

调车机车自动驾驶技术研究——控制条件与控制模式

刘晶¹ 陈首昆² 李彬³

1. 北京全路通信信号研究设计院集团有限公司 北京 100070;

2. 中国铁路广州局集团有限公司机务部 广州 510180; 3. 广深铁路股份有限公司江村车站 广州 510000

DOI:10.12238/ems.v7i9.15242

[摘 要] 本文对铁路调车机车自动驾驶的现状、标准、问题等方面进行了研究,并根据对现场作业流程、特点、和影响因素的分析,制定了一套调车机车自动驾驶的应用条件和控制模式,旨在为铁路调车机车自动驾驶的应用和推广提供参考。

[关键词] 调车机车; 自动驾驶; 控制条件; 控制模式

Abstract: The article conducts research on the current status, standards, and issues of automatic driving for railway shunting trains. Based on an analysis of on-site operation processes, characteristics, and influencing factors, a set of application conditions and control modes for automatic driving of shunting trains is formulated, aiming to provide a reference for the application and promotion of automatic driving for railway shunting trains.

Keywords: shunting train; automation driving; operation condition; operation mode

1. 引言一

1. 研究背景

1.1 铁路车站与调车

车站是铁路运输的基层生产单位,它集中了与运输有关的各项技术设备。据统计,我国拥有内燃机车约1.2万台,货车约57万辆^[1],在我国铁路货车一次全周转时间中,车辆在站作业和停留时间约占60%~70%^[2]。因此,合理地布置和有效地运用车站和枢纽的各项设备,保障车站运输的安全性,提高车站运转效率,提升车站自动化、信息化程度,加速机车车辆周转,降低人员劳动强度,是降低运输成本的关键环节之一。

目前,国内调车机车的自动化、信息化建设水平异较大。比较先进的车站,如广州局集团的江村站、怀化西站,成都局集团的成都北站等,已基本实现了调机作业信息化,并在信息化的基础上实现了行车安全防护,有效的避免了行车安全事故,同时,在保证行车安全的前提下,已实现了部分作业的自动驾驶。而建设程度相对落后的车站,很多还处在车-地互相独立,没有有效联动联控的水平,司机-调车组-调度员之间仅靠对讲机传递作业信息。

随着基础技术和通用技术的快速发展,北斗卫星定位、5G无线通信、环境感知识别、数字孪生、人工智能AI训练等新技术逐步得以应用,使得调车机车自动控制领域正在向着更安全、更高效、更节约的方向快速发展,自动驾驶、无人驾驶已经不再是遥不可及的空中楼阁,正在一步一步照进现实。

1.2 调车机车运行特点

在铁路运输生产过程中,除列车在车站的到达、出发、通过以及在区间内运行外,凡机车车辆进行一切有目的移动统称为调车。调车是为了达到解体、编组列车的目的,进行摘挂、转场、整场、调移、取送车辆以及机车的对位、转线、出入段等作业而使机车车辆在站线或其他线路上移动。它是

铁路行车工作的基本内容之一。

2. 文献综述

2.1 国际方面

当前国外的自动驾驶系统主要面向长大线路货运或多级重联同步控制方向。美国GE公司的重联机车无线遥控系统(LOCOTROL)广泛应用于世界各国,在中国的大秦运煤专线引进的就是GE公司的LOCOTROL技术,解决了多机车同步控制重载列车运行的操纵问题,于2006年开始开行两万吨列车。美国GE公司开发的Trip Optimizer(TO)系统在美国批量运用,累计装车7000余套,但该系统在机车速度大于15km/h时才被允许进入,当TO系统获得控制权后,仅控制机车的牵引和电制动(不控制空气制动系统)。庞巴迪公司研制的InterFLO系统,在智利艾尔特尼恩特铜矿、瑞典基律纳铁矿等处已进行了列车自动控制的研究和试验。澳大利亚力拓公司的机车自动驾驶系统AutoHaul在位于澳大利亚西部的皮尔巴拉(Pilbara)地区的重载铁路上实现了自动化运营。^[2]

2.2 国内方面

国内铁路机车自动驾驶技术在近几年取得了一定的发展。由于城轨系统的运营环境相对简单,列车车辆操控难度相对较低,因此目前国内外轨道交通行业的自动驾驶技术主要集中在城市轨道交通领域。在城际(市域)铁路中,已推广使用CTCS2+ATO的驾驶模式。在货运机车领域,由于受货运机车控制复杂性和工况复杂等因素制约,实现完全自动驾驶的应用暂时较少,研究方向主要集中在优化操纵与辅助驾驶等方面。2020年由北京全路通信信号研究设计院集团有限公司研制的货运站场自动驾驶系统,在鞍钢股份有限公司鲅鱼圈钢铁分公司范屯站75km线路上得以应用,实现了站场大部分调车作业自动驾驶和部分特定作业遥控驾驶。中国铁道科学研究院集团有限公司研制的调机自动驾驶系统,在朔黄铁路黄骅港站实现了站场调车作业自动驾驶。中冶赛迪集团有限公司在湛江钢铁实现了铁水运输的自动驾驶。

2.3 标准方面

标准方面，与调车机车自动驾驶相关度较高的标准有国际电工委员会（IEC）发布的国际标准——城市轨道交通管理和指挥控制系统-第一部分-系统原理和基本概念（IEC 62290-1 2014 Railway applications - Urban guided transport management and command /control systems - Part 1: System Principles and fundamental concepts）。该标准将列车运行控制系统自动化定义为 5 个等级 GOA0~GOA4 (Grade of Automation)。

GOA0：视距列车驾驶（On-sight train operation）。在该自动化等级下，列车完全由驾驶员人工驾驶，驾驶员负有全部驾驶责任，不需要系统来监督驾驶行为。

GOA1：非自动化驾驶（Non-automated train operation）。在该等级下，由驾驶员负责瞭望线路和列车驾驶，自动驾驶系统负责监督驾驶员的驾驶行为，在必要时系统可直接实现停车。系统对驾驶的监控，可以是间断性的或是连续性的，但对于列车起动、发车等行车条件的检查由驾驶员负责。

GOA2：半自动驾驶（Semi-automated train operation）。

在该等级下，由自动驾驶系统控制列车加速、减速、制动，并对列车速度进行持续监控，遇危险时自动停车。在该等级下驾驶员负责瞭望线路、确认信号、检查行车条件等工作，必要时采取停车措施应对行车风险。

GOA3：无司机驾驶（Driverless train operation）：在该等级下，车上不再设置驾驶员岗位，所有列车运行控制均由自动驾驶系统完成，包括瞭望线路、障碍物识别、确认信号、检查行车条件等工作。但车上仍需安排值乘人员，以处理特殊和异常情况。

GOA4：无人监督驾驶（Unattended train operation）：该等级是机车自动驾驶的最高等级。在该等级下，车上不再安排任何工作人员，自动驾驶系统必须自行判断行车条件、自动识别行车障碍物，并自行检测和处理危险情况。

以上是对列车自动驾驶划分的几个自动化度等级。同一列车在同一线路上的不同区域可以使用不同等级的自动化策略。不同自动化等级的功能应建立在共同的核心架构上，并可通过调整相应的子系统模块实现。

不同等级下的自动驾驶基本功能可参见表 1。

表 1 自动化等级功能

列车运行基本功能		视距列车驾驶	非自动化列车驾驶	半自动列车驾驶	无司机驾驶	无人监督驾驶
		GOA0	GOA1	GOA2	GOA3	GOA4
确保列车运行安全	确保线路安全	×	系统	系统	系统	系统
	确保列车安全分离	×	系统	系统	系统	系统
	确保安全速度	×	系统（部分情况下）	系统	系统	系统
驾驶列车	控制加速和制动	×	×	系统	系统	系统
瞭望线路	防止与障碍物碰撞	×	×	×	系统	系统
	防止与轨道上的人员发生碰撞	×	×	×	系统	系统
监督乘客	控制车门	×	×	×	×	系统
	防止车辆与站台间接驳造成人员伤亡	×	×	×	×	系统
	确保安全行车的启动条件	×	×	×	×	系统
操作列车	投入或退出自动驾驶	×	×	×	×	系统
	监控列车状态	×	×	×	×	系统
紧急情况监控及处理	探测火灾/烟雾和脱轨，检测列车完整性，管理乘客请求	×	×	×	×	系统或员工

注：“×”表示该功能为操作人员的职责；“系统”表示自动驾驶系统应担负的责任。

II. 引言二

1. 目前存在的问题（指出研究不足）

铁路机车自动驾驶技术近年来得以快速发展，特别是在机车定位技术、无线通信技术、感知识别技术等方面的技术进步突飞猛进。但是，铁路调车作业自身具有很大的特殊性和复杂性，不同于客运列车、地铁、轻轨等，调车作业以单节车辆为基本单位进行统筹管理和调配。在不同的作业中，车辆会以不同的编组形态存在于车列中。同时，由于货运列车的整列制动需要通过连接各车辆之间的制动软管（风管）实现，在不同的编组形态中，连接风管的数量也不同，造成

制动性能的巨大差异。因此，调车作业的特殊性可以总结为以下几个方面：

- 1) 车列长度动态变化。由于每次编组、解体的作业不确定，导致每钩调车作业的车列长度不确定。
- 2) 车列重量不确定。由于每节车辆的装载情况不统一，车型不统一，车辆自重不统一，导致每个车列编组的总重量不确定。
- 3) 制动性能存在较大差异性。每次调车作业，需要连接的风管数量，根据每个车站站细规定由人工操作进行。连接风管数量的多少，直接导致车列制动特性的巨大差异。

4) 车辆类型不确定。每个车列编组的组成是由各种车型构成的, 导致车辆类型复杂多变, 会造成每个车辆的摩擦系数不确定, 进而导致同样的风压加载到每节车辆上所产生的制动效果不同, 全列车辆叠加在一起, 导致整列车的制动特性不确定。

5) 运行路径变化多端。每次调车作业的起始端和终到端需要根据现场情况进行组合, 导致每次作业的运行路径都不尽相同。

6) 线路情况。线路中的坡道、弯道, 会导致车列运动特性的变化。

7) 天气因素。雨雪雾霜风等天气因素, 会导致车轮与钢轨摩擦系数的变化, 对加速和制动性能产生不可忽视的影响。

8) 障碍物。由于运行的线路非全封闭环境, 导致车列运行路径上可能出现人、车、物等各种障碍物。

以上这些因素, 都是影响调车作业运行的重要原因, 每一个都不能轻视, 这就导致了调车作业的多样性、复杂性, 大大提高了自动驾驶的难度, 也使调车自动驾驶与客运列车自动驾驶存在着较大差异。

2. 研究目的

本文通过对大量现场应用经验的总结, 结合铁路站场运输管理体系、信号控制系统构成、现场一般作业流程和管理规定等因素, 对标 GOA3 级的要求, 对铁路调车机车自动驾驶技术控制条件、控制模式与系统架构进行研究与探讨, 为该领域技术发展、产品应用与推广起到推动作用。

3. 本文后续章节及概要

本文后续章节概括如下: 第III部分介绍自动驾驶技术控制条件与控制模式, 第IV部分介绍研究成果应用案例, 第V部分为结论。

III. 自动驾驶控制条件与控制模式

1. 自动驾驶控制条件

自动驾驶控制条件可分为投入条件和行车条件两类。

投入条件是指机车从人工驾驶状态下, 转入自动驾驶的前提条件。条件具备后, 须由人工操作, 将机车驾驶状态转入自动驾驶, 此后机车的驾驶由自动驾驶系统完成。

行车条件是指机车在自动驾驶状态下, 应由自动驾驶系统自主判断可否控车运行的前提条件。条件检查都满足后, 系统可以控车运行, 否则应保持制动停车状态, 避免盲目控车运行造成事故。

1.1 自动驾驶投入条件

自动驾驶投入条件是由人工驾驶转入自动驾驶的必要条件。自动驾驶投入条件分为“人检”和“自检”两部分。

人检, 是指机车操纵人员(乘务员或监控人员)人工检查自动驾驶行车条件, 条件满足后允许手动投入自动驾驶。

自检, 是指系统自动判断行车条件, 条件满足后系统允许投入自动驾驶。

人检和自检都是自动驾驶系统控车运行的必要条件, 缺

一不可。

自动驾驶系统应在机车操纵台上设置自动驾驶转换开关, 在人检完成后由人工操作转换开关投入自动驾驶, 将机车的驾驶权交由自动驾驶系统。

● 人检条件包括:

- ①自动驾驶系统的机车定位准确;
- ②当前作业计划与机车定位相符;
- ③系统提示的运行目标方向和距离正确;
- ④自动驾驶系统状态正常, 提示允许投入自动驾驶。

● 自检条件包括:

①系统定位功能正常(卫星、电子标签、应答器等定位识别设备运行正常);

②机车控制、采集状态正常(机车控制输出与状态回采一致, 柴油机转速、水温、油温等传感器采集值在正常范围内, 制动压力自检正常);

①地面信号、站场表示采集正常;

②调车计划接收正常;

③车地通信正常;

④地面传感器采集正常(计轴、手扳道岔、大门、脱轨器、停车器等设备状态采集正常);

⑤其它外部接口正常(铁路无线调车灯显设备、装卸设备电子交权牌等相关系统接口正常);

⑥自动驾驶系统自身运行状态正常。

自检条件中, 一些非关键条件(如大门采集、手扳道岔状态采集等)如果不满足, 系统应允许投入自动驾驶, 但对不满足的条件应予以报警提示, 并在条件不满足的相关区域禁止行车。

1.2 自动驾驶行车条件

自动驾驶投入条件都具备后, 可由人工操作系统投入自控状态。投入自动控制后, 自动驾驶系统应实时检查以下行车条件, 条件必须都满足后, 系统可以控车运行。自控过程中某个必要条件一旦缺失, 则应立即降级运行或直接停车。

自动驾驶行车条件包括:

①机车端自动驾驶投入开关处于“自动”位(人工授权投入自动驾驶);

②控制中心地面操作终端处于“自动驾驶”状态(人工授权投入自动驾驶);

③调车信令保持在允许动车的状态, 包括:【推进】【启动】【减速】【十车】【五车】【三车】【连结】【溜放】;

④当前机车行进相关进路已锁闭(含道岔单锁);

⑤运行前方信号已开放;

⑥调车作业计划与进路、信号相符;

⑦调机位置与调车作业计划、进路、信号条件相符;

⑧系统检查机车状态正常;

⑨环境感知系统允许控车;

⑩系统自身运行状态正常。



图1 自动驾驶行车条件示意图

2. 自动驾驶控制模式

2.1 控制模式分类

投入自动驾驶状态的机车, 自动驾驶系统应将驾驶模式细分为调车自控、现场遥控、远程遥控、驼峰推峰自控、应急停车几类。

2.1.1 调车自控

调车自控模式, 是指系统根据调车计划、信号、信令等行车指挥命令和条件, 自动控制机车完成调车作业。调车自控模式下, 系统根据预设的自控策略, 完成调机全过程自动驾驶, 主要包括启动、试闸、试拉、牵引、推进、调速、制动、停车、驻车等机车驾驶操控。

调车自控模式下, 自动驾驶系统对机车、车列的控制, 应限制在安全行车范围内。即自动驾驶系统应该根据调车计划、信号、信令等行车条件, 自动计算行车安全距离、动态限速等控制参数。在行驶过程中系统实时监控行车, 发现危险隐患时, 应触发防护机制, 自动导向安全。例如, 当发生车轮打滑导致实际制动效果达不到理论制动曲线时, 系统应触发紧急制动, 优先保证车列停车。

2.1.2 现场遥控

现场遥控模式, 是指在特定的作业场景下, 由调车人员通过便携设备对机车进行遥控指挥, 自动驾驶系统根据遥控命令控制机车运行。现场遥控模式, 主要应用于由调车组等现场作业人员遥控指挥进行调车连挂作业、推进顶送作业、对位停车作业等场景下的遥控驾驶。

现场遥控模式的便携设备可以使用通用的铁路无线调车灯显设备, 通过对灯显设备调车信令的解析, 完成相应的控车行为。例如, 【十车】信令, 对应控制方法为控制机车推送车列行进 110 米, 并预计在 110 米位置完成连挂作业, 在控制过程中完成匀减速驾驶。在不便使用铁路无线调车灯显设备进行遥控的场景, 也可采用自动驾驶专用遥控设备进行现场遥控。

在现场遥控时, 自动驾驶系统应根据当时的进路、信号

等基本条件对机车进行监控。当遥控指令超出行车条件的限制时, 自动将行车过程控制在行车限速、限距的允许范围内。

2.1.3 远程遥控

远程遥控模式, 是指由远程驾驶操作人员在地面端的远程模拟驾驶台上, 对自动驾驶系统进行操作, 远程遥控机车行驶。远程遥控模式通常应用在自动驾驶行车条件缺失的特殊情况下, 且机车上没有设置驾驶人员的场景下。例如, 由于列车过长压住轨道电路导致信号机无法开启, 或是临时变更计划的导致计划与进路不符等情况。由于是特殊情况下的应急驾驶手段, 应用时须十分谨慎。通常应配有远程监控系统, 实时监控列车运行状态和场景的条件下才可运用远程遥控模式。

远程遥控模式在设计时, 应进行较为严格的参数限制, 例如限速不超过 5km, 限制距离不超过一个信号区间或 200m 等固定限制条件。限制条件可以根据各现场实际需求进行设计。

2.1.4 驼峰推峰自控

驼峰推峰自控模式, 是指在驼峰推峰作业时, 由自动驾驶系统根据驼峰信号、驼峰命令、驼峰解体计划、驼峰推峰相关信号和进路条件、调车信令等行车条件, 自动计算驾驶目标速度, 并完成推峰机车运行控制的驾驶模式。由于驼峰推峰作业较为特殊, 属于调车作业中的特殊作业, 与其它调车场景有较大区别, 因此单独设计为一种控制模式。顾名思义, 驼峰推峰自控模式仅限应用于驼峰推峰作业过程, 包括试拉、预推、主推、牵引后退等驼峰作业。推送车列下峰、送禁溜线、送迂回线等驼峰作业, 由于属于推送车列完成送车作业, 应将控制模式转换为调车自控。

驼峰推峰自控模式, 也应当遵循调车信号控制条件, 不得超过安全行车的限速和限距。

2.1.5 应急停车

应急停车模式, 又叫紧急停车模式, 是平行于其它控制模式的一种特殊控制模式。应急停车模式是指机车在运行时,

收到应急停车指令后,立即采取应急停车手段,快速达到最大制动效果的控制模式。应急停车模式的触发方式和条件主要包括以下几种:

①紧急停车信令。由调车组人员通过灯显调车信令给出,应用于调车组人员发现危险情况时或进行危险作业时的系统响应,例如调车连结员处理列车风管作业。

②机车紧急停车。在机车司机室内设置机车紧急停车按钮,由机车上的操作、监控人员进行控制,应用于车上人员发现危险时的应急处置。有条件时,可在机车外壳加装紧急停车按钮,给随车人员提供应急停车的操作手段。

③远程应急停车。在地面远程操作终端上设置远程应急停车按钮,由远程操作、监控人员及进行控制,应用于远程监控人员发现危险时的应急处置。

④系统应急停车。自动驾驶系统在控车运行过程中,检测到发生危险情况时,自动触发系统应急停车,例如环境感知系统发现危险情况、信号突变、普通制动失效等危险情况。

日常作业中,应急停车模式的触发应检查机车速度和状态,当机车处于停车且采取了驻车防溜手段时,系统收到应急停车触发指令后不应直接触发紧急制动控制,而是处于严格监控机车速度的状态,直到应急停车指令解除。监控过程中一旦发现机车速度不为0,则立即触发应急停车控制。

应急停车控制应遵循“谁下达,谁解锁”的原则,即自动驾驶系统必须区分且记录应急停车指令的来源,一个来源下达的应急停车指令必须由本来源解锁,避免错误解锁产生事故隐患。多个来源的应急停车指令可同时下达,各自响应,各自解锁,相互之间不控制、不影响。

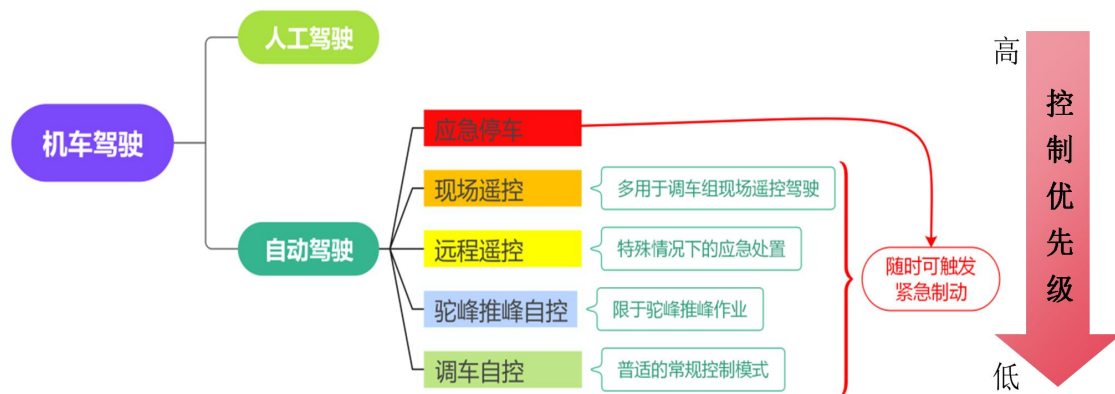


图2 自动驾驶控制模式示意图

2.2 控制模式转换

系统应在机车上设置模式转换开关或按钮,进行控制模式的转换。系统应实时检测机车司控台的操纵状态。在自动驾驶模式下,当检测到机车上有人工操作介入驾驶时,系统应立即切断自身的动力输出,并切换到人工控制模式。

系统控制模式的优先级设定应遵循人工控制优先级最高,自动控制优先级最低的原则,并遵循停车优先级高于控车运行优先级的基本原则。

IV. 研究成果应用案例

本文阐述的调机自动驾驶控制条件和控制模式,已经在鞍钢鲅鱼圈钢铁分公司范屯站、原料站得以运用三年,运用效果良好,证明了本文研究的控制方式较为严谨、可行。鞍钢鲅鱼圈钢铁分公司普通铁路运输分为范屯站、原料站两个主要作业场区和连接场区的一段区间。全部铁路总长约75km,共4个作业场,30条股道,1座驼峰,17条翻车机、解冻库等专用线,6条牵出线,区间长度3.7km,在线运用6台调机,作业场景全面,具有一定代表性和典型性。自2022年3月起,该站已实现该站调车机车从起机出库,到折返运行、编组连结、取送车辆、专用线配车、特定点对位停车等场景下的调车自控、现场遥控、远程遥控、驼峰推峰自控、

应急停车等自动驾驶全部功能。系统投入运用后,大幅减轻司机岗位劳动强度,减少副司机岗位设置,保障调机运行安全,达到了自动驾驶系统建设目标。

V. 结论

本文研究成果,旨在对铁路调车机车自动驾驶的控制条件与控制模式进行探讨,根据现场应用需求,研究一套可行的调机自动驾驶控制条件和模式设定。其中,对控制条件按投入条件和行车条件分别进行分析和阐述;对控制模式按照作业场景和控制信息源的不同进行分类,并对控制优先级进行解析和说明。本文的研究成果已得到实践证明,行之有效。在本文工作的基础上,后续的研究,可进一步深入研究和细分现场应用场景,进一步细化控制条件和控制模式。

[参考文献]

- [1] 铁道部统计中心. 铁路简明统计资料[M]. 北京, 中国铁道出版社, 2009: 25.
- [2] 李海鹰, 张超. 铁路站场及枢纽[M]. 北京, 中国铁道出版社有限公司, 2020: 1.
- [3] 尚敬, 刘勇, 江帆. 机车自动驾驶技术研究与应[J], 机电传动, 2023 (1): 1-12.