

# 悬挂式单轨车辆动态包络线 计算方法研究

彭长福, 白永平

(中车资阳机车有限公司, 四川 资阳 641300)

**摘要:** 悬挂式单轨交通系统在国内尚处于起步阶段, 合理地确定车辆动态包络线是保证系统经济性的主要因素之一。文章基于一种自主开发且通过试验验证的悬挂单轨车辆, 分析了悬挂式单轨车辆与传统轨道车辆动态包络线构成要素的差异, 提出了悬挂式单轨车辆动态包络线计算的总体思路和基本原理, 详细说明了动态包络线的构成要素, 给出了计算公式, 并通过计算与试验结果的对比, 验证了计算方法的准确性。相关计算方法可为不同结构悬挂式单轨车辆的动态包络线计算提供参考依据。

**关键词:** 悬挂式单轨车辆; 动态包络线; 线位移; 侧滚位移

**中图分类号:** U232; U239.5

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-128X(2022)01-0059-06

## Research on dynamic envelope calculation method of suspended monorail vehicle

PENG Changfu, BAI Yongping

(CRRC Ziyang Locomotive Co., Ltd., Ziyang, Sichuan 641300, China)

**Abstract:** For the domestic suspended monorail transit system which is still in its infancy, the reasonable determination of vehicle dynamic envelope is one of the main factors to ensure the system economy. Based on a self-developed and tested suspension monorail vehicle, the differences of the components of the dynamic envelope between suspension monorail vehicle and traditional rail vehicle were analyzed. The general idea and basic principle of the dynamic envelope calculation of suspension monorail vehicle were put forward. The components of the dynamic envelope were listed in detail, and the calculation formula was provided. The accuracy of the calculation method was verified by comparing the calculation results with the experimental results. The relevant calculation methods can provide reference for the calculation of dynamic envelope of suspension monorail vehicles with different structures.

**Keywords:** suspended monorail vehicle; dynamic envelope; linear displacement; roll displacement

## 0 引言

动态包络线是轨道车辆正常运行时其横向和垂向所占用最大空间的轮廓线, 由线位移、侧滚位移和制造误差3部分构成。CJJ/T 96—2018《地铁限界标准》<sup>[1]</sup>为走行装置位于车厢下方的轨道车辆(以下简称“传统车辆”)的动态包络线计算提供了参考依据, 基

于该标准提供的计算方法, 只需依据实际情况增减计算要素和修正车辆参数即可得出车辆动态包络线。但对于车厢吊挂于走行装置下部的悬挂式单轨车辆(以下简称“单轨车辆”), 由于其结构形式和运行中受力状态的差异, 上述标准提供的计算方法不能直接应用, 同时由于国内外均无统一的限界计算标准, 导致车体宽度尺寸相同的情况下其双线间距差异较大, 如德国H-Bahn系统的双线间距为5 m<sup>[2]</sup>, 国内双流试验线的双

收稿日期: 2020-07-02; 修回日期: 2021-12-07

基金项目: 四川省科技计划项目(2017GZ0081)

通信作者: 彭长福(1971—), 男, 教授级高级工程师, 从事轨道车辆总体研究工作; E-mail: pc980924@163.com

线间距为 4.2 m, 开封试验线的双线间距为 4.4 m。文献 [3-5] 虽对悬挂式单轨车辆限界的计算方法进行了分析研究, 但均以车辆结构的理论研究为主, 计算方法均为在地铁限界计算公式中增减计算要素, 得出的计算结果没有得到工程应用验证。本文基于具有两级减振机构的某单轨车辆结构, 借鉴 CJJ/T 96—2018《地铁限界标准》计算的基本原理和思路, 开展单轨车辆动态包络线计算方法研究。

## 1 车辆结构及差异分析

### 1.1 车辆结构简介

经过 100 多年的发展, 悬挂式单轨交通的悬挂形式出现了钢轮钢轨非对称悬挂型、胶轮钢轨非对称悬挂型、“工”字轨道梁悬挂型、胶轮对称式悬挂型 (SAFEGE 型) 4 种。其中, SAFEGE 型是最先进、应用最广泛的悬挂形式<sup>[6]</sup>, 目前国内 5 条试验线上的悬挂式单轨均为 SAFEGE 型。单轨车辆转向架位于下部开口的厢形轨道梁内, 车体悬挂于转向架下方; 控制行车的主要设备均置于车辆顶部。相对于传统车辆, 单轨车辆车体悬挂运行, 走行机构位于轨道梁内, 其底面负责走行, 侧面负责导向, 导向和走行功能分离。

转向架结构如图 1 所示, 主要由轮对驱动装置、构架、枕梁、承载梁、牵引拉杆和橡胶减振元件组成。永磁牵引电机通过具有差速功能的主减速器驱动实心橡胶走行轮在厢形轨道梁内运行; 导向轮与厢形轨道梁侧面接触, 引导运行方向; 承载梁和牵引拉杆与车体相连, 承载梁承受车辆垂向重量, 牵引拉杆传递纵向牵引力; 锥形橡胶堆和空气弹簧分别为一系减振元件和二系减振元件, 用于衰减来自轮轨的振动, 保证车辆平稳运行。

悬挂结构示意图如图 2 所示。车辆具有两系悬挂减振, 一系悬挂位于轨道梁内, 减振弹簧不同于传统车辆左右成对对称布置, 而是在纵向中心上单一布置, 车辆绕一系悬挂等效偏转中心  $A$  发生侧滚时, 等效侧滚刚度由一系减振弹簧偏转刚度和导向轮刚度共同决定。二系悬挂位于轨道梁下方 (车顶), 减振元件包括牵引橡胶关节和空气弹簧, 抗侧滚减振器可平衡车体侧滚角。车辆绕二系悬挂等效偏转中心  $B$  发生侧滚时,

等效侧滚刚度由 2 种减振元件共同决定。车辆运行时, 围绕一系减振弹簧、二系减振弹簧产生的线位移和侧滚位移是构成动态包络线的主要因素。

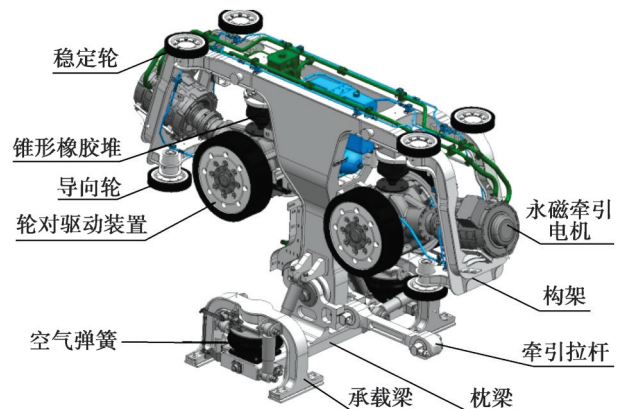


图 1 转向架

Fig. 1 Bogie

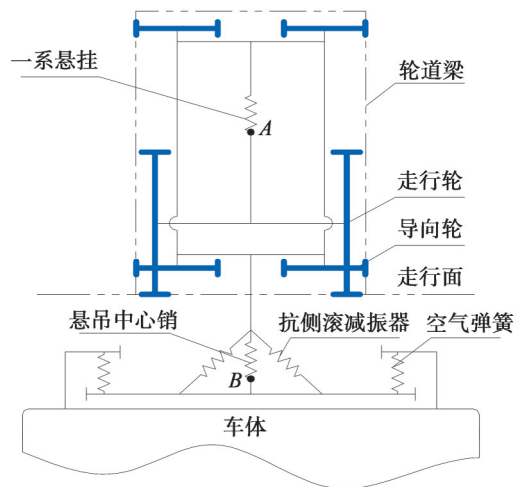


图 2 悬挂结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of suspension structure

本文所研究的悬挂式单轨列车的总体方案如图 3 所示。

### 1.2 构成动态包络线的因素差异

基于以上悬挂结构, 结合悬挂式单轨交通的自身特点, 单轨车辆动态包络线计算时考虑的主要因素与传统车辆有以下差异:

①传统车辆纵向偏移系数和轮轨位移由轮轨间隙

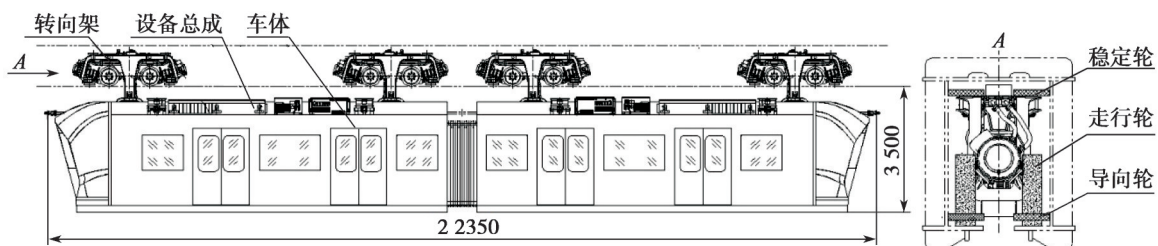


图 3 悬挂式单轨列车总体方案图

Fig. 3 Overall scheme of suspended monorail train

决定; 单轨车辆走行装置位于箱形梁内, 走行和导向功能分离, 纵向偏移系数和箱形梁内部走行装置的位移量由导向轮与导向面的间隙决定。

②当车辆发生侧滚运动时, 传统车辆的车体重力会加剧侧滚运动, 而单轨车辆则会抑制侧滚运动。因此, 参考CJJ/T 96—2018《地铁限界标准》计算侧滚位移时, 统一计算重力倾角附加系数的方法不可用, 需根据单轨车辆一、二系悬挂偏转刚度分别计算; 同时, 由于单轨车辆侧滚角较大, 标准给出的等效计算方法误差太大, 不能直接使用。

③悬挂运行具有“钟摆”效应, 对侧风和离心力等外部作用力比较敏感, 因此影响动态包络线的主要因素为侧滚造成的横向移动量和垂向移动量。尤其在曲线区段, 其线路一般没有弯道外轨加高设计, 因此离心力在横向和垂向造成的侧滚偏移均较大, 不可忽略。

## 2 计算要素

### 2.1 线位移

结合单轨车辆的理论计算与试验测试结果可知, 轻车的动态包络线大于重车。因此, 基于空车时车辆的位置状态, 结合车辆自身的结构特点, 可确定线位移计算时主要考虑的要素如表1~表3所示(“概率性质”中的“Z”为“随机因素”; “NZ”为“非随机因素”)。

表1 横向线位移计算要素

Table 1 Calculation elements of transverse linear displacement

计算要素	符号	概率性质
导向轮与导向面间隙引起的横移量(考虑导向轮轨间磨耗)/mm	$\Delta w_1$	Z
二系悬挂最大横移量/mm	$\Delta w_2$	Z
车辆半宽横向制造误差/mm	$\Delta a_1$	Z
线路中心线横向位差/mm	$\Delta C_x$	Z
轨道横向弹性变形量/mm	$\Delta e$	NZ
导向轨道横向弹性变形量/mm	$\eta_{w0}$	NZ

表2 垂向向下位移计算要素

Table 2 Calculation elements of vertical downward displacement

计算要素	符号	概率性质
空重车一系挠度变化/mm	$\Delta N_1$	NZ
空重车二系挠度变化/mm	$\Delta N_2$	NZ
空重车一系垂向振幅/mm	$n_{c1}$	Z
空重车二系垂向振幅/mm	$n_{c2}$	Z
走行轮磨耗/mm	$\Delta q_3$	NZ
销外下垂量/mm	$\Delta M_1$	NZ
底部设备安装及制造尺寸误差/mm	$\Delta a_2$	Z
走行轨道中心垂向位差值/mm	$\Delta C_y$	Z
竖曲线下移/mm	$\eta_{w1}$	NZ
走行轨道挠度/mm	$\eta_{w2}$	NZ
走行轨道垂向磨耗量/mm	$\eta_{w3}$	NZ

表3 垂向向上位移计算要素

Table 3 Calculation elements of vertical upward displacement

计算要素	符号	概率性质
销外上翘量/mm	$\Delta M_2$	NZ
竖曲线下移/mm	$\eta_{w4}$	NZ
一系弹簧垂向振幅/mm	$n_{c1}$	Z
二系弹簧垂向振幅/mm	$n_{c2}$	Z
上部设备安装及制造尺寸误差/mm	$\Delta a_3$	Z

### 2.2 侧滚位移

侧滚位移计算要素如表4所示(“概率性质”中的“Z”为“随机因素”; “NZ”为“非随机因素”)。其中, 序号1~6、10、11对应的参数均按本文所述方法计算, 序号7~9对应参数依然参考文献[1]的方法计算。对于侧滚角形成的垂向位移, 应结合侧滚方向确定其方向是向上还是向下。

表4 侧滚位移计算要素

Table 4 Calculation elements of roll displacement

序号	计算要素	符号		概率性质
		横向	垂向	
1	风力产生的侧倾力矩在一系悬挂上的倾角产生的位移/mm	$\Delta X_1$	$\Delta Y_1$	Z
2	风力产生的侧倾力矩在二系悬挂上的倾角产生的位移/mm	$\Delta X_2$	$\Delta Y_2$	Z
3	横向振动惯性力矩在一系悬挂上的倾角产生的位移/mm	$\Delta X_3$	$\Delta Y_3$	Z
4	横向振动惯性力矩在二系悬挂上的倾角产生的位移/mm	$\Delta X_4$	$\Delta Y_4$	Z
5	载荷不对称导致一系悬挂上的倾角产生的位移/mm	$\Delta X_5$	$\Delta Y_5$	Z
6	载荷不对称导致二系悬挂上的倾角产生的位移/mm	$\Delta X_6$	$\Delta Y_6$	Z
7	空簧高差造成车体倾斜量产生的位移/mm	$\Delta X_7$	$\Delta Y_7$	Z
8	走行面高度误差引起的倾角产生的位移/mm	$\Delta X_8$	$\Delta Y_8$	Z
9	走行面相对高度的弹性变化量引起的倾角产生的位移/mm	$\Delta X_9$	$\Delta Y_9$	Z
10	曲线离心力在一系悬挂上的倾角产生的位移/mm	$\Delta X_{10}$	$\Delta Y_{10}$	NZ
11	曲线离心力在二系悬挂上的倾角产生的位移/mm	$\Delta X_{11}$	$\Delta Y_{11}$	NZ

## 3 计算方法

### 3.1 计算思路及原理

动态包络线计算的总体思路是先分别计算车辆轮廓线每个控制点的线位移、侧滚位移和误差位移, 再

将非随机因素(NZ)的参数通过线性相加合成,按高斯概率分布的随机因素(Z)的参数采用方均根值合成,最后将2类参数相加形成车体偏移量<sup>[1]</sup>。对于线位移,车辆轮廓线上每个点的位移量是相同的;对于侧滚位移,车辆轮廓线上不同点的位移量是不同的。侧滚位移的计算是悬挂式单轨车辆动态包络线计算的主要内容,图4为车辆侧滚示意图,实线表示车辆轮廓线,虚线表示车辆受侧向力作用而发生侧滚后的平衡状态。走行面对称中心O点为坐标原点,A点为一系悬挂等效偏转中心;B点为二系悬挂等效偏转中心;C点为车体受侧向力F等效受力点;D点为车体重心;P点为车体轮廓线上任意一点,P'为P点发生侧滚位移后对应的点; $K_{\Phi P}$ 为一系悬挂抗侧滚刚度; $K_{\Phi S}$ 为二系悬挂抗侧滚刚度; $\theta$ 为车体受侧向力作用后以B点为偏转中心产生的侧滚角; $h_{cp}$ ,  $h_{cs}$ ,  $h_{cc}$ 和 $h_{sc}$ 分别表示A点、B点、C点和D点到O点的垂向距离。根据转矩平衡原理,可得

$$G \cdot \sin \theta \cdot (h_{sc} - h_{cs}) + K_{\Phi S} \cdot \theta - F \cdot \cos \theta \cdot (h_{cc} - h_{cs}) = 0 \quad (1)$$

将 $\sin \theta$ 等效为 $\theta$ ,将 $\cos \theta$ 等效为1可得

$$\theta = F \cdot (h_{cc} - h_{cs}) / (G \cdot (h_{sc} - h_{cs}) + K_{\Phi S}) \quad (2)$$

式中: $G$ 为偏转点以下重量; $F$ 为车体受到的侧向外力,可为离心力、侧风力或横向振动力等。

结合图中辅助线,车体轮廓线上 $P(X_p, Y_p)$ 点绕B点旋转 $\theta$ 角到 $P'$ 后,横坐标的变化量为 $\Delta X_p$ ,纵坐标的变化量为 $\Delta Y_p$ ,其中

$$\Delta X_p = PP' \cdot \cos \omega \quad (3)$$

$$\Delta Y_p = PP' \cdot \sin \omega \quad (4)$$

$$PP' = PB \cdot \theta = (X_p^2 + (Y_p - h_{cs})^2)^{0.5} \cdot \theta \quad (5)$$

$$\omega = \pi - \alpha - \beta = \pi - \arctan((Y_p - h_{cs})/X_p) - ((\pi - 2\theta)/2) =$$

$$\pi/2 + \theta/2 - \arctan((Y_p - h_{cs})/X_p) \quad (6)$$

式中: $PP'$ 和 $PB$ 为计算辅助线,均为2点之间距离; $\omega$ 为 $PP'$ 与水平线的夹角; $\alpha$ 为 $PB$ 与水平线夹角; $\beta$ 为 $PP'$ 与 $PB$ 的夹角。

将式(5)和式(6)代入式(3)和式(4)后得出车体上任意点侧滚位移 $\Delta X_p$ 和 $\Delta Y_p$ 为:

$$\Delta X_p = (X_p^2 + (Y_p - h_{cs})^2)^{0.5} \cdot \theta \cdot \cos(\pi/2 + \theta/2 - \arctan((Y_p - h_{cs})/X_p)) \quad (7)$$

$$\Delta Y_p = (X_p^2 + (Y_p - h_{cs})^2)^{0.5} \cdot \theta \cdot \sin(\pi/2 + \theta/2 - \arctan((Y_p - h_{cs})/X_p)) \quad (8)$$

同理,假设车体以A点为偏转中心,则侧滚角 $\lambda$ 为

$$\lambda = F \cdot (h_{cc} + h_{cp}) / (G \cdot (h_{sc} + h_{cp}) + K_{\Phi P}) \quad (9)$$

车体任意点的侧滚位移 $\Delta X_p$ 和 $\Delta Y_p$ 为:

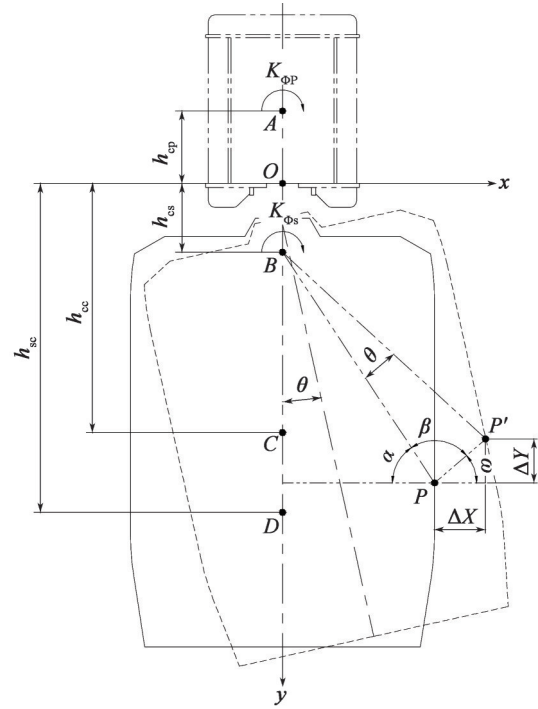


图4 车辆侧滚示意图

Fig. 4 Schematic diagram of vehicle rolling

$$\Delta X_p = (X_p^2 + (Y_p + h_{cp})^2)^{0.5} \cdot \lambda \cdot \cos(\pi/2 + \lambda/2 - \arctan((Y_p + h_{cp})/X_p)) \quad (10)$$

$$\Delta Y_p = (X_p^2 + (Y_p + h_{cp})^2)^{0.5} \cdot \lambda \cdot \sin(\pi/2 + \lambda/2 - \arctan((Y_p + h_{cp})/X_p)) \quad (11)$$

需要注意的是,以上侧滚位移计算公式适用于车辆侧滚横向位移与线位移方向相同的情况。当侧滚横向位移与线性位移方向相反时,式(6)中 $\omega$ 的值为

$$\omega = \pi/2 - \theta/2 - \arctan((Y_p - h_{cs})/X_p) \quad (12)$$

### 3.2 计算公式

对于单轨车辆,无论横向线位移和侧滚位移方向是相同还是相反,侧滚形成的垂向位移是一致的,主要差别在横向位移量。线性横向位移计算应考虑纵向偏移系数 $a_n$ 的影响, $a_n$ 的计算可参考文献[1]。

①当横向线位移与侧滚位移同方向时,车体的横向位移 $\Delta X_{TC}$ 为

$$\Delta X_{TC} = (\Delta e + \eta_{w0}) \cdot a_n + \Delta X_{10} + \Delta X_{11} + [(\Delta w_1 \cdot a_n)^2 + (\Delta w_2 \cdot a_n)^2 + \Delta a_1^2 + \Delta C_X^2 + \Delta X_1^2 + \Delta X_2^2 + \Delta X_3^2 + \Delta X_4^2 + \Delta X_5^2 + \Delta X_6^2 + \Delta X_7^2 + \Delta X_8^2 + \Delta X_9^2]^{0.5} \quad (13)$$

②当横向线位移与侧滚位移反方向时,车体的横向位移 $\Delta X_{FC}$ 为

$$\Delta X_{FC} = (\Delta e + \eta_{w0}) \cdot a_n - \Delta X_{10} - \Delta X_{11} + [(\Delta w_1 \cdot a_n)^2 + (\Delta w_2 \cdot a_n)^2 + \Delta a_1^2 + \Delta C_X^2]^{0.5} - (\Delta X_1^2 + \Delta X_2^2 + \Delta X_3^2 + \Delta X_4^2 + \Delta X_5^2 + \Delta X_6^2 + \Delta X_7^2 + \Delta X_8^2 + \Delta X_9^2)^{0.5} \quad (14)$$

③车体垂向向下位移 $\Delta Y_{DC}$ 计算公式为

$$\begin{aligned} \Delta Y_{DC} = & \Delta N_1 + \Delta N_2 + \Delta q_3 + \Delta M_1 + \eta_{w1} + \\ & \eta_{w2} + \eta_{w3} + \Delta Y_{10} + \Delta Y_{11} + (n_{c1}^2 + n_{c2}^2 + \Delta a_2^2 + \\ & \Delta C_Y^2 + \Delta Y_1^2 + \Delta Y_2^2 + \Delta Y_3^2 + \Delta Y_4^2 + \Delta Y_5^2 + \\ & \Delta Y_6^2 + \Delta Y_7^2 + \Delta Y_8^2 + \Delta Y_9^2)^{0.5} \end{aligned} \quad (15)$$

④车体垂向向上位移 $\Delta Y_{UC}$ 计算公式为

$$\begin{aligned} \Delta Y_{UC} = & \Delta M_2 + \eta_{w4} + \Delta Y_{10} + \Delta Y_{11} + \\ & (n_{c1}^2 + n_{c2}^2 + \Delta a_3^2 + \Delta Y_1^2 + \Delta Y_2^2 + \Delta Y_3^2 + \\ & \Delta Y_4^2 + \Delta Y_5^2 + \Delta Y_6^2 + \Delta Y_7^2 + \Delta Y_8^2 + \Delta Y_9^2)^{0.5} \end{aligned} \quad (16)$$

因为悬挂式单轨车辆转向架在箱型梁内运行, 其导向轮与箱型轨道梁侧面稳定接触, 所以一般默认轨道梁横截面净空尺寸即为转向架运行限界。如果有特殊需求需要在轨道梁内增加设备, 可以参照以上车体部分计算方法, 只考虑一系悬挂产生的位移进行限界校核。

### 4 计算结果试验验证

为了验证本文计算方法的正确性, 对该单轨车辆开展了无侧风时运行姿态试验, 针对完成试验测试的3种典型工况进行校核计算。

工况1: 以60 km/h的速度在平直道上运行;

工况2: 以50 km/h的速度通过曲线半径为170 m的线路;

工况3: 以20 km/h的速度通过半径为30 m的曲线。

在车辆运行姿态测试中, 在车辆轮廓线点号8处布置位移传感器, 首先在车辆静止状态下标定相对轨道立柱的间距, 再按各工况设定的条件运行通过标定点, 由传感器记录相对轨道立柱的位移, 与静态标定位移相减得出车辆横向位移量。表5为横向位移实测值与计算值对比。由表5可知, 本计算方法得出的数据与实测值具有较高的一致性。

车辆轮廓线及动态包络线点号标示如图5所示, 计算坐标值如表6所示。

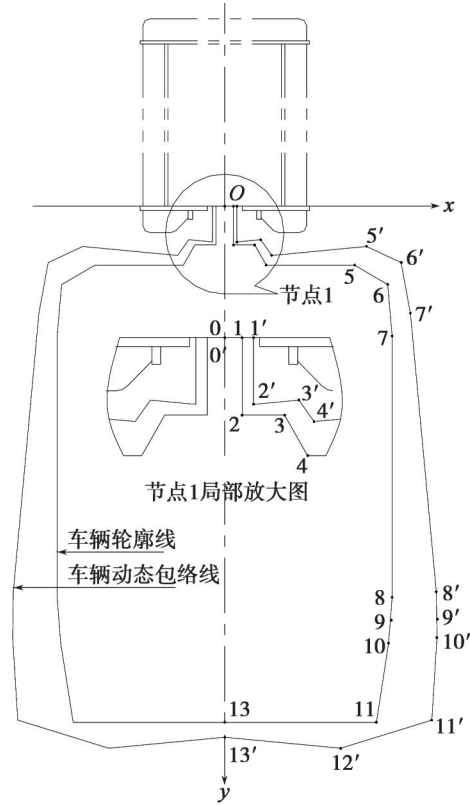


图5 车辆轮廓线及动态包络点号标示图

Fig. 5 Marking diagram of vehicle contour line and dynamic envelope point number

表5 车辆计算与实测横向位移对比

Table 5 Comparison between calculated and measured lateral displacement of vehicle mm

工况	最大横向位移实测值	最大横向位移计算值
工况1	78	80
工况2	166	188
工况3	197	226

表6 车辆轮廓线及不同工况下动态包络线坐标计算值

Table 6 Vehicle contour and dynamic envelope coordinate values under different working conditions

坐标	车辆轮廓线点号														
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
x	0	60	60	206	285	893	1 120	1 150	1 150	1 144	1 126	1 042		0	
y	0	0	262	262	400	400	531	880	2 653	2 809	2 963	3 500		3 500	
工况	坐标	动态包络线点号													
		0'	1'	2'	3'	4'	5'	6'	7'	8'	9'	10'	11'	12'	13'
工况1	x	0	78	78	262	340	928	1 178	1 210	1 230	1 232	1 228	1 138	947	0
	y	0	0	251	250	388	368	506	855	2 627	2 688	2 904	3 595	3 606	3 596
工况2	x	0	91	91	266	335	936	1 183	1 229	1 338	1 341	1 338	1 286	799	0
	y	0	0	246	239	368	330	452	798	2 569	2 776	2 981	3 595	3 659	3 612
工况3	x	0	92	92	264	330	928	1 181	1 233	1 376	1 381	1 379	1 342	740	0
	y	0	0	242	235	360	311	429	775	2 544	2 802	3 058	3 595	3 682	3 624

## 5 结语

本文分析了单轨车辆与传统车辆动态包络线构成因素的差异,提出了单轨车辆动态包络线计算的基本原理,并基于一种具有两级减振的单轨车辆转向架结构,分析了计算要素,得出了计算公式。悬挂式单轨系统在国风尚处于发展初期,虽然近年有多条试验线、示范线开建,但还没有形成统一的技术框架体系和行业技术标准,各企业不同车辆的动态包络线确定方法差异较大。文中提出的基本计算原理对所有单轨系统通用,所涉及结构的计算方法通过了2条试验线的验证,相关研究结果可作为各型单轨车辆动态包络线计算的参考。

### 参考文献:

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 地铁限界标准: CJJ/T 96—2018[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for metro gauges: CJJ/T 96—2018[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2018.
- [2] 周美艳. 悬挂式空中列车的应用发展[J]. 国外铁道车辆, 2014, 51(2): 10-14.  
ZHOU Meiyang. Application and development of the suspension type sky train[J]. Foreign Rolling Stock, 2014, 51(2): 10-14.
- [3] 李磊, 张茂帆, 李芾, 等. 悬挂单轨交通限界计算方法研究[J]. 铁道机车车辆, 2016, 36(1): 119-126.  
LI Lei, ZHANG Maofan, LI Fu, et al. Research on the calculating method of suspension monorail transit gauge[J]. Railway Locomotive & Car, 2016, 36(1): 119-126.
- [4] 张茂帆, 王孔明, 李磊, 等. 悬挂式单轨交通车辆限界分析与计算[J]. 成都大学学报(自然科学版), 2016, 35(1): 81-85.  
ZHANG Maofan, WANG Kongming, LI Lei, et al. Analysis and calculation of vehicle gauge of suspension monorail transit[J]. Journal of Chengdu University(Natural Science Edition), 2016, 35(1): 81-85.
- [5] 刘文龙, 徐延海, 吴晓, 等. 悬挂式单轨交通限界计算研究及方法分析[J]. 铁道机车车辆, 2016, 36(6): 90-95.  
LIU Wenlong, XU Yanhai, WU Xiao, et al. Research and analysis for vehicle gauge of suspension monorail transit[J]. Railway Locomotive & Car, 2016, 36(6): 90-95.
- [6] 李芾, 许文超, 安琪. 悬挂式单轨车的发展及其现状[J]. 机车电传动, 2014(2): 16-20.  
LI Fu, XU Wenchao, AN Qi. Development and current status of suspended monorail vehicle[J]. Electric Drive for Locomotives, 2014(2): 16-20.