DOI: 10.3901/JME.2019.04.148

高寒动车组-40℃环境下动力学性能*

滕万秀^{1,2} 罗 仁¹ 石怀龙¹ 曾 京¹

(1. 西南交通大学牵引动力国家重点实验室 成都 610031;

2. 中车长春轨道客车股份有限公司高速列车系统集成国家工程实验室 长春 130062)

摘要: 低温环境对高速动车组动力学性能影响显著, 需要掌握低温下的车辆参数变化范围, 针对-40℃或极低温工况鲜有研究。基于悬挂元件低温特性试验结果, 建立高寒动车组非线性动力学仿真模型, 并将常温环境下的动力学仿真结果与线路试验结果进行对比验证; 将车辆系统悬挂参数、轮轨匹配、轮轨界面参数考虑为正态随机分布, 采用拉丁超立方采样方法组合得到 300 种计算工况, 仿真研究高寒动车组在-40℃低温环境运行时的动力学性能。300 km/h 速度条件下, 车辆运行稳定性和安全性能满足标准要求, 但新镟修车轮在直线运行工况下的横向平稳性较常温环境下差, 主要是由于车辆发生了横向低频晃动; 低温引起橡胶元件和减振器的刚度和阻尼增大, 导致在与车体上心滚摆接近的频率范围内, 前后转向架同向蛇行运动的阻尼比降低, 引发以车体滚摆为主的横向晃动, 因此高寒动车组需要注意预防新镟轮后的车体晃动现象。为低温环境下的高速动车组悬挂参数使用范围和动力学性能设计提供了参考。

关键词: 动车组; 动力学仿真; 线路试验; 随机因素; 极低温环境

中图分类号: U270

Dynamics Behaviour of High-speed Train at the Low Temperature of -40℃

TENG Wanxiu^{1,2} LUO Ren¹ SHI Huailong¹ ZENG Jing¹

(1. State Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031;

2. National Engineering Laboratory of High-speed Train System Intergration, CRRC Changchun Railway Co. Ltd., Changchun 130062)

Abstract: The low temperature has great effect on the vehicle system dynamics of high-speed train, which needs to know the range of variation of suspension parameters in low temperature, but there exists rare researches on the dynamics behaviour of railway vehicle when it bears a quite low temperature of -40℃ or lower. A non-linear dynamics railway vehicle model is built for a high-speed train running in cold climate on the basis of low-temperature dynamics performance tests for its suspension components. The modelling accuracy is validated by comparing the simulated results with the field measurements within the normal temperature. In the numerical simulations, the stochastic characteristics of suspension parameters components, wheel-rail interactions, wheel-rail interfaces are considered as normal distributions. Then the Latin hypercube sampling (LHS) method is applied to design numerical scenarios, and a total of 300 cases is considered during the numerical analysis. It shows that the hunting stability and safety indices still meet the requirements declared in respective criterion at the speed of 300 km/h, while the lateral ride quality under extreme low-temperature case is a bit severe than that under normal temperature case resulting from the lateral sway motion of car body when the vehicle with reprofiled wheels running on tangent tracks. Lab tests and simulations demonstrate that the low-temperature increases the rubber stiffness and dampers' damping significantly and leads to a low damping ratio of the in-phase hunting movements of two bogies, which share a similar frequency with the swaying motion of car body. The swaying movement of car bod has the rotation center higher than the position of center of mass of car body. This contributes a lateral swaying motion of car body, and then attentions shall be paid for the newly reprofiled high-speed vehicles in case of ca body swaying. A reference is provided for the design of suspension parameters and dynamic behavior of high-speed train under the low temperature situation.

Key words: high-speed trains; dynamics simulation; field tests; stochastic parameters; extreme low-temperature

* 国家重点研发计划(2016YFB1200501)和牵引动力国家重点实验室自主课题(2015TPL_Z03)资助项目。20180301 收到初稿, 20180806 收到修改稿

0 前言

我国高速列车具有运行跨越区间大、持续运行时间长、运行速度高的特点,随着动车组运行地域不断扩大,线路状况、气候等边界条件趋于多样化。高速列车需要有稳定可靠的优良动力学性能和绝对安全性,这种运营条件给动力学性能带来极大的挑战。尤其我国北方多条客运专线都属于高寒气候条件,列车和线路一年中承受的温度差高达 80~90 ℃,行驶于高寒地区的动车组与常规动车组相比,面临着更加突出的动力学问题。由于低温下线路条件、车辆参数均会发生很大变化,低温下车辆的振动性能和乘坐性能比常温下明显增大。我国开展了高寒动车组低温动力学试验,但试验温度高于-30 ℃。通过悬挂元件低温试验发现,温度越低对悬挂参数的影响越大,为此在极端-40 ℃低温状态下,通过动力学仿真研究车辆动力学性能十分必要。

国内外对高速列车极低温度环境下的动力学性能研究较少。宋春元等^[1]研究了低温条件下车辆悬挂参数按比例增加对动力学性能的影响。罗仁等^[2]研究了高速列车在典型工况下的线路运行适应性,但未考虑低温的影响。徐腾养等^[3]对低温环境下的抗蛇行减振器动态特性开展了研究,为低温环境动力学仿真提供了参数输入。孙琳等^[4]研究了低温状态下车辆橡胶元件材料特性的变化,没有给出动力学参数变化。王付胜等^[5]研究了轨道车辆用耐低温橡胶减振元件的制作,在-40 ℃下刚度增加 50%左右。LENNART^[6]针对欧洲高速列车冬季运营状态开展了系统调研,主要是针对冰雪危害,对低温下的动力学性能没有开展研究。

针对我国东北冬季极端气温条件,高寒动车组仍然以 300 km/h 运营。由于型式试验只是线路运营随机集合中的个别样本,因此需要通过动力学仿真研究在各种边界条件综合作用下、-40 ℃极寒条件下高寒动车组的动力学性能,全面掌握高寒动车组极低低温环境下的动力学表现。

1 计算模型

以运行在哈尔滨-大连客运专线(以下简称哈大客专)上某高寒动车组为研究对象,考虑在-40 ℃极寒条件,建立车辆系统动力学仿真模型。车辆系统一系和二系悬挂元件中有大量的橡胶件、油压减振器,温度对其动态特性影响显著。同时需要注意,

悬挂元件本身刚度和阻尼存在一定的误差,一般在±15%以内。考虑到橡胶老化、温度的影响,参数变化范围可能进一步扩大。从大的空间域和长的时间域来看:不同车辆之间、同一车辆不同运营里程下,其悬挂参数不同;高速铁路轨道状态和轮轨界面参数也随着时间和空间存在随机分布,要全面掌握高寒动车组的动力学性能变化域,必须考虑这些随机因素的综合作用^[7-8]。

1.1 车辆系统动力学模型

铁道车辆是一个复杂的非线性多体系统,数值仿真计算时需要根据研究目的和要求,假定或简化一些次要因素,而对动力学性能影响较大的主要因素要尽可能做出符合实际情况的模拟。根据高寒动车组参数,在 SIMPACK 软件中建立动车和拖车的多刚体系统动力学模型,由于车间耦合较弱,故只针对单车开展分析,如图 1 拖车模型。动、拖车模型独立自由度分别为 74 个和 42 个,自由度组成如表 1 所示。轮对浮沉和侧滚自由度与其横移运动相关,为非独立自由度。齿轮箱中大齿轮点头自由度与轮对点头运动相关,为非独立自由度;小齿轮点头自由度与大齿轮点头运动相关,为非独立自由度;小齿轮与电机转子通过力元连接模拟弹性联轴器。采用非线性空簧物理模型^[9-10],橡胶件为弹簧-阻尼并联模型。

图 1 拖车车辆动力学模型

表 1 车辆系统动力学模型自由度

部件	伸缩	横移	浮沉	侧滚	点头	摇头
车体(1)	√	√	√	√	√	√
构架(2)	√	√	√	√	√	√
轮对(4)	√	√	√	√	√	√
轴箱(8)					√	
电机定子(4)	√	√	√	√	√	√
电机转子(4)					√	
齿轮箱(4)					√	
大齿轮(4)					√	
小齿轮(4)					√	

1.2 低温环境下的悬挂元件参数测试

对高寒动车组主要橡胶元件、液压减振器开展常温和低温下的参数测试,测试环境温度包括

-40℃低温、-20℃低温、20℃常温和 60℃高温。试验共涉及 9 种橡胶件和所有液压减振器。

从图 2 可见,橡胶件的刚度随着环境温度降低而增大。与常温相比,在-40℃低温时增加 10%到 45%,在-20℃低温时增加 5%到 30%,在 60℃高温时减小 2%到 9%。液压减振器的阻尼特性也随着温度发生变化,在 20℃和 60℃时差异不明显。温度为-40℃、20℃和 60℃时,速度 ± 0.02 m/s 对应的阻尼系数为 636 kN·s/m、582 kN·s/m 和 581 kN·s/m,即-40℃对应的阻尼系数相对于常温增幅 9%;速度 ± 0.01 m/s 对应的阻尼系数为 923 kN·s/m、455 kN·s/m 和 434 kN·s/m,即-40℃对应的阻尼系数相对于常温增幅 102%。综合考虑卸荷速度内的阻尼,-40℃对应的阻尼系数相对于常温平均增幅 55%,但卸荷力变化不大。

(a) 橡胶件刚度

(b) 液压减振器载荷-速度关系曲线

图 2 悬挂元件低温试验结果

1.3 参数的随机分布特性

将在不同温度下试验测试的悬挂元件刚度和阻尼名义值作为平均值,将这些参数在制造和运用中的最大误差的三分之一设为方差,采用正态分布模拟参数的变化范围。根据哈大客专高寒动车组实测的、不同运营里程下的多个车轮踏面外形样本,与实测的多个钢轨外形、标准打磨钢轨外形匹配,得到仿真用的轮轨匹配关系,等效锥度变化范围在 0.10 到 0.50 之间。假设轮轨界面参数和轨道几何参数也满足正态分布,其变化范围见表 2。

表 2 轨道参数变化

参数	均值	最小值	最大值
轮轨摩擦因数	0.350	0.150	0.550
蠕滑饱和系数	0.900	0.750	1.050
轨距/m	1.435	1.432	1.438
轨底坡(1:X)	40	30	50

根据我国高速铁路实测轨道不平顺谱的分布特性,建立多个典型的轨道不平顺样本,每个仿真工况随机选择这些样本作为轨道激励。按照哈大客专的典型线路曲线和直线设置仿真线路,见表 3。

表 3 仿真线路设置

编号	曲线半径/km	外轨超高/mm	运行速度/(km/h)
1	3	155	250
2	5	80	300
3	7	60, 175	300
4	8	150	300
5	9	130	300
6	10	110	300
7	直线	—	300

1.4 仿真分析方法

由于车辆系统悬挂参数、运行边界条件都具有随机特性,不同车辆之间、同一车辆在较大的时间尺度或空间尺度下,其悬挂参数和动力学边界条件都是不同的。因此,在研究高寒动车组低温下动力学性能时,有必要考虑这些随机因素的影响,才能得到完整的动力学性能分布特性,全面掌握高寒动车组的运行性能。

由于动力学性能分析的时间段一般较短,针对上节的随机参数,车辆在每个动力学仿真样本内参数可以认为是不变的。针对每种仿真工况,事先将以上随机因素按照分布特性生成数表,采用拉丁超立方采样方法^[11]在数表中均匀取值并组合得到 300 种计算工况,得到每个仿真工况的悬挂参数和边界条件,然后开展动力学数值仿真。

2 线路试验和模型验证

高寒动车组分别在哈大客专、长吉线、郑西客专上开展了型式试验。动车组在长吉线试验时,气温-27~-12℃,最高试验速度 250 km/h;郑西客专试验时,气温 3~16℃,最高试验速度 350 km/h;哈大客专试验时,气温 20~35℃,最高试验速度 385 km/h。针对这三次试验选取典型工况的试验结果与仿真结果对比,验证仿真模型的正确性,包括运行安全性指标、运行平稳性指标、运动稳定性指标,这里仅给出哈大客专部分试验与仿真结

果的对比。

图 3、4 是长吉线某典型工况的试验和仿真结果对比。车辆最高运行速度 250 km/h, 仿真时选用低温条件下的悬挂参数, 并通过试验时选用的实际线路。仿真和试验得到的轮轴横向力、横向平稳性指标分布范围随运行速度变化规律基本相同, 而其他线路、环境温度和车速条件下的型式试验具有类似的规律, 说明仿真模型可靠。

图 3 轮轴横向力对比

图 4 横向平稳性指标对比

3 -40 °C 条件下动力学性能预测

选用-40 °C 的车辆悬挂参数, 并考虑悬挂参数、运行边界条件等随机因素的影响, 仿真研究高寒动车组在-40 °C 极寒环境下的动力学性能。

3.1 蛇行运动稳定性

高速列车运营中以构架端部横向加速度 3~9 Hz 带通滤波值是否连续多次超过限值来评判车辆

运动稳定性。本文按照国内试验常用的方法, 对车辆前、后构架端部横向加速度进行 0.5~10 Hz 带通滤波, 然后取最大值作为该车的评判值, 这比列车实际评判值更大。

图 5 为拖车构架加速度最大值随等效锥度变化规律, 按等效锥度范围分为 6 个等级。其中标准轮轨匹配的等效锥度约 0.17, 实测新镟修车轮踏面等效锥度均值 0.12 左右, 实测磨耗到限踏面等效锥度均值 0.45 左右(采用了超限磨耗车轮外形, 实际运营中在 0.4 左右已经镟轮)。图 5 中含有实际加速度最大值离散点及其分位数统计值、平均值和最小/最大值, 其中, 每个空心原点对应一个仿真工况的加速度最大值; 矩形框上下限为 25% 和 75% 分布范围; 其他粗实线为 5%、50% 和 95% 范围; 小实心矩形为最大值; 实心五角星为最小值; 空心矩形为平均值。可见, 随着等效锥度的增加, 加速度平均值、最大值均增大; 在等效锥度 0.4 以下的正常运营条件范围内, 构架端部横向加速度未超限值(0.8g)。

图 5 构架横向加速度与等效锥度的关系

3.2 运行平稳性

车辆运行平稳性受到多种因素的影响, 冬季悬挂参数变化造成的影响也不容忽视, 后续结果同时给出动拖车数据或者仅给出两个车中的最大值。图 6 为预测-40 °C 条件下的横向平稳性指标, 与图 4 中常温时相比平均增大 0.2 左右, 且轮轨匹配关系仍然是横向平稳性指标的最重要影响因素。随着等效锥度的增加, 平稳性指标先减小后增大, 在等效

图 6 横向平稳性指标与等效锥度的关系

锥度 0.35 左右达到最小。当等效锥度小于 0.2 时,部分工况下平稳性指标接近或者超过 2.5,此时车辆系统发生了比较明显的横向低频晃动,频率在 1.3~1.6 Hz。在等效锥度 0.45 左右时,部分工况下的横向平稳性指标也达到 2.5,这是由于等效锥度过大,蛇行运动稳定性不足引起车体晃动。

通过分析发现,低等效锥度下车体横向平稳性指标增大的主要原因是:低温引起悬挂参数增大,在与车体上心滚摆频率接近的范围内,前后转向架同向蛇行运动的阻尼比降低,从而发生与车体滚摆为主的横向晃动,如图 7 所示。图中圆圈从小到表示等效锥度从 0.05 增大到 0.3,间隔 0.01;纵坐标 D 表示阻尼比,横坐标 F 为频率。低温下如果等效锥度小于 0.07,前后转向架同向蛇行运动的阻尼比出现负值,从而发生更加严重的车体横向晃动。低温下车体蛇行运动频率比常温下低,尤其是大等效锥度情况。

图7 车体悬挂模态和蛇行模态对比

图 8 分析了线路条件对横向平稳性指标的影响,可见,直线轨道上横向平稳性指标离散度最大,且超过 2.5 的工况基本都是直线轨道,即高寒动车组在直线轨道上更容易发生横向低频晃动。在半径 7 km 曲线上部分点的横向平稳性指标也偏大,结合表 4 统计结果发现,这主要发生在超高 60 mm 工况,

图8 不同线路条件下的横向平稳性指标

此时动车组以 300 km/h 运行的欠超高达到 92 mm,二系横向止挡处于压缩状态从而提供附加横向刚度,结合较低的等效锥度则导致车辆横向平稳性变差。同样的半径 7 km 曲线,如果超高 175 mm,则过超高仅 23 mm,横向止挡的贡献明显减小。由于低等效锥度发生在新线修踏面情况,因此,需要注意预防低温环境下新线修动车组在直线线路运行时的晃车现象。

表4 半径 7 km 曲线的横向平稳性指标

超高/mm	横向平稳性指标			
	平均值	方差	最小值	最大值
60	2.08	0.20	1.70	2.48
175	1.90	0.14	1.70	2.32

3.3 运行安全性

以脱轨系数为例分析安全性指标,从图 9 可见,等效锥度较小时脱轨系数比较离散,且部分工况最大值达到 0.6。等效锥度大于 0.25 之后,脱轨系数明显减小。这主要是因为小等效锥度工况下车辆发生了横向低频晃动,轮对横向位移较大导致脱轨系数增大。

图9 不同轮轨匹配下的脱轨系数最大值

从轮轴横向力、脱轨系数、轮重减载率等运行安全性指标的计算结果可见,高寒动车组的运行安全性指标均小于相关标准规定限值,且有足够的安全裕量,这里不再给出具体结果。

4 结论

(1) 通过悬挂元件的参数测试,得到温度对刚度和阻尼的影响;橡胶件的刚度随着环境温度降低而增大, -40°C 低温时比常温增加 10%~45%;液压减振器的阻尼最大增加约 50%,但卸荷力基本不变。

(2) 考虑悬挂参数、运行边界条件的随机分布特征,仿真与试验得到的动力学指标分布范围基本相同,验证了仿真模型的准确性。

(3) 高寒动车组在-40℃环境下的动力学性能满足标准要求,运行安全性指标具有足够的裕量。

(4) 架端部横向加速度0.5~10 Hz带通滤波最大值随等效锥度的增加而增大,等效锥度小于0.4时车辆具有足够的运动稳定性。

(5) 较低等效锥度时,高寒动车组在-40℃环境下更容易发生横向晃动,使车辆横向平稳性指标较常温条件下差,脱轨系数也有一定增大。因此,需要注意预防新镗修动车组在低温环境下容易发生车体晃动。

参考文献

- [1] 宋春元, 罗仁. 低温条件悬挂参数变化对动力学性能的影响研究[C/CD]//第八届中国智能交通年会论文, 合肥, 2013: 309-214.
SONG Chunyuan, LUO Ren. Study on the effects of parameters on the dynamic performance of the low temperature suspension[C/CD]//Proceedings of the 8th China Intelligent Transportation Annual Conference, Hefei, 2013: 314-318.
- [2] 罗仁, 曾京, 戴焕云, 等. 高速动车组线路运行适应性[J]. 交通运输工程学报, 2011, 11(6): 37-43.
LUO Ren, ZENG Jing, DAI Huanyun, et al. Running adaptability of high-speed EMU[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2011, 11(6): 37-43.
- [3] 徐腾养, 池茂儒, 田向阳, 等. 抗蛇行减振器内部油液温度对其动态特性的影响[J]. 机车电传动, 2016, 6: 43-46.
XU Tengyang, CHI Maoru, TIAN Xiangyang, et al. Influence of oil temperature of yaw damper on dynamic performance[J]. Electric Drive for Locomotives, 2016, 6: 43-46.
- [4] 孙琳, 林化强, 林鹏, 等. 北方高寒地区轨道车辆橡胶材料的力学特性分析[J]. 材料开发与应用, 2016, 31(6): 88-92.
SUN Lin, LIN Huaqiang, LIN Peng, et al. Mechanical properties analysis of rubber materials for rail vehicles in the north China[J]. Development and Application of Materials, 2016, 31(6): 88-92.
- [5] 王付胜, 高新文, 曹江勇, 等. 轨道车辆用耐低温橡胶减振元件的研究[J]. 铁道车辆, 2012, 50(11): 22-24.
WANG Fusheng, GAO Xinwen, CAO Jiangyong, et al. Research on low temperature resistant rubber damping elements for rail vehicles[J]. Rolling Stock, 2012, 50(11): 22-24.
- [6] LENNART K. High-speed train operation in winter climate[R]//KTH Trains for Tomorrow's Travellers Report, 2011.
- [7] 罗仁, 胡俊波, 王一平. 考虑随机因素的高速列车动力学模拟方法及应用[J]. 铁道车辆, 2016(10): 1-6, 8.
LUO Ren, HU Junbo, WANG Yiping. Dynamics simulation method and the application on high speed trains with consideration of random factors[J]. Rolling Stock, 2016(10): 1-6, 8.
- [8] 罗仁, 李然, 胡俊波, 等. 考虑随机参数的高速列车动力学分析[J]. 机械工程学报, 2015, 51(24): 90-96.
LUO Ren, LI Ran, HU Junbo, et al. Dynamic analysis of high-speed train with stochastic parameters[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(24): 90-96.
- [9] FACCHINETTI A, MAZZOLA L, ALFI S, et al. Mathematical modelling of the secondary airspring suspension in railway vehicles and its effect on safety and ride comfort[J]. Vehicle System Dynamics, 2010, 48(Suppl.1): 429-449.
- [10] 高红星, 池茂儒, 朱旻昊, 等. 空气弹簧模型研究[J]. 机械工程学报, 2015, 51(4): 108-115.
GAO Hongxing, CHI Maoru, ZHU Minhao, et al. Study on air spring model[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(4): 108-115.
- [11] IMAN R, CAMPBELL J, HELTON J. An approach to sensitivity analysis of computer models. I- Introduction, input, variable selection and preliminary variable assessment [J]. Journal of Quality Technology, 1981, 13: 174-183.

作者简介: 滕万秀, 男, 1979年出生, 工程师, 博士研究生。主要研究方向为机车车辆系统动力学。

E-mail: 13844841121@126.com

罗仁(通信作者), 男, 1979年出生, 副研究员, 硕士研究生导师。主要研究方向为车辆系统动力学。

E-mail: luoren@swjtu.edu.cn