

调车机车自动驾驶技术研究

——测速测距技术优化研究与应用

刘斌 刘德福 刘文才 刘晶 王彬鉴

北京全路通信信号研究设计院集团有限公司 北京 100070

DOI: 10.12238/ems.v8i1.17674

[摘要] 本文对铁路调车机车自动驾驶系统的机车测速测距技术进行了研究,并根据现场应用特点和需求,制定了一套适用于铁路调车机车自动驾驶的机车测速测距误差消除方法,旨在提高自动驾驶系统的测速测距准确性,为系统的应用和推广提供参考。

[关键词] 调车机车; 自动驾驶; 测速测距

Abstract: This article studies the locomotive speed and distance measurement technology of the auto drive system for railway shunting locomotives, and based on the characteristics and requirements of field applications, develops a set of methods for eliminating errors in locomotive speed and distance measurement applicable to the auto drive system for railway shunting locomotives. The aim is to improve the accuracy of speed and distance measurement in the auto drive system and provide a reference for the application and promotion of the system.

Keywords: shunting train; automation driving; speed and distance measurement

1. 引言

1.1 研究背景

铁路运输的基层生产单位是车站,这里集中了与运输相关的各种技术设备。据统计,我国目前约有内燃机车1.2万台,货车约57万辆。在货车一次全周转时间里,车辆在站作业时间所占比例约为60%~70%。不难看出,合理布局并高效使用车站与枢纽的各项设备,保障运输安全,提高运转效率,提升自动化水平,是降低运输成本的关键环节之一。

当下,国内调车机车在自动化和信息化建设方面存在明显差异。部分较为先进的车站,像广州局集团的江村站、怀化西站,以及成都局集团的成都北站等,已基本达成调机作业信息化,并在此之上完成了行车安全防护,成功避免了行车安全事故的发生。同时,在确保行车安全的基础上,部分作业已实现自动驾驶。

随着基础技术和通用技术的快速发展,北斗卫星定位的应用日臻成熟,同时,超宽带定位技术、惯导技术、陆基自主定位技术等新技术的发展与应用也逐步适用于铁路领域,促使调车机车自动控制领域向着更安全、更高效、更节约的方向快速前进。

2. 文献综述

2.1 国际方面

目前,国外的自动驾驶系统主要将研究和应用的重点放在长大线路货运以及多机车重联同步控制这些特定领域之中。以美国GE公司为例,该公司精心研发出了一种名为重联

机车无线遥控系统(LOCOTROL)的技术成果,这一技术成果在世界范围内得到了极为广泛的应用。在中国,大秦运煤专线就引进了美国GE公司的LOCOTROL技术,这一技术的引入意义重大,成功地攻克了多机车同步控制重载列车运行过程中的操控难题,借助这一先进技术,大秦运煤专线自2006年起就开始运行两万吨级别的列车,极大地提升了运煤效率。

同样由美国GE公司开发的TripOptimizer(TO)系统,在美国已经实现了大规模的应用,其累计装车数量超过了7000套之多。然而,需要注意的是,该系统有着特定的启用条件限制,只有当机车速度高于15km/h的时候才被允许启用。并且,在TO系统获取控制权之后,它的功能范围是有限的,仅仅负责机车的牵引和电制动操作,而不涉及空气制动系统方面的操控。

庞巴迪公司也不甘落后,推出了自己的InterFLO系统。这一系统已经在智利艾尔特尼恩特铜矿、瑞典基律纳铁矿等具有代表性的地点开展了列车自动控制相关的深入研究与试验工作,为列车自动控制技术的发展积累了宝贵的实践经验。

另外,澳大利亚力拓公司的机车自动驾驶系统AutoHaul也取得了显著的成果。该系统在澳大利亚西部皮尔巴拉(Pilbara)地区的重载铁路网上实现了令人瞩目的自动化运营效果,极大地提高了铁路运输的效率和安全性,为重载铁路的运营模式带来了革命性的变革。

2.2 国内方面

近年来,我国铁路机车自动驾驶技术实现了显著的进步

与发展。鉴于城市轨道交通系统的运营环境相对简单，列车操控的难度也较低，因此在国内外轨道交通行业中，自动驾驶技术目前主要被广泛应用于城市轨道交通领域。在城际(市域)铁路方面，已推广使用 CTCS2+ATO 驾驶模式，这种模式能有效提升列车运行效率与安全性。而在货运机车领域，由于其控制复杂性较高且工况多变，实现完全自动驾驶的应用尚不多见。当前的研究重点主要集中于优化操纵与辅助驾驶等方面，以提升货运机车的运行效率和安全性。

例如，在 2020 年，北京全路通信信号研究设计院集团有限公司成功研发了一套货运站场自动驾驶系统，并在鞍钢股份有限公司鲅鱼圈钢铁分公司范屯站 75km 线路上投入实际应用。该系统实现了站场大部分调车作业的自动驾驶以及部分特定作业的遥控驾驶，大幅提升了站场作业的效率与安全性。此外，中国铁道科学研究院集团有限公司开发的调机自动驾驶系统也在朔黄铁路黄骅港站实现了站场调车作业的自动驾驶，为铁路运输的智能化发展提供了重要支持。中冶赛迪集团有限公司则在湛江钢铁实现了铁水运输的自动驾驶，进一步推动了钢铁行业物流运输的自动化与智能化进程。这些成功的应用案例表明，随着技术的持续进步，铁路机车自动驾驶技术将在更多领域得到广泛应用，为交通运输行业的智能化发展注入新的动力。

II. 引言二

1. 目前存在的问题

在实际进行调机测速测距时，受多种因素影响，像机车车轮对出现空转、打滑或者轮径发生改变等，这些不良因素会造成测速测距产生误差，从而影响调车作业整体的精准性与安全性。要解决这些问题，需要研究有效的补偿算法，增强系统的鲁棒性，保证测速测距的准确性。

2. 研究目的

本文通过对调车机车测速测距方法的研究与改进，实现调机测速测距的方案优化，并通过改进测速测距算法和补偿机制，提高其在复杂工况下的适应能力和准确性，提升产品关键性能，具有重要意义。

3. 本文后续章节及概要

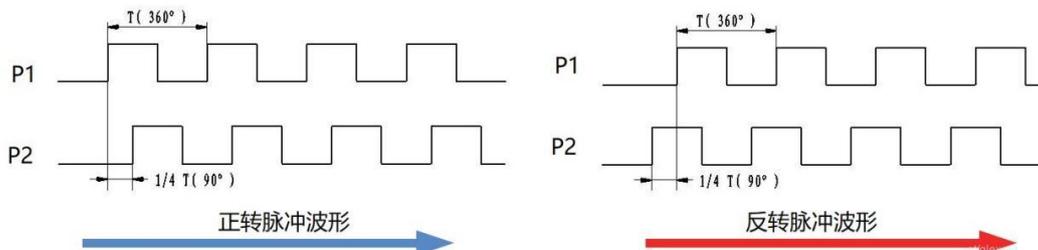


图 2 两路脉冲波形图

本文后续章节概括如下：第 III 部分介绍自动驾驶测速测距补偿技术研究，第 IV 部分介绍研究成果应用案例，第 V 部分为结论。

III. 自动驾驶测速测距补偿技术研究

1. 测速工作原理

1) 速度传感器工作原理

目前国内绝大多数调车机车采用的都是光电速度传感器，简称“速传”。速传首先利用机械传动方式，将列车车轮对的转动(转速)转变为光通量的变化，再通过光电转换元件将光通量的变化转换成电量变化，即把光脉冲变成电脉冲，通过对电脉冲的计数最终换算成列车运行速度。光电转换元件的工作原理是光电效应，通过转轴及万向联轴传动机构实现与列车车轴的紧密连接和同步转动，内部是由装在转轴上的带孔或光栅的旋转盘、光源、光接收器等主要部件组成。旋转盘与转轴紧固连接并随车轴同步转动，光源、光接收器安装在旋转盘两侧并固定在底座下，图 1 为光电速传原理图。

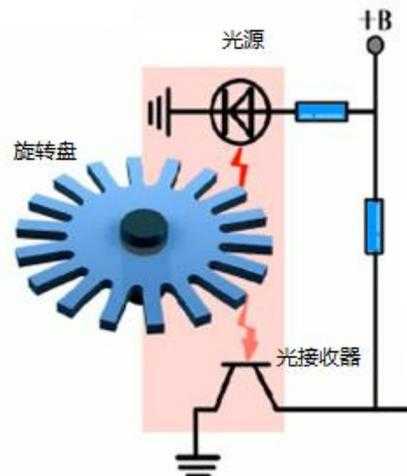


图 1 光电速传原理

列车运行速度与脉冲信号的关系为：

$$v = \frac{\pi d n}{N t} \quad \#1)$$

其中 d 为速传直径， n 为脉冲数， N 为车轮转一圈的脉冲数， t 为脉冲对应时间。

速传依赖多路脉冲之间的先后关系形成的相位差来判断速传的运转方向。以两路脉冲信号为例, 当两路速传采集脉冲, 可形成如图 2 所示的脉冲波形图, 如果通道 1 (P_1) 先采集到信号的上升沿, 通道 2 (P_2) 再采集到信号的上升沿, 且两路信号的上升沿相位差为 90 度, 则判定速传的方向为正向, 反之速传的方向为反向。

2) RFID 电子标签、应答器等辅助定位设备

RFID 电子标签、点式应答器等绝对定位设备一般安装在轨道上, 机车经过时通过车载查询天线获取标签信息, 实现标签位置的绝对定位。

3) 空转及打滑的判定

(1) 空转

空转的判断: 系统计算当前次采集的脉冲数量 P_1 与前次采集的脉冲数量 P_0 的差值 P_D :

$$P_D = P_1 - P_0$$

若 P_D 大于设定的上限值 $P_{D,max}$, 认为发生空转。

一般的空转补偿方法: 空转发生时系统计算的位移大于车列的实际位移, 计算的距停车点距离将小于车列实际距停车点的距离, 所以系统对空转不进行补偿。

(2) 打滑

系统计算当前次采集的脉冲数量 P_1 与前次采集的脉冲数量 P_0 的差值 P_D :

$$P_D = P_1 - P_0$$

若 P_D 大于设定的上限值 $P_{D,min}$, 认为发生打滑。

在判断打滑发生后, 系统持续记录脉冲数量 $P_1, P_2, P_3, \dots, P_n$, 计算与空转发生时的脉冲数的差值 $P_{D2}, P_{D3}, P_{D4}, \dots, P_{Dn}$:

$$P_{D2} = P_2 - P_0; P_{D3} = P_3 - P_0; \dots; P_{Dn} = P_n - P_0$$

若 $P_{Dn} \geq P_{D,min}$ 认为打滑结束; 当 n 超过设定的打滑检测累计数量 n_{max} , 认为打滑结束。

一般的打滑补偿方法:

系统判断打滑发生时, 系统根据打滑发生时的脉冲数量 P_1 计算系统走行距离。系统持续记录采集的脉冲数量 P_2, P_3, P_4, \dots , 计算与空转发生时的脉冲数量 P_1 的差值 D_2, D_3, \dots , 若差值小于下限值的累计次数超过系统设定的打滑检测累计次数, 认为打滑结束。

2. 误差源分析

误差源主要来自于 2 个方面: 速传误差、RFID 读写器误差 (应答器同理)。

1) 速传误差分析:

轮径误差: 属于固定误差, 该误差偏向一侧, 可通过算法校验消除。具体实现方法为经过固定长度距离, 通过对脉冲数的累计计算, 判断现有轮径长度。

系统采样时间误差: 系统依靠计时器定时读取寄存器中的脉冲信号数量, 可能产生漏查。可通过算法消除。

脉冲检测误差: 系统在定期累计方波脉冲数量时, 连续两次的计数存在重复累计一个方波的可能, 由于此误差影响较小, 不做处理。

2) RFID 读写器误差分析:

系统响应延迟: 属于固定误差, 该误差偏向一侧, 可通过算法消除, 根据系统运行情况设置固定的响应延迟。

现场环境干扰标签信息采集: 此误差属于随机误差, 不做处理。

系统采集到标签时与标签实际距离的误差: 此误差属于人工误差, 校准位置修改数据库标签位置即可消除。

3) 逻辑优化

软件逻辑为: 在运行方向的轨道区段状态由锁闭变为占用时, 系统根据当前位移更新距停车点的距离, 可消除前一区段空转/打滑造成的测距误差; 停车点前的最后一条区段内的空转/打滑造成的测距错误无法修正, 存在导向危险侧的可能。需要进行空转、打滑软件逻辑优化。

4) 误差优化过程

速传误差优化:

- 轮径误差消除: 通过算法校验轮径, 消除固定误差。
- 系统采样时间误差消除: 优化算法, 确保系统定时准确读取脉冲信号数量, 减少漏查。
- 脉冲检测误差处理: 由于影响较小, 不进行特殊处理。

RFID 读写器误差优化:

- 系统响应延迟消除: 通过算法调整, 消除固定响应延迟误差。
- 现场环境干扰处理: 对于随机误差, 不做特殊处理, 但需注意环境因素对标签信息采集的影响。
- 标签距离误差校准: 通过人工校准标签位置, 修改数据库中的标签位置信息, 消除误差。

整个误差优化过程涉及对固定误差、随机误差和人工误差的识别和处理。通过算法优化和人工校准, 可以有效减少这些误差对系统性能的影响, 提高系统的准确性和可靠性。

5) 空转、打滑判断逻辑优化

空转打滑判断条件为:

空转：若某速传的加速度 acc_{tacho} 满足条件： $acc_{tacho} > acc_{max}$ ，则认为该速传发生空转。

打滑：若某速传的加速度 acc_{tacho} 满足条件： $acc_{tacho} < acc_{min}$ ，则认为该速传发生打滑。

其中， acc_{max} 为空转开始加速度，综合考虑车辆最大加速度、线路坡度等，为可配置值， acc_{min} 为打滑开始加速度，综合考虑车辆最大加速度、线路坡度等，为可配置值。

图 3 为测速测距空转打滑状态转换机。

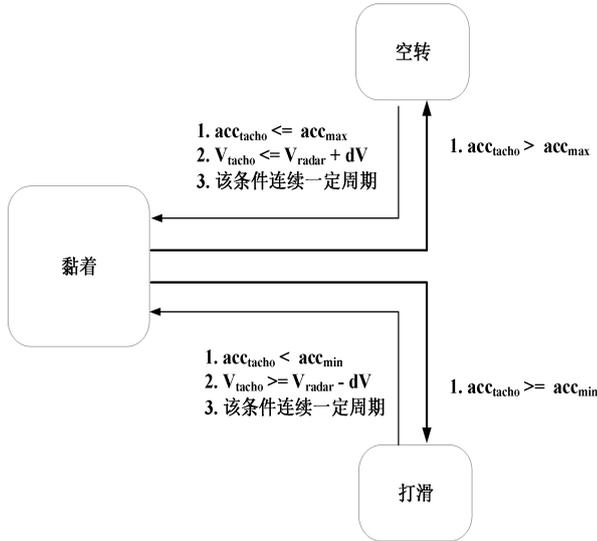


图 3 测速测距空转打滑状态转换机

检测到某个速传发生空转打滑后，采用加速度补偿的方式针对最大值和最小值进行补偿，即：以空滑前的速度和坡度补偿后的加速计测量值值进行计算。其中坡度补偿可以为：轨旁提供坡度或最大坡度。

6) 仿真测试

编制用于调机产品测速测距的仿真软件，该软件可依据输入的仿真最高速度及加速/减速时间生成理想速度曲线，根据理想速度曲线修改单位采样时间内的脉冲数量，模拟空转与打滑现象，将仿真数据文件导入车载测速测距模块，测速测距程序读取仿真数据文件并运行后生成测速测距运行文件。将测速测距运行文件导入仿真软件后可对比各曲线。

(1) 无干扰数据运行测试：

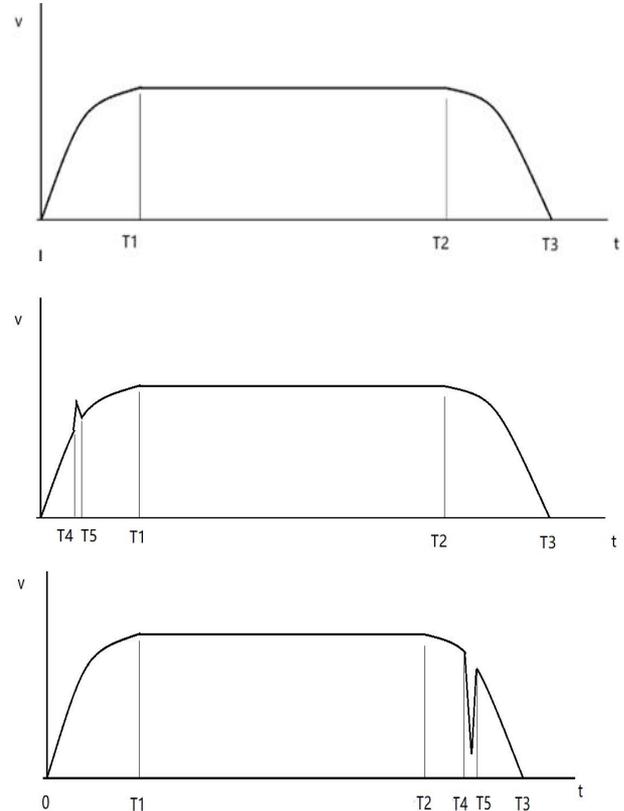
使用仿真数据生成软件生成无干扰的测试数据：0-T1 为加速阶段，T1-T2 为恒速运行阶段，T2-T3 为减速阶段，在第 T3 秒速度减至 0 km/h。

(2) 加速运行阶段空转干扰测试

修改无干扰测试数据：加速阶段在 T4 第 T5 间产生空转干扰。

(3) 减速运行阶段打滑干扰测试

修改无干扰测试数据：减速阶段在 T4 第 T5 间产生打滑干扰。



仿真运行结果：

(1) 无干扰运行结果：

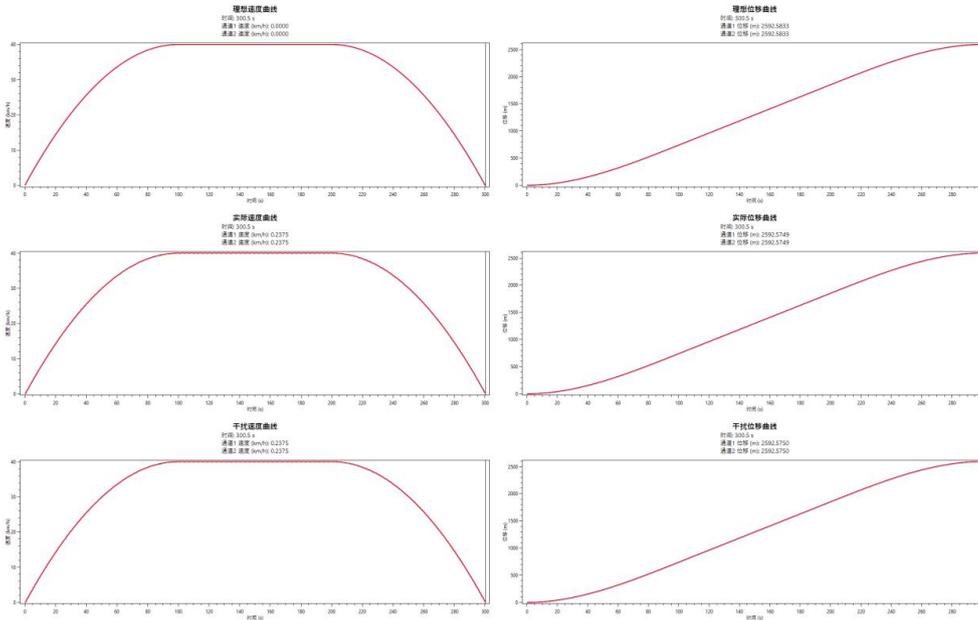
根据干扰速度曲线，发生打滑、空转后，测速测距模块能较快判断，测速测距模块生成的干扰位移曲线和实际的位移曲线相近，极大程度的消除了空转、打滑对系统测速测距带来的影响。

IV. 研究成果应用案例

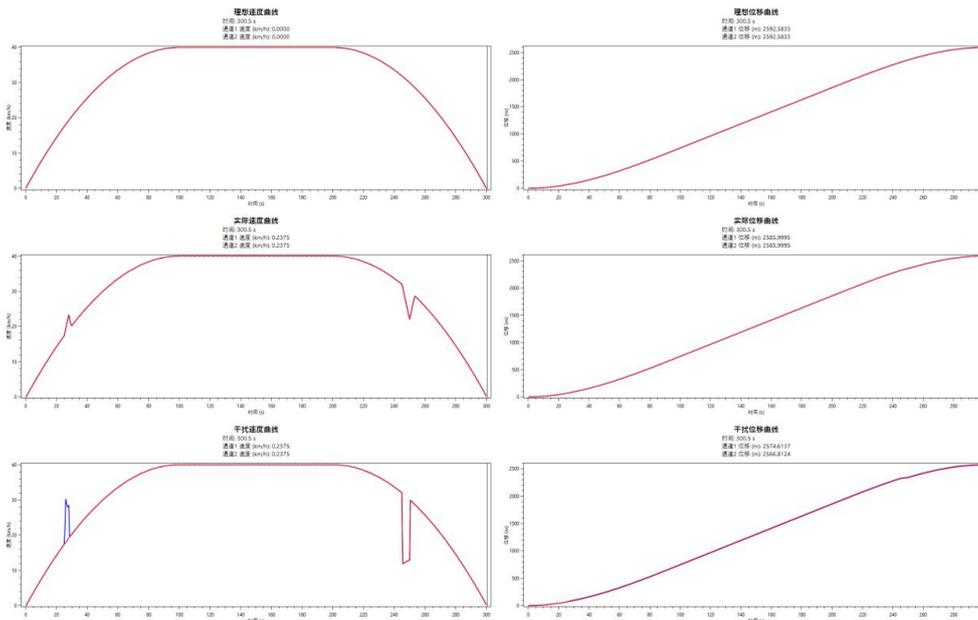
上述测速测距优化方案已在部分自动驾驶项目中进行实例测试和应用。在中国铁路广州局集团公司江村站自动驾驶系统、鞍钢集团鲅鱼圈钢铁分公司自动驾驶系统中，该优化后的测距测速方法均进行了长期应用，效果良好。在成都北站、南京东站等调车机车自动控制系统中，该优化算法也已投入现场运用。

V. 结论

本文对铁路调车机车自动驾驶系统的测速测距方法进行简要阐述和探讨研究，对于一些传统算法中遇到的空转、打滑等误差因素进行分析，并提出了一套消除误差的方法。该方法通过实验室测试、现场应用测试，证明行之有效，可在调车机车自动驾驶系统未来推广应用时提供理论支持和方法引导，为提高此类产品的可靠性、安全性起到一定作用。



(2) 有干扰运行结果



[参考文献]

[1]张帆. 列车自动驾驶(ATO)季节性调节方案探讨[J]. 铁路通信信号工程技术, 2024, 21(1): 87-91.

[2]宁云转, 鲍鹏宇, 刘佳, 王成, 顾玲凤. 基于首尾冗余的列控车载设备测速测距系统[J]. 铁路通信信号工程技术, 2024, 21(4): 10-14

[3]陆海亭, 孙春洋, 王亮军, 付保明, 陈林山. 神经网络融合多源信息的列车测速方法研究[J]. 铁路通信信号工程技术, 2024, 21(5): 90-95

[4]张永, 孙宇, 杨振全. CHA3A1型调车机车无人驾驶系统[J]. 铁道机车与动车, 2021(12): 10-12, 16.

[5]栾德杰, 杨华昌, 冯军. 基于5G技术的调车机车远程驾驶控制系统[J]. 中国铁路, 2022(9): 105-111.

[6]闫石, 栾德杰, 唐汇东, 等. 无线调车机车信号和监控系统宽带移动通信方案研究[J]. 中国铁路, 2021(5): 93-97.

[7]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.

[8]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.

[9]尚敬, 刘勇, 江帆. 机车自动驾驶技术研究与应[J]. 机车电传动, 2023(1): 1-12.