

公共自行车系统规划方法研究

潘媛媛¹, 窦万峰^{1,2}

(1.南京师范大学计算机科学与技术学院,江苏 南京 210023)

(2.江苏省信息安全与保密工程研究中心,江苏 南京 210023)

[摘要] 本文提出基于两阶段规划的公共自行车租赁点选址规划方法,该方法将规划区域划分成若干子区域来求解系统需装配的自行车规模及租赁点的布设位置. 第一阶段通过分析子区域间自行车流量关系确定系统公共自行车总规模以及获得系统运营初期的车辆调度信息. 第二阶段基于需求吸引力,以骑行距离为优化目标确定租赁点的位置. 规划方法旨在使系统能够充分考虑用户需求、系统建设成本及车辆利用率等问题. 对本文所提出模型的算例应用结果显示,该方法能很好地解决公共自行车租赁点位置规划及自行车规模规划.

[关键词] 公共自行车系统,选址规划,优化,两阶段规划

[中图分类号] U491.1 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1672-1292(2017)01-0066-06

The Planning Method of Public Bicycle System

Pan Yuanyuan¹, Dou Wangfeng^{1,2}

(1.School of Computer Science and Technology, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

(2.Jiangsu Research Center of Information Security and Confidential Engineering, Nanjing 210023, China)

Abstract: In this paper, the research work we conduct proposes an optimization method to determine the required bike fleet size and the location of shared biking stations based on the two-phase planning through dividing planning area into several sub areas. In the first stage, it determines the biking fleet size of the system and the information of bikes distributed after implementation of the system according to the analysis of flow relationship. In the second phase, it establishes the location of the rental stations based on the optimal goal of the demand attraction and riding distance. The mathematical model attempts to optimize a bike-sharing system by fully considering the user demands, construction costs and utilization rate of bikes. The results of example application show that this method can be a good solution for planning of rental locations and bicycle fleet size.

Key words: public bicycle system, location planning, optimization, two stages of planning

公共自行车系统(public bicycle system, PBS)因其清洁、安全、低成本等特点被国内外很多城市采用. 公共自行车的实施对减少汽车的使用量具有积极作用,是国际公认的绿色出行方式,在建设发展低碳型交通体系中起着重要作用. 自行车因其机动灵活的特性适用于短距离出行,接驳城市轨道交通,解决“最后一公里”问题,有利于城市客运交通结构的优化. 公共自行车系统每隔一段距离设置一个公共租赁点,每个租赁点配备 20-60 辆统一规格的自行车,用户可在一个租赁点借车,进行相应的短途骑行,使用后归还到相异或相同的租赁点^[1-2]. 公共自行车系统规划处于公共自行车系统项目实施的前期,规划的内容包括站点自行车初始配置量和站点的建设位置. 租赁点初始车辆配置量直接影响系统运营部门对系统投入的车辆购买成本. 同时,租赁点建设成本较高而预算有限,若规划失当,将会影响整个系统的实施,且重新改造或移动站点会带来较大的经济损失. 因此,如何在有限预算下提高公共自行车系统租赁点布局的服务效率显得尤为重要.

公共自行车租赁点主要满足灵活机动的短距离出行需求,为潜在需求用户提供方便可靠的公共交通服务. 规划方法一般采用设施选址优化模型,即模型最后求解的变量表示租赁点布设位置、租赁点自行车投放

收稿日期:2016-09-26.

基金项目:国家自然科学基金(41171298).

通讯联系人:窦万峰,博士,教授,研究方向:软件工程、并行计算、公共自行车系统. E-mail:douwanfeng@njnu.edu.cn

规模^[3-5]. 优化考虑的因素主要包括距离成本、系统需求覆盖率、预算投资约束等.

文献[6]以租赁点建设费用最小、用户走行成本最小和系统覆盖的总需求最大为优化目标,选出切合实际的约束条件,建立多目标优化模型. 该模型可同时求解租赁点的数量和位置,以及每个租赁点的容量. 文献[7]认为系统不可能完全做到满足用户的借车需求. 租赁点设置过少或站点配备的自行车数量不恰当,会导致因用户使用不方便而选择其他交通方式,在此情况下定义惩罚值来代表被系统因站点设置不合理拒绝的借车需求. 2011年, Lin 提出将自行车的库存量考虑到目标函数中^[8].

文献[9]认为公共交通的实施(特别是公共自行车项目)十分复杂,因为它总是受制于预算投入,而设计和实施公共自行车系统最主要的关注点却是使系统利益最大化.

文献[10]研究发现,地形、土地利用、附近的交通网络和风景点分布对公共自行车系统的分配有显著影响,并专门围绕旅游景点规划租赁点,提出自行车总骑行距离和站点覆盖重叠率最小化两项指标,以基集群的概念和启发式贪婪的想法优化模型. 文献[11]针对特定地铁线路周围的地区展开自行车租赁点优化,该方法只考虑在地铁客流高峰时期对包括地铁站、周围商业区、居民区在内的自行车候选点的优化,没有考虑全天系统的运行情况.

除了构建优化模型来解决公共自行车选址规划问题,一些学者还提出了其他方法. 文献[12]提出了基于 GIS 技术来估计规划区潜在出行需求及需求的空间分布情况. 文献[13]首先在基于各交通小区 OD 数据的基础上,建立基于交通方式选择的 LOGIT 模型对租赁点的使用需求进行预测,然后以使用者出行时间最小、运营成本最小和环境效益最大为目标建立平均站间距模型,以平均站间距为指标,提出方格法和同心圆法. 方格法先确定一个中心点,然后以平均站间距为间距画方格并在每个方格内布设一个租赁点. 同心圆法是以一个中心点为圆心,以平均站间距为半径画同心圆,同时描述了如何依次确定其他租赁点的位置.

上述文献在对指定区域规划公共自行车系统时,将整个区域作为一个整体构建优化模型,将系统的自行车总规模与租赁点位置规划放在同一个阶段求解,即在同一个模型中既解决租赁点位置,也优化自行车的总规模,其中涉及到 NP 问题求解,求解过程较复杂. 此外,众多文献并未预先考虑需求在不同租赁点不均匀分布的特性会导致系统在不同时间段可能会出现有些站点自行车满载或空载的情况,未考虑车辆利用率. 本文首先将规划区域划分为多个子区域,减小求解规模. 同时,将用户需求按时间段划分,求出相应时段内的调度量,并首次提出让用户自主参与到调度的过程中来. 规划通过两个阶段进行:第一阶段,根据区域间公共自行车的流动关系,获得系统在每个子区域内的自行车规模. 第二阶段,考虑租赁点布设影响因素,确定租赁点最终位置,并结合第一阶段获得的车辆规模为每个站点配备公共自行车.

1 优化方法

如图 1 所示,在公共自行车系统中,租赁候选点分布在规划区域的不同位置,每个租赁点为多个需求点提供自行车服务. 在给某区域规划自行车系统时,将规划地区按用地性质、交通路网结构或面积等划分成不同的子区域,区域间、区域内均存在自行车流的流动.

1.1 第一阶段:自行车规模优化

因为任意时间段、任意子区域的借还车需求存在不均匀分布的特性,当下一个时间段的需求到来时,区域内租赁点拥有的自行车在线数可能不满足借还需求,导致部分站点处于自行车空载的情况,无法满足用户的需求而降低了用户对系统的使用信心,也降低了系统的运营效率. 在有限投资条件下,通过大量购买车辆来满足各个时间段的需求是不实际的. 因此,本文认为,应采用调度的方式,即在系统规划初期就预先将调度其他站点的空闲车辆来补充需求的方法考虑到租赁点设施选址规划中. 而纯粹依靠运营部门雇佣人工来调度车辆将大大增加运营

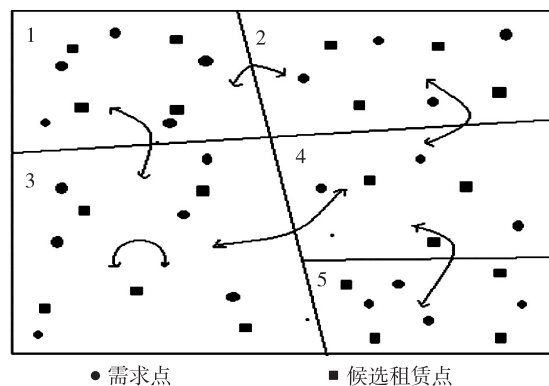


图 1 区域划分与流量关系

Fig. 1 Region division and flow relation

成本. 城市公共自行车系统旨在公益性运营, 对行程在短时间内或短路程内的用户免费, 因此可对用户采取奖励措施, 让用户主动积极参与到租赁点之间车辆的动态借还平衡的实现过程中, 即用户在使用过程中提前获知租赁点空满载情况, 激励用户主动就近选择处于满载状态的租赁点借车, 或主动就近选择空载状态的租赁点还车. 通过这种依靠激励用户主动调度自行车的方法, 大大降低了运营成本, 同时也提高了系统自行车的使用率.

对某一子区域而言, 既可以从该区域借出自行车骑行到其他区域, 也接收从其他子区域骑行到此归还的自行车. 因此, 子区域既具有借车功能, 又有还车功能. 在求解上可将每个子区域抽象处理成两个功能模块: 借车模块 (Lend Part) 和接收模块 (Receive Part). 如此, 整个自行车系统可被抽象为功能模块的集合: 所有借车块组成子集 N_1 , 只负责借出车辆; 所有还车块组成子集 N_2 , 只负责归还车辆. 在时间段 t 内从借车块 i 到接收块 j 的路径上可分配的车辆数表示为 $LB_{ij}(t)$. 设置变量 $MB_{ji}(t)$ 表示在时间段 t 内, 从接收块 j 通过用户主动能够调度到借车块 i 的车辆数; $UB_{ij}(t)$ 表示在时间段 t 内从借车块 i 开始到接收块 j 结束的路径上未能满足需求的车辆数; $SB_i(t)$ 为时间段 t 开始时刻, 借车块 i 拥有的在线自行车数; $RB_j(t)$ 为时间段 t 开始时刻, 接收块 j 拥有的在线自行车数. 图 2 说明了含有两个子区域的公共自行车系统被抽象成四个功能块的含义及各功能块之间在空间-时间上的流量关系.

基于以上对系统的抽象处理, 建立以激励成本、未满足用户需求带来的损失成本、系统购买自行车的总成本最小为目标的优化模型:

$$\text{Min } Z_1 = a \sum_{j \in N_2} \sum_{i \in N_1} \sum_{t \in T} MB_{ji}(t) + b \sum_{i \in N_1} \sum_{j \in N_2} \sum_{t \in T} UB_{ij}(t) + c \sum_{i \in N_1} SB_i(1); \quad (1)$$

s.t.

$$SB_i(t) = SB_i(t-1) - \sum_{j \in N_2} LB_{ij}(t-1) + \sum_{i \in N_1} MB_{ji}(t-1) \quad \forall i, t; \quad (2)$$

$$RB_j(t) = RB_j(t-1) - \sum_{i \in N_1} MB_{ji}(t-1) + \sum_{i \in N_1} LB_{ij}(t) \quad \forall j, t; \quad (3)$$

$$UB_{ij}(t) = DB_{ij}(t) - LB_{ij}(t) \quad \forall i, j, t \quad i \neq j; \quad (4)$$

$$LB_{ij}(t) \leq DB_{ij}(t) \quad \forall i, j, t \quad i \neq j; \quad (5)$$

$$SB_i(t) \geq \sum_{j \in N_2} LB_{ij}(t) \quad \forall i, t; \quad (6)$$

$$RB_j(t) \geq \sum_{i \in N_1} MB_{ji}(t) \quad \forall j, t; \quad (7)$$

$$LB_{ij}(t), MB_{ji}(t), UB_{ij}(t), SB_i(t), RB_j(t) \geq 0 \quad \forall i, j, t; \quad (8)$$

式中, $MB_{ji}(t)$ 表示通过激励措施让用户主动在处于空载或满载区域借还自行车的车辆数目. a, b, c 分别为奖励用户主动调度车辆的单位成本、单位未满足需求损失成本、车辆购买单位成本; $DB_{ij}(t)$ 为时间段 t 内, 从借车块 i 开始到接收块 j 结束的路线上的需求量. 约束条件 (2) 保证借车行为在任意相邻时间段的平衡关系, 对于每一个借车块, 任意时间段的初始自行车量应等于前一时间段初始量减去前一时段因用户租借行为而自然流动出去的车辆数, 再加上前一时段用户从其他区域调度过来的车辆数. 相应地, 约束条件 (3) 是保证车辆调度行为在任意相邻时间段之间的平衡关系. 式 (4) 保证未满足需求的车辆数在任意相邻时间段之间的平衡关系. 式 (5) - (7) 是对自行车流动路径上车量数的约束; 式 (8) 赋予对各个决策变量的整数约束.

通过上述模型可获得每个功能块在任意时间段初始时刻的车辆数 $SB_i(t)$, 其中, $SB_i(1)$ 实际上即为每

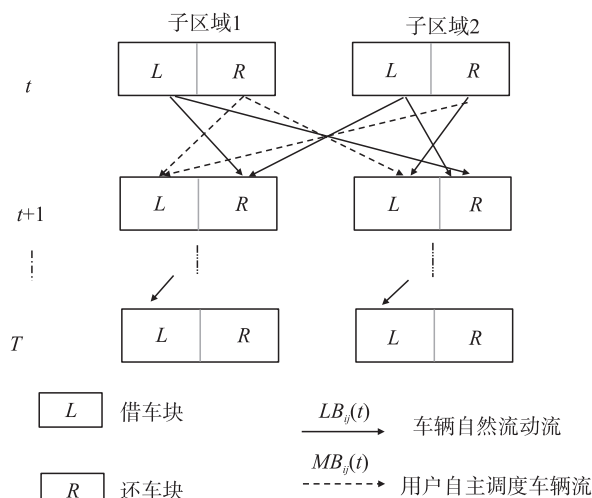


图 2 含有两个子区域系统的功能块之间的自行车流动关系

Fig. 2 Illustration of Lend part and Receive part for system with two sub-zone

个子区域 i 应配备的自行车数量. 因此,系统自行车总规模应为所有子区域自行车数量之和:

$$N_{\text{bike}} = \sum_{i \in N_1} SB_i(1). \quad (9)$$

系统内需要依靠用户主动调度的车辆总数为:

$$N_{\text{schedu}} = \sum_{i \in N_1} \sum_{j \in N_2} \sum_{t \in T} MB_{ij}(t). \quad (10)$$

1.2 第二阶段:自行车租赁点位置规划

子区域空间内影响租赁点布局优化的因素主要包括用户到租赁点的步行距离、站点到站点的骑行距离、站点需求吸引力以及租赁点用地建设的固定投资成本等. 用户步行到附近的租赁点租借自行车,完成出行需求到达另一个租赁点,若步行距离或骑行距离超过容忍值,用户就会拒绝使用公共自行车而选择其他交通工具替代. 为保证系统运营的高效性,希望在有限的资源下满足更多人群的使用,如将租赁点布置在能够吸引人流集中的位置,如公交站点、地铁站点等. 子区域内所有租赁点分配的自行车总和不能超过第一阶段规划的数量,并希望具有高吸引力权重的租赁点获得更多的自行车配备.

租赁点的吸引力权重可通过下式计算:

$$f_{ni} = \frac{\sum_{j \in N_{ir}} Q_{nj}}{\sum_{j \in N} Q_{nj}}, \quad (11)$$

式中, f_{ni} 为子区域 n 内候选点 i 的吸引力权重; N_{ir} 是候选点在服务半径 r 内能够覆盖到的需求点的集合; N 为子区域 n 内所有候选点的集合; Q 为需求点 j 的潜在借车需求量.

此外,公共自行车的使用量受温度、季节和城市旅游淡旺季等因素的影响,比如温和舒适的春秋季节人们更愿意以自行车出行,而恶劣气候频发的夏冬季则整体使用频率降低. 规划公共自行车系统时需考虑这些因素的影响,避免资源浪费. 然而,季节对自行车使用量的影响关系不易区分,本文将天气季节状况处理成高温、正常、低温以获取每个时间段路径上的借还需求量,则每一个时间段的规划需求量可表示为:

$$DB_{ij}(t) = \alpha HDB_{ij}(t) + \beta NDB_{ij}(t) + \delta LDB_{ij}(t), \quad (12)$$

式中, HDB 、 NDB 、 LDB 分别表示高温、正常、低温气候下的实际需求量; α 、 β 、 δ 为 3 种温度下实际需求占总体规划需求量的权重,可通过实地调查、统计分析得到数值.

综上,在子区域内规划租赁点位置时,需要考虑租赁点固定建设成本、租赁点需求吸引力及租赁点到租赁点的骑行总距离. 基于上述因素考虑,建立以下优化模型:

$$\text{Min } Z_2 = \alpha_1 \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} y_i f_{ni} + \alpha_2 \frac{1}{\sum_{i \in N} \sum_{j \in N} y_j y_i d_{ij} \delta_{ij}}, \quad (13)$$

s.t.

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{若 } d_{\min} = < d_{ij} <= d_{\max} \\ 0, & \text{否则} \end{cases} \quad \forall i \in N, j \in N; \quad (14)$$

$$\sum_{i \in I_n} y_{ni} B_{ni} = Q_n \quad \forall n \in M; \quad (15)$$

$$\sum_{i \in N} y_i C_i \leq p; \quad (16)$$

$$y_i = \begin{cases} 1, & \text{若在 } i \text{ 点建设租赁点} \\ 0, & \text{否则} \end{cases} \quad \forall i \in N; \quad (17)$$

式中, α_1 、 α_2 为相对权重; BS_{ni} 为租赁点 i 应分配的自行车数量; Q_n 为子区域 n 规划的自行车总量,由第一阶段获得; d_{ij} 为候选点 i 到需求点 j 的骑行距离长度; C_i 为候选点 i 用地建设的固定成本; f_{ni} 为区域 n 内,候选点 i 的吸引力权重. 由式(11)可得,模型的优化目标是在固定预算投资下使系统总需求吸引力最大,同时使骑行距离较小. 约束条件(14)约束租赁点到租赁点的骑行距离不能超过容忍值. 式(15)保证每个区域内应配备的自行车数量应满足第一阶段规划得到的自行车配备量. 这里的自行车配备量综合考虑了天气温度的影响,通过式(12)获得各时段规划需求量;式(16)为固定建设成本预算;式(17)为决策变量的 0-1 约束.

2 实证分析

本文选取具有 12 个候选公共自行车租赁点的路网,按位置相邻与否划分到 A、B、C、D 4 个子区域中. 如图 3 所示,圆圈内的数字表示候选租赁点的编号,圆圈的大小表示该候选点的吸引力权重. 利用 Matlab 产生各区域之间路径上的需求量和各租赁点之间的路径长度. 将 4 个子区域抽象成 4 个借车模块、4 个车辆接收模块,并将区域间的需求量转换为借车模块与接收模块之间路径上的需求流动量. 假设初期规划考虑通过激励措施让用户主动参与调动的量在实际操作中都能满足. 设置车辆购买单位成本为 500,调度成本为 20,损失单位成本为 100.

通过本文第一阶段优化模型,获得车辆规模优化结果如表 1 所示. 括号内的数值为该子区域优化的公共自行车规模(辆). 算例结果显示对大部分路径上的需求基本上达到满足. 该表可以为系统运营管理人员提供详细的信息,包括调度时间、调往区域及调度量. 若依靠用户无法主动调度达到实际的调度量,管理人员可适当采取相应措施,如提高车辆单位激励成本或加入人工调度方式. 以各项成本(车辆购买成本、调度成本、损失成本)为优化目标下的总自行车规模为 A 区+B 区+C 区+D 区自行车总和; $116+163+65+149=493$ 辆.

表 1 第一阶段:系统公共自行车规模优化结果
Table 1 The optimized number of bikes for the public bike system

子区域	调往区域及调度量		调度时段	未满足需求量
A 区 (116)	A 区			
	B 区	32	1	
	C 区	40	4	11
	D 区	34	3	
B 区 (163)	A 区	36	5	
	C 区	21	3	
	D 区			12
C 区 (65)	A 区			18
	B 区	20	1	
	D 区	45		7
D 区 (149)	A 区	37	4	9
	B 区	43	1	
	C 区			5

图 4 展示了通过第二阶段规划获得租赁点位置的最优布局,最优点上的加粗数值为该点布置车辆数. 在有限资金预算投入条件下,从 16 个候选点中选出 12 个最优布置点. 最优点基本覆盖了吸引力权重较大的点,且分布较集中,符合模型的优化目标. 同时,在同一子区域中,吸引力较大的最优点分得较多的自行车数量.

以往文献提出的方法将公共自行车规模规划与租赁点选址规划放在同一模型中求解,属于单阶段规划. 在本案例下将本文方法与以往文献提出的单阶段方法对公共自行车系统规划结果进行比较,结果如表 2 所示. 其中,车辆利用率=总辆/总需求量. 本文两阶段规划方法获得的自行车利用率较高,

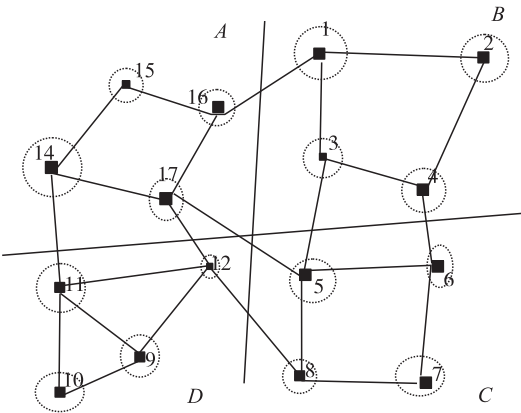


图 3 算例路网与各点吸引力权重
Fig. 3 Network of case study and the distribution of demands on the point

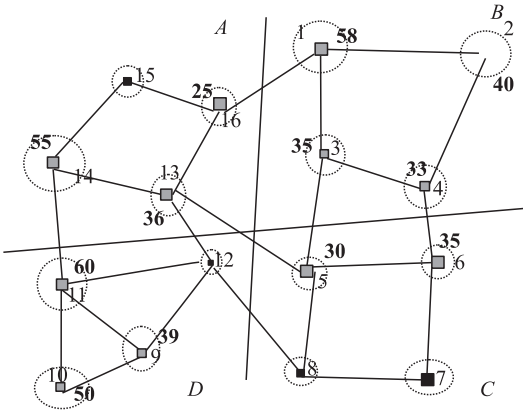


图 4 第二阶段规划:租赁点布设优化结果
Fig. 4 The optimization results of location planning

有以下两个原因:一是通过用激励的方式激励用户主动参与车辆调度,从而提高了车辆的周转率;二是由于激励成本远远小于人工调度成本,在相同的车辆购买成本下,本文方法能够获得更多的车辆来参与到满足需求的过程中. 单阶段规划与双阶段规划都是离散模型,需求覆盖程度基本相似.

通过实证分析,验证了基于两阶段调度公共自行车系统规划方法的有效性,可为管理人员在系统运营初期提供详细的车辆信息,同时提高车辆的利用率.

3 结语

本文基于两阶段规划,对规划区域和需求进行合理划分的基础上,提出了公共自行车系统选址规划的方法:第一阶段通过将子区域按借还功能划分为借车块、还车块,从而获得系统总自行车规模,同时获得车辆调度有关的详细信息;第二阶段,针对每个小区域确定最终租赁点的优化位置. 本文通过分析各区域间的流量关系,在综合考虑各成本情况下优化系统所需要的车辆. 同时,首次提出投入奖励成本,激励用户主动参与到车辆调度的过程,大大减小了车辆调度成本.

[参考文献] (References)

[1] ELLIOT F,魏贺. 公共自行车近期文献综述[J]. 城市交通,2015,13(6):80-94.
ELLIOT F,WEI H. Bike-share:a review of recent literature[J]. Urban transport of China,2015,13(6):80-94.(in Chinese)

[2] 韩慧敏,张宇,乔伟. 里昂公共自行车系统[J]. 城市交通,2009,7(4):13-20.
HAN H M,ZHANG Y,QIAO W. Bike sharing system in lyon[J]. Urban transport of China,2009,7(4):13-20.(in Chinese)

[3] DASKIN M S. Network and discrete location analysis[J]. Journal of the operational research society,1995,48(V):763-763.

[4] DASKIN M S. What you should know about location modeling[J]. Naval research logistics,2008,55(4):283-294.

[5] REVELLE C S,EISELT H A. Location analysis:a synthesis and survey[J]. European journal of operational research,2005,165(1):1-19.

[6] 罗海星. 城市公共自行车租赁站点选址方法研究[D]. 北京:北京交通大学,2013.
LUO H X. Study on locating and planning of urban public bike rental station[D]. Beijing:Beijing Jiaotong University,2013.(in Chinese)

[7] LIN J R,YANG T H. Strategic design of public bicycle sharing systems with service level constraints[J]. Transportation research part E logistics and transportation review,2011,47(2):284-294.(in Chinese)

[8] LIN J R,YANG T H,CHANG Y C. A hub location inventory model for bicycle sharing system design:formulation and solution[J]. Computers and industrial engineering,2013,65(1):77-86.

[9] INES F,ANABELA R. Bike-sharing stations:a maximal covering location approach[J]. Transportation research part A,2015,82:216-227.

[10] GUO T Y. Allocation optimization of bicycle-sharing stations at scenic spots[J]. Journal of central south university,2014,21(8):3 396-3 403.

[11] CHEN J,CHEN X,JIANG H,et al. Determining the optimal layout design for public bicycle system within the attractive scope of a metro station[J]. Mathematical problems in engineering,2015(10):1-8.

[12] GARCIA P J C,GUTIERREZ J,LATORRE M. Optimizing the location of stations in bike-sharing programs:a gis approach[J]. Applied geography,2012,35(s 1/2):235-246.

[13] 冯媛媛. 公共自行车租赁点布局方法研究[D]. 西安:长安大学,2014.
FENG Y Y. Study on layout method of public bicycle rental station[D]. Xi'an:Chang'an University,2014.(in Chinese)

[责任编辑:严海琳]