

文章编号: 1005-0523(2019)06-0019-06

# 轨道车辆曲线通过时车钩摆角仿真计算研究

金希红<sup>1</sup>, 张海<sup>2</sup>, 帅纲要<sup>1</sup>, 匡希超<sup>1</sup>, 林凤涛<sup>2</sup>

(1. 大功率交流传动电力机车系统集成国家重点实验室, 湖南 株洲 412001;

2. 华东交通大学载运工具与装备教育部重点实验室, 江西 南昌 330013)

**摘要:** 轨道车辆通过曲线时, 过大的车钩摆角会严重威胁列车的行车安全; 因此在进行设计时必须进行曲线通过时车钩摆角的校核。通过解析的方法给出前后车辆的姿态位置, 再依据其车钩相对位置求解车钩摆角大小。最后依据算法对水平曲线通过和竖曲线通过两种情况进行了车钩摆角的计算, 发现在不同的工况下, 车钩最大摆角均出现在前后两车中心销横移方向相错的时候; 在入曲线工况下, 车钩最大摆角出现 2 位车刚进入曲线时; 在 S 曲线工况下, 车钩最大摆角出现在 1 位车完全进入后曲线时, 而 2 位车 1 位中心销在夹直线时; 在竖曲线的工况下, 车钩最大摆角出现在变坡点处。

**关键词:** 曲线通过; 车钩摆角; 动态计算; 几何解析

中图分类号: U260.11

文献标志码: A

DOI: 10.16749/j.cnki.jecjtu.2019.06.004

轨道车辆曲线通过时, 一般仅采用 CAD 软件进行车钩摆角的二维仿真分析, 操作步骤复杂, 车钩在不同曲线的不同位置连挂通过情况分析不全面, 不容易发现最困难的连挂、曲线通过工况, 容易产生因未发现最恶劣工况而开展设计工作导致车钩在实际线路无法连挂、无法通过曲线的情况<sup>[1-4]</sup>。

## 1 计算车辆参数设定

铁路曲线有平面曲线及竖曲线两种类型<sup>[5]</sup>。在平面上直线与直线间采用曲线连接而形成平面曲线连接, 简称平曲线; 在竖面上坡段与坡段采用曲线连接, 形成竖曲线<sup>[2-3]</sup>。在不同的线路条件下运行, 需要用到的车辆几何参数也有所不同。表 1 给出了地铁 A 型车几何参数, 图 1(a) 为通过平面曲线时车辆几何参数示意图, 图 1(b) 为通过竖曲线时车辆几何参数示意图。

表 1 地铁 A 型车几何参数表  
Tab.1 Geometric parameters of typical vehicles

参数	初值/mm	备注
$L_1$	2 100	2 位转向架中心到车端距离
$L_2$	2 339	1 位转向架中心到车钩旋转中心距离
$L_3$	12 600	1 位转向架中心到 2 位转向架中心距离
$L_4$	1 225	车钩旋转中心到连挂面距离
$L_5$	450	车钩旋转中心到轨面距离
$TL$	19 000	车长
$TW$	2 800	车宽
$OF$	50	车体相对轨道横向偏移量

收稿日期: 2019-05-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(51865009, 51665015)

作者简介: 金希红(1970—), 男, 教授级高级工程师, 硕士, 研究方向为轨道机车车辆车体研发。

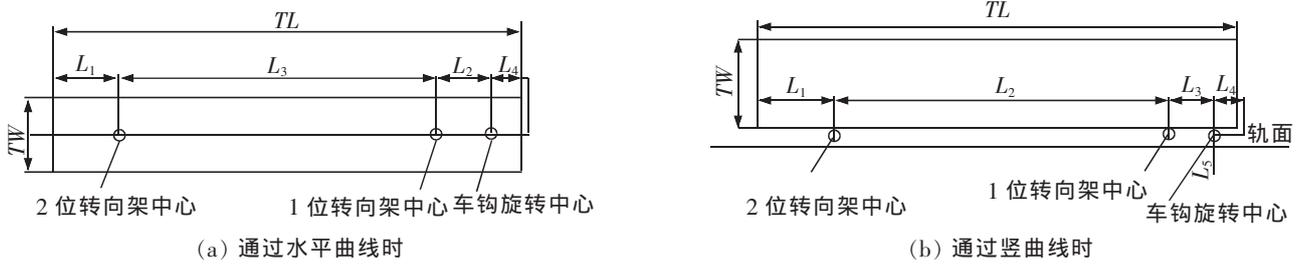


图1 车辆几何参数示意图

Fig.1 Schematic diagram of vehicle geometric parameters

## 2 轨道车辆曲线通过时车钩摆角计算方法

按照“铁道车辆强度设计及试验鉴定规范”(TB/T 1335-1996)<sup>[6]</sup>,车辆在连挂条件下通过曲线时,车辆的姿态考虑两类影响因素:曲线对姿态的影响,车辆振动和偏移对姿态的影响。其中,线路几何形状对姿态的影响可以假设车辆位于理想位置,通过计算和作图得到车辆在轨道面内投影的几何形位<sup>[7]</sup>。

车体偏移值可依据“地铁限界规范”(CJJ96-2003)<sup>[8]</sup>以及相关试验结果来确定:

- 1) 车体横向偏移量为 $\pm 50$  mm;
- 2) 车辆转向架一系及二系簧破损引起的车体下沉量为 $\pm 50$  mm。

### 2.1 通过水平曲线计算方法

1) 车钩摆角计算方法,计算示意图如图2。

步骤1:以线路曲线圆心为原点建立坐标系  $OXY$ 。2位车的车体1位中心销  $O_1$  相对线路中心线横向偏移  $Y_1$ ,2位中心销  $O_2$  相对线路中心线横向偏移  $Y_2$ 。假设  $O_1$  的坐标为  $(x_1, y_1)$ ,  $\theta_1$  为  $OO_1$  与  $x$  轴的夹角。

步骤2:以  $O_1$  为圆心,以车辆定距  $L_3$  为半径作圆;以线路中心线的圆心  $O(0,0)$  为圆心,以半径  $R+Y_1$  作圆。联立求解两个圆的方程组,即可求得两圆交点  $O_2$  的坐标  $(x_2, y_2)$ 。

步骤3:将  $O_1$  和  $O_2$  连接起来,即为车体的中心线。1位车钩旋转中心  $O_3$  位于直线  $O_1O_2$  的延长线上,距离中心销  $O_1$  的距离为  $L_3$ ,则1位车钩旋转中心  $O_3$  的坐标  $(x_3, y_3)$  为

$$x_3 = (x_1 - x_2) \frac{L_2}{L_3} + x_1, y_3 = (y_1 - y_2) \frac{L_2}{L_3} + y_1 \quad (1)$$

步骤4:1位车的车体2位中心销  $O_5$  相对线路中心线横向偏移  $Y_3$ ,1位中心销  $O_6$  相对线路中心线横向偏移  $Y_4$ 。此时需要依据  $OO_5$  与  $OO_1$  夹角  $\alpha$  来预估  $O_5$  的坐标位置,假设  $O_5$  的坐标为  $(x_5, y_5)$ ,  $\theta_2$  为  $OO_5$  与  $x$  轴的夹角。

步骤5:以  $O_5$  为圆心,以车辆定距  $L_3$  为半径作圆;以线路中心线的圆心  $O(0,0)$  为圆心,以半径  $R+Y_4$  作圆。联立求解两个圆的方程组,即可求得两圆交点  $O_6$  的坐标  $(x_6, y_6)$ 。

步骤6:将  $O_5$  和  $O_6$  连接起来,即为车体的中心线。2位车钩旋转中心  $O_4$  位于直线  $O_5O_6$  的延长线上,距离中心销  $O_5$  的距离为  $L_3$ ,则2位车钩旋转中心  $O_4$  的坐标  $(x_4, y_4)$  为

$$x_4 = (x_5 - x_6) L_2 / L_3 + x_5, y_4 = (y_5 - y_6) L_2 / L_3 + y_5 \quad (2)$$

步骤7:通过判定车钩的长度来确定1位车的位置。首先根据前后车辆车钩旋转中心  $O_3(x_3, y_3)$  和  $O_4(x_4, y_4)$ , 计算得到车钩长度  $L_b$ , 计算示意图如图3

$$L_b = \sqrt{(x_4 - x_3)^2 + (y_4 - y_3)^2} \quad (3)$$

步骤8:设定阈值  $\varepsilon$ , 如果  $|L_b - L_0| \leq \varepsilon$  时,继续步骤9计算车钩摆角;如果  $|L_b - L_0| > \varepsilon$ , 修改  $\theta_2$ , 重复步骤4至7,直至满足要求,继续步骤9计算车钩摆角。

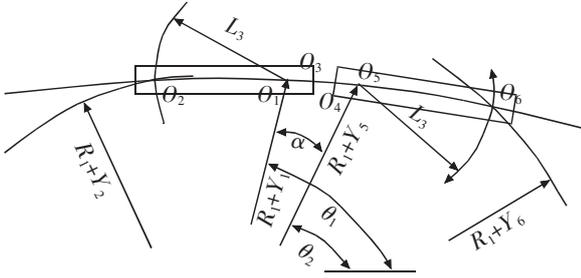


图 2 圆曲线工况车辆计算示意图

Fig.2 Calculation diagram of working condition vehicles under circular curve

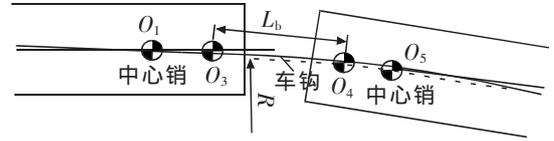


图 3 车辆车钩长度计算示意图

Fig.3 Calculation diagram of vehicle coupler length

步骤 9:计算车钩摆角。计算直线  $O_1O_2$  与直线  $O_3O_4$  以及直线  $O_5O_6$  与直线  $O_3O_4$  的夹角。

2) 对于入曲线工况,可分为 3 种情况:2 位车的车体 1 位中心销和 1 位车的车体 2 位中心销都位于直线段;2 位车的车体 1 位中心销位于直线段,1 位车的车体 2 位中心销位于曲线段;2 位车的车体 1 位中心销和 1 位车的车体 2 位中心销都位于曲线段。车钩摆角计算方法与圆曲线一致。

3) 对于 S 曲线工况,可分为 5 种情况:2 位车的车体 1 位中心销和 1 位车的车体 2 位中心销都位于后曲线段;2 位车的车体 1 位中心销位于后曲线,1 位车的车体 2 位中心销位于夹直线段;2 位车的车体 1 位中心销和 1 位车的车体 2 位中心销都位于夹直线段;2 位车的车体 1 位中心销位于夹直线段,1 位车的车体 2 位中心销位于前曲线段;2 位车的车体 1 位中心销和 1 位车的车体 2 位中心销都位于前曲线段。前曲线半径  $R_1$ ,后曲线半径  $R_2$ ,夹直线长度  $L_J$ 。车钩摆角计算方法与圆曲线一致。

2.2 通过竖曲线计算方法

竖曲线工况车辆姿态分 3 种:① 前车体后转向架中心和后车体前转向架中心在左斜坡上;② 前车体后转向架中心在左斜坡上,后车体前转向架中心在右斜坡上;③ 前车体后转向架中心和后车体前转向架中心在右斜坡上;计算示意图如图 4。

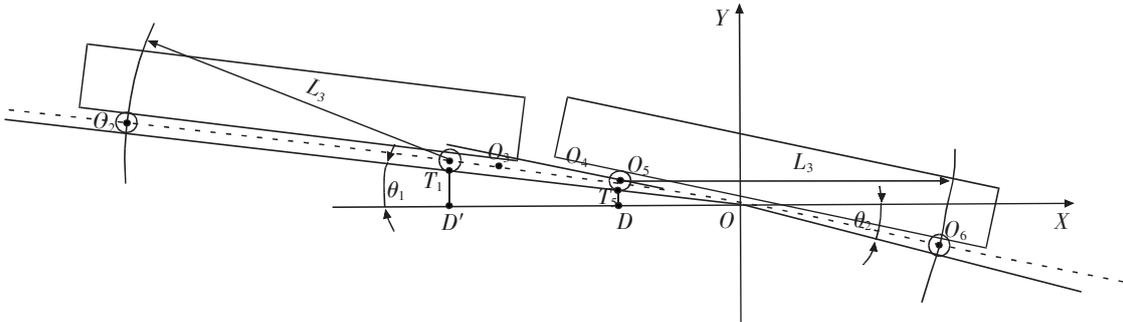


图 4 竖曲线工况下车辆姿态计算示意图

Fig.4 Calculation diagram of vehicle attitude under vertical curve condition

步骤 1:以线路坡道变化点为原点建立坐标系  $OXY$ 。1 位车的车体 2 位中心销  $O_5$  相对线路垂向偏移  $H_3$ ,1 位中心销  $O_6$  相对线路垂向偏移  $H_4$ ,假设 1 位车 2 位中心销实际位置  $O_5(x_5, y_5)$ 。

步骤 2:以  $O_5$  为圆心,以车辆定距  $L_3$  为半径作圆,以平行于线路并偏移  $L_3+H_4$ ,作一直线,直线与圆相交得  $O_6(x_6, y_6)$ 。

步骤 3:将  $O_5$  和  $O_6$  连接起来,即为车体的中心线。2 位车钩旋转中心  $O_4$  位于直线  $O_5O_6$  的延长线上,距离中心销  $O_5$  的距离为  $L_3$ ,则 2 位车钩旋转中心  $O_4$  的坐标  $(x_4, y_4)$  为

$$x_4 = (x_5 - x_6) \frac{L_2}{L_3} + x_5, y_4 = (y_5 - y_6) \frac{L_2}{L_3} + y_5 \quad (4)$$

步骤4:2位车的车体1位中心销 $O_1$ 相对线路垂向偏移 $H_1$ ,2位中心销 $O_2$ 相对线路垂向偏移 $H_2$ 。此时假设 $O_1$ 的坐标 $(x_1, y_1)$ 。

步骤5:以 $O_1$ 为圆心,以车辆定距 $L_3$ 为半径作圆,以平行于线路并偏移 $L_5+H_2$ ,作一直线,直线与圆相交得 $O_2(x_2, y_2)$ 。

步骤6:将 $O_1$ 和 $O_2$ 连接起来,即为车体的中心线。1位车钩旋转中心 $O_3$ 位于直线 $O_1O_2$ 的延长线上,距离中心销 $O_1$ 的距离为 $L_3$ ,则1位车钩旋转中心 $O_3$ 的坐标 $(x_3, y_3)$ 为

$$x_3 = (x_1 - x_2) \frac{L_2}{L_3} + x_1, y_3 = (y_1 - y_2) \frac{L_2}{L_3} + y_1 \quad (5)$$

步骤7:通过判定车钩的长度来确定1位车的位置。首先根据前后车辆车钩旋转中心 $O_3(x_3, y_3)$ 和 $O_4(x_4, y_4)$ ,计算得到车钩长度 $L_b$ ,如图3

$$L_b = \sqrt{(x_4 - x_3)^2 + (y_4 - y_3)^2} \quad (6)$$

步骤8:设定阈值 $\varepsilon$ ,如果 $|L_b - L_0| \leq \varepsilon$ 时,继续步骤9计算车钩摆角;如果 $|L_b - L_0| > \varepsilon$ ,修改 $\theta_2$ ,重复步骤4至7,直至满足要求,继续步骤9计算车钩摆角。

步骤9:计算车钩摆角。计算直线 $O_1O_2$ 与直线 $O_3O_4$ 以及直线 $O_5O_6$ 与直线 $O_3O_4$ 的夹角。

### 3 不同工况下列车曲线通过计算

#### 3.1 通过水平曲线时车钩摆角计算

1) 圆曲线工况。选择圆曲线半径为150 m,通过计算得到1位车2位车钩摆角最大值为 $7.432^\circ$ ,2位车1位车钩摆角最大值为 $5.607^\circ$ ,如表2。同时车钩最大摆角出现在两车前后中心销横移相错的时候。

表2 圆曲线工况下车钩摆角最大值

Tab.2 Maximum swing angle of coupler under circular curve condition

圆曲线序号	车钩摆角/ $^\circ$		中心销横向偏移/mm			
	1位车	2位车	1位车1位销	1位车2位销	2位车1位销	2位车2位销
1	5.584	7.425	50	-50	50	-50
2	5.607	6.992	-50	-50	50	-50

2) 入曲线工况。选择圆曲线半径为150 m,通过计算得到1位车2位车钩最大摆角出现在入曲线5 m处,最大值为 $10.135^\circ$ ;2位车1位车钩最大摆角出现在入曲线2 m处,最大值为 $6.367^\circ$ ,如表3,而且车钩最大摆角均出现在两车前后中心销横移相错的时候。图5为入曲线不同位置下车辆车钩摆角变化曲线。

表3 入曲线工况下车钩摆角最大值

Tab.3 Maximum swing angle of coupler under curve condition

入曲线处/m	车钩摆角/ $^\circ$		中心销横向偏移/mm			
	1位车2位车钩	2位车1位车钩	1位车1位销	1位车2位销	2位车1位销	2位车2位销
2	9.536	6.367	-50	50	-50	50
5	10.135	5.819	-50	50	-50	50

3) S曲线工况。选择前后圆曲线半径为150 m,夹直线长度为10 m。通过计算得到2位车车钩最大摆角出现在2位车1位中心销进入夹直线3.5 m处,最大值为 $10.588^\circ$ ,1位车车钩摆角最大值出现在1位车2位中心销进入后曲线3.5 m处,最大值为 $10.575^\circ$ ,如表4。同时车钩最大摆角出现在两车前后中心销横移相错的时候。图6为S曲线不同位置下车辆车钩摆角变化曲线。

表 4 S 曲线工况下车钩摆角最大值  
Tab.4 Maximum swing angle of coupler under S curve working condition

S 曲线处/m	车钩摆角/(°)		中心销横向偏移/mm			
	1 位车 2 位车钩	2 位车 1 位车钩	1 位车 1 位销	1 位车 2 位销	2 位车 1 位销	2 位车 2 位销
3.5	7.368	10.588	-50	-50	50	-50
13.5	10.575	7.417	-50	50	50	-50

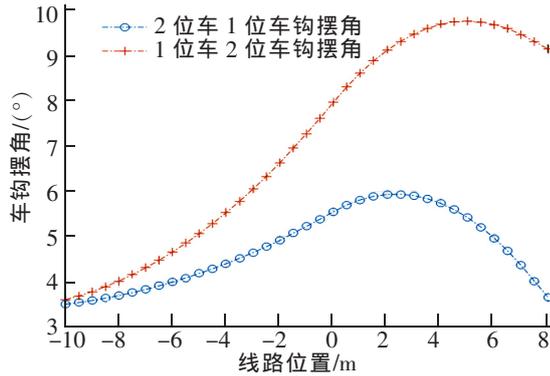


图 5 入曲线不同位置下车钩摆角变化曲线  
Fig.5 Change curve of the swing angle of the lower hook at different positions of the entry curve

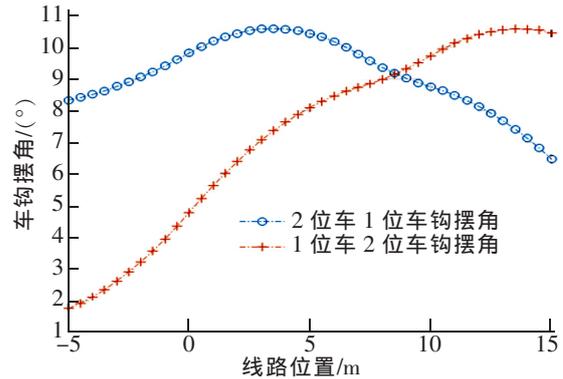


图 6 S 曲线不同位置下车钩摆角变化曲线  
Fig.6 Change curve of yaw angle of lower coupler at different positions of S curve

### 3.2 通过竖曲线时车钩摆角计算

选择坡度组合为 5‰和 10‰。通过计算得到 2 位车 1 位车钩摆角最大值和 1 位车 2 位车钩摆角最大值均出现在变坡点处,数值分别为 3.930°和 4.217°,如表 5。

表 5 竖曲线工况下车钩摆角最大值  
Tab.5 Maximum swing angle of coupler under vertical curve condition

竖曲线处/m	车钩摆角/(°)		中心销横向偏移/mm			
	1 位车 2 位车钩	2 位车 1 位车钩	1 位车 1 位销	1 位车 2 位销	2 位车 1 位销	2 位车 2 位销
0	4.217	3.930	-50	50	-50	50

## 4 结论

列车通过曲线时,过大的车钩摆角会严重威胁列车的行车安全,因此在进行设计时必须进行曲线通过的车钩摆角的校核。本文通过解析的方法对水平曲线通过和竖曲线通过两种情况进行了车钩摆角的计算。通过计算发现:

- 1) 在不同的工况下,车钩最大摆角均出现在前后两车中心销横移方向相错的时候。
- 2) 在入曲线工况下,车钩最大摆角出现在 1 位车进入曲线而 2 位车还未进入曲线的状态下,并且随着 2 位车也进入曲线后,车钩最大摆角逐渐减小。因此此工况下应重点校核 2 位车刚进入曲线时的车钩摆角。
- 3) 在 S 曲线工况下,2 位车车钩最大摆角出现在 1 位车进入后曲线而 2 位车进入夹直线的状态下,并且随着 2 位车也进入曲线后,1 位车车钩最大摆角逐渐增大,而 2 位车车钩最大摆角则逐渐减小。因此,此工况应重点校核 1 位车完全进入后曲线,而 2 位车 1 位中心销在夹直线时的车钩摆角。
- 4) 在竖曲线的工况下,车钩最大摆角出现在变坡点处,此时应重点校核车钩摆角。

## 参考文献:

- [1] 蔡军爽,杜健,宋显刚. 基于 CATIA 软件的列车过小曲线运动仿真校核[J]. 铁路技术创新,2014(4):130-132.
- [2] 李长淮. 铁路车辆通过曲线时的最小半径研究[J]. 铁道标准设计,2016,60(3):19-24.
- [3] 刘兵,王爱民,黄盼. 铁道车辆通过水平曲线时车钩最大偏移角的分析[J]. 铁道技术监督,2014,42(6):3-8.
- [4] 聂敏,崔启超,原志强,等. 浮车型 5 模块低地板有轨电车几何曲线通过计算方法[J]. 机车电传动,2017(6):109-113.
- [5] 宋唯维. 市域轨道交通道岔至平面曲线距离研究[J]. 华东交通大学学报,2018,35(5):22-26.
- [6] 中华人民共和国铁道部. TB/T 1335-1996 铁道车辆强度设计及试验鉴定规范[S]. 北京:中国标准出版社,1996.
- [7] 罗仁,干峰,滕万秀,等. 连挂车辆几何曲线通过计算[J]. 电力机车与城轨车辆,2013,36(4):16-18.
- [8] 中华人民共和国住房和城乡建设部. CJJ96-2003 地铁限界规范[S]. 北京:中国标准出版社,2003.

## Research on Simulation Calculation of Coupler Swing Angle During Rail Vehicles Passing Curve

Jin Xihong<sup>1</sup>, Zhang Hai<sup>2</sup>, Shuai Gangyao<sup>1</sup>, Kuang Xichao<sup>1</sup>, Lin Fengtao<sup>2</sup>

(1.The State Key Laboratory of Heavy Duty AC Drive Electric Locomotive Systems Integration,Zhuzhou 412001, China;

2. Key Laboratory of Conveyance and Equipment of the Ministry of Education , East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

**Abstract:** When the train passes the curve, the excessive swing angle of the coupler will seriously threaten the safety of the train. Therefore, the coupler angle must be checked when the train passes through curves. In this paper, the attitude position of the front and rear vehicles was given by analytical method, and the swing angle of the coupler was solved according to the relative position of the coupler. Finally, according to the algorithm, the swing angle of the coupler was calculated when the train passed through the horizontal curve and the vertical curve. It showed that under different working conditions, the maximum swing angle of the coupler appeared when the front and rear center pins of the two cars were in different directions. Under the curve-line working condition, the maximum swing angle of the coupler appeared when the two trains just entered the curve; under the Scurve condition, the maximum swing angle of the coupler appeared after the first position train completely entered rear curve and the center pin of the second position train was located in the line; under the condition of the vertical curve, the maximum swing angle of the coupler appeared at the slope point.

**Key words:** curve passing; coupler swing angle; dynamic calculation; geometric analysis