

风雨联合作用下南京大胜关长江大桥 地铁列车运营安全研究

汪 皓¹ 司天文² 郑史雄² 马 舜³ 周云强³

(1. 中铁城市规划设计研究院有限公司, 241060, 芜湖; 2. 西南交通大学土木工程学院, 610031, 成都;

3. 中铁大桥勘测设计院集团有限公司, 210031, 南京//第一作者, 高级工程师)

摘 要 为降低风雨联合作用对大跨度桥梁上城市轨道交通运营安全造成的影响,以南京大胜关长江大桥地铁搭载段为例,建立横风作用下列车倾覆数学计算模型,并研究列车在风雨联合作用下的运营安全性。结果表明:列车在背风侧运行时的临界倾覆风速大于列车在迎风侧运行时;相对于仅有强风作用,风雨联合作用下列车迎、背风侧的临界倾覆风速均有所降低且背风侧降低较为显著;仅强风作用时桥梁附属设施的增加使列车临界风速有所降低,风雨联合作用下桥梁附属设施的增加对列车临界倾覆风速的影响较小;风雨联合作用下,列车在边跨与中跨运行时的临界倾覆风速变化不大;雨强增大时临界倾覆风速降低不大。由此可见,风雨联合作用下对行车安全影响的主要因素是风速。

关键词 地铁; 列车; 运营安全; 桥梁; 风雨联合作用

中图分类号 U270.1⁺1

DOI:10.16037/j.1007-869x.2023.06.020

Safety of Metro Train Operation on Nanjing Dashengguan Yangtze River Bridge under Combined Wind-Rain Action

WANG Hao, SI Tianwen, ZHENG Shixiong, MA Shun, ZHOU Yunqiang

Abstract To reduce the combined impact of wind-rain action on the safety of urban rail transit operation on long-span bridges, taking the metro carrying section of Nanjing Dashengguan Yangtze River Bridge as an example, a mathematical model for calculating train overturning under crosswind action is established, and the train operation safety under wind-rain action is studied. Results show that compared to running on the windward side, the critical train overturning wind speed (hereafter 'critical speed' for short) is higher when train is running on the leeward side; compared to the scenario of strong wind only, the critical speed on either the windward or the leeward sides is lower under wind-rain action, while the reduction on the leeward side is more significant; adding bridge ancillary facilities under action of only strong wind reduces the critical speed, and

under combined wind-rain action, the impact of adding bridge ancillary facilities on critical speed is less; the critical speed does not change much when train runs on side-span and mid-span under wind-rain action; the increase of rainfall intensity has little effect on the reduction of the critical speed. Therefore, it can be derived that wind speed is the main factor affecting train operation safety under combined wind-rain action.

Key words metro; train; operation safety; bridge; wind-rain action

First-author's address China Railway Urban Planning & Design Institute Co., Ltd., 241060, Wuhu, China

在强风和强降雨等极端天气下,尤其通过桥梁时,地铁列车发生脱轨及倾覆等安全事故的可能性大大增加。对风雨联合作用下的地铁列车运营安全研究,具有重要的理论及实际意义。

文献[1]通过在大气边界层风洞中搭建的风雨联合作用试验系统,获取降雨对大跨桥梁颤振稳定性的影响规律。文献[2]基于在大气边界层风洞中搭建的风雨联合作用试验系统,通过分析不同降雨强度(以下简称“雨强”)下节段模型的静力三分力系数,获取桥梁主梁断面在风雨联合作用下的静力特性。文献[3]采用双方程湍流模型和离散相模型相结合的方法,对不同雨强、横风风速和车速下高速行驶车辆周围的流场进行研究。

在上述研究的基础上,本文以南京大胜关长江大桥地铁搭载段为背景,研究风雨联合作用下地铁列车通过桥梁时的运营安全性。

1 地铁列车在横风下行车安全性分析

1.1 工程背景

南京大胜关长江大桥地铁搭载段桥型为双联拱连续钢桁梁,北侧连接钢桁梁,南侧衔接混凝土

连续梁。该钢桁拱桥由 3 片桁架组成,每两片主桁间的中心间距相等且均为 15.0 m。南京大胜关长江大桥地铁搭载段主桥总体布置如图 1 所示。

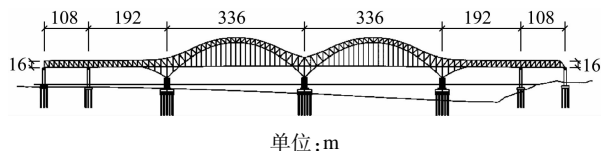


图 1 南京大胜关长江大桥地铁搭载段主桥总体布置图

Fig. 1 General layout diagram of Nanjing Dashengguan Yangtze River Bridge metro carrying section main bridge

通常桥梁上的风速比地面大,列车在桥梁上运行时的气动性能较之于地面上运行时有较大变化,因此大大降低了地铁列车的运行安全。

1.2 列车抗倾覆指标

随着风速的增大,迎风侧轨道受到的压力会进一步减小,直至位于迎风侧的轮重变为 0。定义此时的风速为临界倾覆风速。

本文在研究列车倾覆时,考虑以下主要的作用力:①侧风引起的气动侧力、气动升力及气动倾覆力矩;②车辆的自重;③车体横向振动的惯性力;④轮轨作用力。

对于车体的垂向振动惯性力、车辆簧以下部分所受到的风力及车钩连挂作用忽略不计。

根据 GB 5599—1985《铁道车辆动力学性能评定和试验鉴定规范》,定义地铁列车的倾覆系数 D 为:

$$D = \frac{F_d}{F_{st}} = \frac{F_2 - F_1}{F_2 + F_1} \quad (1)$$

式中:

F_d ——在侧向风力作用下,轨道受到的垂向力的变化量;

F_{st} ——车轮的静荷载,即为无侧向风力作用时轨道受到的垂向力;

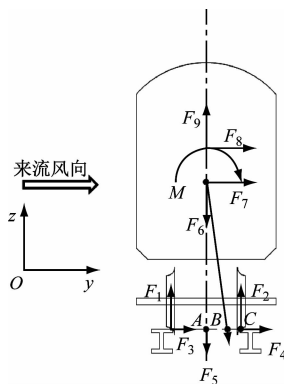
F_2 ——轮重增加一侧(背风侧)轨道受到的垂向力;

F_1 ——轮重减小一侧(迎风侧)轨道受到的垂向力。

式(1)中: $D=1$ 为列车倾覆的临界条件,此时 $F_1=0$; $D=0$ 为无侧风条件,此时 $F_1=F_2$ 。在列车实际运行情况下,考虑到列车运行的安全性,取 $D=0.8$ 。

1.3 列车倾覆数学计算模型

本文研究的钢桁拱桥为直线桥梁,因此只考虑列车在直线上运行的情况。考虑列车的自重、列车受到的风力、轮轨间作用力,以及列车受到的横向振动惯性力,忽略其他力的作用,建立车体受力分析图,如图 2 所示。



注: F_3 为减载侧轮轨水平作用力; F_4 为增载侧轮轨水平作用力; F_5 为转向架自重; F_6 为车体自重; F_7 为车体横向振动惯性力; F_8 为气动侧向力; F_9 为气动升力; M 为气动倾覆力矩; A 为中心线与轨顶平面交点; B 为列车车体所受合力的作用线与两侧轨道轨顶平面的交点; C 为轮轨接触点(倾覆点)。

图 2 车体受力分析图

Fig. 2 Diagram of vehicle body stress analysis

根据文献[4], $F_7 = m_{\text{车}} a$ ($m_{\text{车}}$ 为列车质量; a 为横向向心加速度)。当车速 v 低于 80 km/h 时, $a = 0.00125 v g$, g 为重力加速度;当 v 高于 80 km/h 时, $a = 0.1 g$ 。

在图 2 所示情况下,列车在来流风作用下向右方倾斜,当 B 与 C 重合时,列车到达临界倾覆点,此时有:

$$\begin{cases} F_1 = \frac{l_{AC} - l_{AB}}{2 l_{AC}} (F_2 + F_1) \\ F_2 = \frac{l_{AC} + l_{AB}}{2 l_{AC}} (F_2 + F_1) \end{cases} \quad (2)$$

将式(2)代入式(1)得到:

$$l_{AB} = DL \quad (3)$$

式中:

L ——轮对的两接触斑间距的一半, $L = l_{AC}$ 。

对于车体临近平衡状态,对 B 点取力矩,有:

$$\begin{aligned} M_{F_1} + M_{F_2} + M_{F_3} + M_{F_4} + M_{F_5} + M_{F_6} + \\ M_{F_7} + M_{F_8} + M_{F_9} + M = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

式中:

M ——风引起的气动倾覆力矩;

M_{F_1} 、 M_{F_2} 、 M_{F_3} 、 M_{F_4} 、 M_{F_5} 、 M_{F_6} 、 M_{F_7} 、 M_{F_8} 、

M_{F_9} ——由 F_1 、 F_2 、 F_3 、 F_4 、 F_5 、 F_6 、 F_7 、 F_8 、 F_9 引起的力矩。

通过三分力系数求得：

$$\begin{cases} M_{F_8} = F_8 h \\ M_{F_9} = F_9 (DL - y) \end{cases} \quad (5)$$

式中：

y ——车体横向位移， $y = y_1 + y_2$ ；

y_1 —— F_7 使车体产生的横向位移， $y_1 = F_7/2K_y$ ，

K_y 为车体一侧转向架的横向刚度；

y_2 —— F_8 使车体产生的横向偏移， $y_2 = F_8/2K_y$ ；

h ——轨面到车体重心的高度。

对于由风引起的气动力，其系数除与风速有关外，还与风向角和列车行驶速度有关。当风向角为 90° ，即侧风垂直吹向列车时，各风荷载的计算式为：

$$F_8 = 0.5\rho HC_0 U_w^2 C_y(\beta) \quad (6)$$

$$F_9 = 0.5\rho B_0 C_0 U_w^2 C_z(\beta) \quad (7)$$

$$M_x = 0.5\rho B_0^2 C_0 U_w^2 C_{mx}(\beta) \quad (8)$$

$$\beta = \arctan\left(\frac{U_w \sin \beta}{V + U_w \cos \beta}\right) = \arctan\left(\frac{U_w}{V}\right) \quad (9)$$

式中：

ρ ——空气密度；

U_w ——水平风速；

β ——合成风速侧偏角；

C_0 、 H 、 B_0 ——分别为单节车辆的长度、高度和宽度；

C_y 、 C_z 、 C_{mx} ——分别为侧向力系数、升力系数、倾覆力矩系数。

将式(6)一式(9)代入式(4)，即可得到地铁列车在直线上临界倾覆平衡时的表达式：

$$\begin{aligned} & -m_{\text{车}} g \{ DL - [m_{\text{车}} a/2K_y + 0.5\rho U^2 C_y H \cdot \\ & C/2K_y] \} - m_{\text{架}} gDL + m_{\text{车}} ah + 0.5\rho HC \cdot \\ & U^2 C_y(\beta) h + 0.5\rho BCU^2 C_z(\beta) DL + 0.5\rho U^2 C_{mx} \cdot \\ & H^2 C = 0 \end{aligned} \quad (10)$$

地铁列车为 A 型车，单节车辆尺寸为 22.8 m (长) × 3.0 m (宽) × 3.8 m (高)， L 取 0.7 m，两侧枕簧中心距的一半 b 为 0.7 m， $m_{\text{车}}$ 为 36.0 t；转向架中心距为 15.7 m，转向架的质量 $m_{\text{架}}$ 为 6.5 t，转向架垂向刚度 K_z 为 1 220 kN/m，横向刚度 K_y 为 3 884 kN/m；车轮直径为 0.84 m， h 为 2.74 m。

1.4 不同工况下列车安全性评估

1.4.1 计算方法

本研究仅针对地铁列车的中间车辆，根据风洞

试验，模拟测得列车静止时风向角为 90° 的气动力系数。风假定从左向右吹，定义位于迎风侧的地铁列车为 1 号线列车，位于背风侧车的地铁列车为 2 号线列车，如图 3—图 4 所示。

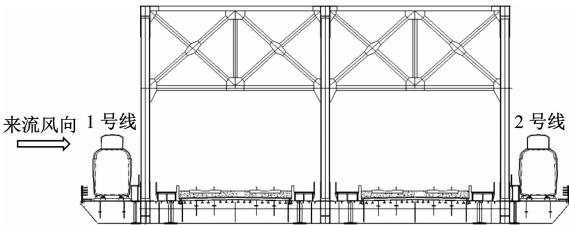


图3 桥梁边跨列车布置示意图

Fig.3 Diagram of bridge side-span train arrangement

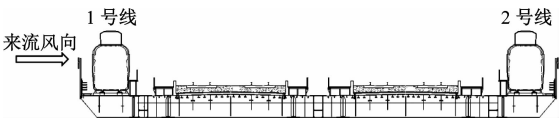


图4 桥梁中跨列车布置示意图

Fig.4 Diagram of bridge mid-span train arrangement

对于列车在不同运行速度下的三分力系数，本文参考兰新线中的研究成果。当 U_w 为 40 m/s，采用桥梁无挡风屏时，其气动力系数如表 1 所示。

表1 兰新线报告中不同车速下的气动力系数

Tab.1 Aerodynamic coefficients of Lanxin Line at different train speeds in the report

车速/(km/h)	C_y	C_z	C_{mx}
0	1.336	0.062	1.005
100	1.406	0.066	1.062
150	1.432	0.073	1.102
200	1.512	0.078	1.164
250	1.597	0.081	1.223

为了得到任意车速下的气动力系数，采取 Origin 中的曲线拟合功能进行拟合，发现 3 次多项式已经可以较好地满足拟合的效果。采用 3 次多项式对气动力系数拟合时，各关系如式(11)所示：

$$\begin{cases} C_y = A_3 v^3 + A_2 v^2 + A_1 v + A_0 \\ C_z = B_3 v^3 + B_2 v^2 + B_1 v + B_0 \\ C_{mx} = C_3 v^3 + C_2 v^2 + C_1 v + C_0 \end{cases} \quad (11)$$

式中：

A_0 、 A_1 、 A_2 、 A_3 ——侧向力系数的多项式系数；

B_0 、 B_1 、 B_2 、 B_3 ——升力系数的多项式系数；

C_0 、 C_1 、 C_2 、 C_3 ——侧向倾覆力系数的多项式系数。

对表 1 中的气动力系数进行拟合后,得到的拟合图形见图 5—图 7。多项式系数拟合值如表 2。

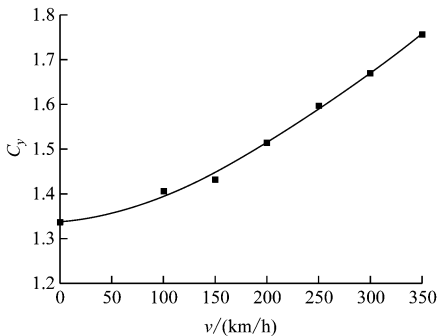


图 5 C_y 与 v 关系拟合图

Fig. 5 Fitting diagram of the relationship between lateral force coefficient and vehicle speed

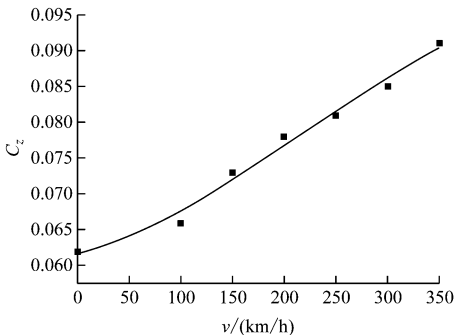


图 6 C_z 与 v 关系拟合图

Fig. 6 Fitting diagram of the relationship between lift force coefficient and vehicle speed

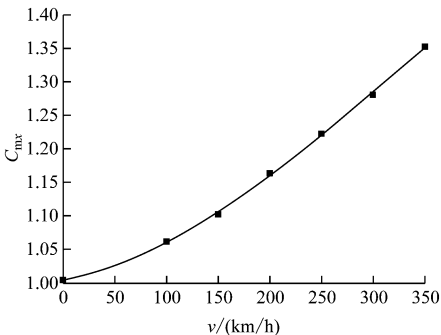


图 7 C_{mx} 与 v 关系拟合图

Fig. 7 Fitting diagram of the relationship between overturning moment coefficient and vehicle speed

在 U_w 为 40 m/s 的情况下,将 $\tan \beta = 40/v$ 代入式(11)中,得到气动力系数与 β 的关系;将其代入式(10)中,得到 D 与 v 、 U_w 之间的关系。

1.4.2 列车临界倾覆风速

根据风洞试验中得到的列车静止情况下的三分力数据,对表 2 中的常数项进行替代,即可得到本

表 2 多项式系数拟合值

Tab. 2 Fitting values of polynomial coefficients

多项式系数	取值	多项式系数	取值
A_0	1.34	B_2	2.85×10^{-7}
A_1	1.73×10^{-4}	B_3	-4.33×10^{-10}
A_2	4.29×10^{-6}	C_0	1.00
A_3	-3.88×10^{-9}	C_1	2.80×10^{-4}
B_0	0.06	C_2	3.09×10^{-6}
B_1	3.52×10^{-5}	C_3	-3.04×10^{-9}

文中车速、风速与列车三分力系数的关系曲线,代入式(10)中即可得到临界风速。由于地铁车速一般不超过 100 km/h,故本文给出了车速 100 km/h 情况下,对应风攻角为 0° 时不同工况下列车的临界倾覆风速,如表 3 所示。

表 3 车速 100 km/h 下的临界倾覆风速

Tab. 3 Critical overturning wind speed of a train running at 100 km/h

桥梁状态	临界倾覆风速/(m/s)			
	双线有车		单线有车	
	1 号线列车	2 号线列车	1 号线列车	2 号线列车
中跨无附属设施	26.1	59.8	25.6	42.2
中跨有附属设施	26.0	47.6	27.0	44.2
边跨无附属设施	30.5	59.8	29.9	45.8
边跨有附属设施	30.3	48.0	29.8	47.5

由表 3 可得:

1) 列车在 2 号线(即背风侧)运行时,其临界倾覆风速值要大于列车在 1 号线(即迎风侧)运行时,最大可达 2.3 倍。

2) 桥梁上附属设施的增加使双车在线时 2 号线列车的临界倾覆风速有所降低,对于其他几种工况影响较小。

3) 列车在桥梁边跨运行时,由于边跨桁架的存在,使列车倾覆的临界风速有所提升,但增值较小。

4) 为保证地铁列车安全运行,在风速大于表 3 中列车在 1 号线(迎风侧)运行的临界倾覆风速时,列车停运。

2 风雨联合作用下列车倾覆风速研究

2.1 降雨的特性

2.1.1 雨滴终点速度

研究表明,雨滴终点速度,除了与雨滴直径和降落高度有关外,还与风速有着密切的关系。

文献[5]提出了静止空气中雨滴下落的终点速度与雨滴直径的计算关系:

$$V_{R0} = 9.5 \left\{ 1 - \exp \left[- \left(\frac{10^3 D_r}{1.77} \right)^{1.147} \right] \right\} \quad (12)$$

式中:

V_{R0} ——雨滴下落的终点速度,单位 m/s;
 D_r ——雨滴直径,单位 m。

2.1.2 雨滴谱

本文使用文献[6]中的雨滴谱进行描述,计算分析如下:

$$\begin{cases} F_0(D_r) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{D_r}{eI^p} \right)^n \right] \\ W = cI^\gamma \end{cases} \quad (13)$$

式中:

$F_0(D_r)$ ——雨滴总体积中直径小于或等于 D_r 的雨滴所占的百分比;
 I ——雨强;
 W ——在单位体积空气中雨滴的总体积;
 n ——雨型常数,取 2.25;
 $e、c、\gamma、p$ ——常数。

式(13)中, e 取 1.30, c 取 67, p 取 0.232, γ 取 0.846。当 I 分别为 1 mm/h、10 mm/h、100 mm/h 时的雨滴粒径分布曲线如图 8 所示。

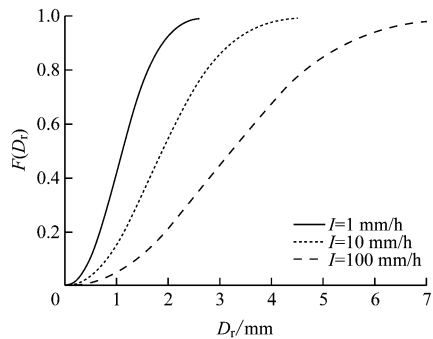


图 8 不同 I 下的雨滴粒径分布曲线

Fig.8 Curve of raindrop particle diameter distribution under different rainfall intensities I

2.1.3 降雨量和雨强

表 4 给出了我国气象部门通常使用的雨强标准。表 5 为 1975—1984 年全国发生的最大 1 min 雨强记录。

由表 4—表 5 可见:按照 24 h 降雨量划分的降雨等级,并不能完全反映出降雨量的强度大小,对于工程实际而言,最大雨强的重要性不应该被忽略。本文中,考虑雨强可能达到的极值,使用每小时的降雨量作为计算分析的标准。

表 4 雨强标准

Tab.4 Standard of rainfall intensity			
项目	24 h 降雨量/ mm	24 h 等效降雨量/ (mm/h)	I / (mm/h)
小雨	0.1 ~ 10	0.004 2 ~ 0.420 0	≤ 2.5
中雨	10 ~ 25	0.420 0 ~ 1.040 0	$> 2.5 \sim 8.0$
大雨	25 ~ 50	1.040 0 ~ 2.080 0	$> 8.0 \sim 16.0$
暴雨	50 ~ 100	2.080 0 ~ 4.170 0	> 16.0
大暴雨	100 ~ 200	4.170 0 ~ 8.330 0	> 16.0

表 5 1975—1984 年全国发生的最大 1 min 雨强记录

Tab.5 Records of maximum 1 min rainfall intensity in China from 1975 to 1984				
城市	1 min 最大雨 强/(mm/min)	对应小时 雨强/(mm/h)	日期	持续时间/ min
广州	9.009	540.54	1984-06-02	1
海口	7.636	458.16	1979-04-08	1
南平	6.946	416.76	1982-06-13	1
阳江	6.714	402.84	1978-05-31	1
汕头	6.700	402.00	1976-06-04	1

2.2 风雨联合作用下的雨强

极端天气下,风雨联合作用更多关注的是风驱雨作用后的风驱雨强。目前,通过雨滴终点速度、风速和垂直雨强来描述风驱雨强的模型。假设垂直雨强为 I_v ,风驱雨强为 I_h ,则:

$$I_{hD_r} = I_v F(D_r) dD_r \frac{U_R(D_r)}{V_R(D_r)} \quad (14)$$

式中:

I_{hD_r} ——雨滴的风驱雨强;
 $F(D_r)$ ——雨滴的概率密度函数;
 $V_R(D_r)$ ——雨滴的垂直速度;
 $U_R(D_r)$ ——雨滴的水平速度。

对式(14)积分可得到风驱雨强 I_h 为:

$$I_h = I_v U_w C_{dD_r} \quad (15)$$

$$C_{dD_r} = \lambda \int \frac{F(D_r)}{V_R(D_r)} dD_r \quad (16)$$

式中:

C_{dD_r} ——风驱雨强系数;
 λ ——不同直径雨滴的水平速度与水平风速的比值, $\lambda = U_R(D_r)/U_w$ 。

根据 JTG/T 3360-01—2018《公路桥梁抗风设计规范》,风速沿竖直高度方向的分布为:

$$V_{Z_2} = \left(\frac{Z_2}{Z_1}\right)^{\alpha} V_{Z_1} \tag{17}$$

式中:

- V_{Z_2} ——地面 Z_2 以上高度处的风速;
- V_{Z_1} ——地面 Z_1 以上高度处的风速;
- α ——地表粗糙度系数,本文取 A 类地表,即 α 为 0.12。

文献[7]通过对暴风雨天气下风速与雨滴速度的实际测量,给出了 2.6 m 高度处不同直径的雨滴终点水平速度与水平风速的比值,见表 6。

表 6 2.6 m 高度处雨滴终点水平速度与水平风速之比

Tab.6 Ratio of raindrop end horizontal velocity to horizontal wind speed at height of 2.6 m

D_r/mm	0.5	1.0	2.0	4.0	10.0
λ	1.0	1.2	1.6	1.7	1.9

文献[7]取最不利情况,即 $\lambda = 1.9$ 。将式(12)和式(13)代入式(15)中,即可得到风驱雨强的表达式:

$$I_{\text{h}D_r} = 1.9 I_v U_w \int \frac{1 - \exp\left[-\left(\frac{D_r}{1.3 I_v^{0.232}}\right)^{2.25}\right]}{9.5 \left\{1 - \exp\left[-\left(\frac{10^3 D_r}{1.77}\right)^{1.147}\right]\right\}} dD_r \tag{18}$$

将式(18)代入式(16)得到 $C_{\text{a}D_r}$ 为:

$$C_{\text{a}D_r} = \int \frac{1 - \exp\left[-\left(\frac{D_r}{1.3 I_v^{0.232}}\right)^{2.25}\right]}{9.5 \left\{1 - \exp\left[-\left(\frac{10^3 D_r}{1.77}\right)^{1.147}\right]\right\}} dD_r \tag{19}$$

利用 Matlab 软件对式(19)进行积分,得到不同垂直雨强下的风驱雨强系数。几种特殊的风驱雨强系数见表 7。

表 7 风驱雨强系数表

Tab.7 Coefficient of wind-driven rainfall intensity

$I/(\text{mm/h})$	10	50	100	200	500	1 000
风驱雨强系数	0.424 8	0.332 3	0.283 9	0.233 8	0.172 1	0.130 6

在 U_w 为 10 m/s 情况下,将表 7 中的风驱雨强系数代入式(18)中,即可得到对应 10 m/s 风速时,不同垂直雨强下的风驱雨强,见表 8。

由表 8 可以看出,风雨联合作用下,在结构表面的风驱雨强要远大于雨的垂直雨强。

表 8 风速为 10 m/s 下的风驱雨强

Tab.8 Wind-driven rainfall intensity at 10 m/s wind speed

$I/(\text{mm/h})$	10	50	100	200	500	1 000
风驱雨强	80.7	315.7	539.4	888.4	1 635.0	2 481.4

2.3 雨滴冲击作用模型

本文将风和雨的作用分开进行考虑,在考虑风作用的基础上,将雨的作用力进行叠加。本文做出以下基本假定:

- 1) 雨滴的存在不改变结构的风场。
- 2) 雨滴在下落时不发生蒸发,将不同直径雨滴的形状均假设为球形,雨滴的密度等物理参数在冲击过程中维持不变。
- 3) 不考虑雨滴冲击结构表面后发生的弹跳和飞溅等现象。
- 4) 雨滴连续冲击结构表面。
- 5) 不考虑结构表面因雨水附着而产生的气动性能变化。

6) 假定雨滴的速度为匀速,同时在竖直方向上雨速取雨滴的自由下落速度;在横风方向上,雨速取 1.9 倍的平均风速。

7) 不考虑结构表面产生的水膜作用。

2.3.1 单个雨滴作用力

假设单个雨滴在撞击结束后速度变为 0,雨滴质量为 m ,雨滴初始速度为 V_0 。根据动量定理可求得直径为 D_r 的雨滴对结构表面的冲击力 f 为:

$$f = 2m\lambda^2 V_0 / \pi D_r \tag{20}$$

2.3.2 雨对单位面积结构表面的作用力

假设所有撞击到列车表面的雨滴均达到了最大冲击力, C 取 67, γ 取 0.846,则其结构表面单位 m^3 内受到的雨滴冲击作用力 F 为:

$$F = nf = \frac{\pi DM}{2m} \frac{2m\lambda^2 V_0^2}{\pi D_r} = m_{\text{wr}} \lambda^2 V_0^2 \tag{21}$$

式中:

m_{wr} ——风雨联合作用下,单位 m^3 内的雨滴质量。

2.4 降雨引起的空气密度变化

考虑最极端情况,假设降雨时全部的雨滴都将其质量转化到空气的质量中,则增大了空气的密度。假设降雨对原有风速造成改变,定义空气密度的变化率为 η ,则:

$$\eta = \frac{m_2 - m_1}{m_1} = \frac{\Delta m}{m_1} = \frac{W\rho_{\text{水}}}{m_1} = \frac{67(1.9I_{\text{v}}UC_{\text{d}D_{\text{r}}})^{0.846}}{m_1}$$

(22)

式中：

- $\rho_{\text{水}}$ ——雨水的密度,取 1 000 kg/m³;
- m_1 、 m_2 ——单位 m³ 内无雨时和降雨时的空气质量;
- Δm ——降雨后单位 m³ 内空气质量的变化量,即为相应空气中雨的质量。
- 变化后的空气密度为:

$$\rho_{\text{a}} = \rho(1 + \eta)$$

(23)

式中：

- ρ_{a} ——降雨时的空气密度;
- ρ ——空气密度,取 1.25 kg/m³。

2.5 列车在风雨联合作用下的行车安全分析

对风雨联合作用下列车的临界倾覆风速进行研究。由于大风和强降雨同时出现的几率较小,本文考虑的雨强为 100 mm/h 和 200 mm/h。

雨滴作用力的考虑方式和风作用力相同,将本文第 1 节中计算得到的列车临界倾覆风速代入式(21),可求得列车受到的雨滴侧向作用力。将雨滴对列车造成的侧向冲击力和空气密度的变化量代入式(10)中,即可得到新的列车倾覆表达式(24)：

$$-m_{\text{车}}g\{DL - [m_{\text{车}}a/2K_y + 0.5\rho_{\text{a}}U^2C_yHC/2K_y]\} - m_{\text{架}}gDL + m_{\text{车}}ah + 0.5\rho_{\text{a}}HCU^2C_y(\beta)h + 0.5\rho_{\text{a}}BCU^2C_z(\beta)DL + 0.5\rho_{\text{a}}U^2C_{\text{mx}}H^2C + Fh = 0$$

(24)

将式(23)、式(21)代入式(19)中,即可得到在强降雨雨强 100 mm/h、车速 100 km/h 情况下的临界倾覆风速,见表 9。

表 9 雨强 100 mm/h 下列车的临界倾覆风速

Tab.9 Critical overturning wind speed of train under rain intensity of 100 mm/h

桥梁状态	临界倾覆风速/(m/s)			
	双线有车		单线有车	
	1 号线列车	2 号线列车	1 号线列车	2 号线列车
中跨无附属设施	24.4	45.3	24.1	36.4
中跨有附属设施	24.4	41.2	25.2	37.6
边跨无附属设施	28.0	39.6	27.6	38.6
边跨有附属设施	27.9	39.8	27.4	39.5

在强降雨雨强 200 mm/h、车速 100 km/h 情况下的临界倾覆风速,见表 10。

表 10 雨强 200 mm/h 下列车的临界倾覆风速

Tab.10 Critical overturning wind speed of train under 200 mm/h rain intensity

桥梁状态	临界倾覆风速/(m/s)			
	双线有车		单线有车	
	1 号线列车	2 号线列车	1 号线列车	2 号线列车
中跨无附属设施	24.0	42.1	23.7	34.8
中跨有附属设施	24.0	38.8	24.7	35.9
边跨无附属设施	27.4	37.5	27.0	36.7
边跨有附属设施	27.3	37.6	26.9	37.4

由表 9 和表 10 可见：

- 1) 列车在 2 号线(即背风侧)运行时,其风雨临界倾覆风速大于列车在 1 号线(即迎风侧)运行时。
- 2) 桥梁上附属设施的增加对风雨联合作用下列车的临界倾覆风速的影响较小。
- 3) 对于风雨联合作用下列车临界倾覆风速,列车在桥梁边跨时与在中跨运行时的变化不大。
- 4) 风雨联合作用下,列车的临界倾覆风速均有所降低,且对于 2 号线(背风侧)列车较为明显。
- 5) 雨强为 200 mm/h 较之于 100 mm/h 的临界倾覆风速有所降低,但降低不大,由此可见风雨联合作用下对行车安全影响的主要因素是风速。

2.6 地铁列车运营实际情况

本文依托的南京地铁 S3 号线已于 2017 年 12 月 6 日正式通车。其相关研究成果如下:当桥面风速不大于 25 m/s 时,地铁列车在运行速度不大于 100 km/h 的工况下,桥梁的动力性能满足要求,列车的运行安全性有保证;但当桥面风速达 30 m/s 时,应禁止列车运行。该成果已提供给该条线路运营单位作为运营依据。

3 结论

- 1) 仅有横风作用下,列车在背风侧运行时,其临界倾覆风速值要大于列车在迎风侧运行时,最大可达 2.3 倍;桥梁附属设施的增加使双车在线时背风侧列车的临界倾覆风速有所降低,但对于其他工况影响较小;列车在桥梁边跨运行时,由于边跨桁架的存在,使列车倾覆临界风速有所提升,但增加值较小。

(下转第 124 页)

作业,对运输安全、车站作业等会造成部分影响;此外,全线不同区段高峰与非高峰时段的边界较难清晰界定,制定更为精细合理的行车组织方案至关重要。灵活编组模式作为城市轨道交通运营组织新的技术手段,值得作更深层次的探讨。

参考文献

- [1] 毛保华,张政,陈志杰,等.城市轨道交通网络化运营组织技术研究评述[J].交通运输系统工程与信息,2017,17(6):155.
MAO Baohua, ZHANG Zheng, CHEN Zhijie, et al. A review on operational technologies of urban rail transit networks[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2017, 17(6):155.
- [2] 唐玉川,马保仁.城市轨道交通灵活编组运营组织研究[J].铁道工程学报,2014,31(8):96.
TANG Yuchuan, MA Baoren. Research on the flexible car-set operation organization of urban rail transit[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2014, 31(8):96.
- [3] 张清华,韩坤,杨鹏,等.轨道交通灵活编组运营模式能耗仿真方法研究[J].应用科技,2022,49(3):89.
ZHANG Qinghua, HAN Kun, YANG Peng, et al. Research on energy consumption simulation methods of rail transit at flexible marshalling operating mode[J]. Applied Science and Technology, 2022, 49(3):89.
- [4] 范海宁,何勇浩.城市轨道交通列车灵活编组方案及功能实现[J].城市轨道交通研究,2021,24(9):200.
FAN Haining, HE Yonghao. Flexible marshalling scheme and

function realization of urban rail transit train[J]. Urban Mass Transit, 2021, 24(9):200.

- [5] 李兆龄,严业智.城市轨道交通信号系统灵活编组关键技术研究[J].铁路通信信号工程技术,2021,18(12):72.
LI Zhaoling, YAN Yezhi. Key technologies of flexible marshalling in signaling system for urban rail transit[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2021, 18(12):72.
- [6] 中华人民共和国建设部,中华人民共和国国家发展和改革委员会.城市轨道交通工程项目建设标准:建标 104—2008[S].北京:中国计划出版社,2008.
Ministry of Construction of the People's Republic of China, National Development and Reform Commission of the People's Republic of China. Urban rail transit project construction standards: JB 104—2008[S]. Beijing: China Planning Press, 2008.
- [7] 国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.地铁安全疏散规范:GB/T 33668—2017[S].北京:中国标准出版社,2017.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Code for safety evacuation of metro: GB/T 33668—2017[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.
- [8] 中华人民共和国住房和城乡建设部,国家市场监督管理总局.地铁设计防火标准:GB 51298—2018[S].北京:中国计划出版社,2018.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, State Administration of Market Regulation. Standard for fire protection design of metro: GB 51298—2018[S]. Beijing: China Planning Press, 2018.

(收稿日期:2022-08-17)

(上接第 117 页)

2) 风雨联合作用下,风驱雨强相对于垂直雨强明显增大。当风速、雨强均较大时,应考虑降雨引起的空气密度变化。

3) 由于雨的冲击力作用,风雨联合作用较之于仅有横风作用的情况,列车的临界倾覆风速有所降低,且对于背风侧的列车降低较为明显。雨强增大,临界倾覆风速有所降低,但是降低不大。风雨联合作用下对行车安全影响的主要因素是风速。

参考文献

- [1] 辛大波,王亮,段忠东,等.风雨联合作用下的桥梁主梁静力特性[J].吉林大学学报(工学版),2011,41(增刊2):174.
XIN Dabo, WANG Liang, DUAN Zhongdong, et al. Static characteristics of bridge deck sections of long-span bridges under simultaneous actions of wind and rain[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2011, 41(S2):174.
- [2] 陶仕博,辛大波,欧进萍.桥梁主梁风雨致静力试验研究[J].钢结构,2011,26(5):23.
TAO Shibo, XIN Dabo, OU Jinping. Research on the wind-rain

induced static force on a bridge deck[J]. Steel Construction, 2011, 26(5):23.

- [3] 敬俊娥,高广军.风雨联合作用下高速列车受力数值模拟[J].铁道科学与工程学报,2013,10(3):99.
JING Jun'e, GAO Guangjun. Simulation of the action effect of wind-driven rain on high-speed train[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2013, 10(3):99.
- [4] 小野纯朗.提高列车速度的理论和实践[M].徐涌,译.北京:中国铁道出版社,1992:47-68.
ONO Junro. Theory and practice of improving train speed[M]. Y. XU, Trans. Beijing: China Railway Publishing House, 1992: 47-68.
- [5] MUALEM Y, ASSOULINE S. Mathematical model for rain drop distribution and rainfall kinetic energy[J]. Transactions of the ASAE (American Society of Agricultural Engineers), 1986, 29(2):494.
- [6] BEST A. The size distribution of raindrops[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1950, 76(327):16.
- [7] CHOI E C. Wind-driven rain and driving rain coefficient during thunderstorms and non-thunderstorms[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2001, 89(3):293.

(收稿日期:2022-11-03)