机车电传动 2018 年第 1 期 (2018-01-10)
ELECTRIC DRIVE FOR LOCOMOTIVES №1, 2018(Jan. 10, 2018)

文章编号：1000–128X(2018)01–0044–04

基于循环变量法的重载列车纵向力仿真分析

赵心迪[1]，郭其一[1]，吕　杰[2]，王梦超[3]

（1. 同济大学 电气工程系，上海　201804；2. 株洲中车时代电气股份有限公司 技术中心，湖南 株洲　412001；3. 上海上实龙创智慧能源科技股份有限公司，上海　200000）

摘　要：重载列车运行实现的基础是动力学建模和牵引仿真计算。针对传统列车仿真模型的不足采用了基于循环变量的重载列车纵向力仿真模型，并对 2Loco+14Car、9 单元编组重载列车进行了建模仿真，验证了模型的正确性。同时给出了该编组在多种工况下的车钩力时程曲线及其沿整列车分布的规律，证明该编组列车符合列车安全运行要求。

关键词：重载列车；循环变量；车钩力；建模仿真

中图分类号：U292.92+1　　**文献标识码：**A

doi：10.13890/j.issn.1000-128x.2018.01.010

Longitudinal Force Simulation for Heavy Haul Train Based on Cycle Variable Method

ZHAO Xindi[1], GUO Qiyi[1], LYU Jie[2], WANG Mengchao[3]

(1.Department of Electrical Engineering, Tongii University, Shanghai 201804, China;
2. Technology Center, Zhuzhou CRRC Times Electric Co.,Ltd., Zhuzhou,Hunan 412001, China;
3. Shanghai SIIC-Longchuang Smarter Energy Technology Co., Ltd., Shanghai 200000, China)

Abstract: The operation of heavy haul train was based on dynamics modeling and traction simulation calculation. According to the limitation of traditional research, a mathematical simulation model of longitudinal force of heavy haul train based on cycle variable was established. The model had been verified by the simulation though a train marshalling of 2Loco+14Car, 9 units. The results of the coupler force curves and its distribution along the whole train in different running conditions were provided, which verified that a train marshalling of 2Loco+14Car, 9 units could meet the safe operation requirement.

Keywords: heavy haul train; cycle variable; coupler force; modeling and simulation

0　引言

发展重载运输是提高线路货运能力的一种有效途径[1]。重载列车纵向动力学建模仿真的研究目的主要是分析重载列车在运行过程中沿轨道方向受到的牵引力、制动力、车钩力、运行阻力等各种纵向力之间的相互作用关系。一方面是为重载列车的实际运行可行性提供参考；另一方面也为货车关键零部件的设计和评价提供依据。其中，车钩力作为各种纵向力和钩缓装置综合作用的结果，是衡量重载列车纵向冲动的重要特性指标[2]。随着列车质量、长度、轴重的增大，同时列车所在线路纵横断面比较复杂，使得重载列车的受力比一般列车复杂，车钩力也大幅增加。因此，在重载列车纵向动力学建模仿真的研究中[2–11]，对车钩力特性的研究变得尤为重要。

对于重载列车，随着列车中车辆编组数目的增加，列车系统中的自由度成等比级数增长，采用传统的列车仿真模型难于建模和计算处理。因此本文采用了基于循环变量[3]的重载列车纵向力建模仿真模型，有效减少了动力学方程的求解规模，大大减少了变量的赋值以及程序的编写，并通过仿真分析了不同工况下 2Loco+14Car、9 单元编组重载列车车钩力的特性及车钩力沿整车的分布规律，验证了该编组列车运行的安全性。

1　传统的列车纵向力仿真模型

对于客运列车而言，一般由十几辆组成，列车的建模常采用传统的列车纵向力仿真模型，即假设一列

收稿日期：2016–08–30；修回日期：2017–07–07

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

车包含 n 节车辆，而每节车有 m 个自由度，则整列车就有 $(m\times n)$ 个自由度。列车系统的运动方程可表示为[4]：

$$[M]\ddot{Y}+[C]\dot{Y}+[K]Y=\{P\}+\{F\} \quad (1)$$

式中：[M]、[C]、[K] 分别表示列车系统的质量、阻尼、和刚度矩阵，分别如下：

$$[M]=\begin{bmatrix} m_1 & \cdots & 0 & \cdots & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & \cdots & m_i & \cdots & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & \cdots & 0 & \cdots & m_n \end{bmatrix}_{(m\times n)\times(m\times n)}$$

$$[C]=\begin{bmatrix} c_1 & \cdots & 0 & \cdots & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & \cdots & c_i & \cdots & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & \cdots & 0 & \cdots & c_n \end{bmatrix}_{(m\times n)\times(m\times n)}$$

$$[K]=\begin{bmatrix} k_1 & \cdots & 0 & \cdots & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & \cdots & k_i & \cdots & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & \cdots & 0 & \cdots & k_n \end{bmatrix}_{(m\times n)\times(m\times n)}$$

列车的自由度变量（$\ddot{Y}$、$\dot{Y}$、Y 分别为加速度、速度、位移矢量），外部作用力 $\{P\}$ 和车间相互作用力 $\{F\}$ 分别表示为：

$$[Y]=\begin{bmatrix} y_1 \\ \cdots \\ y_i \\ \cdots \\ y_n \end{bmatrix}_{(m\times n)\times 1} \qquad [P]=\begin{bmatrix} p_1 \\ \cdots \\ p_i \\ \cdots \\ p_n \end{bmatrix}_{(m\times n)\times 1}$$

$$[F]=\begin{bmatrix} f_{1\leftarrow 2} \\ \cdots \\ f_{i-1\leftarrow i}+f_{i\leftarrow i+1} \\ \cdots \\ f_{n-1\rightarrow n} \end{bmatrix}_{(m\times n)\times 1}$$

随着我国万吨级重载列车的开行，列车编组将达到几百辆。若采用传统的列车纵向力仿真模型，随着列车中车辆编组数量的增加，列车系统中的自由度增长迅速。要一次性处理 $(m\times n)\times(m\times n)$ 阶数矩阵，目前的计算机几乎很难办到，因此，采用传统的建模方法对于长大列车是不可取的，故本文采用了基于循环变量的重载列车纵向力仿真模型。

2　基于循环变量的重载列车纵向力仿真模型

把列车运动方程式（1）分解成 n 个子方程：

$$[m_i]\ddot{y}_i+[c_i]\dot{y}_i+[k_i]y_i=\{p_i\}+\{f_i\} \quad (i=1,\cdots,n) \quad (2)$$

其中车间相互作用力 $\{f_i\}$ 为

$$\{f_i\}=\begin{cases} f_{1\leftarrow 2} & i=1 \\ f_{i-1\leftarrow i}+f_{i\leftarrow i+1} & 1<i<n \\ f_{n-1\leftarrow n} & i=n \end{cases}$$

式中：$\{y_i\}$ 为第 i 节车所有自由度的集合；$[m_i]$、$[c_i]$、$[k_i]$ 是第 i 节车相关的质量、阻尼、刚度矩阵；$\ddot{y}_i$、$\dot{y}_i$、y_i 为第 i 节车的加速度、速度、位移矢量；$\{p_i\}$ 是作用在第 i 节车上的外部作用力；$\{f_{i-1\leftarrow i}\}$ 和 $\{f_{i\leftarrow i+1}\}$ 是第 i 节车前后相邻车之间的相互作用力（头车和尾车分别只有一个相邻车间相互作用力）。

根据基于循环变量的重载列车模型，各节车辆状态计算的步骤是相似的，因此可以定义一组自由变量，将单节车辆看作单位积分单元。在当前单位时间内，重复使用该组自由变量对不同车辆运行状态进行计算，以减少大量变量的赋值及繁杂的程序编写。当一节车辆相关运行状态的计算完成后，将计算结果存入中转变量，同时释放自由变量以便对下一节车辆运行状态进行计算。直到当前单位时间内所有车辆的运行状态计算完毕，便进入下一个积分步，这种积分方法称为循环变量法[2]。

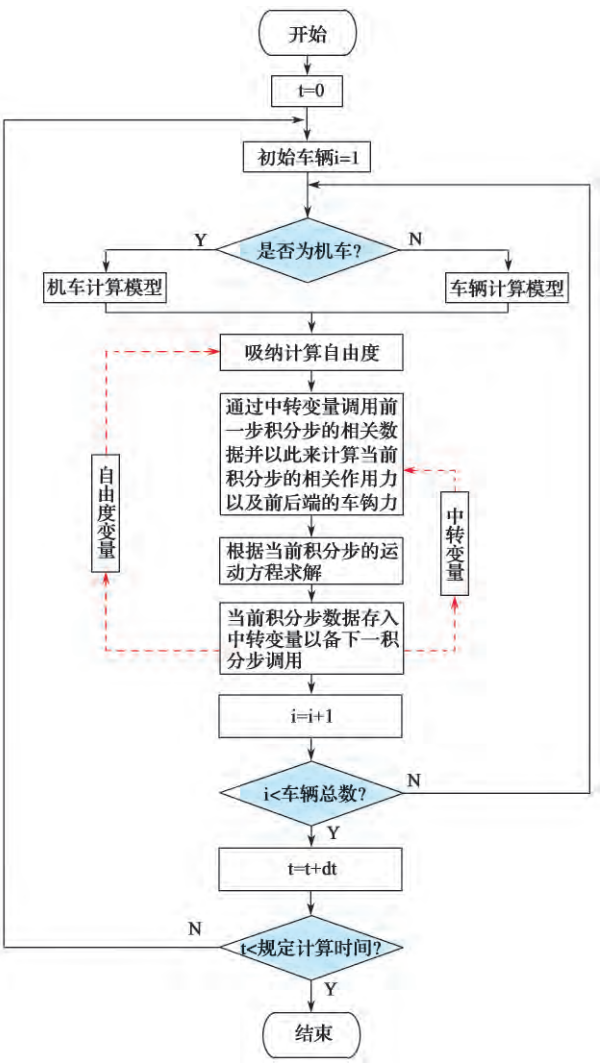

图 1　基于循环变量的重载列车纵向力仿真框图

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

3 仿真验算

本文给出了基于 Matlab 的重载列车纵向力建模仿真[5]。主要对 2Loco+14Car、9 单元编组列车进行了仿真，排列方式为每 2 个单元一正一反对接，即 2Loco+14Car+14Car+ 2Loco+…+2Loco+14Car+14Car+ 2Loco。该模型为 LOCOTROL 模型[6]，属于动力分布控制系统，该系统的基本原理是由主机发送无线信号至各台从控机车，从而实现多台机车的同步控制。仿真模型考虑了控制信号的传播速度以及各从控机车的操作时间延迟。并在建立制动模型时假设在列车管中空气制动波双向传播速度相同，即中间位置机车产生的制动波向后和向前传播的速度相同，同时忽略了机车排风负荷差别对制动波速产生的影响。

具体仿真计算条件为：机车为 4 轴 B_0-B_0 转向架，轴重 23 t，机车额定功率 6 400 kW；一列组合列车机车总台数 18 台；单节车辆轴重 25 t，质量为 60 t，机车为 SS_{4B} 型；单节车辆长度为 12 m，单节机车长度为 15 m，列车总长为 1 782 m；车辆的缓冲器为 MT-2 型缓冲器，一对车钩的初始间隙为 10 mm，机车采用 DK-1 型电空制动机，车辆的制动装置主要为 120 型控制阀配高摩合成闸瓦。

3.1 不同工况的仿真验算

本节给出了 2Loco+14Car、9 单元编组列车在牵引启动、缓解制动、通过长大下坡道工况下的仿真验算曲线。

3.1.1 牵引启动

计算条件为：平道牵引启动，列车初始速度为 0 km/h，车钩初始状态为压钩状态，同步控制，牵引手柄提到最大位的时间为 32 s。牵引启动工况车钩力如图 2 所示，车钩力 – 时间历程如图 3 所示。

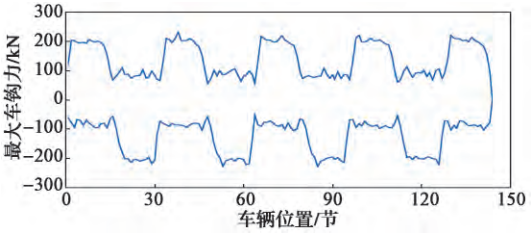

图 2 牵引启动工况下车钩力分布特性

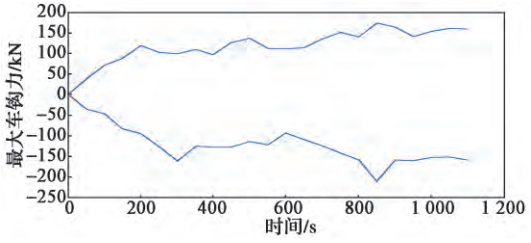

图 3 牵引启动工况下车钩力—时间历程

平道牵引启动状况下，较大车钩力出现在主控机车和从控机车的后端位。这是由于主控机车的牵引力以波的形式向后方传递，而从控机车的牵引力既向前方又向后方传递，因此机车的后端位车辆受到的拉钩力较大，前端位车辆受压钩力较大。

3.1.2 缓解制动

计算条件为：平道制动，初始制动速度为 80 km/h，车钩初始状态为拉钩状态，同步控制，列车管减压量为 80 kPa，制动力与制动参数的取值参考文献 [7]。缓解制动工况车钩力分布特性如图 4，车钩力 – 时间分布历程如图 5 所示。

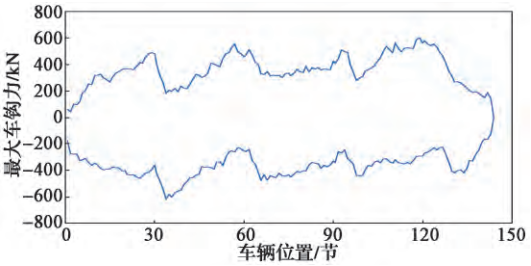

图 4 缓解制动工况下车钩力分布特性

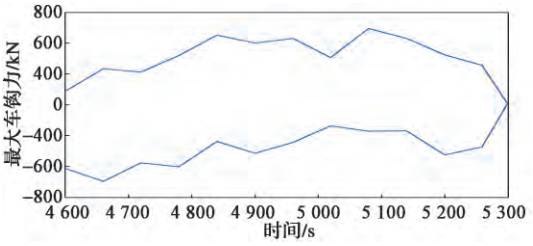

图 5 缓解制动工况下车钩力—时间历程

在缓解制动工况下，由于制动力由前往后传递时间较长，造成后车未接受到制动力而向前涌，因此在开始制动时，从控机车前部列车会受到较大拉钩力，如图 4 所示。由图 5 可知，缓解制动初期，列车前部车辆所受压钩力较大，随着时间的增加，所受压钩力逐渐减小并趋近于零。

3.1.3 通过长大下坡道

计算条件：由平道运行至坡道为 –10‰的单一下坡道，初始下坡速度为 60 km/h，同步控制，列车管减压量为 80 kPa，通过长大下坡工况车钩力分布特性如图 6 所示，车钩力 – 时间历程如图 7 所示。

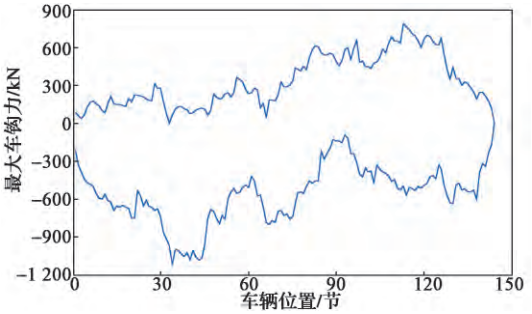

图 6 长大下坡车钩力分布特性

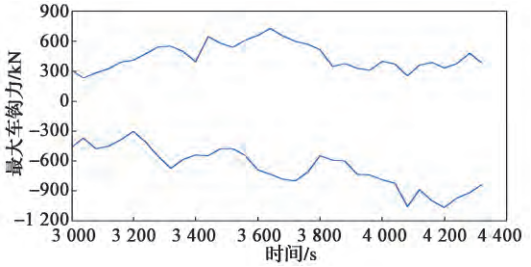

图 7 长大下坡车钩力—时间历程

?2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

长大下坡道区间重载列车再充气和纵向冲动是重载列车可否开行的关键技术问题。为保证下坡道的限速要求，在使用动力制动的同时仍必须多次施行空气减压的循环制动，若再充风时间不足将导致列车空气制动能力逐次衰减而危及到列车在下坡道的安全性。在列车调速制动过程中，长大列车的纵向动力作用又会导致车钩力和纵向冲动的剧增[8–9]。因此，对长大下坡道上的列车制动需要通过仿真计算制定合理的操纵方法[9]。本文采用的制动方法是充分利用动力制动，空气制动减压量 80 kPa，6 次循环制动，每次制动的平均时间为 96 s，可容许的再充风时间平均在 420 s 以上。

3.1.4　完整运动过程

计算条件为：平道牵引启动，列车初始速度为 0 km/h，车钩初始状态为压钩状态，后经过坡道为 10‰的上坡道并匀速运行转入 –10‰的下坡道，最后在平道阶段制动，初始制动速度为 80 km/h，同步控制完整运动过程的车钩力分布特性如图 8 所示。

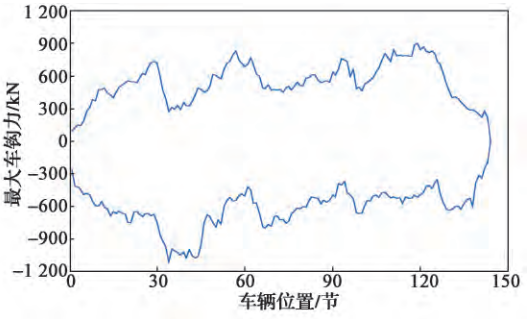

图 8　完整运动过程的车钩力分布特性

3.2　仿真数据与理论值分析对比

根据神华集团对 SS4B 型机车的试验数据，以及各类型万吨组合列车的静态试验数据[7–9]，可以对 2Loco+14Car、9 单元编组列车最大车钩拉力与最大车钩压力的理论值进行范围估计。表 1 为仿真数据和预估理论数据对比。由于仿真计算存在一定的误差，而误差将直接影响最大值的取定，因此最大车钩拉力与最大车钩压力根据所得数据密度取范围值。从表 1 中数据可以看出，本次仿真计算所得值均在理论估计范围值之内，该仿真的正确性以及实用性得到了验证。

表 1　不同工况下的最大车钩力

工况	坡度 /‰	初始速度 /(km·h^{-1})	比较	最大车钩拉力 /kN	最大车钩压力 /kN
牵引启动	0	0	计算	150~210	–190~–210
	0	0	理论	100~400	–100~–400
缓解制动	0	80	计算	590~610	–610~–700
	0	80	理论	400~700	–500~–800
长大下坡道	–10	60	计算	650~790	–1 120~–1 150
	–10	60	理论	500~800	–900~–1 200

表 2 为编组列车不同工况下的加速度及冲动值大小等物理量的详细计算值。通过仿真结果可知，该编组列车符合列车纵向力安全性要求[5]。

表 2　不同工况下的最大车钩力和最大加速度

工况	坡度 /‰	初始速度 /(km•h^{-1})	最大车钩拉力 /kN，车位	最大车钩压力 /kN，车位	最大正加速度 /(m•s^{-2})，车位	最大负加速度 /(m•s^{-2})，车位
牵引启动	0	0	150~210, 34	–190~–210, 88	2.6, 13	–1.51, 5
缓解制动	0	80	590~610, 120	–610~–700, 31	4.68, 117	–3.25, 90
通过长大下坡道	–10	60	650~790, 116	–1 120~–1 150, 32	5.59, 109	–3.79, 31

4　结语

本文采用基于循环变量的重载列车仿真模型，并基于 Matlab 编程对 2Loco+14Car、9 单元编组列车进行了运行状态仿真。通过将仿真结果与既有重载列车静态试验数据比较，验证了模型的正确性与准确性。

同时给出了该编组重载列车在牵引启动、缓解制动、通过长大下坡道等工况下的车钩力时程曲线及车钩力沿整列车分布的规律，验证了该编组列车符合安全运行要求，在后续工作中将进行该编组重载列车的实际运行测试，并对该仿真程序的实用性进行进一步验证。

参考文献：

[1] 钱立新 . 国际铁路重载技术发展水平 [J]. 铁道运输与经济，2003(8)：58–59.

[2] 田光荣 . 重载列车系统动力学研究 [D]. 成都：西南交通大学，2009.

[3] 池茂儒，张卫华，曾京，等 . 长大列车动力学建模的一种新方法 [J]. 铁道车辆，2007(3)：1–4.

[4] 丁莉芬 . 重载列车纵向动力学建模研究 [D]. 北京：北京交通大学，2012.

[5] 耿志修，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(2)：88–93.

[6] 李显洲 . 列车纵向动力学模型研究及小间隙车钩动力学性能分析 [D]. 大连：大连铁道学院，2002.

[7] 马大炜 . 重载列车及其试验研究 (续六)——我国重载列车的试验研究 (上) [J]. 铁道车辆 , 1999(4)：20–23.

[8] 中国铁道科学研究院机车车辆研究所 . 大秦线采用 Locotrol 技术开行 2 万 t 重载组合列车试验报告 [R]. 北京：中国铁道科学研究院，2006.

[9] 马大炜 . 关于大秦线重载列车下坡道安全运行和纵向力问题 [J]. 铁道车辆，2005(1)：1–4.

[10] 严隽耄，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，2002.

[11] 饶忠 . 列车牵引计算 [M]. 北京：中国铁道出版社，1999.

[12] 列车牵引计算规程：TB/T 1407—1998 [S]. 北京：中国铁道出版社，1999.

作者简介：赵心迪（1992–），女，硕士研究生，主要研究方向为轨道机车牵引。

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net