

文章编号: 1674—8247(2021)02—0027—06
DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2021.02.005

400 km/h 莫斯科至喀山高速铁路土建 工程设计研究综述

陈 列 朱 颖 谢 毅 林晓龙

(中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031)

摘 要:俄罗斯莫斯科至喀山高速铁路设计速度 400 km/h, 轨距 1 520 mm, 极端低温 -48 ℃。为提升运输效益, 除开行旅客列车外, 还开行货运列车。设计面临在国外更低气温环境下建造更高速度客货混运宽轨铁路的诸多挑战, 既无可借鉴的工程先例, 也缺乏完善的技术标准。为成功实施该项目, 在充分吸收国内外高速铁路特别是中国高速铁路成功经验的基础上, 以科学研究和技术标准研究为牵引, 结合俄罗斯特有的国情和铁路运输管理体系, 通过创新运输组织方式和对高速铁路基础理论的分析研究, 形成了严寒地区速度 400 km/h 宽轨高速铁路设计的技术标准体系和成套技术。在完成设计并通过俄罗斯国家鉴定的同时, 为中国标准国际化, 中国高铁技术装备“走出去”积累了经验, 探索了新路, 也为我国建造更高速度的高速铁路奠定了基础。

关键词:400 km/h 高速铁路; 严寒地区; 俄罗斯; 莫斯科至喀山; 设计研究; 技术标准

中图分类号:U238

文献标志码:A

27

Research Overview on the Civil Engineering Design of 400 km/h Moscow-Kazan High-speed Railway

CHEN Lie ZHU Ying XIE Yi LIN Xiaolong

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

Abstract: The design speed of Moscow-Kazan high-speed railway in Russia is 400 km/h, the track gauge is 1 520 mm, and the extreme low temperature is -48 ℃. In order to improve transportation benefits, freight trains are also operated in addition to passenger trains. The design is faced with many challenges of building a higher-speed broad-gauge railway for mixed passenger and freight transport under the lower temperature environment abroad, without neither engineering precedent for reference nor perfect technical standard. For the purpose of successfully implementing the project, a technical standard system and complete set of technologies for the design of broad-gauge high-speed railway with a speed of 400 km/h in the severe cold region have been formed through the innovative transport organization mode and the analysis and study on the basic theory of high-speed railway by taking scientific research and technical standard research as the orientation and combining with Russia's unique national conditions and railway transport administration system, and on the basis of fully absorbing the successful experience in high-speed railway at home and abroad, especially that of China high-speed railway. With the completion of the design and the acceptance in the national appraisal of Russia, great experience for the internationalization of the Chinese standards and the "going global" of the high-speed railway

收稿日期:2021-03-01

作者简介:陈列(1965-),男,教授级高级工程师。

基金项目:四川省科技厅重点研发计划(2018GZ0050)

引文格式:陈列,朱颖,谢毅,等.400 km/h 莫斯科至喀山高速铁路土建工程设计研究综述[J].高速铁路技术,2021,12(2):27-32.

CHEN Lie, ZHU Ying, XIE Yi, et al. Research Overview on the Civil Engineering Design of 400 km/h Moscow-Kazan High-speed Railway[J]. High Speed Railway Technology, 2021, 12(2):27-32.

technology and equipment of China has been accumulated, new ways have been explored, and a foundation has been laid for the construction of high-speed railway at a higher speed in China.

Key words: 400 km/h high-speed railway; severe old region; Russia; Moscow-Kazan; design research; technical standard

莫斯科至喀山高速铁路(简称“莫喀高铁”)西起莫斯科库尔斯克亚车站,向东经莫斯科、莫斯科州、弗拉基米尔州、下诺夫哥罗德州、楚瓦什共和国、马里埃尔共和国,东至鞑靼斯坦共和国首府喀山^[1-2]。线路长度约 770 km,设计速度 400 km/h,轨距 1 520 mm,最大坡度 24‰。

沿线地形相对平坦,季节性冻土、软土分布广泛,部分地区岩溶发育,极端最低气温 -48 ℃,最高气温 37 ℃,地质和气候极其复杂。铁路跨越国道 M7 公路、既有铁路以及克利亚济马河、奥卡河、苏拉河和伏尔加河。

1 运输组织

根据俄罗斯交通运输建设项目勘察设计开放式股份公司《莫斯科-喀山-叶卡捷林堡高速铁路干线(高铁-2)莫斯科-喀山段施工阶段投资论证》(简称“《投资论证》”)报告,莫喀高铁采用最大轴重 170 kN 的高速客运列车(允许行车速度 350~400 km/h)、区域特快列车(允许行车速度 250 km/h)以及最大轴重 226 kN 的集装箱列车(允许速度 160 km/h)混跑的行车组织模式。

为分析 400 km/h 高速客运列车与 226 kN 集装箱列车共线运行的合理性,运用现代机车车辆-轨道耦合动力学理论,对高速动车与低速货车的动力学性能进行对比分析,结果发现:高速客运动车、高速货运动车组和低速货列车(“三大件转向架”货车)通过直线和曲线轨道时,低速货列车作用下的各轮轨安全性指标明显大于另外两种车型作用下的指标,低速货列车作用下的钢轨振动位移也明显大于另外两种车型作用下的钢轨振动位移。高速客运动车组与货运动车组作用下的各轮轨动力学性能差异不明显。

传统转向架货车(“三大件转向架”货车)簧下质量大,以 160 km/h 速度通过时,对轨道的动力作用较剧烈,轮轨动力性能指标明显高于动车组或动货车作用下的指标,动车组与传统转向架货车的轮轴横向力比较如图 1 所示。

为降低轮轨动力作用,保证高速客运的安全性、舒适性,减少维修养护费用,并充分吸取世界高速铁路的运营实践经验,提出了取消开行货运集装箱列车的建议。但考虑到莫喀高铁沿线人口少,取消货运对项目效益影响较大以及互联网购物发展的需要,建议将货

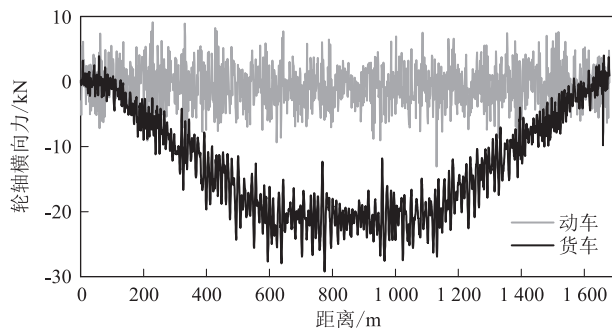


图1 动车组与传统转向架货车的轮轴横向力图

运集装箱列车改为运输高附加值的高速货运动车组(允许速度 250 km/h)。该建议被俄方采纳,成为莫喀高铁设计的基准和原则,也为未来铁路国际高速通道建设提供了具有竞争性的新模式^[3-4]。

“动车组客运+动车组货运”是一个新型的运输组织结构形式,包括列控系统、通信信号、牵引供电和信息系统,都需在 400 km/h 目标速度值之下进行全新设计,以保证高速客货共线铁路的平稳、舒适和安全。

2 线形参数

根据莫喀高铁设计时速、轨距等技术要求,在平面参数研究中,研究了线路超高、欠超高、过超高、超高时变率、欠超高时变率等动力学参数,探明了 400 km/h 高速铁路曲线半径、缓和曲线长度、夹直线长度、夹圆曲线长度、线间距离等与通过列车之间的相互作用机理,建立了线路平面参数与车-线动力学特性的关系模型。提出莫喀高铁特定条件下最小曲线半径为 10 000 m,最大曲线半径为 1 4000 m,曲线半径 10 000 m 时的最小缓和曲线长度为 600 m,夹直线及圆曲线的最小长度为 400 m,正线最小线间距为 5 m 等参数设计标准或基准。

在纵断面参数研究中,分析了坡度、坡段长度、竖曲线半径、坡度代数差等对高速列车通过时动力学特性的影响规律,建立了线路纵断面参数与车-线垂向动力学参数之间的关系模型。提出适合本项目特殊条件的最大坡度为 24‰,最小夹坡段长度为 300 m,最小坡段长度为 1 150 m,最大坡段长度位 4 km,竖曲线半径为 42 000 m(凸型)和 31 000 m(凹形)等参数设计标准或基准。

在高速铁路空间线形基本原则的研究中,根据高速铁路空间线形与沿线地理环境、地物景观、综合交通

体系的融合机理,分析了高速行车安全性、平稳性和旅客舒适性随空间线形的变化规律,提出了确定高速铁路空间线形的基本原则^[5],并采用动力仿真方法对全线平纵断面参数进行评估,验证所采用参数的合理性。

设计中,通过修订线形参数标准、统一全线曲线要素、选取合理路桥分界高度,以及依据动力仿真方法评估结果调整设计参数等手段,提高了线形设计品质。

3 冻土特性研究

在莫喀高铁沿线莫斯科丘陵、弗拉基米尔低地、下诺夫哥罗德低地、伏尔加河丘陵4个大的地貌单元中,选择林地、草地、沼泽湿地以及河流阶地等代表性微地貌的14处测试场地,监测自然条件下沿线不同场地的冻胀特性。根据寒季现场调查和监测的结果,确定了莫喀高铁沿线季节性冻土的分布特征。(1)提出了总冻胀量 $h < 4\text{ mm}$ 为弱冻胀, $4\text{ mm} \leq h \leq 15\text{ mm}$ 为冻胀, $h > 15\text{ mm}$ 为强冻胀的高速铁路冻胀分级标准和相应的防治措施。按照冻胀分级标准,14处测试场地中,6处场地为弱冻胀土,6处场地为冻胀土,2处场地为强冻胀土。(2)提出了影响冻胀的主要因素有土体性质、水、温度、含盐量和雪盖,探明了冻胀强度高的土体类型,最大季节性冻土深度与地下水最高水位的关系,冻胀与低温天气持续时间的关系,含盐量对冻胀的影响和雪盖对冻结及冻结融化时间的影响。

4 轨道结构

基于车辆-轨道耦合动力学理论,根据莫喀高铁400 km/h高速列车主要参数,建立高速列车-无砟轨道耦合动力学模型,开展轨道动力响应、动荷载、曲线半径和超高等参数以及钢轨表面局部几何状态恶化等参数变化对轨道结构各部件影响的研究。根据轨道几何不平顺对高速列车运行安全性和舒适性的影响分析,提出了不平顺控制限值。通过轨下胶垫刚度、过渡段刚度、扣件间距等对高速列车-无砟轨道动力特性及行车安全性和舒适性的影响分析,提出了合理的合理参数值。

根据严寒地区的气候特点,结合无砟轨道的动力特性,提出了严寒地区无砟轨道列车设计荷载、温度荷载和基础变形荷载的合理取值。根据严寒地区无砟轨道的服役特性研究,综合考虑轨道纵横向传力、养护维修、严寒条件下材料的服役特性等,提出了合理的无砟轨道结构型式。通过建立无砟轨道静、动力分析模型,开展了无砟轨道结构设计参数研究,提出了无砟轨道的主要结构设计参数。针对严寒地区对无砟轨道服役状态要求,开展了无砟轨道各主体结构 and 附属结构的

适应性研究。针对严寒环境特征,开展无砟轨道系统材料的常温、低温力学性能试验与耐候性(低温、冰雪)试验研究,提出材料的关键设计参数。

运用高速道岔平面线形与基本参数法及轮轨系统动力学评估理论,研究了适合于客货共线、客运专线运行特点的400 km/h高速道岔平面线型,确定了其主要尺寸和总布置图。结合道岔转换计算,确定了高速道岔的牵引点布置和转换动程。研究确定了400 km/h高速道岔部件结构设计原则、滑床台弹性扣压技术、双肢弹性可弯心轨、尖轨及心轨不足位移控制、心轨跟端结构、工电接合部方案、翼轨结构形式、尖轨和心轨防跳结构、长短心轨拼接方式、心轨水平藏尖结构、岔枕或道岔板结构形式。

采用基于中国CRTSⅢ型板式无砟轨道技术的CRTSⅢRUS型板式无砟轨道无砟轨道,由P65钢轨、扣件、双向预应力预制轨道板、自密实混凝土、隔离层、钢筋混凝土底座等部分组成。路基和桥梁地段均为单元结构,受温度力作用影响较小,对严寒及大温差环境的适应性好。轨道板为工厂预制,采用自动化流水线进行先张法预应力混凝土预制。

根据中国高速铁路建设、运营经验,并结合俄罗斯国情,对俄罗斯2013年颁布的《莫斯科至喀山至叶卡捷琳堡高速铁路莫斯科至喀山区段人工设施设计施工技术规范和特殊技术条款》(简称“《特殊技术条款》”)提出了修改和补充建议。将原规定“无缝线路超长轨道长轨最佳锁定轨温 $35 \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ”修改为“应由计算确定,并且其取值应该在轨道区间范围内是统一的”;补充了“为补偿无缝线路超长轨道与桥梁交界处或与道岔相连处的温度位移,根据计算需要设置伸缩调节器”的规定;补充了“当具备合适的规范技术文件时,可以按规定程序使用感应压力焊接方式,当缺乏使用电接触方式的技术可行性时,可以使用铝热焊接方式”的规定;补充了“当使用的扣件应该保障钢轨相对于轨道结构支座进行自由滑动时(在轨枕处、伸缩调节器处或桥梁上),应该保障扣压力不小于9 kN,扣件节点纵向阻力不小于4 kN”的规定。

5 路基工程

根据莫喀高铁设计时速、轨距、气候环境特征等,开展了无砟轨道路基基床结构的适用性研究,包括沥青混凝土强化基床、级配碎石基床和桩板结构等多种型式,特别是沥青混凝土结构层的适应性与耐久性研究。根据工程资料、实地调研、数值计算、室内材料与模型试验的研究成果,开展了无砟轨道400 km/h高速铁路基床结构型式的综合研究。

通过对严寒地区抗冻胀填料冻胀性表现的调研,分析了填料的级配特征,以及典型填料的级配、渗透、持水和压实特征,评价了其工程适用性。通过测试改良土的强度及抗冻指标,评价其工程适用性。

通过对国内外研究现状、现场勘查资料、既有线路监测结果等的分析、总结,考虑气候、地质、工程对策等主要影响条件,比选路基典型监测断面。并基于设计规范、评估技术指南、高速铁路工程测量规范等规定,完成基于环境-荷载-路基-列车的安全风险分析,最终确定冻土地区高速铁路路基的监测内容、控制指

标及典型断面的测点布设方案。

路基结构采用“防排疏渗”的防冻胀结构型式,由沥青混凝土封闭层、第一保护层、第二保护层、保护层以下路堤、边坡防护、排水系统等组成。路基断面示意图如图2所示。设置能有效减小地表水下渗和路基冻胀的全断面沥青混凝土封闭层。保护层采用渗透性好的非冻胀填料,厚度不小于冻结深度。将电力、通信电缆槽等设置于路堤坡脚护道上。路堤坡脚设置保温护道,加强沥青混凝土层与轨道结构的连接,线间排水通过轨道基座伸缩缝实现。

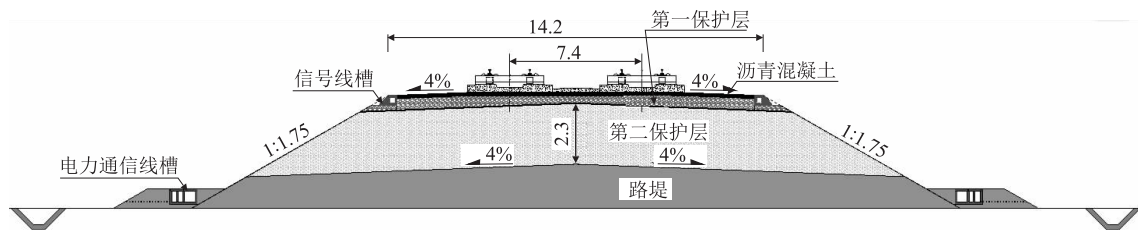


图2 路基断面图(m)

路桥分界高度综合路基工后沉降标准和工程投资综合考虑。低压缩性土地基的路基高度为8~12 m,软弱地基的路基高度为6~8 m,其他地基的路基高度为6~10 m。设计资料足够时,应根据地基条件和路堤填料方案(远运或改良),进行路基与桥梁方案的比选研究。

6 桥梁结构

针对典型简支梁桥,采用车-线-桥耦合振动理论,研究400 km/h 高速列车下桥梁的动力响应及车辆的行车安全性和乘坐舒适性,评价其设计参数。基于车-桥耦合振动分析理论及车桥耦合振动计算,分析不同时速列车作用下梁体位移的动态变化。根据各种因素作用下梁体位移动态的分析结果,对桥梁结构动态性能进行综合评价,给出桥梁梁部结构刚度、变形及变位限值。

在对俄罗斯混凝土制备技术和应用现状进行调研的基础上,结合各国对混凝土抗冻性技术的要求和俄罗斯特殊的环境条件,提出了桥梁用混凝土的耐久性设计原则。通过桥面防水体系耐久性设计研究,结合桥梁轨道结构形式,提出了用于无砟轨道混凝土桥面的Ⅰ型防水体系结构和用于有砟轨道混凝土桥面或无冻融季节地区无砟轨道混凝土桥面的Ⅱ型防水体系结构。通过梁体、桥墩防护材料研究,提出了梁体、桥墩混凝土表面耐久性涂装体系。

根据中国高速铁路的建设、运营经验,对俄罗斯

《特殊技术条款》提出修改和补充建议。删除了“桥上只铺设无砟轨道”的不合理规定,为设计全线铺设无砟轨道,提升俄罗斯高速铁路品质扫除了障碍。提出的“补充结构物不均匀沉降造成的折角不应大于1‰,无砟轨道墩台均匀沉降限值20 mm、有砟轨道墩台均匀沉降限值30 mm”、“补充梁端竖向转角标准,桥长超过3 km在线路两侧交错设置1处可上下桥的救援疏散通道”等建议均在《特殊技术条款》修订中被采用。

根据中国高速铁路桥梁采用工厂制造,大型设备运输、架设的成功经验以及这一经验在俄罗斯的适应性分析和技术保障措施研究,将俄罗斯《投资论证》报告“混凝土桥梁以现场浇筑为主”的设计方案修改为“以标准化设计的预制梁为主”的方案,有效提升了工程质量,节省了工程投资(高架桥预制梁与现浇梁混凝土量比高达1:93),缩短了建设工期。

按照俄罗斯设计模数,标准化设计的预制梁以34 m跨度预应力混凝土简支箱梁为主^[6],其最大动力响应特征如图3所示,特殊情况采用移动模架和支架现浇。

同时设计了以预制架设为主的24 m跨度预应力混凝土简支箱梁和采用移动模架现浇的50 m跨度预应力混凝土简支箱梁。为适应特殊困难区段施工组织的需求,还设计了34 m和50 m跨度钢-混简支梁。跨M7公路采用特殊的框架桥,跨河流、道路、既有铁路时设计主跨66 m和162 m的预应力混凝土连续梁

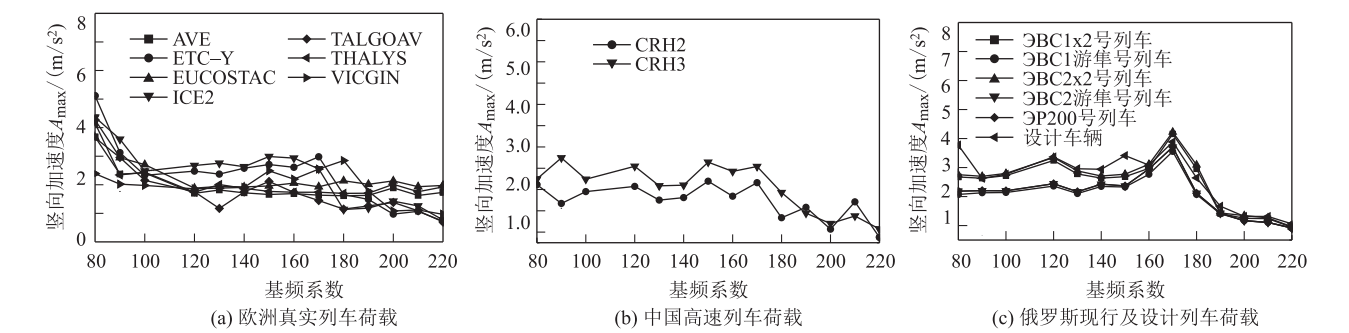


图3 跨度34 m 预应力混凝土简支箱梁最大动力响应特征图

(连续刚构)、110 m 的混凝土系杆拱桥和 190 m 的钢混结合梁。

7 隧道结构

根据动车组列车密封性调研,分析多种工况下 400 km/h 列车通过断面 65 ~ 95 m²单线隧道和 80 ~ 110 m²双线隧道时的车内瞬变压力,并基于瞬变压力舒适度准则,得出两组推荐隧道净空断面,如表 1 所示。经平均空气阻力检算,两组隧道推荐断面下的空气阻力满足列车的牵引能力。

以两组推荐断面为基础,采用数值模拟计算软件计算发现,为使微气压波满足标准限值要求,需同时采用缓冲结构和辅助坑道措施。各缓冲结构的波前压力

梯度曲线如图 4 所示。

表 1 400 km/h 高速铁路隧道净空断面面积推荐值表

所需动态密封指数 要求/s	单线隧道断面/m ²		双线隧道断面 /m ²
	长度≤3 km	长度>3 m	
18	90	75	110
20	80	70	100

研发了寒区高速铁路隧道温度场模型试验系统,该系统由高速列车模型驱动装置、隧道模型、温度控制装置、测试系统以及列车模型 5 部分组成^[7]。系统装置试验可得:(1)实际工程中,寒区隧道不能忽视围岩地温对保温设防长度的影响;(2)寒区高速铁路隧道应考虑列车运行间隔对保温设防长度的影响。

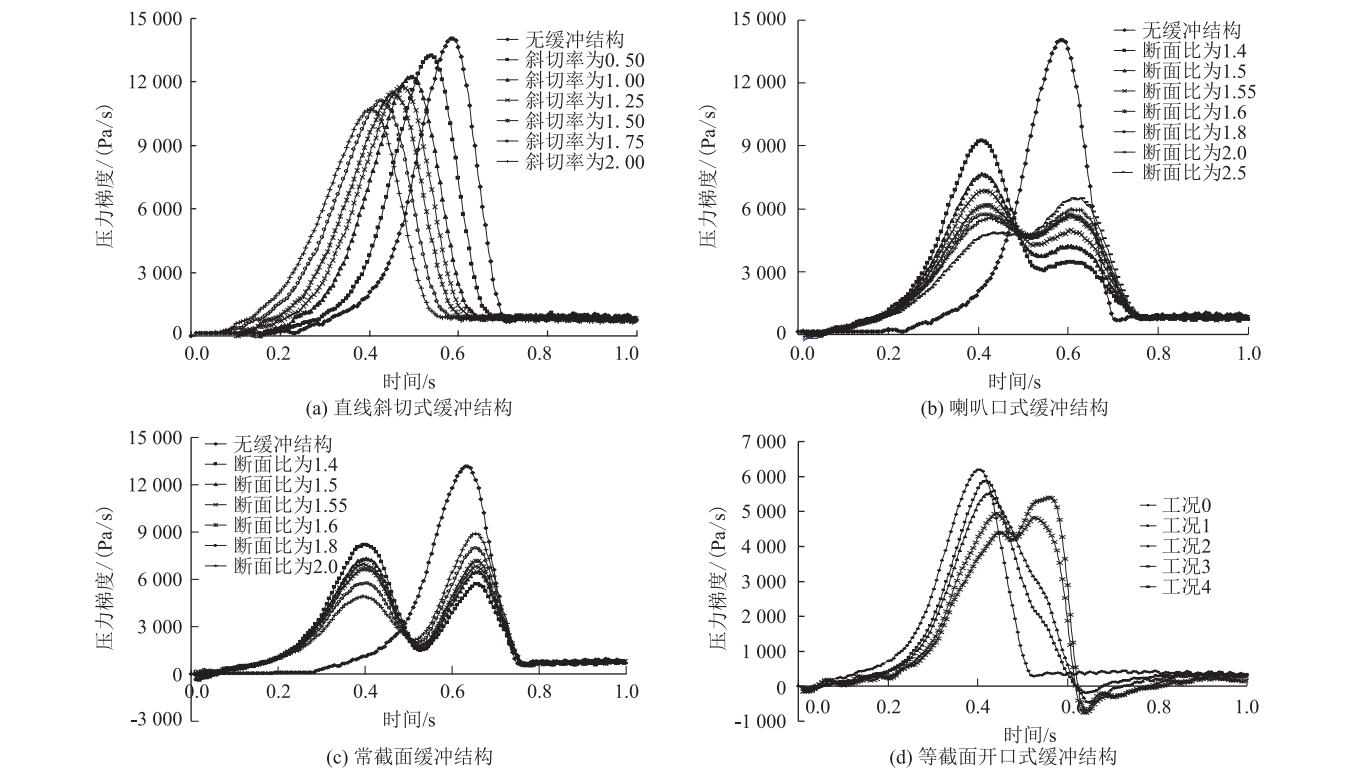


图4 波前压力梯度曲线图

8 站场设计

对《特殊技术条款》提出多项修改建议:(1)对“正线上渡线使用 22 号道岔,正线与到发线连接使用 18 号道岔,到发线与其他线路连接使用 11 号道岔,其他线路之间连接使用 9 号道岔”的条款,提出了“正线道岔统一采用 18 号道岔,疏解联络线根据速度目标值来选取,一般选用 50 号道岔、42 号道岔,车站内到发线与其他线路接轨一般选用 12 号或者 9 号道岔”的建议;(2)对“站间距通常为 20~40 km,带股道的分界站距离为 50~70 km”的条款,提出了“站间距一般在 50 km 左右,不宜小于 30 km,不宜大于 60 km”的建议;(3)对“道岔间配轨依次相邻的两个道岔之间的插入段长度不得小于 50 m,困难条件下也需保证不小于 25 m”的条款,提出了“正线上道岔对向设置,中间短轨长度不小于 50 m,受站坪长度限制时,短轨不应小于 32 m;道岔顺向布置时,中间短轨不小于 25 m,到发线与其他站线间配轨见相关设计原则说明”的建议;(4)对“调度连接线(渡线)速度不小于 170 km/h,车站到发线速度不小于 80 km/h”的条款,提出了“调度连接线(渡线)处应根据不同目标值选用相应型号道岔”的条款;(5)对涉及开行集装箱列车的多项条款,提出了删除开行集装箱列车相关条文的建议;(6)对连接与交叉条款,提出了“补充疏解线根据列车种类以及运行需要进行设置”的建议;(7)对道岔转辙器条款,提出了“补充道岔转辙器由相应道岔型号配套,根据需要选定”的建议。

《投资论证》中,全线共设调度站 15 处,铺设道岔 60 组。调度站距离最近站点 20~35 m,由两条渡线构成,用于调整施工时期或者出现意外情况下的火车运行。通过对铺设区间渡线作用、世界主要国家区间渡线设置情况和合理站间距的分析,提出本线速度目标值为 400 km/h 条件下,采用“一线维修、一线运营”的养护维修模式存在极大安全隐患,建议采用双线同时封闭维修的方式,正常情况下不进行维修转线作业。本线在仅运行高速动车和区际动车两种列车的条件下,完全可实现公交化、节拍化运行,没有必要区间越行,且在节拍化运行情况下,双方向均高密度发车,也难以实现区间越行,反向行车作业也没有必要。故建议在相距 75.62 km 的卡夫罗夫高铁站与戈罗霍韦茨高铁站、相距 81 km 的尼瓦高铁站与波良金高铁站的区间内各增设越行站 1 处,减少 15 处调度站,减少铺设高速道岔 44 组,增加站线铺轨约 4.2 km,优化运输

组织和设计。

9 结束语

在充分吸收国内外高速铁路特别是中国高铁成功经验的基础上,本文通过高速铁路线形、轮轨关系、空气动力学、结构动力特性、冻胀土特性等基础理论的分析研究和科学试验,建立和完善了严寒地区 400 km/h 宽轨高速铁路设计技术标准体系和成套技术。在确保莫喀高铁技术水平和设计质量,创新和发展高速铁路运输组织方式、技术标准、结构形式的同时,为中国标准国际化,中国高铁技术和装备“走出去”积累了经验,提升了中国高铁的国际影响力,也为我国探索和建造更高速度的高速铁路奠定了基础。

参考文献:

- [1] 朱颖. 严寒地区 400 km/h 高速铁路线下基础关键技术[C]//严寒地区高速铁路技术研讨会论文集. 哈尔滨, 2017: 40-45.
ZHU Ying. Key Technologies of Track Foundation on 400 km/h High Speed Railway in Cold Regions [C]//Proceedings of Technical Seminar on High-speed Railway in Cold Regions. Harbin, 2017: 40-45.
- [2] 刘大园, 庞玲, 姚力. 莫斯科至喀山高铁轨道设计综述[J]. 山西建筑, 2020, 46(11): 126-127.
LIU Dayuan, PANG Ling, YAO Li. The Track Design Summary of High-speed Railway from Moscow to Kazan[J]. Shanxi Architecture, 2020, 46(11): 126-127.
- [3] 钱立新. 世界高速铁路技术[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2003.
QIAN Lixin. World High-speed Railway Technology [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2003.
- [4] 黄民. 新时代交通强国铁路先行战略研究[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2020.
HUANG Min. Research on the Strategy of Building a Country with Strong Transportation Network by Developing Railway First in the New Era [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2020.
- [5] ZHU Ying, CHEN Lie. Modern Railway Engineering Consultation [M]. Singapore: World Scientific, 2018.
- [6] 郭建勋, 陈列, 刘伟, 等. 莫斯科至喀山高速铁路桥涵统一跨构通用图设计[J]. 高速铁路技术, 2018, 9(4): 50-56.
GUO Jianxun, CHEN Lie, LIU Wei, et al. Standard Drawing Design on Bridge and Culvert of Moscow-Kazan High-speed Railway [J]. High Speed Railway Technology, 2018, 9(4): 50-56.
- [7] 高焱, 朱永全, 何本国, 等. 寒区高速铁路隧道温度场模型试验系统的研制及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(8): 1989-1998.
GAO Yan, ZHU Yongquan, HE Benguo, et al. Development and Application of Test System Modeling Temperature Field for High Speed Railway Tunnel in Cold Region [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(8): 1989-1998.