

地铁与自动旅客运输系统的车辆与站台水平间隙标准的对比及应用

王兴元 王良良 王嘉鑫 朱冬进 罗 唐

(中车浦镇庞巴迪运输系统有限公司, 210031, 南京//第一作者, 高级工程师)

摘 要 对地铁车站车辆与站台水平间隙标准的相关规定和规范的演变, 进行了解读和梳理, 总结了车辆与站台水平间隙设置的 3 个原则。总结了近年来国内学者对车辆限界与站台间隙的研究成果, 提出车辆与站台水平间隙应满足车辆限界并为一系悬挂或悬挂二系故障留有裕量, 但间隙不宜大于 70 mm。对 APM(自动旅客运输)系统国外规范规定和应用情况进行了解读和介绍。对 APM 车辆正常过站、故障过站因素进行分析, 并参照相关规范进行叠加汇总, 提出计算公式, 得出计算结果。计算结果远小于地铁 70 mm 的间隙, 且经过试验验证是安全可靠的。

关键词 地铁; 自动旅客运输系统; 车辆与站台水平间隙; 车辆限界

中图分类号 U270.2

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2020.05.017

Comparison and Application of the Platform Level Clearances between Metro Vehicle and APM System

WANG Xingyuan, WANG Liangliang, WANG Jiabin, ZHU Dongjin, LUO Tang

Abstract In this paper, the evolution of level clearance standards for subway station is studied and sorted out, three principles of platform clearance setting are summarized. According to the research achievement of Chinese scholars in recent years about vehicle platform margin and clearance, it is proposed that the platform gap should satisfy vehicle gauge with wheel or air spring, leave room for the primary suspension or secondary suspension failures, but the gap should be controlled with 70 mm. Then, foreign regulations and the application of automated people mover (APM) system are introduced. Through analyzing APM vehicle's normal station crossing and fault station crossing, the influencing factors are further overlaid and summarized, a calculation formula is proposed. The calculated result is far less than the 70 mm clearance for subway gap. After the application of platform limit design on Shanghai Pujiang Line, the calculated result proves to be safe and reliable.

Key words metro; APM; clearance between train and platform; vehicle gauge

Author's address CRRC Puzhen Bombardier Transportation Systems Ltd., 210031, Nanjing, China

轨道交通车辆与站台之间的间隙大小, 涉及乘客上下车安全以及行车安全。这是轨道交通运营的核心安全问题之一。本文对比了地铁系统及自动旅客运输 (APM) 系统的车辆与站台水平间隙的相关标准与有关的研究成果, 供业界参考。

1 地铁的相关规范与标准

1.1 相关规范

GB 50157—2003《地铁设计规范》^[1]规定, 站台限界按车辆限界加不小于 10 mm 的安全裕量来确定。此规定基于 CJJ 96—2003《地铁限界标准》^[2]的计算公式, 选取合适的参数, 计算所得车辆与站台水平间隙 (以下简称“站台间隙”) 不小于 88 mm。文献[1]与文献[2]均规定站台间隙应不大于 100 mm, 二者相互匹配, 在过去的十余年间对地铁车站限界设计起到了重要作用。

基于文献[1]修编的 GB 50157—2013 (文献[3]) 不再要求 10 mm 的安全裕量, 而仅要求不得使站台限界受侵, 并明确规定站台间隙应为 70 mm (以内藏门列车为例)。文献[3]附录中的 A 型车过站车辆限界是 1 544 mm (隧道内) 和 1 547 mm (隧道外), 相对于 70 mm 的站台间隙规定, 其安全裕量较大, 为 23~26 mm。

目前, 正在修编的新版《地铁限界标准》将列车一系悬挂或二系悬挂的故障影响也计入了车辆限界, 规定站台限界按不侵入过站车辆限界确定 A 型车应为 1 570 mm。新版《地铁限界标准》附录的 A₂ 型车过站车辆限界 (计及侧风作用) 为 1 566.5 mm, 安全裕量为 3.5 mm。

从文献[1]、文献[2]及文献[3]的演变,以及文献[3]的修编情况,可归纳站台间隙的确定原则为:站台限界的拟定应在保证过站行车安全前提下,尽可能减小站台间隙;行车安全需留有裕量,为一系悬挂或二系悬挂故障列车留有空间;在车辆限界计算中,侧风和横向振动加速度取值应综合考量确定,并允许瞬时超速。

1.2 相关研究及工程执行情况

文献[4]对文献[1]规定的10 mm安全裕量和100 mm站台间隙进行了解析,提出应按照车站条件计算车辆限界,并以此外放10 mm安全裕量作为站台限界。二者计算条件差别主要为列车运行速度的取值和线路中心线横向位差。

文献[5]提出,文献[2]中的站台间隙计算公式用在区间是合适的,但用到车站范围不甚恰当。主要原因为:列车在区间和车站的横向振动加速度有别;列车蛇形运动时的转向架是否按最大偏移位、且作为随机因素线性叠加考虑,其结果不同。研究建议:当采用内藏门式的A型车时,站台限界按车辆限界(隧道内为1 553 mm、隧道外为1 555 mm)外放10 mm安全裕量计算。

文献[6]与文献[4]观点类似,基于国外的站台间隙规定,建议站台间隙规定缩小为70 mm。

文献[7]认为传统的限界计算方法是将各种不利影响因素条件下的极限值叠加,过于保守,进而提出采用车线动力分析方法,将轨道不平顺外部激励作用于车辆,计算得到不同速度下动态横移量。计算结果表明,横向最大位移量小于60 mm;车速为20 km/h时的列车横向振动加速度最大;车速大于30 km/h后,列车横向振动加速度与车速成正比。如考虑列车过站速度为60 km/h,则其横向振动幅值与在区间的车速为20 km/h和60 km/h时基本相当,均为30 mm。故建议广州地铁4号线站台间隙取75~80 mm^[7]。

文献[8-9]统计了国内8个城市的地铁车站站台橡胶条安装情况(胶条宽度为30~50 mm),建议内藏门式A型车对应的站台安装50 mm橡胶条,且此时站台间隙为50 mm。

基于文献[4-9]的研究,非故障列车安全过站所需站台间隙可小于60 mm。在此基础上,需考虑为一系悬挂或二系悬挂发生故障的列车过站留有裕量:当站台间隙不采用橡胶条时,站台间隙设计应为70 mm;当站台间隙采用橡胶条时,完成橡胶

条安装后的站台间隙可小于60 mm,且橡胶条前端的柔性竖齿可以侵入车辆限界,但后端的钢骨架不得与一系或二系悬挂发生故障的列车过站相干涉。

2 APM的相关规范及应用

ANSI/ASCE/T&DI 21-13^[10]规定:列车最高运行速度不高于32 km/h的APM,其站台间隙不得大于25 mm;列车最高运行速度大于32 km/h的APM,其站台间隙不得大于50 mm^[10]。该规范并未对车辆限界进行界定。

胶轮路轨系统技术平台引自国外,其限界体系或理念与国内标准或规范差异较大,尚难以直接套用相关规定开展工程设计。

文献[11]规定站台间隙采用1.5英寸(即38.0 mm)设计。考虑车体横向制造正误差2.5 mm,则实际站台间隙应为40.5 mm。文献[11]还要求在站台两端设置故障引导胶条,可扶正故障车辆,使之安全通过站台。

据调查,目前香港机场航站楼接驳APM的站台间隙采用了30 mm设计,其车辆由日本IHI集团石川岛公司提供,为侧导向。

3 APM的站台间隙

由于限界体系的差异,APM并未参照《BOStrab》(《德国有轨电车建设和运营条例》)或国内标准进行计算,而是分别对车辆在正常情况和故障情况下过站时的间隙设置影响因素进行分析。

3.1 车辆正常过站情况的影响因素

1) 车辆允许公差。包括车辆车体横向制造公差 A ,门槛装配公差 B ,转向架对中允许公差 C ,导轮制造误差为 D_1 ,导轮装配公差 D_2 。

2) 车辆正常运行侧滚。性能完好的车辆高速运行在平直道时,列车横向振动引起侧滚,在一系列拉杆限制下的列车重心最大侧滚角为 α_E ,车体相对转向架扭转的中心高度 F ,地板面相对于轨面的高度 G ,车体半宽 H ,该侧滚引起在车体门槛高度处的伸出量为 I (见式(1))。

3) 车辆自由间隙。包括导向轮与导梁自由间隙 J ,导向轮磨损限值 K 。

4) 导向轨公差。根据运行道及导梁施工验收标准,导向轨制造误差为 L ,导向轨安装施工误差为 M 。

5) 偏载。考虑2/3的AW2(额定载荷)偏载,轮胎压缩量为 N ,车轴中心线距轨面高度为 h_0 ,车

轮中心距为 P , 车体地板面伸出量为 Q (见式(2))。

6) 运行道不平顺。运行道横向平整度要求最大为 R , 车体地板面伸出量为 S (见式(3))。

7) 车体-转向架斜拉位放大。

需注意的是, 以上 7 类因素中, C 、 D_1 、 D_2 、 J 及 K 等 5 个参数需考虑转向架与车体的倾斜系数^[11]。

门槛计算长度为 F_1 , 转向架中心距为 G_1 , 则可得偏斜系数 C_E (见式(4))。

$$I = \sin\left(\arctan \frac{H}{G-F} + \alpha_E\right) \times \sqrt{(G-F)^2 + H^2} - H \quad (1)$$

$$Q = \sin\left(\arctan \frac{N}{P} + \arctan \frac{H+P/2}{G-h_0}\right) \times \sqrt{(H+P/2)^2 + (G-h_0)^2} - H - P/2 \quad (2)$$

$$S = \sin\left(\arctan \frac{R}{P} + \arctan \frac{H+P/2}{G-h_0}\right) \times \sqrt{(H+P/2)^2 + (G-h_0)^2} - H - P/2 \quad (3)$$

$$C_E = F_1/G_1 \quad (4)$$

$$T = J \times C_E + K \times C_E + L + M + Q + S \quad (5)$$

$$U = J \times C_E + K \times C_E + Q + \sqrt{A^2 + B^2 + (C \times C_E)^2 + (D_1 \times C_E)^2 + (D_2 \times C_E)^2 + I^2 + L + M + S} \quad (6)$$

$$V = A + B + C \times C_E + D_1 \times C_E + D_2 \times C_E + K \times C_E + L + M + Q + S + \sqrt{I^2 + (J \times C_E)^2} \quad (7)$$

$$W = A + B + C \times C_E + D_1 \times C_E + D_2 \times C_E + I + J \times C_E + K \times C_E + L + M + Q + S \quad (8)$$

3.3 故障车辆过站情况下的影响因素

1) 走行轮爆胎。车辆走行轮采用“氮气轮胎+防爆钢圈”轮胎形式。车轮爆裂时, 在内置钢圈限制下, 车厢地板面下降量为 h_x , 在车体门槛高度处的伸出量为 m (见式(9))。

2) 二系空簧爆裂。爆裂后车体作用空簧内橡胶止挡上, 空载时空气弹簧上承面距空簧止挡的高差为 h_z , 空簧上承面相对走行面顶高度为 h_{AK} , 空簧中心距线路中心线水平距离为 B , 爆裂空簧支点距线路中心线水平距离为 C , 据此考虑空簧爆裂引起的侧滚。该侧滚反映在车体门槛高度处的伸出量为 D (见式(10))。需要说明的是, 这里暂列了 $D=9.7$ mm, 实际上在车辆限界计算时已考虑空簧动态形变量 8.8 mm, 可不予重复计列。且为了简化计算, 这里取空载空簧上承面至空簧爆裂的下降量, 是有一定裕量的。

3) 导向轮故障。导向轮采用“聚氨酯+金属构件”弹性橡胶车轮。导向轮表层弹性部件剥离时, 弹性部件厚度记为 d , 考虑单侧单个导轮弹性部件

3.2 正常车辆过站的站台间隙取值

参照 UIC 501-1 OR (2006)《Railway Transport Stock Rolling Stock Construction Gauge》将上述因素均视为非随机因素, 在不考虑侧风和制造公差时, 站台间隙 T 见式(5)。经计算, $T=23.9$ mm。

参照《BOStrab》及 CJJ 96—2003, 并考虑以上影响因素作用, 将导轮-导向梁的自由间隙、导轮磨损及载荷不均衡作为非随机因素, 将车辆制造类公差、轨道不平顺、侧风及横向振动作为随机因素, 则站台间隙为 U (见式(6))。经计算, $U=30.8$ mm。

参照文献[3], 将轮轨间隙、一系横向位移作为随机因素, 侧风作为非随机因素^[14], 则站台间隙为 V (见式(7))。经计算, $V=41.3$ mm。

若参照目前仍在修编的新版《地铁限界标准》, 则站台限界需考虑一系或二系悬挂发生故障的情况。若对项公差、偏移及侧滚等因素进行线性叠加, 则共需要站台间隙 W 见式(8)。经计算 $W=45.7$ mm。

需要说明的是: 以上不包括站台施工误差。

剥离, 则导致的车辆横向位移量为 I_1 (见式(11))。

$$m = \sin\left(\arctan \frac{h_x}{P} + \arctan \frac{H+P/2}{G-h_0}\right) \times \sqrt{(H+P/2)^2 + (G-h_0)^2} - H - P/2 = 12 \text{ mm} \quad (9)$$

$$D = \sin\left(\arctan \frac{h_z}{B+C} + \arctan \frac{H+\frac{h_{AK}}{2}}{G-h_{AK}}\right) \times \sqrt{\left(H+\frac{h_{AK}}{2}\right)^2 + (G-h_{AK})^2} - H - \frac{B}{2} = 9.7 \text{ mm} \quad (10)$$

$$I_1 = \frac{d}{G_1} \times \left(G_1 + \frac{F_1 - G_1}{2}\right) = 16.1 \text{ mm} \quad (11)$$

3.4 站台间隙综合计算

依据不同标准或计算方法, 得到站台间隙建议值如表 1 所示。

由表 1 可见, 站台间隙取 50 mm 较合适, 既可在正常车辆过站时留有足够的安全间隙, 也可满足列车在单一故障情况下的过站要求。

表 1 参照不同标准的站台间隙汇总表		
依据	正常过站时的 站台间隙/mm	站台间隙 建议值/mm
UIC 505	23.9	
CJJ 96—2003	30.8	40.8 ^①
GB 50157—2013	41.3	
CJJ 96(专家咨询稿)		46.9 ^②
线性叠加	45.7	61.8 ^②

注:①为正常过站情况下,外放 10 mm 后的安全间隙;②为考虑列车在单一故障情况下过站的安全间隙

4 试验线与验证

4.1 试验线

上海轨道交通浦江线是上海建成运营的首条 APM 线路。为满足乘客无障碍登车需求,结合经验,确定站台间隙为 39.5 mm。由于门槛处车体半宽为 1 420.5 mm,故站台边缘距线路中心线 1 460.0 mm。考虑到故障车辆进出站的情况,在站台边缘安装了厚度为 25.0 mm 的故障导向胶条,故站台混凝土边缘应距线路中心线 1 485.0 mm^[14]。

基于车辆正常过站的安全间隙,考虑 3 种故障同时发生的最不利工况,确定故障车辆的最大动态包络线,并参考文献[10]将之外放一定裕量作为建筑限界。计算可得,站台建筑限界与线路中心线的水平距离为 1 632.0 mm。因此,从站台两端至站台中部,引导胶条完成面与线路中心线的距离由 1 632.0 mm 向 1 485.0 mm 渐变。

4.2 试验验证

试验选用一列性能完好的列车(新车、新轮),在车身贴不同尺寸的显色泡沫,在空载工况下进出站,并以 40 km/h 速度过站。列车经多次多站往返试验,车身厚度为 23.0 mm 的泡沫没有发生剐蹭^[15]。

试验列车的车辆制造公差累计值测得为 9.5 mm(理论计算加权值最大为 11.4 mm);导轮磨耗为 0(理论计算导轮磨耗放大至端部门槛处为 10.3 mm);运行道不平顺和导轨高差难以准确测量,但经过多站往返试验,可认为已按标准要求发生;导轮导梁自由间隙为随机变量,但经过多次往返试验,可认为已按标准要求发生;因试验条件制约,偏载量(2.3 mm)未发生。

综上,在 23.0 mm 的泡沫裕量中,扣除车辆误差类、磨耗类及偏载影响后,仍有 8.5 mm 安全裕量。此时的安全裕量可以理解为自振动和运行道不平顺实际并未同时发生而产生的裕量。

经上海轨道交通浦江线的试验验证结果表明:

39.5 mm 站台间隙是安全的;设置厚 25.0 mm 的引导胶条能扶正多重故障同时发生的列车进站,验证了该措施的有效性;在保证行车安全的前提下,将站台间隙从传统地铁的 70.0 mm 或 100.0 mm 减小至 39.5 mm,可更好地满足乘客无障碍登车需求,具有实际意义。

参考文献

[1] 中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局.地铁设计规范:GB 50157—2003[S].北京:中国计划出版社,2003.

[2] 中华人民共和国建设部.地铁限界标准:CJJ 96—2003[S].北京:中国建筑工业出版社,2003.

[3] 中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局.地铁设计规范:GB 50157—2013[S].北京:中国建筑工业出版社,2014.

[4] 倪昌.《地铁设计规范》问与答(五)[J].都市轨道交通,2005(1): 80.

[5] 倪昌,王建.关于站台建筑限界的探讨[J].都市轨道交通,2006(6): 15.

[6] 王锋,余惠林,赵晓华,等.关于地铁车站站台限界的探讨[J].铁道标准设计,2009(2): 81.

[7] 夏景辉,梁青槐.直线电机轮轨交通车站站台建筑限界研究[J].北京交通大学学报,2010(2): 10.

[8] 杨铭.浅谈地铁车站防踏空胶条安装[C]//中国土木工程学会.2015 中国(天津)区域轨道交通发展及装备关键技术论坛暨第 24 届地铁学术交流会议论文集.北京:土木工程协会,2015: 620.

[9] 邱邵峰.地铁车站防踏空胶条安装探讨[J].铁道标准设计,2015(11): 97.

[10] American National Standards Institute, ASCE. Automated People Mover Standards: ANSI/ASCE/T&DI 21-13[S]. Reston, Virginia, USA: American Society of Civil Engineers, 2013: 31.

[11] EKSTRAND C, NESTOR J, GRADICH J, et al. INNOVIA APM 300 General Guideway Design Criteria Shanghai Line 8 Phase III[S]. Nanjing: CRRC Puzhen Bombardier Transportation Systems Limited, 2015.

[12] 王嘉鑫.浮动车型有轨电车车辆限界(横向部分)计算方法分析[J].地下工程与隧道,2015(1): 44.

[13] 杨娜,袁艳萍,王虎高.《GB 50157—2013》与《CJJ 96—2003》标准限界对比浅析[J].技术与市场,2017(8): 53.

[14] 上海市隧道工程轨道交通设计研究院.上海市轨道交通 8 号线三期暨集运系统(暂名)施工图设计[R].上海:上海市隧道工程轨道交通设计研究院,2017.

[15] 中车浦镇庞巴迪运输系统有限公司.上海八号线三期 APM 胶轮路轨核心机电及集成项目车辆/导轨/车站限界现场试验报告[R].南京:中车浦镇庞巴迪运输系统有限公司,2017.

(收稿日期:2018-07-12)