

文章编号: 1001-2486(2001)05-0117-05

横风中双层客车车辆的风荷载研究*

祝志文¹, 陈伟芳², 陈政清¹

(1. 中南大学铁道校区土木建筑学院, 湖南长沙 410075)

(2. 国防科技大学航天与材料工程学院, 湖南长沙 410073)

摘要 数值模拟了在横向风的不同来流攻角作用下, 双层客车车辆单体、铁路 24 米预应力 T 形简支梁桥单体、双层客车车辆-24 米预应力 T 形简支梁桥组合体、以及在不同路堤高度上双层客车车辆的气动三分力系数。研究表明, 双层客车车辆在桥梁、路堤上所受风荷载均比双层客车车辆单独存在时明显增大, 因而在计算双层客车车辆所受横风向风荷载时, 应重视桥梁、路堤对此产生的影响。

关键词 横风向, 双层客车车辆, 简支梁桥, 路堤, 风荷载

中图分类号: V271.7; V211.7 文献标识码: A

A Survey on Wind Loads for Double-Deck Vehicle in Cross Wind

ZHU Zhi-wen¹, CHEN Wei-fang², CHEN Zheng-qing¹

(1. College of Civil and Architectural Engineering, Centralsouth Univ., Changsha 410075, China)

(2. College of Space and Material Engineering, National Univ. of Defence Technology, Changsha 410073, China)

Abstract Based on numerical simulation for double-deck vehicle in crosswind with different angle of attacks, it is found that the vehicle's three aerodynamic coefficients become obviously large when the vehicle running on railroad 24m free supported bridge with T configure or on embankment, compared with those of considering the vehicle only. Accordingly, the affect of enlarged wind loads acting on the vehicle should be taken seriously.

Key words Double-deck vehicle, Crosswind, Free supported beam bridge, Embankment, Wind loads

由于列车运行环境的复杂多变及自然风作用的随机性, 列车要受到横向风的作用。横向风的作用是影响列车运行的安全性、稳定性、舒适性的一个因素。横向风达到一定速度将使列车产生共振, 引起乘客不适, 也能导致车辆结构的疲劳破坏。在强劲的横向风作用下, 列车所受到的横向气动力有可能使列车掉轨, 甚至出现翻车和人员伤亡。在某些特殊的风环境, 如特大桥梁、高架桥、路堤、丘陵及山区的风口地段, 以及导致横向气动力与离心力叠加的曲线线路上, 列车绕流流场明显改变, 导致气动力显剧改变, 列车掉轨、翻车可能性大大增加。在我国新疆地区曾经发生过大风 13 次吹翻列车, 总计翻车 79 辆的风环境事故^[1]。1981 年, 在印度发生了旅客列车被飓风吹落桥下造成 3000 多人死亡的人间灾难, 1986 年 12 月, 在日本山阴线的余步桥上, 超过列车临界倾覆风速的强风将列车吹致桥下, 造成列车车辆、路轨、桥梁结构以及人员伤亡的重大交通事故^[2]。由横向风所导致的列车事故在世界各国时有发生。为此, 国外在列车运行的危险路段, 诸如特大桥梁或高架桥、路堤、高路堤、风口线路上, 建立完善、可靠的风速监测、报警系统, 来保证列车在相应环境下的行车安全。显然, 研究列车在横向风作用下的空气动力学特性, 特别是在极端风速和特殊风环境下的气动力特性, 显得尤为重要。

在运行可能经过的各种风环境中, 列车经过空旷地带的特大桥梁或高架桥、路堤、高路堤是一种值得重视的特殊风环境。例如, 目前客运专线和高速铁路建设的趋势是大量采用长距离的桥梁或高架桥, 列车过桥时间可能长达十分钟左右, 这一特殊风环境下车辆的气动力特性, 明显具有不同于一般地面环境下车辆气动力特性, 因而对这一特殊风环境下车辆-桥梁系统的空气动力学研究很有必要。

由于列车直接暴露在近地自然风中, 其气动特性不仅受到自然风的平均特性影响, 同时也受到自然风的湍流结构影响, 加之车辆所具有的复杂空气动力学外形, 车辆绕流具有明显不同于一般流线型物体

* 收稿日期: 2001-04-04
基金项目: 国家自然科学基金项目(编号: 59778043)及长沙铁道学院科研基金联合资助
作者简介: 祝志文(1968-)男, 博士生。

的绕流特性,因而车辆空气动力学属于钝体空气动力学的研究范围。这种绕流最明显的特征是涡的产生、分离涡的脱落及可能的再附,在绕流物体的背风面是大的分离、回流区,具有复杂的尾迹结构。在地面运行的车辆,由于近地湍流具有和车辆大小相当的尺度,这些近地涡将与车辆绕流相互作用,进而影响车辆绕流边界层,影响车辆绕流的涡的形成、脱落和尾迹发展。还必须看到,车辆会经历各种不同的地形地貌、高度变化的路堤、不同形式的桥梁和建筑物以及其他车辆所产生的湍流等风环境。所有这些都使车辆绕流剧烈变化而呈现错综复杂性,导致列车受到非正常气动力,给列车的安全运行、操纵、舒适性带来影响。

钝体空气动力学的研究成果可用于车辆空气动力学的研究。国外起步很早,Anderso^[1]用立方体作车辆模型、以立方体下的平板模拟地面。当平板运动时,可模拟纵向行驶的车辆气动力特性,而当平板静止时可反映车辆在横向风作用下的绕流特性。为此分别完成了置于运动静止和平板上立方体绕流的风洞试验。发现当立方体和运动平板之间的净距大于立方体高度时,立方体上、下表面的压力分布几乎不随二者之间净距增大而发生改变,且上、下表面没有再附发生。但随着二者距离的减小,下表面压力分布改变,分离流将出现再附,分离点前移。Anderso 试验研究最主要的结论是,随着立方体与运动或静止平板二者之间净距的减小,立方体升力由正变负,而当立方体与平板二者之间的净距在很大范围内变化时,阻力基本上与净距无关。日本余部事故技术调查委员会在余部列车坠落事故后,将横风中车辆空气动力学特性研究作为重大研究课题,并专门对事故的 14 型车辆和余部桥梁进行了车辆单体、车辆-桥梁组合系统的风洞试验和数值模拟研究。研究表明,横风给予 14 型车辆的空气阻力与有无桥梁密切相关,桥梁上车辆阻力比地面明显增大。Baker^[2-3]通过在各种模拟大气条件下具有不同几何外形的车辆风洞试验,基于风洞试验和数值模拟,提出了一种横风中车辆动力学的理论模型^[4-5]。在国内,张小刚等^[6]采用数值模拟方法对高速列车运行时横向风作用下的绕流场进行了研究,并得出了减小横向风作用所产生的侧向力的几个截面优化参数。随后,张小刚等^[7]又首次对高速列车三维湍流绕流场压力分布、速度分布以及气动阻力进行了研究。作者曾经就 YZ₂₂ 型车辆单体、16 米预应力 T 形简支梁桥单体和相应车辆在桥梁上的空气动力学特性作过数值研究^[8],发现在横向风作用下,车辆在桥梁上二者的阻力系数均比单独存在时明显增大。考虑到目前运营的双层客车车辆车底距轨顶高度远远小于 YZ₂₂ 型车底距轨顶的高度,这种高度的显著减小必将使双层客车-桥梁系统绕流有明显不同于 YZ₂₂ 型车辆-桥梁系统的绕流特性。本文研究的目的是揭示双层客车车辆-T 形简支梁系统、双层客车车辆-路堤系统中桥梁、路堤的存在对车辆气动力特性的影响。全文数值模拟计算采用大型计算分析软件 ANSYS 之 FLOTRAN 模块。FLOTRAN 模块对湍流和工程计算有很强的模拟能力。作者多次就不同的桥梁节段模型的 FLOTRAN 湍流数值模拟结果与风洞试验作对比,发现用 FLOTRAN 湍流数值模拟得到的节段模型气动三分力系数,与风洞试验结果有很好的—致性。本文就双层客车车辆在 24 米预应力 T 形简支梁桥上、不同高度路堤等风环境下列车、桥梁的气动力特性作了数值模拟。

1 双层客车车辆与 24 米预应力 T 形简支梁桥的风荷载

图 1 是双层客车车辆在 24 米预应力 T 形简支梁桥上的二维物理模型,上部是双层客车车辆的横截面外形轮廓,下部是铁轨、枕木及道渣、人行道板和 24 米 T 形预应力简支梁桥的跨中截面组合体,忽略车顶设备、桥侧人行道栏杆。同时,基于 Andersod 的试验研究结果,采用类似于日本余部事故技术调查委员会所建立的列车单体计算模型,建立了本文列车单体、桥梁单体数值模拟模型。

横风中,双层客车车辆单体和 24 米 T 形简支梁桥单体可近似当作二维处理。由于来流风速远低于音速,流场可当作不可压,不考虑温度变化,计算按定常处理,采用标准 $k-\epsilon$ 湍流模型。

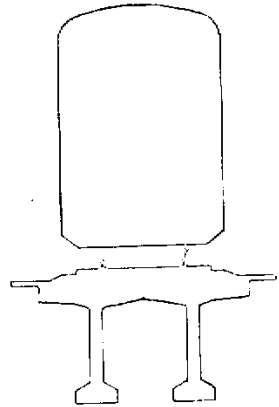


图 1 双层旅客列车和 T 形简支梁桥
Fig.1 Double-Deck Vehicle and
Free Supported Beam Bridge

设车辆和桥梁静止,计算车辆单体、桥梁单体、车辆-桥梁组合体时,前方边界、上下边界均给速度条件,后方给压力边界条件,相应物体表面给无滑移不穿透边界条件,且湍流动能和湍流耗散在物面取零值。

Reynolds 数是所有相似参数里最难模拟的参数。然而一般认为,由于非流线型物体具有尖锐的棱角,当气流流过时,流场分离点位置几乎是固定不变的,即流场对 Reynolds 数的变化不敏感^[9]。由于 Reynolds 数差异导致的空气动力系数差异很小以至可以忽略不计,据此,来流风速取 15m/s,车辆、桥梁均采用 1:20 的缩尺比。

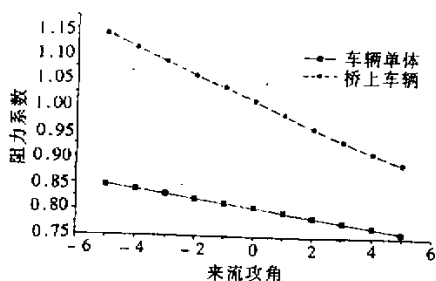


图2 来流攻角与车辆阻力系数

Fig.2 Incidence Angle and Drag Coefficients of Vehicle

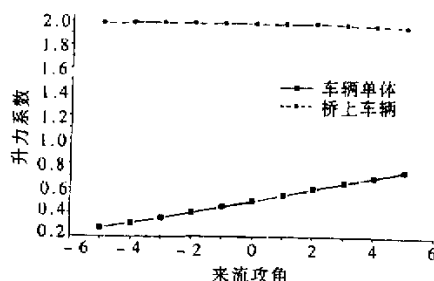


图3 来流攻角与车辆升力系数

Fig.3 Incidence Angle and Lift Coefficients of Vehicle

设 ρ 为空气密度, v_{∞} 是横向风速, h 、 l 分别是双层客车车辆沿体轴的侧向投影高度和水平投影宽度,通过对计算模型表面上的压强分布沿物面积分可得到压力的合力,沿体轴方向分解即得到阻力和升力,分别用 F_D 、 F_L 表示,设 M 表示倾覆力矩。倾覆力矩取双层客车车辆表面压力合力对下游一侧轨顶之矩,并规定使双层客车车辆绕此轨顶点逆时针转动为正。按下式计算阻力系数 C_D 、升力系数 C_L 和倾覆力矩系数 C_M :

$$C_D = \frac{F_D}{1/2\rho v_{\infty}^2 h} \quad (1)$$

$$C_L = \frac{F_L}{1/2\rho v_{\infty}^2 l} \quad (2)$$

$$C_M = \frac{M}{1/2\rho v_{\infty}^2 l^2} \quad (3)$$

本文分别计算了双层客车车辆单体、T形筒支桥梁桥单体、双层客车车辆在桥梁上时气动三分力系数。

图2是双层客车车辆单体和桥上双层客车车辆的阻力系数随来流攻角的变化,攻角从-5度增大到+5度,二者阻力系数均单调减小,呈现较好的线性,但各个计算点上,桥上双层客车车辆的阻力系数均大大高于双层客车车辆单体的阻力系数,零攻角时增大25.4%,且随攻角的减小,这种增大将更明显,-5度攻角增大35.3%。比较二者的流场压力分布,发现在迎风面,双层客车车辆在桥上时峰值压力点下移,高压区域范围增大,而在背风面的回流区内,负压值更小,因而桥上双层客车车辆的阻力增大。同时还应看到,由于双层客车车辆单体的阻力系数随来流攻角的减小而增大,在曲线路段,由于路基倾斜导致来流负攻角,使双层客车车辆单体的阻力系数增大,且有与离心力叠加的可能性,此时,行车应更为谨慎。

来流攻角与双层客车车辆升力系数的关系见图3,车桥组合时双层客车车辆升力系数基本上不受攻角变化的影响,较车辆单体增加3~9倍。升力影响双层客车车辆行驶的安全性、稳定性,指离地面的升力使双层客车车辆的轮压降低,增加脱轨的危险性,升力系数和阻力系数显著增大对双层客车车辆稳定所产生的影响,可从阻力和升力的综合效应——倾覆力矩系数来考虑。从图4可知,桥上双层客车车辆的倾覆力矩系数明显大于双层客车车辆单体,且随攻角的减小绝对值单调增大,零攻角时增大58.5%,-5度攻角增加73%。因此,双层客车车辆通过桥梁时其所受倾覆力矩明显增大是显而易见

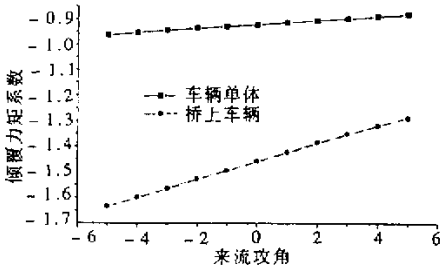


图4 来流攻角与车辆倾覆力矩系数
Fig.4 Incidence Angle and Moment Coefficients of Vechile

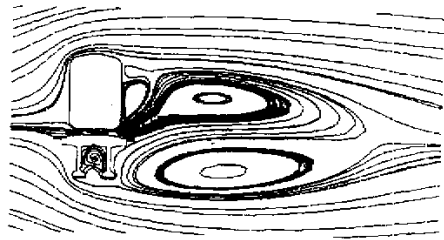


图5 双层客车车辆和T形简支梁桥绕流速度粒子图
Fig.5 Particle Traces Around Double-Deck Vechile and Free Supported Beam Bridge

的。图5是双层客车车辆、桥梁组合体绕流速度粒子图。从图可知,在组合体的背后形成大的分离回流区,回流区内流动极为复杂。

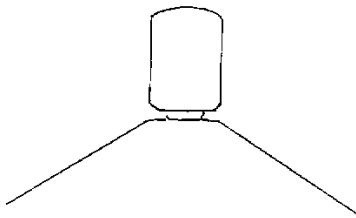


图6 路堤上的双层旅客列车
Fig.6 Double-Deck Vechile on Embankment

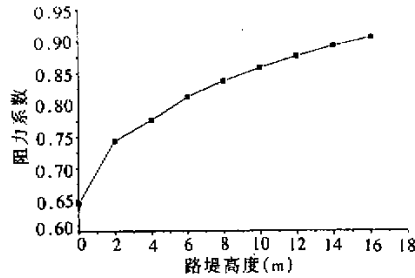


图7 车辆阻力系数与路堤高度
Fig.7 Drag Coefficients of Vechile and Height of Embankment

2 双层客车车辆在路堤上的风荷载

图6是双层客车车辆在路堤上的二维物理模型,计算方法类似于双层客车车辆-桥梁系统。不同的是此处作为地面、路堤面的下边界不是自由边界,而是将其处理成物面,施加相应的物面边界条件。计算路堤高度从0~16米,每2米作为一个工况。图7是双层客车车辆阻力系数随路堤高度的变化图。随着路堤高度增大,阻力系数总的趋势是增大,路堤高度小时增大很快,路堤高度为6米时阻力系数比0米高度增大25%。图8是双层客车车辆在路堤上的绕流速度粒子图。从图可知,由于路堤对来流的阻挡作用,使流场通道变窄,来流沿路堤攀升,气流加速,形成所谓的“爬坡效应”。在双层客车车辆和路堤的背风面,形成很大的分离回流区,回流区压强很低,因而形成很大的前后压强差,使阻力增大。路堤高度进一步增大,阻力系数曲线变得平缓。这一变化趋势也反映在双层客车车辆的倾覆力矩系数上,如图9所示。因此,在线路和路堤设计上,应该考虑路堤高度对双层客车车辆阻力增大的影响,特别是随路堤高度增大双层客车车辆倾覆力矩系数增大对行车安全带来的不利影响。同时,也应看到,较低高度的路堤对双层客车车辆风载的影响也是很大的,必须予以考虑。

3 结论

双层客车车辆在桥梁上、路堤上承受着明显不同于其单独存在时的横向风荷载作用,值得特别注意。

在24米预应力T形简支梁桥上,双层客车车辆在不同来流攻角下的阻力系数、升力系数均大大高于其单独存在时的情况,特别是反映其横向稳定性能的倾覆力矩系数增大更为显著。因而在确定双层

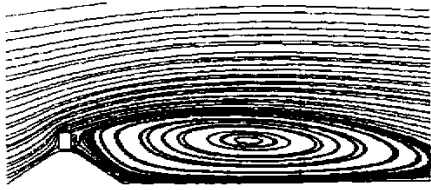


图8 双层客车车辆和路堤绕流速度粒子图

Fig.8 Particle Traces Around Double-Deck Vehicle on Embankment

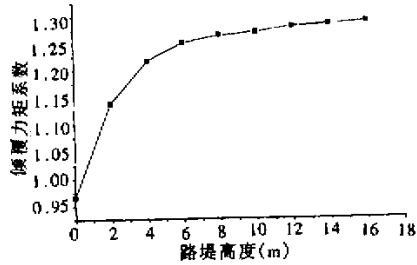


图9 车辆倾覆力矩系数与路堤高度

Fig.9 Moment Coefficients of Vehicle and Height of Embankment

客车车辆在桥梁上运行的临界倾覆风速、设计曲线桥梁方面,应考虑这一影响。

在路堤上行驶的双层客车车辆,所受风荷载随路堤高度的增大而增大。路堤高度在一定范围内,其阻力系数、倾覆力矩系数随路堤高度增大而增长很快。同样,在确定双层客车车辆在路堤上行驶的临界倾覆风速时,也应考虑由于路堤的存在使其所受风荷载明显增大的趋势,以及不同路堤高度对双层客车车辆稳定所带来的不利影响。

参考文献:

- [1] Anderson, H. L. Investigation of the Forces on Bluff Bodies Near the Ground[D], M. Sc. dissertation, Department of Aeronautics, Imperial College, 1977.
- [2] Coleman S. A., and Baker C. J., High sided road vehicles in crosswinds[J]. J. of wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1990, 36: 1383~1392.
- [3] Baker C. J. and Reynolds S. Report On Wind Induced Accidents of Road Vehicles[R]. October, 1990, FR90045.
- [4] Baker C. J. and Robinson C. G. The assessment of wind tunnel testing techniques for ground vehicles in crosswind[J]. J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1990, 33: 429~438.
- [5] Baker C. J. Ground vehicles in high crosswinds[J]. J. of Fluids and Structure, 1991, 5: 69~111.
- [6] Zhang Xiaogang and Liu Yingqing. Numerical Computation of Flow over a Train in Crosswinds[J]. J. of Southwest Jiaotong University, 1995, 32(2): 163~168.
- [7] 张小刚、刘应清. 高速列车湍流绕流三维数值模拟研究[J]. 西南交通大学学报, 1996, 6: 262~266.
- [8] 祝志文、陈正清. YZ₂₂型车辆与铁路T型简支梁桥的风荷载研究[J]. 湖南大学学报, 2001(1): 93~97.
- [9] 埃米尔·希谬等. 风对结构的作用—风工程导论[M]. 刘尚培等译, 上海: 同济大学出版社, 1992(3): 206~207.

