

上海机场联络线列车自动折返方案研究*

杨 俐

(上海申铁投资有限公司, 200003, 上海//高级工程师)

摘 要 CTCS-2(中国列车运行控制系统 2 级)+ATO(列车自动运行)系统应用于市域(郊)铁路时,存在线路折返能力不足的问题。以上海机场联络线为研究对象,对 CTCS-2+ATO 制式下的列车折返作业进行分析,在国内首次提出 CTCS-2+ATO 下 3 min 内完成列车自动折返的技术方案。该方案建立了 CTCS-2+ATO 下的列车自动折返流程,并提出列车自动折返的信号-车辆接口方案。仿真验证结果表明:该方案的列车自动换端时间在 20 s 以内,列车自动折返全过程可在 3 min 内完成。

关键词 市域铁路;上海机场联络线;信号系统;中国列车运行控制系统 2 级;列车自动折返

中图分类号 U284.482

DOI:10.16037/j.1007-869x.2022.11.003

Research on Automatic Train Turn-back Scheme of Shanghai Rail Transit Airport Link Line

YANG Li

Abstract When the CTCS-2 (Chinese Train Control System Level 2) + ATO (automatic train operation) system is applied to urban (suburban) railways, the problem of insufficient train turn-back capacity comes out. In this paper, based on Shanghai Rail Transit Airport Link Line, the current situation of train turn-back under CTCS-2 + ATO system is analyzed, and a technical scheme of automatic turn-back within 3 min under CTCS-2 + ATO system is proposed for the first time in China. In the scheme, the automatic turn-back process is established and a signal/vehicle interface scheme is put forward. Simulation results show that the automatic train switching of the scheme is within 20 s, and the whole process of train automatic turn-back can be completed within 3 min.

Key words urban railway; Shanghai Rail Transit Airport Link Line; signal system; CTCS-2; automatic train turn-back

Author's address Shanghai Shentie Investment Co., Ltd., 200003, Shanghai, China

1 项目概况

上海机场联络线是上海第一条新建的市域铁路,从虹桥站至上海东站全长 68.63 km,共设车站 9 座、动车运用所 1 处,其线路走向如图 1 所示。该线与上海市域铁路嘉闵线、南汇支线(又称为“两港快线”)互联互通,并在三林南站预留了与国家铁路(以下简称“国铁”)互联互通的线路条件,拟通过南站支线(三林南路至铁路上海南站)实现与金山铁路线、国铁网的互联互通。三林南站以东至上海东站区域为国铁城际列车和上海市域列车共线运营范围。上海机场联络线采用 25 kV 交流架空接触网供电,列车采用市域动车组(4 节编组、8 节编组列车混跑),设计最高运行速度为 160 km/h。



图 1 上海机场联络线走向示意图

Fig. 1 Route diagram of Shanghai Rail Transit Airport Link Line

上海机场联络线信号采用 CTCS-2(中国列车运行控制系统 2 级)+ATO(列车自动运行)系统,主要包括 CTC(调度集中)、CTCS-2、ATO、车站联锁、集中监测等系统。线路区间采用 ZPW-2000 系列无绝缘轨道电路。这些系统均接入新建的上海市域铁路调度中心。

CTCS-2+ATO 系统于 2016 年起在珠江三角洲的城际莞惠线、佛肇线等线路上投入使用,其升级版本 CTCS-3(中国列车运行控制系统 3 级)+ATO 于 2019 年在京张(北京—张家口)高速铁路线上得以首次应用。CTCS(中国列车运行控制系统)与

* 上海申铁投资有限公司科研课题(SHST-2021-ZSS-230)

ATO 相结合,实现了列车的自动驾驶、精确停车、车门与站台门联动等功能,但其折返仍采用人工换端方式,站后折返作业用时大于 10 min。

面对 CTCS-2 + ATO 下线路折返能力不足问题,上海机场联络线建设方牵头组织开展了市域铁路 CTCS-2 + ATO 下列车自动折返能力的研究。本研究以现有信号系统设备和中国高速铁路 ATO 技术体系为基础,结合上海机场联络线的需求,进行了系统的研究和探索,首次提出了 CTCS-2 + ATO 系统 3 min 内完成列车自动折返的技术方案,并仿真验证了该方案的可行性。

2 CTCS-2 + ATO 下的列车折返问题

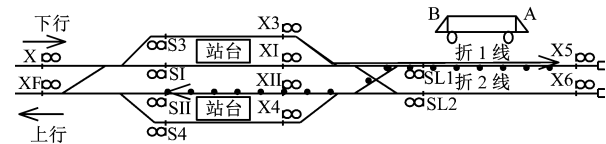
2.1 线路折返能力不足问题分析

上海机场联络线建设方牵头组织设计院、设备厂家等单位,对市域铁路 CTCS-2 + ATO 下的列车自动折返功能进行研究。研究发现,珠江三角洲的城际铁路中,信号系统采用 CTCS-2 + ATO 的线路的站后折返作业时间均大于 10 min,其中,司机换端走行时间、换端后车地通信建立时间及开机注册时间均较长。即使采用双司机配置方式,车载人工换端用时也需 120 s。因此,线路折返能力不足已成为制约上海机场联络线全线开行最小行车间隔 3 min 运行方案的瓶颈。

2.2 确定研究对象

在列车的折返过程中,若列车可自动折返,则可减少司机操作时间,进而减少列车折返耗时。考虑到目前 CTCS-2 + ATO 仍处于 GoA2(半自动化列车运行),列车自动折返需由司机发起操作。因列车采用的原地自动折返方式(即列车进入股道后,关闭本务端驾驶台并激活另一端驾驶台,列车准备向另一个方向发车的折返方式)相对较简单,本文不予以讨论,仅以机场联络线的上海东站为例,对列车站后折返方式进行阐述。

如图 2 所示,本务端(以下称为“A 端”)的车载设备在站台股道接收到司机下发的自动折返发车指令后,ATO 车载设备自动驾驶列车从站台股道驶入折 1 线内并停稳。待两端车载设备完成控制权交接后,原休眠端(以下称为“B 端”)ATO 车载设备自动驾驶列车驶出折 1 线,列车运行到站台股道停稳、停准。



注: X 为下行进站信号机; XF 为下行反向进站信号机; SL 为上行接车进路信号机; X/XF/SL 字母后数字均为信号机编号。

图 2 上海东站列车站后折返示意图

Fig. 2 Schematic diagram of train turn-back after Shanghai East Railway Station

3 列车自动折返研究的主要成果

上海机场联络线 CTCS-2 + ATO 依据 TJ/DW 202—2019《高速铁路 ATO 系统总体暂行技术规范》系列技术标准进行设计。《高速铁路 ATO 系统总体暂行技术规范》在珠江三角洲城际铁路线 ATO 实际运行效果基础上进行了优化,取消了 CCS(通信控制服务器),相关功能由 TSRS(临时限速服务器)实现,其他信号子系统的地面设备不变^[1]。上海机场联络线 CTCS-2 + ATO 下列车自动折返的研究在此基础上开展。

3.1 首次提出了 CTCS-2 + ATO 下 3 min 内完成列车自动折返的技术方案

无论原地自动折返还是站后自动折返,列车折返的关键均是自动换端,因此,本文研究的重点为两端车载自动切换和换端期间保持车地通信。

3.1.1 两端车载自动切换

两端车载自动切换的实现方式有 2 种:方式 1 为 A 端—B 端通过硬线交互信息;方式 2 为 A 端—B 端通过无线通信交互信息^[2]。考虑到无线通信延时对换端效率的影响,本文采用方式 1。与方式 2 相比,方式 1 的实时性、可靠性更高,在动车组头部和尾部驾驶室内敷设 2 根不同物理路径的贯通线,贯通线优先采用车辆 MVB(多功能车辆总线)。A 端—B 端的交互信息主要包括车载内部状态、换端后的车次号、列车车长、司机号、轨道区段载频信息等。采用两端车载自动切换方式,可节省司机开机人工注册时间。

3.1.2 换端期间车地通信的保持

在高速铁路 ATO 技术体系中,TSRS 负责 ATO 车载与 CTC 之间的联系。本研究采用 B 端提前与 TSRS 建立连接的方式来保持换端期间的车地通信,进而节省 TSRS 与 A 端断开后再与 B 端建立通信会话的时间。该方式需 TSRS 支持与休眠端车载

保持连接的功能。

列车自动折返作业是一个典型的独立运营场景。为此,本研究新增了 TSRS 至车载折返计划的信息包【CTCS-47】,以及 CTC 至 TSRS 的折返计划信息。列车进入折返车站前,CTC 以 6 s 间隔周期性地向 TSRS 发送折返计划信息,TSRS 立即将信息转发给车载设备。列车自动折返完成后,CTC 停止

发送折返计划信息。此外,本研究还新增了车载至 TSRS 折返状态反馈的信息包【CTCS-48】,以及 TSRS 至 CTC 折返状态反馈信息。列车进入自动折返状态时,车载以 6 s 间隔周期性地向 TSRS 发送折返状态反馈信息,TSRS 立即将信息转发给 CTC,以表明列车处于自动折返状态。信息包【CTCS-47】的格式如表 1 所示。

表 1 TSRS 至车载折返计划信息包【CTCS-47】的格式
Tab. 1 TSRS to on-board turn-back plan information packet 【CTCS-47】 format

序号	变量名	位数	变量说明	变量取值
1	NID_XUSER	9	信息包标识码	取值为“47”
2	Q_DIR	2	验证方向	取值为“2”表示正向、反向运行均有效
3	L_PACKET	13	信息包位数	取值取决于信息包的具体内容
4	M_TBPLAN	2	折返计划	取值为“1”表示取消折返计划;取值为“2”表示实施站后自动折返计划;取值为“3”表示实施原地自动折返计划;其他取值无效
5	NID_TBDEPART- TRACK	24	原地自动折返的股道 编号或站后自动折返 发车的股道编号	填写地面应答器提供的信息包【CTCS-13】中的股道编号,其格式为:大区 编号(7 bit) + 分区编号(3 bit) + 车站编号(6 bit) + 车站序号(3 bit) + 股 道序号(5 bit)。“0xFFFFFFFF”表示股道编号未知
6	TrainNo_TBCAB	32	换端后的车次号	自动折返换端后列车激活端的车次号,其格式参见 Q/CR 844—2021 《CTCS-2/3 列车车载设备人机界面(DMI)显示规范》附录 B(资料性):车 次号编码方案
7	NID_TBARRIV- ALTRACK	24	原地自动折返的股道 编号或站后自动折返 终到的股道编号	填写地面应答器提供的信息包【CTCS-13】中的股道编号,其格式为:大区 编号(7 bit) + 分区编号(3 bit) + 车站编号(6 bit) + 车站序号(3 bit) + 股 道序号(5 bit);“0xFFFFFFFF”表示股道编号未知
8	M_TASK	2	是否办理上下客作业	取值为“1”表示办理上下客;取值为“2”表示不办理上下客;其他取值无效

3.1.3 其他

如上文所述,列车自动折返需同步修改信号车载设备、TSRS、CTC 及 TCC(列车控制中心)的技术条件。列车站后自动折返换端完成且车载处于自动折返状态时,信号系统应支持车载设备从 PS(部分监控)模式进入 AM(自动驾驶模式)。另外,上海机场联络线移动通信系统采用 LTE-M(城市轨道交通车地综合通信系统)为市域列车提供服务,信号系统还应支持 LTE-M 实现车地无线通信。

针对上海机场联络线 4 节编组和 8 节编组列车混跑情况下 4 节编组列车的快速折返问题,本研究对信号机、轨道电路、应答器等地面设备进行多方案比选后,得出设置中间分隔信号机以区分长、短折返进路的优化布置方案。

3.2 建立了 CTCS-2 + ATO 下的列车自动折返流程

列车原地自动折返的核心流程是自动换端,与列车站后自动折返相比较为简单,故本文仅描述列车站后自动折返流程。列车的站后自动折返流程

主要包括列车从站台股道运行至折返线(以下简称“进折返线”)、列车自动换端及列车从折返线运行至站台股道(以下简称“出折返线”)3 个环节。

3.2.1 进折返线

CTC 提前 1 个车站或在到达折返站的前 1 个区间通过 TSRS 向车载设备发送列车运行计划(含折返计划)。列车位于折返车站的站台股道时,CTC 通过 TSRS 收到列车停稳且停准的信息后,根据折返计划通过联锁办理列车自动折返的发车进路,并通过 TSRS 周期性地向车载设备发送列车运行计划。车载设备收到折返计划后,通过 DMI(车载人机界面)向司机发出自动折返提示。车载设备判断列车自动折返条件满足后,令 A 端驾驶台的自动折返按钮指示灯绿灯闪烁。

司机按压 A 端驾驶台上的“自动折返按钮”后,车载设备进入列车自动折返状态。车载设备控制 A 端驾驶台的自动折返按钮指示灯绿灯亮起,并在 DMI 上提示司机可关闭 A 端驾驶台。

司机关闭 A 端驾驶台并拔出钥匙,车载设备根

据列车运行计划判断得知折返方式为站后自动折返。车载设备检查确认满足自动折返条件后,ATO 自动启动列车运行至折返线,此时按钮保持绿灯亮起。

3.2.2 自动换端

列车到达折返线停稳后,A 端 ATO 车载设备通过 TSRS 向 CTC 发送列车已停稳信息。CTC 按折返计划通过 CBI(计算机联锁)办理列车自动折返的接车进路。A 端车载确认具备折返条件后,向 B 端发送换端请求及相关数据。在接收到 B 端车载设备发来的准备就绪信息后,A 端向 B 端发送换端结束信息,并进入休眠模式。

B 端 ATO 车载设备接收到 A 端发来的列车自动折返换端数据后,点亮 B 端驾驶台的自动折返指示灯,进入待机模式。在接收到 A 端发来的换端结

束确认信息后,B 端车载设备通过 TSRS 向 CTC 发送换端状态信息,并进入 PS 模式。

3.2.3 出折返线

当列车具备发车条件后,B 端车载设备自动进入 PS 下的 ATO 模式,列车在折返线上限速 45 km/h 运行。ATO 控制列车运行一定距离(暂定为 20 m)后收到折返进路信号机处的应答器组报文,此时列车转为 FS(完全监控)模式下的 AM。列车运行至站台股道停稳、停准后,ATO 根据折返计划自动打开车门进行上下客作业。

3.3 提出了 CTCS-2 + ATO 下列车自动折返的信号-车辆接口方案

列车自动折返功能的实现,离不开车辆与信号的紧密配合,因此,需新增 ATP、ATO 与车辆继电器输入/输出接口,如表 2 所示。

表 2 列车自动折返新增的信号-车辆继电器接口			
Tab.2 New relay interface of automatic train turn-back between signal and vehicle			
接口名称	接口方式	接口描述	接口类型
折返激活	干接点/电平	干接点断开/电平取值为“0”时表示车载设备未输出折返激活信号,取值为“1”时表示车载设备输出折返激活信号	ATP 输出
折返指示灯	电平	电平取值为“0”时表示折返指示灯熄灭,取值为“1”时表示折返指示灯亮	ATO 输出
折返激活反馈	干接点/电平	干接点断开/电平取值为“0”时表示车辆未输出折返激活反馈信号,取值为“1”时表示车辆输出折返激活反馈信号	ATP 输入
折返按钮	电平	电平取值为“0”时表示折返按钮未被按下,取值为“1”时表示折返按钮被按下	ATO 输入

注:ATP——列车自动防护。

司机按压自动折返按钮后,车载设备输出折返激活信号有效的信息,司机拔出 A 端钥匙。列车收到折返激活信号且检测到 A 端的车钥匙被拔出后,将折返激活信号作为等效钥匙输出信息,激活 B 端驾驶室(站后自动折返时还需输出“方向手柄前向”信号),同时给出折返激活反馈信号和组合零位信号,以继续保持 A 端驾驶室的占用状态。上述的列车输出信号均应在 500 ms 内给出。

列车任意一端检测到驾驶台插入钥匙以激活驾驶台时,列车给出相应驾驶台激活/休眠和方向手柄位置信号,并撤销折返激活反馈信号。

当车载设备确认具备自动折返条件时,车载将相关信息输出至列车,列车控制 A 端的自动折返按钮指示灯,使其保持稳定的亮绿色闪烁状态。司机按下自动折返按钮后,A 端的自动折返按钮常亮绿灯;换端结束后,A 端的自动折返按钮指示灯熄灭,

B 端的自动折返按钮常亮绿灯;B 端退出列车自动折返状态时,B 端的自动折返按钮指示灯熄灭。

3.4 实验室仿真验证平台的验证结果

列车控制车载设备的厂家各自独立搭建了 3 min 内完成列车自动折返的实验室半实物仿真平台,用以验证列车自动折返的技术条件。其中:车载、TSRS、TCC 均采用真实设备,轨道电路、应答器均采用仿真设备,CTC、CBI 结合各自情况选用真实/仿真设备。

3.4.1 基础数据

仿真采用上海机场联络线初步设计阶段的相关数据。其中,车辆的主要参数如表 3 所示。

3.4.2 列车自动折返模型

根据列车站后自动折返的流程,单列车折返时间 $T_{\text{单}}$ 主要包括自动折返发车进路办理时间 T_1 、列车进折返线停稳时间 T_2 、换端时间 T_3 及自动折返

表 3 上海机场联络线车辆主要参数

Tab.3 Main vehicle parameters of Shanghai Rail Transit Airport Link Line

参数	取值
车辆长度/mm	25 250(头车),25 000(中间车)
车辆宽度/mm	3 300
车辆高度/mm	3 880
车辆固定轴距/mm	2 500
车辆定距/mm	17 500
车轮直径/mm	860(新轮),790(全磨耗车轮)
轴重/t	≤17
列车最高运行速度/(km/h)	160
列车平均起动加速度/(m/s ²)	≥1.00(3M1T),≥0.80(2M2T)
列车平均加速度/(m/s ²)	≥0.44(3M1T),≥0.38(2M2T)
列车常用制动平均减速度/(m/s ²)	≥1.00
列车紧急制动平均减速度/(m/s ²)	≥1.20
列车制动时冲击极限/(m/s ³)	≤0.75

注:3M1T 指 3 动 1 拖;2M2T 指 2 动 2 拖;制动时冲击极限用以表述列车制动时 1 s 内加速度的变化率。

接车进路办理时间 T_{31} 、列车出折返线至站台股道停稳停准时间 T_4 。其计算式^[3]为:

$$T_{\text{单}} = T_1 + T_2 + \max(T_3, T_{31}) + T_4 \tag{1}$$

列车的站后折返若考虑交替折返,可根据不同区段的占用冲突状态,列车折返间隔 $T_{\text{折}}$ 应从到达站台列车到达间隔 T_{D1} 、折返线列车到达间隔 T_{D2} 及出发站台列车到达间隔 T_{D3} 中取最大值:

$$T_{\text{折}} = \max(T_{D1}, T_{D2}, T_{D3}) \tag{2}$$

3.4.3 仿真验证结果

设备厂家对 CTCS-2 + ATO 在上海东站的列车站后自动折返进行了仿真,表 4 为该线 8 节编组列车自动折返仿真结果。

表 4 CTCS-2 + ATO 下 8 节编组列车站后自动折返仿真结果

Tab.4 Simulation results of 8-car marshalling train automatic turn-back under CTCS-2 + ATO system

设备厂家	列车自动换端时间/s	$T_{\text{单}}/\text{s}$	$T_{\text{折}}/\text{s}$
1	12.00	156.00	165.00
2	13.00	180.00	157.65
3	19.00	168.00	160.00
4	18.00	175.70	164.00

4 节编组列车和 8 节编组列车在线上混跑时,由于 8 节编组列车折返时的走行距离较长,因此,线

路折返能力受 8 节编组列车限制。从表 4 可知:本研究建立的列车自动折返技术方案是可行的,CTCS-2 + ATO 下列车自动换端时间在 20 s 以内,因此,列车自动折返全过程可以在 3 min 内完成。

3.5 制定了列车自动折返运营场景故障时的处置措施

本研究还梳理了列车自动折返过程中可能出现的设备故障及误操作等情况,基于这些运营场景的故障现象描述,制定了操作流程建议及处置措施,以确保列车原地自动折返和站后自动折返不成功时能有效地减少对运营的影响。

4 结语

国铁线路虽然没有列车自动折返的功能需求,但 CTCS + ATO 用于市域或城际铁路高密度运营时,列车自动折返功能不可缺少。本文提出的 CTCS-2 + ATO 下列车自动折返的功能需求、技术条件已作为技术要求,纳入上海市域铁路机场联络线信号系统相关设备采购要求中,并制定了与之匹配的运营场景及故障处置措施,为上海机场联络线行车规则的制定奠定了基础。此外,本文提出的 CTCS-2 + ATO 下列车自动折返技术条件拟被中国铁道学会标准《市域铁路列车运行控制系统总体技术规范》采用,有望推广至全国范围内市域(郊)铁路建设中。

参考文献

[1] 徐铁劼. CTCS-2 + ATO 城际列控系统与高速铁路 ATO 系统差异性及应用趋势探讨[J]. 铁路通信信号工程技术,2021(3):37.
XU Yijie. Discussion on differences and application trends of CTCS-2 + ATO intercity train control system and high-speed railway ATO system[J]. Railway Signalling & Communication Engineering,2021(3):37.
[2] 王栋,刘实秋. 城际铁路应用无人自动折返技术研究[J]. 铁路通信信号工程技术,2018(12):47.
WANG Dong, LIU Shiqiu. Study on application of automatic turn-back technology in intercity railways [J]. Railway Signalling & Communication Engineering,2018(12):47.
[3] 李莹莹,张晨,刘栋青. 市域铁路无人自动折返仿真模型及实验验证[J]. 铁道技术标准(中英文),2021(12):1.
LI Yingying, ZHANG Chen, LIU Dongqing. Simulation model and experimental verification of automatic turn-back technology of sub-urban railways [J]. Railway Technical Standard(Chinese & English),2021(12):1.

(收稿日期:2022-04-10)