

地铁车辆车体侧摆试验及参数灵敏度分析

王爱彬¹ 罗 仁² 奚佳欣³

(1. 中车长春轨道客车股份有限公司磁浮研究所, 130062, 长春; 2. 西南交通大学牵引动力国家重点实验室, 610031, 成都; 3. 吉林建筑大学基础科学部, 130118, 长春//第一作者, 高级工程师)

摘 要 通过车辆动力学仿真来计算车辆动态限界的方法在我国已被广泛应用。动力学模型是影响车体动态限界计算精度的关键因素, 可以通过车体倾摆试验来验证动力学模型。以某地铁列车的拖车和动车为研究对象, 建立了车辆非线性动力学仿真模型, 开展了车体侧摆试验。通过仿真和试验的相对误差分析, 验证了仿真模型的准确性; 设计了关键悬挂参数的正交试验, 分析了关键悬挂参数对车体侧摆角度灵敏度的影响, 以及关键悬挂件非线性对误差的影响。

关键词 地铁车辆; 动态限界; 动力学模型; 参数灵敏度

中图分类号 U270.1⁺4

DOI:10.16037/j.1007-869x.2021.02.015

Metro Vehicle Body Sway Test and Parameters Sensitivity Analysis

WANG Aibin, LUO Ren, XI Jiaxin

Abstract The calculation method of kinematic envelope by dynamic model simulation has been widely applied in China. Dynamic model is the key factor influencing vehicle body kinematic envelope calculation precision, which can be verified through vehicle body sway test. Taking the trailer and motor vehicles of certain metro train as the research object, by establishing vehicle non-linear dynamic simulation model, vehicle body sway test is carried out. Through analysis of relative error between simulation and test, the accuracy of simulation model is verified. Orthogonal tests of key suspension parameters are designed, and the influence of these parameters on vehicle body side-swing angle sensitivity is analyzed, as well as the impact of key suspension component non-linearity on error.

Key words metro vehicle; kinematic envelope; dynamic model; parameter sensitivity

First-author's address CRRC Changchun Railway Vehicles Co., Ltd., 130062, Changchun, China

现代轨道车辆为了提高乘坐舒适度, 往往采用较软的一系悬挂和二系悬挂, 但同时车体更容易发生较大的侧滚运动。因此, 校核车辆限界是所有新

造车辆设计前期必须履行的一个分析环节^[1-2]。车辆限界计算有多种方法。动力学仿真能够模拟车辆的真实运动状态, 可以考虑各种非线性悬挂和复杂运营环境。通过动力学仿真来计算车辆动态限界的方法已在我国得到广泛应用, 该方法成为高速列车、城市轨道交通列车和出口车辆的重要设计手段。由于车辆限界与安全性息息相关, 因此车辆限界计算所用的车辆模型需要经过充分校验, 才能够确保车辆限界分析结果准确可靠。车体侧摆试验是验证车辆动力学模型的重要手段, 通过由对比试验和仿真计算得到的车辆关键控制点的横向和垂向位移、车体和构架的侧滚角度来评价模型的准确程度。

侧摆测试与国内熟知的柔性系数测试几乎相同, 都可以用来衡量车体相对于轨面发生侧滚运动的难易程度, 进而评估车辆的动态限界。文献[3]通过对多种简化柔性系数公式的对比, 分析了各悬挂参数对车辆柔性系数、车辆偏移的影响。文献[4]采用动力学仿真分析修正限界的方法来考察车辆的动态偏移, 且由动力学仿真得到的柔度系数略小于 UIC 505-5—2010 标准的计算结果, 但能够考虑轨道超高、悬挂非线性等的影响。大多数文献仅对比了通过不同的限界标准公式和动力学仿真结果来验证车辆姿态偏移的合理性, 并未与实际测试数据进行对比修正。

本文主要通过侧摆试验及仿真分析考察车辆的侧摆姿态偏移; 通过正交试验分析参数灵敏度, 考察可能存在的参数误差对车体侧摆试验测试结果的影响; 分析了一系悬挂非线性的影响, 指出了动力学建模的关键因素。

1 地铁车辆车体侧摆试验介绍

如图 1 所示, EN 14363—2016 标准中车辆侧摆测试过程^[5]如下: 通过在车轮或轴箱下加垫片, 模

拟车辆在一个带有超高轨道上的倾斜。在加垫倾斜操作过程中进行车辆姿态数据收集,随后对测量数据分析得出偏移位移特性信息。

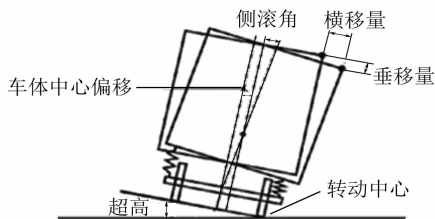


图1 车辆侧摆试验原理图

依据标准要求,逐级抬升试验中车辆单侧车轮高度,直至满足合同要求的最大超高或欠超高,再逐级降低车辆单侧车轮高度至水平位置。按照超高分别为 50 mm、85 mm、120 mm 和 140 mm 依次加载,然后再按以上超高反向卸载。如图 2 所示,试验中实际加载的超高值与预测值非常接近,大部

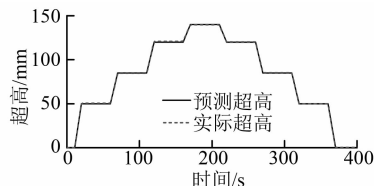


图2 车辆侧摆试验中超高加载曲线

2 侧摆试验车体偏移理论分析

由于侧摆试验与柔性系数试验内容基本一致,因此侧摆试验的车体偏移计算借用柔性系数试验的理论公式。根据 UIC 505-5—2010 标准中对柔性系数定义^[6-7],假设车辆停在超高角为 η 的倾斜轨道上,悬挂在弹簧上的车体发生倾斜,并与轨面的垂线间形成角 η_* ,则:

$$\frac{\eta_*}{\eta_0} = S = \frac{\left(1 - \frac{h_3}{h_2}\right) \left(1 - \frac{G_1 h_1 + G_2 h_3 + G_2^2 / C_{2y}}{2C_1 b_1^2}\right) + \frac{2C_2 b_2^2 + 2K_\phi}{2C_1 b_1^2} \left(1 + \frac{G_1 h_1}{G_2 h_2} + \frac{G_2}{h_2 C_{2y}}\right)}{\frac{2C_2 b_2^2 + 2K_\phi}{G_2 h_2} - \left[\left(1 - \frac{h_3}{h_2}\right) \left(1 - \frac{G_1 h_1 + G_2 h_3 + G_2^2 / C_{2y}}{2C_1 b_1^2}\right) + \frac{2C_2 b_2^2 + 2K_\phi}{2C_1 b_1^2} \left(1 + \frac{G_1 h_1}{G_2 h_2} + \frac{G_2}{h_2 C_{2y}}\right)\right]} \quad (1)$$

式中:

S ——车辆柔性系数;

η_* ——车体侧滚角, ($^\circ$);

G_1 ——整车车体转向架簧上部分重力, N;

G_2 ——车体簧上重力, N;

h_1 ——转向架簧上部分重心距车轴中心线的高度, m;

h_2 ——车体簧上部分重心距车轴中心线的高度, m;

h_3 ——二系弹簧上支承面距车轴中心线的高度, m;

C_1 ——车辆一侧一系悬挂弹簧垂向刚度, N/m;

C_2 ——车辆一侧二系悬挂弹簧垂向刚度, N/m;

C_{2y} ——整车车辆二系悬挂弹簧横向刚度, N/m;

K_ϕ ——每个转向架的抗侧滚扭杆侧滚角刚度, Nm/rad;

b_1 ——一系悬挂横向距离之半, m;

b_2 ——二系悬挂横向距离之半, m。

借用车辆柔性系数公式推导出车体的横向位移 s_{way} 为:

$$s_{way} = Y \sin \eta_* + G_2 \sin(\eta_* + \eta_0) / C_{ky} \quad (2)$$

$$C_{ky} = \frac{2C_{1y} C_{2y}}{2C_{1y} + C_{2y}} \quad (3)$$

式中:

C_{1y} ——车辆单个转向架一系悬挂弹簧横向刚度, N/m;

C_{ky} ——整车车辆一、二系悬挂弹簧综合横向刚度, N/m;

Y ——车体轮廓的垂向坐标。

车体的垂向位移 d_{rop} 为:

$$d_{rop} = X \cos \eta_* \quad (4)$$

式中:

X ——车体轮廓的横向坐标。

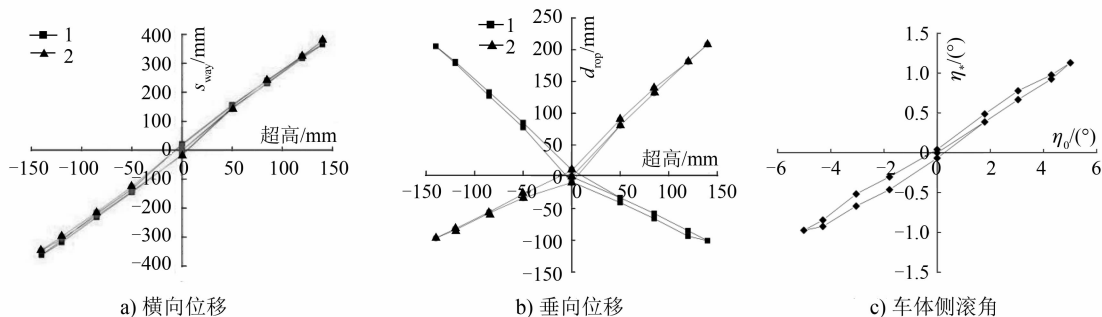
3 静态侧摆试验数据分析

图3为某地铁 Mp 车依据 EN 14363—2016 标准开展车体侧摆试验的现场照片。Mp 车和 Tc 车的试验过程相同,车体侧摆规律亦类似。



图3 某地铁 Mp 车车体侧摆试验

试验过程中,通过全站仪识别出试验车辆测试



注: 1 和 2 分别代表位于车体横断面左、右对称的测点。

图4 Mp 车车体测试点位移和侧滚角试验结果

4 侧摆试验与仿真对比分析

英国标准 GM/RC 2641—2009^[8]中要求:“车体侧滚角仿真与试验最大偏差不大于 0.229° , 平均偏差不大于 0.115° 。”

考虑一系弹簧及空气弹簧刚度的非线性特性, 利用 SIMPACK 动力学软件建立车辆动力学模型。

依据静态侧摆测试试验内容, 计算出不同加载超高下的车体侧滚角, 并与实测数据进行误差比对, 如图5所示。由图5可知, 车体侧滚角试验值与仿真值的最大偏差和平均偏差均小于标准要求, 说明仿真分析所用的动力学模型较为可靠, 可用于后续动态限界分析。

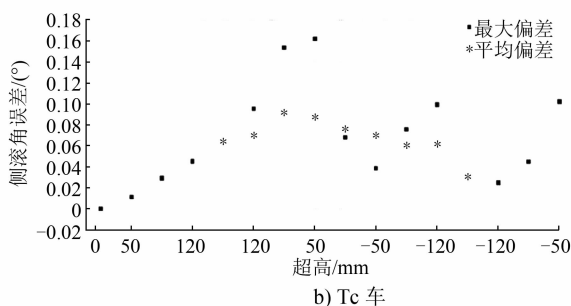
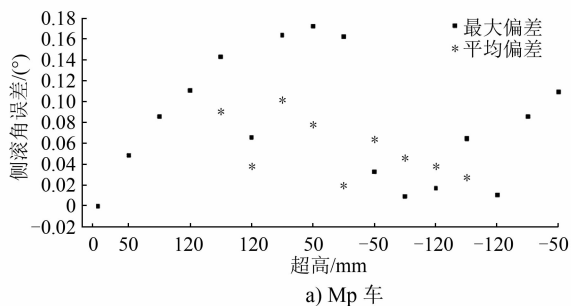


图5 车体侧摆试验与仿真分析对比图

5 侧摆试验参数灵敏度分析

在车体侧摆测试试验与仿真分析对比过程中, 部分参数如重心高度等无法直接测量, 多由理论模型估算得出; 另外一、二系悬挂刚度在生产制造时也存在一定误差。因此, 为了深入了解这些偏差或误差对侧摆分析结果的影响, 对参数灵敏度进行了分析。

正交试验设计^[9-11]是用正交表来安排试验并进行数据分析的一种方法。利用正交试验设计, 能够用较少的试验次数较快地找出影响因子对指标的影响。依据正交试验的正交表特点, 设计本次试验正交表为 $L_{27}(3^9)$, 共包含 9 个因子、3 种水平的 27 次试验。依据影响车体侧滚角的主要参数, 选取 9 个影响因子考察。涉及质量及重心高度的数值需考虑 $\pm 10\%$ 的配置偏差, 涉及悬挂刚度的因子需考

考虑±15%或±10%的制造误差,详见表 1。

表 1 参数灵敏度分析的影响因子

序号	影响因子	误差/%
1	G_1	±10
2	G_2	±10
3	h_1	±10
4	h_2	±10
5	h_3	±10
6	C_1	±15
7	C_2	±15
8	C_{2y}	±15
9	K_ϕ	±10

5.1 关键参数灵敏度分析

采用车辆动力学仿真方法对上述 27 次试验开展仿真分析,获取每次试验的车体侧滚角数值,并计算每个参数的极差和水平变化率,结果如图 6~7 所示。由图 6~7 可见:车体质量和重心对车体侧滚角的影响最明显,其次是悬挂刚度,影响最小的是转向架质量、重心及空簧支撑面高度;悬挂刚度中,二系弹簧垂向刚度对车体侧滚角的影响最显著;随着超高增大,车体质量、重心、悬挂刚度极值也随之增加,但当超高到达临界值后,这些参数的极值趋于稳定。

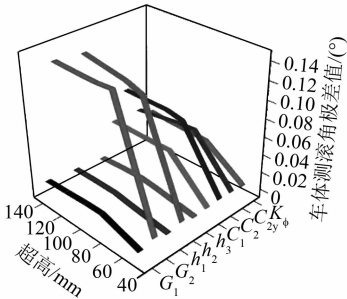


图 6 不同车辆参数下的车体侧滚角极差值

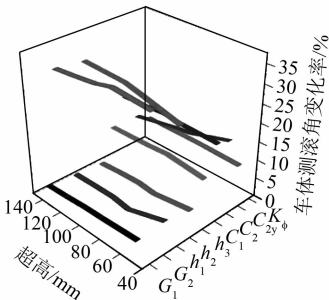


图 7 不同车辆参数下的车体侧滚角变化率

5.2 非线性参数的影响分析

一系橡胶弹簧的垂向刚度具有较强非线性,尤

其是在较大的载荷下。一系弹簧垂向力-位移非线性如图 8 所示。由图 8 可知,橡胶弹簧的加载曲线和卸载曲线不重合。动力学仿真模型中一般仅考虑其平均幅值非线性,即采用加载曲线和卸载曲线的平均值作为一系垂向刚度特性。

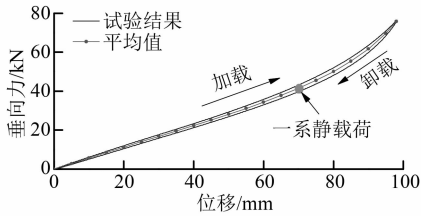


图 8 一系弹簧垂向力-位移非线性曲线

分别采用一系静载荷位置的橡胶弹簧垂向线性刚度、实测的位移-平均力非线性曲线建立一系悬挂模型,计算得到某工况下的构架侧滚角度,然后与理想的构架侧滚角度相减,得到构架侧滚角误差。图 9 为侧摆试验与两种仿真模型下的侧滚角误差对比图。由图 9 可知,考虑一系垂向非线性后,构架侧滚角误差从 0.393°减小到 0.309°,该值和试验误差 0.311°非常接近。

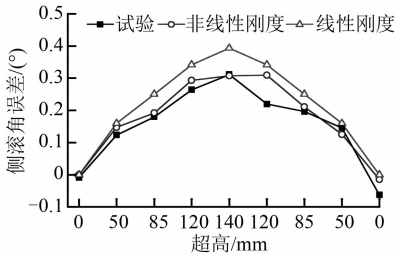


图 9 侧摆试验与两种仿真模型下的侧滚角误差对比图

6 结论

- 1) 为了保障用于动态限界分析的动力学模型准确可靠,需要依据 EN 14363—2016 标准开展侧摆试验。
- 2) 依据 GM/RC 2641—2009 标准开展车体侧摆测试,并与仿真分析结果对比,得出该车辆满足标准要求的误差范围。
- 3) 按照 DOE (试验设计) 方法建立正交试验表,对侧摆测试结果影响较为明显的 9 个车辆参数开展灵敏度分析,得出影响因子从高到低排列为车体质量、车体重心、二系弹簧垂向刚度、二系弹簧横向刚度、一系弹簧垂向刚度、抗侧滚扭杆刚度、转向架簧间部分质量、转向架簧间部分重心和二系弹

(下转第 68 页)

值偏离正常运行状况的程度来预测产品未来可靠性的过程。传统的方法往往是将非线性问题线性化,或者拟合为类线性进行分析。本文使用了基于深度学习的数据驱动方法。轨道交通车辆系统部件性能往往呈非线性或多元混沌形式,基于深度学习的数据驱动方法可有效解决非线性拟合和高维计算问题,从而实现预测精度的提高。最后通过评估系统部件剩余使用寿命的可靠性、维护经济性,制定最优的维护计划任务,为维护人员提供最优的维护间隔、任务和资源分配,从而实现高水平的经济可靠性预防维护。

2 结语

本文提出了一种先进的维护决策技术,该技术集成了 RCM 方法以进行维护决策机制管理,并采用数据挖掘策略来提高预防性维护的监控预测诊断精度。本文提出的维护决策技术主要存在如下优势:

1) 精益成本。整套维护策略是在 RCM 架构下构建的,可帮助维护业主确定关键组件及其潜在故障、最优的维护任务以及最佳的维护间隔。整套策略支持自适应和动态维护策略,从而达到降本增效的目的。

2) 预测维护精准。通过 PHM 的运行监控、健

康评估及故障预测等功能,实现精准的预防修计划编制,使得车辆维护趋于经济、可靠、安全。通过集成数据挖掘技术实现多级挖掘以及深度挖掘,在整个维护策略中,采用基于深度学习的架构,构建数据挖掘模型,有效地解决非线性和高维灾难问题,从而实现智能诊断与精准预测。

参考文献

- [1] GUPTA G, MISHRA R P, MUNDRA N. Development of a framework for reliability centered maintenance[C]//IEOM Society International. Proceedings of International Conference on Industrial Engineering and Operations Management. Bandung, Indonesia: IEOM Society International, 2018.
- [2] 蒋太立. 基于 RCM 理论的维修决策研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2006.
- [3] 吕一农. 以可靠性为中心的维修(RCM)在电力系统中的应用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2005.
- [4] 陈佳槟. 基于 RCM 的直线电机车辆维修决策系统研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2019.
- [5] 陈琛. 基于 PHM 技术的风电机组状态监测与故障诊断方法研究[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2019.
- [6] NIU G, PECHT M. A framework for cost-effective and accurate maintenance combining CBM RCM and data fusion[C]//IEEE. The 8th International Conference on Reliability, Maintainability and Safety. New York: IEEE, 2009.

(收稿日期: 2020-09-05)

(上接第 63 页)

簧上支承面。建议在后续的产品设计和试验中,应对上述参数予以重点关注。

4) 车辆悬挂非线性特性对仿真结果有较大影响,尤其是一系垂向刚度、二系垂向和横向刚度的非线性特性。

参考文献

- [1] IWNIICKI S. Handbook of railway vehicle dynamics[M]. Boca Raton: CRC Press, 2006.
- [2] 罗仁, 石怀龙. 高速列车系统动力学[M]. 成都: 西南交通大学, 2019.
- [3] 李学良. 轨道车辆的柔性系数研究[J]. 铁道车辆, 2011(8): 4.
- [4] 张晓明. 基于动力学仿真的地铁车辆动态包络线计算方法[J]. 城市轨道交通研究, 2012(3): 38.
- [5] CENELEC. Railway applications — Testing and simulation for the acceptance of running characteristics of railway vehicles — Running behavior and stationary tests; EN 14363—2016[S].

Brussels: CENELEC, 2016.

- [6] UIC. Railway transport stock rolling stock construction gauge: UIC 505 - 1—2006 [S]. Paris: International Union of Railways, 2006.
- [7] UIC. History, justification and commentaries on the elaboration and development of UIC leaflets of the series 505 and 506 on gauges: UIC 505 - 5—2010 [S]. Paris: International Union of Railways, 2010.
- [8] Rail Safety and Standards Board Limited. Recommendations for vehicle static testing; GM/RC 2641—2009[S]. London: RSSB, 2009.
- [9] 沈文林. 动车组参数灵敏度分析及参数优化[D]. 成都: 西南交通大学, 2013.
- [10] 段亮. 动力学参数对出口铁路客车扭曲试验的影响[J]. 机械工程学报, 2019(6): 116.
- [11] 姚金山. 车辆强度和动力性能测试技术[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1993.

(收稿日期: 2020-09-05)