

固定闭塞系统下列车运行限速区段交通流特性分析^{*}

付印平 高自友 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 9 月 12 日收到 2007 年 1 月 17 日收到修改稿)

针对铁路交通中四显示固定自动闭塞系统下的限速区段,建立了元胞自动机模型,对限速区段的交通流进行了模拟,分析了限速区段长度、发车时间间隔和限速值对交通流的影响,模拟结果表明减少限速区段长度、适当增加发车时间间隔和提高限速区段限速值都可增加列车在绿灯下的运行时间.

关键词:四显示固定自动闭塞,元胞自动机,交通流

PACC:0550

1. 引 言

列车运行的限制速度包括^[1]线路条件所决定的容许速度、道岔和曲线规定的通过速度、机车车辆的构造速度、施工慢行规定的速度和制动能力限制速度等.从线路来说,主要是曲线半径小、缓和曲线长度不足、坡度大及桥梁等原因造成的限速.研究这些限速下的交通流特性,对于铁路部门的规划设计具有一定的指导意义.张素敏^[2]分析了限速区段长度和限速值对列车运行速度和通过能力的影响,卢祖文^[3]就限速值对列车运行速度的影响进行了探讨,赵国堂^[4]研究了限速区段(点)对压缩运行时分、资源利用率和安全的影响.到目前为止,还没有见到通过建立模型来模拟分析限速区段列车流运行特性的研究.

元胞自动机(cellular automata, CA)是一种时间、空间和状态都离散的模拟模型.使用简单的规则,CA能够模拟出真实而复杂的交通现象^[5-14].Nagel与Schreckenberg于1992年提出了一种描述高速公路交通流的CA模型(NaSch模型)^[9].NaSch模型的特点是规则简单,易于计算机模拟,而且特别适合于大规模的计算机模拟,它在很短的时间里就可以模拟大规模交通网络中的交通现象^[10].通过修改NaSch模型的基本规则,可以描述更为复杂的交通现象.近年来,许多改进的NaSch模型在城市交通流

的研究中得到了广泛的应用^[11-14].Li等人^[15,16]根据轨道交通的特点,在NaSch模型的基础上,提出了一种适用于轨道交通系统的CA模型,对车站附近的列车流进行了模拟,分析了列车流的追踪运行特性.

本文在NaSch模型和文献[15]的基础上,提出了一种基于四显示固定闭塞信号控制系统的元胞自动机模型,并用来模拟列车流在限速区段的运行.在此模拟的基础上,通过分析列车流的时空相图、列车运行的速度分布及运行轨迹等等,来研究和探讨固定闭塞条件下限速区段列车流的动态特性.

2. 模 型

2.1. 固定闭塞系统

固定闭塞的信号系统被广泛地用在现代铁路交通中^[17].采用固定闭塞系统,铁路线路通常被分成若干个闭塞分区或离散的区域,闭塞分区的长度取决于列车的最大速度、刹车曲线以及信号显示的数目等等.一般地,闭塞分区的长度不得小于司机确认信号和制动停车所需要行驶的距离之和.通常情况下,在同一个闭塞分区内最多只能有一辆列车.本文采用四显示的固定闭塞信号系统作为模拟研究的系统.

线路上信号灯的颜色取决于列车的分布.对于四显示的固定闭塞系统,信号灯的颜色有四种,即红

^{*} 国家重点基础研究发展计划(批准号:2006CB705500),国家自然科学基金(批准号:60634010),长江学者和创新团队发展计划(批准号:IRT0605),教育部科学技术研究重点项目(批准号:107007)和新世纪优秀人才支持计划(批准号:NCET-06-0074)资助的课题.

色、黄色、绿黄色和绿色. 一般来讲, 如果某一分区被一辆列车所占据, 该分区的信号灯只能是红色, 否则可以为黄色、绿黄色和绿色. 图 1 为四显示固定闭塞信号系统的原理. 在图 1 中, 每个信号灯的颜色可以为红色、黄色、绿黄色和绿色. 正如图 1 所示, 第一辆列车处在第四分区, 此时第四个信号灯为红色, 第三个信号灯为黄色, 第二个信号灯为绿黄色, 第一个信

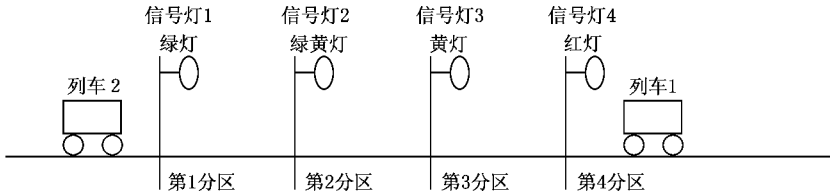


图 1 四显示固定自动闭塞原理

2.2. CA 模型

下面我们建立四显示固定自动闭塞系统的元胞自动机模型. 我们的模型是建立在 NaSch 模型和文献 [15] 的基础上的. 将轨道划分为 L 个元胞, 每个元胞大小相同, 记为 $i = 1, 2, \dots, L$. 每个元胞或者为空, 或者被列车占据. 列车速度取 $0 - v_g$ 之间的整数, 这里 v_g 为列车行驶的最大允许速度. 模拟的轨道线路如图 2 所示, 整个模拟轨道线路采用四显示固定闭塞系统, 分成若干个闭塞分区, 每个闭塞分区

号为绿色. 在这种情况下, 第二辆列车可以以较大的速度驶入第一个分区. 通常, 当列车前方的信号灯为绿色时, 列车可以以较大的速度进入前面的分区; 当列车前方的信号灯为绿黄色时, 列车能不减速或限速行驶 (本文采用限速行驶); 当列车前方的信号灯为黄色时, 列车只能以限速行驶; 当列车前方的信号灯为红色时, 列车只能停留在所在分区.

含若干个元胞, 列车从左至右运行, 第一个信号灯设在轨道线路的最左端, 线路两端为非限速区段, 中间夹有一段限速区段 (图中阴影部分).

轨道线路中列车位置更新有四种不同情况. 如图 2 所示, 情况 1 为非限速区段内列车更新 (不含紧邻限速区段左端的那个闭塞分区), 情况 2 为非限速区段内紧邻限速区段左端的那个闭塞分区内的列车更新, 情况 3 为限速区段内列车更新 (不含限速区段最后一个闭塞分区), 情况 4 为限速区段最后一个闭塞分区内的列车更新.

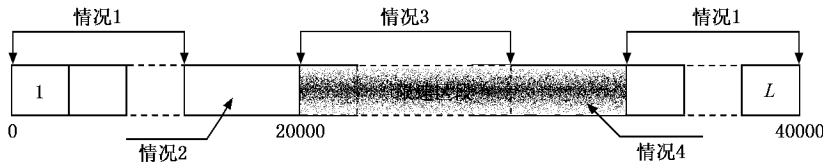


图 2 轨道线路示意图

在介绍更新规则之前, 我们以情况 1 即非限速区段列车更新为例定义三个限速函数: 绿黄色限速函数 $v_{gy1}(s)$, 黄灯限速函数 $v_{y1}(s)$ 和红灯限速函数 $v_{r1}(s)$ (s 为列车车头离前方信号机的距离).

如果列车前方信号灯显示为绿黄色, 列车的速度应该小于等于 $v_{gy1}(s)$, $v_{gy1}(s)$ 应满足 $v_{gy1}(s)^2 - v_{gy}^2 = 2bs$, 由此可以得到

$$v_{gy1}(s) = \text{int}(\min(\sqrt{2bs + v_{gy}^2}, v_{gy})), \quad (1)$$

其中 \min 表示两者之间取小, int 表示取整, b 为减速度, v_{gy} 为列车绿灯下闭塞分区最大允许速度, v_{gy} 为

绿黄色下闭塞分区最大允许速度.

如果列车前方为黄色信号灯, 列车的速度应该小于等于 $v_{y1}(s)$, $v_{y1}(s)$ 应满足 $v_{y1}(s)^2 - v_y^2 = 2bs$, 由此可以得到

$$v_{y1}(s) = \text{int}(\min(\sqrt{2bs + v_y^2}, v_y)), \quad (2)$$

其中 v_y 为黄灯下闭塞分区最大允许速度.

如果列车前方为红色信号灯, 列车应该在红色信号机前停止. 类似可以得到

$$v_{r1}(s) = \text{int}(\min(\sqrt{2bs}, v_r)). \quad (3)$$

其他三种情况下的限速函数与情况 1 类似, 只

是涉及限速区段，需结合考虑限速区段的限速值而已。例如，在情况 3 下，列车行驶在限速区段，由于限速区段有最大允许速度 v_c ，所以列车运行时除必须满足相应前方信号灯的限速要求外，还必须不大于限速区段的最大允许速度 v_c 。图 3 为 $v_y < v_c < v_{gy}$ 时列车在限速区段的速度控制情况。对于情况 2 和情况 4，在进行速度更新时也类似地把限速 v_c 考虑进去。

轨道交通中，由于在列车运行时随机行为是禁止的，所以更新时去掉了 NaSch 模型中的随机慢化步骤。

轨道线路中列车更新规则如下：

步骤 1 更新线路上的列车位置

1) 速度更新

表 1 列车 n 速度更新

列车 n 位置情况	列车 n 前方信号灯颜色			
	绿色	绿黄色	黄色	红色
情况 1	$v_n = \min(v_n + a, \nu_g)$	$v_n = \min(v_n + a, \nu_{gy1}(s))$	$v_n = \min(v_n + a, \nu_{y1}(s))$	$v_n = \min(v_n + a, \nu_{r1}(s))$
情况 2	$v_n = \min(v_n + a, \nu_{g2}(s))$	$v_n = \min(v_n + a, \nu_{gy2}(s))$	$v_n = \min(v_n + a, \nu_{y2}(s))$	$v_n = \min(v_n + a, \nu_{r2}(s))$
情况 3	$v_n = \min(v_n + a, \nu_c)$	$v_n = \min(v_n + a, \nu_{gy3}(s))$	$v_n = \min(v_n + a, \nu_{y3}(s))$	$v_n = \min(v_n + a, \nu_{r3}(s))$
情况 4	$v_n = \min(v_n + a, \nu_c)$	$v_n = \min(v_n + a, \nu_{gy4}(s))$	$v_n = \min(v_n + a, \nu_{y4}(s))$	$v_n = \min(v_n + a, \nu_{r4}(s))$

表 1 中： a 为加速度， ν_n 为列车 n 的速度，

$$\nu_{g2}(s) = \min(\nu_{g2}(s), \nu_g)$$

$$\nu_{gy2}(s) = \min(\nu_{gy2}(s), \nu_{gy})$$

$$\nu_{y2}(s) = \min(\nu_{y2}(s), \nu_y)$$

$$\nu_{r2}(s) = \min(\nu_{r2}(s), \nu_r)$$

$$\nu_{gy3}(s) = \min(\nu_{gy3}(s), \nu_{gy}, \nu_c)$$

$$\nu_{y3}(s) = \min(\nu_{y3}(s), \nu_y, \nu_c)$$

$$\nu_{r3}(s) = \min(\nu_{r3}(s), \nu_r)$$

$$\nu_{gy4}(s) = \min(\nu_{gy4}(s), \nu_{gy}, \nu_c)$$

$$\nu_{y4}(s) = \min(\nu_{y4}(s), \nu_y, \nu_c)$$

$$\nu_{r4}(s) = \min(\nu_{r4}(s), \nu_r)$$

2) 位移

$$x_n = x_n + v_n \Delta t$$

其中 x_n 为列车 n 的位置。

步骤 2 更新信号灯的颜色

如果 $B(k) = 1$

则 $color(k) = '红'$

如果 $B(k+1) = 1$

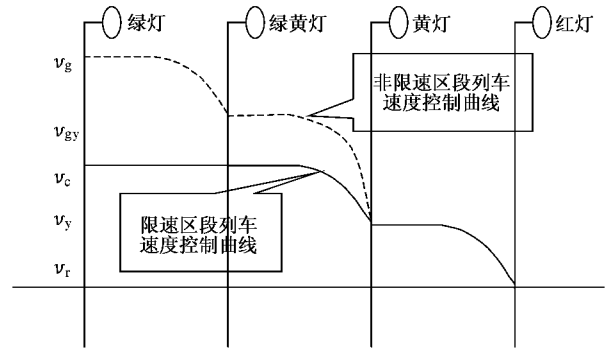


图 3 列车速度控制曲线

表 1 为列车 n 在四种情况下根据前方信号灯颜色的速度更新。

则 $color(k) = '黄'$

如果 $B(k+2) = 1$

则 $color(k) = '绿黄'$

否则 $color(k) = '绿'$

其中 $B(k)$ 表示闭塞分区 k 的状态，1 表示有车，0 表示无车； $color(k)$ 表示 k 的信号灯颜色。

我们的模型采用开放边界条件，定义如下：1) 初始时刻整个轨道全空，线路上无列车。系统每更新 I_k 次后，若系统第一个信号灯颜色为绿色，则在 $i = 1$ 处产生一列速度为 v_g 的列车，该列车立即按系统更新规则进行更新。这里 I_k 为列车的发车时间间隔。2) 若列车的位移大于 L ，即在 $i = L$ 处，列车移出系统。为了使模拟结果和真实情况可对照，我们规定一个元胞长度对应 1 m，系统更新的时间间隔为 1 s。这就意味着 $v_g = 45$ 元胞/更新步对应的实际最大限速 $v_g = 162$ km/h。

3. 模拟结果分析

我们使用上述模型来模拟四显示固定闭塞系统的列车运行。轨道线路的长度 $L = 40000$ ，闭塞分区

长度 $BL = 1000$,共 40 个闭塞分区 ,从 $i = 20000$ 处开始为限速区段 ,限速区段占 l 个闭塞分区 ,限速区段长度为 $l \times 1000$, $\nu_g = 45$, $\nu_{gy} = 36$, $\nu_y = 27$, $a = 1$, $b = 1$,列车长度 $L_T = 300$,系统演化时间 $T = 6000$.

图 4 所示为交通流状态演化的时空图 ,其中前 2000 步作为暂态过程而舍去 .该图描述了 4000 个时间步内 40000 个位置上列车的演化情况 .图中水平方向表示时间演化的方向 ,垂直方向是列车前进的方向 ,图中的点代表列车车头的位置 ,发车时间间隔为 180 ,限速区段闭塞分区数 $l = 5$,限速 $\nu_c = 25$.从图 4 中可以看出交通流处于自由状态 ,在图的中间有折线 ,这是由于列车行驶至限速区段由于速度减小而引起的 .

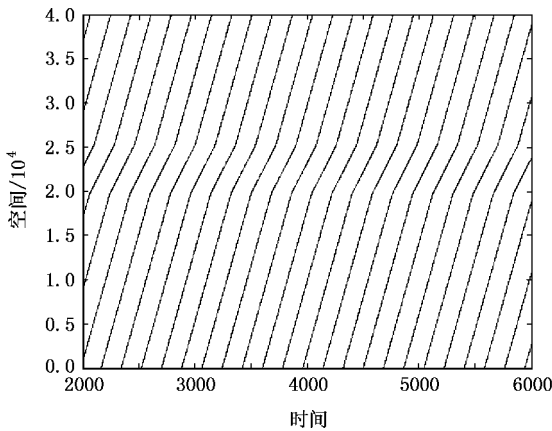


图 4 $I_k = 180$, $l = 5$, $\nu_c = 25$ 时的时空图

图 5 为列车的位移和速度之间的关系图 .系统在第 3601 个时间步时产生一辆列车 ,图中实线和虚线分别对应 $l = 5$ 和 $l = 10$ 时的速度位移关系 .从图中可以看到 ,列车开始时以最大速度行驶 ,快到达限速区段时 ,由于前面出现绿黄灯而减速 ,当速度减至一定速度时 ,前方信号灯重新变成绿色 ,列车又逐渐加速至最大运行速度 ,然后在进入限速区段时速度降到限制速度 ,驶出限速区段后列车速度又恢复到最大速度 .对于虚线 $l = 10$,由于限速区段较长 ,所以列车在限速区段行驶的距离更长 .如果适当延长发车间隔 ,限速区段前的车速波动将会消失 ,这表明列车一直在绿灯下追踪运行 .这些与实际情况是相符的 .

我们再来考察列车的速度随时间的变化情况 .如图 6 所示 ,发车时间间隔 $I_k = 150$,限速 $\nu_c = 25$,系统在第 3601 个时间步时 ,产生一辆列车 ,我们来观测该列车的速度随时间变化情况 .图 6 中的实线和

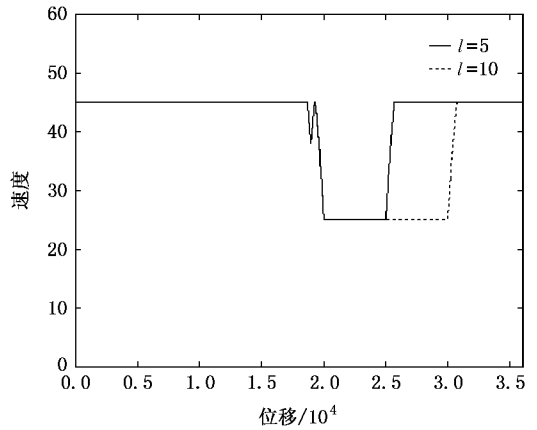


图 5 $I_k = 120$, $\nu_c = 25$ 时速度位移图

虚线分别为 $l = 5$ 和 $l = 10$ 时该列车时间速度曲线 .可以看到 , $l = 5$ 时 ,列车在第 4030 个时间步左右开始减速进入限速区段 ,在限速区段行驶 200 个时间步后 ,开始逐渐加速 ,最后在第 4590 个时间步左右驶离系统 .当 $l = 10$ 时 ,由于限速区段的加长 ,列车在限速区段行驶了 400 个时间步 ,然后开始加速驶离限速区段 ,最终在第 4680 个时间步左右驶离系统 .

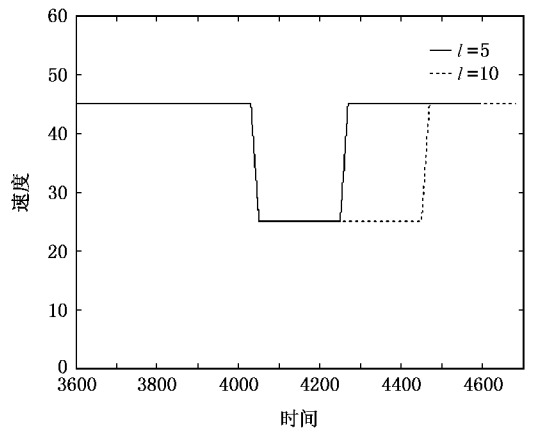


图 6 $I_k = 150$, $\nu_c = 25$ 时速度时间图

再来看看列车的行驶距离与时间的关系 .与速度时间图的参数相同 ,系统在第 3601 个时间步时产生一辆列车 ,图 7 中的实线和虚线分别为 $l = 5$ 和 $l = 10$ 时该列车时间距离曲线 .同样可以看到 , $l = 5$ 时 ,列车在第 4030 个时间步左右开始进入限速区段 ($i = 20000$ 处) ,此时曲线斜率减少 ,表示由于限速速度降低 ,在限速区段行驶 5000 个元胞长 (这是限速区段长度)后 ,开始逐渐加速 ,最后在第 4590 个时间步左右驶离系统 .当 $l = 10$ 时 ,由于限速区段的加

长列车在限速区段行驶到 $i = 30000$ 处,行驶了 10000 个元胞长(限速区段长度)后,开始加速驶离限速区段,最终在第 4680 个时间步左右驶离系统. 这些情况都是符合轨道交通中的实际情况的.

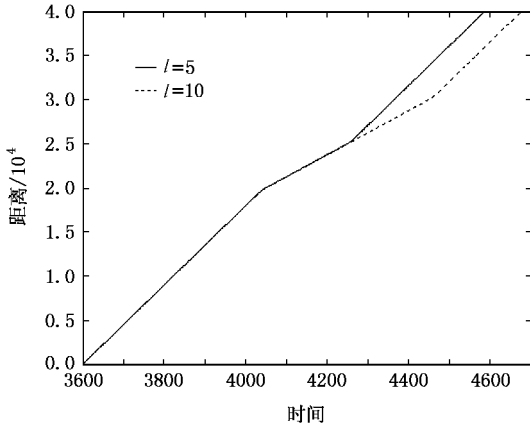


图 7 $l_k = 150, \nu_c = 25$ 时距离时间图

在实际的轨道交通中,列车之间的车头距随时间是不断变化的. 下面我们来探讨四显示固定自动闭塞系统下列车车头距的变化规律. 图 8 显示了系统在第 3600 个时间步时的列车车头距的分布情况. 从图中可以看出,在限速区段附近的列车车头距相对较小,而离限速区段较远的两端车头距较大. 这是因为列车追踪运行过程中,当前车运行到限速区段附近区域时,速度需要经历三个阶段的变化:在限速区段前需要减速,在限速区段限速运行一段时间,从限速区段逐渐加速. 在前车处于这三个阶段中时,后车的速度较大,因此前后车的速度差造成了较小的车头距. 而当前车驶离限速区段,后车要经历相同的三个阶段,这时前车速度较大,这个速度差造成了较

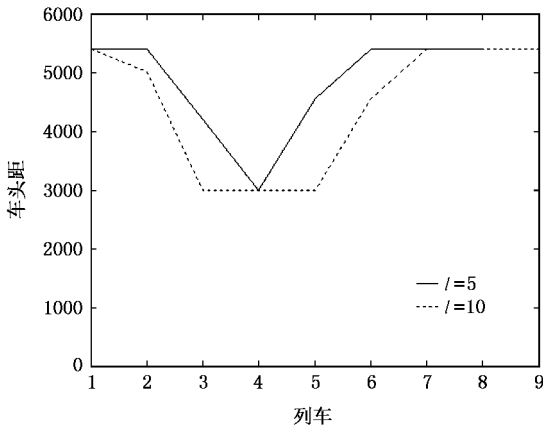


图 8 $l_k = 120, \nu_c = 25$ 时车头距图

大的车头距,因此车头距会呈现图 8 中的分布规律,而且可以看到,当限速区段较长时($l = 10$),中间有较多列车在限速区段运行,车头距保持一定的平稳性且相对较小,这种分布与实际是非常相符的.

图 9 显示了发车间隔 I_k 对系统中列车运行的影响. 图 9 中的空心圆圈实线表示 $l = 5$ 时列车在绿黄灯下的平均运行时间,空心圆圈虚线表示 $l = 10$ 时列车在绿黄灯下的平均运行时间;方块实线表示 $l = 5$ 时列车在黄灯下的平均运行时间,方块虚线表示 $l = 10$ 时列车在黄灯下的平均运行时间;实线表示 $l = 5$ 时列车在红灯下的平均运行时间,虚线表示 $l = 10$ 时列车在红灯下的平均运行时间. 我们把系统中列车在绿黄灯、黄灯和红灯下的平均运行时间分别记为 $Time_{gy}, Time_y$ 和 $Time_r$. 其中, $Time_{gy} = (\sum_{i=1}^n gy_i) / n, Time_y = (\sum_{i=1}^n y_i) / n, Time_r = (\sum_{i=1}^n r_i) / n$. n 表示在整个系统演化时间 6000 个时间步内进入系统的列车数量, gy_i 表示列车 i 在绿黄灯下运行的时间, y_i 表示列车 i 在黄灯下运行的时间, r_i 表示列车 i 在红灯下的运行时间. 如图中所示,如果发车间隔时间 I_k 大于等于 180, $Time_{gy}, Time_y$ 和 $Time_r$ 的值均为 0;当 I_k 小于 180 时,列车运行会遇到绿黄灯,并且 $Time_{gy}$ 随着 I_k 的减少而增加;当 I_k 小于 140 时,列车会遇到黄灯, $Time_y$ 的值随着 I_k 的减少而增加;当 I_k 小于 100 时,列车会遇到红灯, $Time_r$ 的值随着 I_k 的减少而增加. 因此发车间隔时间 I_k 小于某个阈值,列车运行中会遇到绿黄灯、黄灯或者红灯,由此而减速运行. 由此可见, I_k 的取值合适时才能保证系统内列车处于自由行驶状

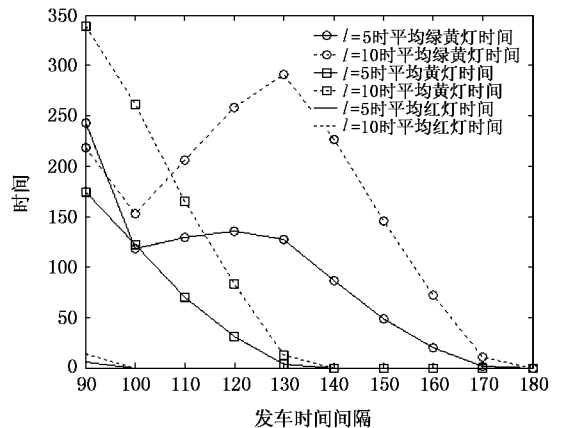


图 9 $\nu_c = 25$ 时发车间隔与平均绿黄灯、黄灯和红灯运行时间关系图

态.从图 9 中也可以看出,当限速区段较长时(图中含虚线部分)相应地遇到绿黄灯、黄灯和红灯的时间也增加.这些情况是符合轨道交通中的实际情况的.

最后我们来探讨一下限速值的大小对系统中列车运行的影响.图 10 中空圆圈实线表示 $l = 5$ 时列车在绿黄灯下的平均运行时间,空心圆圈虚线表示 $l = 10$ 时列车在绿黄灯下的平均运行时间;方块实线表示 $l = 5$ 时列车在黄灯下的平均运行时间,方块虚线表示 $l = 10$ 时列车在黄灯下的平均运行时间.纵坐标为时间,横坐标为限速.从图 10 中可以看出,随着限速的增大,平均绿黄灯和黄灯时间减少;并且在相同的限速下,随着限速区段长度的增加,平

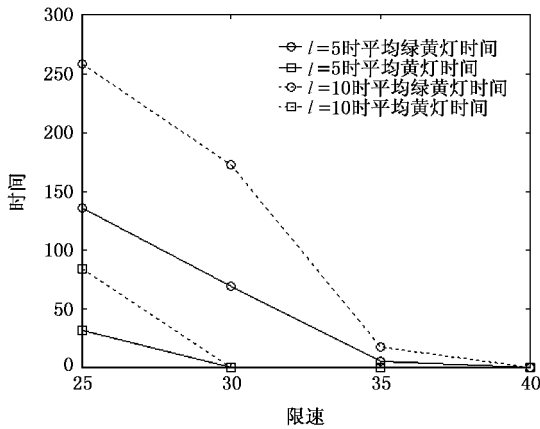


图 10 $l_k = 120$ 时限速值与平均绿黄灯、黄灯运行时间关系图

均绿黄灯和黄灯时间也相对增加.这些与实际情况都非常相符.

以上说明,应用本文所提出的模型,数值模拟的结果接近于真实交通中列车行驶的特点.

4. 结 论

综上所述,本文根据轨道交通的特点,提出了一种新的元胞自动机模型,并用来模拟四显示固定闭塞条件下含限速区段的铁路交通.在该模型的基础上,我们通过系统时空图探讨了轨道交通流特性,分析了列车速度、时间和位移之间的相互变化情况,考察了轨道线路上的车头距分布情况,分析了发车时间间隔对列车运行的影响以及限速大小对列车运行的影响.通过模拟结果发现:减少限速区段长度、选择合适的发车时间间隔以及提高限速区段的限速值大小都有助于提高铁路运输服务质量.尽管数值模拟结果表明该模型能够很好地描述轨道交通流的一些主要的特征.然而,在我们的模型中只考虑了较为简单的情况,一些其他影响列车运行的因素并没有考虑在内,如列车种类等.但是,由于本文的模型具有灵活可调等特点,所以,未考虑这些因素只是降低算法的复杂性外,不会影响对列车的运行追踪特性的探讨.有鉴于此,针对这些问题,可以在本文模型基础上对规则进行合理的修改和完善,从而更进一步进行研究和探讨.

[1] Ding Y 2004 *Ph. D. Thesis* (Beijing : Beijing Jiaotong University) p21 (in Chinese) [丁 勇 2004 博士学位论文 (北京 : 北京交通大学) 第 21 页]

[2] Zhang S M 2006 *Journal of Railway Engineering Society* **91** 1 (in Chinese) [张素敏 2006 铁路工程学报 **91** 1]

[3] Lu Z W 2005 *Chinese Railways* **6** 17 (in Chinese) [卢祖文 2005 中国铁路 **6** 17]

[4] Zhao G T 2004 *Railway Transport and Economy* **5** 5 (in Chinese) [赵国堂 . 2004 铁道运输与经济 **5** 5]

[5] Wang B H , Kuang Y Q , Xu B M 1998 *Acta Phys. Sin.* **47** 906 (in Chinese) [汪秉宏、邝乐琪、许伯铭 1998 物理学报 **47** 906]

[6] Wang L , Wang B H 1999 *Acta Phys. Sin.* **48** 808 (in Chinese) [王 雷、汪秉宏 1999 物理学报 **48** 808]

[7] Wang B H , Wang L , Xu B M , Hu B B 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 1926 (in Chinese) [汪秉宏、王 雷、许伯铭、胡斑比 2000 物理学报 **49** 1926]

[8] Li K P , Gao Z Y 2005 *Chin. Phys.* **14** 930

[9] Nagel K , Schreckenberg M 1992 *J. Phys. I France* **2** 2221

[10] Chowdhury D , Santen L , Schadschneider A 2000 *Phys. Rep.* **329** 199

[11] Bai K Z , Tan H L , Liu M R , Kong L J 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 2421 (in Chinese) [白克钊、谭惠丽、刘慕仁、孔令江 2003 物理学报 **52** 2421]

[12] 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]

[13] 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]

[14] 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]

[15] Li K P , Gao Z Y , Ning B 2005 *J. Comp. Phys.* **209** 179

[16] Li K P , Gao Z Y , Ning B 2005 *Int. J. Mod. Phys. C.* **16** 921

[17] Ning B 2005 *Ph. D. Thesis* (Beijing : Beijing Jiaotong University) p48 (in Chinese) [宁 滨 2005 博士学位论文 (北京 : 北京交通大学) 第 48 页]

The characteristic analysis of the traffic flow of trains in speed-limited section for fixed-block system^{*}

Fu Yin-Ping Gao Zi-You Li Ke-Ping

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

(Received 12 September 2006 ; revised manuscript received 17 January 2007)

Abstract

For speed-limited sections of railway traffic in the four-aspect fixed-block system , we propose a cellular automata model to simulate the traffic flow to analyze how the length of speed-limited section , train time interval and the speed-limit value affect the traffic flow . The simulation results demonstrate that the decrease of the length of speed-limited section , the moderate increase of train time interval and the increase of the speed-limit value can improve the green light runtime of the trains .

Keywords : four-aspect fixed-block system , cellular automaton , traffic flow

PACC : 0550

^{*} Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant No. 2006CB705500) , the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60634010) , Changjiang Scholars and Innovative Research Team in University (Grant No. IRT0605) , the Key Project of Chinese Ministry of Education (Grant No. 107007) and New Century Excellent Talents in University (Grant No. NCET-06-0074) .