

文章编号: 1005-8451 (2011) 02-0016-03

重载列车运行控制的研究

张李军, 专祥涛

(武汉大学 动力与机械学院, 武汉 430072)

摘要: 介绍重载列车运行控制方面的研究进展。按不同的控制目标、研究方法和控制器设计方法进行分类阐述。

关键词: 重载列车; 预测控制; 制动系统; 研究进展

中图分类号: U296 文献标识码: A

Studies on heavy haul train operation control

ZHANG Li-jun, ZHUAN Xiang-tao

(School of Power and Mechanical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: The paper introduced the research progress For heavy haul train operation control described the different control targets, research methods and desgine methods of controller based on classification.

Key words: Heavy haul trains; MPC; braking system; research review

重载列车有着运量大, 效率高, 成本低的优势, 重载列车技术的发展越来越重要。国内外对于重载列车技术的研究近几年取得了不少成果, 本文从重载列车运行的控制目标、研究方法和系统控制器设计3个方面分别进行阐述。

1 重载列车运行控制的目标

重载列车运行中, 关心的主要因素包括能量消耗、运行时间和运行安全。能量消耗直接关系到运行的经济效益, 能耗越少, 运行的成本就越低; 运行时间则关系到线路的运输能力和铁路企业的服务水平, 速度越快, 企业的服务水平越好。然而, 速度越快, 列车运行的安全水平越难保障, 如果没有有效的控制措施, 制动距离和车钩受力都会随着速度的提高而增大, 直接影响列车的安全运行。

1.1 以减少能耗为目标

国外对列车节能运行问题进行了大量的研究。南澳大利亚大学SCG研究所在列车的建模和控制方面做了一系列研究^[1~2], 他们最重要的贡献有3点。(1) 提出了计算列车节能控制问题的机械能

模型, 指出了列车节能控制主要分为4个阶段: 最大加速、匀速运行、惰行以及最大制动^[2]。(2) 相继开发了适用于较短列车计算机在线操纵指导系统METROMISER, 和适用于长途货运列车的节能控制系统CRUISEMSIER。(3) 综合考虑了离散和连续控制, 研究了更符合实际情况的列车运行控制问题, 给出了关于如何计算最优控制切换点的新结果, 并在2010年解决了在大坡度道路上全局最优切换点的计算问题, 完善了这一结果。

他们的研究有两点不足之处。(1) 研究是在纯气动制动系统上进行的, 这种制动系统由于气动信号的传输时延和衰减问题在重载列车上的使用并不理想。(2) 设计的控制器本质上是开环控制器, 没有任何系统的输出反馈到控制回路, 操作效果会受到实际环境的影响。

为了解决以上问题, 南非University of Pretoria的研究团队在总结澳大利亚和美国的列车制动控制方案后, 将原来的开环控制器改进为闭环控制器, 并考虑了大面积使用ECP(电控空气制动系统electrically controlled pneumatio brake system), 制动后, 列车纵向力冲动的改善和能耗的减少。他们首先对装备ECP的重载列车建立了纵向动力学模型^[3], 基于这种模型, 提出了基于速度反馈的控制方法, 并利用非线性系统理论设计了相应的控制器^[4], 解决了全状态反馈在实际应用不现实的问题, 使得列车能效优化控制更接近实际情况。

收稿日期: 2010-03-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(名称: 重载列车能效优化设计, 项目批准号: 60904036)

作者简介: 张李军, 在读硕士研究生; 专祥涛, 副教授。

近年来,国内主要致力于列车节能算法设计与模型求解方法的研究。起初采用了拉格朗日乘子法。但在实际计算应用中,这种算法由于参数敏感有时会导致程序无法执行而且参数很难调整。针对这个问题,后来改用遗传算法等启发式算法求解模型^[6-7]。

启发式算法的缺点是,很难保证求得全局最优解。有一部分学者将预测控制理论应用于重载列车的控制中,取得了良好的效果。例如:文献[8~9]深入研究了预测控制理论,将预测控制的思想运用于列车节能运行速度的预测。建立了机车节能控制模型,借助于预测方案确定列车节能运行的工况转换点,并通过仿真研究证明了该预测控制算法的有效性。

除了对列车建模和控制之外,驾驶人员的技术水平也是影响能效的一个重要因素,为此,文献[10]针对机车司机操纵列车时不合理的能耗问题,对节能列车操纵的思路及方法进行了分析论述。

1.2 以准点运行为目标

从列车调度方面系统考虑,为保证列车的准点运行,列车运行调度问题至关重要。当列车实际运行状态偏离运行计划而造成列车运行秩序紊乱时,必须重新规划列车运行时刻表,尽快恢复列车有秩序运行状态。列车调度问题属于大规模的组合优化问题,现有方法只能解决特定调度区段或是特定列车组的列车运行,不具有广泛的适应性,基于此,文献[11]等构建多目标优化列车运行调整的数学模型,并设计了分解协调计算模型。并通过实验证实了该计算模型能适应多种线路条件和不同列车调度员习惯偏好,并快速求出优化解。

从单个列车考虑,其运行的准时性是列车调度系统的保障,文献[12]的研究考虑了准时特性,以在一定的时分误差最小为控制目标之一对系统进行了优化,提高了单个列车的准时性。

1.3 以运行安全为目标

重载列车运行的安全问题主要包括列车超速保护、坡道停车问题以及车钩受力问题。

对于超速问题,文献[13]开发的列车速度控制仿真系统已经投入运行。针对坡道停车问题,文献[14]从完善重载列车的操纵办法、提高操纵技能、稳定设备质量和提高调度指挥水平等方面提出了防止列车坡停的具体对策措施。

车钩受力过大容易导致断钩现象发生,进而引起列车脱轨等一系列严重事故。为此,国内研究根据万吨重载列车试验数据和实际操纵经验,在理论和实际相结合基础上探讨了万吨重载列车的平稳操纵方法。南非文献[15]在对重载列车深入研究的基础上,提出了一种综合考虑列车纵向车钩力、能量消耗的最佳的重载列车操纵方法。

2 重载列车运行控制的研究方法

2.1 建模仿真研究

利用计算机技术将理论研究和试验研究相结合对重载列车进行系统仿真研究能节省大量人力物力,并提高研究的效率,是重要的研究手段。

在关于制动特性的研究方面,2004年,利用现代流体动力学数值计算方法研究了长大货物列车空气制动管系的充气特性^[16],建立了考虑列车管泄漏的连续性方程,给出一种求解压力速度耦合方程的显式有限差分算法。

关于列车操纵方面的研究较多,如文献[18]通过建立重载列车运行仿真平台,研究了大秦线不同编组重载列车的牵引、制动等技术参数,为大秦线组织重载列车试验、制订合理的操纵方法等方面提供了技术依据。

2.2 试验研究

试验研究包括试验室试验和运行试验。前者是在试验室内对重载列车关键部件的模拟试验,主要有钩缓装置和列车制动系统的试验。室内试验以较少的人力、物力进行多方案的比较,并完成在实际运行中难以实现的试验,特别在重载列车的初期研究阶段是必不可少的。由于试验室试验不能完全反映复杂的实际情况,所以运行试验被用来在研究后期作为试验验证的手段,和结论性试验。运行试验一般是将专用的试验车混编在列车中进行试验,并记录运行参数以供研究。

试验室试验方面,文献[18]对长大货物列车新型制动系统进行了系统研究,在2001年设计了相应的试验台。

受各种因素的影响,研究列车运行试验的文献尚不多见,2007年,文献[19]根据大秦线2万t列车的试验和仿真研究结果,提出了大秦线安全开行2万t重载组合列车的技术对策和建议。

3 重载列车运行控制系统控制器设计方法

国内外目前在重载列车控制器的设计方法上从形式上分有开环控制和闭环控制两种策略, 从使用的方法上分主要有采用现代控制理论的状态反馈法、基于启发式算法的遗传算法, 模糊逻辑算法以及预测控制法。

国内的研究主要集中在自适应算法这一块^[7]。2009年, 文献[8~9]针对SS4改型机车对列车的节能运行速度进行预测。核心内容是列车节能运行速度的预测, 介绍了预测控制理论的基本原理及其基本特征, 将预测控制的思想运用于列车节能运行速度的预测。其做法: 利用速度预测控制算法对列车运行的典型区间进行了节能运行速度的预测, 给出了列车节能运行优化方案的选择方法, 通过仿真研究证明了该预测控制算法的有效性, 在满足时间等限制的条件下达到了节能的目的。

上述控制器设计方法和SCG的控制方法^[2], 在本质上是一种开环控制。鉴于此, 南非比勒陀利亚大学团队综合考虑车钩受力的优化问题和LRQ闭环控制思想, 设计了基于全状态反馈的闭环优化控制器。然而实际中并不是所有的状态量都可测, 为了解决这个问题, 该团队设计了基于速度测量反馈、并利用非线性理论设计了优化控制器^[14], 使得这种列车控制器可以方便地被用于实际列车控制中, 并取得了比用线性理论设计的控制器更好的实际效果。

4 结束语

从国内外重载列车研究的现状可以得出以下结论:

(1) ECP制动必将代替纯空气制动; (2) 预测控制在列车运行控制中逐渐成为一种趋势; (3) 节能和环境保护问题越来越受重视; (4) 信息技术的应用对改善列车运行调度、控制、设备改造等方面都将产生重大影响; (5) 综合考虑列车系统的非线性特性和外界干扰, 研究更加接近实际情况的列车运行控制系统意义重大。

参考文献:

[1] P.G. Howlett, I.P. Milroy, P.J. Pudney. Energy-efficient train

- control[J]. Control Engineering Practice. 1994, 2(2): 193-200.
- [2] P. G. Howlett, P. J. Pudney, X. Vu. Local energy minimization in optimal train control. Automatica, 2009, 45(11): 2692-2698.
- [3] M. Chou, X. Xia, C. Kayser. Modelling and model validation of heavy-haul trains equipped with electronically controlled pneumatic brake systems[J]. Control Engineering Practice, 2007, 15(4): 501-509.
- [4] X. Zhuan, X. Xia. Speed regulation with measured output feedback in the control of heavy haul trains[J]. Automatica, 2008, 44(1): 242-247.
- [5] 付印平. 列车追踪运行与节能优化建模及模拟研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2009.
- [6] 程家兴, 陈万里. 列车控制问题的计算分析及自适应算法[J]. 安徽大学学报(自然科学版), 2002, 26(2): 1-8.
- [7] 何 庆. 基于遗传算法和模糊专家系统的列车优化控制[D]. 成都: 西南交通大学, 2006.
- [8] 刘剑锋. 基于模糊模型预测控制的重载组合列车机车制动控制策略研究[D]. 长沙: 中南大学, 2008.
- [9] 庄会华. 基于预测控制理论的机车节能运行控制系统的研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2009.
- [10] 王奇钟. 节能列车操纵的思路及方法[J]. 铁道机车车辆, 2008, 29(4): 64-67.
- [11] 罗 晴, 金福才等. 列车运行调整问题的分解协调计算模型[J]. 北京交通大学学报, 2004, 28(6): 87-90.
- [12] 石红国. 列车运行过程仿真及优化研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2006.
- [13] 王志莉, 黄厚宽等. 列车控制仿真系统中速度控制曲线的计算[J]. 铁路计算机应用, 2005, 14(4): 1-4.
- [14] 王国建, 刘红灿. 重载列车发生坡停的原因及对策[J]. 铁道运输与经济, 2008, 30(1): 38-39.
- [15] X. Zhuan, X. Xia. Cruise control scheduling of heavy haul trains[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2006, 14(4): 757-766.
- [16] 刘金朝, 王成国, 马大炜, 等. 长大列车空气管系充气特性数值仿真研究[J]. 中国铁道科学, 2004, 25(1): 13-19.
- [17] 欧志修, 李学峰, 张波. 大秦线重载列车运行仿真计算研究[J]. 中国铁道科学, 2008, 29(2): 88-93.
- [18] 马大炜. 重载列车及其试验研究-我国重载列车的试验研究[J]. 铁道车辆, 1999, 37(6).
- [19] 马大炜, 翁 彬, 王成国. 大秦线开行2万t级重载列车的关键技术问题和对策[J]. 铁道机车车辆, 2007, 27(4): 1-4.