

高速动车组强耦合模型的分布式滑模控制策略

李中奇^{1,2} 金柏^{1,2} 杨辉^{1,2} 谭畅^{1,2} 付雅婷^{1,2}

摘要 高速动车组是由多节车辆与钩缓装置链接而成的复杂系统. 将钩缓装置等效成弹簧-阻尼器系统, 分析动车组运行过程中钩缓装置对相邻车辆作用的动力学机理, 明确作用方式, 建立高速动车组的强耦合模型. 根据列车模型动力或制动力输入的分散特征, 设计分布式神经网络滑模控制策略, 对高速动车组进行速度跟踪控制. 为减小速度跟踪过程中未知因素对高速动车组控制精度的影响, 利用列车历史运行数据, 采用历史工况数据中心对当前控制律输出进行补偿以提高控制精度与实用稳定性. 采用高速动车组运行仿真平台的仿真实验结果表明, 该建模方法较以往多质点模型更能体现高速动车组运行特性, 且采用补偿规则的控制策略优于传统控制效果.

关键词 高速动车组, 强耦合模型, 分布式神经网络滑模控制, 跟踪控制, 数据补偿

引用格式 李中奇, 金柏, 杨辉, 谭畅, 付雅婷. 高速动车组强耦合模型的分布式滑模控制策略. 自动化学报, 2020, 46(3): 495-508

DOI 10.16383/j.aas.190216

Distributed Sliding Mode Control Strategy for High-speed EMU Strong Coupling Model

LI Zhong-Qi^{1,2} JIN Bai^{1,2} YANG Hui^{1,2} TAN Chang^{1,2} FU Ya-Ting^{1,2}

Abstract The high-speed EMU (electric multiple units) is a complex system composed of multi-section vehicles and hooking devices. This paper compares the hooking device into a spring-damper system, and analyzes the dynamic mechanism and mode of the action of coupler and buffer device on adjacent vehicles during the operation of high-speed EMU, and then, establishes the strong coupling model of high-speed EMU. According to the decentralized characteristics of the input of train model power or braking force, a distributed neural network sliding mode control strategy is designed to track the speed of high-speed EMU. In order to reduce the influence of unknown factors on the control accuracy of high-speed EMU during speed tracking, using the historical train operating data, the historical operating data center is used to compensate the current control law to improve control accuracy and practical stability. The simulation results of the high-speed EMU Operation Simulation Platform show that the modeling method can better reflect the operation characteristics of the high-speed EMU than the previous multi-point model, and the control strategy with compensation rules is better than the traditional control effect.

Key words High-speed electric multiple units (EMU), strong coupling model, distributed neural network sliding mode control, tracking control, data compensation

Citation Li Zhong-Qi, Jin Bai, Yang Hui, Tan Chang, Fu Ya-Ting. Distributed sliding mode control strategy for high-speed EMU strong coupling model. *Acta Automatica Sinica*, 2020, 46(3): 495-508

列车运行控制系统是高速铁路的关键组成之一, 它直接关系到高速列车的安全稳定运行, 并且研究面向自动驾驶的高速列车自动驾驶技术是未来一段时间内列车运行控制系统的研究方向^[1-2]. 由于

高速列车动力结构分散, 车辆间由车钩缓冲装置链接而成, 使得运行动力学模型中包含非线性和未知时滞等运行特点, 运行参数难以直接测量, 使得对列车运行过程的精确建模和优化控制提出了更高的要求. 为确保列车安全、准时和经济的运行, 研究高速列车运行过程动力学建模与优化控制方法及其应用研究, 对国内高速列车率先实现自动驾驶具有重要意义.

高速动车组运行时多种未知变化的不确定因素, 包括未知车钩力、未知时延和未知外界干扰等因素. 根据实际动车组运行过程的控制要求, 众多学者对高速动车组建模方法与控制策略进行了大量的研究, 建立适用于高速动车组的动力学模型和控

收稿日期 2019-03-21 录用日期 2019-07-30

Manuscript received March 21, 2019; accepted July 30, 2019

国家自然科学基金 (51565012, 61673172, 61663013, 61803155) 资助
Supported by National Natural Science Foundation of China (51565012, 61673172, 61663013, 61803155)

本文责任编辑 董海荣

Recommended by Associate Editor DONG Hai-Rong

1. 华东交通大学电气与自动化工程学院 南昌 330013 2. 江西省先进控制与优化重点实验室 南昌 330013

1. School of Electrical and Automation Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013 2. Key Laboratory of Advanced Control and Optimization of Jiangxi Province, Nanchang 330013

制方法. 文献 [3-5] 考虑高速动车组运行过程中的不同线路条件 (如弯道、坡道、摩擦等), 不同的天气因素 (如强风、顺风等), 分析了对高速动车组动力学模型的量化影响, 建立了优化的列车运行过程动力学模型. 但在长下坡道路或弯道路况条件下, 或者受风力因素影响, 多编组的高速列车前后车辆运行规律一般会不同, 其车钩的链接作用会突显. 对于列车车钩的一些研究, 如文献 [6] 从列车链接处各部件动力学机理出发建立了纵向 - 垂向耦合模型. 文献 [7] 分析了列车车钩缓系统各部件几何非线性机理, 提出了列车运动时三自由度的计算方法. 结合车钩模型的研究, 文献 [8-9] 将高速动车组描述成多动力单元结构. 文献 [10] 进行了二进制微粒群算法下高速列车输入控制力与作用距离的关系的控制方法探究, 同时简要考虑了停车准时条件与能耗条件. 或者有学者直接将列车当作“黑箱”系统, 采用数据驱动的辨识方法进行虚拟参数辨识而得到的模型. 如文献 [11] 分析了高速动车组 Hammerstein 模型的静态部分与动态部分, 并用思维进化算法 (Mind evolutionary algorithm, MEA) 对动态部分进行了误差辨识, 取得了一定的效果. 文献 [12] 建立了以均方根误差最小, 参数饱和为约束的一阶、二阶、三阶模型, 最后得到了最佳的二阶近似模型. 在考虑改进的建模方法基础上, 一并改进了优化策略与控制算法. 文献 [13] 在城轨列车一阶运行模型的基础上详细分析了驾驶经验的影响. 文献 [14] 设计了误差最小的评价指标, 对列车一阶制动系统模型进行了参数辨识. 文献 [15] 尝试采用极大似然估计法对高速动车组的非线性部分与未知部分进行系数辨识. 文献 [16] 建立了高速动车组多个局部线性辨识模型. 文献 [17] 提出了一种利用运行数据驱动的子空间预测模型. 文献 [18] 在文献 [17] 基础上考虑了预测模型误差的延时效果, 建立了列车自适应模型. 这些利用数据驱动的虚拟参数建模方法准确率较高, 但主要在于模型的难以解释性, 无法解释其推理过程, 一旦系统发生故障难以进行针对性的改进, 并且重要的是, 不足以应对运行过程中的突发情况.

列车的复杂运行特性也对控制策略提出了较高的要求, 要求既能应对突发情况又能保持良好的跟踪能力. 如文献 [19] 依据列车牵引动力学计算模型设计了自适应终端滑模控制器. 文献 [20] 分析了多种优化目标下的高速动车组混合系统模型, 设计了混合系统模型预测控制器 (Hybrid system model predictive control, HMPC). 文献 [21] 对一阶高速动车组延时模型设计了滑模 PID 组合控制器. 文献 [22]

提出了针对动车组分布式模型的预测控制器. 文献 [23] 在文献 [22] 基础上增加了约束指标, 把高速动车组当作与相邻车辆相关的智能体进行的预测控制器设计. 文献 [24] 建立了理想与存在干扰两种情况下列车制动过程的动态模型, 设计了基于增广误差的模型参考自适应控制器. 从这些文章中可以看到, 控制方法主要采用单一集中式控制, 对动力分散的高速列车来说, 分布式控制策略会更好分配机车动力^[22], 减小车钩的纵向冲动, 保证列车的平稳运行性能.

根据以上研究成果分析, 关于高速列车运行过程建模, 大多研究学者考虑高速列车的运行环境如坡道、隧道、弯道、天气条件等外部条件, 忽略了动车组运行过程中车钩对相邻车辆的作用方式而影响车辆及全车运行动力学特性的本质; 数据驱动的虚拟参数模型有时又不足以应对路况条件的变化. 因此, 考虑基于车钩对相邻车辆的内在作用规律, 从钩缓装置作用的实质出发, 建立揭示内部运动作用规律的高速动车组强耦合模型. 在列车运行速度跟踪控制方面, 采用传统的 PID 控制器虽有控制算法简单, 运行快速等优点. 但也存在调节频繁、超调大等缺点. 预测控制的效果一般要好于 PID 控制, 但预测控制计算量大, 实时性差, 很难满足实际列车运行对实时性的要求. 文献 [4, 21] 的滑模控制策略具有良好的跟踪能力和较强的鲁棒性, 并且随着高速动车组频繁的往返运行与相同的区间, 随着运营里程的增加, 会产生大量的历史运行数据. 发掘历史运行数据的潜在价值^[25], 研究采用历史数据信息修正动车组速度跟踪控制器的控制量, 以减小高速动车组运行过程中未知因素对控制器的影响, 提高应用稳定性, 故建立工况数据中心修正的滑模控制器对高速动车组进行速度跟踪控制.

1 高速动车组强耦合系统模型

高速动车组由多节动车和拖车通过车钩链接而成, 为能更好的描述动车组运行实际的单节车辆动力学过程, 提高其运行过程的建模精度, 必须要结合精确的车钩缓冲器数学模型, 并考虑车钩力在车辆间的传递规律. 因此, 本文研究了考虑不同位置与环境因素对纵向车钩力变化的内在影响因素与作用规律, 建立高速列车运行过程的强耦合模型.

1.1 高速动车组的纵向动力学分析

高速动车组运行过程包括牵引、制动和惰行等工况. 牵引工况是动车组里的动力车牵引电机产生驱使列车向前运行的转矩, 一般用于提升或保持列车运行速度; 制动工况是通过动力车使牵引电机产

生反向转矩和全部车辆的机械制动, 使列车减速运行或停车; 惰行工况是列车既不施加牵引力也不施加制动力, 列车靠自身惯性运行的一种工况; 列车在各工况运行都需要保证安全运行、舒适乘坐、准确停靠等多目标. 实现动车组多目标运行控制的基础是建立更加准确可靠的列车运行过程模型.

传统的高速动车组多质点模型并没有明确车钩力对各车辆的运动影响规律, “淡化” 影响结果. 本文在多质点模型的基础上, 继续考虑了动车组内部各车辆的功能特性, 即动车有牵引电机的控制力输入作用, 也有制动系统的制动力作用, 而拖车没有控制力的输入, 仅有制动力的输入. 并且多辆车之间通过车钩复杂作用链接起来的, 车钩等效成弹簧 - 阻尼器系统^[6]. 国内某型号的高速动车组如图 1 所示, 其中, 白色轮对表示该车辆为拖车, 黑色轮对表示该车辆为动车.



图 1 国内某型号的高速动车组

Fig. 1 A certain type of high-speed EMU in China

考虑到实际情况, 虽然车辆间的耦合作用力是由高速动车组运行过程中多节车辆共同作用产生的, 但作用方式与影响效果仅仅依靠相邻车辆作用并表现出来, 进而影响高速动车组整体运行状况. 并且车辆间的相互耦合作用力是一个与运行速度、与运行位置有关的复杂变化过程. 动车组列车车辆间通过车钩缓冲器对各车辆受力作用规律如图 2 所示, 其中车辆间的相互耦合作用力是由相邻两辆车的位置信息和速度信息共同决定, 若车钩缓冲器在拉伸状态, 则对前车表现为阻力, 同时对后车表现为拉力. 该模型也同时区分了各个车辆的功能特性, 揭示了各个车辆的运动内在规律, 较为合理地描述了高速动车组的实际运行过程.

以上结合车钩缓冲装置模型对高速动车组运行影响的内在规律进行分析, 详细描述了车钩对相邻车辆的运动状态影响. 接下来继续给出对动车 - 拖车系统链接部分、动车 - 动车系统链接部分的具体建模方法, 拖车 - 拖车系统链接部分分析方法类似, 不单独讨论. 最后构建高速动车组运行过程动力学强耦合模型.

1.2 动车 - 拖车动力学系统建模

高速动车组动车与拖车的链接如图 3 所示, 其描述了弹簧 - 阻尼器系统约束下的动车 - 拖车 ($M - T$) 的运行特性. 现针对拖车为运行方向前车, 动车

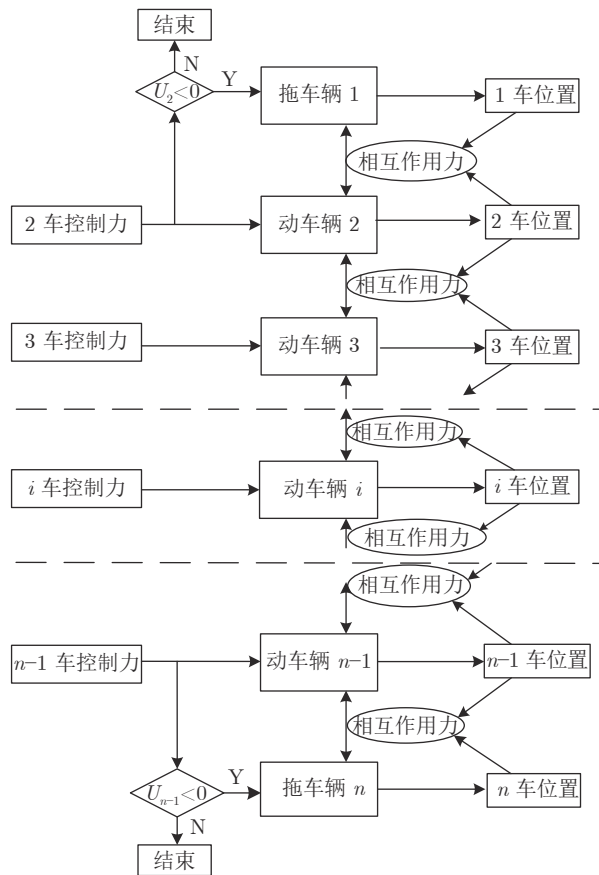


图 2 高速动车组弹簧-阻尼器系统强耦合模型

Fig. 2 Strong coupling model of spring damper system for high speed EMU

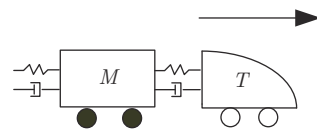


图 3 高速动车组动车与拖车链接示意图

Fig. 3 Schematic diagram of high-speed EMU locomotive and trailer link

为后车的运行方式进行动力学分析, 拖车为后车情况分析方法与其类似. 在动车获得牵引力之后, 拖车在弹簧 - 阻尼器系统下获得一个与运行方向相同的推动, 产生实时变化的运动加速度. 当动车牵引力稳定后, 弹簧 - 阻尼器系统处在一种相对稳定的状态, 即两节车辆保持在一个相对稳定的速度运行.

在动车与拖车运行位置、运行速度不断调整的过程中, 对动车 - 拖车系统进行动力学分析如图 4 所示. 其中, 把动车等效成质点 M , 拖车等效成质点 T , x_M 为质点 M 的运行位置, x_T 为质点 T 的运行位置, c 为阻尼器的阻尼系数, k 为弹簧的弹簧系数. 对质点 T 进行受力分析, 运行前进方向受到弹

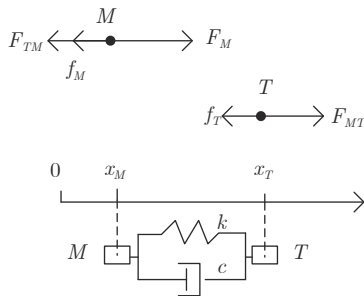


图 4 动车与拖车系统动力学分析

Fig. 4 Dynamic analysis of locomotive and trailer system

簧 - 阻尼器系统的推力 F_{MT} , 相反方向受到运行阻力 f_T 的作用. 对质点 M 进行受力分析, 前进方向受到牵引电机提供的动力输入 F_M , 相反方向受到弹簧 - 阻尼器系统的反推力 F_{MT} , 同时受到运行阻力 f_M 的作用. 得到高速动车组动车 - 拖车弹簧阻尼器系统的动力学方程为

$$\begin{cases} m_T \ddot{x}_T = F_T + F_{MT} - f_T \\ m_M \ddot{x}_M = F_M - F_{MT} - f_M \end{cases} \quad (1)$$

式中, F_T 被设计的目的是为了表示高速动车组在制动工况下对拖车辆的制动力, 与图 2 所描述的相同, 加入阈值约束, 即列车在加速或者惰行工况下, 此值为零, F_{MT} 由弹簧 - 阻尼器系统动力学方程式 (2) 确定.

$$F_{MT} = \begin{cases} L^{-1}(e^{-T_{MT}s}) \times [c(\dot{x}_M - \dot{x}_T) + k(x_M - x_T)], & |x_M - x_T| \leq \delta_{\max} \\ 0, & |x_M - x_T| > \delta_{\max} \end{cases} \quad (2)$$

式中, F_{MT} 表示两节车辆运行过程中的耦合作用力, 并且可以简单的实时计算. s 为拉普拉斯算子, $L^{-1}(e^{-T_{MT}s})$ 为时域车钩耦合作用力的延时环节. $k(x_M - x_T)$ 表示车钩弹簧刚度力, $c(\dot{x}_M - \dot{x}_T)$ 表示阻尼力, δ_{\max} 为缓冲器行程容量.

式 (1) 和式 (2) 描述了高速动车组机车 - 拖车在弹簧 - 阻尼器系统作用下的运行调整过程, 给出了高速动车组在加速、惰行、制动各工况车辆的位置、速度和加速度的关系.

1.3 动车 - 动车 - 动车动力学系统建模

高速动车组动车与动车的链接广泛存在于列车编组中, 如图 5 所示, 其描述了弹簧 - 阻尼器系统约束下的动车 - 动车 - 动车 ($M_{i-1} - M_i - M_{i+1}$) 系统的运行特性. M_{i-1} 与 M_{i+1} 分别为 M_i 动车的左右相邻动车, 运行方向向右. 在车钩的弹簧 - 阻尼

器系统约束下, 当 M_{i+1} 动车的相对位置大于 M_i 动车时, 车钩系统产生的力对 M_{i+1} 动车表现为阻力, 对 M_i 动车表现为拉力, 进一步影响两节动车的运动状态的改变. M_i 动车与 M_{i-1} 动车的动力学分析类似, 不赘述.

在动车与动车运行位置、运行速度不断调整的过程中, 对动车 - 动车系统进行动力学分析如图 6 所示. 其中动车分别等效成质点 M_{i-1} , M_i , M_{i+1} , $x_{M_{i-1}}$, x_{M_i} , $x_{M_{i+1}}$ 分别为对应质点相对位置, c 为阻尼器的阻尼系数, k 为弹簧的弹簧系数.

对质点 M_i 进行受力分析, 其运行方向受到牵引电机提供的动力 F_{M_i} , 受到车辆 M_{i+1} 作用在车辆 M_i 的拉力. 需要注意的是, 在质点 M_{i+1} 的相对位置大于质点 M_i 时, 此力为正值; 在质点 M_{i+1} 的相对位置小于质点 M_i 时, 此力为负值. 运行反方向受到质点 M_{i-1} 作用到质点 M_i 的阻力 (动力学规律同上), 受到运行阻力 f_{M_i} 的作用. 得到高速动车组动车 - 动车车弹簧阻尼器系统的动力学方程为

$$\begin{cases} \vdots \\ m_{M_i} \ddot{x}_{M_i} = F_{M_i} + L^{-1}(e^{-T(M_i M_{i+1})s}) \times [c(\dot{x}_{M_{i+1}} - \dot{x}_{M_i}) + k(x_{M_{i+1}} - x_{M_i})] - L^{-1}(e^{-T(M_i M_{i-1})s}) \times [c(\dot{x}_{M_i} - \dot{x}_{M_{i-1}}) + k(x_{M_i} - x_{M_{i-1}})] - f_{M_i} \\ \vdots \end{cases} \quad (3)$$

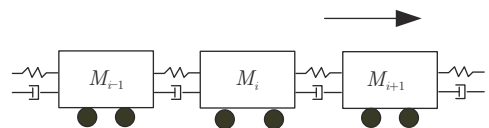


图 5 高速动车组动车与动车链接示意图

Fig. 5 Schematic diagram of high-speed EMU locomotive and locomotive link

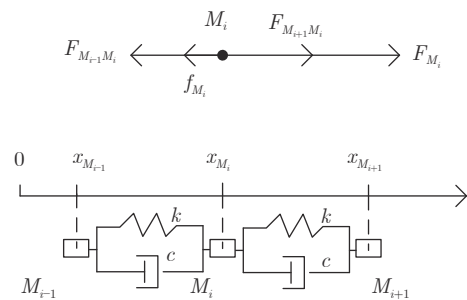


图 6 动车 - 动车系统动力学分析

Fig. 6 Locomotive-locomotive system dynamics analysis

式中各变量所代表的物理意义同第 1.2 节. 式 (3) 确定了质点 M_i 的动力学数学表达式, 质点 M_{i-1} 和质点 M_{i+1} 的表示式类似. 其描述了高速动车组机车与机车之间的运动学规律, 强调了弹簧 - 阻尼器系统约束下高速动车组的动力学作用结构, 进而为分析整个列车系统的运动学规律提供条件.

高速动车组是一个由多动力车辆组成的, 靠车钩链接起来的复杂系统, 并且高速运行在铁路区间线路内, 其弹簧 - 阻尼器系统约束下的动车 - 动车车链接方式普遍存在. 建立的模型应该在复杂路况环境, 不同牵引力输入, 内部作用的多种状况下, 都能明确反映各节车辆的运行指标数据, 才能进一步设计合理可靠的控制策略, 保证高速动车组安全正常运行.

1.4 车钩力作用方式与强耦合模型建立

高速动车组车辆间耦合作用力直接影响了列车整体的运行情况, 多质点强耦合模型较以往多质点模型能更好描述各车辆受力运行规律的渐变过程. 根据第 1.2 节与第 1.3 节对高速动车组不同车辆间弹簧 - 阻尼器系统约束下的动力学规律分析, 结合各车辆功能特点, 建立多质点强耦合模型. 从车钩力的实际作用效果的分析中, 可以发现本文建立的高速动车组强耦合模型是一个与车辆期望运行方式相关的过程, 可以描述为图 7(a) 与图 7(b) 两种延时类型的作用方式.

图 7(a) 表示车辆两端的的车钩力同步延时作用到相邻两节车辆上, 同时改变相邻两节车辆运动状态. 而图 7(b) 描述车辆间的延时车钩力对相邻两节车辆的作用再一次产生了延时, 称为异步延时作用. 从本质上分析, 图 7 说明, 如果初始时刻的高速动车组车辆位置决定性因素不同, 其运行指标的变化程度不尽相同, 为了能达到预期的目的, 可以根据实际情况进行具体分析. 进而可以得到高速动车组弹簧 - 阻尼器系统强耦合模型, 如式 (4). 式中, f_i 项为高速动车组第 i 节车辆的运行阻力, 其他同第 1.3 节. 为了建立高速动车组的强耦合模型, 有必要对高速动车组运行过程中的阻力进行适当的分析.

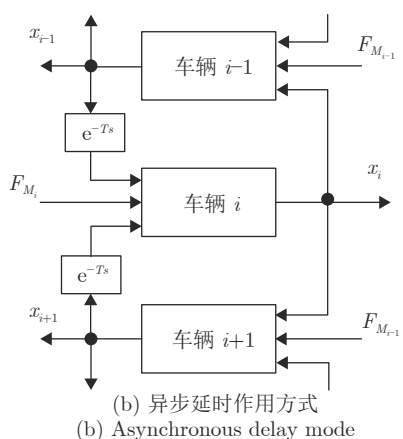
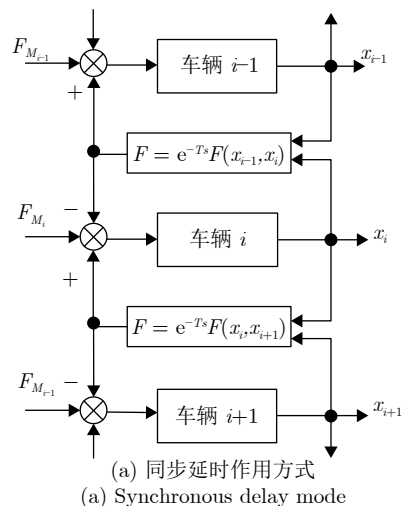


图 7 两种延时类型的作用方式
Fig. 7 Two types of delay mode

高速动车组的运行阻力包括基本阻力和附加阻力: 基本阻力是构成动车和拖车的零部件之间的运动阻力, 是由运行中的空气摩擦以及车轮与轮轨的摩擦和冲击等原因造成的, 并且运行中一直存在的阻力; 附加阻力是指线路, 隧道等形成的阻力, 包括坡道附加阻力, 曲线附加阻力和隧道附加阻力. 根据高速动车组牵引计算规程, 可以通过式 (5) 近似计算得出.

$$\begin{cases} m_{M_1} \ddot{x}_{M_1} = F_{M_1} + L^{-1} (e^{-T_{12}s}) [c(\dot{x}_{M_2} - \dot{x}_{M_1}) + k(x_{M_2} - x_{M_1})] - f_1 \\ \vdots \\ m_{M_i} \ddot{x}_{M_i} = F_{M_i} + L^{-1} (e^{-T_{M_i M_{i+1}}s}) [c(\dot{x}_{M_{i+1}} - \dot{x}_{M_i}) + k(x_{M_{i+1}} - x_{M_i})] - \\ \quad L^{-1} (e^{-T_{M_i M_{i-1}}s}) [c(\dot{x}_{M_i} - \dot{x}_{M_{i-1}}) + k(x_{M_i} - x_{M_{i-1}})] - f_i \\ \vdots \\ m_{M_n} \ddot{x}_{M_n} = F_{M_n} + L^{-1} (e^{-T_{M_n M_{n-1}}s}) [c(\dot{x}_{M_{n-1}} - \dot{x}_{M_n}) + k(x_{M_{n-1}} - x_{M_n})] - f_n \end{cases} \quad (4)$$

易实现, 设置滑模函数为 $s = \dot{e} + ce$, c 值为滑模面的切换系数, 通过调整合适的参数 c 值, 既可以保证滑动模态到达过程的动态品质, 又可以减弱控制信号的高频抖动, 但不合适的参数 c 值会导致抖振. 由于在滑模面附近产生的“抖振”现象只能使其影响最小, 目前, 关于此问题的解决方法, 主要有降低切换增益^[27]、观测器方法^[28]、滤波方法^[29-30]、带有约束的优化算法等, 也各有优缺点, 同时这些算法也被应用于离散系统、时延系统等. 综合考虑列车的实际运行条件, 利用神经网络的万能逼近的优良特性及在线学习的能力, 用以逼近列车运行过程中的未知部分, 抑制滑模变结构控制的“抖动”影响, 提高列车运行过程的动态性能^[31], 即采用神经网络分别逼近函数 $F(\dot{X}, X)$, $G(\dot{X}, X)$, 闭环控制系统如图 8 所示.

设计的神经网络输入输出算法为

$$h_f(\bar{X}) = \frac{(C - \beta)\dot{X} - \gamma\phi(\dot{X}) + KX - \alpha}{M} \quad (12)$$

$$h_g(\bar{X}) = \frac{1}{M} \quad (13)$$

$$F = W^{*\top}h_f(X) + \varepsilon_f, G = V^{*\top}h_g(X) + \varepsilon_g \quad (14)$$

式中, X 为网络输入, h 为函数的中间变量, W^* 和 V^* 分别为逼近 $F(\dot{X}, X)$ 和 $G(\dot{X}, X)$ 的理想网络权值, ε_f 和 ε_g 为网络逼近误差, 且 $|\varepsilon_f| \leq \varepsilon_{Mf}$, $|\varepsilon_g| \leq \varepsilon_{Mg}$. 设计式 (12) 和式 (13) 表示了对影响高速动车组模型的已知因素逼近, 式 (14) 表示了对影响高速动车组模型的未知因素逼近. 由于式 (14) 是理想状态下的网络结构, 设计实际输出为

$$\hat{F} = \hat{W}^\top h_f(\bar{X}), \hat{G} = \hat{V}^\top h_g(\bar{X}) \quad (15)$$

式 (14) 的目的在于分析系统稳定性的表示需要. 式 (15) 中的 \hat{W} , \hat{V} 将在接下来的改进控制器中给出自适应变化律.

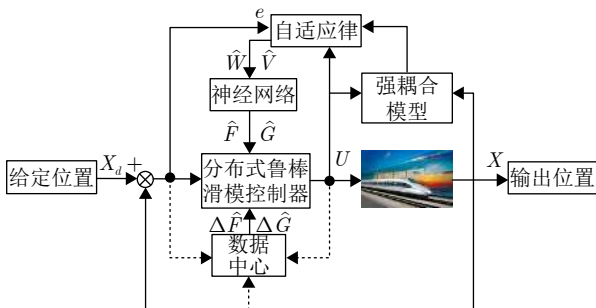


图 8 高速动车组分布式神经网络自适应滑模控制框图
Fig. 8 Block diagram of neural network adaptive sliding mode control for high speed EMUs

2.2 工况数据中心修正补偿规则

某固定车次高速动车组基本是按照调度准时发车, 额定运行, 定点停靠的原则运行的, 因此, 在同一区间内、同一车次运行的高速动车组牵引力时间曲线与速度时间曲线存在一个相对稳定的变化范围与变化程度. 基于这样的考虑, 提出了工况数据中心对高速动车组运行控制器的补偿规则, 以发现历史运行数据中的规律, 并利用高速动车组历史运行数据中的内在价值, 进而提高控制器的实用稳定性与适用性, 增强泛化能力.

如图 9, 为动车组优化的工况数据中心修正补偿逻辑框图. 具体描述为: 通过测量单元测量动车组的运行状态, 计算出未知因素对当前运动状态的影响, 结合初值设定, 对历史数据中心进行计算, 得到控制量的修正值, 组成闭环下优化控制器的策略. 若出现新发工况, 可对新发工况下的列车运行状态数据进行记录, 留作备用. 进而, 表述为高速动车组的每一次区间内运行都可以获取数据中心的 X_d, U, X . 即

$$X_d(t) = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ \cdots \ x_p \ \cdots \ x_q]$$

$$U(t) = \begin{bmatrix} u_{11} & u_{12} & u_{13} & \cdots & u_{1p} & \cdots & u_{1q} \\ u_{21} & u_{22} & u_{23} & \cdots & u_{2p} & \cdots & u_{2q} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ u_{i1} & u_{i1} & u_{i1} & \cdots & u_{ip} & \cdots & u_{iq} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ u_{n1} & u_{n2} & u_{n3} & \cdots & u_{np} & \cdots & u_{nq} \end{bmatrix}$$

$$X(t) = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ \cdots \ x_p \ \cdots \ x_q]$$

其中, $1, 2, 3, \dots, p, \dots, q$ 为高速动车组运行的时间序列, i 为高速动车组的车辆编号. 设数据中心共存有特定区间内高速动车组运行数据 m 组, 现给出历史数据下的修正规则.

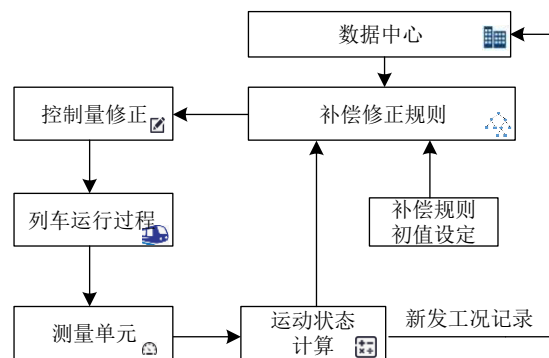


图 9 优化控制器输出的补偿规则逻辑
Fig. 9 Optimize the compensation rule logic of the controller output

算法 1. 历史数据下的修正规则

输入. m 组历史给定位置矩阵 X_d , 历史控制力输入矩阵 U , 历史输出位置矩阵 X .

过程.

1. for $j = 1:1:m$
2. for $i = 1:1:p$
3. $\begin{cases} \text{search}[U_{up} | \text{diff}(X) - \text{diff}(X_d) \geq \varphi_1] \\ \text{search}[U_{down} | \text{diff}(X) - \text{diff}(X_d) < \varphi_2] \end{cases}$
4. $\text{new}(U) = [U_{up} \oplus U_{down}]$
/*表示把寻到的数据按原时刻组合成新矩阵*/
5. end for
6. end for
7. 得到 $\text{new}(U)$, 已知 X .
8. for $i = 1:1:p$
9. for $j = 1:1:n$
- 10.

$$\begin{cases} \text{diff}[X(i) - X(i-1)] = \\ \quad G_{ji} \text{new}(U)(ji) + F_{ji} \\ \text{diff}[X(i+1) - X(i)] = \\ \quad G_{j(i+1)} \text{new}(U)(ji+1) + F_{j(i+1)} \end{cases}$$

11. $\Delta G(ji) = rG_{ji} \quad \Delta F(ji) = rF_{ji}$
/* r 为工况数据中心对控制器输出的影响因子, U_{up} 对应 r 值为负, U_{down} 对应 r 值为正.*/
12. end for
13. end for

输出. $\Delta F, \Delta G$.

/*根据实际情况, 约定 $\Delta F, \Delta G \leq \zeta$, ζ 为一个较小实数矩阵.*/

算法 1 中, p 为当前运行时刻. 步骤 1~6 表示遍历数据中心实际运行速度大于或小于给定运行速度时刻点, φ_1 与 φ_2 为初始设定的阈值; 步骤 8~11 表示历史数据对控制量的修正值, r 为初始设定的影响因子; 步骤 10 采用滚动循环实时计算未知参数的补偿值, 目的就是为了提高该算法的实用性. 优化后的计算结果就代表了工况数据中心控制器输出的补偿修正. 高速动车组控制器在自动驾驶方面就具有足够的认知能力, 应对一些未知因素引起的误差. 算法的框图表示见图 10.

本文考虑了工况数据中心修正项 ($\Delta F, \Delta G$) 的神经网络滑模控制器, 表示为

$$U = \frac{1}{\hat{G} + \Delta G} \left[-(\hat{F} + \Delta F) + \ddot{X}_d + c\dot{e} + \eta \text{sgn}(s) \right] \quad (16)$$

式中, $\eta = \text{diag}\{\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_i, \dots, \eta_m\} \geq D$, η 为系统运动点趋近切换面的速度.

为了保证控制器中分母项不为零或过大, 引入判别机制, 即若分母项为零或超过阈值, 控制器保

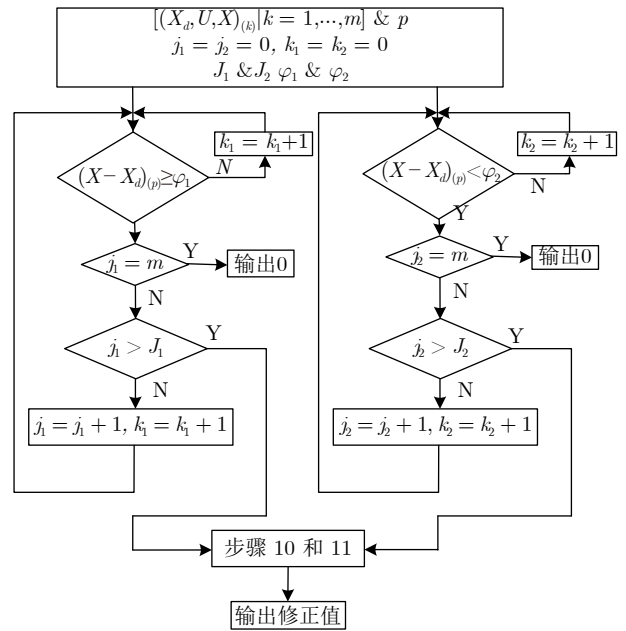


图 10 工况数据中心修正算法框图

Fig. 10 Data center correction algorithm block diagram

持为上一时刻的输出, 因为在一定时间内, 牵引力短时间下降, 但由于惯性存在, 运行速度不会瞬时改变. 或者引入映射机制, 将控制量输出保证在一定的区间范围内.

考虑需要达到对高速动车组运行数据的优化处理的目的, 提出了控制器参数在工况数据中心下的修正补偿规则, 其在一定程度上具有了运行的认知修正能力, 通过工况数据中心修正使得控制器输出更加接近最优值, 可以在未来高速动车组的自动驾驶性能上就会有着更加优秀的表现.

2.3 控制策略的稳定性证明

现在简要证明控制策略的稳定性, 考虑控制律式 (16) 与滑模函数 $s = \dot{e} + ce$, 得式 (17). 式中, $\tilde{W} = W^* - \hat{W}$, $\tilde{V} = V^* - \hat{V}$, 且有式 (18) 和式 (19).

$$\begin{aligned} \dot{s} &= \ddot{e} + c\dot{e} = \ddot{X}_d - \ddot{X} + c\dot{e} = \\ & \ddot{X}_d - F - GU - d(t) + c\dot{e} = \\ & \ddot{X}_d - F - (\hat{G} + \Delta G)U + (\hat{G} + \Delta G - G)U - d(t) + c\dot{e} = \\ & \ddot{X}_d - F - (\hat{G} + \Delta G)U + (\hat{G} + \Delta G - G)U - d'(t) + c\dot{e} = \\ & (\hat{F} + \Delta F - F) - \eta \text{sgn}(s) + (\hat{G} + \Delta G - G)U - d'(t) = \tilde{F} + \Delta F - \\ & \eta \text{sgn}(s) + (\tilde{G} + \Delta G)U - d'(t) = \tilde{W}^T h_f(X) - \varepsilon_f + \\ & \Delta F - \eta \text{sgn}(s) + (\tilde{V}^T h_g(X) - \varepsilon_g + \Delta G)U - d'(t) \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned}\tilde{F} &= \hat{F} - F = \\ \hat{W}^T h_f(X) - W^{*T} h_f(X) - \varepsilon_f &= \\ \tilde{W}^T h_f(X) - \varepsilon_f\end{aligned}\quad (18)$$

$$\begin{aligned}\tilde{G} &= \hat{G} - G = \\ V^T h_g(X) - V^{*T} h_g(X) - \varepsilon_g &= \\ \tilde{V}^T h_g(X) - \varepsilon_g\end{aligned}\quad (19)$$

设计 Lyapunov 函数为式 (20).

$$L = \frac{1}{2} \|s\|^2 + \frac{1}{2\gamma_1} \tilde{W}^T \tilde{W} + \frac{1}{2\gamma_2} \tilde{V}^T \tilde{V}\quad (20)$$

式中, $\gamma_1 > 0$, $\gamma_2 > 0$. 考虑式 (17), 得式 (21).

$$\begin{aligned}\dot{L} &= s\dot{s} + \frac{1}{\gamma_1} \tilde{W}^T \dot{\tilde{W}} + \frac{1}{\gamma_2} \tilde{V}^T \dot{\tilde{V}} = \\ s &\left[\tilde{W}^T h_f(X) - \varepsilon_f + \Delta F - \eta \operatorname{sgn}(s) + (\tilde{V}^T h_g(X) - \varepsilon_g + \Delta G)U - d'(t) \right] + \\ &\frac{1}{\gamma_1} \tilde{W}^T \dot{\tilde{W}} + \frac{1}{\gamma_2} \tilde{V}^T \dot{\tilde{V}} = \\ &\tilde{W}^T (sh_f(X) + \frac{1}{\gamma_1} \dot{\tilde{W}}) + \tilde{V}^T (sh_g(X)U + \frac{1}{\gamma_2} \dot{\tilde{V}}) + \\ &s[-\varepsilon_f + \Delta F - \eta \operatorname{sgn}(s) - (\varepsilon_g + \Delta G)U - d'(t)]\end{aligned}\quad (21)$$

取自适应律为

$$\dot{\tilde{W}} = -\gamma_1 sh_f(X)\quad (22)$$

$$\dot{\tilde{V}} = -\gamma_2 sh_g(X)U\quad (23)$$

则有

$$\begin{aligned}\dot{L} &= s[-\varepsilon_f + \Delta F - \eta \operatorname{sgn}(s) - (\varepsilon_g + \Delta G)U - d'(t)] \\ &= [-\varepsilon_f + \Delta F - (\varepsilon_g + \Delta G)U - d'(t)]s - \eta |s|\end{aligned}\quad (24)$$

由于神经网络逼近误差 ε_f 和 ε_g 为非常小的实数, 并且工况中心数据修正值对当前控制器的影响因子 r 也为非常小的实数, 即 ΔF , ΔG 为非常小的实数. 取 $\eta \geq |-\varepsilon_f + \Delta F - (\varepsilon_g + \Delta G)U - d'(t)|$, 则有 $\dot{L} \leq 0$. 当 $\dot{L} \equiv 0$ 时, $s \equiv 0$, 根据 LaSalle 不变集原理, $t \rightarrow \infty$ 时, $s \rightarrow 0$. 由于 $L \geq 0$ 且 $\dot{L} \leq 0$, 则当 $t \rightarrow \infty$ 时, L 有界, 则 \dot{W} , \dot{V} 有界, 但无法保证 \dot{W} , \dot{V} 同时收敛到理想权值 W^* , V^* .

3 仿真与分析

实验室现有的高速动车组运行过程仿真平台,

如图 11 所示. 该平台具备高速动车组运行数据预处理, 运行控制辨识和优化控制算法仿真等功能, 可实现高速动车组运行状态信息 (里程、实际速度、运行时间) 存储、显示, 设定列车运行目标曲线, 及各种人机交互功能.

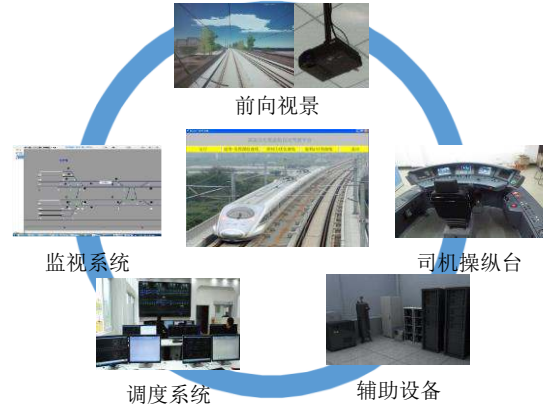


图 11 高速动车组虚拟自动驾驶平台

Fig. 11 Virtual automatic driving platform for high speed EMUs

3.1 仿真

本文选用国内六动两拖的 CRH380A 型高速动车组为仿真验证对象, 它由 8 节车辆单位组成, 其车辆的功能特性与动力学机理和图 1 描述相同. 为验证本文所提方法的有效性, 假设特定区间内预期的运行速度曲线由式 (25) 确定, 包含了高速动车组的加速工况、惰行工况、制动工况, 共行驶 236.2957 公里. 该型号高速动车组各节车辆基本质量如表 1 所示.

需要说明的是: 1) 本文采用图 7(a) 形式的车辆间车钩力同步延时作用方式. 2) 在使用平台仿真时加入反应车钩力延时特性的时变延时环节. 3) 在高速动车组实际运行的过程中, 引入车辆车钩形变量的约束条件, 即为了约束式 (4) 中位移差项的数值, 本文在仿真时加入了 Saturation 函数. 4) 本文同时进行了高速动车组强耦合模型的传统 PID 控制策略与文献 [32] 预测控制策略的速度跟踪效果实验.

$$v = \begin{cases} -0.0075t^2 + 3t, & 0 < t \leq 200 \text{ s} \\ 300, & 200 < t \leq 1200 \text{ s} \\ -0.002t^2 + 4.8t - 2580, & 1200 < t \leq 1300 \text{ s} \\ 280, & 1300 < t \leq 1400 \text{ s} \\ 0.225t - 35, & 1400 < t \leq 1600 \text{ s} \\ 325, & 100 < t \leq 2400 \text{ s} \\ -0.0009t^2 + 4.33333t - 4891.5, & 2400 < t \leq 3000 \text{ s} \end{cases}\quad (25)$$

表 1 CRH380A 型动车组各节车辆质量
Table 1 The CRH380A EMU vehicle quality

车辆	类型	质量 (kg)
1	拖车	60 800
2	动车	62 000
3	动车	60 800
4	动车	56 560
5	动车	55 800
6	动车	60 800
7	动车	62 000
8	拖车	60 800

该型号高速动车组各个车辆的速度跟踪效果如图 12 所示. 考虑到该型号高速动车组 1 车辆为拖车辆, 特别列出其跟踪误差曲线, 如图 13 所示. 由于 2 车辆与 1 车辆 (动车 - 拖车) 相连, 特别列出其车钩力变化情况, 如图 14 所示. 2 车辆控制力输入曲线如图 15 所示. 图 16 表示了工况数据中心对控制器的修正曲线.

3.2 分析

图 12 实时记录了高速动车组各个车辆的位移数据, 在牵引工况下 $t = 200$ s 时间时, 拖车与预定位移相差 0.1 m 之内. 在制动工况下 $t = 3000$ s 时, 拖车与预定位移相差 0.2 m 之内. 结果说明了本文建立的弹簧 - 阻尼器系统模型高精度地描述了整列车辆的运动情况, 验证了控制器良好的速度跟踪效果.

从图 13~15 可以看出, 针对在弹簧-阻尼器约束下的高速动车组强耦合模型, 本文设计的分布式神经网络滑模控制策略对给定速度均能保持良好的跟踪能力, 能够满足准时运行, 定点停靠的安全要求, 同时加速度变化较为合适, 乘客的舒适性较好^[33], 乘客乘坐舒适指标得到改善. 从图 14 可以得到, 车钩力处于变化的过程中, 并且由于列车的耦合作用变化频率快, 与车钩的耦合作用实际相吻合, 但整体的趋势变化较为平滑, 冲击小, 保证了与大质量拖车相链接的车钩安全. 从图 15 可以得到, 动车组在外界环境变化或机车本身性能变化时, 控制力变化的较为平缓, 超调作用小. 文献 [32] 预测控制策略

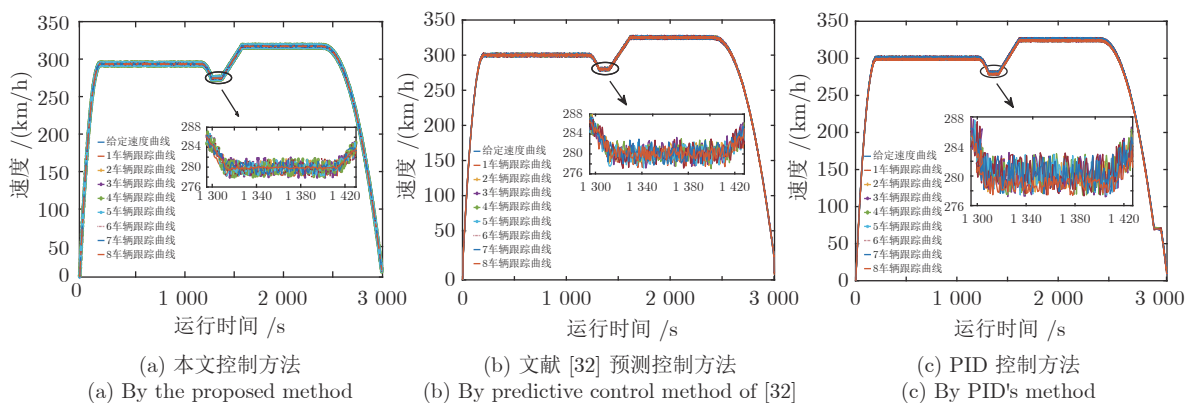


图 12 各车辆速度跟踪效果
Fig. 12 Vehicles speed tracking effect

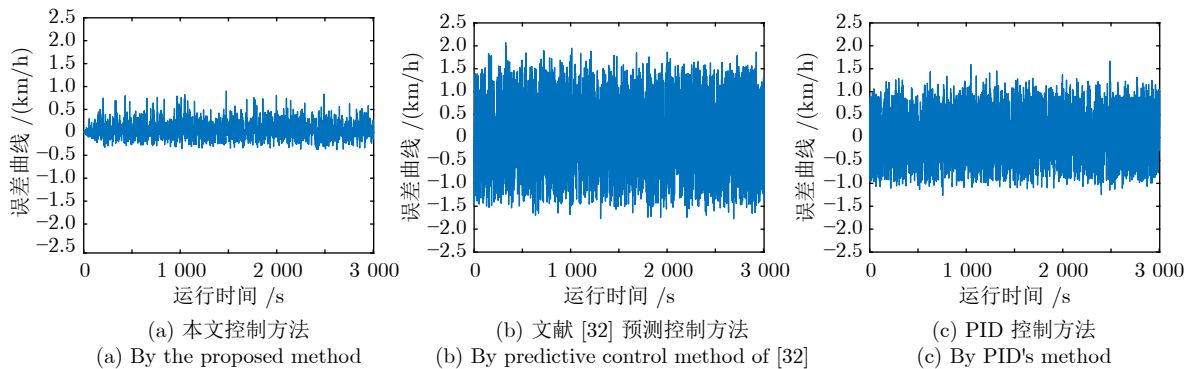


图 13 1 车辆速度跟踪误差
Fig. 13 The speed tracking error of the first vehicle

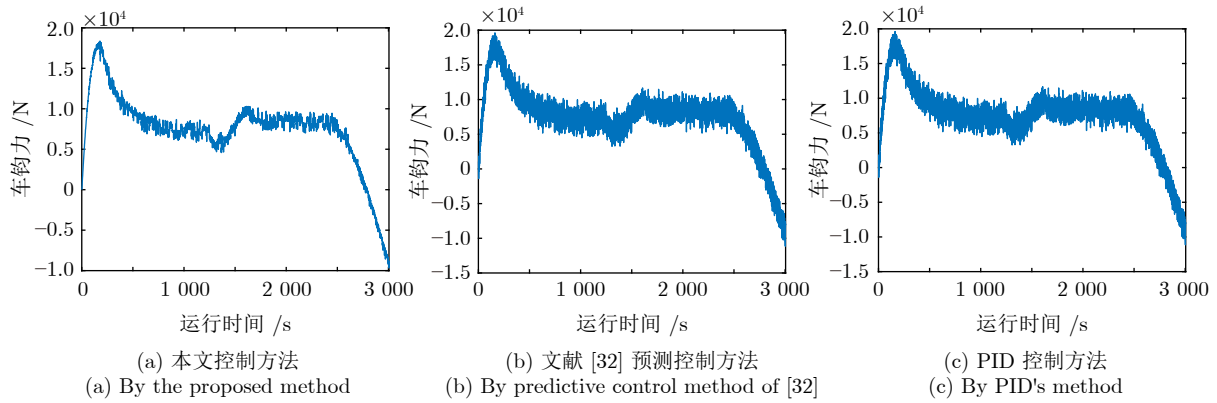


图 14 1 车辆和 2 车辆间车钩力变化

Fig. 14 The change in the hook force between the first and second vehicle

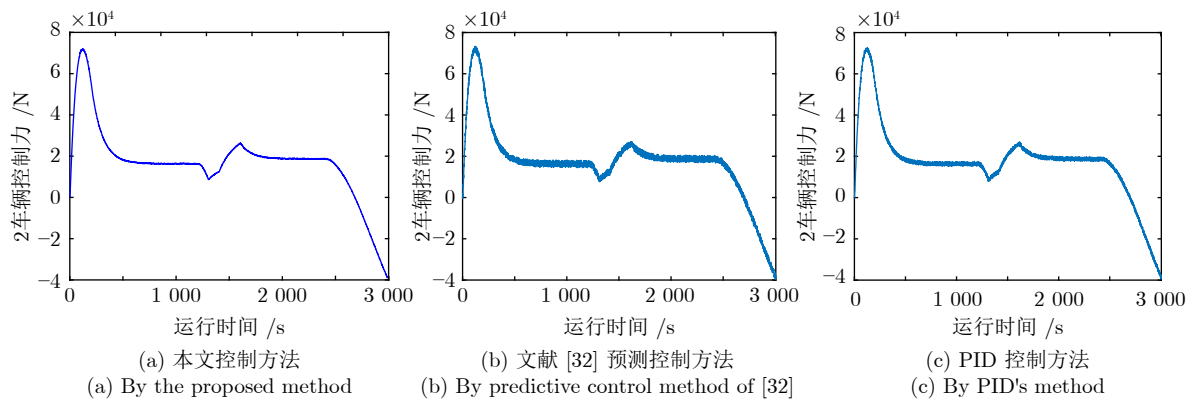


图 15 2 车辆控制力变化

Fig. 15 The control force change of the second vehicle

下的动车组强耦合模型跟踪效果略差于本文所设计的方法, 车钩力的变化与控制力的变化也略有优势, 另外, 在采用预测控制方法仿真时, 计算开销大, 运行速度明显较慢, 不利于满足列车运行的实时性要求。

从图 16 可以看出, 高速动车组工况数据中心补偿规则算法对控制器的输出具有一定的抑制效

果, 即在实际速度大于给定期望速度时, 反馈一个负的数值, 用来减小控制力, 反之, 在实际速度小于给定期望速度时, 反馈一个正的数值, 用来增加控制力. 高速动车组的实际作用效果提高了速度跟踪精度。

4 总结与展望

本文区分以往高速动车组的多质点模型, 在详细分析高速动车组车钩缓冲装置对相邻车辆的作用内在规律后, 建立了车钩模型约束的多质点动力学强耦合模型. 该模型更准确反映运行环境对高速动车组运行状况的复杂影响关系, 且模型简单有效, 具有较高的精度. 结合给定的列车运行速度目标, 探究了对动车组内各车辆分别控制的分布式神经网络滑模控制方法. 为了应对列车运行过程中的不确定干扰, 利用列车以往运行过程数据, 提出了一种工况数据中心对控制器的补偿修正规则, 提高了控制策略的实用性. 通过高速列车运行过程仿真实验

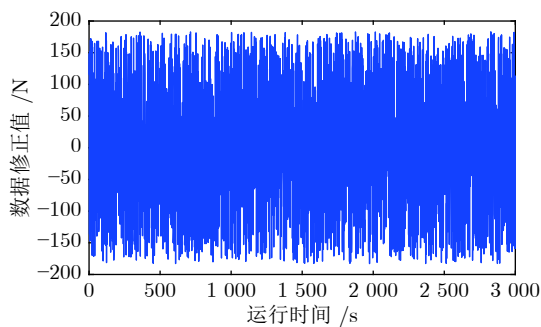


图 16 本文补偿规则下的数据修正曲线

Fig. 16 Data correction curve under compensation rule

平台仿真验证表明,对高速动车组建立的强耦合模型采用分布式神经网络滑模控制方法不但能够合理分配机车动力,实现对给定速度的高精度跟踪控制,而且可计算列车运行过程的车钩力,使车钩力控制在合理的安全范围内,实现动车组的安全、准时运行。

进一步,在本文的研究分析基础上,作者将会在以下几个方面做深入研究:1)继续分析车钩力对整列车的运动状态影响规律,并且从控制策略的角度减少其影响,使列车稳定安全运行。2)考虑到单节列车的动力系统故障^[34],在现有控制策略下能否保证整列车的运行状态。3)虽然本文结合了车钩模型,并考虑了延时关系,但还是有很多未考虑的未知因素影响列车的运行,通过大数据的分析手段进行无监督“自学习”工作,发现未知因素的影响规律。4)现阶段的列车运行跟踪精度已基本满足实际运行需求,但理论应用到实际的列车运行中还有一定的距离,继续结合实际情况,找到两者的衔接点,早日实现高速列车的自动驾驶。

References

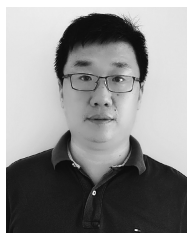
- Dong H R, Ning B, Cai B, Hou Z S. Automatic train control system development and simulation for high-speed railways. *IEEE Circuits and Systems Magazine*, 2010, **10**(2): 6–18
- Chen C L. Reshaping Chinese space-economy through high-speed trains: opportunities and challenges. *Journal of Transport Geography*, 2012, **22**(2): 312–316
- Wu Meng-Ling, Cheng Guang-Hua, Wang Xiao-Yan, Jin Bi-Yun. Discussion on the problem of train brake deceleration control. *Journal of the China Railway Society*, 2009, **31**(1): 94–97
(吴萌岭,程光华,王孝延,金碧筠.列车制动减速度控制问题的探讨.铁道学报,2009,31(1):94–97)
- Li De-Cang, Meng Jian-Jun, Xu Ru-Xun, Yin Ming. Adaptive robust H_∞ control method for high speed trains under high winds. *Journal of the China Railway Society*, 2018, **40**(7): 67–73
(李德仓,孟建军,胥如迅,银铭.强风下高速列车滑膜自适应鲁棒 H_∞ 控制方法.铁道学报,2018,40(7):67–73)
- Zhang Shou-Shuai, Tian Chang-Hai. Study on the related problems of train running speed in long and downhill sections of high speed railway. *China Railway Science*, 2017, **38**(3): 124–129
(张守帅,田长海.高速铁路长大下坡地段列车运行速度相关问题研究.中国铁道科学,2017,38(3):124–129)
- Lu Yu-Jiang, Xiao Shou-Na, Zhu Tao, Yang Guang-Wu, Yang Chao. Modeling and research on coupled longitudinal-vertical collision dynamics model. *Journal of the China Railway Society*, 2014, **36**(12): 6–13
(卢毓江,肖守讷,朱涛,杨光武,杨超.列车纵向-垂向碰撞动力学耦合模型建模与研究.铁道学报,2014,36(12):6–13)
- Ding Li-Fen, Xie Ji-Long, Ahmed A, Shabana. Application of non-inertial coordinates in longitudinal force analysis of trains. *Journal of the China Railway Society*, 2012, **34**(1): 13–18
(丁莉芬,谢基龙,Ahmed A. Shabana.非惯性坐标在列车纵向力分析中的运用.铁道学报,2012,34(1):13–18)
- Li Zhong-Qi, Yang Hui, Liu Ming-Jie, Liu Jie-Min. Modeling and tracking control of high speed EMU braking process. *China Railway Science*, 2016, **37**(5): 80–86
(李中奇,杨辉,刘明杰,刘杰民.高速动车组制动过程的建模及跟踪控制.中国铁道科学,2016,37(5):80–86)
- Yang Hui, Zhang Kun-Peng, Wang Xin, Zhong Lu-Sheng. Multi-model generalized predictive control method for high-speed trains. *Journal of the China Railway Society*, 2011, **33**(8): 80–87
(杨辉,张坤鹏,王昕,衷路生.高速列车多模型广义预测控制方法.铁道学报,2011,33(8):80–87)
- Yu Jin, He Zheng-You, Qian Qing-Quan. Research on multi-objective train control based on hybrid particle swarm optimization. *Journal of the China Railway Society*, 2010, **32**(1): 38–42
(余进,何正友,钱清泉.基于混合微粒群优化的多目标列车控制研究.铁道学报,2010,32(1):38–42)
- Guo Hong-Ge, Sun Zhi-Yi, Zhang Chun-Mei. Research on generalized predictive control of Hammerstein model for EMU train braking system. *Journal of the China Railway Society*, 2014, **36**(6): 47–54
(郭红戈,孙志毅,张春美.动车组列车制动系统 Hammerstein 模型的广义预测控制研究.铁道学报,2014,36(6):47–54)
- Gao Chun-Hai, Chen De-Wang. Research on automatic driving braking model identification based on model selection and optimization technology. *Journal of the China Railway Society*, 2011, **33**(10): 57–60
(郜春海,陈德旺.基于模型选择和优化技术的自动驾驶制动模型辨识研究.铁道学报,2011,33(10):57–60)
- Leng Yong-Lin, Chen De-Wang, Yin Jia-Teng. Train intelligent driving algorithm based on expert system and online adjustment. *Journal of the China Railway Society*, 2014, **36**(02): 62–68
(冷勇林,陈德旺,阴佳腾.基于专家系统及在线调整的列车智能驾驶算法.铁道学报,2014,36(02):62–68)
- Yu Zhen-Yu, Chen De-Wang. Braking model and parameter identification of urban rail trains. *Journal of the China Railway Society*, 2011, **33**(10): 37–40
(于振宇,陈德旺.城轨列车制动模型及参数辨识.铁道学报,2011,33(10):37–40)
- Zhong Lu-Sheng, Li Bing, Gong Jin-Hong, Zhang Yong-Xian, Zhu Zhen-Min. Maximum likelihood identification of nonlinear models for high speed trains. *Acta Automatica Sinica*, 2014,

- 40(12): 2950–2994
(衷路生, 李兵, 龚锦红, 张永贤, 祝振敏. 高速列车非线性模型的极大似然辨识. 自动化学报, 2014, 40(12): 2950–2994)
- 16 Yang Hui, Yan Jin, Zhang Kun-Peng. Multi-model adaptive PID control for EMU braking process. *Journal of the China Railway Society*, 2014, 36(3): 42–48
(杨辉, 严瑾, 张坤鹏. 动车组制动过程多模型自适应 PID 控制. 铁道学报, 2014, 36(3): 42–48)
- 17 Zhong Lu-Sheng, Yan Zheng, Yang Hui, Qi Ye-Peng, Zhang Kun-Peng, Fan Xiao-Ping. Data-driven subspace prediction control for high-speed trains. *Journal of the China Railway Society*, 2013, 35(4): 77–83
(衷路生, 颜争, 杨辉, 齐叶鹏, 张坤鹏, 樊晓平. 数据驱动的高速列车子空间预测控制. 铁道学报, 2013, 35(4): 77–83)
- 18 Zhong Lu-Sheng, Yan Zheng, Gong Jin-Hong, Zhang Yong-Xian, Zhu Zhen-Min, Fan Xiao-Ping. Adaptive subspace predictive control for high-speed trains with time-varying forgetting factor. *Journal of the China Railway Society*, 2013, 35(5): 54–61
(衷路生, 颜争, 龚锦红, 张永贤, 祝振敏, 樊晓平. 时变遗忘因子的高速列车自适应子空间预测控制. 铁道学报, 2013, 35(5): 54–61)
- 19 Wang Qing-Yuan, Wu Peng, Feng Xiao-Yun, Zhang Yan-Dong. Accurate parking algorithm for urban rail trains based on adaptive terminal sliding mode control. *Journal of the China Railway Society*, 2016, 38(2): 56–63
(王青元, 吴鹏, 冯晓云, 张彦栋. 基于自适应终端滑模控制的城轨列车精确停车算法. 铁道学报, 2016, 38(2): 56–63)
- 20 Wang Long-Sheng, Xu Hong-Ze, Zhang Meng-Nan, Duan Hong-Wei. Train automatic driving strategy based on hybrid system model predictive control. *Journal of the China Railway Society*, 2015, 37(12): 53–60
(王龙生, 徐洪泽, 张梦楠, 段宏伟. 基于混合系统模型预测控制的列车自动驾驶策略. 铁道学报, 2015, 37(12): 53–60)
- 21 Yang Yan-Fei, Cui Ke, Lv Xin-Jun. Sliding mode PID combination control for train autopilot system. *Journal of the China Railway Society*, 2014, 36(6): 61–67
(杨艳飞, 崔科, 吕新军. 列车自动驾驶系统的滑模 PID 组合控制. 铁道学报, 2014, 36(6): 61–67)
- 22 Yang Hui, Zhang Fang, Zhang Kun-Peng, Li Zhong-Qi, Fu Ya-Ting. The EMU predictive control method based on distributed model. *Acta Automatica Sinica*, 2014, 40(9): 1912–1921
(杨辉, 张芳, 张坤鹏, 李中奇, 付雅婷. 基于分布式模型的动车组预测控制方法. 自动化学报, 2014, 40(9): 1912–1921)
- 23 Li Zhong-Qi, Yang Hui, Zhang Kun-Peng, Fu Ya-Ting. Distributed predictive control of EMU based on multi-agent model(In English). *Acta Automatica Sinica*, 2014, 40(11): 2625–2631
(李中奇, 杨辉, 张坤鹏, 付雅婷. 基于多智能体模型的动车组分布式预测控制. 自动化学报, 2014, 40(11): 2625–2631)
- 24 Luo Heng-Yu, Xu Hong-Ze. Research on ATO adaptive control algorithm based on reference model. *Journal of the China Railway Society*, 2013, 35(7): 68–73
(罗恒钰, 徐洪泽. 基于参考模型的 ATO 自适应控制算法研究. 铁道学报, 2013, 35(7): 68–73)
- 25 Adang Suwandi Ahmad. Brain inspired cognitive artificial intelligence for knowledge extraction and intelligent instrumentation system. In: Proceedings of the 2017 International Symposium on Electronics and Smart Devices (ISESD), Yogyakarta, Indonesia: IEEE, 2017. 352–356
- 26 Liu Jin-Kun. *Sliding Mode Variable Structure Control MATLAB Simulation (3 Edition)*. Beijing: Tsinghua University Press, 2015. 349–355
(刘金琨. 滑模变结构控制 MATLAB 仿真 (第 3 版). 清华大学出版社, 2015. 349–355)
- 27 Yang Y C, Zhou H T, Su H S, Zeng W. Semi-global consensus with position limited and rate disturbances via low gain feedback and integral sliding mode control. *IET Control Theory and Applications*, 2017, 11(8): 1173–1183
- 28 Liu Jing, Li Hong-Wen, Deng Yong-Ting. Current adaptive sliding mode control based on disturbance observer for permanent magnet synchronous motor. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(5): 1229–1241
(刘京, 李洪文, 邓永婷. 基于扰动观测器的永磁同步电机电流环自适应滑模控制. 光学精密工程, 2017, 25(5): 1229–1241)
- 29 Su Hao, Yang Xian-Hai. Research on low-pass filter sliding mode variable structure control chattering problem of valve-controlled hydraulic cylinder system. *Coal mining machinery*, 2018, 39(11): 77–79
(苏皓, 杨先海. 阀控液压缸系统低通滤波滑模变结构控制抖振问题的研究. 煤矿机械, 2018, 39(11): 77–79)
- 30 Cui R X, Chen L P, Yang C G, Chen M. Extended state observer-based integral sliding mode control for an underwater robot with unknown disturbances and uncertain nonlinearities. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2017, 64(8): 6785–6795
- 31 Tian Meng, Zhang Bo-Wen, Zhou La-Wu, Yang Hong-Zhi, Long Yan. Research on sliding mode variable structure independent pitch control based on RBF neural network. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(4): 107–114
(田猛, 张博文, 周腊吾, 杨宏智, 龙燕. 基于 RBF 神经网络滑模变结构独立变桨控制研究. 电力系统保护与控制, 2019, 47(4): 107–114)
- 32 Yang H, Fu Y, Wang D. Multi-ANFIS model based synchronous tracking control of high-speed electric multiple unit. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2018, 26(3): 1472–1484
- 33 Huang W C, Shuai B. A methodology for calculating the passenger comfort benefits of railway travel. *Journal of Modern Trans-*

portation, 2018, **26**(2): 107–118

- 34 Jiang Bin, Wu Yun-Kai, Lu Ning-Yun, Mao Ze-Hui. Overview of Fault Diagnosis and Prediction Technology for High Speed Train Traction System. *Control and Decision*, 2018, **33**(5): 841–855

(姜斌, 吴云凯, 陆宁云, 冒泽慧. 高速列车牵引系统故障诊断与预测技术综述. *控制与决策*, 2018, **33**(5): 841–855)



李中奇 华东交通大学电气与自动化工程学院教授, 工学博士. 主要研究方向为列车运行过程建模与控制. 本文通信作者.

E-mail: lzq0828@163.com

(**LI Zhong-Qi** Ph.D., professor at the School of Electrical and Automation Engineering, East China Jiaotong University. His research interest covers modeling and control of train operation process, track electrical equipment testing. Corresponding author of this paper.)



金 柏 华东交通大学电气与自动化工程学院硕士研究生. 主要研究方向为列车运行过程建模与控制.

E-mail: jinbai0009@163.com

(**JIN Bai** Master student at the school of Electrical and Automation Engineering, East China Jiaotong University. His research interest covers modeling and control of train operation process.)



杨 辉 华东交通大学电气与自动化工程学院教授, 工学博士. 主要研究方向为复杂系统建模, 控制与运行优化. E-mail: yhshuo@263.net

(**YANG Hui** Ph.D., professor at the School of Electrical and Automation Engineering, East China

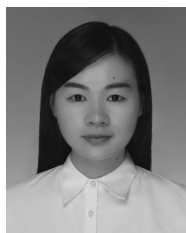
Jiaotong University. His research interest covers modeling complex systems, control and operation optimization.)



谭 畅 华东交通大学电气与自动化工程学院副教授, 工学博士. 主要研究方向为复杂系统建模, 控制与运行优化.

E-mail: lovetanchang@163.com

(**TAN Chang** Ph.D., associate professor at the School of Electrical and Automation Engineering, East China Jiaotong University. Her research interest covers modeling complex systems, control and operation optimization.)



付雅婷 华东交通大学电气与自动化工程学院讲师, 工学博士. 主要研究方向为轨道交通自动化和运行优化.

E-mail: fuyating0103@163.com

(**FU Ya-Ting** Ph.D., lecturer at the School of Electrical and Automation Engineering, East China Jiaotong University. Her research interest covers rail transit automation and operation optimization.)