

doi: 10.3969/j.issn.1672-6073.2024.02.010

# ATC 车辆基地咽喉区通过能力 计算方法研究

黄宗志<sup>1</sup>, 肖雅玲<sup>2</sup>, 柏 赟<sup>2</sup>

(1. 广州地铁设计研究院股份有限公司, 广州 510010; 2. 北京交通大学, 北京 100044)

**摘要:** 车辆基地发车能力逐渐成为提高早高峰正线运营水平的瓶颈, 部分城市开始探索建设自动化列车控制 (automatic train control, ATC) 车辆基地, 针对 ATC 车辆基地收发车能力计算复杂, 现有收发车能力计算方法难以应用的弊端, 研究了 ATC 车辆基地咽喉区通过能力的计算方法。首先, 在 ATC 灭灯模式下, 通过比较得到不同列车发车顺序下的最小列车总发车时间; 其次, 计算得到 ATC 车辆基地的最大咽喉区通过能力; 最后以广州萝岗车辆基地为案例, 进行 ATC 灭灯模式下咽喉区通过能力计算模型有效性的验证研究。研究表明: ATC 灭灯模式、ATC 点灯模式、列调结合模式和列车进路模式下咽喉区通过能力分别为 28、17、13、11 列/h; ATC 灭灯模式较其他 3 种模式有更大的发车能力, 能更好地满足早高峰正线的运营需求。研究结果可以为评估车辆基地设计方案提供参考。

**关键词:** 城市轨道交通; 车辆基地; 咽喉区通过能力; 发车顺序; 模拟退火算法

中图分类号: U231

文献标志码: A

文章编号: 1672-6073(2024)02-0065-07

## Capability Calculation Method of ATC Depot Throat Area

HUANG Zongzhi<sup>1</sup>, XIAO Yaling<sup>2</sup>, BAI Yun<sup>2</sup>

(1. Guangzhou Metro Design &amp; Research Institute Co., Ltd., Guangzhou 510010;

2. Beijing Jiaotong University, Beijing 100044)

**Abstract:** Given that the departure capacity of depots has gradually hindered the improvement of the operation level of the main line during morning peak hours, some cities have begun to explore the construction of ATC depots. However, existing calculation methods for vehicle sending and receiving capacity cannot be applied to ATC depots. The throat area capacity calculation method of ATC depots is investigated to compensate for the above shortcomings. First, under the ATC lights-off mode, the minimum total train departure time is obtained by comparing the total train departure times under different train departure sequences. Second, the maximum throat area passing capacity of the ATC depot is calculated. Finally, using the Guangzhou Luogang depot as a case study, a validation study of the effectiveness of the calculation model of the throat area passing capacity under the ATC lights-off mode is carried out. The results show that the passing capacities of the throat area under the ATC lights-off, ATC lighting, train adjustment combination, and train approach modes are 28, 17, 13, and 11 trains/h, respectively; the ATC lights-off mode has a greater capacity than the other three modes and can better meet the operational demand of the mainline during morning peak hours. The results of this study can serve as a reference for evaluating depot design schemes.

**Keywords:** urban rail transit; depot; throat-area capacity; departure sequence; simulated annealing algorithm

收稿日期: 2023-07-06 修回日期: 2023-12-07

第一作者: 黄宗志, 男, 硕士, 工程师, 研究方向为城市轨道交通, 970062455@qq.com

通信作者: 柏赟, 男, 博士, 教授, 研究方向为城市轨道交通运输组织, yunbai@bjtu.edu.cn

基金项目: 中央高校基本科研业务费(2023JBCZ002); 国家自然科学基金(71971016, 71901022)

引用格式: 黄宗志, 肖雅玲, 柏赟. ATC 车辆基地咽喉区通过能力计算方法研究[J]. 都市轨道交通, 2024, 37(2): 65-71.

HUANG Zongzhi, XIAO Yaling, BAI Yun. Capability calculation method of ATC depot throat area[J]. Urban rapid rail transit, 2024, 37(2): 65-71.

城市轨道交通线路的行车水平主要受终点站折返能力、信号行车追踪能力以及车辆基地收发车能力等因素的影响。随着城市轨道交通信号系统和作业流程的不断优化,正线的列车运营间隔可压缩至 105 s,因此车辆基地的发车能力将成为城轨线路行车水平提高的关键<sup>[1]</sup>。车辆基地的发车能力为列车从库前至转换轨(段内区段)直至进入正线运营(段外区段)的能力,其受到咽喉区通过能力和加车能力的控制。其中,咽喉区通过能力为影响车辆段发车能力的主控因素<sup>[2]</sup>。因此,车辆基地咽喉区通过能力计算方法的研究对评估车辆基地设计方案的发车能力具有重要意义。

自动化列车控制(automatic train control, ATC)车辆基地为采用基于通信的列车控制系统(communication based train control system, CBTC)信号制式且具备列车自动运行功能的车辆段<sup>[3]</sup>。与传统车辆基地相比,ATC 车辆基地在调度权限、列车控制模式和出入场效率等方面均有差异。在调度权限方面,传统车辆基地的收发车作业是以转换轨为界,场段内至转换轨区域由停车场控制中心(depot control center, DCC)调度指挥,转换轨以外至正线区域由运营控制中心(operating control center, OCC)调度指挥。ATC 车辆基地的运用库至转换轨区域是无人值守的,可以由 OCC 统一管理,也可以在 OCC 排列完成后下放至 DCC 管理,其他作业调度权限由 DCC 管理。在列车控制模式方面,ATC 车辆基地的列车进出车辆基地时为全自动驾驶,列车的间隔距离通过 CBTC 系统进行控制。在出入场效率方面,由于地铁正线采用 CBTC 模式,而车辆基地内采用基于轨道电路的控制系统(track based train control, TBTC),传统车辆基地的列车由正线回到车场或由车场驶入正线都需在转换轨处切换控制模式;在 ATC 车辆基地内,列车采用与正线相同的 CBTC 系统,实现列车自动控制,避免了控制模式切换,提高了列车出入场效率<sup>[3]</sup>。

传统车辆基地的出段方式主要有列车进路方式和列调结合方式。列车进路模式下,将停车列检库至转换轨处划分为一个进路,一次性办理完成从车库内至出段的列车进路。列调结合模式下,在总出发信号机处进行进路划分,划分停车列检库至总出发信号机处为调车进路,划分总出发信号机至转换轨出清点处为列车进路。为更好地满足早高峰正线的运营需求,部分车辆基地开始探索建造 ATC 车辆基地,其一般采用 ATC 点灯模式和 ATC 灭灯模式。ATC 点灯模式下,在

总出发信号机处进行进路划分,划分停车列检库至总出发信号机处为调车进路,划分总出发信号机至转换轨出清点处为列车进路。ATC 灭灯模式下,在共用道岔处进行进路划分,划分停车列检库至前后车共用道岔处为调车进路,划分共用道岔至转换轨出清点处为列车进路。ATC 点灯模式和 ATC 灭灯模式下的列车进路均由 CBTC 控制。

针对传统车辆基地,以段内区段为核心,张雄等<sup>[4]</sup>针对广州洛溪车辆段将段内作业划分为运用库至转换轨和出清转换轨 2 个过程,计算车辆段出段能力。刘娴等<sup>[5]</sup>将列车的出段流程划分为出库进路、调车进路和列车进路等,计算出各进路所需时间的最大值,进而得到车辆段的出段能力。以段外区段为核心,宋周敏等<sup>[6]</sup>研究了不同接轨站形式和出入段作业方案下的加车和收车过程,提出了出入段作业能力的计算方法。针对 ATC 车辆基地,黄志红<sup>[7]</sup>指明在车辆段实现自动化运行,可以有效提高城市轨道交通的运行效率。汪小勇<sup>[8]</sup>分析了城市轨道交通 ATC 车辆段的关键功能,给出了设计时的注意事项。综上,既有研究对传统车辆基地的收发车能力计算方法和 ATC 车辆基地的功能展开了一些研究,但对 ATC 车辆基地收发车能力的计算方法考虑不足,难以评估 ATC 车辆基地布设方案的收发车能力。

相较于传统的列调结合方式,ATC 点灯模式下仍以总出发信号机为进路划分点;而 ATC 灭灯模式下以列车间的共用道岔为进路划分点,列车发车顺序会影响车辆基地发车能力。鉴于此,本文针对城市轨道交通 ATC 车辆基地,考虑 ATC 灭灯模式下列车发车顺序影响车辆基地发车能力的特点,通过比较不同发车顺序下的列车总发车时间,得到所有列车的最小总发车时间,进而确定 ATC 灭灯模式下车辆基地的咽喉区通过能力。最后以某地铁车辆基地为案例,验证模型的实施效果。

## 1 模型建立

### 1.1 问题描述

在 ATC 灭灯模式下,ATC 车辆基地的列车从停车列检库运行至共用道岔的过程受 TBTC 系统控制,记为 TBTC 区段;在该区段内,同一时间内仅允许一列车运行,前一列车出清共用道岔后,后一列车才能进入该区段。列车从共用道岔运行至转换轨则受 CBTC 系统控制,记为 CBTC 区段;在该区段内,同一时间

可以有多列车运行，列车间需满足最小追踪间隔。

以图 1 所示的尽端式 ATC 车辆场段为例，该场段总共有 4 条股道，每条股道有两列列位，可以停放两列车。假设有编号为  $i_1$ 、 $i_2$ 、 $i_3$  的 3 列车，准备从停车列检库发出。由图 1 可知，列车  $i_1$ 、 $i_2$  间的共用道岔为 1 号共用道岔，列车  $i_2$ 、 $i_3$  间和列车  $i_1$ 、 $i_3$  间的共用道岔为 2 号共用道岔。根据轨道电路分界点，对各线路分区进行编号。

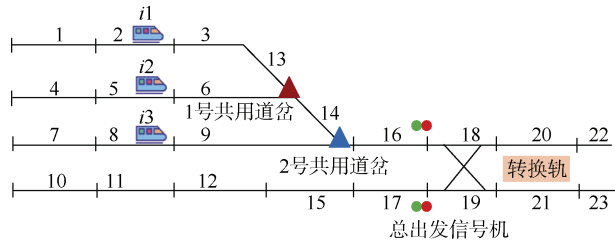


图 1 车辆场段布线示意

Figure 1 Schematic of the depot

在 ATC 灭灯模式下，列车在 TBTC 区段内的运行间隔为前车从停车列检库到出清与后车共用道岔的时间，在 CBTC 区段内的行车间隔为最小追踪间隔。

已知线路分区  $s$  的长度为  $l_s$ ，列车  $i$  的车长为  $l_i$ ，列车在车辆基地内运行的平均速度为  $v_1$ ，进路准备等作业时间为  $t_{\text{作业}}$ 。列车发车顺序存在  $i_1$ - $i_2$ - $i_3$ 、 $i_1$ - $i_3$ - $i_2$ 、 $i_2$ - $i_1$ - $i_3$ 、 $i_2$ - $i_3$ - $i_1$ 、 $i_3$ - $i_1$ - $i_2$  和  $i_3$ - $i_2$ - $i_1$  共 6 种方案。以  $i_1$ - $i_2$ - $i_3$ 、 $i_1$ - $i_3$ - $i_2$  两种方案为例，计算其列车运行间隔。方案 1 下，列车  $i_1$ - $i_2$  的运行间隔为  $(l_3+l_{13}+l_i)/v_1+t_{\text{作业}}$ ，列车  $i_2$ - $i_3$  的运行间隔为  $(l_6+l_{14}+l_i)/v_1+t_{\text{作业}}$ 。方案 2 下，列车  $i_1$ - $i_3$  的运行间隔为  $(l_3+l_{13}+l_{14}+l_i)/v_1+t_{\text{作业}}$ ，列车  $i_3$ - $i_2$  的运行间隔为  $(l_9+l_{14}+l_i)/v_1+t_{\text{作业}}$ 。显然，在共用道岔前，不同的列车发车顺序下，列车的运行间隔不同，列车的总发车时间也不同。在共用道岔后，列车运行仅需满足最小追踪间隔。

综上，列车发车顺序会影响列车的运行间隔，进而影响列车的总发车时间，而列车的总发车时间决定了车辆基地的咽喉区通过能力。为此，本文通过比较不同发车顺序下列车的总发车时间，得到最小总发车时间和最优发车顺序，进而确定 ATC 灭灯模式下车辆基地的咽喉区通过能力。

## 1.2 模型构建

1) 模型假设。在整个发车过程中，列车均会根据已知且固定的限速运行。不考虑正线运行列车对车辆

基地发出列车间隔的影响。

2) 模型决策变量和参数。本文的目的在于优化列车间的发车顺序，将模型决策变量和参数的符号定义如下： $M$  为车辆基地的列车集合； $x_{m,n}$  为 0-1 变量，若列车  $m$  早于列车  $n$  发出为 1，否则为 0， $m \in M$ ， $n \in M$ ； $c_{m,n}$  为常量，表示列车  $m$  和列车  $n$  之间的运行间隔。

3) 目标函数和约束条件。本文目的在于优化列车之间的发车顺序以最小化总发车时间，可理解为找到一条包含所有列车的路径使得路径成本最小化。其中，每两列车间的路径成本为列车间的运行间隔。因此，可参考旅行商问题(traveling salesman problem, TSP)的建模思路构建本文模型。

目标函数为路径成本最小化，即所有列车运行间隔之和最小化，表示为

$$\min \sum_m \sum_n c_{m,n} \cdot x_{m,n} \quad (1)$$

将每列车理解为节点，节点集合为  $M$  ( $|M|=N$ )， $S$  为子点集。模型的约束条件为

$$\sum_{m \in M} x_{m,n} = 1 \quad \forall n \in M, m \neq n \quad (2)$$

$$\sum_{n \in M} x_{m,n} = 1 \quad \forall m \in M, m \neq n \quad (3)$$

$$\sum_{m,n \in S} x_{m,n} \leq |S| - 1 \quad 2 \leq |S| \leq N - 1, S \subset M \quad (4)$$

$$x_{m,n} \in \{0,1\} \quad \forall m,n \in M \quad (5)$$

## 1.3 算法介绍

本文问题为 NP-hard 问题，随着问题规模的增大，短时间内难以求得可行解。考虑到车辆基地的列车数量较多，采用模拟退火算法<sup>[9]</sup>对模型进行求解。模拟退火算法适用于处理大规模复杂的组合优化问题，且与其他优化算法相比更容易实现。

## 2 案例分析

### 2.1 案例基本情况

为验证本文所提出模型和算法的有效性，选择广州萝岗车辆段进行案例分析。萝岗车辆段位于广州地铁 6 号线的终端，和某终端站以双线接轨的方式连接。根据行车资料，远期 6 号线一、二期贯通运营，贯通后线路长度为 42 km，全线高峰小时开行对数为 30 对/h，旅行速度为 33 km/h，按照规模分配原则，萝岗车辆段近期列位数为 55 列位，远期配属车列位数为 75 列位。目前，萝岗车辆段采取列调结合模式出段，即列

车从停车列检库出发，到达总出发信号机，车尾离开信号转换段后，列车可以调整至正线追踪间隔。车辆

段布置形式如图 2 所示，对其中共用道岔按顺序进行了编号。

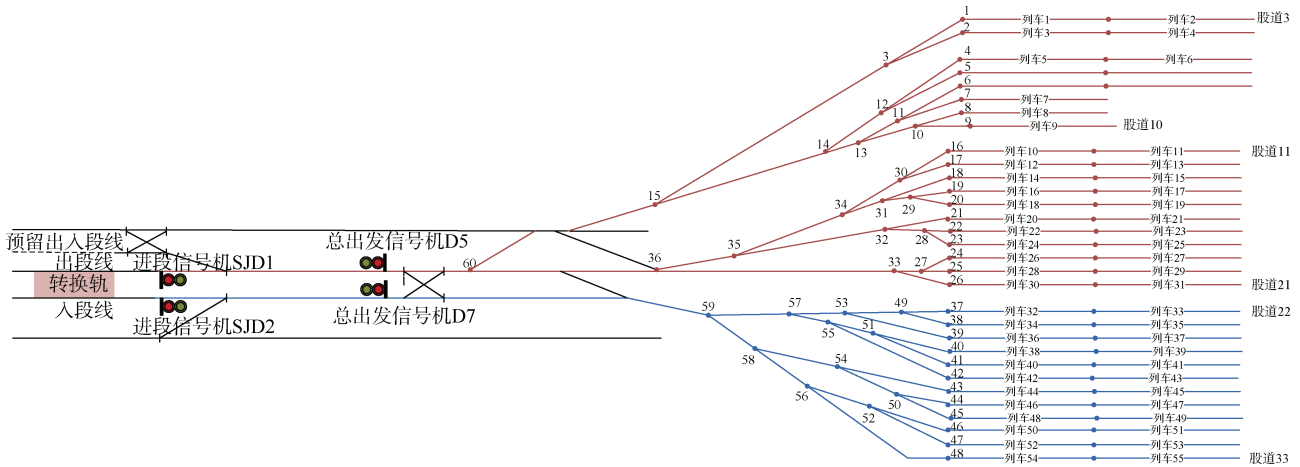


图 2 萝岗车辆段布置形式示意

Figure 2 Schematic of the Luogang depot layout

## 2.2 参数设置

根据萝岗车辆段近期出入段线与咽喉区关系，对萝岗车辆段发车进路可进行如下排列：进路 1 承担 L-3~L-10、L-11~L-21 股道共 31 列位的发车任务；进路 2 承担 L-22~L-33 股道共 24 列位的发车任务。各发车股道停放的列车数如表 1 所示，按照发车股道顺序对列车进行编号。参考相关行车资料，确定咽喉区通过能力计算的相关参数如下：列车在传统车辆基地咽喉区的平均运行速度为 12 km/h，在 ATC 车辆基地的平均运行速度为 17 km/h。进路准备时间为 30 s，司机信号确认时间为 20 s，平交道口一度停车时间为 30 s。列车长度为 72.3 m。进路 1 由 D5 总出发信号机控制，进路 2 由 D7 总出发信号机控制。

表 1 萝岗车辆段发车作业基本情况

Table 1 Basic information about the departure operation of the Luogang car depot

进路	出段进路编号	发车股道	占用次数
进路 1	1	L-3	2
	2	L-4	2
	3	L-5	2
	4	L-8	1
	5	L-9	1
	6	L-10	1
	7	L-11	2
	8	L-12	2
	9	L-13	2
	10	L-14	2

续表

进路	出段进路编号	发车股道	占用次数
进路 1	11	L-15	2
	12	L-16	2
	13	L-17	2
	14	L-18	2
	15	L-19	2
	16	L-20	2
	17	L-21	2
	18	L-22	2
	19	L-23	2
进路 2	20	L-24	2
	21	L-25	2
	22	L-26	2
	23	L-27	2
	24	L-28	2
	25	L-29	2
	26	L-30	2
	27	L-31	2
	28	L-32	2
	29	L-33	2

在 ATC 灭灯模式下，列车间的运行间隔为前车出清共用道岔的时间。依据萝岗车辆段的布置图，测量和计算列车间的运行间隔，得到的列车出清共用道岔走行距离和运行间隔部分如表 2 所示。模拟退火算法采用的相关参数取值分别为：初始温度 50 000、最低温度  $1 \times 10^{-8}$ 、退火系数 0.98、常数 K 为 1、每个温度



的迭代次数为 1 000。

表 2 部分列车间的运行间隔

Table 2 Departure interval between some trains

发车顺序	共用道岔	前车出清共用道岔的距离/m	运行间隔/s	发车顺序	共用道岔	前车出清共用道岔的距离/m	运行间隔/s
1-2	1	221.0	60.3	1-11	56	569.0	134.1
1-3	3	434.5	105.5	1-12	56	569.0	134.1
1-4	3	434.5	105.5	1-13	56	569.0	134.1
1-5	11	436.1	105.9	1-14	56	569.0	134.1
1-6	11	436.1	105.9	1-15	56	569.0	134.1
1-7	11	431.1	104.9	1-16	56	569.0	134.1
1-8	11	431.1	104.9	1-17	56	569.0	134.1
1-9	11	431.1	104.9	1-18	56	569.0	134.1
1-10	56	569.0	134.1	1-19	56	569.0	134.1

### 2.3 案例结果分析

#### 2.3.1 ATC 灭灯模式下咽喉区通过能力

基于以上数据设置，对模型进行求解，得到的列车最优发车顺序如表 3~4 所示。

优化结果中，进路 1 连续两列车的平均运行间隔为 113.7 s，总发车时间为 3 523.9 s；进路 2 连续两列车的平均运行间隔为 108.8 s，总发车时间为 2 611.9 s。根据车辆段能力计算公式<sup>[10]</sup>，在考虑 10% 的设备能力储备的情况下，萝岗车辆段的咽喉区通过能力为  $N_{咽喉} = [3600 \times (1 - 0.1) \times 31] / 3523.9 \approx 28$  列/h，发车频率为 2.1 min/列车。

#### 2.3.2 不同信号模式下咽喉区通过能力对比分析

对每条股道线进路走行里程进行统计，并据此计

算得到列车进路模式、列调结合模式和 ATC 点灯模式下各列车间的运行间隔，如表 5~6 所示。

表 3 ATC 灭灯模式下进路 1 的最优发车顺序

Table 3 Optimal departure sequence for route 1 in ATC lights-off mode

发车顺序	列车编号	发车顺序	列车编号	发车顺序	列车编号
1	1	12	14	23	24
2	2	13	13	24	23
3	3	14	12	25	25
4	4	15	15	26	28
5	5	16	19	27	26
6	6	17	17	28	29
7	7	18	18	29	27
8	8	19	16	30	30
9	9	20	20	31	31
10	10	21	21	—	—
11	11	22	22	—	—

表 4 ATC 灭灯模式下进路 2 的最优发车顺序

Table 4 Optimal departure sequence for route 2 in ATC lights-off mode

发车顺序	列车编号	发车顺序	列车编号	发车顺序	列车编号
32	42	40	39	48	45
33	36	41	41	49	52
34	34	42	38	50	51
35	33	43	43	51	54
36	35	44	48	52	44
37	32	45	46	53	53
38	37	46	49	54	50
39	40	47	47	55	55

表 5 各种模式下进路 1 列车间的发车间隔

Table 5 Train departure interval on route 1 under different modes

列车进路模式				列调结合模式				ATC 点灯模式			
列车编号	运行间隔/s	列车编号	运行间隔/s	列车编号	运行间隔/s	列车编号	运行间隔/s	列车编号	运行间隔/s	列车编号	运行间隔/s
1	296.9	17	281.9	1	249.8	17	234.8	1	191.0	17	180.4
2	296.9	18	288.5	2	249.8	18	241.4	2	191.0	18	185.1
3	287.3	19	288.5	3	240.2	19	241.4	3	184.3	19	185.1
4	287.3	20	287.6	4	240.2	20	240.5	4	184.3	20	184.5
5	294.2	21	287.6	5	247.1	21	240.5	5	189.1	21	184.5
6	294.2	22	287.3	6	247.1	22	240.2	6	189.1	22	184.3
7	285.8	23	287.3	7	238.7	23	240.2	7	183.2	23	184.3
8	287.0	24	287.6	8	239.9	24	240.5	8	184.0	24	184.5
9	286.1	25	287.6	9	239	25	240.5	9	183.4	25	184.5
10	290.3	26	287.6	10	243.2	26	240.5	10	186.4	26	184.5
11	290.3	27	287.6	11	243.2	27	240.5	11	186.4	27	184.5

续表

列车进路模式				列调结合模式				ATC点灯模式			
列车编号	运行间隔/s	列车编号	运行间隔/s	列车编号	运行间隔/s	列车编号	运行间隔/s	列车编号	运行间隔/s	列车编号	运行间隔/s
12	289.4	28	287.3	12	242.3	28	240.2	12	185.7	28	184.3
13	289.4	29	287.3	13	242.3	29	240.2	13	185.7	29	184.3
14	288.5	30	287.6	14	241.4	30	240.5	14	185.1	30	184.5
15	288.5	31	287.6	15	241.4	31	240.5	15	185.1	31	184.5
16	281.9	—	—	16	234.8	—	—	16	180.4	—	—

表6 各种模式下进路2列车间的发车间隔

Table 6 Train departure interval on route 2 under different modes

列车进路模式				列调结合模式				ATC点灯模式			
列车编号	运行间隔/s	列车编号	运行间隔/s	列车编号	运行间隔/s	列车编号	运行间隔/s	列车编号	运行间隔/s	列车编号	运行间隔/s
32	284.6	44	288.2	32	237.5	44	241.1	32	182.4	44	184.9
33	284.6	45	288.2	33	237.5	45	241.1	33	182.4	45	184.9
34	287.3	46	288.5	34	240.2	46	241.4	34	184.3	46	185.1
35	287.3	47	288.5	35	240.2	47	241.4	35	184.3	47	185.1
36	287.3	48	289.1	36	240.2	48	242.0	36	184.3	48	185.5
37	287.3	49	289.1	37	240.2	49	242.0	37	184.3	49	185.5
38	287.3	50	289.7	38	240.2	50	242.6	38	184.3	50	186.0
39	287.3	51	289.7	39	240.2	51	242.6	39	184.3	51	186.0
40	287.6	52	290.3	40	240.5	52	243.2	40	184.5	52	186.4
41	284.6	53	290.3	41	240.5	53	243.2	41	184.5	53	186.4
42	287.9	54	290.9	42	240.8	54	243.8	42	184.7	54	186.8
43	287.9	55	290.9	43	240.8	55	243.8	43	184.7	55	186.8

1) 列车进路模式。列车进路模式下，两列车的运行间隔为前车从停车列检库出发至出清转换轨出清点的运行时间。

由表5和表6可知，列车进路模式下，进路1连续2列车的平均发车间隔为288.5 s，总发车时间为8 942.9 s；进路2连续两列车的平均发车间隔为288.2 s，总发车时间为6 917.4 s。根据文献[10]的计算公式，考虑10%的设备能力储备的情况下，得到萝岗车辆段咽喉区通过能力为 $N_{咽喉} = [3600 \times (1 - 0.1) \times 31] / 8942.9 \approx 11$ 列/h，发车频率为5.3 min/列车。

2) 列调结合模式。列调结合模式下，两列车的行车间隔为调车进路和列车进路行车间隔的较大值。由表5和表6可知，进路1连续两列车的平均发车间隔为241.4 s，总发车时间为7 482.8 s；进路2连续2列车的平均发车间隔为241.1 s，总发车时间为5 787 s。根据文献[10]的计算公式，考虑10%的设备能力储备，得到萝岗车辆段咽喉区通过能力为 $N_{咽喉} = [3600 \times (1 - 0.1) \times 31] / 7282.8 \approx 13$ 列/h，发车频

率为4.6 min/列车。

3) ATC点灯模式。在ATC点灯模式下，列车在进路区域按照CBTC模式连续追踪，追踪间隔小于调车进路的发车间隔，因而列车间的发车间隔以调车进路间隔为主。由表5和表6可知，进路1连续2列车的平均发车间隔为185.0 s，总发车时间为5 737.9 s；进路2连续两列车的平均发车间隔为184.9 s，总发车时间为4 437.9 s。根据文献[10]的计算公式，考虑10%的设备能力储备，萝岗车辆段咽喉区通过能力为 $N_{咽喉} = [3600 \times (1 - 0.1) \times 31] / 5737.9 \approx 17$ 列/h，发车频率为3.53 min/列车。

## 2.4 不同信号模式下咽喉区通过能力对比

对于广州萝岗车辆基地，在列车进路、列调结合、ATC点灯和ATC灭灯模式下，列车的总出发时间和咽喉区通过能力如表7所示。

由表7可知，相较于传统车辆基地的列车进路和列调结合模式，ATC车辆基地的发车能力明显更大。此外，ATC车辆基地在ATC灭灯模式下的发车能力远

大于 ATC 点灯模式,能更好地满足正线的发车需求,进而提高早高峰正线的运营水平。

表 7 不同信号模式下列车总发车时间和发车间隔  
Table 7 Total departure time and interval of trains under different signal modes

列车信号模式	总发车时间/s	咽喉区通过能力/(列/h)
列车进路模式	8 942.9	11
列调结合模式	7 482.8	13
ATC 点灯模式	5 737.9	17
ATC 灭灯模式	1 973.9	28

### 3 结论

1) 本文针对车辆基地在 ATC 灭灯模式下的咽喉区通过能力计算问题,基于优化模型比较了不同发车顺序下列车的总发车时间,得到列车最优发车顺序和最小总发车时间,进而计算得到咽喉区通过能力。基于该方法,计算得到广州萝岗车辆基地在 ATC 灭灯模式下的咽喉区通过能力为 28 列/h,发车频率为 2.1 min/列车,验证了本文所提出方法的有效性。

2) 以广州萝岗车辆基地为研究对象,得到列车进路模式、列调结合模式、ATC 点灯模式、ATC 灭灯模式下车辆基地的咽喉区通过能力分别为 11、13、17 和 28 列/h。该结果表明 ATC 灭灯模式相较于其他 3 种模式,可以更有效地提高车辆基地咽喉区通过能力,满足正线运营需求。

#### 参考文献

[1] 杨普杰. 广州地铁五号线鱼珠车辆段早高峰出车能力分析 & 优化思考[EB/OL]. (2018-12-22)[2022-12-30]. <https://www.g3mv.com/thesis/detail/3281680>.

[2] 徐彰杰. 重庆轨道交通白居寺车辆段段内发车能力研究[J]. 都市快轨交通, 2021, 34(3): 65-69.  
XU Zhangjie. Capacity analysis of entrance/exit line from bajusi depot of Chongqing rail transit[J]. Urban rapid rail transit, 2021, 34(3): 65-69.

[3] 周磊姿, 曹耘文, 金之端. 上海地铁 ATC 车辆基地运营需求与管理[J]. 上海建设科技, 2017(6): 39-42.  
ZHOU Leizi, CAO Yunwen, JIN Zhidian. Operation demand and management of ATC vehicle base in Shanghai metro[J]. Shanghai construction science & technology, 2017(6): 39-42.

[4] 张雄, 李剑虹. 广州地铁三号线洛溪车辆段出入段线设计方案及能力分析[J]. 铁道工程学报, 2007, 24(4): 73-76.  
ZHANG Xiong, LI Jianhong. Design proposal and capacity analysis of entrance/exit line from luoxi depot of Guangzhou metro line 3[J]. Journal of railway engineering society, 2007, 24(4): 73-76.

[5] 刘娴, 胡华, 刘志钢, 等. 城市轨道交通停车场/车辆段的列车出段能力分析 & 计算[J]. 城市轨道交通研究, 2020, 23(11): 63-67.  
LIU Xian, HU Hua, LIU Zhigang, et al. Analysis and calculation of train exit capacity of urban rail transit stabling yard and depot[J]. Urban mass transit, 2020, 23(11): 63-67.

[6] 宋周敏, 刘葛辉, 张晨曦. 车辆段接轨站出入段作业能力与运营组织分析[J]. 山东科学, 2019, 32(6): 79-88.  
SONG Zhoumin, LIU Gehui, ZHANG Chenxi. Analysis of operating capacity and organization of access operation at depot junction station[J]. Shandong science, 2019, 32(6): 79-88.

[7] 黄志红. 车辆段/停车场增设全自动运行功能的分析[J]. 现代城市轨道交通, 2015(5): 4-6.  
HUANG Zhihong. Analysis of automatic train operation function of depot and parking yard[J]. Modern urban transit, 2015(5): 4-6.

[8] 汪小勇. 城市轨道交通自动化车辆段和停车场的关键功能分析[J]. 铁道通信信号, 2016, 52(2): 53-56.  
WANG Xiaoyong. Analysis of key functions of automatic depot and parking yard in urban rail transit[J]. Railway signalling & communication, 2016, 52(2): 53-56.

[9] 闫利军, 李宗斌, 卫军胡. 模拟退火算法的一种参数设定方法研究[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(1): 245-247.  
YAN Lijun, LI Zongbin, WEI Junhu. Study on parameter setting method for simulated annealing algorithm[J]. Journal of system simulation, 2008, 20(1): 245-247.

[10] 毛保华. 城市轨道交通规划与设计[M]. 3 版. 北京: 人民交通出版社, 2020.

(编辑: 王艳菊)