

文章编号:1005-0523(2018)05-0001-08

列车运行建模与速度控制方法综述

杨辉^{1,2}, 付雅婷^{1,2}

(1. 华东交通大学电气与电子工程学院, 江西 南昌 330013; 2. 江西省先进控制与优化重点实验室, 江西 南昌 330013)

摘要: 随着社会的快速发展, 如何保障列车行车安全, 准点到达, 舒适运行及节约能源成为列车运行发展趋势。因此, 完备的列车自动控制系统成为现代铁路的研究目标。有效的列车运行过程模型描述和合适的运行速度控制方法是列车自动控制系统的核心。通过介绍列车自动控制系统的主要组成部分概述了列车自动控制系统的基本原理。归纳分析了近些年来列车运行过程模型描述手段和方法, 并阐述了列车运行速度控制方法的发展历程, 最后对我国列车的自动控制前景作了展望。

关键词: 列车自动控制系统, 动态建模, 运行速度控制, 控制算法

中图分类号: U292

文献标志码: A

随着如今运输量的不断增加, 铁路运输在我国综合交通运输体系的发展进程中, 具有重要优势, 长期处于不可替代的骨干地位, 在社会进步和国民经济发展过程中发挥着重大贡献。在轨道交通系统中, 列车自动控制系统(automatic train control)ATC, 是确保列车能够安全运行并提高运行效率的核心系统。ATC系统是轨道交通系统的大脑和中枢系统, 其控制策略的优势直接影响铁路系统的运输能力。在高速铁路建设中, ATC系统起着至关重要的作用, 它是技术手段控制着列车运行的方向、速度和间隔, 确保高速动车组的运行安全和提高动车组的运行效率。随着高速铁路的发展, ATC系统已从简单的调度、闭塞、联锁、信号机等设备的组合, 逐渐发展为集自动驾驶和调度指挥为一体的自动化系统^[1-2]。现有的ATC主要包括: 列车自动驾驶系统(automatic train operation)ATO, 列车超速防护系统(automatic train protection)ATP, 和列车自动监控系统(automatic train supervision)ATS。在信息交换的基础上, 三个子系统组成了一个闭环系统, 其实现了地面与车上共同控制、现地控制结合中央控制, 从而形成了一个以安全设备为基础, 集行车指挥、运行调整以及列车驾驶自动化为一体的系统。随着列车运行速度和运行密度的逐渐提高, 我们迫切需要开发性能先进、可靠、高效的ATC系统^[3-4]。

设计开发有效的ATO系统是ATC系统的重要技术, ATO系统能代替司机驾驶列车, 结合地面信息和车载信息对高速动车组的启动、牵引、恒速、惰行和制动等工况的自动控制, 列车可以自动调整车速, 自动停车到准确位置, 自动加速到最佳运行速度, 具有提高动车组运行效率, 加快运行速度, 保证行车安全和有效防止由人为错误操作所引起的恶性事故发生等功能。而高速动车组ATO需要解决的核心问题是针对不同的运行工况和环境自动调整牵引/制动力, 实现高速动车组安全运行、正点到达、改善乘客舒适性、降低能源消耗。为了解决这个核心问题并实现这些功能, 需要自动调整控制力大小使高速列车自动跟踪最优V-S曲线运行, 控制列车运行轨迹与理想V-S曲线最贴近^[5]。所以, 需要建立有效的高速动车组运行过程动态模型和设计相应的高速动车组运行控制方法。

收稿日期: 2018-06-08

基金项目: 国家自然科学基金(61673172, 51565012, 61733005, 61803155)

作者简介: 杨辉(1965—), 男, 教授, 博士, 博士生导师, 国务院政府特殊津贴获得者, 入选国家百千万人才工程, 主要研究方向为轨道交通运行优化控制, 复杂系统建模、控制与优化。

通讯作者: 付雅婷(1988—), 女, 讲师, 博士, 主要研究方向为轨道交通运行优化控制。

2.1 动车组单质点/多质点建模

2.1.1 单质点建模

传统的基于单质点动力学描述的建模方法主要是将列车简化为单个刚性质点,并把动车组运行过程中所有的受力作用到这个质点上进行分析计算,忽略动车组内部和车厢之间的车钩力和速度偏差,如图 2 所示。围绕这类动车组运行过程单质点建模方法的主要有:采用基于动车组牵引特性和运行阻力经验模型的描述方法^[6];针对动车组复杂动态特征提出的多模型方法^[7];基于能以任意精度逼近非线性系统的神经网络模糊模型描述方法^[8]。上述这类单质点建模方法由于受力计算比较简单,容易实现,得到了广泛的应用。但没有考虑各车厢之间存在的车钩力和速度差,这对于由多个车厢组成的动车组来说,并不准确。尤其是列车在上下坡、拐弯或进隧道时,列车前后车厢的受力情况并不一样,如果还将列车作为一个质点来处理,将与实际动车组运行过程存在一定的差距,特别是对于运行环境更加复杂的高速动车组;因此,许多研究者逐渐考虑多质点建模。

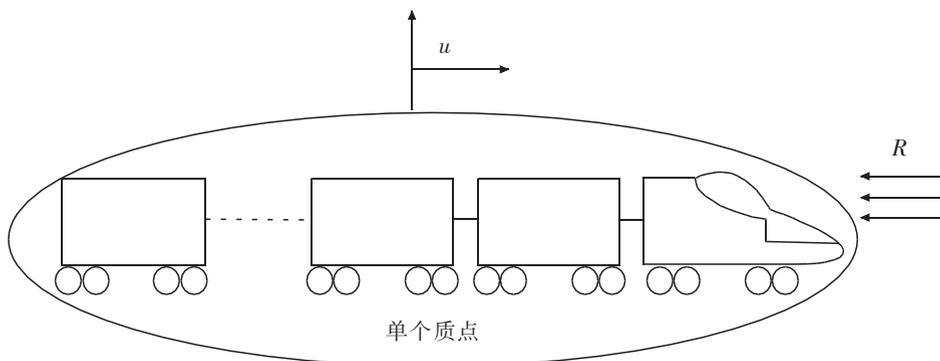


图 2 动车组单质点受力简图

Fig.2 Force analysis of an EMU via a single-body model

2.1.2 多质点建模

近些年,列车运行过程多质点建模引起学者们关注。列车的多质点建模是将列车的每一个车厢都当作是一个质点,将列车看作是若干个质点构成的“质点链”。多质点模型不但考虑列车整体的受力情况,还将车厢之间的车钩力计算进每个车厢的受力范畴中^[9],其力学分析相对复杂,如图 3 所示。针对这类多质点建模,通常采用机理建模。对于动车组多质点建模,Yang 分析了车厢之间不同非线性因素的弹簧对模型的影响,提出了一种列车运行状态空间模型,并通过对模型的线性化来简化复杂的多质点建模过程^[10-11],但同时这也降低了多质点建模精度。由于列车受到的空气阻力与速度存在非线性关系,当列车运行在高速状态时,非线性特性就表现的愈加明显,为解决这个问题,Chou 和宋等先后针对列车运行过程中受到的非线性基本阻力和附加阻力(坡道阻力、曲线阻力及隧道空气阻力),考虑车厢之间的车钩力,建立了列车多质点模型,改善了模型精度^[12-13]。上述这些研究,针对列车多质点动态建模,从不同方面对列车运行进行机理分析,改善了列车动态模型的精确性。

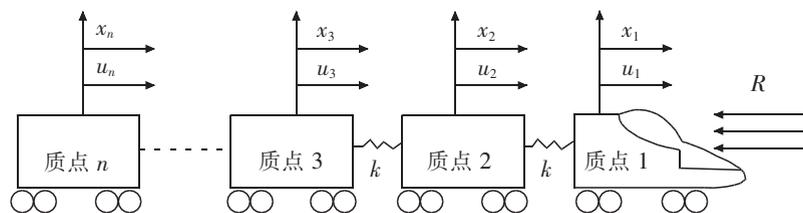


图 3 动车组多质点受力简图

Fig.3 Force analysis of an EMU via a multi-body model

2.2 动车组机理/数据驱动建模

2.2.1 机理建模

传统的动车组运行过程建模常采用基于列车牵引计算和运行阻力的单质点机理模型,如宋^[14]从物理规律出发,考虑列车行驶过程中的基本受力,建立了简单的单质点机理模型

$$\begin{cases} Ma=u-R \\ R=a+bv+cv^2 \end{cases} \quad (1)$$

式中: M 为列车质量; a 为列车加速度; u 为动车组控制力; R 是动车组运行过程中受到的基本阻力。

但在列车行驶过程中,除了受到基本阻力外,还受到坡道阻力、曲线阻力和隧道空气阻力等附加阻力的作用,为了建立更精确的列车运行模型,Lin^[15]和宋^[6]充分考虑了列车行驶中的各种受力,建立了列车运行较为完整的单质点机理模型;同样,考虑车厢之间的车钩力,列车运行多质点机理模型得到推广,以一节车厢为一个质点的多质点机理模型可描述为

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1 = u_1 - k(x_1 - x_2) - (a_1 + b_1 \dot{x}_1 + c_1 \dot{x}_1^2) \\ \vdots \\ m_j \ddot{x}_j = u_j - k(x_j - x_{j-1}) - k(x_j - x_{j+1}) - (a_j + b_j \dot{x}_j + c_j \dot{x}_j^2) \\ \vdots \\ m_n \ddot{x}_n = u_n - k(x_n - x_{n-1}) - (a_n + b_n \dot{x}_n + c_n \dot{x}_n^2) \end{cases} \quad (2)$$

式中: m_j 为每节车厢的质量; x_j 为每节车厢的运行位移; u_j 是每节车厢的控制力; $a_j + b_j \dot{x}_j + c_j \dot{x}_j^2$ 是列车运行过程中每节车厢受到的基本阻力。进一步,同时考虑多质点和附加阻力,宋提出一种更为精确的动车组运行过程多质点模型^[16]。

然而,机理模型是根据经验公式推导获得,其参数是根据列车运行经验提取,并不随列车运行环境的改变而变化,对于具有高度不确定性特征的列车尤其是高速动车组,采用机理建模方法,难以准确地描述列车运行过程的动态性质。

2.2.2 数据驱动建模

数据驱动建模是利用数据挖掘技术寻找暗含在数据间的有用信息,通过清楚的数学公式来表达输入与输出变量间内部存在的关系,采用数据驱动建模方法可在很大程度上克服机理建模的不足^[17-19]。因而在近几年,学者们把数据驱动建模方法引进到高速动车组运行模型的创建中。文献[20]针对高速动车组结构特点建立一种数据驱动子空间预报模型,其状态空间表达形式在列车建模方面取得了一定的效果,但其模型表达缺乏具体的物理意义,难以有针对性的调整模型参数。支持向量机建模具有较好的泛化能力,在复杂不确定系统建模中有较好应用,文献[21]基于最小二乘支持向量机算法建立高速动车组运行模型,取得不错的效果,但如何快速设置有效的参数还没有较好的方法。文献[22]和文献[23]基于多模型切换方法建立了高速动车组数据驱动多模型预测控制方法,该方法简单清晰的表明了速度与控制力之间的关系,但多个模型之间如何平稳切换现在还没有很好的办法。文献[24]提出一种可以无限逼近非线性系统的 ANFIS(自适应模糊推理系统)模糊模型来刻画高速动车组运行中速度与控制力之间的关系,高速动车组建模精度有一定的提高。以上都是采用数据驱动建模方法建立的单质点动车组模型,同样,多质点数据驱动建模也在被大家关注。文献[25]基于图论原理采用减法聚类和模式分类方法构建了高速动车组数据驱动多智能体模型,文献[26]基于子空间建模方法完成对高速动车组运行过程的分布式建模,都取得不错实验结果,但各智能体或各动力单元的模型没有具体的物理意义,难以有效调整模型参数。随后,文献[27]将每一个车厢看为一个质点,考虑受到前后车厢车钩力的作用,提出一种动车组状态空间多 ANFIS 模型,提高了列车运行过程建模精度。

3 国内外列车运行速度控制发展历程

3.1 普通列车

对于列车运行控制的研究,早在上个世纪60年代,传统的PID算法就被采用到地铁列车的自动控制中,其中最早是应用在英国伦敦的地铁中,紧接着美国地铁的自动驾驶系统也大量采用PID控制方法^[5]。在前几年北京地铁亦庄线的列车自动控制中同样采用的是经典的PID控制^[28]。PID控制算法的优点在于它简单易实现且不易出错,但由于其运行时加减次数过多,易造成列车运行的不平稳和耗能过大,且参数的选择没有明确的方法,难以达到列车运行控制的最佳状态。为了避免PID控制方法的缺点,日本学者Yasunohu等在1983年提出一种模糊控制方法^[29]。该方法通过模拟优秀列车驾驶员的驾驶经验,总结出一些列车操纵控制规则来对列车进行运行控制。但对于系统延时大这一问题,Yasunohu等又引入预测理念,设计出一种预测型模糊控制方法^[30-31],该方法在日本的仙台地铁得到了实际应用,该方法有效解决了多目标控制的难题。但此方法的控制规则是人们通过经验积累进行总结的,控制规则始终不够精确,难以适应列车运行环境的改变。为了解决这个问题,日本学者Sekine等提出一种模糊神经网络控制方法^[32],该方法模拟专家解决问题且具有神经网络的自学习能力,在列车运行控制上取得一定进步。进入90年代,我国各方学者也不断投入到列车运行控制的研究中。1995年,中国科学院自动化所采用一种基于联想记忆的神经网络算法对列车进行自动停车控制,提高了列车运行控制精度^[33]。但神经网络算法属于黑箱控制,其控制过程没有具体的物理意义,且易陷入局部最优。为了避免这个问题,1998年我国铁科院结合模糊控制和神经网络的优点,设计一种新型的直接模糊神经控制方法对列车进行自动运行控制^[34]。随着科学研究的发展,进入21世纪以来,我国对列车运行控制的研究也在不断的进步。2008年,北京交通大学提出一种迭代学习控制方法对列车的速度和位移进行跟踪控制,取得不错的效果^[35]。2009年,北京交通大学的高冰和董海荣等又提出一种列车运行自适应模糊PID软切换控制方法^[36-37],该方法通过在模糊控制器和PID控制器中的切换来兼顾两种控制方法的优点,提高了列车运行的平稳性,舒适性和停车精度。然而,上述列车运行控制方法均是以地铁为研究对象,均是运行速度较低的普通动车组,不需过多考虑多变的运行环境和较高的运行速度,这对于高速运行的高速动车组来说并不是很适用。

3.2 高速动车组

对于飞速发展的高速动车组,其运行控制的研究近些年在我国也得到了快速推动。2010年,北京交通大学的宋琦和宋永端等提出一种自适应高速动车组运行控制方法^[6,14],该方法通过分析动车组运行过程的动力学模型和阻力经验公式,构造李雅普诺夫函数,设计动车组运行自适应控制器,速度和位移跟踪效果良好。但该方法是在假定阻力系数精确已知的情况下进行设计的,对于实际运行环境多变的高速动车组并不实用。为解决这个问题,宋等将自适应控制和反步控制方法融合^[38],并考虑动车组牵引和制动动态,设计一种可处理动车组运行不确定阻力系数问题的有效控制方法。以上方法,动车组在不同工况间切换时,其控制力的变化都过于快速,这在实际应用中将会影响动车组的舒适性。鉴于高速动车组运行过程中可能会发生牵引或制动故障,宋等又提出一种自适应容错控制策略^[39-40],在牵引或制动发生故障情况下仍可以很好地保障动车组的行驶稳定性。针对高速动车组由多个动力单元组成,多级档位驾驶方式的特性,宋等也研究了动车组的多质点运行控制^[41]。同时考虑基本阻力,附加阻力,车厢间的车钩力和多级牵引/制动操纵引起的非线性,建立一种新的鲁棒自适应动车组运行控制方法,获得不错的控制效果。迭代学习方法可以通过前面有用的信息来校正现在的控制策略,文献[42-43]均基于迭代学习方法设计相应的自适应控制器完成列车的运行控制,取得较好的成果。但该方法的实时性较差,其收敛的速度需要进一步得到提高。

列车运行控制的研究与列车运行优化问题也密切相关,如今也有大批学者争相研究列车运行优化问题^[44]。早在上个世纪,Hwang就通过设计一种基于模糊C-均值聚类分析和遗传算法优化的模糊控制模型用来确定列车最优运行模式^[45]。文献[46]通过构造一种数值算法,来获得列车的最佳控制方法。其采用最大原则分析方法获得列车运动方程的最优解,从而利用最优解的解析性质构造该数值算法。同样,对于列车运行

优化问题, Li 等考虑列车的能耗, 扩展速度范围和再生制动, 提出一种混合系统模型, 并利用基于梯度算法的外点法计算最优模型^[47]。除此之外, Guan 等采用微分进化和模拟退火算法的混合进化策略获取列车运行轨迹的帕累托最优解来达到节能的要求^[48]。

4 结论

从上个世纪60年代到现在, 为了改善列车的运行性能, 研究者一直在致力研究动车组的运行控制, 并在城市轨道的普通低速动车组上得到了大量的应用。但对于现在大力发展的高速动车组, 其行驶速度比普通动车组高, 外界环境比较不确定, 非线性特质更加突出, 因而, 考虑动车组运行特性和环境, 设计更全面的建模方法和自动控制器是值得深入研究。

考虑数据驱动建模需要的数据源较大, 先进、智能控制算法计算量大, 动车组的运行过程可描述为线性和非线性两部分组成, 在线调整整个模型参数的策略会加大控制器的计算量, 一定程度上影响动车组运行控制的实时性, 且机理模型具有明确的物理意义, 能够清晰的描述动车组运行过程。因此, 结合动车组运行过程线性机理模型和非线性数据驱动模型的动车组运行过程建模方式也将是下一步需要进行研究的。

针对高速动车组运行环境复杂多变, 其实际的运行情况和运行线路与动车组的特性有着必不可分的关系。考虑实际的运行线路(坡道, 隧道, 弯道等)和动车组的特性变化(质量变化等), 设计有效的故障容错控制来实现更精确的速度跟踪对未来高速动车组运行过程控制的研究具有重要意义。

总而言之, 为满足当下高速动车组快速发展的现状, 研究者应进一步考虑多方面外界因素, 采用最适当的建模方式, 并通过结合先进控制方法的优点来设计合适有效的控制方法来达到动车组安全、正点、舒适、节能和高效运行的全方面运行要旨。

参考文献:

- [1] 季学胜, 刘大为. 高速铁路列控系统发展趋势分析和研究[C]//第七届世界高速铁路大会论文集(上册). 北京: 中国铁道出版社, 2010: 189-194.
- [2] 何华武. 中国高速铁路创新与发展[J]. 中国铁路, 2010(12): 5-8.
- [3] DONG H R, NING B, CAI B G, HOU Z S. Automatic train control system development and simulation for high-speed railway[J]. IEEE Circuits Syst. Mag, 2010, 10(2): 6-18.
- [4] CHEN C L. Reshaping Chinese space-economy through high-speed trains: opportunities and challenges[J]. Journal of Transport Geography, 2012, 22: 312-316.
- [5] 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.
- [6] SONG Q, SONG Y D. Robust and adaptive control of high speed train systems[C]//2010 China Control and Decision Conference (IEEE/CCDC'2010), Xu Zhou China, 2010: 2468-2474.
- [7] 杨辉, 张坤鹏, 王昕, 等. 高速列车多模型广义预测控制方法[J]. 铁道学报, 2011, 33(8): 80-87.
- [8] YANG H, FU Y T, ZHANG K P. Generalized predictive control based on neurofuzzy model for electric multiple unit [C]//2012 Third International Conference on Digital Manufacturing and Automation(ICDMA'2012), Gui Lin China, 2012: 422-445.
- [9] ZHUAN X, XIA X. Cruise control scheduling of heavy haul trains[J]. IEEE Transaction on Control Systems Technology, 2006, 14(4): 757-766.
- [10] YANG C D, SUN Y P. Mixed cruise controller design for high speed train[J]. International Journal of Control, 2001, 74(9): 905-920.
- [11] LI S K, YANG L X, GAO Z Y. Coordinated cruise control for high-speed train movements based on a multi-agent model[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2015, 56: 281-292.
- [12] CHOU M, XIA X, KAYSER C. Modelling and model validation of heavy-haul trains equipped with electronically controlled pneumatic brake systems[J]. Control Engineering Practice, 2007, 15(4): 501-509.

- [13] SONG Q, SONG Y D. Adaptive control and optimal power/brake distribution of high speed train with uncertain nonlinear couplers[C]//China Control Conference(CCC'2010), Bei Jing China, 2010: 1966–1971.
- [14] 宋琦, 顾青, 刘峰, 等. 高速列车的自适应速度及位置控制[J]. 控制工程, 2010, 17(S0): 35–37.
- [15] LIN C J, CHEN C L, TSAI S H, et al. Extended sliding-mode controller for high speed train[C]//International Conference on System Science and Engineering(IEEE/ICSSE'2010), Tai Wan, 2010: 475–480.
- [16] SONG Q, SONG Y D, CAI W C. Dealing with traction/braking failures in high speed trains via virtual parameter based adaptive fault-tolerant control method [C]//2012 American Control Conference Fairmont Queen Elizabeth, Montreal, Canada, 2012: 362–367.
- [17] WU X, SHEN J, LI Y G, et al. Data-driven modeling and predictive control for boiler-turbine unit[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2016, 28(3): 470–481.
- [18] VAGHEFI S A, JAFARI M A, ZHU J, et al. Hybrid physics-based and data driven approach to optimal control of building cooling/heating systems[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2016, 13(2): 600–610.
- [19] PRATAMA M, ER M J, LI X, et al. Data driven modeling based on dynamic parsimonious fuzzy neural network[J]. Neurocomputing, 2013, 110(13): 18–28.
- [20] 衷路生, 颜争, 等. 数据驱动的高速列车子空间预测控制[J]. 铁道学报, 2013, 35(4): 77–83.
- [21] 杨辉, 张芳, 刘鸿恩, 等. 基于自适应 LSSVM 模型的动车组运行速度控制[J]. 铁道学报, 2015, 37(9): 62–68.
- [22] 杨辉, 张坤鹏, 王昕, 等. 高速列车多模型广义预测控制方法[J]. 铁道学报, 2011, 33(8): 80–87.
- [23] WEN S H, YANG J W, RAD A B, et al. Multi-model direct generalised predictive control for automatic train operation system[J]. IET Intelligent Transport Systems, 2015, 9(1): 86–94.
- [24] YANG H, FU Y T, ZHANG K P, et al. Speed tracking control using an ANFIS model for high-speed electric multiple unit[J]. Control Engineering Practice, 2014, 23: 57–65.
- [25] LI Z Q, YANG H, ZHANG K P, et al. Distributed model predictive control based on multi-agent model for electric multiple unit [J]. Acta Automatica Sinica, 2014, 40(11): 2625–2631.
- [26] 杨辉, 张芳, 张坤鹏, 等. 基于分布式模型的动车组预测控制方法[J]. 自动化学报, 2014, 40(9): 1912–1921.
- [27] HUI YANG, YATING FU and DIANHUI WANG. Multi-ANFIS model based synchronous tracking control of high-speed electric multiple unit[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems. 2018, 26(3), 1472–1484.
- [28] 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.
- [29] YASUNOHU S, MIYAMOTO S, IHARA H. Fuzzy control for automatic train operation system[C]//IFAC/IFIP/IFORS Conference on Control in Transportation Systems(4th), Baden-Baden Germany, 1983: 33–39.
- [30] YASUNOHU S, MIYAMOTO S. Automatic train operation system by predictive fuzzy control[J]. Industrial Applications of Fuzzy Control, 1985: 1–18.
- [31] HIROYASU O, YASUNOHU S, SEKINO S. Automatic train operation system based on predictive fuzzy control[J]. International Workshop on Artificial Intelligence for Industrial Applications, 1988: 485–489.
- [32] SEKINE S, IMASAKI N, ENDO T. Application of fuzzy neural network control to automatic train operation and tuning of its control rules[C]//International Conference on Fuzzy Systems(IEEE/ICFS'1995), Yokohama Japan, 1995: 1741–1746.
- [33] 周家猷. 模糊预测控制及其在列车自动驾驶中的应用[D]. 北京: 北京交通大学, 2008, 6.
- [34] WANG JING. Direct Fuzzy Neural Control with Application to Automatic Train Operation [J]. Control Theory and Applications, 1998, 15(3): 391–399.
- [35] WANG Y, HOU Z S, LI X Y. A novel automatic train operation algorithm based on iterative learning control theory[C]//The IEEE International Conference on Service Operations and Logistics and Informatics (IEEE/SOLI'2008), Beijing, China, 2008: 1766–1770.
- [36] GAO B, DONG H R, ZHANG Y X. Speed adjustment braking of automatic train operation system based on fuzzy-PID switching control[C]//Sixth International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery, Tian jin, China, 2009: 577–580.
- [37] 董海荣, 高冰, 宁滨, 等. 基于模糊 PID 软切换控制的列车自动驾驶系统调速制动[J]. 控制与决策, 2010, 25(5): 794–800.
- [38] SONG Q, SONG Y D, CAI W C. Adaptive backstepping control of train systems with traction/braking dynamics and uncertain resistive forces[J]. Vehicle System Dynamics, 2009, 49(9): 1441–1454.

- [39] SONG Y D, SONG Q, CAI W C. Fault-tolerant adaptive control of high-speed trains under traction braking failures: a virtual[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2014, 15(2): 737-748.
- [40] SONG Q, SONG Y D. Data-based fault-tolerant control of high-speed trains with traction/braking notch nonlinearities and actuator failures[J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 2011, 22(12): 2250-2261.
- [41] SONG Q, SONG Y D, TANG T, et al. Computationally inexpensive tracking control of high-speed trains with traction/braking saturation[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2011, 12(4): 1116-1125.
- [42] FAN L L. Iterative learning and adaptive fault-tolerant control with application to high-speed trains under unknown speed delays and control input saturations[J]. IET Control Theory Application, 2014, 8(9): 675-687.
- [43] HONG H J, ZHONG S H, RUI K Z. Adaptive iterative learning control for high-speed trains with unknown speed delays and input saturations[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2016, 13(1): 260-273.
- [44] YANG H, LIU H E, FU Y T. Multiple-objective operation optimization for electric multiple unit-based speed restriction mutation [J]. Neurocomputing, 2015, 169: 383-391.
- [45] HWANG H S. Control strategy for optimal compromise between trip time and energy consumption in a high-speed railway[J]. IEEE Systems, Man, and Cybernetics Society, 1998, 28(6): 791-802.
- [46] KHMELNISKY E. On an optimal control problem of train operation[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2000, 45(7): 1257-1266.
- [47] LI L, DONG W, JI Y D, et al. Minimal-energy driving strategy for high-speed electric train with hybrid system model [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2013, 14(4): 1642-1653.
- [48] GUAN W S, YAN X H, CAI B G, et al. Multi-objective optimization for train speed trajectory in CTCS high-speed railway with hybrid evolutionary algorithm[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2015, 16(4): 2215-2225.

A Survey of Modeling and Speed Control Methods for Operation of Trains

Yang Hui^{1,2}, Fu Yating^{1,2}

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China;

2. Key Laboratory of Advanced Control & Optimization of Jiangxi Province, Nanchang 330013, China)

Abstract: With the rapid development of society, it becomes a tendency to guarantee the safe train operation, improve the ride comfort and reduce energy consumption as well. Therefore, a holistic automatic train control system is of great significance. The core of automatic train control system lies in establishing an effective train model and designing an appropriate speed tracking controller. This paper introduces the main components and basic principle for automatic train control system. Then the dynamic modeling methods and speed control approaches for trains are mainly induced and analyzed. Finally, the future research trend is presented.

Key words: automatic train control system; dynamic modeling; speed control; control algorithms