

文章编号:1671-1637(2013)04-0045-06

客车转向架回转阻力矩特性

石怀龙, 邬平波, 罗 仁

(西南交通大学 牵引动力国家重点实验室, 四川 成都 610031)

摘 要:建立车辆系统数学模型,理论分析转向架相对车体的回转运动过程,推导装备空气弹簧转向架车辆的回转阻力系数计算公式。利用参数试验台进行回转阻力系数测试,验证数学模型和理论计算结果的可信性,分析动拖车在不同载重下的回转阻力系数分布规律,研究空簧状态对回转阻力系数的影响。分析结果表明:空簧正常、过充状态下理论计算值均低于试验值,最大相差0.02,因为理论计算时未考虑不同转动速度下的空簧动刚度特性与其他悬挂部件的阻力作用;回转阻力系数与转动角度和转动速度成正比,1.0 (°)·s⁻¹时的回转阻力系数要远大于0.2 (°)·s⁻¹时的结果,最大相差0.047;在空簧失气状态下,试验值大于计算值,且转动速度越大,差异越显著;空簧过充对回转阻力系数影响不大,最危险工况为拖车空车在空簧失气状态下,回转阻力系数为0.093。

关键词:铁道车辆;转向架;回转阻力矩;回转阻力系数;转动速度;转动角度

中图分类号:U270.331

文献标志码:A

Bogie rotation resistance torque characteristics of passenger car

SHI Huai-long, WU Ping-bo, LUO Ren

(State Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan, China)

Abstract: The mathematical model of railway passenger car was established to analyze the rotation motion between bogie and carbody. The bogie rotation resistance factor formula was built for the vehicle with air springs bogies. Laboratory test was used to measure the resistance factor to verify mathematical model and calculation results. The distribution rule of bogie rotation resistance factor was summarized for motor and trailer car under different loading conditions. The influence of air spring state on the resistance factor was analyzed. Analysis result shows that the theory calculation result is slightly smaller than the test result for air springs in inflated and over-inflated states, and the maximum error is 0.02, which is resulted from that the dynamic stiffness change of air spring at different rotation velocities and other suspension components' influence in theory calculation are ignored. The greater the rotation angle and the rotation velocity are, the greater the rotation resistance factor becomes. The resistance factor at 1.0 (°)·s⁻¹ is much greater than that at 0.2 (°)·s⁻¹, and the extreme error is 0.047. In the deflated state of air spring, the test result is bigger than the calculation result, and the difference increases with the rotation velocity. The air spring in over-inflated state has little effect on the rotation resistance factor. In the deflated state of air spring, for trailer car of tare load, the rotation resistance factor reaches its most dangerous value 0.093. 7 tabs, 6 figs, 14 refs.

Key words: railway vehicle; bogie; rotation resistance torque; rotation resistance factor; rotation

收稿日期:2013-02-13

基金项目:“十一五”国家科技支撑计划项目(2009BAG12A02);“十二五”国家科技支撑计划项目(2011BAG10B01)

作者简介:石怀龙(1986-),男,吉林四平人,西南交通大学工学博士研究生,从事车辆动力学研究。

导师简介:邬平波(1968-),男,浙江奉化人,西南交通大学教授,工学博士。

velocity; rotation angle

Author resumes: SHI Huai-long(1986-), male, doctoral student, +86-28-87600882, hl_shi@126.com; WU Ping-bo(1968-), male, professor, PhD, +86-28-87600882, wupingbo@163.com.

0 引言

铁道客车转向架回转阻力矩是评价车辆曲线通过性与直线运行稳定性的重要综合指标,是对车辆悬挂系统装配后整体性能的考核,其直接影响着列车运行的安全性、稳定性和平稳性等。转向架回转阻力矩过大会恶化车辆的曲线通过性能,过小会降低车辆直线运行时的稳定性,因此,在设计阶段选择正确的回转阻力矩计算方法与进行试验验证是非常有必要的。

Eickhoff 等系统研究了车辆系统动力学模型仿真计算理论,但数学模型中不考虑空气弹簧、扭杆等部件与载荷相关的摩擦性能、橡胶元件的迟滞特性等参数的影响^[1],这与车辆实际状态有差异;Iwnicki 等参照 GM/RT2141 标准分析了转向架参数试验流程、注意事项及评价指标等^[2-3],但未考虑铁道客车空气弹簧状态对回转阻力矩的影响;Simson 等系统研究了货车三大件式转向架在不同承载方式下的载荷分布情况,研究回转阻力矩对车辆通过曲线时轮轨接触、磨损的影响,过大阻力矩将加剧车轮磨损,采用导向拉杆可减小阻力矩^[4-7];Emereole 等仿真计算了货车系统轮轨型面、承载结构型面、载重、速度等对阻力矩、磨损与车辆爬轨特性的影响^[8],但未分析影响回转阻力矩的悬挂参数;Wu 等通过仿真分析了货车心盘摩擦力对车辆曲线通过性、横向稳定性的影响^[9-10];任利惠等利用转向架参数试验台进行了三大件转向架的抗菱刚度试验,也进行了回转阻力矩设计,但试验结果曲线误差较大^[11];黄彪等介绍了转向架参数台数据处理方法,消除数据误差影响,但只进行了正常状态下回转阻力矩试验^[12];Huang 等分析了两轴客车转向架阻力矩计算方法并进行试验验证,试验结果与计算结果吻合,但未考虑转动速度与空簧失气状态等工况^[13];苏建等进行了空簧失气状态下的回转阻力测试,但计算方法繁琐且试验结果值得商榷^[14]。综上,现有研究大多是关注货车旁承结构的回转阻力矩的计算和试验,而关于铁道客车回转阻力矩设计与研究的文献很少,因此,计算带有空簧转向架的回转阻力矩和开展试验研究具有重要意义。

本文分析了装备空气弹簧转向架车辆的回转阻

力矩与阻力系数计算公式,利用参数试验台进行回转阻力系数测试,分析测试结果并对理论计算结果进行验证,总结空簧正常充气、失气和过充状态下回转阻力系数分布规律,研究车辆载重、空簧状态对回转阻力系数的影响。

1 数学计算模型

车辆系统动力学模型见图 1。当车体相对转向架发生转动时,若不考虑系统非线性因素,作用在转向架上的回转阻力矩可近似表示为图 2。其中: a 为转向架轴距之半; L 为车辆定距; K_s 、 C_s 分别为空簧垂向刚度和阻尼; K_p 、 C_p 分别为一系悬挂(每轴箱)垂向刚度和阻尼; θ 为转向架与车体间相对转动角度; θ_{\max} 为最大转动角度; M 为转向架回转阻力矩; M_F 为最大转动角度时的回转阻力矩; K 为悬挂装置等效回转刚度。试验时只保留车体垂向和点头自由度。

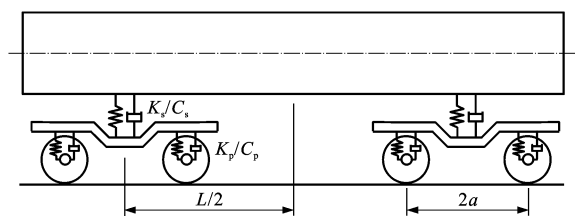


图 1 车辆系统动力学模型

Fig. 1 Dynamics model of vehicle system

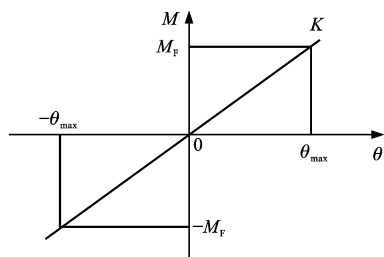


图 2 阻力矩与转动角的关系

Fig. 2 Relation between resistance torque and rotation angle

2 回转阻力矩计算

2.1 回转阻力系数定义

转向架的回转阻力系数定义为^[2]

$$X = \frac{M}{2Qa} \quad (1)$$

式中: X 为转向架回转阻力系数; Q 为被试转向架平

均轴重。

GM/RT2141 规定铁道客车转向架的回转阻力系数应满足 $X \leq 0.1$ 要求。

2.2 回转阻力矩计算

2.2.1 空簧正常/过充状态

此时转向架回转刚度主要由空簧纵向刚度提供,空簧正常和过充状态下的刚度值取决于空簧动态刚度特性,回转阻力矩 M_1 计算如下

$$M_1 = 2K_1 d^2 \sin(\theta) \quad (2)$$

$$\theta = \arcsin(L/2R) \quad (3)$$

式中: K_1 为空簧纵向刚度; d 为左右空簧横向跨距之半,其值为 1.0 m; R 为曲线半径,其值为 300 m。

2.2.2 空簧失气状态

此时转动刚度由空簧内部橡胶堆提供,摩擦力大小与垂向载荷相关,将摩擦因数考虑为常数时回转阻力矩 M_2 为

$$M_2 = 2W\mu d \quad (4)$$

式中: W 为空簧垂向载荷; μ 为橡胶堆水平方向摩擦因数, $\mu=0.09$ 。

表 1 为车辆在不同空簧状态下的基本参数,其中 W1 代表空车,W2 代表重车;T 代表拖车,M 代表动车。如,拖车空车状态可表示为 T-W1,其他工况表达方式类似。表 2 为转向架回转阻力系数的理论计算结果,可知回转阻力系数计算值在 0.22~0.60 范围内,并有如下规律。

表 1 车辆基本参数

Tab. 1 Basic parameters of vehicles

工况	空簧失气	空簧正常	空簧过充	Q/kN	W/kN
	$K_1/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-1})$				
M-W1	62.5	149	169	103	62.5
M-W2	134.5	182	212	175	134.5
T-W1	59.8	152	172	90	59.8
T-W2	141.5	188	218	171	141.5

表 2 回转阻力系数计算结果

Tab. 2 Calculation results of rotation resistance factors

工况	空簧失气	空簧正常	空簧过充
M-W1	0.044	0.030	0.034
M-W2	0.055	0.022	0.025
T-W1	0.048	0.035	0.040
T-W2	0.060	0.023	0.027

(1)在空簧正常、过充状态下,动、拖车在重车工况下回转阻力系数均低于空车工况;相同工况下,拖车指标大于动车,且空车时差异明显。

(2)空簧过充与失气状态下的回转阻力系数均

大于空簧正常充气状态,且失气状态下回转阻力系数最大。

3 回转阻力系数测试

利用试验台模拟车辆通过曲线时转向架与车体之间的转动过程,见图 3,图中阴影区域为可绕结构中心自由旋转的转动平台,试验中带动转向架绕其中心往复转动。转动平台由液压作动器驱动,通过记录作动器位移和载荷的时程曲线来计算车体与转向架间的相对转动速度、角度和阻力矩等参数。其中: b 为试验台 2 个作动器水平间距之半,其值为 1.25 m; u_1 、 u_2 分别为 2 个作动器的输出位移,正弦波同步反相控制。

试验中施加位移控制使转动台绕结构中心发生往复回转运动,通过调整 2 个作动器位移幅值与频率实现不同曲线半径和通过速度的模拟,转动平台摩擦阻力矩、转速、转角计算方法见图 4。其中: F_1 为转动角度为 θ 时的作动器载荷,即转向架相对车体的回转阻力,此时的回转阻力矩为 M ; F_0 为相对转角为 0 时的作动器载荷,视为试验台摩擦回转阻力。试验时转动台在 0-1-2 状态之间往复运动。

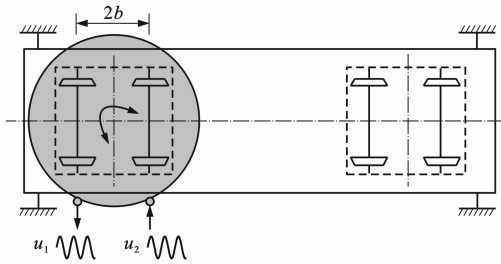


图 3 转向架回转阻力矩测试台

Fig. 3 Test rig of bogie rotation resistance torque

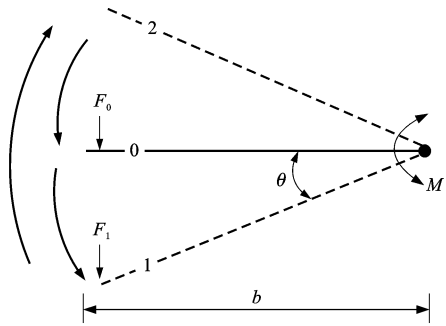


图 4 转动平台阻力矩与角度计算方法

Fig. 4 Calculation method for resistant torque and angle of rotation platform

3.1 试验条件

各工况下前后转向架空簧状态应完全相同,即全部处于正常充气、失气或过充状态,要求在整个测

试过程中空簧系统始终处于正常工作状态,试验期间内不出现显著升降。应考虑车辆运营过程中的各种工况,保证在最大偏转条件下车辆动态限界不超标且无干涉。分别测试动车、拖车在 $0.2 (^{\circ}) \cdot s^{-1}$ 和 $1.0 (^{\circ}) \cdot s^{-1}$ 条件下的回转阻力系数。

3.2 转动平台摩擦回转阻力矩测试

测试转动平台空载状态下的摩擦回转阻力矩时,在 2 种回转速度下,得到转动台自身摩擦阻力 F_0 ,从而计算摩擦回转阻力矩。

3.3 转向架回转阻力矩测试

Step 1: 测量转向架轴重,计算整车质量。

Step 2: 将一端转向架放在转动平台上并固定,另一端转向架自由,参照图 3 固定车体。

Step 3: 通过作动器加载,记录转向架回转阻力 F_1 ,转向架回转阻力矩为

$$M = 2b(F_1 - F_0) \quad (5)$$

Step 4: 计算转向架回转阻力系数 X 。

Step 5: 重复步骤 Steps 1~4,完成其他工况下的回转阻力系数测试。

3.4 试验结果分析

转动平台空载时的作动器输出载荷曲线见图 5,取连续 3 个周期的波峰均值 $F_0 = 0.213 \text{ kN}$ (图 5(a)) 和 $F_0 = 0.079 \text{ kN}$ (图 5(b)) 作为转动台的摩擦回转阻力, t 为时间。试验中各工况进行 3 次测试,连续记录多个周期数据,取稳定状态数据分析,回转阻力系数试验结果见表 3~6。表 3 为拖车空车在 $0.2 (^{\circ}) \cdot s^{-1}$ 时的试验结果,表 4 为拖车空车在 $1.0 (^{\circ}) \cdot s^{-1}$ 时的试验结果,表 5 为拖车重车在

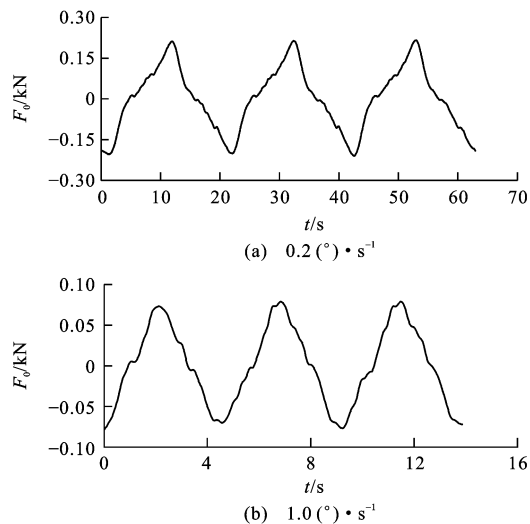


图 5 试验台空载状态回转阻力曲线
Fig. 5 Rotation resistance curves of rotation platform without load

$0.2 (^{\circ}) \cdot s^{-1}$ 时的试验结果,表 6 为拖车重车 $1.0 (^{\circ}) \cdot s^{-1}$ 时的试验结果。

表 3 试验结果 1

Tab. 3 Test result 1

参数	空簧失气	空簧正常	空簧过充
F_0/kN	0.213	0.213	0.213
F_1/kN	4.222	4.444	4.350
b/m	1.25	1.25	1.25
$M/(\text{kN} \cdot \text{m})$	10.023	10.578	10.343
Q/kN	88.29	88.29	88.29
a/m	1.25	1.25	1.25
X	0.045	0.048	0.047

表 4 试验结果 2

Tab. 4 Test result 2

参数	空簧失气	空簧正常	空簧过充
F_0/kN	0.079	0.079	0.079
F_1/kN	8.328	5.394	5.525
b/m	1.25	1.25	1.25
$M/(\text{kN} \cdot \text{m})$	20.623	13.288	13.615
Q/kN	88.29	88.29	88.29
a/m	1.25	1.25	1.25
X	0.093	0.060	0.062

表 5 试验结果 3

Tab. 5 Test result 3

参数	空簧失气	空簧正常	空簧过充
F_0/kN	0.213	0.213	0.213
F_1/kN	7.099	7.284	7.592
b/m	1.25	1.25	1.25
$M/(\text{kN} \cdot \text{m})$	17.215	17.678	18.448
Q/kN	168.242	168.242	168.242
a/m	1.25	1.25	1.25
X	0.041	0.042	0.044

表 6 试验结果 4

Tab. 6 Test result 4

参数	空簧失气	空簧正常	空簧过充
F_0/kN	0.079	0.079	0.079
F_1/kN	13.203	9.022	8.816
b/m	1.25	1.25	1.25
$M/(\text{kN} \cdot \text{m})$	32.810	22.358	21.843
Q/kN	168.242	168.242	168.242
a/m	1.25	1.25	1.25
X	0.078	0.053	0.052

表 7 为 $0.2 (^{\circ}) \cdot s^{-1}$ 和 $1.0 (^{\circ}) \cdot s^{-1}$ 工况下的试验结果,对比分析如下。

(1) $1.0 (^{\circ}) \cdot s^{-1}$ 试验结果远大于 $0.2 (^{\circ}) \cdot s^{-1}$ 试验结果,在拖车空车空簧失气状态最大相差

表7 试验结果
Tab. 7 Test results

工况	0.2 (°) · s ⁻¹			1.0 (°) · s ⁻¹		
	空簧失气	空簧正常	空簧过充	空簧失气	空簧正常	空簧过充
T-W1	0.045	0.048	0.047	0.093	0.060	0.062
T-W2	0.041	0.042	0.044	0.078	0.053	0.052
M-W1	0.043	0.050	0.044	0.076	0.059	0.048
M-W2	0.043	0.041	0.042	0.078	0.049	0.053

0.047,表明回转阻力系数和转动速度相关,转动速度越快,阻力系数越大。

(2)不同速度下,空簧正常、过充时试验结果差异主要受空簧动态刚度影响,通常刚度随载荷作用频率的提高而变大,即与转动速度相关;同一速度下,空簧正常和充气状态下试验结果基本一致,表明空簧过充对结果影响不大。

(3)空簧失气时2种转动速度下结果差异较大,回转阻力系数最大值为0.093,为拖车空车在空簧失气状态。

表2为理论计算结果,将其与0.2 (°) · s⁻¹工况下试验结果(表7)进行对比,结果如下。

(1)空簧正常与过充状态下计算值均低于试验值,最大相差0.02,这是由于理论计算时不能考虑空簧的动态刚度特性,且转向架与车体间其他连接部件如扭杆、减振器等也提供小部分阻力作用,突出车辆组装后进行参数测试的必要性。

(2)空簧失气状态下重车的计算值平均大于试验值0.014,而空车的计算值与试验值基本一致,这与空簧内部的应急橡胶堆的刚度与摩擦因数非线性有关,载荷越大,刚度越大,转动速度越快,刚度越大。

(3)理论与试验结果对比说明在进行回转阻力系数计算时应考虑空簧动态刚度的影响,在不同转动速度下输入相应的空簧刚度值或摩擦因数,以修正理论计算公式。

图6为在不同空簧状态下,拖车在空车载重下的回转阻力矩与转动角度关系,对比结果如下。

(1)在空簧正常、过充状态,2种转动速度下的回转阻力矩与角度迟滞特性曲线基本一致,表明空簧过充对回转阻力矩影响不大;转动速度越快,回转阻力矩越大。空簧失气时迟滞特性最明显,与空簧有气情况下曲线分布差异显著,且在曲线变坡点位置回转阻力矩达到最大值,表明在车辆快速进出曲线时,空簧失气状态下的阻力矩最大,曲线通过性能最差,安全性指标最低。

(2)转向架回转阻力矩与转动角度关系曲线表

明回转刚度基本为常数,主要受空簧纵向刚度影响,验证了理论数学模型的可信性。试验中阻力矩在最大转角位置出现突变点,这主要受转动平台因运动方向变化而产生的惯性力的影响,试验中并未达到悬挂系统刚度非线性位置。

(3)相对于理论计算方法,试验可分析转向架回转刚度的迟滞特性,主要由空簧阻尼或橡胶堆摩擦阻尼提供,是对车辆悬挂系统装配后整体性能的考核。

4 结 语

(1)转向架回转阻力系数与转动角度和转动速度相关,转动速度越快,阻力系数越大。

(2)最危险工况为1.0 (°) · s⁻¹时拖车空车在空簧失气工况,回转阻力系数为0.093。

(3)空簧正常、过充状态下计算值低于试验值,说明理论计算时应考虑空簧动态刚度影响。试验表明空簧过充对结果影响不大,而空簧失气时2种速度下试验结果差异较大,说明理论计算时应考虑橡胶堆刚度与摩擦因数的非线性特性。

(4)试验结果验证了数学模型的可信性,校核了理论计算,指出了误差可能来源,在理论计算时应考虑空簧动态刚度特性与其他部件对转向架回转阻力系数的影响。

参考文献:

References:

- [1] EICKHOFF B M, EVANS J R, MINNIS A J. A review of modelling methods for railway vehicle suspension components[J]. Vehicle System Dynamics, 1995, 24(6/7): 469-496.
- [2] GM/RT2141—1998, resistance of railway vehicles to derailment and roll-over[S].
- [3] IWICKI S. Handbook of Railway Vehicle Dynamics[M]. New York: Taylor and Francis Group, 2006.
- [4] SIMSON S, PEARCE M. Longitudinal impact forces at 3 piece bogie center bearings[C]//ASME. Proceedings of JRC 2005. Pueblo: ASME, 2005: 45-50.
- [5] SIMSON S, BRYMER B. Gauge face contact implications of bogie rotation friction in curving[C]//Institute of Materials Engineering Australasia Ltd. 7th Conference on Contact Mechanics and Wear of Rail/Wheel Systems. Brisbane: Institute of Materials Engineering Australasia Ltd., 2006: 549-554.
- [6] SIMSON S, PEARCE M. Wheel wear losses from bogie rotation resistance, effects of cant and speed[C]//ASME. Proceedings of JRC 2006. Atlanta: ASME, 2006: 109-114.
- [7] SIMSON S, BRYMER B. Laboratory testing of bogie rotation friction with applied track twisting forces[C]//Railway Technical Society of Australasia. Conference on Railway Engineering 2008. Perth: Railway Technical Society of Australasia,

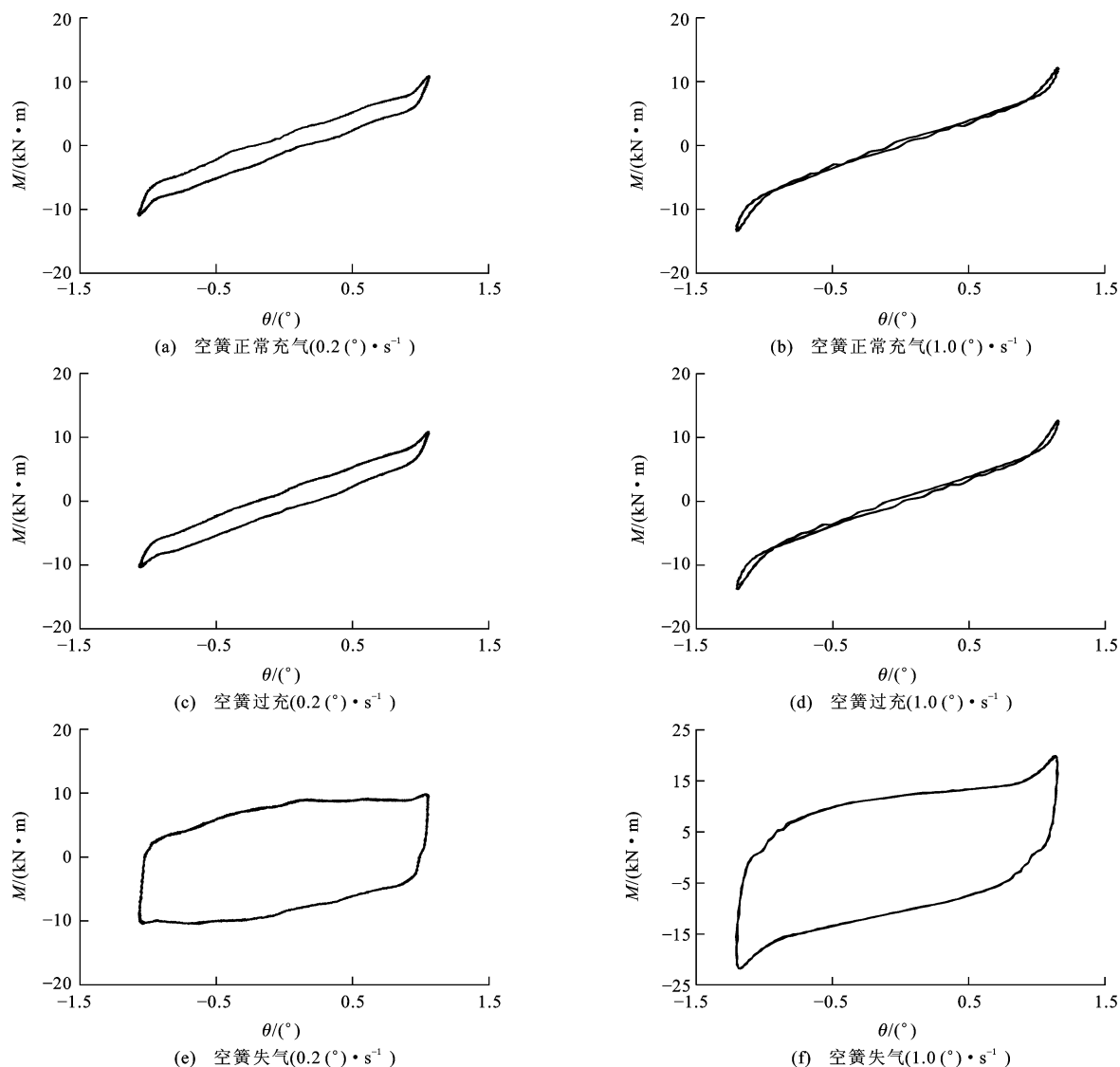


图 6 回转阻力矩与转动角度关系曲线

Fig. 6 Relation curves of rotation resistance torque and angle

2008; 395-402.

- [8] EMEREOLE O, SIMSON S, BRYMER B. A parametric study of bogie rotation friction management utilizing vehicle dynamic simulation[C]//Institute of Materials Engineering Australasia Ltd. 7th International Conference on Contact Mechanics and Wear of Rail/Wheel Systems. Brisbane: Institute of Materials Engineering Australasia Ltd., 2006; 535-541.
- [9] WU H, ROBEDA J. Effect of bogie center plate lubrication on vehicle curving and lateral stability[J]. Vehicle System Dynamics, 2004, 41(1): 292-301.
- [10] WU H, ROBEDA J, GUINS T. Truck center plate lubrication practice study and recommendations[R]. Pueblo: Association of American Railroads/Transport Technology Center, 2004.
- [11] 任利惠, 张 辉, 胡用生. 货车转向架动力学参数测试台研究与试验[J]. 中国铁道科学, 2001, 22(3): 72-78.
REN Li-hui, ZHANG Hui, HU Yong-sheng. Research and experiment on test-bed for measuring dynamics parameters of

freight car bogie[J]. China Railway Science, 2001, 22(3): 72-78. (in Chinese)

- [12] 黄 彪, 邬平波, 杨世杰, 等. 转向架参数测试台数据处理方法[J]. 交通运输工程学报, 2009, 9(6): 54-58.
HUANG Biao, WU Ping-bo, YANG Shi-jie, et al. Data-processed method of bogie parameters test rig[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2009, 9(6): 54-58. (in Chinese)
- [13] HUANG Y M, WANG T S. Rotational resistance behavior and field testing of two-axle bogie design[J]. Vehicle System Dynamics, 1999, 31(1): 47-63.
- [14] 苏 建, 王秀刚, 曹晓宁, 等. 转向架回转特性的测定[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2013, 41(5): 6-10, 22.
SU Jian, WANG Xiu-gang, CAO Xiao-ning, et al. Determining turning characteristics of bogies[J]. Huazhong University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2013, 41(5): 6-10, 22. (in Chinese)