DOI:10.19344/j. cnki. issn1671-5276.2024.01.006

# 列车在特殊风工况下的运行品质分析

刘帅,梁树林,王欢声,池茂儒

(西南交通大学 牵引动力国家重点实验室,四川 成都 610031)

摘 要:基于时速400 km 中国标准化动车组的动力学参数,利用 SIMPACK 软件建立动力学模型,模拟列车在无风、"中 国帽"横风激扰、列车交会以及通过隧道等状态下的运行平稳性,以便支撑动车组的设计工作。研究表明:在无风、两列 车交会运行以及通过隧道的状态下,车速对列车横向平稳性的影响最大;在"中国帽"横风激扰的状态下,车速对列车横 向平稳性以及乘坐舒适度的影响较大;在无风、横风激扰以及通过隧道的状态下,随着车速的增大,头车、中间车和尾车 的平稳性以及乘坐舒适度都在增大。

关键词:横风;列车交会;隧道风;运行品质;SIMPACK

中图分类号:TP391.9 文献标志码:A 文章编号:1671-5276(2024)01-0029-04

# Train Operating Quality Analysis under Special Wind Conditions

LIU Shuai, LIANG Shulin, WANG Huansheng, CHI Maoru

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

**Abstract**: Based on the dynamic parameters of Chinese standardized EMU with a speed of 400 kilometers per hour, the dynamic model is established by SIMPACK software, and the smooth running of the train in the state of no wind, "Chinese hat" crosswind disturbance, train rendezvous and through the tunnel is simulated, so as to support the design work of the EMU. The results show that in the state of no wind, the intersection of two trains and the passage of tunnels, the speed of the train has the greatest impact on the lateral stability of the train. In the state of "Chinese hat" crosswind agitation, the train speed has a greater impact on the lateral stability of the train and riding comfort. In absence of wind, with crosswind disturbance and when passing through tunnel, the smoothness of head, middle and tail cars and the riding comfort increase with the increase of train speed.

Keywords: crosswind; train rendezvous; tunnel wind; running quality; SIMPACK

# 0 引言

近年来,随着我国科学技术的发展和进步,我 国的高铁建设取得了举世瞩目的成就,不断创造 奇迹和惊喜是中国高铁给人们留下的最深刻印 象。截至2019年底,中国高铁不仅在运行速度上 以350 km/h领先于世界各国,而且在运行规模上 也以3.5万公里的营业里程稳居世界第一<sup>[1]</sup>。

当列车以正常车速行驶于铁道线路上时,会 不可避免地受到各种风载的作用,比如横风、隧道 风以及列车交会运行时的风载。随着动车组行驶 速度的增加,相关的空气动力学问题也会变得愈 加突出<sup>[2-3]</sup>,导致列车在通过这些区段或受到这 些风载的作用时,列车的动力学性能会受到明显 影响。国内外学者针对侧风效应和列车交会问题 已经开展了诸多数值模拟研究<sup>[4-6]</sup>。当列车进入 隧道时,隧道与列车对空气的挤压作用引发的压 力波会导致隧道内交变压力的产生,一方面会严 重影响乘客舒适性,另一方面也会对隧道内衬砌 与车体结构的强度提出了一定的挑战<sup>[7-8]</sup>。当列 车在隧道内交会时,该问题会更加严重<sup>[9-10]</sup>。动 车组高速交会时,交会侧的空气压力发生突变,产 生瞬态压力冲击,会对车体钢结构、侧窗和车体横 向稳定性带来不利影响。交会过程中若遭遇较大 的横风,可使交会压力波幅值增加,列车将承受更 大的横向冲击载荷<sup>[11-12]</sup>。我国地形及气象条件 比较复杂,不少行车区段已处于强风区,而随着高 速铁路的不断发展,强风区内动车组交会不可避 免<sup>[13-14]</sup>。因此,研究动车组在各种特殊风载下的 气动效应具有很强的现实意义。

本文基于时速 400 km 中国标准化动车组的 动力学参数,利用 SIMPACK 软件建立动力学模型,模拟了列车在无风、横风激扰、列车交会以及 通过隧道等状态下的运行平稳性,以便支撑动车

基金项目:国家自然科学基金区域联合基金项目(U21A20168)

第一作者简介:刘帅(1996-),男,河南漯河人,硕士研究生,研究方向为车辆系统动力学,3213871706@qq.com。

组的设计工作。

#### 1 动力学模型的建立

采用计算机数值仿真分析是车辆系统动力学 最重要的研究手段之一,也是最常用的动力学分析 方法。为研究列车中车辆的动力学性能等动力学 问题,需要建立相应的动力学分析模型。动力学数 值仿真的核心问题是,根据分析问题的需求,从实 际物理模型抽象出有针对性的、可靠的数学模型和 多体动力学模型,然后采用合理的数值方法对所分 析的问题进行研究。归根到底就是仿真模型要有 针对性,要准确可靠,数值方法要尽量减小误差。 动力学仿真涉及机车车辆结构、多体系统动力学、 数值计算方法、数据处理方法等多个方面<sup>[15]</sup>。

时速 400 km 中国标准化动车组的车轮踏面外 形采用 LMA 踏面,钢轨采用 CHN60 钢轨,轮对内 侧距 1 353 mm,轨道不平顺采用实测轨道谱。时速 400 km 中国标准化动车组动力学模型由 3 节车组 成,每节车由 1 个车体、2 个构架、4 个轮对和 8 个 转臂组成,利用 SIMPACK 软件建立时速 400 km 中 国标准化动车组的系统动力学模型如图 1 所示。



图 1 內速 400 Km 中国标准化幼年组的 动力学模型

对于时速 400 km 中国标准动车组的运行平稳 性计算,采用武广 50 轨道谱,轨道具有 4 个方向的 随机不平顺。在进行运行平稳性计算时,认为轨道 的随机输入是各态历经的,因此可以用一段有限长 的时间历程曲线来模拟车辆在实际线路上的运行 情况。为了较为完全地反映车辆系统的实际动态 响应,计算时先让车辆在一段无激扰直线轨道上运 行,然后在一段足够长的不平顺轨道上运行。

评价车辆运行品质的主要指标包括车辆运行 横向平稳性、垂向平稳性以及乘坐舒适度等,因此 本文主要基于所建立的时速 400 km 中国标准动 车组的动力学模型,仿真计算列车在无风、横风激 扰、列车交会以及通过隧道等状态下的运行品质, 以便支撑动车组设计工作。

#### 2 无风工况下的车辆运行品质分析

当列车在无风工况下运行时,列车运行的横 向平稳性、垂向平稳性以及乘坐舒适度分别如 图 2—图 4 所示。





由图 2—图 4 分析可知在无风状态下:1)车 速对列车横向平稳性的影响较大,对列车垂向平 稳性以及乘坐舒适度的影响较小;2)在新轮和磨 耗轮两种状态下,随着车速的增大,头车、中间车 和尾车的横向平稳性、垂向平稳性以及乘坐舒适 度都在增大;3)同一车速等级下,在新轮状态下, 列车头车的横向平稳性最大,中间车次之,尾车最 小,3节车在设定的各个速度等级下均满足横向 平稳性的限值要求。在磨耗轮状态下,列车中间 车的横向平稳性最大,且当车速大于 400 km/h 时,中间车的横向平稳性超过限值要求。

## 3 有风工况下的车辆运行品质分析

#### 3.1 "中国帽"横风

当列车在横风的作用下运行时,列车运行的 横向平稳性、垂向平稳性以及乘坐舒适度分别如 图 5---图 7 所示。



横向平稳性(横风)

图 5



图 7 乘坐舒适度(横风)

由图 5—图 7 可知在横风激扰下:1)车速对 列车横向平稳性以及乘坐舒适度的影响较大,对 列车垂向平稳性的影响相对较小;2)在新轮和磨 耗轮两种状态下,随着车速的增大,头车、中间车 和尾车的横向平稳性、垂向平稳性以及乘坐舒适 度都在增大;3)当列车以同一车速运行时,均是列 车头车的横向平稳性最大,中间车次之,尾车最 小,且在磨耗轮状态下,当车速大于 400 km/h 时, 中间车的横向平稳性指标略微超过限值要求。建 议限定车辆运行速度在 400 km/h 以下来保证车 辆具有较优的运行平稳性。

#### 3.2 列车交会运行

当两列车交会运行时,列车运行的平稳性以 及乘坐舒适度分别如图 8—图 10 所示。





图9 垂向平稳性(交会运行)



由图 8—图 10 分析可知当两列车交会运行 时:1)车速对列车横向平稳性的影响较大,对列车 垂向平稳性以及乘坐舒适度的影响相对较小;2) 同一车速等级下,在新轮状态下,列车头车的横向 平稳性最大,中间车次之,尾车最小,3 节车在设 定的各个速度等级下均满足横向平稳性的限值要 求;在磨耗轮状态下,列车中间车的横向平稳性最 大,且当车速大于 400 km/h 时,中间车的横向平 稳性超过限值要求。建议当两列车在交会运行 时,限定车辆运行速度在 400 km/h 以下来保证车 辆具有较优的运行平稳性。

## 3.3 隧道内运行

当列车在隧道中运行时,列车运行的横向平 稳性、垂向平稳性以及乘坐舒适度分别如图 11图 13 所示。











由图 11—图 13 分析可知当列车在隧道中运 行时:1)车速对列车横向平稳性的影响较大,对列 车垂向平稳性以及乘坐舒适度的影响相对较小; 2)在新轮和磨耗轮两种状态下,随着车速的增大, 头车、中间车和尾车的横向平稳性、垂向平稳性以 及乘坐舒适度都在增大;3)同一车速等级下,在新 轮状态下,列车头车的横向平稳性最大,中间车次 之,尾车最小,3节车在设定的各个速度等级下均 满足横向平稳性的限值要求;在磨耗轮状态下,列 车中间车的横向平稳性最大,且当车速大于 400 km/h时,中间车的横向平稳性最大,限定车辆运行 速度在 400 km/h 以下来保证车辆具有较优的运 行平稳性。

#### 4 结语

本文主要基于所建立的时速 400 km 中国标

准动车组的动力学模型,仿真计算列车在无风、横 风激扰、列车交会以及通过隧道等状态下的车辆 运行品质,所得结论具体如下。

1) 在无风、两列车交会运行以及通过隧道的 状态下,车速对列车横向平稳性的影响较大,对列 车垂向平稳性以及乘坐舒适度的影响较小; 在横 风激扰的状态下,车速对列车横向平稳性以及乘 坐舒适度的影响较大, 对列车垂向平稳性的影响 相对较小。

2) 在无风、横风激扰以及通过隧道的状态下, 在新轮和磨耗轮两种状态下,随着车速的增大,头 车、中间车和尾车的横向平稳性、垂向平稳性以及 乘坐舒适度都在增大。

3) 在无风、列车交会运行以及通过隧道的状态下, 同一车速等级下, 在新轮状态下, 列车头车的横向平稳性最大, 中间车次之, 尾车最小, 3节车在设定的各个速度等级下均满足横向平稳性的限值要求。在磨耗轮状态下, 列车中间车的横向平稳性最大, 且当车速大于 400 km/h 时, 中间车的横向平稳性超过限值要求。

4) 当列车在横风激扰下运行时,在新轮和磨 耗轮两种状态下,当列车以同一车速运行时,均是 列车头车的横向平稳性最大,中间车次之,尾车最 小,且在磨耗轮状态下,当车速大于 400 km/h 时, 中间车的横向平稳性指标略微超过限值要求。建 议当列车在横风激扰下行驶时,限定车辆运行速 度在 400 km/h 以下来保证车辆具有较优的运行 平稳性。

#### 参考文献:

- [1] 王雷,于东明,丁勇. 动车组运营速度由 350 km/h 提 升至 400 km/h 可行性研究[J]. 机车电传动, 2020(2):17-22.
- [2] 赵翔彦. 横风对高速列车气动性能的影响[J]. 自动 化与仪器仪表,2022(4):25-29,34.
- [3] 吴敬朴,龚增进,李红梅,等. 高速铁路动车组横风空 气动力学分析[J]. 中国铁路,2021(10):15-21.
- [4] 王磊,骆建军,李飞龙. 横风下高速列车突入隧道瞬变 压力及列车风[J]. 振动与冲击,2022,41(3):27-36.
- [5] TOURAJIZADEH H, YOUSEFZADEH M, KHALAJI A K, et al. Design, modeling and control of a simulator of an aircraft maneuver in the wind tunnel using cable robot[J]. International Journal of Control, Automation and Systems, 2022,20(5):1671-1681.
- [6] 朱阳. 浅析既有线地铁换乘站隧道风系统模式调整 方案[J]. 智能城市,2021,7(23):125-126.

(下转第54页)

# 3 结语

本文选取 TPMS 模型中的 Schwarz\_P 曲面,采用 基于加工轨迹构造的多孔结构设计方法设计了不同 结构参数的 Schwarz\_P 结构,利用 SLM 技术成功制 备,通过压缩试验研究了 Schwarz\_P 结构的力学性 能,建立了弹性模量和抗压强度与结构参数之间的 关系模型,模型拟合优度分别为0.996 86和 0.988 14, 力学性能验证试验结果表明本文建立的模型能有效 预测 Schwarz\_P 结构的力学性能,可在 Schwarz\_P 结 构的设计阶段直观地预估其力学性能。

## 参考文献:

- [1] ATAEE A, LI Y C, FRASER D, et al. Anisotropic Ti-6Al-4V gyroid scaffolds manufactured by electron beam melting (EBM) for bone implant applications [J]. Materials & Design, 2018, 137:345-354.
- [2] 李展硕. 三重周期最小曲面结构的力学性能研 究[D]. 广州:广州大学,2019.
- [3] ASHBY M F. The properties of foams and lattices [J]. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2006, 364(特刊1838):15-30.
- [4] 刘培生. 泡沫金属的经典性模型——Gibson-Ashby 模型浅析[J]. 有色金属,2005,57(2):55-57.
- [5] ECHETA I, FENG X B, DUTTON B, et al. Review of defects in lattice structures manufactured by powder bed fusion [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 106(5/6):2649-2668.
- [6] 吴先哲,刘红旗,王富友,等.激光选区熔化成形多孔
  钽金属构件力学性能研究[J].激光杂志,2019,40(11):154-160.

- [7] 张国庆,杨永强,宋长辉,等.激光选区熔化成型 CoCrMo多孔结构的设计与性能研究[J].中国激光, 2015,42(11):59-68.
- [8] JHA N, MONDAL D P, MAJUMDAR D J, et al. Highly porous open cell Ti-foam using NaCl as temporary space holder through powder metallurgy route [J]. Materials & Design, 2013, 47:810-819.
- [9] 阮文超,李烈军,倪东惠,等. 尿素含量对泡沫不锈钢 孔隙率和力学性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2020,41(7):87-97.
- [10] 韩春光. 拉伸条件下泡沫金属的细观统计分析模型 及统计特性研究[D]. 广州:华南理工大学,2011.
- [11] HU L L, HUANG X Q, TANG L Q. Constitutive relation of open – celled metal foams based on the mesoscopic behavior of random cells [J]. Key Engineering Materials, 2007, 63(340/341):403-408.
- [12] 张明康. 隐式曲面梯度多孔结构优化设计及激光选 区熔化成形力学性能研究[D]. 广州:华南理工大 学,2020.
- [13] ZHANG Y C, TAN S J, DING L P, et al. A toolpathbased layer construction method for designing & printing porous structure [J]. CIRP Annals, 2021, 70(1):123-126.
- [14] GB/T 7314—2017 金属材料室温压缩试验方法[S].
- [15] GB/T 1453—2005 夹层结构或芯子平压性能试验方 法[S].
- [16] TAN S J,ZHANG X,WANG Z Y, et al. Characterization of triply periodic minimal surface structures obtained using toolpath-based construction design[J]. Materials Science in Additive Manufacturing, 2020, 1(3):17.

#### 收稿日期:2022-09-19

#### (上接第 32 页)

- [7] WANG T T, LEE C H, YANG M Z. Influence of enlarged section parameters on pressure transients of high – speed train passing through a tunnel[J]. Journal of Central South University, 2018, 25(11): 2831-2840.
- [8] 刘小燕,陈春俊,王亚南. 高速列车单车通过隧道压 力波的研究[J]. 机械,2014,41(12):1-4,58.
- [9] 史宪明,吴剑,梅元贵,等.内置开孔隔墙高速铁路隧 道列车车体压力波动特征[J].科学技术与工程, 2019,19(34):355-360.
- [10] LI W H, LIU T H, CHEN Z W, et al. Comparative study on the unsteady slipstream induced by a single train and two trains passing each other in a tunnel[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2020, 198: 104095.

- [11] 陶泽平,杨志刚,陈羽. 侧风风场特征对高速列车交 会的影响研究[J]. 力学与实践,2013,35(2):22-28.
- [12] 李艳,魏德豪,秦登,等. 时速 400 km+高速列车交会 压力波特性研究[J]. 铁道工程学报,2021,38(8): 25-29,35.
- [13] 崔涛,张卫华,王琰. 侧风环境下列车高速交会流固 耦合振动安全性分析[J]. 振动与冲击, 2013, 32(11):75-79.
- [14] 杨婧. 侧风下高速列车运行安全性分析[J]. 机械工 程与自动化,2016(5):19-20,24.
- [15] 罗仁,石怀龙. 高速列车系统动力学[M]. 成都:西 南交通大学出版社,2019.

收稿日期:2022-08-12