

Effect of bridge windscreen on train operation safety under strong side wind

Xinjie Wang¹ Weijuan Wang² Yaguang Yan^{1*}

1. Civil Engineering College, Hebei Polytechnic University, Handan, Hebei, 056000, China

2. Shougang Jingtang Iron and Steel United Co., Ltd., Tangshan, Hebei, 063200, China

Abstract

This study investigates the operational mechanisms and design optimization strategies of bridge deck wind deflectors in high-wind environments, analyzing their effects on train safety through three key aspects: mitigating lateral wind impacts, enhancing operational stability, and reducing aerodynamic resistance. The research identifies critical safety risks under strong crosswinds, including vehicle stability, driver comfort, passenger safety, and track system load-bearing capacity. The paper proposes comprehensive design optimization strategies encompassing: improving vehicle aerodynamic performance, optimizing structural parameters and height configurations, selecting appropriate materials, implementing wind flow simulation and aerodynamic analysis, and developing intelligent dynamic control systems.

Keywords

bridge windscreen; strong side wind; train safety; design optimization; aerodynamics

桥梁挡风屏对强侧风条件下列车运营安全性的影响

王新杰¹ 王伟娟² 闫亚光^{1*}

1. 河北工程大学土木工程学院, 中国·河北 邯郸 056000

2. 首钢京唐钢铁联合有限责任公司, 中国·河北 唐山 063200

摘要

本文的目的旨在研究大风环境下桥面挡风屏对列车安全运营的作用机理以及设计优化策略, 分析并验证桥面挡风屏通过降低侧向风的影响、提升列车运行平稳性、降低列车运行阻力提升列车运行安全。分析强侧风环境下列车安全运营存在的风险: 车体运营稳定性、司机驾驶条件及行车安全、乘客舒适性以及轨道体系载荷等方面的问题。通过文章提出桥面挡风屏设计及优化方法策略: 桥面挡风屏设计中提高车体通过性能挡风屏外形参数、高度形式优化设计方法、挡风屏材料选用以及风流模拟及风力分析计算方法、智能与动态的调控方法策略等。

关键词

桥梁挡风屏; 强侧风; 列车安全; 设计优化; 风力学

1 引言

铁路强侧风对铁路运输中的列车平稳及运行安全性是一个严峻考验, 其主要危害在铁路桥梁上尤为突出。铁路桥梁是国家重要的交通基础设施, 在复杂气象条件等因素作用下, 会对列车在桥梁上运行产生强侧风风险, 导致一系列危害铁路运行稳定性的运行安全隐患出现, 因而, 如何应用铁路桥梁挡风屏进行桥上列车强侧风危害的安全性防范问题, 是铁路工程中值得关注的重要方面。

【作者简介】王新杰(1998-), 男, 中国河北唐山人, 硕士, 从事隧道空气动力学研究。

【通讯作者】闫亚光(1978-), 男, 中国河北邯郸人, 博士, 副教授, 从事隧道空气动力学研究。

2 桥梁挡风屏对强侧风影响的作用机制

2.1 减少侧风影响

侧风指风力作用在列车侧面, 导致列车出现横向偏摆与横摇, 大侧风的存在使列车运行不稳定甚至会引起脱轨等安全事故。桥梁挡风屏是指在桥梁两侧或在桥面上设置有效的障碍物, 有效地减少风力对列车的影响。通过形成屏蔽区, 桥梁挡风屏减小侧风对列车的影响, 列车侧面所受到的风压降低, 从而可以通过改变风的流向使风力不能直接作用到列车侧面, 从而避免列车跑偏导致的风险, 提高列车的行车安全性。

2.2 提高列车的稳定性

在有强侧风的情况下, 列车容易出现左右晃动, 严重的甚至改变列车的运行方向、行驶轨道, 影响列车运行。在桥梁位置设置挡风屏, 有效地降低了侧风对列车运行的影

响,通过科学设置挡风屏,让风流速度、风向得到了控制,从而降低了风对列车平稳性的影响,改善了列车运行中的稳定性能。

2.3 减少气动阻力

强侧风既会对列车的行车安全造成威胁,又会增加列车的风致阻尼,降低列车运行效率,造成列车耗能的增加。当风直接作用于列车表面时,会对列车造成一定的气动力,增加列车运行阻力,影响列车运行速度和用油效率。通过在桥面布设挡风屏,改变了其气流场的流线分布规律,优化了列车与风场的接触模式,可使列车受到的风阻减小^[1]。

3 强侧风对列车运营安全性的影响

3.1 列车稳定性问题

影响列车在强侧风下的运行稳定性,主要是来自列车的横向力矩,列车在运行过程中强侧风对其产生的力作用在列车侧面,则会产生横移或者摇摆等现象,这时列车在轨道上行驶则容易造成列车出现不稳定的情况。当列车高速运行时,风力对列车运行的影响也相对更为严重,此时列车容易出现剧烈的摇摆现象,此时造成列车出现脱轨事故的概率便大幅增加。列车由于在侧风作用下运动不稳,会出现列车向侧风方向溜逸、列车偏重或者倾覆等情况,严重时将会产生列车的失稳情况而发生事故。

3.2 驾驶员操作困难

除了引起列车稳定性降低、导致其出现不良运动之外,强侧风给司机操作带来的影响也是最大的,列车强风状态下需要司机频繁地调整列车的运行状态,比如对列车的运行方向以及速度作出调整,以适应风力瞬时变化引发的列车不稳定状态。经常调整列车运行参数会加大列车司机的操作难度,尤其是连续性强风之下列车司机操控变得更加复杂和困难。强侧风在强风影响状态下时速变化速度异常快,驾驶员可能无法及时应对列车因风力引起的影响,或者在进行操作控制上出现不准确,从而增加人为误控的可能性。

3.3 乘客舒适度下降

强侧风作用不仅影响着列车行车稳定和司机操纵稳定性,而且影响乘客的身体舒适性。列车在强风作用下发生剧烈横向摇摆有可能带来乘客的不适感,尤其处于此工况长时间运转后,乘客可能出现晕车等不适感受。列车晃动不仅使乘客产生身体上的不适感,也会导致一种心理上的不稳感和恐惧感,尤其是在强风条件下运行的列车,乘客的愉悦体验将大打折扣。而对一些长期受风压影响下的列车,其乘客体验将更为不理想。

3.4 轨道系统的负荷增加

强侧风不仅影响列车系统本身,还同时给线路系统增加其他力的作用。列车受到强侧风的影响时,列车与轨道的接触力及滑动摩擦力也受到风力影响,强风对轨道的直接作用可使轨枕轻微的移位,在一段时间内风的正压作用会使轨

道件加速磨损,减短线路系统寿命。持续的风压力不断作用在轨道结构上,可能导致轨道结构变化,发生轨道变形及线路不均匀磨损情况^[2]。

4 桥梁挡风屏设计与性能优化策略

4.1 挡风屏的高度和形状

一般在桥梁挡风屏的高度及形状设计中,高度是由挡风屏的高度与列车所受的侧向大风的强弱程度有关。挡风屏的高度必须尽可能的大,尽量挡住列车的绝大部分侧面的大风,在侧面强风及大风的恶劣条件下,列车可以得到充足的风阻挡区。桥梁挡风屏的设计可结合桥梁结构特点以及地形风力分布图以及最大车速,尽可能增大挡风屏的高度,从而使挡风屏可以阻挡大风在侧面吹来时风力的大部分,进而起到屏蔽侧面风压的作用。否则将不能起到屏蔽作用,还易导致风力的反射与积聚,这样就会产生一个侧向力,导致列车的行驶不稳定,从而降低列车的稳定性,提高列车脱轨的概率。为了不出现这样的极端现象,在设计风挡屏时必须进行有效的风力分析和计算,保证挡风屏高度必须满足在风速变化时,最大车速时对列车的挡风防风的效果。形状设计也对列车行车稳定产生影响。为了防止在挡风屏设计过程中产生风力集聚作用和产生风力反弹作用,必须在挡风屏设计中避免出现气流滞积,或者在高速行车时产生空气动力不稳定,所以尽量设计为弯曲表面,避免出现较大面积滞积及发生风力反弹,此设计可以使风流沿着挡风屏表面自由流动,并能顺利过桥,且不会引起风力和列车的侧向作用力的显著增加。总之,通过对挡风屏高度大小的优化和设计,同时考虑挡风屏的外形设计,并结合高速列车、桥梁结构特征及风力特性,经过反复的风洞试验研究,才能够有效地保障高速列车及桥结构的安全稳定,并且能减小侧向风对列车行车的影响。

4.2 材料选择

桥面上挡风屏材料选择是挡风屏设计方案的重要组成部分。桥面上的挡风屏如果能具有足够的强度及稳定可靠性,足以抵抗长时间的强风冲击,并且该方案还应当对风有非常优秀的气动效果,如此方能够降低风阻力。目前被较多的挡风屏方案中作为材料的包括钢、混凝土以及透明材料(钢化玻璃,如图1、聚碳酸酯板)等材料。各种材料均有自身的不同特征,并被适应在不同的设计场合内。倘若采用不同的材料将最终设计会根据不同的桥梁环境与风力特点进行。钢材可作为挡风屏方案中使用较多的材料之一,可为挡风屏提供足够的强度,并具备极好的耐候性,可抵抗强风的猛烈冲击,但钢材的缺点是长时间暴露于风雨中容易产生锈蚀的现象,由此必须额外进行防锈处理,选用合适的钢材材质(高强度防腐钢材等),能够对挡风屏的耐久性和抗风能力有极大的提升^[3]。混凝土为桥面上较多采用的挡风屏材料之一,通常较多被应用在大型桥梁建筑上,或特殊需要稳

定性(牢固度)高的桥梁上。混凝土挡风屏因具有良好的抗压强度及其耐久性,但混凝土的施工工艺较复杂、材料质量较高,价格昂贵,在选择此材料时需重点考虑其安装方式及施工工期;透明材料则通常较少被应用在桥面挡风屏方案设计上,因其可以看做透明,能够确保在具备挡风的同时,保持景观的通透性,透明材料具备良好的气动性能,可降低风的反射与聚集,通常材料的抗风和抗紫外线能力并不如钢、金属和混凝土类材料。因此,透明性材料适合对于抗风性要求不是太严的地方。不管什么样的材料,都需要耐候性以及抗风性是设计时的重要条件,材料的生锈问题也是不可忽视的,尤其对长时间在自然环境中工作的挡风屏的材料,会对挡风屏材料产生腐蚀、风化甚至发生形变等。因此,挑选合理耐候及抗紫外线的材料可以对挡风屏使用寿命和长期性大有裨益。



图 1: 桥面挡风屏钢化玻璃材质

4.3 风流模拟与风力学分析

风流模拟和风力学分析是挡风屏设计工作不可缺少的关键步骤,也是对挡风屏进行优化设计时不可或缺的科学依据。利用计算流体力学(CFD)软件对不同风速、不同风向、不同地形环境下的风流状态进行精确模拟分析,从而提前分析不同风流状态对挡风屏的影响,在一定程度上可以帮助设计人员明确和理解列车与风力的相关作用情况,从而将设计人员与设计物的理论提升起来,使其变得更加科学化。首先利用桥梁所在地区的气象资料(常年风速、常年风向、常年气压等)对初步设计提出的挡风屏进行风力分析,然后采用CFD模拟对挡风屏的风流情况进行模拟,针对模拟情况判断在不同风速状态下对风力作用于挡风屏表面所引起的风

力分布进行计算,从而达到风力作用在挡风屏的作用情况,并确定挡风屏的相关设计尺寸、形状和位置。例如,通过相关模拟数据来判断相关区域风力较大,而不同区域的风力则较小,然后及时调整挡风屏的形状。或者是相关的风力存在突变或较强的气流滞留作用,从而增加风压,这种情况会在挡风屏的前侧以及后侧的气流上出现,这种情况属于潜在的风致动不稳定区域,而相关的风力学分析可以及时找到与发现这些潜在的影响区域,从而及时采用有效方法进行补强,从而达到设计分析的作用,促进我国挡风屏设计工作的良好运行。

4.4 智能控制与动态调整

为了优化传统的固定结构静态应对的挡风屏方案,借助现代智能化控制系统,不断探寻挡风屏结构的灵活和动态的变化,促进风速变化时挡风屏控制的智能化和动态化发展。例如在挡风屏材质设计上,如果遇到极端天气,风速变化缺乏规律性,那么挡风屏不能固定在一个角度上抵御风速变化带来的破坏。此时采用智能化控制系统,及时地接受风速、风向、大气压等气象预报数据,并且及时地调节挡风屏的挡风板角度、尺寸、位置,增加挡风屏抗风阻能力^[4]。动态化的智能控制系统可以通过挡风屏上的传感器测算当下挡风屏的风速情况以及在特定时刻、位置条件下风速对行车风速变化的影响,自动调整挡风屏的倾斜角度。通过对挡风屏角度和位置的实时动态调整,使得挡风屏能够做到最大程度地根据实际风速和风向进行调整,防止风速和风向变化突然造成列车行车风速过大造成脱轨事故;甚至智能化控制挡风屏的改变,能够预测即将发生的风速变化,并提前调整好挡风屏板的角度和大小位置,及时降低风力对列车的冲击风阻。

5 结语

强侧风给列车运行带来很大的安全隐患,桥梁挡风屏能很大程度上改善列车受侧风影响带来的不利作用,通过合理的桥梁挡风屏设计能有效改善列车的稳定性、减小列车气动阻力、提高乘车的舒适性、降低轨道系统载荷。未来在风致计算、智能化控制等技术不断发展的背景下,桥梁挡风屏的结构设计将更加科学与精准,有利于保障铁路交通运输的安全稳定。

参考文献

- [1] 陶玮,姜平,孙震.风屏障端部附近交会的背风侧列车气动效应[J].铁道科学与工程学报,2025,22(3):954-966.
- [2] 杨明智,袁先旭,鲁寨军,黄汉杰.强侧风下青藏线列车气动性能风洞试验研究[J].实验流体力学,2008,22(1):76-79.
- [3] 周丹,田红旗,杨明智,鲁寨军.强侧风下客车在不同路况运行的气动性能比较[J].中南大学学报(自然科学版),2008,39(3):554-559.
- [4] 何玮,郭向荣,朱志辉.侧风对大跨度城轨斜拉桥车-桥耦合振动的影响及其对策研究[J].应用力学学报,2021,38(3):958-964.