



研析轨道交通站台门防踏空胶条安装安全间隙的计算方法

桂思平 许永欣

沈阳地铁集团有限公司运营分公司，辽宁沈阳 110000

[摘要] 以某城市地铁为实例，简要介绍车辆列车动态通过曲线站台站台门加装防踏空胶条处，所需最小安全间隙的计算方法。结合实际数据，总结计算公式，并得出有价值的结论。

[关键词] 城市轨道交通；站台门系统；防踏空胶条；车辆动态安全限界。

随着城市轨道交通的高速发展，站台门设备已成为新建城市轨道交通线路不可缺少安全防护设备。在使用过程中，站台门设备系统也暴露出一些不可避免的安全隐患。其中，受土建建设误差或曲线站台影响，站台门门槛与列车车门门槛之间间隙过大，因乘客在乘降过程中无意脚踏空而造成的客伤、投诉事件日益增多。为应对此安全隐患，国内城市轨道交通运营单位普遍选择在站台门轨道侧门槛加装防踏空胶条的措施来应对。

防踏空胶条向轨道侧延伸深度应满足小于列车动态横移最大位置时与站台门门槛的相距距离。而列车动态横移量的计算，成为了新的难题。现以 S 市地铁 T 号线 G 站为实例，简要介绍车辆动态横移量的计算方式。

S 市的 T 号线 G 站为曲线车站在对站台门整体家装防踏空胶条后，S 市地铁要求相关技术专家确定上行 1 号、下行 24 号站台门所安装的防踏空胶条是否侵入安全限界，对列车通行有无影响。相关的判断具体步骤如下：

一、实地测量结果

针对此事宜，相关技术人员赴 G 站实地测量，具体测量详见下图 1、图 2，其中 G 站上行 1 号站台门位置站台边缘与列车间隙最大值为 168mm，下行 24 号站台门位置站台边缘与列车间隙最大值为 143mm。



图 1 上行 1 号站台门位置间隙

图 2 下行 24 号站台门位置间隙

二、实地测量结果符合标准

根据实际测量结果，G 站上行 1 号站台门位置站台边缘与列车间隙最大值 168mm，下行 24 号站台门位置站台边缘与列车间隙最大值 143mm 均符合《地铁设计规范 GB 50157-2013》中“4.3.11 条款中曲线站台边缘至车辆轮廓线之间的间隙不得大于 180mm”的要求。

三、车辆动态通过所需最小安全间隙理论计算

根据《地铁限界标准 CJJ 96-2003》和《地铁设计规范 GB 50157-2013》要求，并结合 S 市地铁 T 号线实际线路条件及车辆参数，对车辆动态通过 G 站上行 1 号站台门、下行 24 号站台门位置车辆曲线限界及所需最小安全间隙进行理论计算，即：该位置车辆曲线限界 = 隧道内直线段车辆限界 + 安全留量 + 曲线站台曲线横向偏移量；该位置所需最小安全间隙 = 隧道内直线段车辆限界 + 安全留量 + 曲线站台曲线横向偏移量 - 车辆轮廓线距轨道中心线距离，具体各部分计算如下：

（一）上行 1 号站台门位置车辆曲线限界及所需最小安全间隙理论计算

1. 隧道内直线段车辆限界

根据《地铁设计规范 GB 50157-2013》附录 D-B2 型车限界图章节中表 D.1-2 车辆限界坐标值（隧道内直线段）对照表获得，S 地铁 T 号线 B2 型地铁车辆的车厢地板面距轨面的高度为 980mm 时，车辆横向限界距轨道中心线的距离为

1480mm。

2. 安全留量

根据《地铁限界标准 CJJ 96—2003》中“3.3.10 直线地段车站有效站台范围内，站台边缘与车厢地板面高度处的车辆限界之间的水平间隙不宜小于 10mm。”规定可知，曲线站台的安全留量应不小于该标准，在本报告中该部分按照 10mm 进行计算。

3. 曲线站台曲线横向偏移量

根据《地铁限界标准 CJJ 96—2003》中“3.3.11 曲线站台应按直线站台车辆限界加曲线偏移量（公式 3.2.3-16、3.2.3-17）确定，曲线站台边缘至车辆轮廓线之间的间隙不得大于 180mm”。具体计算方法如下（注：下文中公式编号均引用于该标准）：

3.1 标准推荐计算方法

G 站上行站台位于轨道曲线的外侧，两端站台侧司机室车头位置应为车辆横向限界最大值，因此可按照公式 3.2.3-16 进行计算。

$$\Delta X_a = T_a + \Delta X_{Qa} + \Delta X_{ca} \quad (3.2.3-16)$$

式中 ΔX_a 为曲线外侧车体横向偏移量。

(1) T_a 为曲线几何偏移引起的车体横向偏移量，计算公式为：

$$T_a = [4n(n+a) - p^2]/8R \quad (3.2.3-1)$$

(2) ΔX_{Qa} 为欠超高引起的车体横向偏移量，计算公式为：

$$\Delta X_{Qa} = \frac{h_{dc}}{1500} m_B g C'_h (1+S) \quad (3.2.3-8)$$

$$h_{dc} = a_q \frac{1500}{g} \quad (3.2.3-9)$$

$$a_q = \frac{(v/3.6)^2}{R} - g \frac{h_{ac}}{1500}$$

$$C'_h = (Y - h_{cp}) \cdot \frac{h_{sc} - h_{cp}}{h_{\phi p}} + (Y - h_{cs}) \cdot \frac{h_{sc} - h_{cs}}{h_{\phi s}} \quad (3.1.3-2)$$

$$S = m_B g \left(\frac{h_{sc} - h_{cp}}{k_{\phi p}} + \frac{h_{sc} - h_{cs}}{k_{\phi s}} \right) \quad (3.1.3-3)$$

$$k_{\phi p} = 0.5 n_p c_p b_p^2 \quad (3.1.3-4)$$

$$k_{\phi s} = 0.5 n_s c_s b_s^2 + 2k_{\phi n} \quad (3.1.3-5)$$

(3) ΔX_{ca} 为曲线轨道参数及车辆参数变化引起的车体及转向架横向曲线外侧偏移量，计算公式为：

$$\Delta X_{ca} = \Delta S_a + \Delta_{de} + \Delta_w + \Delta_q \quad (3.2.3-12)$$

3.2 计算所需各参数

表 1 各参数表示内容及具体数值

符号	表示内容	具体数值	数据来源
ΔX_a	曲线外侧车体横向偏移量 (mm)	计算	[1]
T_a	曲线几何偏移引起的车体横向偏移量 (mm)	计算	[1]
n	车体计算断面至相邻中心销距离 (mm)	3600	[3]
a	车辆定距 (mm)	12600	[3]
p	转向架固定轴距 (mm)	2200	[3]
R	S 地铁 T 号线 G 站轨道曲线半径 (m)	350	[5]
ΔX_{Qa}	欠超高引起的车体横向偏移量 (mm)	计算	[1]
h_{dc}	欠超高值 (mm)	计算	[1]
m_B	含载客车体重量 (AW3) (kg)	48700	[3]
g	重力加速度 (m/s^2)	9.81	
S	重力倾角附加系数	计算	[1]
a_q	未平横离心加速度 (m/s^2)	计算	[1]
v	车辆运行速度 (km/h)	45	
h_{ac}	轨道超高值 (mm)	120	[5]
Y	S 地铁 T 号线 B2 型地铁车厢地板面距轨面的高度 (mm)	980	[1]
h_{cp}	转向架一系弹簧上支撑面距轨面高度 (mm)	420	[3]
h_{sc}	车体重心距轨面高度 (mm)	1500	[4]
h_{cs}	转向架二系弹簧上支撑面距轨面高度 (mm)	860	[3]
$k_{\phi p}$	整车一系弹簧侧滚刚度 ($N \cdot mm/rad$)	计算	[1]
$k_{\phi s}$	整车二系弹簧侧滚刚度 ($N \cdot mm/rad$)	计算	[1]
n_p	车辆一侧一系弹簧并列数	4	[3]
c_p	每一轴箱一系弹簧垂向刚度值 (N/mm)	700	[3]
b_p	转向架一系弹簧横向间距 (mm)	1930	[3]
n_s	车辆一侧二系弹簧并列数	2	[3]
c_s	转向架一侧二系弹簧垂向刚度值 (N/mm)	1000	[4]

b_s	转向架二系弹簧横向间距 (mm)	1850	[3]
$k_{\phi n}$	抗侧滚扭杆的抗侧滚刚度 (每根) (N·mm/rad) (无)	0	[3]
ΔX_{ca}	曲线轨道参数及车辆参数变化引起的车体及转向架横向曲线外侧偏移量 (mm)	计算	[1]
ΔS_a	曲线轨距加宽外轨分量及外轨磨耗量 (mm) (无轨距加宽)	0	[5]
Δd_e	钢轨横向弹性变形直线与曲线差值 (mm) (忽略不计)	0	[5]
Δw	车辆二系弹簧横向位移在曲线及直线上差值 (mm) (忽略不计)	0	[4]
Δq	车辆一系弹簧横向位移在曲线及直线上差值 (mm) (忽略不计)	0	[4]

3.3 具体计算

将表 1 中的各参数数值带入上述公式中, 可得到相应结果如下:

(1) T_a 曲线几何偏移引起的车体横向偏移量:

$$T_a = [4n(n+a) - p^2]/8R$$

$$= [4 \cdot 3600(3600+12600) - 2200^2]/8 \cdot 350000 = 81.59\text{mm}$$

(2) ΔX_{Qa} 欠超高引起的车体横向偏移量:

$$\Delta X_{Qa} = \frac{h_{dc}}{1500} m_B g C'_h (1+S)$$

$$= \frac{68.14}{1500} \cdot 48700 \cdot 9.81 \cdot 0.000138(1+0.188) = 3.57\text{mm}$$

(3) ΔX_{ca} 曲线轨道参数及车辆参数变化引起的车体及转向架横向曲线外侧偏移量:

$$\Delta X_{ca} = \Delta S_a + \Delta d_e + \Delta w + \Delta q = 0$$

总的曲线外侧车体横向偏移量:

$$\Delta X_a = T_a + \Delta X_{Qa} + \Delta X_{ca} = 81.59 + 3.57 + 0 = 85.16\text{mm}$$

4. 车辆轮廓线距轨道中心线距离

根据《地铁设计规范 GB 50157-2013》附录 D-B2 型车限界图章节中表 D.1-1 车辆轮廓线坐标值 (隧道内直线段) 对照表获得, S 地铁 T 号线 B2 型地铁车辆距轨面的高度为 1100mm 时, 车辆横向轮廓线距轨道中心线的距离为 1400mm。

5. 车辆动态通过上行 1 号站台门位置曲线限界

该值 = 隧道内直线段车辆限界 + 曲线站台曲线横向偏移量 = 1480 + 85.16 = 1565.16mm。

6. 车辆动态通过上行 1 号站台门位置所需最小安全间隙

该值 = 隧道内直线段车辆限界 + 安全留量 + 曲线站台曲线横向偏移量 - 车辆轮廓线距轨道中心线距离 = 1480 + 10 + 85.16 - 1400 = 175.16mm。

(二) 下行 24 号站台门位置车辆曲线限界及所需最小安全间隙理论计算

1. 隧道内直线段车辆限界

根据《地铁设计规范 GB 50157-2013》附录 D-B2 型车限界图章节中表 D.1-2 车辆限界坐标值 (隧道内直线段) 对照表获得, S 地铁 T 号线 B2 型地铁车辆的车厢地板面距轨面的高度为 980mm 时, 车辆横向限界距轨道中心线的距离为 1480mm。

2. 安全留量

根据《地铁限界标准 CJJ 96-2003》中“3.3.10 直线地段车站有效站台范围内, 站台边缘与车厢地板面高度处的车辆限界之间的水平间隙不宜小于 10mm。”规定可知, 曲线站台的安全留量应不小于该标准, 在本报告中该部分按照 10mm 进行计算。

3. 曲线站台曲线横向偏移量

3.1 标准推荐计算方法

G 站下行站台位于轨道曲线的内侧, 列车站台侧两车连挂位置应为车辆横向限界最大值, 因此可按照公式 3.2.3-17 进行计算。

$$\Delta X_i = T_i + \Delta X_{Qi} + \Delta X_{ci} \quad (3.2.3-17)$$

式中 ΔX_i 为曲线内侧车体横向偏移量。

(1) T_i 为曲线几何偏移引起的车体横向偏移量, 计算公式为:

$$T_i = [4n(a-n) + p^2]/8R \quad (3.2.3-2)$$

(2) ΔX_{Qi} 为超高引起的车体横向偏移量, 计算公式为:

$$\Delta X_{Qi} = \frac{h_{sc}}{1500} m_B g C'_h (1+S) \quad (3.2.3-7)$$

$$C'_h = (Y - h_{cp}) \cdot \frac{h_{sc} - h_{cp}}{h_{\phi p}} + (Y - h_{cs}) \cdot \frac{h_{sc} - h_{cs}}{h_{\phi s}} \quad (3.1.3-2)$$

$$S = m_B g \left(\frac{h_{sc} - h_{cp}}{k_{\phi p}} + \frac{h_{sc} - h_{cs}}{k_{\phi s}} \right) \quad (3.1.3-3)$$

$$k_{\phi p} = 0.5n_p c_p b_p^2 \quad (3.1.3-4)$$

$$k_{\phi_s} = 0.5n_s c_s b_s^2 + 2k_{\phi_n} \quad (3.1.3-5)$$

(3) ΔX_{ci} 为曲线轨道参数及车辆参数变化引起的车体及转向架横向曲线内侧偏移量，计算公式为：

$$\Delta X_{ci} = \Delta S_i + \Delta d_e + \Delta w + \Delta q \quad (3.2.3-14)$$

3.2 计算所需各参数

表2 各参数表示内容及具体数值

符号	表示内容	具体数值	数据来源
ΔX_i	曲线内侧车体横向偏移量 (mm)	计算	[1]
T_i	曲线几何偏移引起的车体横向偏移量 (mm)	计算	[1]
n	车体计算断面至相邻中心销距离 (mm)	6300	[3]
a	车辆定距 (mm)	12600	[3]
p	转向架固定轴距 (mm)	2200	[3]
R	S地铁T号线G站轨道曲线半径 (m)	350	[5]
ΔX_{Qi}	超高引起的车体横向偏移量 (mm)	计算	[1]
m_b	含载客车体重量 (AW3) (kg)	48700	[3]
g	重力加速度 (m/s^2)	9.81	
S	重力倾角附加系数	计算	[1]
a_q	未平横离心加速度 (m/s^2)	计算	[1]
v	车辆运行速度 (km/h)	45	
h_{ac}	轨道超高值 (mm)	120	[5]
Y	S地铁T号线B2型地铁车厢地板面距轨面的高度 (mm)	980	[1]
h_{cp}	转向架一系弹簧上支撑面距轨面高度 (mm)	420	[3]
h_{sc}	车体重心距轨面高度 (mm)	1500	[4]
h_{cs}	转向架二系弹簧上支撑面距轨面高度 (mm)	860	[3]
k_{ϕ_p}	整车一系弹簧侧滚刚度 ($N \cdot mm/rad$)	计算	[1]
k_{ϕ_s}	整车二系弹簧侧滚刚度 ($N \cdot mm/rad$)	计算	[1]
n_p	车辆一侧一系弹簧并列数	4	[3]
c_p	每一轴箱一系弹簧垂向刚度值 (N/mm)	700	[3]
b_p	转向架一系弹簧横向间距 (mm)	1930	[3]
n_s	车辆一侧二系弹簧并列数	2	[3]
c_s	转向架一侧二系弹簧垂向刚度值 (N/mm)	1000	[4]
b_s	转向架二系弹簧横向间距 (mm)	1850	[3]
k_{ϕ_n}	抗侧滚扭杆的抗侧滚刚度 (每根) ($N \cdot mm/rad$) (无)	0	[3]
ΔX_{ci}	曲线轨道参数及车辆参数变化引起的车体及转向架横向曲线内侧偏移量 (mm)	计算	[1]
ΔS_i	曲线轨距加宽内轨分量及内轨磨耗量 (mm) (无轨距加宽)	0	[5]
Δd_e	钢轨横向弹性变形直线与曲线差值 (mm) (忽略不计)	0	[5]
Δw	车辆二系弹簧横向位移在曲线及直线上差值 (mm) (忽略不计)	0	[4]
Δq	车辆一系弹簧横向位移在曲线及直线上差值 (mm) (忽略不计)	0	[4]

注：上表中的数据来源于：^[1]根据《地铁限界标准 CJJ 96—2003》、^[2]《地铁设计规范 GB 50157-2013》、^[3]《S地铁T号线车辆使用维护手册》、^[4]地铁B2型车相关设计参数、^[5]S地铁T号线轨道设计相关图纸。

3.3 具体计算

将表2中的各参数数值带入上述公式中，可得到相应结果如下：

(1) T_i 曲线几何偏移引起的车体横向偏移量：

$$T_i = [4n(a-n) + p^2]/8R$$

$$= [4 \cdot 6300(12600-6300) + 2200^2]/8 \cdot 350000 = 58.43 \text{mm}$$

(2) ΔX_{Qi} 欠超高引起的车体横向偏移量：

$$\Delta X_{Qi} = \frac{h_{ac}}{1500} m_b g C_h (1+S)$$

$$= \frac{120}{1500} \cdot 48700 \cdot 9.81 \cdot 0.000138(1+0.188) = 6.27 \text{mm}$$

(3) ΔX_{ci} 曲线轨道参数及车辆参数变化引起的车体及转向架横向曲线内侧偏移量：

$$\Delta X_{ci} = \Delta S_i + \Delta d_e + \Delta w + \Delta q = 0$$

总的曲线内侧车体横向偏移量：

$$\Delta X_i = T_i + \Delta X_{Qi} + \Delta X_{ci} = 58.43 + 6.27 + 0 = 64.7 \text{mm}$$

4. 车辆轮廓线距轨道中心线距离

根据《地铁设计规范 GB 50157-2013》附录D-B2型车限界图章节中表D.1-1车辆轮廓线坐标值（隧道内直线段）对照表获得，S地铁T号线B2型地铁车辆距轨面的高度为1100mm时，车辆横向轮廓线距轨道中心线的距离为1400mm。

5. 车辆动态通过下行24号站台门位置曲线限界

该值 = 隧道内直线段车辆限界 + 曲线站台曲线横向偏移量 = 1480 + 64.7 = 1544.7mm。

6. 车辆动态通过下行 24 号站台门位置所需最小安全间隙

该值 = 隧道内直线段车辆限界 + 安全留量 + 曲线站台曲线横向偏移量 - 车辆轮廓线距轨道中心线距离 = 1480 + 10 + 64.7 - 1400 = 154.7mm。

四、判断结论

依据上述计算，为保证列车以 45km/h 速度安全通过站台，得出具体结论如下：

1. 上行 1 号站台门位置车辆曲线限界理论计算值为 1565.16mm，所需最小安全间隙理论计算值为 175.16mm，大于实际测量值 168mm，防撞胶条侵限。

2. 下行 24 号站台门位置车辆曲线限界理论计算值为 1544.7mm，所需最小安全间隙理论计算值为 154.7mm，大于实际测量值 143mm，防撞胶条侵限。

综上所述，在曲线站站台门加装防踏空胶条之前，一定要确定安全的情况下，可以通过计算列车车辆动态通过某位置时的曲线限界来确定此时列车动态通过此位置时的曲线横向偏移量，从而确定列车通过所需的最先安全距离，用以限制防踏空胶条向轨行区方向的延伸深度。

[参考文献]

-
- [1] 《地铁限界标准 CJJ 96—2003》
 - [2] 《地铁设计规范 GB 50157—2013》
 - [3] 地铁 B2 型车相关设计参数