

# 基于无线通信的重载列车同步控制技术研究

郭其一<sup>1</sup>, 陈琳芝<sup>1</sup>, 黄世泽<sup>1</sup>, 姚晓阳<sup>2</sup>

(1. 同济大学 电子与信息工程学院, 上海 201804; 2 株洲南车时代电气股份有限公司, 湖南 株洲 412001)

**摘要:** 为了研究适合国内机车的无线同步控制系统, 对无线同步控制技术特点进行分析, 并建立了重载组合列车纵向动力学数学模型和仿真模型。从纵向动力角度, 验证采用无线同步控制技术的组合列车与传统编组列车相比的优越性, 通过计算从控机车不同延迟时间对纵向力的影响来验证同步控制的优越性, 为进一步优化无线同步控制系统提供借鉴。

**关键词:** 重载列车; 无线同步控制; 纵向动力; 数学模型; 仿真模型

**中图分类号:** U239.4

**文献标志码:** A

## Wireless Communication-based Synchronization Control Technology for Heavy Haul Train

GUO Qi<sup>1</sup>, CHEN Linzhi<sup>1</sup>, HUANG Shize<sup>1</sup>, YAO Xiaoyang<sup>2</sup>

(1. College of Electronics and Information Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Zhuzhou CSR Times Electric Co. Ltd., Zhuzhou 412001, China)

**Abstract:** Based on an analysis of the characteristics of wireless synchronization control technology, a mathematical and simulation model of longitudinal force of heavy haul train was established. From the angle of longitudinal force, the combined train with wireless synchronization control technology was verified to be superior to traditional train. The longitudinal force affected by different delay time between the main control locomotive and the driven control locomotive train was calculated to verify the advantages of wireless synchronization control technology, which provided a reference for further optimization of the wireless synchronization control system.

**Key words:** heavy haul train; wireless synchronization control; longitudinal force; mathematical model; simulation model

和重要发展方向, 是提高货运运能的主要手段, 为经济快速发展提供了有力保障。基于无线通信的重载列车同步技术是解决列车安全和经济运行的关键技术, 是国内外研究的重点。目前国内无线同步控制技术主要靠国外引进, 没有完全自主知识产权, 性价比低, 与国产车的兼容性较差, 不能很好地满足我国铁路应用需求。故开展适合我国国情的基于无线通信的重载组合列车同步控制技术显得尤为重要。

我国铁道部依靠自主创新, 首次实现了 GSM-R (GSM for railways) 技术与 Locotrol (机车无线同步遥控) 技术的结合; 800 MHz 数传电台与 Locotrol 技术的结合, 以及 2 台和谐型大功率机车加可控列尾的创新方式, 开发了重载配套设备, 成功开行了大秦线 20 kt 级重载组合列车, 与原设计能力相比, 实际运行年运量提高 3 倍。在继承大秦线成功经验基础上, 株洲电力机车研究所、株洲电力机车工厂、铁科院通信信号研究所、中南大学联合进行 SS4B 电力机车无线重联同步控制系统研制, 成功应用在神朔铁路万吨重载组合列车上。本文根据“基于无线通信的重载列车同步控制技术”的应用需求, 运用计算机系统仿真技术从系统工程的高度进行列车动力学的数学建模与系统仿真, 仿真计算与实际数据进行比较验证。验证结果证明: 采用无线同步控制技术的重载组合列车的编组比传统列车编组, 以及不同延迟时间对纵向力的影响都具有优越性, 为进一步优化无线同步控制系统提供了借鉴。

## 1 无线同步控制技术特点分析

基于无线通信的同步控制技术指组合列车以无线通信方式传输主从控机车间的操控命令和应答、状态信息等, 实现主控机车对从控机车的远程无线同步控制<sup>[1]</sup>。讨论无线同步控制技术的优越性, 机车

重载列车代表着当今世界铁路货运的先进水平

收稿日期: 2012-01-05

基金项目: 国家“八六三”高技术研究发展计划(2011AA110505, 2009AA11Z217)

第一作者: 郭其一(1961—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为轨道电气。E-mail: gqi1@263.net

分布在列车不同位置是其前提,则首先要讨论组合列车动力分散与传统列车动力集中相比的优越性,之后探讨机车同步控制比起不同步控制的优越性。制动距离、制动时间、纵向力、纵向冲动作为衡量控制优越性的指标。下面根据这些指标分析无线同步控制技术的优越性。

### 1.1 无线同步控制组合列车性能分析

制动距离、制动时间以及纵向车钩力是分析制动性能的有效指标,其中制动距离  $S_b$  包括空走距离  $S_k$  和有效距离  $S_e$ ,制动时间  $t_b$  包括空走时间  $t_k$  和有效时间  $t_e$  [2],计算公式分别为

$$S_b = S_k + S_e = \frac{v_0 t_k}{3.6} + \sum \frac{4.17(v_1 - v_2)}{1000\theta\varphi + \omega_0} \quad (1)$$

$$t_b = t_k + t_e = (1.6 + 0.065n) + \sum \frac{30(v_1 - v_2)}{1000\theta\varphi + \omega_0} \quad (2)$$

式中:  $v_0, v_1, v_2$  分别为制动初速度、速度间隔的初速、速度间隔的终速,  $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ ;  $\theta$  为换算制动率;  $\varphi$  为闸瓦的换算摩擦系数;  $\omega_0$  为列车运行阻力因数,  $\text{N} \cdot \text{kN}^{-1}$ ;  $n$  为列车编组辆数。

下面针对传统编组列车和无线同步控制组合列车进行比较分析。图1为万吨重载列车,2台重联机车牵引100辆货车。传统编组“2+0”单元列车编组辆数  $n=100$ ,与其相比,“1+1”编组组合列车采用无线同步控制技术,2台机车同时产生制动作用,前面50辆货车为头部机车和中间机车同时发生制动作用,即制动波向中间传递,编组辆数  $n=(50/2+50)/2=37.5 \approx 38$ ,同时,2台机车同步制动,产生相同制动力,故减小了前后车的速差。由式(1)和(2)知,无线同步控制的“1+1”编组列车可以减小牵引辆数  $n$  和速差,从而减小空走时间和空走距离,进而减小制动时间和制动距离,改善了制动性能。

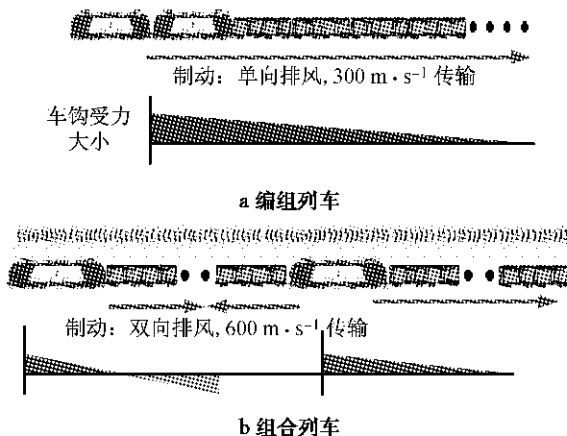


图1 传统编组列车和组合列车

Fig.1 Traditional marshaling train and combined train

另外,根据原苏联卡尔瓦茨基的纵向力研究,纵向力  $F$  和制动机的制动速度、制动缸充气特性间的关系  $F \propto (t_b/t_c)^{n_p}$  (其中,  $t_b$  为制动时间,  $t_c$  为制动缸充气时间,  $n_p$  为反映制动缸充气曲线特性的指数)可知,无线同步控制列车减小了列车制动时间,从而减小了列车的纵向车钩力。

### 1.2 主从控机车同步控制与不同延时对列车纵向力的影响

理想的无线同步控制忽略了控制信号无线传输时延、各从控机车操作时延的影响,使各车同一时刻执行相同控制,但实际却受到这些因素的影响,造成从控机车延时一段时间才执行主控机车命令的相同动作。主从控机车不同延时时间对列车纵向力的影响很大,随着延迟时间的递增,同一时刻各车辆制动力不同,增大车辆间速差,使车钩力及纵向冲动迅速增大,在紧急制动工况下有可能造成断钩的危险。所以凸显列车同步控制的必要性,在分析主从控机车不同延时时间对列车纵向力影响的基础上,以减少纵向力为目标,优化同步控制策略 [3-4]。

## 2 无线同步控制重载列车仿真研究

### 2.1 列车纵向动力学模型

如图2所示,将列车视为用缓冲器联结的间断质点系,每一个质点代表一个车辆,根据牛顿第二定律,列出用非线性方程描述的列车运动方程式的形式为 [5-6]

$$M_i \ddot{x}_i = S_i - S_{i+1} - B_i - R_i - G_i \quad (3)$$

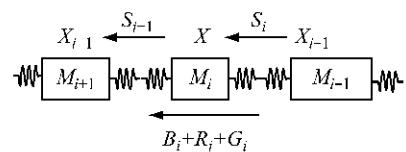


图2 列车纵向运动计算简图

Fig.2 Schematic diagram of train longitudinal movement

式中:  $M_i, \ddot{x}_i, S_i, B_i, R_i, G_i$  分别为序号为  $i$  的车辆的质量、位移量、前车钩力、制动力、基本阻力、附加阻力(包括坡道阻力和弯道阻力)。车钩力  $S_i$  取决于车辆间的相对位移与相对速度,将式(3)写成2阶常微分方程组的通用形式

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = F \quad (4)$$

式中:  $M$  为系统质量矩阵;  $C$  为系统阻尼矩阵;  $K$  为系统刚度矩阵;  $\ddot{x}, \dot{x}, x$  分别为加速度、速度、位移矢

量; $F$ 为广义载荷矢量,是与位移、速度有关的非线性过程量.式(4)两边同时乘以 $M^{-1}$ ,再通过移项得下式:

$$\ddot{x} = M^{-1}F - M^{-1}C\dot{x} - M^{-1}Kx \quad (5)$$

这是一个关于 $\ddot{x}$ 的方程,把方程分成3个模块:制动力与阻力模块,刚度子系统模块,阻尼子系统模块.建立仿真模型对方程组求解,获得车钩的受力情况.

## 2.2 列车同步控制仿真模型

根据前文分析的列车纵向动力学数学模型,利

用 Matlab/Simulink 模块设计仿真模型.具体的仿真条件为:万吨重载列车的总质量为 10 368 t,列车总长约为 1 460 m. 25 t 轴重货车的车辆长度按 13 942 mm 考虑,车辆的车钩为 E 级钢 17 型联锁式车钩,一对车钩的结构间隙考虑到应用磨损后取 30 mm,车辆的缓冲器为 MT-2 型缓冲器,车辆的制动装置为改进的 120 型控制阀配新型高摩合成闸瓦.设计仿真模型如图 3 所示.

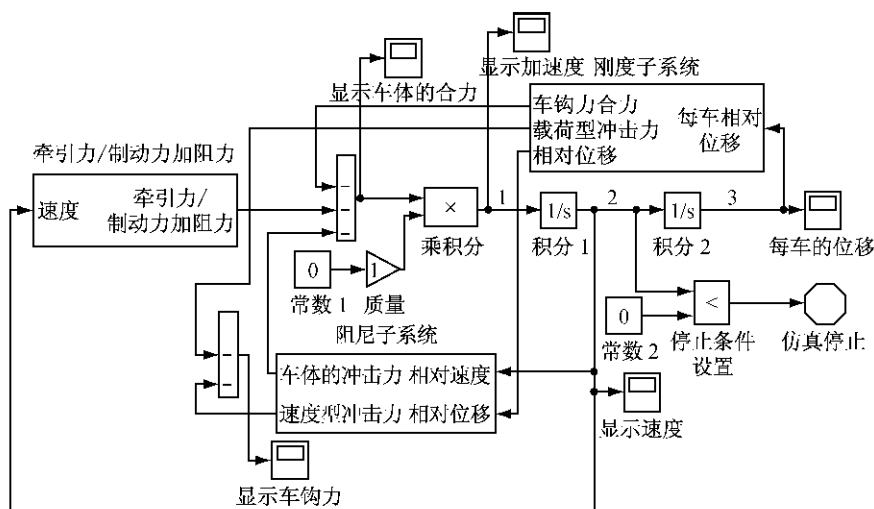


图3 列车纵向动力学仿真模型

Fig.3 Simulation model of train longitudinal dynamic

列车纵向动力学仿真模型包含2个积分环节和1个求和模块,实现微分方程(1)的求解.如图3所示,在数据线1上传递的是车体的加速度 $\ddot{x}$ ,经积分环节转化为车体的速度 $\dot{x}$ 传递到数据线2,再经过积分环节转化为车体的位移 $x$ 传递到数据线3.由于刚度子系统与位移有关,所以将数据线3的数据引入到刚度子系统中.同理,将数据线2引入阻力子系统模块,这样就可以得到和式(3)等价的仿真框图,由仿真图可以方便地得出各车的车钩力、速度和加速度等.

## 3 仿真实验

利用前文建立的仿真模型对无线同步控制技术特点进行验证.本文重点对以下两种列车编组方案进行计算分析:方案1(组合列车方案),SS4B机车+25 t轴重货车(50辆)+SS4B机车+25 t轴重货车(50辆)+可控列尾;方案2(单元列车方案),SS4B机车(2台重联)+25 t轴重货车(100辆)+可控列尾.

### 3.1 不同制动工况的仿真计算

对各种制动工况进行仿真计算,得到最大车钩力沿列车长度方向的分布.

#### 3.1.1 动力制动(图4)

计算条件为:坡道为-9%的单一下坡道,列车的初始速度为 $45 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ ,车钩初始状态为拉钩状态,两台SS4型电力机车同时动力制动,动力制动手柄提到最大位的时间为32 s.

#### 3.1.2 常用制动(图5)

计算条件为:坡道为-9%的单一下坡道,初始制动速度为 $75 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ ,车钩的初始状态为拉钩状态,列车管减压量为80 kPa.

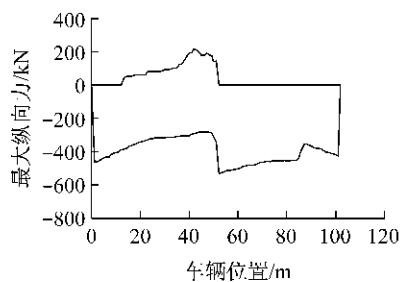
#### 3.1.3 常用制动缓解(图6)

计算条件为:坡道为-9%的单一下坡道,列车的初始缓解速度为 $35 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ ,车钩的初始状态为压钩状态,列车管减压量为80 kPa.

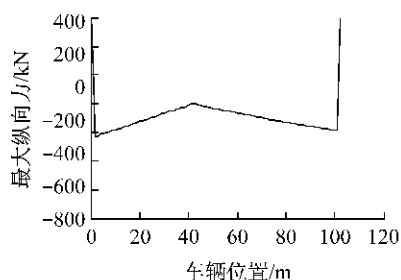
#### 3.1.4 紧急制动(图7)

计算条件为:单一平直道,初始速度为 $100 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ ,车钩的初始状态为拉钩状态,计算列车的制动距离和制动时间单元列车为907.8 m和57 s,而

组合列车为 870.2 m 和 56 s.

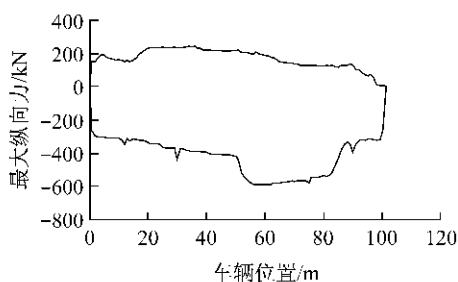


a 组合列车

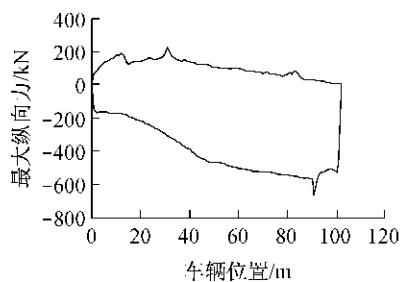


b 单元列车

图4 动力制动工况中每节车的最大车钩力  
Fig.4 Maximum coupler force of each wagon tipper in dynamic braking condition



a 组合列车



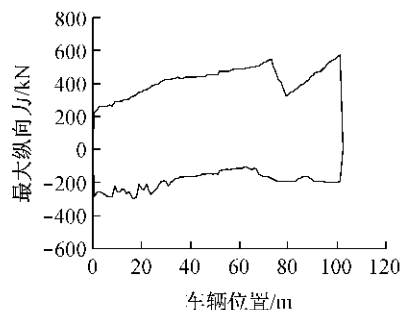
b 单元列车

图5 常用制动工况下每节车的最大车钩力  
Fig.5 Maximum coupler force of each wagon tipper in braking condition

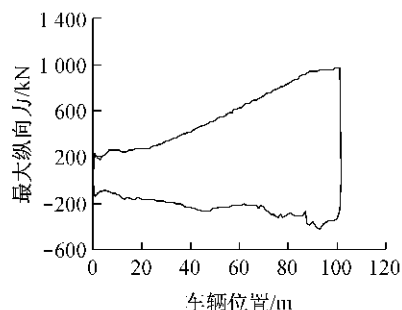
### 3.2 仿真计算结果与试验比较

对照神华 SS4B 机车加装机车无线重联装置进行分布动力控制万吨组合列车试验数据,和在燕家塔进行“2+2,1+1,2+0”3种模式万吨组合列车的静态试验的数据.根据前文“1+1”编组的仿真计算结果与试验数据比较如表1所示.其中,车钩力为负

表示车钩受压,车钩力为正表示车钩受拉(以下同).仿真数据和试验测试数据基本一致,说明仿真的正确性.

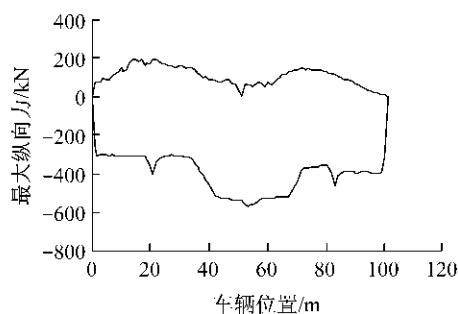


a 组合列车

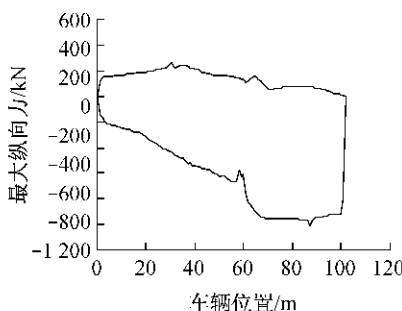


b 单元列车

图6 制动缓解工况中每节车的最大车钩力  
Fig.6 Maximum coupler force of each wagon tipper in release condition



a 组合列车



b 单元列车

图7 紧急制动工况中每节车的最大车钩力  
Fig.7 Maximum coupler force of each wagon tipper in emergency braking condition

表1 不同条件下的最大车钩力

Tab.1 Maximum coupler force in different conditions

工况	坡度/ ‰	速度/ (km·h <sup>-1</sup> )	比较	最大车钩拉力和发生车位的		最大车钩压力和发生车位的	
				车钩拉力/kN	车位	车钩压力/kN	车位
动力	-9	45	计算	220.00	42	-510.00	51
制动	-9	45	试验	215.40	42	-531.04	52
常用	-9	75	计算	242.00	34	-587.00	56
制动	-9	75	试验	245.26	34	-590.75	56
制动	-9	35	计算	570.00	100	-300.00	17
缓解	-9	35	试验	573.69	101	-300.71	17
紧急	0	100	计算	200.00	21	-557.00	53
制动	0	100	试验	198.34	17	-565.16	53

### 3.3 仿真数据分析

#### 3.3.1 无线同步控制组合列车性能分析

##### (1) 制动距离和制动时间减小

根据前文紧急制动的计算数据知,组合列车的制动距离减小了37.6 m,说明采用无线同步控制组合列车可缩短车辆制动缸的出闸时间,即减少了列车制动时的“空走时间”。

表2 不同条件下的最大车钩力和最大加速度

Tab.2 Maximum coupler force and acceleration in different conditions

工况	坡度/ ‰	初始速度/ (km·h <sup>-1</sup> )	编组	最大车钩拉力和发生车位的		最大车钩压力和发生车位的		最大正加速度和发生车位的		最大负加速度和发生车位的		车钩力改善/%	冲动改善/%
				拉力/kN	车位	压力/kN	车位	正加速度/(m·s <sup>-2</sup> )	车位	负加速度/(m·s <sup>-2</sup> )	车位		
动力	-9	45	A			-829	2	6.67	86	-7.76	101	36.0	46.8
制动	-9	45	B	220	42	-510	51	1.99	39	-4.13	101		
常用	-9	75	A	223	31	-663	91	4.68	86	-5.69	91	10.9	43.4
制动	-9	75	B	242	34	-587	56	3.01	15	-3.22	31		
制动	-9	35	A	971	101	-428	93	9.50	101	-6.01	84	40.9	41.1
缓解	-9	35	B	570	100	-300	17	5.59	101	-3.79	92		
紧急	0	100	A	258	30	-1 006	87	8.31	80	-9.99	87	43.8	61.7
制动	0	100	B	200	21	-557	53	2.92	22	-3.83	84		

表3 从控机车不同延时的最大车钩力和加速度范围

Tab.3 Maximum coupler force and acceleration range of different delay periods of controlling locomotives

常用制动			紧急制动		
延时/s	最大车钩力范围/kN	最大加速度范围/(m·s <sup>-2</sup> )	延时/s	最大车钩力范围/kN	最大加速度范围/(m·s <sup>-2</sup> )
0	-550~203	-3.01~2.89	0	-510~167	-3.54~2.66
2	-587~242	-3.22~3.01	2	-557~200	-3.83~2.92
4	-705~366	-4.34~3.87	4	-690~325	-4.55~4.04
6	-823~421	-6.21~5.08	6	-917~525	-6.95~5.54
7	-1190~650	-10.12~7.71	7	-1350~832	-11.37~8.20

由表3可知,随着延迟时间的递增,车钩力及纵向冲动增大。主从控机车作用时间相差在4 s以内时,产生的车钩力小于1 000 kN,纵向加速度小于1g,满足国内外的经验标准。在接近或大于6 s时,特别是紧急制动时,车钩力及纵向冲动迅速增大,易出现断钩等危险<sup>[3]</sup>。

#### (2) 车钩力和列车冲动减小

在各工况中,最大车钩力和最大加速度的值如表2所示。加速度为正表示其方向与列车运行方向相同,加速度为负表示其方向与列车运行方向相反(以下同),单元列车为A,组合列车为B。

通过上述数据的分析,无论是哪种工况,组合列车最大车钩力和最大车体加速度均大大降低,改善程度在40.0%左右,且满足一般国内外的标准,SS4型机车最大车钩力小于1 000 kN,紧急制动最大车钩力小于2 000 kN,纵向加速度小于1 g,说明采用无线同步控制的“1+1”模式明显优于“2+0”模式。

#### 3.3.2 主从控机车不同延时时间对列车纵向力的影响

为研究主从控机车延迟时间对重载组合列车纵向性能的影响,设置从控机车延时分别为0,2,4,6,7 s进行仿真计算。在前文常用制动和紧急制动工况下,不同延时产生的车钩力如表3所示。

## 4 结论

(1) 组合列车可以有效地缩短制动波传输时间,使各车开始制动时间基本一致,提高列车制动同  
(下转第246页)