

研  
究  
开  
发

# 纵向冲动对动车组平稳性和舒适度影响研究

刘晓京, 李 芾, 周 阳, 安 琪

(西南交通大学 机械工程学院, 四川 成都 610031)



作者简介: 刘晓京(1990-), 男, 硕士研究生, 现从事车辆系统动力学研究。

**摘 要:** 为研究车辆间纵向冲动对平稳性和舒适度指标的影响, 建立了动车组连挂模型, 并通过联合仿真技术对动力学模型施加牵引、制动与基本运行阻力。分析结果表明纵向作用力对车辆舒适性存在不可忽略的影响, 由于纵向力的作用, 纵向舒适度指标在计算中最大升高了200.75%, 而平稳性指数则无法体现纵向力对车辆运行品质的影响。

**关键词:** 动车组; 纵向冲动; 平稳性; 舒适度; 仿真建模; 高速客运

**中图分类号:** U266.2; U292.91<sup>4</sup> **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-128X(2014)01-0033-04

## Influence of Longitudinal Impact on Stability and Comfort for EMUs

LIU Xiao-jing, LI Fu, ZHOU Yang, AN Qi

(School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China)

**Abstract:** To research the influence of longitudinal impact on stability and comfort index, coupled EMUs model was built, and traction force, braking force and basic resistance were applied to the dynamic model by co-simulation for simulating the EMUs longitudinal impact. Results showed that: influence of longitudinal force on the comfort could not be ignored, and because of longitudinal force, longitudinal comfort index increased by 200.75% maximum, stability index could not reflect the influence of longitudinal force on EMUs operation quality.

**Keywords:** EMUs; longitudinal impact; stability; comfort; simulation modeling; high-speed passenger transportation

### 0 引言

高速动车组是高速铁路和客运专线上重要的运载工具, 其动力学性能将直接影响运行的安全性和舒适性。列车各车辆间牵引与制动载荷并不能完全同步, 车间纵向作用对列车运行平稳性的影响不可忽视, 而常规分析模型并不能较好地对该问题进行研究。在我国, 目前主要通过线路测量或仿真分析获得车辆运行时的车体地板面横向加速度和垂向加速度, 根据GB/T 5599—1985标准计算平稳性指数, 来评价车辆的运行平稳性, 但平稳性指标只考虑垂向和横向加速度的作用, 没有考虑纵向加速度的影响。ISO 2631、UIC 513、EN 12299等标准文献给出了舒适度的评价方法, 包含了纵向舒适度分量, 能够较好地反映纵向载荷对车辆运行平稳性的影响。为此, 建立动车组的多体系统动力学模型和列车纵向运动控制模型, 进行联合仿真模拟,

以实现列车模型的纵向力仿真。

### 1 平稳性和舒适度评价指标

#### 1.1 平稳性评价指标

我国铁道机车车辆平稳性指标采用GB 5599—1985《铁道车辆动力学性能评定和试验鉴定规范》中的规定<sup>[1]</sup>, 标准中客车运行平稳性指标的计算公式如下:

$$W = 7.08 \times \left[ \frac{A^3}{f} F(f) \right]^{0.1} \quad (1)$$

式中:  $W$ 为平稳性指标;  $A$ 为振动加速度,  $g$ ;  $f$ 为振动频率, Hz;  $F(f)$ 为与振动频率有关的修正系数, 由经验得出。

垂向和横向平稳性采取相同的评定等级, 车体垂向和横向加速度的加速度传感器安装在距1、2位心盘一侧1 000 mm的车体地板面上。客车运行平稳性等级如表1所示。新造车辆平稳性指标不大于2.75。

收稿日期: 2013-06-12

基金项目: 国家国际科技合作专项项目(2013DFA1330)

表1 客车运行平稳性等级<sup>[1]</sup>

平稳性等级	评定	平稳性指标 $W$
1 级	优	<2.5
2 级	良好	2.5~2.75
3 级	合格	2.75~3.0

UIC 518:2005中对车辆运行品质则是对横向和垂向加速度的最大值及取均方根后的最大值进行评估<sup>[2]</sup>,同时对横向准静态加速度的最大值进行限定。对动车组而言,最大横向和垂向加速度不超过2.5 m/s<sup>2</sup>;横向加速度取均方根后最大值不超过0.5 m/s<sup>2</sup>,垂向不超过1 m/s<sup>2</sup>;横向准静态加速度最大不超过1.5 m/s<sup>2</sup>。

1.2 舒适度评价指标

目前国际上常用的舒适度评价标准为EN 12299:2009,ISO 2631-1:1997,ISO 2631-4:2001,UIC 513:1994,JIS E 4023:1990等标准,除ISO 2631-1是将人体在基准坐标系内定义坐标轴以外,其他几个标准均采用了以车辆为中心的坐标系。在频率修正方面,则采用了不同的频率修正曲线。表征加速度指标时,一般采用频率修正后的加速度,称为加速度有效值 $a_w$ ,例如,在ISO 2631-1中,可由式(2)求得:

$$a_w = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T a_w^2(t) dt} \quad (2)$$

式中: $a_w(t)$ 为频率修正后的加速度瞬时值,m/s<sup>2</sup>或rad/s<sup>2</sup>;  $T$ 为测量时间,s。

表2 给出振动大小与舒适度的关系。

表2 振动大小与舒适度的关系<sup>[3]</sup>

振动加速度值 /m · s <sup>-2</sup>	舒适度评价
<0.315	无不舒适
0.315~0.630	稍稍不舒适
0.500~1.000	稍不舒适
0.800~1.600	不舒适
1.250~2.500	很不舒适
>2.000	非常不舒适

UIC 513:1994标准是基于UIC在1988年由ERRIB153经过十年的研究,所提出的UIC标准草案《铁道车辆振动舒适度评定指南》,并经过审议后,在1994年正式以UIC 513编号颁布实施的。我国自2004年开始依据《200 km/h及以上速度级电动车组动力学性能试验鉴定方法及评定标准》对整车的舒适度进行试验和评定,借鉴了UIC 513的简化方法采用 $N_{MV}$ 作为舒适度评定指标。2008年施行的《高速动车组整车试验规范》也采用了该方法以评定高速动车组乘坐舒适度<sup>[5]</sup>。

EN 12299:2009为欧洲现行的铁道车辆舒适度评价标准,其评价方法也是基于ERRI的试验报告及ISO 2631标准得出的,简化舒适度计算方法与UIC法基本一致,但评价准则上更为合理一些。本研究中舒适度指标的测量和计算将参照欧洲标准EN 12299:2009标准中的简化方法,其计算公式为:

$$\left. \begin{aligned} N_x &= 6 \cdot a_{XP95}^{W_d} \\ N_y &= 6 \cdot a_{YP95}^{W_d} \\ N_z &= 6 \cdot a_{ZP95}^{W_b} \\ N_{MV} &= 6 \cdot \sqrt{(a_{XP95}^{W_d})^2 + (a_{YP95}^{W_d})^2 + (a_{ZP95}^{W_b})^2} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中: $N_x$ 、 $N_y$ 、 $N_z$ 分别为纵向、横向和垂向舒适度分量; $N_{MV}$ 为舒适度指标,其中下标MV表示舒适度计算简化方法; $a$ 为有效加速度; $W_{i(i=b,d)}$ 为加速度值按频率加权( $d$ 表示水平方向, $b$ 表示垂直方向); $X$ 、 $Y$ 、 $Z$ 表示纵向、横向、垂向;P95表示地板面加速度取95%置信点的有效值。

采样数据分为多个连续时间段,每段的计算时间为5 min,每5 s为一个计算单元,求得加权有效值,取60个有效值的50%或95%的置信点,合成3个方向加速度值计算得到舒适度值,所记频谱范围为0.4~80 Hz。最后对所有连续段计算所得的舒适度值进行算术平均,求得舒适度指标。表3所示为EN 12299:2009标准定义的舒适度指标与舒适度评价的关系。

表3 EN舒适度指标与舒适度评价的关系<sup>[6]</sup>

$N_{MV}$ 值	舒适度评价	$N_{MV}$ 值	舒适度评价
<1.5	非常舒适	3.5~4.5	不舒适
1.5~2.5	舒适	>4.5	非常不舒适
2.5~3.5	一般		

2 动力学仿真计算建模

为研究动车组的动力学性能,建立CRH3动车组半列车的计算多体系统动力学模型,通过SIMAT接口利用MATLAB和SIMPACK进行联合仿真,实现纵向力控制。

2.1 车辆模型

根据标准推荐的方法,列车平稳性和舒适度由列车运行在带有激励的轨道上时测量得出的车体加速度求得。基于此,在SIMPACK环境下,建立列车的计算多体系统动力学模型。

模型可细分为动车模型和拖车模型,通过车间连接装置,将动车和拖车模型组成列车动力学模型,列车模型采用了Mc1-T1-M1-Tc1的4辆编组形式。如图1所示为在SIMPACK软件中所建立的列车模型。各车动力学模型如表4所示。

表4 车辆动力学模型

车辆	刚体数目	自由度数目
Mc1	19	54
T1	17	42
M1	19	54
Tc1	17	42

拖车包含轮对4个、构架2个、轴箱8个、枕梁2个、车体1个共计17个刚体,自由度为42。与拖车相比,动车模型上还包括电机组件2个,共计19个刚体,自由度为54。

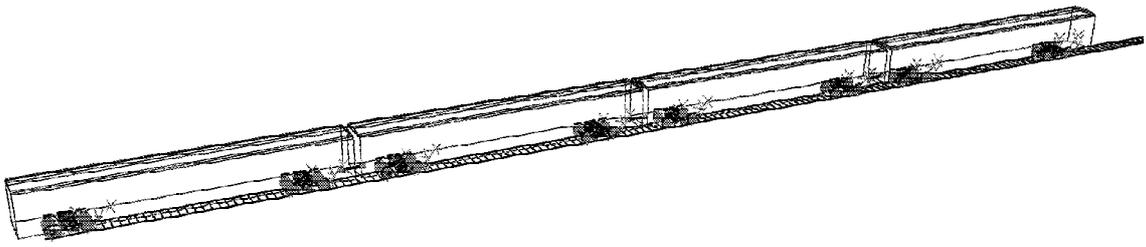


图1 半列车动力学计算模型

2.2 车端连接装置模型

2.2.1 缓冲器模型

车端连接装置中的缓冲器具有非线性磁滞回刚度阻尼特性, 缓冲器非线性特性如图2所示<sup>[10]</sup>。但由于动车组采用密接车钩, 因此, 不必考虑车钩间隙对动车组纵向冲动的的影响。缓冲器的加载和卸载定义为2个以其行程为变量的函数, 上包络线定义为 $f_u(x)$ , 下包络线定义为 $f_l(x)$ 。通过这2个函数可以描述车钩间隙、缓冲器初压力和刚性冲击, 而压溃管的单向塑性力作用则需另外考虑。根据上下包络线函数, 可以得到一定行程下缓冲器磁滞力为

$$f_{hys} = |f_u(x) - f_l(x)| \quad (4)$$

定义2个标志点之间的相对速度也即相连车体间的相对速度为 $v$ , 磁滞力作用方向与相对速度方向总是相反, 因此可用符号函数 $sign(v)$ 修正磁滞力。

$$F_H = f_{hys} \cdot sign(v) \quad (5)$$

另外定义转换速度(门限速度) $\varepsilon_v$ , 缓冲器作用力如式6所示:

$$F_B = \begin{cases} F_{spring} \pm f_{hys} & \text{if } |v| \geq \varepsilon_v \\ F_{spring} + \frac{v}{\varepsilon_v} f_{hys} & \text{if } |v| < \varepsilon_v \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $F_B$ 为缓冲器作用力;  $F_{spring}$ 视加载不同工况而分别取 $f_u(x)$ 或 $f_l(x)$ 。

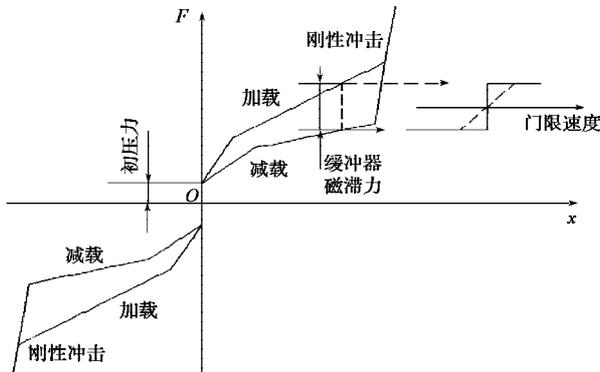


图2 缓冲器模型<sup>[10]</sup>

2.2.2 车钩模型

动车组中间车车端连接装置一般为半永久车钩, 在本模型中视为刚性体处理, 通过假从板与车体及缓冲器连接起来。假从板释放 $X$ 向平动自由度, 通过缓冲器与车体相连, 车钩和假从板间释放绕 $X$ 向的转动自由度。形成车体—缓冲器—假从板—车钩—假从板—

缓冲器—车体的连接方式。

2.3 纵向运动控制模型

纵向模拟仿真计算中一共要考虑列车匀速运行、最大常用制动和紧急制动等多种工况。通过控制列车制动力矩来实现不同工况, 在MATLAB/SIMULINK数学分析软件中建立控制模型并利用SIMAT接口实现与SIMPACK联合仿真, 控制系统仿真模型如图3所示。

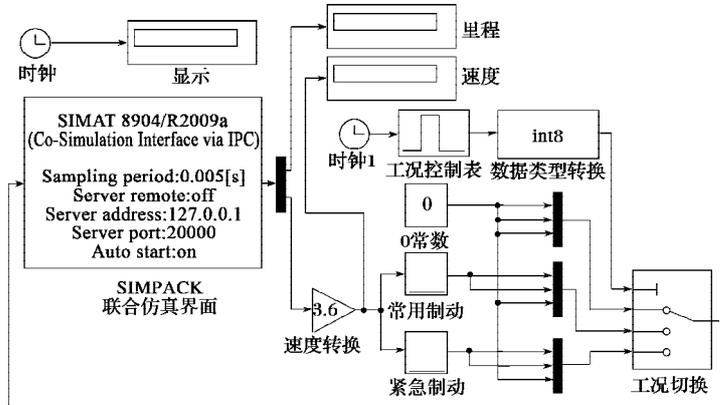


图3 纵向运动控制模型

控制模型中, SIMPACK的MBS模型输出里程和速度值用以实时判断列车的运行情况。以积分时间控制多点开关来自动切换制动力矩。在同一工况下根据不同的速度值选择相应的制动力矩大小, 最终将制动力矩返回MBS模型实现列车的纵向控制。

2.4 计算边界条件

仿真中共选定4种试验工况, 分别为: 206 km/h匀速运行工况, 260 km/h匀速运行工况, 最大常用制动减速工况及紧急制动工况。工况1~4速度曲线如图4所示。其中, 最大常用制动减速工况加速度为 $-0.5 \text{ m/s}^2$ , 紧急制动工况减速度为 $1 \text{ m/s}^2$ 。4种工况均不考虑基本运行

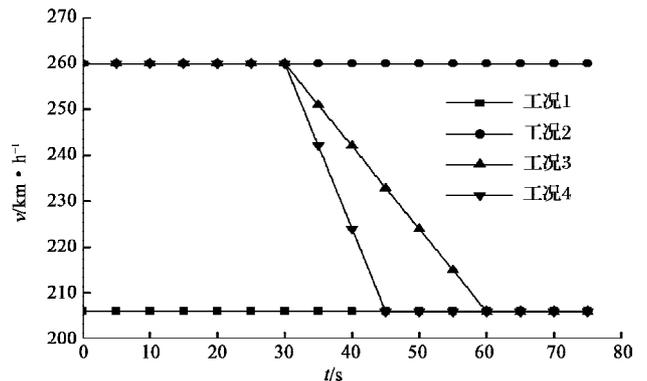


图4 工况示意图

阻力及横风等因素的影响。仿真试验线路为直线线路，全长5 000 m，轨道不平顺采用德国低干扰谱。分别对4种工况进行舒适度计算，考察纵向作用对舒适度指标的影响。

### 3 平稳性仿真计算

我国常用的平稳性指标评价方法没有考虑纵向运动的影响，平稳性指标分为横向平稳性指标和垂向平稳性指标。目前计算仿真中大多使用单节车辆进行仿真计算，较少以多车连挂的形式在统一模型中计算，因此车间连接装置对于平稳性指标的影响作用也难以直观考虑。

现采用上文中的车间连接装置模型将4辆车连挂在一起，控制整列车的制动力，分别模拟4种工况，对车辆的平稳性指标进行评估，采用GB 5599—1985标准规定的平稳性指标计算方法仿真得出车辆运行时的平稳性。取M1各工况计算结果如图5所示。

分析计算结果：工况1中，列车以206 km/h速度运行， $W_y$ 峰值为2.6， $W_z$ 峰值为2.58；工况2中，列车在260 km/h速度下运行时， $W_y$ 峰值为2.72， $W_z$ 峰值为2.62；工况3中，260 km/h速度区段，其 $W_y$ 峰值为2.72， $W_z$ 峰值为2.62，206 km/h速度区段 $W_y$ 峰值为2.6， $W_z$ 峰值为2.51；工况4中，260 km/h速度区段，其 $W_y$ 峰值为2.72， $W_z$ 峰值为2.62，206 km/h速度区段峰值 $W_y$ 峰值为2.6， $W_z$ 峰值为2.3。可见4种工况在同等速度等级下的平稳性基本一致。

随着运行速度的升高，车辆的平稳性指标也随着增大，舒适性变差，但纵向运动对结果的影响未能体现出来。

### 4 不同纵向作用工况下的列车舒适度评价

基于EN 12299:2009标准规定的舒适度分量和合成后平均舒适度指标的简单算法，对在4种不同速度等级或纵向力变化工况下运行的动车组列车模型进行舒适度仿真计算，得到各方向的分量及合成后的平均舒适度指标随时间和纵向工况的变化历程。

舒适度计算结果峰值见表5。如图5所示为舒适度结果随时间的变化历程。

表5 舒适度指标峰值

工况	$N_x$	$N_y$	$N_z$	$N_{Mv}$
M1 工况 1	0.495 0	1.314 5	1.522	2.066
M1 工况 2	0.436 5	1.519 0	1.527	2.156
M1 工况 3	0.689 5	1.519 0	1.658	2.152
M1 工况 4	1.093 5	1.519 0	1.525	1.927

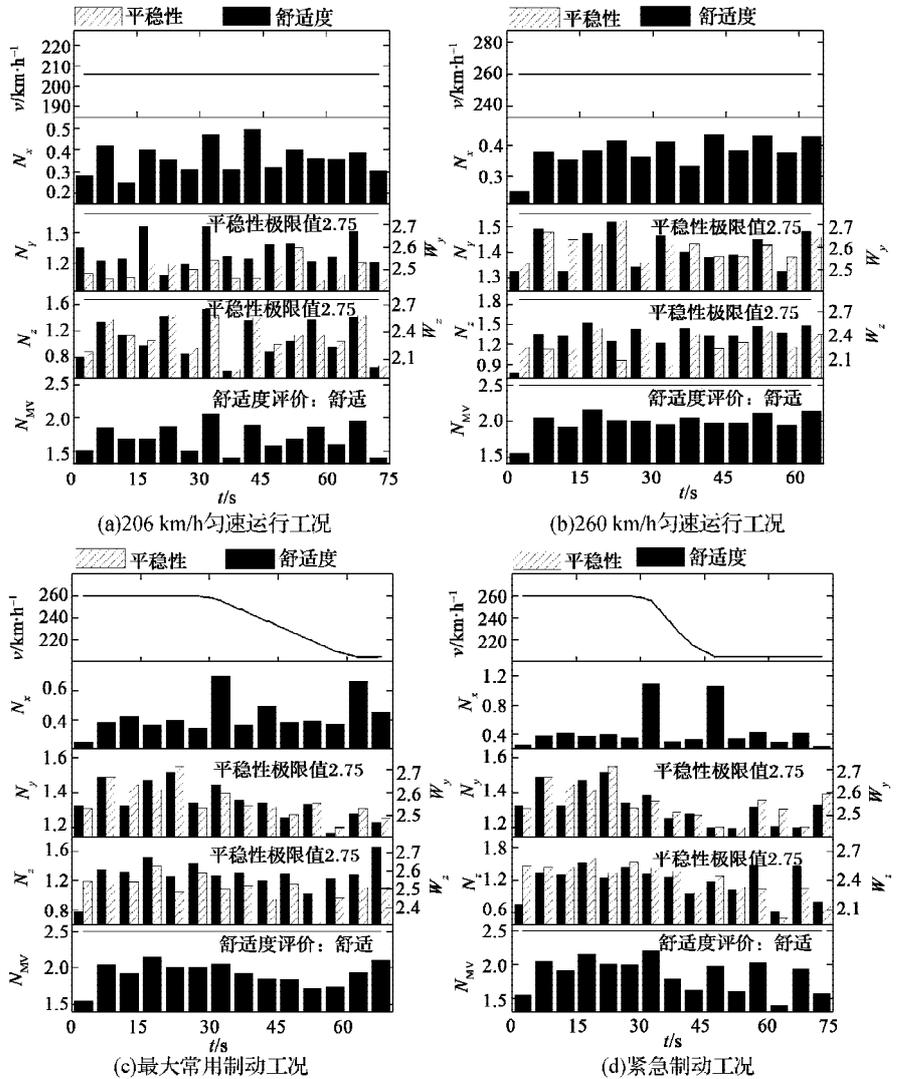


图5 不同工况下平稳性指标及舒适度随时间的变化历程

对于舒适度计算的4种工况更可以看出，在匀速运行工况下，纵向平稳性指标会有波动但是波动较小，一直处在较低的水平上，舒适性好。而在变速工况下都可以明显看出，列车在纵向上受到突变的作用时，会导致舒适度指标的纵向分量迅速升高，舒适性变差，并且使得综合舒适度指标也会发生相应的升高，Mc1车纵向舒适度分量增大了155.504%，T1车增大200.750%，M1车增大150.572%，Tc1车增大167.838%。由此可见，纵向作用力对于车辆纵向舒适度指标影响非常大。同时也可以看出，横向和垂向舒适度指标随着速度提高而升高，与速度成正相关关系，与纵向作用关系不大。

(下转第43页)

