头车和尾车的磨耗速率整体上大于中间车。采用上述建模方法，可充分考虑不同因素对车轮磨耗的影响，并有效考虑其随机分布。

2.2 车轮缺陷模型算例

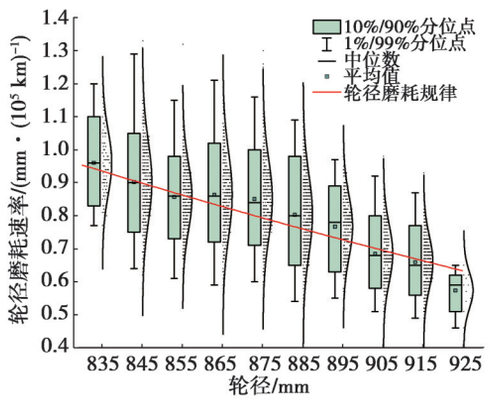
2.2.1 车轮多边形化

根据式(3)，采用统计方法建立车轮多边形化发生概率的数学模型，其模型为

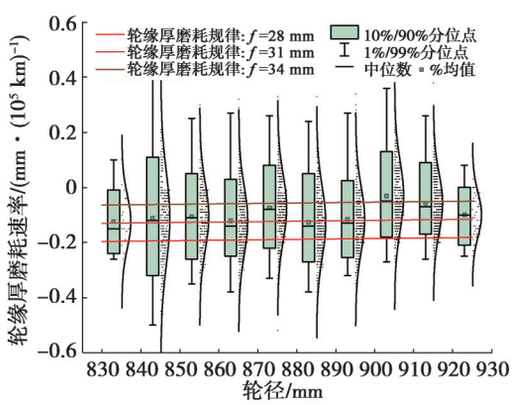
$$P_{\mathrm{p}}=\psi_{\mathrm{p}}(p,d,s,m,h_{\mathrm{p}})=\frac{\mathrm{NumP}\{p\in T_{\mathrm{p}i},d\in D_{\mathrm{d}i},s\in S_{si},m\in M_{\mathrm{m}i},h_{\mathrm{p}}\in H_{\mathrm{f}i}\}}{\mathrm{Num}\{p\in T_{\mathrm{p}i},d\in D_{\mathrm{d}i},s\in S_{si},m\in M_{\mathrm{m}i},h_{\mathrm{p}}\in H_{\mathrm{f}i}\}} \tag{15}$$



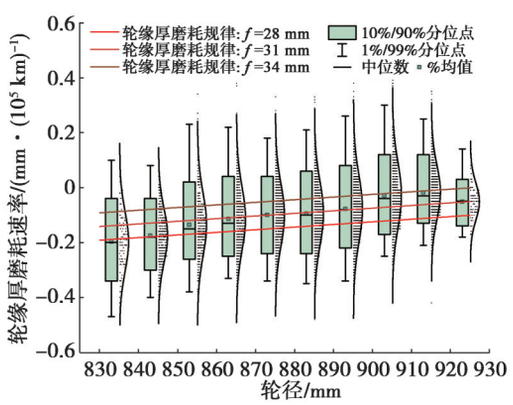
(a) 头尾车不同轮径下轮径磨耗速率



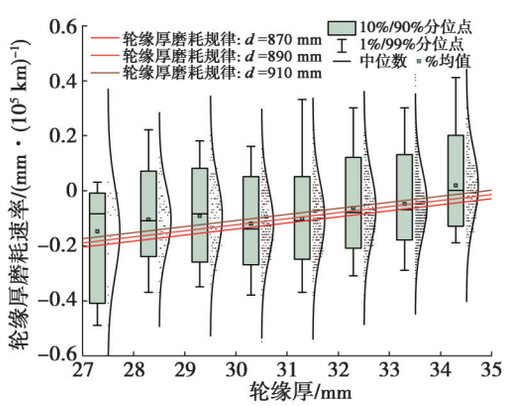
(b) 中间车不同轮径下轮径磨耗速率



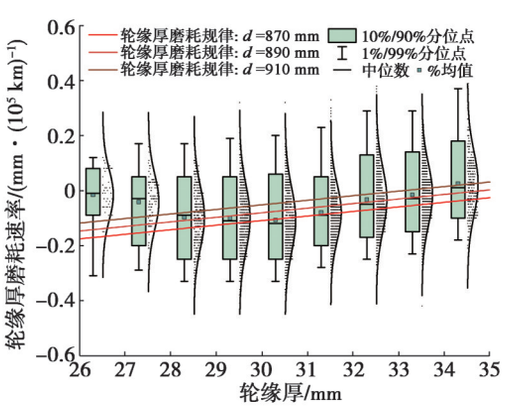
(c) 头尾车不同轮径轮缘厚磨耗速率



(d) 中间车不同轮径轮缘厚磨耗速率



(e) 头尾车不同轮缘厚下轮缘厚磨耗速率



(f) 中间车不同轮径轮缘厚下轮缘厚磨耗速率

图4 车轮磨耗模型

Fig. 4 Wheel wear model

式中：Num{ }为对应集合内的车轮总数；NumP{ }为对应集合内的多边形化车轮数量；T_{pi}, D_{di}, S_{si}, M_{mi}, H_{fi}分别为按车轮类型、轮径、季节、里程和上次检测时多边形化发生情况所划分的集合/区间及其序号。

采用车轮镟修前多边形测量数据建立车轮多边形模型，其中针对各影响因素的多边形化发生规律统计模型结果如图5所示。由图5可知，动轮的多边形化发生率高于拖轮，小轮径车轮的多边形化发生率高于大轮径车轮，夏季的车轮多边形化发生率最高，冬季车轮多边形化发生率最低；运行里程越大，车轮多边形化的发生率越高；上一次发生过多边形化的车轮更有可能再次发生多边形化。

2.2.2　车轮疲劳缺陷

根据式(4)，采用统计方法建立车轮疲劳缺陷发生概率模型，其模型为：

头尾车车轮

$$P_{\mathrm{f}}=\psi_{\mathrm{f}}(d,w_{\mathrm{d}},s,m,h_{\mathrm{f}})=\frac{\mathrm{NumF}\{d\in D_{\mathrm{d}j},\omega_{\mathrm{d}}\in W_{\omega j},s\in S_{sj},m\in M_{\mathrm{m}j},h_{\mathrm{f}}\in H_{\mathrm{f}j}\}}{\mathrm{Num}\{d\in D_{\mathrm{d}j},\omega_{\mathrm{d}}\in W_{\omega j},s\in S_{sj},m\in M_{\mathrm{m}j},h_{\mathrm{f}}\in H_{\mathrm{f}j}\}} \tag{16}$$

中间车车轮

$$P_{\mathrm{f}}=\psi_{\mathrm{f}}(d,w_{\mathrm{d}},s,m,h_{\mathrm{f}})=\frac{\mathrm{NumF}\{h_{\mathrm{f}}\in H_{\mathrm{f}j}\}}{\mathrm{Num}\{h_{\mathrm{f}}\in H_{\mathrm{f}j}\}} \tag{17}$$

式中：Num{ }为对应集合内的车轮总数；NumF{ }为对应集合内的发生疲劳缺陷车轮数量；$D_{\mathrm{d}j}$, $W_{\omega j}$, S_{sj}, $M_{\mathrm{m}j}$, $H_{\mathrm{f}j}$分别为按轮径、轮径磨耗速率、季节、里程和上次检测时疲劳缺陷发生情况所划分的集合/区间及其序号。

采用车轮镟修时疲劳缺陷检测数据建立车轮疲劳缺陷模型，其中针对各影响因素的疲劳缺陷发生规律统计模型结果如图6所示。由图6可知，中间车车轮缺陷发生率显著低于头车和尾车；上一次发生过疲劳缺陷的车轮更有可能再次发生疲劳缺陷；小轮径车轮的疲劳缺陷发生率高于大轮径车轮；轮径磨耗速率大的车轮的疲劳缺陷发生率也更高；运行里程数越大，车轮疲劳缺陷的发生率越高；夏季车轮疲劳缺陷发生率高于冬季。

2.3　车轮镟修模型算例

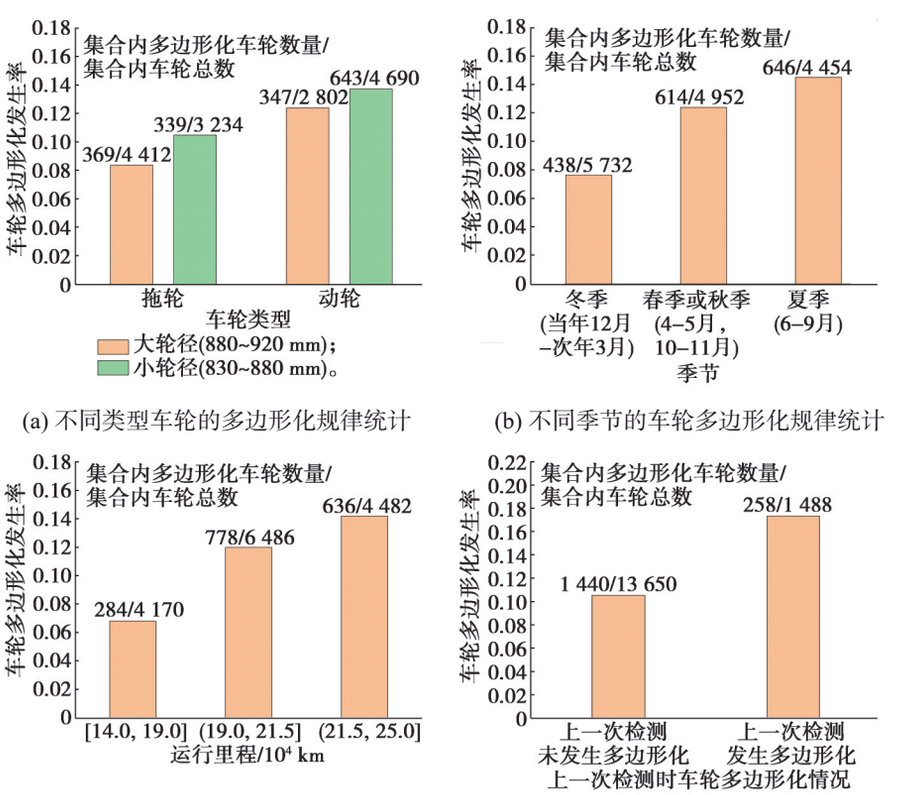
2.3.1　镟修周期

根据式(5)，采用截断正态分布描述镟修间隔里程m的分布，即

$$\left.\begin{aligned}&m\sim N\left(m_{\mathrm{c}},\sigma_{\mathrm{m}}^{2}\right)\\&m_{\min}<m<m_{\max}\end{aligned}\right\} \tag{18}$$

式中：m_{c}, σ_{m}分别为镟修周期的均值和标准差。

采用车轮镟修数据，对上述模型进行拟合，结果如图7所示。由图7可知，采用的模型可以较好地描述镟修周期的整体分布。

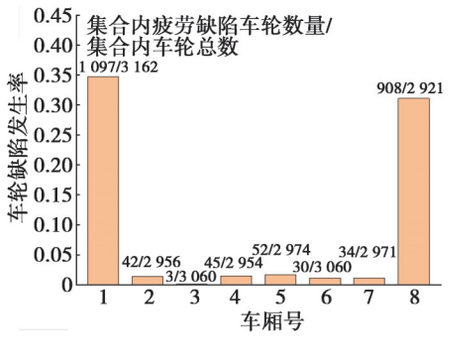


(a) 不同类型车轮的多边形化规律统计　(b) 不同季节的车轮多边形化规律统计

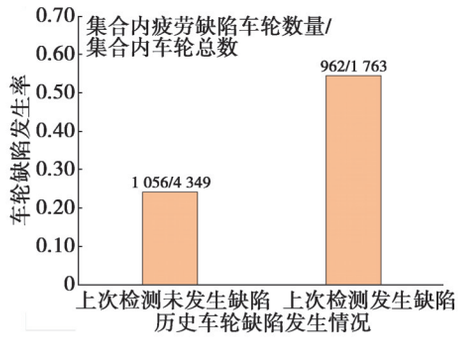
(c) 不同运行里程的车轮多边形化规律统计　(d) 不同历史发生情况的车轮多边形化规律统计

图5　车轮多边形化发生规律统计

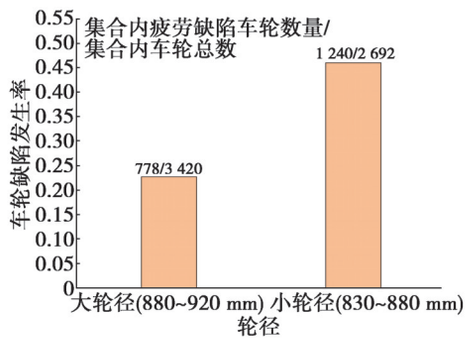
Fig. 5　Statistical law of wheel polygonization occurrence



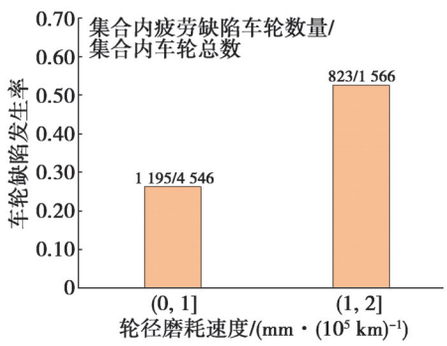
(a) 不同车厢的车轮疲劳缺陷规律统计



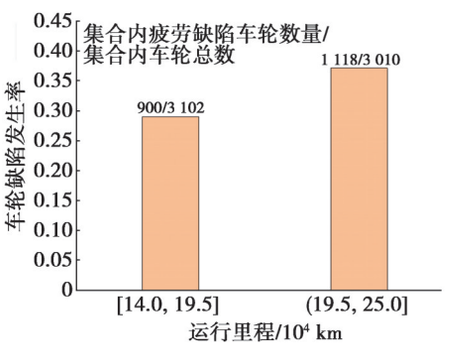
(b) 不同历史车轮缺陷的车轮疲劳缺陷规律统计



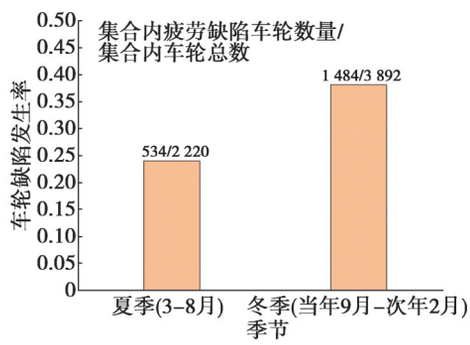
(c) 不同轮径的车轮疲劳缺陷规律统计



(d) 不同轮径磨耗速率的车轮疲劳缺陷规律统计



(e) 不同运行里程的车轮疲劳缺陷规律统计



(f) 不同季节的车轮疲劳缺陷规律统计

图6 车轮疲劳缺陷规律统计

Fig. 6 Statistical law of wheel fatigue defect

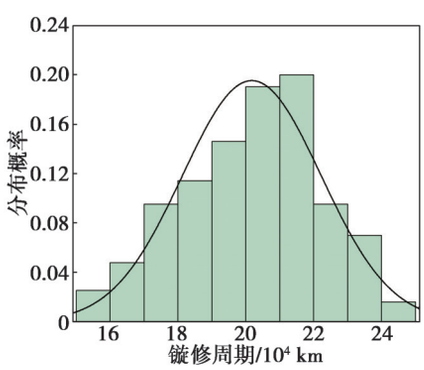


图7 车轮镟修周期分布

Fig. 7 Distribution of reprofiling mileage interval

2.3.2 镟修量

1）基础轮径镟修量c_{bd}

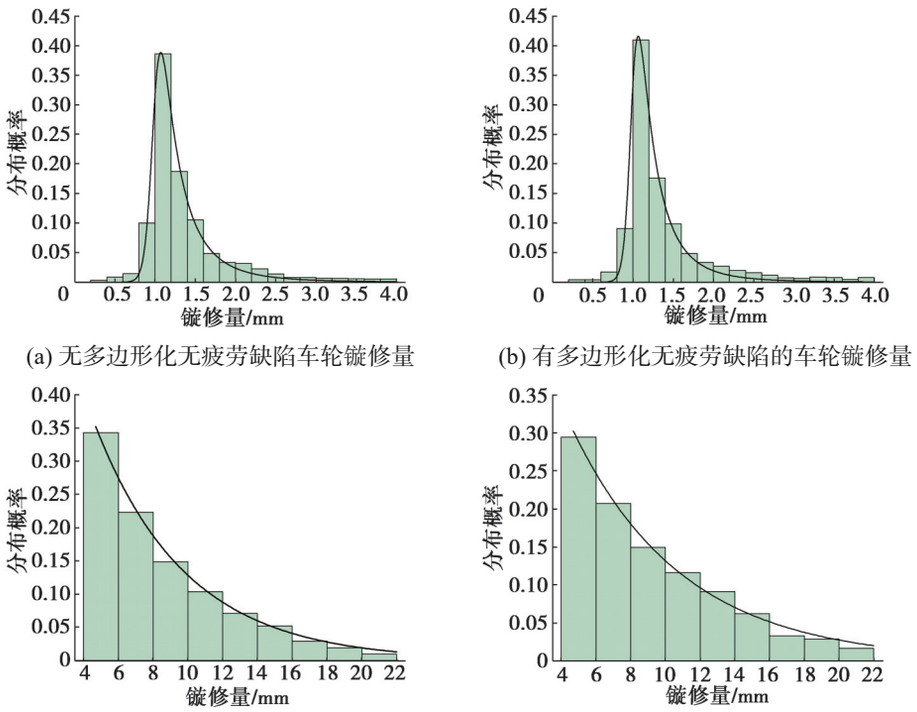
根据式(6)，采用截断Burr分布[24]和截断指数分布分别描述没有发生疲劳缺陷、发生疲劳缺陷情况下的基础轮径镟修量c_{bd}分布，即

$$\left.\begin{aligned}&\text{无疲劳缺陷}\\&c_{\mathrm{bd}}\sim\mathrm{Burr}(\alpha_{y_{\mathrm{p}}},\theta_{y_{\mathrm{p}}})\\&c_{y_{\mathrm{f}_\min}}<c_{\mathrm{bd}}<c_{y_{\mathrm{f}_\max}}\end{aligned}\right\}\tag{19}$$

$$\left.\begin{aligned}&\text{有疲劳缺陷}\\&c_{\mathrm{bd}}\sim E(\gamma_{y_{\mathrm{p}}})\\&c_{y_{\mathrm{f}_\min}}<c_{\mathrm{bd}}<c_{y_{\mathrm{f}_\max}}\end{aligned}\right\}\tag{20}$$

式中：$\alpha_{y_{\mathrm{p}}}$，$\theta_{y_{\mathrm{p}}}$为不同的车轮多边形条件（y_{p}为类别变量）所对应的Burr分布参数；$\gamma_{y_{\mathrm{p}}}$为不同的车轮多边形条件所对应的指数分布参数。

采用车轮镟修数据，对基础轮径镟修量模型进行拟合，结果如图8所示。由图8可知，Burr分布很好地表征了未发生疲劳缺陷情况下基础镟修量偏态、峰度大的分布特点；指数分布很好地表征了发生疲劳缺陷情况下基础镟修量拖尾分布的特点。此外，对于多边形化的车轮，选取较大的基础轮径镟修量的概率更高。



(a) 无多边形化无疲劳缺陷车轮镟修量　(b) 有多边形化无疲劳缺陷的车轮镟修量

(c) 无多边形化有疲劳缺陷的车轮镟修量　(d) 有多边形化有疲劳缺陷的车轮镟修量

图 8　车轮基础镟修量分布

Fig. 8　Distribution of basic amount for wheel reprofiling

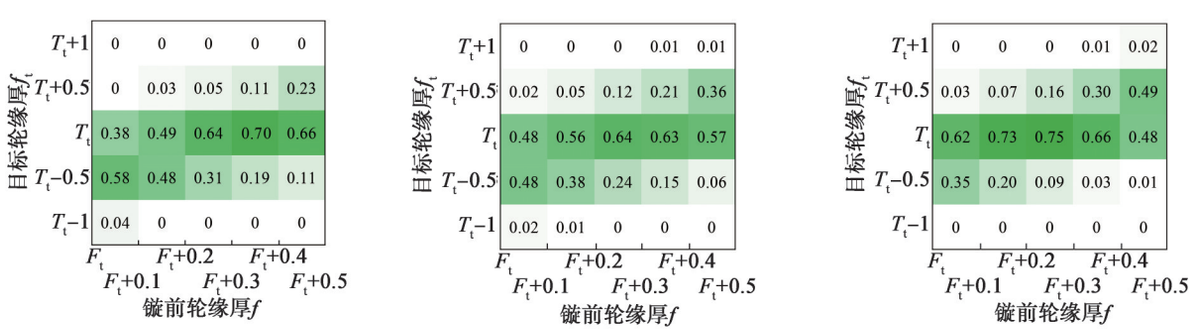
2）目标轮缘厚镟修量 c_{tf}

目前，我国普遍采用经济镟修模式，即从不同轮缘厚的廓形模板中选定 1 个作为镟修目标，记为 T_{tj}（$j=1,2,\cdots,N$）。镟修目标的选择主要由镟修前轮缘厚 f 和基础镟修量 c_{bd} 决定，本算例采用离散概率分布表达目标轮缘厚分布，具体为

$$P(f_{\mathrm{t}}=T_{tj}|c_{\mathrm{bd}}\in C_k,f\in F_{ti})=\frac{\mathrm{Num}\{f_{\mathrm{t}}=T_{tj},c_{\mathrm{bd}}\in C_k,f\in F_{ti}\}}{\mathrm{Num}\{c_{\mathrm{bd}}\in C_k,f\in F_{ti}\}} \tag{21}$$

式中：f 为目标轮缘厚；C_k 为基础镟修量区间及其序号；F_{ti} 为镟前轮缘厚区间及其序号。

采用车轮镟修数据，计算不同轮径基础镟修量 c_{bd} 所对应的目标轮缘厚选取概率，部分结果如图 9 所示。由图 9 可知，当镟修量相同，镟前轮缘越厚，目标轮缘变厚的概率越大；当镟前轮缘厚相同，轮径镟修量越大，目标轮缘变厚的概率越大。该模型能同时反映轮径镟修量和镟前轮缘厚对目标轮缘厚选取的影响。



(a) $c_{\mathrm{bd}}\in(0,1]$　(b) $c_{\mathrm{bd}}\in(1,2]$　(c) $c_{\mathrm{bd}}\in(2,3]$

图 9　不同镟修量下目标轮缘厚选取概率

Fig. 9　Probability of objective flange thinkness of different reprofiling amount

根据式(7)，若基于轮径基础镟修量 c_{bd} 选择的轮缘厚小于限值 L_{f}，则需将限值作为目标轮缘厚。综合上述 2 种情况，轮缘厚镟修量目标值为

$$c_{\mathrm{tf}}=\begin{cases}L_{\mathrm{f}}-f, & f_{\mathrm{t}}\leqslant L_{\mathrm{f}}\\ f_{\mathrm{t}}-f, & f_{\mathrm{t}}>L_{\mathrm{f}}\end{cases} \tag{22}$$

3）目标轮径镟修量 c_{td}

当轮缘需要增厚时，可能需要相应增大轮径镟修量。根据式(8)，单个车轮的轮径镟修量目标值为

$$c_{\mathrm{td}}=q_0+q_1c_{\mathrm{tf}},\ f_{\mathrm{t}}\leqslant L_{\mathrm{f}} \tag{23}$$

式中：q_0,q_1 为常数。

采用车轮镟修数据，对上述模型进行拟合，结果如图 10 所示。

在采用上述方法计算单个车厢所有车轮的轮径镟修量目标值 c_{td} 后，需增加部分大轮径车轮的轮径镟修

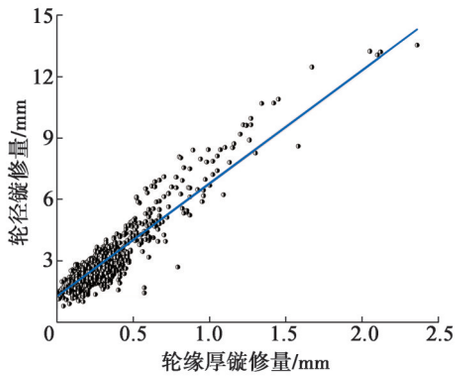


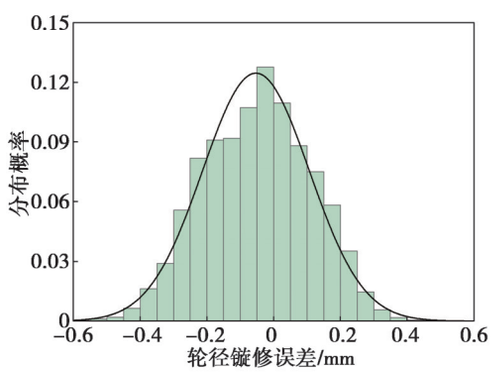
图 10　轮径镟修量−轮缘厚镟修量比例模型

Fig. 10　The scale model of the reprofiling amount between wheel diameter and flange

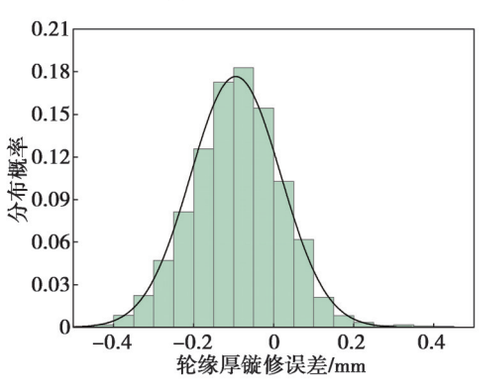
量，以保证同轴、同架、同车厢轮径差要求，进而得到最终的轮径镟修量目标值c_{td}。

4）镟修误差

根据式(9)和式(10)，采用正态分布描述误差的分布。采用车轮镟修数据，对该模型进行拟合，结果如图 11 所示。由图 11 可知，该模型可以很好地描述镟修误差的随机分布。



(a) 轮径镟修误差



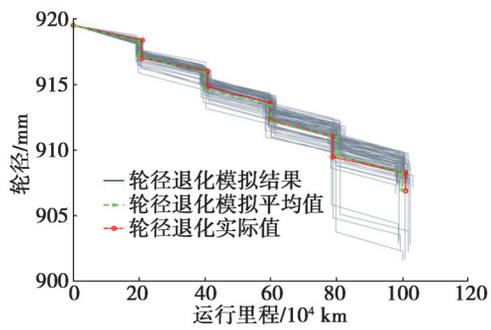
(b) 轮缘厚镟修误差

图 11　轮径和轮缘厚镟修误差分布

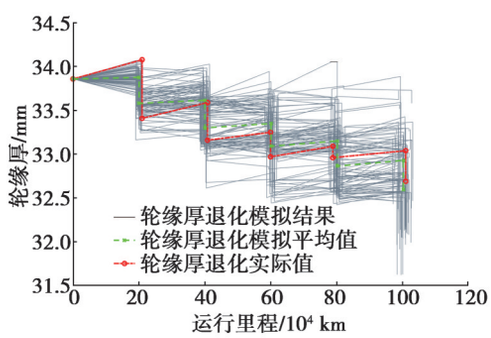
Fig. 11　Distribution of wheel diameter and flange thickness reprofiling error

2.4　数值模拟结果验证

基于前文建立的车轮退化模型，采用本文提出的数值模拟方法，以某车轮为例，模拟其若干次退化过程，并与其实际退化过程对比，结果如图 12 所示。由图 12 可知，预测退化过程的平均值与实际较接近，并且随着运行里程的增加，轮径和轮缘厚的分布范围随不确定性的累积而变大。这说明本文所提出的方法能够有效预测车轮退化过程的平均水平及其不确定性。



(a) 轮径退化过程

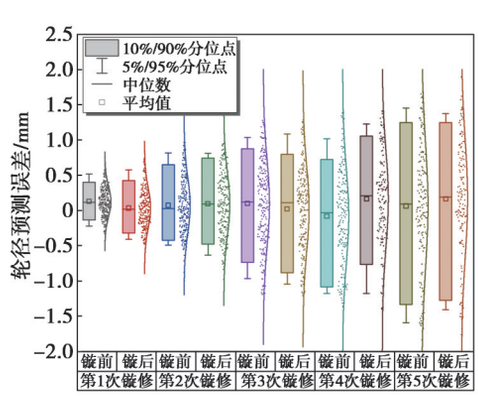


(b) 轮缘厚退化过程

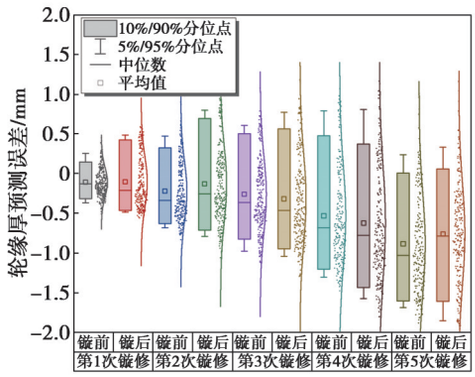
图 12　车轮退化过程

Fig. 12　Degradation processes of wheel

进一步选取 5 个车组，采用上述方法模拟其所有 320 个车轮的退化过程，并统计历次镟修时预测平均值与实际测量值的偏差，结果图 13 所示。由图 13 可知，随着镟修次数的增加，预测误差不断积累，车轮参数的预测误差分布越分散：在第 1 次镟修时，约 90% 的轮径和轮缘厚预测误差在±0.5 mm 以内；在第 5 次镟修时，约 90% 的轮径预测误差在±1.5 mm之间，90% 的轮缘厚预测误差在−2.0~0.5 mm。这些数据定量表明了本文提出方法的准确性。



(a) 轮径预测误差



(b) 轮缘厚预测误差

图 13　车轮尺寸参数预测误差

Fig. 13　Prediction error of wheel dimension parameters

3　全列车轮退化数值模拟工程应用

3.1　车轮剩余寿命预测

将本文提出的全列车轮退化数值模拟方法应用于某动车运用所的所有动车组车轮，实现预测各车轮运用至到限的退化过程，得到各车轮剩余运行里程的可靠度分布、平均运行剩余寿命和平均到限日期。以本文研究的某动车运用所案例车型为例，对该车型所有车组未来 1 年内的车轮退化情况进行预测，并按照到限时间、到限修程、车轮类型统计车轮到限结果，统计结果如图 14 所示。该结果可有效支撑相关部门制定换轮计划，提前储备换轮配件，提高运维效率和资产管理水平。

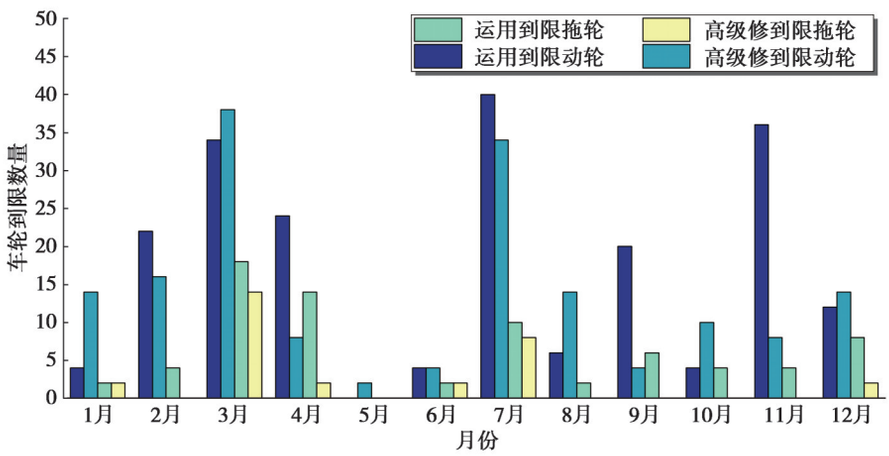


图 14　车轮寿命到限情况统计

Fig. 14　Statistic of wheel to service-life limits

3.2　高级修维修限值优化

当前，我国动车组存在大量运用换轮问题，不仅花费大量的检修成本，而且影响了动车组运用效率，其主要原因在于高级修车轮尺寸限值、车轮退化与寿命不匹配。以本文研究的车型为例，其高级修限值相比运用限值仅有 10 mm 余量，因此接近高级修限值出厂的车轮，有很大概率会在运用中到限。因此，对当前的车轮高级修轮径和轮缘厚限值进行优化是十分必要的。

本文提出的车轮运维全过程数值模拟方法可以支撑车轮高级修限值的优化。针对不同的高级修限值，预测某动车运用所的所有车组车轮退化情况直至其使用到限，同时结合车轮退化过程中的运维成本，计算车轮运维全过程总成本，进而对比不同高级修限值的运维成本，优选总成本最低的高级修维修限值，实现优化高级修限值，减少运用换轮，从而降低运维成本。在此过程中，车轮运维成本评估模型对于维修限值的优化十分重要，需要充分考虑动车组实际运用检修情况。所有车组的车轮运维总成本 C_{T} 可表达为

$$C_{\mathrm{T}}=\sum_{i_{\mathrm{r}}=1}^{n_{\mathrm{r}}}\frac{C_{\mathrm{Pr}}\cdot n_{\mathrm{Pr}_i_{\mathrm{r}}}+C_{\mathrm{Po}}\cdot n_{\mathrm{Po}_i_{\mathrm{r}}}+C_{\mathrm{Rr}}}{m_{i_{\mathrm{r}}}}+\sum_{i_{\mathrm{o}}=1}^{n_{\mathrm{o}}}\frac{C_{\mathrm{Pr}}\cdot n_{\mathrm{Pr}_i_{\mathrm{o}}}+C_{\mathrm{Po}}\cdot n_{\mathrm{Po}_i_{\mathrm{o}}}+C_{\mathrm{Ro}}}{m_{i_{\mathrm{o}}}} \tag{24}$$

式中：n_{r}, n_{o} 分别为运用修到限车轮数和高级修到限车轮数；C_{Pr}, C_{Po} 分别为运用修镟修成本和高级修镟修成本；C_{Rr}, C_{Ro} 分别为运用修换轮成本和高级修换轮成本；$n_{\mathrm{Pr}_i_{\mathrm{r}}}$, $n_{\mathrm{Po}_i_{\mathrm{r}}}$ 分别为运用到限车轮到限前运用修次数和高级修次数；$n_{\mathrm{Pr}_i_{\mathrm{o}}}$, $n_{\mathrm{Po}_i_{\mathrm{o}}}$ 分别为高级修到限车轮到限前运用修次数和高级修次数；$m_{i_{\mathrm{r}}}$, $m_{i_{\mathrm{o}}}$ 为车轮到限时的运行里程。

图 15 展示了不同高级修限值对应的车轮运维总成本，其中成本计算过程中做了归一化处理。由图 15 可知：①当轮径限值不变时，不同轮缘厚限值下的车轮的运维总成本差异不大，主要是因为该车型轮缘磨耗不严重，轮缘普遍较厚，高级修补轮缘的情况较少；②当轮缘厚限值不变时，高级修轮径限值从运用限值起逐渐增大，运维总成本先降低后增加，这是因为轮

径限值越大，车轮运用到限换轮的可能性越低，而同时高级修到限换轮的可能性越大，由于高级修到限换轮的成本显著低于运用换轮，因此运维总成本先降低，但随着限值的进一步增大，车轮使用寿命被进一步缩短，导致单位里程下的成本上升；③对比当前高级修限值（轮径限值 870 mm，轮缘厚限值 30 mm），对于总成本，优化后的高级修限值可以降低车轮运维总成本 8.3%。



图 15　高级修限值优化模拟结果

Fig. 15　Simulation results of advanced overhaul limit optimization

4　结论

本文提出一种动车组全列车轮运维全过程退化数值模拟方法，并基于我国动车组运维数据，给出了建模与模拟算例，介绍了其工程应用价值。本文主要结论如下：

①运用检修数据显示，车轮退化具有影响因素多、参数互相影响、随机性强的特点；同时，动车组全列车轮退化具有整体同步性和个体差异性，并且邻近车轮在运用和检修过程中相互影响。

②本文所提出的车轮退化建模方法覆盖了包括磨耗、缺陷、运用修和高级修的运维全过程，采用概率模型考虑了各环节的相关因素、退化规律及其不确定性，进一步通过闭环迭代实现了车轮退化过程的数值模拟。

③实例研究结果表明，所提出的方法能够有效预测动车组全列车轮退化过程的平均水平及其不确定性，进而支撑车轮剩余寿命预测，并结合车轮运维成本评估，支撑车轮高级修限值优化，以降低车轮运维全过程成本，改善动车组维修经济性。

参考文献：

[1] 常振臣, 高明亮, 宋冬利. 动车组轮对精准镟修管理系统及其应用[J]. 城市轨道交通研究, 2021, 24(2): 114-119.
CHANG Zhenchen, GAO Mingliang, SONG Dongli. Research and application of EMU wheelset precision re-profiling management system[J]. Urban Mass Transit, 2021, 24(2): 114-119.

[2] 王凌, 员华, 那文波, 等. 基于磨耗数据驱动模型的轮对镟修策略优化和剩余寿命预报[J]. 系统工程理论与实践, 2011, 31(6): 1143-1152.
WANG Ling, YUAN Hua, NA Wenbo, et al. Optimization of the re-profiling strategy and remaining useful life prediction of wheels based on a data-driven wear model[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2011, 31(6): 1143-1152.

[3] 顾正隆, 葛亦凡. 基于轮对磨耗数据数理统计的轮对镟修策略多目标优化[J]. 城市轨道交通研究, 2021, 24(增刊 1): 21-25.
GU Zhenglong, GE Yifan. Multi-objective optimization of wheelset rotation repair strategy based on mathematical statistics of wheelset wear data[J]. Urban Mass Transit, 2021, 24(Suppl 1): 21-25.

[4] 杨志, 邢宗义, 王露, 等. 基于磨耗数据统计模型的镟轮决策优化[J]. 铁道标准设计, 2018, 62(1): 142-148.
YANG Zhi, XING Zongyi, WANG Lu, et al. Optimization of wheel re-profiling strategy based on statistical wear model[J]. Railway Standard Design, 2018, 62(1): 142-148.

[5] 张渝, 王松, 邱春蓉. 基于轮对磨耗数据的 CRH2A 型动车经济镟修策略研究[J]. 铁路计算机应用, 2021, 30(4): 6-10.
ZHANG Yu, WANG Song, QIU Chunrong. Economic reprofiling strategy of CRH2A EMU based on wheelset wear data

[J]. Railway Computer Application, 2021, 30(4): 6-10.

[6] ZENG Yuanchen, SONG Dongli, ZHANG Weihua, et al. An optimal life cycle reprofiling strategy of train wheels based on Markov decision process of wheel degradation[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2022, 23(8): 10354-10364.

[7] E Mingcheng, LI Bing, JIANG Zengqiang, et al. An optimal reprofiling policy for high-speed train wheels subject to wear and external shocks using a semi-Markov decision process[J]. IEEE Transactions on Reliability, 2018, 67(4): 1468-1481.

[8] BRAGA J A, ANDRADE A R. Optimizing maintenance decisions in railway wheelsets: a Markov decision process approach[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability, 2019, 233 (2): 285-300.

[9] BEVAN A, MOLYNEUX-BERRY P, MILLS S, et al. Optimisation of wheelset maintenance using whole-system cost modelling[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2013, 227(6): 594-608.

[10] ZHANG Di, HU Hao, LIU Yutao, et al. Railway train wheel maintenance model and its application[J]. Transportation Research Record, 2014, 2448(1): 28-36.

[11] 王珍. 动车组整车轮对镟修优化决策模型的研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2013.
WANG Zhen. Study on the model of the re-profiling strategy optimization about the whole wheelset wearing electric multiple unit[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2013.

[12] 华莎. 基于数据智能分析的列车车轮磨耗预测与镟修策略研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2017.
HUA Sha. Research on wheel wear predicting and reprofiling strategy based on intelligence analysis[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2017.

[13] 陈紫薇. 高速动车组轮对尺寸预测及镟修策略研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2019.
CHEN Ziwei. Research on wheel size prediction and reprofiling strategy for the wheel-set of high-speed EMU[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2019.

[14] ANDRADE A R, STOW J. Assessing the potential cost savings of introducing the maintenance option of 'Economic Tyre Turning' in Great Britain railway wheelsets[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2017, 168: 317-325.

[15] ANDRADE A R, STOW J. Statistical modelling of wear and damage trajectories of railway wheelsets[J]. Quality and Reliability Engineering International, 2016, 32(8): 2909-2923.

[16] ANDRADE A R, STOW J. Assessing the efficiency of maintenance operators: a case study of turning railway wheelsets on an under-floor wheel lathe[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability, 2017, 231(2): 155-163.

[17] 曾元辰, 唐旭, 张卫华, 等. 车轮尺寸对车轮磨耗的影响规律研究[J]. 铁道学报, 2022, 44(4): 27-35.
ZENG Yuanchen, TANG Xu, ZHANG Weihua, et al. Study on influence of wheel size on wheel wear[J]. Journal of the China Railway Society, 2022, 44(4): 27-35.

[18] ZENG Yuanchen, SONG Dongli, ZHANG Weihua, et al. A new physics-based data-driven guideline for wear modelling and prediction of train wheels[J]. Wear, 2020, 456/457: 203355.

[19] ZENG Yuanchen, SONG Dongli, ZHANG Weihua, et al. Risk assessment of wheel polygonization on high-speed trains based on Bayesian networks[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability, 2021, 235(2): 182-192.

[20] CHI Zhexiang, CHEN Ruoran, HUANG Simin, et al. Multi-state system modeling and reliability assessment for groups of high-speed train wheels[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2020, 202: 107026.

[21] 赵鑫, 温泽峰, 王衡禹, 等. 中国轨道交通轮轨滚动接触疲劳研究进展[J]. 交通运输工程学报, 2021, 21(1): 1-35.
ZHAO Xin, WEN Zefeng, WANG Hengyu, et al. Research progress on wheel/rail rolling contact fatigue of rail transit in China[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2021, 21(1): 1-35.

[22] ZENG Yuanchen, SONG Dongli, ZHANG Weihua, et al. Physics-based data-driven interpretation and prediction of rolling contact fatigue damage on high-speed train wheels [J]. Wear, 2021, 484/485: 203993.

[23] YEH W C, LIN Yicheng, CHUNG Y Y, et al. A particle swarm optimization approach based on Monte Carlo simulation for solving the complex network reliability problem[J]. IEEE Transactions on Reliability, 2010, 59(1): 212-221.

[24] 韦程东, 陈志强, 韦师, 等. 两参数 Burr Ⅻ分布的经验 Bayes 检验问题[J]. 工程数学学报, 2010, 27(2): 333-341.
WEI Chengdong, CHEN Zhiqiang, WEI Shi, et al. Empirical Bayes test for the parameter of Burr Ⅻ distribution[J]. Chinese Journal of Engineering Mathematics, 2010, 27(2): 333-341.

收稿日期：2022-12-20
修回日期：2023-02-13