

有轨电车浮动车体动态包络线计算方法

刘玉文¹, 黄平², 牟晓莎¹, 李言义¹

(1. 中车青岛四方机车车辆股份有限公司, 山东 青岛 266111;
2. 佛山市铁路投资建设集团有限公司, 广东 佛山 528000)

摘要: 浮动车体有轨电车采用模块化铰接车体结构, 车体各模块之间采用铰接装置连接, 因而其限界计算不能直接引用使用刚性车体的地铁车辆的计算方法。根据5模块悬浮车体有轨电车的结构特点和运动自由度, 参考CJJ 96—2003标准, 探讨了5模块浮动车体有轨电车的车辆动态包络线的计算方法。根据车体各模块之间以及车体与转向架之间的运动关系, 分析了车体各模块的横向偏斜系数、垂向偏斜系数和柔性系数的取值方法, 并增加了车体相对转向架转动而产生的横移量。提出的限界计算方法可扩展到3模块和7模块的浮动车体有轨电车以及单车车型有轨电车。

关键词: 有轨电车; 动态包络线; 5模块浮动车体; CJJ 96—2003 标准

中图分类号: U482.1

文献标识码: A

doi: 10.13890/j.issn.1000-128x.2018.05.022

Caculation Method on Kinematic Envelope of Tram with Suspended Carbody

LIU Yuwen¹, HUANG Ping², MOU Xiaosha¹, LI Yanyi¹

(1. CRRC Qingdao Sifang Co., Ltd., Qingdao, Shandong 266111, China;

2. Foshan Railway Investment and Construction Group Co., Ltd., Foshan, Guangdong 528000, China)

Abstract: The tram with suspended carbody adopts modular articulated carbody structure, and each module of the carbody is connected by articulated equipment, so its kinematic envelope calculation cannot directly use the calculation method of subway vehicle with rigid carbody. According to the structure and degree of freedom of movement of the tram with 5 module suspended body, the calculation method of the kinematic envelope of the tram with 5 module suspended body was discussed with reference to the CJJ 96—2003 standard. Based on the relationship between carboy modules and the movement between carbody and bogie, the values of the transverse deflection coefficient, the vertical deflection coefficient and the flexible coefficient of each modular were analyzed and transverse displacement caused by the relative rotation between carboy and bogie was taken into account additionally. The proposed method could be extended to 3 module and 7 module suspended carbody trams and single carbody trams.

Keywords: tram; dynamic envelope; 5 module suspended carbody; CJJ 96—2003 standard

0 引言

限界是轨道交通建设的基础性技术规范, 关系工程的规模、投资及建成后运行的安全等问题。限界可以分为车辆限界、设备限界和建筑限界, 其中车辆限界是确定其他限界的基础。车辆限界不仅制约车辆外形尺寸, 还关系到诸如隧道等各种建筑物的内部轮

廓, 对轨道交通系统的建设规模、投资有重大的影响。2003年我国颁布了CJJ 96—2003《地下铁道限界标准》, 给出了地铁车辆限界的详细计算方法^[1]。

随着我国城市对轨道交通多样性需求增加, 现代有轨电车作为一种中运量公共交通系统, 以其运量适中、运行舒适、投资少、运营灵活等特点, 在我国得到了快速发展。目前我国引进和自主研发了多种形式的有轨电车, 其中5模块浮动车体有轨电车具有曲线通过性能好、车内空间宽阔、转向架数目少、相对价

收稿日期: 2018-06-06

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFB1201004-15)

格低等优点,成为市场主流产品。

目前有轨电车的车辆限界计算并未形成一整套比较成熟的标准规范。文献[2]参照德国 BOSTrab《有轨电车制造和运行规定》规范,计算了庞巴迪 Flexcity 100% 低地板有轨电车的限界。文献[3]参照 BOSTrab 规范,计算了自主研发的单车体型 100% 低地板有轨电车的限界。文献[4]根据 70% 低地板铰接车辆的结构形式,对 CJJ 96—2003《地铁限界标准》予以修订,制定出一套符合 70% 低地板铰接车辆动态包络线的计算公式。文献[5]根据 BOSTrab 规范和 CJJ 96—2003 标准,对浮动车车型有轨电车车辆限界横向部分计算进行分析和探讨,提出曲线地段限界加宽的方法。

相对采用整体刚性车体和 2 个转向架支撑的地铁车辆,有轨电车大多采用铰接车体结构,并且结构形式多种多样,因此并不能直接使用 CJJ 96—2003 标准计算铰接车体形式有轨电车的限界。本文参照 CJJ 95—2003 标准,探讨了 5 模块浮动车体有轨电车的一种限界计算方法。

1 5 模块浮动车体有轨电车的铰接布置

5 模块浮动车体有轨电车包括 2 个端部车体、2 个浮动车体和 1 个中间车体,端部车体坐落在端部转向架上,中间车体坐落在中部转向架上,2 个浮动车体则通过铰接装置吊挂在端部车体和中间车体上。

车体之间的铰接装置具有下面几种形式:①固定铰,限制 3 个方向的平动,但能绕 3 个方向旋转,它能承受垂向力,传递大部分的纵向力和横向力,该结构一般用于下铰;②转动铰,限制纵向和横向的平动,不限制垂向的平动和三向转动,也不承受垂向力,一般用于上铰;③自由铰,仅限制相邻车体间的侧滚运动,一般用于上铰^[6]。

5 模块车体的铰接组合通常如图 1 所示。所有车体模块的下铰都使用固定铰连接。A、B、C 模块之间和 D、E 模块之间的上铰采用转动铰,这样 A、B、C 模块和 D、E 模块在垂向各自形成静定结构,模块之间可以相互摇头但不能相互侧滚和点头。C、D 模块之间的点头自由铰上铰有 2 种选择,一是横向拉杆,二是使用有限位作用的横向减振器,两者都可以适应车辆通过竖曲线的要求,即(A+B+C)单元相对(D+E)单元之间能够点头运动。使用横向拉杆时,整列车的侧滚是一致的,各模块具有相同的抗侧滚能力;使用横向减振器时,(A+B+C)单元相对(D+E)单元之间能够侧滚,这样布置可使车辆适应扭曲线路的能力提高,但(D+E)单元的抗侧滚能力降低。

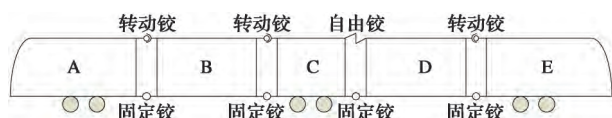


图 1 5 模块车体的铰接形式

从 5 模块有轨电车的铰接布置特点可以看出,模块之间的运动自由度与整体车体的地铁车辆存在以下差别:

①对于摇头运动,地铁车体的摇头受到前后 2 个转向架的约束,而 5 模块有轨电车端车和中间车的摇头运动只受到各模块下转向架的约束,悬浮车体的摇头运动由端车和中间车的状态决定。

②对于点头运动,地铁车体的点头同样受到前后 2 个转向架的约束,而 5 模块有轨电车的点头运动只受到各静定单元的约束,即 A+B+C 的点头运动受到端车转向架和中间转向架的约束,而 C+D 的点头运动受到端车转向架和车体铰接的约束。

③对于侧滚运动,当自由铰采用拉杆约束时,整个有轨电车所有模块的侧滚运动是一致的;自由铰采用减振器约束时,A+B+C 的侧滚运动与 D+E 的侧滚运动是独立的。

2 5 模块有轨电车的偏斜系数

2.1 车体纵向中心线的横向偏斜系数

对于传统的地铁车辆,车体的摇头运动受到前后转向架横移运动的约束(见图 2),车体纵向中心线的横向偏斜系数为

$$k_{ay} = \frac{2n+a}{a} \quad (1)$$

式中: n 为计算断面距相邻转向架中心的纵向距离; a 为车辆定距。

当计算断面在前后转向架中心销位置时,取 $k_{ay}=1$ 。

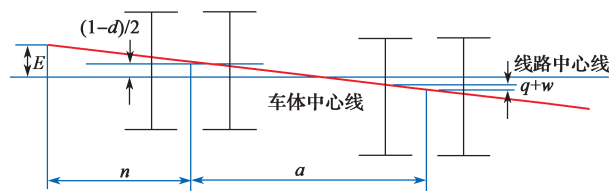


图 2 地铁车辆车体的偏移示意图

对于采用铰接车体的有轨电车,有转向架支撑的车体模块仅受其下部的单个转向架的约束,车体的偏斜由转向架的摇头运动引起,而转向架的横移运动并不引起车体的偏斜(见图 3)。

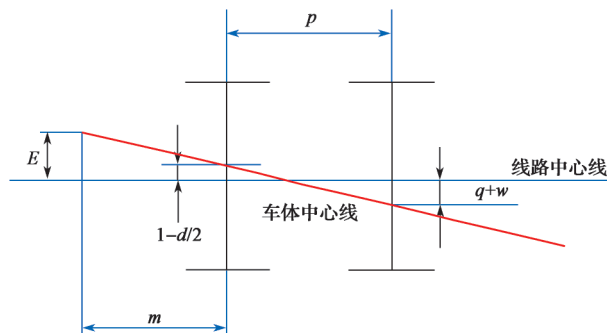


图 3 铰接车体的摇头偏移示意

对于有转向架的车体模块, 由一系悬挂和轮对变形引起的车体纵向中心线的横向偏斜系数为

$$k_{ay} = \frac{2m+p}{p} \quad (2)$$

式中: m 为计算断面距相邻轴的纵向距离; p 为转向架轴距。

对于悬浮车体模块, 其摇头状态取决于相邻的车体。由于相邻车体转向架的一系悬挂和轮对变形引起的悬浮车体纵向中心线的横向偏斜系数为

$$k_{ay} = \frac{2m_j+p}{p} \quad (3)$$

式中: m_j 为车体铰接点距相邻轴的纵向距离。

对于有转向架模块和悬浮模块, 二系悬挂变形引起的转向架横移运动不引起车体摇头, 车体纵向中心线的横向偏斜系数 $k_{ay}=1$ 。

2.2 车体相对转向架转动产生的横移量

5 模块铰接车体通过曲线时, 主要依靠车体之间的转动来适应曲线, 因此转向架与车体之间可以不设置回转自由度。对于使用刚性轮对转向架的有轨电车, 为了防止轮对的蛇形运动刚性传递到车体, 在车体与转向架之间通常需要设置一定的回转间隙, 允许车体与转向架在一定角度内转动。

设车体与转向架之间的最大摇头角为 ψ_z 。对于有转向架模块, 由摇头角为 ψ_z 产生的横向偏离量为

$$d_{y\psi} = n \cdot \psi_z \quad (4)$$

悬浮车体的横向偏移量为

$$d_{y\psi} = a_i \cdot \psi_z \quad (5)$$

式中: a_i 为铰接点距相邻转向架中心的纵向距离。

2.3 车体纵向中心线垂向偏斜系数

对于采用刚性车体的地铁车辆, 车体的点头运动受到前、后转向架垂向运动的约束, 车体纵向中心线的垂向偏斜系数为

$$k_{ax} = \frac{2n+a}{a} \quad (6)$$

对于采用铰接车体的 D+E 模块, 车体的点头运动受到端部转向架和 C、D 模块之间固定铰的约束。D+E 模块的垂向偏移系数为

$$k_{ax} = \frac{2n+a-a_j}{a-a_j} \quad (7)$$

式中: a_j 为自由铰距中间转向架中心的纵向距离。

需要说明的是, 对于 D+E 模块, 当计算断面位于端部转向架以内时, 中间车体的转向架产生浮沉运动量 Δf 反映在 C、D 模块之间固定铰的垂向位移为

$$\Delta f_{j-cd} = \frac{2a_j+a}{a} \cdot \Delta f \quad (8)$$

2.4 柔性系数 S

抗侧滚刚度应考虑车体模块之间的侧滚自由度。当车体模块之间没有侧滚自由度时, 侧滚刚度按整个

编组考虑; 当自由铰存在一定的侧滚自由度时, 侧滚刚度应按 A+B+C 单元、D+E 单元分别考虑。

当自由铰采用拉杆时, 车体模块之间没有相对侧滚, 整个车辆的抗侧滚刚度为

$$\left. \begin{aligned} k_{\phi p} &= \sum_{i=1,2,3} 0.5n_p c_p b_p^2 \\ k_{\phi s} &= \sum_{i=1,2,3} (0.5n_s c_s b_s^2 + k_{sn}) \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

式中: k_{sn} 为每个转向架的抗侧滚扭杆刚度; n_p 为每个转向架一侧一系弹簧并列数; c_p 为每个转向架每一个轴箱一系弹簧的垂向刚度值; n_s 为每个转向架一侧二系弹簧并列数; c_s 为每个转向架一侧二系弹簧的垂向刚度值。

车辆的柔度系数为

$$S_w = m_B g \left(\frac{h_{sc} - h_{cp}}{k_{\phi p}} + \frac{h_{sc} - h_{cs}}{k_{\phi s}} \right) \quad (10)$$

式中: m_B 为整个列车的质量; h_{sc} 为转向架二系弹簧支撑面距轨面高度; h_{cp} 为转向架一系弹簧支撑面距轨面高度; h_{cs} 为车体重心距离轨面高。

当自由铰采用横向减振器时, A+B+C 单元、D+E 单元分别存在相对侧滚。对于 A+B+C 单元由 2 个转向架提供抗侧滚刚度:

$$\left. \begin{aligned} k_{\phi p_ABC} &= \sum_{i=1,2} 0.5n_p c_p b_p^2 \\ k_{\phi s_ABC} &= \sum_{i=1,2} (0.5n_s c_s b_s^2 + k_{sn}) \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

A+B+C 单元的柔度系数为

$$S_{ABC} = m_{ABC} g \left(\frac{h_{sc} - h_{cp}}{k_{\phi p_ABC}} + \frac{h_{sc} - h_{cs}}{k_{\phi s_ABC}} \right) \quad (12)$$

式中: m_{ABC} 为模块 A+B+C 的质量; $k_{\phi p_ABC}$ 为 A+B+C 单元的一系抗侧滚刚度; $k_{\phi s_ABC}$ 为 A+B+C 单元的二系抗侧滚刚度。

对于 D+E 单元, 只有一个转向架提供抗侧滚刚度:

$$\left. \begin{aligned} k_{\phi p_DE} &= 0.5n_p c_p b_p^2 \\ k_{\phi s_DE} &= 0.5n_s c_s b_s^2 + k_{sn} \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

D+E 单元的柔度系数为

$$S_{DE} = m_{DE} g \left(\frac{h_{sc} - h_{cp}}{k_{\phi p_DE}} + \frac{h_{sc} - h_{cs}}{k_{\phi s_DE}} \right) \quad (14)$$

式中: m_{DE} 为模块 D+E 单元的质量; $k_{\phi p_DE}$ 为模块 D+E 单元的一系抗侧滚刚度; $k_{\phi s_DE}$ 为模块 D+E 单元的二系抗侧滚刚度。

2.5 车体典型计算断面的偏斜系数

根据 5 模块有轨电车的运动特点, 对于横向偏斜系数, 有转向架的车体模块由其下的转向架参数确定, 悬浮车体由相邻车体模块确定; 对于垂向偏斜系数, 按照车体模块之间的静定关系确定; 对于柔性系数, 按照模块之间的侧滚运动关系确定。因此, 车体的最

大偏移处可能出现在端部车体的头部以及悬浮车体模块的端部,如图4所示。

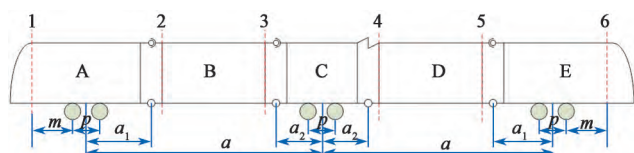


图4 5模块车体的计算断面

表1给出了各断面的偏斜系数。从表1中可以看出:横向偏斜系数中,通常1、6断面的最大,其次是2、5断面,3、4断面的最小;垂向偏移系数中,通常断面6的最大,其次是断面1,再次是断面4,而断面2、3、5的垂向偏移系数为1;当自由铰采用横向拉杆时,各断面在侧滚上是相同的;当自由铰采用横向减振器时,断面4、5、6的柔性系数大于1、2、3断面。综上分析可知,自由铰侧的端部车体断面6通常具有最大的动态偏移量。

表1 各断面的偏斜系数

项目	断面1	断面2	断面3	断面4	断面5	断面6
横向偏斜系数 k_{ax}	$\frac{2m+p}{p}$	$\frac{2a_1}{p}$	$\frac{2a_2}{p}$	$\frac{2a_2}{p}$	$\frac{2a_1}{p}$	$\frac{2m+p}{p}$
垂向偏斜系数 k_{ay}	$\frac{2n+a}{a}$	1	1	$\frac{2a_2+a}{a}$	1	$\frac{2n+a-a_2}{a-a_2}$
柔性系数 S	S_w (车体模块之间没有相对侧滚) 断面1、2、3、4为 S_{ABC} , 断面5、6为 S_{DE}					

3 5模块有轨电车动态包络线的计算公式

5模块浮动车体有轨电车的限界与地铁车辆的主要区别在车体部分。参考CJJ 96—2003标准中的计算方法,当车体横向平移和车体倾角产生的横向偏移方向相同时,浮动车体有轨电车的车体横向偏移量的计算公式如下:

$$\begin{aligned} \Delta X_{BP} = & \left(\frac{l-d}{2} \right) k_{ax} + (\Delta q_1 + \Delta q_2 + \Delta q_3) k_{ax} + (\Delta w_1 + \Delta w_2) + \\ & n \cdot \psi + \Delta e + \frac{\Delta h_{c2}}{1500} Y(1+S) + b_z m_z g(1+S) \left(\frac{Y-h_{cp}}{k_{\phi p}} + \frac{Y-h_{cs}}{k_{\phi s}} \right) + \\ & \left\{ \left(\frac{\Delta d}{2} \cdot k_{ax} \right)^2 + (\Delta w_3)^2 + (\Delta M_{t1})^2 + (\Delta M_{t2})^2 + (\Delta M_{t3})^2 + \right. \\ & \left. (\Delta M_{t4})^2 + (\Delta M_{t5})^2 + \Delta_c^2 + (\Delta S_{hd})^2 + \left[\frac{\Delta x_{Bq}}{H_{cq}} (Y-h_{sj}) \right]^2 + \right. \\ & \left. \left[\frac{\Delta h_{cl}}{1500} Y(1+S) \right]^2 + [A_w \cdot P_w(1+S) C_h]^2 + [m_B a_b(1+S) C'_h]^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \end{aligned} \quad (15)$$

而车体横向平移和车体倾角产生的横向偏移方向相反时,浮动车体有轨电车的车体横向偏移量的计算公式如下:

$$\begin{aligned} \Delta X_{BP} = & \left(\frac{l-d}{2} \right) k_{ax} + (\Delta q_1 + \Delta q_2 + \Delta q_3) k_{ax} + (\Delta w_1 + \Delta w_2) + \\ \Delta e + n \cdot \psi + & \left[\left(\frac{\Delta d}{2} \cdot k_{ax} \right)^2 + (\Delta w_3)^2 + (\Delta M_{t1})^2 + (\Delta M_{t2})^2 + \right. \\ & \left. (\Delta M_{t3})^2 + (\Delta M_{t4})^2 + (\Delta M_{t5})^2 + \Delta_c^2 + (\Delta S_{hd})^2 \right]^{\frac{1}{2}} - \\ & \left\{ \frac{\Delta h_{c2}}{1500} Y(1+S) + b_z m_z g(1+S) \left(\frac{Y-h_{cp}}{k_{\phi p}} + \frac{Y-h_{cs}}{k_{\phi s}} \right) + \right. \\ & \left[\frac{\Delta x_{Bq}}{H_{cq}} (Y-h_{sj}) \right]^2 + \left[\frac{\Delta h_{cl}}{1500} Y(1+S) \right]^2 + \\ & \left. [A_w \cdot P_w(1+S) C_h]^2 + [m_B a_b(1+S) C'_h]^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \end{aligned} \quad (16)$$

式(15)、式(16)中公式的符号含义与CJJ 96—2003标准相同,公式中各项的含义见表2。

表2 各运算子项的意义

表达式	意义
Δq_1	转向架轴箱轴承横向游间
Δq_2	车轮横向弹性变形量
Δq_3	转向架一系弹簧横向弹性变形量
$\Delta q_1 + \Delta q_2 + \Delta q_3$	一系悬挂横向位移之和
Δw_1	转向架中心销径向间隙及磨耗量
Δw_2	转向架二系弹簧横向弹性变形量(静态)
Δw_3	转向架二系弹簧横向弹性变形量(动态)
$\frac{\Delta h_{c2}}{1500} Y(1+S)$	两条钢轨相对高度弹性变形量引起的倾角产生的横向偏移量
$b_z m_z g(1+S) \left(\frac{Y-h_{cp}}{k_{\phi p}} \right)$	载荷不对称引起的倾角产生的一系横向偏移量,式中 b_z 表示载荷横向偏移量
$b_z m_z g(1+S) \left(\frac{Y-h_{cs}}{k_{\phi s}} \right)$	载荷不对称引起的倾角产生的二系横向偏移量,式中 b_z 表示载荷横向偏移量
$\frac{\Delta x_{Bq}}{H_{cq}} (Y-h_{sj})$	车体倾斜量引起的倾角产生的横向偏移量
$\frac{\Delta h_{cl}}{1500} Y(1+S)$	两条钢轨相对高度误差量引起的倾角产生的横向偏移量
$A_w \cdot P_w(1+S) C_h$	风力引起的倾角产生的横向偏移量
$m_B a_b(1+S) C'_h$	未平衡离心力引起的倾角产生的横向偏移量

4 应用与验证

参照DG/TJ 08-2213—2016《有轨电车工程设计规范》给出的车辆限界,图5给出了应用本方法计算的某100%低地板有轨电车车体动态包络线计算结果^[7]。从图5结果看出,车体断面1、6具有最大的横向动态包络线,车体断面6具有最大的垂向动态包络线,且车体所有断面的动态包络线均在用户车辆限界范围内。

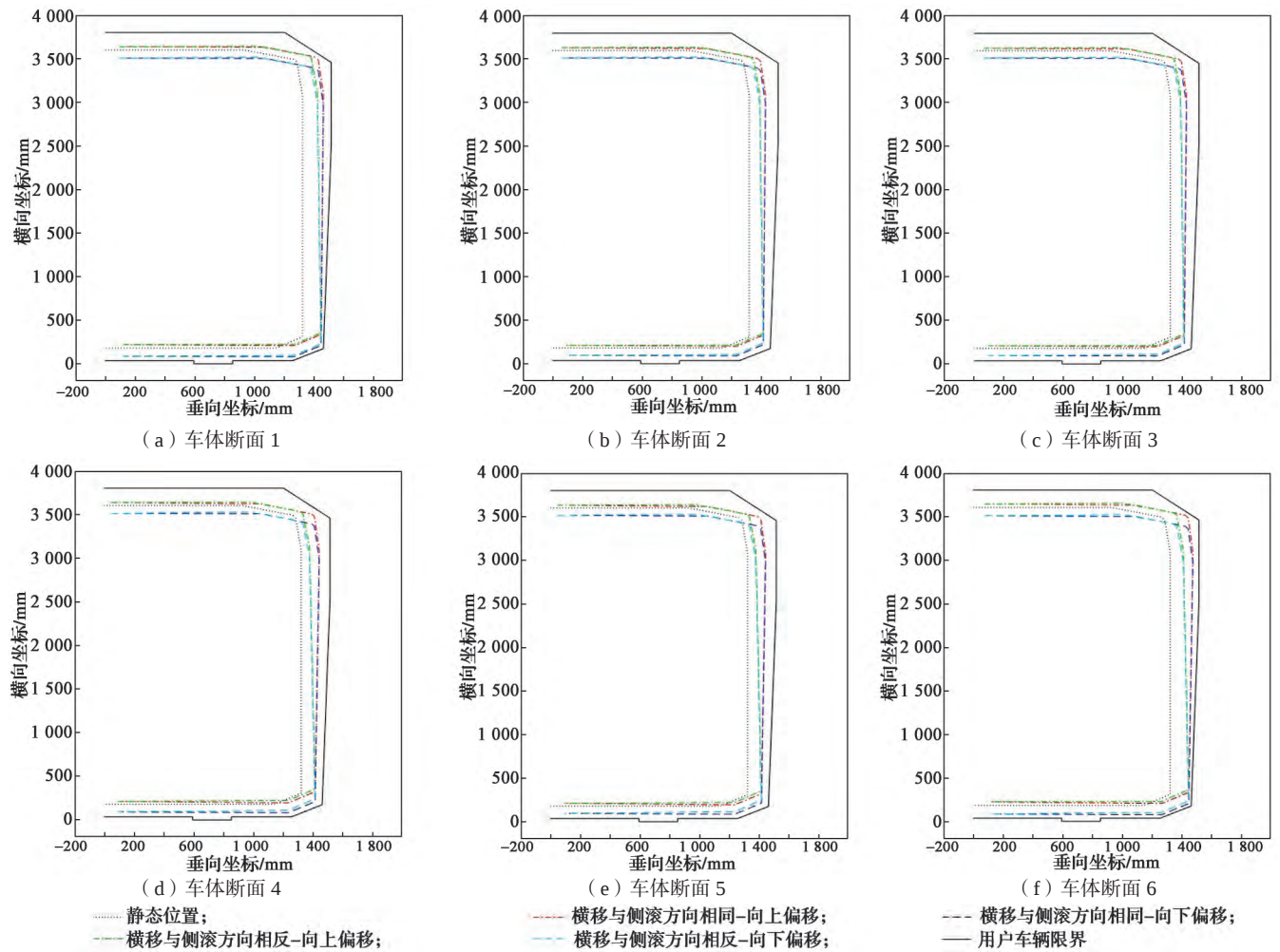


图5 某有轨电车动态包络线计算结果

5 结语

根据5模块浮动车体有轨电车的结构形式和运动自由度,并参考CJJ 96—2003标准和CJJ 95—2003标准,探讨了5模块浮动车体有轨电车动态包络线的计算方法。本文提出的限界计算方法可扩展到3模块或7模块的浮动车体有轨电车以及单车体型有轨电车。

参考文献:

- [1] 地铁限界标准: CJJ 96—2003[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.
- [2] 张明阳, 冯遵委. 低地板车辆限界计算研究[J]. 铁路技术创新, 2013(6): 40-44.

- [3] 吕凤梅, 赵建秋, 闫晓明, 等. 100%低地板现代城市有轨电车限界和小曲线通过能力分析[J]. 铁道车辆, 2013(9): 5-7.
- [4] 王爱彬, 滕万秀, 罗仁. 70%低地板铰接城轨车辆动态包络线计算方法研究[J]. 大连铁道学报, 2016(4): 42-45.
- [5] 王嘉鑫. 浮动车体型有轨电车车辆限界(横向部分)计算方法分析[J]. 地下工程与隧道, 2015(1): 44-50.
- [6] 赵大斌, 任利惠. 70%低地板轻轨车辆的型式比较[J]. 城市轨道交通研究, 2007(4): 29-33.
- [7] 中车青岛四方机车车辆股份有限公司. 佛山市南海有轨电车动态包络线计算报告[R]. 青岛: 中车青岛四方机车车辆股份有限公司, 2017.

作者简介: 刘玉文(1969-), 男, 教授级高级工程师, 主要研究方向为轨道车辆总体集成技术。

(上接第96页)

- [2] 江巍. 上海轨道交通8号线二期车辆闸瓦磨耗问题分析[J]. 大连交通大学学报, 2015, 36(2): 1-4.
- [3] 乔青峰. 地铁车辆车轮踏面异常磨耗原因分析[J]. 铁道机车车辆, 2011, 31(3): 26-30.
- [4] 巫红波. 广州地铁4号线车辆制动盘异常磨耗调查分析及解决对策[J]. 铁道机车车辆, 2013, 33(1): 84-86.
- [5] 贾文婷. 城市轨道交通列车运行控制[M]. 北京: 北京交通

大学出版社, 2012.

- [6] 王凤臣. 电力机车牵引计算[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2010.
- [7] 刘敏军. 轨道交通车辆电力牵引控制系统[M]. 北京: 清华大学出版社, 2014.

作者简介: 祁国俊(1961-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事地铁运营管理工作。