

超限车运行对双线铁路运能损失影响分析*

王新宇, 陈治亚, 雷定猷, 张英贵

(中南大学 交通运输工程学院, 长沙 410075)

摘要: 以双线自动闭塞区段列车追踪运行行为对象, 充分考虑超限车运行特征, 采用元胞自动机理论, 提出列车运能换算、站元胞等概念; 设计双线铁路列车运行的各种变换规则, 分析超限车越行和禁会前后的元胞状态, 构建基于CA的双线铁路列车运行仿真模型和运能损失评估模型, 模拟双线区段列车运行过程, 刻画超限车运行所引起的耗能特征。仿真结果表明, 双线区段减少一个禁会区间时, 上行方向通过能力可以少浪费15.2%, 下行方向通过能力可以少浪费6.3%; 综合考虑双线区段通过能力及其输送能力时, 上行方向运能可以少浪费18.5%, 下行方向运能可以少浪费8.8%; 提出的方法能全面分析超限车运行对双线铁路运能的影响, 评估超限车运行对双线铁路运能损失, 为合理铺画双线铁路区段的列车运行图提供决策支持。

关键词: 双线铁路; 超限车; 运能损失; CA模型; 模拟仿真

中图分类号: TP391.3; U294.6

文献标志码: A

文章编号: 1001-3695(2012)08-2886-05

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2012.08.022

Influence analysis of transport capacity loss for out-of-gauge trains running on double-track railway

WANG Xin-yu, CHEN Zhi-ya, LEI Ding-you, ZHANG Ying-gui

(School of Traffic & Transport Engineering, Central South University, Changsha 410075, China)

Abstract: With trains tracking in the double automatic block section as an object, taking the running characteristics of out-of-gauge trains into consideration, this paper employed cellular automata (CA) theory and proposed some concepts, such as train capacity conversion and station cellular. Furthermore, after the design of various transformation rules for trains running in double-track railway and analyses on the cellular state during the overtaking and non-intersection, it constructed simulation model and capacity loss evaluation model of trains running in double-track railway on the basis of CA theory. In addition, it simulated the train running process in the double-track sections and described the capacity loss resulted from the out-of-gauge trains running. The simulation results indicate that, when one non-intersection is reduced in the double-track section, 15.2% of the carrying capacity of up direction can be saved and 6.3% of the carrying capacity of down direction can be saved. Moreover, from the overall perspective of the carrying capacity and delivery capacity in the double-track sections, 18.5% of the transport capacity of up direction can be saved and 8.8% of the transport capacity of down direction can be saved. In all, the proposed method can comprehensively analyze the out-of-gauge trains' effects on the double-track railway's transport capacity, evaluate the capacity loss of double-track railway resulted from the out-of-gauge trains' running, and provide the decision-making supports for the train diagram in the double-track railway sections.

Key words: double-track railway; out-of-gauge train; transport capacity loss; CA model; analogue simulation

0 引言

国民经济的大力发展与国防建设的客观需要, 超限超重货物运量正处于持续增长阶段。超限超重货物具有外形尺寸超大、重量超重、价值高等自身特征。编组装有超限超重货物车辆的列车即超限车的综合轮廓尺寸一般会超过机车车辆限界, 甚至超过铁路沿线设备及建筑限界, 故超限车在双线铁路运行过程中, 往往需采取限速或禁会等措施, 保证行车安全, 但这样严重干扰了铁路正常运输组织, 影响铁路运能。一般情况下, 超限车经由铁路既有有线通行, 几乎不经由客运专线或新建线路运行。目前, 我国铁路既有有线运能与运量之间存在较为严重的冲突, 超限车的运行严重影响列车混跑模式下既有线的运输组

织, 不利于既有能力利用与释放, 超限车的运行会占用或浪费大量的铁路运能。因此, 分析超限车运行对双线铁路运能的影响及评估运能损失具有十分重要的现实指导意义, 为合理铺画双线铁路列车运行图提供强有力的决策支持。

铁路运输能力是铁路区段通过能力及其输送能力的统称^[1]。衡量铁路运输能力应以区段通过能力为基础。目前, 计算铁路区段通过能力的方法主要有扣除系数法^[2~6]、平均最小列车间隔时间法^[7,8]和计算机模拟法^[9,10]。其中, 被广泛采用的是扣除系数法, 其计算结果的正确性主要依赖各种列车扣除系数的取值。但当铁路设备条件、运输组织方式等均发生重大变化时, 扣除系数的取值容易出现偏离实际较大等问题^[11,12]。计算机铺画的运行图可行方案往往数量巨大, 对于

收稿日期: 2012-01-13; 修回日期: 2012-02-24 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(70971140)

作者简介: 王新宇(1978-), 男, 吉林通化人, 博士, 主要研究方向为交通运输运营管理及优化(esu_michael@126.com); 陈治亚(1958-), 男, 湖南岳阳人, 教授, 博导, 主要研究方向为交通运输技术经济、运输企业系统资源优化等; 雷定猷(1958-), 男, 湖南浏阳人, 教授, 博导, 主要研究方向为特种货物运输、交通运输运营管理及优化等; 张英贵(1984-), 男, 安徽六安人, 博士, 主要研究方向为交通运输运营管理及优化。

方案的比选和优化是比较复杂的,这是计算机模拟法铺画运行图确定通过能力的一个不足^[13]。本文的研究思路是结合超限车运行特征,综合考虑扣除系数法和计算机模拟法,以双线自动闭塞区段列车追踪运行过程为对象,采用元胞自动机理论^[14~16]设计各种元胞规则模拟列车运行过程,构造基于CA的双线铁路列车运行仿真模型及其运能损失评估模型,通过模拟仿真分析并刻画超限车运行所引起的耗能特征,深入分析超限车运行对双线区段通过能力的影响,探讨超限车运行对双线铁路的运能损失机理。

1 问题描述与分析

超限车在双线铁路区段的运行往往会采取限速、禁会等措施,在确保安全的同时降低了铁路通过能力,严重干扰双线铁路的正常运输组织。超限车对双线铁路运能的影响主要表现在以下两个方面:a)从同方向运行的列车来看,较低的超限车运行速度及其限速措施对后续同方向、速度较高列车具有速度传递效应,不利于后续列车的高速运行,增加了同方向列车纯运行时分,且运行速度较低超限车比普通货物列车(即非超限车)的区间占用时分更长,很大程度上降低了铁路区段通过能力利用率;b)从反方向运行的列车来看,由于超限车往往采用禁止会车的措施,影响反方向列车运行,甚至会迫使反方向运行的列车必须在车站停站避让,额外增加反向列车停站时分,加剧铁路运能的浪费行为。在货物列车编组辆数固定的前提下,虽然超限车的纯运行时间较长、区段占用时间较大,从区段通过能力来看,这就意味着超限车的运行对铁路运能的影响程度较重;但由于超限超重货物自身特征决定了在单位时间内超限车所输送的货物吨公里数比同等条件下普通货物列车所输送的货物吨公里数较大,从铁路输送能力方面来看,超限车运行一定程度上又降低了因限速、禁会而引起的运能损失,缓和了超限车运行对铁路运能的影响。因此,本文综合考虑铁路区段通过能力和铁路输送能力,全面衡量铁路运能、评估运能损失,深入分析超限车运行对双线铁路运能的影响。

目前,双线铁路通过能力的计算是以从平行运行图上扣除的普通货物列车对数或列数为基准,相应地确定铺画其他列车后的非平行运行图通过能力^[1]。为便于分析超限列车运行对双线区段通过能力的影响,结合扣除系数法中基准货物列车,提出标准车型和运能换算概念,设计列车运能权重换算公式。

定义1 标准车型。根据列车种类、速度、牵引重量等特征,选取合适列车作为其他列车运能换算的标准列车。本文选取以最大运行速度90 km/h、牵引重量3000 t的普通货物列车为标准车型。

定义2 运能换算。为便于直观体现超限车对双线铁路运能的影响,以标准车型为参照体,综合考虑铁路通过能力和输送能力,进而得到其他非标准车型的列车运能换算系数的过程。

设某区段内全部运行种类和牵引重量等具有完全相同特征列车,单位时间内(如一昼夜)通过该区段的指定货物列车通过能力为 Q ,其输送能力为 G ,该区段相同时间内标准列车通过能力为 Q_e ,输送能力为 G_e ,则列车的运能换算系数 c 按式(1)计算确定取值:

$$c = Q_e G_e / QG \quad (1)$$

本文的研究思路是以双线自动闭塞区段列车追踪运行过

程为对象,充分考虑超限车运行特征,采用元胞自动机理论,提出基于双向四车道的双线铁路列车运行仿真模型,即上、下行方向分别设置一条线路和一条虚拟线路。其中,在虚拟线路上设置为相当于一个元胞大小的虚拟中间站(与实际中间站位置一致),用于临时停靠列车,实现列车越行及因禁会需反向列车停站以办理禁会作业(简称为会让),虚拟和实际车站统称为站元胞(或停靠元胞);其他位置均设置成相当于一个闭塞分区的虚拟元胞,不办理列车换线和临时停靠作业。在此基础上,构建双线区段多种货物列车混跑的运行规则,刻画超限车运行对双线铁路运能的影响,评估运能损失,探讨超限车运行对双线铁路的运能损失机理。

2 模型建立

论述基于以下三个前提:

- a) 双线自动闭塞区段的中间站和区段站看成闭塞分区,每个闭塞分区视为一个元胞空间;
- b) 每个元胞空间在同一时刻内至多被一列列车占用,列车只在中间站办理越行或禁会作业;
- c) 所有列车在双线铁路不间断追踪运行,列车间距满足列车最小安全距离约束。

2.1 符号说明

不妨假设某双线自动闭塞区段由若干个闭塞分区和中间站、两个区段站共同组成。本文所用符号声明及其含义如下:

l_0 为单位元胞空间(闭塞分区)长度(m),按线路、车站及信号机位置等信息确定取值;

N 为双线区段中所有闭塞分区、中间站和区段站的总数,即元胞总数;

L 为双线区段总长 $L = Nl_0$ (m),每个元胞状态为空闲或仅容纳一列列车;

$v_{\max}^n$ 为第 n 列列车的最大运行速度(m/s),超限车一般走行既有线,不妨设货物列车的最高运行速度在40~120 km/h(即11.10~33.33 m/s)之间,旅客列车最高运行速度为140 km/h(即38.89 m/s),其中,超限车 o 的最大运行速度为 $v_{\max}^o$ (m/s);

$\Delta v_{\max}$ 为列车与其紧后相邻列车之间最大运行速度差的绝对值(m/s);

$v_n(t)$ 为第 n 列列车在时刻 t 的瞬时速度(m/s);

t_0^n 为第 n 列列车通过一个元胞空间的平均时间(s);

$x_n(t)$ 为第 n 列列车在时刻 t 所处元胞物理位置,其中超限车 o 在时刻 t 所处元胞实际物理位置为 $x_o(t)$;

$d_n(t)$ 为时刻 t 时第 n 列列车与紧前列车之间的距离,即紧前车间距(m);

$\Delta x(t)$ 为前车与紧后列车在时刻 t 时两者之间的位移差(m);

$\Delta v_n(t)$ 为第 n 列列车在时刻 t 和时刻 $(t+1)$ 时之间的瞬时速度差(m);

$d_{\min}$ 为列车运行的最小安全距离(m),按实际情况确定的一个固定值;

$d_{\min}^{n-1-m+1}$ 为越行后第 $(n-1)$ 列列车到第 $(n+1)$ 列列车之间的最小安全距离(m);

$d_{\min}^{n-m-1}$ 为越行后新开行的第 n 列列车到第 $(n-1)$ 列列车

之间的最小安全距离(m);

p_{ik} 为列车停靠概率,不妨取[0.25,0.50];

p_{qd} 为列车启动概率,不妨取[0.75,1];

c_{on} 为超限车 o 在禁会区间运行过程中其反方向的紧前列车所走行元胞数,即走行格点数;

$t_{\min}$ 为两列列车在任意闭塞区间内运行时的最小安全时间间隔(s);

$t_{\min}^s$ 为停靠元胞的最低停靠或停留时间(s);

t_s 为模拟仿真环境中的时间更新步长;

$\text{gap}(n, c_{ik}, t)$ 为时刻 t 时第 n 列列车所处元胞位置与虚拟线路上前方停靠元胞 c_{ik} 之间的格点数,即列车与前方车站所处元胞之间的格点数小于某个固定值 k 时,列车才可能在紧前方车站停靠。

2.2 基于 CA 的双线铁路列车运行仿真模型

若不考虑列车越行时,双线铁路自动闭塞区段开行两列相邻列车的最小安全距离一般取决于列车速度、区间长度及信号制式等方面的因素。不妨设 $t_i^{(1)}$ 和 $t_i^{(2)}$ 分别表示第 1 列列车(前车)和第 2 列列车(后车)在闭塞分区 i 的运行时间。当第 1 列列车离开闭塞分区 i 后,在列车前进方向的紧前闭塞分区($i+1$)空闲的前提下,第 2 列列车抵达闭塞分区($i+1$)所需要的时间为 $t_{\min} + t_i^{(2)}$ 。为保证行车安全,最小安全距离应由该区间内所有闭塞分区的最小安全时间间隔的最大值确定。最小安全时间间隔按式(2)计算确定取值:

$$t_{\min} \geq \max_{i \in \{1, 2, \dots, N-1\}} \{t_i^{(1)} - t_i^{(2)} + t_{i+1}^{(1)}\} \quad (2)$$

从元胞的角度来看,最小安全距离 $d_{\min}$ 按式(3)计算确定取值:

$$d_{\min} = \begin{cases} 1000 \times ((t_{\min} \times \max_{\forall n} \{v_{\max}^n\}) / l_0) & t_{\min} \times \max_{\forall n} \{v_{\max}^n\} \% (l_0) = 0 \\ [(t_{\min} \times \max_{\forall n} \{v_{\max}^n\}) / l_0] \times & \\ 1000 + 1000 & t_{\min} \times \max_{\forall n} \{v_{\max}^n\} \% (l_0) \neq 0 \end{cases} \quad (3)$$

双线自动闭塞区段列车追踪运行时,若第 n 列列车的最大运行速度 $v_{\max}^n$ 小于第 $(n-1)$ 列列车的最大运行速度 $v_{\max}^{n-1}$,且第 $(n+1)$ 列列车的最大运行速度 $v_{\max}^{n+1}$ 大于第 n 列列车的最大运行速度 $v_{\max}^n$ 时,第 n 列列车可能会被越行;存在超限车运行且超限车前向区间为禁会区间时,若超限车在禁会区间的最短运行时间大于其反向紧前列车抵达并通过该禁会区间的最短运行时间时,则超限车开行,否则超限车因禁会需要停靠中间站;若邻线超限车反方向运行时,相关车站所停靠列车应综合考虑超限车、中间站所处相对位置信息进行发车,列车运行应满足禁会需求。因此,列车越行、会让与传统的双车道 CA 问题中换道行为不同之处在于:在办理列车越行或禁会作业区间,被越行或因禁会需要而会让的列车应在停靠元胞停靠,并不能简单地处理为列车在同方向的目标线路和虚拟线路上元胞空间的平移行为,还必须考虑列车越行、禁会时间、列车最小安全间隔、越行列车或因禁会需要反方会让列车与前方车站相对位置、各列车瞬时速度及其自身特征等信息。其 CA 模型的规则整理为如下所示的八个串、并行共存过程:

a) 越行列车停靠、紧后列车越行规则。若 $\text{gap}(n, c_{ik}, t) \leq k$, 考虑越行列车 n 是否停靠前方车站即停靠元胞 c_{ik} : $v_{\max}^n > v_{\max}^{n-1}$ 且 $|x_n(t) - x_{n-1}(t)| \geq d_{\min}/l_0$, 则列车 n 以概率 $(v_{\max}^{n-1} d_{\min} p_{ik}) / (v_{\max}^n \Delta v_{\max} \Delta x(t))$ 停靠同时紧后列车 $(n-1)$ 越行; $v_{\max}^n = v_{\max}^{n-1}$ 且 $|x_n(t) - x_{n-1}(t)| \geq (d_{\min} + l_0)/l_0$, 则列车 n 以概率

$(d_{\min} p_{ik}) / (2 \Delta x(t))$ 停靠同时紧后列车 $(n-1)$ 越行; $v_{\max}^n < v_{\max}^{n-1}$ 且 $|x_n(t) - x_{n-1}(t)| \geq d_{\min}/l_0$, 则列车 n 以概率 $(\Delta v_{\max} d_{\min} p_{ik}) / (v_{\max}^n \Delta x(t))$ 停靠, 紧后列车越行。

b) 禁会列车即超限车停靠会让规则。若 $\text{gap}(o, c_{ik}, t) \leq k$, 考虑超限车 o 是否停靠前方车站即停靠元胞 c_{ik} : $[\text{gap}(o, c_{ik}, t) + c_{on} - \text{gap}(n, c_{ik}, t)] \times v_{\max}^n < c_{on} v_{\max}^o$, 则超限车 o 不停靠站元胞 c_{ik} 通过禁会区间, 此时若 $\text{gap}(n, c_{ik}, t) \leq c_{on}$, 那么超限车 o 的紧前反向列车 n 必须停靠站元胞 c_{ik} ; 若 $[\text{gap}(o, c_{ik}, t) + c_{on} - \text{gap}(n, c_{ik}, t)] \times v_{\max}^n \geq c_{on} v_{\max}^o$, 则超限车 o 以概率 p_{ik} 停靠站元胞 c_{ik} 同时其紧前反向列车 n 不停站直接通过禁会区间。

c) 同方向停靠列车启动规则。若 $\text{gap}(n, c_{ik}, t) / v_{\max}^{n-1} \geq t_{\min}^s$, 考虑第 n 列列车的紧后列车 $(n-1)$ 的运行状态: 若 $v_{\max}^n > v_{\max}^{n-1}$ 且 $|x_n(t) - x_{n-1}(t)| \geq d_{\min}/l_0$ 时, 第 n 列列车应尽可能启动, 即若 $v_{\max}^n \geq 2v_{\max}^{n-1}$, 第 n 列列车以概率 $(p_{qd} \Delta x(t)) / d_{\min}$ 启动; 若 $v_{\max}^n < 2v_{\max}^{n-1}$, 第 n 列列车以概率 $(p_{qd} \Delta v_{\max} \Delta x(t)) / (v_{\max}^{n-1} d_{\min})$ 启动; 若 $v_{\max}^n = v_{\max}^{n-1}$ 且 $|x_n(t) - x_{n-1}(t)| \geq d_{\min}/l_0$, 第 n 列列车以概率 $(p_{qd} \Delta x(t)) / (2d_{\min})$ 启动; 若 $v_{\max}^n = v_{\max}^{n-1}$ 且 $|x_n(t) - x_{n-1}(t)| < d_{\min}/l_0$, 第 n 列列车不启动同时考虑与同方向后续第 $(n-2)$ 列列车的情况, 依次循环进行比较; 若 $v_{\max}^n < v_{\max}^{n-1}$ 且 $|x_n(t) - x_{n-1}(t)| \geq (d_{\min} + l_0)/l_0$, 第 n 列列车以概率 $(P_{qd} v_{\max}^n \Delta x(t)) / (2v_{\max}^{n-1} \Delta v_{\max} d_{\min})$ 启动。

d) 反方向停靠列车启动规则。若 $\text{gap}(n+1, c_{ik}, t) / v_{\max}^n \geq t_{\min}^s$ 或 $\text{gap}(o+1, c_{ik}, t) / v_{\max}^o \geq t_{\min}^s$, 则停靠列车 n 或 o 以概率 p_{qd} 启动。

e) 加速规则。针对越行列车 $(n-1)$ 的加速规则, 若 $v_{n-1}(t) < v_{\max}^{n-1}$ 且 $v_{\max}^{n-1} < v_{\max}^{n+1}$, 则 $v_{n-1}(t+1) = \min(v_{n-1}(t) + \Delta v_{n-1}(t), v_{\max}^{n-1})$; 若 $v_{n-1}(t) < v_{\max}^{n-1}$ 且 $v_{\max}^{n-1} > v_{\max}^{n+1}$, 当越行列车与紧前列车之间的距离满足 $d_n(t) > d_{\min} + l_0$ 时 $v_{n-1}(t+1) = \min(v_{n-1}(t) + \Delta v_{n-1}(t), v_{\max}^{n-1})$, 当越行列车与紧前列车之间的距离 $d_{\min} + l_0 > d_n(t) > d_{\min}$, 则 $v_{n-1}(t+1) = \min(v_{n-1}(t) + \Delta v_{n-1}(t), v_{\max}^{n+1})$; 若 $v_{n-1}(t) < v_{\max}^{n-1}$ 且 $v_{\max}^{n-1} = v_{\max}^{n+1}$, 则 $v_{n-1}(t+1) = \min(v_{n-1}(t) + \Delta v_{n-1}(t), v_{\max}^{n-1})$ 。针对停靠列车 n 启动后的加速规则, 若 $\text{gap}(n, c_{ik}, t) / v_{\max}^n \geq t_{\min}^s$ 且列车 n 已启动, 则列车 n 恢复原线路并加速且 $v_n(t+1) = \min(v_n(t) + \Delta v_n(t), v_{\max}^n)$ 。

f) 减速规则。越行列车 $(n-1)$ 的减速规则, 若 $v_{n-1}(t) v_0^{n-1} > d_{\min}^{n-1-n+1} l_0$, 则 $v_{n-1}(t+1) = (d_{\min}^{n-1-n+1} - l_0) / l_0^{n-1}$, 即 $v_{n-1}(t+1) = \min(v_{n-1}(t), (d_{\min}^{n-1-n+1} - l_0) / l_0^{n-1})$; 停靠列车 n 的减速规则, 若 $v_n(t) v_0^n > d_{\min}^{n-n-1} l_0$, 则 $v_n(t+1) = \min(v_n(t), (d_{\min}^{n-n-1} - l_0) / l_0^n)$ 。

g) 随机慢化规则。 $v_n(t+1) = \max((d_n(t) - l_0) / l_0^n, v_n(t))$, 表示因不完全驾驶产生的偶然因素, 列车司机过度反应使车辆以一定概率 p 减速, 若车速为 $v_n(t) = 0$, 则保持不变 $v_n(t+1) = 0$ 。

h) 位置更新。在 $t+1$ 时刻, 依据步骤 a) ~ g) 重新计算确定各次列车新的速度值并更新列车位置, 若 $(x_n l_0 + v_n t_s) \% l_0 = 0$, 则 $x_n = (x_n l_0 + v_n t_s) / l_0$; 否则 $x_n = [(x_n l_0 + v_n t_s) / l_0] + 1$ 。

以上规则给出了由第 t 时步到第 $t+1$ 时步双线铁路列车运行演化过程, 即基于 CA 的双线铁路列车运行仿真模型。

2.3 双线铁路运能损失评估模型

设 $\bar{v}_s$ 表示标准列车的平均运行速度; ω_n 为第 n 列车运能损失权重; m 为列车的总数量; 减函数 φ_n 是列车距离 $\Delta x_{n+j}(t)$

的权值函数,即当前列车与前列车相距越远,前方列车对本列车的运行速度影响越小; l 表示两相邻列车的安全间隔的元胞数, $l \geq d_{\min}$ 。结合基于CA的双线铁路列车运行仿真模型,以单位列车运行时分损失率最小为第一优化目标,以列车流量最大为第二优化目标,构建双线铁路运能损失评估模型,即

$$\min \alpha = \lambda_1 \sum_{n=1}^m \omega_n \left(\frac{v_n}{N} \times \sum_{t_n=1}^N \frac{1}{v_n(t_n)} - 1 \right) / m - \frac{\lambda_2 \sum_{n=1}^m v_n}{L} \quad (4)$$

$$\text{s. t. } \frac{dv_j(t)}{dt} = V \left[\sum_{n=1}^{m-1} \varphi_n (\Delta x_{n+j}(t)) \right] - v_j(t)$$

$$\frac{\varphi_j}{\varphi_1} \leq 1 \quad j = 2, 3, 4, \dots, m \quad (5)$$

$$x_n(t) - x_{n-1}(t) \geq d_{\min} \quad (6)$$

$$x_n(t+1) = x_n(t) + v_n(t+1) \quad (7)$$

$$v_n(t+1), v_n(t) \in [0, v_{\max}^n] \quad (8)$$

其中,式(5)表示速度传递效应,相邻两列车速差对后续列车的影响;式(6)表示最小安全距离约束;式(7)表示列车位置更新过程;式(8)表示列车运行速度约束。

3 算法设计

利用基于CA的双线铁路列车运行仿真模型模拟仿真双线区段列车实际追踪运行过程,确定列车越行和禁会前后在区间内的实际运行速度、位置状态等信息,以刻画超限车运行所引起的耗能特征,并采用双线铁路运能损失评估模型评估超限车运行对双线铁路运能损失的影响。以双线双向四显示自动闭塞制式为例,设计双线铁路运能损失评估算法。算法具体步骤如下:

a) 参数初始化。区段站、区间站、闭塞分区等线路参数,最大运行速度、等级、种类等列车仿真环境设置及参数初始化。

b) 区段站始发列车按列车权重、最大运行速度等信息确定初始开行方案;上、下行中间站的列车则按CA变换规则确定其开行方案。当敌对方向邻近区间运行超限车时,综合考虑中间站、禁会区间数量、超限车与邻近车站相对位置信息判断其运行状态。

c) 双线区段无超限车运行时,同方向列车若前方车站空闲且本列车与前方车站间距离满足最小安全距离,根据列车与后续列车速度、间距等信息判断列车是否停靠前方车站。若前方车站已停靠列车,且本列车与前方车站间距离满足最小安全距离,则根据本列车与停靠列车速度、间距等信息判断列车是否越行,引入列车停靠、越行、加速或启动规则,更新相关信息。

d) 双线区段存在超限车运行时,同方向列车运行调用步骤c)。当超限车运行到指定禁会区间时,若超限车经由当前位置并通过禁会区间的运行时间小于反方向邻近列车到达并通过该禁会区间所需时间时,超限车保持运行状态,引入超限车停靠会让规则,更新相关信息;否则,超限车签发车站停靠,依据停靠会让规则依次判断反方向邻近列车的运行状态,引入列车停靠、越行、加速或启动规则,更新相关信息。

e) 按列车在双线区段的运行状态,引入随机慢化规则更新相关信息。若本列车与前方列车间元胞数大于两个闭塞分区的距离(信号机显示绿灯),引入加速规则,列车加速;若前方列车速度小于本车速度且两车间元胞数等于两个闭塞分区(信号机显示黄绿灯),引入减速规则进行减速,速度为 $v_n(t) - \Delta v_n(t)$;若前方列车速度小于本车速度且两车间元胞数等于最小安全距离(信号机显示黄灯),引入减速规则,本列车开始减速至前车的最大速度。

f) 以列车为循环对象,模拟出各单位时间(更新时间步长)各次列车的即时状态,确定 $v_n(t)$ 、 $d_n(t)$ 、 $x_n(t)$ 三者之间的关系和第 t 时步到第 $t+1$ 时步的列车演化过程,输出每一个时步更新后的列车位置、运行速度及列车间距等信息。

g) 根据各个时步更新后的列车位置、实时速度及列车间距,采用列车运能换算公式和运能损失评估公式,计算双线铁路运能损失评估量。

h) 算法结束。输出不同速度差的货物列车的速度演变过程、双线区段铁路通过能力损失比及运能损失比。

4 实例

选取某双线自动闭塞区段作为模拟环境。区段总长 $L = 82\ 000\text{ m}$,格子点数 $N = 82$ 个,设定5个中间站、2个区段站、75个闭塞分区,元胞长度 $l_0 = 1\ 000\text{ m}$,时间更新步长 $t_s = 20\text{ s}$ 。已知某时段的上、下行方向共有6趟货物列车运行,即①上行方向82702次行包快运专列,最大速度为 120 km/h (即 33.33 m/s),牵引重量为 $1\ 500\text{ t}$;②上行方向26512次直通货物列车,最大速度为 90 km/h (即 25.00 m/s),牵引重量为 $3\ 000\text{ t}$;③上行方向70210次超限车,最大速度为 50 km/h (即 13.90 m/s),牵引重量为 $10\ 000\text{ t}$;④下行方向26561次直通货物列车,最大速度为 90 km/h (即 25.00 m/s),牵引重量为 $3\ 000\text{ t}$;⑤下行方向36531次区段货物列车,最大速度为 80 km/h (即 22.20 m/s),牵引重量为 $3\ 000\text{ t}$;⑥下行方向70641次超限车,最大速度为 40 km/h (即 11.10 m/s),牵引重量为 $15\ 000\text{ t}$ 。下行方向70641次超限车在运行过程中存在两个禁会区间,即在第三与第四、第四与第五个中间站之间。区段站到发列车设定为:列车尾部通过进、出站信号机所在的轨道电路,列车出清对应的接、发列车进路,且列车本身具有一定的车长,故上、下行列车速度—里程曲线中均存在一段不大于站元胞长度的相对距离。利用C#语言,采用本文提出的系列模型与算法,研发铁路运能损失模拟仿真系统,分析超限车运行对双线铁路运能损失的影响,评估运能损失。

a) 两个连续禁会区间条件下超限车运行对双线铁路通过能力的影响分析。在仿真环境一定的条件下,上、下行各有3趟列车运行时,共有36种不同的开行方案。因各种列车开行方案的越行、禁会互不相同,不同列车开行方案中同一列车的速度曲线不尽一致,对运能的影响程度也各不相同。通过对各种列车开行方案模拟仿真50次,取最接近运能损失均值的方案为备选方案,则各种列车开行方案的备选方案的列车旅行时分和中间站停站时分汇总如表1所示。

当上行方向列车开行顺序为④⑤⑥,下行方向列车开行顺序为②①③时,双线区段区间占用时间最短,其原因在于后续列车受前方低速列车的压制时间短,且上、下行停站时间短,对区段运能影响较小。下行区段70641次超限车仅在前方第1和第2中间站办理两次短暂的会让停车,总停车时间为 560 s ,上行区段70210次超限车则无停车通过整个区段。其中,下行方向旅行时间为 $8\ 480\text{ s}$,上行方向旅行时间为 $6\ 580\text{ s}$;该双线区段上、下行分别开行3列速度均为 90 km/h 的标准列车,追踪间隔时间为 360 s 时,旅行时间为 $3\ 640\text{ s}$,则开行方案是上行方向列车开行顺序为④⑤⑥、下行方向列车开行顺序为②①③时,下行方向通过能力最小损失值为13.4列;上行方向通过能力最小损失值为8.2列。因此,从运能损失的角度,选取最优或较优的列车开行方案,一定程度上可以缓解区段的运输压

力,为铺化双线区段列车运行图提供决策参考。

表 1 区段旅行时间和中间站停站时分汇总表(两个禁会区间) /s

列车开行 方案 (下行/上行)	旅行时分/停站时分				列车开行 方案 (下行/上行)	旅行时分/停站时分				
	下行		上行			下行		上行		
	旅行	停站	旅行	停站		旅行	停站	旅行	停站	
③ ② ①	⑥⑤④	9660	1280	8240	1500	⑥⑤④	8620	680	7580	680
	⑥④⑤	9520	1240	8320	1220	⑥④⑤	8700	780	7640	720
	④⑥⑤	9680	1300	8340	1600	④⑥⑤	9140	860	8020	820
	④⑤⑥	9360	1120	7500	760	④⑤⑥	8820	1020	7560	1180
	⑤④⑥	9460	1260	7920	1380	⑤④⑥	9220	1460	7720	1000
	⑤⑥④	9580	1420	8260	1180	⑤⑥④	8340	480	7140	580
	⑥⑤④	9540	1160	8180	1460	⑥⑤④	9320	960	8080	1180
	⑥④⑤	9420	1180	8300	1160	⑥④⑤	9360	1060	8340	1240
③ ① ②	④⑥⑤	9740	1380	8280	1540	④⑥⑤	8980	1140	8340	1380
	④⑤⑥	9400	1160	7500	760	④⑤⑥	9120	900	7440	920
	⑤④⑥	9520	1280	7860	1500	⑤④⑥	9040	1220	7640	1160
	⑤⑥④	9680	1460	8160	1260	⑤⑥④	8540	560	7400	420
	⑥⑤④	8860	600	8200	1480	⑥⑤④	8820	580	8220	1480
	⑥④⑤	8780	520	8400	1260	⑥④⑤	8860	620	8340	1260
	④⑥⑤	9240	1040	8300	1680	④⑥⑤	9140	1020	8060	1640
	④⑤⑥	8480	560	6580	0	④⑤⑥	8520	400	7440	820
② ① ③	⑤④⑥	8820	1080	7860	1480	⑤④⑥	8660	420	7620	1260
	⑤⑥④	9220	980	8180	1500	⑤⑥④	9260	1020	8200	1680

b)减少禁会区间时超限车运行对双线铁路通过能力的影响分析。区段变长和列车数量的逐渐增加,使得区段内列车开行方案呈组合爆炸趋势,且列车在运行过程受主客观因素影响,选取最优方案具有一定的难度。为清晰分析禁会区间减少时超限车运行对双线铁路通过能力的影响,选取上行开行顺序⑥④⑤、下行开行顺序②①③的列车开行方案作为比照方案,其列车运行速度里程曲线如图 1 所示。其他条件不变的情况下,当减少 70641 次超限车在运行过程中禁会区间时,以同一列车开行方案仿真 10 次,其结果如表 2 所示。

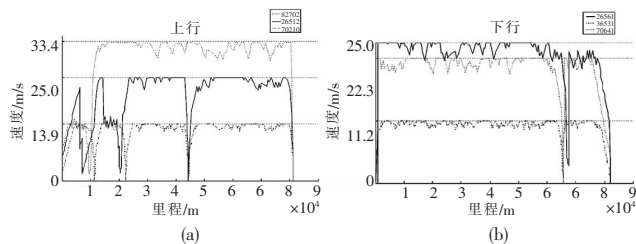


图 1 列车速度—里程曲线(两个禁会区间)

表 2 区段旅行时分与中间站停站时分统计表(一个禁会区间)/10 s

仿真方案 编号	旅行时分/停站时分				仿真方案 编号	旅行时分/停站时分			
	下行		上行			下行		上行	
	旅行	停站	旅行	停站		旅行	停站	旅行	停站
0	852	24	760	66	5	850	28	768	72
1	848	20	758	60	6	852	26	764	68
2	862	78	768	72	7	852	26	772	74
3	818	30	762	66	8	842	18	764	70
4	848	24	766	72	9	850	28	764	72

由表 2 易知,上行方向列车旅行时分均值为 8 474 s,下行方向列车旅行时分为 7 646 s,分析减少禁会区间后,旅行时分最接近均值的第 5 种列车开行方案,其列车运行速度—里程曲线如图 2 所示。

对比图 1、2 可知,当双线区段有两个连续禁会区间时,70641 次超限车运行至第 1 中间站即满足会让要求,会让 82702 次行包快运专列通过禁会区间,增加了 70641 次超限车的车站停留时间;当双线区段只有一个禁会区间,70641 次超限车运行至本方向第 2 中间站,满足列车会让要求时,反向 70210 次超限车已基本通过禁会区间,70641 次超限车仅需短暂停车会让,减少了车站停留时间;而上行方向,70210 次超限

车需在本方向第 1 和第 2 中间站办理两次被越行作业后,在第 4 中间站与 26512 次直通货物列车同时办理会让反向 70641 次超限车的禁会作业。70210 次超限车的车站停留时间不仅包括被越行停站时间、会让停站时间,同时还增加了一次发车追踪间隔时间。而当双线区段只有一个禁会区间时,70210 次超限车仅需要办理两次被越行作业,明显降低了 70210 次超限车站停留时间。

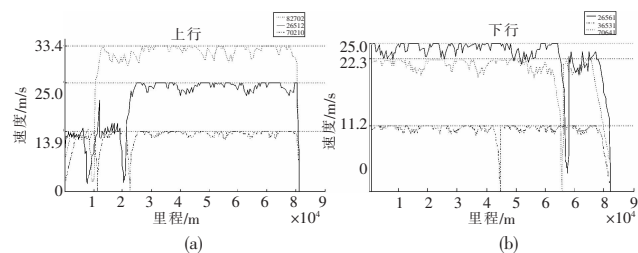


图 2 列车速度—里程曲线(一个禁会区间)

以上行开行顺序⑥④⑤、下行开行顺序②①③的列车开行方案为例,双线区段存在两个禁会区间时,下行方向通过能力损失值为 14.3 列,上行方向通过能力损失值为 13.2 列;双线区段只有一个禁会区间时,下行方向通过能力损失值为 13.4 列,通过能力少浪费 6.3%;上行方向通过能力损失值为 11.2 列,通过能力少浪费 15.2%。因此,尽可能减少超限车禁会区间的数量,有利于释放超限车所占用的运能,减少双线铁路运能的不必要浪费。

c)超限车运行对双线铁路运能的影响分析。仍以上行开行顺序为⑥④⑤、下行开行顺序为②①③的列车开行方案为例,采用列车运能换算和运能评估公式进行计算,结果表明,双线区段有两个禁会区间时,下行方向运能损失值为 11.4 列,上行方向运能损失为 13 列;双线区段只有一个禁会区间时,下行方向运能损失值为 10.4 列,运能少浪费 8.8%,上行方向运能损失为 10.6 列,运能少浪费 18.5%。经过比较易知,超限车运行对双线铁路运能的影响略小于对通过能力的影响,这主要是受超限车输送能力的影响,本文提出的方法能综合反映出铁路运能的利用水平。

5 结束语

a)综合考虑扣除系数法和计算机仿真法,通过引入标准车型和列车运能换算的概念,直观描述了超限车运行对双线铁路运能的影响;运用元胞自动机理论,构建了基于 CA 的双线铁路列车运行仿真模型和基于运行时间损失率的双线铁路运能损失评估模型,评估超限车运行对双线铁路运能损失,为铺化双线区段非平行列车运行图提供决策支持。

b)在区段长度、列车类型、列车速度等仿真环境一定的条件下,从微观角度描述了列车在区间的实际运行过程,刻画了超限车运行所引起的耗能特征,验证了超限车对后续快速列车速度压制所引起的速度传递效应,即减少一个禁会区间时下行方向通过能力可以少浪费 6.3%,上行方向通过能力可以少浪费 15.2%;综合考虑通过能力和输送能力时下行方向运能损失可以少浪费 8.8%,上行方向运能损失可以少浪费 18.5%。

c)CA 模型及铁路运能损失评估模型可广泛应用于其他类型铁路运能损失评估环节;而 CA 模型的慢化概率、禁会区间的设置对铁路运能的影响等诸多问题仍有待进一步的研究和探讨。

(下转第 2894 页)

参考文献:

- [1] 胡思继. 铁路行车组织学[M]. 北京:中国铁道出版社,1998.
- [2] 滕涛,田长海,马大伟. 货物列车紧急制动距离延长对通过能力的影响[J]. 铁道学报,2008,30(6): 96-101.
- [3] 李海鹰,张超. 编组站到解系统通过能力计算[J]. 中国铁道科学,2010,31(3):120-124.
- [4] 周黎,张超,胡思继. 线路运输能力计算方法及其在京广线能力计算中的应用[J]. 北京交通大学学报:自然科学版,2006,30(6): 32-35.
- [5] 彭其渊,闫海峰,殷勇. 单线提速区段通过能力和旅行速度的研究[J]. 西南交通大学学报,2002,37(5):510-514.
- [6] 苏顺虎,田长海,陈治亚. 客运专线通过能力的分析计算[J]. 中国铁道科学,2008,29(5):119-124.
- [7] 白磊,胡帅,孟令云,等. 列车开行间隔对区间通过能力影响的研究[J]. 铁路计算机应用,2010,19(10):4-6.
- [8] 魏德勇,王进勇,余凡. 平均最小列车间隔通过能力计算法在武广客运专线的应用[J]. 铁道工程学报,2004(增刊):4-6.
- [9] 曲思源,徐行方. 既有繁忙干线时段性通过能力规划模型及算法[J]. 交通运输工程学报,2010,10(1): 77-81.
- [10] 宋瑞,何世伟,朱松年. 智能铁路系统线路通过能力分析模拟模型的研究[J]. 铁道学报,1999,21(2):1-6.
- [11] 李洪波. 铁路双线区间通过能力计算方法的改进[J]. 铁道运输与经济,2007,29(8):68-69.
- [12] 朱家荷,汤奇志,赵春雷,等. 铁路区间通过能力计算方法的变革[J]. 铁道运输与经济,2005,2(7):72-75.
- [13] 马金元. 基于列车运行图异质性的区间通过能力计算方法研究[D]. 北京:北京交通大学,2010.
- [14] LO S C, HSU C H. Cellular automata simulation for mixed manual and automated control traffic[J]. Mathematical and Computer Modelling,2010,51(7-8):1000-1007.
- [15] JIA Bin, LI Xin-gang, JIANG Rui, *et al.* Traffic behavior around the weaving section in cellular automata model[J]. International Journal of Modern Physics C,2010,21(3):409-422.
- [16] FOWDUR S C, RUGHOOPUTH S D D V. Automated traffic routing based on the rip and EIGRP algorithms using cellular automata[J]. International Journal of Modern Physics C,2010,21(2):239-247.