

# 网络条件下列车追踪模型及延迟传播的研究<sup>\*</sup>

荀 径 宁 滨 李克平

(北京交通大学轨道交通控制与安全国家重点实验室, 北京 100044)

(2006 年 11 月 14 日收到 2007 年 1 月 2 日收到修改稿)

描述了一种移动闭塞下考虑不同类型列车混跑时基于元胞自动机的列车追踪模型. 将该模型应用到铁路网, 模拟了网络条件下列车运行情况. 应用该模型模拟了移动闭塞下列车延迟传播的现象. 分析了发车间隔松弛时间、初始延迟时间等因素对列车延迟的影响. 将该模型的模拟结果和理论公式的计算结果进行了比较, 验证了模型的可靠性和有效性.

关键词: 元胞自动机, 铁路网络, 列车追踪模型, 移动闭塞

PACC: 0550

## 1. 引 言

移动闭塞信号系统是一种新型的闭塞制式. 现阶段国际上已有不少城市通过对现有的城市轨道交通列车控制系统进行更新, 实现了移动闭塞. 国内的广州和武汉地铁也相继采用了这种新的闭塞制式. 在移动闭塞系统中, 列车行驶速度和车辆密度将得到进一步提高, 单个列车的延迟将对后续列车产生很大的影响. 对于移动闭塞信号系统列车延迟传播规律的研究, 最近几年也得到了很大的发展. Takeuchi 等<sup>[1]</sup>对移动闭塞系统下列车的延迟传播及其恢复能力做了模拟探讨. 张勇<sup>[2]</sup>开发了移动闭塞列车运行模拟系统对列车延迟进行了模拟分析. 赵明<sup>[3]</sup>利用交通流回波理论分析了移动闭塞系统中列车的延迟及其传播.

元胞自动机 (cellular automaton, CA) 模型作为模拟非线性复杂系统的一种有效工具, 近年来在交通流的研究中得到了广泛的应用<sup>[4-9]</sup>. CA 模型的时间、空间、状态均离散, 规则简单, 非常适合于计算机模拟. 最为基本的一维 CA 模型是由 Wolfram 命名的 184 号规则<sup>[10]</sup>. 在 184 号规则基础上 Nagel 和 Schreckenberg 提出了 NaSch 模型 (NS 模型)<sup>[10]</sup>, 该模型在一定的程度上可以模拟出实际的交通状况. 在此基础上很多学者提出改进模型, 用来模拟更为复

杂、真实的交通现象. 随着 CA 模型的广泛应用, 宁滨、高自友、李克平等<sup>[11-13]</sup>在 NS 模型的基础上, 提出了一种铁路 CA 模型, 成功地对铁路移动闭塞系统的列车运行进行了模拟探讨. 文献 [10] 在此基础上提出了对准移动闭塞系统的元胞自动机模型, 并分析了准移动闭塞系统中的轨道定位单元长度、发车间隔、初始延迟时间等因素对列车延迟传播的影响.

文献 [11] 中建立了移动闭塞系统下列车追踪模型, 该模型没有考虑线路条件和车辆的种类 (高速列车还是低速列车). 这其中线路条件尤其重要. 列车的运行不是在一条线上, 而是在铁路网中运行. 因此本文在 NS 模型和文献 [11] 基于单线模型的基础上, 考虑不同类型列车混跑的情况, 提出了一种网络条件下不同类型列车混跑追踪模型. 并使用该模型模拟和分析网络条件下列车延迟传播规律.

## 2. 移动闭塞原理

移动自动闭塞的思想和原理早在上个世纪 60 年代由汪希时提出. 它的基本原理是在车站间的区间不再划分闭塞分区. 列车之间的运行间隔是可以随时调整的. 实际上该系统把先行列车的后部看作是假想的闭塞区间. 由于这个假想的闭塞区间随着列车的移动而移动, 所以叫做移动闭塞.

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金 (批准号: 60634010) 北京市科技计划 (批准号: DX200510010) 北京市科委计划项目 (批准号: D0604003040811) 资助的课题.

移动闭塞系统有如下特点:

- 1) 线路没有固定划分的闭塞分区,闭塞分区随前一列车的移动而移动.
- 2) 列车间隔是按后续列车在当前速度下所需的制动距离,加上安全余量计算和控制的,确保不追尾.
- 3) 制动的起点和终点是动态的,轨旁设备的数量与列车运行间隔关系不大.
- 4) 可实现较小的列车运行间隔.
- 5) 采用地-车双向传输,信息量大,易于实现无人驾驶.

图 1 描述的是绝对制动距离的移动闭塞原理.

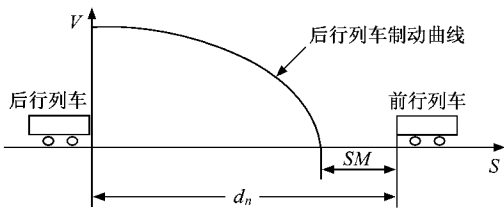


图 1 移动闭塞原理示意图

对于移动闭塞系统,文献[14]中提出了三种模式.绝对距离制动的移动闭塞,即移动空间闭塞(MSB)是最简单的模式,该模式的前后列车间最小瞬间距离  $d_n$  满足以下关系:

$$d_n = v_{\max}^2(2b) + SM, \quad (1)$$

这里  $v_{\max}$  表示列车的最大速度,  $b$  表示列车减速度,  $SM$  表示安全距离.这种模式下,追踪列车需要知道前行列车的位置和本车的位置.

移动时间闭塞(MTB)模式中,两列列车通过线路上任何点的时间间隔总是固定的,和行驶速度无关.该模式的前后列车间最小瞬间距离满足以下关系:

$$d_n = v_{\max} v_f(2b) + SM, \quad (2)$$

其中  $v_f$  表示追踪列车的速度,其他同上.

相对制动距离的移动闭塞也称为完全移动闭塞(PMB).它是一种理想化的模式.该模式下所需要的信息是前行列车和本车的相对位置以及前方列车的速度.该模式的前后列车间最小瞬间距离满足以下关系:

$$d_n = v_f^2(2b) + SM, \quad (3)$$

这时的瞬间距离是在前方紧邻列车突然停车,避免碰撞的最小距离.效率比前两种模式都要高,但现阶段出于安全考虑,一般不会采用这种模式.

段出于安全考虑,一般不会采用这种模式.

在本文提出的模型中采用的是第一种模式,移动空间闭塞模式.在移动闭塞控制系统下,当前方唯一停靠的站点时,分两种情况考虑.若车站内没有停靠列车,那么追踪列车应减速进站,列车和车站间的距离应满足

$$d_n = v_{\max}^2(2b). \quad (4)$$

若车站内有停靠的列车,那么追踪列车和车站间的最小瞬间距离应满足

$$d_n = v_{\max}^2(2b) + SM. \quad (5)$$

## 3. 追踪模型

### 3.1. 元胞自动机模型

#### 3.1.1. 元胞自动机的提出

上世纪 50 年代, Von Neumann 提出 CA 模型,由于受到当时计算机计算水平的限制,并没有引起太多的关注.直到上世纪 70 年代, Conway 提出了生命游戏机(game of life)的概念后,才引起人们极大的兴趣. Wolfram 等人 80 年代对于元胞自动机模型的研究为元胞自动机的研究和发展打下了坚实的基础.从此以后元胞自动机被广泛应用于各个领域的模拟研究,包括化学、军事、物理以及道路交通等等<sup>[11]</sup>.

元胞自动机(CA)是定义在一个由有限状态的元胞(cell)组成的离散元胞空间上,按照一定的局部规则,在离散时间上演化的动力系统.它由元胞、元胞空间、状态集、邻居和规则五个基本的组成部分组成,具有齐性、离散性、同步性、确定性等特点.在元胞自动机中,某一时刻一个元胞的状态只与前一时刻此元胞的状态以及前一时刻相邻元胞的状态有关.这些特性与交通流的特性有着极其相似之处,这是使用元胞自动机建立交通流模型的原因.

#### 3.1.2. NS 模型

Nagel 和 Schreckenberg 提出的考虑车速分布的随机加速、减速的 CA 模型,简称 NS 模型.在 NS 模型中,将道路视为长度为  $L$  的一维离散格点链,每一个格点在每一时刻或为空,或被一辆车占据.用  $X_i(t)$  表示第  $i$  辆车  $t$  时刻的位置,则  $\text{gap}_i(t) = X_{i+1}(t) - X_i(t) - 1$  表示第  $i$  辆车  $t$  时刻与前方紧邻车辆之间的间距.在每一演化时步  $t \rightarrow t+1$  中,格点上的每一辆车,其状态都按照 NS 模型的演化规则进行速度和位置的并行更新. NS 模型车辆状态演

化的更新规则如下。

1)加速过程:

$$V_i(t+1) \rightarrow \min(V_i(t)+1, V_{\max});$$

2)确定性减速过程:

$$V_i(t+1) \rightarrow \min(V_i(t), \text{gap}_i(t));$$

3)以概率  $P$  随机减速过程:

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

4)位置更新:

$$X_i(t+1) \rightarrow X_i(t) + V_i(t+1).$$

### 3.2. 基于元胞自动机的不同类型列车混合追踪模型

本文在 NaSch 模型和文献 [11] 模型的基础上,建立了网络条件下不同类型列车混跑追踪模型.模型算法的步骤如下:

1)根据预先制定的列车运行图发车.发车同时规定了列车的类型(长途还是短途,进路信息和需要停靠车站的信息).

2)每个车站在同一时刻只能停靠一趟列车,后行追踪列车在前方车站有车占用时必须在车站外等候.

3)第  $n$  辆列车出站后按照更新规则和边界条件在线路上行驶.

在介绍更新规则之前,先定义一个列车当前限速的概念.列车的当前限速受很多因素的影响,这其中包括列车的最大速度  $V_{\max}$ ,线路限速  $V_L$ ,以及列车与若干个前方限速点(将停车点视为限速为 0 的限速点)的距离等.由运动学定律

$$v_t = \sqrt{v_0^2 + 2bs}, \quad (6)$$

其中  $v_t$  为相对于前方某个限速点的列车限速,  $v_0$  为限速点限速,  $b$  为减速度,  $s$  为相对距离,我们可以分别推出对于所有限速点的列车限速,所有这些限速的最小值作为列车相对于所有限速点的限速  $V_x$ .则列车当前限速就是前面所提到的三种限速的最小值  $V(t, s) = \min(V_{\max}, V_L, V_x)$ .

本文模拟中,对于文献 [11] 的移动闭塞下列车追踪模型的更新规则作了一些变动,更新规则中不再分情况考虑,而是根据所有限速因素直接计算出当前限速,规则如下.

(a)更新速度:

如果  $V_n < V(t, s)$

$$V_n = V_n + a;$$

或

$V_n > V(t, s)$

$$V_n = V_n - b;$$

则

$$V_n = V_n.$$

(b)更新位置:

$$X_n = X_n + V_n.$$

这其中  $a$  为列车加速度,  $b$  为列车减速度,  $V_n$  为表示列车  $n$  的速度,  $X_n$  表示列车  $n$  的位置.  $V(t, s)$  为列车的当前限速.

4)若列车到达终点站且满足停站时间,则列车直接离开网络模型,若列车到达位置在  $i \geq L$  处,则列车直接驶离网络模型.

5)模拟中,规定元胞自动机的迭代时间间隔为 1 s,一个元胞代表 1 m.也就是说当列车以  $V_{\max} = 10 \text{ cells/update}$  时,对应实际的列车速度为 36 km/h.

## 4. 模拟结果及分析

### 4.1. 网络条件下不同类型列车混跑模拟

将上述模型放到图 2 的铁路网络中进行模拟.这部分铁路网络中共有 6 个车站  $A, B, C, D, E, F$ .其中  $A$  和  $E$  为终点站,  $B, C, D, F$  为中间站.包括 4 条主要线路  $BC, BF, CD$  和  $DF$  以及 2 条次要线路  $AB$  和  $DE$ .每段线路的长度分别为  $AB = 150, BC = 250, CD = 200, DE = 400, DF = 200$  和  $BF = 250$ .模拟时使用了两种类型的列车,一种长途列车,最大车速  $V_{\max} = 10$  和一种短途列车,最大车速  $V_{\max} = 6$ .加速度  $a$  和减速度  $b$  均为 1,列车的长度  $LT = 1$ ,保护区段长度  $LS = 25$ .模拟时间长度为  $T = 1000$ .

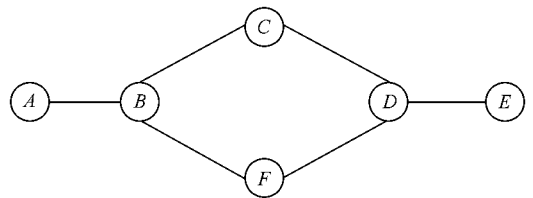


图 2 模拟的铁路网络图

表 1 给出了在图 2 所示的铁路网络上每天运行的列车进路和数量.这里列车的数量,例如 11 表示每天发 11 趟列车从  $A$  到  $E$ .此外还给出了列车在相应车站的停站时间.

图 3 所示的时刻表显示了车站  $A, B, C, D, E$  之间的模拟结果.横轴为时间,纵轴为位置.节点  $A$  代表 0 点,节点  $E$  代表最远距离的车站  $E$ .图 3 中,

深色斜线表示列车行驶时每时刻的位置变化. 这些斜线分两种类型. 一种代表上行列车, 另一种代表下行列车. 从图 3 中可以看出这些线路的始发站和终点站. 当列车经过一个中间站时, 列车会停车等候乘客上下车. 模拟的结果表明本文提出的模型可以描述列车时刻表的主要特性.

表 1 列车进路发车表 ( $T = 1000$ )

运营类型	进路	数量	停站时间				
			A 站	B 站	C 站	D 站	E 站
长途	A - B - C - D - E	11	10	10	10	10	10
长途	E - D - C - B - A	6	10	10	10	10	10
短途	A - B - C	21	10	10	10		
短途	E - D - C	6	10	10	10		
短途	E - D	21	10	10			

将会阻碍后面高速长途列车的行驶.

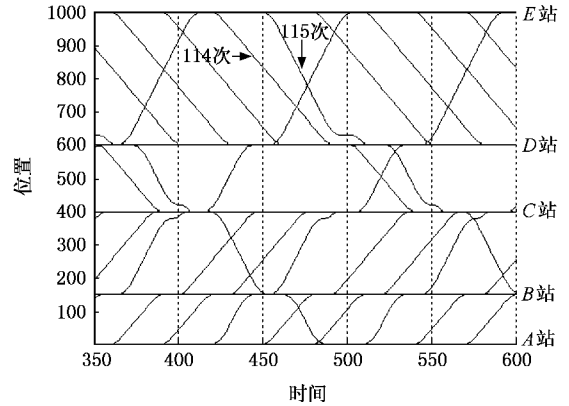


图 4 时刻表 (部分)

在实际轨道交通中, 列车在行驶过程中会有若干次停车. 这是因为前方车站被其他列车占据, 或是在车站等待乘客上下车. 图 5 显示了铁路网络中某一列车的运行曲线. 该列车从 E 站出发, 终点站为 A 站. 图中曲线上共有 5 处横线显示了列车在网络中停车的位置, 即速度为 0 的地方. 这其中的 3 次停车是在车站 B, C, D, 其余 2 次是由于前行列车占据车站, 该列车只能在站外停车等候前方列车出站.

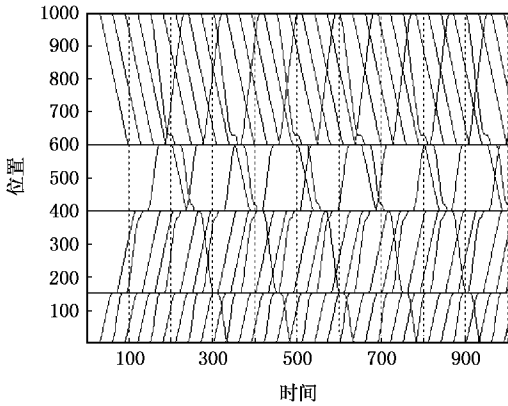


图 3 模拟得到的时刻表

本文的模型中使用的是复线的铁路网络. 复线允许列车双向同时运行. 所有在复线区间运行的列车都可以立即进入区间运行. 在我们模拟的例子中, 考虑了由快慢列车组成的混合交通流的情况. 在混合交通流中, 列车不再以相同的速度行驶. 在线路上将会发生相遇和追踪的情况. 图 4 是时刻表的一部分. 从图 4, 可以清晰地看到很多个上行列车位置-时间曲线和下行列车的位置-时间曲线构成的交叉点. 这些交叉点就是各个列车相遇的地方. 此外我们观察在时刻 450 左右发车的 114 次和 115 次列车, 其中 114 次是 E - D - C 的短途列车, 115 次是 E - D - C - B - A 的一趟长途列车. 115 次在追上 114 次然后保持一个安全距离追踪运行, 114 次进 D 站停车, 115 次在车站外停车等候. 这些都是实际铁路交通中列车运动的特征. 事实上, 当两辆列车行驶在同一段线路区间上时, 短途列车是一辆低速列车, 它

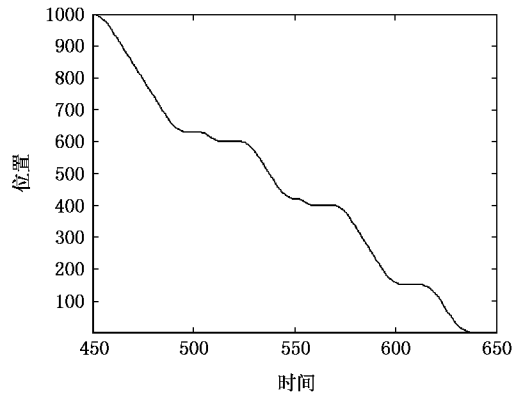


图 5 某一列车的运行曲线

前行列车在车站处形成延迟, 随着延迟时间的增加, 追踪列车接近车站时将被迫减速甚至停在站外等候. 图 6 中显示了随着前行列车在车站 A 处延迟时间的增加, 追踪列车的速度 - 距离曲线的变化. 显然, 延迟越久, 追踪列车的速度 - 距离曲线越远离正常进站时的制动曲线, 受到的影响也就越大.

模拟参数如下: 列车最大速度  $V_{max} = 10$ , 正常停站时间  $T_D = 2$ , 其他参数同上.

图 7、图 8 为形成初始延迟后, 后行列车各自的

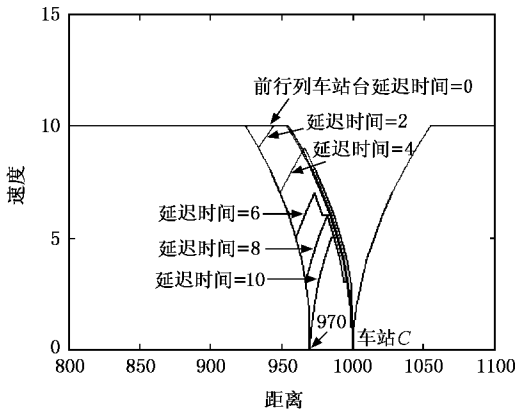


图 6 追踪列车的速度-距离曲线

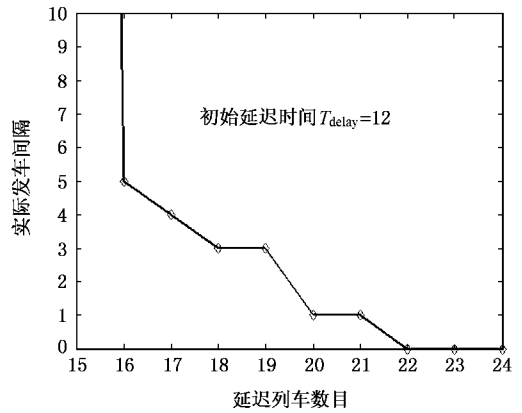


图 8 在不同发车间隔松弛时间下受延迟影响的后续列车数目曲线图

晚点时间变化规律,图中  $T_{slack}$  为发车间隔松弛时间,  $T_{slack} = T_{interval} - T_{min}$  ( $T_{interval}$  为实际发车间隔,  $T_{min}$  为列车最小追踪间隔).从图 7 可以看出,后行列车晚点时间均小于前车晚点时间.  $T_{slack} = 1$  对应的晚点曲线明显高于其他晚点曲线.而从图 8 可以看到随着发车间隔松弛时间的加大,受延迟影响的后续列车的数目显著减少.可见发车间隔适当大于最小

间隔时间,在很大程度上可以提高移动闭塞系统的运行稳定性.

#### 4.2. 网络条件下同类型列车运行模拟

接下来我们使用相同类型列车进行模拟,通过和国内外较成熟的理论公式进行比较,来验证本文模型的有效性和可靠性.

模拟中使用的参数除了列车最大速度  $V_{max}$  的取值范围变为 0 到 15 外,其余同前.列车将从 A 站按一定时间间隔连续出发,出发间隔先按照文献 1 和文献 15 的公式计算得到的理论值作为初始值,然后再经过调整,得到连续出发的列车相互影响时的间隔值作为列车最小追踪间隔的模拟值.

列车最小追踪间隔是衡量闭塞控制系统的一个重要参数.根据文献 1 和文献 15,移动闭塞系统下列车最小追踪间隔是前行列车刚刚出清车站,且驶过安全保护段  $L_S$  后,后续列车则以区间最大允许速度  $V_{max}$  行驶,并位于距车站出口的距离正好等于列车制动距离加上制动反映时间内列车驶过的距离.所以列车的安全间隔时间计算公式如下:

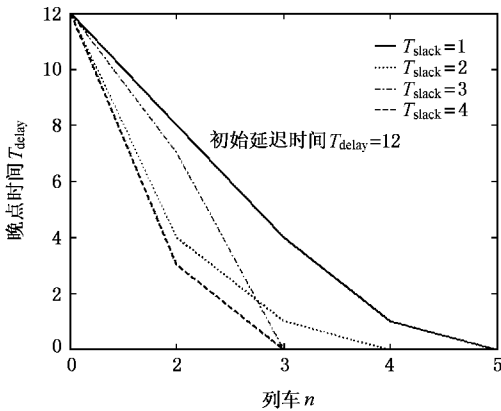


图 7 在不同发车间隔松弛时间下各个后行列车的晚点时间曲线图

$$H_{min} = \begin{cases} \sqrt{\frac{2(L_T + L_S)}{a}} + t_{an} + \frac{V_{max}}{b}, & V_{max} \geq \sqrt{2(L_T + L_S)}, \\ \frac{2a(L_T + L_S) + V_{max}^2}{2aV_{max}} + t_{an} + \frac{V_{max}}{b}, & V_{max} < \sqrt{2(L_T + L_S)}, \end{cases} \quad (7)$$

其中  $H_{min}$  为列车安全间隔时间,  $L_T$  为列车长度,  $a$  为列车加速度,  $b$  为列车减速度,  $t_{an}$  为系统反应时

间.本文模型中没有考虑系统反应时间,因此  $t_{an}$  为 0.(7)式就简化为

$$H_{\min} = \begin{cases} \sqrt{\frac{2(L_T + L_S)}{a}} + \frac{V_{\max}}{b}, & V_{\max} \geq \sqrt{2(L_T + L_S)}, \\ \frac{2a(L_T + L_S) + V_{\max}^2}{2aV_{\max}} + \frac{V_{\max}}{b}, & V_{\max} < \sqrt{2(L_T + L_S)}. \end{cases} \quad (8)$$

对于不同  $V_{\max}$ , 列车最小追踪间隔的理论计算值和模型模拟值的比较结果如图 9 所示. 图中实线为理论计算结果, 点划线为模拟结果. 从中可以看出模拟结果和理论结果非常接近, 这说明本文的模型可以较好地模拟移动闭塞系统下列车追踪运行.

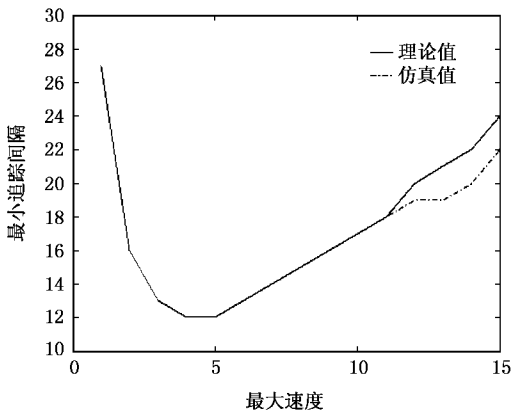


图 9 最大速度  $V_{\max}$  与最小间隔时间  $T_{\min}$  的关系

## 5. 结 论

本文描述了一种移动闭塞下考虑不同类型列车混跑时基于元胞自动机的列车追踪模型. 首先将该模型放到网络条件下, 模拟网络条件下列车的运行情况. 模拟的结果显示该模型基本可以描述网络条件下列车运行的特点. 然后再利用该模型模拟了网络条件下列车延迟的交通现象, 这为研究列车的延迟规律提供了一个很好的模型. 模拟的结果表明, 适当增加发车间隔松弛时间可以大幅度减弱系统列车的延迟传播. 这对于解决实际的铁路交通问题是有参考价值的. 最后利用该模型进行模拟, 得到了移动闭塞系统下的列车最小间隔时间, 并且模拟结果与理论公式的计算结果比较符合, 证明了该模型的可靠性和有效性.

我国铁路运营模式的显著特点是不同等级列车混跑, 客货列车共线, 高速和普通列车共站. 因此本文提出的模型对于我国铁路网中客货共线混行情况下列车延迟传播规律的研究有着重要的理论意义和实用价值.

- [1] Takeuchi H, Goodman U, Sone S 2003 *IEE Proc. Electr. Power Appl.* **150** 483
- [2] Zhang Y 1998 *Ph. D. Thesis* (Beijing: Northern Jiaotong University) p101 (in Chinese) [张勇 1998 博士学位论文(北京: 北方交通大学)第 101 页]
- [3] Zhao M 1996 *Ph. D. Thesis* (Beijing: Northern Jiaotong University) p70 (in Chinese) [赵明 1996 博士学位论文(北京: 北方交通大学)第 70 页]
- [4] Mou Y B, Zhong C W 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 5597 (in Chinese) [牟勇彪、钟诚文 2005 物理学报 **54** 5597]
- [5] Lei L, Dong L G, Dai S Q et al 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 1711 (in Chinese) [雷丽、董力耘、戴世强等 2006 物理学报 **55** 1711]
- [6] Ge H X, Zhu H B, Dai S Q 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 4621 (in Chinese) [葛红霞、祝会兵、戴世强 2005 物理学报 **54** 4621]
- [7] Wu K F, Kong L J, Liu M R 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 6274 (in Chinese) [吴可非、孔令江、刘慕仁 2006 物理学报 **55** 6274]
- [8] Kuang H, Kong L J, Liu M R 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 2894 (in Chinese) [邝华、孔令江、刘慕仁 2004 物理学报 **53** 2894]
- [9] Zheng Y S, Tan H L, Kong L J et al 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 3516 (in Chinese) [郑容森、谭惠丽、孔令江等 2005 物理学报 **54** 3516]
- [10] Zhou H L, Gao Z Y, Li K P 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 1706 (in Chinese) [周华亮、高自友、李克平 2006 物理学报 **55** 1706]
- [11] Ning B 2005 *Ph. D. Thesis* (Beijing: Beijing Jiaotong University) p59 (in Chinese) [宁滨 2005 博士学位论文(北京: 北京交通大学)第 59 页]
- [12] Li K P, Gao Z Y, Ning B 2005 *J. Comp. Phys.* **209** 179
- [13] Li K P, Gao Z Y, Ning B 2005 *Int. J. Mod. Phys. C* **16** 921
- [14] Pearson 1973 *Ph. D. Thesis* (Loughborough: University of Technology) p80
- [15] Luo L Y, Wu W Q 2005 *China Railway Science.* **26** 119 (in Chinese) [罗丽云、吴汶麒 2005 中国铁道科学 **26** 119]

# Network-based train-following model and study of train 's delay propagation<sup>\*</sup>

Xun Jing Ning Bin Li Ke-Ping

( *State Key Laboratory of Rail Traffic Control and Safety* , *Beijing Jiaotong University* , *Beijing* 100044 , *China* )

( Received 14 November 2006 ; revised manuscript received 2 January 2007 )

## Abstract

Based on the cellular automaton concept , this paper presents a train-following model for the moving block system with different types of trains running. We apply the model to the rail network and simulate the running of trains. We also simulate the traffic phenomenon of delay propagation in moving block system. We investigate how the main factors including train deliver time interval and initial delay affect the delay propagation of trains. The simulation results are compared with the theoretical results to verify the reliability and feasibility of the model.

**Keywords** : cellular automaton , rail network , train-following model , moving block

**PACC** : 0550

---

<sup>\*</sup> Project supported by the National Natural Science Foundation of China( Grant No. 60634010 ) , the Science and Technology Program of Beijing , China ( Grant No. DX2005I0010 ) and the Fund for Beijing Municipal Science and Technology Commission Project( Grant No. D0604003040811 ).