机车电传动 2017 年第 6 期 (2017-11-10)
ELECTRIC DRIVE FOR LOCOMOTIVES №6, 2017(Nov. 10, 2017)

文章编号：1000–128X(2017)06–0011–06

# 提高大风条件下动车组运行安全性的防风设施过渡段优化研究

徐　峻[1]，刘堂红[2]，梁习锋[2]

（1. 中车长春轨道客车股份有限公司 总体研发部，吉林 长春　130062；
2. 中南大学 交通运输工程学院 轨道交通安全教育部重点实验室，湖南 长沙　410075）

**摘　要**：作为穿越大风区的高速铁路，兰新高铁的行车安全受大风环境的影响较为严重。对兰新高铁进行大风环境实车试验后，发现列车在某些位置出现明显晃车现象。结合实地考察和现场实车试验，基于三维、定常、不可压雷诺平均 SST*k*-*ω* 两方程湍流模型来模拟其中一处典型地段的流场特性，得出线路上方最大速度突变点，并采用局部挡风墙改造和铲土方的方法对原始突变流场进行了优化。结果发现：通过局部挡风墙和地形地貌的优化改造，可以明显改善原始流场的突变。90° 风向角作用下，1 号过渡段、1 号山梁、2 号山梁和 2 号过渡段处，2 线上方 3 m 高度处横向速度峰峰值分别为优化前的 56.3% 、24.4% 、55.8% 和 67.2%，防风效果改善明显。

**关键词**：动车组；高速运行；大风环境；过渡段；挡风墙；流场优化

**中图分类号**：U271.91；U216.41$^{+}$3　　**文献标识码**：A

doi：10.13890/j.issn.1000-128x.2017.06.003

# Optimal Study on Windproof Facilities Transition Section for Improving EMUs' Operational Safety in Strong Wind Conditions

**XU Jun[1], LIU Tanghong[2], LIANG Xifeng[2]**

( 1.General Development Department, CRRC Changchun Railway Vehicles Co., Ltd., Changchun 130062, Jilin, China;
2.Key Laboratory of Traffic Safety on Track, Ministry of Education, School of Traffic & Transportation Engineering, Central South University, Changsha, Hunan 410075, China )

**Abstract:** The safety of Lanzhou—Urumqi high-speed railway line, a high-speed railway through the strong wind area, affected with the strong wind environment seriously. Obvious shaking was found at some locations along the railway line during the full-scale test. Based on the field investigation and full-scale test, the three-dimensional, constant, incompressible and Reynolds average SST *k*-*ω* double equations were employed to simulate the flow field of one of the typical sections. The maximum velocity mutation points above the line were found and the original flow field was optimized by reconstruction of the local windbreak and shovelling method. It was found that the optimization results were satisfactory. In the case of 90° wind angle, at 3 m position above the 2# rail, the peak-to-peak lateral velocities of 1# transition, 1# ridge, 2# ridge, and 2# transition were 56.3%, 24.4%, 55.8% and 67.2% relative to that of original scheme, respectively.

**Keywords:** EMUs; high-speed operation; strong wind environment; transition; windbreak; flow field optimization

## 0　引言

作为西部大开发计划的重点工程之一，兰新高速铁路，是目前世界上一次性建成通车里程最长的高速铁路，全长 1 776 km，东起甘肃兰州，西至新疆乌鲁木齐，旅客列车设计最高速度 250 km/h。兰新高铁的建成，使新疆与内地间形成一条全天候、运输能力大的高速铁路通道，大幅缩短了行车时间。

收稿日期：2017–10–30
基金项目：中国铁路总公司科研计划项目（2016T004-E，2015T002-A）

同时，兰新高铁也是世界首条穿越大风区的高速铁路。沿线地区有大范围的大风区，且风期长，局部地区一年中风速超过 17.2 m/s 的天数有 150 多天，最大瞬时风速达到 60 m/s[1–2]。事实上，风沙灾害是我国西部铁路面临的最主要自然灾害。从 1960~2011 年，一共有 38 起由风沙引起的安全事故，大风造成的列车停运案例更是数不胜数，对铁路运输造成了严重影响[3–4]。为了解决大风行车的安全问题，国内学者做了很多大风条件下行车安全的研究[5–8]。其中，中南大学在 2003 年采用数值模拟方法，得到各型列车运行时气动力与车速和风速的关系，大风环境下临界运行速度与风速的关系。2006 年 4 月，中南大学在兰新普速线百里风区内进行了实车试验，测量了不同的风速和风向条件下，不同挡风墙区段内试验列车所受的气动力。在 2009~2010 年，中南大学又开展了新疆铁路大风环境下车辆与防风设施空气动力学的综合试验和数值模拟分析，发现了线路上挡风墙的薄弱环节主要存在于不同类型挡风墙之间过渡地段、路堑与挡风墙之间过渡地段[9–10]。

为了保证动车组在兰新高铁的安全运营，采用 CRH5G 等动车组在兰新高铁开展了大量的现场试验和数值计算分析，以确定合理的列车运行速度，提出防风设施的合理改造措施。由于铁路沿线特殊的地形地貌与风沙灾害等不利条件，兰新高铁在试验期间也发现了部分路段存在挡风墙防风能力薄弱的问题。针对 CRH5G 动车组，分别于 2014 年 11 月 25—26 日、2015 年 4 月 14—15 日、2015 年 4 月 27—28 日开展了不同风速风向条件下列车安全运行试验，根据试验结果中气动力大值点出现的位置，对兰新高铁百里风区防风设施进行了多次实地考察，记录汇总了沿线的挡风墙及地形地貌等特征，以提出合理的优化方案。本文主要针对 K3030+680—K3031+300 位置防风设施开展相关优化研究。

## 1 现场试验概述

CRH5G 动车组测试车辆选取动车组头车 1 车、尾车 8 车和中间车 4 车进行测试，其中 1 号车、8 号车布置车辆气动力和表面压力变化测点，4 号车布置表面压力变化测点，总共布置 278 个测点（1 车测点布置实物照片如图 1 所示）。测试内容包括车体表面压力、车辆横向气动力、升力及倾覆力矩等参数，探讨动车组运行速度—风速风向—列车空气动力学性能间的关系，总结不同地段环境风对动车组空气动力学性能的影响规律，为动车组在大风环境下安全运行评估方法的制定提供基础数据。



图 1　CRH5G 动车组 1 号车测点实物照片

车辆典型的气动倾覆力矩曲线如图 2 所示，气动力突变的区域主要集中在路堑与挡风墙过渡的区域。其中，K3030+680—K3031+300 里程处的地形为路堑 - 路堤 - 路堑交错出现，属于较复杂的地形。现场照片和数值模拟三维模型如图 3 所示，该地形有 2 个过渡段处，在 2 个过渡段中间又有 2 道山梁，因此在这 4 处流场容易发生改变，风速突变比较大。本文以该路段为分析对象，通过数值模拟方法对该区段地形流场进行了仿真，对风速突变的原因进行了分析，确定该区段流场的优化方案，并将优化后结果与原始地形结果进行对比，验证优化的效果。

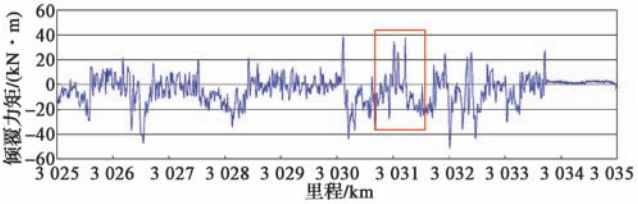
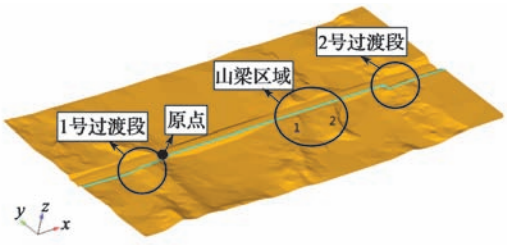



图 2　车辆气动倾覆力矩测试曲线



（a）现场照片




（b）数值模拟三维模型

图 3　K3030+680—K3031+300 区段地形

## 2 数值计算模型与方法

铁路沿线的风场数值模拟计算中，需将对铁路沿线风场产生影响的无限空间转化为有限计算空间。为得到精度较高的计算结果，模型和计算域的合理构建尤为重要。本文主要研究 K3030+680—K3031+300 区段特殊地形对流场的影响，长度方向包含整个研究对象且考虑了一定的边界延长，全长 900 m。在宽度方向上，气流受不同地形作用，对轨道上方的影响也不同，线路横截面上的流动情况是文中分析的一个主要对象，因此计算域的宽度要足够大，保证来流的充分发展。线路中心位于计算域的宽度方向中心，距入口边界与出口边界均为 150 m，计算域高度 150 m，如图 4 所示。来流风速为 35 m/s，2 个出口均采用压力出口边界条件，设定出口处的静压为 0。将计算域的顶部设置为对称面

边界条件，可以修正计算域顶部对气流的摩擦效应，更好地仿真出无限的计算空间。地面及路基设置为固定壁面边界条件。

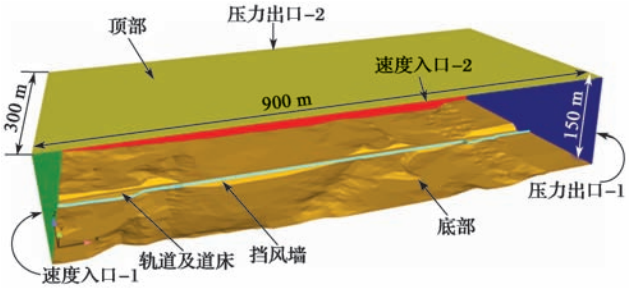
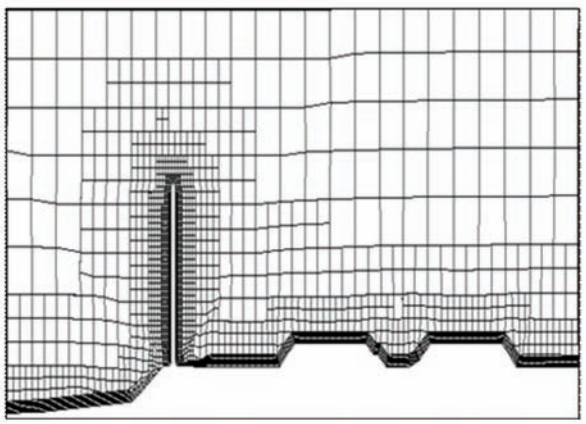
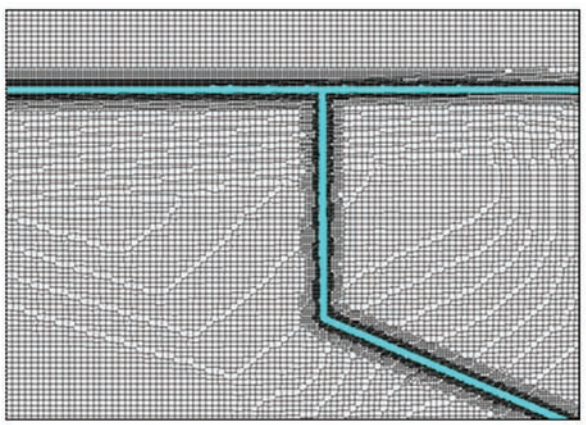



图 4　计算域与边界条件

文中使用的网格是由 OpenFOAM 内置的 SnappyHexa 模块生成的非结构六面体网格。该工具包提供自动网格生成方法，可以合理控制计算域中不同区域内的网格分辨率。计算域的局部网格如图 5 所示。气流会在贴近地形与挡风墙附近的区域产生很大的压力梯度，因此在这些区域进行了网格加密处理。同时，在模型表面设置了 10 层附面层，可以更好地捕捉近壁面的高速度梯度。



（a）挡风墙和线路附近区域加密网格



（b）1 号过渡段附近的网格

图 5　局部计算网格

根据工程需要，采用 SST$k$-$\omega$ 的 Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS) 模型来模拟铁路沿线周围的空气流场特性，其数学模型要求实现封闭求解，因此该模型的控制方程组包含 RANS 控制方程和 SST$k$-$\omega$ 两方程湍流模型的 $k$ 方程和 $\omega$ 方程。其中 RANS 控制方程主要包含连续方程和动量方程：

连续方程：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x_i}\left(\rho u_i\right)=0 \tag{1}$$

动量方程：

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\rho u_i\right)+\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\rho u_i u_j\right)=-\frac{\partial p}{\partial x_i}+\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\mu\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}-\frac{2}{3}\delta_{ij}\frac{\partial u_i}{\partial x_i}\right)\right] \tag{2}$$

式中：$u_i$ 与 $u_j$ 为流场中的流速分量；$x_i$ 与 $x_j$ 为直角坐标系的方向分量；$p$ 为压力；$\delta_{ij}$ 为克罗内克符号，当 $i=j$ 时，$\delta_{ij}=1$，$i\neq j$ 时，$\delta_{ij}=0$；$\mu$ 为空气动力粘度；$\rho$ 为空气密度；$t$ 为时间。

目前国内外关于铁路沿线周围空气流场的研究方法有大涡模拟方法和 Reynolds 平均法等。大涡模拟是通过滤波函数滤掉小尺度涡，直接模拟大尺度涡的流场运动方程，滤掉的小尺度涡对大涡的影响通过在大涡流场运动方程中添加相应附加应力项来体现。但高雷诺数工况需要细密的附面层网格实现计算精度，导致计算量大大增加，因此在实际工程运用中大涡模拟使用较少。Reynolds 平均法是将瞬态的脉动量时均化处理，建立并求解相应的时均化 Reynolds 方程。Reynolds 平均法大大降低了计算量，成为工程中广泛使用的湍流数值模拟方法。目前使用的湍流模型有 2 类：Reynolds 应力模型和涡粘模型。其中 Reynolds 应力模型是直接构建 Reynolds 应力方程，而涡粘模型是通过引入湍动粘度的概念，并将湍流应力表示成湍动粘度的函数。涡粘模型中的两方程模型，尤其是标准 $k$–$\varepsilon$ 模型，以其在远场偏离局部平衡态较远的自由流态特性使得其在工程中使用十分广泛。但是在低 $Re$ 数条件下的近壁区域求解精度远低于 $k$–$\omega$ 模型。综合 $k$–$\varepsilon$、$k$–$\omega$ 的优点，本文采用了 SST $k$–$\omega$ 两方程湍流模型来模拟铁路沿线周围的空气流场特性。

## 3　结果分析

### 3.1　原始流场分析

为明确 K3030+680—K3031+300 区段内防风设施薄弱环节形成原因，先得出 1 线（靠近挡风墙侧的轨道）与 2 线（远离挡风墙侧的轨道）距离轨面 3 m 高处沿线路中心线的 $Y$ 方向速度分量分布曲线，再分析水平截面上的速度矢量分布，得到流场突变的原因，最后对流动突变剧烈的地方进行定位，分析该处垂直线路横截面上的速度矢量分布。

#### 3.1.1　线路中心 $Y$ 方向速度分布

图 6 为风向角 90° 作用时，距轨面 3 m 高度线路中心线上的 $Y$ 方向速度分量分布曲线。将 1 号过渡段与路堤的连接处作为横坐标的零点，该区段上主要的地形特征沿线路方向从左到右依次是 1 号过渡段、两

道山梁、2 号过渡段。由图 6 可知，1 线和 2 线的上方 *Y* 方向速度变化趋势基本一致。从 1 号过渡段与路堤的连接处左方约 75 m 处，*Y* 方向速度分量开始负向增加，在 *X* 方向约等于 –36 m 处达到最大负值，即在该处发生了最剧烈的反向流动。随后负向速度减小，在原点附近达到 0 左右。在 *X* 方向约等于 250 m 的地方，突出的山梁开始影响该处的气流，接近山梁的地方，*Y* 方向的速度急剧增大，在 *X* 方向约等于 287 m 处达到该高度处的极大值。在同样高度处，2 线上方的气流速度大于 1 线。在两道山梁之间的空隙处，气流反向流动，大小达到 7 m/s 左右。在 *X*=350 m 处，大风直接越过挡风墙作用在线路上方，*Y* 分量速度在 *X*=350 m 附近急剧增大，再次形成一个峰值，然而这个值小于在第一道山梁处的速度值。在 *X*=487 m 附近，线路形式由路堤进入路堑，形成了路堤挡风墙与路堑挡风墙之间的过渡段，*Y* 方向的速度由负值突变为正值，线路上方仍存在较大的气流作用。在整个区段长度上，1 号过渡段附近最大风速峰峰值达到了 17.4 m/s，两道山梁处分别达到了 36.0 m/s 和 20.8 m/s，2 号过渡段附近为 18.9 m/s。

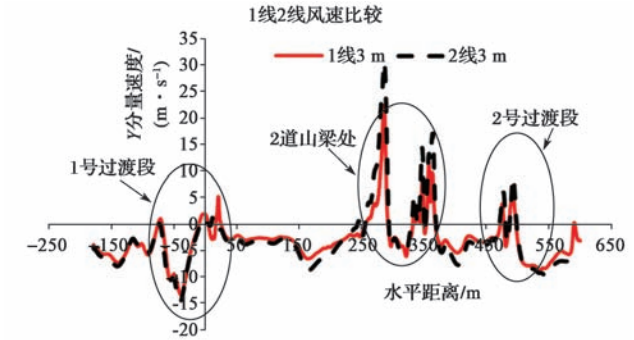



图 6　线路上方 3 m 的 *Y* 方向速度分布

### 3.1.2　轨道上方水平面速度矢量分布

为了探究图 6 中 *Y* 方向速度突变的原因，复原特殊地形附近的流动状态，如图 7 所示是线路上方 3 m 高度水平面上速度矢量图，线路与特殊地形处用红框标出，图中无矢量箭头的地方是局部地形高于 3 m，无气流经过。受地形的作用，只有中部一段宽度上的来流没被阻挡，以原本来流的速度（35 m/s）作用在挡风墙上，在该水平面上，*Y* 方向速度分量大小在不同的位置范围为 –20~40 m/s。为了具体分析每一处的流动情况，探究该处防风措施存在的问题，如图 8 所示，将 1 号过渡段、两道山梁与 2 号过渡段附近的流场分别进行分析。

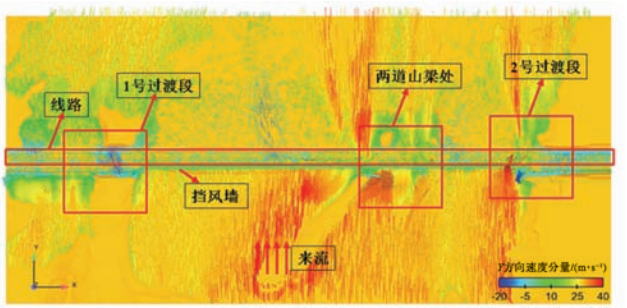
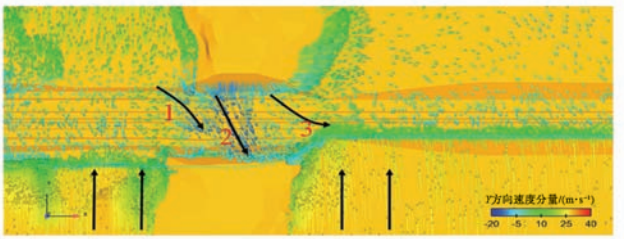


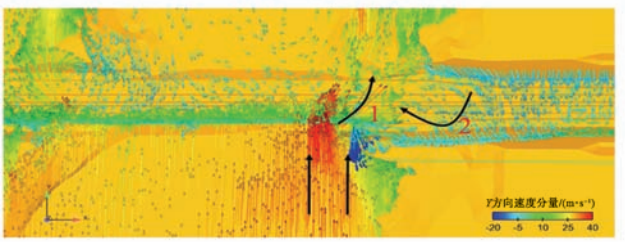

图 7　线路上方 3 m 高度水平面上速度矢量整体分布




（a）1 号过渡段附近




（b）两道山梁附近




（c）2 号过渡段附近

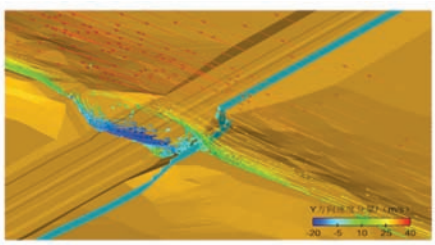
图 8　线路上方 3 m 高度水平面上速度矢量分布

图 8（a）为 1 号过渡段周围距轨面高 3 m 的流场矢量图，对于 1 号过渡段，主要受到 3 股气流的影响，其中第 1 股为来流受到矮路堑阻挡，一部分继续流走，另一部分则反向涌向过渡段处；第 2 股为高处来流受到高路堑阻挡，全部反向涌向过渡段处，这一股气流对过渡段处影响最大，由气流曲线可知，此处正是 *Y* 分量速度峰值出现的地方；第 3 股气流对过渡段影响不大，这股气流大都流向过渡段右侧的路堤方向，只有少部分回流到了过渡段处。图 8（b）为两道山梁处距轨面高度 3 m 处的流场矢量图，图中从左至右的气流大致可分为 5 个部分：第一部分为 1 号过渡段和山梁之间的气流；第二部分为第一道山梁与挡风墙形成的涡结构；第三部分为两道山梁之间形成的峡谷风；第四部分为第二道山梁与挡风墙形成的涡结构；第五部分为山梁与 2 号过渡段处形成的气流来流。其中第一部分气流和第二部分气流相遇的地方产生气流叠加，结合气流速度曲线图可以得知，此处形成了一处风速突变；同理，第三部分和第四部分气流在相遇的地方也汇聚形成又一处风速增大的突变处，这在气流速度曲线图上也体现了出来。其中第一处和第三处气流的影响最大，主要是因为挡风墙外山梁较高，挡风墙高度不够，此处形成了类似下坡风的情况，致使线路内风速突变加大。图 8（c）为 2 号过渡段周围距轨面高度 3 m 处的流场矢量图，从图中可知，2 号过渡段处所受到的气流主要来源于 2 个地方，第一处为山梁与 2

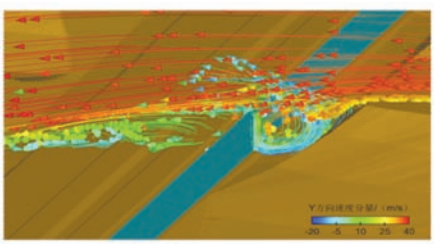
号过渡段之间的气流，一部分顺着来流流走，另一部分流向过渡段处；第二处为来流遇到对面的高路堑回流至过渡处。2 股气流叠加作用也形成了该处的速度突变。

### 3.1.3　垂直线路不同横截面上的矢量分布

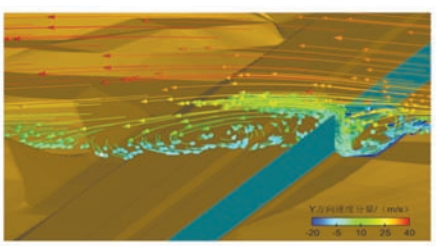
结合 3.1.1 与 3.1.2 的分析，在 4 个特殊地形引起速度突变最大值点处显示出垂直于线路方向的横截面上的速度矢量图（如图 9），该图可以更好地反映出气流在这个截面上的流动情况，获得线路上方系统的气流流动状态。图 9 分别为 1 号过渡段附近（–36 m）、第一道山梁附近（+287 m）、第二道山梁附近（+363 m）与 2 号过渡段附近（+487 m）处的横截面上的 $Y$ 方向速度矢量。在防风设施防风效果较好的地方，气流在到达轨面上方前被抬升，经过轨面时，会在轨道上方形成回流，方向与来流方向相反，速度值也大大减小。而在防风能力不足的地方，轨道上方依然会存在较大的速度。如图 9 所示，在 4 处横截面上，横风在越过挡风墙后，都会在线路上方形成一个漩涡，而来流经过的地形不同，漩涡的大小和强度也各不相同。从效果上来看，4 处横截面轨面上方的流场都没有达到理想的防风要求，需要对防风措施进行改善，从而使流场结构得到优化。



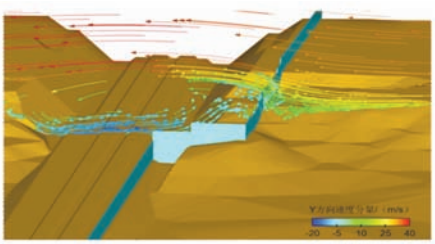
（a）1 号过渡段（$X$=–36 m）



（b）第一道山梁（$X$=+287 m）



（c）第二道山梁（$X$=+363 m）

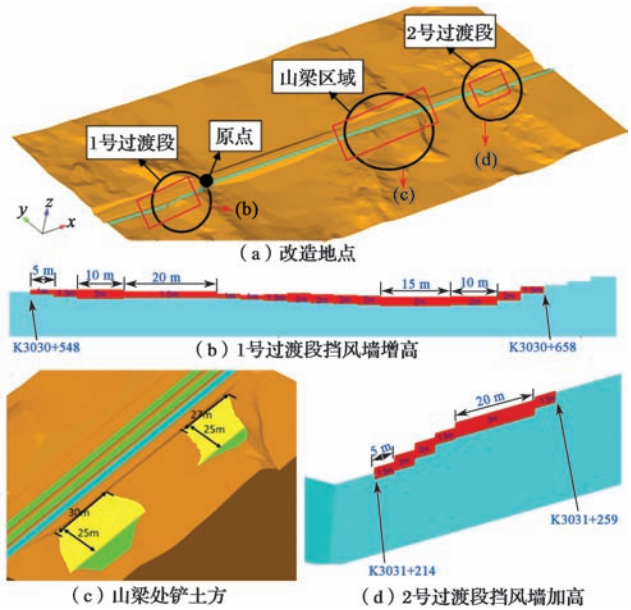


（d）2 号过渡段（$X$=+487 m）

图 9　不同位置垂直于线路方向横截面上的速度矢量图

## 3.2　优化方案研究

根据不同防风设施的特点和前期研究成果[11]，其优化方案可以归纳为以下 4 点：挡风墙直角变 30°斜切、挡风墙加高、新建挡风墙、铲土方。根据 K3030+680—K3031+300 区段的地形条件、效果、成本以及施工难度考虑，采用铲土方结合挡风墙局部加高来优化特殊地形处的流场。地形改造方案如图 10 所示。

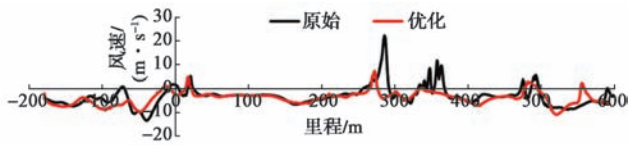



（a）改造地点　（b）1号过渡段挡风墙增高　（c）山梁处铲土方　（d）2号过渡段挡风墙加高

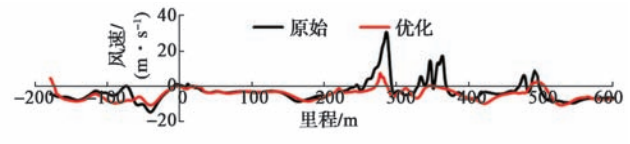
图 10　地形改造方案

## 3.3　优化结果对比

为了更清晰地显示出优化结果，将 1 线与 2 线单独列出对比。图 11 显示了在实施了局部挡风墙改造和局部地形改造方案后，优化后地形与原始地形在 1 线与 2 线中心 3 m 高度处的 $Y$ 方向速度分量分布。由图 11 可以看出，在以上关注的 4 处特殊地形处，通过增高挡风墙与铲土方优化后的横向速度的突变被明显减弱。表 1 列出了优化前后特殊地形附近的 $Y$ 方向风速峰峰值大小以及优化后峰峰值占优化前的百分比。




（a）1 线




（b）2 线

图 11　优化前后线路中心上方 3 m 处 $Y$ 方向速度分量

由表 1 可得，4 处主要地形处优化后的 $Y$ 方向速度突变值与优化前的比值都小于 70%。其中最大的速度峰峰值出现在第一道山梁附近 2 线上方 3 m 高度处，该处的 $Y$ 方向速度峰峰值为 36.0 m/s，此处优化后的峰峰值为 8.8 m/s，仅为原始值的 24.4%。综合表 1 所示的优化前后的风速峰峰值数据可知，采用铲土方结合

表 1　优化前后各地形附近 1 线与 2 线上方 3 m 处 *Y* 方向速度峰峰值

| 线路位置 | 1 线上方 3 m 高度 *Y* 方向速度 | | | 2 线上方 3 m 高度 *Y* 方向速度 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 优化前速度峰峰值 /(m·s$^{-1}$) | 优化后速度峰峰值 /(m·s$^{-1}$) | 与优化前百分比 | 优化前速度峰峰值 /(m·s$^{-1}$) | 优化后速度峰峰值 /(m·s$^{-1}$) | 与优化前百分比 |
| 1 号过渡段 | 16.1 | 10.9 | 67.7% | 17.4 | 9.8 | 56.3% |
| 第一道山梁 | 28.1 | 11.2 | 39.9% | 36.0 | 8.8 | 24.4% |
| 第二道山梁 | 19.5 | 4.9 | 25.1% | 20.8 | 11.6 | 55.8% |
| 2 号过渡段 | 16.9 | 11.7 | 69.2% | 18.9 | 12.7 | 67.2% |

局部加高挡风墙的方案可以有效地改善过渡段及山梁区域周围的流场，降低线路内最大突变风速，优化效果良好。由于线路已经运营，开展现场实车试验验证难度较大，但通过现场运营中司机和乘客的具体感受和情况反映，优化后该处并没有出现优化前的晃车现象。

## 4　结论

本文通过现场试验，发现了兰新高铁线 K3030+680—K3031+300 区段存在车辆气动力和流场突变现象，进行了地形实地考察与流场数值分析，得到以下结论：

K3030+680—K3031+300 里程处的地形为路堑 - 路堤 - 路堑交错出现，属于较复杂的地形，该地形有 2 个过渡段处，在 2 个过渡段中间又有两道山梁，因此在这 4 处流场容易发生改变，这是造成车体发生晃动的主要原因。由于该区段地形特殊，挡风墙无法理想地改善线路上方的流场，不能很好地发挥防风效果，其中， 2 线上风速突变大于 1 线。在文中所研究的工况和位置上，该区段中线路上方 3 m 处最大的速度峰峰值为 36.0 m/s，出现在第一道山梁附近的 2 线上方。通过铲土方和局部增高挡风墙，可以明显地改善线路上方的流场，保证大风环境下的行车安全。在 1 号过渡段，两道山梁和 2 号过渡段处的 1 线上方速度峰峰值减弱为原始的 67.7%、39.9%、25.1% 和 69.2%，2 线上方的速度峰峰值最大减弱为原始的 56.3%、24.4%、55.8% 和 67.2%。研究发现地形对防风设施的防风效果影响较大。后续对于晃车点防风设施的优化改造，都必须结合具体地形开展针对性的研究。

同时，除了改造地面的防风设施外，动车组自身重量、高度、悬挂参数的优化设计也是提高动车组在大风条件下运行安全性的重要措施，对于新疆等大风地区铁路，需要有针对性地开展相关优化设计。

**参考文献：**


[1] 李　荧 . 新疆风区列车气动性能试验分析 [J]. 中国铁路，2011(12)：1–3.

[2] 祁延录，王怀军 . 大风对新疆铁路的影响及防护 [J]. 西部探矿工程，2009，21(6)：161–163.

[3] 葛盛昌，周林森 . 兰新铁路沙害成因及防治对策 [J]. 铁道运输与经济，2007，29(1)：33–34.

[4] 唐士晟，史永革，张小勇 . 新疆铁路百里风区大风特征统计分析 [J]. 铁道技术监督，2011，39(1)：36–40.

[5] 高广军，田红旗，姚松，等 . 兰新线强横风对车辆倾覆稳定性的影响 [J]. 铁道学报，2004，26(4)：36–40.

[6] 徐刚 . 兰新铁路挡风墙过渡地段流场特性研究及优化 [D]. 长沙：中南大学，2010.

[7] 杨斌，刘堂红，杨明智 . 大风区铁路挡风墙合理设置 [J]. 铁道科学与工程学报，2011，8(3)：67–72.

[8] 张洁，刘堂红 . 兰新铁路土堤式挡风墙阶梯式设计 [J]. 中南大学学报（自然科学版），2014，45(4)：1334–1340.

[9] LIU Tanghong, SU Xinchao, ZHANG Jie, et al. Aerodynamic performance analysis of trains on slope topography under crosswinds [J]. Journal of Central South University, 2016, 23(9)：2419–2428.

[10] 牛权，史永革，张小勇 . 新疆铁路百里风区既有防风沙工程薄弱点分析 [J]. 铁道技术监督，2011，39(8)：43–45.

[11] Liu Tanghong, Chen Zhengwei, Zhou Xisai, et al. A CFD analysis of the aerodynamics of a high-speed train passing through a windbreak transition under crosswind [J]. Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics, 2017(8)：137–151.


作者简介：徐　峻（1966–），男，硕士，高级工程师，主要从事铁路客车环控方面的研究。

（上接第 5 页）


北京交通大学学报，2016，40(4)：25–31.

[6] 中华人民共和国科学技术部 . 先进轨道交通重点专项 2016 年度定向项目公开课题申报指南 [S]. 北京：中华人民共和国科学技术部，2016.

[7] 王升 . 高速列车车厢内火灾燃烧特性研究 [R]. 成都：西南交通大学，2017.

[8] 丁叁叁 . 高速列车车体设计关键技术研究 [R]. 北京：北京交通大学，2016.

[9] 丁叁叁，田爱琴，董天韵，等 . 端面下斜导流板对高速列车转向架防积雪性能的影响 [J]. 中南大学学报（自然科学版），2016，47(4)：1040–1045.


作者简介：丁叁叁（1967–），男，博士，教授级高级工程师，长期从事轨道交通车辆研发设计工作。