

文章编号: 1003-1995(2015)10-0026-05

我国铁路列车荷载图式的研究与应用

胡所亭^{1,2}

(1. 中国铁道科学研究院 铁道建筑研究所, 北京 100081; 2. 高速铁路轨道技术国家重点实验室, 北京 100081)

摘要: 随着我国铁路运输的发展, 不同类型线路的运营列车在轴重、速度、运输密度等方面都有较大差异, 单一列车荷载图式难以反映新形势下的铁路运输状态。本文回顾了我国铁路列车荷载图式的研究和发展情况, 介绍了各种类型荷载图式的适用范围和应用中需注意的问题, 并提出列车竖向动力作用、列车纵向作用力等需要进一步研究的问题。

关键词: 列车荷载图式 发展历程 应用

中图分类号: U441⁺.2 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1003-1995.2015.10.05

铁路列车荷载图式是铁路列车对线路基础设施静态作用的概化表达形式, 也是铁路桥涵结构设计的核心参数。影响列车荷载图式的因素很多, 除与机车车辆参数、运输模式、速度指标和不同结构体系加载方式等有关外, 尚需考虑桥涵结构设计基准期内机车车辆装备技术的进步和发展。国际铁路联盟(UIC)和世界大部分国家推荐采用能够代表运营列车并具有一定安全储备的概化图式进行铁路基础设施的设计, 如美国的 Cooper E 系列荷载, UIC 的 LM71 荷载, 以及我国的中一活载图式等^[1-3]。需要说明的是, 为便于理解和区分, 早期多将“列车荷载”称为“活载”; 本文除对既有图式等描述外, 统一表述为“列车荷载”。

我国铁路近年来得到了快速发展, 铁路运输总体呈现“客运高速、货运重载”的发展趋势。随着客运铁路网的逐渐建成, 既有客货共线铁路将主要承担货物运输的任务; 能源供求较大的区域还新建大轴重等级的重载铁路。不同类型线路运营列车在轴重、速度、运输密度等方面都有较大的差异, 单一的列车荷载图式难以反映新形势下的铁路运输状态。根据铁路的发展需求, 我国铁路学者对列车荷载作用进行了深入的研究, 提出了新形势下的列车荷载图式^[4-7]。

1 我国铁路列车荷载图式研究和发展情况

旧中国时代, 我国桥梁设计主要应用国外的列车荷载标准, 包括美国的 Cooper E 级荷载、日本的 L 级荷载等。由于荷载等级较低且不统一, 造成桥梁承载能力差别较大。1938 年, 我国制定了列车荷载标准, 为中华活载标准(C 级); 其中主要铁路干线采用的是 C-20 级荷载, 次要干线采用的是 C-16 级荷载。新中国成立后, 未制定新的标准前临时应用的是前苏联的 H-7、H-8 级荷载。

我国“铁路桥梁设计规范”共正式颁布实施(含修订)过 6 次, 分别为 1951 年, 1959 年, 1975 年, 1985 年, 2000 年和 2005 年版本。1951 年版规范采用中一 Z 活载图式(图 1), 按铁路不同等级采用中-22 ~ 中-26 级活载图式; 1959 年版规范沿用中一 Z 活载图式, 按铁路不同等级采用中-18 ~ 中-26 级活载图式。1975 年及以后规范统一采用中一活载图式(图 2), 用于客货共线铁路桥梁设计。中一活载图式主要源自中一 Z 活载图式系列的中-22 级, 上世纪 70 年代修订时考虑到牵引车辆重量的增加、机车与车辆重量比的降低等因素, 将代表车辆的均布荷载 66 kN/m 提高到 80 kN/m,

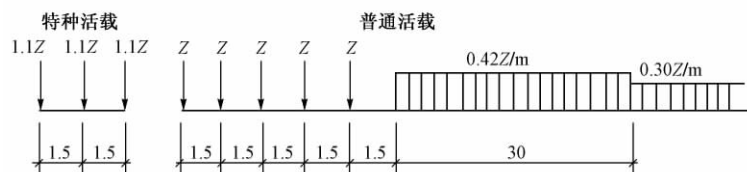


图 1 中一 Z 活载图式(距离以 m 计)

将特种荷载由 242 kN 提高至 250 kN。实践证明, 中一活载图式基本满足了该期间铁路客货运输发展的需要。

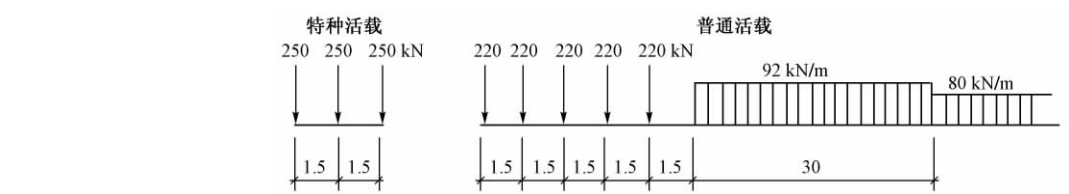


图 2 中一活载图式(距离以 m 计)

1994 年,根据《铁路主要技术政策》(铁科技[1993]166 号)要求,“为进一步提高列车重量,积极发展轴重 25 t 低动力作用的大型四轴货车,并相应有计划地强化桥梁、线路结构,提高承载能力”,我国铁路开展了 25 t 轴重作用下轨道和桥梁承受状态及列车活载图式的研究工作。研究成果表明,随着机车车辆的发展,采用中一活载图式设计的桥梁(跨度 1 ~ 200 m)平均发展储备为 9.4%,与国外相比,活载标准偏低,已不能满足机车车辆发展需求^[8]。

1996 年,根据我国高速铁路发展需要,结合国外

高速铁路列车荷载图式的研究和制定情况,从列车荷载效应、强度检算和竖向刚度检算等方面,对采用 0.6UIC,0.7UIC 和 0.8UIC 进行了系统对比分析,研究提出了采用 0.8UIC 作为普通荷载,同时针对小跨度桥梁提出了特种荷载及适用加载范围,制定了我国高速铁路列车荷载图式,即 ZK 荷载图式(图 3),主要应用于 250 ~ 350 km/h 高速铁路桥梁的设计^[4]。近年来,针对仅考虑动车组开行要求的城际铁路,研究提出了 0.6UIC 作为普通荷载配套相应特种荷载,作为城际铁路列车荷载图式,即 ZC 荷载图式(图 4)^[9]。

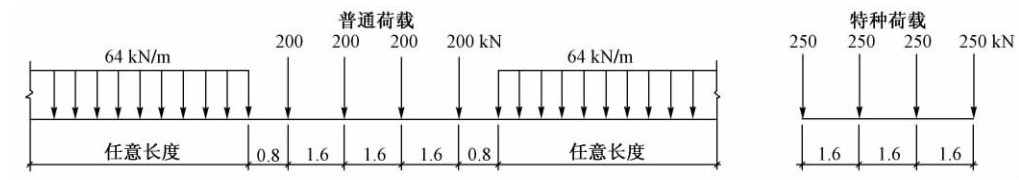


图 3 ZK 荷载图式(距离以 m 计)

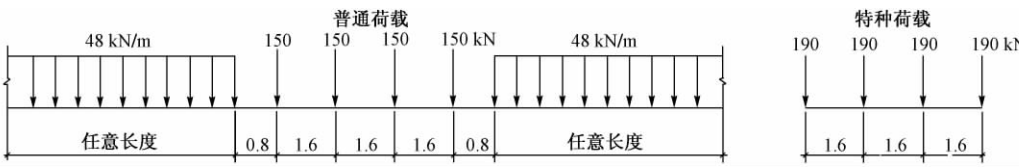


图 4 ZC 荷载图式(距离以 m 计)

2004 年,我国铁路开展客货共线和货运铁路桥梁活载标准的研究工作。在总结历年研究成果的基础上,分析了现行中一活载图式实施 30 年来的工程实践效果,根据当时机车和车辆装备的技术现状和发展,考虑牵引质量的增加、运营速度提高、编组及运输模式的变化,提出适用于我国客货共线(ZKH)和货运专线(ZH)铁路设计的中一活载(2005)图式(见图 5)^[5-6]。图式中 4 个 250 kN 的集中荷载代表机车车辆轴重效应和货车邻轴距效应,85 kN/m 的均布荷载代表货车车辆的延米重效应。其中, z 为活载等级系数;客货共线铁路(ZKH) z 按 1.0 取用。值得注意的是,与既有

中一活载图式相比,中一活载(2005)图式更符合现有铁路移动装备的加载特征,即剪力加载效应略低,弯矩加载效应适当提高。此外,根据通行长大货车需求线路的检算需要,提出了长大货车检算图式。

2005 年以来,按照国务院加快我国铁路运输装备现代化的战略方针,我国铁路货运机车和车辆技术得到了迅速发展。2006 年,我国铁路停止生产了轴重 21 t、载重 60 t 级的通用货车,全路推广轴重 23 t、载重 70 t 级通用货车;轴重 25 t、载重 80 t 运煤专用敞车在大秦等重载线路上大量运用;轴重 25 t 和谐型大功率机车也在路网中逐步得到运用。装备部门同时开展了

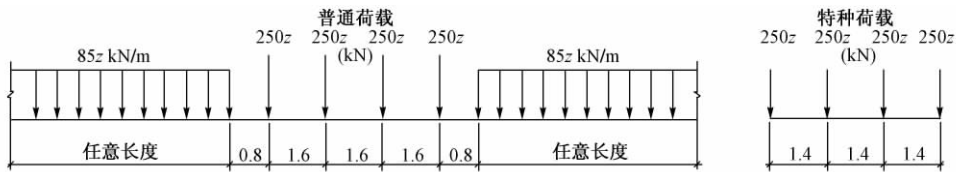


图 5 中一活载(2005)图式(距离以 m 计)

大轴重铁路机车、货车总体技术研究和轴重 27,30 t 的样车试制、试验和运用考核工作。

2010 年以来,根据铁路重载运输新的发展趋势,结合《铁路主要技术政策》修订研究工作,我国铁路对铁路重载运输发展定位、重载铁路列车荷载标准、既有铁路桥涵对于重载运输适应性等方面开展了系列研究工作^[10-11],并对客货共线铁路和货运铁路列车荷载标准进行了深化研究。从铁路移动装备总体发展趋势看,铁路货车加载效应较机车更为控制;客货共线铁路通用货车向轴重 25 ~ 27 t、载重 80 t 级发展,大轴重等

级重载铁路专用货车向轴重 30 ~ 35 t(不含)、载重 100 t 级发展;货车牵引杆技术的应用将较大幅度减小车辆间相邻车轴的距离(简称邻轴距),车辆对线路基础设施作用效应显著提升。研究认为,中一活载(2005)图式总体上是适用的,但随着车辆轴重发展和邻轴距的降低,存在对于中小跨度桥涵加载效应偏低等问题;为提高设计列车荷载图式效应同时避免 z 的取值过大,研究提出了修订方案,即中一活载(2010)图式(图 6),客货共线铁路 z 按 1.0 取用,不同轴重、载重等级的重载铁路根据需求选取相应等级系数。

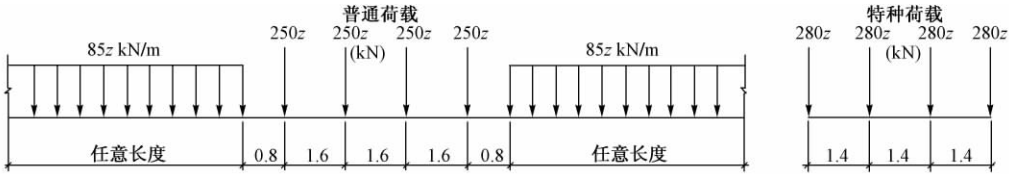


图 6 中一活载(2010)图式(距离以 m 计)

2 铁路列车荷载图式应用建议

ZK,ZC,ZKH 和 ZH 荷载图式的普通荷载形式相同,均采用中间 4 个集中荷载来代表机车车辆轴重效应、轴距和邻轴距效应,采用两侧均布荷载来代表车辆

的延米重效应,特种荷载主要用于提高小跨度桥涵结构和影响线加载长度较短杆件的加载效应。设计列车荷载效应取普通荷载图式和特种荷载图式加载效应的上限包络值,详见表 1。设计时,可根据不同类型铁路运输特征、运营模式、移动装备情况等综合选用。

表 1 铁路列车荷载图式

图式名称	荷载图式	
	普通荷载	特种荷载
ZK 荷载图式		
ZC 荷载图式		
ZKH 荷载图式		
ZH 荷载图式		

注: z 为 ZH 荷载图式中重载等级系数;距离以 m 计。

3 列车荷载图式应用中相关问题的说明

3.1 关于列车荷载图式发展和储备系数

国际铁路联盟在上世纪 70 年代研究制定 Load Model71 荷载图式(简称 UIC 荷载)时,需要涵盖 6 种类型的机车车辆,包括六轴机车(120 km/h,轴重 21 t)、四轴货车(120 km/h,轴重 25 t)、六轴货车(120 km/h,轴重 21 t)、四轴客车(250 km/h,轴重 15 t)、高速列车(300 km/h,轴重 17 t)和特种货车(80 km/h)。各类机车车辆在速度和轴重方面差异大,高速列车和客车自重轻、速度高、动力效应大,货车自重大、速度低、动力作用相对小。为避免统一标准条件下设计列车荷载与运营列车荷载偏差大的情况,一方面提出可按照基本图式的 0.75,0.83,0.91,1.00,1.10,1.21,1.33 和 1.46 的分级系数取用,另一方面提出在图式选择方面按照“设计荷载图式静效应 \times 设计动力系数 $>$ 运营车辆静效应 \times 运营动力系数”的总体原则。值得注意的是,UIC 规定的设计动力系数是列车动效应的概化,无实际意义。

我国 ZK 荷载图式和 ZC 荷载图式中的普通荷载分别为 0.8UIC 和 0.6UIC,动力系数也采用其相应的规定。由于高速动车组运行条件下桥涵结构的动力系数与其自身动力特征相关,因此,在设计荷载、设计动力系数以及运营动车组参数基本确定的前提下,需通过改变结构的自身动力参数来降低运营动力系数,尤其是对于常用跨度桥梁结构。这也是我国《高速铁路设计规范》^[12]和《城际铁路设计规范》^[13]规定不同速度条件下梁体基频限值的原因之一。如高速铁路大量采用的 32 m 箱梁结构,高速动车组运行条件下,可能达到的最大动力系数接近 3.0(图 7)，“规范”采取了增大梁体频率,提高共振响应速度,将运营速度范围内梁体振动响应和动力系数控制在合理范围。对于客运专线铁路,因列车荷载图式还用来控制桥梁的刚度和变形等众多指标^[9,14],故不应简单地通过动车组静荷载和荷载图式的对比来说明荷载储备的问题。设计应

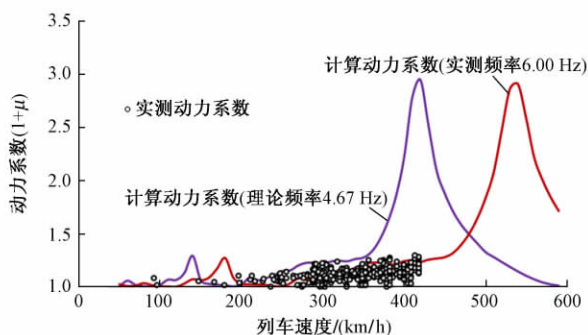


图 7 不同基频条件下梁体动力系数计算值与实测值对比

用时,虽然可采用效应较小的列车荷载图式,但需要调整梁体刚度和基频等参数与之相适应。

我国 ZKH 荷载图式和 ZH 荷载图式中的普通荷载是在 UIC 荷载的基础上,根据我国重载车辆特点进行局部调整后提出的,并根据典型四轴货车等制定了特种荷载。现阶段动力系数采用既有中—活载图式配套动力系数,该动力系数是对大量实测数据进行拟合,并按照一定的保证率取其包络值制定的,具有实际意义。根据国内外铁路研究成果和运营实践经验,设计选用活载图式时,宜预留平均不少于 20%、最小不少于 10% 的列车荷载发展和储备系数。

3.2 关于列车荷载图式加载长度

我国现行规范规定荷载图式加载长度根据加载需要确定,不限制加载长度,主要考虑既有客货共线铁路桥梁跨度一般在 200 m 以下,而运营列车的长度超过桥跨结构。随着铁路运输特征的变化,高速铁路动车组一般采用 8 辆、16 辆编组,城际铁路动车组编组更灵活,列车长度相对较短;客货共线铁路和重载铁路货物列车牵引质量呈增大的趋势,大秦等重载铁路大量开行 2 万 t 编组的重载列车,并已完成 3 万 t 编组试验工作。目前,铁路桥梁跨度已达到千米级,在建桥梁最大跨度达 1 092 m。因此,一般情况下,荷载图式加载长度按检算项目的最不利工况进行加载;对于高速铁路和城际铁路大跨度桥梁结构,当桥梁跨度或加载长度超过运营列车的最大编组长度时,宜采用可能开行的最大列车编组长度。

3.3 关于客货共线和重载铁路双线折减系数的取用

我国客货共线铁路多为单线和双线铁路,桥涵结构设计时,单线按荷载图式的全部效应进行计算,双线采用 0.9 的折减系数。制定双线折减系数主要考虑了双线加载效应同时达到最大时的概率问题。既有客货列车主要是机车加载控制,双线铁路机车加载同时达到最大效应的概率相对小,加之我国既有客货共线铁路桥涵结构数量相对较少(约占线路总长的 5% 以下),双线机车在桥上交会、加载效应又同时达到最大的概率更小。目前,随着货运机车和车辆的发展,货车竖向加载效应整体大于机车效应;新建铁路桥涵结构占比也大幅提高,双线铁路运营列车效应同时达到最大的概率显著提升,成为常见运营工况。因此,新建客货共线铁路设计时,不宜再沿用既有的折减系数的规定,各线均应计入列车荷载作用。对于货物运输方向固定的双线重载铁路,设计时可根据实际情况考虑相应折减。

4 结语

铁路列车对线路基础设施的作用体现在竖向、横

向和纵向三个方向,我国既有中—Z 活载图式、中—活载图式及配套的参数体系,较好地适应了不同时期客货共线铁路运输需要和发展。现阶段,又提出了适用于不同运输特征的铁路列车荷载图式,在后续工作中,还需进一步开展配套竖向动力系数、横向摇摆力和离心力、纵向牵引力和制动力的研究工作。

参 考 文 献

[1] American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association. Manual for rail way engineering [S]. Lanham: ARE-MA, 2010.

[2] UIC. UIC CODE 776-1 Load to be Considered in Railway Bridge Design [S]. Paris: UIC, 2006.

[3] 中华人民共和国铁道部. TB 10002. 1—2005 铁路桥涵设计基本规范 [S]. 北京: 中国铁道出版社, 2005.

[4] 铁道部科学研究院. 高速铁路活载图式的研究报告 [R]. 北京: 铁道部科学研究院, 1996.

[5] 中国铁道科学研究院. 客货共线和货运铁路桥梁活载标准研究报告 [R]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2005.

[6] 中国铁道科学研究院. 铁路中—活载图式修订和分级标准

研究 [R]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2005.

[7] 胡所亭. 铁路重载条件下桥梁活载标准研究 [D]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2013.

[8] 铁道部科学研究院. 25 吨轴重作用下轨道桥梁承受状态及列车活载图式——列车活载图式研究报告 [R]. 北京: 铁道部科学研究院, 1994.

[9] 中国铁道科学研究院. 时速 250 公里以下客运专线铁路 (城际铁路) 设计活载及桥梁结构相关技术标准研究报告 [R]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2010.

[10] 中国铁道科学研究院. 重载铁路轴重发展目标值及轴重分类 [R]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2010.

[11] 中国铁道科学研究院. 《铁路主要技术政策》专题研究之六——铁路重载运输发展研究 [R]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2012.

[12] 国家铁路局. TB 10621—2014 高速铁路设计规范 [S]. 北京: 中国铁道出版社, 2015.

[13] 国家铁路局. TB 10623—2014 城际铁路设计规范 [S]. 北京: 中国铁道出版社, 2015.

[14] 中国铁道科学研究院. 客运专线铁路常用跨度桥梁结构刚度和基频标准研究报告 [R]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2009.

Research and application on railway train load pattern in China

HU Suoting^{1,2}

(1. Railway Engineering Research Institute, China Academy of Railway Sciences, Beijing 100081, China;
2. State Key Laboratory for Track Technology of High-speed Railway, Beijing 100081, China)

Abstract: With the development of railway transportation in China, there are great differences in axle load, speed, transport density of the trains on different type of lines, which means single train load pattern cannot correctly reflect the railway transport in such new situation. The research and development history of China railway train load pattern was reviewed in this paper, applicable range of various load pattern and problems that need to be paid attention to in application were introduced, and some further research issues including train vertical dynamic action, train longitudinal force and etc. were proposed.

Key words: Train load pattern; Development history; Application

(责任审编 孟庆伶)