

文章编号: 1671-6612 (2023) 06-812-06

市域铁路隧道轨侧设备所受瞬态气动力的变化特征

何 磊

(中铁第一勘察设计院集团有限公司 西安 860117)

【摘 要】 市域铁路高速度和高行车密度的运行方式, 易造成隧道内设备的疲劳破坏, 也有可能导致固定螺栓等安装结构件的损坏与脱落, 从而给行车安全带来隐患。论文基于某市域铁路工程, 建立了列车经过隧道的三维 CFD 数值计算模型, 研究了列车高速通过单线隧道时轨侧设备所受的气动力, 并分析了气动力的特征及变化机理。研究结果表明当列车以 140km/h 通过单线隧道时, 窄体和宽体电源箱所受到的最大纵向力分别为 54.6N 和 125.1N; 隧道内不同位置处电源箱所受的纵向力均大于横向力和垂向力; 轨侧设备所受气动力的极值主要由列车绕流引起的。

【关键词】 市域铁路; 隧道; 轨侧设备; 气动力; 数值计算
中图分类号 TU96+2 文献标识码 A

The Characteristics of Transient Aerodynamic Force of Rail Side Equipment in Urban Railway Tunnel He Lei

(China Railway First Survey and Design Institute Group Ltd, Xi'an, 860117)

【Abstract】 The operation mode of urban railway with high speed and high traffic density is easy to cause fatigue damage of equipment in the tunnel. That may also cause damage and fall off of installation structural parts such as fixed bolts, thus might bring hidden dangers to operation safety. Based on a specific urban railway tunnel, this paper establishes the aerodynamic 3-D CFD numerical calculation model of the train passing through the tunnel. Moreover, when the train passes through the city railway single-track tunnel at high speed, the aerodynamic force of the rail side equipment - power box is studied. Furthermore, the cause of the aerodynamic force change is analyzed. The results show that when the train passes through the single-line tunnel at 140km/h, the maximum longitudinal forces of narrow and wide power boxes are respectively 54.6N and 125.1N; The longitudinal force on the power box at different positions in the tunnel is greater than the transverse force and vertical force. The extreme value of the aerodynamic force of the rail side equipment-power box appears during the train passes it.

【Keywords】 Urban railway; Tunnel; Rail side equipment; Aerodynamic force; Numerical calculation

0 引言

市域铁路作为各城市群之间重要的交通运输方式之一, 与城市地铁相比, 它不仅速度更快、运量更大、站间距更大、辐射范围也更广; 相较于高速铁路干线, 它的运营模式则更加灵活、开行密度也更高。目前我国大部分市域铁路设计列车运行速

度均在 120km/h-200km/h 之间^[1,2]。列车通过隧道引发的隧道压力波及列车风将在隧道内的轨侧设备上产生非定常气动力, 这些气动力不仅作用特性和变化规律复杂, 而且在长期往复作用下(如台州市域铁路 S1 线高峰期间发车间隔仅为 6 分 40 秒, 一天列车通过次数可高达大几十次), 极易造成轨

侧设备产生疲劳损坏，影响设备的使用寿命。严重地，将还可能导致轨侧设备脱落，一旦脱落的设备进入列车行驶区域，将可能引发重大安全事故，严重危害乘客和行车安全^[3]。由于空气动力学效应对轨侧设备安全具有重要影响，我国现有规范中，对轨侧设备的安装提出了相应要求^[1,2]。

国内学者围绕隧道内一些设备开展了研究。王照伟^[4]分析了空气动力学效应对于隧道内的接触网悬挂件、水沟盖板的影响，并且得到了隧道内的风机、通信电缆支架等其他设备所受的压力值。王国志等^[5]为了针对接触网进行安全性分析，仿真计算出了接触网的风振结果，得出接触线将会产生 2.92mm 正向偏移的结论。祝福^[6]采用数值计算仿真模拟得到了隧道里不同位置处广告牌的表面压力变化，并且得到列车速度为 120km/h 速度时广告牌的最大压强为 1081.4Pa。韩桂新等^[7]利用 CFD 软件模拟了实际地铁隧道内的流场，分析了广告牌上的风压随时间的变化特性。吴磊^[9]研究了活塞风作用下的风阀强度，为风阀安装提供了参考。耿义光^[10]揭示了高速列车通过隧道时，馈线及夹具所受气动载荷随时间的变化历程，对比实验结果与数值分析结果，两者吻合良好。张曙^[11]等人基于 Abaqus 商业计算平台，建立隧道地层-衬砌结构-锚栓-疏散灯的结构动力学仿真模型，研究气动荷载和地层荷载联合作用下隧道衬砌、锚栓和疏散灯的动力响应。方雨菲^[12]等人通过现场测试分析不同因素对隧道附属设施表面气动荷载、振动加速度和列车风速的影响，给出隧道内气动荷载分布规律。

列车通过隧道引起的空气动力学效应在轨侧设备产生的频繁往复作用力，一方面可能造成设备自身的破坏；另一方面也可能造成设备安装螺栓的松动，甚至引起设备的脱落。轨侧设备所受的气动载荷是设备安转螺栓疲劳计算的前提，本文基于某市域铁路具体工程，建立了列车经过市域铁路隧道

的空气动力学数值计算模型，研究了列车通过单线市域铁路隧道时隧道内轨侧设备-电源箱所受的气动力，并分析了气动力的产生原因。

1 计算模型

1.1 几何模型

以某市域线车站建筑结构为参考，建立了市域线隧道-车站的数值计算模型，研究市域 A 型车分别以 140km/h 速度驶入隧道并以该速度越行过站。图 1 为电源箱模型图，图 1 (a) 为宽体电源箱，尺寸为 0.7m×0.5m×0.4m，图 1 (b) 为窄体电源箱，尺寸为 0.35m×0.5m×0.7m。列车计算模型以实际运行的市域铁路 A 型列车外形作为参考，在保证计算精度的前提下，对其外观进行适当简化，忽略受电弓、转向架、车体连接部分等细部结构，如图 2 所示，市域铁路 A 型列车模型高度为 3.4m，宽度为 3m，横截面积为 10.2m²，列车总长度为 186m。根据实际情况，为了更准确模拟实际工况下列车从空气中驶入隧道的过程中产生的气动力，在地上段建立了如图 3 所示的 U 型槽，U 型槽长 313m，宽 8m，入口高度为 1m，出口高度为 10m。图 4 为数值模型计算区域的示意图，数值计算模型包括地上、进站端隧道、车站、活塞风井、出站端隧道。其中入口空气域长为 315m，宽为 48m，高为 30m，进站端隧道与出站端隧道均是直径 7.5m 盾构隧道，净空面积约为 42m²，长度分别为 500m 和 250m。

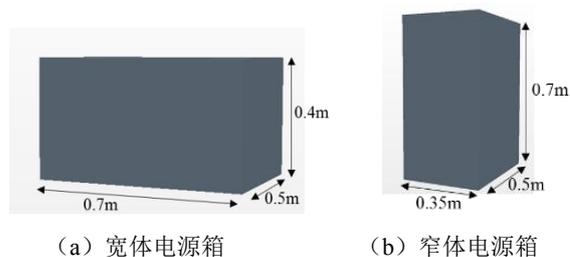


图 1 电源箱模型

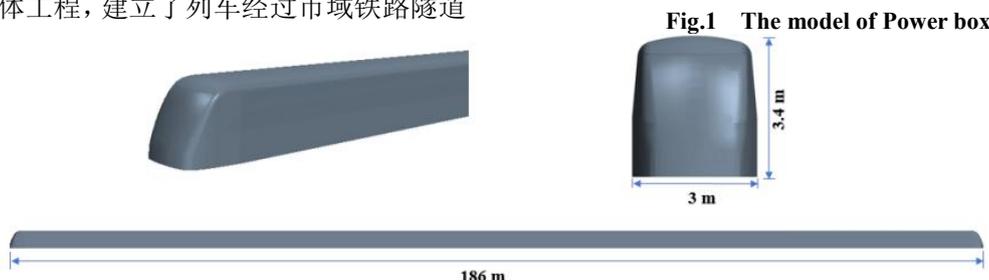


图 2 市域 A 型列车计算模型

Fig.2 The calculation model of A type train of urban railway

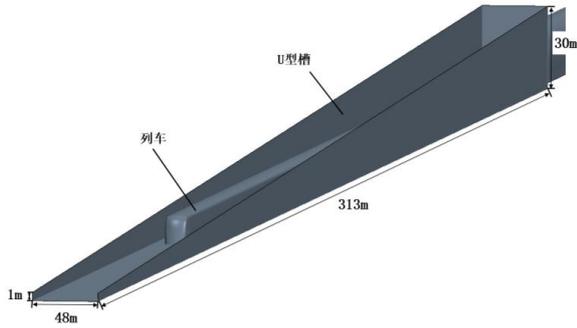


图3 隧道进口 U 型槽

Fig.3 U-shaped groove at tunnel entrance

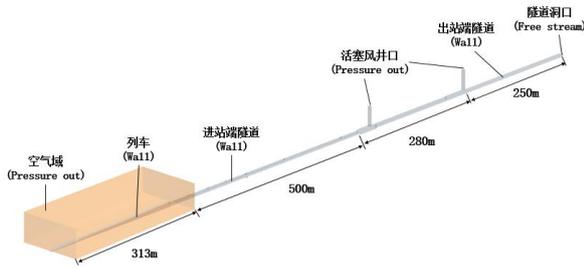


图4 计算域

Fig.4 Calculation domain

1.2 控制方程

列车通过隧道的过程中所引起的空气流动，是可压缩、粘性、存在边界层分离的三维非定常湍流流动。空气在隧道内的流动满足能量守恒定律、动量守恒定律以及质量守恒定律^[13]。对三大定律的基本方程作适当简化可以得出如下的流体流动基本控制方程。

连续性方程：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

动量守恒方程：

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho u}{\partial t} + \text{div}(\rho u \mu) &= \text{div}(\mu \cdot \text{grad} u) - \frac{\partial p}{\partial x} + S_{Mx} \\ \frac{\partial \rho v}{\partial t} + \text{div}(\rho v \mu) &= \text{div}(\mu \cdot \text{grad} v) - \frac{\partial p}{\partial y} + S_{My} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho w}{\partial t} + \text{div}(\rho w \mu) = \text{div}(\mu \cdot \text{grad} w) - \frac{\partial p}{\partial z} + S_{Mz}$$

能量守恒方程：

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u T)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v T)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w T)}{\partial z} =$$

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{k}{c_p} \frac{\partial T}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{k}{c_p} \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{k}{c_p} \frac{\partial T}{\partial z} \right) + S_T \quad (3)$$

理想气体状态方程：

$$p = \rho R T \quad (4)$$

式中， u 、 v 、 w 分别为 x 、 y 、 z 方向上的速度分量； μ 为气体动力粘度； c_p 为气体比热容； T 为温度； ρ 为气体密度； R 为气体常数； k 为传热系数； S_{Mx} 、 S_{My} 和 S_{Mz} 是广义源项； S_T 为内热源或者由于粘性作用流体机械能转换为热能的部分。

1.3 湍流模型

列车在市域铁路隧道内行驶时，流体的流动状态为湍流流动。为了准确地进行数值计算，并得到正确的结果，需要为流体选择适当的湍流模型。本文选择雷诺时均方程法下的 Realizable K-Epsilon Two-Layer 模型^[8]，该模型结合了 Realizable K-Epsilon 模型和 Two-Layer 的壁面处理方法，使其对壁面的处理更加灵活。

1.4 边界条件及数值计算方法

本研究使用 STAR-CCM+ 软件建模并计算，为保证列车从空气中驶入隧道时流场的稳定性，列车初始位置为距离隧道入口 50m 的位置处。

通过重叠网格技术实现列车的运动，具体的边界条件如图 4 所示。其中隧道入口处的空气域以及活塞风井口的边界条件设置为压力出口；进站端隧道、列车、车站、轨侧设备及出站端隧道的边界条件均设置为无滑移壁面，并使用 Two-Layer 全 $y+$ 壁面处理。出站端隧道洞口处的边界条件设置为无反射的自由流边界；列车的表面边界条件设置为壁面。为了更准确的模拟列车行驶过程中产生的压力变化，对车身表面附近和列车行驶区域的网格进行了加密处理，列车表面第一层网格为 10mm，并在初始计算后采用网格自适应进行调整，以满足标准壁面函数的要求。列车和列车行驶区域加密网格尺寸为 0.2m，宽体电源箱与窄体电源箱网格尺寸为 0.1m，总网格数为 2383 万。计算中求解器选择隐式非稳态求解器，时间离散为一阶离散格式，时间步长为 0.01s。

为了验证本论文的数值计算模型，采用了文献 [14] 中的动模实验数据，具体的对比结果见文献 [15]，隧道内某测点压力波的最大误差不超过 6%。

1.5 轨侧设备的布置位置

窄体电源箱、宽体电源箱与列车的相对位置如图 5 所示，宽体电源箱中心位置距隧道中轴线 2.1m，窄体电源箱中心位置距隧道中轴线 2.28m。如图 6 所示，将窄体电源箱和宽体电源箱放在距离隧道入口 50m、150m、250m、400m 处，分别命名

为轨侧设备组 1、轨侧设备组 2、轨侧设备组 3、轨侧设备组 4。

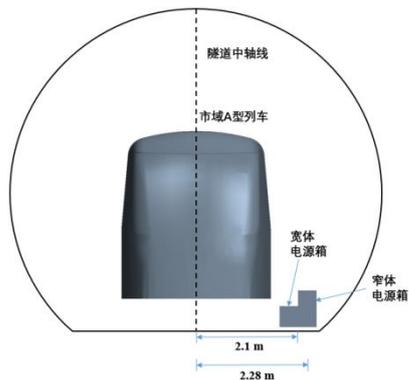


图 5 电源箱与列车相对位置关系图

Fig.5 The relative position of the power box and the train

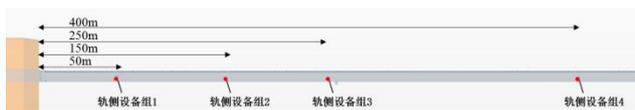


图 6 电源箱布置图

Fig.6 Layout of Power box

2 列车高速通过市域铁路单线隧道时轨侧设备所受瞬态气动力的变化特征

以电源箱为例，研究列车高速越行通过市域铁路单线隧道时，轨侧设备所受的气动力。列车通过隧道时，电源箱所受气动力在直角坐标系下分为三个方向，分别定义沿 X 轴方向的力为纵向力、沿 Y 轴方向的力为横向力和沿 Z 轴方向的力为垂向力，如图 7 所示。图 8 为当列车以 140km/h 速度通过隧道时不同位置处宽体电源箱所受的气动力变化。由图 8 可知，宽体电源箱在不同位置处所受的纵向力、横向力和垂向力的变化规律基本一致。对于隧道内不同位置处的宽体电源箱，其所受纵向力大于横向力和垂向力。

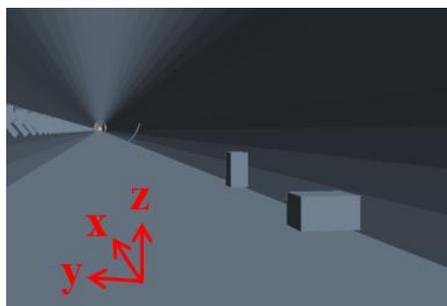
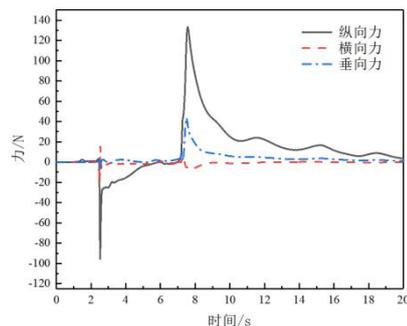
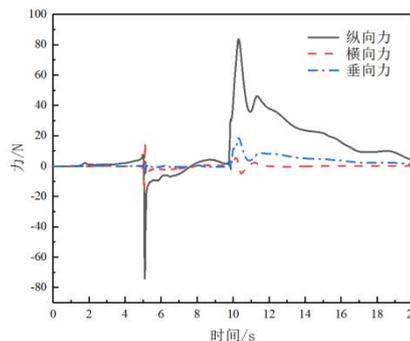


图 7 电源箱位置示意图

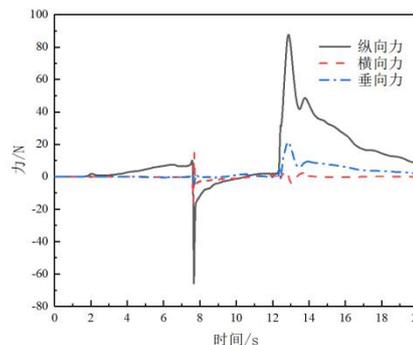
Fig.7 Position diagram of power boxes



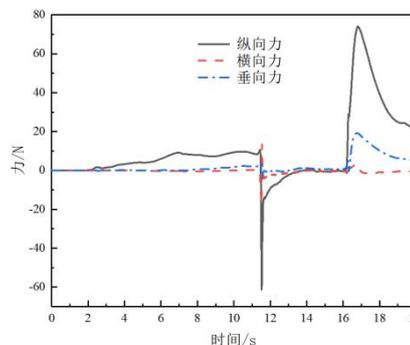
(a) 距离隧道入口 50m 处



(b) 距离隧道入口 150m 处



(c) 距离隧道入口 250m 处



(d) 距离隧道入口 400m 处

图 8 隧道内不同位置处宽体电源箱所受气动力变化曲线

Fig.8 The variation curve of the aerodynamic force of a wide-body power box at different positions in the tunnel

以距离隧道入口 150m 处宽体电源箱为例进行受力分析, 图 9 所示为距离隧道入口处 150m 处宽体电源箱前表面中心点的压力与气动力关系图, 图中 (a) 部分为列车驶入隧道后产生的压缩波、膨胀波及车头、车尾的轨迹曲线, 其中带有实心矩形和空心矩形的线条分别表示列车的初始压缩波和初始膨胀波在整个隧道中的传播, 其中实线和虚线分别代表压缩波传播轨迹和膨胀波传播轨迹, 传播速度近似取常温下声速 340m/s; 带有实心圆形的实线为列车车头的轨迹曲线, 带有实心圆形的虚线为列车车尾的轨迹曲线; (b) 部分为距离隧道入口 150m 处宽体电源箱前表面中心点的压力-时间历程曲线图; (c) 部分为距离隧道入口 150m 处宽体电源箱气动力-时间历程曲线图。

$t=1.8\text{s}$ (点 a) 时刻, 宽体电源箱 X 方向上先产生与列车运动方向相同的纵向力, 大小为 2.1N, 横向力和升力基本未产生波动。这是因为当车头进入隧道时, 车头前方的空气由于受到挤压作用而压强升高, 在车头与隧道进口和出口之间形成压强梯度, 从而引起初始压缩波, 在此压强梯度的持续作用下车头前方的隧道空气开始向出口端流动, 并且随着列车不断进入隧道, 挤压作用增强, 气流速度越来越大, 当压缩波传播到测点处时, 宽体电源箱受到压缩波的持续作用, 导致该点处压力升高, 此时宽体电源箱开始受到逐渐升高的纵向力; $t=3.8\text{s}$ (点 b) 时刻, 初始压缩波传播到断面突变区后发生反射, 并以膨胀波的形式传播回测点处, 此时点 b 处压力减小; $t=5.2\text{s}$ (点 c) 时刻, 列车车头经过宽体电源箱, 由于车头处为正压, 车身周围为负压, 所以测点处的压力会先上升, 再立刻下降, 此时宽体电源箱纵向力也有相同变化, 并且变化明显; $t=6.5\text{s}$ (点 d) 时刻, 列车车尾进入隧道引起的膨胀波经过宽体电源箱, 测点处压力降低, 所受纵向力也有所下降; $t=9.8\text{s}$ (点 e) 时刻, 列车车尾经过宽体电源箱, 由于列车车身为负压区, 车尾为正压区, 测点处的压力与纵向力在短暂下降后立即升高。之后, 当列车完全驶离电源箱后, 其所受的纵向力逐渐恢复至 0N 附近, 并且此后隧道内的设备在压缩波和膨胀波的来回反射作用影响下, 其压力与气动力发生相应改变。综上可知, 轨侧设备电源

箱所受气动力的极值主要由列车绕流引起的。

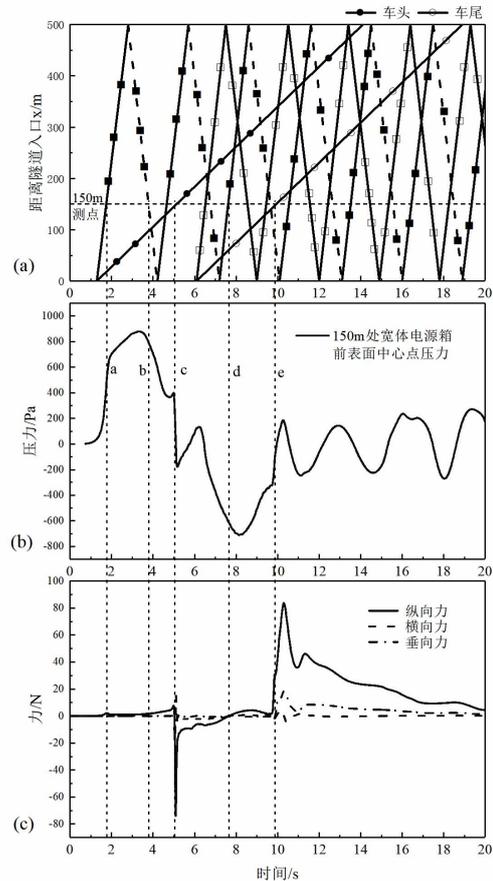


图 9 宽体电源箱前表面中心点压力及所受气动力关系图
Fig.9 The central point pressure on the front surface of a wide-body power box and its relationship with the air force

当列车以 140km/h 通过隧道时, 图 10 给出了不同位置处窄体和宽体电源箱所受气动力极值。由图可知, 对于隧道内所有位置处的电源箱来说, 其所受的纵向力大于横向力和垂向力。对于隧道内不同位置处的电源箱, 其所受纵向力大于横向力和垂向力。窄体电源箱所受最大纵向力为 54.6N, 最大横向力为-23N, 最大垂向力为 5.2N; 宽体电源箱所受最大纵向力为 125.1N, 最大横向力为-20.7N, 最大垂向力为 38.1N。宽体电源箱所受的气动力和窄体电源箱所受的气动力最值变化规律基本一致。在同一位置处, 宽体电源箱受到纵向力和垂向力比窄体电源箱所受更大, 而窄体电源箱所受横向力更大。这是因为宽体电源箱在 X、Z 两个方向上的截面积更大, 窄体电源箱在 Y 方向上的截面积更大, 所以轨侧设备体积越大受到气流扰动的作用越明显。

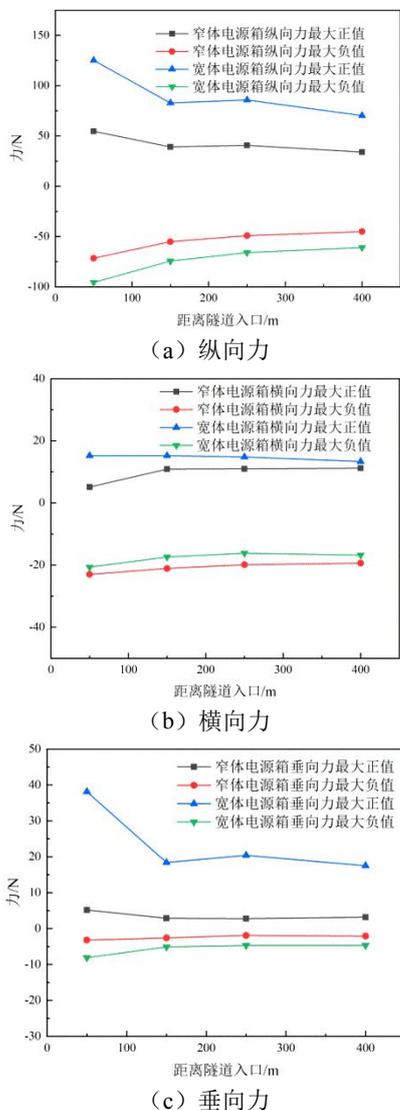


图 10 不同位置处电源箱气动力极值

Fig.10 Extrema values of aerodynamic force of the power box at different positions

3 结论

本文以实际工程中某市域铁路隧道为研究对象,采用数值计算方法研究了列车以 140km/h 高速越行通过轨侧设备时,轨侧设备——电源箱所受的气动力。主要研究结论如下:

(1) 电源箱在不同位置处所受的纵向力、横向力和垂向力的变化规律基本一致。对于隧道内不同位置处的电源箱,其所受纵向力均大于横向力和垂向力;

(2) 电源箱所受气动力极值主要是由列车的绕流作用产生;

(3) 窄体电源箱所受最大纵向力为 54.6N,最大横向力为-23N,最大垂向力为 5.2N;宽体电源箱所受最大纵向力为 125.1N,最大横向力为-20.7N,最大垂向力为 38.1N。

参考文献:

- [1] TB10624-2020,市域(郊)铁路设计规范[S].北京:中国铁道出版社,2021.
- [2] CJJ/T298-2019,地铁快线设计标准[S].北京:中国建筑工业出版社,2020.
- [3] 董梦雪,赵帅帅.地铁列车进站过程中活塞风对站台屏蔽门的影响——以杭州地铁为例[J].河南科学,2021,9(10):1575-1580.
- [4] 王照伟.高速铁路空气动力学效应对隧道内附属设施的影响[D].长沙:中南大学,2011.
- [5] 王国志,孙海振,于兰英,等.高速列车过隧道时对接触网安全性的影响分析[J].铁道标准设计,2016,60(10):118-121.
- [6] 祝福,余志祥,曹瑞洲,等.地铁隧道附属广告设施的活塞风作用时变特性[J].西南交通大学学报,2018,53(5):1048-1057.
- [7] Han Guixin, Luo Zhong, Sun Yonghang, et al. Time-variant characteristic under the pistonwind on subway tunnel billboard[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 2019,233(16).
- [8] Launder B E, Spalding D B. Lectures in mathematical models of turbulence[M]. 1972.
- [9] 吴磊.活塞风作用下隧道设备风振及疲劳研究[D].成都:西南交通大学,2020.
- [10] 耿义光.高速铁路隧道馈线及夹具气动载荷数值计算与试验研究[D].长沙:中南大学,2012.
- [11] 张曙,杨伟超,施成华,等.气动荷载作用下高速铁路隧道内轨旁疏散灯安全性研究[J].铁道科学与工程学报,2022,19(9):2470-2479.
- [12] 方雨菲,马伟斌,程爱君,等.隧道附属设施气动效应分析[J].铁道建筑,2022,62(4):102-106.
- [13] 崔涛,孙帮成,张卫华.高速铁路站台屏蔽门气压荷载数值分析[J].铁道建筑,2013,(4):142-144.
- [14] 曾令伟,易富民,王汉封,等.地铁车站屏蔽门风压特性试验研究[J].实验流体力学,2020,34(6):59-65.
- [15] 詹佑霖,毕海权,王宏林,等.市域线车站站台屏蔽门气动特性研究[C].2022 年全国铁路与城轨暖通学术年会论文集,2022:437-441.