

基于多元胞模型的桥梁车流合成及荷载模拟

阮欣¹, 金泽人¹, 周军勇¹, 涂辉招²

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 同济大学 交通运输工程学院, 上海 201804)

摘要: 随机车辆荷载模拟是桥梁荷载评定和性能评估的基础和关键, 目前基于 Monte Carlo 的车流模拟较难呈现长加载跨径内车流的微观动态演化特性, 而基于元胞自动机(CA)的单元胞模拟方法在加载精度方面仍需改进. 单元胞模拟法中, 将每个车辆用一个元胞模拟, 难以体现轴重影响, 限制了模拟精度的提高. 在此基础上, 提出了每个元胞模拟一个车轴, 多个元胞模拟一辆车的多元胞自动机(MCA)模型, 并利用实测车流及其荷载数据进行模型校核. 研究表明: 多元胞车轴模拟方法能够准确地还原车流量、车头时距、车速、车重等系列车流以及荷载参数. 以 1 000 m 虚拟加载跨径的荷载集度、支点剪力、跨中弯矩为指标, 统计模拟车流和实测数据的荷载响应特性. 结果显示, MCA 模型的模拟结果与实际车流误差均在 5% 以内, 相较于传统单元胞模型 17% 的误差, 精度显著提高.

关键词: 桥梁工程; 车辆荷载模拟; 随机车流; 元胞自动机; 多元胞模型

中图分类号: U441⁺.2

文献标志码: A

Traffic Flow Generation and Load Simulation of Bridges Based on Multi-cell Cellular Automaton

RUAN Xin¹, JIN Zeren¹, ZHOU Junyong¹, TU Huizhao²

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. College of Transportation Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: The simulation of random traffic load is the foundation and crux of load assessment and performance evaluation of bridges. The current traffic simulation based on the Monte Carlo method is inappropriate for describing the dynamic evolution of traffic on microscopic scales within a relatively long span, while the single-cell method based on cellular automaton (CA) remains to be improved concerning precision. In the single-cell method, a car is simulated by a single cell, which could not consider the influence of axle load and exerts a limit on enhancement of simulation precision. In

this paper, based on the current CA, a model is proposed to simulate an axle by a cell and to simulate a car by a number of consecutive cells, which is defined as multi-cell cellular automaton (MCA). It verifies the mathematical model with realistic traffic and its load data. It is demonstrated that the parameters of traffic flow and traffic load, such as traffic volume, time headway, velocity and weight of simulated traffic are reproduced accurately by the multi-cell method. With the distribution load, bearing shear and mid-span moment in a simply supported girder with a length of 1 000 meters set as indexes respectively, the statistics analysis of the load response characteristics of simulated and realistic data is conducted. The result indicates that the relative errors of simulated data of the MCA model to realistic data are within 5%. When MCA is applied, the precision of load response can be increased from the correlated error of less than 17% in the traditional single-cell method to a relatively high precision.

Key words: bridge engineering; traffic load simulation; random traffic flow; cellular automaton; multi-cell model

近年来, 随着动态称重(weigh in motion, WIM)数据的大量获得和积累, 利用实测车流信息研究桥梁车辆荷载及结构响应已经成为研究热点和主流方向^[1-5]. 其基本过程是: 基于 WIM 记录的车辆通过监测断面时的瞬时信息(车重、轴重、轴距、车速、车道等)开展车流模拟; 然后还原经过桥梁的随机车流, 进而通过影响线加载等方法分析响应或建立荷载模型. 这其中需要解决的关键问题包括车流模拟、响应分析、模型推定等, 且车流模拟是基础也是最为关键的问题. 研究表明^[3, 6-9]: 桥梁跨径不同, 车流模拟的方法和精度要求差异显著. 中小跨径桥梁往往受多辆重车的瞬时相遇影响, 一般根据重车相遇情形确定车流建模方法^[6-7], 主要回答加载区间上重车的空间分布位置及其时间演化规律; 大跨桥梁加载区间

收稿日期: 2016-10-09

基金项目: 国家自然科学基金(51478337, 51678435); 中央高校基本科研业务费专项资金(2016J012302); “交通运输工程”高峰学科开放基金(2016J012302)

第一作者: 阮欣(1977—), 男, 副教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为桥梁风险管理及评估. E-mail: ruanxin@tongji.edu.cn

长,交通拥堵下的重车排队则成为控制因素,因而模拟拥堵类型和重车集聚等微观特性成为关键^[3,7-11],需要考虑拥堵情形下各载重车辆的局部动态变化行为,捕捉重载车流的集聚与消散特性及其连带响应。因而,解决大跨桥梁的车辆荷载问题,需要同时兼顾车流模拟的精度和效率。目前广泛应用的随机车流 Monte Carlo 模拟方法,主要基于给定的车流宏观数理模型,通过随机抽样建立系列交通参数形成模拟车流^[6-7,12-13],其较难考虑拥堵情形下的车辆局部作用引起的交通参量变化,且模拟效率无法满足这种动态演变要求。

元胞自动机是一种动态模型的建模方法,Kai 和 Schreckenberg^[14]最先提出了能够描述车辆微观运动的元胞自动机 N-S 模型,随后发展出确定性元胞自动机(deterministic traffic cellular automaton, DTCA)和随机性元胞自动机(stochastic traffic cellular automaton, STCA),元胞自动机逐渐成为交通响应研究的基础工具^[15-16]。这其中,STCA 可以较为全面地描述车辆的随机微观行为,因此得到更快发展,各种针对实际车辆微观行为的更新规则也在不断提出,通过高精度的车流模拟反映实际交通流的作用。元胞自动机将连续的区段(如桥梁)用网格离散为若干元胞,并按照一定的时间间隔考察每一个元胞的状态变化,而研究对象(如车辆)则是以元胞状态参数的形式不断更新并在元胞之间传递。所谓更新规则,正是研究对象的参数不断变化以及在元胞之间传递和转移的依据和标准。目前的研究中,利用元胞自动机进行交通模拟时,主要采取一个元胞存放一辆车的单元胞模型,模拟交通流的动态演化过程^[10,14-15]。例如,Wahle 等^[17]分析了车流状态的预测以及行驶路线的动态规划等问题,并给出某些特定路况导航系统的策略分析和效率评价。这些研究的特点是结合元胞自动机自适应的演化特点,对车辆的运动状态进行描述,提高了车流模拟的效率。

文献^[10-11,18]较早将交通元胞自动机引入桥梁研究中,建立了随机车辆荷载的单元胞模型,采用 STCA 规则和车辆变道规则进行车流的模拟,并将其用于分析斜拉桥在风与车辆荷载组合作用下的响应研究,国内也有学者开始这方面的研究^[19]。从基本元胞模型方面,这些研究在车流模拟时采用了单元胞模型,车辆荷载通过所占据的单个元胞进行表达。这种模拟方法能够提高模拟效率,但由于车辆加载最为关键的加载位置和车头间距在单元胞模型中

较难准确考虑^[8],因此其加载的精细化程度较低,较难考虑大跨径桥梁交通拥堵情形下的荷载空间分布影响。

以下尝试从基本的元胞自动机数学模型和更新方法出发,针对桥梁荷载研究的特点和需求,重新定义元胞内车辆荷载的表达方法,采用元胞模拟车轴的多元胞车辆建模方式,改进目前单元胞建模精度低的问题,并利用高速公路实测车流及其荷载数据进行模型校核,对多元胞自动机(multi-cell cellular automaton, MCA)模型的正确性和精度进行讨论分析。

1 基本的交通元胞自动机模型

1.1 基本元胞自动机模型

在基本模型中,有限且连续的模拟空间以一定的规律划分为若干个边界明确的网格,这些网格被称为元胞,元胞中存储有实现时间和空间状态转化的参数。自动机是指元胞中的参数能够根据预先设定好的规则,参考一定范围内其他元胞的参数状态,按相等的时间间隔自行演化。元胞自动机中需要定义的内容主要分为物理环境、元胞状态、更新规则和相邻元胞。物理环境 Φ 即元胞网格及其划分形式,如空间尺寸和时间间隔,其主要影响模拟的精度;元胞状态空间 Σ 则是所有元胞内的参数赋值情况,对于元胞自动机不同的应用环境,所设定的参数不尽相同;更新规则 δ 如前所述,是对元胞内参数进行更新的具体操作,规则影响的范围则是元胞自动机中的另一个重要概念,即相邻元胞 N ;相邻元胞 N 是指对某一特定元胞演化有影响的元胞集合,可以是两个紧靠的元胞,也可以是一个区域内的多个元胞。因此,元胞自动机系统可以用下式总体描述:

$$C_A = (\Phi, \Sigma, N, \delta) \quad (1)$$

1.2 STCA 元胞自动机

STCA 规则是随机性元胞自动机中发展最早、应用最广的规则^[15],其加速与减速机制较为完善,在不过多考虑行驶因素的情况下,采用 STCA 规则能够在最大程度上符合交通模型中随机过程的特征^[9,14-15],并有利于模型的简化和计算效率的提高。

基于元胞自动机进行交通模拟时,首先根据模拟精度和车辆轴型,确定元胞网格划分的尺度 c_e ,模拟过程中以该尺度为单位实现车辆的移动和状态参数的转移。依据车辆属性和模拟要求,确定元胞状态 σ 所包含的参数,其主要包括若干运动学参数 M 和

荷载参数 W . 在运动学方面,模拟过程被离散为多个时间点,各个时间点的间隔为 Δt ,因此相应的车速单位为 $c_e/\Delta t$,运动学参数用于确定车辆在元胞局部更新规则作用下的移动,包括最大速度 v_{\max} 、当前速度 v 以及前车间距 g_s ;荷载参数用于确定在车长范围内的荷载形式和数值,主要包括车辆自重 G 、各轴轴重 g 、轴数 a 以及各轴间轴距 p . 基于 STCA 的元胞自动机的数学模型可表示如下:元胞自动机的状态空间 Σ 包含了研究区段上所有单个元胞的状态, $\sigma_i(t) \in \Sigma$,即元胞 i 在 t 时刻的参数状态. 对于单个元胞的状态 σ 而言,在模拟交通情况时包含了若干参数,这些参数与前述的运动学参数 $M = \{v_{\max}, v, g_s\}$ 和荷载参数 $W = \{G, g, a, p\}$ 相对应.

图1为用于车流模拟的元胞自动机物理环境的建立和状态更新流程,也是目前广泛采用的单元胞荷载模拟方法. 整个元胞自动机系统可以表示为如下的二维矩阵:

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \vdots \\ \sigma_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_1 & W_1 \\ M_2 & W_2 \\ \vdots & \vdots \\ M_n & W_n \end{bmatrix} \quad (2)$$

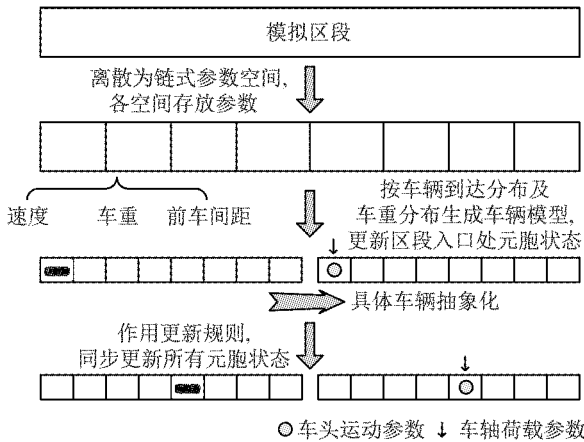


图1 基于元胞自动机车流模拟的物理环境及更新流程

Fig.1 Physical environment and updating process of traffic simulation based on CA

模拟过程中,使车辆“自动化”的关键在于元胞的更新规则. 由前文所述,STCA 通过随机慢化的规则进行更新,考虑了随机因素的影响. 对于车辆 i 所占据的元胞,其相邻元胞 N 为车辆 i 的正前方与其紧靠的车辆所占据的元胞. 针对在模拟区段中的运动车辆,其各项参数的更新规则如下:

(1)加速和减速

$$v_i(t) \leftarrow \min\{v_i(t-1)+1, g_i(t-1)/\Delta t, v_{\max}\}$$

(2)随机慢化

$$\xi(t) < p_0 \Rightarrow v_i(t) \leftarrow \max\{0, v_i(t) - 1\}$$

(3)位置更新

$$x_i(t) \leftarrow x_i(t-1) + v_i(t) \cdot \Delta t$$

式中: $v_i(t)$ 表示第 i 辆车在时刻 t 的速度; $g_i(t-1)$ 表示第 i 辆车的车头与前车车尾在 $t-1$ 时刻的距离,以元胞个数 c_e 表示; v_{\max} 表示车辆最大运动速度; $\xi(t)$ 表示在 t 时刻产生的随机数,且有 $\xi(t) \in [0, 1]$; p_0 为给定的减速因子; $x_i(t)$ 表示第 i 辆车在时刻 t 所在的位置.

STCA 的规则中,加速和减速主要受到最大车速、加速能力和前车间距的控制. 在通常情况下,为了追求时间效益,驾驶员均有追求最大速度的趋势. 但由于模拟过程时间离散,速度变化需要一定的时间,可以认为加速度相同,为 $c_e/\Delta t$. 当前车间距过小,车辆在当前速度下将发生碰撞时,驾驶员必须将速度降至允许值. 随机慢化是为了考虑驾驶员在行驶过程中因为不确定因素而导致的减速,设置减速因子 p_0 . 使车辆以一定的概率减速,同样假定减速度与加速度相同,为 $c_e/\Delta t$.

除实现车辆同车道演化的基本规则外,模型中还考虑了车辆变道的可能性,在满足条件的情况下,车辆可以执行变道操作. 变道的规则及作用流程详见文献[8].

应用 STCA 规则和变道规则前,需要确定各车所在的元胞的相邻元胞. 为确定一个时间点上的所有元胞状态,需要将更新规则从车队的尾部向前,依次作用于所有元胞. 因此,为避免车辆数据的更新出现混乱,交通元胞自动机的规则中规定^[12-15]: 车流同车道演化的规则中,参考车辆的相邻元胞仅为该车正前方首辆车所在的元胞;车辆变道的规则中,参考车辆的相邻元胞包括了目标车道上该车前方和后方首辆车所在的元胞.

在设定元胞自动机的更新规则并规定相邻元胞后,基于元胞自动机的交通模型则能按公式 $x_i(t) \leftarrow x_i(t-1) + v_i(t) \cdot \Delta t$ 自发演化,不断更迭,以达到车流模拟的需求.

2 基于 MCA 方法的车辆荷载模型

2.1 MCA 方法的荷载模型

基本的单元胞模型中,一辆车占据一个元胞,对车辆荷载的模拟通过在该元胞内的均布荷载或元胞中心的单点加载实现,这两种模拟方式在表达车头间距和车轴加载方面均精度有限. 因此,这里尝试对

元胞自动机基本参数模型进行重新定义:允许一辆车跨越连续的多个元胞,跨越元胞的数量由车轴数确定.这一模型为元胞模拟车轴的多元胞车辆建模方法,即 MCA 模型.和前述基本的元胞自动机模型相比,其运动学参数和基本模型相同,且仅存放于车头所在的元胞内;荷载参数在单元胞模型车重 G 的基础上,在连续的多个元胞中设置了不同的轴重 g ,并通过车头所在元胞内的车辆轴数确定车头控制的元胞个数.例如,当区段上仅有一辆三轴车,其车头位置在第 i 个元胞处,多元胞荷载模型中,元胞自动机系统的状态矩阵可以表示为

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \vdots \\ \sigma_{i-2} \\ \sigma_{i-1} \\ \sigma_i \\ \vdots \\ \sigma_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_1 & G_1 & g_1 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ M_{i-2} & G_{i-2} & g_{i-2} & 0 \\ M_{i-1} & G_{i-1} & g_{i-1} & 0 \\ M_i & G_i & g_i & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ M_n & G_n & g_n & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: $M_j = \emptyset (j \neq i)$, 无车头占据的元胞内运动参数为零; $G_j = 0 (j \neq i, j \neq i-1, j \neq i-2)$, 无车轴占据的元胞内车重为零; $G_i = G_{i-1} = G_{i-2}$, 车轴占据的元胞内设定相同的车重; $G_i = g_i + g_{i-1} + g_{i-2}$, 车重为车辆的轴重之和.

这样,元胞网格内含有 3 种不同的元胞状态,分别是运动学参数与荷载参数均为零、运动学参数与荷载参数均不为零,以及运动学参数为零而荷载参数不为零的情况.相应地,这 3 种元胞状态分别对应了无车占据元胞的状态、车头所占据元胞的状态以及其余车轴所占据的元胞状态.

在进行车流模拟时,根据元胞的局部更新规则,首先确定各车在下一个时间点上的运动学参数以实现车头的移动,接着将相应车辆各轴所在元胞中的荷载参数根据运动学参数的改变进行同步更新,实现了车辆各轴的荷载参数随车头进行演化的过程,以满足车辆荷载的局部动态模拟.车辆荷载更新流程如图 2 所示.

在车辆荷载的动态模拟过程中采用运动参数和荷载参数分类存放的方式,目的是减少作用车辆运动更新规则时需要考察的元胞数目,以提高车流模拟的效率.车头所在的元胞中的车辆轴数能够确保该车所有轴与车头位置的同步更新,以实现精细化的轴位加载.

2.2 MCA 方法的车流模拟

上述流程可以方便地利用模块化的方法编程实

现(见图 3),不同模块分别控制前文所述的元胞自动机的不同部分,从而实现了车流的模拟.

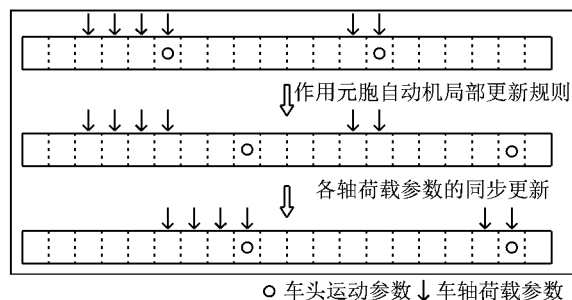


图 2 MCA 模型中车辆荷载参数的更新流程

Fig. 2 Updating process of traffic load information in MCA model

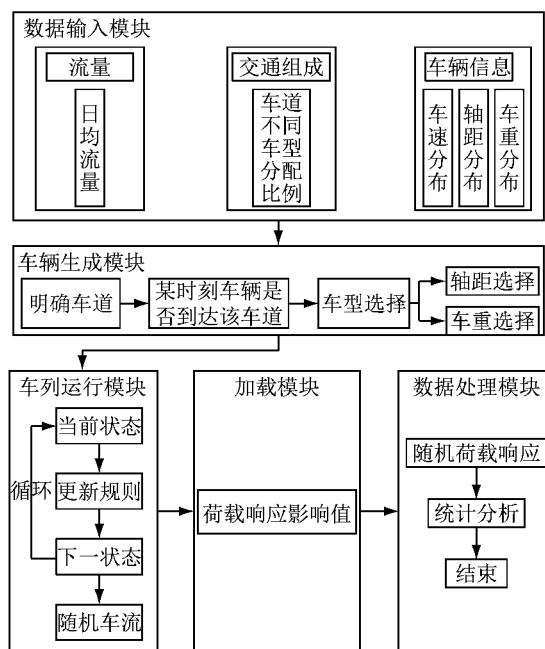


图 3 基于 MCA 的随机车流建模流程

Fig. 3 Programming of random traffic simulation based on MCA

模拟开始前,根据精度和车辆轴型对模拟区段进行网格划分,确定元胞自动机的物理环境,得到需要进行分析的元胞数目.在各个元胞中按模拟的需求设定各项参数的存储空间,定义运动参数(最大速度、速度、前车间距)和荷载参数(车重、轴重和轴数等),给出确定元胞状态的依据.据此可将模拟区段在各个时刻的车流状态根据公式(3),用一个二维矩阵加以表示.

数据输入模块,汇总交通特性数据,包括交通流量、车辆类型、车辆组成比例、车道上车型分配规律、车重特性、车速特性、轴重比例、轴距特性等.将统计特性(分布类型、统计参数)输入程序,建立交通信息

数据库。

车辆生成模块,首先基于每日车流量建立车辆的到达模型,在车辆到达模型的基础上,参考建立的交通流特性模型,利用 Monte Carlo 方法模拟产生与实测数据具有相同规律的初始车速,并分配相应车道。进一步根据输入的概率分布确定车辆的最大速度、速度、车重、轴重等参数,将各参数赋予模拟区段入口处的单个或多个连续元胞内,并更新模拟区段入口处的元胞状态。

车流模拟时,将 STCA 更新规则同步作用于所有元胞。首先找到区段上各车所在的元胞位置,参考这些元胞及其相邻元胞的当前状态,根据更新规则确定所有元胞在下一个时刻的状态。实际上,对车辆分布状态循环地作用更新规则,可以实现车辆的不断运动,而在矩阵的参数空间中,则是车辆参数在不同的元胞之间传递和改变。车辆的荷载参数随运动参数的变化而不断转移,以此实现车辆的移动加载。模型采用了开放式的物理环境,根据模拟的时长要求不断迭代,利用元胞自动机自适应的演化特点,即可不断地模拟车流的进出、变速、变道等情形。模拟的数据结果与 WIM 实测数据的断面监测不同,能够直接得出模拟区段中各个模拟时间点上车辆的分布状态,以及局部范围内车辆的轴位和轴重数据,即时刻一元胞编号一元胞状态的多维矩阵(任意时刻 t , 元胞 i 的具体状态为 $\sigma_{i,t}$),满足微观加载车流的荷载模拟要求。

3 模型校核

利用某高速公路 3 d 实测单向两车道的 WIM 数据进行模型校核:首先,将模拟数据的基本统计参数与实测统计参数进行比较,从车辆到达特性、车速特性及车重特性等方面校核 MCA 模型模拟的准确性;然后,比较 MCA 模型与传统单元胞建模、实测数据的模拟精度,分析基于 MCA 模型进行车辆加载模拟的优势。

3.1 车重及车流参数

WIM 实测数据和利用 MCA 模型模拟得到的日车流量非常接近,模拟精度在 $\pm 2.0\%$ 以内,说明 MCA 模型能够较好地跟踪日交通量的变化特性。

车头时距反映了车辆的跟车及排队行驶特征,是车队随机模拟的重要参量。统计 WIM 数据和 MCA 模型模拟数据的车头时距参数如表 1 所示,模拟结果中均值误差很小,能够控制在 1.20% 以内,总

体模拟结果较好。

按轴型将模拟数据和实测数据的车速进行分类统计和比对,见表 2。六轴以上车辆占比不到 0.01% ,因而数据分析不考虑此情况。由统计分析可知:车速误差很小,各参数误差均能控制在 1% 以内,说明车辆车速的演化状态与实际情况是相符的。

统计 WIM 数据、MCA 模型的车重均值和 90% 分位值,如表 3 所示。由表 3 可知:均值和 90% 分位值的误差较小,能分别控制在 5.63% 和 7.69% 以内,保证了对车重进行 Monte Carlo 抽样的精度。

表 1 车头时距参数的模拟与实测对比

Tab.1 Comparison of time headway between modelling and measured data

车道	实测均值/s	模拟均值/s	误差/%
快车道	43.02	43.52	1.16
慢车道	42.34	42.17	-0.40

表 2 车速参数的模拟与实测对比

Tab.2 Comparison of velocity between simulation and measured data $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$

车道	轴型	均值	
		实测	模拟
快车道	二轴	82.37	82.37
	三轴	76.52	76.01
	四轴	70.98	70.83
	五轴	71.85	71.57
	六轴	72.36	72.28
	二轴	71.93	71.79
慢车道	三轴	67.86	68.38
	四轴	64.54	64.48
	五轴	63.44	63.19
	六轴	65.76	65.88

表 3 车重参数统计

Tab.3 Weight of vehicle t

车道	轴型	均值		90%分位值	
		实测	模拟	实测	模拟
快车道	二轴	13.5	13.2	18.3	17.4
	三轴	20.9	19.9	36.4	39.2
	四轴	30.3	29.4	45.5	45.5
	五轴	36.3	35.4	56.5	54.0
	六轴	43.7	45.2	64.5	63.1
	二轴	14.9	15.2	25.2	27.1
慢车道	三轴	27.0	28.5	47.2	50.0
	四轴	34.7	35.5	53.4	54.8
	五轴	39.1	41.3	58.5	60.1
	六轴	46.7	48.2	66.5	70.9

3.2 荷载及响应

区段上所有车辆的总重量与区段长度的比值定义为等效荷载集度,是反映车流模拟统计一致性的重要指标^[8-9]。

3.2.1 等效荷载集度

MCA 模型模拟数据的结果可直接由选定的区域进行统计得到. 对于实测数据, 则先要进行如下处理: ① 根据车辆的到达时间差和到达速度, 基于车辆通过断面后一段时间内速度保持不变的假定, 计算前、后车之间的间距, 进行两个车道上车队的横向混排, 获得纵桥方向的一维车队; ② 而后固定车队, 使加载区段按一定的间隔在车架上移动 (按照车队整体相对于加载区段的移动速度 $72 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, 每隔 1 s 计算 1 次, 确定计算间隔为 20 m). 以上两个数值的统计结果、概率密度及累计概率分布如图 4 所示. 从图 4 中可以看出, 对于 1000 m 加载区段上的荷载集度, 实测和 MCA 模型的模拟数据的差别很小, 而实测数据较模拟数据略大, 说明模拟结果在区段上的加载条件与实测数据比较吻合, 可进一步进行响应的比较分析.

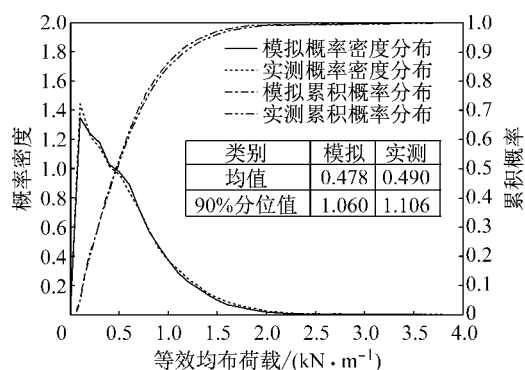


图 4 等效均布荷载的概率密度及累计概率分布统计

Fig.4 Statistical results of probability density distribution and cumulative probability distribution

3.2.2 荷载响应

将一维车队对应的轴载序列对跨径 1000 m 、边界条件为两端简支的虚拟梁进行影响线加载, 计算跨中弯矩和支点剪力的荷载响应^[8-9], 得到实测车队和模拟车队的荷载响应. 其中, 跨中弯矩影响线是跨中影响值 $I_F = L/4$, 支点影响值 $I_F = 0$ 的线性分布; 支点剪力影响线是两支点影响值分别为 $I_F = 1$ 和 I_F

$= 0$ 的线性分布. 以弯矩基准值 $6 \times 10^4 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 及剪力基准值 200 kN , 绘制各荷载响应的盒形图如图 5 所示. 由图 5 可知: MCA 模型的荷载响应特性基本与实测数据吻合, 中位数误差在 4% 以内, 25% 和 75% 分位数误差在 3.5% 以内, 最大值误差在 4.3% 以内. 进一步对 WIM 实测数据、单元胞模型的模拟数据以及 MCA 模型的模拟数据进行分析, 得到各小时内荷载集度和荷载响应的最大值的统计参数, 以说明三者之间的数值关系. 理论上, 相比于 MCA 模型, 单元胞模型仅模拟一辆车占据一个元胞的情形, 以元胞车重的形式进行加载, 荷载响应的精度偏低.

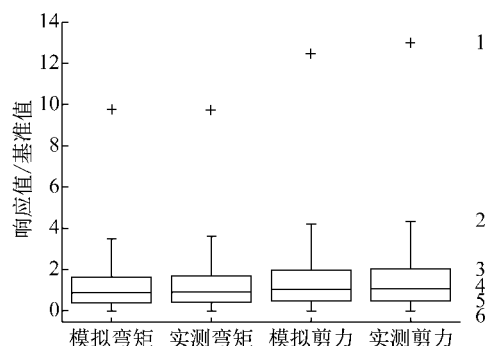


图 5 1000 m 区段上跨中弯矩和支点剪力的盒形图

Fig.5 Boxplot of mid-span moment and bearing shear in a simply supported girder with a length of 1000 m

考虑到桥梁荷载响应评估中主要关注的是极值特性, 因此选取每小时区间内最大值组成数据样本进行统计分析, 见表 4. 从表 4 可以得出, 与实测数据对比, MCA 模型较经典的单元胞模型而言, 在荷载响应方面有更高的精度, 从 17% 以内提高到 7% 以内. 上述分析说明, 利用 MCA 模型进行桥梁荷载响应的模拟能够有效弥补动态称重技术无法长时间测量的缺陷, 以及利用完全的 Monte Carlo 方法模拟无法考虑车流自适应的局限性, 并且对于单元胞模型而言有着更高的荷载分析精度.

表 4 1000 m 虚拟简支梁桥每小时最大荷载响应

Tab.4 Maximum load responses per hour in a simply supported girder with a length of 1000 m

类别	跨中弯矩				支点剪力			
	均值/ 10^5	90%分位 值/ 10^5	均值误 差/%	90%分位 误差/%	均值/ 10^3	90%分位 值/ 10^3	均值误 差/%	90%分位 误差/%
MCA 模型	3.67	4.46	6.86	-3.56	1.53	1.86	5.11	-4.80
单元胞模型	3.91	5.01	13.88	8.25	1.72	2.11	17.62	8.06
实测	3.43	4.62			1.46	1.95		

4 结论

基于随机车流元胞自动机的理论和更新规则,将传统的单元胞模型改进为描述车轴特性的多元胞模型,重新定义了车辆荷载在元胞自动机中的表达,并相应地调整了车辆运动参数和荷载参数的演化规则,开发了模拟程序,最后基于实测 WIM 数据校核了 MCA 模型。

校核结果表明:MCA 模型合成车流的车重及车流参数与实测车流吻合较好,保证了模拟车流对实际车流统计特性的还原,验证了参数模型的可靠性。同时,合成车流的荷载及响应参数具有很高的精度,MCA 模型相较于单元胞模型在荷载响应精度方面,相对实际荷载响应误差从 17% 以内提高到 7% 以内,能够更准确地反映随机合成车流的荷载作用特性。

参考文献:

- [1] KWON O, KIM E, ORTON S. Calibration of live-load factor in LRFD bridge design specifications based on state-specific traffic environments [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2010, 16(6): 812.
- [2] PELPHREY J, HIGGINS C, SIVAKUMAR B, *et al.* State-specific LRFR live load factors using weigh-in-motion data [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2008, 13(4): 339.
- [3] RUAN X, ZHOU J Y, SHI X F, *et al.* A site-specific traffic load model for long-span multi-pylon cable-stayed bridges [J]. *Structure and Infrastructure Engineering*, 2016, 13(4): 494.
- [4] 韩万水, 闫君媛, 武隽, 等. 基于长期监测的特重车交通荷载特性及动态过桥分析[J]. *中国公路学报*, 2014(2): 54.
HAN Wanshui, YAN Junyuan, WU Jun, *et al.* Extra-heavy truck load features and bridge dynamic response based on long-term traffic monitoring record [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2014(2): 54.
- [5] 韩万水, 马麟, 汪炳, 等. 随机车流-桥梁系统耦合振动精细化分析与动态可视化[J]. *中国公路学报*, 2013(4): 78.
HAN Wanshui, MA Lin, WANG Bing, *et al.* Refinement analysis and dynamic visualization of traffic-bridge coupling vibration system [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2013(4): 78.
- [6] CAPRANI C C, O'BRIEN E J, MCLACHLAN G J. Characteristic traffic load effects from a mixture of loading events on short to medium span bridges [J]. *Structural Safety*, 2008, 30(5): 394.
- [7] ENRIGHT B, O'BRIEN E J. Monte Carlo simulation of extreme traffic loading on short and medium span bridges [J]. *Structure and Infrastructure Engineering*, 2013, 9(12): 1267.
- [8] O'BRIEN E J, HAYRAPETOVA A, WALSH C. The use of micro-simulation for congested traffic load modeling of medium- and long-span bridges [J]. *Structure and Infrastructure Engineering*, 2012, 8(3): 269.
- [9] NOWAK A S, LUTOMIRSKA M, IBRAHIM F I S. The development of live load for long span bridges [J]. *Bridge Structures*, 2010, 6(1/2): 73.
- [10] CHEN S R, WU J. Modeling stochastic live load for long-span bridge based on microscopic traffic flow simulation [J]. *Computers & Structures*, 2011, 89(9): 813.
- [11] 武隽, 杨飞, 韩万水. 基于实测和 CA 模型的大跨桥梁车辆荷载模拟[J]. *铁道科学与工程学报*, 2014(4): 14.
WU Jun, YANG Fei, HAN Wanshui. Vehicle load simulation for long-span bridge based on merging real-monitored data and cell automaton model automaton [J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2014(4): 14.
- [12] GETACHEW A, O'BRIEN E J. Simplified site-specific traffic load models for bridge assessment [J]. *Structure and Infrastructure Engineering*, 2007, 3(4): 303.
- [13] 阮欣, 周小磊, 郭济. 基于合成车流的桥梁车辆荷载效应极值预测[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2012, 40(10): 1458.
RUAN Xin, ZHOU Xiaoyan, GUO Ji. Extreme value extrapolation for bridge vehicle load effect based on synthetic vehicle flow [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2012, 40(10): 1458.
- [14] KAI N, SCHRECKENBERG M. A cellular automaton model for freeway traffic [J]. *Journal De Physique I*, 1992, 2(12): 2221.
- [15] MAERIVOET S, DE MOOR B. Cellular automata models of road traffic [J]. *Physics Reports*, 2005, 419(1): 1.
- [16] 贾斌, 高自友, 李克平, 等. 基于元胞自动机的交通系统建模与模拟[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
JIA Bin, GAO Ziyu, LI Keping, *et al.* Models and simulations of traffic system based on the cellular automaton [M]. Beijing: Science Press, 2007.
- [17] WAHLE J, NEUBERT L, ESSER J, *et al.* A cellular automaton traffic flow model for online simulation of traffic [J]. *Parallel Computing*, 2001, 27(5): 719.
- [18] CHEN S R, WU J. Dynamic performance simulation of long-span bridge under combined loads of stochastic traffic and wind [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2010, 15(3): 219.
- [19] 茅向前, 李枝军, 李雪红, 等. 大跨桥梁多车道随机车流荷载模拟及应用[J]. *南京工业大学学报(自然科学版)*, 2016, 38(3): 99.
MAO Xiaoqian, LI Zhijun, LI Xuehong, *et al.* Multi-lane random traffic flow simulation and application of long-span bridge [J]. *Journal of Nanjing University of Technology (Natural Science Edition)*, 2016, 38(3): 99.