

DOI: 10.3901/JME.2019.02.135

基于元胞自动机方法的地铁车轮磨损动态建模与仿真^{*}

尹波润¹ 文永蓬¹ 尚慧琳²

(1. 上海工程技术大学城市轨道交通学院 上海 201620;

2. 上海应用技术大学机械工程学院 上海 201418)

摘要: 为解决轮轨之间的磨损预测问题,以地铁车轮为研究对象,利用元胞自动机方法建立轮轨磨损动态分析模型,将轮轨接触问题以局部演变规则表征,解析元胞的移动规则、受损规则、切削规则和脱落规则的自组织演变过程,实现了车轮在钢轨上宏观磨损的动态过程模拟,获得地铁运行过程中轮缘高度、轮缘厚度、轮缘综合值的变化情况,并且,同时考虑车轮和钢轨磨损的相互作用,采用皮尔逊相关系数对仿真结果与实测结果进行对比,发现具有极强相关和强相关性,验证了仿真模型的有效性。研究表明:建立的轮轨接触元胞自动机模型适用于车轮磨损的动态演变过程,设置的局部演化规则是合理的,形象地描述了车轮型面的变化过程,轮缘高度、轮缘厚度及轮缘综合值的仿真结果与实测结果对比证明了元胞自动机方法在车轮磨损上的可行性。工作为轮轨磨损预测提供了一种新思路,在指导轮合理周期的制定方面具有一定的参考价值。

关键词: 车轮磨损; 元胞自动机; 轮缘高度; 轮缘厚度; 轮缘综合值

中图分类号: U260; U270

Dynamic Modeling and Simulation of Metro Wheel Wear Based on Cellular Automata Method

YIN Borun¹ WEN Yongpeng¹ SHANG Huilin²

(1. School of Urban Railway Transportation, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620;

2. School of Mechanical Engineering, Shanghai Institute of Technology, Shanghai 201418)

Abstract: In order to solve the problem of wear prediction between wheel and rail, the wheels of urban rail metro are taken as the research objects, and the dynamic analysis model of wheel-rail wear is established using the method of cellular automata. The wheel-rail contact problem is characterized by local evolution rules, and the self-organization evolution process of the cell's movement rules, damage rules, cutting rules, and shedding rules is analyzed. The dynamic process simulation of the macroscopic abrasion of the wheel on the rail is realized, and the variation of the flange height, the thickness of the flange, and the comprehensive value of the flange during the operation of the urban rail metro is obtained. The interaction between wheel and rail wear is also considered. Using the correlation coefficient to compare the simulation results with actual line operation data, the strong correlation of the comparison results verify the validity of the simulation model. The results show that the wheel-rail contact cellular automaton model is suitable for the dynamic evolution of wheel wear and the established local evolution rules are reasonable, which can describe the change process of the wheel profile. The simulation results of flange height, flange thickness and flange comprehensive value are compared with the measured results to prove the feasibility of cellular automata method in wheel wear. The work provides a new idea for the prediction of wheel-rail wear and has a certain reference value in guiding the development of the reasonable cycle of the reel.

Key words: wheel wear; cellular automaton; flange height; flange thickness; flange comprehensive value

^{*} 国家自然科学基金(11472176)和上海市自然科学基金(15ZR1419200)资助项目。20180320 收到初稿, 20180920 收到修改稿

0 前言

随着轨道交通运输的发展,地铁轮轨间的磨耗问题日益突显,轮轨之间的磨耗对行车稳定性、安全性、乘客舒适性以及车轮的使用寿命有很大影响。地铁车辆运行过程中,车轮磨耗过度以及异常磨耗等原因都有可能引发脱轨事故,因此,车轮磨耗的预测研究对实际线路的工作开展具有重要的指导意义^[1-2]。

轮轨之间的磨损产生主要以磨粒磨损、疲劳磨损以及粘着磨损为主,另外造成轮轨磨损的因素还有很多,例如轮轨的相对运动情况、外部荷载、外部环境和材料属性等,车轮的磨损分析是一个极为复杂的过程,很难将各种综合因素结合起来进行磨耗仿真分析。

论文研究主要考虑磨粒磨损,考虑到轮轨间工况复杂且磨损计算量大的因素,采用了用于模拟复杂系统时空演化过程的元胞自动机方法解决地铁车轮的磨损问题,根据轮轨表面的元胞演变规则对车轮磨损进行仿真分析。

1 经典理论与元胞自动机方法

1.1 现有车轮磨损计算方法

国内外学者对轮轨磨耗问题进行了大量的研究^[3-17]。JENDEL 等^[3]基于 Archard 体积磨损方法等建立了一套车轮磨耗模型,并且仿真对比了轮缘高度、轮缘厚度等,吻合度较好;BRAGHIN 等^[4-5]提出了一套车轮磨耗数值算法,并与 LEWIS 对之前的方法进行改进,结果在踏面部分比较吻合,轮缘部分略大;后期 ENBLOM 等^[6-7]改进了接触模型并加入了弹性和磨损率的影响;金学松等^[8-9]考虑了将车辆轨道耦合动力学理论与 KALKER 的非 Hertz 精确理论、Archard 材料磨损模型相结合,并发展了相应的数值方法,利用该模型分析了不同曲线半径下车轮的磨损情况,验证了该模型与数值方法可以较好的模拟车轮磨损的演化过程;MELI 等^[10]开发了一套用于预测轮轨磨损预测的完整模型,该模型基于一个离散的过程,较好地描述了轮轨的磨损发展;李芾等^[11-12]利用统计学方法对机车车轮磨耗数据处理方法进行的研究并建立了轮缘镟修周期预测模型,通过对机车不同牵引工况下的车轮磨耗研究发现增大牵引力能够缩短时间但是会造成车轮更严重的磨损;RAMALHO^[13]基于 Archard 模型建立磨损方程,并考虑加权因子来估计蠕变比,接触压力和切向速

度对特定磨损率的影响,预测结果与实验结果的比较验证了其方法的可行性;温泽峰等^[14]对比分析了五种接触模型对车轮预测的影响,提出了分别采用赫兹理论和 FASTSIM 来求解车轮磨损仿真中的正常接触和切向接触问题;罗仁等^[15]建立了非线性多体车辆系统模型,通过考虑轮轨相互作用参数的随机匹配,从而实现对高速列车的车轮轮廓的磨损预测;文永蓬等^[16]基于某线路车轮的实际磨耗数据,对轮缘高度、轮缘厚度以及轮缘综合值三个参数进行阐述,并对车轮在热力耦合作用下不同磨耗深度的力学特性进行了建模和仿真^[17-18]。

车轮磨损模型一般可分为基于接触斑内能量耗散和滑动量两大类,近代数值磨损计算分析方法将各种理论与车轮磨耗模型相结合预测车轮磨耗情况,或配合如 SIMPACK、UM 多体动力学软件等进一步加强了车轮磨损的预测分析,并取得了丰硕的成果,但是求解过程的繁杂也为车轮磨损的研究带来了不便,为了避免繁杂计算求解过程,论文提出了用于模拟复杂系统时空演化过程的元胞自动机方法解决地铁车轮的磨损问题。

1.2 元胞自动机方法

元胞自动机作为一种可以模拟复杂系统演化过程的网格动力学模型而被广泛认知和应用^[19-22],目前在磨损方面也有涉及。黄晋阳等^[19]根据汽车摩擦材料形成摩擦层的过程建立了二维和三维元胞自动机模型,对磨屑的变化状态和材料的表面样貌进行了模拟;宫燃等^[20]利用移动元胞自动机方法构建了重型车辆传动系统的复合材料密封环的离散模型,选择两种不同的复合材料对摩擦副微观磨损过程的可视化进行了对比仿真;王安麟等^[21-22]针对汽车电子连接器在微动磨损下的失效过程,提出基于元胞自动机方法建立微动磨损下电传导失效的自组织模型,解析结果与试验结果高度相关。由此可以看出,元胞自动机是一种可以实现对磨损进行预测的研究方法,因此,区别于以往的城轨车辆车轮磨损预测模型,论文考虑利用元胞自动机方法对轮轨磨损进行仿真分析。

论文提出元胞自动机在地铁车轮磨损下的仿真思路,建立轮轨接触的元胞自动机模型;通过元胞间键与键的连接及断裂关系的描述,实现对车轮移动、受损、切削、脱落规则的设定,模拟车轮在钢轨上做蛇形运动及曲线运动时踏面及轮缘部分的磨耗产生,得出地铁车辆运行过程中轮缘高度、轮缘厚度、轮缘综合值及型面的变化情况,基于上海某轨道交通线路的测量数据进行对比分析,验证元胞自动机理论对地铁车轮磨耗预测的可行性。

2 轮轨接触的元胞自动机模型

2.1 基于自组织理论的轮轨模型建立

牵引力及摩擦的作用使车辆得以实现在钢轨上的运动。随着车轮与钢轨的接触次数增多及外界因素的影响, 不断累积的磨耗形成了轮轨的磨损。地铁车辆轮轨磨耗问题其影响因素很多且过于繁杂, 热效应、力作用等在车轮磨损过程中一直在起着不可忽视的作用。用元胞自动机方法对车轮磨耗问题进行建模分析, 将复杂的轮轨接触问题转化为自组织过程。自组织理论是以复杂自组织系统的形成与发展机制研究对象的系统理论^[22], 元胞自动机作为模拟复杂自组织模型的有效方法, 将从微观角度自下而上的描述车轮磨损演变过程, 这种方法的本质是元胞与元胞之间相互依靠进而相互作用, 通过对轮轨表面元胞进行演变规则的设定来实现元胞的破坏与断裂, 其中, 移动规则模拟车轮的运动过程, 受损规则表征了轮轨接触表面元胞的破坏情况, 受到破坏的元胞经过切削规则的断裂处理, 从而形成脱落元胞完成整套的车轮磨损过程, 该模型的演变过程可以看作是元胞属性的变化过程。

轮轨磨耗的元胞自动机模型建模仿真思路如图 1 所示。由图 1 可知, 轮轨磨耗的元胞自动机求解实际上是根据真实线路参数通过自组织模型的元胞属性改变进行模拟仿真的, 建立轮轨接触的元胞自动机模型, 考虑其关键的影响因素并总结归类, 从

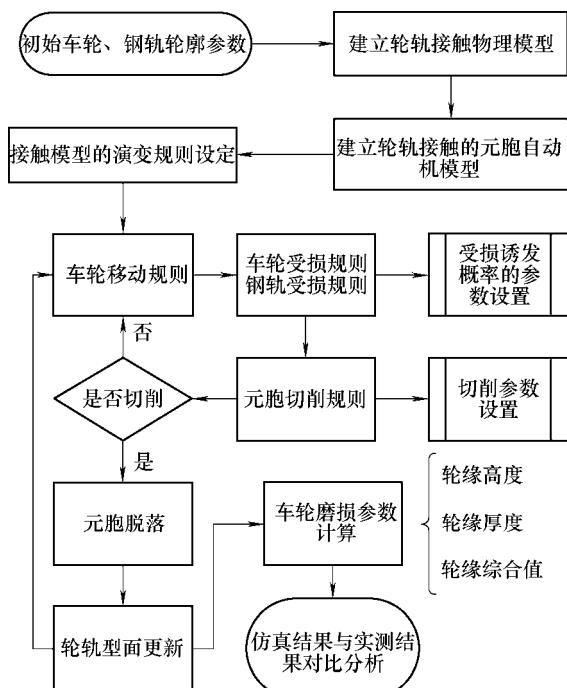


图1 轮轨磨损仿真设计思路

而建立一套完整的元胞自动机演变规则, 随着时间及运行里程的增加, 车轮表面元胞首先受到影响并且属性会发生变化, 轮轨表面的元胞由于互相之间的接触碾压从而使表层元胞受损, 受损的元胞附着于轮轨表面, 经过切削规则判断轮轨表层元胞的脱落情况, 未脱落的元胞依旧附着于轮轨表层等待下一次判断, 经过演变程序的判断, 切削掉的元胞会脱落从而形成新的车轮型面, 从而完成整个周期的迭代, 新的车轮型面经过计算之后会得到该运行里程下的车轮磨耗量及轮缘高度、轮缘厚度、轮缘综合值三个重要的轮轨参数, 将仿真结果与实际结果进行对比分析进而优化模型及演变规则。

元胞自动机法自组织模型的元胞演变规则设计思路如图 2 可以概括如下: 依据仿真线路的轮轨型号建立了轮轨接触的元胞自动机静态模型, 通过对车轮表面元胞进行演变规则的设定来实现元胞的破坏与断裂, 其中包括了移动规则模拟车轮的运动过程, 受损规则表征了轮轨接触表面元胞的破坏情况, 受到破坏的元胞经过切削规则的断裂处理, 从而元胞脱落完成整套的轮轨磨损过程, 该模型的演变过程可以看作是元胞属性的变化过程, 元胞类型可分为两类: 刚体(空气、地面)和弹性体(车轮), 其中, 论文对刚性钢轨与弹性钢轨对车轮的磨耗影响分别进行了仿真对比与分析。

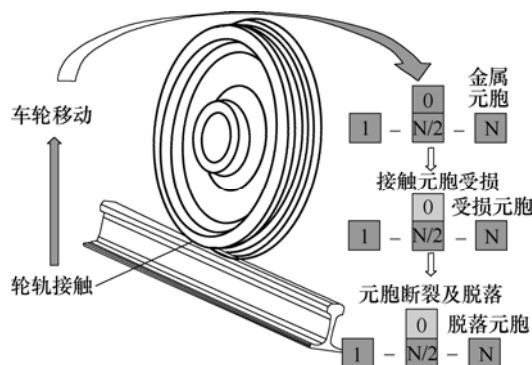


图2 轮轨磨损元胞演变过程

论文重点考虑车轮的磨耗问题, 钢轨型面的磨耗也会随着车轮的磨耗产生, 轮轨表面之间的接触元胞相互影响。由实际线路的车轮及钢轨型号建立 LM 磨耗型踏面车轮及 60 kg/m 的钢轨模型, 轮轨间的单点接触物理模型如图 3 所示。

依据图 3 所示的轮轨接触模型进行元胞自动机模型的建立, 元胞类型采用二维元胞自动机 Moore 型邻居^[22], 元胞周围除上下左右方向的四个元胞, 还包括了左上、左下、右上、右下方向的四个元胞。

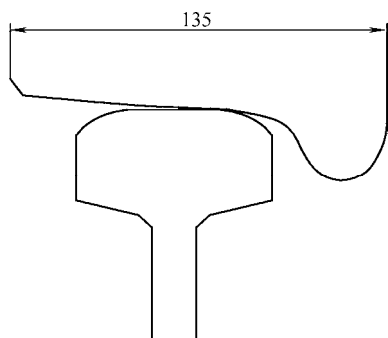


图3 轮轨接触物理模型(mm)

依据轮轨接触物理模型建立的轮轨接触元胞自动机模型如图4所示,其中包括了车轮、钢轨、地面等,依据此模型进行元胞演变规则的设置,从而实现车轮磨耗的仿真预测。

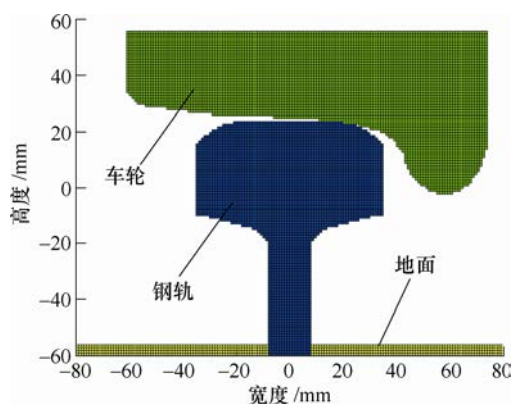


图4 轮轨接触的元胞自动机模型

2.2 轮轨接触模型的演变规则

根据元胞自动机对车轮磨耗的总体思路,可将轮轨接触模型演变规则分解为移动规则、受损规则、切削规则、脱落规则四个规则,通过元胞之间键与键的结合、破坏、脱落等一系列的演变过程从而实现城轨车辆车轮磨耗的动态建模与仿真,车轮在钢轨表面发生位移,车轮与钢轨的接触越频繁,接触应力越大,车轮表面元胞受损的几率也就越大,受损元胞满足切削条件后会被切削掉并且形成脱落元胞,元胞属性的改变是决定该模型演变规则的关键所在,元胞间的连接方式如图5所示。



图5 元胞之间的连接

图5所示为元胞之间的连接。如图5所示,元胞之间采取键与键的连接方式,0元胞与周围元胞之间存在着相互影响的关系,其中,1、3、5、7与0元胞直接相邻,2、4、6、8与0元胞间接

相邻,相邻越近的元胞,互相之间的作用关系越明显

$$C_{t+1}^i = (C_{t+1}^{i-r}, \dots, C_t^i, \dots, C_t^{i+r}) \quad (1)$$

式中, C_{t+1}^i 为 $t+1$ 时刻 i 元胞的状态,此刻的元胞状态取决于前一刻其周围的元胞状态,也就是所谓的键与键之间的相互联系、相互作用、相互影响,同时也是元胞自动机自组织模型的关键所在,具体规则设定如下。

(1) 移动规则: 地铁车辆在牵引力的作用下沿轨道线路方向发生位移,车轮在纵向和横向位移的过程中同时存在着滚动和滑动的情况。其中,车辆在发生滑动与滚动的情况下其磨耗量是不一致的,分开讨论两者的磨耗量相对来说比较繁杂。因此,轮轨接触模型的动态模拟过程中,车轮在钢轨表面来回移动,主要模拟的是直线段的蛇形运动及曲线段的过弯运动,车辆蛇行运动的过程中轮轨间一般为一点接触,也就是踏面与钢轨表面相接触,但是在过弯运动的时候,由于惯性力的作用轮缘部分会与钢轨紧贴,从而形成两点接触。

(2) 受损规则: 将受损规则作为轮轨表面元胞受到磨损脱落的先行条件,地铁车辆车轮在运动过程中受力复杂且磨耗的影响繁多,磨粒磨损在轮轨之间的磨损占据了主导地位,此外还有粘着磨损、疲劳磨损等也具有一定的影响,这些影响对车轮造成的损伤统称为受损。受损规则可以总结为以下几点。

1) 车轮表面元胞与钢轨表面元胞接触的过程采用二项分布函数计算其受损的诱发概率

$$P = 1 - \prod_{i=1}^5 (1 - P_i) \quad (2)$$

式中, P_i 表示 i 元胞对于 0 元胞受损的诱发概率。

参照图5元胞之间的连接情况,公式表示接受受损判断的0元胞其受损概率 P 由轮轨相互接触的元胞属性来决定的。

表1 车轮元胞的受损诱发概率设置

元胞属性	直接相邻	间接相邻
钢轨金属元胞	0.3	0.06
钢轨受损元胞	0.1	0.02
空气元胞	0	0

表1为钢轨元胞与空气元胞对车轮元胞的受损诱发概率设置,表2为车轮元胞与空气元胞对钢轨元胞的受损诱发概率,考虑到轮轨硬度比的关系,同等条件下钢轨的磨耗程度相较于车轮的磨耗程度偏低,具体参数设置如表中所示。

表 2 钢轨元胞的受损诱发概率设置

元胞属性	直接相邻	间接相邻
车轮金属元胞	0.28	0.05
车轮受损元胞	0.1	0.01
空气元胞	0	0

2) 车轮移动过程中,存在着蛇行运动和过弯运动等,蛇形运动主要对踏面部分造成磨损,过弯运动使踏面和轮缘部分同时产生磨损,为保证踏面和轮缘有一个好的过渡,受损判断采用相同的诱发概率,概率越大元胞受损几率越高,论文分开讨论踏面和轮缘与钢轨的接触频次

$$\bar{v} \propto f_i \quad (3)$$

$$\bar{v} \propto f_i \quad (4)$$

式中, \bar{v} 为城轨车辆运行的平均速度, f_i 为踏面与钢轨表面元胞的接触频次, f_i 为轮缘部分与钢轨表面元胞的接触频次。

3) 金属元胞判定受损之后,元胞属性发生改变,元胞受到破坏但未断裂,因此,此时的元胞不会脱落,论文采用切削规则对破坏元胞进行断裂处理。

(3) 切削规则:依据图 1 的演变过程来看,元胞首先需要经历移动规则、受损规则的破坏之后,从而形成受损元胞,受损的元胞依然附着于轮轨表面,为此,轮轨表面的金属元胞受到破坏后形成的受损元胞,需要对其进行切削判断,判断依据采用切削力和结合力之间的大小关系进行分析,若是达到判定条件,则元胞将会被切削掉,若是不满足切削条件,则对其进行保留,等待下一次判断。

图 6 为元胞自动机的切削规则示意图。从图 6 可以看出,0 为判断元胞,用以判断此元胞是否符合切削条件,若达到切削条件则进行切削,0、1、5 代表轮轨的表面元胞。判断元胞与周围元胞的连接关系是该元胞是否切削的关键所在。

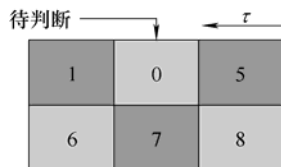


图 6 切削规则图示

基于元胞自动机理论设定元胞的切削规则,对元胞的局部演化规则的思路建立如下。

1) 列车运行的过程中必然产生摩擦,包括了滚动摩擦、滑动摩擦、滚压摩擦、转动摩擦等,轮轨相对静止的时候又会产生静摩擦,摩擦力是在微观层面上针对中心元胞与周围元胞之间的结合进行判

断,切削力 τ 是在宏观层面上所有摩擦力的合力,论文采用摩擦力计算公式判断切削力与结合力之间的大小关系,从而作为元胞断裂的判断依据

$$\tau_i = \pm \mu_i N_i \quad (5)$$

式中, \pm 指切削方向, μ 为磨损系数, N 为轮轨接触力。车轮不同位置的磨损系数不一样,受到的正压力也是不一样的,因此切削力是一个不断变化的过程,既不方便计算,而且计算过程比较繁琐,为此,规定摩擦因数 μ 为 0.3,轮轨接触力则根据实际模拟的车辆数据进行计算。

2) 元胞在断裂之前,元胞之间的受力变形是弹性变形,且元胞之间的连接方式为键与键连接,当元胞属性发生变化,会影响其周围元胞的属性变化,也就是元胞之间相互影响,故元胞之间的属性不同,其结合强度也会不同,元胞之间的结合强度

$$\sigma_{\text{总}} = \sum \alpha_{oi} \sigma_{oi} \quad (6)$$

式中, α 为影响系数, σ 为 0 元胞与周围元胞的结合强度。

根据图 6 切削规则图示可以看出,0 元胞与 1、2、3、4、5 元胞之间存在着相互作用的关系,也就是说 0 元胞是否被切削受到周围元胞的影响,0 元胞与周围元胞的结合强度关系可表示为

$$\sigma_{\text{总}} = \alpha_{01} \sigma_{01} + \alpha_{02} \sigma_{02} + \alpha_{03} \sigma_{03} + \alpha_{04} \sigma_{04} + \alpha_{05} \sigma_{05} \quad (7)$$

由于 1、3、5 元胞与 0 元胞直接相邻,故设 α_{01} 、 α_{03} 、 α_{05} 为 1; 2、4 元胞与 0 元胞间接相连,影响因素并不是很大,故设 α_{02} 、 α_{04} 为 0.5。

3) 由于元胞自动机键与键之间连接的结合强度未知,为能够计算元胞之间的结合力,设定元胞之间的结合力与结合强度的关系如式(8)所示

$$F_{oi} = k \sigma_{oi} \quad (8)$$

式中, k 为比例系数,且 $\tau_i \approx F_{oi}$ 。

4) 刚性钢轨由于不发生改变,切削规则只考虑车轮不同属性元胞之间的结合强度,表 3 是对车轮不同属性元胞间的结合强度的设置。

表 3 车轮元胞间的结合强度设置

结合强度 σ	车轮金属元胞	车轮受损元胞
车轮金属元胞	τ / k	$0.7 \tau / k$
车轮受损元胞	$0.7 \tau / k$	$0.3 \tau / k$

表 4 轮轨元胞间的结合强度设置

结合强度 σ	车轮金属元胞	车轮受损元胞
钢轨金属元胞	$0.48 \tau / k$	0
钢轨受损元胞	$0.9 \tau / k$	$0.24 \tau / k$

弹性钢轨表面元胞属性发生改变, 切削规则又加入了钢轨元胞对车轮元胞的破坏程度, 为方便计算, 将破坏程度换算成元胞间的结合强度进行分析, 表4是对轮轨间不同属性元胞间结合强度的设置。

5) 当元胞达到切削判定的基本条件之后, 开始进行切削判断, 车轮经过钢轨的碾压之后, 车轮表面与钢轨接触的地方经过受损规则的判断可能会形成受损元胞, 受到破坏的元胞只是与金属元胞的结合力下降而已, 切削规则对车轮表面所有的元胞进行判断, 切削概率表现为元胞断裂中的随机性, 为元胞的留存提供了可能, 概率公式如式(9)所示

$$\eta = 1 - \sigma_{\text{总}} / \sigma_{\text{max}} \quad (9)$$

式中, σ_{max} 为0元胞与其他元胞之间总的最大结合力。

6) 结合上述分析, 每个元胞都有三种不同的形态, 其中空气元胞不作为判断元胞进行切削判断, 因此, 0元胞有金属和受损两种情况, 1、2、3、4、5则有金属、受损和空气三种情况。

(4) 脱落规则: 经过上述三个规则的演变之后, 车轮元胞的状态发生了以下几种属性的转变, 车轮表面元胞与钢轨元胞之间的相互作用致使元胞受到破坏, 破坏后的元胞称为受损元胞, 受损元胞依然附着于车轮表面, 此时车轮表面有金属元胞和受损元胞两种, 切削规则对车轮表面元胞进行切削判断, 切削掉元胞会从车轮表面断裂, 并从车轮脱离随机掉落在钢轨或者地面上形成脱落元胞。元胞脱落实际上就是元胞间键与键的连接受到破坏后的断裂现象, 元胞脱落后会形成新的车轮型面, 磨损后的车轮会下移, 直至与钢轨接触形成新的接触。

元胞具体划分如图7所示, 图7中元胞包括车轮元胞、钢轨元胞、受损元胞、空气元胞、脱落元胞、地面元胞。

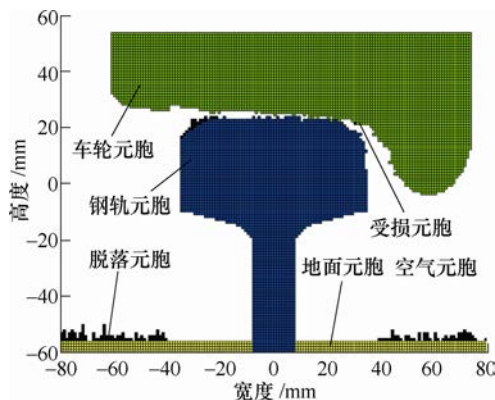


图7 元胞划分

(5) 计算方法: 车轮以每0.1 mm的磨损深度为基准, 对车轮型面进行更新, 预测运行里程为每万

公里下的车轮磨损量及型面变化, 主要计算参数为轮缘高度、轮缘厚度、轮缘综合值, 具体计算方法如图8所示。图8为研究车轮磨损的几何参数的尺寸定义, 从图8可以看出, LM 磨耗型踏面车轮的直径是840 mm, 直径点的判断位置距轮缘外侧70 mm, 直径基准点 P_0 与轮缘底端的垂直距离为轮缘高度(用 S_h 表示), 初始轮缘高度为27 mm; 基准点 P_0 往上12 mm的距离与轮缘内侧有一交点 P_3 , P_3 点距轮缘外侧的距离为轮缘厚度(用 S_d 表示), 初始轮缘厚度为32 mm; 基准点 P_0 往上10 mm的距离与轮缘内侧有一交点 P_1 , 轮缘底端往上2 mm的距离与轮缘内侧交于点 P_2 , P_1 与 P_2 点的水平距离为轮缘综合值(用 Q_r 表示), 初始轮缘综合值为10.7 mm, 对于三个值的判断标准需要依据仿真线路的具体情况进行分析。

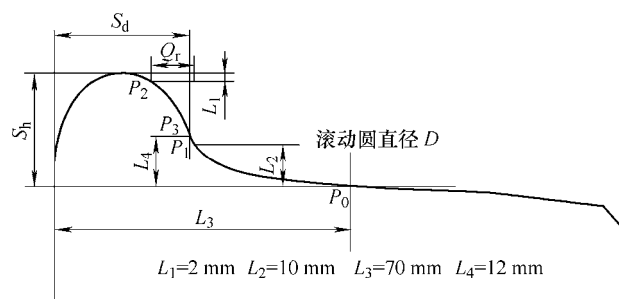


图8 车轮几何参数定义

3 仿真结果与实测对比

3.1 轮轨磨损过程的动态仿真

根据对上海某地铁线路的跟踪测量, 车轮采用LM 磨耗型踏面车轮, 初始直径840 mm, 钢轨采用60 kg/m 的规格。

依据上述演变规则对整个车轮磨损过程进行仿真, 为直观地显示车轮磨损后元胞的演变状态, 论文采用稀疏网格边长为1 mm的轮轨接触模型进行分析, 如图9所示, 显示了5、10、15和20万公里的磨损状态, 从图9中可以看出经过移动、受损、切削、脱落规则的模拟之后, 随着运行里程的不断增加, 车轮的磨损情况不断加剧, 当车轮踏面及轮缘部分受到磨损, 磨损掉的受损元胞脱落分布在钢轨表面及地面, 脱落元胞在横截面有一个积聚, 真实情况是不会出现的, 主要是为了给人以感性的认识。元胞脱落之后, 车轮会下移与钢轨形成新的接触, 从而进行进一步的磨损仿真。车轮磨损预测的范围一般根据实际磨损范围来定, 仿真过程基本实现了对地铁车辆车轮磨损过程的动态模拟, 仿真结果与基本情况相符, 然而该模型的预测准确

性却不够, 磨损表面过渡不够圆滑, 计算磨耗量时的误差比较大, 稀疏网格下的车轮模型经过磨损后车轮表面的变化更加明显, 网格加密只是对

仿真过程进一步更加准确地计算, 演变规则没有改变, 为此论文先采用稀疏网格讲解, 后优化模型进行准确计算。

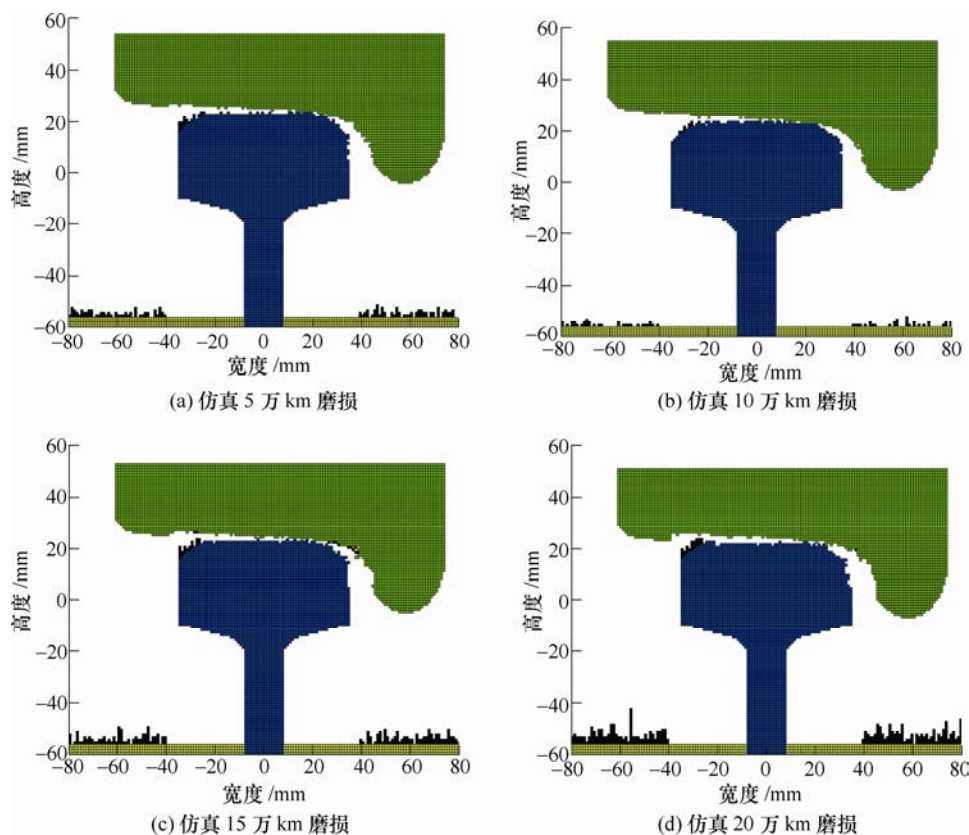


图 9 车轮磨损过程的动态模拟

图 10 为稀疏网格下磨损前后轮轨间元胞静态接触的对比, 稀疏网格下的轮轨表面并不平滑, 从图 10a 中可以看出, 虽然严格按照标准尺寸进行元胞轮廓的建模, 但是由于网格稀疏的缘故导致轮轨型面相较于物理模型较差, 尤其是曲线部分呈现出明显的层次感, 1 mm 单元格下的轮轨接触模型可以作为仿真模型, 但是考虑到实际测量结果均以

0.1 mm 作为评判标准, 论文后期对模型进行了优化, 图 10a 的轮轨接触基本属于区域接触, 当轮轨经过演变规则的仿真之后形成的轮轨接触如图 10b 所示, 从图 10b 可以看出轮轨间的接触既有多元胞接触也有单元胞接触, 较图 10a 有较大的区别, 形象的展示了轮轨经过演变规则之后的磨损及接触情况。

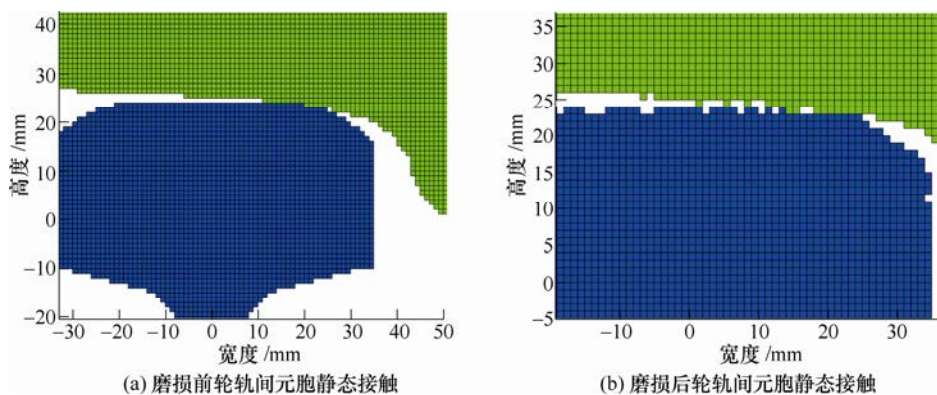


图 10 磨损前后轮轨元胞静态接触

3.2 考虑计算精度的轮轨模型优化

经过元胞演变规则的设定及仿真之后, 采用稀疏网格模拟出了轮轨的磨损过程, 稀疏网格下的单

位元胞边长为 1 mm, 但是实际测量轮缘高度、轮缘厚度及轮缘综合值的过程中精度都达到了 0.1 mm 级, 为了提高模型预测的准确性, 论文对模型进行

了优化,优化的方法是将轮轨的元胞自动机模型增加了10倍密度,也就是元胞长度由1 mm变为0.1 mm,密度增加之后的轮轨接触模型型面会显得非常光滑,这样更加接近真实的轮轨接触物理模型,为保证仿真模型的有效性及准确性,上述的元胞演变规则保持不变,优化模型如图11所示。

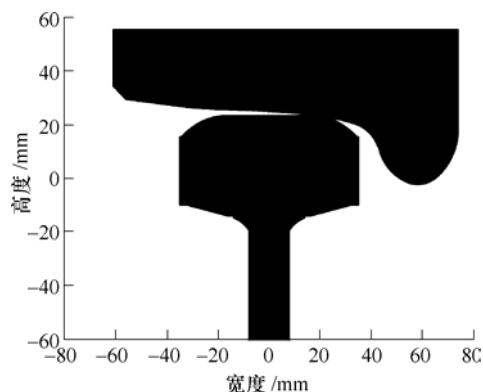
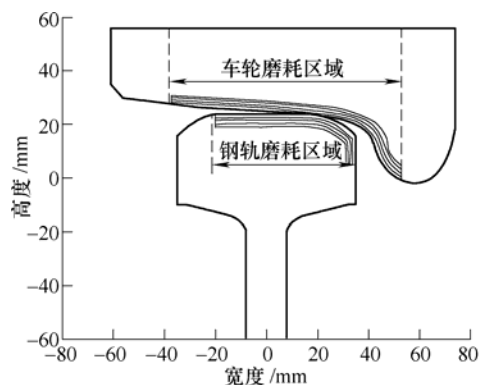


图11 密度增加的轮轨接触模型

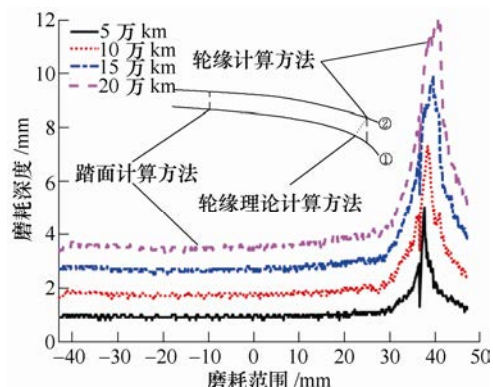
图11为密度增加十倍后的优化轮轨接触模型,网格过密导致网格线的颜色覆盖了元胞本身的颜色,网格变密只是为了增加仿真结果的精确性,并不会对算法规则造成影响。从图11可以看出,模型优化过后的车轮及钢轨型面相对于图4来说显得更加光滑平整。

优化车轮模型是为了提高元胞自动机模型的仿真预测的准确性,以求精确的预测表面磨耗量,使仿真预测量更加符合实际测量结果,具体的仿真预测结果如图12所示。

图12为车轮运行发生在 $[-43, 47]$ 区间范围内的磨耗仿真情况,磨耗范围可根据实际车轮的磨损情况设置。如图12a所示,提取轮轨元胞自动机模型的外围元胞,图中分别为初始型面以及轮轨经过5、10、15、20万km磨耗后的型面变化情况,从图中可以看出,该模型可以实现对车辆运行一段时间后轮轨型面变化的仿真预测,由踏面到轮缘部分过渡的平整性增加了模型预测的可靠性,图12b为在此区间范围内表面磨耗深度的变化情况,为了能够看出车辆运行后的磨耗情况,磨耗深度采用垂直磨耗深度计算方法,将初始车轮型面(①线表示)与运行5、10、15、20万km后的车轮表面元胞分布(②线表示)进行差值计算,从而得出了不同运行里程下的踏面及轮缘磨耗深度,这种计算方法比轮缘理论计算方法算的值偏大,造成轮缘附近处的磨耗深度比踏面处磨耗有一定的渐突。综合图12a、12b,可以直观地看出车轮的型面变化及磨耗深度的变化情况,虽然磨耗深度的变化存在着一定的波动,但是



(a) 磨耗前后的车轮型面



(b) 车轮磨耗深度

图12 踏面及轮缘部分仿真

波动幅度并不是很大,没有出现异常磨耗情况,说明该模型对于车轮型面及磨耗深度的仿真预测是可行的。

3.3 验证

通过对上海某轨道交通线路的长时间跟踪测量,并对相关数据进行分析从而得出了该线路的大致磨耗情况。图13为针对上海某轨道交通线路的数据采集及分析,数据分析选用轮缘综合值作为分析指标,从轮缘综合值与标准值的对比可以直观了解该线路所属的磨耗类型。

图13a为采用轮缘尺量取车轮的轮缘高度、轮缘厚度、轮缘综合值的测量图,图13b和13c采集数据之后的 Q_r 分析图,图13b为线路开通早期某列车的运行情况,从图中可以看出,在试运营调试期间, Q_r 值持续下降,可见在此期间该线路主要以轮缘磨耗为主,该现象主要是处在磨合期的车轮与钢轨接触过程中,轮缘部分表现的相对脆弱,造成磨损偏重,试运营到正式运营阶段因轮缘厚度偏低而进行了一次镟轮并进行了一些调整,在镟轮之后的运营阶段, Q_r 值虽然有波动,但是都在标准值之上,表现为踏面磨耗。

图13c为该线路后期投入运营的某列车 Q_r 变化情况,轮轨匹配程度相对于早期有了明显的改善,从图中可以看出,该线路的磨耗类型主要表现为踏

面磨耗, 相对于图 13b 来说, Q_r 的走势相对平稳, 以轮缘综合值作为评判该线路的磨耗类型指标, 选取多辆列车进行分析, 得出了该线路主要以踏面磨耗为主。为此, 根据上海轨道交通实际运行线路的某列车, 针对前 20 万 km 运行里程的轮缘高度、轮缘厚度以及轮缘综合值进行仿真, 并与实测结果进行对比分析。



(a) 轮缘尺测量图

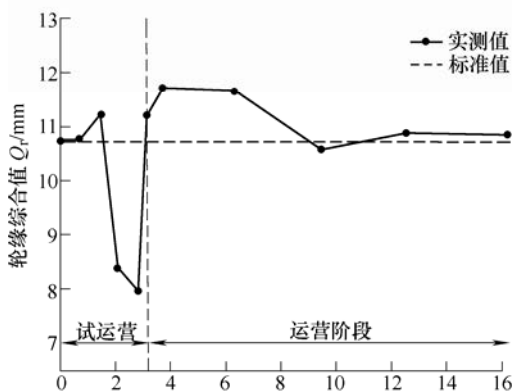
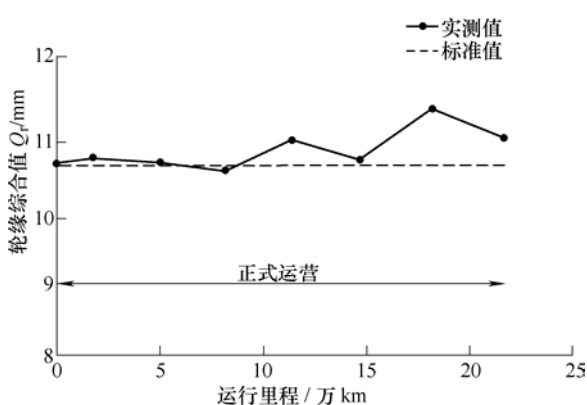
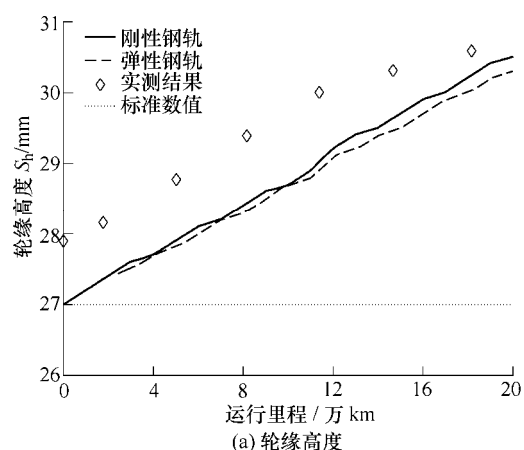
(b) 线路开通早期列车车轮的 Q_r 变化(c) 后期新加入车辆车轮的 Q_r 变化

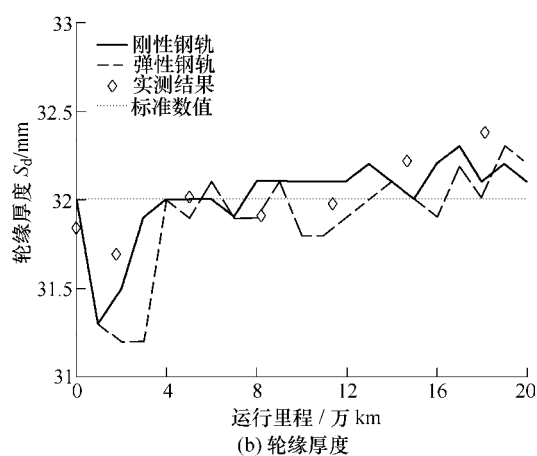
图 13 数据采集与分析

图 14 为依据上海某轨道交通的实测结果与仿真结果的对比分析。论文选取前 20 万 km 的数据, 根据图 8 的计算方法, 对轮缘高度(S_h)、轮缘厚度(S_d)、轮缘综合值(Q_r)三者进行仿真对比, 轮缘高度的实际线路的初始值与标准值存在约 1 mm 的偏差,

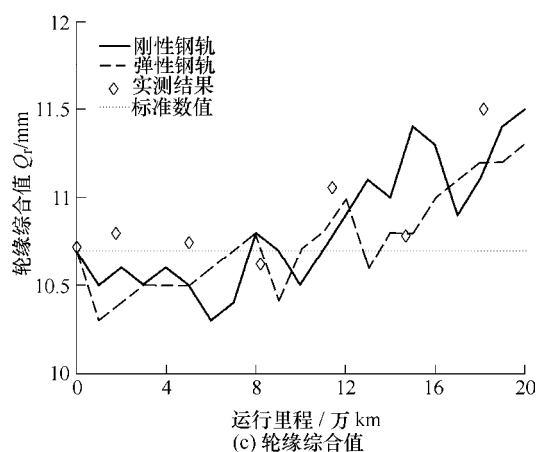
这是由于加工制造带来的, 但是都在许可范围内, 并无异常数据。



(a) 轮缘高度



(b) 轮缘厚度



(c) 轮缘综合值

图 14 仿真结果与实测结果对比

图 14a 为轮缘高度的对比分析, 从图中可以看出, 仿真结果与实测结果都呈现出线性上升的趋势, 但是仿真结果的上升速度明显大于实测结果, 也就是说仿真车轮的磨耗速率相对于实测结果来说较快, 并且踏面部分刚性钢轨对于车轮的磨损速度相较于弹性钢轨较快, 图 14b 为轮缘厚度的对比分析, 从图中可以看出, 相对于标准值来说, 仿真结果波动情况比较厉害, 但是总体呈现出上升的趋势, 而实测结果也是在波动中呈现出上行的趋势, 也就是

轮缘厚度偏高的情况, 刚性钢轨的波动幅度比实测结果略大, 而弹性钢轨则相对较小, 轮缘部分刚性钢轨的磨耗速度快于弹性钢轨, 图 14c 为轮缘综合值的对比分析, Q_t 的波动情况代表了车轮的磨耗类型, 呈现踏面磨耗的趋势, 同时仿真结果在前期出现了少许轮缘磨耗的情况, 从仿真结果与实测结果的对比分析来看, 轮轨接触的元胞自动机模型基本实现了对车轮磨耗过程的模拟, 仿真情况与真实情况也基本相近。

模拟车轮的轮缘高度、轮缘厚度、轮缘综合值随着运行里程的变化情况, 与实测结果在总的变化趋势上是一致的, 轮缘高度呈现出线性上升的趋势, 由于加工制造的缘故初始值出现偏差, 但是通过对仿真与实测结果的对比来看, 两者呈现出近似的线性变化趋势, 对于轮缘厚度和轮缘综合值来说, 呈现出非线性的变化趋势, 为准确描述仿真结果与实测结果的对比情况, 论文对三者进行了相关性的准确分析。皮尔逊相关系数是最常用的相关系数, 主要研究变量之间的线性相关程度, 以符号 r 表示。其计算公式为

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (10)$$

式中, X , Y 表示仿真结果与实测结果的变量值; \bar{X} , \bar{Y} 分别表示 X , Y 的均值; i 表示选取数据点的个数; r 表示相关程度, $r > 0$ 为正相关, $r < 0$ 为负相关, $r = 0$ 则不相关; r 范围在 $[-1, 1]$ 之间, $|r|$ 越接近 1, 则说明相关程度越高。

表 5 为刚性钢轨和弹性钢轨对车轮磨损参数相关系数的对比, 由于仿真结果数据多于实测结果, 论文通过 7 组数据点分析了两组曲线的相关性。

表 5 车轮磨损参数相关系数的对比

	轮缘高度	轮缘厚度	轮缘综合值
刚性钢轨	0.982 2	0.612 4	0.315 2
弹性钢轨	0.982 1	0.661 1	0.733 8

其中, 分析了轮缘高度的相关性得出其相关系数, 在 $[0.8, 1]$ 之间属于极强相关, 相关程度非常好, 在踏面部分刚性钢轨和弹性钢轨呈现出了较好的磨损状态, 对轮缘厚度的相关性分析得出相关系数, 刚性钢轨和弹性钢轨在 $[0.6, 0.8]$ 之间属于强相关范畴, 从数据上看弹性钢轨的仿真程度优于刚性钢轨, 但是相对于踏面部分来说, 轮缘部分的磨耗仿真需要进一步加强, 同样对轮缘综合值的相关性分析得到相关系数, 刚性钢轨在 $[0.2, 0.4]$ 之间属于弱相关

范畴, 而弹性钢轨在 $[0.6, 0.8]$ 之间属于强相关范畴, 从相关系数层面看, 弹性钢轨的仿真结果优于刚性钢轨, 具有极强相关和强相关性, 定量的说明了元胞自动机实现了对车轮磨损的仿真模拟, 虽然实测数据偏少, 增加数据会使得相关系数下降, 但是仍会保持较高的水平, 仿真结果可以做到预测车轮磨损的型面变化, 通过车轮轮缘高度、轮缘厚度、轮缘综合值的数值计算验证了该模型的可行性和有效性, 虽然仿真精度有待进一步提升, 但是对规则的更加合理化以及参数的修正为车轮磨损预测的高相关性提供了可能。

4 结 论

(1) 通过元胞自动机在磨损领域上的应用, 提出了元胞自动机在轮轨磨损仿真预测上的应用方法, 建立了轮轨接触的元胞自动机模型, 并发展了包括车轮移动规则、轮轨受损规则、元胞切削规则以及元胞脱落规则在内的一套完整的演变规则。

(2) 同时讨论了刚性钢轨和弹性钢轨对车轮磨损的影响情况, 以轮缘高度、轮缘厚度及轮缘综合值为研究对象, 对前 20 万公里的仿真结果与实测结果进行了对比分析, 将皮尔逊相关系数作为评价指标, 其中弹性钢轨对车轮磨损的仿真结果优于刚性钢轨。

(3) 利用该模型通过对自组织模型规则的改变可以实现对不同车轮磨损情况的仿真, 具有一定的广泛性及实用性, 仿真结果与实际结果的对比证明了该模型的可行性, 局部演化规则的可调整性对不同线路车轮磨损的研究具有重要的意义, 该模型对车轮磨损的研究过程具有一定的参考价值, 同时也为轮轨磨损的预测提供了一种新的思路。

参 考 文 献

- [1] 金学松, 梁树林, 陶功权, 等. 高速铁路轮轨磨损特征、机理、影响和对策——车轮踏面横向磨耗[J]. 机械工程学报, 2018, 54(4): 3-13.
JIN Xuesong, LIANG Shulin, TAO Gongquan, et al. Characteristics, mechanisms, influences and counter measures of high speed wheel/rail wear: transverse wear of wheel tread[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(4): 3-13.
- [2] 李霞, 温泽峰, 金学松. 地铁车轮踏面异常磨耗原因分析[J]. 机械工程学报, 2010, 46(16): 60-66.
LI Xia, WEN Zefeng, JIN Xuesong. Analysis of abnormal

- wear on metro wheel tread [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(16): 60-66.
- [3] JENDEL T. Prediction of wheel profile wear—comparisons with field measurements[J]. Wear, 2002, 253(1): 89-99.
- [4] BRAGHIN F, BRUNI S, RESTA F. Wear of railway wheel profiles: a comparison between experimental results and a mathematical Model[J]. Vehicle System Dynamics, 2003, 37(sup1): 478-489.
- [5] BRAGHIN F, LEWIS R, DWYER-JOYCE R S, et al. A mathematical model to predict railway wheel profile evolution due to wear[J]. Wear, 2006, 261(11): 1253-1264.
- [6] ENBLOM R, BERG M. Simulation of railway wheel profile development due to wear—influence of disc braking and contact environment[J]. Wear, 2005, 258(7): 1055-1063.
- [7] ENBLOM R, BERG M. Impact of non-elliptic contact modelling in wheel wear simulation[J]. Wear, 2008, 265(9): 1532-1541.
- [8] 李霞, 金学松, 胡东. 车轮磨损计算模型及其数值方法[J]. 机械工程学报, 2009, 45(9): 193-200.
- LI Xia, JIN Xuesong, HU Dong. Theoretical model and numerical method of wheel profile wear[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(9): 193-200.
- [9] LI X, JIN X, WEN Z, et al. A new integrated model to predict wheel profile evolution due to wear[J]. Wear, 2011, 271(1): 227-237.
- [10] IGNESTI M, MALVEZZI M, MARINI L, et al. Development of a wear model for the prediction of wheel and rail profile evolution in railway systems[J]. Wear, 2012, s 284-285(1): 1-17.
- [11] TAOVANCHIEN, 李芾, 戚壮, 等. 机车车轮磨损统计数据处理方法与镟修周期预测模型[J]. 铁道学报, 2015(12): 14-19.
- TAOVANCHIEN, LI Fu, QI Zhuang, et al. Processing method of locomotive wheel wear statistical data and prediction model of turning period[J]. Journal of the China Railway Society, Railway Engineering, 2015(12): 14-19.
- [12] 杨阳, 丁军君, 李芾, 等. 机车牵引工况下车轮磨损研究[J]. 交通运输工程学报, 2017, 17(5): 81-89.
- YANG Yang, DING Junjun, LI Fu. Research on wheel wear under locomotive traction condition[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2017, 17(5): 81-89.
- [13] RAMALHO A. Wear modelling in rail-wheel contact[J]. Wear, 2015, s 330-331: 524-532.
- [14] TAO G, WEN Z, ZHAO X, et al. Effects of wheel-rail contact modelling on wheel wear simulation[J]. Wear, 2016, 366-367: 146-156.
- [15] LUO R, SHI H, TENG W, et al. Prediction of wheel profile wear and vehicle dynamics evolution considering stochastic parameters for high-Speed train[J]. Wear, 2017.
- [16] 文永蓬, 尚慧琳, 董其炜, 等. 城市轨道交通车辆车轮轮缘磨损分析[J]. 科技导报, 2013, 31(26): 40-43.
- WEN Yongpeng, SHANG Huilin, DONG Qiwei, et al. Wear of Wheel Flange of Urban Rail Vehicle[J]. Science & Technology Review, 2013, 31(26): 40-43.
- [17] 文永蓬, 徐小峻, 尚慧琳, 等. 考虑热力耦合的轨道车辆车轮建模与仿真[J]. 交通运输工程学报, 2016, 16(5): 30-41.
- WEN Yongpeng, XU Xiaojun, SHANG Huilin, et al. Modeling and simulation of railway vehicle Wheel considering thermo-mechanical coupling[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2016, 16(5): 30-41.
- [18] 文永蓬, 郑晓明, 尚慧琳, 等. 考虑不同辐板的轨道车轮热力耦合特性研究[J]. 机械强度, 2018, 40(1): 165-170.
- WEN Yongpeng, ZHENG Xiaoming, SHANG Huilin, et al. Study on the thermal-mechanical coupling for different plate urban railway vehicle wheels[J]. Journal of Mechanical Strength, 2018, 40(1): 165-170.
- [19] 徐野, 吕亚非, 黄晋阳. 摩擦层形成的元胞自动机模拟[J]. 北京化工大学学报, 2010, 37(6): 136-140.
- XU Ye, LU Yafei, HUANG Jinyang. Simulation of friction layer formation by the cellular automata mode[J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology, 2010, 37(6): 136-140.
- [20] 宫燃, 张鹤, 徐宜, 等. 基于元胞自动机法的复合材料密封环微观磨损状态模拟[J]. 汽车工程, 2016, 38(5): 626-631.
- GONG Ran, ZHANG He, XU Yi, et al. A simulation on the microscopic wear state of composite sealing ring based on cellular automata method[J]. Automotive Engineering, 2016, 38(5): 626-631.
- [21] 王安麟, 傅英超, 刘瑜华, 等. 基于田口方法的电子连接器微颤磨损自组织模型的优化[J]. 机械工程学报, 2010, 46(21): 118-123.
- WANG Anlin, FU Yingchao, LIU Yuhua, et al. Optimization of self-organization model of electronic

connector under fretting wear based on taguchi method[J].

Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(21):

118-123.

- [22] 王安麟. 复杂系统的分析与建模[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2004.

WANG Anlin. Complex system analysis and modeling[M].

Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press, 2004.

作者简介: 文永蓬(通信作者), 男, 1979 年出生, 博士, 副教授, 硕士研究生导师。主要研究方向为城市轨道交通车辆振动与控制、城市轨道交通车辆轮轨磨损。

E-mail: yp_wen@163.com

尹波润, 男, 1993 年出生, 硕士研究生。主要研究方向为城市轨道交通车辆轮轨磨损。

尚慧琳, 女, 1983 年出生, 博士, 教授, 硕士研究生导师。主要研究方向为非线性动力学。