

# 基于免疫克隆选择算法的市域快速轨道交通 列车开行方案优化研究

陈胜波, 何世伟, 何必胜

(北京交通大学 交通运输学院 北京 100044)

**摘要:** 为描述城市轨道交通市域线多交路运营的开行方案问题,在满足客流需求和车站折返能力、车底配置数、旅客容忍等待时间等约束条件下,构建了以企业运营成本最小和列车承载率最佳的双目标优化模型。给出了求解该模型的自适应免疫克隆算法的求解设计和步骤,并结合算例证明了算法的有效性。

**关键词:** 城市轨道交通; 市域线; 多交路; 多目标优化; 自适应免疫克隆算法

**中图分类号:** U12 **文献标识码:** A **文章编号:** 2095-0373(2013)03-0081-06

城市轨道交通列车开行方案等同于确定列车交路上分时段列车开行对数的日行车计划。随着城市轨道交通的快速发展,不同城市轨道交通线路的并行建设和运营,将在城市轨道交通路网中形成部分超长线路,把城市中心与卫星城镇紧密联系起来。这种超长的城市轨道交通线路被称为市域轨道交通快速线(简称市域线或R线)。这种线路具有线路长、站间距大、沿线断面客流分布不均衡等特点。在这样的线路上采用单一的交路行车模式,一方面,列车往返时间较长,难以保证各客流区段的合理发车间隔,另一方面难以有效地利用运输能力和列车车底,从而无法满足旅客的出行需要和服务水平。因此,有学者对市域线在多交路运营模式下的列车开行方案问题进行了研究。

## 1 研究综述

在城市轨道交通列车交路的选择方面,徐瑞华等<sup>[1]</sup>分析了多种交路对城市轨道交通线路通过能力和车底运用的影响,建立多种交路条件下的城市轨道交通通过能力和车底数量的数学模型,并给出实例验证了模型的有效性。徐新玉<sup>[2]</sup>通过对城市轨道交通列车运行组织中不同交路情况进行了分析,阐述了各种交路的优缺点、适用条件和应用情况,以期在城市轨道交通的运营组织上选择合适的列车交路,取得运能和客流需求的平衡,并对城市轨道交通未来运营组织模式提出了建议。李俊芳等<sup>[3]</sup>分析了城市轨道交通各种典型交路的形式适用情况,计算了大小交路嵌套形式、分段运行交路的通过能力和车底运用数,以及带有支路的交路对通过能力的影响。在开行方案的优化模型方面,李春雨<sup>[4]</sup>在分析了市域线轨道交通客流的时空波动特点并对不同的交路模式进行了定性分析后,建立了合理承载率下的多区段列车开行间隔优化模型,结合算例采用Lingo9.0规划软件对模型进行了求解,这种方法虽能得出最优解但求解速度较为缓慢。徐林<sup>[5]</sup>针对新线引入条件下城市轨道交通运力资源配置问题建立了以企业运营成本最小和乘客出行时间成本最小的双目标优化模型,采用免疫克隆算法对模型进行了求解并通过ILOG优化软件对求解质量进行了验证。CHANG Y H et al<sup>[6]</sup>以企业运营成本最小和旅客总的旅行等待时间最小为目标,建立了列车周期化运行条件下的高速列车开行方案的多目标整数规划模型并采用模糊数学规划方法对该问题进行求解。CADARSO L et al<sup>[7]</sup>通过设定经济惩罚系数控制列车满载率的波动范围,在此基础上考虑旅客需求约束、列车服务约束、机车车辆约束建立了基于轨道交通线路运营成本最小、空车运行费用

收稿日期: 2013-05-03

作者简介: 陈胜波 男 1990年出生 硕士研究生

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(2012CB725400); 国家科技支撑计划课题(2011BAG01B02)

最小以及列车满载率过低或过高出现概率最小化的综合优化模型,确定城市轨道交通路网中列车运营计划。

由此可见,在交路的选择方面,目前定性研究较多,定量较少。在开行方案的优化模型上,应该综合考虑企业的运营成本和乘客的出行时间成本,乘客的出行时间成本包括候车时间、车上的运行时间以及换乘时间。当列车速度一定时,乘客在车上的运行时间是固定的,乘客的换乘多数在不同线路间进行,所以交路的设计对本线乘客的换乘影响不大。列车承载率是反应列车承载状况的指标,追求最佳的承载率既能保证列车不至空载而浪费运能又能兼顾旅客乘车的舒适程度。因此,本文在已有的研究基础上,针对市域线断面客流波动的特点,在满足了客流需求及乘客容忍等待时间等前提下,建立了多交路运营模式下的以企业运营成本最小和列车承载率最佳的双目标优化模型。采用黄友锐<sup>[8]</sup>提出的克隆选择理论,用自适应免疫克隆选择算法(ACSA)对模型进行了求解,经算例验证该算法的求解时间小于5 min,提高了算法的实用性。

## 2 多目标优化模型

(1) 模型构建思路。以企业的运营成本和列车承载率最佳为目标函数构建优化模型,其中列车承载率最佳是以各区间列车运量与标准载客量的差方和最小来表示<sup>[4]</sup>。考虑了区间通过能力、车站折返能力、乘客容忍候车时间、满载率约束、车底配置数约束等,在满足客流需求的前提下使得总的目标值最小。

(2) 模型假设。①列车采用站站停的运行模式;②上下行列车成对发车;③线路上的每个折返站都具备两个方向的折返能力;④车辆选型和列车编组数量固定,列车标准荷载及最大容量为定值;⑤乘客能够接受的候车时间为一定值,超过该定值乘客将选择其他运输方式;⑥服务水平较高,无客流滞留情况。

(3) 参变量的定义。轨道交通线路  $G = \{N, A\}$ , 其中集合  $n \in N$  为线路  $G$  上的车站集合,  $a \in A$  为路线  $G$  上的区间集合;  $l_a$  为区间长度;  $v_a$  为区间的最高运行速度;  $\eta_{\max}$  为列的最大满载率;  $\bar{f}_a$  表示单位时间内路段  $a$  的最大通过能力;  $r \in R$  为备选交路集合;  $l_r$  表示列车在交路  $r$  上的周转距离;  $t_r^z$  为列车在交路  $r$  上的周转时间;  $t_r^R$  为列车在折返站的折返时间;  $\zeta$  为最大的运营交路个数;  $c_1$  为开行一列车的固定成本,单位为万元;  $c_2$  为开行一列车的变动成本,单位为万元/km;  $Q$  表示车辆定员;  $L$  为车底编组辆数;  $\delta_r^a$  为0-1变量,若交路  $r$  经过路段  $a$  则为1,否则为0;  $p_a$  为路段  $a$  的断面客流流量;  $t_{\min}$  为最小列车追踪间隔时间;  $T_{\text{rong}}$  为乘客的容忍等待时间;  $f_r$  为整数决策变量,表示交路  $r$  上的列车开行频率。

(4) 模型构建。

$$\min Z_1 = 2c_1 \sum_{r \in R} f_r + c_2 \sum_{r \in R} f_r l_r \quad (1)$$

$$\min Z_2 = \sum_{a \in A} (p_a / \sum_{r \in R} f_r \delta_r^a - QL)^2 \quad (2)$$

约束条件:

$$\sum_{r \in R} f_r \delta_r^a \leq \bar{f}_a, \forall a \in A \quad (3)$$

$$f_r \leq 3600/t_r^R, \forall r \in R \quad (4)$$

$$\sum_{r \in R} (f_r t_r^z / 3600) \leq m, \forall r \in R \quad (5)$$

$$\sum_{r \in R} (f_r / \bar{f}_a) \leq \zeta, \forall a \in A \quad (6)$$

$$p_a / \sum_{r \in R} f_r \delta_r^a \leq \eta_{\max} \quad (7)$$

$$3600 / \sum_{r \in R} f_r \delta_r^a \leq T_{\text{rong}} \quad (8)$$

$$\bar{f}_a = \min(3600/t_{\min}, 3600v_a/l_a), \forall a \in A \quad (9)$$

$$f_r \in Z \quad (10)$$

其中,目标函数(1)和(2)分别表示企业的运营成本最小和列车的承载率最佳;约束条件(3)为区间通过

能力约束; (4) 为车站折返能力约束; (5) 表示车底配置数约束; (6) 为最大交路个数约束; (7) 为列车在各区间的满载率约束; (8) 为乘客容忍等待时间约束; (9) 为区间通过能力计算; (10) 决策变量的整型约束。

### 3 模型求解

由于目标函数(1)表示企业的运营成本,单位为万元,而目标函数(2)追求的是列车的最佳承载率,为使得量纲统一以及两目标函数在同一个数量级上,对目标函数(2)设置一个经济惩罚系数  $w$  (万元/人)。当列车的实际载客量与标准载客量偏差太大时,整个惩罚结果越大,当列车的实际载客量接近标准载客量时,惩罚结果越小。这样既能保证量纲的统一,也能保证承载率在一个合理范围内波动,减少列车运能的虚靡。

另外,上述开行方案的优化问题是一个带约束的多目标组合优化问题,需要将多目标问题转化为单目标问题进行求解。求解多目标规划问题的方法有主要目标法、功效系数法、分层序列法、线性加权法和理想点法。论文采用线性加权法将上述多目标优化问题转化为单目标问题,以达到问题简化的目的,方便问题的求解。对目标函数(1)的权重设置为  $\lambda$ ,则目标函数(2)的权重为  $(1 - \lambda)$ 。转化后的单目标函数为  $\min Z = \lambda Z_1 + (1 - \lambda) w Z_2$ 。

简化后的模型为非线性整数规划模型,规模较大时利用经典的数学方法求解较为困难。相比于其他智能算法,自适应免疫克隆选择算法能够很好的避免陷入局部极值的情况,在保证收敛速度的同时又能维持抗体的多样性。考虑上述自适应免疫算法的多种优点,论文采用该算法进行长大线路下城市轨道交通列车开行方案的优化求解。

#### 3.1 ACSA 的算法设计说明

(1) 抗体(解)的表示和初始化。以整数编码组成抗体,抗体编码形式为  $F = (f_1, f_2, \dots, f_i)$ ,其中  $f_i$  表示交路  $i$  的列车开行频率,抗体长度为备选交路个数。抗体群的初始化是随机生成的,即  $f_i$  随机在  $(0, \bar{f}_a)$  间取值。如图 1 所示。

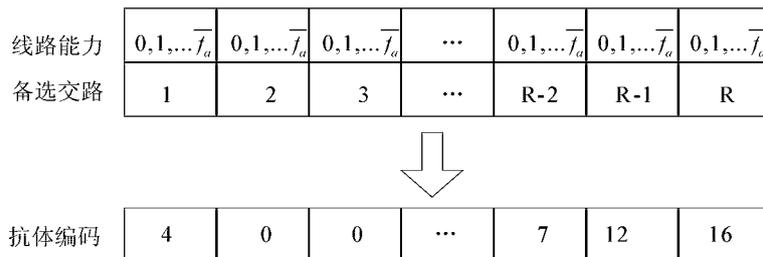


图 1 抗体编码示意图

(2) 亲和度函数的设计。将模型中的目标函数和约束条件作为抗原,通过解析每一个抗体所对应的目标函数值来确定抗体-抗原的亲和度,目标函数值越小则抗体亲和度越高。这里以目标函数值作为抗体-抗原亲和度。但是由于智能算法存在着初始解的随机生成以及变异的随机性,可能导致无效抗体的产生,比如抗体的解析结果无法满足某些约束条件,算法对无效抗体的适应度赋值 -1,从而使得该抗体适应度值很低,在克隆过程中由于其亲和度很低,从而克隆个数很少,选择进入新的种群的可能性很低,最终这些抗体或消亡或以新的较优解的形势存在于新的群体中。

(3) 克隆个数的确定。对当前代初始群体中的抗体进行克隆,生成一个临时的克隆群体。设定最大克隆个数  $cl_{max}$  和最小克隆个数  $cl_{min}$ 。抗体的克隆个数  $cl$  与其亲和度成正比关系,本文设计的关系为  $cl = \text{int} [cl_{max} (1 - i/n)]$ ,并且  $cl \geq cl_{min}$ 。其中  $n$  为种群中抗体个数,  $\text{int}$  为上取整函数,  $i$  为对应的抗体的次序。在进行克隆个数确定前,需要将(2)中计算的抗体-抗原亲和度按照从大到小的顺序排序,抗体次序  $i$  与亲和度正相关,即  $i$  越小,该抗体的亲和度越大,克隆的个数越多。

(4) 变异概率的确定。为保证得到全局最优解,在进化的初期需要一个较大的变异概率,扩大抗体的多样性选择。随着进化代数的增加,抗体的亲和度也相应变大,此时变异概率应该较小,以便算法的收敛。设置变异概率  $\theta = \theta_{max} (1 - m/M)$ ,其中  $m$  为迭代次数,  $M$  为设定的总的迭代次数。以此体现了免疫

算法的自适应性。

(5) 选择个数的确定。克隆选择算法,要求某个抗体的选择个数  $d$  正比于亲和度,即亲和度越大,选择个数越多。选择个数按公式  $d = \text{int}[d_{\max}(1 - m/M)]$  其中  $d_{\max}$  为最大选择个数。

(6) 终止条件的确定。当连续迭代次数超过 10 次,得出的最优值相同或者迭代次数超过  $M$  说明算法已经收敛到最优解,终止计算,输出最优解。

### 3.2 ACSA 的实现步骤

(1) 抗原识别。将给定的目标函数和约束条件作为待求问题的抗原。

(2) 随机初始化种群。随机产生  $N$  个抗体,组成初始化种群  $P$ 。抗体由随机产生的列车开行频率组成,每个抗体代表一个开行方案,抗体的长度为交路个数。

(3) 亲和度计算。对  $P$  中的抗体进行亲和度计算。

(4) 克隆。对抗体群  $P$  中的抗体进行克隆得到扩增后的抗体群  $C$ ,每个抗体扩增个数按照 3.1 中的 (3) 确定。

(5) 高频变异。对抗体群中的抗体进行高频变异并且每次变异后都要进行约束检验,得到  $C^*$ ;变异的概率按照 3.1 中的 (4) 进行变异操作。

(6) 选择。从  $C^*$  中选择  $d$  个亲和高的抗体替换  $P$  中  $d$  个亲和度低的个体,  $d$  的大小按照 3.1 中的 (5) 进行确定。

(7) 判断终止条件是否满足,如果满足则程序结束,输出最优解,否则转至 (3)。

## 4 算例分析

### 4.1 参数说明

以某市  $R_0$  线为例,该线全长 55 km,共设有  $s_1 \sim s_{29}$  共 29 个车站,其中具有折返能力的站有 9 个。因此备选交路个数为  $C_9^2 = 36$ ,即抗体长度为 36。列车固定行驶成本  $c_1 = 8$  万元,变动成本  $c_2 = 0.04$  万元/km。采用 A 型车 8 节编组,车辆标准载客量  $Q = 310$  人,车底配置数  $m = 60$  列。全线设计区间最高运营速度为 80 km/h,最小列车开行间隔时间  $t_{\min} = 120$  s;折返时间  $t_r^R = 120$  s。高峰小时乘客容忍候车时间  $T_{\text{rong}} = 420$  s。经济惩罚系数  $w = 0.001$  万元/人,最大满载率  $\eta_{\max} = 1.32$ ,交路个数上线  $\zeta = 3$ 。论文目标函数 (1) 赋权重  $\lambda = 0.6$ ,此值可以根据决策者偏好灵活设置。

### 4.2 算例数据

针对  $R_0$  线远期高峰时段的列车开行方案进行分析,图 2 是根据客流预测得出的  $R_0$  线远期高峰时段上行区间断面客流统计图,其中最大断面客流量 54 690 人,最小为 6 842 人。由此图可以看出,该线各区间断面客流分布不均衡,主要表现在中间区段客流较大,而两端客流分布较少。 $R_0$  线的部分交路数据如表 1 所示。

表 1 部分交路数据

交路编号	交路区段	周转距离/km	周转时间/s
1	$r(S_1, S_1)$	11.00	1 467
2	$r(S_1, S_6)$	13.91	1 854
3	$r(S_1, S_9)$	23.29	3 105
4	$r(S_1, S_{14})$	34.59	4 612
5	$r(S_1, S_{18})$	50.62	6 749
6	$r(S_1, S_{22})$	71.89	9 585
...	...	...	...
33	$r(S_{18}, S_{29})$	59.38	7 918
34	$r(S_{22}, S_{27})$	22.18	2 957
35	$r(S_{22}, S_{29})$	38.11	5 081
36	$r(S_{27}, S_{29})$	10.85	1 446

### 4.3 求解结果及分析

采用 c#2008 编程实现该算法对该实例进行求解。

对抗体规模、最大克隆抗体数、最小克隆抗体个数、最大变异概率、最小变异概率、最大抗体选择个体数、最

小抗体选择个体数取不同值条件下对算法进行多次测试。测试结果表明当抗体规模在 20 ~ 50 之间,变异概率在 0.4 ~ 0.8 变化,最大克隆个数在 10 ~ 15 之间,最小克隆个数在 5 ~ 3 内变化时,算法均可以收敛到相同的最优解。这说明算法对参数的依赖性不强,有较好的稳定性。上述算例的参数设置如下:抗体规模为 40,最大变异概率取值  $\theta_{\max} = 0.8$ ,总的迭代次数  $M = 100$ ,抗体选择个数最大值  $d_{\max} = 10$ ,最小  $d_{\min} = 4$ 。

算法经过多次运行测试,平均运行时间小于 5 min,平均迭代次数为 27 次,算法即达到收敛,收敛过程中的抗体平均亲和力与迭代次数的关系如图 3 所示,最优值为 6 336.49 万元。

高峰时期  $R_0$  线列车交路为两条分别为  $r(S_1, S_{18})$  和  $r(S_6, S_{29})$ , 开行频率均为 9 列/h, 计算结果符合图 2 中断面客流量的分布规律, 即在客流集中的区段采取不同交路联合运营的方式。最终的列车交路示意图如图 4 所示, 由图可知  $R_0$  线远期交路模式为嵌套列车交路( 又称交错列车交路)。由公式  $N_r = \text{int}(f_r t_r^z / 3 600)$  ( $\text{int}$  表示上取整函数) 计算出上述多交路运行模式下的车底需要数量为 49 列。若采用单一的交路方式, 由公式  $f_r = p_{\max} / \eta b q$  ( $\eta$  为列车满载率, 此处假定为 1.32,  $p_{\max}$  为区间的最大断面客流量) 得开行频率为 17 列/h, 需要车底 69 列, 超过了车底配置数量。对比结果如表 2 所示, 可见采用多交路运行能够节省车底的运用, 降低运营成本。

目标函数(2) 是追求最佳的承载率, 即在保证乘客乘车舒适度的同时又能有效地减少列车运能的虚靡。运能虚靡情况如图 5 所示, 图中上半轴表示多交路模式下的运能虚靡情况, 下半轴表示单一交路下的运能虚靡情况。对比分析可知, 采用上述模型得出的多交路模式下的列车开行方案, 不仅能够有效减少需要的车底数而且能降低运能虚靡, 得到一个最佳的列车承载率。

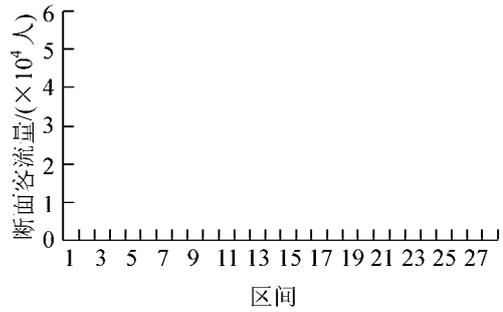


图 2 早高峰时段区间断面客流统计图

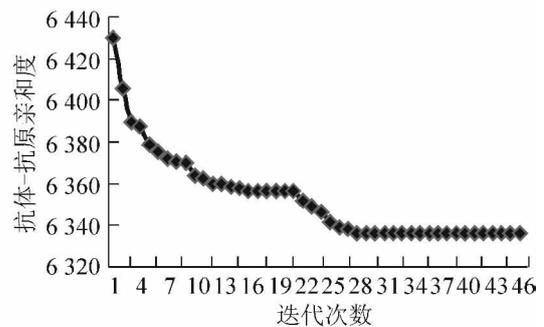


图 3 抗体-抗原亲和力与迭代次数关系曲线

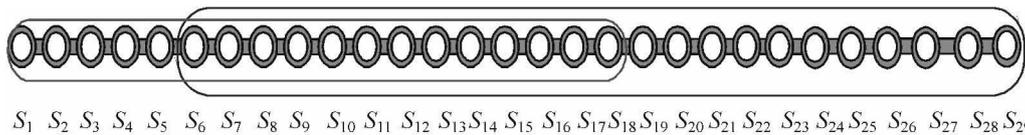


图 4  $R_0$  线列车交路示意图

表 2 不同交路运行模式下的需要车底数量对比

项目	多交路		单一交路
	$r(S_1, S_{18})$	$r(S_6, S_{29})$	$r(S_1, S_{29})$
开行频率/(列·h <sup>-1</sup> )	9	9	17
列车周转时间/s	6 749	12 670	14 667
所需车底/列	17	32	69

### 5 结束语

对城市轨道交通市域线的开行方案问题构建了优化模型, 将车底配置、折返站的折返能力、运行交路数等进行了综合考虑, 建立了企业运营成本最小和列车承载率最佳的双目标优化模型, 并针对该模型设计了算法。结合算例, 采用了自适应免疫克隆算法对问题进行求解, 提高计算效率, 为开行方案问题的智能化提供了较好的解决途径。最后对计算结果进行了对比分析, 验证了模型的有效性。

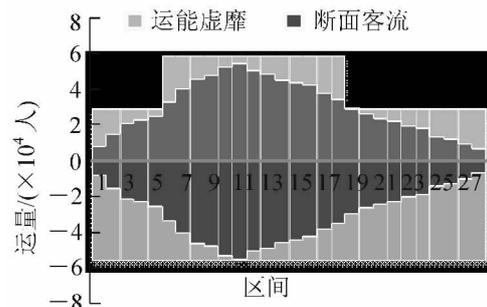


图 5 不同交路模式下的运能虚靡

## 参 考 文 献

- [1]徐瑞华,李侠,陈菁菁.市域快速轨道交通线路列车运行交路研究[J].城市轨道交通研究,2006(5):36-39.
- [2]徐新玉.城市轨道交通行车组织交路形式分析[J].铁道运输与经济,2010,32(9):55-58.
- [3]李俊芳,王柄达.城市轨道交通典型交路形式分析[J].铁道运输与经济,2009,31(10):54-48.
- [4]李春雨.轨道交通市域线运输组织优化研究[D].成都:西南交通大学交通运输学院,2009.
- [5]徐林.新线引入条件下城市轨道交通运力资源配置研究[D].北京:北京交通大学交通运输学院,2012.
- [6]CHANG Y H, YE H C H, SHEN C C. A multi-objective model for passenger train services planning application to Taiwan's High-speed Rail Line[J]. Transportation Research Part B, 2000, 34(2):91-106.
- [7]CADARSO L, MARIN A. Integration of timetable planning and rolling stock in rapid transit networks[J]. Ann Oper Res, 2011, 119(1):113-135.
- [8]黄友锐.智能优化算法及其应用[M].北京:国防工业出版社,2008.

## Optimization of Train Working Plan for City Line Based on Immune Clone Algorithm

Chen Shengbo, He Shiwei, He Bisheng

(School of Traffic and Transportation, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

**Abstract:** To illustrate the problem of multi-routing train service planning of city line, the multi-objective programming model for making the train working plan of the metro line is set up considering the turning capacity of station, the number of train sets and the passengers' tolerant waiting time. The model's objectives minimize the train operation cost and pursue the best fully-loaded ratio. Then a specific solving solution and procedure of adaptive immune clone algorithm is given which proves the effectiveness of the algorithm combined with a numeric example.

**Key words:** urban rail transit; city line; multi-routing, multi-objective; immune clone algorithm

(责任编辑 刘宪福)

(上接第 81 页)

## Dynamic Response of High-speed Railway Catenary

Feng Zijin, Guo Shuqi, Ma Baoping

(Department of Engineering Mechanics, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

**Abstract:** In this paper, the dynamic response of the railway catenary with the the action of the moving load is investigated. The motion equation is established using a partial differential equation based on the contact model. Due to the variational stiffness of the catenary system, in the terms of the proposed transformation, the motion equation is a second order differential equation with variable coefficients. Solving the equation with WKB method, one could obtain the mode function and frequency equation with the two special boundary conditions. At last, using the mode superposition method, the partial differential equation is solved. Then, the effect of parameters is discussed.

**Key words:** stiffness; boundary conditions; frequency equation; dynamic response (责任编辑 车轩玉)