

文章编号:1672-9331(2017)04-0049-06

面向城际轨道交通的定制化接驳公交线路优化

彭 巍, 周和平, 高 攀

(长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410004)

摘 要: 针对面向城际轨道交通的定制化接驳公交线路优化问题, 对现有的定制化接驳公交的不足进行了总结, 并建立了定制化接驳公交运行线路优化模型, 该模型目标函数考虑最小化乘客出行成本和公司运营成本, 同时满足最大乘客定制需求。针对该优化模型的特点, 设计了混合模拟退火算法对其进行求解。最后通过算例分析, 验证了所研究的考虑轨道交通到站时间的定制化接驳公交协调线路优化模型和算法的可操作性、有效性以及稳定性。

关键词: 城际轨道交通; 定制化接驳公交; 线路优化; 定制需求; 模拟退火; 协调线路

中图分类号: U491.1

文献标识码: A

The route optimization research of customized feeder transit system oriented on intercity railway system

PENG Wei, ZHOU He-ping, GAO Pan

(School of Traffic and Transportation Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410004, China)

Abstract: In order to optimize the bus routes of customized connection for intercity feeder transit, this paper summarizes the existing problems of customized feeder buses, and establishes an optimized model of the bus line with customized connection. The model objective function considers minimizing passenger travel costs and operating costs, while meeting the largest passenger customization requirements. According to the characteristics of the optimization model, a hybrid simulated annealing algorithm for solving them is designed; finally, through the example analysis, the optimization model and algorithm of track traffic coordination customized shuttle bus arrival time of the feasibility, validity and stability are tested.

Key words: intercity rail transit; customized feeder transit; route optimization; custom requirements; simulated annealing; coordination circuit

定制化接驳公交是一种新型的接驳公交模式, 它通过灵活的运输形式(如没有固定线路)为乘客提供需求响应式接驳服务。因其具有方便快捷、灵活多变、准点率高、适用郊区、服务舒适等特点

点, 故能有效地接驳轨道交通。

在定制化接驳公交的研究方面, Alshalal-fah^[1]评估了服务于低密度郊区的灵活型公交服务系统的实用性; Lownes 等^[2]针对灵活响应式的接

收稿日期: 2017-09-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51178061); 交通运输部应用基础研究项目(2014319825190)

作者简介: 彭 巍(1993-), 男, 江西吉安人, 长沙理工大学硕士研究生, 主要从事交通运输规划与管理方面的研究。

驳轨道交通的公交网络进行了优化,并设计出启发式算法;Almasi等^[3]针对铁路运输系统的接驳巴士进行了研究,设计出了数学优化模型和相应的启发式算法,模型的计算结果能有效地减少接驳巴士的运营成本;吕慎等^[4]通过建立轨道交通接驳公交换乘乘客候车时间模型,发现换乘乘客的候车时间受接驳公交的发车时刻影响较大;刘华胜等^[5]通过定义有效路径这一概念,建立了双层规划模型来研究轨道交通接驳线路;丁帅^[6]在对灵活型公交接驳系统线路优化研究时,分别建立了基于车辆运营成本和乘客在途时间成本的单车型及多车型线路优化模型。

当前的研究主要集中在公交站点选址优化、公交线网优化设计以及评价方法等方向,而在面向城际轨道交通定制化接驳公交线路优化的研究极为缺乏。因此,作者根据所需服务的需求量以及乘客需求期望的换乘轨道交通时间等信息,构建考虑轨道交通发车时间的协调线路优化模型,

并通过数学模型对接驳公交到达每个需求接送点的时间以及接驳公交的行驶路径等进行优化,充分考虑乘客出行需求,以提高公交服务水平。

1 定制化接驳公交运行线路优化模型

本研究的定制化接驳公交协调路线优化问题隶属于带有时间窗的车辆路径问题^[7],需要花费很长时间才能求解出大规模实例的最优解,同时也是多目标优化问题,考虑最小化乘客出行成本和公司运营成本,在满足最大乘客定制需求的基础上,对系统服务的接驳公交的行驶路线进行优化,以达到提高接驳公交的服务水平的优化目标。将上述多个目标函数赋予了不同的转换系数,把多目标函数优化问题转化单目标优化问题来进行研究^[8]。

1.1 决策变量

x_{uvk}^h 和 y_{ik}^h 均为决策变量,其表达式为:

$$x_{uvk}^h = \begin{cases} 1, & \text{车辆 } k \text{ 第 } h \text{ 趟从需求点 } u \text{ 前往下一需求点 } v \text{ 接驳} \\ 0, & \text{否则} \end{cases} \quad (1)$$

$$y_{ik}^h = \begin{cases} 1, & \text{订单 } i \text{ 与车辆 } k \text{ 第 } h \text{ 趟匹配} \\ 0, & \text{否则} \end{cases} \quad (2)$$

1.2 目标函数

考虑轨道交通发车时间的协调线路优化模型旨在满足乘客预约需求的基础上优化接驳车辆的行驶路线,目标函数分别从公交运营成本及乘客时间成本来考虑:一方面考虑定制需求满足最大;另一方面综合考虑接驳公交运营过程中车辆的公里油耗和乘客在车时间最小,达到降低公交企业的运营成本和提高接驳公交的服务水平的优化目标。

定制化需求满足最大:

$$\max Z_1 = \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^K \sum_{h=1}^M y_{ik}^h p_i \quad (3)$$

接驳公交运营成本最小:

$$\min Z_2 = \sum_{u=1}^U \sum_{v=1}^V \sum_{k=1}^K \sum_{h=1}^M x_{uvk}^h S_{uv} C_k \quad (4)$$

乘客时间成本最少:

$$\min Z_3 = \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^K \sum_{h=1}^M y_{ik}^h p_i T_i \quad (5)$$

本次模型构建将引入公交运营成本转换系数 α 、乘客时间成本转换系数 β 、定制需求量转换系数

γ , 将该三者统一起来,以定制化接驳公交系统成本 Z 为最优,因此可将多目标规划模型转变为单目标规划模型。

目标函数转化为:

$$\min Z = \alpha \sum_{u=1}^U \sum_{v=1}^V \sum_{k=1}^K \sum_{h=1}^M x_{uvk}^h S_{uv} C_k + \beta \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^K \sum_{h=1}^M y_{ik}^h p_i T_i - \gamma \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^K \sum_{h=1}^M y_{ik}^h p_i \quad (6)$$

式中: p_i 为第 i 个订单的同行人数; K 为接驳车辆数; M 为接驳车辆总运行次数; N 为订单总数; S_{uv} 为需求点 $u-v$ 的距离; C_k 为车辆 k 的车公里油耗; N_r 为轨道交通接驳站点的数量; U 为停靠需求点数量; $T_i = f(x_{uvk}^h)$ 为订单 i 的时间成本,包括车内时间与中间停靠时间,根据车辆路径计算。

1.3 约束条件

1) 需求点接驳服务约束。

接驳公交在运营时必须保证每个需求点至少有 1 辆接驳公交进行服务^[9]:

$$\sum_{v=1}^V \sum_{k=1}^K \sum_{h=1}^M x_{uvk}^h \geq 1, \forall u \quad (7)$$

2) 订单一车辆匹配约束。

提前2 h 预定并进入预排的订单必须满足:

$$\sum_{k=1}^K \sum_{h=1}^M y_{ik}^h = 1, i \in B. \quad (8)$$

下述约束条件表示对于后续没有进入预排的任意订单,最多只有一趟接驳公交与之匹配:

$$\sum_{k=1}^K \sum_{h=1}^M y_{ik}^h \leq 1, i \notin B. \quad (9)$$

式中: B 为进入预排的订单。

3) 定制服务优先约束。

为了激励乘客提早预定,采取“先到先服务”策略,优先安排时间靠前的订单需求:

$$\sum_{k=1}^K \sum_{h=1}^M y_{ik}^h \geq \sum_{k=1}^K \sum_{h=1}^M y_{jk}^h, \forall j \geq i. \quad (10)$$

4) 车辆路径有效性约束。

通过控制接驳公交的绕行时间来体现定制化接驳公交的快捷性。利用下述约束条件限制乘客乘坐接驳公交到达轨道交通站点的行驶时间不超过其直达行驶时间的 $(1+\theta)$ 倍:

$$t(O_k^h, u) + t_{uv} \leq (1+\theta)t_{\min}(O_k^h, D_k^h), \quad \forall u, k, h. \quad (11)$$

式中: O_k^h, D_k^h 分别为车辆 k 第 h 趟的起点和终点; t_{uv} 为需求点 $u-v$ 的时间; $t_{\min}(O_k^h, D_k^h)$ 为车辆 k 第 h 趟的起点和终点的最短时间; θ 为绕行系数,依据当地的实际道路条件确定。

5) 车队规模约束。

表示在运营过程中使用的接驳车辆数不超过系统的车队规模:

$$K \leq K_{\max}. \quad (12)$$

式中: K_{\max} 为最大车辆数。

6) 车辆容量约束。

表示保证在运行过程中接驳公交的载客量不超过车辆的额定容量^[10],保证服务水平:

$$\sum_{i=1}^K y_{jk}^h p_i \leq Q_k, \forall k, h. \quad (13)$$

式中: Q_k 为第 k 辆车的额定载客量。

7) 车辆停靠次数约束。

接驳公交在单次行程中的停靠次数不宜过多,需要受到限制,以便体现定制化接驳公交的快捷性:

$$P_k^h \leq P_{\max}. \quad (14)$$

式中: P_{\max} 为最大停靠次数; P_k^h 为车辆 k 第 h 趟

的停靠次数。

8) 车辆单趟运行时间约束。

考虑到乘客乘车的公平性,车辆的行驶时间不能超过最长的运行时间限制,以满足乘客快速到达轨道交通站点的要求,否则会影响接驳服务水平:

$$\sum_{v=1}^V \sum_{k=1}^K \sum_{h=1}^M x_{uvk}^h t_{uv} + w_k^h \leq T_{\max}, \quad \forall k, h. \quad (15)$$

式中: T_{\max} 为线路最长允许运行时间; w_k^h 为车辆 k 第 h 趟的在各需求接送点停靠总等待时间;

9) 接驳公交起点到达时刻约束。

接驳公交起点到达时刻约束表示接驳车辆到达该趟次接驳任务第一个接送点的时刻要早于第 i 个订单乘客最早到达停靠接送点的时刻:

$$G_k^h \leq \min_i (y_{ik}^h E_i | y_{ik}^h = 1), \forall k, h. \quad (16)$$

10) 终点时间窗约束。

通过时间窗的约束限制接驳公交到达轨道交通站点的时间。由于同一趟接驳公交车对应同一轨道车站的同一发车时刻,车辆到达时间必须满足时间窗约束,可以确保该公交系统的服务质量:

$$R_k^h - L_R \leq G_k^h + \sum_{u=1}^U \sum_{v=1}^V x_{uvk}^h t_{uv} + w_k^h \leq R_k^h - E_R, \forall k, h. \quad (17)$$

式中: R_k^h 为车辆 k 第 h 趟的城际轨道发车时刻; $[E_R, L_R]$ 为时间窗; E_R, L_R 分别为接驳公交最早和最晚到达轨道交通站点的时间。

2 算法设计

考虑到车辆路径问题是多目标组合优化问题,涉及参数众多,约束条件繁杂,因此采用改进模拟退火算法求解。模拟退火算法能在求解车辆路径问题中灵活使用,其初值的鲁棒性较强,较少受初始条件的限制,在短时间内可以快速收敛,同时还可以搜索到全局最优解。但是,如果降温太快,将得不到全局最优解^[11]。针对这一缺点,采用2-opt 算法进行修正。该算法是属于局部搜索中的一种改进型优化算法,它是在确认一个解为初始解后,通过进行逐步的迭代来改进当前最优解^[12]的。

2.1 改进模拟退火算法的算法策略

利用改进的模拟退火算法求解定制化接驳公

协调路线优化问题的关键在于确定解的表示方法。针对有 n 个停靠接送点的带有时间窗的车辆路径问题,直接产生 n 个 $1 \sim n$ 之间的自然数排列来表示接驳公交经过的停靠接送点的顺序,然后根据定制化接驳公交协调路线优化模型的约束条件,依次把停靠接送点加入到接驳车辆行驶路径中。如果出现一个解配对的接驳车辆路径数大于车队规模时,该解为不可行解。

基于上述停靠接送点的解的表示方法,结合带有时间窗的协调路径优化问题的特征,设计出改进的模拟退火算法的求解策略如下。

1) 解的评价方法。

按照轨道交通到站时间的接驳公交协调路线优化问题的约束条件,把确认服务的停靠接送点依次加入到各条接驳公交服务路线中。对于得到的某个解,则可以采用公式 $E = Z + M \times P_w$ 对该解进行评价,其中, M 为对应解的车辆运行线路方案中的不可行路线条数; Z 为目标函数; P_w 为每条不可行路线的惩罚权重,它是依据每条线路的重要程度来确定。

2) 邻域操作方法。

采用“两交换法”构造参数的随机邻域,即随机交换当前解中的两个不同元素的取值。

3) 降温方法的确定。

每次降温都是以相同的比率降低。

4) 每一迭代步长的确定。

在迭代过程中选取固定的迭代步长 s ,同时根据问题的求解规模确定该步数。

5) 终止准则的确定。

若在 n 次降温过程中(n 由试算得出),目标函数值均小于设定值,且函数值的变化维持在一定范围内,则认为程序达到了终止条件,此时的目标函数值即为最优解。也就是温度下降到指定次数后,则程序停止计算。

2.2 算法步骤

根据上述算法策略以及基于 2-opt 算法的优化的混合算法,运用改进模拟退火算法求解定制化接驳公交协调路线优化模型的具体步骤如下。

步骤 1:编号得到接驳车辆运行线路方案。将被确认服务的停靠接送点编号依次标定为 $I_1, I_2, I_3, \dots, I_n$,轨道交通换乘站点编号为 I_{n+1} ,则 $\{I_1,$

$I_2, I_3, \dots, I_n\}$ 表示接驳车辆运行方案。

步骤 2:构造初始解。令当前解作为初始解,表示为 $X_0 = \{I_1, I_2, I_3, \dots, I_n\}$,当前温度的迭代步数为 $L=0$,当前的温度 $te_k = te_{\max}$ 。

步骤 3:判断初始解的可行性。首先判断第一个接驳轨道交通发车时间所对应的停靠接送点 I_1 是否满足约束条件,如:额定车载容量约束 $q_1 \leq Q_k$,若满足,则以这个接送作为该条线路的起点,并将其加到选择链中,然后依次加入停靠接送点 I_2, I_3, \dots, I_n ,并判断其是否满足约束条件。如果进行服务的乘客需求量超过了接驳公交的额定载客量或出行距离超出了选择链最大行驶长度的限制时,则可得到第一条路径为 $\{I_1 \rightarrow I_2 \rightarrow I_3 \cdots \rightarrow I_{n+1}\}$,按上述方法可得到其他接驳的轨道交通发车时间所对应的路线。

步骤 4:新解的产生。采用两变换法从解中随机选择 2 个元素,交换其在解中的位置可得到原解的邻居,产生新解 $f(X'_l)$,令 $L=L+1$,比较路径函数差的大小。若 $\Delta f \geq 0$,则接受新解,转步骤 6;否则,转步骤 5。

$$\Delta f = f(X'_l) - f(X_l). \quad (18)$$

式中: $f(X_l) = Z + M + P_w$, Z 表示目标函数值。

步骤 5:利用 Metropolis 接受准则,计算新的试探解的转移概率 P :

$$P = \begin{cases} 1, & \text{当 } f(X'_l) < f(X_l) \\ \exp\left\{-\frac{\Delta f}{te_l}\right\}, & \text{当 } f(X'_l) \geq f(X_l) \end{cases} \quad (19)$$

若随机产生一个在 $(0,1)$ 区间内的随机数 a ,比较 a 与 P 的大小。若 $a < P$,则接受新的解,并令 $f(X_l) = f(X'_l)$;若 $a \geq P$,则不接受新解,维持当前解不变。

步骤 6:若 L 小于当前温度最大迭代次数,转步骤 4,继续当前温度的内循环;否则,得到当前温度最优解后对其进行 2-opt 修正,将最优解保存。随后选定利用的降温系数,即 $te_{l+1} = \varphi te_l$,其中, $0 < \varphi < 1$,进行降温处理得到新的温度,转步骤 7。

步骤 7:若降温步数达到了程序的终止条件,则算法停止,该目标函数值为近似最优解,即近似最优的路径方案。

3 算例分析

3.1 模型参数输入

选取如图 1 所示的研究区域进行验证。按照我国的用地分类标准,将研究区域划分为 18 个小区简化研究。并将各小区进行标号,同时各个小区或几个小区的乘客需求聚集起来作为该定制化服务系统的停靠接送点。表 1 给出了模型中各常量参数的取值。

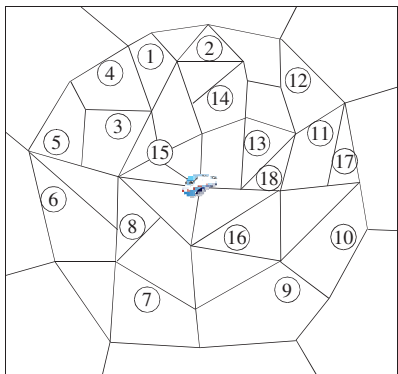


图 1 研究区域示意图
Fig. 1 The research area

表 1 模型输入参数

Table 1 Model parameter input table			
输入参数	值	输入参数	值
$K_{\max}/\text{辆}$	5	$C_k/(L \cdot \text{km}^{-1})$	0.3
N_r	1	$\overline{w_k}/\text{min}$	1
U	18	T_{\max}/min	25
N	34	α, β, γ	0.5, 0.3, 0.2
θ	0.3	te_0	250
$Q_k/\text{座}$	20	n, s	400, 40
$P_{\max}/\text{次}$	5	R_k^h	9 : 30/10 : 00/10 : 30/11 : 00

表 3 运行线路最优近似解

Table 3 Optimal approximate solution of running line								
车辆	R_k^h	满足订单号	线路	运行线路	需求 量	停靠点服务 乘客数	行驶 里程/km	绕行 比例/%
A1	9 : 30	(1 2 5 6 10 15 22)	1	4—1—2—14—H	13	(3, 4, 2, 4)	4.75	113.10
A2	9 : 30	(4 9 14 16 20)	2	12—11—13—H	10	(3, 5, 2)	4.50	121.62
A3	10 : 00	(3 12 17 24 27 33)	3	6—5—3—15—H	11	(5, 2, 1, 3)	5.50	115.79
A1	10 : 00	(8 11 23 26 28 29)	4	10—9—16—H	12	(4, 3, 5)	4.00	119.40
A4	10 : 30	(7 18 21 31)	5	7—8—15—H	9	(3, 4, 2)	5.00	120.77
A3	11 : 00	(13 19 25 30 32)	6	17—11—18—H	12	(5, 2, 5)	5.25	117.45

注:H 代表城际轨道交通换乘站。

3.2 算例求解

根据所设计的混合模拟退火算法,结合已知约束条件,输入原始数据,运用 MATLAB 进行程序编写,随机运行求解 10 次,得出目标函数最优近似解。计算结果如表 2 所示。

表 2 模拟退火算法计算结果

Table 2 Results of simulated annealing algorithm			
计算次序	$K/\text{辆}$	$Z/\text{元}$	计算时间/s
1	4	118.3	1.70
2	4	120.9	1.70
3	5	115.7	1.70
4	5	118.2	1.65
5	5	114.7	1.70
6	5	118.1	1.70
7	4	118.6	1.70
8	4	114.8	1.65
9	4	119.5	1.70
10	4	113.5	1.65
平均	5	117.2	1.69

从表 2 可以看出,在对线路优化模型运用混合模拟退火算法进行 10 次求解的过程中,所得到的解的质量都相对较高,大幅度提升了解的性能,其中,平均服务车辆数为 5 辆,目标函数的平均值为 117.2。并且在第 10 次的随机求解过程中,所得到的解的质量相对最优,其对应的 6 条路线方案见表 3。根据表 2 的计算结果以及问题中要求的乘客期望到达时间约束,得到车辆运行线路最优近似解如表 3 所示。

运行线路如图 2。

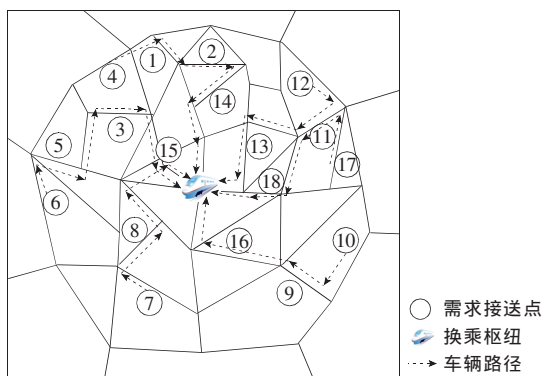


图 2 车辆行驶路线图

Fig. 2 Feeder bus routing

3.3 结果分析

车辆 A1 分别进行了第一、第四趟次服务, 车辆 A3 分别进行了第三、第六趟次服务, 其余 2 辆公交只进行了一次接驳服务, 并且还留有 1 辆预备车辆以应对突发情况。其次, 在满足预排订单都需要服务的基础上, 算例中的 8 号, 11 号, 17 号, 21 号, 22 号订单预约时间在其预约轨道发车时间前 2 h 内为插入订单, 也都后续安排到接驳车辆上, 使得订单需求都得到了满足, 有效地保证了定制化接驳公交系统的服务质量。另一方面, 5 条线路的平均绕行距离都较小, 且绕行比例都满足绕行限制, 避免了资源的浪费, 体现了定制化接驳公交的便捷性和公平性。

4 结论

1) 作者研究了考虑轨道交通到站时间的协调线路优化模型, 以订单一车辆匹配约束、车辆路径有效性约束、定制服务优先约束、接驳车辆额定容量约束、时间窗约束等为约束条件, 建立了在保证满足最大定制化乘客出行需求的基础上, 最小化接驳车辆运营成本和乘客时间成本为优化目标的协调线路优化模型, 有效保证运营者需求和乘客需求得到均衡, 综合考虑运营企业与乘客的双方利益, 使其得到均衡。

2) 针对提出的定制化接驳公交协调路线优化模型构建特点, 设计了混合模拟退火算法对其进行求解。该算法将模拟退火算法与 2-opt 算法有机结合起来, 通过对模拟退火算法的每个温度下

生成的当前最优路径进行 2-opt 算法修正, 有效地解决了求解时间长的难题, 使该模型能够适用于实际运营环境。

为了便于研究, 作者针对性地研究了“多对一”模式的接驳运行线路优化, 即多个停靠接送点面向单个轨道交通站点的情况, 但没有对其他服务模式进行分析。在今后的研究中, 需要进一步研究“多对多”的接驳模式, 即多个停靠接送点面向多个轨道交通换乘站点。

〔参考文献〕

- [1] Alshalafah B W. Planning design and scheduling of flex route transit service[D]. Toronto: University of Toronto, 2009.
- [2] Lownes N E, Machemehl R B. Exact and heuristic methods for public transit circular design[J]. Transport Res, 2010, 44(2): 309-318.
- [3] Almasi Mohammad, Hadi Sadollah, Ali Mounes, et al. Optimization of a transit services model with a feeder bus and rail system using metaheuristic algorithms[J]. Journal of Computing in Civil Engineering, 2015, 29(6): 401-409.
- [4] 吕慎, 田锋, 莫一魁. 轨道交通枢纽地铁换乘接驳公交乘客平均候车时间研究[J]. 公路交通科技, 2014, 31(12): 92-97.
LV Shen, TIAN Feng, MO Yi-kui. Average waiting time of passengers transferring from subway to feeder bus at rail transit hub[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2014, 31(12): 92-97.
- [5] 刘华胜, 赵淑芝, 朱永刚, 等. 基于有效路径的轨道交通接驳线路设计模型[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2015, 45(2): 371-378.
LIU Hua-Sheng, ZHAO Shu-zhi, ZHU Yong-gang, et al. Feeder bus network design model based on effective path[J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2015, 45(2): 371-378.
- [6] 丁帅. 灵活型公交接驳系统运行线路优化研究[D]. 济南: 山东大学, 2016.
DING Shuai. The route optimization research of flexible feeder transit system[D]. Jinan: Shandong University, 2016.

(下转至第 82 页)

- [11] 中华人民共和国交通运输部.JTG B01—2014,公路工程技术标准[S].北京:人民交通出版社,2015.
Ministry of Transport of the People's Republic of China.JTG B01—2014,technical standard of highway engineering[S].Beijing:China Communications Press,2015.
- [12] 岑达希.基于主动转向与差动制动的汽车防侧翻控制研究[D].杭州:浙江大学,2011.
CEN Da-xi.Research on anti rollover control of automobile based on active steering and differential braking[D].Hangzhou: Zhejiang University,2011.
- [13] 解少博,阿比旦,魏朗.公路运行车速预测模型对比分析[J].长安大学学报:自然科学版,2013,33(5):81-85.
XIE Shao-bo, A Bidan, WEI Lang.Comparison and analysis of prediction model for highway speed[J].Journal of Chang'an University:Natural Science Edition,2013,33(5):81-85.
- [14] 中华人民共和国交通部.JTG D20—2006,公路路线设计规范[S].北京:人民交通出版社,2006.
Ministry of Communications of the People's Republic of China.JTG D20—2006,design specification for highway alignment[s].Beijing:China Communications Press,2006.
- [15] Lee Y H,Deng W W.Speed control method for vehicle approaching and traveling on a curve[P].U S; US7400963B2,2008-07-28.
- [16] Lee Y HAutomatic speed control system for vehicle Approaching and driving on a curve[A].International Mechanical Engineering Congress and Exposition[C].New York:ASME,2008:345-353.

(上接第 54 页)

- [7] 符卓,刘文,邱萌.带软时间窗的需求依订单拆分车辆路径问题及其禁忌搜索算法[J].中国管理科学,2017,25(5):78-86.
FU Zhuo,LIU Wen,QIU Meng.A tabu search algorithm for the vehicle routing problem with soft time windows and split deliveries by order[J].Chinese Journal of Management Science,2017,25(5):78-86.
- [8] 郑玉蒙.区间多目标规划问题的优化方法及应用研究[D].保定:河北大学,2015.
ZHENG Yu-meng.The optimization method and application research of interval multi-objective programming problems[D].Baoding:Hebei University,2015.
- [9] 邱丰,李文权,沈金星.可变线路式公交的两阶段车辆调度模型[J].东南大学学报:自然科学版,2014,44(5):1078-1084.
QIU Feng,LI Wen-quan,SHEN Jin-xing.Two-stage model for flex-route transit scheduling[J].Journal of Southeast University:Natural Science Edition,2014,44(5):1078-1084.
- [10] 林叶倩,李文权,邱丰,等.可变线路式公交车调度优化模型[J].交通信息与安全,2012,30(5):14-18.
LIN Ye-qian,LI Wen-quan,QIU Feng,et al.An optimal model for flex-route transit scheduling problem[J].Journal of Transport Information and Safety,2012,30(5):14-18.
- [11] 冯玉蓉.模拟退火算法的研究及其应用[D].昆明:昆明理工大学,2005.
FENG Yu-rong.Research and application of simulated annealing algorithm[D].Kunming:Kunming University of Science and Technology,2005.
- [12] 王斌,尚新春,李海峰.解决车辆路径问题的混合模拟退火算法[J].计算机工程与设计,2009,30(3):651-653.
WANG Bin,SHANG Xin-chun,LI Hai-feng.Hybrid simulated annealing algorithm for solving vehicle routing problem[J].Computer Engineering and Design,2009,30(3):651-653.