

# 苏州轨道交通线网末班车衔接方案优化

徐 静

(苏州市轨道交通集团有限公司运营一分公司,215101,苏州//工程师)

**摘 要** 苏州轨道交通已经进入网络化运营新阶段,随着线网规模和客流需求的变化,进一步优化线网末班车换乘衔接方案十分必要。以苏州轨道交通线网运营现状和客流特征为基础,设计了线网末班车衔接方案的优化方法;利用生成树算法计算得到各站的末班车时间,再结合线路施工最小预留时间、线网车辆段数量等对末班车起点站发车时间的限制,以及铁路枢纽夜间客流运输需求对末班车衔接方案进行修正,得到了苏州轨道交通 1—4 号线的末班车衔接优化方案。研究结果表明,相较于现有的末班车方案,优化方案的衔接性更合理,也更贴合乘客和运营需求。

**关键词** 苏州轨道交通;末班车;衔接方案;换乘站

**中图分类号** U292.15

**DOI:**10.16037/j.1007-869x.2022.05.004

## Optimization of Last Train Connection Scheme in Suzhou Rail Transit Line Network

XU Jing

**Abstract** Suzhou rail transit has entered the new stage of network-based operation. With the change of line network scale and passenger flow demand, it is essential to further refine the transfer connection scheme of last trains. Based on the current operation status and passenger flow characteristics of Suzhou rail transit line network, the optimization method of line network last train connection scheme is designed. The last train timetable of each station is calculated by Spanning Tree Algorithm. Considering the restrictions of minimum reserved time of line construction and number of train depots in line network on the departure time of the last train at the departure station, and the demand of railway hub night-time passenger flow, the last train connection scheme is rectified, and the optimized last train connection scheme of Suzhou Rail Transit Lines 1-4 is obtained. Research results show that, compared to the existing last train scheme, the connection of the optimization scheme is more reasonable and more suitable for passenger and operation requirements.

**Key words** Suzhou Rail Transit; last train; connection scheme; transfer station

**Author's address** Suzhou Rail Transit Group Co., Ltd.,

215101, Suzhou, China

目前,苏州轨道交通有 5 条已开通运营线路,有 4 条在建线路,已经进入网络化运营新阶段。线网中末班车换乘衔接复杂,但目前的换乘衔接不能完全满足末班车乘客的需求。进一步优化末班车换乘衔接,最大限度保证夜间乘坐末班车乘客的可达性,是苏州轨道交通急需研究和解决的问题。

国外有关末班车衔接的研究主要集中于公共交通与轨道交通的匹配优化方面<sup>[1]</sup>。国内的相关研究中,文献[2]利用最小生成树算法,通过兼顾客流需求和运营衔接需求,建立了末班车衔接优化模型。文献[3]在确定动态可达性最优路径的前提下,提出了可达性查询系统,以及与之相配套的管理系统。文献[4]通过分析末班车动态可达性得出最晚可达时间和可达路径,并提出了求解最晚可达时间的算法。本文主要利用生成树算法,并结合线路施工最小预留时间、线网车辆段数量对末班车起点站发车时间的限制,以及铁路枢纽夜间客流运送需求等对末班车衔接的限制,优化原有方案,形成能保证客流最大方向的部分末班车有效换乘衔接方案。

## 1 苏州轨道交通末班车运营现状分析

苏州轨道交通的 5 条运营线路中,因 5 号线刚开通,客流规律不稳定,因此不在本文研究范围内。图 1 为苏州轨道交通各线路末班车时间。当前线网末班车衔接主要存在 2 个问题:一是末班车换乘原则不够清晰明了,二是末班车换乘衔接未能与线网换乘客流有效关联。随着新线开通,线网规模逐渐壮大,换乘站将呈几何倍数增长。当面对复杂的换乘关系时,当前的单线匹配方式将会出现效率低下和匹配不精确等问题。合理的末班车时刻可保证线网中能够换乘到末班车的乘客数量最大化,使本线乘客和换乘乘客能顺利到达目的地。

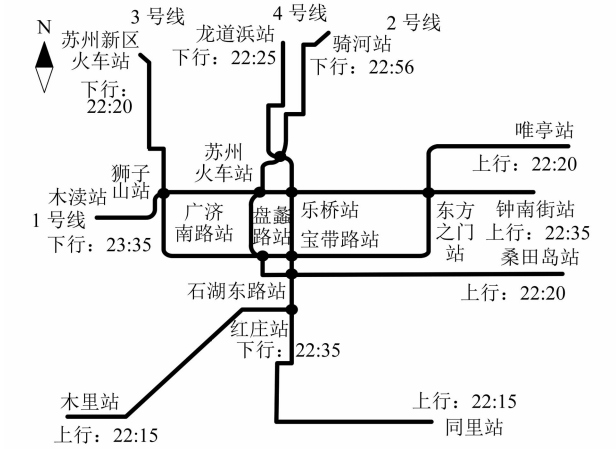


图 1 苏州轨道交通各线路末班车时间

Fig. 1 Timetable of the last train of each line of Suzhou rail transit

## 2 苏州轨道交通末班车衔接优化方法

### 2.1 末班车换乘原则

保证将苏州高铁北站和苏州火车站等交通枢纽的夜间客运送至苏州市区是换乘首要原则；以客流为基础，重点保证换乘客流较大方向的换乘畅通性及覆盖性。因此：需考虑各线路车辆段位置、施工开始时间及列车最晚回场的可行时间；需考虑乘客换乘平均走行时间，以保证换乘时间的合理性；需考虑既有线路的末班车时间。

### 2.2 末班车衔接约束分析

#### 2.2.1 约束条件分析

- 1) 同一个衔接关系不可能同时出现在 2 个换乘站。
- 2) 形成“头尾回路”的衔接关系有可能不能同时成立。如图 2 所示，从时间上考虑，若 line C 下行→line A 上行和 line A 上行→line B 下行成立，则 line B 下行→line C 下行的逻辑关系必须有可能不成立。
- 3) 2 列末班车涉及的相对的 2 个衔接关系不能同时实现。如图 3 所示，从时间上考虑，若 line A

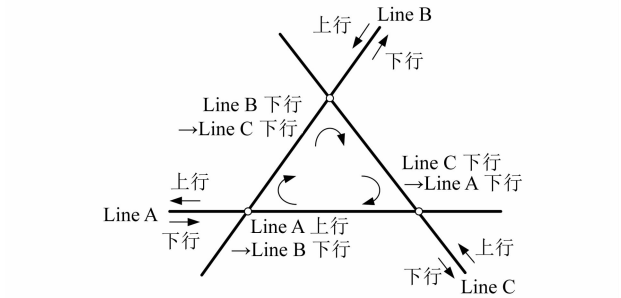


图 2 衔接关系回路图

Fig. 2 Connection relationship loop diagram

上行→line B 下行成立，则 line B 下行→line A 上行必须有可能不成立。

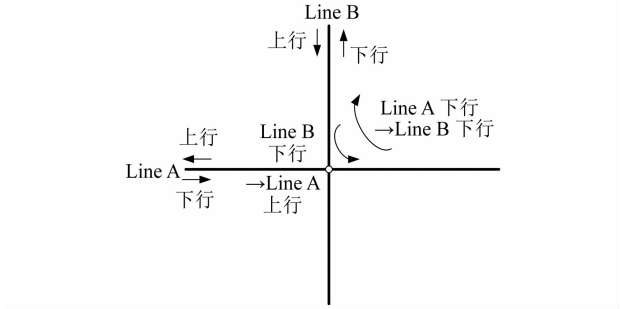


图 3 上下行衔接关系图

Fig. 3 Uplink and downlink connection diagram

#### 2.2.2 苏州轨道交通衔接约束分析

- 1) 1 号线仅有 1 个车辆段位于木渎站附近，运营结束后所有列车仅能回此车辆段。而其他线路至少拥有 2 个车辆段或停车场，末班车发车时间受限制较小。故 1 号线木渎起点站的最晚发车时间将影响全线路的末班车换乘衔接。
- 2) 如图 4 所示，综合考虑夜间套跑、夜间施工、运营前检查等时间，夜间施工的总计最小用时为 4 h 30 min。将各线路压道车、备车的出回场时间纳入计算后，目前苏州轨道交通 1—4 号线大交路运行条件下，夜间两端站实际空闲时间分别约为 5 h 10 min、4 h 55 min、5 h 25 min 和 5 h 25 min，即在目前基础上可供 1—4 号线末班车延长的时间范围分别为 40 min、25 min、55 min 和 55 min。

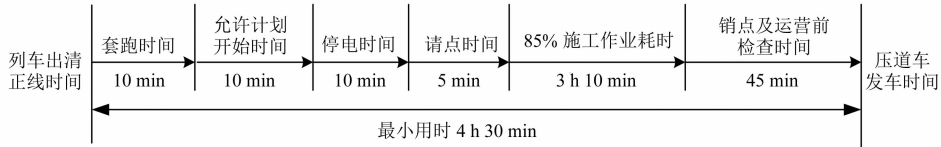


图 4 夜间施工时间分析图

Fig. 4 Diagram of night-time construction time analysis

### 2.3 客流需求分析

苏州轨道交通 1—4 号线共有 9 个换乘站,由于 21:00 以后的客流基本能代表末班车时段客流走向,故取 21:00—23:00 线网 2 h 换乘 OD(起讫点)数据进行分析。表 1 为 1—4 号线 3 个典型换乘站的换乘客流量。

## 2.4 换乘路径

本文基于文献[6]构建的最小生成树方法进行求解,其原理是从图的某顶点出发,可根据某种规则遍历所有顶点,而遍历时经过的边和顶点所构成的图则成为生成树图,遍历时要求生成树中不得产生回路。线网末班车衔接问题同样可借鉴生成树算法进行求解,取遍历时最大的数值作为新增加的边。因此可将末班车衔接问题转化为连通赋权无向图的最大生成树问题。由于各线路之间的换乘不止一个换乘站,故存在同一个换乘方向在不同的换乘站出现 2 个客流数值的情况,如表 2 所示,此时将 2 个客流进行比较,取数值大的填入表格。

根据表 2 建立矩阵,根据最大生成树原理,取矩阵对角线的数据两列比较,小的数值以 0 代替。如矩阵中所示,若取 860 则 1 号线上行、2 号线下行、4 号线下行将形成回路,若取 897 同理,故不合适。

表 2 苏州轨道交通线网各方向换乘客流量

**Tab. 2** Transfer passenger flow in all directions of Suzhou rail transit network

单位:人次

线路	1 号线上行	1 号线下行	2 号线上行	2 号线下行	3 号线上行	3 号线下行	4 号线上行	4 号线下行
1 号线上行	0	0	957	1 171	686( 674)	249( 175)	1 122	1 780
1 号线下行	0	0	389	260	308( 136)	375( 161)	333	428
2 号线上行	245	206	0	0	294	131	478( 354)	550( 221)
2 号线下行	760	601	0	0	158	188	73( 69)	860( 527)
3 号线上行	276( 207)	241( 26)	152	211	0	0	167	690
3 号线下行	88( 63)	128( 93)	100	406	0	0	201	491
4 号线上行	355	340	897( 264)	250( 200)	257	179	0	0
4 号线下	380	397	115( 45)	770( 179)	360	265	0	0

注:括号中的数字为该换乘方向另一换乘站的换乘客流量。

								1号线	1号线	2号线	2号线	3号线	3号线	4号线	4号线	
								上行	下行	上行	下行	上行	下行	上行	下行	
0	0	957	1171	686	249	1122	1780	1号线上行	0	0	④957	1171	686	249	③1122	1780①
0	0	389	0	308	375	333	428	1号线下行	0	0	389	0	308	375	0	428
245	206	0	0	294	131	478	550	2号线上行	0⑥	0	0	0	294	131	0	550
760	601	0	0	158	188	73	860	2号线下行	0	601	0	0	0	0	0	860
276	241	152	211	0	0	167	690	3号线上行	0	0	0	211	0	0	0	690⑤
88	128	100	406	0	0	201	491	3号线下行	0	0	0	406	0	0	201	491⑦
355	340	897	250	257	179	0	0	4号线上行	0	340	897	250	257	0	0	0
380	397	115	0	360	265	0	0	4号线下行	0	0	0	0	0	0	0	0

表1 苏州轨道交通1—4号线3个典型换乘站21:00—23:00换乘客流量

**Tab.1 Passenger flow of three typical transfer stations of Suzhou Rail Transit Line 1-Line 4 at 21:00-23:00**

换乘路径	换乘站	客流/人次
1 号线下行—2 号线下行	广济南路站	260
1 号线上行—2 号线上行	广济南路站	957
1 号线上行—2 号线下行	广济南路站	1 171
1 号线下行—2 号线上行	广济南路站	389
1 号线下行—4 号线下行	乐桥站	428
1 号线上行—4 号线下行	乐桥站	1 780
1 号线上行—4 号线上行	乐桥站	1 122
1 号线下行—4 号线上行	乐桥站	333
2 号线上行—4 号线下行	苏州火车站站	221
2 号线下行—4 号线上行	苏州火车站站	69
2 号线上行—4 号线上行	苏州火车站站	478
2 号线下行—4 号线下行	苏州火车站站	527
2 号线下行—1 号线上行	广济南路站	760
2 号线下行—1 号线下行	广济南路站	601
2 号线上行—1 号线下行	广济南路站	206
2 号线上行—1 号线上行	广济南路站	245
4 号线上行—2 号线上行	苏州火车站站	897
4 号线下行—2 号线上行	苏州火车站站	45
4 号线下行—2 号线下行	苏州火车站站	179
4 号线上行—2 号线下行	苏州火车站站	250
4 号线上行—1 号线下行	乐桥站	340
4 号线上行—1 号线上行	乐桥站	355
4 号线下行—1 号线上行	乐桥站	380
4 号线下行—1 号线下行	乐桥站	397

以此类推,按照客流大小依次排序,去掉不合适数据后,取前 7 个最大数值,得到如图 5 所示的换乘关系最大生成树图。

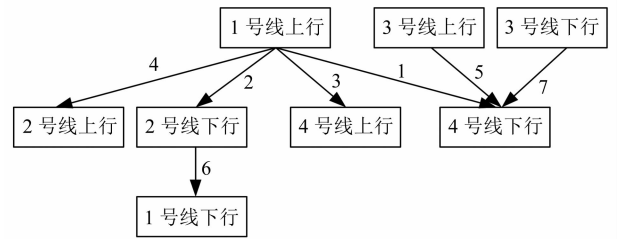


图 5 苏州轨道交通 1—4 号线换乘关系最大生成树图  
Fig. 5 Maximum Spanning Tree diagram of the transfer relationship of Suzhou Rail Transit Line 1-Line 4

换乘关系生成树模型可用文字表示成如表 3 所示的换乘路径表。

表 3 苏州轨道交通 1—4 号线换乘衔接优先考虑的换乘路径表  
Tab. 3 List of priority transfer routes for Suzhou Rail Transit Line 1-Line 4

序号	换乘关系	主动换乘车站
1	1 号线上行换乘至 4 号线下行	乐桥站
2	1 号线上行换乘至 2 号线下行	广济南路站
3	1 号线上行换乘至 4 号线上行	乐桥站
4	1 号线上行换乘至 2 号线上行	广济南路站
5	3 号线上行换乘至 4 号线下行	宝带路站
6	2 号线下行换乘至 1 号线下行	广济南路站
7	3 号线下行换乘至 4 号线下行	宝带路站

### 2.5 线网末班车表示方法

考虑到既有线路的末班车时间已对外公布,不宜大幅度变更,且 1 号线只有一个车辆段对钟南街

站末班车产生制约,故选择以钟南街站末班车时间为基准点,结合换乘关系及时刻表制定了如图 6 和表 4 所示的基于线网换乘客流的末班车时间表示方法。图 6 和表 4 以钟南街站上行末班车时间为基准点,如将钟南街站上行末班车时间记为  $N$ ,钟南街站到乐桥站的列车走行时间为  $25\text{ min}$ ,则乐桥站到站时间为  $N+25$ ;1 号线乐桥站上行换乘至 4 号线上行的换乘时间按  $5\text{ min}$  计算,同里站至乐桥站的列车走行时间为  $47\text{ min}$ ,则可倒推同里站上行的末班车时间应该为  $N+25\text{ min}+5\text{ min}-47\text{ min}$ 。同理可推算其他方向的末班车时间。

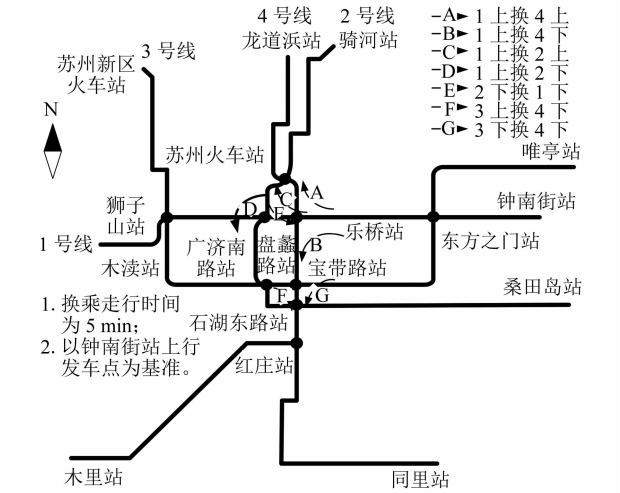


图 6 基于线网换乘客流苏州轨道交通 1—4 号线末班车换乘衔接示意图  
Fig. 6 Diagram of transfer and connection of Suzhou Rail Transit Line 1-Line 4 last train based on line network transfer passenger flow

表 4 基于线网换乘客流苏州轨道交通 1—4 号线末班车换乘衔接时间表  
Tab. 4 Transfer connection timetable of the last train of Suzhou Rail Transit Line 1-Line 4 based online network passenger flow

方向别	1 号线	2 号线	3 号线	4 号线
下行	木渎站: $N + (29 + 5 + 5 - 18)\text{ min}$	骑河站: $N + (29 + 5 - 32)\text{ min}$	新区火车站站: $N + (25 + 5 + 10 - 5 - 40)\text{ min}$	龙道浜站: $N + (25 + 5 - 21)\text{ min}$
	广济南路站: $N + (29 + 5 + 5)\text{ min}$	广济南路站: $N + (29 + 5)\text{ min}$	宝带路站: $N + (25 + 5 + 10 - 5)\text{ min}$	乐桥站: $N + (25 + 5)$
	—	—	—	宝带路站: $N + (25 + 5 + 10)\text{ min}$
上行	广济南路站: $N + 29\text{ min}$	广济南路站: $N + (29 + 5)\text{ min}$	宝带路站: $N + (25 + 5 + 10 - 5)\text{ min}$	乐桥站: $N + (25 + 5)\text{ min}$
	乐桥站: $N + 25\text{ min}$	桑田岛站: $N + (29 + 5 - 42)\text{ min}$	唯亭站: $N + (25 + 5 + 10 - 5 - 44)\text{ min}$	同里站: $N + (25 + 5 - 47)\text{ min}$
	钟南街: $N$	—	—	—

### 3 苏州轨道交通线网末班车衔接优化

以钟南街站末班车时间为基准点,将钟南街站当前的末班车时间代入图 6 的末班车衔接表示方

法,并根据一系列的主动换乘关系,可计算出如图 7 a)所示的各线路始发站以及各换乘站的末班车时间。

将图 7 a)所示的末班车时间与当前线网末班

车时间进行对比发现,部分线路的末班车时间存在提前的现象,如图 7 a)中显示的骑河站下行发车时刻是 22:37,而实际上该站的末班车时刻为 23:06。为了坚持一般情况下运营时间不能缩短的原则,故将 7 a)中骑河站末班车时间修正为

23:06。但修正后发现,2 号线下行换乘至 1 号线下行的主动换乘关系无法成立,故舍弃此主动换乘关系,保留表 3 中 1—5 和 7 这 6 种末班车换乘衔接关系,由此可以得到如图 7 b)所示的各条线路的最优末班车时间。

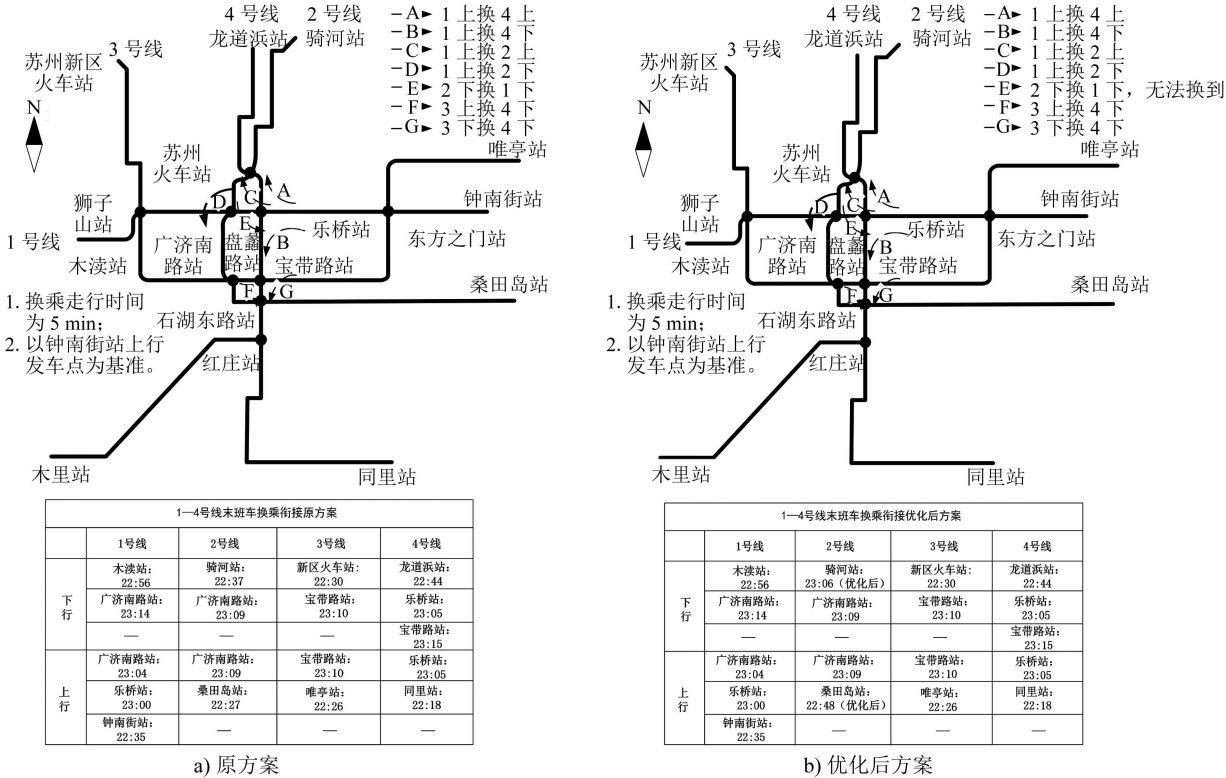


图 7 苏州轨道交通 1—4 号线末班车换乘衔接优化前后方案

Fig. 7 Transfer connection scheme of last train of Suzhou Rail Transit Line 1-Line 4 before and after optimization

苏州轨道交通 1—4 号线末班车衔接优化前后情况对比如下:

1) 修正后的部分线路的末班车时间比图 1 有小幅延长,总体仍能保证夜间施工及运营前检查等最少的所需时间。

2) 优化后明确了当前的线网换乘原则为:1 号线上行能换乘至 2 号线上下行,主动换乘站为广济南路站;1 号线上行能换乘至 4 号线上下行,主动换乘站为乐桥站;3 号线上下行能换乘至 4 号线下行,主动换乘站为宝带路;能将苏州高铁北站、苏州火车站夜间客流运送至苏州市区。

3) 换乘关系以换乘客流为基础,在覆盖当前各线路末班车时间的基础上有部分车站末班车时间有小幅延长。图 1 和图 7 b)的末班车时间对比发现,1 号线木渎站由 22:35 延长为 22:56;2 号线骑河站由 22:56 延长为 23:06,桑田岛站由 22:20 延长为 22:

48;3 号线苏州新区火车站站由 22:20 延长为 22:30,唯亭站由 22:20 延长为 22:26;4 号线龙道浜站由 22:25 延长为 22:44,同里站由 22:15 延长为 22:18。

4 结语

为了进一步提升苏州轨道交通的运营服务水平,需在摸透当前线网客流特点的基础上提升线网末班车衔接的合理性。本文基于苏州轨道交通的换乘客流数据分析,建立了末班车衔接方案和模型,钟南街站上行末班车时间为基准点,推导出了多条主动换乘衔接关系。结合夜间施工时间和既有末班车时间等条件,对模型进行修正,最终得出适用于苏州轨道交通生产实际的线网末班车衔接时刻表。本文的方法可推广至苏州轨道交通后续所有线路中。不足之处是,5 号线刚刚开通,客流量

(下转第 26 页)