

准移动闭塞系统的元胞自动机模型及列车 延迟传播规律的研究*

周华亮 高自友[†] 李克平

(北京交通大学交通运输学院,北京 100044)

(2005 年 6 月 6 日收到,2005 年 11 月 1 日收到修改稿)

在 NaSch 模型的基础上,针对铁路交通的特点提出一种用于模拟准移动闭塞系统的元胞自动机模型.应用该模型模拟了准移动闭塞系统列车延迟传播的交通现象,分析了准移动闭塞系统中的轨道定位单元长度、发车时间间隔、初始延迟时间等因素对列车延迟传播的影响.

关键词:元胞自动机,交通流,准移动闭塞

PACC:0550

1. 引 言

随着铁路列车运行速度和密度的提高,当某辆列车运行出现延迟时,后续列车的运行也会受到影响而发生延迟,从而造成列车的延迟传播.因此,对列车延迟传播规律的研究便具有重要的理论意义和实用价值.前苏联学者运用概率论与数理统计的方法研究了在不同列车追踪间隔条件下,列车运行延迟对系统通过能力的影响.日本学者应用流体力学理论研究了前车延迟对后车运行的影响^[1].这些研究都是针对固定闭塞信号系统的.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重视.我国的赵明^[2]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,张勇^[3]开发了移动闭塞列车运行仿真系统对列车延迟进行了仿真分析,Takeuchi 等^[4]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.就目前掌握的资料看,很少有关于准移动闭塞(moving-like block,简称 MLB)系统列车延迟传播规律的研究,因而开展这方面的研究便具有重要的理论价值.

元胞自动机(cellular automaton,简称 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^[5-12].CA 模型的时间、空间、状态均离散,规则简单,非常适合计算机模拟^[5,9].最为基本的一维 CA 模型是由 Wolfram 命名的 184 号规则,该规则虽然简单却可以反映车流的一些相变现象,并且成为后续一些重要交通模型的基础.在 184 号规则基础上 Nagel 和 Schreckenberg 提出了 NaSch 模型,该模型主要是引入了慢化概率并且规定最大车速不为 1,在一定的程度上可以模拟出实际的交通状况.NaSch 模型一石激起千层浪,许多科研工作者在此基础上提出改进模型,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,我国的李克平、高自友等^[13,14]在 NaSch 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.该模型根据铁路交通的特点,去掉了 NaSch 模型中的慢化概率步骤,考虑到了影响列车运行的前车、车站等因素.该模型为铁路交通列车流的研究开辟了一条新思路.

本文是在 NaSch 模型和文献^[13]模型的基础上提出 MLB 系统的 CA 模型,并尝试用该模型来模拟探讨 MLB 系统的列车延迟传播规律.

* 国家杰出青年科学基金(批准号:70225005)、国家自然科学基金(批准号:70471088)、高等学校博士学科点专项科研基金(批准号:20050004005)和北京市科技计划(批准号:DX200510010)资助的课题.

[†] 通讯联系人. E-mail: zygao@center.njtu.edu.cn

2. 模型

2.1. MLB 系统

在采用音频数字轨道电路作为列车定位与信息传输手段时,其闭塞方式既区别于常规自动闭塞,也区别于移动闭塞,我们称之为 MLB. MLB 与移动闭塞的最根本区别在于:后者是通过连续数据通信实现列车定位的,定位单元可以认为是无限小,而前者是利用音频数字轨道电路实现列车非连续定位的,定位单元的长度就是音频数字轨道电路的长度.两种闭塞方式的列控方式均为目标距离控制模式(又称连续式一次速度控制).目标距离控制模式根据目标距离、目标速度及列车本身的性能确定列车制动曲线,不设定每个闭塞分区速度等级,采用一次制动方式. MLB 下的追踪目标点是前行列车尾部所占用闭塞分区的始端(移动闭塞下的追踪目标点是前行列车的尾部),当然会留有一定的安全距离 d_s . 后行列车从最高速开始制动的计算点是根据目标距离、目标速度及列车本身的性能计算决定的. MLB 列车控制原理如图 1 所示.

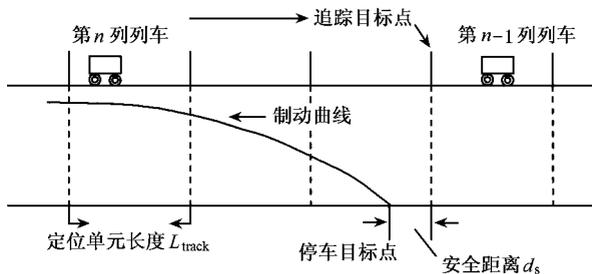


图 1 MLB 列车控制原理示意图

2.2. CA 模型

下面我们建立 MLB 系统的 CA 模型.模型是建立在 NaSch 模型和文献 [13] 的 CA 模型基础上的.假设铁路轨道由 L 个格子组成.每个格子大小相同,记为 $i = 1, 2, \dots, L$.系统的时间是离散的.每个格子或者为空,或者被车辆占据.列车速度取 $0 \sim v_{\max}$ 之间的整数.

在介绍该模型的列车运动更新规则之前,我们先定义一个列车动态限速函数 $v_1 = F(s)$,其中 s 为第 n 列列车的车头与该车前方停车目标点间的距离.列车 n 的前方停车目标点的概念定义为: (1) 若

列车 n 运行前方为车站,则该车的停车目标点指车站处的停车点; (2) 若列车 n 运行前方为第 $n-1$ 列车,则列车 n 的停车目标点指列车 $n-1$ 的尾部所占闭塞分区的始端后退 $d_s + 1$ 个格子的点(这样可以保证列车 n 停止时与追踪目标点的距离等于安全距离 d_s) 如图 1 所示.

由运动学定律知,

$$v_1^2 - v_0^2 = 2bs, \quad (1)$$

式中, v_1 为列车制动运行过程的速度, v_0 为停车目标点的速度, $v_0 = 0$, b 为列车减速度.由 (1) 式得

$$v_1 = \sqrt{2bs}. \quad (2)$$

结合 CA 模型整数特性就有

$$v_1 = F(s) = \text{In}(\sqrt{2bs}). \quad (3)$$

CA 模型中的列车在每一时步的并行更新规则如下:

1) 列车 n 的速度更新.

当 $s > s_b$ 则

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

当 $s < s_b$ 则

$$v_n \rightarrow \min(v_n + a, F(s)).$$

当 $s = s_b$ 则

$$v_n \rightarrow v_n.$$

2) 列车 n 的位移更新.

$$x_n \rightarrow x_n + v_n.$$

上述规则中, $s_b = v_{\max}^2 / 2b$, 其值为列车从最大速度 v_{\max} 减速到零所行驶的距离, v_n 为列车 n 的速度, x_n 为列车 n 的位移, a 为列车的加速度.

我们的模型采用的是开放边界条件.边界条件定义如下: (1) 系统每刷新 T_{interval} 次后,若系统最后一辆列车所占用闭塞分区的始端和 $i = 1$ 的格子之间的距离大于 $s_b + d_s$,则在 $i = 1$ 格子处产生一辆速度 $v = v_{\max}$ 的列车,该车立即根据上述演化规则运动.这里 T_{interval} 为列车的发车时间间隔,一般情况下 T_{interval} 应不小于列车最小间隔时间 T_{\min} .关于 MLB 系统下 T_{\min} 的计算,我们将在下面详细介绍. (2) 若列车的位移大于 L ,该车将驶离系统.为了使模拟结果与真实情况对照,我们规定 CA 模型中的系统刷新时间间隔为 1 s ,一个元胞长度对应 1 m .这就意味着,当 $v_{\max} = 20$ 时,对应实际速度为 $v_{\max} = 72 \text{ km/h}$.

3. 模拟分析与讨论

我们用上述的 CA 模型来模拟 MLB 系统的列车

延迟传播. 铁路段总的格子数 $L = 2000$, 在中央处设置一个车站, 车站内的车头停车点位置为第 1000 格子. 系统演变总时间 $T = 5000$. 列车的加速度 a 和减速度 b 均为 1, 列车的长度 $L_{\text{train}} = 50$, $v_{\text{max}} = 20$, $T_d = 10$, $d_s = 10$. 这里, T_d 为列车按规定应该在车站停留的时间, 用 L_{track} 表示轨道定位单元长度. 由于列车最小间隔时间是追踪运行的两列车间的最小允许间隔时间, 一般在车站区域会得到较大的值, 因此这里仅讨论车站区域的列车最小间隔时间. 文献 [15, 16] 提供了计算 MLB 系统列车最小间隔时间的方法, 我们用该方法计算出一个时间间隔, 然后以该时间间隔为初始值, 按一定的步长逐步增加或减少该初始值, 最终利用文中模型数值模拟得出列车运行彼此不受影响的最小间隔时间, 结果如图 2 所示.

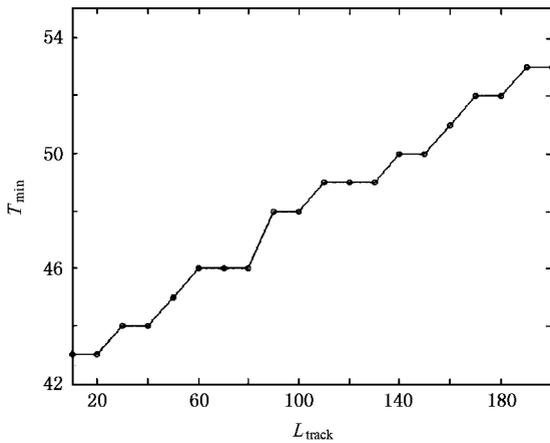


图 2 MLB 系统下定位单元长度 L_{track} 与最小间隔时间 T_{min} 的关系

第一辆列车在车站形成初始延迟时间 $T_{\text{delay}} = 60$ 时, MLB 系统下发车时间间隔 T_{interval} 与晚点列车总数 N_{total} 以及晚点总时间 T_{total} 的关系分别如图 3 和图 4 所示. 从图 3 可以看出: 随着 T_{interval} 的增加, MLB 系统下的晚点列车总数 N_{total} 呈阶梯状递减; 对于相同的 T_{interval} , 定位单元长度 L_{track} 越小则 N_{total} 越小, 晚点曲线也越逼近完全移动闭塞 (pure moving block, 简称 PMB) 下的晚点曲线 (根据文献 [13] 的模型模拟得到). 从图 3、图 4 还可以看出, 当 T_{interval} 较大时, 不同定位单元长度下的晚点列车总数 N_{total} 和晚点总时间 T_{total} 均接近于 PMB 下的情况.

图 5 为在形成初始延迟后, 后行列车各自的晚点时间变化规律, 图中 T_{slack} 为发车间隔松弛时间, $T_{\text{slack}} = T_{\text{interval}} - T_{\text{min}}$. 从图 5 可以看出, 后行列车晚点时间均小于前车晚点时间. $T_{\text{slack}} = 0$ 对应的晚点曲

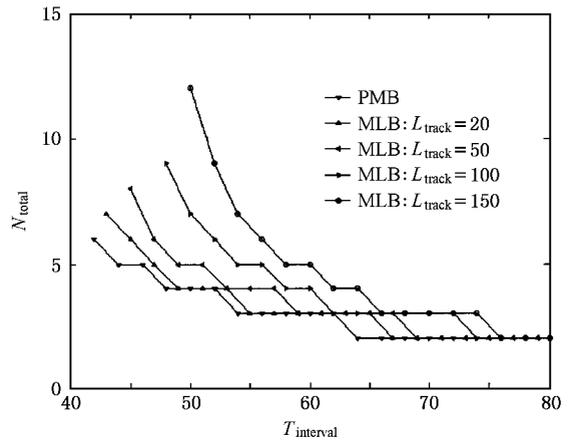


图 3 初始延迟时间 $T_{\text{delay}} = 60$ 时, 在不同定位单元长度情况下, 发车时间间隔 T_{interval} 与晚点列车总数 N_{total} 的关系

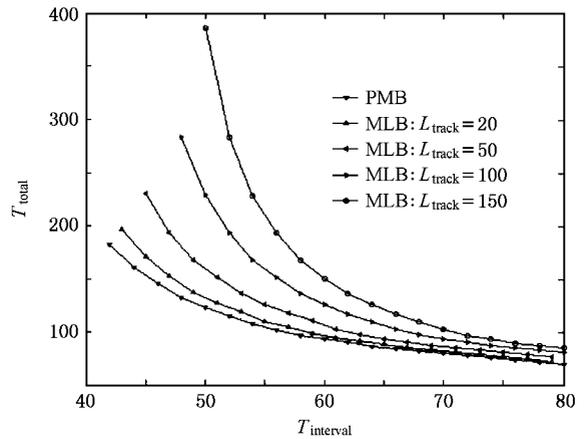


图 4 初始延迟时间 $T_{\text{delay}} = 60$ 时, 在不同定位单元长度情况下, 发车时间间隔 T_{interval} 与晚点总时间 T_{total} 的关系

线明显高于其他晚点曲线, 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 MLB 系统的运行稳定性.

接着我们考察初始延迟时间 T_{delay} 和晚点列车总数 N_{total} 的关系, 如图 6 所示. 随着 T_{delay} 的增加, N_{total} 呈阶梯状增长. 对于相同的 T_{delay} , T_{slack} 越大则 N_{total} 越小, 这与图 3 是一致的. 同时从图 5 还可以看出, 同一条曲线上的每个阶梯宽度 (记为 X) 是相等的, 不同曲线上的阶梯宽度 X 随 T_{slack} 变大而变大, T_{slack} 的值每增加 1, X 的值相应也增加 1, 其关系如表 1 所列.

此外, 为了说明所建模型的有效性和可靠性, 我们把本文中的模型和较成熟的理论公式进行了对比分析. 列车最小间隔时间是列车追踪运行中后车运

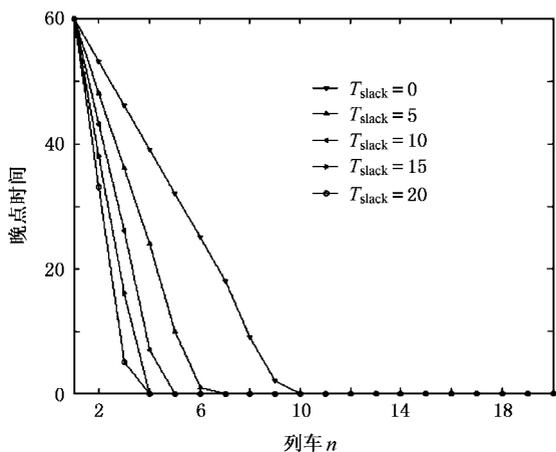


图 5 初始延迟时间 $T_{\text{delay}} = 60$, 定位单元长度 $L_{\text{track}} = 100$ 时, 在不同发车间隔松弛时间下的各个后行列车的晚点时间曲线图

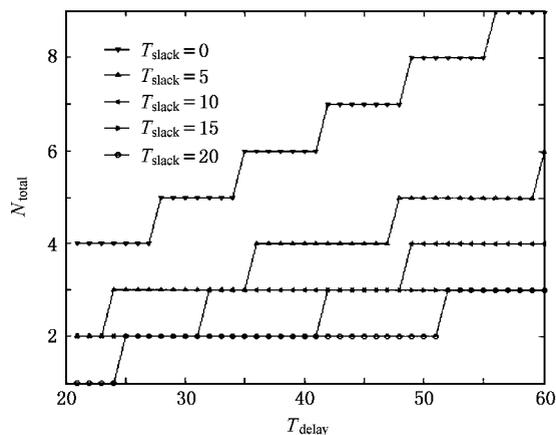


图 6 定位单元长度 $L_{\text{track}} = 100$ 时, 在不同发车间隔松弛时间下, 初始延迟时间 T_{delay} 与晚点列车总数 N_{total} 的关系

表 1 发车间隔松弛时间 T_{slack} 与晚点曲线阶梯宽度 X 的关系

T_{slack}	X
0	7
5	12
10	17
15	22
20	27

行不受前车影响的最小时间间隔, 该值的计算涉及到列车的减速、站间停留、列车启动等多个因素, 是列车追踪运行的一个重要参数. 因此我们利用本文的模型, 通过模拟得到 MLB 系统下的列车最小间隔时间, 并且利用数值模拟结果与目前较成熟的计算该参数的理论公式进行比较来验证本文模型的可靠

性. 目前较成熟的计算 MLB 下列车最小间隔时间的理论公式为^[16]

$$T_{\min} = L_{\text{track}}/v_{\max} [2 + \text{Int}\{ (T_r v_{\max} + v_{\max}^2/2b) / L_{\text{track}} \}] + v_{\max}/2b + T_d + [\alpha d_s + L_{\text{train}} \gamma a]^2, \quad (4)$$

式中, T_r 为列车司机反应时间, 其余参数符号的含义和上述对应参数符号含义相同. 由于本文忽略了列车司机的反应时间, 即 $T_r = 0$, 因此(4)式变为

$$T_{\min} = L_{\text{track}}/v_{\max} [2 + \text{Int}\{ v_{\max}^2 (2L_{\text{track}} b) \}] + v_{\max}/2b + T_d + [\alpha d_s + L_{\text{train}} \gamma a]^2. \quad (5)$$

我们对对比考察了不同的 v_{\max} 下 T_{\min} 的值, 结果如图 7 所示. 图 7 中实线为数值模拟结果, 虚线为理论计算结果. 从图 7 可以看出, 数值模拟结果和理论计算结果符合较好. 由此说明, 应用本文的模型可以较好描述 MLB 条件下的列车运行特点.

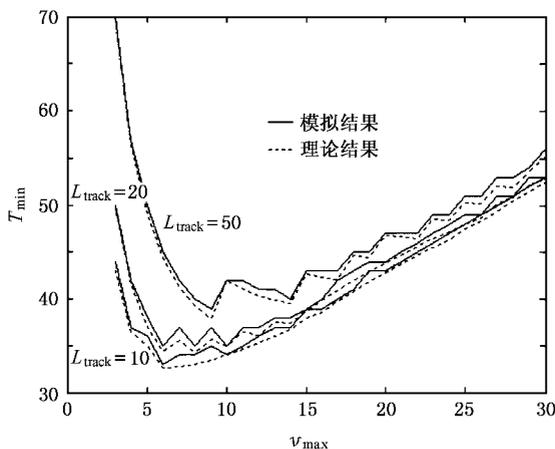


图 7 列车最大速度 v_{\max} 与列车最小间隔时间 T_{\min} 的关系

4. 结 论

本文提出了 MLB 系统的 CA 模型, 应用该模型模拟了 MLB 系统下的列车延迟传播的交通现象, 探讨了列车延迟传播的规律. 重点讨论了定位单元长度、发车时间间隔、初始延迟时间等因素对系统列车延迟传播的影响. 模拟结果表明: 定位单元长度越小延迟传播影响的车辆越少; 适当增加发车间隔的松弛时间可以大幅度减弱系统列车的延迟传播. 最后得出了初始延迟时间与晚点列车总数在不同松弛时间下的变化规律. 这些方法和结论对于研究实际的铁路交通问题是有参考价值的. 此外, 我们还利用本文模型模拟计算了 MLB 系统下的列车最小间隔时

间,数值模拟结果与理论公式较为相符,从而表明了模型的可靠性和有效性.然而,该模型没有考虑铁路

线路特性、列车种类等因素,这些问题有待进一步的研究.

- [1] Liu Y 1998 *Ph. D. Thesis* (Beijing : Northern Jiaotong University) p69 (in Chinese) [刘 英 1998 博士学位论文 (北京 : 北方交通大学) 第 69 页]
- [2] 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]
- [3] 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]
- [4] Takeuchi H , Goodman U , Sone S 2003 *IEE Proc. Electr. Power Appl.* **150** 483
- [5] Bai K Z , Tan H L , Liu M R *et al* 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 2421 (in Chinese) [白克钊、谭惠丽、刘慕仁等 2003 物理学报 **52** 2421]
- [6] Lei L , Xue Y , Dai S Q 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 2121 (in Chinese) [雷 丽、薛 郁、戴世强 2003 物理学报 **52** 2121]
- [7] Tan H L , Liu M R , Kong L J 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 2713 (in Chinese) [谭惠丽、刘慕仁、孔令江 2002 物理学报 **51** 2713]
- [8] Huang P H , Kong L J , Liu M R 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 30 (in Chinese) [黄丘花、孔令江、刘慕仁 2001 物理学报 **50** 30]
- [9] Xue Y , Dong L Y , Dai S Q 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 445 (in Chinese) [薛 郁、董力耘、戴世强 2001 物理学报 **50** 445]
- [10] Wang B H , Wang L , Xu B M *et al* 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 1926 (in Chinese) [汪秉宏、王 雷、许伯铭等 2000 物理学报 **49** 1926]
- [11] 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]
- [12] Li K P , Gao Z Y 2005 *Chin. Phys.* **14** 931
- [13] Li K P , Gao Z Y , Ning B 2005 *J. Comp. Phys.* **209** 179
- [14] Li K P , Gao Z Y , Ning B 2005 *Int. J. Mod. Phys. C* **16** 921
- [15] Zhang J M , Wu W L , Zhang S J 1999 *J. China Rail. Soc.* **21** 6 (in Chinese) [张济民、吴汶麟、张树京 1999 铁道学报 **21** 6]
- [16] Hill R J 1995 *IEE Power Eng. J.* **9** 201

Cellular automaton model for moving-like block system and study of train 's delay propagation^{*}

Zhou Hua-Liang Gao Zi-You[†] Li Ke-Ping

(School of Traffic and Transportation , Beijing Jiaotong University , Beijing 100044 , China)

(Received 6 June 2005 ; revised manuscript received 1 November 2005)

Abstract

Based on the NaSch traffic model , we propose a cellular automaton traffic model for moving-like block system to simulate the railway traffic . We simulate the traffic phenomenon of delay propagation . We also investigate how the main facts including the length of location unit , train time interval and initial delay affect the delay propagation of trains .

Keywords : cellular automaton , traffic flow , moving-like block

PACC : 0550

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation for Outstanding Young Scholars of China (Grant No. 70225005) , the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 70471088) , the Doctoral Program Foundation of Institution of Higher Education of China (Grant No. 20050004005) and the Science and Technology Program of Beijing , China (Grant No. DX200510010) .

[†] Corresponding author. E-mail zygao@center.njtu.edu.cn