



面向全自动驾驶的车辆控制 与信号系统融合技术研究

王向阳¹, 谢白洁¹, 罗钦洋², 罗方旋², 任颖², 何涛²

(1. 宁波市轨道交通集团有限公司, 浙江 宁波 315101;

2. 株洲中车时代电气股份有限公司, 湖南 株洲 412001)

摘要: 国内外相关企业均在积极开展车辆控制和信息集成的一体化平台技术攻关, 以实现运行控制精度、动态响应特性和能耗等方面的同步优化。文章针对城轨车辆自动驾驶提出一种融合控制方式, 将车辆控制系统与信号系统的功能重新划分, 融合构建了一体化控制系统, 实现了控制系统对线路信息、运营信息以及车辆子系统状态信息的同步获取, 通过自主决策、规划与跟随优化车辆的控制性能, 最后通过在宁波地铁外场试验线的现场测试验证了融合控制系统性能, 测试结果表明, 通过融合控制系统可达成准点、舒适与节能的控制目标, 其中, 融合控制节能模式的车辆总能耗节能率约为7.25%。

关键词: 融合控制; 速度控制; 提升旅行速度; 节能; 自动驾驶系统; 地铁车辆; 城市轨道交通

中图分类号: U284.48; U268.4

文献标志码: A

文章编号: 1000-128X(2025)04-0088-09

0 引言

我国经济持续增长, 城市化进程不断加快, 以运量大、舒适快捷、安全准点为显著特点的城市轨道交通在缓解城市地面交通拥堵、分担客流、促进经济社会发展方面发挥着至关重要的作用。城市轨道交通系统耗电量大、运行成本高, 因此, 降低能耗、节约能源是亟待解决的重要问题。针对列车运行控制优化和效率提升, 国内外均进行了相关研究并取得一定成效。文献[1]研究了同一条线路上由于前行列车发生延误而引发的问题, 提出一种多车协同控制调度的方法来降低线路的总能耗。文献[2]通过 Training Guard MT 系统集成了列车的节能优化算法, 并在多条线路的仿真试验中取得良好效果。文献[3]利用一种典型的自适应控制系统进行节能问题优化求解。文献[4]基于牵引系统效率特性和轮周机械功构建列车运行能耗精细计算模型, 提出基于迭代诱导遗传算法的自适应节能策略, 实现最优节能规划。文献[5]在综合考虑地铁列车动力

学特性、线路条件、区间限速以及准点运行等条件的基础上, 建立基于再生制动能量利用的多约束能耗模型; 通过免疫粒子群组合算法求解列车能耗模型, 得到列车节能操纵工况序列及各工况转换点, 最终求得列车站间运行的最低能耗。文献[6]针对复杂路况下列车的运行控制, 设计出一套基于递归思想的优化算法, 能够得到在特定时间、特定路况等约束条件下的最优行驶控制策略, 有效降低牵引能耗。文献[7]通过对列车自动驾驶策略相关算法的深入研究, 基于多种优化指标, 得出列车的优化操纵序列。综上, 目前国内外相关学者多分别针对信号系统或车辆控制进行优化, 开展车辆动力学、线路特性等外部约束条件适应性研究。

当前, 地铁车辆的速度控制功能主要由车载信号系统实现, 在整个闭环控制过程中存在控制指令传输环节较多且延时较大的问题, 极大地影响车辆控制性能、节能和舒适性。2020年, 中国城市轨道交通协会发布了《中国城市轨道交通智慧城轨发展纲要》, 提出突破车辆控制和信息集成的一体化平台技术瓶颈, 实

基金项目: 湖南省科技重大专项(2022GK1060)

通信作者: 任颖, 男, 正高级工程师, 主要从事城市轨道交通通信信号系统技术的研究; E-mail: renying@csrzc.com

引用格式: 王向阳, 谢白洁, 罗钦洋, 等. 面向全自动驾驶的车辆控制与信号系统融合技术研究[J]. 机车电传动, 2025(4): 88-96.DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2025.04.102.

Citation: WANG Xiangyang, XIE Baijie, LUO Qingyang, et al. Research on integration technology of vehicle control and signal systems for fully automatic train operation[J]. Electric drive for locomotives, 2025(4): 88-96.DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2025.04.102.

现列车多专业系统深度集成的建设重点,并确定了相关建设目标^[8]。基于此,为解决工程项目中的痛点,本文将车辆控制与信号系统融合,提出一种融合控制方式,使控制系统同时获取线路信息、运营信息和车辆子系统状态信息,通过自主决策、规划与跟随实现准点、舒适、节能控制。

1 系统研究

城轨车辆融合控制系统的主控单元采用了DTECS (distributed train electronic control system) 平台的安全型产品,该产品的相关软件和硬件均符合SIL2(safety integrity level)等级要求,功能强大、接口丰富,可满足应用场景对高安全性、高算力、多样化通信接口等需求。融合控制系统软件分为决策、规划、控制3个功能模块:决策模块根据场景和车辆实际运行状态,控制系统的运行模式;规划模块根据预测结果和当前状态,生成一条最优的驾驶曲线,满足安全、舒适和节

能等目标;控制模块根据规划结果和车辆动力学,控制车辆的运行,使车辆沿着目标曲线平稳行驶。3个模块通过共享内存的方式进行数据交互。

1.1 融合控制方案

城轨车辆的速度控制主要由列车运行自动控制系统(ATC)根据当前车速与目标车速的差值计算级位,网络控制系统(TCMS)将接收到的级位指令转发给牵引控制单元(DCU)和制动控制单元(BCU),牵引系统与制动系统依据控制指令实现速度调控,之后ATC再根据当前周期的反馈速度计算下一周期的级位^[9],具体如图1所示。由于在闭环控制过程中指令传输的延时较大,当城轨车辆从加速模式向巡航模式切换时可能出现速度调节不及时导致的列车速度超调。在城轨车辆运行过程中,为避免因速度超调而触发EBI(emergency braking intervention)限速,通常会降低最高运行速度。目标限速的变化容易引起牵引与制动切换,而不必要的切换将导致额外的能耗。

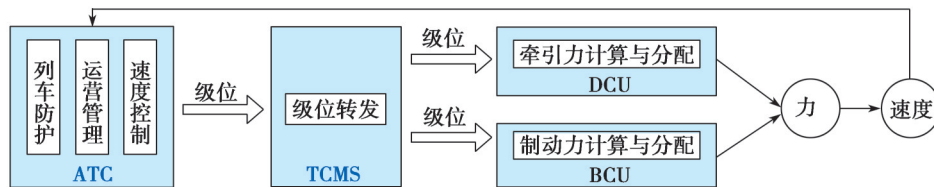


图1 ATC控制流程

Fig. 1 Process flow of ATC control

鉴于上述分析,本文将原ATC中的速度控制功能转交到融合控制系统的TCMS中。ATC将列车位置、目的停车点、EBI限速、运营信息等发送给TCMS,再由TCMS通过自主计算生成牵引力/制动力,并将其直接发送给牵引/制动系统执行,具体如图2所示。通信链路的减

少可缩短闭环控制周期,提高控制精度;同时TCMS可获取更丰富的车辆系统信息,充分考虑牵引系统、制动系统的实时状态和控制能力,实时动态调整目标曲线,实现控制指令与车辆实际控制能力的进一步匹配,减少牵引制动切换次数,在提升舒适性的同时降低能耗。

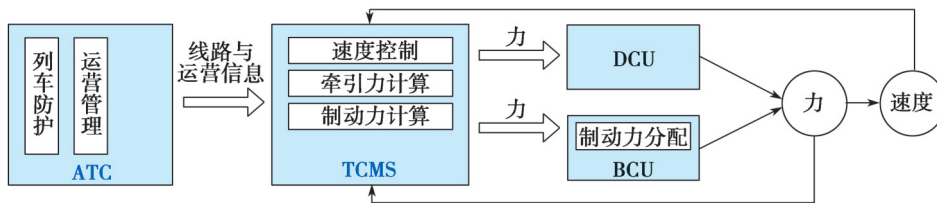


图2 融合控制系统控车流程

Fig. 2 Process flow of integrated control system

1.2 融合控制策略

融合控制系统通过基于模型的优化控制技术,可实现车辆实际运行速度紧紧跟随目标速度,同时还具备状态预测功能,能减少牵引、制动切换次数,实现级位平稳变化,有效提升控制精度。

首先,为确定城轨车辆线路运行曲线,对最优运行工况进行分析后给出车辆的运行状态方程为

$$\frac{dv}{dx} = \frac{\mu_t f_t(v) - \mu_b f_b(v) - w_0(v) - g(x)}{v} \quad (1)$$

$$\frac{dt}{dx} = \frac{1}{v} \quad (2)$$

式中: v 为城轨车辆运行速度; μ_t 为牵引力控制系数; $f_t(v)$ 为每质量单位最大牵引力; μ_b 为制动力控制系数; $f_b(v)$ 为每质量单位最大制动力; $w_0(v)$ 为单位基本阻力; $g(x)$ 为由轨道梯度和曲线引起的单位附加阻力; x 为车辆位置。

确定优化目标为使城轨车辆区间运行的牵引能耗 J 最小, J 可表示为

$$J=\int_{x_0}^{x_T}(\frac{\mu_t f_t(v)}{\eta_t})dx \tag{3}$$

式中： η_t 为牵引工况下传动系统的机电效率； x_0 为区间起始位置； x_T 为区间终点位置。

根据庞特里亚金极大值原理，引入伴随变量 λ_1 和 λ_2 ，由式(1)~式(3)可定义哈密顿函数 H 为

$$H=-\frac{\mu_t f_t(v)}{\eta_t}-\frac{\lambda_1}{v}+\frac{\lambda_2}{v}(\mu_t f_t(v)-\mu_b f_b(v)-w_0(v)-g(x)) \tag{4}$$

引入处理限速约束的拉格朗日算子 M ，得到最优控制必须满足的方程组如下：

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\lambda_1}{dx} &= -\frac{\partial H}{\partial t} \\ \frac{d\lambda_2}{dx} &= -\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{dM}{dx} \\ (v-v_{lim})\frac{dM}{dx} &= 0 \\ \frac{dM}{dx} &\geq 0 \end{aligned} \right\} \tag{5}$$

式中： λ_1 和 λ_2 为伴随变量； x 为车辆位置； t 为时间； M 为拉格朗日算子； H 为哈密顿函数； v 为城轨车辆运行速度； v_{lim} 为限制速度。

由于哈密顿函数 H 中不显含时间 t ，即 $\frac{\partial H}{\partial t}=0$ ，可知 λ_1 为常数，设伴随变量 $\sigma=\eta_t\lambda_2/v$ ，对式(4)进行整理后可得

$$H=\frac{1}{\eta_t}((\sigma-1)\mu_t f_t(v))+\frac{\eta_t\lambda_1}{v}-\sigma\mu_b f_b(v)-\sigma(w_0(v)+g(x)) \tag{6}$$

由极大值原理可知，若使式(3)中的 J 取最小值，则应使哈密顿函数 H 在满足控制变量约束的条件下均取得最大值。因此，通过将 σ 的取值分成5个范围即可确定最优控制工况。5个范围分别对应城轨车辆运行的最大牵引、部分牵引、惰行、部分制动、最大制动5种工况，其中部分牵引和部分制动对应恒速巡航控制模式，具体如表1所示。

表1 变量与工况对照表

Table 1 Table of variables and conditions

伴随变量	最优运行工况	控制量取值
$\sigma>1$	最大牵引	$\mu_t=1,\mu_b=0$
$\sigma=1$	部分牵引	$0\leq\mu_t\leq 1,\mu_b=0$
$0<\sigma<1$	惰行	$\mu_t=0,\mu_b=0$
$\sigma=0$	部分制动	$\mu_t=0,0\leq\mu_b\leq 1$
$\sigma<0$	最大制动	$\mu_t=0,\mu_b=1$

当伴随变量 $\sigma>1$ 的时候，式(6)可以在最大牵引工况下取得极值。由此类推，随着伴随变量取值的变化，列车节能的最优控制曲线最终由全力牵引、全力制动、部分牵引、部分制动和惰行5种工况构成，其中部分牵引或部分制动时列车保持匀速。由于工况转换点无法仅靠控制规则确定，因此需结合操纵经验确定工况转

换时机，优化列车控制效果：列车在大下坡道时，可在进入前先通过惰行降速以防超速；列车在大上坡道时，用全力牵引减小速度降幅，若坡道前特定条件满足，可提前全力牵引提速；需提高速度时，用全力牵引实现快速加速；需降速时优先惰行，若惰行无法满足则启用全力制动。

城市轨道交通的站间距较短，线路状况简单，工况转换次数有限，在实时进行列车最优运行工况切换最优点计算时，需搜索确定牵引、制动、惰行这3种工况的最少切换次数，同时通过限制牵引/制动级位的变化幅度来达到降低冲击的目的，基于此可获得满足准点、平稳和节能目标的曲线^[10]。

当运行时间有富余时，可以实现列车准点运行的同时兼具很好的节能效果，并且富余时间越多，惰行的距离就越长，节能效果越显著^[11]。由以上分析可知，根据运营需求和运营计划，城市轨道交通的线路运行曲线规划存在2种策略，快速运行策略和准点节能运行策略，分别如图3和图4所示。

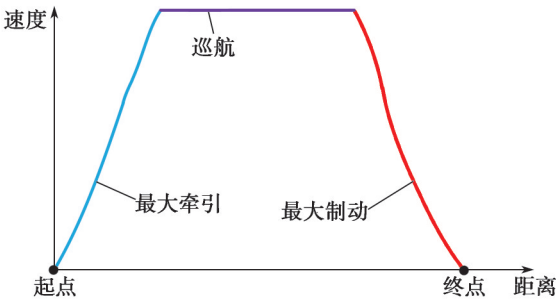


图3 快速运行策略

Fig. 3 Operation strategy for fast running

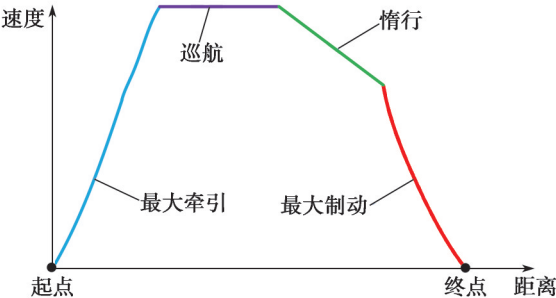


图4 准点节能运行策略

Fig. 4 Operation strategy for punctuality and energy saving

当车辆采用准点节能运行策略时，为增加惰行时间，巡航速度应尽可能贴近限速，因此区间运行时间主要取决于惰行起点的位置^[12]。基于列车“最大牵引—巡航—最大制动”运行曲线寻找惰行起点：假定列车在巡航曲线上某个点切换成惰行工况，之后再切换到最大制动工况，最终停车，计算列车对应的“最大牵引—巡航—惰行—最大制动”的站间运行时长，如果运行时长与（运行计划中的）站间计划时长的偏差在允许范围内则将该点作为惰行起点；如果运行时长大于计划时长则在该点之后搜索新的惰行起点并重新

判断是否满足准点要求; 如果运行时长小于计划时长, 则在该点之前搜索新的惰行起点, 重复搜索过程直到搜索出满足准点要求的惰行起点, 完成节能运行曲线的规划, 具体如图5所示。

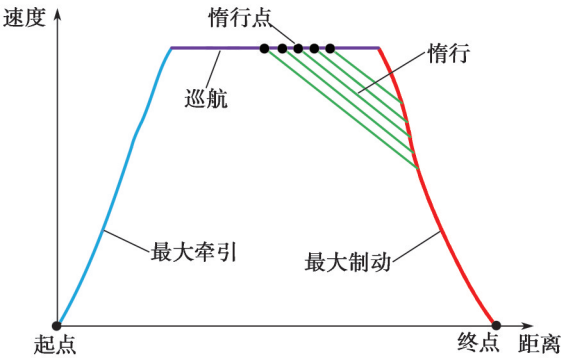


图5 惰行点搜索方法
Fig. 5 Coasting point search method

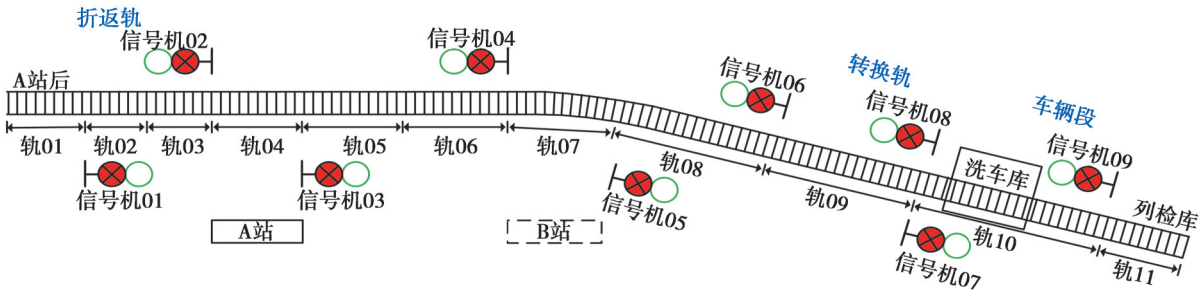


图6 试验线路
Fig. 6 Test track

2.2 试验方案

考虑信息数据量及通信实时性要求, 基于宁波地铁5号线列车拓扑, 在1车厢和6车厢的TCMS与信号系统之间增加百兆以太网线建立ATC与TCMS之间的通信链路。改造后的列车系统拓扑如图7所示。

ATC系统通过以太网发送限速信息、位置信息、行车计划等给融合控制系统TCMS。TCMS获取上述信息后, 自主进行运行决策, 实现到目的停车点的曲线规划及速度跟随功能。详细通信数据如表2所示。

表2 从ATC到TCMS的通信数据

Table 2 Communication data between ATC and TCMS

序号	名称	序号	名称
1	下一停车点位置	8	弯道信息
2	移动授权范围	9	运行等级
3	当前位置	10	运行方向
4	EBI速度	11	自动驾驶允许
5	线路限速	12	发车命令
6	动态限速	13	列车速度
7	坡道信息	14	到下一车站时刻

将试验分为性能测试和场景测试两部分。性能测试主要验证融合控制系统各项指标是否满足预期要求; 场景测试主要验证在全自动运行模式各运营场景下融合控制系统是否能够正常控车。

2 试验验证

2.1 试验条件

为了验证融合控制系统的控制性能、单车的节能效果以及FAM (fully-automatic train operating mode) 下城轨车辆的运行控制功能, 本文通过宁波地铁5号线在外场线进行实车验证, 相关试验条件如下:

- ①试验线路: 长度约1.8 km, 有弯道, 无坡道, 限速60 km/h, 具体如图6所示;
- ②站台: A站是真实站台, 有站台屏蔽门, 在A站进行停车对标测试; B站为虚拟站台;
- ③车辆: 宁波地铁5号线列车, 列车采用永磁电机驱动, 空载运行。

具体测试内容为:

- ①开展信号系统自动运行控车测试, 采集速度、牵引力/制动力、运行时间和能耗等数据, 用来作为参照数据;
- ②开展融合控制快速模式控车测试, 采集速度、牵引力/制动力、运行时间和能耗等数据, 与参照数据对比旅行速度;
- ③开展融合控制节能模式控车测试, 采集速度、牵引力/制动力、运行时间和能耗等数据, 与参照数据对比能耗;
- ④开展融合控制精准停车测试, 并测试停车精度;
- ⑤开展在全自动运行模式下各运营场景的控车测试, 采集速度、牵引力/制动力、运行时间和能耗等数据。

在车辆和信号系统均满足试验条件后开始性能测试。测试时首先将列车停在停车窗, 然后办理相关进路, 融合控制系统在收到ATC的发车命令后自动驾驶列车完成“启车—区间运行—进站停车”整个过程, 列车停稳后下载试验数据进行分析。

2.3 试验结果

2.3.1 信号系统自动运行控车测试

测试时采用常规控制模式, TCMS系统按信号系统ATC发送的牵引/制动指令控制列车起动、区间运行

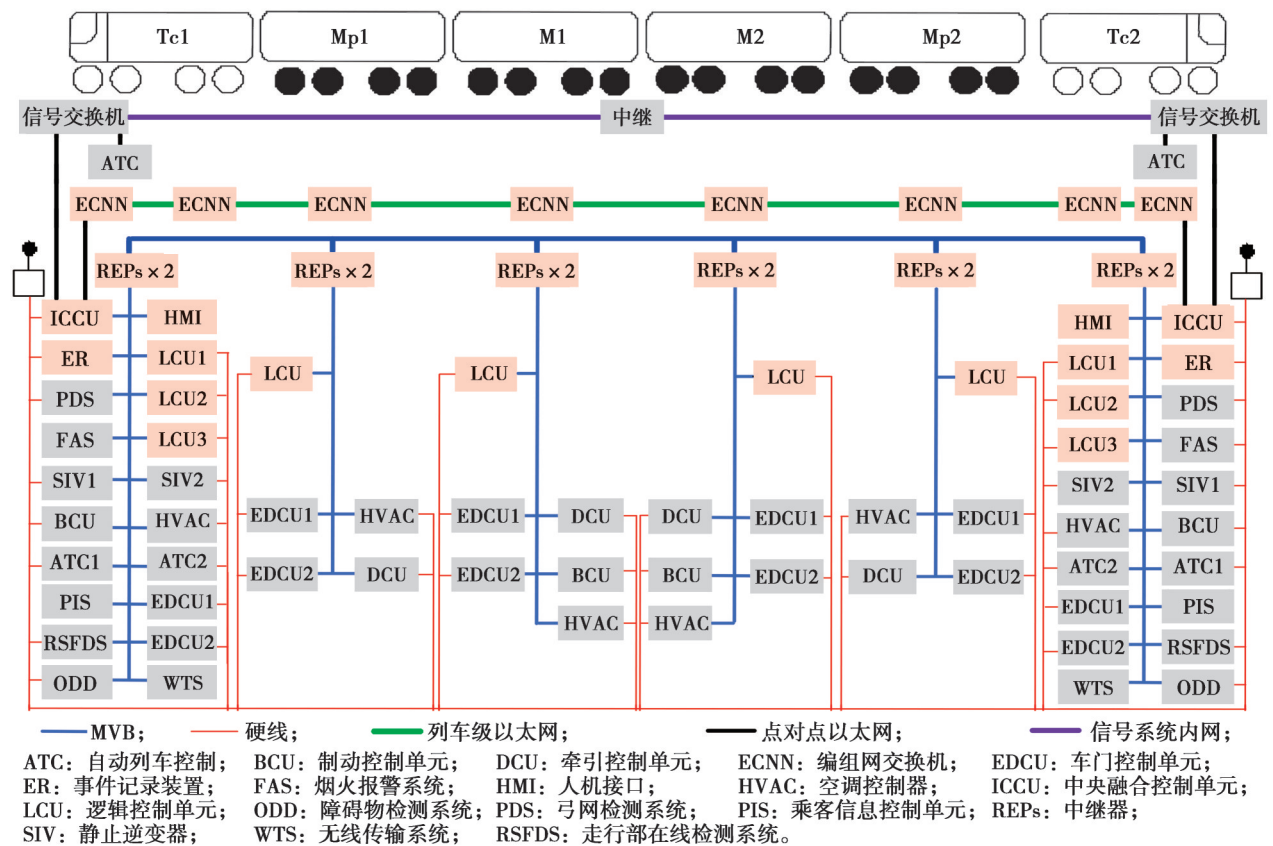


图7 系统拓扑(列车运行自动控制系统)

Fig. 7 System topology (automatic train control system)

和精确停车，试验结束后，从TCMS中下载运行数据进行分析，得到速度和牵引力/制动力曲线如图8所示，运行时间和能耗数据如表3所示。

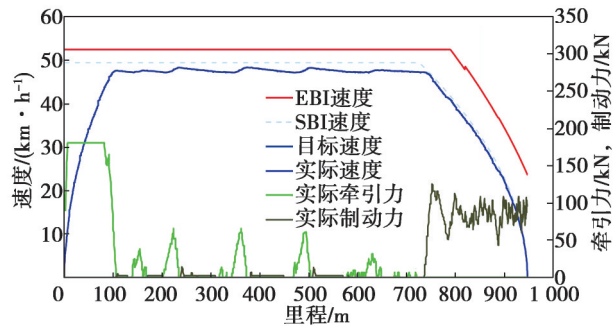


图8 信号自动运行控车试验曲线

Fig. 8 Test curve of automatic signal system control

表3 信号系统自动运行控车试验数据

Table 3 Test data of automatic signal system control

试验序号	运行时间/s	运行距离/m	牵引能耗/(kW·h)	再生能量/(kW·h)	总能耗/(kW·h)
1	98.30	965.20	7.20	4.44	2.76
2	97.85	964.64	7.12	4.41	2.72
3	97.90	964.23	7.00	4.38	2.62
4	97.55	964.19	7.05	4.40	2.66
5	97.75	964.40	7.15	4.49	2.65
6	97.80	964.66	7.03	4.45	2.58
7	98.60	964.38	7.05	4.48	2.57
8	98.55	964.63	7.20	4.65	2.55
9	98.10	964.56	6.88	4.40	2.48
平均值	98.04	964.54	7.08	4.46	2.62

2.3.2 融合控制快速模式控车测试

测试时采用融合控制的快速运行模式，其余操作与2.3.1节的内容一致，得到速度和牵引力/制动力的曲线如图9所示，运行时间和能耗数据如表4所示。

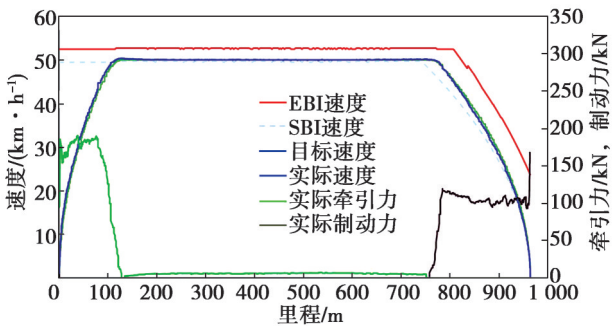


图9 融合控制快速模式控车试验曲线

Fig. 9 Test curve of integrated control in fast running mode

表4 融合控制快速模式控车试验数据

Table 4 Test data of integrated control in fast running mode

试验序号	运行时间/s	运行距离/m	牵引能耗/(kW·h)	再生能量/(kW·h)	总能耗/(kW·h)
1	91.40	964.4	7.5	4.80	2.70
2	91.40	964.7	7.5	4.90	2.60
3	91.30	964.4	7.5	4.90	2.60
平均值	91.37	964.5	7.5	4.87	2.63

2.3.3 融合控制节能模式控车测试

将融合控制设置为节能运行模式，其他操作与

2.3.1 节的内容一致, 得到速度和牵引力/制动力的曲线如图 10 所示, 运行时间和能耗数据如表 5 所示。

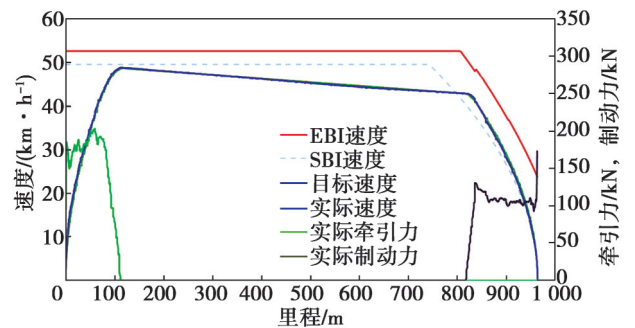


图 10 融合控制节能模式控车试验曲线
Fig. 10 Test curve of integrated control in energy-saving mode

表 5 融合控制节能模式控车试验数据
Table 5 Test data of integrated control in energy-saving mode

试验序号	运行时间/s	运行距离/m	牵引能耗/(kW·h)	再生能量/(kW·h)	总能耗/(kW·h)
1	95.60	964.56	6.13	3.67	2.46
2	95.45	964.27	6.14	3.69	2.45
3	95.65	964.31	6.18	3.62	2.56
4	94.95	964.21	6.25	3.74	2.50
5	95.60	964.72	6.09	3.70	2.39
6	95.70	962.69	6.00	3.64	2.36
7	95.05	964.33	6.10	3.75	2.35
8	95.55	964.31	6.15	3.68	2.48
9	95.65	964.51	6.17	3.67	2.50
10	95.25	965.03	6.06	3.74	2.32
11	95.25	965.05	6.09	3.75	2.34
平均值	95.43	964.36	6.12	3.70	2.43

2.3.4 融合控制精准停车测试

通过融合控制实现进站停车时, 充分考虑电制动到 0 速度 (EB0) 或电空混合制动的特性, 开展精准停车曲线规划及制动力控制。基于 EB0 精准停车得到速度和力的曲线如图 11 所示, 其停车精度数据统计如表 6 所示; 基于电空混合制动的精度数据得到速度和力的曲线如图 12 所示, 其停车精度数据统计如表 7 所示。

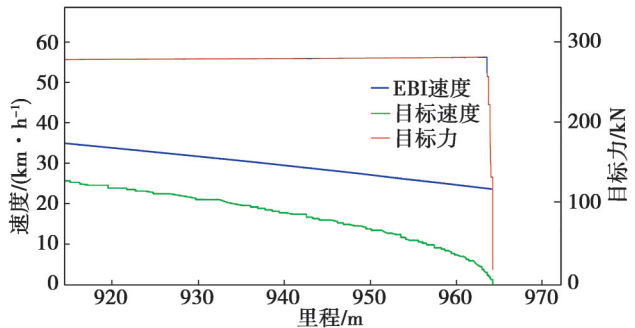


图 11 EB0 精准停车规划曲线
Fig. 11 Planning curve of EB0 precision parking

表 6 精确停车试验结果 (EB0 模式)
Table 6 Test results of precision parking in EB0 mode

序号	试验时间	停车精度/cm
1	2023-09-27T10:30	9
2	2023-09-27T14:07	15
3	2023-09-27T14:12	15
4	2023-09-27T14:16	5
5	2023-09-27T14:30	5
6	2023-09-27T14:45	3
7	2023-09-27T14:52	10
8	2023-09-27T15:12	5

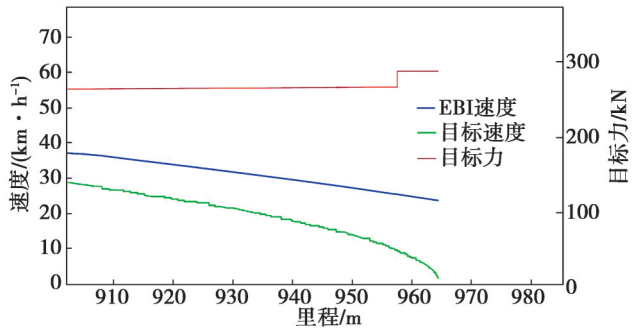


图 12 电空混合精准停车规划曲线
Fig. 12 Planning curve of electro-pneumatic precision parking

表 7 精确停车试验结果 (电空混合制动模式)
Table 7 Test results of precision parking in electro-pneumatic brakg mode

序号	试验时间	停车精度/cm
1	2023-09-26T10:59	20
2	2023-09-26T14:08	10
3	2023-09-26T14:13	10
4	2023-09-26T14:20	2
5	2023-09-26T14:35	5
6	2023-09-26T14:48	10
7	2023-09-26T15:43	5
8	2023-09-26T16:09	10
9	2023-09-26T16:19	5
10	2023-09-26T16:27	5

2.4 结果分析

2.4.1 控制精度

精准的速度控制是确保城轨车辆安全运行、提升旅行速度、降低运行能耗和实现精准停车的前提。采用融合控制快速模式控车时, 列车在“加速—巡航—减速”全程均采用闭环跟踪控制, 巡航阶段的速度控制精度可达 ± 0.5 km/h, 如图 13 所示; 采用融合控制节能模式控车时, 列车长距离惰行阶段采用受控的开环控制, 通过高精度建模可确保速度偏差在可控范围之内, 如图 14 所示。

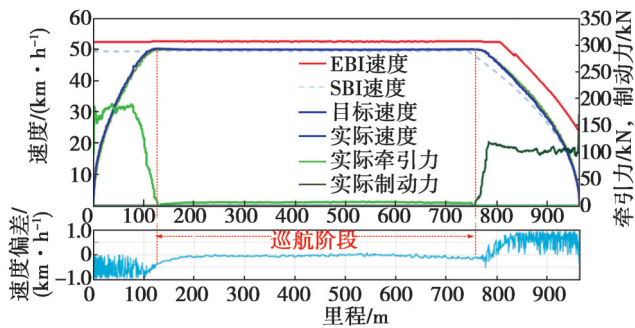


图 13 融合控制快速模式控速精度

Fig. 13 Speed precision of integrated control in fast running mode

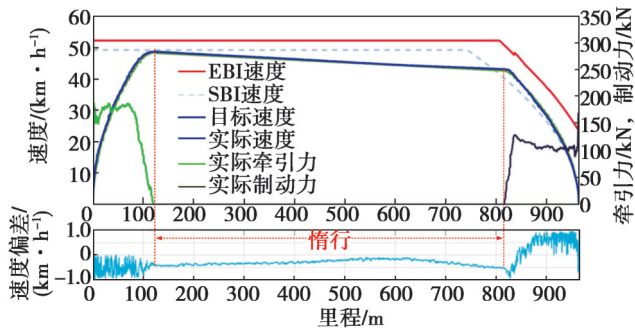


图 14 融合控制节能模式控速精度

Fig. 14 Speed precision of integrated control in energy-saving mode

2.4.2 旅行速度

旅行速度是衡量城轨车辆实际运输效率的重要指标，最高运行速度会直接影响旅行速度，最高速度越大，旅行速度的上升空间越大；反之，旅行速度的受限越大。有关运行效率对比如表 8 所示。

由图 8、图 9 和表 8 可知，采用信号自动运行模式控车时，列车速度始终处于 SBI（service braking intervention）速度之下，最高运行速度约为 48.5 km/h；通过融合控制的快速模式控车时，列车最高巡航速度稍大于 SBI 速度（由于速度跟随控制精度的提高，这种情况下可确保不会触碰 EBI 限速曲线），最高运行速度约为 50.5 km/h，提升了 2 km/h，这使得在相同的运行区间，通过融合控制系统控车比通过信号系统控车的旅行速度更高、运行用时更短，这为提升城市轨道交通的运能和缓解客流量压力提供了新的可能。

表 8 信号自动运行控车与融合控制控车的运行效率对比
Table 8 Comparison of operational efficiency between automatic signal system control and integrated control

驾驶模式	运行距离/m	最高运行速度/(km·h ⁻¹)	运行时间/s	旅行速度/(km·h ⁻¹)
信号自动运行控车	964.54	48.5	98.04	35.42
融合控制快速模式	964.50	50.5	91.37	38.00

2.4.3 运行能耗

列车牵引供电系统是城市轨道交通系统的用电大户^[13]，而列车节能操纵是降低系统能耗的重要手段，其目标是通过寻找最优操纵策略来实现列车在运行过程中的牵引能耗最小。

采用信号系统自动运行控车时，系统在巡航阶段采用连续的“牵引-惰行”控制使列车速度在 SBI 速度下方一定范围内波动，在确保行车安全的同时降低能耗，但由于存在不必要的牵引和制动，系统节能效果有限。采用融合控制的节能模式控车时，由于列车启动时采用较高的加速度，并在满足区间运行时间的前提下延长惰行时间，因此，融合控制采用的最优节能运行曲线可使牵引能耗显著下降，尽管再生制动能量也有所减少，但综合考虑能量变换和传递过程中的损耗，列车实际运行能耗仍然是降低的^[14]，具体如表 9 所示，节能率可达 7.25%。

表 9 信号自动运行控车与融合控制控车的运行能耗对比
Table 9 Comparison of operational energy consumption between automatic signal system control and integrated control

驾驶模式	运行时间/s	牵引能耗/(kW·h)	再生能量/(kW·h)	总能耗/(kW·h)	节能率/%
信号自动运行控车	98.04	7.08	4.46	2.62	
融合控制节能模式	95.43	6.12	3.70	2.43	7.25

2.4.4 乘车舒适度

由图 8~图 10 可知，采用信号自动运行控车时列车在巡航阶段采用连续的“牵引-惰行”方式运行，存在多次牵引；采用融合控制方式控车时列车采用一次牵引，同时针对制动力变化幅度进行限制，减少了纵向冲击，提高了乘车舒适度。

3 结束语

本文针对城市轨道交通车辆常规牵引制动控制指令传输方式进行了研究，提出了一种列车融合控制系统方案，该方案整合了列车控制系统与信号系统功能，优化了牵引制动指令传输路径，并提出了快速运行模式和节能运行模式两种融合控制策略。在宁波地铁外场线针对融合控制系统的控制精度、旅行速度和运行能耗等性能指标进行了现场验证，结果表明：在相同线路和相同区间运行时长的条件下，与信号系统自动驾驶相比，融合控制节能运行模式的总能耗节能率达 7.25%；在相同线路条件下，融合控制快速运行模式的最高旅行速度提升 2 km/h；融合控制系统在全自动运行模式各场景中均能正常工作，满足正线运营需求，具备工程化应用的基础。后续可在本文研究的基础上结合运行计划开展多车节能运行控制，实现多列车间

的节能优化提升。

参考文献:

- [1] CUCALA A P, FEMFINDEZ A, SICRE C, et al. Fuzzy optimal schedule of high speed train operation to minimize energy consumption with uncertain delays and driver's behavioral response[J]. Engineering applications of artificial intelligence, 2012, 25(8): 1548-1557.
- [2] RAHN K, BODE C, ALBRECHT T. Energy-efficient driving in the context of a communications-based train control system[C]//IEEE. 2013 IEEE International Conference on Intelligent Rail Transportation Proceedings. Beijing: IEEE, 2013: 19-24.
- [3] ZLOCKI A, THEMANN P. Methodology for quantification of fuel reduction potential for adaptive cruise control relevant driving strategies[J]. IET intelligent transport systems, 2014, 8(1): 68-75.
- [4] 梅文庆, 史可, 张征方. 基于迭代诱导遗传算法的列车自适应节能策略研究[J]. 机车电传动, 2023(3): 117-123.
MEI Wenqing, SHI Ke, ZHANG Zhengfang. Train adaptive energy saving strategy based on iterative induced genetic algorithm[J]. Electric drive for locomotives, 2023(3): 117-123.
- [5] 谭文举, 贺德强, 王合良. 基于免疫粒子群算法的地铁列车节能优化研究[J]. 机车电传动, 2017(2): 93-95.
TAN Wenju, HE Deqiang, WANG Heliang. Research on energy saving optimization of metro train based on immuneparticle swarm optimization algorithm[J]. Electric drive for locomotives, 2017(2): 93-95.
- [6] 宋勐潇, 李杰, 张洪广. 一种城市轨道交通节能优化控制算法设计[J]. 机车电传动, 2017(2): 101-105.
SONG Mengxiao, LI Jie, ZHANG Hongguang. Design of urban rail transit operation energy saving optimal control method[J]. Electric drive for locomotives, 2017(2): 101-105.
- [7] 唐涛, 黄良骥. 列车自动驾驶系统控制算法综述[J]. 铁道学报, 2003, 25(2): 98-102.
TANG Tao, HUANG Liangji. A survey of control algorithm for automatic train operation[J]. Journal of the China railway society, 2003, 25(2): 98-102.
- [8] 中国城市轨道交通协会. 中国城市轨道交通智慧城轨发展纲要[J]. 城市轨道交通, 2020(4): 8-23.
China Association of Metros. Smart urban rail transit development in China's urban rail transit[J]. China metros, 2020 (4): 8-23.
- [9] 李磊, 杨涛. 地铁列车人工驾驶与自动驾驶能耗研究[J]. 交通与运输, 2023, 39(1): 58-62.
LI Lei, YANG Tao. Energy consumption of manual and automatic driving of subway trains[J]. Traffic & transportation, 2023, 39(1): 58-62.
- [10] 宿帅. 城轨列车运行图和速度曲线一体化节能方法[D]. 北京: 北京交通大学, 2016.
SU Shuai. An energy-efficient approach by integrating the train timetable and speed trajectory in urban rail[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2016.
- [11] YANG Xin, LI Xiang, NING Bin, et al. A survey on energy-efficient train operation for urban rail transit[J]. IEEE transactions on intelligent transportation systems, 2016, 17(1): 2-13.
- [12] 黄舰, 曲健伟. 地铁列车基于惰行控制的节能优化运行研究[J]. 机车电传动, 2015(3): 69-73.
HUANG Jian, QU Jianwei. Study on energy saving and optimization control of metro vehicle based on coasting control [J]. Electric drive for locomotives, 2015(3): 69-73.
- [13] 杨严杰, 贺德强, 郭锐. 轨道交通全自动驾驶及运营节能策略[J]. 控制与信息技术, 2018(6): 14-20.
YANG Yanjie, HE Deqiang, GUO Rui. Strategy of fully automatic operation and energy conservation for rail transit[J]. Control and information technology, 2018(6): 14-20.
- [14] 唐涛, 荀径, 曹芳, 等. 北京地铁亦庄线列车节能驾驶研究[J]. 北京交通大学学报, 2016, 40(4): 19-24.
TANG Tao, XUN Jing, CAO Fang, et al. Research on energy-efficient driving strategy in Beijing-Yizhuang line[J]. Journal of Beijing jiaotong university, 2016, 40(4): 19-24.

Research on integration technology of vehicle control and signal systems
for fully automatic train operation

WANG Xiangyang¹, XIE Baijie¹, LUO Qingyang², LUO Fangxuan², REN Ying², HE Tao²

(1. Ningbo Rail Transit Group Co., Ltd., Ningbo, Zhejiang 315101, China;
2. Zhuzhou CRRC Times Electric Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China)

Abstract: Relevant enterprises in China and abroad are striving to make technological breakthroughs in developing platforms that integrate vehicle control and signal systems to optimize train operation across multiple aspects, including operational control accuracy, dynamic response characteristics, and energy consumption. This paper presents an integrated control approach for automatic train operation in urban rail systems. An integrated control system was developed through reallocating functions for the vehicle control and signal systems. This system is designed to synchronously collect track information, train operation information, and status information of on-board subsystems, and to optimize train control performance through autonomous decision-making, speed planning and tracing algorithms. The performance of this integrated control system was verified through tests conducted on the field test track of the Ningbo metro. Test results demonstrate the proposed control system meets its control objectives regarding punctuality, comfort, and energy saving. Notably, the total energy-saving rate reached approximately 7.25% in the energy-saving mode of integrated control.

Keywords: integrated control; speed control; increase of travelling speed; energy saving; automatic operation system; metro vehicle; urban rail transit