

文章编号:1003-1995(2018)12-0001-05

我国高速铁路桥梁的研究现状与发展趋势

闫龙彪,程泽农,韩冰,张楠

(北京交通大学 土木建筑工程学院,北京 100044)

摘要 桥梁是高速铁路的重要结构,其性能直接影响列车运营的安全性和舒适性。深入开展高速铁路桥梁相关问题的研究,提升其设计、建造及运营维护水平,对推动我国高速铁路的发展十分重要。本文根据我国高速铁路桥梁的建设特点,通过对现有文献的统计分析,总结了文献发表规律和高速铁路桥梁的研究现状。进而结合我国铁路行业发展需求,在广泛征集领域内专家建议的基础上,总结出高速铁路桥梁发展过程中亟待解决的问题,指出今后的科研方向。

关键词 高速铁路;桥梁;研究现状;存在问题;发展趋势;文献统计;科研方向

中图分类号 U44;U238 **文献标识码** A **DOI**:10.3969/j.issn.1003-1995.2018.12.01

1 我国高速铁路桥梁的工程特点

我国高速铁路建设的重要特点是桥梁在高速铁路线路中总占比高^[1],桥梁的性能对列车运营的安全性和舒适性具有举足轻重的影响。

高速铁路主要以速度目标值大小加以区分,结合我国高速铁路发展现状,遵循国际上对于高速铁路定义的惯例,把新建铁路旅客列车运行速度达到或者超过 250 km/h,或旅客列车运行速度达到 250 km/h 的客货共线运行铁路和既有线通过改造使基础设施适应速度 200 km/h 的铁路称为高速铁路。

截至 2017 年底,我国高速铁路运营里程达到 2.5 万 km,占世界高速铁路总里程的 66.3%。目前我国已拥有世界上最现代化的铁路网和最发达的高速铁路网。

我国高速铁路在研究、设计的同时,也在学习、消化、吸收其他国家高速铁路先进成熟技术,系统总结已开工建设的中国客运专线工程技术、科研试验成果,针对高速铁路建设的关键技术问题,又进一步开展研究、试验、验证、技术装备的自主创新和各系统集成研究攻关,初步形成适合中国国情、路情的高速铁路自主技术体系^[2-4]。通过多年的研究、探索和工程实践,我国在高速铁路桥梁的建设标准和规模已经处于世界前列。

收稿日期:2018-09-10;修回日期:2018-10-23

基金项目:国家自然科学基金(51742811)

第一作者:闫龙彪(1989—),男,博士研究生。

E-mail:yanlongbiao@bjtu.edu.cn

通信作者:韩冰(1973—),男,教授,博士。

E-mail:bhan@bjtu.edu.cn

现有的高速铁路桥梁主要以简支梁桥为主,其中预应力混凝土简支梁具有构造简单、受力明确、施工便捷、耐久性好等优点,是高速铁路桥梁的主要结构形式,并且以跨度 24,32 m 简支箱梁的应用最为广泛,随着高速铁路的发展,对于桥梁的跨度提出更高的要求,跨度 40,56,64 m 简支箱梁得到研究应用。

我国高速铁路的桥梁工程,经过研究和建设人员多年来的不懈努力,设计理论、建设技术日趋完善,具有以下基本特征:①已形成独具特色的标准体系^[5-6];②桥梁总长度占比高,预应力混凝土梁大量应用^[7-8];③成功研发高速铁路标准梁建造成套技术^[9];④特殊结构桥梁及大跨度桥梁建造居于世界前列^[10-11];⑤组合结构桥梁的应用形成新的特色^[12-13]。

2 高速铁路桥梁相关研究分析

科技论文对高速铁路科技进步起引领作用,不仅代表此领域科学、技术和工程方面的需求与发展方向,亦体现了在既有研究成果的基础上,今后一段时间的学术热点。自 1992 年始,我国学者即开展对高速铁路的研究工作,并发表了大量的论文。依据知网文献统计中文文献中高速铁路(含客运专线)的文献发表数量和高速铁路桥梁的文献数量,结果见表 1。从中可以看出,20 世纪 90 年代为积累阶段,文献数量相对平稳,从 2005—2010 年文献数量快速增长,研究力度大为增强。这段时期处于我国建设高速铁路的初期,面临京沪高速铁路的建设,需要进行大量的技术论证。之后针对高速铁路的研究一直处于维持高位的平稳阶段。与此同时,有关高速铁路桥梁的研究基本与高速铁路整体研究同步。1993—2006 年文献发表量缓慢

表 1 高速铁路及其桥梁有关文献历年发表量

年份	高速铁路 论文篇数	高速铁路 桥梁论文 篇数	年份	高速铁路 论文篇数	高速铁路 桥梁论文 篇数
1992	98	0	2005	240	23
1993	113	1	2006	390	31
1994	125	2	2007	473	61
1995	150	7	2008	604	82
1996	141	9	2009	733	111
1997	90	6	2010	1 016	134
1998	115	16	2011	990	134
1999	128	11	2012	863	119
2000	153	21	2013	865	100
2001	191	29	2014	954	106
2002	137	29	2015	1 032	121
2003	209	31	2016	992	97
2004	190	20	2017	1 084	98

增加,2007—2011 年,桥梁研究方面的文献数量增速很快。2011 年以后有所下降,但整体数量依然保持较高位。

高速铁路桥梁研究的主要经费来源见表 2。其中,国家自然科学基金和铁道部科技研究开发计划项目占有较大的比例,以此 2 个基金为支撑,分别发表 153,98 篇论文。国家高技术研究发展计划(863 计划)、国家重点基础研究发展计划(973 计划)、中国博士后科学基金、跨世纪优秀人才培养计划、高等学校博士学科点专项科研基金和长江学者奖励计划等也对高速铁路桥梁研究进行了大力的资助。国家基础建设的强力推动、铁路部门的有力支持,以及其他相关基金机构的资助,使得高速铁路桥梁的研究得到快速发展。

表 2 高速铁路桥梁研究主要经费来源

研究经费来源	论文篇数
国家自然科学基金	153
铁道部科技研究开发计划项目	98
国家高技术研究发展计划(863 计划)	29
国家重点基础研究发展计划(973 计划)	25
中国博士后科学基金	22
跨世纪优秀人才培养计划	17
高等学校博士学科点专项科研基金	15
长江学者奖励计划	10
建设部科技计划项目	8
国家科技支撑计划	8
国家科技攻关计划	8
四川省应用基础研究基金	5
四川省青年科技基金	5
江苏省自然科学基金	5
湖南省自然科学基金	5

开展高速铁路桥梁研究的主要单位及其论文发表量分布情况见表 3。其中,西南交通大学和中南大学研究成果突出,分别发表 122 和 99 篇论文,中国铁路设计集团有限公司、中国铁道科学研究院、中铁第四勘察设计院集团有限公司、中铁第一勘察设计院集团有限公司、北京交通大学、中铁二院工程集团有限责任公司、同济大学、石家庄铁道大学和中铁大桥局集团有限公司也对高速铁路桥梁进行了大量的研究。总体来说,目前开展高速铁路桥梁研究的主体仍集中于铁路行业高校、设计院及科研单位。

表 3 高速铁路桥梁主要研究单位及其论文发表量

研究单位	论文篇数
西南交通大学	123
中南大学	99
中国铁路设计集团有限公司	86
中国铁道科学研究院	77
中铁第四勘察设计院集团有限公司	67
中铁第一勘察设计院集团有限公司	54
北京交通大学	53
中铁二院工程集团有限责任公司	31
同济大学	30
石家庄铁道大学	30
中铁大桥局集团有限公司	22
兰州交通大学	16
中国工程设计咨询集团有限公司	16
郑州新大方重工科技有限公司	15
东南大学	14
中铁大桥勘测设计院有限公司	13

按研究方向分类,高速铁路桥梁相关文献量分布情况见表 4。其中,以高速铁路桥梁设计理论及方法的研究最多,主要针对高速铁路桥梁的构造、静动力性能以及设计方法进行研究,包括车桥耦合作用以及轨道变形、梁体变形对整个系统动力性能影响的研究。其次是关于建造技术及设备的研究,主要分析高速铁路桥梁的施工技术、施工设备、施工安全等。关于地震、风、洪水、长期性能等防灾减灾方面的文献数量排在第 3 位,主要针对高速铁路桥梁抗震、抗风、抗洪、

表 4 高速铁路桥梁的研究方向

研究方向	论文篇数
设计理论及方法	386
施工技术及机械	342
地震、风、洪水、长期性能	193
车-轨-桥系统	123
减振降噪	60
其他	116

防撞,以及温度、地基沉降、病害损伤、收缩徐变等长期性能进行研究分析。第 4 位的是车桥耦合作用,主要针对轮轨关系、车辆激励下轨道变形、梁体变形对整个系统动力性能的影响等。此外,一些学者开始关注高速铁路桥梁振动对环境的影响,重点包括高速列车行驶引起的环境噪声特性、声屏障性能^[14]等。还有一些文献难以准确归类,这里归于其他类型。

统计中还发现:针对高速铁路桥梁技术类的文献占总数的 65.7%;关于标准与质量控制的占 26.4%;而基础研究的文献较少,约占 4.9%。

3 高速铁路桥梁的应用情况

相较于公路桥梁和普通铁路桥梁,对高速铁路桥梁的安全性、舒适性和平顺性要求更高。目前高速铁路线路中使用较多的桥梁类型是标准跨度桥梁、大跨度混凝土梁式桥及组合结构桥梁、大跨度上承式拱桥和大跨度缆索支承桥梁 4 类。

1) 常用标准跨度桥梁。我国高速铁路桥梁上部结构设计通常采用 250,350 km/h 桥梁通用图,以便于标准化、工厂化施工,保证结构质量,加快施工速度。目前应用较多的跨径为 24,32,40 m,桥梁类型有简支梁、连续梁和刚构梁。其中 95% 左右的桥梁采用标准跨径的预应力混凝土简支箱梁。梁体以竖向基频为动力控制的主要指标,而梁体实测频率普遍高于理论值,满足梁体动力性能要求,避免桥梁和车辆产生较大的动力响应。控制梁体混凝土最大压应力,以控制徐变变形与应力发展在混凝土弹性范围内,同时严格控制梁体上下截面应力差,以实现对徐变等后期变形的精细控制,保证长期的舒适性,减小养护维修工作量,基本保证了桥墩刚度,控制住基础沉降。

2) 大跨度混凝土梁式桥及组合结构桥梁。混凝土结构刚度大,噪声小,成本低,维修养护方便。针对我国的国情,混凝土桥仍是大跨度桥梁优先考虑的桥型之一。现在国内大跨度混凝土梁体收缩徐变竖向变位的控制,是通过控制恒载下梁体上下缘应力差等方法实现的,其具体手段是在混凝土连续结构上增加拱、桁、拉索等加劲结构。加劲结构承担了部分荷载,提高了结构的刚度,从而控制梁体的变位。同时也提出了减小弹性变形以控制徐变变形的技术路径。我国已系统掌握了大跨度混凝土梁式桥及组合结构的设计技术,并对混合结构主梁、空腹式结构、轻质混凝土的应用开展相关研究。

3) 大跨度上承式拱桥。上承式拱桥跨越能力强、刚度大、养护维修工作量小,是艰险山区高速铁路跨越 V 形沟谷的最佳桥型。主拱施工方法是限制其应用的

主要控制条件,我国针对不同的地形地质条件,对拱桥的工法和结构形式开展了相关的研究和探索,从而使拱桥焕发出新的生机和活力。我国提出的钢管劲性骨架分段、分层主拱方法,极大地拓展了上承式拱桥的应用。在万州长江公路大桥成果的基础上,集中深化研究了主拱施工线形控制、截面应力重分布规律、徐变特性、施工工艺等关键技术问题,从而使拱桥设计和施工逐渐成熟。拱上结构采用中等跨度的连续结构来提高铁路拱桥的平顺性,通过选择合理拱轴线和拱上结构布置减小拱的徐变变形。在动力性能分析中,综合考虑了温度、徐变变形和活载非对称加载的影响。对拱桥合理宽度、悬臂灌注法、高强自密实混凝土应用、成桥线形动态调整技术等方面开展了相关研究。

4) 大跨度缆索支承桥梁。通过已建和在建的 40 余座铁路和公铁斜拉桥的研究、设计、探索和总结,我国基本掌握了铁路斜拉桥的刚度标准,特别是大跨度斜拉桥的设计技术和主要控制标准。目前国内以活载作用下的挠跨比和梁端转角来控制主梁的竖向刚度,主梁的横向刚度一般为竖向刚度的 2 倍。大跨度缆索支撑结构因其挠度变形曲线较和缓,挠跨比不宜成为主要关注的控制指标,影响行车安全和舒适的主要刚度突变区域,如梁端、主塔、桥墩等,需要对局部范围的轨面变形进行限制。我国钢桥通过控制线路的最小曲线半径来控制梁体的横向变形。我国建造的铁路悬索桥较少。由于缺乏铁路悬索桥列车运行的研究,目前按照斜拉桥的标准和桥上轨道结构要求进行设计。为解决其梁端转角问题,采用加劲梁连续布置、中跨悬吊的结构形式,为了控制其刚度,桥梁设计普遍采用了较大的恒载,自重较重,设计上较为保守。

4 高速铁路桥梁存在的问题及研究方向

目前我国高速铁路桥梁设计理论、建造理论及桥梁动力学上存在科学理论落后于工程实践、总结规律落后于探索创新等诸多问题。下文结合高速铁路桥梁的特点、发展现状以及目前存在的问题,针对高速铁路桥梁设计理论及方法、复杂极端条件下高速铁路桥梁安全性、高速铁路桥梁长期服役性能、新材料及新结构应用基础理论等方面,指出进一步的研究方向。

1) 高速铁路桥梁设计标准的科学依据。现有高速铁路桥梁设计标准大多沿用普通铁路桥梁的设计方法,只是对部分设计参数、设计内容进行了修改,并未针对设计方法进行科学的顶层设计,导致目前高速铁路设计规范中桥梁部分系统性不强,部分内容缺乏足够的科学依据和实测数据的支撑。未来应继续深化高速铁路桥梁设计理论及方法的研究。主要包括高速铁

路桥梁荷载、高速铁路大跨桥梁梁-轨相互作用、高频轮轨作用下的车-线-桥系统伤损机理等。

2) 高速铁路桥梁长期性能演化规律及能力保持。高速铁路采用了大量的预应力混凝土桥梁,对这些桥梁性能演化规律的认识还不深入。随着运营时间的增加,桥梁性能的退化增加了列车运行安全风险,加剧了检查维修工作量大与作业时间有限的矛盾。由于这些桥梁采用相同建造标准,集中在相对较短的时间内建造而成,一旦出现安全问题则影响面巨大。为此应加大对高速铁路桥梁长期服役性能的研究。主要包括高速铁路预应力混凝土梁徐变及其对行车安全性的影响、高速铁路预应力混凝土梁耐久性、大跨度特殊结构桥梁服役性能演化、高速铁路桥梁快速检测评估理论、高速铁路桥梁基础沉降等。

3) 高速铁路桥梁动力性能。高速铁路桥梁与普速铁路桥梁不同,由刚度控制设计。因而二者在地震、风致振动、车桥耦合振动方面显著不同,理应采用不同的求解理论、分析方法和安全判别标准。而在此方面,尚未充分开展与行车速度匹配的全面透彻的科学的研究。尤其是特大跨度桥梁,如何基于车-线-桥-环境耦合理论,从保证高速行车的角度考虑结构设计的优化,仍需要开展大量基础研究。进一步加强复杂极端环境下高速铁路桥梁的安全性研究,主要包括高速铁路桥梁-车-地震系统安全性、高速铁路桥梁-车-风系统安全性、浅海区域风-浪联合作用下桥梁行车安全性、高速铁路桥梁防灾评估及预警等。

4) 高速铁路桥梁新材料、新技术应用的相关理论和技术。高速铁路桥梁是桥梁建造现代化的体现,随着桥梁服役年限的增加,其新材料、新技术、新工艺的性能逐渐被实际运营所验证,但仍需根据实际采用情况和出现的一般性问题进行归纳总结,发现科学理论与科学方法,提出并完善基于这些新材料、新技术、新工艺的新观点。随着我国高速铁路路网的不断完善,一些自然条件恶劣地区如海洋、山区、戈壁等需要修建高速铁路,这就对高速铁路桥梁的服役提出了更高的要求。一方面,现有技术是否适应新的发展需求有待验证;另一方面,为保证桥梁在设计年限内安全服役,需要将新材料、新技术和新工艺引入,进而带来新的科学和技术问题。未来需继续深入对新材料及新技术应用基础理论的研究。主要包括高性能混凝土和钢材的研发与应用,新型施工、养护技术和设备的研发与应用。

5) 高速铁路桥梁新型结构。我国幅员辽阔,跨越地区的地形、地质和环境条件非常复杂,标准梁的形式不能满足所有建设环境的需求,其普及应用受到诸多

限制,要求因地制宜地进行桥梁形式选择。随着后期高速铁路的发展,将会对桥梁提出更高性能的要求,有必要进行新型桥梁的研究,为后期铁路的发展提供坚实的基础。桥梁新型结构形式的研究主要是关于钢-混凝土组合梁、轻型结构桥梁以及不同结构形式桥梁的组合。

6) 高速铁路桥梁的环境友好性问题。高速铁路桥梁多位于人口稠密地区,高速行车产生较大的结构振动及噪声,对铁路沿线的环境产生不利影响。目前虽开展了较多的工程探讨,但仍未有全面性、一般性的科学方法针对高速铁路沿线的环境改变进行预测与控制。今后将重点研究高速铁路桥梁减振降噪^[14],主要包括对高速铁路桥梁气动噪声和结构噪声产生机理的研究以及进行相应的降噪方法和措施研究。

7) 高速铁路桥梁智能化建造。标准化、信息化、智能化的发展趋势如何体现在高速铁路桥梁的发展中,尚缺乏具有前瞻性、战略性的发展思路和理念引导,有待深入开展相关的科学问题的研究,为高速铁路桥梁向可持续方向发展奠定基础。在高速铁路桥梁建造技术方面,应引入自动化、智能化的设计设计理念,实现高速铁路桥梁的建造、运营全过程监控反馈系统,以实时了解桥梁的健康状况,进行针对性的养护维修。

5 结语

我国高速铁路桥梁经过近年来的发展,形成了完整的技术标准,采用工厂化制梁、架桥机组织快速铺架,有效提高了主梁的质量,缩短了建设周期。引入钢-混组合梁等多种类型的桥梁结构,建设了多种特殊结构桥梁及大跨度桥梁。设计理论、建设技术日趋完善,形成了较完整的设计、建设及运营体系。我国高速铁路桥梁的历年文献发表均保持在较高数量,但是在整个高速铁路系统中的研究比重依然很低,只占总文章篇数的 10% 左右,研究重点集中于设计理论与方法,施工技术及装备,地震、风、洪水、长期性能,车-轨-桥系统、减振降噪等方面,研究层次集中于工程技术、标准与质量控制等方面。目前存在设计标准不完善、动力性能和长期性能研究不深入等问题,需对高速铁路桥梁设计理论及方法、复杂极端条件下高速铁路桥梁安全性、高速铁路桥梁长期服役性能、新材料及新结构应用基础理论等方面作进一步的研究。

参 考 文 献

- [1] 孙树礼.高速铁路桥梁设计与实践 [M].北京:中国铁道出版社,2011.
- [2] ANTOLÍN P,ZHANG N,GOICOLEA J M,et al.Consideration

- of Nonlinear Wheel-rail Contact Forces for Dynamic Vehicle-bridge Interaction in High-speed Railways [J]. Journal of Sound & Vibration, 2013, 332(5): 1231-1251.
- [3] 李小珍, 强士中. 列车-桥梁耦合振动研究的现状与发展趋势 [J]. 铁道学报, 2002, 24(5): 112-120.
- [4] 王昆鹏, 夏禾, 张楠. 混凝土徐变对柔性车体列车-桥梁系统动力响应影响分析 [J]. 北京交通大学学报, 2017(6): 114-121.
- [5] HU N, DAI G L, YAN B, et al. Recent Development of Design and Construction of Medium and Long Span High-speed Railway Bridges in China [J]. Engineering Structures, 2014, 74: 233-241.
- [6] YAN B, DAI G L, HU N. Recent Development of Design and Construction of Short Span High-speed Railway Bridges in China [J]. Engineering Structures, 2015, 100: 707-717.
- [7] XIN T, GAO L. Reducing Slab Track Vibration into Bridge Using Elastic Materials in High Speed Railway [J]. Journal of Sound & Vibration, 2011, 330(10): 2237-2248.
- [8] 李国龙, 黎国清, 高芒芒, 等. 基于 CRTS I 型板式无砟轨道温度变形的桥隧过渡段车线动力性能分析 [J]. 铁道建筑, 2018, 58(1): 133-137.
- [9] 刘勇, 戴公连, 康崇杰. 中国高速铁路简支梁综述 [J]. 铁道科学与工程学报, 2015, 12(2): 242-249.
- [10] 周源. 高速铁路大跨度预应力混凝土连续刚构桥长期性能关键问题研究 [D]. 上海: 同济大学, 2011.
- [11] 金莉. 高速铁路超长大桥梁设计研究 [J]. 铁道标准设计, 2017, 61(1): 34-40.
- [12] ZHOU H, LIU K, SHI G, et al. Fatigue Assessment of a Composite Railway Bridge for High Speed Trains. Part I: Modeling and Fatigue Critical Details [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2012, 82(12): 234-245.
- [13] 张帅. 高速铁路 5×50 m 钢箱-混凝土连续结合梁设计研究 [J]. 铁道标准设计, 2016, 60(9): 59-63.
- [14] 王少林. 考虑列车-轨道-桥梁/声屏障相互作用的高速铁路半封闭式声屏障动力响应分析 [J]. 铁道标准设计, 2017, 61(1): 149-153.

Research Status and Development Trend of High Speed Railway Bridges in China

YAN Longbiao, CHENG Zenong, HAN Bing, ZHANG Nan

(School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract Bridge is an important structure of high speed railway. Its performance directly affects the safety and comfort of train operation. It is very important for the development of high speed railway in China to carry out in-depth research on related problems of high speed railway bridge and improve its design, construction and operation and maintenance level. Based on the construction characteristics of high speed railway bridges in China and the statistics and analysis of existing documents, the publishing rules of relevant research documents and the research status of high speed railway bridges were summarized in this paper. Based on the development needs of China railway and the extensive collection of expert suggestions in the field, the problems that need to be solved urgently were summarized, and the directions of future research were pointed out.

Key words High speed railway; Bridge; Research status; Existing problem; Development trend; Document statistics; Direction of scientific research

(责任编辑 李付军)