

限速条件下铁路区间通过能力计算方法

王 莉^{1,2}, 秦 勇¹, 徐 杰¹, 贾利民¹

(1. 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;

2. 北京交通大学 交通运输学院, 北京 100044)

摘要: 深入分析限速条件下区间通过能力计算涉及的不确定因素. 针对其动态性、模糊性、随机性和无后效性等特点, 建立基于模糊马尔科夫链的区间通过能力计算方法. 提出一种以模糊随机变量表达区间通过能力的解析形式, 使得能力随突发事件影响程度变化的随机性和司机驾驶行为等因素的模糊性没有任何缺失. 以京沪高铁作为实例分析, 基于模糊马尔科夫链的计算方法反映了能力随事件变化的动态过程, 更能容错各类因素及其不确定性, 为决策者提供了丰富的选择方案, 使得能力计算可兼顾激进的、保守的和相对折中的各种典型的运输组织策略, 符合特殊条件下列车的实际运营环境.

关键词: 突发事件; 区间通过能力; 模糊马尔科夫链; 模糊随机过程

中图分类号: U292

文献标志码: A

Capacity Determination Approach of Railway Section in Speed Restriction Conditions

WANG Li^{1,2}, QIN Yong¹, XU Jie¹, JIA Limin¹

(1. Rail Traffic Control and Safety State Key Laboratory, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. School of Traffic and Transportation, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: Uncertainties parameters of section carrying capacity calculation in speed restriction conditions are analyzed. The capacity calculation method based on Fuzzy Markov Chain is established according to its characteristics of dynamic, fuzziness, randomness and non-after-effect property. The section carrying capacity in emergency is expressed by fuzzy random variable, which remains the randomness of capacity changing with the impact of emergencies and the fuzziness of the driving behavior and other factors. The case study on Beijing-Shanghai Highspeed Line shows that the capacity calculation method based on Fuzzy Markov Chain reflects the capacity dynamic process in

emergency. It has an excellent fault tolerance of a variety of factors and uncertainties and provides a wealth of options for policy-makers. The capacity calculation gives consideration to a variety of typical transport organization strategies, such as the jacobinical, the conservative or the compromised scheme, which is more coincident with the actual operation of the train in special conditions.

Key words: emergency; section carrying capacity; Fuzzy Markov Chain; fuzzy random process

铁路区间通过能力指在一定的列车类型和行车组织条件下, 铁路区间在单位时间内(一昼夜或几小时)能通过的最大列车数. 其影响因素主要包括区间正线数目, 铁路信号制式, 列车运行速度, 闭塞区间长度, 列车类型及列车序列等. 区间通过能力的计算方法一般分为 4 种: 图解法, 解析法, 优化法和模拟仿真法.

图解法是人工模拟运输生产实际, 用特性图形表示和确定通过能力的方法^[1]. 其最大的优点就是可行性强, 但工作量大, 铺图水平也因人而异, 一般用来最后验证运行计划的可行性. 解析法是在现有固定设备和移动设备等相关因素分析的基础上建立数学模型求解的方法. 其优点是综合考虑各种因素、工作量较小. 目前国内主要为扣除系数法, 即首先计算只有一种列车开行的平行运行图的区间通过能力, 然后确定各种列车在不同运行速度、追踪间隔和数量要求下的扣除系数, 从而获得非平行运行图的区间通过能力. 国内很多学者对此进行了研究^[2-3]. 此外, 国际铁路联盟于 2004 年通过了铁路通过能力的计算方法 UIC406, 其首先根据基础线路生成列车时刻表, 然后将列车运行线进行压缩以得到最小的

收稿日期: 2013-05-31

基金项目: 国家自然科学基金(61074151), 国家“十一五”科技支撑计划(2009BAG12A10), 国家“八六三”高新技术研究发展计划(2012AA112001)

第一作者: 王 莉(1982—), 女, 博士后, 主要研究方向为轨道交通主动安全保障与应急管理. E-mail: wangli298@gmail.com

通讯作者: 贾利民(1963—), 男, 工学博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为轨道交通运营控制与安全. E-mail: jialm@vip.sina.com

列车追踪间隔时间来计算通过能力. 一些学者进行了实证分析^[4-5]. 优化方法是通过建立数学优化模型对铁路区间通过能力进行评估,其目标是通过优化的手段使既定铁路区间能够开行更多的车,从而得到最大通过能力. 文献[6-7]通过确定列车发车时间利用分枝定界法解决单线上运行计划生成问题并计算区间通过能力. 混合整数规划^[8]和进化算法^[9]也被用于这类问题的求解. 近年来随着计算机技术的发展,一些学者尝试利用计算机仿真分析铁路区间通过能力. 一些铁路仿真软件也提供了相对成熟的工具,如 Multirail, Simone, Railsys 和 Opentrack. 其基本原理是通过构建铁路基础设施设定运行图参数,以仿真的手段实现运行图的铺画和能力的评估.

由于区间通过能力计算涉及因素多,关系复杂,而数学模型的建立或者计算仿真往往只考虑关键因素,不可能完全符合现实情况;简化计算得到唯一值不能兼顾各种决策偏好,使得运输组织策略不够灵活性,无法提供更多的合理可选项. 此外,无论是哪种方法,都会涉及铁路信号制式、闭塞分区长度、列车运行速度、列车追踪间隔、列车停站方式等因素. 在现实环境中,特别是突发事件条件下,根据突发事件的类型、级别不同,铁路运输系统会遭受不同程度的影响,如某些区段中断行车或者采取列车限速措施,随着突发事件态势的不断发展,线路通过能力也会发生动态变化,具有一定程度上的随机性. 由于线路特征不同,突发事件条件下的列车速度,信号设备的反应时间以及司机的驾驶行为等因素使得区间通过能力存在一定程度的模糊性. 随机与模糊的双重不确定性使得突发事件条件下的区间通过能力的计算需要探索新的解决方法.

1 铁路区间追踪间隔不确定因素分析

列车区间追踪间隔是计算铁路区间通过能力的关键因素. 我国铁路目前采取准移动闭塞和固定闭塞两种列车控制模式. 在突发事件条件下,如果信号设备发生故障,列车控制模式可能由准移动闭塞降级为固定闭塞的模式. 本文将针对准移动闭塞和固定闭塞两种情况进行讨论.

1.1 准移动闭塞模式下列车追踪间隔

我国高速铁路主要采用准移动闭塞的方式控制列车运行,采用目标距离控制模式,如图1所示. 图中, L_a 为制动命令发出到列控车载设备接收到的时间以及司机采取制动措施反应时间内的列车走行距

离, m ; L_d 为列车制动系统起动的延迟时间列车走行距离, m ; L_b 为列车纯制动距离, m ; L_p 为列车安全防护距离, m ; L_c 为司机舒适驾驶距离^[12], m ; L_t 为列车长度, m ; L_s 为所有距离的和. 列车追踪间隔时间 t_1 的计算方法见式(1).

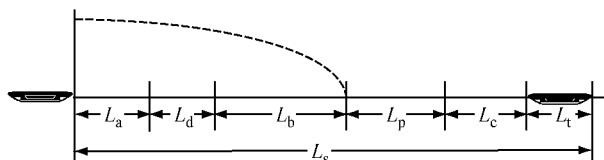


图1 目标距离控制模式

Fig.1 Control model of objective distance

$$t_1 =$$

$$[(L_a + L_d + L_b + L_p + L_c + L_t)/v] \cdot 3.6 \quad (1)$$

式中: t_1 为准移动闭塞模式下列车追踪间隔时间; v 为列车平均运行速度, $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$. 为了分析列车追踪间隔的不确定性,将式(1)转化为速度、时间的形式,如下:

$$t_1 = t_a + t_d + (v/3.6)/2a + [(L_p + L_c + L_t)/v] \cdot 3.6 \quad (2)$$

由于列车控制系统、制动系统、司机驾驶行为等因素的影响,式(2)中的许多参数都体现出模糊性. t_a 为制动命令发出到列控车载设备接收到的时间以及司机采取制动措施的反应时间, t_a 的取值与列控地面设备和车载设备的相应时间、信息传递时间和通信网络可靠性等因素相关,同时司机的反应时间也会影响 t_a 的取值(文献[4]认为该时间为9.5 s左右),故 t_a 是一个模糊参数,记为 \tilde{t}_a (本文通过加入上标“~”表示其模糊参数,上标“^”表示模糊随机参数,下文涉及的相关参数同样处理,不再赘述); t_d 为列车制动系统起动的延迟时间,其同样具有模糊性,一般取2.5 s左右; a 为列车制动减速度,取值由列车的制动性能决定,与线路特征有一定关系,如区间一般地段平均坡度为下坡20‰时,其对应的常用减速度值为 $0.565 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$,区间平坡时一般取值 $0.75 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$,站内停车一般取 $0.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ ^[10],由于列车制动装置和线路条件不同, a 的取值具有模糊性,取值范围为 $0.50 \sim 0.75 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$;由于列控系统的测速测距误差小于2%,距离累计误差不大于80 m,如果考虑一些安全余量, L_p 可取值150 m,所以 L_p 的变化范围为80~150 m; L_c 的取值随着控制模式的不同而变化, L_c 越长司机的驾驶行为就越从容,但同时会增加列车追踪间隔,故 L_c 可取1~2个闭塞分区的

长度在保证舒适驾驶的同时提高能力利用;列车的平均速度 v 受线路条件、司机驾驶行为、设备状态和外界环境等众多因素的影响,特别是突发事件下,随着设备修复和行车组织工作的进行,突发事件影响程度的变化往往带有一定的随机性,故列车平均速度可表示为模糊随机参数,记为 \hat{v} . 综上,移动闭塞模式下列车追踪间隔时间也具有不确定性,其计算公式可表示如下:

$$\tilde{t}_1 = \tilde{t}_a + \tilde{t}_d + \hat{v}^2/2 \tilde{a} + [(\tilde{L}_p + \tilde{L}_c + L_t)/\hat{v}] \cdot 3.6 \tag{3}$$

1.2 固定闭塞模式下的列车追踪间隔

固定闭塞模式下,列车运行依靠信号灯控制实现,中国大部分铁路目前仍采取这种控制模式,大量的文献对固定闭塞下的列车追踪间隔进行了分析.

(1) 在使用三显示的固定闭塞区段,追踪列车的间隔一般需相隔 3 个闭塞分区^[11],如图 2 所示. 图中, L'_s, L''_s, L'''_s 分别为 3 个闭塞分区的区间长度, m; 追踪间隔时间计算如下:

$$t_1 = [(L_t + L'_s + L''_s + L'''_s)/v] \cdot 3.6 \tag{4}$$

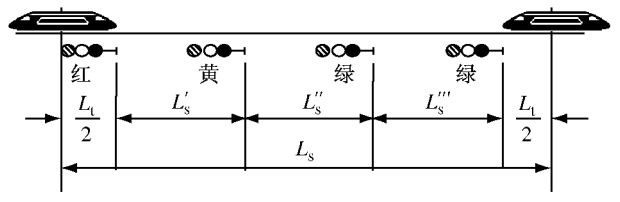


图 2 三显示固定闭塞列车追踪间隔距离
Fig.2 Interval between trains in three-pattern block section

(2) 在使用四显示的固定闭塞区段,追踪列车的间隔距离一般需相隔 4 个闭塞分区^[11],如图 3 所示,图中, L 表示信号灯为绿色, U 表示信号灯为黄色, H 表示信号灯为红色, LU 表示信号灯一个为绿色另一个为黄色. 追踪间隔时间计算如下:

$$t_1 = [(4L_s + L_t)/v] \cdot 3.6 \tag{5}$$

	L	L	LU	U	H
	—○—	—○—	—○—	—○—	—○—
闭塞分区性质	提醒区	第一制动区	第二制动区	第三制动区	占用区
信息种类	提醒注意	预告	预告	停车	

图 3 四显示固定闭塞列车追踪间隔距离
Fig.3 Interval between trains in four-pattern block section

固定闭塞条件下,列车追踪间隔时间主要取决于闭塞分区长度和列车运行速度. 一般条件下,三显示要求一个闭塞分区长度满足一个列车制动距离^[12],四显示要求 2 个或 3 个闭塞分区长度来满足列车制动距离. 闭塞分区长度由列车制动距离、显示制式和安全冗余确定,而制动距离的主要影响因素为牵引机型、牵引重量、线路限速、线路坡度等,这些因素都增加了固定闭塞条件下的列车追踪间隔的不确定性. 文献[11]指出在三显示模式下闭塞分区长度可取 1 600~2 600 m,四显示模式下可取 700~900 m. 故三显示模式下,列车追踪间隔计算公式转化为

$$\tilde{t}_1 = [(L_t + 3 \tilde{L}_s)/\hat{v}] \cdot 3.6 \tag{6}$$

四显示模式下列车追踪间隔计算公式转化为

$$\tilde{t}_1 = [(L_t + 4 \tilde{L}_s)/\hat{v}] \cdot 3.6 \tag{7}$$

2 突发事件下铁路区间通过能力计算

2.1 铁路区间通过能力的不确定性分析

区间通过能力的不确定性表现在两个方面,首先区间能力取值本身具有模糊性,由于列车平均运行速度、列车停站时间、到发间隔和列车追踪间隔等在一定程度上都具有模糊性,故在一定时间段内铁路区间通过能力也通常在一个范围内变化. 其次,在一段时间内,突发事件影响的严重程度和铁路部门对能力损失区域的修复能力都是随机变化的,其对应的列车运行速度也会随之变化,因此在一段时间内区间通过能力的变化也具有随机性;而且,未来某时段路网能力的变化只与当前设备条件相关与这之前的情况无关,故对于不同线路等级,车站等级、突发事件类型和事件级别区间通过能力的转化具有无后效性. 文献[13]指出区间能力状态改变过程是一个马尔科夫链. 由于区间通过能力本身具有模糊性,本文认为其状态改变过程是一个模糊马尔科夫链.

如图 4,将计算时间段分成 M 个分时段,由于各分时段特殊事件影响程度、应急等级不同,线路修复

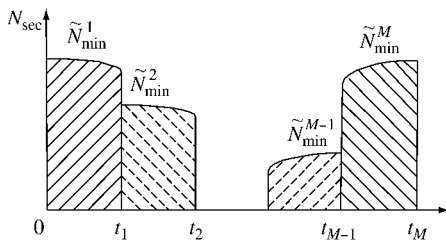


图 4 突发事件条件下区间通过能力变化过程
Fig.4 Section capacity changing process in emergency

程度也不同,故列车限速不同,各分时段区间通过能力也不同。 \tilde{N}_{mix}^i 表示在第*i*个分时段区间通过能力的模糊值,令 $\Delta t^{(i)} = t_i - t_{i-1}, i = 1, 2, \dots, M$,则整个计算时间段的区间通过能力 N_{sec} 为

$$N_{\text{sec}} = \sum_{i=1}^M \tilde{N}_{\text{mix}}^i \quad (8)$$

这里分时段的划分是根据突发事件的影响程度和线路能力恢复程度确定的,故分时段的划分也具有模糊性,在现场实际条件下可以根据突发事件的演化过程或限速策略确定。

2.2 模糊马尔科夫链

模糊随机变量(fuzzy random variable, FRV)是从概率空间到模糊空间构成的集合的可测函数,也就是说模糊随机变量是一个取模糊值的随机变量。给定概率空间 $\{\Theta, \Lambda, P_r\}$, $\tilde{u}_1, \tilde{u}_2, \dots, \tilde{u}_n$ 为模糊变量,如果 $\xi(\omega_i) = \tilde{u}_i, i = 1, 2, \dots, n$,则 $\xi(\omega_i)$ 为模糊随机变量^[14]。

定义1 模糊马尔科夫链: 给定概率空间 (Ω, Λ, P) ,其中 Θ 为非空集合, Λ 是 Γ 上的 σ 代数, P 为概率。考虑只取有限个或可数个模糊随机变量 $\{\tilde{X}(t), t = 0, 1, 2, \dots\}$,对于全体 $\tilde{X}(t)$ 所有可能的模糊状态,存在一组模糊集 $\tilde{A} = \{\tilde{A}_0, \tilde{A}_1, \tilde{A}_2, \dots\}$ 与之对应,令 S 为一个模糊事件发生的可能性,若 $\tilde{X}(n+1) = \tilde{A}_{n+1}$ (变量 $\tilde{X}(n+1)$ 在时刻 $n+1$ 处于状态 \tilde{A}_{n+1})的可能性只与 $\tilde{X}(n)$ 相关,而与 n 之前状态无关,即: $S(\tilde{X}(n+1) = \tilde{A}_{n+1} | \tilde{X}(n), \tilde{X}(n-1), \dots, \tilde{X}(0)) = S(\tilde{X}(n+1) = \tilde{A}_{n+1} | \tilde{X}(n))$,则序列 $\tilde{X}(t)$ 称为模糊马尔科夫链。

以 S 记一步转移可能性矩阵,从而

$$S = \begin{bmatrix} s_{0,0} & s_{0,1} & s_{0,2} & \cdots & s_{0,j} & \cdots \\ s_{1,0} & s_{1,1} & s_{1,2} & \cdots & s_{1,j} & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ s_{i,0} & s_{i,1} & s_{i,2} & \cdots & s_{i,j} & \cdots \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \end{bmatrix} \quad (9)$$

矩阵 S 的第*i*+1行就是给定 $\tilde{X}(n) = \tilde{A}_n$ 时, $\tilde{X}(n+1)$ 的条件可能性概率。即 $S_{i,j} = S(\tilde{X}(j) = \tilde{A}_j | \tilde{X}(i) = \tilde{A}_i)$ 。这里需要注意的是,本文定义的模糊马尔科夫链仍严格遵守“无后效性”。

模糊马尔科夫链与概率空间上的马尔科夫链的区别是构成马尔科夫链的变量的状态空间不同,后者观察的对象为随机变量,其所有可能的状态取值

为实数,而模糊马尔科夫链中观察的对象为模糊随机变量,其所有可能的状态取值为模糊数。

2.3 区间通过能力模糊值计算

假设突发事件条件下在持续时间 T 内,列车的速度为 Q_{spe} 种,记为 $v^{(1)}, v^{(1)}, \dots, v^{(Q_{\text{spe}})}$ 。将持续时间 T 划分为 Q_c 个分时段,其对应的区间通过能力有 Q_c 种情况,记为 $\tilde{c}_1, \tilde{c}_2, \dots, \tilde{c}_i, i = 1, 2, \dots, Q_c$,构成能力变化马尔科夫过程的所有可能模糊集合 \tilde{C} 。

首先计算单位时间区间通过能力,如下:

$$c = (60 \times 60 - t_{\text{mai}}) / t_1 \quad (10)$$

式中, c 为单位时间区间通过能力,列; t_{mai} 为综合维修天窗时间, s 。若存在不同等级列车可利用扣除系数法计算单位时间区间通过能力,具体参见文献^[15]。

列车速度变化时,由于受到其他因素的影响,在实际运营环境中,调度员并不能根据列车速度实时地计算区间能力,也就是说一段时间内区间通过能力往往对应一组变化的列车速度,故 $Q_{\text{sp}} \neq Q_c$ 。

记列车速度的状态转移矩阵为

$$P = \begin{bmatrix} P_{1,1} & P_{1,2} & \cdots & P_{1,Q_{\text{sp}}} \\ P_{2,1} & P_{2,2} & \cdots & P_{2,Q_{\text{sp}}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{Q_{\text{sp}},1} & P_{Q_{\text{sp}},2} & \cdots & P_{Q_{\text{sp}},Q_{\text{sp}}} \end{bmatrix} \quad (11)$$

其中 $P_{i,j}$ 为列车速度由 $v^{(i)}$ 转移到 $v^{(j)}$ 的概率。

令可能性测度下的区间能力的状态转移矩阵为

$$S = \begin{bmatrix} s_{1,1} & s_{1,2} & \cdots & s_{1,Q_c} \\ s_{2,1} & s_{2,2} & \cdots & s_{2,Q_c} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ s_{Q_c,1} & s_{Q_c,2} & \cdots & s_{Q_c,Q_c} \end{bmatrix} \quad (12)$$

其中 $s_{i,j}$ 为可能性测度下区间能力由 \tilde{c}_i 转移到 \tilde{c}_j 的条件概率^[16],即

$$s(\tilde{c}_j / \tilde{c}_i) = \left(\sum_{m=0}^{Q_{\text{sp}}} P_m \mu_{\tilde{c}_i}(m) \sum_{s=0}^{Q_{\text{sp}}} P_{ms} \mu_{\tilde{c}_j}(s) \right) / P\{\tilde{c}_i\} \quad (13)$$

式中, $\mu_{\tilde{c}_i}(m)$ 为分时段区间能力的隶属度函数; $P\{\tilde{c}_i\}$ 为分时段区间能力取模糊值 \tilde{c}_i 的概率; P_m 为列车速度取 $v^{(m)}$ 的概率; P_{ms} 为列车速度由 $v^{(m)}$ 转移到 $v^{(s)}$ 的概率。

为了计算方便,定义矩阵 Q_1 和 Q_2 。

$$Q_1 = \begin{bmatrix} \mu_{\tilde{c}_1}(0) & \mu_{\tilde{c}_2}(0) & \cdots & \mu_{\tilde{c}_N}(0) \\ \mu_{\tilde{c}_1}(1) & \mu_{\tilde{c}_2}(1) & \cdots & \mu_{\tilde{c}_N}(1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mu_{\tilde{c}_1}(N) & \mu_{\tilde{c}_2}(N) & \cdots & \mu_{\tilde{c}_N}(N) \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$Q_2 = \begin{bmatrix} \frac{p_0 \mu_{\tilde{c}_1}(0)}{P(\tilde{c}_1)} & \frac{p_1 \mu_{\tilde{c}_1}(1)}{P(\tilde{c}_1)} & \cdots & \frac{p_N \mu_{\tilde{c}_1}(N)}{P(\tilde{c}_1)} \\ \frac{p_0 \mu_{\tilde{c}_2}(0)}{P(\tilde{c}_2)} & \frac{p_1 \mu_{\tilde{c}_2}(1)}{P(\tilde{c}_2)} & \cdots & \frac{p_N \mu_{\tilde{c}_2}(N)}{P(\tilde{c}_2)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{p_0 \mu_{\tilde{c}_N}(0)}{P(\tilde{c}_N)} & \frac{p_1 \mu_{\tilde{c}_N}(1)}{P(\tilde{c}_N)} & \cdots & \frac{p_N \mu_{\tilde{c}_N}(N)}{P(\tilde{c}_N)} \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$\text{故 } s(\tilde{c}_j/\tilde{c}_i) = Q_2 P_{ms} Q_1 \quad (16)$$

故在可能性测度下, $\hat{N}_{\max}^{(1)}$ 为在时间段 T 内首次限速时对应的区间通过能力值, 设 $\hat{N}_{\max}^{(1)} = \tilde{c}_1$.

则有

$$\hat{N}_{\max}^{(2)} = \begin{cases} \tilde{c}_1, s_{1,1} \\ \tilde{c}_2, s_{1,2} \\ \vdots \\ \tilde{c}_{Q_c}, s_{1,Q_c} \end{cases} \quad (17)$$

表示 $\hat{N}_{\max}^{(2)}$ 取模糊值 \tilde{c}_i 的条件可能性为 $s_{1,i}$, $i=1, 2, \dots, Q_c$.

推广到一般情况, 则

$$\hat{N}_{\max}^{(l)} = \begin{cases} \tilde{c}_1, s_{h,1} \\ \tilde{c}_2, s_{h,2} \\ \vdots \\ \tilde{c}_{Q_c}, s_{h,Q_c} \end{cases}, l = h+1 \quad (18)$$

所以, 限速条件下的分时段内的区间通过能力 $\hat{N}_{\max}^{(l)}$ 为一个模糊随机变量.

在限速条件下持续时间 T 内的区间通过能力为

$$N_{\text{sec}} = \sum_{i=1}^{Q_c} \tilde{N}_{\max}^i = \begin{cases} \sum_{i=1}^{Q_c} \tilde{c}_1, \prod_{i=1}^{Q_c} s_{i,1} \\ \sum_{i=1}^{Q_c-1} \tilde{c}_1 + \tilde{c}_2, \prod_{i=1}^{Q_c-1} s_{i,1} \cdot s_{Q_c,2} \\ \sum_{i=1}^{Q_c-1} \tilde{c}_1 + \tilde{c}_3, \prod_{i=1}^{Q_c-1} s_{i,1} \cdot s_{Q_c,3} \\ \vdots \\ \sum_{i=1}^{Q_c-1} \tilde{c}_{Q_c} + \tilde{c}_{Q_c-1}, \prod_{i=1}^{Q_c-1} s_{i,Q_c} \cdot s_{Q_c,Q_c-1} \\ \sum_{i=1}^{Q_c} \tilde{c}_{Q_c}, \prod_{i=1}^{Q_c} s_{i,Q_c} \end{cases} \quad (19)$$

可见, 在可能性测度下, 突发事件条件持续时间 T 内的区间通过能力仍为一个模糊随机变量.

综上, 限速条件下, 时间段 T 内的区间通过能力的求解步骤如下: ①获取突发事件条件下, 列车速度

的转移概率; ②计算不同限速条件下的区间通过能力模糊值; ③根据列车速度转移概率, 计算区间通过能力的条件转移概率; ④取第一个分时段区间通过能力为 $\tilde{N}_{\max}^{(1)} = \tilde{c}_1$, 根据步骤③中求得的条件转移概率, 依次得到后面所有分时段的通过能力; ⑤对步骤④中求得的分时段区间通过能力进行加和, 得到最终的时间段 T 内的区间通过能力.

2.4 参数灵敏度分析

区间通过能力计算方法主要取决于列车追踪间隔的模糊值计算和通过能力的条件转移概率. 在移动闭塞模式下, 追踪间隔的计算公式中前两项一般为个位数, 第 4 项中列车舒适驾驶距离 (根据列车速度可取 1~2 个闭塞分区长度) 相比另外两个长度多一个数量级, 此外列车长度、列车减速度和闭塞分区长度等参数一般可测量获得, 因此移动闭塞模式下列车追踪间隔主要敏感参数为列车速度. 在固定闭塞下根据式 (6)~(7) 可知, 列车追踪间隔的敏感参数同样是列车速度. 此外, 根据本文 2.3 节的推导过程可知, 通过能力的条件转移概率取决于列车速度状态转移概率. 故限速条件下对列车运行速度及速度变化概率的估计是本文计算区间通过能力的敏感参数, 速度转移矩阵反映了突发事件条件下现场运营环境的动态变化. 对现实环境中列车的速度进行统计, 速度变化的频率就形成了不同速度间的转移概率. 该数值可由三种方式获得: ①对历史上已经发生的各类突发事件下列车运行状态的记录和统计; ②根据具有多年驾龄的列车司机操作经验和行车调度专家经验进行统计; ③根据突发事件条件下的行车安全操作规范进行判定, 如风速为 $25 \sim 30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时列车限速 $70 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, 轨钢轨面上积雪深度为 $19 \sim 22 \text{ cm}$ 时列车限速 $160 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$.

3 算例

3.1 突发事件场景设置

京沪高速铁路作为我国纵横南北的主动脉, 对促进全国高速铁路网络的发展具有极其重要的作用, 其中上海至南京段 (沪宁段) 为京沪高铁最繁忙的区段. 沪宁段内具体车站设计及列车时刻表可见文献 [15]. 假设某日上午 8 时, 京沪高铁镇江西至无锡东区间由于大风天气实施限速, 预计风速以 $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右的速度持续 2 h, 而后风速持续增强以 $24 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右的速度持续 5 h, 最后风速迅速减小并在 2 h 后恢复正常运营环境.

3.2 铁路区间通过能力计算

根据突发事件的发展状态,本文将区间能力变化过程按照风速变化情况划分为3个阶段,根据铁路行车安全规范,在上述场景下列车运行速度有3种:限速 $160 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 、限速 $70 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 或者正常行驶. 首先计算不同限速下的区间能力. 该时段内只涉及中高速列车,因此当列车恢复运营时,列车的平均运行速度可表示为模糊数 $\tilde{v}_0 = (330 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}, 340 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}, 350 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1})$;此外,列车的平均速度由于外界环境、运营设备条件和司机驾驶水平的差异,往往在一个区间内变化且必须小于限速值,故当限速值为 $160 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 时,列车平均运行速度可设置为 $\tilde{v}_1 = (130 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}, 140 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}, 155 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1})$,当限速值为 $70 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 时,设为 $\tilde{v}_2 = (50 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}, 60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}, 65 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1})$.

(1) 首先计算不同限速条件下的区间能力模糊值

t_a 取值为 9.5 s , t_d 为 2.5 s , a 为 $0.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$, L_p 为 150 m , L_c 的取值与列车速度有很大关系,当列车速度较高时可取两个闭塞分区的长度,约为 4000 m ,当列车速度较低时可取一个闭塞分区的长度,约为 2000 m , L_i 取保守值 400 m ,将上述参数代入式(2)得到如下结果:

当列车正常运行时,列车追踪间隔 \tilde{t}_{i_0} 为 $(124 \text{ s},$

$$P_1 = \begin{bmatrix} 0.1 & 0.05 & 0.05 & 0.1 & 0.4 & 0.3 & 0 & 0 & 0 \\ 0.05 & 0.1 & 0.05 & 0.2 & 0.3 & 0.3 & 0 & 0 & 0 \\ 0.05 & 0.05 & 0.1 & 0.2 & 0.2 & 0.4 & 0 & 0 & 0 \\ 0.1 & 0.05 & 0 & 0.5 & 0.2 & 0.1 & 0 & 0 & 0.05 \\ 0 & 0 & 0.05 & 0.1 & 0.7 & 0.15 & 0 & 0 & 0 \\ 0.05 & 0.05 & 0.1 & 0.2 & 0.2 & 0.4 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.05 & 0 & 0 & 0.5 & 0.2 & 0.25 \\ 0 & 0 & 0 & 0.05 & 0.05 & 0 & 0.3 & 0.5 & 0.1 \\ 0.01 & 0 & 0 & 0 & 0.05 & 0.04 & 0.1 & 0.2 & 0.6 \end{bmatrix}$$

$$P_2 =$$

$$\begin{bmatrix} 0.4 & 0.2 & 0.1 & 0.05 & 0.05 & 0.2 & 0 & 0 & 0 \\ 0.1 & 0.7 & 0.1 & 0 & 0 & 0.1 & 0 & 0 & 0 \\ 0.1 & 0.1 & 0.8 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.2 & 0.2 & 0.2 & 0.1 & 0.2 & 0.1 & 0 & 0 & 0 \\ 0.3 & 0.2 & 0.15 & 0.1 & 0.25 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.2 & 0.2 & 0.3 & 0 & 0.1 & 0.2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.7 & 0.1 & 0.2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.5 & 0.3 & 0.2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.5 & 0.2 & 0.2 & 0 & 0 & 0.1 \end{bmatrix}$$

根据上述计算的能力模糊值及式(14),计算得

$127 \text{ s}, 131 \text{ s})$,由于算例中维修天窗时间为零,1 h 单方向通过能力 \tilde{c}_0 为 $(27, 28, 29)$;当限速 $160 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 时,列车追踪间隔 \tilde{t}_{i_1} 为 $(143 \text{ s}, 156 \text{ s}, 168 \text{ s})$,1 h 单方向通过能力 \tilde{c}_1 为 $(21, 23, 25)$;当限速为 $70 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 时,列车追踪间隔 \tilde{t}_{i_2} 为 $(163, 187, 208)$,1 h 单方向通过能力 \tilde{c}_2 为 $(17, 19, 22)$.

(2) 计算突发事件条件下能力转移的条件概率

假设第一个阶段列车限速为 $160 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,调整涉及的列车等级相同,限速后运行速度相近,列车之间一般不会发生越行,可得第一个阶段区间通过能力 $\hat{N}_{\max}^{(1)}$ 为:

$$\hat{N}_{\max}^{(1)} = 2\tilde{c}_1 = (42, 46, 50)$$

为了方便计算,令 $v_0 = 330 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, $v_1 = 340 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, $v_2 = 350 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, $v_3 = 130 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, $v_4 = 140 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, $v_5 = 155 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, $v_6 = 50 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, $v_7 = 60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, $v_8 = 65 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,且各种速度出现的概率 p_{v_i} 相同,即 $p_{v_i} = 1/9$, $i = 1, 2, \dots, 8$;第2个阶段和第3个阶段的列车速度转移矩阵分别为 P_1 和 P_2 . 列车速度转移矩阵取值是根据2.4节提到的第2种和第3种方式获得的,但实际应用中需要更多数据调查的支持.

到不同速度相对于能力的隶属度矩阵为:

$$Q_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0.9 & 0.1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0.2 & 0.8 \end{bmatrix}$$

三种能力的概率为 $P(\tilde{c}_0) = 1/3$, $P(\tilde{c}_1) = 3.1/$

9, $P(\tilde{c}_2) = 2.9/9$.

根据式(15)可得矩阵 Q_2 的值.

$$Q_2 = \begin{bmatrix} \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{0.9}{3.1} & \frac{1}{3.1} & \frac{1}{3.1} & 0 & 0 & \frac{0.2}{3.1} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{0.1}{2.9} & 0 & 0 & \frac{1}{2.9} & \frac{1}{2.9} & \frac{0.8}{2.9} \end{bmatrix}$$

根据式(16)可得第2个阶段和第3个阶段的能力转移条件概率,将其转移矩阵分别记为 S^1 和 S^2 .

$$S^1 = \begin{bmatrix} 0.200 & 0 & 0.783 & 3 & 0.016 & 7 \\ 0.124 & 8 & 0.789 & 0 & 0.086 & 1 \\ 0.007 & 9 & 0.156 & 6 & 0.835 & 5 \end{bmatrix}$$

$$S^2 = \begin{bmatrix} 0.866 & 7 & 0.131 & 7 & 0.001 & 7 \\ 0.609 & 7 & 0.375 & 8 & 0.014 & 5 \\ 0.020 & 7 & 0.901 & 7 & 0.077 & 6 \end{bmatrix}$$

(3) 计算受影响时段内的能力和

根据第2节提出的基于模糊马尔科夫链的区间通过能力计算方法,第2个和第3个阶段的通过能力可表示为模糊随机变量,具体形式如下:

$$\hat{N}_{\text{mix}}^{(2)} = \begin{cases} 5\tilde{c}_0, s_{1,0}^1 \\ 5\tilde{c}_1, s_{1,1}^1 \\ 5\tilde{c}_2, s_{1,2}^1 \end{cases} = \begin{cases} (135, 140, 145), 0.124 & 8 \\ (105, 115, 125), 0.789 & 0 \\ (85, 95, 110), 0.086 & 1 \end{cases}$$

$$\hat{N}_{\text{mix}}^{(3)} = \begin{cases} 2\tilde{c}_0, s_{1,0}^2 \\ 2\tilde{c}_1, s_{1,1}^2 \\ 2\tilde{c}_2, s_{1,2}^2 \end{cases} = \begin{cases} (54, 56, 58), 0.609 & 7 \\ (42, 46, 50), 0.375 & 8 \\ (34, 38, 44), 0.014 & 5 \end{cases}$$

故9h的能力和为

$$\hat{N}_{\text{sec}} = \sum_{i=1}^3 \hat{N}_{\text{mix}}^{(i)} = \begin{cases} (231, 242, 253), 0.076 & 1 \\ (219, 232, 245), 0.046 & 9 \\ (211, 224, 239), 0.001 & 8 \\ (201, 217, 233), 0.481 & 1 \\ (189, 207, 225), 0.296 & 5 \\ (181, 199, 219), 0.011 & 4 \\ (181, 197, 218), 0.052 & 5 \\ (169, 187, 210), 0.032 & 4 \\ (161, 179, 204), 0.001 & 3 \end{cases}$$

综合能力的期望值为215.197. 综合能力期望值的计算过程说明,在当前场景下区间通过能力大约是215,可能的最大和最小值分别是242和180. 这为决策者提供了根据不同偏好进行决策的备选方案. 如果选择较激进的安排,进行运输组织决策时可取242,如果调度员倾向保守的策略,以满足基本运输需求为主要目标,可取180. 一般情况下人们更倾向于兼顾不同偏好,采取相对折中的策略,即215.

本文研究内容为铁路区间通过能力,不涉及车站通过能力,本算例中大风条件主要影响区间列车运行速度,对车站通过能力影响较小,故在当前场景下区间通过能力决定了区段能力.

4 结语

区间通过能力计算涉及因素多、关系复杂,突发事件条件下能力计算影响因素呈现动态性、模糊性、随机性和无后效性等特点,现实环境中无法穷尽所有因素进行能力计算. 基于模糊随机过程的能力计算方法更能容错各类因素及其不确定性,并以京沪高速铁路为背景验证了算法在突发事件条件下的有效性. 此外,该方法为决策者提供了丰富的选择方案,使得能力计算可兼顾激进的,保守的,相对折中的各种典型的运输组织策略.

未来研究方向主要集中在以下两方面:①列车速度转移矩阵是实现区间能力计算的一个关键因素,转移矩阵的取值还需要在实际运营环境中进一步确认;②突发事件条件下运输组织调整的目标、策略、原则与正常条件下存在很大区别,研究特殊条件下车流路径搜索和行车方案的调整模型及方法,以快速恢复行车,疏散滞留旅客,减少突发事件造成的影响,是中国铁路基础设施建设快速发展背景下亟待解决的关键问题.

参考文献:

- [1] 许庆斌, 杨肇夏. 中国铁道百科全书(运输与经济卷)[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2000.
XU Qingbin, YANG Zhaoxia. Encyclopedia of China railways (transportation and economy) [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2000.
- [2] 纪加伦, 杨肇夏. 移动闭塞方式下列车运行组织及区间通过能力计算方法的探讨[J]. 铁道学报, 1992, 14(1): 38.
JI Jialun, YANG Zhaoxia. An approach to the organization of train operation and the method of computing section carrying capacity in the condition of movable block system[J]. Journal of the China Railway Society, 1992, 14(1): 38.
- [3] 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): 54.
SU Shunhu, TIAN Changhai, CHEN Zhiya. Analysis and calculation of the carrying capacity on passenger dedicated lines[J]. China Railway Science, 2008, 29(5): 54.
- [4] Alex L, Anders H K, Bernd S, et al. Evaluation of railway capacity [C] // Annual Transport Conference at Aalborg University. Aalborg: [s.n.], 2006: 1-22.
- [5] Abril M, Barber F, Ingolotti L, et al. An assessment of railway capacity [J]. Transportation Research Part E, 2008, 44: 774.

(下转第936页)