

铁路(高铁)横风监测预报技术方法初探

冯蕾 陈仲榆 郝淑会 郜婧婧 陈辉 吴昊

(中国气象局公共气象服务中心, 北京 100081)

摘要: 强横风是影响铁路(高铁)运行最为严重的气象灾害之一。气象监测/预报风速与对铁路运行有实际影响的风速之间存在显著差异。本研究从铁路部门实际需求出发, 结合铁路气象学基本原理和地理信息系统空间分析与数据融合技术, 初步探索了铁路(高铁)横风监测预报的技术方法, 主要包括精细化网格风速监测/预报新产品的应用、精细化道路分段及各路段下垫面类型的提取、反映路段基本特征的风速订正技术, 以及综合考虑铁路线路走向和风向的横风转化技术等。同时, 以哈大客运专线四平段一座典型高架桥为例, 分析了气象风速资料在该高铁路段的适应性及风速订正效果, 探讨了本技术方案的可行性。该方法将常规气象风速资料转化为对列车运行有实际影响的风速, 对于开展针对性强、专业化程度高的铁路气象服务具有一定的指导意义。

关键词: 高铁, 典型路段, 风速订正, 横风

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2017.01.019

Exploration of the Monitoring and Forecasting Method for the Railway Crosswind

Feng Lei, Chen Zhongyu, Hao Shuhui, Gao Jingjing, Chen Hui, Wu Hao

(China Meteorological Administration Public Meteorological Service Centre, Beijing 100081)

Abstract: Strong crosswind is one of the most serious disasters to railway (high speed rail) operation. There is large difference between the meteorological monitoring/forecasting wind and the one having actual effect on railway operation. According to the needs of the railway administration, using the basic principle of the railway meteorology and GIS spatial analysis and data fusion technology, we explored a meteorological monitoring and forecasting method for the railway crosswind, which includes the application of new gridded wind monitoring and forecasting products in high-resolution to fine road segmentation and the extraction of the underlying surface types. The wind speed revision technology considers the railway characteristics, the angle of the railway line trend and the wind direction. Besides, taking a typical viaduct on Harbin Dalian Passenger Dedicated Line as an example, we analyzed the applicability of meteorological wind data to high speed rail and the wind speed revision effect, also discussed the feasibility of this method proposed in this paper.

Keywords: high speed rail, railway viaduct, wind speed revision, crosswind

0 引言

强风是影响高速列车运行的最为严重的灾害之一。我国地域广阔, 冬季的寒潮大风, 以及夏季的短时雷雨大风、台风和龙卷发生频繁, 对客运专线高速列车安全运行影响很大。在强风作用下, 客运专线动车组空气动力性能恶化, 不仅使列车的空气阻力、升力、横向力迅速增加, 还影响高速列车的横向稳定性, 严重时将导致列车倾覆, 造成重大铁路交通事故

故^[1]。如2007年2月28日01:55, 由乌鲁木齐开往阿克苏地区的5806次列车遭遇13级大风, 11列车厢被吹翻, 造成3名旅客、1名乘务员死亡、5名旅客重伤、100余名旅客轻伤, 被困旅客近千人, 南疆铁路被迫中断行车近10小时。因此, 开展铁路沿线大风监测预警预报技术研发, 对于降低大风对客运专线高速列车安全行车的影响和危害程度, 以及最大程度的保证行车效率具有重要的意义。

目前国内外铁路部门在高速列车强横风防风措施及对策方面以大风监测预警为主。如我国通过建立高速铁路大风预警系统来实现高速列车的运行管制机制。在不同类型大风条件下, 系统可实时监控侧风、横风的风速风向, 经过系统对地理信息各因子的运算和导入历史资料、沿线风监测点数据库以及内潜程序的判断, 为行车指挥控制系统提供较为合理的行车速

收稿日期: 2016年8月31日; 修回日期: 2016年12月5日

第一作者: 冯蕾(1982—), Email: fenglei21cn@163.com

资助信息: 公益性行业科研专项(GYHY201306058, GYHY201306043, GYHY201406029); 中国气象局2016年山洪项目公路交通气象预报试点建设; 国家自然科学基金(41205045)

度限制指令信息^[2]。日本的铁路“强风警报系统”最初只利用铁路沿线监测点的风速进行判断，后来综合利用风速和风向判断。2005年羽越本县发生事故后，“强风警报系统”在实况最大风速的基础上引入预测最大风速，无论哪个风速超过规定值之后都要实行运行管制，另外，当两个最大风速都低于规定值之后立即解除管制^[3]。增加预测风速的判断指标后，比仅依据实测风速更加安全。

风速的短时预测方法主要采用考虑空间分布和地形特征的气象学预测模式，以及各类统计预测方法，包括时间序列分析法、卡尔曼滤波法及其他智能算法。铁路沿线风速预测研究属于风速预测的前沿方向，涉及交通运输工程、环境气象、系统辨识、智能控制和信号处理等多个学科，目前国内外在该领域的研究成果相对缺乏^[4]。德国学者Hoppmann^[5]提出一种线性外推法实现铁路沿线风速预测，该方法通过在铁路沿线设置气象站来采集实时风速，并对采集的风速序列进行线性外推计算以获取未来时刻的风速预测值。刘辉^[4]针对青藏铁路大风危险路段提出了时间序列分析与卡尔曼滤波相结合的风速预测方法；马媪娟等^[6]在对比分析中国、英国、日本和德国等高速铁路强风路段的主要风速预测模式的基础上，提出针对不同大风类型的短时预测模式，并应用于京津城际高速铁路防风监控预警系统。

气象部门依赖大型计算机和高分辨率大气环流模式的风速预测方法具有更坚实的研究基础。而从调研情况来看，现阶段我国气象部门开展的铁路气象服务大多还是以对基础气象观测资料和常规天气预报产品的简单释用、加工制作、集成包装及信息传送为主，缺乏面向铁路部门气象服务具体需求的系统性的基础研究。铁路局获取的预报预警信息，主要是铁路沿线所在县（市）的天气预报，而非针对铁路沿线的站点和路段的预报，在预报代表性、时间精度和空间精度上都存在不足。此外，由于铁路部门与气象部门之间信息共享和通报机制仍不健全，两部门存在“信息孤岛”，铁路局所拥有的精确的铁路线路特征和详细的重点防灾路段等资料难以在气象服务中得到充分的利用，造成了铁路局接收到的气象预报预警信息针对性不强且专业化水平较低。

本文在文献调研的基础上，借鉴我国学者在开展客运专线桥梁工程设计风速、高速铁路防灾系统中防风布点方案的优化研究，以及我国高速铁路沿线强风区间的确定方法及风险评估研究时所采用的一些技术方法，提出使用气象部门最新研发的精细化风速监测/预报产品，并结合铁路线路具体特征的横风监测预

报技术思路，同时，使用有限的高铁典型路段实测资料，分析论证其中的部分技术细节，从而为气象部门开展针对性较强、专业化程度较高的铁路（高铁）气象服务提供技术参考。

1 铁路（高铁）横风监测预报技术思路及典型案例分析

近年来，气象部门在现有数值预报模式产品和台站监测信息基础上，依赖先进的计算机水平和资料融合分析系统，发展了高时空分辨率的格点风速实况产品和预报产品。如2015年中国气象局公共气象服务中心研发了高分辨率实况风格点产品，该产品使用美国NOAA/ESRL/GSD开发的局地分析预报系统（Local Analysis and Prediction System, LAPS），利用GRAPES-MESO作为背景场数据，对地面自动站数据、探空数据、卫星数据和雷达数据进行多源异构数据融合，形成全国范围内1km分辨率的实况格点风速分布。2016年国家气象中心研发了72h预报时效内逐3h间隔、全国范围内空间分辨率为5km的多模式集成格点风预报产品，该产品融合了多个模式的客观预报和中央气象台预报员的主观预报，分析过程中同时考虑了坡度、坡向和高程等精细化地理信息的影响和订正。依托这些高分辨率的风速监测预报产品，可以获取任意路段的风速风向实况与预报信息，为开展精细化的铁路（高铁）大风监测预报服务提供坚实的数据基础。

使用以上精细化风速监测/预报服务产品，从气象风速与对铁路运行有实际影响的风速之间的差异出发，提出气象风速资料向铁路（高铁）应用转化的技术方案：根据我国干线铁路车站站点的分布以及数值模式网格分布，对铁路线路进行分段，并判断各路段下垫面类型，由此确定各路段的风速订正系数，将模式监测/预报的10m高度处的平均风速转化为干线铁路沿线行车高度处的瞬时风速。另外，根据各路段的线路走

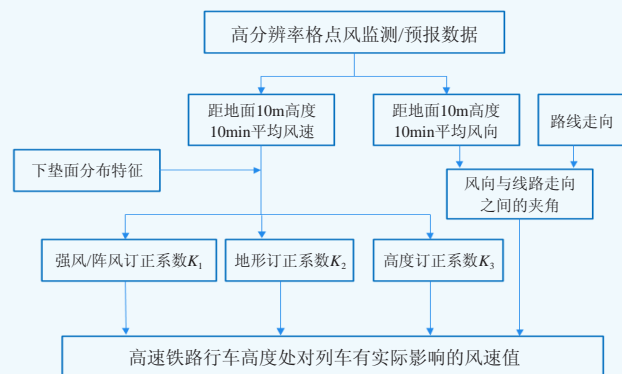


图1 铁路（高铁）沿线横风监测/预报技术方案
Fig. 1 The technological scheme of monitoring and forecasting the wind on high-speed railway

向与风向，确定两者之间的夹角，得到我国干线铁路沿线行车高度处的横风预报。具体方案如图1所示。

1.1 道路分段

为了避免对模式预报的风向进行插值，借助地理信息系统（Geographic Information System, GIS）空间分析技术，使用模式网格将铁路线路截断。同时，考虑到铁路部门实际需求，使用沿途车站站点对铁路线路进一步分段。具体方法为：1）使用Create Fishnet工具，按照格点风速场中的等经纬格点间距生成对应的等经纬格网（选择生成面矢量）；2）用得到的多边形与铁路段进行Identity分析；3）使用Identity分析得到的数据与原始的格点矢量数据通过ID关联便可得到最终可用数据。经过上述三步处理后，便完成了道路分段。图2以哈大客运专线为例，给出了具体道路分段方法示意图。



图2 铁路线路分段示意图

（黄点为沿途车站分布，网格为数值模式网格分布，红三角为1.3.2节典型案例分析中的四平段高架桥位置）

Fig. 2 The sketch map of subsection method for railway road (yellow dots are railway stations; the mesh refers to the model grid; the red triangle is the location of viaduct analyzed in section 1.3.2)

1.2 各路段下垫面类型的提取

使用欧空局分辨率为300m的全球陆地覆盖数据（ESA GlobCover, http://blog.sina.com.cn/s/blog_670ee7720101c0ng.html）中的土地使用分类对上

述各铁路路段进行下垫面类型判别。GlobCover全球陆地覆盖数据的原始数据来自Envisat卫星，由Medium Resolution Imaging Spectrometer（MERIS）传感器拍摄完成。该数据为格点数据，包括城镇、村庄、沙漠、丘陵及林地等99种土地分类。

借助GIS空间分析技术，取铁路沿线一定范围内（如5~10km）的缓冲区。对每一段线路，计算缓冲区内各下垫面类型的格点数，如果某一类别的格点数最多，那么，该路段的下垫面类型就确定为该类别（图3）。下垫面类型的判别主要用于2.3部分风速订正过程中订正系数的确定。根据《建筑结构荷载规范》（GB 50009—2001）^[7]，将地面粗糙度分为A, B, C, D共4类，A类指近海海面和海岛、海岸、湖岸及沙漠地区；B类指田野、乡村、丛林、丘陵及房屋比较稀疏的乡镇和城市郊区；C类指有密集建筑群的城市市区；D类指有密集建筑群且房屋较高的城市市区。



图3 各高速铁路段下垫面类型判别示意图

（黄点为沿途车站分布，三角为1.3.2节典型案例分析中的四平段高架桥的位置）

Fig. 3 The sketch map of determining method for land-use type in each railway section (yellow dots are railway stations; the triangle is the location of viaduct analyzed in section 1.3.2)

1.3 各路段风速的订正及典型案例分析

1.3.1 订正原理

我国气象台站大多建在市、县等城镇附近，而

客运专线多数远离城镇,两者所处地理环境具有明显的差异;另外,由于我国高速铁路以桥代路的特点,在客运专线一些特殊路段如高架桥、特大桥和高路堤处,对列车运行有实际影响的风速是在距轨面4m高度处,而气象部门风速监测是在距地面10m高度处,两者在高度上也有显著差异^[8]。因此,气象风速资料与影响铁路实际运行的风速之间存在一定的差异,在使用气象风速资料开展铁路气象服务时,对客运专线高架桥等路段或地形较复杂的铁路路段,最大风速资料必须进行时距订正、地形订正、路堤和桥高订正等规范化处理^[2,9-10],具体如式(1)所示:

$$V_2 = V_1 \times K_1 \times K_2 \times K_3, \quad (1)$$

式中, V_2 为典型路段订正后的风速, V_1 为订正前的风速, K_1 为时距订正系数; K_2 为地形订正系数; K_3 为路堤、大桥和特大桥桥高订正系数。

时距指确定基本风速的时间间隔,基本风速是规定时距内的平均风速,其数值与时距的取值有很大关系,不同的时距取值可以得到不同的基本风速。一般来说,时距越长,基本风速越小,目前,时距常取3s或10min。气象部门提供的基本风速值一般为10min平均风速,而从国内外列车倾覆的经验来看,强横风条件下高速列车的最大危险不是平均风速,而是3s短时特强阵风,即瞬时风速达到倾覆临界风速。因此,使用气象资料开展高铁气象服务时需要进行时距订正,即由平均风速向瞬时风速的订正。瞬时风速与平均风速的比值称为阵风系数。阵风系数一般通过当地风速实测资料分析得到。《建筑结构荷载规范》^[7]也给出了离地面不同高度处、不同地面粗糙度下的阵风系数列表。

当客运专线大桥、特大桥桥址所在格点的地形地貌与真实地形相差较大时,应对风速进行地形订正。地形订正系数 K_2 可以依据《建筑结构荷载规范》^[7]中的经验值得到。马韞娟等^[8]通过托克逊气象站与南疆铁路沿线桥梁工程区大风监测点相关分析发现,铁路沿线与风向一致的谷口、山口 K_2 值在1.16~1.58;沟壑 K_2 值在1.07~1.09;与风向一致的河谷 K_2 值一般在1.10~1.20;山谷 K_2 值一般在0.76~0.90,这与《建筑结构荷载规范》^[7]中地形订正系数的经验值非常接近。

风随高度的变化与下垫面性质、大气层结构等因素密切相关,理论上可以采用指数率公式来描述近地层风速廓线。马韞娟等^[8]通过对客运专线沿线100多个铁塔梯度风监测资料进行拟合分析,证明指数率公式适合我国客运专线铁路沿线风随高度变化的规律。本文将使用指数率公式将气象站点10m高度的风速订正

至列车运行高度,并与实际风速进行对比:

$$\frac{U_n}{U_1} = \left[\frac{Z_n}{Z_1} \right]^\alpha, \quad (2)$$

式中, U_n 是高度 Z_n 处的风速, U_1 是高度 Z_1 处的风速, α 为风随高度的变化指数,与地面粗糙度有关。这里, Z_1 为10m, U_1 为气象站测得风速, Z_n 为32m, U_n 为订正后风速。地面粗糙度反映了下垫面的形态结构对风速的影响,是确定风速变化廓线的一个重要参量^[11]。 α 的值可按照《建筑结构荷载规范》^[7]中下垫面的分类获取。

1.3.2 典型案例

以哈大客运专线四平段一典型高架桥处为例(位置如图2和3中的三角形所示),考察模式对于高铁高架桥路段风速的预报能力,并使用上述方法开展订正试验。由实地踏查可知,该高架桥位于四平市城市郊区,周围为平坦地形,绝对海拔高度为183.9m,高架桥离地面的高度为32m,因此该高架桥路段处地面粗糙度可归为B类。通过项目合作,获取该路段2014年1—5月逐5min平均风观测数据。由于2014年尚无精细化的格点实况风和预报数据,下面给出EC模式25km分辨率、逐3h间隔的格点风预报数据与实况风的对比,以及使用上述订正方法订正前后的误差分析。为了与模式资料对比,首先将观测数据进行逐10min平均处理,同时根据1.2节中道路分段以及下垫面类型提取方法,获取该路段的风速以及对应的下垫面类型。经检验,根据1.2节中客观方法得到的下垫面类型与实地考察得到的下垫面类型一致。由于该路段位于平原地区,因此无需进行地形订正,只需对模式的10m高度风速预报进行高度订正。

图4给出2014年1月1—5月31日EC模式每日08时预报的未来24h、逐3h间隔的风速与对应时刻实况风速的对比(图4)。从图中可以看出,EC模式能够较好地预报出该铁路路段风速的变化,两者之间的相关系数为0.73,超过了0.001的显著性水平检验(样本总数为1334)。但从风速值的大小来看,EC模式预报的风速比该高架桥上的风速明显偏小,特别是风速较大的时段。

根据式(2)对EC模式预报的风速进行高度订正后,进一步统计了订正前后的误差变化。由于对铁路安全运行有影响的主要是大风时刻,因此选取预报风速在10m/s以上的大风时刻进行风速订正。结果表明,订正前风速预报绝对偏差平均为4.37m/s,订正后风速预报绝对偏差平均为3.07m/s,风速预报绝对偏差降低30%左右。

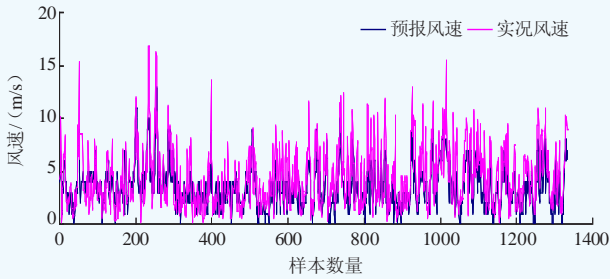


图4 EC模式风速预报与哈大高铁四平段铁路气象监测站风速实况对比

Fig. 4 The wind time series of EC model forecasts and the observation, in the viaduct shown in Fig. 2 and Fig. 3

1.4 各路段线路走向与风向之间夹角的求取

强风天气条件下, 高速列车行驶时不仅受行驶方向的气动阻力影响, 还会受线路走向与强风主风向之间夹角的影响, 如图5所示。当高速列车行车在特大桥、高路堤、垭口和峡谷区间遭遇强横风时, 即线路走向与强风风向夹角在 $75^{\circ}\sim 95^{\circ}$, 强横风作用在列车上的气动力大大增加, 列车车体会发生颤动, 严重时甚至发生倾覆翻车事故; 高速列车横风效应数值模拟结果也表明, 列车全车所受的升力、横向力和倾覆力矩都随横风风向角的增加而增大, 且均在横风风向角为 90° 时达到最大^[12]。当线路走向与强风风向夹角 $<45^{\circ}$ 时, 动车组受强侧风影响, 将增加列车推力的速度, 站停列车溜逸的危险大大增加^[2]。因此, 需要同时考虑风向与铁路线路之间的夹角。目前国内或国外(如日本)的铁路大风报警系统都将线路与风向之间的夹角作为安全行车技术标准中的重要参数之一^[3, 13-14]。

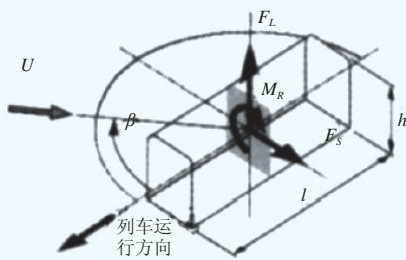


图5 列车受力示意图^[3]
(β 为相对列车的风向角)

Fig. 5 The sketch map of force on the train^[3]
(β is the included angle of the wind and the train)

使用GIS空间分析技术, 各路段线路方向可通过Linear Directional Mean 工具获取, 风向则通过该路段所在模式网格的风向得到, 两者之间的夹角便可获取。如果某路段风速达到预警标准, 同时又受到横风影响, 则列车运行的危险性大大增加, 应当提前采取防御措施。

2 结论及讨论

本文在对我国铁路工程气象学研究进行文献调研, 以及对铁路相关部门(如中国铁路总公司、铁路第三勘察设计院集团有限公司等)进行工作调研的基础上, 从气象风速资料与对铁路运行有实际影响的风速之间的差异出发, 提出一种铁路(高铁)横风监测预报技术思路, 主要包括现有精细化格点风速监测预报产品应用技术、精细化道路分段技术、路段下垫面类型提取技术、风速订正技术, 以及风向与线路走向之间夹角的获取技术。另外, 以哈大高铁典型高架桥路段为例, 根据高架桥高度以及所处的下垫面类型, 对模式预报风速进行订正, 并使用高架桥上的风速监测资料进行了检验, 结果表明, 订正后的预报风速绝对偏差比模式直接预报的风速绝对偏差降低30%左右, 从而证明了该方法的科学合理性。

值得注意的是, 本文只针对铁路部门普遍关心的问题给出一种可供参考的技术思路, 在具体开展铁路气象服务时, 应充分考虑所服务部门的实际需求进行更细致的分析, 如精细化程度的要求等。另外, 本文所述风速订正方法主要是一些经验的订正方法, 其中的经验系数并不一定适用于所有的路段, 在具体服务时, 要首先对该路段所处地理环境、地形条件等进行详细审定, 并通过实测资料进一步分析, 获取更加精准的订正系数, 从而科学合理地开展铁路气象服务。

参考文献:

- [1] 刘庆宽. 强风环境下列车运行安全保障体系的初步研究. 工程力学, 2010, 27(s):305-310.
- [2] 马志福, 周晓斌, 王伟, 等. 我国高速列车强横风防风措施及对策研究. 中国科技信息, 2011, (4): 212-216.
- [3] 刘庆宽, 杜彦良, 乔富贵. 日本列车横风和强风对策研究. 铁道学报, 2008, 30(1): 82-88.
- [4] 刘辉. 青藏铁路运行安全保障系统大风预测优化算法及推广应用研究. 长沙: 中南大学, 2008.
- [5] Hoppmann U, Koenig S, Tielkes T. A short-term strong wind prediction model for railway application: design and verification. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2002, 90 (10): 1127-1134.
- [6] 马韞娟, 马淑红, 李振山, 等. 我国客运专线高速列车安全运行大风预警系统研究. 铁道工程学报, 2009, 130(7): 43-47.
- [7] 中国建筑科学研究院, 等. 建筑结构荷载规范(GB 50009-2001). 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
- [8] 马韞娟, 马淑红. 我国铁路客运专线桥梁设计风速研究. 铁道技术监督, 2009, 37(10): 34-37.
- [9] 马韞娟, 马志福, 樊艳, 等. 高速铁路防灾系统防风布点方案优化研究. 交通运输, 2010, (21): 304-312.
- [10] 马淑红, 马韞娟. 我国高铁强风灾风险评估与区划方法研究. 轨道交通, 2013, (6): 94-95.
- [11] 郭凤霞, 朱文越, 饶瑞中. 非均一地形近地层风速廓线特点及粗糙度的研究. 气象, 2010, 36(6): 90-94.
- [12] 郝艳红. 横风作用下的高速列车气动特性及运行安全性研究. 北京: 北京交通大学, 2012.
- [13] 马淑红, 马韞娟, 李建群, 等. 京津城际CRH3 动车组大风天气条件下安全行车技术标准参数研究. 铁道技术监督, 2009, 37(2): 7-12.
- [14] 马淑红, 马韞娟. 瞬时风速对高速列车安全运行的影响及其控制. 铁道工程学报, 2009, 26(1): 11-16.