

城市轨道交通中影响折返效率的关键因素分析

李 鹏

上海电气泰雷兹交通自动化系统有限公司 上海 201206

摘要: 在城市轨道交通中,折返站的折返效率通常是本条线路的运营能力的瓶颈点,从信号系统角度出发,本文分析并归纳了在CBTC模式下折返过程中的关键步骤以及影响折返效率的关键因素,以及如何有效的提高折返效率,为信号系统设计提供参考。随着城市规模的不断增大,以及城市人口密度的高度集中,如何在有限的条件下尽可能的提高城市轨道交通的运营能力成为重中之重。然而在城市轨道交通的运营能力中,通常折返车站的折返能力会成为本条线路的折返效率乃至本条线路运能的瓶颈点。

关键词: 城市轨道交通;折返效率;进路;干扰点;轨道资源

Analysis of Key Factors Affecting Turn-back Efficiency in Urban Rail Transit

LI Peng

Shanghai Electric Thales Traffic Automation System Co., Ltd., Shanghai 201206

Abstract: In urban rail transit, the reentry efficiency of the reentry station is usually the bottleneck of the operation capability of the line. From the perspective of the signal system, this paper analyzes and summarizes the key steps in the reentry process in the CBTC mode and the factors that affect the reentry efficiency. The key factors and how to effectively improve the foldback efficiency provide a reference for signal system design. With the continuous increase of urban scale and the high concentration of urban population density, how to improve the operation capacity of urban rail transit as much as possible under limited conditions has become the top priority. However, in the operational capacity of urban rail transit, the turn-back capability of the turn-back station usually becomes the bottleneck of the turn-back efficiency of the line and even the transport capacity of the line.

Keywords: Urban rail transit; Turnaround efficiency; Approach; Interference point; Rail resources

1 折返过程

列车在折返站台的作业过程可以分为三部分:接车作业(列车进站)、折返作业(列车折返及换端)、发车作业(列车出站)。

接车作业:通过授权的进路,将列车从接车干扰点(根据系统当前的运营模式,后车的在该位置的正常进站过程不受前车作业的影响,不会因前车的作业导致后车非正常降速)接入车站并完成上下客的作业过程;

折返作业:通过授权的进路,列车从折返起始站台发车进入折返轨,并在折返轨完成换端后从折返轨驶出的作业过程;

发车作业:通过授权的进路,列车由折返轨出发驶入折返终端站台并完成上下客作业后,出清当前系统模式下该站台的安全防护距离;

由于折返站台的站型通常有两种;站前折返和站后折返。

站前折返:列车由区间进入终点站台完成上下客作业后,在本站台换端后完成折返的方式;

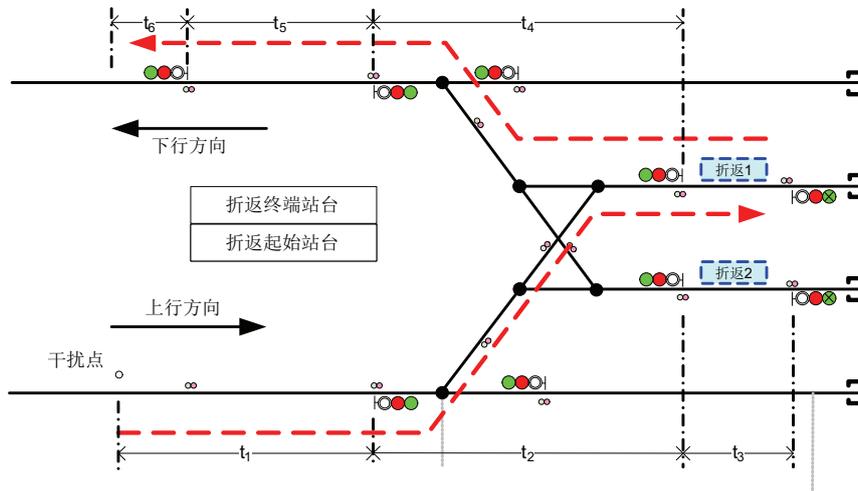
站后折返:列车由折返起始站台开始,通过折返轨进行换端后到达折返终端站台完成折返的方式。

2 折返效率

列车在连续追踪时,后车的折返过程不受前车运行干扰的情况下,在正常运营的过程中,列车从站台经过的最小间隔。

折返间隔取决于接车作业、折返作业和发车作业中用时最长的过程。

在相同停站时间的条件下,站后折返的效率要高于站前折返的效率,故本文中以站后折返的站型来举例分析。



按照列车运行过程，可以将列车按照运动轨迹进行如下时间分割：

t_1 ：列车由干扰点运行至折返起始站台的时间；

$t_{停}$ ：列车在折返实体站台（折返起始站台、折返终端站台）进行上下客作业的停站时间；

t_2 ：列车从折返起始站台驶出，运行至完全占用折返轨区段的时间；

t_3 ：列车从完全占用折返轨区段至列车在折返轨站台停准的时间；

$t_{换}$ ：列车在折返轨站台换端的时间；运行至完全占用折返轨区段的时间；

$t_{岔}$ ：道岔搬动及表示返回的时间；

t_{route} ：办理进路及列车收到进路的时间；

t_4 ：列车从转换轨站台驶出，运行至完全占用折返终端站台区段的时间；

t_5 ：列车从完全占用折返终端站台区段至列车在折返终端站台停准的时间；

t_6 ：列车从折返终端站台输出至列车完成出清站台防护距离的时间。

间隔控制区域		间隔时间 (s)
发车作业	前车从折返终端站台发车，出清站台安全防护距离后，后车移动授权延伸至折返终端站台，后车由折返轨运行至折返终端站台停车并完成上客作业后，具备发车条件。	$T_{发车} = t_6 + t_4 + t_5 + t_{停} + t_{route}$
通过比较上述三个作业间隔控制，该折返站折返间隔 $= \text{Max}(T_{接车}、T_{折返}、T_{发车})$		

通常情况下折返间隔的瓶颈点在于接车作业。

3 影响折返效率的主要因素

将影响折返效率的各个时间段缩短，可以通过提高列车的运行速度，缩短列车在折返期间的站停时间，以及让前车尽可能早的释放轨道资源使后车的对轨道资源的占用提前来实现。

下面将对各个主要因素进行分析。

3.1 列车速度

在折返过程中，可以将列车的速度分类为进站速度和过岔速度，该速度的ATP顶篷速度由土建条件及道岔型号所决定，如果将ATP速度尽可能的贴近ATP顶篷速度，列车将在折返运行中有效的减少折返时间。

根据系统安全制定模型，信号系统允许的最大运行速度需综合考虑速度误差、超速容限、系统反应时间、EB建立时间、牵引切除时间、失控加速度、坡度等，确保在极端情况下列车不突破土建及车辆的限定速度。

安全制定模型如下图：

系统设计速度计算公式：

$$V = [V_{max} - (a_{run\ away} + a_{grade}) * (T_{cut\ off} + T_{reaction\ time}) - a_{grade} * (T_{eb} - T_{cut\ off})] / (1 + \epsilon_v - V_{tolerance})$$

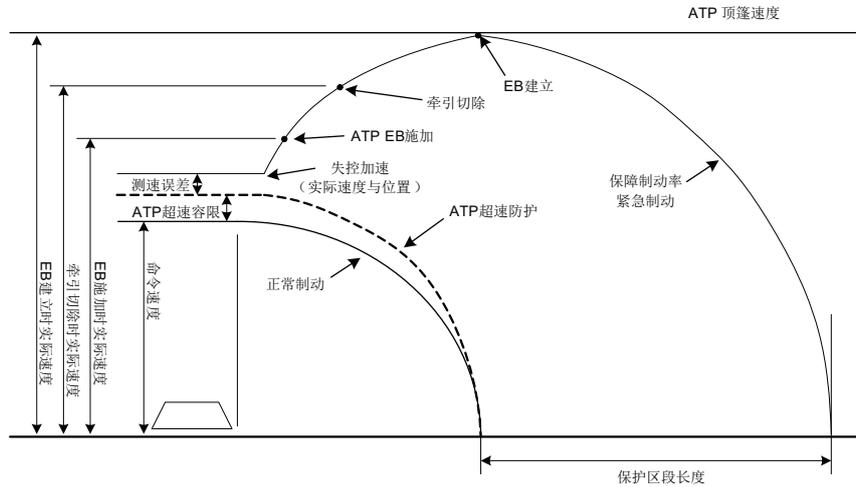
其中：

a_{grade} ：坡度重力加速度；

$a_{run\ away}$ ：失控加速度；

V_{max} ：ATP顶篷，该速度为轨道条件所决定；

间隔控制区域		间隔时间 (s)
接车作业	前车从折返起始站台发车，完全占用折返轨站台区段后，系统将后车进站防护区段内的道岔扳至相应位置后，后车的移动授权延伸至折返起始站台，后车由干扰点运行至折返起始站台停车并完成下客作业。	$T_{接车} = t_2 + t_{岔} + t_{route} + t_1 + t_{停}$
折返轨作业	前车从折返轨站台发车，完全占用折返终端站台区段后，系统将后车进折返轨的道岔扳至相应位置后，后车的移动授权延伸至折返轨站台，后车由折返起始站台运行至折返轨站台停车并完成换端，后车换端期间同时为该车办理从折返轨折出的进路。	$T_{折返} = t_4 + t_{岔} + t_{route} + t_2 + t_3 + t_{换}$



$V_{tolerance}$: 超速容限;

ε_V : 系统所采用测速传感器的测速误差;

$T_{cut\ off}$: 牵引切除时间;

T_{eb} : EB建立时间;

$T_{reaction\ time}$: 信号系统反应时间=0.376秒。

在折返站的轨道坡度条件由土建条件确定, 不易做出调整, 故可以认为 *agrade* 定值。从式中可以得出, 上坡较下坡相比, ATP命令速度可以更接近ATP顶篷速度; 失控加速度 *arun away* 主要与列车各个速度下的实时加速度相关, 为了让列车更快的相应牵引命令使其速度最早的到达目标速度, 各个车辆厂商会将列车的实时加速度增大, 列车的失控加速度则相应增大, 使得ATP命令速度远离ATP顶篷速度; ATP顶篷速度 V_{max} 在线路设计及道岔选型完成后, 确定的在系统发生最不利情况下列车不得超过的速度; 超速容限 $V_{tolerance}$ 是信号系统为了更容易控制车辆的速度使其不超过ATP制动曲线而设定的参数, 国内大部分系统将该值设定为3.6km/h, 可以将其设定为2.5km/h来实现精准控车并是ATP命令速度贴近与顶篷速度; 测速误差 ε_V 为设备固有误差, 可以认为定值; 牵引切除时间 $T_{cut\ off}$ 与EB建立时间 T_{eb} 是ATP命令速度计算中个关键因素, 在列车收到信号系统发送的EB施加命令时, 列车将实施牵引切除动作及EB建立动作, 但在车辆真正切除牵引前, 列车速度仍然以失控加速度和坡度重力加速度继续增大, 在车辆实际牵引切除后, 列车不再输出加速度的, 但在EB完全建立前(制动缸压力达到90%及以上), 列车速度仍然以坡度重力加速度继续增大。

3.2 过岔速度

在《城市轨道交通列车运行速度限制与匹配技术规范中》规定道岔速度如下表:

以9号岔(弹性可弯尖轨)为例, 其临界速度为40km/h, 以国内某地铁线路的车辆参数计算, ATP命令

道岔数号	尖轨类型	导曲线半径	道岔侧向通过速度 (km/h)		
			道岔直向通过速度 (km/h)	道岔设计速度	道岔临界速度
50 kg/m-1/7	普通尖轨	150	80	25	28
	弹性可弯尖轨	150	80	25	28
60 kg/m-1/9	普通尖轨	180	100	30	35
	弹性可弯尖轨	200	100	35	40
60 kg/m-1/12	弹性可弯尖轨	350	120	50	55

速度可以达到31km/h, 经优化将超速容限由3.6更改为2.5km/h, 牵引切除延时由0.771s更改为0.576后, ATP命令速度可提高至33km/h, 折返间隔可以缩短0.6s。

由上述计算可见, 通过对车辆对EB施加及建立的时间改变对过岔速度有较明显的优化, 但是对于折返效率的提升作用不明显。

3.3 进站速度

列车进站速度取决于线路等级及土建条件。在追踪折返的场景中, 若列车的进站速度较高, 接车进路的干扰点也将会距目标站台较远, 可以通过将进站前的速度适当降低使干扰点前移, 来优化折返效率。

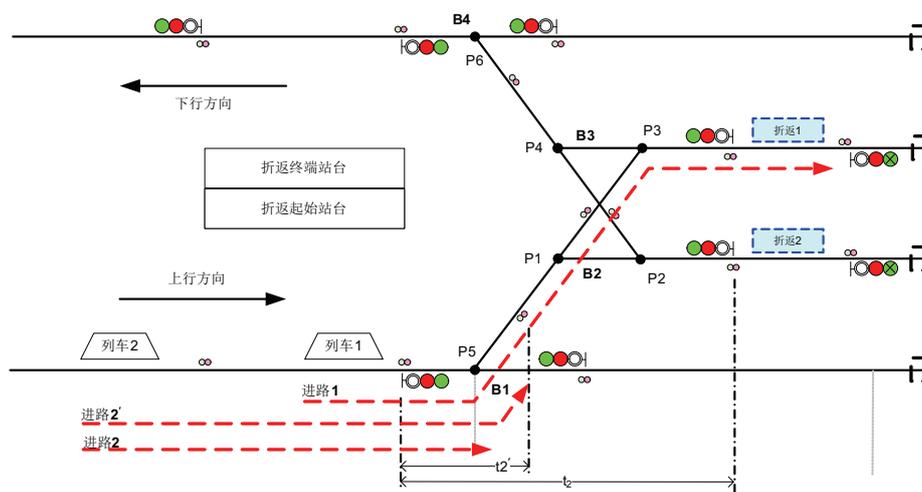
以站台限速50km/h为例, 为使干扰点前移将进站前400m位置的速度设置为50km/h, 使接车进路中的 t_1 减少, 将使折返效率提高4.4s, 但将会使列车的区间运行时间增加5.4s。

由上述计算可得, 通过将干扰点前移的方式对折返效率有明显改善, 在对旅行时间不敏感的项目中可以使用此方法提高折返效率。

3.4 时间

停站时间、道岔转动时间、以及进路办理及传输时间在折返效率中也有很多作用, 但是道岔转动时间在道岔选型已经确定后无法进行优化, 故从信号系统方面认

为道岔转动时间为定值。进路办理及传输时间，由系统的处理周期以及轨旁移动授权单元与车载系统的通信周期所决定，不同厂商对该值的定义基本相同，其具体数值不大于1s，对折返效率的影响较小，而优化的空间及成本较高，故不建议优化该时间。停站时间为列车在折返实体站台（折返起始站台、折返终端站台）进行上下客作业的时间，在折返效率计算表中，折返站停站时间的长短将会直接影响到该车站的折返效率，但是停站时间不应单一考虑折返效率，应综合考虑该站点的客流因素、运营策略、时刻表匹配等各个方面的因素平衡所得。为提高折返效率，在满足系统运能要求的前提下，应减小停站时间来提高折返效率。



如图中，列车1（前车）在通过进路1进行折返时，进路1将其覆盖的所有道岔进行锁闭，直到列车1出清了道岔区段B2时，道岔才可以解锁，待道岔P5转动至定位后，列车2（后车）的接车进路2才可以授权；如将列车2的接车进路设置为进路2'，只需列车1出清道岔区段B1时，无需道岔P5扳动即可立即为列车2排列接车进路。列车1将提前一个区段释放了对折返区域资源的独占，使列车2提前占用折返区域的轨道资源，并减少了道岔扳动时间。

按照该站型的轨道布置原则，由于轨距的不同导致轨道区段B2的长度略有差异，大致在70m左右，另由于列车出清区段B2时，该列车将近对准折返站台而速度较低，故列车出清B2区段的时间 $t_2-t_2'=13s$ ，这将使后车的提前 $t_2-t_2'+t_{岔}$ 收到进路，如动岔时间 $t_{岔}=10s$ 计算，优化后的接车作业时间较传统接车方式将较少23s。

根据上述分析，优化后的接车进路的授权方式将对折返间隔有显著提高。

另若由于运营限制或其他轨道条件限制，不允许将接车进路防护距离中的道岔防护在侧向，则可以将道岔区域进行精细化管理，让道岔区域的资源尽早释放用于

3.5 轨道资源

目前国内在线运营的线路中，列车的折返进路都是对轨道资源的独占，尤其是在道岔区域，覆盖道岔的进路需要等到列车出清整条进路才能解锁，部分系统对进路解锁做了优化，使覆盖岔区的进路可以按照进路中区段的占用出清逻辑顺序来提前解锁进路，但是对于道岔的扳动，如果道岔所在区段仍然被列车占用，则该道岔无法扳动，系统没有按照列车的实时位置以及道岔的位置关系来进行计算判断，提前释放轨道关键资源，使得后续的折返列车等待前序列车完全释放轨道资源后，才能进行折返作业，严重阻碍了折返效率的提高。所以提前释放轨道关键资源，对提高折返效率有关键作用。

提高折返效率。

4 结语

折返车站的折返效率目前已经成为了城市轨道交通运行线路的折返效率乃至运营能力的主要瓶颈之一，经过分析计算及现场验证：通过提高列车的过岔速度、前移干扰点的方式对折返效率的提高较小；对于旅行时间不敏感的线路，可以通过缩短折返车站的停站时间来小幅度的提高折返效率；另可以通过在信号系统中优化进路授权及道岔区域解锁的方式，使“独占”的轨道资源提前释放，显著提升折返车站的折返效率，大幅度增大城市轨道交通运行线路的运营能力。

参考文献：

- [1] 马能艺，一种常用折返站型的折返能力改进方案[J].城市轨道交通研究，2013（2）：99.
- [2] 王珮瑶，郭进.基于列车追踪仿真的城市轨道交通折返能力的研究[J].铁路计算机应用，2011，20（12）：54-57
- [3] JT/CAMET 04015-2019城市轨道交通列车运行速度限制与匹配技术规范[S]，2019.