

文章编号:1671-8879(2016)02-0099-06

基于生灭过程的场站周转挂车数量配置

朱 灿^{1,2}, 杨 明²

(1. 长沙理工大学 道路结构与材料交通行业重点实验室, 湖南 长沙 410004;

2. 长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410004)

摘 要:为了解决甩挂运输中场站备用挂车数量配置问题,引入生灭模型模拟挂车聚散过程,建立当场站发送和接收牵引车频次长期稳定,假定牵引车到达为泊松流,装卸队伍个数确定且装卸时间服从独立负指数分布时,周转挂车状态变化的生灭过程模型;通过研究其平稳分布,给出了牵引车需要等待的概率给定时,场站周转挂车配置数量的计算方法;通过分析排队等待的牵引车数量分布规律,给出需要等待的牵引车平均排队长度计算方法;分析了全部牵引车和等待牵引车的等待时间分布。研究表明:车辆的等待时间服从负指数分布,其均值与周转挂车数量无关;为周转挂车数量配置提供了一种有效的计算方法。

关键词:交通工程;甩挂运输;生灭过程;挂车数量配置;平稳分布;等待时间

中图分类号:U492.331

文献标志码:A

Quantity configuration of spare trailers for freight stations based on birth-death process

ZHU Can^{1,2}, YANG Ming²

(1. Key Laboratory of Road Structure and Material of Ministry of Transport, Changsha University of Science

& Technology, Changsha 410004, Hunan, China; 2. School of Traffic & Transportation Engineering,

Changsha University of Science & Technology, Changsha 410004, Hunan, China)

Abstract: In order to solve the quantity configuration problem of spare trailers for freight station in drop and pull transport network, the theory of birth-death process was introduced to model the accumulating-disseminating process of spare trailers. While receiving and sending tractors frequency was long-term stable, spare trailers state transformation was modeled as a birth-death process under the assumption that tractors arrival was regarded as a Poisson stream, the number of loading and unloading service channel was given and the service time was submitted to independent negative exponential distribution. After analyzing the stationary distribution of the birth-death process, the algorithmic method for spare trailer number of freight station was deduced when the probability of tractors waiting was given. After analyzing the number distribution of waiting tractors, the algorithmic method for waiting tractors average queue length was obtained, and the waiting time distribution of waiting tractors and all tractors was analyzed. The results show that the waiting time of waiting tractors is submitted to negative exponential distribution

收稿日期:2015-09-16

基金项目:国家自然科学基金项目(51178061);湖南省教育厅基金项目(10C0374);道路结构与材料交通行业重点实验室项目(kfj100207)

作者简介:朱 灿(1973-),男,湖南双峰人,讲师,工学博士,E-mail:zhucanplus@163.com。

and its conditional mean is not relevant to the number of spare trailer. This paper provides an effective computational method for quantity configuration of spare trailers for freight station. 2 tabs, 1 fig, 20 refs.

Key words: traffic engineering; drop and pull transport; birth-death process; quantity configuration of spare trailer; stationary distribution; waiting time

0 引言

机动车将随车拖带的承载装置,包括半挂车、全挂车甚至货车底盘上的货箱甩留在目的地后,再拖带其他装满货物的装置返回原地,或者驶向新的地点,这种1辆带有动力的主车,连续拖带2个及以上承载装置的运输方式被称为甩挂运输^[1]。甩挂运输作为一种集约、高效的运输组织模式,在欧美和日本等发达国家和地区早已成为主流运输方式,牵引车和挂车的配比一般达到了1:3左右,甩挂运输的货物周转量占到总货物周转量的70%~80%^[2]。目前,中国甩挂运输发展滞后,牵引车和挂车数量较少,牵引车与挂车比例仅约为1:1.2,道路货物运输仍以普通单体货车为主。近年来,中国积极推进甩挂运输,随着交通运输部第1批、第2批、第3批甩挂运输试点工作的开展,全国出现了一大批实力较强的甩挂运输企业。2012年下半年起,江苏、渤海湾、华中、上海等地相继出现了甩挂运输联盟,2014年3月起,广东省交通运输厅开始进行组建粤港澳-东盟甩挂联盟的可行性研究。

目前有关甩挂运输的研究成果主要集中在运营机理、路径优化、运作模式、车辆调度、节能分析、效益分析、信息平台建设、标准化建设、发展策略、政策扶持等方面^[3-10]。场站是共享周转挂车聚散的场所,场站该配置多少周转挂车,对于场站改造规划实施、减小挂车购置成本、联盟内利益分配等具有重要意义。在交通运输部颁发的《甩挂运输试点工作实施方案》附件2中,拖挂比(又称甩挂比)是试点项目3个主要考核指标之一。但根据在广东等地物流园区实地调研,发现当前有关挂车数量主要参照国外经验分阶段逐渐增大拖挂比来配置,有关挂车数量配置的文献较少。耿蕤等剖析了甩挂运输组织过程,假定线路牵引车均匀分布行驶,分别对线路挂车和站场挂车进行估算,最终求出运输网络最佳挂车数量配置计算方法,该方法通过设定一个调节系数来估算牵引车的非均匀到达的情形,对挂车聚散过程的模拟过于简单^[2]。

描述交通流聚散行为的方法有很多,祁宏生等

分别将交通波理论、跟驰模型、元胞自动机模型等用于交叉口交通流分析^[11-14]。交通波理论、跟驰模型一般适用于车流拥挤产生干扰的情形;元胞自动机是一种基于局部动力学模型的仿真研究方法;基于生灭过程的排队论一般适用于因服务需求拥挤产生等待的现象,已广泛应用于交通领域。童方仲将其引入到城市道路施工区域通行能力分析^[15];Baykal-Gürsoy等运用生灭过程构建了交通事故对交通流影响的分析模型^[16];周智勇等将其引入到停车场管理^[17];陈小红等将其引入到交叉口信号控制^[18]。鉴于上述研究对车流聚散模拟过于简单,本文提出当场站发送接收货源大致稳定,假定到达车流服从独立泊松分布,场站装卸设备确定且装卸时间服从独立负指数分布时,将场站甩挂车状态模拟成一个生灭过程;对单个站场推理了生灭过程的稳态概率计算方法;给出了牵引车到达需要等待的概率给定时,场站的周转挂车数量计算方法;给出了上述假设条件时,牵引车排队长度计算公式及等待时间分布规律,计算了平均等待时间;并用算例进行了验证。

1 问题描述及假设条件

周转挂车状态有2种:一种是尚未装好的挂车,称之为待装挂车,包括来不及装好的挂车及新到牵引车甩掉的挂车;另一种是装好待运的挂车,称之为待运挂车。本文对场站甩挂的分析基于以下假定。

(1)只研究场站日均发送接收挂车频次长期稳定的情形。为了减少投资,企业会尽量少购置牵引车,因此可假设所有牵引车都处于在途状态,场站没有空余牵引车;同时各场站周转挂车数必须保持稳定。因业务需要从本场站调入调出牵引车时,调入调出的牵引车必须带空挂车,才能确保场站周转挂车数稳定。一般认为线路车流密度不大时,随机行驶的车流、港口船舶到达都近似服从泊松分布。由于假定场站进出业务大致稳定,因此可假定牵引车到达场站服从稳定参数的泊松分布。

(2)当牵引车入场站并甩下挂车后,对这个刚甩下的挂车可能的操作包括先卸后装、只卸不装(当需要调出空挂车时)、不卸只装(当其他场站空挂车

调入本场站时), 本文将这些操作统称为装车, 并且假定各装卸设备所有装车操作时间独立且服从相同分布, 假定装车时间与牵引车相继到达时间间隔相互独立。牵引车到达场站后甩掉挂车, 装上待运挂车, 甩挂操作不占用时间。

(3) 假定场站装卸挂车顺序合理, 只要有 1 台挂车已经装好, 则新到达的牵引车就不需要等待。牵引车到达场站后需要等待的概率即为场站周转挂车全部为待装挂车的概率, 需要等待的概率在设计时确定, 并且取值较小。

(4) 牵引车到达后如场站无已装好的挂车, 假定牵引车必须等待装车, 不能不带挂车放空离开, 即牵引车有效到达率为 100%。

设场站日接收、发送重挂车数量为 P 、 Q 。如 $P < Q$, 则需从其他场站调入牵引车来本场站发送重挂车; 反之, 则需调出牵引车到其他场站运送货物回本场站。空车调度完毕后, 场站日接收、发送牵引车数相等, 均为 $\lambda = \max(P, Q)$ 。假定牵引车独立单个到达, 服从参数为 λ 的泊松流。设场站周转挂车数为 K , 装卸设备台数为 c , 即共有 c 支装卸队伍。假定装卸队伍数小于周转挂车数, 即 $c < K$ 。各装卸队伍装卸 1 台挂车所需时间服从参数为 μ 的负指数分布, 总装卸率大于牵引车到达率, 即 $c\mu > \lambda$ 。

2 周转挂车状态变化生灭过程及稳态概率计算

2.1 周转挂车状态变化生灭过程分析

场站待装挂车数量为 i 时称为状态 i (正在进行装卸操作的挂车由于还不能拖走也视为空车状态), 取值为 $0, 1, \dots, c, \dots, K, \dots$; 当 $i < K$ 时, 待装挂车数为 i , 已装好的挂车数为 $K - i$ 。当 $i \geq K$ 时, 所有的周转挂车都未装好, 此外还有 $i - K$ 台排队等候的牵引车带来的挂车。周转挂车状态变化生灭过程模型与排队模型不同, 排队模型中的等待指所有服务机构均处于工作状态。生灭过程模型中, 牵引车等待从到达后无装好的周转挂车而必须等待开始, 直到有周转挂车已装好车为止。由于配置了周转挂车, 相当于所牵引的挂车装车操作提前, 而卸车操作

延后了。但卸车操作并不影响新到达牵引车的逗留时间, 因此等待时间实际上指的是牵引车在场站内的逗留时间, 或者说其等待时间已经包含了装卸时间。周转挂车聚散生灭过程与信号交叉口排队模型也有明显的不同。信号交叉口排队模型一般被抽象成随机到达、批量服务(绿灯时间)、含休息时间(红灯时间)的排队系统。而周转挂车聚散生灭过程本质上是 1 个服务时间提前的排队系统。

设状态为 i 的概率记为 P_i 。新的牵引车到达, 待装挂车数加 1, 装卸机械装好 1 台待装挂车, 待装挂车数减 1。假设牵引车到达率为 λ , 故状态 i 向状态 $i + 1$ 的转换率为 $\lambda_i = \lambda$ 。当 $0 < i < c$ 时, 共有 i 个装卸队在工作, 状态 i 向状态 $i - 1$ 的转换率为 $i\mu$; 当 $i \geq c$ 时, 共有 c 个装卸队在工作, 状态 i 向状态 $i - 1$ 的转换率为 $c\mu$, 状态为 i 时, 如有新的牵引车到达带来 1 台待装挂车, 则状态变为 $i^* = i + 1$, 由于负指数分布的无记忆性, 状态 $i^* = i + 1$ 向状态 $i^* - 1$ 的转换率仍旧满足 $i^* \mu$, 因此周转挂车状态变化为生灭过程。其状态转移如图 1 所示。

这种生灭过程状态分布的瞬时解含有修正的贝塞耳函数, 不便于应用。本文只研究其稳态情况。根据图 1 可列出状态概率稳态方程

$$\begin{cases} \mu P_{i+1} = \lambda P_i & i=0 \\ (i+1)\mu P_{i+1} + \lambda P_{i-1} = (\lambda + i\mu) P_i & 0 < i < c \\ c\mu P_{i+1} + \lambda P_{i-1} = (\lambda + c\mu) P_i & i \geq c \end{cases} \quad (1)$$

记 $\rho = \lambda/\mu$, 由式(1)可得

$$P_i = \begin{cases} \frac{\rho^i}{i!} P_0 & i < c \\ \frac{\rho^i}{c! c^{i-c}} P_0 & i \geq c \end{cases} \quad (2)$$

再由 $\sum_{i=0}^{\infty} P_i = 1$, 可解得

$$P_0 = \left[\sum_{i=0}^{c-1} \frac{\rho^i}{i!} + \frac{\rho^c}{c!(1-\rho/c)} \right]^{-1} \quad (3)$$

2.2 周转挂车配置数量计算

当系统状态 $i \geq K$ 时, 场站无装好的挂车, 牵引车到达需要等待, 故等待的概率 P^* 为

$$P^* = \sum_{i=K}^{\infty} P_i \quad (4)$$

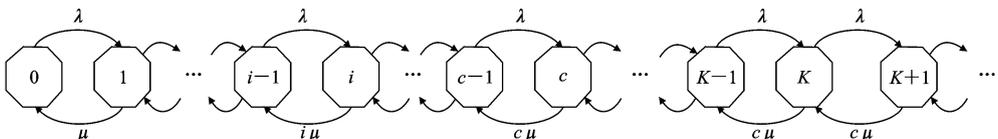


图 1 周转挂车状态转移

Fig. 1 Spare trailers state transition

当 $K \geq c$ 时,可表示为

$$P^* = \sum_{i=K}^{\infty} P_i = \frac{\rho^K}{c! c^{K-c}} \frac{1}{1-\rho/c} P_0$$

将 P^* 用 P_c 表示,则上式可变为

$$P^* = \left(\frac{\rho}{c}\right)^{K-c} \frac{1}{1-\rho/c} P_c \quad (5)$$

由式(5)可以发现,增加1台周转挂车,需要等待的概率减小 ρ/c 。指定 P^* 时,周转挂车数 K 为

$$K = c + \left\lceil \frac{\ln((1-\rho/c)P^*/P_c)}{\ln(\rho/c)} \right\rceil \quad (6)$$

式中: $\lceil \cdot \rceil$ 为上取整函数。

2.3 等待牵引车数分布

记排队等待牵引车数为 s ,用事件 A 表示新到牵引车需要等待,即: $A = \{i | i \geq K\}$, $P(A) = P^*$ 。

(1) 当 $i < K$ 时,排队长 $s = 0$,且新到牵引车无须等待;

(2) 当 $i = K$ 时,排队长恰好 $s = 0$,但新到牵引车必须等待;

(3) 当 $i = K + s$ 时,新到牵引车到达需要等待且前面已有 s 台牵引车正在等待; s 可取值为 $1, 2, \dots$ 。将 s 对应的状态概率记为 q_s 。显然, $q_s = P_{K+s}$ 。

将 q_s 用 P^* 表示,结合全概率 $\sum_{s=1}^{\infty} q_s = P^*$,可得等待牵引车数分布为

$$q_s = \begin{cases} 1 - P^* & s = 0 \text{ 且 } A \text{ 不发生} \\ \left(1 - \frac{\rho}{c}\right) P^* & s = 0 \text{ 且 } A \text{ 发生} \\ \left(1 - \frac{\rho}{c}\right) \left(\frac{\rho}{c}\right)^s P^* & s = 1, 2, \dots \end{cases} \quad (7)$$

新到牵引车需要等待条件下,牵引车排队长度为 s 的概率记为 q_s^* ,则

$$q_s^* = P(k + s | A) = \frac{P_{K+s}}{P^*} \quad (8)$$

显然, $q_{s+1}^* = \frac{\rho}{c} q_s^*$,由全概率 $\sum_{s=1}^{\infty} q_s^* = 1$,可得

$$q_s^* = \left(1 - \frac{\rho}{c}\right) \left(\frac{\rho}{c}\right)^s, s = 0, 1, 2, \dots \quad (9)$$

3 牵引车平均排队长度与等待时间

3.1 牵引车平均排队长度

根据式(7),可得牵引车平均排队长度 L 为

$$L = \sum_{s=1}^{\infty} s \left(1 - \frac{\rho}{c}\right) \left(\frac{\rho}{c}\right)^s P^* = \frac{\rho}{c - \rho} P^* \quad (10)$$

上式统计了不需等待的情况。根据式(9)可得,在必须等待条件下,牵引车的平均排队长 $L(A)$ 为

$$L(A) = \sum_{s=1}^{\infty} s \left(1 - \frac{\rho}{c}\right) \left(\frac{\rho}{c}\right)^s = \frac{\rho}{c - \rho} \quad (11)$$

3.2 等待时间分布

除了关心牵引车到达需要等待的概率外,企业对平均等待时间和等待条件下的平均等待时间也非常关注。即计算平均等待时间时不应将不需等待的情况统计在内^[19]。下面分析中将发现概率直接用平稳概率表示。

当有 $s (s \geq 1)$ 台牵引车正在等待时, c 个装卸队伍均处于工作状态,由于负指数分布的无记忆性, c 个装卸队伍正在装卸的挂车的剩余装卸时间都为参数为 μ 的负指数分布^[19]。假定牵引车排队等候时先到先服务。第 $s + 1$ 台牵引车前面已有 s 台牵引车正在等待,其等待时间 τ 为前面 s 台牵引车装车时间和自身装车时间之和,即为 $(s + 1)$ 个参数为 $c\mu$ 的独立负指数分布之和,即服从 $(s + 1)$ 阶爱尔朗分布^[20]。记 $f(\tau | s + 1)$ 为系统中有 s 台需要等待的牵引车时新到牵引车等待时间 τ 的条件概率密度,则

$$f(\tau | s + 1) = \frac{c\mu (c\mu\tau)^s e^{-c\mu\tau}}{s!} \quad (12)$$

由全概率公式

$$f(\tau) = \sum_{s=0}^{\infty} q_s f(\tau | s + 1) = \sum_{s=0}^{\infty} P^* \left(1 - \frac{\rho}{c}\right) \left(\frac{\rho}{c}\right)^s \frac{c\mu (c\mu\tau)^s e^{-c\mu\tau}}{s!} = P^* (c\mu - \lambda) e^{-(c\mu - \lambda)\tau} \quad (13)$$

则等待时间概率密度函数为

$$\begin{cases} f(\tau) = P^* (c\mu - \lambda) e^{-(c\mu - \lambda)\tau} & \tau > 0 \\ P(\tau) = 1 - P^* & \tau = 0 \end{cases} \quad (14)$$

根据式(14),很容易计算出等待时间均值为 $P^* / (c\mu - \lambda)$ 。

3.3 等待条件下等待时间分布

结合式(9)、式(12),由全概率公式,等待条件下的等待时间 τ^* 的概率密度为

$$f(\tau^*) = \sum_{s=0}^{\infty} q_s^* f(\tau^* | s + 1) = \sum_{s=0}^{\infty} \left(1 - \frac{\rho}{c}\right) \left(\frac{\rho}{c}\right)^s \frac{c\mu (c\mu\tau^*)^s e^{-c\mu\tau^*}}{s!} = (c\mu - \lambda) e^{-(c\mu - \lambda)\tau^*} \quad (15)$$

即日均发送频次确定,货源无限时,车辆等待时间服从参数为 $c\mu - \lambda$ 的负指数分布。其均值为 $1/(c\mu - \lambda)$ 。增加周转挂车可以减小牵引车总的平均等待时间,但不能减小等待条件下的平均等待时间。

4 算例分析

对某场站高峰时期日发送挂车数统计资料进行假设检验,发现该场站日发送挂车数为每天12台,且服从泊松分布。场站共有4个装卸设备,每个装

表1 平稳概率 P_i 计算结果

Tab. 1 Computational results of stationary probability

i	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
P_i	0.037 7	0.113 2	0.169 8	0.169 8	0.127 4	0.095 5	0.071 6	0.053 7	0.040 3	0.030 2
i	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
P_i	0.030 2	0.017 0	0.012 8	0.009 6	0.007 2	0.005 4	0.004 0	0.003 0	0.002 3	0.001 7

表2 等待概率 $P^*(K)$ 计算结果

Tab. 2 Computational results of waiting probability

K	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$P^*(K)$	1.000 0	0.962 3	0.849 1	0.679 2	0.509 4	0.382 1	0.286 6	0.214 9	0.161 2	0.120 9
K	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
$P^*(K)$	0.090 7	0.068 0	0.051 0	0.038 3	0.028 7	0.021 5	0.016 1	0.012 1	0.009 1	0.006 8

由表1、表2可以看出,当周转挂车数为0时,所有牵引车到达都必须等待;当 $K < c$ 时,增加周转挂车能显著减小等待概率;当 $K \geq c$ 时,每增加1台周转挂车,等待概率下降为原来的75%。

当指定需要等待的概率 P^* 为0.1时, K 为10台;全部牵引车平均等待时间为0.022 675 d;等待车辆的平均等待时间为0.25 d;拖挂比为1:1.833。

当指定需要等待的概率 P^* 为0.05时, K 为13台。全部牵引车平均等待时间为0.009 575 d;等待车辆的平均等待时间为0.25 d;拖挂比为1:2.08。

5 结 语

(1)分析了甩挂场站待装挂车的聚散特征,当场站发送和接收牵引车频次长期稳定,牵引车到达服从独立泊松分布,若干个装卸队伍装车时间服从独立负指数分布时,构建了待装挂车状态生灭过程模型。

(2)分析了待装挂车状态稳态分布,给出了牵引车需要等待的概率给定时,周转挂车数量配置计算公式。研究了排队等待的牵引车数量分布规律,并给出了牵引车平均排队长度。

(3)研究了牵引车等待时间分布规律,得出了平均等待时间计算公式。指出需要等待条件下牵引车的等待时间服从负指数分布。增加周转挂车可以减小牵引车总的平均等待时间,但不能减小等待条件下的平均等待时间。

(4)本文研究了单个站场平稳阶段的周转挂车

卸设备日均装卸挂车数为4台。假定各设备装卸时间独立并与牵引车到达率无关。显然, $\lambda = 12, \mu = 4, c = 4$;根据式(2)、式(3),可求出各状态稳态概率 P_i ,计算结果见表1。根据式(4),可求出周转挂车数为 K 时的等待概率 $P^*(K)$,计算结果见表2。

数量配置方法,但仅研究牵引车到达和装卸时间服从泊松流的情形。不同的场站牵引车到达规律和装卸时间分布规律有差别,比如牵引车有成批到达的情形;工厂进货和出货货品确定时,其装卸时间接近定长分布;随着甩挂运输的进一步发展,甩挂联盟出现后,高峰时段多个场站如何实现动态最优周转挂车数量配置等均是进一步研究的方向。

参考文献:

References:

- [1] 高洪涛,李红启. 道路甩挂运输组织理论与实践[M]. 北京:人民交通出版社,2010.
GAO Hong-tao, LI Hong-qi. Theory and practice of drop and pull transport organization [M]. Beijing: China Communications Press, 2010. (in Chinese)
- [2] 耿 蕤,张世华. 甩挂运输最佳挂车配置数量计算方法[J]. 公路交通科技,2013,30(6):127-130.
GENG Rui, ZHANG Shi-hua. A method for computing optimal trailer number for trailer pick-up transport[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2013, 30(6): 127-130. (in Chinese)
- [3] 杨广哲. 道路货物甩挂运输运营机理研究[D]. 西安:长安大学,2014.
YANG Guang-zhe. The study of operation mechanism of road freight drop and pull transport [D]. Xi'an: Chang'an University, 2014. (in Chinese)
- [4] LIN S W, YU V F, CHOU S Y. Solving the truck and trailer routing problem based on a simulated annealing

- heuristics[J]. *Computers & Operations Research*, 2009(36):1683-1692.
- [5] 付 壮,陈 康. 集装箱运输中空重箱调运方案[J]. *大连海事大学学报*, 2011, 37(4): 87-90.
FU Zhuang, CHEN Kang. Empty & heavy containers transport scheme design[J]. *Journal of Dalian Maritime University*, 2011, 37(4): 87-90. (in Chinese)
- [6] ZONG C, ZHANG H, YI Z, et al. Research on key technology of drop and pull transport for modern logistics in China[C]//FANG C F, WEI H, WANG Y P, et al. *Proceedings of the 12th COTA International Conference of Transportation Professionals*. Reston: ASCE, 2012: 2028-2036.
- [7] QI H X. The study of drop and pull transport mode based on low-carbon transport organization[C]//QI E, SHEN J, DOU R L. *International Asia Conference on Industrial Engineering and Management Innovation (IEMI2012) Proceedings*. Heidelberg: Springer, 2013: 1577-1585.
- [8] 李 晴. 甩挂运输经济效益的定量计算[J]. *物流工程与管理*, 2011, 33(8): 19-22.
LI Qing. Quantitative calculation of the economic effectiveness of drop and pull transport [J]. *Logistics Engineering and Management*, 2011, 33(8): 19-22. (in Chinese)
- [9] 张 娥. 甩挂运输技术标准体系研究[D]. 西安: 长安大学, 2013.
ZHANG E. The study of technical standard system of drop and pull transport[D]. Xi'an: Chang'an University, 2013. (in Chinese)
- [10] 薛 亮, 马健霄, 余 伟. 甩挂运输具体应用分析[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2011, 11(5): 200-205.
XUE Liang, MA Jian-xiao, YU Wei. Application analysis of drop and pull transport[J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2011, 11(5): 200-205. (in Chinese)
- [11] 祁宏生, 王殿海, 陈 松. 基于综合饱和度的单点信号控制方法[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2012, 44(2): 134-137.
QI Hong-sheng, WANG Dian-hai, CHEN Song. Isolated intersection control based on integrated saturation degree[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2012, 44(2): 134-137. (in Chinese)
- [12] 杨 昌, 初大智, 卢少平. 甩挂运输作业法及其实施策略研究[J]. *物流技术*, 2010(7): 69-70.
YANG Chang, CHU Da-zhi, LU Shao-ping. Research on drop and pull transport and its implementation strategy[J]. *Logistics Technology*, 2010(7): 69-70. (in Chinese)
- [13] 许世燕, 贺昱曜, 李 渊. 基于最大车速的广义力跟驰模型[J]. *长安大学学报: 自然科学版*, 2007, 27(1): 72-75.
XU Shi-yan, HE Yu-yao, LI Yuan. Generalized force model of car's following based on maximum velocity [J]. *Journal of Chang'an University: Natural Science Edition*, 2007, 27(1): 72-75. (in Chinese)
- [14] 张兴强, 汪 滢, 胡庆华. 交叉口混合交通流元胞自动机模型及仿真研究[J]. *物理学报*, 2014, 63(1): 1-8.
ZHANG Xing-qiang, WANG Ying, HU Qing-hua. Research and simulation on cellular automaton model of mixed traffic flow at intersection[J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(1): 1-8. (in Chinese)
- [15] 童方仲. 基于生灭系统对城市道路施工区域通行能力分析[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2013.
TONG Fang-zhong. Capacity analysis of urban road construction area based on birth and death system [D]. Changsha: Changsha University of Science and Technology, 2013. (in Chinese)
- [16] BAYKAL-GÜRSOY M, XIAO W, OZBAY K. Modeling traffic flow interrupted by incidents[J]. *European Journal of Operational Research*, 2009, 195(1): 127-138.
- [17] 周智勇, 陈 峻, 王 炜. 基于排队论的出行车辆停放接受条件[J]. *东南大学学报: 自然科学版*, 2006, 36(4): 638-642.
ZHOU Zhi-yong, CHEN Jun, WANG Wei. Parking acceptance condition for in-trips vehicles[J]. *Journal of Southeast University: Natural Science Edition*, 2006, 36(4): 638-642. (in Chinese)
- [18] 陈小红, 钱大琳, 钮志强. 混合交通下信号交叉口排队长度计算模型研究[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2010, 10(1): 105-111.
CHEN Xiao-hong, QIAN Da-lin, NIU Zhi-qiang. Calculating model of queuing length at signalized intersections with mixed traffic[J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2010, 10(1): 105-111. (in Chinese)
- [19] 唐应辉, 唐小我. 排队论-基础与分析技术[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
TANG Ying-hui, TANG Xiao-wo. *Queuing theory-foundation & analytical techniques*[M]. Beijing: Science Press, 2006. (in Chinese)
- [20] 周华任, 马亚平. 随机运筹学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2012.
ZHOU Hua-ren, MA Ya-ping. *Stochastic Operational Research*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2012. (in Chinese)