

移动闭塞条件下线路弯道对列车 交通流影响的研究*

陈永[†] 王小明 党建武 胡晓辉

(兰州交通大学电子与信息工程学院, 兰州 730070)

(2013年9月3日收到; 2013年12月17日收到修改稿)

在NaSch模型的基础上, 针对铁路线路特点提出了一种用于模拟铁路线路弯道的多列车追踪运行的元胞自动机模型. 应用该模型, 进行了计算机数值模拟, 研究了具有不同弯道半径、不同外轨超高和不同弯道长度的线路弯道对铁路交通流的影响. 模拟结果表明: 建立的模型能够准确的反映出特殊线路交通流情况, 线路弯道对列车的行车安全有较大的影响, 同时再现了时走时停的交通波现象, 根据仿真结果得出了随着弯道半径的增大, 列车的晚点时间逐渐减少, 合理选择弯道半径、外轨超高值和弯道长度, 可以显著提高线路的通行能力, 减低轮轨磨耗, 保证列车的安全、舒适运行. 所得结果对铁路线路选线设计和运营管理有一定的指导意义.

关键词: 交通流, 元胞自动机, 弯道, 列车

PACS: 05.40.-a, 05.60.-k, 89.40.Bb

DOI: 10.7498/aps.63.030503

1 引言

铁路作为国民经济大动脉、国家重要基础设施和大众交通工具, 在我国经济社会发展中的地位和作用至关重要. 发展高速铁路, 建成快速铁路网, 满足大流量、高密度、快速便捷的客运需求, 是我国铁路建设的基本任务. 随着高可信无线通信技术的发展, 在移动闭塞系统中, 列车行驶速度和行车密度得到进一步提高. 元胞自动机 (cellular automaton, CA) 模型是模拟非线性复杂系统的一种有效工具, CA模型在时间、空间、状态上均离散, 规则简单, 非常适合计算机模拟^[1,2]. CA模型能有效模拟交通流中的车辆微观运动, 成为近年来交通流研究中的热点, 公路交通流NaSch模型可以重现道路交通流基本特征, 如果要仿真更为复杂的交通现象, 通过修改演化规则, 众多学者提出了考虑各种交通现象的CA交通流模型^[3-9]. NaSch模型在公路交通中的

研究较多, 使用了简单的规则, 通过前后车安全距离控制及随机慢化来模拟单车道公路上车辆的行驶行为. 与公路交通流相比较, NaSch模型同样适用于铁路交通流模拟研究, 主要原因有: 1) 元胞空间线路构成类似. 公路NaSch交通模型是一个一维的元胞自动机模型, 适用于单车道单向公路模型仿真, 时间、空间都被离散化, 道路被划分为离散的格子 (元胞), 道路每个元胞状态有限, 每个元胞或者为空或者被一辆车占据, 同样单车道单向铁路线路与单车道单向线路构成类似, 也可以离散化, 将线路分割为若干个元胞, 每个元胞或者为空或者被一列车占据, 如假设每个元胞长度为1m, 和谐号CRH3动车则占用200个元胞. 2) 当前车辆受近邻车辆的影响一致. 在公路NaSch模型中, 当前车辆的下一时刻的状态取决于车辆本身的状态和它的前方邻居元胞车辆的状态, 移动闭塞条件下不需要将铁路线路区间分成固定的闭塞分区, 取消了一个固定闭塞区间只能行驶一辆列车的限制, 而是在列车间

* 国家自然科学基金 (批准号: 61163009) 和兰州交通大学青年科学基金 (批准号: 2011001) 资助的课题.

[†] 通讯作者. E-mail: edukeylab@126.com

自动调整运行间隔, 后继列车的下一时刻的状态同样取决于前行列车的状态和其自身的状态. 3) 微观模型车辆交互机理类似. 公路 NaSch 模型通过研究单个车辆及车辆间的相互作用以得到宏观交通流分析, 单车道单向公路上行驶的车辆在安全间隔距离控制下进行车辆的加速与减速行为; 同样列车在移动闭塞下在单线单向线路上追踪运行与汽车在单车道公路上行驶运行机理类似, 都是通过前后车的安全距离控制来调整后继车辆的追踪行驶行为, 在移动闭塞系统中, 列车为了避免撞车, 前行列车和后继列车之间要保持一定的距离^[10,11]. 综上多列车在铁路线路上追踪运行可以看成是单车道交通流模型模拟, NaSch 模型适用于铁路交通流模拟研究. 与公路 NaSch 模型相比, 铁路 CA 模型将 NaSch 模型中第三步随机慢化过程忽略, 这是因为在铁路交通中, 出于行车安全考虑, 不容许司机的随机行为, 另外铁路 CA 模型还涉及信号系统、车站、线路等因素, 建立合理的铁路 CA 模型不仅可以方便的模拟铁路交通现象, 还可以分析铁路交通流特性. 对于列车交通流运行规律的研究, 最近几年也取得了很大的发展, 在 NaSch 模型的基础上, 结合铁路运营的实际特点, Li 等^[10,11] 将元胞自动机理论应用于铁路交通问题研究, 提出了铁路元胞自动机模型, 铁路 CA 模型可以观察到一些类似于公路交通中的交通流复杂现象. 李峰等^[12] 针对铁路固定闭塞系统的特点, 提出了一种用于模拟四显固定闭塞系统的铁路元胞自动机模型. 周华亮等^[13] 提出了一种模拟准移动闭塞系统的元胞自动机模型分析了延迟传播规律. 荀径等^[14] 分析了准移动闭塞条件下的铁路网中列车延迟传播的现象. 梁玉娟等^[15] 分析了公路弯道的曲线半径、路面摩擦系数对公路交通的影响. 张立东等^[16] 对公路弯道上汽车跟驰特性进行了研究. 目前针对铁路交通流的运行规律研究中, 大部分仿真研究都是基于线路是理想直线条件下, 但实际铁路线路由于受地理自然条件的限制, 线路平面几何条件主要有直线、曲线等构成, 传统的列车线路直线 CA 模型不适用线路弯道列车交通流分析研究, 并且普通公路弯道动力学模型与铁路线路弯道有较大差异.

针对上述铁路列车 CA 模型的不足, 本文以元胞自动机理论为基础, 为了更接近线路实际几何条件, 在 NaSch 模型的基础上, 提出了一种列车在线路弯道上运行的动力学模型, 通过计算机仿真分

析, 得到了铁路线路不同弯道曲线半径、不同路轨超高和不同弯道长度的几何条件对列车交通流的影响性分析.

2 线路模型

铁路线路 (railway line) 是一条三维空间带状体, 是在路基上铺设轨道, 供机车车辆和列车运行的土工构筑物. 线路是行车的基础, 它的作用是引导列车的运行, 并直接承受来自列车的负载, 并把荷载传至路基或者隧道结构物上, 铁路路基横断面如图 1 所示. 铁路轨道结构应具有足够的强度、稳定性和耐久性, 并具有良好的几何形位, 只有这样才能保证列车安全、平稳、不间断的运行^[17]. 铁路线路施工, 由于受地理自然条件限制, 线路平面是由直线和曲线组成的. 线路上设置曲线可以很好的适应地形的变化, 减少工程量, 但是列车在运行的过程中, 弯道曲线地段会增加轮轨的磨损. 为了满足旅客舒适度, 提高线路的稳定性和安全性, 在线路设计时将弯道曲线外轨抬高, 如图 2 所示.

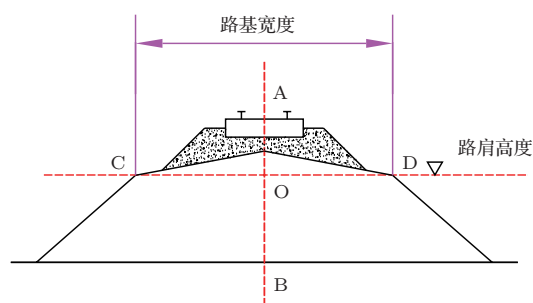


图 1 路基横断面

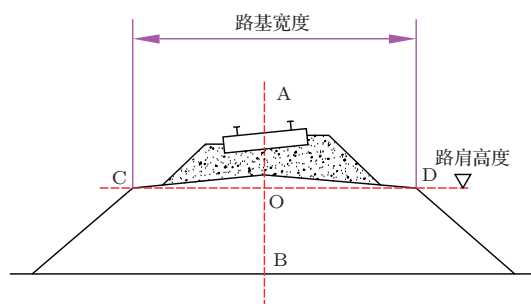


图 2 外轨超高

对于铁路曲线外轨超高的设置方法, 目前我国铁路和其他各国普遍采用的方法是外轨提高法. 外轨提高法是内轨高程不变而只抬高外轨的方法. 在铁路建设施工时对于有砟轨道, 曲线超高在道床上

实现;对于板式轨道,曲线超高均在底座上实现;对于双块式无砟轨道,桥梁和隧道地段曲线超高在道床上实现,土质路基地段曲线超高在基床表层层上实现^[17].

3 线路弯道安全速度

列车在弯道曲线上行驶时,由于离心力的作用,将列车推向外股钢轨,加大了外股钢轨的压力,也使旅客感到不适,货物发生位移等.因此需要将曲线外轨适当的抬高,使列车的自身重力产生一个向心的水平分力,以抵消离心力的作用,使内外两股钢轨受力均匀和垂直磨耗均等^[17].弯道曲线外轨抬高后产生的外轨顶面与内轨顶面的高度差称为曲线超高,图3中变量 h 即为外轨超高值.弯道上行驶的列车离心和向心加速度示意图如图3所示,下面进行线路弯道安全速度计算.

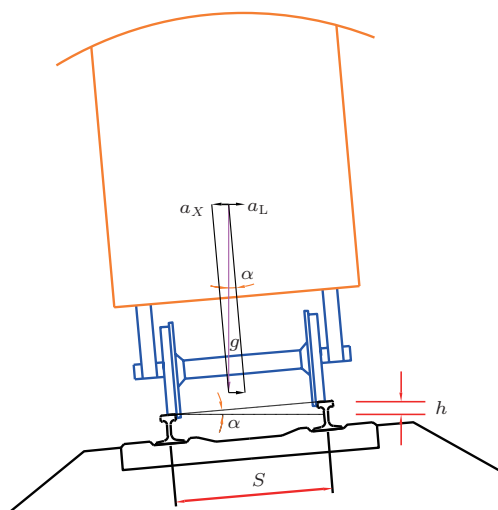


图3 弯道上行驶列车离心和向心加速度示意图

当列车安全通过曲线时,产生离心加速度 a_L ,其值与列车安全通过速度 v_{safe} 的平方成正比,与曲线半径 R 成反比,即

$$a_L = \left(\frac{v_{\text{safe}}}{3.6} \right)^2 \times \frac{1}{R},$$

式中 v_{safe} 为列车通过安全速度 (km/h); R 为圆曲线半径 (mm).

弯道曲线上由于外轨超高 h , 使重力加速度 g 在圆心方向产生一个分量,称为向心加速度,其值为

$$a_x = g \times \tan \alpha \approx g \times \sin \alpha = g \times \frac{h}{S} (\text{m/s}^2),$$

式中 g 为重力加速度, $g = 9.81 \text{ m/s}^2$; h 为外轨超高 (mm); S 为两根钢轨头中心线之间的距离 (mm),对于标准轨距, $S = 1500 \text{ mm}$.

若通过设置外轨超高产生的向心加速度正好平衡掉列车做曲线运动产生的离心加速度,列车的运动状态处于最理想的状态,则 $a_L = a_X$, 即

$$\left(\frac{v_{\text{safe}}}{3.6} \right)^2 \times \frac{1}{R} = g \times \frac{h}{S}.$$

相应的对于标准规格铁路,曲线半径与外轨超高值的关系有

$$\begin{aligned} h &= \frac{S}{g \times R} \times \left(\frac{v_{\text{safe}}}{3.6} \right)^2 = \frac{1500 \times v_{\text{safe}}^2}{3.6^2 \times 9.81 \times R} \\ &= 11.8 \times \frac{v_{\text{safe}}^2}{R} (\text{mm}). \end{aligned}$$

则得出列车安全行驶过弯道曲线的最大速度为

$$v_{\text{safe}} = \sqrt{\frac{h \times R}{11.8}} (\text{km/h}).$$

从上式中可以看出,列车弯道行驶的最大安全速度 v_{safe} 由弯道曲线半径 R 和路轨超高 h 两个因素决定,若列车驶入弯道时速度 $v > v_{\text{safe}}$, 列车驶入弯道时会产生未被平衡的离心加速度,轨道的内外轨不均匀磨耗,列车的稳定性下降,此时未被平衡的离心加速度还可能导致列车脱轨倾覆,造成严重的行车事故.因此,为了使列车安全、平顺的进入线路弯道,如果列车在进入弯道前的速度 $v > v_{\text{safe}}$, 列车在驶入弯道前的路段上必须采取相应的减速措施,使列车行驶速度 $v \leq v_{\text{safe}}$, 以保证列车安全、平稳的运行.

4 模型建立

中国列车运行控制系统 (Chinese train control system, CTCS), 是以分级的形式满足不同线路运输需要,在不干扰机车乘务员正常驾驶的前提下有效地保证列车运行的安全,即为了保证列车安全运行,并以分级形式满足不同线路运输需求的强制性技术规范. CTCS 根据功能要求和设备配置划分应用等级,分为0—4级,CTCS-4是CTCS的最高级,是完全基于无线移动闭塞的列控系统,由无线闭塞中心 (radio block centre, RBC) 和车载验证系统共同完成列车定位和列车完整性检查.随着移动闭塞条件下列车的追踪运营间隔不断的缩短、行车密度不断增大,使列车之间安全的行车距离的问题突显出来,对列车安全追踪运行控制问题的研究显得尤

为重要. 移动闭塞系统下当前行列车驶出停靠车站, 并且驶过安全保护段 SM, 后续列车则以最大允许速度 $V_{\max}$ 行驶, 移动闭塞方式下将该安全间隔时间称为列车之间的最小追踪时间间隔 $T_{\min}$, 其中 $T_{\min} = \sqrt{\frac{2(l_{\text{train}} + \text{SM})}{a}} + T_d + \frac{V_{\max}}{b}$, l_{train} 为列车长度, SM 表示制动后安全防护距离, T_d 为列车车站停靠时间 [13,14]. 当列车从线路左侧车站按照一定的时间间隔 T_{int} 连续发车, 如果连续发车间隔时间 T_{int} 大于最小追踪时间间隔 $T_{\min}$ 时, 此时列车之间的间距 gap 较大, 列车之间的相互作用影响较小, 线路交通密度较低. 当连续发车间隔时间 T_{int} 小于或等于最小追踪时间间隔 $T_{\min}$ 时, 此时列车之间的追踪间距 gap 较小, 列车之间追踪运行相互影响作用加大, 线路上多列车追踪运行会出现高密度交通现象.

如以本文仿真的和谐号 CRH3 型动车为例, CRH3 型动车车长 200 m, 当 $V_{\max} = 180$ km/h、安全防护 SM = 100 m, $T_d = 90$ s 时, 列车最小追踪时间间隔 $T_{\min} = 164$ s, 图 4 (a1) 和 (a2) 是在连续发车间隔 $T_{\text{int}} = 250$ s 条件下得到的时空图, 因为连续发车间隔时间 T_{int} 远大于最小追踪时间

时间 $T_{\min}$, 此时列车与列车之间 gap 较大, 列车间追踪行驶互相不影响, 从图 4 (a2) 中可以看出列车运行时除了列车进出站停靠之外均以最大速度行驶, 线路运行密度较低. 图 4 (b1) 和 (b2) 是在连续发车间隔 $T_{\text{int}} = 100$ s 条件下得到的时空图, 因为发车间隔小于最小追踪时间 $T_{\min}$, 列车之间追踪运行距离 gap 较小, 列车之间互相影响的作用增大, 列车时走时停. 线路中因为包含弯道, 列车在弯道曲线上行驶时, 由于离心力的作用, 将列车推向外股钢轨, 为了保证行车安全对弯道驶过列车采取限速措施, 前行列车的减速运行会对追踪运行的后继列车产生制约影响, 如图 4 (b2) 中列车进过弯道减速, 后继列车也随之减速, 从而影响整个线路的通行状况. 图 4 可以得出, 当 $T_{\text{int}} > T_{\min}$ 时, 列车追踪间距 gap 较大, 车间距对追踪列车的速度影响较小; 当 $T_{\text{int}} \leq T_{\min}$ 时, 列车追踪间距 gap 较小, 后继列车的减速概率越大, 车间距对追踪列车的速度影响较大, 随着连续发车间隔时间 T_{int} 的减小, 列车追踪间距 gap 逐步较小, 线路中行驶列车的车速越来越小, 线路交通出现时走时停的交通波现象, 严重时发生线路堵车现象.

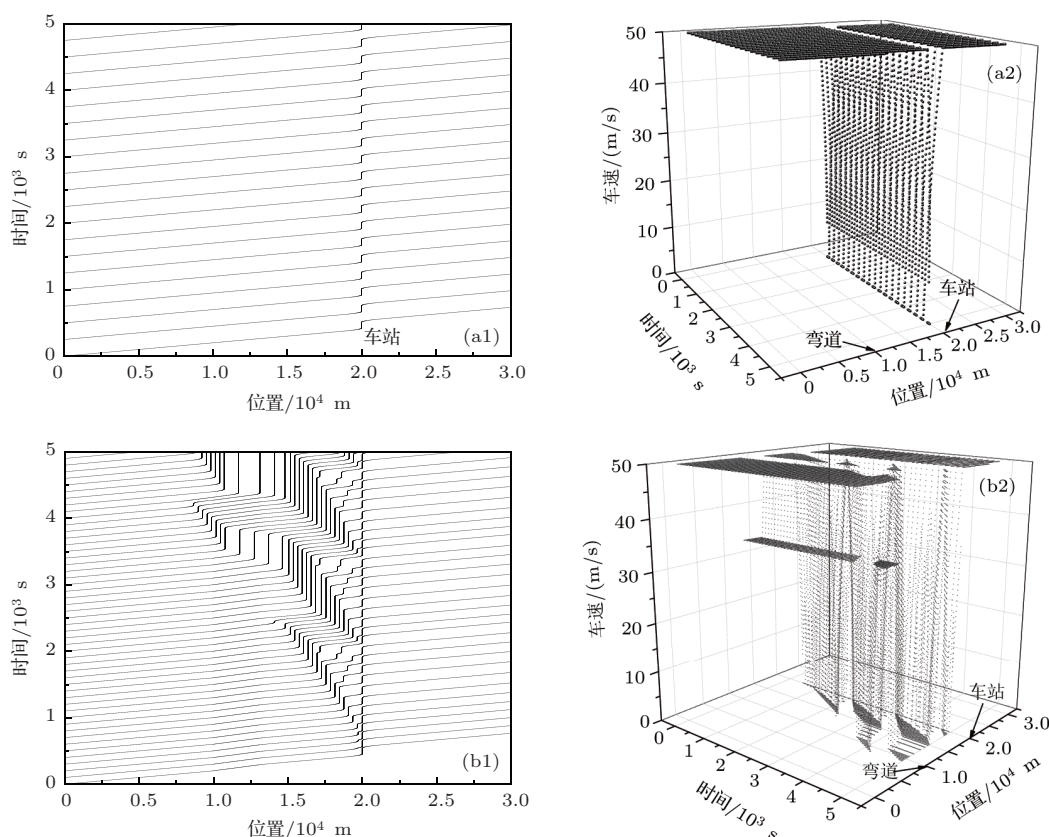


图 4 不同发车间隔下交通流时空相图 (a1) $T_{\text{int}} = 250$ s; (a2) $T_{\text{int}} = 250$ s; (b1) $T_{\text{int}} = 100$ s; (b2) $T_{\text{int}} = 100$ s

移动闭塞是利用现代无线通信技术的新型闭塞方式,它以机车信号替代轨道上的固定信号,取消了物理层次上的分区划分,区间在列车间自动调整运行间隔,使之经常保持一定的距离,从而大大地提高区段的通行能力.移动闭塞的基本技术特征是具有车地双向安全数据通信,充分利用先进的通信传输手段,实时进行列车与地面间的双向网络通信联络,使得后续列车可以及时了解前方列车实际间隔距离,后续列车通过计算即可给出最佳制动曲线,这样的控制方式有利于组织间隔小、密度大的连续运输,改善了旅客乘车舒适度^[14].在移动闭塞系统中,为了避免撞车,前行列车和后继列车之间要保持一定的距离,该距离至少要大于最小追踪间隔距离,如图5所示.在移动空间闭塞绝对制动方式下,相邻列车间的最小追踪间隔距离 d_n 为: $d_n = v_{\max}^2/2b + SM$,其中 $v_{\max}$ 为列车行驶的最大速度, b 为列车的减速度, SM 表示制动后安全防护距离.

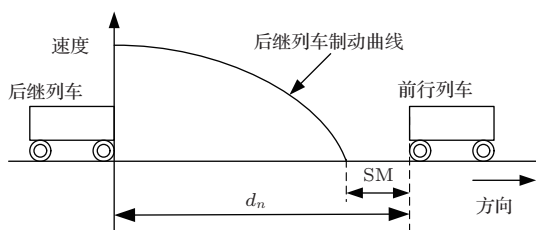


图5 移动闭塞原理示意图

4.1 模型结构

在NaSch模型的基础上,考虑列车行驶过程中,线路不是在理想的直线条件下,线路包含直线和曲线构成,模型分别研究了弯道曲线半径、路轨超高和弯道长度对铁路交通流的影响.仿真单向单线的轨道,线路长度为 L ,上有一个半径为 R ,外轨超高为 h ,弯道长度为 S_d 的弯道,列车车长为 l_{train} .

列车追踪目标又可以分为两类: 1) 如果列车追踪运行的前方是另一辆正在行驶的列车时,如果前后列车之间的距离大于最小追踪间隔距离 d_n 时,前行列车不会影响到后继列车的运行,后继列车可以加速运行;若小于最小追踪间隔距离 d_n ,后继列车必须减速;若等于最小追踪间隔距离 d_n ,后续列车保持追踪速度不变. 2) 如果列车追踪运行的前方是车站,而且列车要进站停靠,那么列车的速度应

该保证列车在此时以减速度 b 开始减速,从而保证不会驶过车站而发生停靠在车站之外的情形,如果车站的防护段还没有清空,则列车和车站之间保持安全距离,如果车站的防护段已经清空,则列车通过减速进入车站.

4.2 演化规则

对于弯道线路行驶的高速列车,采用下述规则表示高速列车在线路上的行驶规则,设计停靠车规则,并进行计算仿真.列车在进入弯道前,为了避免急减速对轮轨的磨损和旅客不适的情况发生,模型设计时,参照铁路施工实际在弯道前增加一定长度的缓和和曲线,以保证旅客舒适性缓和曲线长度 $lh = \frac{h \times v_{\text{safe}}}{3.6f}$,其中 v_{safe} 为弯道最大安全限速值, f 为保证旅客舒适的超高时变率容许值率(mm/s),一般情况下取值25 mm/s.列车的更新规则如下:

情况1 第 N 辆列车的前面是 $N-1$ 辆车

1) 加速过程:

如果 $\Delta x_n > d_n$,

$$v_n(t+1) \rightarrow \min(v_n(t) + a, v_{\max});$$

另外, $\Delta x_n < d_n$,

$$v_n(t+1) \rightarrow \max(v_n(t) - b, 0);$$

另外

$$v_n(t+1) \rightarrow v_n(t).$$

2) 确定性减速过程:

$v_n(t+1) \rightarrow \min(v_n(t+1), \text{gap}_n(t))$, 其中 $\text{gap}_n(t) = x_{n+1}(t) - x_n(t) - l_{\text{train}}$ 表示 t 时刻相邻列车之间的距离,规则表示列车行驶时为了避免和前车发生碰撞而采取的减速措施.

3) 弯道及缓和曲线安全行驶控制:

$v_n(t+1) \rightarrow \min(v_n(t+1), v_{\text{safe}})$,列车在弯道曲线上行驶时,由于离心力的作用将列车推向外轨钢轨,列车会发生脱轨或倾覆危险可能,如果列车驶入弯道及缓和曲线时速度大于弯道曲线安全限速值,此时进行弯道安全限速控制.

4) 列车运动:

$x_n(t+1) \rightarrow x_n(t) + v_n(t+1)$; 列车按照调整后的速度向前行驶.

情况2 第 N 辆列车的前面是车站

(i) 车站被前方第 $N-1$ 辆相邻列车所占据

更新规则与情况1相同

(ii) 车站没有被其他列车所占据

1) 加速过程

如果 $d_s > d_m$

$$v_n(t+1) \rightarrow \min(v_n(t) + a, v_{\max})$$

另外, $d_s < d_m$

$$v_n(t+1) \rightarrow \max(v_n(t) - b, 0)$$

另外,

$$v_n(t+1) \rightarrow v_n(t)$$

2) 确定性减速过程:

$$v_n(t+1) \rightarrow \min(v_n(t+1), d_s)$$

3) 弯道及缓和曲线安全行驶控制:

$$v_n(t+1) \rightarrow \min(v_n(t+1), v_{\text{safe}})$$

4) 列车运动:

$$x_n(t+1) \rightarrow x_n(t) + v_n(t+1)$$

情况3 第 N 辆列车在车站内等候发车

(i) 当列车在站点停留时间小于规定停站时间 T_d 时, 停靠站乘客上车, 等待发车 $v_n(t+1) = 0$, $t < T_d$, 其中 T_d 表示列车在车站规定的停留时间.

(ii) 当列车在站点停留时间大于规定停站时间 T_d 时, 列车发车, 加速离开车站站台

1) $v_n(t+1) \rightarrow \min(v_n(t) + a, v_{\max}), \geq T_d$.

2) 列车运动: $x_n(t+1) \rightarrow x_n(t) + v_n(t+1)$, 列车按照调整后的速度向前行驶.

上式中 Δx_n 表示第 N 辆列车与前方第 $N-1$ 辆车之间的距离, d_n 为列车间的最小追踪间隔距离, a 为列车加速度, b 为列车减速度, v_{safe} 为弯道最大安全限速值, $x_n(t)$ 表示 t 时间列车在线路中的位置, d_s 为列车与车站之间的距离, d_m 为列车从制动到进入站点行驶的安全距离.

5 数值模拟与仿真分析

模型建立时将线路视为长度为 L 的一维离散格子组成, 每个格子大小相同, 每个格子或者为空, 或者被列车占据, 列车速度取 0 到 $v_{\max}$ 之间的整数. 列车 i 在 t 时刻的状态由列车本身的行驶速度 $v_i(t)$ 表示, $v_i(t) \in [0, v_{\max}]$, 其中 $v_{\max}$ 为列车最大限速. 为了使模拟结果具有实际的物理意义, 可以根据实际情况规定元胞自动机迭代时间间隔和元胞长度. 模拟线路为长度为 L 的元胞, 设定每

个元胞长度为 1 m, 数值模拟仿真时以德国西门子公司和唐山轨道客车有限责任公司联合研制的和谐号 CRH3 型动车组为例进行研究, 根据 CRH3 型列车主要技术参数, 编组形式为 4 拖车 4 动车, 列车编组长度为 200 m, 对应仿真时每辆列车占 200 个 cells. 系统刷新时间间隔为 1s, 这就意味着, 当 $v_{\max} = 30$ cell/s 时, 对应的列车实际速度为 108 km/h, $v_{\max} = 50$ cell/s 时, 对应的列车的实际速度为 180 km/h.

在数值模拟仿真时, 取线路长度 $L = 30000$, 演化时间 $T = 5000$, 假设半径 R 的弯道在线路 1/3 处, 车站在线路 2/3 处, 车站长度为 200 m, 列车加速度 a 和减速度 b 均为 1 m/s^2 , 安全防护距离 $SM = 100$, 列车车站停靠时间 $T_d = 90 \text{ s}$. 仿真元胞自动机模型是采用开放型边界条件, 边界条件定义如下: 1) 线路左侧起点每隔 T_{int} 发车间隔, 则新生成一列列车, 并按照线路更新规则进行更新; 2) 在线路的终点列车自由驶出系统.

5.1 线路曲线半径对交通流的影响

为研究不同线路曲线半径对列车交通流的影响, 取定外轨钢轨曲线超高 $h = 150 \text{ mm}$, 仿真列车最大车速为 40 cell/s 即 $v_{\max} = 144 \text{ km/h}$, 改变线路曲线半径 R , 通过仿真得到了不同曲线半径下列车速度曲线变化图, 如图 6 所示, 横坐标表示线路的格点数即线路的长度, 纵坐标表示列车行驶的速度, 图 6 中其中一条仿真曲线显示了超高 $h = 150 \text{ mm}$ 、弯道半径 $R = 2500 \text{ m}$ 、弯道长度 $S_d = 3000 \text{ m}$ 条件下列车的速度与位置变化曲线, 从图中可以看出列车逐步加速后达到最大行车速度, 以最大车速向线路前方行驶, 当行驶至车站上游 9703 cell 时进入弯道缓和曲线路段, 缓和曲线长度为 297 cell, 车站上游 10000 cell 到 13000 cell 时, 此时列车进入线路弯道区域. 因为弯道半径 R 为 2500 m 时, 弯道安全行驶速度 $v_{\text{safe}} = 178 \text{ km/h}$, 此时因为列车最大车速 $v_{\max} < v_{\text{safe}}$, 列车驶过弯道不用减速, 仍以最大车速 144 km/h 行驶, 安全驶过弯道. 当列车与车站距离小于安全刹车距离时, 列车逐渐减速并停靠在车站, 当列车在车站内停留的时间达到停站时间 90 s 以后, 列车逐渐加速驶出车站, 逐渐达到最大行驶速度继续行驶. 图 6 中另外一条曲线显示了曲线半径 $R = 1200 \text{ m}$ 条件下列车行驶速度与位置关系曲线, 当列车行驶至车站上游弯道区域时, 因

为 $R = 1200$ m 时弯道安全速度 $v_{\text{safe}} = 123$ km/h, 列车行驶最大车速 $v_{\text{max}} > v_{\text{safe}}$, 受到线路弯道对列车安全的影响, 此时列车需要减速安全驶入弯道缓和曲线和弯道. 列车限速驶出弯道后, 行驶至车站附近时列车逐渐减速并停靠在车站, 当列车在车站内停留的时间达到 90 s 后, 列车加速驶出车站逐渐达到最大行驶速度.

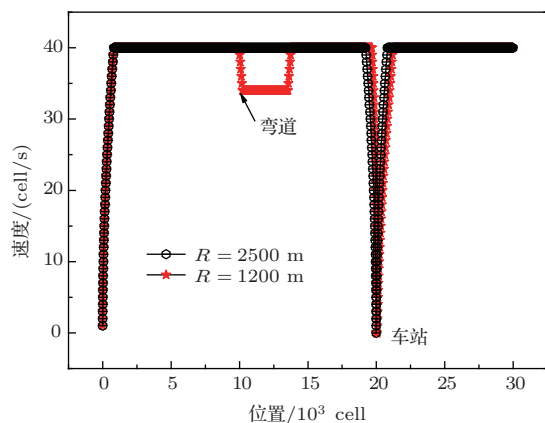


图6 不同弯道曲线半径下列车速度变化图

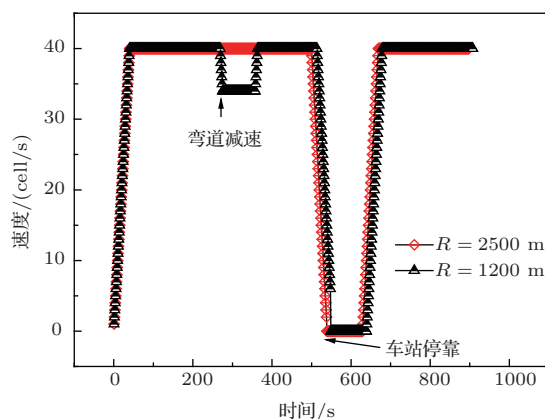


图7 不同弯道曲线半径下列车速度随时间变化图

图7显示了列车速度随时间变化的关系, 当弯道半径 $R = 1200$ m, 在 270 s 时列车因为安全限速列车减速进入弯道, 在 364 s 时列车驶出弯道, 列车开始加速行驶. 图7中另外一条曲线为弯道半径 $R = 2500$ m 的速度时间变化曲线, 可以看出在弯道通过时段, 即 270 s 至 364 s 时段, 因为列车的行驶速度小于列车的安全限速, 列车不需要减速, 保持最大车速通过弯道. 根据铁路运营知识, 列车经过曲线弯道时, 轮轨间产生纵向滑动、横向滑动和横向挤压, 使轮轨磨损增加, 曲线半径越小, 磨损增加越大. 从图6和图7中可以看出对于外轨道超高

一定的情况下, 线路弯道曲线半径越小, 列车减速概率越大, 导致轮轨的磨损越大, 对于线路修建时应尽可能选用较大的弯道半径值, 这样可以改善运营条件, 节省运营费用.

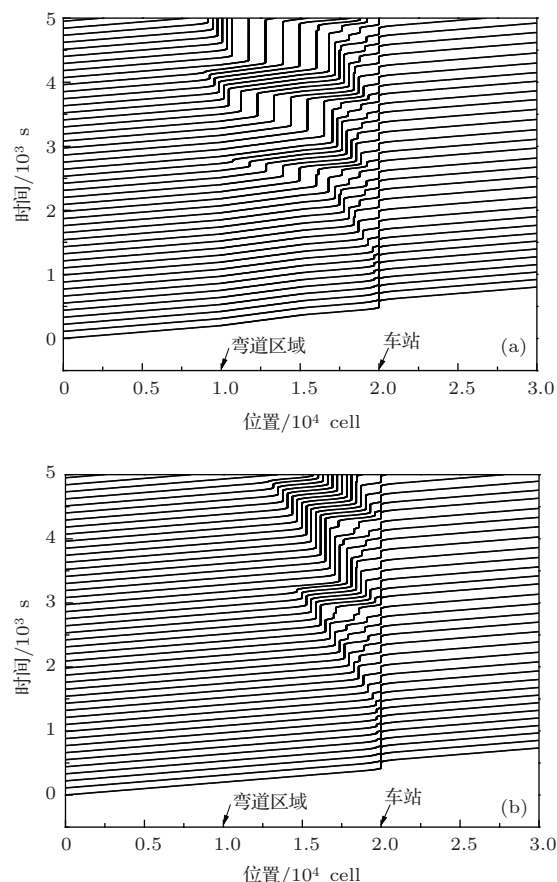


图8 不同弯道曲线半径下交通流时空相图 (a) $R = 1200$ m; (b) $R = 3000$ m

下面进行弯道线路列车交通流现象仿真, 图8是外轨超高 $h = 150$ mm、列车最大车速 $v_{\text{max}} = 50$ cell/s、发车间隔 $T_{\text{int}} = 110$ s、弯道长度 $S_d = 3000$ m 条件下, 得到的弯道与车站附近列车流行驶轨迹状态. 图中横坐标表示线路的位置, 纵坐标表示时间, 以黑色的点表示有车占据该位置, 白色表示该位置无车. 其中图8(a)是曲线半径 $R = 1200$ m 条件下的列车交通流时空图, 从图8(a)可以看出在线路车站上游区域出现了列车长时间等待入站、列车集簇现象, 这是因为当前列车行驶至线路弯道路段, 因为弯道半径 $R = 1200$ m, 弯道安全限速 $v_{\text{safe}} = 123$ km/h, 列车行驶最大车速 $v_{\text{max}} = 50$ cell/s, 对应实际物理最大车速为 180 km/h, 此时 $v_{\text{max}} > v_{\text{safe}}$, 为了保证行车安全, 所有列车需要减速进入线路弯道, 此时弯道区域可以看成线路的“瓶颈”路段, 系统中

出现了时停时走的交通波现象, 并且随着时间的增加列车在车站前停靠时间增加, 拥堵将随着时间快速反向传播. 在这种情况下线路左侧不断发来新的列车, 加之弯道限速等影响, 导致了后续部分车辆出现拥堵现象, 而引发交通拥堵车辆停滞, 此时整个线路的列车通行能力的下降. 其中图 8(b) 是在曲线半径 $R = 3000$ m 下得到的列车交通流时空图, $R = 3000$ m 时弯道安全限速值 $v_{\text{safe}} = 195$ km/h, 列车行驶最大车速 $v_{\text{max}} < v_{\text{safe}}$, 列车进入弯道不用减速即可安全驶过弯道, 可以从图中看出弯道区域处, 列车不需要减速通过弯道, 列车之间的相互影响作用很小, 在车站区域附近因为列车要停靠站 90 s, 此时会出现列车在车站上游短暂停车等待进站. 时空相图的演化同样能说明线路弯道是影响高速列车运行的一个重要因素, 线路弯道半径越小, 对铁路行车的“瓶颈”作用也就越明显.

下面分析线路弯道曲线半径对列车延迟时间的影响. 首先增大列车发车间隔 T_{int} 值, 发车间隔大于列车最小追踪时间间隔 T_{min} , 追踪运行的两列车在运行过程中相互不受干扰的最小间隔时间称为追踪列车间隔时间^[13]. 图 9 中一条曲线为 $v_{\text{max}} = 30$ cell/s 条件下的列车弯道半径与晚点时间的关系图, 列车发车间隔为 150 s, 从图中可以看出当弯道半径 R 为 800 m 时, 列车晚点 9 s, 当弯道半径为 825 m 时, 列车晚点 6 s, 当弯道半径为 950 m 时, 列车正点达到车站, 这是因为随着弯道半径的增加, 弯道限速范围值 v_{safe} 也在增大. 弯道半径为 $R = 800$ m 时, $v_{\text{safe}} = 100$ km/h, 此时列车最大车速大于弯道限速值, 列车通过弯道需要减速慢行; 当 $R = 950$ m 时, $v_{\text{safe}} = 109$ km/h, 此时列车最大车速小于弯道限速值, 列车不用减速直接通过弯道, 列车正点达到车站. 另外一条曲线是列车 $v_{\text{max}} = 50$ cell/s, 即最大车速为 180 km/h 条件下列车弯道半径与晚点时间的关系, 当弯道半径 $R = 800$ m 时, 晚点时间为 57 s, 当 $R = 1000$ m 时, 列车晚点时间为 41 s, 当 $R = 2600$ m 时, 列车正点到达车站. 从图可以看出对于低速或者快速列车, 随着弯道半径的增大, 列车的晚点时间越来越少, 说明随着弯道半径的增大, 弯道的“瓶颈”作用逐渐减小, 该结论与仿真得到的时空图一致. 根据图 9 的仿真结果, 如线路目标最大车速 $v_{\text{max}} = 50$ cell/s 即 180 km/h 时, 选取弯道半径 2600 m 左右列车可以正点运行, 线路目标最大车速 $v_{\text{max}} = 30$ cell/s

即 108 km/h 时, 选取弯道半径为 1000 m 左右列车可以正点运行. 在铁路选线设计时, 应根据铁路等级、速度目标值、铁路运输模式进行弯道最小半径的选择, 考虑到旅客舒适度及钢轨磨损, 及行车安全, 选取合理的弯道半径, 在文献[17]中给出的铁路工程和运营各级铁路设计速度的最小曲线半径值工程经验值, 最高设计速度为 100 km/h 时, 曲线弯道 R 最小选取 1000 m 左右, 客运专线中最高设计速度为 180 km/h 时, 曲线弯道 R 选择 2700 m 左右. 图 9 仿真结论与实际铁路建设数据相符合, 有一定的实际工程应用意义.

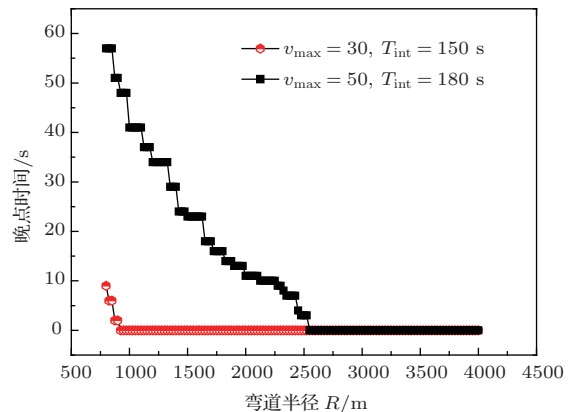


图9 $S_d = 3000$ m, $h = 150$ mm, 不同弯道曲线半径下列车晚点图

接下来减小列车的发车间隔 T_{int} , 研究线路列车晚点时间与弯道半径之间的关系. 仿真参数 $T_{\text{int}} = 110$ s, $v_{\text{max}} = 50$ cell/s, $S_d = 3000$ m, $T = 3000$ s 条件下模拟得到了不同弯道半径 R 条件下晚点列车晚点时间关系图. 图 10 中横坐标为列车的编号, 纵坐标为列车的晚点时间, 从图中可以看出在同一弯道半径条件下, 后继列车由于前行列车通过弯道减速的影响, 导致后继列车在驶向车站的过程中出现了延迟, 延迟向后传播并不断积累, 导致后续列车的晚点时间不断增加. 如图中 $R = 800$ m 时, 编号 1 的列车晚点 57 s, 编号 5 的列车晚点 87 s, 编号 15 的列车晚点 332 s, 形成这种现象的主要原因是, 列车为了安全行驶追踪行车间距必须满足最小追踪距离 d_n 的要求, 如果两车间距小于 d_n , 追踪列车只能减速, 图中可见弯道较小时对于列车的晚点传播非常快, 后续列车晚点时间快速增加. 从图 10 中, 另外可以得到随着弯道半径的增加, 同一个编号的列车晚点时间在减小, 如编号为 5 的列车, $R = 700$ m 时晚点 94 s, $R = 800$ m 时晚点 87 s, $R = 1000$ m 时晚点 71 s, $R = 2000$ m 时

晚点 46 s, $R = 3000$ m 时晚点 21 s. 这说明对于线路中行驶的列车, 随着弯道半径的增大, 弯道的“瓶颈”作用逐渐下降, 线路晚点时间也开始减少. 另外从图中也可以看出当弯道半径增大到一定程度后, 列车的晚点时间不会进一步减少, 如弯道半径 R 从 3000 m 增大到 4000 m, 5000 m 后, 列车晚点时间不再发生变化, 这是因为当 $R = 2500$ m 时列车行驶的最大车速已经小于弯道限速值, 列车驶过弯道不需要减速, 此时弯道对列车的“瓶颈”作用彻底消失. 在铁路选线设计时曲线半径应该与沿线的地形条件相适应, 为了创造良好的运营条件节省运营费用, 应该选择较大的弯道半径, 这样列车的晚点率会大幅度下降, 这与图 10 仿真结论相一致.

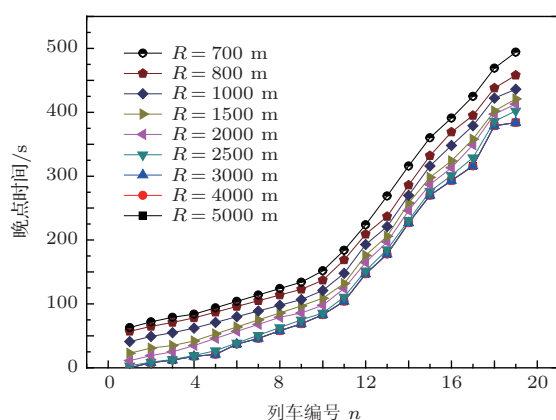


图 10 $S_d = 3000$ m, $h = 150$ mm, 不同弯道曲线半径下列车晚点图

5.2 线路曲线外轨超高对交通流的影响

列车在曲线上行驶对轨道产生离心力, 使外轨承受较大的压力, 不仅会使轨道外轨磨损增大, 发生严重的侧面磨耗, 并使旅客感觉不适, 严重时甚至造成列车倾覆事故, 因此, 在铁路线路转弯时, 常把路基的外侧垫起, 使外侧铁轨抬高, 以避免外轨受到的侧压力. 下面开始分析不同线路曲线外轨超高对交通流的定量影响. 在图 11 中, 横坐标代表外轨超高的取值范围, 纵坐标代表列车的晚点时间, 当列车 $v_{\max} = 50$ cell/s, 在 $R = 1500$ m 的条件下, 从仿真曲线可以看出: 在弯道曲线半径 R 一定的情况下, 列车的晚点时间随着外轨超高值的增大而逐渐减小. 当列车最大车速 $v_{\max} = 30$ cell/s 时同样满足这样的规律. 这是因为根据弯道安全速度公式 $v_{\text{safe}} = \sqrt{h \times R / 11.8}$, 当弯道半径一定时, 弯道限速值随着外轨超高的增大而增大, 安全限速值增

大, 意味着线路弯道“瓶颈”作用的减弱, 线路的通行能力会逐步提高, 列车的晚点时间逐渐减少, 整个道路的拥堵在逐步减小. 外轨超高值 h 的值越小的情况下, 导致线路列车减速行为的概率越大, 列车晚点也越大, 受弯道的影响列车交通流越容易进入堵塞相. 在线路建设施工时线路曲线超高的选择主要由列车运行安全、乘坐舒适度和经济合理性等因素^[17], 如法国 TGA 线为 180 mm; 德国 ICE 高速客运专线, 在有砟轨道道路最大超高为 150 mm, 无砟道路最大超高为 170 mm; 我国目前在制定相应规范时, 客货共线的铁路实设超高值取 150 mm, 高速客运专线实设超高最大取值范围为 170—180 mm^[17]. 根据上述超高实设的取值范围, 在曲线半径一定的情况下, 可以通过增大外轨超高值来平衡因速度提高而增大的离心加速度, 合理增大外轨超高, 列车的晚点时间会逐渐降低.

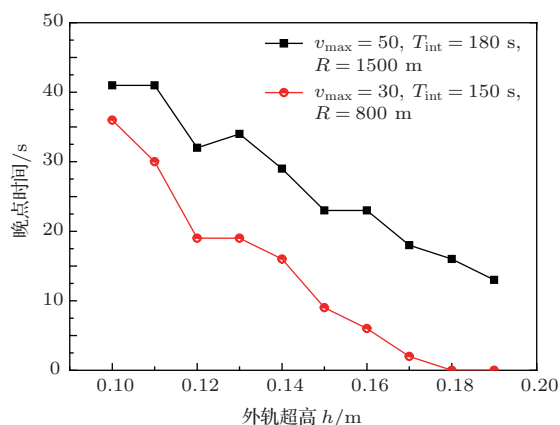
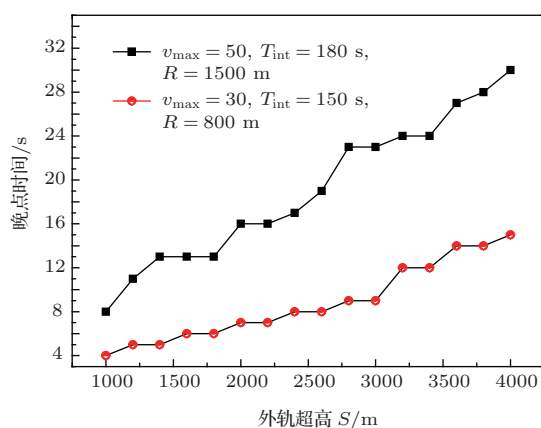


图 11 $S_d = 3000$ m, 不同外轨超高下列车晚点时间

5.3 线路弯道长度对交通流的影响

为了研究弯道不同长度对列车交通流的影响, 取定弯道半径 R 、外轨超高值 h , 改变弯道长度 S_d 进行仿真. 图 12 是在外轨超高 $h = 150$ mm 得到的不同弯道长度下列车晚点时间图, 图中可以看出对于快速列车和低速列车随着弯道长度的增大, 列车的晚点时间也在逐步增大, 这说明由于弯道安全限速值的影响, 随着弯道长度的增大, 列车追踪运行时减速概率增大, 交通流量会减低. 仿真结论同时说明在铁路选线设计时, 合理选择较小的弯道弧长, 不但可以减少工程造价费用还可以提高交通通行量.

图12 $h = 150$ mm, 不同弯道长度下列车晚点时间

6 结 论

考虑弯道曲线半径作为重要的铁路曲线参数,是限制铁路行车速度的关键因素,在NaSch的基础上,建立了一种移动闭塞条件下弯道交通流列车追踪模型,并应用元胞自动机模型研究了铁路线路弯道半径、外轨超高和弯道长度对交通流、列车运营的影响.结果表明:1)不同弯道半径对移动闭塞条件下多列车追踪速度有明显的影 响.2)时空相图再现了弯道交通流拥堵和消散过程,在弯道区域显示了不同弯道半径对行车的影响情况,线路弯道半径越小,其对铁路行车的“瓶颈”作用也就越明显.3)对于低速或者快速列车随着弯道半径的增大,列车的晚点时间会逐渐减少.4)曲线半径一定的情况下,合理增大外轨超高值,会改善交通状况.5)弯道半径和外轨超高一定的情况下,适当减少弯道长度可以提高交通流量.本文提出的弯道列车交通流运行模型对于研究实际的铁路选线设计和运营管

理有一定的参考意义与实用价值.

参考文献

- [1] Wolfram S 1983 *Rev. Mod. Phys.* **55** 601
- [2] Nagel K, Schreckenberg M 1992 *J. Phys. I* **2** 2221
- [3] Xue Y, Dong L Y, Dai S Q 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 0445 (in Chinese) [薛郁,董力耘,戴世强 2001 物理学报 **50** 0445]
- [4] Tian H H, Xue Y, Kang S J, Liang Y J 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 4507 (in Chinese) [田欢欢,薛郁,康三军,梁玉娟 2009 物理学报 **58** 4507]
- [5] Sun Z, Jia B, Li X G 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 100508
- [6] Hua X D, Wang W, Wang H 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 084502
- [7] Zhao H T, Mao H Y 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 060501
- [8] Fang Y, Chen J Z 2013 *Chin. Phys. B* **22** 108902
- [9] Sun Y H, Cao C X, Xu Y, Wu C 2013 *Chin. Phys. B.* **22** 120501
- [10] Li K P, Gao Z Y, Ning B 2005 *J. Comp. Phys.* **209** 179
- [11] Li K P, Gao Z Y, Ning B 2005 *Int. J. Mod. Phys. C* **16** 921
- [12] Li F, Gao Z Y, Li K P 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 3160 (in Chinese) [李峰,高自友,李克平 2007 物理学报 **56** 3160]
- [13] Zhou H L, Gao Z Y, Li K P 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 1707 (in Chinese) [周华亮,高自友,李克平 2006 物理学报 **55** 1707]
- [14] Xun J, Ning B, Li K P 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 5159 (in Chinese) [荀径,宁滨,李克平 2007 物理学报 **56** 5159]
- [15] Lang Y J, Xue Y 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 5326 (in Chinese) [良玉娟,薛郁 2010 物理学报 **59** 5326]
- [16] Zhang L D, Cao L, Zhu W X 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 074501 (in Chinese) [张立东,贾磊,朱文兴 2012 物理学报 **61** 074501]
- [17] Yi S R 2009 *Design of Railway location* (3rd Ed.) (Chengdu: Southwest Jiao Tong University Press) p-p96-113 (in Chinese) [易思蓉 2009 铁路选线设计(第三版)(成都:西南交通大学出版社)第96—113页]

Research on train traffic flow affected by the line curve of the moving block system^{*}

Chen Yong[†] Wang Xiao-Ming Dang Jian-Wu Hu Xiao-Hui

(School of Electronic and Information Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

(Received 3 September 2013; revised manuscript received 17 December 2013)

Abstract

According to the characteristics of railway line and NaSch model a cellular automata model for simulating multi-train tracking of railway curve is proposed. The computer numerical simulation is carried out and the influence of different curve radius, outer rail superelevation curve and curve length on railway traffic flow are studied using the propose model. Simulation results show that the model can reflect accurately traffic flow situation of the special line; and the train line curve has a great influence on the running safety and reveals the traffic wave phenomena in running and stopping. With increasing curve radius, train delay time decreases gradually according to the simulation results. Reasonable selection of curve radius, the outer rail superelevation and curve length can significantly improve the line capacity and reduce the wheel rail wear, so that these can guarantee the safety and comfort of the train running. The results have certain guiding significance for the railway line design and operational management.

Keywords: traffic flow, cellular automata, railway curve, train

PACS: 05.40.-a, 05.60.-k, 89.40.Bb

DOI: 10.7498/aps.63.030503

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61163009), and the Young Scholars Science Foundation of Lanzhou Jiaotong University, China (Grant Nos. 2011001).

[†] Corresponding author. E-mail: edukeylab@126.com