

基于公交分担率的城市客运交通枢纽选址优化

周雪梅, 狄 迪, 吴 迪, 杨晓光

(同济大学 交通运输工程学院, 上海 201804)

摘要: 在用户均衡理论的基础上, 首先研究超级网络条件下公交车与小汽车交通流量的相互影响, 并以公交分担率最大为目标, 建立在不同的枢纽选址方案下城市交通网络中公交车流量和小汽车流量分配最优化模型. 进而, 以公交车与小汽车的出行成本、枢纽建设的土地成本之和作为总成本, 以总成本最小为优化目标, 建立城市交通枢纽选址优化的双层规划模型. 最后, 运用案例验证模型, 并提出枢纽选址优化的相关建议.

关键词: 公交分担率; 客运交通枢纽; 选址优化

中图分类号: U 491

文献标识码: A

Urban Passenger Transportation Terminal Location Based on Bus-sharing Ratio

ZHOU Xuemei, DI Di, WU Di, YANG Xiaoguang

(College of Transportation Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: Based on user equilibrium theory, a study was made of the interaction between the traffic flow of cars and buses in super-network, the traffic flows of the two transportation modes were optimized to maximize the bus-sharing ratio. Then, based on the assumption that the total travel cost in urban transportation network consisting of the travel cost of cars and the buses, two-tier location model was established to optimize the total travel cost and land cost. Finally, a case study was made of the two-tier location model and then gives some useful suggestions on optimization location of transportation terminal.

Key words: bus-sharing ratio; passenger transportation terminal; optimization location

交通系统有着“牵一发而动全身”的影响, 对交通体系功能的完善及城市的发展起着极为重要的推动作用. 交通枢纽的合理布局不仅能节约交通运输费用, 对推动城市公交优先发展也起着重要的促进作用.

当前, 交通枢纽选址问题是研究的热点, 国内外对其进行了很多研究. 在国外, 交通枢纽选址属于设施选址问题. Klose A 和 Drexler A 对设施选址问题进行深入整理研究, 将问题划分为若干类, 主要针对线性选址模型、基于网络的选址模型、混合整数规划模型以及应用进行了总结^[1]. Esnaf 利用模糊聚类分析法对不同地理位置进行分析, 选取其聚类分析的中心作为设施备选址点, 然后运用重心模型, 找出运输成本最优的点作为选址点^[2]. Harkness J 和 ReVelle C 研究了生产递增成本的设施选址模型^[3]. Racunica 和 Wynter 对运输枢纽的选址进行了研究, 并考虑了因经营规模扩大而得到的经济节约因素^[4]. 在国内, 张三省分别建立了单站离散型选址模型、交替选址—分配模型以及考虑定性因素的枢纽选址模型, 其共性是从预先确定的若干备选小区, 按照满足各小区到枢纽之间的交通费用最小以及枢纽建设费用最小的原则, 选取总费用最小作为枢纽选址点^[5]; 王来军等建立了一类容量受限制设施定位问题的数学模型, 该模型能够反映实际情况, 并利用遗传算法给出了求解步骤^[6]; 刘灿齐提出了基于交通均衡分配的交通枢纽选址模型^[7]. 可以看出, 枢纽选址规划主要采用的方法有重心法、微分法、交通运输的效益成本分析法等; 随着运筹学在交通领域的应用, 还出现了线性规划、整数规划、混合整数规划等枢纽布局优化方法.

随着城市经济发展与交通发展联系的日益紧密以及枢纽在城市交通体系的重要作用, 交通枢纽选址对城市经济的发展越来越重要. 笔者在宏、微观两

交通枢纽是城市交通系统的重要节点, 对城市

收稿日期: 2010-06-13

基金项目: 国家自然科学基金(60974093); 国家“九七三”重点基础研究发展计划(2006CB705500)

第一作者: 周雪梅(1968—), 女, 副教授, 工学博士, 主要研究方向为交通运输规划与管理. E-mail: zxm1007@126.com

通讯作者: 狄 迪(1985—), 男, 工学硕士, 主要研究方向为交通运输规划与管理. E-mail: diditjt@gmail.com

个层面上考虑城市内交通枢纽的选址优化特点,并综合考虑两个层面的相互影响,建立城市交通枢纽选址优化模型.

1 客运交通枢纽选址特点分析

合理的城市客运交通枢纽选址能促进公交线路的优化及交通方式间换乘效率的提高,从而提高公共交通服务水平,使更多的居民选择公交出行方式,最终提高公交出行分担率.同时,与小汽车(主要由私家车和单位用车组成,且均换算成标准车,后不赘述)出行相比,公共交通在人均占用道路资源和居民出行成本方面相对较低.

其次,不同的交通枢纽选择位置,对小汽车的出行也产生影响,即小汽车出行路径选择的变化,导致道路交通量变化.不同出行路径具有不同的出行成本,导致城市交通总出行成本(假设其主要由小汽车与公交车出行成本两部分构成)的不同,即合理的交通枢纽选址能降低城市交通总出行成本.

再次,当枢纽建设资金有限时,交通枢纽选址不仅要满足公交分担率较高、交通总出行成本最优的目标,还要考虑交通枢纽建设的土地成本.随着城市的不断发展,土地已成为城市的稀缺资源,成本不断提高.城市交通枢纽作为城市交通的中转站,往往需要开发和利用较多的土地,因此,在进行城市枢纽的选址时,不得不考虑土地成本.土地成本由城市及各区域的发展水平所决定,与城市区域人口、GDP产值、城市化水平以及第三产业比重等因素相关.

综上所述,城市交通枢纽选址的目标,一是城市公交分担率最大化,推动城市公共交通的优先发展;二是公交车与小汽车交通量在城市交通网络上的均衡分配,缓解道路交通拥挤,减少运输费用,降低城市交通总出行成本;三是枢纽建设土地成本最低.

2 模型建立

下面建立双层数学规划模型描述上述问题.上层模型目标为城市交通网络出行总成本和枢纽建设土地成本最小,下层模型目标为在不同枢纽选址、城市交通网络均衡分配的条件下,公交车和小汽车流量分配最优化,公交分担率最大化.

2.1 上层模型建立

上层模型主要考虑城市交通出行总成本以及城市交通枢纽建设的土地成本两个因素.

首先,考虑枢纽选址对城市交通出行总成本的影响,以城市交通出行总成本 G 最小为目标函数,建立以下模型:

$$\min G = \lambda \left[\sum_{a=1}^n y_{na} t_a(x_{na}) + \sum_{b=1}^n \hat{y}_{nb} \hat{t}_b(\hat{x}_{nb}) \right] \quad (1)$$

式中: $\hat{y}_b = \hat{d}x_b/m$; $y_a = \hat{d}x_a$; \hat{x}_b 为研究范围内各路段公交车流量; x_a 为各路段小汽车流量; a 和 b 分别为小汽车网络和公交网络的某一路段; d 为单位标准车额定载客人数; m 为单位公交车转换为标准车的折减系数; y_{na} 为小汽车网络的各路段出行客流; \hat{y}_{nb} 为公交车各线路的客流; $t_a(x_{na})$ 为小汽车网络各路段的时间阻抗; $\hat{t}_b(\hat{x}_{nb})$ 为公交车网络各路段的时间阻抗; λ 为时间成本的价值换算系数,元/h,其数值与单位油耗及城市消费指数相关,应视具体情况而定; G 的单位由时间成本转化为货币成本.

采用 BPR(业务流程重组或整理)公式来计算公交车网络和小汽车网络中各路段时间阻抗.如下所示:

$$t_a(x_{na}) = t_{0a} + 0.15(y_{na}/C_a)^4$$

$$\hat{t}_b(\hat{x}_{nb}) = t_{0b} + 0.15(\hat{y}_{nb}/C_b)^4$$

式中: t_{0a} 为小汽车在 a 路段上自由流行程时间; t_{0b} 为公交车在 b 路段上自由流行程时间; C_a 为 a 的通行能力; C_b 为 b 的通行能力.

其次,考虑枢纽选址与土地成本的关系,引入城市土地价格影响指数 h_{ir} (i 为枢纽, r 为区域),以枢纽建设土地成本 T 最小为目标函数,建立以下模型:

$$\min T = \sum_{i=1}^m \sum_{r=1}^n \chi_{ir} z_{ir} h_{ir}, \quad z_{ir} = \begin{cases} 1, & i \text{ 在 } r \\ 0, & \text{否则} \end{cases} \quad (2)$$

式中: n 为城市各区域待选枢纽数; m 为城市候选区域数; χ_{ir} 为土地成本初始值.

将以上两个优化目标合并为一个多目标优化问题,即城市交通枢纽选址上层模型

$$\min F = \eta \left\{ \lambda \left[\sum_{a=1}^n y_{na} t_a(x_{na}) + \sum_{l=1}^n \hat{y}_{nl} \hat{t}_l(\hat{x}_{nl}) \right] \right\} + \psi \sum_{i=1}^m \sum_{r=1}^n \chi_{ir} z_{ir} h_{ir} \quad (3)$$

式中: F 为枢纽选址总成本,单位为货币成本; η 为城市交通出行总成本对枢纽选址成本的影响权重, ψ 为枢纽建设土地成本对枢纽选址成本的影响权重; η 和 ψ 权重大小的选择应视具体情况而定,如枢纽选址更多地考虑宏观交通成本的下降,则 η 应较大;更多考虑建设成本的下降,则 ψ 应较大.

2.2 下层模型建立

下层模型基于用户均衡分配^[8]建立流量分配模型. 设公交网络与小汽车网络的起讫点一致, 令 $\hat{t}_b = \hat{t}_b(\bar{x}_b)$, $\forall b$, 在公交网络中下列关联式成立:

$$\hat{x}_b = \sum_{rs} \sum_l \hat{f}_{rs,l} \delta_{rs,b,l}, \quad \forall b \in \hat{A}$$

$$\hat{c}_{rs,l} = \sum_b \hat{t}_b \hat{\delta}_{rs,b,l}, \quad \forall l \in \hat{L}_{rs}, \quad \forall r, s$$

式中, r 和 s 分别表示路网的起点和终点. 若 b 在 r 与 s 之间的路径 l 上, 则 $\hat{\delta}_{rs,b,l} = 1$, 否则 $\hat{\delta}_{rs,b,l} = 0$.

同理, 令 $t_a = t_a(x_a)$, $\forall a$, 在小汽车网络中下列关联式成立:

$$x_a = \sum_{rs} \sum_m f_{rs,m} \delta_{rs,a,m}, \quad \forall a \in \hat{D};$$

$$c_{rs,m} = \sum_a t_a \delta_{rs,a,m}, \quad \forall m \in M_{rs}, \quad \forall r, s$$

式中: \hat{A} 为公交网络中线段的集合, $b \in \hat{A}$; D 为小汽车网络中线段的集合, $a \in D$; \hat{x}_b 为 b 上的公交流量, 以人数计算; x_a 为 a 上的小汽车流量, 以人数计算; \hat{t}_b 为在 a 上花费的旅行时间; t_a 为在 a 上花费的旅行时间; \hat{L}_{rs} 为在公交网络中连接起始点任何终点的所有路径的集合; M_{rs} 为在小汽车网络中连接起始点任何终点的所有路径的集合; $\hat{f}_{rs,l}$ 为 r 与 s 之间路径 l 的公交流量, $l \in \hat{L}_{rs}$; $\hat{f}_{rs,m}$ 为 r 与 s 之间路径 m 的小汽车流量, $\forall m \in M_{rs}$; $\hat{c}_{rs,l}$ 为 r 与 s 之间路径 l 的行驶阻抗; $c_{rs,m}$ 为 r 与 s 之间路径 m 的行驶阻抗. 若 a 在 r 与 s 之间的路径 m 上, 则 $\delta_{rs,a,m} = 1$, 否则 $\delta_{rs,a,m} = 0$.

再设 q_{rs} 和 \hat{q}_{rs} 分别为 r 与 s 之间小汽车和公交车的 $O-D$ (起—讫) 运量, 都是变量, 但其和为已知常量, 并假设为 \bar{q}_{rs} , 则有关系如下:

$$\sum_k f_{rs,k} = q_{rs}, \quad \forall r, s$$

$$\sum_l \hat{f}_{rs,l} = \hat{q}_{rs}, \quad \forall r, s$$

$$q_{rs} + \hat{q}_{rs} = \bar{q}_{rs}, \quad \forall r, s$$

假定 UE (用户均衡理论) 条件在整个公交网络上成立, 公交网络上的流量与旅行时间应满足

$$(\hat{c}_{rs,l} - \hat{u}_{rs}) \hat{f}_{rs,l} = 0, \quad \forall l, r, s;$$

$$\hat{c}_{rs,l} - \hat{u}_{rs} \geq 0, \quad \forall l, r, s$$

式中, $\hat{u}_{rs,l}$ 为 r 与 s 之间的最小阻抗 (时间).

同理可知, 假定 UE 条件在整个小汽车网络上成立, 小汽车网络上的流量与旅行时间应满足

$$(c_{rs,k} - u_k) f_{rs,k} = 0, \quad \forall k, r, s$$

$$c_{rs,k} - u_{rs} \geq 0, \quad \forall k, r, s$$

由于道路网络中小汽车和公交车两种交通方式的相互影响, 导致其各自的服务水平 (阻抗) 变化, 进而使得出行者对于两种交通方式的选择也变化. 此处, 采用方式分离函数来解决运输方式选择与运量配流组合问题. 该函数是基于 Logit 模型上的, 即在平衡状态, 应有

$$q_{rs} = \bar{q}_{rs} / \{1 + \exp[\theta(u_{rs} - \hat{u}_{rs} - \varphi_{rs})]\}, \quad \forall r, s$$

式中, θ 和 φ_{rs} 为非负的经验函数.

进而构建超级网络 (公交网络与小汽车网络叠加) 条件下的用户均衡分配数学规划模型

$$\min Z(x, \hat{x}, \hat{q}) = \sum_a \int_0^{x_a} t_a(\omega) d\omega + \sum_{rs} \int_0^{\hat{q}_{rs}} \frac{1}{\theta} \cdot$$

$$\left[\ln \frac{\omega}{q_{rs} - \omega} + \varphi_{rs} \right] d\omega + \sum_b \int_0^{\hat{x}_b} \hat{t}_b(\omega) d\omega$$

$$\text{s. t. } \sum_k f_{rs,k} = \bar{q}_{rs} - \hat{q}_{rs}, \quad \forall r, s (u_{rs})$$

$$\sum_k \hat{f}_{rs,k} = \hat{q}_{rs}, \quad \forall r, s (u_{rs})$$

$$f_{rs,k} \hat{f}_{rs,l} \geq 0, \quad \forall k, l, r, s$$

式中: ω 为小汽车/公交车在道路交通网络上不同路段的各自行驶车速.

3 求解算法

求解运算的迭代步骤如下:

(1) 初始化, $t_{0a} = t_a(0)$ 及 $\hat{t}_{0l} = \hat{t}_l(0)$, $\forall a$, 令 $n = 1$, 用“全有全无”法将 $O-D$ 矩阵分别加载到小汽车网络和公交车网络上, 得到初始阶段路段流量和公交线路流量 x_{1a} 和 \hat{x}_{1l} .

(2) 分别计算 $t_{na} = t_a(x_{na})$ 和 $\hat{t}_{nl} = \hat{t}_l(\hat{x}_{nl})$, 得到路段流量和公交线路流量 x_{na} 和 \hat{x}_{nl} ; 根据最短路算法, 分别在小汽车网络和公交车网络上寻找最短路程 $u_{n,rs}$ 和 $\hat{u}_{n,rs}$.

(3) 计算 $\{u_{n,rs}\}$ 和 $\{\hat{u}_{n,rs}\}$

$$\hat{v}_{n,rs} = \bar{q}_{rs} \{1 + \exp[\theta(\hat{u}_{n,rs} - u_{n,rs} - \varphi_{rs})]\}$$

$$v_{n,rs} = \bar{q}_{rs} - \hat{v}_{n,rs}, \quad \forall r, s$$

(4) 将 $v_{n,rs}$ 和 $\hat{v}_{n,rs}$ 安排到式(2)中确定的最短路径上,产生路段流 y_{na} 和 \hat{y}_{nl} .

(5) 由 MSA(测量系统分析)算法,令 $x_{n+1,a} = x_{na} + (y_{na} - x_{na})/n, \forall a; \hat{x}_{n+1,l} = \hat{x}_{nl} + (\hat{y}_{nl} - \hat{x}_{nl})/n, \forall a$.

(6) 如果满足收敛性准则,停止迭代;否则令 $n = n + 1$,重新执行(2),(3),(4),直到分别得出小汽车网络各路段和公交车网络各线路的客流量.

(7) 将运算结果代入上层模型,得最终目标值.

4 算例分析

取一个简单路网为研究对象,如图 1 所示.该路网中有 36 个节点,将 12 个节点设为 $O-D$ 点,各路段自由流行程时间(括号外数字,单位 min)及通行能力(括号内数字,辆 $\cdot \text{min}^{-1}$)在图中标明;同时,将 4 个节点选为候选枢纽节点,分别为 9,16,21,28;选其中 2 个为城市交通枢纽,以达到综合效益最优.假设区域 15—16—22—21 为中心城区,其他区域为非中心城区.另外,选择不同的候选枢纽节点,将导致公交车线网相应变化(共有 6 种).下面举其中之一为例来说明,如图 2 所示.其余情况见表 1.

4.1 输入数据及参数设置

将路网各节点之间通过 60 条路线连接,其中,节点 4,5,10,11,12,18,19,21,25,26,27,31,32 为出行起讫点, O 和 D 的量如表 2 所示. $\eta = 0.8, \psi = 0.2, \theta = 1.0, \phi_{rs} = 2.0$.

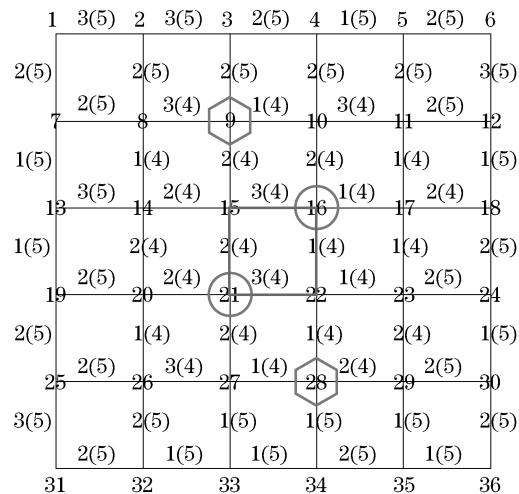


图 1 路网示意图

Fig 1 Transport network

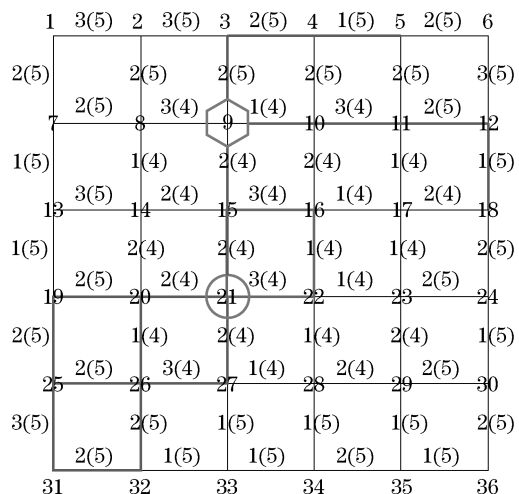


图 2 公交线网及枢纽选址示意图

Fig.2 Bus network and terminal location

表 1 各方案的公交线网及枢纽位置

Tab.1 The bus networks and terminals location of different cases

方案	枢纽位置	线路 1	线路 2	线路 3	线路 4	枢纽之间线路
方案 1	9,21	5→4→3→9	18→12→11→10→9	31→25→19→20→21	31→32→26→27→21	9→15→21
方案 2	9,16	5→4→3→9	18→12→11→10→16	31→25→19→13→7→8→9	31→32→26→27→28→22→16	9→15→16
方案 3	21,28	11→5→4→10→9→15→21	11→12→18→24→30→29→28	31→25→19→20→21	31→32→26→27→28	21→22→28
方案 4	16,28	11→5→4→10→16	11→12→18→17→16	25→19→13→14→15→16	25→31→32→26→27→28	16→22→28
方案 5	9,28	5→4→3→9	18→12→11→10→9	25→19→13→7→8→9	25→31→32→26→27→28	9→15→21→22→28
方案 6	16,21	5→4→10→16	18→12→11→17→16	31→25→19→20→21	31→32→26→27→21	16→15→21, 16→22→21

此外,设时间成本的价值换算系数 $\lambda = 1.0$;城市土地价格影响指数 h_{ir} 与城市各区域发展水平有

很大关系,通常发展水平比较高的城市区域土地价格也相应较高,设中心城区的 $h_{ir} = 1.2$,非中心城区

的 $h_{ir} = 1.0$, 土地成本初始值 $\chi_{ir} = 100\ 000$.

表2 路网各客流节点的O和D量
Tab.2 The status O and D data in the node of network 辆

OD 节点号	OD 节点号					
	19	25	26	27	31	32
4	25/45	35/20	30/20	20/35	45/40	30/30
5	30/30	45/20	40/25	30/35	25/20	35/45
10	35/40	30/25	40/30	25/35	45/40	25/40
11	30/30	25/35	20/35	25/45	40/25	20/20
12	25/30	30/40	30/20	35/20	20/30	35/35
18	25/25	40/30	30/25	25/25	35/30	25/40

注:“/”用以区分2个节点之间的路段双向的OD客流量.

4.2 输出结果及分析

用 Matlab 编程仿真, 优化求解双层规划模型. 例如, 在枢纽选择为节点 9, 21 时的公交线路布设情况(如图 2), 当迭代 98 次时, 相对误差趋于稳定, 收敛曲线如图 3 所示. 其他 5 种枢纽选择情况下的收敛曲线与之类似. 迭代结束后, 各方案最优化参数如表 3 所示. 显然, 方案 4(节点 16, 28 为枢纽点) 为最优. 其公交线网及枢纽选址如图 4 所示. 其优越性主要体现在: 一方面, 客流出行的公交分担率显著优于其他方案(见表 3); 另一方面, 尽管方案 5 的综合成本最低, 但与方案 4 相比, 差别微小, 可忽略不计.

方案 4 的公交线网及枢纽选址有如下特点: ① 布设位置与各客流发生点平均距离最近, 有利于提高枢纽的客流吸引力; ② 枢纽之间通过通行能力较大的道路相连接(节点 16, 28 之间的道路自由行程时间均为 1, 即通行能力较大), 有利于枢纽之间客流

的快速换乘和疏导; ③ 与其公交线路的设置有关, 合理的公交线路有利于最大化地提升枢纽的使用和换乘效率.

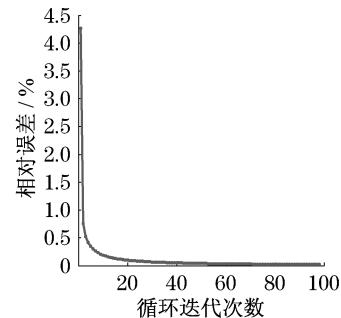


图3 迭代收敛曲线

Fig.3 Convergence curve of iteration

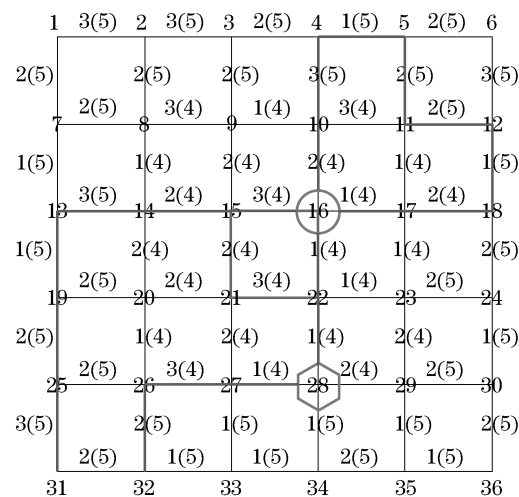


图4 方案4 公交线网及枢纽选址示意图

Fig 4 Bus network diagram and terminal location in Program 4

表3 各方案的最优化数据

Tab.3 The optimal data of different cases

相关数据	方案1	方案2	方案3	方案4	方案5	方案6
公交车分担率/%	25.4	26.5	25.3	40.3	25.0	27.8
私家车分担率/%	74.6	73.5	74.4	59.7	75.0	72.2
$G/10^3$ 元	330 680	319 920	326 930	324 900	323 820	331 390
$T/10^3$ 元	44 000	44 000	44 000	44 000	40 000	48 000
$F/10^3$ 元	374 680	363 920	370 930	368 900	363 820	379 390
公交分担率排名	4	3	5	1	6	2
综合成本最优排名	5	2	4	3	1	6

5 结论

(1) 枢纽选择的最佳位置应尽可能靠近密集客流点, 使得枢纽可以承担的客流最大化、效率最大化.

(2) 在选择城市内多个枢纽点时, 为方便枢纽之间多种交通方式的换乘, 快速缓解各枢纽的客流压力, 枢纽之间应有通行能力较大的道路相连接.

(3) 枢纽选址应考虑到对公交线路布设的影响, 必须与实际相结合.

(下转第 1358 页)