

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2014.09.026

基于同步控制的重载列车纵向力仿真与研究

傅怡旻, 郭其一*

(同济大学 电子与信息工程学院, 上海 201804)

摘要:针对解决列车运输能力局限性的问题,对开行万吨重载列车进行了研究。通过建立列车纵向力模型,主要考虑车钩间隙与空气阻力两个影响因素,利用 Matlab 仿真的方法研究了车钩的受力情况与规律;在仿真的结果上对重载列车的同步控制性进行了评价,引入了 Markov 策略以优化同步无线传输性能;结合 1+1+1 万吨列车的实际试验结果与数据,比较了仿真模拟结果与试验值,研究结果表明,两者基本上吻合,在实际运行线路中加入优化策略是可行的,能够实现对同步控制性能大幅度地优化,为进一步优化长大重载列车的同步控制性能奠定了基础。

关键词:重载列车;数学模型;仿真模型;最大车钩力;马尔可夫策略

中图分类号:TM921;U292.92;TP391.9

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2014)09-1222-04

Simulation and study of heavy haul train longitudinal force based on synchronous control

FU Yi-min, GUO Qi-yi

(School of Electronic Information and Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: Aiming at the problems of limitation of transportation ability, running heavy haul train was studied. The model of train longitudinal force which mainly involved train couplers gap and air resistance was established to study forces of train couplers by using Matlab. The synchronous control capability was evaluated on the simulation, then the Markov strategy was established to optimize the synchronous wireless transmission. The experimental results and data of 1+1+1 ten thousand tons train were compared with the simulation results. The results indicate that they are reasonable and it shows that applying optimized strategy in railway lines is feasible. Synchronous control capability of heavy haul train which contained Markov strategy was greatly optimized. Then the foundation of further improving synchronous control capability was built.

Key words: heavy haul train; mathematical model; simulation model; max forces of train couplers; Markov strategy

0 引言

重载运输一直以来是铁路货运的重要发展方向。为了提高铁路的货运能力,国内已经对开行万吨重载列车进行了可行性研究。开行重载列车需要多台机车共同牵引,而列车安全运行的前提是保证机车的牵引力均衡和制动品质优良,这需要各台机车之间具有良好的运行协同性和同步性,对重载列车运动过程的仿真与研究则是同步控制研究的重要前提,这也为进一步优化同步控制策略奠定基础。文献[1]对纵向力的数学模型和原理进行了阐述;文献[2-3]研究了不同编组条件下的列车牵引制动特性;文献[4]简化了列车

的车钩装置模型,并采用改进的 Runge-Kutt 求解列车纵向动力学方程组;文献[5]采用 Newmark 积分方法求解非线性的列车纵向动力学方程;文献[6]研究了不同工况下最大车钩力的分布情况;文献[7]重点进行了纵向力的试验研究;文献[8]分析了无线重联同步控制及技术;文献[9]研究了无线传输马尔可夫同步控制策略;文献[10]研究了刹车时延对列车纵向力的影响。

本研究通过构建纵向力数学模型,在模型中加入车钩间隙和空气阻力两个影响因素,借助 Matlab 仿真重载列车纵向力,求解最大车钩力的发生时间、大小和位置;在此基础上提出 Markov 优化策略,对同步控制指令的响应时间进行研究和分析,为进一步优化同步

收稿日期:2014-04-15

作者简介:傅怡旻(1990-),男,上海人,主要从事重载列车和电气工程方面的研究,E-mail:fymfym188@163.com.cn

通信联系人:郭其一,男,教授,博士生导师.E-mail:guoqiyl@tongji.edu.cn

控制性能提供理论依据。

1 纵向动力学模型原理

列车纵向力的模型是将每一节车厢视为一个质点模型,运用牛顿第二定理,对其进行受力分析,即 $F=ma$;其中: F —整节车厢的合力,由牵引力、制动力、运行阻力、空气阻力、惯性力等共同作用形成。这样,通过分析 n 节车厢的受力就可以列出 n 个微分方程,然后求解该微分方程组就可以得到纵向力、车钩力和加速度。一般求解微分方程组的方法是通过数值分析的迭代算法来进行,但是这种方法往往计算量大,尤其是对于万吨重载列车而言,车厢数量往往在百节以上,这样用迭代算法求解的话会变是相当困难。所以借助 Matlab 来进行仿真是一种快速便捷的方法,可以很好地模拟求解纵向力。

2 重载列车运动过程建模

本研究中万吨重载列车的纵向运动计算模型如图 1 所示,并以此作为基础进行仿真。该质点模型中具有车钩间隙,弹簧缓冲器和空气制动软管。主要考虑车钩间隙和空气阻力两个影响列车运动的因素,其中空气阻力与列车速度呈二次曲线关联,关系如下式所示:

$$F_{\text{空}} = (1.02 + 0.003\,5\,V + 0.000\,426\,V^2) \times m \quad (1)$$

式中: V —列车速度, m —单节车厢质量。

计算中,车钩间隙是定值,将弹簧缓冲器视为线性,其作用力 S_i 与相对位移 Y_i 的关系如图 2 所示。

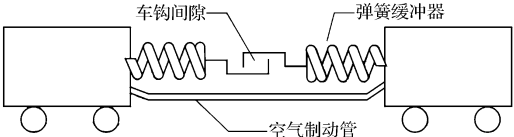


图 1 列车纵向运动计算模型

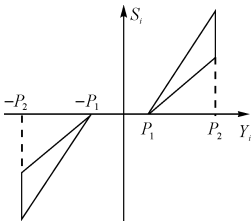


图 2 缓冲器特性曲线

P_1 —车钩缓冲器的游隙; P_2 —缓冲器的最大行程

通常两节车辆间有 2 个弹簧缓冲器,把这 2 个缓冲器视为串联形式。模型中忽略了一些影响较小的因素,旨在把空气阻力和车钩间隙这两个具有相互耦合关系的因素对纵向力的影响表现出来。

由牛顿第二定律,第 i 节车辆的纵向力运动方程如下式所示:

$$M_i \ddot{x}_i = T - B_i - R_i - G_i \quad (2)$$

式中: $M_i, \ddot{x}_i, T, B_i, R_i, G_i$ —第 i 节车辆的质量,加速度,牵引力,制动力,基本阻力,附加阻力。

本研究中建立的车辆模型的纵向力运动方程如式 (3) 所示:

$$M_i \ddot{x}_i = f_i - f_{i+1} - B_i - F_{\text{空}} \quad (3)$$

式中: $M_i, \ddot{x}_i, f_i, f_{i+1}, B_i, F_{\text{空}}$ —第 i 节车辆的质量,加速度,第 i 节车辆的前车钩力,第 i 节车辆的后车钩力,制动力,空气阻力。

由式 (2) 和式 (3) 比较可以得出,本研究模型对纵向力的求解是符合牛顿第二定律下的实际车钩力模型的,通过把每节车辆在前、后车钩力作用下的合力减去制动力和总阻力,就可以求出每一个单位积分时间下的列车的合力,从而确定列车运动状态。

3 程序仿真与实现

仿真程序的流程图如图 3 所示。该程序通过判断每节车辆的状态从而确定运动过程中的受力情况。首先对 3 台同步控制的机车进行判断:第一节机车(从行驶方向算起)没有前车钩力,最后一节机车没有后车钩力,第一节机车的后车钩力,最后一节机车的前车钩力和当中一节机车的前、后车钩力都是根据车钩的压缩、拉升和自由状态的判断来计算,并同时根据速度计算牵引力与制动力(牵引力与制动力是关于速度的分段函数);在对 3 辆同步控制机车判断与计算完毕之后,对普通车厢进行分析,同样也是根据其车钩的压缩、拉升和自由状态判断计算前、后车钩力;最后对每一节车厢进行了受力分析,求解出合力,从而得到了速度与位移曲线。计算中认为各个机车同时执行制动和牵引动作,并且各台机车的制动力和牵引力大小相同。

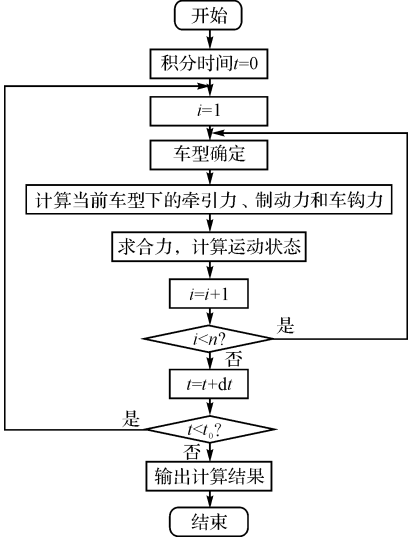


图 3 程序流程图

4 仿真结果分析

列车编组形式为“1+1+1”编组,即 1 辆机车+100 辆车辆+1 辆机车+100 辆车辆+1 辆机车,在平直道路上运动过程中的最大车钩力的仿真结果如图 4~6 所示。

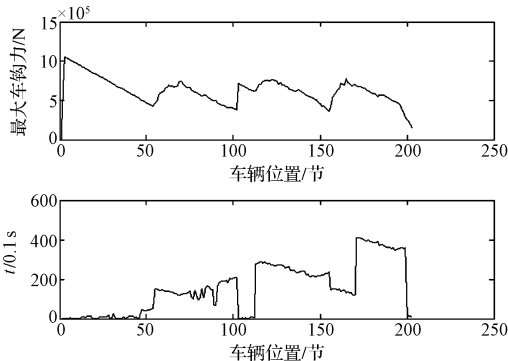


图 4 最大车钩拉力发生位置与时间

车钩力为正—车钩受拉,车钩力为负—车钩受压,下同。

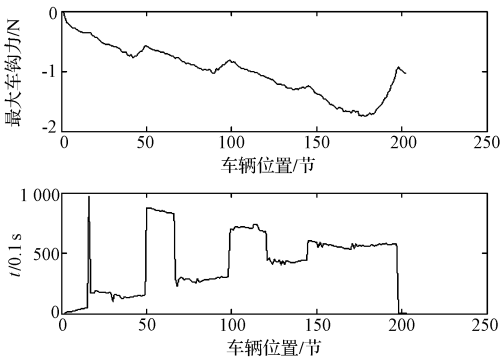


图 5 最大车钩压力发生位置与时间

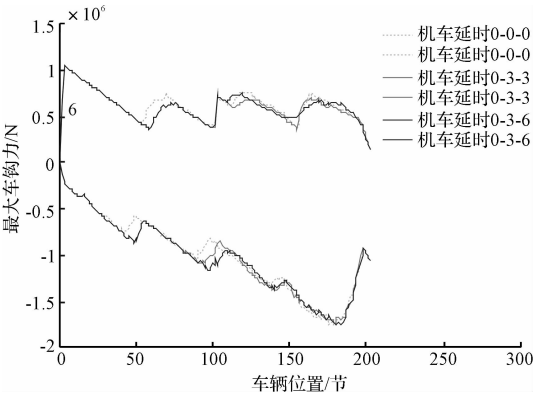


图 6 3 种机车指令接发情况下的最大车钩力

由图 4~6 结果分析可知,最大车钩力发生在大约 180 节车厢位置,发生时间为加速到匀速整个过程所用时间的一半;机车之间无论是同步控制(3 辆机车指令接发延时为 0)还是异步控制(3 辆机车指令接发有延时)对最大车钩力大小和发生位置影响很小,可以认为与指令接发延时无关。

在实际静态试验中有针对以 SS4 机车为牵引机车,编组为 1+1+1 的万吨重载列车的测试数据,根据

前文中的仿真计算数据与试验数据的比较,结果如表 1 所示。从表 1 中可以得出结论,仿真数据和试验测试数据基本一致,说明仿真是正确并具有实际意义的。

表 1 最大车钩力的计算数据与试验数据的比较

从控机车与 主控机车的 延时/s	比较	最大车 钩拉力 /N	位置 /节	最大车 钩压力 /N	位置 /节
0-0-0	计算	700 000	125	-1 700 000	175
	试验	715 000	130	-1 750 000	170
0-3-3	计算	700 000	102	-1 700 000	175
	试验	685 000	100	-1 670 000	172
0-3-6	计算	700 000	100	-1 700 000	175
	试验	724 000	99	-1 735 000	169

5 同步控制策略的研究

5.1 同步控制原理

在重载列车中,司机在主控机车发出牵引和制动指令,同步控制指令信息经逻辑编码由无线数据传输单元发出,从控机车无线数据传输单元延迟 t 时间后接收并解读同步控制指令,这样主控机车与从控机车可实现同步启动制动,达到了同步操作控制,最后从控机车反馈执行状态信息给主控机车。每台机车都有自己的固定编码,从控机车只能接收主控机车的指令信息,不会受到其他从机车发出的指令信息和干扰。

5.2 马尔可夫策略

本研究在第 4 节仿真结果中对比了同步控制下的重载列车的最大车钩力仿真数据与试验数据,这为实现无线通信指令同步传输打下了基础。在列车运行过程中,各机车之间的数据传输都是一类离散的过程,前、后之间的状态并不存在相关性,从这个状态到下一个状态并不确定,如地形、隧道的影响都可以引起通信状态的改变而引起通信中继转发或周期重发。

重载列车中机车发送指令数据经多节点转发到达相应机车节点并被接收。一般希望在每个节点上都能选取最好的行动策略,达到最优传输,保证无线传输的同步性和可靠性。在实际列车运行中,无线传输有可能有较大延迟甚至发生丢帧现象,为了提高重载列车各机车无线指令传输的同步性能,本研究提出运用马尔可夫策略理论来优化无线传输同步性。

5.3 同步控制系统同步性验证

为了保证列车控制同步性,就需要控制从控机车指令响应时间在安全要求范围内。一般通过牵引系统与制动系统对主控机车的控制命令执行响应变化延迟时间来判断个机车的同步性。以下给出本研究中 1+1+1 万吨列车 1:1 模拟试验同步控制系统指令响应时间结果的分布图。第一个试验引入了 Markov 策略

和理论,试验结果如图7、图8所示。

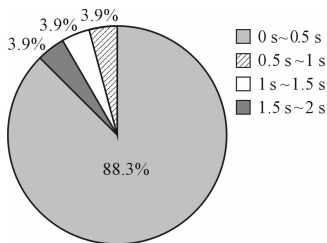


图7 机车牵引控制测试指令响应时间

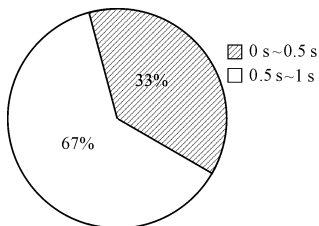


图8 制动指令测试指令响应时间

第二个试验没有加入任何同步控制优化策略,测试的是重载列车在一般情况下指令发出后的响应时间,试验结果如图9、图10所示。

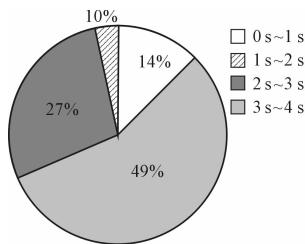


图9 机车牵引控制测试指令响应时间

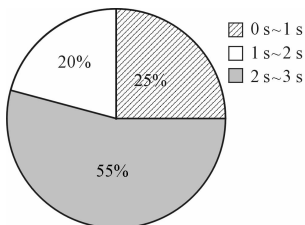


图10 制动指令测试指令响应时间

由图7~10试验结果分析可知,在加入Markov优化策略的牵引试验中,从控机车的响应时间近90%都在0.5 s以内,最大值为2 s;在制动试验中,从控机车的响应时间近70%在0.5 s~1 s之间,最大值为1 s;在一般情况下的牵引试验中,从控机车的响应时间近50%在1 s~2 s之间,最大值为4 s;在制动试验中,从控机车的响应时间约50%在1 s~2 s之间,最大值为3 s。由此可见,引入Markov策略的列车控制系统的性

能大大被优化,优化程度达到近一倍。

根据大秦线和神朔线实际运行线路的从控机车控制指令响应时间,一般该响应时间能控制在3 s~4 s内就能保证列车运行的安全性,并能满足无线重联控制的要求,在优化策略下的从控机车,能在70%以上的情况下对牵引/控制指令的响应时间小于1 s,这对于万米长大重载列车而言,可以实现在大多数情况下免受地形、隧道、距离等的影响从而导致接受牵引/制动指令接发的不同步性。

6 结束语

本研究建立了列车纵向力和车钩力的数学模型,主要加入了车钩间隙和空气阻力两个影响因素,运用Matlab进行仿真计算求出加速度和最大车钩力等物理量,与实际运行线路上的试验值比较,其大小、方向等结果是一致的。引入Markov同步控制策略的重载列车在指令响应时间方面具有比普通的重载列车具有更大的优越性,这为进一步优化重载列车编组和同步控制性能提供了重要的理论参考依据。

在下一阶段,本研究将在模型中加入更多的影响因素,完善仿真模型,进一步优化同步控制性能,引入更好的同步控制策略,缩短同步指令的响应时间。

参考文献(References):

- [1] 田光荣.重载列车系统动力学研究[D].成都:西南交通大学载运工具信息工程学院,2009.
- [2] 蒋益平,池茂儒,朱海燕.两万吨重载组合列车牵引和制动时的车钩力分析[J].机车电传动,2013(1):23-25.
- [3] 于建.3万t组合列车纵向动力学研究[D].大连:大连交通大学交通运输工程学院,2011.
- [4] 严隽毫,翟婉明,陈清,等.重载列车系统动力学[M].北京:中国铁道出版社,2003.
- [5] 耿志修.大秦铁路重载运输技术[M].北京:中国铁道出版社,2009.
- [6] 马大伟,王成国,张波.2万吨级重载列车的技术对策及其纵向力研究[J].铁道机车车辆,2008(12):212-216.
- [7] 马大伟,王成国.繁忙干线开行重载列车的仿真研究[J].铁道学报,1995(4):33-38.
- [8] 李蔚.重载列车机车无线重联同步控制关键技术研究与应用[D].长沙:中南大学交通运输工程学院,2012.
- [9] 肖华.无线通信中的马尔科夫决策过程研究[D].成都:电子科技大学通信与信息工程学院,2013.
- [10] NASR A, MOHAMMADI S. The effects of train brake delay time on in-train forces[J]. Proceeding Institution Mechanical Engineers. 2010,5(2):176-196.

[编辑:李辉]

本文引用格式:

傅怡旻,郭其一.基于同步控制的重载列车纵向力仿真与研究[J].机电工程,2014,31(9):1222-1225.

FU Yi-min, GUO Qi-yi. Simulation and study of heavy haul train longitudinal force based on synchronous control[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2014,31(9):1222-1225.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>