

王乐冰,金建钢.基于 OD 需求的城市轨道交通网络扩张设计[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2021,36(2):37-45.  
doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2021.02.006

WANG L B, JIN J G. Designing Urban Rail Transit Network Expansion for Optimal Origin-Destination Demand Capture[J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2021,36(2):37-45. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2021.02.006

# 基于 OD 需求的城市轨道交通网络扩张设计

王乐冰,金建钢\*

(上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院,上海 200240)

**摘要:**为了解决在已有部分轨道交通线路的基础上进一步网络扩张设计的问题,以最大化轨道交通网络能满足的起讫点(OD)需求为目标,建立了城市轨道交通网络扩张设计的整数规划模型,并提出了考虑乘客在扩张后的轨道交通网络中实际出行路径与交通方式间竞争的多项式 Logit 模型,以获得合理的轨道交通出行需求分担率.通过无锡市轨道交通规划案例验证了网络扩张设计模型的有效性与高效性,该模型能在不同预算下提供科学有效的网络扩张设计方案,并可用于分析新建线路间建设优先级以及区域交通发展潜力,为城市发展与用地规划提出建设性意见.此外,通过对 Logit 模型中的关键参数进行敏感性分析,发现乘客越在意旅行时间和费用,轨道交通网络越能在较少的预算下满足更多需求,修建轨道交通的性价比越高.

**关键词:**城市交通;轨道交通网络扩张设计;整数规划模型;OD 需求;多项式 Logit 模型

**中图分类号:**U121      **文献标志码:**A      **文章编号:**1672-9102(2021)02-0037-09

## Designing Urban Rail Transit Network Expansion for Optimal Origin-Destination Demand Capture

WANG Lebing, JIN Jiangang

(School of Naval Architecture, Ocean & Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** Designing the urban rail transit network expansion over time for matching with urban development and emerging travel demand remains to be a crucial yet challenging task. A binary integer linear programming model was developed with the objective of maximizing the origin-destination demand capture under limited budget. In order to make the problem to be tractable, a modeling strategy was proposed. And the ratio of OD demand for urban rail transit was calculated by a multinomial Logit model, which considered not only mode competition, but also passengers' actual path in the expanded network. The linear programming model was applied to a real large-scale case in Wuxi, for validating its practicality and computing efficiency. The results demonstrate that satisfactory urban rail transit network design patterns with good connection between new lines and existing network can be obtained. Under tight budget conditions, those corridors and sections with higher priorities can also be identified. And a sensitively analysis indicates that passengers' concern about time and fares is conducive to the construction of the urban rail transit network.

**Keywords:** urban transport; urban rail transit network expansion design; integer programming model; origin-destination demand; multinomial Logit model

收稿日期:2021-01-09

基金项目:国家自然科学基金资助项目(72061127003)

\*通信作者,E-mail: jiangang.jin@sjtu.edu.cn

城市轨道交通具有载客量大、速度快、时间可靠度高、与城市地面空间基本隔离等特性,提高了城市公共交通的容量与质量,缓解了道路交通拥堵压力,提升了交通安全性及准时性,已成为城市交通系统的重要组成部分<sup>[1]</sup>.在城市轨道交通的建设与运营中发现,网络化能提高轨道交通的通达性,实现客流倍增,呈现规模效应.然而,城市轨道交通网络的建设需要大量人力、资金与时间,任何城市的轨道交通网络的形成都不是一步到位的,需逐步新建线路实现网络的扩张.所以,运用科学方法推进城市轨道交通成网扩张十分必要<sup>[2]</sup>.本文针对城市轨道交通网络扩张设计问题展开研究,通过数学优化模型解决如何向已有轨道交通网络中合理添加新线路的问题,为轨道交通网络扩张提供设计方案.

城市轨道交通网络扩张设计问题的研究基础是公共交通网络设计问题.Ceder等<sup>[3]</sup>定义公交网络设计问题旨在研究网络结构形状,确定线路走向与站点排布的设计方案;Valerie等<sup>[4]</sup>提出传统轨道交通网络设计问题是对新建车站选点和车站间线路连接进行研究,该问题可通过数学优化模型解决,常见的目标函数包括最小化成本与最大化需求,用于建模的出行需求可分为单点需求和OD需求;卢小林等<sup>[5]</sup>构建了公交走廊专用道选址和公交网络调节的双层优化模型,上层模型的优化目标是最小化建设成本、最大化网络的运营效率,下层模型的目标是最小化广义的出行成本;Laporte等<sup>[6]</sup>更有针对性地对城市轨道交通线路设计展开研究,在确定线路走向的条件下,以最大化新建站点覆盖出行需求为目标建立了新建站点位置的决策模型;Gutiérrez-Jarpa等<sup>[7]</sup>为解决轨道交通多条线路的设计问题,建立了最小化建造成本与最大化满足OD需求的双目标整数线性规划模型;沈景炎<sup>[8]</sup>建议轨道交通线路设计应从线网规划的角度解决“换乘节点和网络联通”的功能问题;Wei等<sup>[9]</sup>针对网络渐进式设计问题提出了以最小化建设成本、最大化新建车站单点覆盖需求的双目标优化模型,采用单点覆盖需求能提高模型求解效率但忽略了网络连通性.

总的来说,已有轨道交通网络设计研究集中在从无到有建立交通网络,而对于在已有部分线路的基础上添加线路,实现进一步网络扩张的研究并不充分.与常见的轨道交通网络设计相比,网络扩张设计问题不仅需确定新建车站的位置和它们之间的连接线路设置,还需考虑换乘站的选址以及换乘站与新线间连接线路设置的问题.对于这一类问题,由于OD需求能反映出行走向,更能体现新线路与已有轨道交通网络的连接性,因此,本文以新建地铁网络尽可能地满足更多OD需求为目标,建立了城市轨道交通网络扩张设计数学优化模型.其中,在计算城市轨道交通分担的出行需求占比时,创新性地考虑了乘客在轨道交通中的实际出行路径,建立多项式Logit模型,有助于提高网络扩张设计模型的现实意义与精确性.

## 1 城市轨道交通网络扩张设计模型

### 1.1 问题描述

城市轨道交通网络扩张设计问题研究的是新建车站与换乘站的位置、新建车站间线路连接以及换乘站与新线之间的衔接关系.由于OD需求包含二维出行信息,在大规模网络中具有计算难度<sup>[10]</sup>.为了提高计算效率,引入通道概念:通道是新建轨道交通线路的设计边界,只有位于通道内的需求点才能作为新建线路候选车站<sup>[11-12]</sup>,城市轨道交通网络设计就是在通道范围内进行车站选点与线路连线.

根据建设意义,新建线路候选站点可分为锚定站和游离站<sup>[13]</sup>.锚定站一定会被建设为新建车站,其位置通常靠近交通枢纽、地标建筑、大型场馆等.游离站是锚定站确定后,结合居民出行需求、站间距限制等确定的站点,它们的数量、位置依据实际情况而定.定义同一通道内相邻两锚定站以及它们之间的游离站构成一个“段”,待建通道被划分为多个“段”,繁杂的OD需求数据通过分段处理减少数量,也能提高模型计算效率.

城市轨道交通网络设计如图1所示.图1中,城市轨道交通网络扩张设计可抽象成点和弧组成的无向图 $G(N, A)$ ,其中, $N = \{1, \dots, n\}$ 表示轨道交通网络所有节

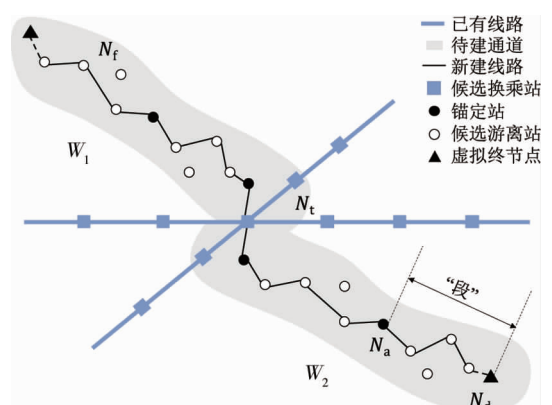


图1 城市轨道交通网络设计

点,既是通道内出行需求点集,也是所有车站位置的节点集,包含候选换乘站  $N_i$ 、新线锚定站  $N_a$ 、候选游离站  $N_f$  以及确保线路完整的虚拟终节点  $N_d$ 。A 表示所有可能存在的弧,是两站点间轨道交通线路的抽象表达。所有通道构成集合  $W$ ,通道内的“段”构成集合  $S$ 。

## 1.2 考虑实际出行路径的方式划分模型

在建立网络设计模型前,需对轨道交通系统能够分担的需求进行预估。通常情况下,在计算出行方式划分时会考虑城市轨道交通、公交巴士、私家车 3 种出行方式的竞争关系<sup>[14]</sup>。然而,由于城市轨道交通网络仍在规划中,不同的网络设计方案会影响乘客轨道交通的实际出行路径,从而也会影响乘客的出行选择<sup>[15]</sup>,因此,本文提出考虑乘客在扩张后轨道交通网络中实际出行路径与交通方式间竞争的多项式 Logit 模型。在已知待建通道、候选站点以及需求集合  $R$  的条件下,可提前生成每种 OD 需求  $r$  在通道内的所有可行路径  $K_r$ ,不同可行路径对乘客的吸引程度不同,乘客倾向于选择更方便、省时的路径。不同设计方案对出行方式选择的影响如图 2 所示,对于 OD 需求 3-6,如果轨道交通线路以直达的方式建造(路径 3-6 被建设成轨道交通),旅行时间较短,则会有更多该 OD 需求的乘客选择轨道交通出行。反之,如果所有的候选游离站都被选建成新车站(路径 3-4-5-6 被建设成轨道交通),列车停靠站增多,旅行时间增加,乘客乘坐轨道交通的意愿减少。

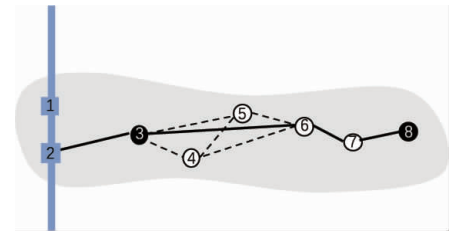


图2 不同设计方案对出行方式选择的影响

将乘客选择交通方式时的心理偏好量化为出行效用,并假设乘客的出行效用主要受到旅行时间与费用的影响,各种方式的出行效用计算公式为

$$U_{usrk}^{metro} = \beta_t T_{usrk}^{metro} + \beta_f F_{usrk}^{metro} + \varepsilon_r^{metro}; \quad (1)$$

$$U_{usr}^{bus} = \beta_t T_{usr}^{bus} + \beta_f F_{usr}^{bus} + \varepsilon_r^{bus}; \quad (2)$$

$$U_{usr}^{car} = \beta_t T_{usr}^{car} + \beta_f F_{usr}^{car} + \varepsilon_r^{car}. \quad (3)$$

式中:  $U_{usrk}^{metro}$  为乘客乘坐轨道交通的出行效用;  $\beta_t$  和  $\beta_f$  为可观测因素旅行时间和旅行费用的效用参数,可结合实际案例采用极大似然方法参数估计得到,它们反映了旅行时间和费用对出行效用的影响程度;  $T_{usrk}^{metro}$  为轨道交通出行时间;  $F_{usrk}^{metro}$  为轨道交通出行费用;  $U_{usr}^{bus}$  为乘客乘坐公交巴士的出行效用;  $T_{usr}^{bus}$  为公交巴士出行时间;  $F_{usr}^{bus}$  为公交巴士出行费用;  $U_{usr}^{car}$  为乘客私家车的出行效用;  $T_{usr}^{car}$  为私家车出行时间;  $F_{usr}^{car}$  为私家车出行费用;  $\varepsilon_r^{metro}, \varepsilon_r^{bus}, \varepsilon_r^{car}$  为不能够观测到的因素构成的效用函数误差项,假设误差项独立且服从 Gumbel 分布<sup>[16]</sup>。

对于轨道交通,考虑了每个 OD 需求在轨道交通网络中每一条可行路径与其他交通方式的竞争,因此,计算的是每条可行路径的出行效用。其中,OD 需求  $r$  在轨道交通网络中第  $k$  条可行路径的出行时间  $T_{usrk}^{metro}$  取决于该路径上的无向弧数  $L_{rk}^{us}$ 、实际出行路径长度  $D_{rk}^{us}$ 、城市轨道交通平均运行速度  $v$  以及每个车站的平均停留时间  $t_0$ 。

$$T_{usrk}^{metro} = \frac{1}{v} D_{rk}^{us} + t_0 (L_{rk}^{us} - 1). \quad (4)$$

多项式 Logit 模型可用于解决此类多元离散选择问题,OD 需求  $r$  的乘客选择轨道交通网络中第  $k$  条可行路径出行占比  $p_{rk}^{us}$  的计算公式如式(5),计算值将作为参数代入数学优化模型。

$$p_{rk}^{us} = \frac{e^{U_{usrk}^{metro}}}{e^{U_{usrk}^{metro}} + e^{U_{usr}^{bus}} + e^{U_{usr}^{car}}}. \quad (5)$$

## 1.3 网络扩张设计数学优化模型

### 1.3.1 模型假设

假设除换乘区域外各个通道不重叠,通道内的新修城市轨道交通线路从已有网络中的换乘站延伸至虚拟终节点,且相邻车站的距离不宜过近或过远。

### 1.3.2 整数规划模型

由于决策变量均为 0-1 变量,该模型是整数规划模型,模型目标是扩张后的城市轨道交通网络能满

足的 OD 需求最大化,如式(6),满足的需求包括扩张后的轨道交通能分担的 OD 需求,以及在换乘站实现新旧线路衔接额外带来的需求量.

$$\max z_d = \sum_{w \in W} \sum_{s \in S} \sum_{r \in R} \sum_{k \in K_r} \delta_{rk}^{ws} q_r^{ws} p_{rk}^{ws} + \sum_{w \in W} \sum_{t \in N_t} q_t^w z_t^w. \quad (6)$$

式中:  $\delta_{rk}^{ws}$  为通道  $w$  中第  $s$  段中的 OD 对  $r$  的第  $k$  种可行路径中的所有弧和节点都被选中修建新线路时则为 1,反之,则为 0;  $q_r^{ws}$  为通道  $w$  第  $s$  段的 OD 对  $r$  的出行需求;  $q_t^w$  为通道  $w$  中将节点  $t \in N_t$  处改造成换乘站点后能额外吸引的需求量;  $z_t^w$  为在通道  $w$  中备选换乘节点  $t$  处改建为换乘站时则为 1,反之,则为 0.

预算限制是建设过程中的一项重要约束,建立约束条件式(7)以确保轨道交通网络的建造成本不超过资金预算限制,建造成本包括新修线路的费用、新建车站费用和改建换乘站的费用.

$$\sum_{w \in W} \sum_{s \in S} \sum_{i,j \in N} h \lambda_{ij}^{ws} d_{ij}^{ws} + \sum_{w \in W} \sum_{s \in S} \sum_{i \in N} f_i^{ws} x_i^{ws} + \sum_{w \in W} \sum_{t \in N_t} g_t^w z_t^w \leq B. \quad (7)$$

式中:  $h$  为单位长度建设成本;  $\lambda_{ij}^{ws}$  为通道  $w$  第  $s$  段中节点  $i$  与节点  $j$  之间连接成为轨道交通线路一部分时则为 1,反之,则为 0;  $d_{ij}^{ws}$  为通道  $w$  第  $s$  段内节点  $i$  和  $j$  之间的距离;  $f_i^{ws}$  为通道  $w$  第  $s$  段节点  $i$  处建设车站所需建设成本;  $x_i^{ws}$  为在通道  $w$  第  $s$  段中节点  $i$  处建设为新车站时则为 1,反之,则为 0;  $g_t^w$  为通道  $w$  节点  $t$  处改建成换乘站所需建设成本;  $z_t^w$  为在通道  $w$  中备选换乘节点  $t$  处改建为换乘站时则为 1,反之,则为 0;  $B$  为城市轨道交通建设资金预算.

为保证所有的通道内都只有一条新建轨道交通线路,且每条线路都由换乘站出发,经过通道内锚定站和若干游离站后终结于一个虚拟节点,建立约束条件式(8)~式(12).

$$\sum_{j \in N_f \cup N_a} \lambda_{ij}^{ws} = x_i^{ws}, \quad \forall i \in N_a, w \in W, s \in S; \quad (8)$$

$$\sum_{j \in N_f \cup N_a} \lambda_{ij}^{ws} = x_j^{ws}, \quad \forall j \in N_a \cup N_d, w \in W, s \in S; \quad (9)$$

$$x_i^{ws} = 1, \quad \forall i \in N_a \cup N_d, w \in W, s \in S; \quad (10)$$

$$\sum_{t \in N_t} z_t^w = 1, \quad \forall w \in W; \quad (11)$$

$$\sum_{(i,j) \in A} \lambda_{ij}^{ws} - \sum_{i \in N_f \cup N_a} x_i^{ws} + 1 \leq 0, \quad \forall w \in W, s \in S. \quad (12)$$

为满足交通流平衡(若某点有客流流入,就一定有客流流出)以及点与弧之间连接的合理性(被选中的站点一定是某一段线路连接弧的起点或终点,被建设为轨道交通的弧两端的节点一定会被选为新建车站),建立约束条件式(13)~式(17).

$$\sum_{i \in N_f \cup N_a, i \neq j} \lambda_{ij}^{ws} - \sum_{l \in N_f \cup N_a, l \neq j} \lambda_{jl}^{ws} = 0, \quad \forall j \in N, w \in W, s \in S; \quad (13)$$

$$x_i^{ws} \leq \sum_{j | (i,j) \in A} \lambda_{ij}^{ws}, \quad \forall i \in N, w \in W, s \in S; \quad (14)$$

$$x_i^{ws} \leq \sum_{j | (j,i) \in A} \lambda_{ji}^{ws}, \quad \forall i \in N, w \in W, s \in S; \quad (15)$$

$$\lambda_{ij}^{ws} \leq x_i^{ws}, \quad \forall i \in N, w \in W, s \in S; \quad (16)$$

$$\lambda_{ij}^{ws} \leq x_j^{ws}, \quad \forall j \in N, w \in W, s \in S. \quad (17)$$

在预算足够多的情况下,为实现目标函数最大化,所有游离站都会被建为新车站,这会导致线路过于迂回,不符合建设技术要求.故引入不允许同时存在的弧的集合  $\Omega_j^{ws}$ ,建立约束条件式(18):当 2 条弧交汇于同一个节点  $j$ ,且夹角小于  $90^\circ$  时,这 2 条弧不允许同时建设轨道交通.

$$\lambda_{ij}^{ws} + \lambda_{jm}^{ws} \leq 1, \quad \forall w \in W, s \in S, ((i,j), (j,m)) \in \Omega_j^{ws}. \quad (18)$$

OD 需求被新建的轨道交通网络满足的条件可用  $\delta_{rk}^{ws}$  与  $\lambda_{ij}^{ws}$  间的数学关系解释,如约束条件式(19)~式(21):当且仅当 OD 需求  $r$  中存在一条可行路径  $k$  中的所有节点与连线段都被选建为城市轨道交通线路时(即  $\sum_{(i,j) \in A} \alpha_{ij}^{wsrk} \lambda_{ij}^{ws} = L_{rk}^{ws}$ ),该 OD 需求被轨道交通网络满足<sup>[17]</sup>,此时决策变量  $\delta_{rk}^{ws}$  等于 1,否则为 0.如图 2 中 OD 对 3-6 有 4 条可行路径(3-6,3-4-6,3-5-6,3-4-5-6),其中存在一条可行路径 3-4-6 中的所有

弧和节点都被选中为新线路的一部分,故 OD 需求 3-6 能被新建轨道交通网络所满足.但 OD 对 3-5,它的 2 条可行路径(3-5,3-4-5)都未被完全建设为轨道交通,故 OD 需求 3-5 未被满足.

$$\sum_{(i,j) \in A} \alpha_{ij}^{usrk} \lambda_{ij}^{us} - L_{rk}^{us} \geq M(\delta_{rk}^{us} - 1), \quad \forall k \in K_r, r \in R, w \in W, s \in S; \tag{19}$$

$$\sum_{(i,j) \in A} \alpha_{ij}^{usrk} \lambda_{ij}^{us} - L_{rk}^{us} + \varepsilon \leq M\delta_{rk}^{us}, \quad \forall k \in K_r, r \in R, w \in W, s \in S; \tag{20}$$

$$\delta_{rk}^{us} \leq \frac{\sum_{(i,j) \in A} \alpha_{ij}^{usrk} \lambda_{ij}^{us}}{L_{rk}^{us}}, \quad \forall k \in K_r, r \in R, w \in W, s \in S. \tag{21}$$

式中:  $\alpha_{ij}^{usrk}$  为如果弧  $(i, j)$  是通道  $w$  第  $s$  段中的 OD 对  $r$  的第  $k$  种可行路径的组成部分时则为 1,反之,则为 0;  $L_{rk}^{us}$  为通道  $w$  第  $s$  段中的 OD 对  $r$  的第  $k$  种可行路径所包含的无向弧的数量;  $M$  为一个较大的常数;  $\varepsilon$  为一个足够小的常数.

## 2 案例分析

为了验证本文所提出的城市轨道交通网络扩张设计模型的现实意义与计算效率,以无锡市轨道交通网络建设规划为案例,进行了求解与分析.

### 2.1 案例描述

截至 2020 年 10 月,无锡市共有 2 条城市轨道交通线路投入运营,分别是 1 号线、2 号线,交汇于市中心,形成“十字”网络构架,满足南北、东西走向的基本客流.但由于无锡市还存在大量从中心向四角辐射的出行需求,故在下一步城市规划中,还需增加建设轨道交通线路,实现网络的扩张发展.将无锡市城市轨道交通案例抽象成建模所需要的网络图形如图 3 所示.2 条较粗的实线代表无锡已建成并且投入使用的 2 条线路,灰色区域代表轨道交通新建线路的通道,已有线路和通道区域覆盖了无锡市超过 80% 的出行需求,新建线路需在通道范围内选点与连线.每个通道内的站点从已有线路上的候选换乘站到通道尾部按顺序标号,由于虚拟终点站在实际的网络中没有意义,故未在图中标注.表 1 列出该案例求解模型时的部分参数值.

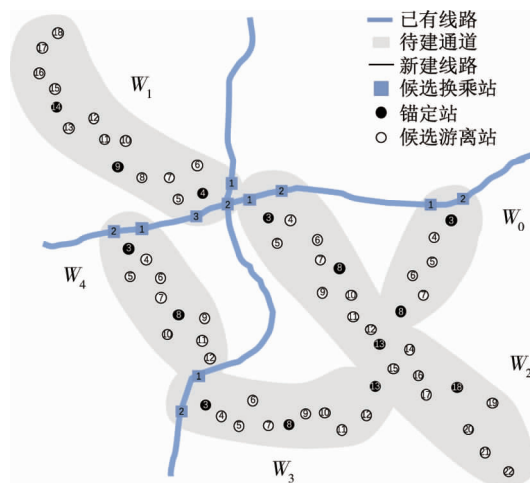


图 3 无锡市轨道交通网络

表 1 案例中部分参数取值

参数	取值	参数	取值
新建车站建造成本/(亿元/车站)	3	$\beta_i$	-0.08
换乘站建造成本/(亿元/车站)	3	$\beta_r$	-0.02
单位距离建设成本/(亿元/km)	5	建设预算/亿元	400~800

### 2.2 案例求解结果

在 Intel Core i7, 3.4 GHz, 8 G RAM 电脑上使用 CPLEX 与 C++ 软件编写程序对模型进行精确求解,



得到在不同预算金额实例下的城市轨道交通网络扩张设计方案,求解结果如表 2,对应的设计方案如图 4. 在预算金额较少的情况,如实例 1,预算为 430 亿元时,仅有 17 个站点被选为新建车站,覆盖 OD 需求 71.56 万人次.而随着预算金额的增加,新修建车站的数量增加,轨道交通网络中站点的密集程度随之提高,OD 需求被满足的量也增多.当预算达到 669 亿元时,有 45 个新建车站,满足了超过 133 万人次需求,此时该案例可被满足的需求达到极限,继续增加预算也不能提高满足的需求量.此外,所有预算实例下,模型求解时间都在 1 s 以内,具有较高的计算效率,说明模型可应用于现实规模城市轨道交通网络案例中.

表 2 案例计算结果

实例	预算金额/亿元	新建换乘站数	新建车站数	满足总需求量/万人次	计算时间/s
1	430	5	17	71.56	0.17
2	450	5	20	83.60	0.35
3	500	5	25	104.75	0.44
4	550	5	31	120.10	0.61
5	600	5	39	129.88	0.58
6	669	5	45	133.63	0.26

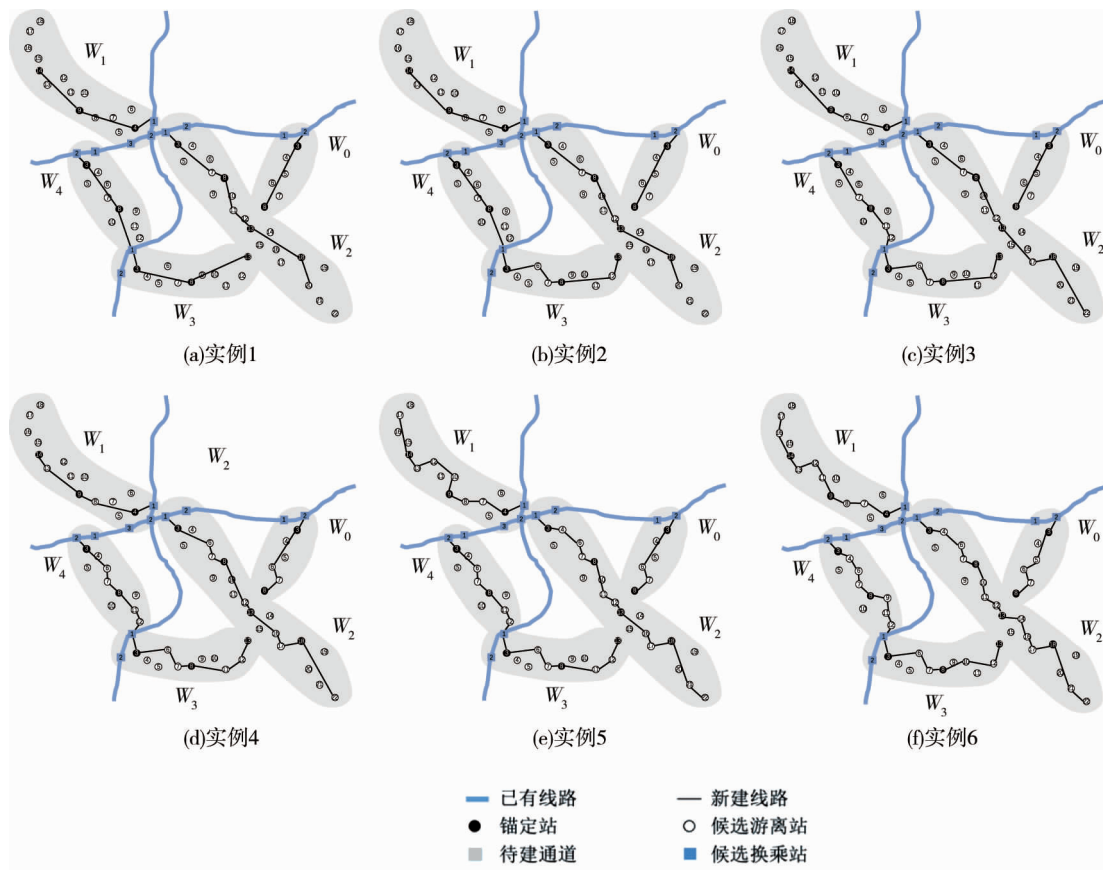


图 4 网络设计方案

### 2.3 合理化调整

通常城市轨道交通网络扩张是从中心地区向偏远地区延伸,实现线路延长,或是新建线路,实现线路数量增多,故需对网络设计方案进行合理化调整.结果处理后的网络设计方案如图 5 所示.首先,移除不符合上述建设规律的线路连接:规定如果某“段”内只有锚定站被选为新建车站,且后续方向上再无游离站被选中,则移除这“段”内的线路建设.如实例 1 和实例 2 中,通道  $W_0$ 、 $W_1$  和  $W_4$  内没有游离站被选为新车站,则当预算较低时,这些通道内没必要建造新线路,如图 5a 和图 5b.此外,在不增加新建站数目的基础上连通部分通道内的线路,可提高网络连接性与完整性.如实例 3~实例 6 中,连接通道  $W_1$  的节点 1 和通道  $W_2$  的节点 1,通道  $W_1$  和通道  $W_2$  被整合成一条线路,如图 5c~图 5f 所示.同样地,实例 4~实例 6 中,连接通道  $W_3$  中的节点 13、通道  $W_2$  中的节点 13 和通道  $W_0$  中的节点 8,5 条新建线路被整合成为 2 条.经过调

整后6种预算实例下的设计方案的结果如表3。

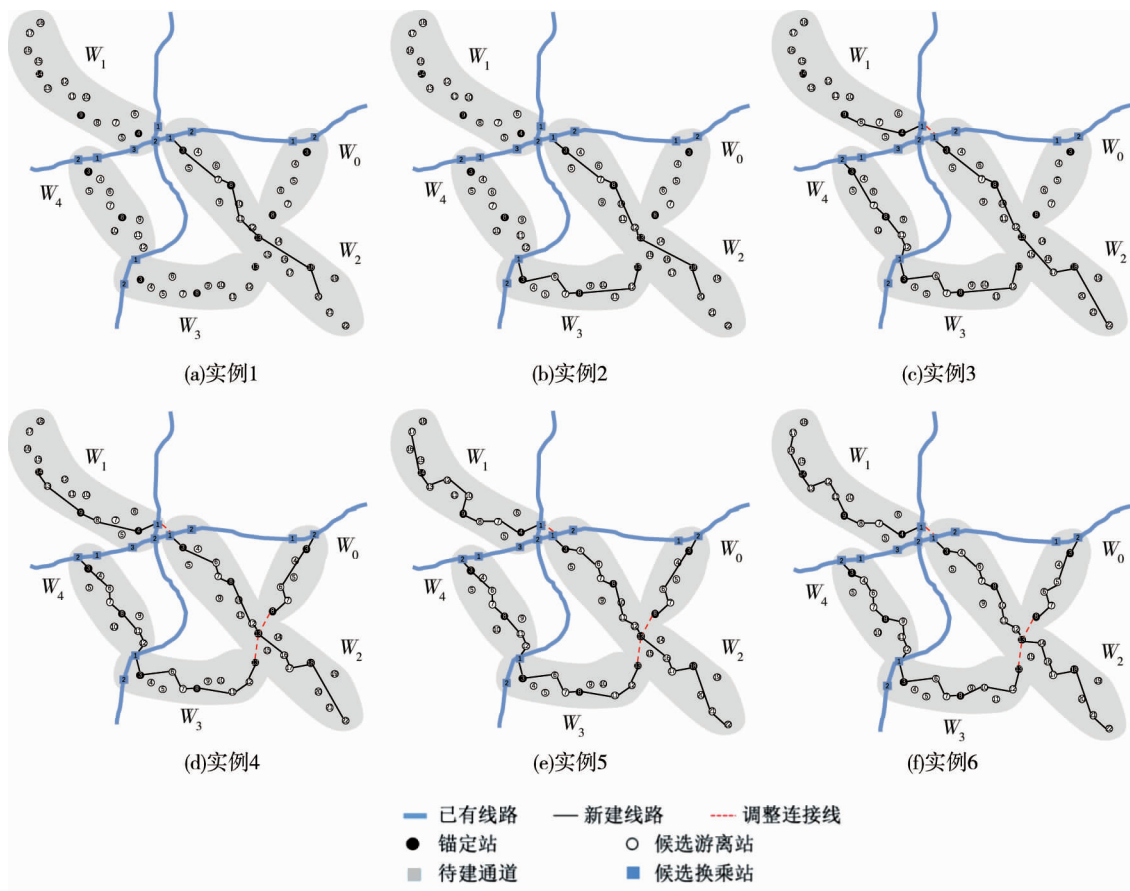


图5 结果处理后网络设计方案

表3 调整后计算结果

实例	预算金额/亿元	新建换乘站数	新建车站数	覆盖通道	满足总需求量/万人次
1	152	1	7	1	21.50
2	223	2	13	2	40.86
3	398	4	22	4	89.43
4	570	6	30	5	123.70
5	620	6	38	5	133.49
6	689	6	44	5	137.23

合理化调整会引起建设成本与满足总需求变化,但预算充足时的变化并不明显,如实例6,调整后仅带来3%的成本增加与2%的满足需求增加.由于无锡市轨道交通的新线规划已开展数年,实例6调整后的设计方案与实际网络高度相似,该结论验证了模型的有效性与科学性.

#### 2.4 通道选择与区域发展潜力分析

通过分析不同预算下的设计方案,还可对各个通道建设的优先级进行排序.实例1中仅有通道 $W_2$ 修建了轨道交通,故通道 $W_2$ 具有最高建设优先级.随着预算的增加,依次在通道 $W_3$ 、 $W_4$ 、 $W_1$ 和 $W_0$ 中出现了线路.当资金预算较低时,排序靠前的通道将被优先考虑建设城市轨道交通线路,该结论可为轨道交通提供更详细的通道选择建议和更具有阶段性特征的网络设计方案.

同样地,分析不同预算下的设计方案,并规定预算较低时,更多游离站被选为新车站的“段”具有更高建设优先级,也可得到“段”之间的优先级排序,如图6.段内连线颜色越深,该“段”的建设优先级越高,所在区域在预算有限时将被优先建设轨道交通.此外,考虑到城市土地利用与城市交通间存在着相互促进,相互制约的关系<sup>[18]</sup>,可将土地利用规划与“段”优先级结合起来进行分析,图6的饼状图表示该“段”所在

区域的用地规划情况,可以发现:通道  $W_2$  的  $S_1$  段的优先级最高,其规划用地性质更侧重于商业和住宅用地,发展潜力极高;通道  $W_2$  的  $S_4$  优先级较高,对应无锡市机场所在区域,是重要发展区域之一.反之,通道  $W_1$  的  $S_3$  优先级最低,所在区域是规划绿色用地,发展潜力弱.该结论说明优先建设轨道交通的区域具有更高的发展潜力,轨道交通可极大程度地促进沿线地区的发展,提出的网络设计模型还可为用地规划、城市发展结构规划提供建设性意见.

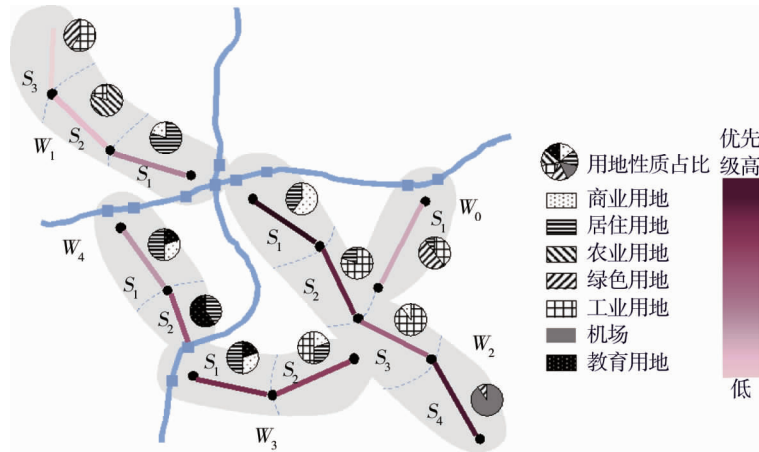


图6 区域优先级与规划用地性质的关系

### 2.5 敏感性分析

乘客敏感程度对网络设计的影响如图7所示.在交通方式划分 Logit 模型中涉及2个主要参数:旅行时间系数  $\beta_t$  和旅行费用系数  $\beta_f$ .  $\beta_t$  反映了旅行时间对乘客出行的影响,由于它是一个负数,取值越低代表乘客对旅行时间的敏感度越高.图7a中比较了  $\beta_t$  取值减少50% ( $\beta_t = -0.12$ )、不变 ( $\beta_t = -0.08$ )、取值增加50% ( $\beta_t = -0.04$ )时6种预算实例下的最优设计方案能满足的总需求量.由图7a可知:相同预算条件下,若乘客对旅行时间的敏感度增加 ( $\beta_t = -0.12$ ),模型求解得到的设计方案能满足的需求增多,当预算为630亿元时的设计方案能满足最大需求141.53万人次.相反,如果乘客对旅行时间不太敏感 ( $\beta_t = -0.04$ ),6种实例下的满足需求总量均降低,即使预算高达701亿,也只能满足127.08万人次的出行需求,投入了更多资金却满足了更少需求.该结论说明乘客越在意旅行时间,越能以更少的预算建设满足更多需求的轨道交通网络,城市轨道交通网络建设的性价比越高.

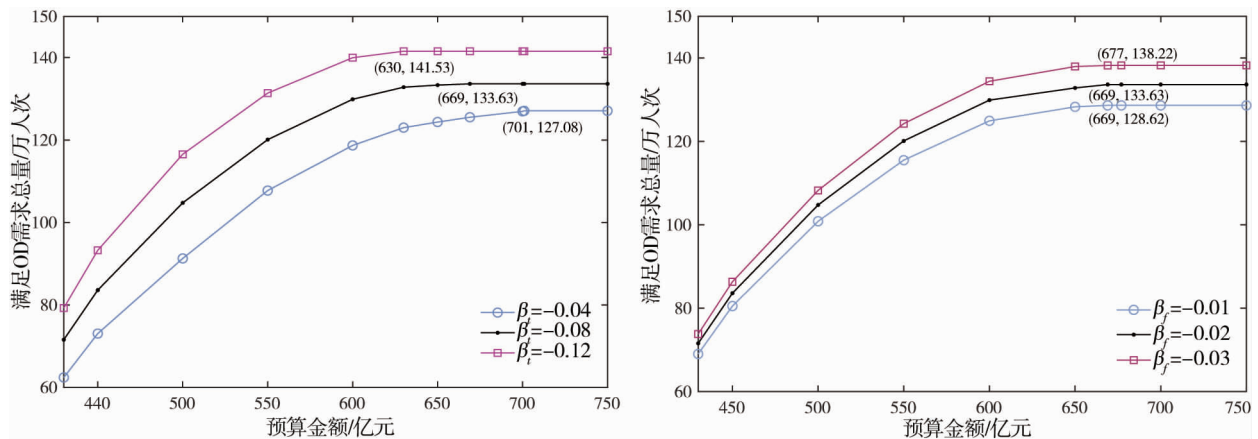


图7 乘客敏感程度对网络设计的影响

同理,  $\beta_f$  表示旅行费用对乘客出行的影响,它也是一个负数,取值越低代表乘客对旅行费用的敏感度越高.图7b中比较了  $\beta_f$  取值减少50% ( $\beta_f = -0.03$ )、不变 ( $\beta_f = -0.02$ )、取值增加50% ( $\beta_f = -0.01$ )时6种预算实例下设计方案能满足的总需求量.结论说明乘客对旅行费用的敏感程度也会影响轨道交通网络设计结果,乘客越在乎旅行费用,修建轨道交通的性价比越高,但乘客旅行费用敏感性的增加对轨道交通网



络的促进作用不如旅行时间.通常情况下,大中型城市的乘客对旅行时间和旅行费用的敏感性较高,城市轨道交通作为一种高效、准时、平价的交通方式,具有很高的建设价值.

### 3 结论

1)城市轨道交通网络扩张设计问题以最大化轨道交通网络能满足的OD需求为目标,建立了城市轨道交通网络扩张设计整数优化模型,且求解该模型能为现实规模案例提供有效且高效的轨道交通网络扩张设计方案.

2)求得的设计方案可用于通道选择,将其与用地规划结合分析所得到的结果可反映新线沿线区域发展潜力,为土地规划提供决策建议.

3)敏感性分析发现乘客对出行时间与出行费用的敏感度越高,建设轨道交通的性价比越高,说明城市轨道交通在大中城市具有较高的建设价值.

#### 参考文献:

- [1] 任娜.城市轨道交通可持续发展的思考[J].数码世界,2018(3):314.
- [2] 李福志,胡思继.城市快速轨道交通路网规划的相关问题[J].交通运输工程学报,2001,1(1):39-42.
- [3] Ceder A, Wilson N H M. Bus network design[J]. Transportation Research Part B: Methodological,1986,20(4):331-344.
- [4] Valerie G, Hao J K. Transit network design and scheduling: a global review[J]. Transportation Research Part A,2008,42(10):1251-1273.
- [5] 卢小林,俞洁,邹难.公交专用道选址与公交线网组合优化模型[J].交通运输工程学报,2016,16(2):132-142.
- [6] Laporte G, Mesa J A, Ortega F A, et al. Maximizing Trip Coverage in the Location of a Single Rapid Transit Alignment[J]. Annals of Operations Research,2005,136:49-63.
- [7] Gutiérrez-Jarpa G, Obreque C, Laporte G, et al. Rapid transit network design for optimal cost and origin - destination demand capture[J]. Computers & Operations Research,2013,40(12):3000-3009.
- [8] 沈景炎.对城市轨道交通线网规划的认识、实践、再认识[J].城市轨道交通研究,2018,21(5):23-35.
- [9] Wei Y, Jin J G, Yang J F, et al. Strategic network expansion of urban rapid transit systems: A bi-objective programming model[J]. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering,2019,34(5):431-443.
- [10] 李文平,王卫,赵颖.居民出行OD调查数据统计分析方法的研究与实现[J].交通信息与安全,2013(3):69-73.
- [11] Laporte G, Marin A, Mesa J A. Designing robust rapid transit networks with alternative routes[J]. Journal of Advanced Transportation,2011,45(1):54-65.
- [12] Laporte G, Pascoal M. Path based algorithms for metro network design[J]. Computers & Operations Research,2015,62:78-94.
- [13] 杨丽媛.城市地铁站点选址方案评价研究[D].长沙:中南大学,2010.
- [14] Gutierrez-Jarpa G, Laporte G, Marianov V, et al. Multi-objective rapid transit network design with modal competition: The case of Concepción, Chile[J]. Computers & Operations Research,2017,78:27-43.
- [15] 王冠,钟鸣,李建忠,等.时变网络下轨道交通出行路径动态选择模型——以武汉市为例[J].交通信息与安全,2020,38(3):54-62.
- [16] 李华民,黄海军,刘剑锋.混合Logit模型的参数估计与应用研究[J].交通运输系统工程与信息,2010,10(5):73-78.
- [17] Jin J G, Nieto H, Lu L J. Robust bike-sharing stations allocation and path network design: a two-stage stochastic programming model[J]. Transportation Letters,2020,12(10):682-691.
- [18] 杨志强,史丰收,黄俊达,等.基于土地利用的城轨新站点客流预测方法研究[J].都市快轨交通,2020,33(2):80-84.