

文章编号: 1674—8247(2021)02—0068—05  
DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2021.02.012

## 高速铁路列车荷载图式对 400 km/h 动车组的 适应性研究

王 丽<sup>1</sup> 李克冰<sup>1</sup> 陈 列<sup>2</sup> 班新林<sup>1</sup> 蔡超勋<sup>1</sup>

(1. 中国铁道科学研究院集团有限公司, 北京 100081; 2. 中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031)

**摘 要:** 本文对我国高速铁路列车荷载图式的制定背景、原则及考虑的运营列车进行调研分析。选择常用跨度桥梁, 对不同速度等级下高铁动车组的动效应进行计算, 并与列车荷载图式动效应进行比较分析, 进而得出列车荷载图式对不同速度等级高速铁路动车组的适应性。针对在设计规范基频取值条件下, 考虑动效应后列车荷载图式无法适应运营 400 km/h 动车组的情况, 保证图式及配套动力系数不变, 考虑 1.1 倍的安全储备, 提出了相应的梁体设计基频调整建议。另外还对我国高速铁路桥梁的实测基频通常值和设计值的差异进行了分析, 结果表明实测基频通常值大于设计值, 并能够满足 400 km/h 动车组的安全运营。研究成果可为我国铁路开行 400 km/h 动车组的桥梁设计提供依据。

**关键词:** 400 km/h 高速铁路; 桥梁; 列车荷载图式; 适应性

**中图分类号:** U441<sup>+</sup>.2; U448.13 **文献标志码:** A

68

## Study on Adaptability of High-speed Railway Train Load Schema to 400 km/h EMU

WANG Li<sup>1</sup> LI Keping<sup>1</sup> CHEN Lie<sup>2</sup> BAN Xinlin<sup>1</sup> CAI Chaoyun<sup>1</sup>

(1. China Academy of Railway Sciences Corporation Limited, Beijing 100081, China;

2. China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu Sichuan 610031)

**Abstract:** The background, principles and considered operation trains for the formulation of China high-speed railway train load schema are investigated and analyzed in the paper. The bridges with the common spans are selected to calculate the dynamic effect of EMU at different speed levels, which is compared with the dynamic effect of the train load schema for analysis, so as to obtain the adaptability of train load schema to EMU at different speed levels. In view of the fact that the train load schema in consideration of the dynamic effect cannot adapt to the 400 km/h EMU under the conditions with the fundamental frequency values as per the design code, the corresponding suggestions for adjusting the fundamental frequency of beam design are put forward, with 1.1 times of safety reserve, and the schema and supporting power coefficient kept unchanged. In addition, the difference between the normal value and the design value of the measured fundamental frequency of the high-speed railway bridges in China is analyzed. As indicated by the results, the normal value of measured fundamental frequency is greater than the design value, which can meet the safe operation requirements of 400 km/h EMU. The results can provide a basis for the bridge design of 400 km/h EMU in China.

**Key words:** 400 km/h high-speed railway; bridge; train load diagrams; adaptability

收稿日期: 2021-03-01

作者简介: 王丽(1981-), 女, 副研究员。

基金项目: 中国铁道科学研究院集团有限公司院基金课题(2020YJ048); 中铁二院工程集团有限责任公司科技发展计划项目(KSNQ202052)

引文格式: 王丽, 李克冰, 陈列, 等. 高速铁路列车荷载图式对 400 km/h 动车组的适应性研究[J]. 高速铁路技术, 2021, 12(2): 68-72.

WANG Li, LI Keping, CHEN Lie, et al. Study on Adaptability of High-speed Railway Train Load Schema to 400 km/h EMU[J]. High Speed Railway Technology, 2021, 12(2): 68-72.

1 高速铁路列车荷载图式制定背景

上世纪 90 年代,根据我国高速铁路建设的需要,初步确定了我国高速铁路的定位:满足设计速度 350km/h 高速列车的运营要求;满足机车牵引旅客列车和机车牵引轻型货车的运营要求;满足高速铁路养路机械车辆的运营要求;与国际接轨。根据我国高速铁路的定位要求,确定了高速铁路列车荷载图式应考虑荷载形式,如表 1 所示。在与国际接轨方面,对日本和国际铁路联盟的荷载标准体系进行了系统的分析

后,认为国际铁路联盟的荷载标准体系更适用于我国的国情,因此对国际铁路联盟的 Load Model 71 图式进行研究,对比 0.6、0.7、0.8 和 1.0 倍 Load Model 71<sup>[1]</sup>的荷载效应,提出将 0.80 倍 Load Model 71 荷载图式作为普通荷载图式,并针对 6 m 以下小跨度桥涵结构提出了特种荷载图式,形成了中国高速铁路列车荷载图式 - ZK 荷载图式<sup>[2]</sup>。同时,确定了高速铁路列车荷载标准的制定原则为“设计荷载动效应不小于运营荷载动效应”,并根据这一原则确定 Load Model 71 配套的精细养修线路的动力系数作为 ZK 荷载的动力系数。

表 1 制定 ZK 荷载时考虑的列车参数表<sup>[3]</sup>

列车类型		轴重/t		机车/车辆长度/m		编组节数 /节	列车总长 /m	列车总重 /t
		机车	车辆	机车	车辆			
高速 列车	德国 ICE	—	19.5	—	26.40	16	438.71	912.0
	法国 TGV	—	16.3	—	22.16	10	200.20	410.4
	日本 200 系电力动车组	—	17.0	—	25.15	12	300.15	816.0
	中国试验列车模型	—	19.0	—	26.20	10	198.14	498.0
普速 列车	SS8 + 单层客车	22	16.5	16.716	26.576	14	388.78	1 012.0
	SS8 + 双层客车	22	16.5	16.716	26.576	12	335.628	880.0
	DF11 + 单层客车	23.0	16.5	21.10	26.576	14	393.164	1 016.0
	DF11 + 双层客车	23.0	16.5	21.10	26.576	12	340.012	884.0
养路 机械车	架桥机	—	39.2(最大)	—	30.64	—	—	—
	捣固车	—	12.0(最大)	—	22.2	—	—	—
	动力稳定车	—	15.0(最大)	—	18.9	—	—	—
	配砟整型车	—	15.0(最大)	—	12.6	—	—	—
	清筛机	—	22.0(最大)	—	31.3	—	—	—
	养路机械车的编组方式: (1)按既有线大修考虑:1 辆清筛机 + 1 辆捣固车 + 1 辆动力稳定车 + 1 辆配砟整型车 + 1 辆捣固车 (2)按新线考虑: + 1 辆配砟整型车 + 1 辆捣固车							

2 高速铁路列车荷载图式对不同速度等级动车组的适应性研究

20 世纪初,我国引进德国、日本等国的高速动车组技术,在消化吸收再创新的基础上,生产了“和谐号”系列高速动车组;2016 年,具有自主知识产权的复兴号动车组研发成功。目前,我国高速铁路主要运行 CRH 系列和复兴号动车组,CRH 系列现有的几种车型为 CRH1、CRH2、CRH3、CRH5 以及 CRH380 系列,其中 CRH380 系列由 CRH1、CRH2、CRH3 发展而来<sup>[4]</sup>。高速动车组与当初制定图式时相比发生了一定的变化,近年来我国又具备了 400km/h 高速动车组的生产制造能力<sup>[5]</sup>,因此,有必要开展 ZK 荷载图式对不同速度等级动车组的适应性的研究,为我国更高速度等级高速铁路桥梁的设计提供依据。

2.1 计算参数

(1) 高速铁路动车组

计算考虑的高速铁路动车组包括 CRH1、CRH2、CRH3、CRH5、CRH380A、CRH380B、CRH380D 和复兴号动车组,相关参数如表 2 所示。

表 2 高速铁路动车组相关参数表

车型	轴重 /t	头车长度 /m	车辆长度 /m	最高速度 /(km/h)
CRH1	16	26.95	26.60	250
CRH2	14	25.0	25.0	350
CRH3	17	25.86	24.825	350
CRH5	17	28.0	25.9	250
CRH380A	15	26.5	25	350
CRH380B	17	25.85	24.825	350
CRH380D	17	27.85	26.60	350
中国标准动车组	17	27.065	25.65	350

(2) 桥梁跨度

选择我国铁路常用跨度的简支梁进行分析,包括 16 m、20 m、24 m、32 m、40 m、48 m、56 m、64 m、70 m、80 m、90 m、100 m 共 12 种跨度。

(3) 桥梁频率

我国现行《高速铁路设计规范》对于基频  $n_0$  上下限进行了规定,并另外针对部分常用跨度 20 m、24 m 和 32 m 简支梁规定了不需要进行动力检算的竖向自振频率限值。本研究对基频考虑 3 种情况,上、下限以及无需进行动力检算的情况。

#### (4) 动力系数

ZK 荷载图式配套动力系数根据设计规范选用。高速动车组列车动力系数考虑两种情况,一为理论计算值,即根据前述不同情况下的基频取值,计算得到相应实际动车组列车的动力系数;二为实测值,即对不同跨度桥梁的实测动力系数进行统计分析,取得动车组列车的实测最大动力系数值。

#### (5) 控制原则

对高速动车组列车进行车桥动力仿真分析,得出不同速度等级下列车荷载的动效应,与图式的动效应进行比较发现,当列车荷载动效应小于图式动效应时,荷载图式与该速度等级的高速列车相适应,反之则不适应。

### 2.2 适应性分析结果

我国前期研究制定高速铁路桥梁各项参数时,最高检算速度按 1.2 倍的设计速度取用。如运营速度 350 km/h,检算速度则为 420 km/h。高速铁路开通前按设计速度的 1.1 倍进行联调联试。因此,在列车速度方面,考虑了 200 km/h、250 km/h、300 km/h、350 km/h、400 km/h、420 km/h、440 km/h 级别。在计算高速动车组动效应时,动力系数考虑 4 种情况:

(1) 基频上限,采用规范中的基频上限限值计算得到的动力系数。

(2) 基频下限,采用规范中基频下限限值计算得到的动力系数。

(3) 规范值,对于部分跨度桥涵结构,规范中给出了不需进行动力检算的基频限值,采用该限值计算得到动车组的动力系数。

(4) 实测值,对实测数据进行统计分析,统计得到实际桥梁的动力系数。

不同速度等级下,列车荷载动效应与 ZK 荷载动效应的比值如图 1~图 7 所示。

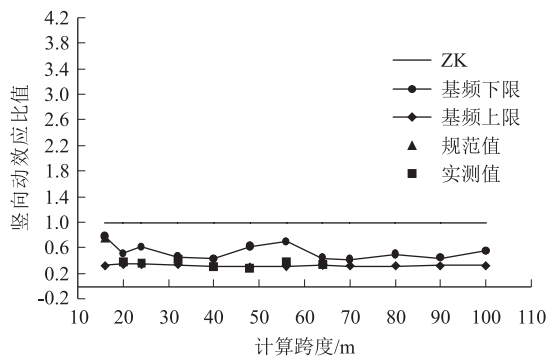


图1 速度 200 km/h 及以下荷载动效应对比图

从图 1~图 7 可以看出:

(1) 当计算速度为 400 km/h 及以下时,图式动效

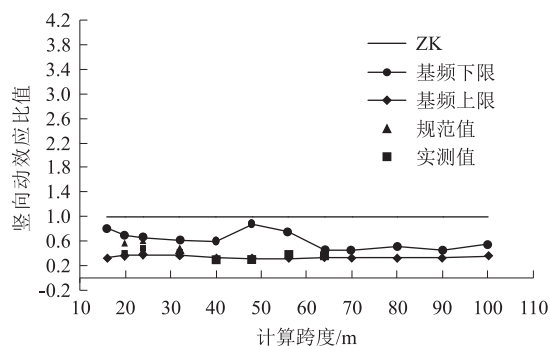


图2 速度 250 km/h 及以下荷载动效应对比图

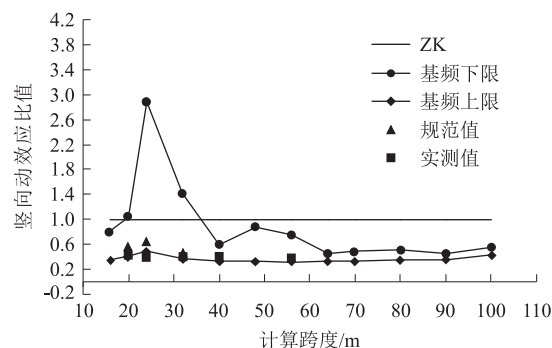


图3 速度 300 km/h 及以下荷载动效应对比图

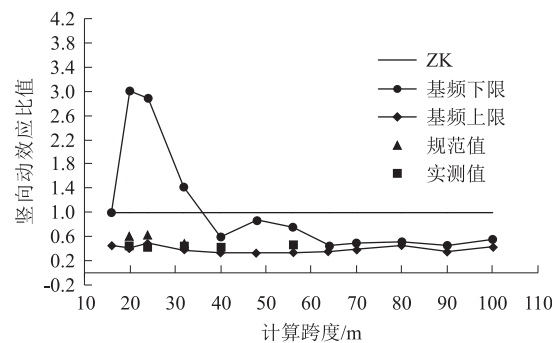


图4 速度 350 km/h 及以下荷载动效应对比图

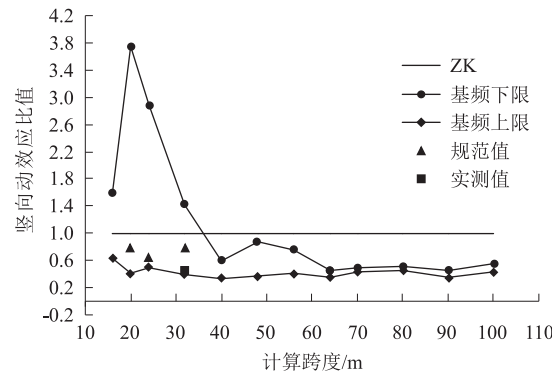


图5 速度 400 km/h 及以下荷载动效应对比图

应均能包络列车荷载的动效应;当计算速度为 420 km/h 时,对于 32 m 梁,运营列车动效应基本与图

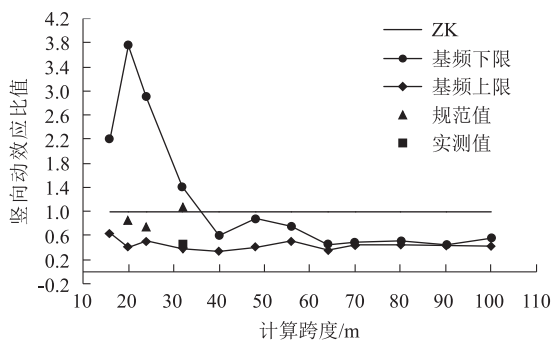


图6 速度420 km/h及以下荷载动效应对比图

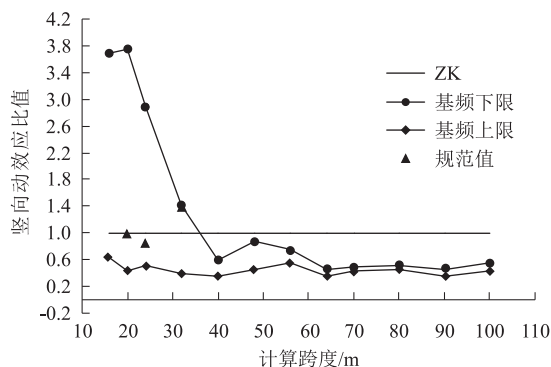


图7 速度440 km/h及以下荷载动效应对比图

式动效应相同;当计算速度为440 km/h时,32 m梁运营列车的动效应超过了图式的动效应。

(2)采用实测动力系数计算得到的动效应基本接近于采用基频上限计算得到的动效应,表明实际桥梁的基频要大于设计基频。

(3)当桥梁跨度达到60 m以上时,高速动车组对桥梁的动力影响显著减小,当速度达到300 km/h以上时,这一特征更为明显。

### 3 适应400 km/h高速动车组桥梁参数取值研究

经过上节分析,对于设计速度为400 km/h的32 m跨度高速铁路桥梁,检算时速按1.1倍安全系数考虑,即按速度为440 km/h进行计算时,高速动车组的荷载效应超过了设计荷载效应。此时可采用3种方案来保证设计荷载效应不小于列车荷载效应<sup>[6]</sup>:(1)提高列车荷载图式效应;(2)增大图式配套动力系数取值;(3)通过提高32 m梁的基频值来降低运营列车的动力系数进而降低动效应。

从计算结果来看,采用ZK荷载及配套的动力系数设计的桥梁,开行速度400 km/h高速动车组时,仅32 m跨度梁不能满足要求。若对ZK荷载图式的形式或者动力系数的计算公式进行调整,势必影响到其他

跨度,造成整个设计体系发生变化,影响高速铁路的互联互通;若单独规定32 m梁的设计荷载取值和动力系数,又会给设计人员造成不便。目前高速铁路规范中已对不同速度等级规定了常用跨度梁无需进行动力检算的基频取值,仅需再增加一档对应时速400 km时基频取值即可,这样既保持了与原有规范的一致性,也不会造成设计体系的变化。因此通过计算分析得到当基频取值为5.1 Hz时,设计荷载动效应能够包络运营列车动效应,如图8所示。

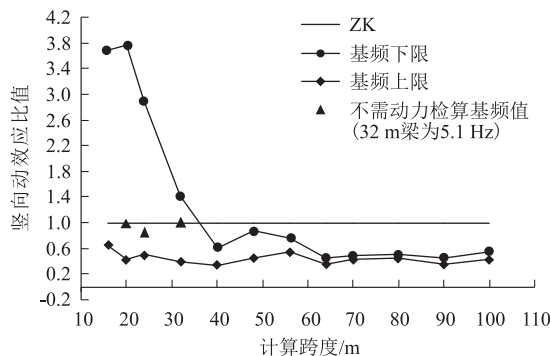


图8 速度440 km/h及以下荷载动效应对比图

自上世纪我国高速铁路开通运营以来,积累了大量桥梁测试数据,在对各种类型桥梁实测竖向自振频率统计分析的基础上,得出了常用跨度预应力混凝土双线简支箱梁一阶竖向自振频率的通常值,纳入了《高速铁路桥梁运营性能检定规定》<sup>[7]</sup>,其中32 m梁在设计速度350 km/h时,有砟轨道桥梁基频通常值为5.9 Hz,无砟轨道桥梁基频通常值为6.2 Hz,均大于设计规范值4.69 Hz。对实测基频通常值大于设计规范值的原因进行分析,简支梁基频的简化计算公式如下:

$$n_0 = \frac{\pi}{2L^2} \sqrt{\frac{EI}{m_1 + m_2}} \quad (1)$$

式中: $L$ ——简支梁跨度(m);

$E$ ——材料弹性模量( $\text{kN/m}^2$ );

$I$ ——截面竖向抗弯惯性矩( $\text{m}^4$ );

$m_1$ ——单位长度的梁体质量( $\text{t/m}$ );

$m_2$ ——单位长度的二恒质量( $\text{t/m}$ )。

从式(1)可以看出,在梁体跨度、截面尺寸、混凝土材料容重基本确定的前提下,式中 $L$ 、 $I$ 和 $m_1$ 确定,影响频率的参数主要为 $E$ 和 $m_2$ 。对近年来32 m简支梁的弹性模量进行调研分析,发现:(1)对于C50混凝土,实际弹性模量比设计高约25.1%,相应使梁体基频平均增大约11.8%。随着二期恒载重量的增加,梁体频率降低;(2)每增加10 kN/m二期恒载,梁体基频约降低0.1 Hz,一般来说,我国高速铁路桥梁实际二期恒载均小于设计值,这也导致了梁体基频的增加。

高速铁路桥梁采用的纵连板式无砟轨道在梁跨内部和梁体之间均为连续的板式结构,通过剪力齿槽在简支梁固定支座上方与梁体连接,梁体竖向挠曲变形时受到轨道结构的约束,在轨道结构内产生轴向力,增大了梁体的竖向刚度,相应增大了梁体基频<sup>[8]</sup>。综上所述,由于混凝土实测弹性模量大于设计值、桥梁实际二期恒载小于设计值以及无砟轨道结构致使梁体刚度增加这三方面的原因,我国高速铁路桥梁的实测基频大于设计规范值。因此,按照速度 350 km/h 设计的桥梁能够满足速度 400 km/h 高铁动车组的安全运营。

## 4 结论与建议

### 4.1 结论

本文对我国高速铁路的制定背景进行了调研分析,掌握了我国高速铁路标准制定之初对于高速铁路的定位、考虑的运营列车、列车荷载图式及配套参数的制定原则;对目前运营的高速铁路动车组的动效应进行计算,并与设计荷载效应进行比较分析,掌握了 ZK 荷载及配套的参数对于不同速度等级高速动车组的适应性;针对 ZK 荷载及配套参数不适应(运营速度 400 km/h、检算速度 440 km/h)的情况,提出了参数调整建议,主要结论如下:

(1)我国高速铁路建设之初,对于高速铁路的定位为:满足设计速度 350 km/h 高速列车的运营要求;满足机车牵引旅客列车和机车牵引轻型货车的运营要求;满足高速铁路养路机械车辆的运营要求;考虑与国际接轨。

(2)与客货共线和重载铁路不同,我国高速铁路列车荷载图式及配套动力系数的制定原则是“设计荷载动效应不小于运营荷载动效应”。

(3)按照 ZK 荷载图式及配套的动力系数设计的 32 m 简支梁无法适应运营速度 400 km/h、检算速度 440 km/h 高铁动车组的安全运营,需要对其基频值进行调整,当基频值调整至 5.1 Hz 时,可满足设计荷载动效应不小于运营荷载动效应的原则。

(4)我国高速铁路的实测基频通常值均大于设计规范值,对于 32 m 梁来说,无砟轨道的基频通常值为 6.2 Hz,大于速度 400 km/h 高速动车组基频为 5.1 Hz

的要求。因此,从我国高速铁路目前的实际情况来看,基本可满足速度 400 km/h 高速动车组的安全运营。

### 4.2 建议

建议对桥梁各类参数设计值和实测值进行系统的调研分析,掌握其差异及引起差异的原因,并能够将实测值反映到设计中,缩小实测和设计之间的差距,使我国高速铁路桥梁的设计更为经济合理。

## 参考文献:

- [1] UIC. UIC CODE 776 - 1. Load to be Considered in Railway Bridge Design[S].
- [2] 中国铁道科学研究院铁道建筑研究所. 高速铁路活载图式的研究[R]. 北京:中国铁道科学研究院,1996.  
Railway Engineering Research Institute, China Academy of Railway Sciences. Research on Load Diagram of High Speed Railway[R]. Beijing: China Academy of Railway Sciences, 1996.
- [3] TB 10621 - 2014 高速铁路设计规范[S].  
TB 10621 - 2014 Code for Design of High Speed Railway[S].
- [4] 中国铁道科学研究院铁道建筑研究所. 高速铁路设计荷载标准研究[R]. 北京:中国铁道科学研究院,2017.  
Railway Engineering Research Institute, China Academy of Railway Sciences. Research on Design Load Standard of High Speed Railway[R]. Beijing: China Academy of Railway Sciences, 2017.
- [5] 徐银光,李艳. 成渝中线 400 km/h 轮轨动车组技术指标研究[J]. 高速铁路技术, 2020, 11(3): 7 - 11.  
XU Yinguang, LI Yan. Research on Technical Indexes of 400 km/h Wheel-Rail EMU for Chengdu-Chongqing Middle Line[J]. High Speed Railway Technology, 2020, 11(3): 7 - 11.
- [6] 胡所亭,魏峰,王丽,等. 《铁路列车荷载图式》制定研究[J]. 中国铁路, 2017(4): 1 - 7.  
HU Suoting, WEI Feng, WANG Li, et al. Development and Research of Train Load Schema[J]. China Railway, 2017(4): 1 - 7.
- [7] TG/GW 209 - 2014 高速铁路桥梁运营性能检定规定(试行)[S].  
TG/GW 209 - 2014 Rating Regulation of High Speed Railway Bridge Operation Performance[S].
- [8] 蔡超勋,胡所亭,柯在田,等. 更高速度条件下铁路简支箱梁关键参数研究[J]. 铁道标准设计, 2015, 59(11): 59 - 63.  
CAI Chaoxun, HU Suoting, KE Zaitian, et al. Research on Key Parameters of Simply Supported Box Beam on Higher Speed Railway[J]. Railway Standard Design, 2015, 59(11): 59 - 63.