

转向架重心空间坐标的测定

王秀刚¹, 苏建¹, 曹晓宁², 谭福星³

(1. 吉林大学 交通学院, 吉林 长春 130022; 2. 德尔福(上海)动力推进系统有限公司, 上海 200131;

3. 长春轨道客车股份有限公司, 吉林 长春 130062)

摘 要: 依托于吉林大学研发的转向架参数测定试验台, 提出了基于力矩平衡原理的重心空间坐标测试方法, 建立了重心空间坐标的测试模型. 被试转向架水平静止状态时测定纵向及横向坐标, 垂向坐标的测定需运用试验台电液伺服控制系统将转向架沿纵向倾斜一定角度, 分析倾斜状态下转向架的力矩平衡关系. 运用齐次坐标变换矩阵原理构建了多六自由度平台复杂耦合运动的位姿反解模型, 通过位姿反解得到各作动器协调控制的指令, 实现垂向坐标的准确测试. 对某型转向架重心坐标进行了测定, 试验结果与理论值一致, 证明了测试模型的准确性, 以及测试方法的可行性.

关 键 词: 转向架; 重心坐标; 空间坐标; 位姿反解; 齐次坐标变换

中图分类号: U 260.331

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2014)02-0277-06

Spatial Coordinates Determination of Bogie's Gravity Center

WANG Xiu-gang¹, SU Jian¹, CAO Xiao-ning², TAN Fu-xing³

(1. College of Transportation, Jilin University, Changchun 130022, China; 2. Delphi Shanghai Dynamics and Propulsion Systems Co., Ltd., Shanghai 200131, China; 3. Changchun Railway Vehicles Co., Ltd., Changchun 130062, China. Corresponding author: SU Jian, professor, E-mail: sujianjd@163.com)

Abstract: Relying on the bogie's parameters test bench developed by Jilin University, the spatial coordinates determination method of the bogie's gravity center was put forward based on the moment balance principle. The test models for spatial coordinates were also established. The longitudinal and the lateral coordinates were tested with keeping the bogie still. But when test the vertical coordinate, the bogie should be inclined via the actuators of the test bench to analyze the moment balance at an angle. The inverse displacement analysis model of the multiple-six-DOF simulation platform with complex coupling motions was established, and the vertical coordinate was tested based on the coordinated control commands of the actuators. Coordinates of the gravity center of a certain bogie were measured and compared with the theoretical coordinates. The result shows that measured values are consistent with the theoretical ones, which proves the accuracy and feasibility of the test method.

Key words: bogie; coordinate of center of gravity; spatial coordinate; inverse displacement analysis; transformation in homogeneous coordinate

重心是影响车辆牵引动力性能的关键因素^[1-2], 关系到整车运行的平稳性及动力学性能; 转向架重心位置直接影响整车的重心, 对整车设计定型及参数匹配有举足轻重的作用. 转向架重心位置偏离将导致轮对载荷的分配不均匀, 使车辆行驶中易发生倾覆、脱轨等事故, 严重影响车辆

运行的安全性.

目前国内外转向架重心的测定主要依托于理论计算及台架试验. 理论计算值往往不能够全面考虑转向架各零部件的质量分布, 计算结果误差较大, 仅可作为参考; 台架试验主要有摇摆法、悬挂法、吊悬法及支撑法. 杨振祥等^[3]提出运用天

车摇摆法测定转向架重心,此类方法利用单自由度弱阻尼微振原理计算重心高度,测试原理简单,但测量误差较大;张卫华等^[4]提出运用吊悬法及支撑法测定车体的重心,但因其测试设备的局限性,不能准确测定转向架重心的空间坐标;而悬挂法显然不能精确测定转向架的重心位置,误差较大。

针对以上问题,本文依托吉林大学汽车运输研究所研发的转向架参数测定试验台提出了转向架重心空间坐标的测试方法,建立重心位置三向坐标的测试模型;构建了多六自由度平台复杂耦合运动的位姿解算模型,并通过位姿反解计算得到了各作动器协调控制的指令,实现垂向坐标的准确测试;同时对某型转向架重心位置进行了测定。测试结果与理论值一致,证明了测试模型的准确性,以及测试方法的可行性。

1 重心空间坐标测试系统及原理

转向架重心的空间坐标,即重心在车辆行驶方向的纵坐标(x 轴)、平行于轮轴方向的横坐标(y 轴)以及垂直轨面的垂坐标(z 轴)。重心空间坐标依据空间力系的平衡方程及力矩平衡方程原理计算,平衡方程为

$$\begin{cases} \sum F_x = 0, \\ \sum F_y = 0, \\ \sum F_z = 0; \end{cases} \quad \begin{cases} \sum M_x = 0, \\ \sum M_y = 0, \\ \sum M_z = 0. \end{cases}$$

图 1 为转向架重心测定模型,依托于转向架参数测定试验台^[5],重心空间坐标的测试系统主要由双六自由度运动执行系统和三维测力系统组成。双六自由度运动执行系统由 2 套 7 缸六自由度运动模拟系统组成,为重心坐标的测定提供平台,实现前后轮对的上下沉浮运动,为垂向坐标测定时倾斜试验的完成提供条件;三维测力系统由 4 套三维测力平台组成,分别支撑在 4 个车轮下方,实时测定各轮的受力情况,并根据转向架在水平状态及倾斜状态下的力矩平衡原理计算得到重心的空间坐标。

2 重心空间坐标的测试

为便于重心位置描述,建立转向架三维坐标系,以 2[#]轮对右侧车轮与轨道面的切点为坐标原点,车辆行驶方向为 x 轴,平行于轮轴的方向为 y 轴,垂直轨面的方向为 z 轴,建立空间坐标系如图 2 所示。设转向架重心空间坐标为 $G(x, y, z)$ 。

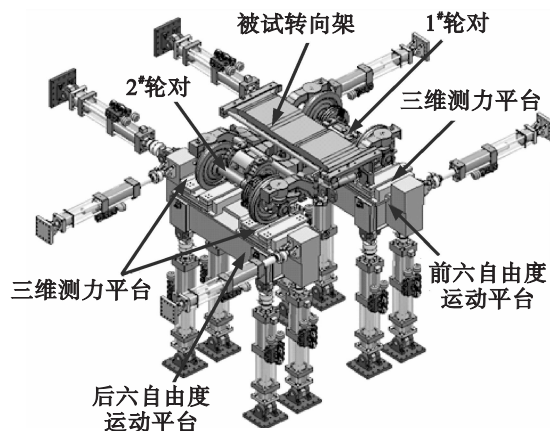


图 1 转向架重心坐标测定模型

Fig. 1 Test model of spatial coordinate for center of gravity

2.1 重心纵坐标测试

图 2 为重心纵向坐标计算模型。转向架轴距为 L ,重心纵向坐标的向量表示为 \vec{Ox} , $|\vec{Ox}|$ 为重心距原点的纵向距离, $F_1 + F_2$ 为 1[#]轮对所受垂向力的和, $F_3 + F_4$ 为 2[#]轮对所受垂向力的和, G 为转向架重力。根据力矩平衡理论,得

$$G|\vec{Ox}| - (F_2 + F_1)L = 0.$$

重心距原点的纵向距离:

$$|\vec{Ox}| = (F_2 + F_1)L/G.$$

所以,重心纵向坐标为 $(F_2 + F_1)L/G$ 。

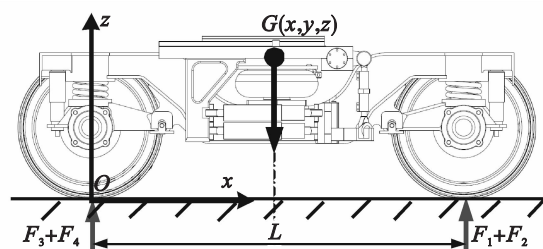


图 2 纵向坐标测试模型

Fig. 2 Test model of longitudinal coordinate

2.2 重心横坐标测试

图 3 为重心横向坐标计算模型。转向架轮距为 S ,重心横向坐标的向量表示为 \vec{Oy} , $|\vec{Oy}|$ 为重心距原点的横向距离, $F_1 + F_4$ 为右侧车轮所受垂向力的和, $F_2 + F_3$ 为左侧车轮所受垂向力的和, G 为转向架重力。根据力矩平衡理论,得

$$G|\vec{Oy}| - (F_4 + F_1)S = 0.$$

重心距原点的纵向距离:

$$|\vec{Oy}| = (F_4 + F_1)S/G.$$

所以,重心横向坐标为 $(F_4 + F_1)S/G$ 。

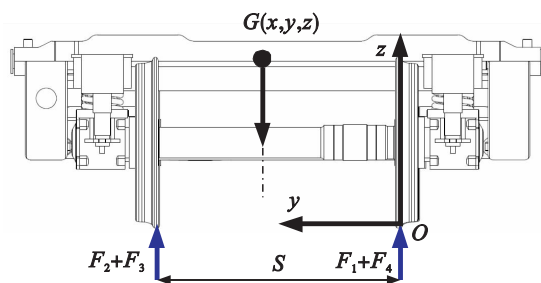


图3 横向坐标计算模型

Fig. 3 Test model of lateral coordinate

2.3 重心垂向坐标测试

2.3.1 倾斜试验方法

横向及纵向坐标可在转向架静载状态下,运用空间力系平衡方程进行求解;转向架重心垂向坐标的测定则需将转向架倾斜一定角度,即转向架前后轮对在垂向沉浮运动一定距离,然后运用力矩平衡及质量理论进行求解^[6]。

本文提出一种转向架倾斜试验方法,如图4所示。试验台运动描述以地面静坐标系为基础, O_0 为两平台同时转动(牵连运动)的参考点,即前后轮对轮轴所在水平面的中点; a_1, a_2 为前后运动平台相对运动的参考点,即前后轮轴横向向中心线中点。转向架倾斜试验时,通过下平台14个作动器的协调控制,使前后六自由度运动平台共同绕通过 O_0 的横向轴线逆时针转动 θ ,同时两六自由度运动平台分别绕各自轴线(通过 a_1, a_2 的横向轴线)以相同的转速顺时针转动 θ ,此时2个六自由度平台与水平面保持平行,并呈一定的高度差 Z 。在倾斜运动过程中,转向架1#轮对升高,2#轮对下降,转向架与水平面呈一定角度。该方法使三维测力平台始终与转向架轮对保持垂直接触,即三维测力平台仅提供转向架的垂向支撑,避免了三维测力平台各分力耦合的干扰,提高了测试的准确度。图4中 R 为车轮半径, L 为转向架轴距。

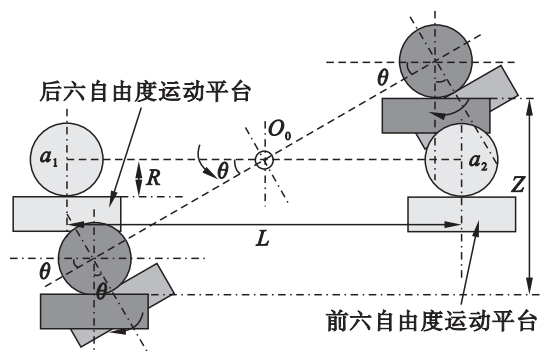


图4 倾斜试验模型

Fig. 4 Model of inclination test

2.3.2 垂向坐标测试模型

根据2.3.1提出的转向架倾斜试验方法,建立了重心垂向坐标的测试模型,如图5所示。重心垂向坐标的向量表示为 \vec{Oz} , $|\vec{Oz}|$ 为重心距原点的垂向距离, R 为车轮半径, $F_1' + F_2'$ 为1#轮对所受垂向力的和, $F_3' + F_4'$ 为2#轮对所受垂向力的和, G 为转向架重力,将重力分解为 $G\sin\theta$ 及 $G\cos\theta$,对坐标系原点的车轮轮心取矩,建立力矩平衡方程:

$$G|\vec{Ox}|\cos\theta - G\sin\theta(|\vec{Oz}| - R) - (F_1' + F_2')L\cos\theta = 0.$$

进一步整理为

$$|\vec{Oz}| - R = \frac{G|\vec{Ox}|\cos\theta - (F_1' + F_2')L\cos\theta}{G\sin\theta}.$$

由于 $G|\vec{Ox}| = (F_2 + F_1)L$,则

$$|\vec{Oz}| = \frac{(F_2 + F_1)L - (F_1' + F_2')L}{G}\cot\theta + R,$$

所以,重心垂向坐标为

$$\frac{(F_2 + F_1)L - (F_1' + F_2')L}{G}\cot\theta + R.$$

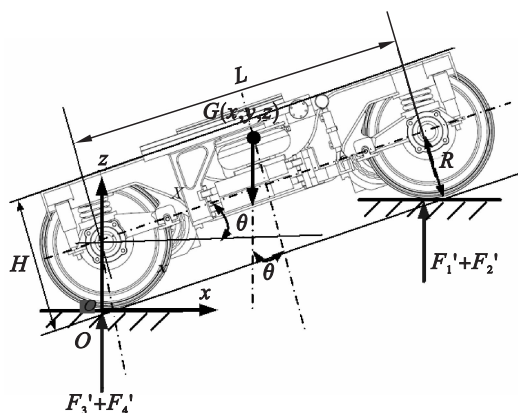


图5 垂向坐标测试模型

Fig. 5 Test model of vertical coordinate

综上所述,转向架重心空间坐标为

$$\begin{cases} x = (F_2 + F_1)L/G, \\ y = (F_4 + F_1)S/G, \\ z = [(F_2 + F_1)L - (F_1' + F_2')L]\cot\theta/G + R. \end{cases}$$

3 位姿反解

转向架重心垂向坐标的测定以2.3节中倾斜方法为基础,需借助于六自由度平台的位姿反解实时解算作动器的位移指令,并作为各作动器控制输入,实现上述运动平台牵连运动与相对运动的耦合。

3.1 位姿反解模型

结合试验台结构,将其简化为图 6 形式. 建立全局坐标系(地面静坐标系) $O-xyz$, 取车辆行驶方向为 x 轴, 取平行于轮轴的方向为 y 轴, 取垂直轨面的方向为 z 轴; 建立牵连运动体坐标系 O_T-xyz , 坐标轴方向选取与全局坐标系相同, 选取前后车轮与三维测力平台切点所在水平面的中心点为坐标原点 O_T, O_0 为牵连运动参考点; 建立 2 个六自由度下平台的局部坐标系(体坐标系) $O_1-x_1y_1z_1$ 及 $O_2-x_2y_2z_2$, 选取下平台横向作动器横向

中心线与两纵向作动器横向间距中线的交点为局部坐标系坐标原点 O_1, O_2 , 以前后轮轴横向中心线中点作为相对运动参考点. 体坐标相对于静坐标的位姿可用广义坐标 $q=(q_1, q_2, q_3, q_4, q_5, q_6)$ 来描述, $q_i (i=1, 2, 3)$ 为体坐标系相对于静坐标系的三个绕 x, y, z 的姿态角, $q_i (i=4, 5, 6)$ 为体坐标原点相对于静坐标系沿 x, y, z 三个坐标轴的平移量^[7-8].

图中 1~14 为作动器编号; $l_1 \sim l_3, v_1$ 和 $v_2, h_1 \sim h_4$ 为试验台几何关系参量.

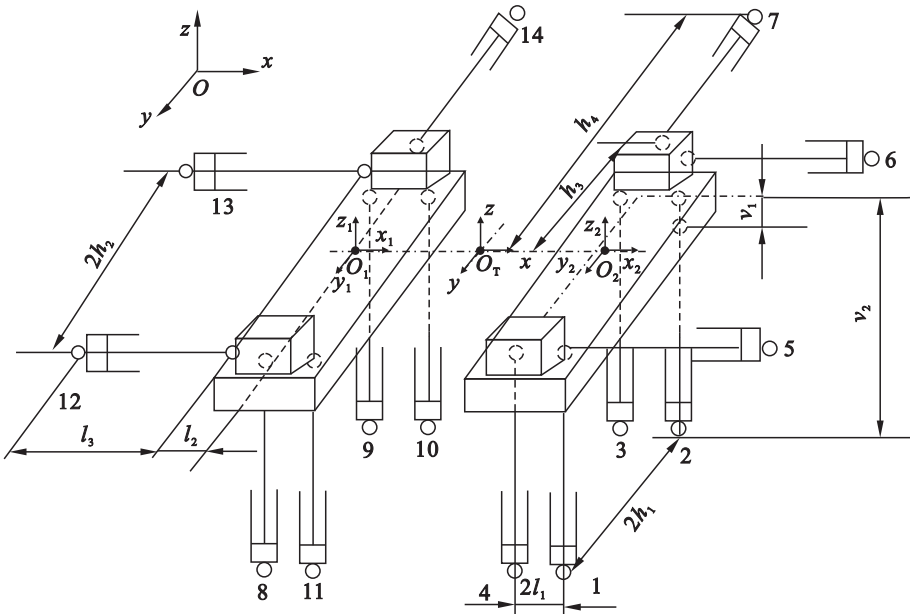


图 6 试验台简图
Fig. 6 Sketch of the test-bed

结合试验台几何关系参量, 作动器 1~7 上铰链点 A_i 、下铰链点 B_i 在局部坐标系中的坐标矩阵表示为

$$A_1 = \begin{bmatrix} l_1 & l_1 & -l_1 & -l_1 & l_2 & l_2 & 0 \\ -h_1 & h_1 & h_1 & -h_1 & -h_2 & h_2 & h_3 \\ -v_1 & -v_1 & -v_1 & -v_1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix},$$
$$B_1 = \begin{bmatrix} l_1 & l_1 & -l_1 & -l_1 & l_2 & l_2 & 0 \\ -h_1 & h_1 & h_1 & -h_1 & -h_2 & h_2 & h_3 \\ -v_2 & -v_2 & -v_2 & -v_2 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}.$$

作动器 8~14 上铰链点 A_2 、下铰链点 B_2 在局部坐标系中的坐标矩阵表示为

$$A_2 = \begin{bmatrix} -l_1 & -l_1 & l_1 & l_1 & -l_2 & -l_2 & 0 \\ -h_1 & h_1 & h_1 & -h_1 & -h_2 & h_2 & h_3 \\ -v_1 & -v_1 & -v_1 & -v_1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix},$$

$$B_2 = \begin{bmatrix} -l_1 & -l_1 & l_1 & l_1 & -l_2 & -l_2 & 0 \\ -h_1 & h_1 & h_1 & -h_1 & -h_2 & h_2 & h_3 \\ -v_2 & -v_2 & -v_2 & -v_2 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}.$$

体坐标系相对于静坐标系进行 zyx 旋转矩阵变换, 得到齐次变换矩阵 $T_i^{[9-10]}$:

$$T_i = \begin{bmatrix} cq_1cq_3 & -cq_1sq_3 + sq_1sq_2cq_3 & sq_1sq_3 + cq_1sq_2cq_3 & q_4 \\ cq_2sq_3 & cq_1cq_3 + sq_1sq_2sq_3 & -sq_1cq_3 + cq_1sq_2sq_3 & q_5 \\ -sq_2 & sq_1cq_2 & cq_1cq_2 & q_6 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

式中, c 表示 \cos , s 表示 \sin .

根据上述内容, 牵连运动体坐标系参考点为 O_0 , 下平台体坐标系坐标原点为 O_1, O_2 , 运动参考点为 a_1, a_2 , 同时可用 O_0, O_1, O_2, a_1, a_2 描述这些局部坐标系及运动参考点在全局坐标系中的位置.

下部双六自由度平台上铰链点及下铰链点在全局坐标系的坐标描述为 $O_i \times T(1, 7) + A_i$ 及

$\boldsymbol{O}_i \times \boldsymbol{\Gamma}(1,7) + \boldsymbol{B}_i$, 其中 $\boldsymbol{\Gamma}(1,7) = [1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1]$, $i=1,2$.

下平台上铰链点相对于牵连运动体坐标系原点的坐标描述为

$$\boldsymbol{A}_i' = \boldsymbol{O}_i \times \boldsymbol{\Gamma}(1,7) + \boldsymbol{A}_i - \boldsymbol{O}_0 \times \boldsymbol{\Gamma}(1,7), \quad (i=1,2).$$

牵连运动过程中,两下平台绕 \boldsymbol{O}_0 相对全局静坐标系运动一定姿态后,下平台本身运动参考点也发生变化,此时下平台上铰链点及各自相对运动参考点相对于全局坐标系的坐标描述分别为

$$\begin{aligned} \boldsymbol{A}''_i &= \boldsymbol{T}_1 \boldsymbol{A}'_i + \boldsymbol{O}_0 \times \boldsymbol{\Gamma}(1,7), \\ \boldsymbol{a}'_i &= \boldsymbol{T}_1 (\boldsymbol{a}_i - \boldsymbol{O}_0) + \boldsymbol{O}_0, (i=1,2). \end{aligned}$$

式中, \boldsymbol{T}_1 表示牵连运动体坐标系与全局静坐标系之间的齐次转换矩阵.

下部双六自由度平台相对于牵连运动体坐标系运动,此时下平台上铰链点相对于全局坐标系的坐标描述为

$$\boldsymbol{A}_i''' = \boldsymbol{T}_2 (\boldsymbol{A}_i'' - \boldsymbol{a}'_i \times \boldsymbol{\Gamma}(1,7)) + \boldsymbol{a}'_i \times \boldsymbol{\Gamma}(1,7), \quad (i=1,2).$$

式中, \boldsymbol{T}_2 表示相对运动体坐标系与全局静坐标系之间的齐次转换矩阵.

综上所述,作动器伸缩量分别为

$$\Delta L_{ij} = \| \boldsymbol{A}_i''' - (\boldsymbol{O}_i \times \boldsymbol{\Gamma}(1,7) + \boldsymbol{B}_i) \| - L_{ij}^0, \quad (i=1,2; j=1, \cdots, 7).$$

式中, L_{ij}^0 为作动器初始伸长量.

3.2 控制指令解算

由文中倾斜试验方法以及试验台几何结构参数可知:牵连运动参考点 \boldsymbol{O}_0 在全局坐标系的坐标描述为 $\boldsymbol{O}_0 = [0 \ 0 \ R \ 0]$, $\boldsymbol{O}_1, \boldsymbol{O}_2$ 在全局坐标系的坐标描述为 $\boldsymbol{O}_1 = [L/2 \ 0 \ R \ 0]$, $\boldsymbol{O}_2 = [-L/2 \ 0 \ R \ 0]$, 则牵连运动体坐标系与全局静坐标系间齐次转换矩阵为

$$\boldsymbol{T}_1 = \begin{bmatrix} c\theta & 0 & -s\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ s\theta & 0 & c\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

相对运动体坐标系与全局静坐标系之间的齐次转换矩阵为

$$\boldsymbol{T}_2 = \begin{bmatrix} c\theta & 0 & s\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -s\theta & 0 & c\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

根据上述分析,结合位姿解算模型,运用 Matlab 编程实现转向架倾斜试验各作动器位移指令的实时解算,并将控制命令输入到下部双六自由度平台各作动器,实现重心垂向坐标的测定,

各作动器指令如图 7 所示.

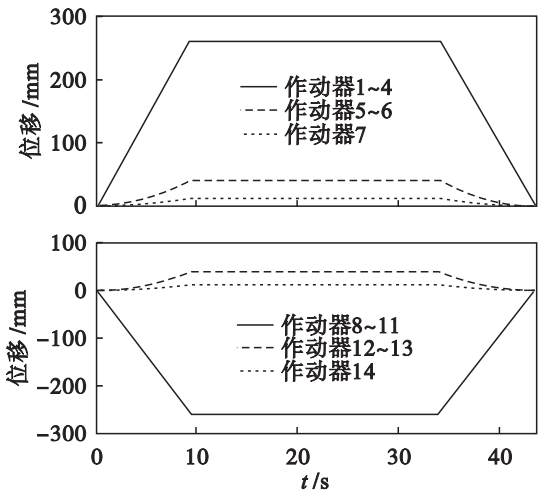


图 7 作动器指令曲线
Fig. 7 Command curves of actuators

4 实车试验

本文对某型车转向架进行了重心空间坐标的实车测试,该转向架车轮半径 $R = 460 \text{ mm}$, 轴距 $L = 2\,500 \text{ mm}$, 轮距 $S = 1\,435 \text{ mm}$. 根据上述重心空间坐标测试模型,将被试转向架推至试验台,分别测定转向架静载及倾斜状态下的车轮载荷值,结合被试转向架的结构参数,完成转向架重心纵向、横向以及垂向坐标的测定. 试验结果如表 1 所示,试验中转向架倾斜角度 $\theta = 12^\circ$, 重复测试 5 次,取平均值,得到转向架重心的三维坐标.

表 1 试验结果 Table 1 Test results				mm
试验序号	纵向坐标	横向坐标	垂向坐标	
1	1 241.1	712.2	552.4	
2	1 242.4	718.9	555.7	
3	1 256.6	719.4	548.7	
4	1 255.2	717.6	549.2	
5	1 244.5	714.8	557.4	
均值	1 247.96	716.58	552.68	
理论计算值	1 255.0	719.5	550.0	
误差/%	0.6	0.4	0.49	

表 1 中理论计算结果是将转向架进行三维几何建模后,输入各零部件的材料属性,通过软件分析得到转向架重心的空间坐标. 对比表 1 中数据,各坐标的测试结果与理论计算值接近,误差较小,证明了测试模型建立的准确性,以及测试方案的合理性;同时,转向架重心的纵向及横向坐标值与 (下转第 294 页)