

大风区铁路挡风墙风洞实验研究

中国科学院兰州沙漠研究所 刘贤万
铁道部第一勘测设计院 崔志刚

引 言

我国南疆铁路和兰新铁路新疆自治区段自沙尔至红旗坎车站的百里风区,是我国特大风区之一,也是世界已知报道出现火车翻车倾覆的唯一一个地区。

自 1960 年通车至 1986 年的 26 年间,由于沙埋造成的脱轨有 4 次,而由于大风造成的脱轨及翻车计有 12 次。这给西北交通大动脉和今后的欧亚大陆桥的畅通,造成巨大的危害,也给国家财产和人民生命造成重大损失。因此,大风翻车问题,从一出现,就受到国家和铁道部的严重关切。兰州沙漠所和铁道部勘测、设计及路段各部门,自 1970 年开始,就对特大风区进行协作调查、试验和室内实验研究。通过现场调查、测试* 和风洞实验[2],对火车倾覆环境、条件、危害机理及临界翻车风速,都有了初步的认识,并提出了挡风墙设计高度的基本数据。为后续的墙风墙设计和施工,提供了实验和理论依据。这次,由于承接了兰新线的复线设计任务,挡风墙的风洞实验任务又被提了出来。但是,由于资金缺乏,时间很紧,实验没有在兰州沙漠所的大型野外风洞中进行实验,且只进行了一遍,风洞的模型阻塞等修正也未考虑。因此,本小结只能是一个初步的定性成果,错漏在所难免,望专家同仁斧正。

1. 实验内容

- (1)确定双线铁路路基(路堤高 5、8 和 12m)不同轨心距(4、6 和 8m)条件下挡风墙的合理高度(矩形墙);
- (2)确定挡风墙的最佳透风系数;
- (3)测定挡风墙表面的压力分布。

2. 实验的相似考虑

一般风洞实验要求满足几何相似、运动相似和动力相似。几何相似要求模型与原型各对应部分成相同比例,我们的车箱模型采用[1]中所制,而路基按二元模型制作,比尺均为 1 : 50;运动相似要求空间流场相似,对于实验在近地层的情况,根据表征大气湍流运动的雷诺

* 参加实验工作的还有兰州沙漠所风沙环境风洞实验室王国昌等同志,深表感谢。

方程,可把运动相似简化为大气边界层风速垂直分布及湍流度相似^{*}。这通过棍栅法调节人工边界层可以达到目的。当然,我们风洞不是模型车横向运动条件,只能模拟静止状态车箱气动特性。对于动力相似,要求模型与原型受力场相似。鉴于我们的路基车辆实验都是在大雷诺数和有棱角体,因此其分离线不因雷诺数而改变,力场就基本上保持了相似的要求。

3. 车箱表面压力系数的测定

车箱、迎风路肩角上下和挡风墙表面压力分布测定都是采用倾斜多管压力计进行的。其水平方向倾角为 20° 。车箱各工况条件下的表面压力系数,可通过测定各种数据进行计算。车箱各力学参数就易于得到了。

车辆各相应测点上的压力系数在各风况条件下基本是相同的(由于低速多管压力计误差较大,多有例外)。各参数测定计算结果,证实了压力系数是不随指示风速和模型比尺而变的(当然,考虑到其他因素,比例尺还是大些的好)。除迎风面因爬坡风及工程的影响,压力系数变化较大外,车箱其余各侧面的压力系数变化较小,分布较为均匀。并且,除不设挡风墙和挡风墙高度太低(1和2m)而出现正值外,其余各侧面的压力系数均为负值,即受到的不是压力而是吸力和升力。最后是压力系数随路堤高度而升高,但随轨心间距的变化不大,说明堤高因素影响较大,而受轨心距的影响较小。

4. 车箱受力分析

不论列车是在直线或在弯道上行驶,车箱的受力都是较为复杂的,其主要有风力、弹簧松动力、车箱重力和机车牵引力、惯性离心力等等。主要考虑风力、振动力(减载)和重力,但可认为风力是第一重要的作用因素。

分析表明,风对车箱的作用力,可分解成水平和垂直二个方向。车箱通风面和背风面的作用,主要是水平方向的(爬坡风的主要作用在迎风路肩角,对于双轨及设了挡风墙后,作用就更小),顶面和底面作用,主要是垂直方向的(顶面二侧水平分量基本相抵消)。于是,水平方向作用可有顺风推力和逆风吸力二种,而垂直方向可有浮升和下沉的二种作用。根据上面分析,我们计算了各工况下车箱表面所受风力的合力。从分析计算可认为,风作用合力处于第1象限(以风向的 x 轴正方向,车箱重心为坐标原点,上升力为 y 轴正方向)。车箱是最不稳定的,而第3象限,车箱是最稳定的,而[4]和[2]则分别是不稳定和稳定的。从其中数值看,数值大者表明稳定者更稳定,而不稳定者更不稳定。因此,单轨路基无挡风墙保护,车箱是不稳定的,而挡风墙太低矮($h \leq 1\text{m}$)及挡风墙透风系数太大($\beta \geq 0.2$)时,车箱也是不稳定的。尽管比无工程时为好。从而告诉我们,挡风墙的最佳高度应选择为 $2.5 \sim 3\text{m}$,而其疏透度应是偏紧密的($\beta = 0 \sim 0.1$)。

除了具有上述单轨条件下的结论外,从作用力看,随轨心间距和路堤高度的加大,防风作用是向着好的方向变化的。这与高注、王厚雄^{*}他们的结论,认为车箱作力系数均随路堤高度的增加而降低,是有异曲同工之妙的。

5. 车箱力矩作用分析

文献[1]及王厚雄他们的资料都采用了力矩分析。[2]中认为大风地区大风翻车是在整个车箱表面倾覆力矩与车箱重力及弹性浮力组成的稳定力矩平衡受到破坏后产生的。并由此推出临界翻车风速。而王厚雄等认为是车箱气动倾覆力矩等于零的挡风墙高度,就是其最佳的高度。我们揉合二者的观点来选择最佳挡风墙高度,即采用车箱合力矩等于零的高度为最佳工程高度。因为我们分析发现,车箱合力矩也有正的情况,即合力矩作用是逆风方向的。我们按一般的定义顺风倾覆的总力矩为负值,而逆风为正值。由作图得知,单轨棚车在各工况条件下,总力矩有个峰值,它大约在 2.9m 处,而在 2.5m 处合力矩等于零。因此,采用 2.5~3.0m 的工程高度是适宜的。而双轨似可略为降低高度,其极大值在 2m。当然,铁路营运不会仅在第二轨道上进行,因此适宜采用单轨的数据。而随路堤高度的提高,似略有减小,但差别很小。挡风墙的通风系数以采用紧密型为好,合力矩约在 $\beta \approx 0.15$ 处达到零值,但在 $\beta = 0.05$ 处达到最大。而双轨条件下,除 $\beta = 0.4$ 较差外,其余变化不大。以上的结论与我们的初稿想法不同,当时认为应是疏透型为佳。究其原因在于双轨路线距挡风墙还太近,仅有数倍的距离,这当然是采用紧密型为好了。

6. 流场测定分析

为了进一步阐明挡风墙的作用原理,除了对车箱进行力和力矩分析外,有必要进行一点流场测定。鉴于二元模型,因此仅测其轴线纵向流场。流场观测同样采用倾斜多管压力计,倾角 $\alpha = 20^\circ$,前后测点布置一般是路堤前后 15cm (或 10cm)、迎背风路肩角内 0.5cm 及各轨枕盒道心处等 5~6 个点,而高程一般有 6 个:0.5、1.5、4、8、16 和 32cm。

将测量结果作出图解可见,不设挡风墙的不同路堤高度上的流场纵剖面,其基本形势是相近的:路堤前后坡脚都有一低速区。前者可阻滞减速、窄而薄,后者为回流死风区,宽而厚;迎风路肩上有一集流高速区,且向后向上倾斜发展着。其最高速度区,一般均在迎风路肩角,这是路堤迎风路肩所以风力强烈的原因。其相对增速值随路堤宽度和高度有所增强;最后是在轨枕合及背风路肩角上有一薄弱的回流低速区,这是轨枕合作用所致。有了挡风墙,整个流场发生了巨大的变化。主要表现有:

- (1)路堤迎风坡脚由于流线的整体稳升,低速区厚度和宽度变大,阻滞加强;
- (2)背风坡低速区范围变得更宽又厚,经常与工程后的回流低速区合二而一;
- (3)挡风墙后的低速区,对透风系数较大者,似乎显得低平些,而紧密型则较为粗短;
- (4)挡风墙顶右上方的加速区,其相对增速值也得到加强,最大值区从迎风路肩角上移至轨道上方,其最大增速值似以疏透型为大。

总之,有了工程后,各个速度区都得到发展。挡风墙起了对来流进行能量再分配的职能,其尾流区即为列车运行创造的高湍流低风速小环境。

7. 迎风路肩角上下及挡风墙表面压力分析

这个项目也是工程设计所急需的。迎风路肩的压力分布,意味着其风能防护的强度,而

墙体表面压力,则与墙体的抗风强度攸关。压力分布仍采用倾斜多管压力计测定,根据测定结果分析有如下几点认识:

(1)无工程条件下,迎风路肩角下一小段距离上压力系数是负值,这与林荣生老师对铁路路基压力分布的测定结果是一致的,即迎风坡最顶部大约 $\frac{1}{6}$ 坡面长度范围内压力系数是负值,而下面则是正的,并随高度上升而逐渐减小。还有路面及背风坡上均为负值,且较为均匀[除路肩角负值较大(绝对值)];

(2)设置了工程后,总的形势未变,但迎风路肩角上方的负值区缩小了。对于双轨路堤,矩形挡风墙设置后,第4点变为正值,而2、3二点变为正值的可能性随工程高度增加而增加,与挡风墙 β 值关系不大。这是由于墙体跟前强烈的回流作用产生的,也是迎风坡面上速度随高度升高超势减弱的表现;

(3)对于等腰三角形挡风墙与矩形墙的区别,看来矩形墙的减速作用大些。这证明三角形墙阻力较小。

矩形与等腰三角形挡风墙表面的压力分布,也可以通过测定,列表作图,进行分析计算。由矩形墙可见,其迎风坡的压力系数经历了一个完整的波动。其底部的波峰是拐角绕流的结果,上半部的波谷(正压力系数)是气流附体加速的结果。而顶部和背面则较为平直。而等腰三角形墙,由于开始就发生气流附体加速作用,因此其压力系数分布如前述的路堤迎风坡,而背风同样是均匀平直的“死水区”。由于测点布点较低,因此其顶部的低速区未能测出,这里假设其平均压力系数为 -0.35 。由表可见,矩形墙的合力是三角形墙的3倍左右。

8. 结 论

(1)对挡风墙设计高度来说,高路堤和双轨宽距,并未提高要求,而且标准有少量的降低(当然,从墙体强度和背风面的防风蚀要求应另行考虑);

(2)挡风墙可采用 $2.5\sim 3.0\text{m}$ 的高度和 $0\sim 0.1$ 的透风系数;

(3)挡风墙表面压力分布,矩形墙迎风面有一完整的波形分布,而等腰三角形则与路堤迎背风坡的分布相近。矩形墙的阻力是等腰三角形的3倍。

由于本实验内容量大,实验时间短,加上我们的实验理论和实验技术设备所限,重复实验很少,并且没有考虑模型堵塞等修正,因此,这个实验基本上仅有定性意义,期待实际工程的检验和修正。

参 考 文 献

[1]赵性存等,中国沙漠铁路工程,中国铁道出版社,1988.

[2]贺大良等,新疆大风地区翻车风速的风洞实验,中国科学院兰州沙漠研究所集刊, No2 科学出版社, 1982.