

市域(郊)铁路轨道曲线超高设置研究

李凤煜

(中铁上海设计院集团有限公司, 上海 200070)

摘要: 针对市域(郊)铁路曲线超高相关规范标准不统一、各超高允许值之间优先考虑原则不明确的情况, 对其合理设置进行研究。通过对比分析不同规范曲线超高的设置要求及实例分析, 提出兼顾《铁路轨道设计规范》及《市域(郊)铁路设计规范》等行业标准的最大及最小设计超高值、一般及困难情况下的欠超高及过超高允许值、超高顺坡率允许值, 以及不同超高设计允许值之间的优先考虑原则, 为新建市域(郊)铁路的曲线超高设计提供指导, 对行业相关标准规范的完善提供参考。

关键词: 城市轨道交通; 市域(郊)铁路; 曲线超高; 允许值; 设计原则

中图分类号: U231

文献标志码: A

文章编号: 1672-6073(2024)02-0072-05

Rail Curve Superelevation Settings of Suburban Railways

LI Fengyu

(China Railway Shanghai Design Institute Group Corporation Limited, Shanghai, 200070)

Abstract: This study investigates the reasonable setting of suburban railway curve superelevations in the case of related specifications and standards that are not unified. The principle of prioritizing the allowable values of each superelevation is not clear. By comparing and analyzing the requirements for curve superelevation settings in different codes and by analyzing examples, this paper proposes the maximum and minimum values of design superelevation, the general allowable values for under-superelevation, over-superelevation, and difficult situations, and the allowable values for the superelevation slope ratio, taking into account the Code for Design of Railway Track, Code for Design of Suburban Railway, and other industry standards. The priority of design principles of allowable values for different superelevations is obtained, providing guidance for the setting of curve superelevations for new suburban railways and providing a reference for the improvement of industry-related standards.

Keywords: urban rail transit; suburban railway; curve super-elevation; allowable value; design principles

随着我国城市化的快速提升和长三角、珠三角等城市群의 扩充发展, 加快发展市域(郊)铁路的需求与日俱增^[1]。据研究, 快慢车组合的运营模式可以提高运输效率、减少乘客出行时间、降低企业运营成本^[2], 在已开通运营或正在设计建设的线路中, 快慢车组合的运营模式逐渐得到普及^[3-4]。一方面, 这种模式使市

域(郊)铁路的超高设计与已经较为成熟的铁路线路及城市轨道交通线路的超高设计产生差异; 另一方面, 由于市域(郊)铁路近几年才开始大量建设, 相关规范及技术标准有待进一步探讨^[5]。对于如何统一相关规范标准、明确各超高允许值之间的优先考虑原则, 本文通过对主要行业规范的对比分析及实例分析提出了

收稿日期: 2023-08-11 修回日期: 2024-01-09

作者简介: 李凤煜, 女, 硕士, 工程师, 主要从事铁路与城市轨道交通设计方面的工作; lifengyu@sty.sh.cn

基金项目: 中铁上海设计院集团有限公司科研课题项目(集 20-07)

引用格式: 李凤煜. 市域(郊)铁路轨道曲线超高设置研究[J]. 都市轨道交通, 2024, 37(2): 72-76.

LI Fengyu. Rail curve superelevation settings of suburban railways[J]. Urban rapid rail transit, 2024, 37(2): 72-76.

相应建议,为超高设计及标准完善提供参考。

1 曲线超高及超高顺坡率计算方法

1.1 超高

列车在曲线上行驶时,由于离心力作用,列车被推向外股钢轨,一方面加大了对外股钢轨的压力,产生钢轨不均匀磨损;另一方面使乘客感觉不适,影响乘坐舒适度;此外离心力过大还将影响行车安全。为抵消离心力的作用,需要将曲线外轨抬高,即设置超高。超高计算公式为

$$h = \frac{11.8v^2}{R} \quad (1)$$

式中, h 为曲线超高, mm; v 为列车运行速度, km/h; R 为曲线半径, m。

1.2 欠超高及过超高

当列车以某一速度通过曲线时所需超高与现场实设超高一致,称为平衡超高;当列车以某一速度通过曲线时所需超高大于现场实设超高,两者之差称为欠超高;反之为过超高。欠超高、过超高均为未被平衡的超高,计算公式分别为

$$h_q = \frac{11.8v_q^2}{R} - h_s \quad (2)$$

$$h_g = h_s - \frac{11.8v_g^2}{R} \quad (3)$$

式中, h_q 为欠超高, mm; h_g 为过超高, mm; h_s 为实设超高, mm; v_q 为产生欠超高时列车运行速度, km/h; v_g 为产生过超高时列车运行速度, km/h。

1.3 超高顺坡率

在曲线外轨设置的超高,需要通过缓和曲线顺接到直线上,不至于使离心力突然产生或突然消失。超高顺坡率计算公式为

$$i = \frac{h}{l} = \frac{3600v_f}{v_{\max}} \quad (4)$$

式中, i 为超高顺坡率, ‰; l 为顺坡长度, m; v_f 为超高时变率, m/s; $v_{\max}$ 为列车最高运行速度, km/h。

1.4 允许通过速度

由式(2)可得,当欠超高最大允许值及实设超高确定时,曲线允许通过的最高速度为

$$v_y = \sqrt{\frac{(h_s + h_{q\max})R}{11.8}} \quad (5)$$

式中, v_y 为允许通过速度, km/h; $h_{q\max}$ 为欠超高最大允许值, mm。

2 主要规范及曲线超高设置要求

对于设计速度在 100~160 km/h 的新建线路,现行规范有所重合,行业标准主要有国家铁路局发布的《铁路轨道设计规范》(TB 10082—2017)、《市域(郊)铁路设计规范》(TB 10624—2020)、《城际铁路设计规范》(TB 10623—2014)以及住房和城乡建设部发布的《地铁快线设计标准》(CJJ/T 298—2019)和《市域快速轨道交通设计标准》(CJJ/T 314—2022)。一些地方和相关学会也发布了地方标准和团体标准,适用范围有一定局限性,此处不做列举和讨论。本文主要针对上述 5 个行业标准进行探讨。

2.1 主要规范适用范围

鉴于目前市域(郊)铁路多为新建线路,其轨道结构形式多采用无砟轨道,因此本文仅针对新建线路采用无砟轨道的情况进行分析讨论。

2.1.1 《铁路轨道设计规范》

针对城际铁路做出了相应规定,其中城际铁路指专门服务于相邻城市间或城市群,设计速度在 200 km/h 及以下,仅运行动车组列车的标准轨距客运专线铁路,设计速度分为 200、160、120 km/h 等 3 级^[6]。

2.1.2 《市域(郊)铁路设计规范》

针对市域(郊)铁路做出了相应规定,其中新建市域(郊)铁路指设计速度为 100~160 km/h 的标准轨距、交/直流电力牵引的市域(郊)铁路,设计速度分为 100、120、140、160 km/h 等 4 级^[7]。

2.1.3 《城际铁路设计规范》

该规范适用于新建设计速度为 200km/h 及以下、仅运行动车组列车的标准轨距客运专线铁路,设计速度分为 200、160、120 km/h 等 3 级^[8]。

2.1.4 《地铁快线设计标准》

该规范适用于采用站站停追踪运行或快慢车组合运行,列车最高运行速度为 100~120 km/h 的钢轮钢轨地铁快线新建工程的设计^[9]。

2.1.5 《市域快速轨道交通设计标准》

该规范适用于最高运行速度 120~160 km/h、采用钢轮钢轨制式的新建、改建、扩建,并服务于市域范围内中、长距离客运交通的市域快速轨道交通设计^[10]。

2.2 不同规范曲线超高设置要求

主要体现在最大设计超高值、最小设计超高值、超高顺坡率允许值及欠超高、过超高允许值等几个方面。另外,部分规范的条文说明在线路篇章中对设计超高与欠超高之和允许值、欠超高与过超高之和允许值也做出了相关规定,如表 1 所示。

表 1 不同规范曲线超高设置要求对比

Table 1 Comparison of requirements for curve superelevation settings in different codes

规范名称	最大、最小设计超高值	欠超高、过超高允许值	超高顺坡率	设计超高与欠高之和允许值	欠超高与过超高之和允许值
《铁路轨道设计规范》 (TB 10082—2017)	最大设计超高值为 175 mm， 最小设计超高值为 15 mm	均为优秀 40 mm、良好 80 mm、一般 110 mm	最大值不应大于 2‰；还需满足一般条件 $1/(10v_{\max})$ ， 困难条件 $1/(8v_{\max})$	—	—
《市域(郊)铁路设计规范》 (含条文说明) (TB 10624—2020)	最大设计超高值为 150 mm， 车站有效站台长度范围内不应大于 15 mm	均为一般条件下不应大于 60 mm，困难条件下不应大于 90 mm	—	一般 210 mm、 困难 240 mm	一般 120 mm、 困难 180 mm
《城际铁路设计规范》 (含条文说明) (TB 10623—2014)	—	—	—	优秀 180 mm、 良好 210 mm、 一般 240 mm	优秀 100 mm、 良好 140 mm、 一般 180 mm
《地铁快线设计标准》 (CJJ/T 298—2019)	最大设计超高值为 150 mm	最大欠超高值不应大于 61 mm，困难情况下不应大于 75 mm	—	—	—
《市域快速轨道交通设计标准》 (CJJ/T 314—2022)	最大设计超高值为 150 mm	允许欠超高值不宜大于 70 mm，困难条件下不应大于 90 mm	160 km/h $\geq v_{\max}$ >120 km/h 时应满足一般情况 $1/(10v_{\max})$ ， 困难情况 $1/(8v_{\max})$ ； 120 km/h $\geq v_{\max}$ >100 km/h 时应满足一般情况 $1/(9v_{\max})$ ， 困难情况 $1/(7v_{\max})$	—	—

3 超高允许值的确定

同一条市域(郊)铁路线路的列车速度目标值通常相同，由于站间距较大，因此快慢车在区间运行的速度基本相同。然而不同运营模式的列车停靠车站不同，导致两者在跨线运行车站附近的通过速度有显著差异。当该范围内存在曲线时，会引起进出站附近曲线列车通过速度的不同。

铁路线路中通常存在同时通过不同速度目标值及不同停靠车站列车的情况，因此不论区间或车站附近，同一曲线的列车通过速度情况较多，可能会同时存在欠超高和过超高^[1]，在考虑曲线超高时，可能会成为约束条件。

城市轨道交通线路绝大多数为站站停运营模式，同一曲线的列车通过速度基本相同，仅存在欠超高或过超高。除最大超高值限制引起的欠超高可能存在较大值的情况外，实设超高通常可以满足计算超高的要求，欠超高和过超高值均较小，在考虑曲线超高时，通常不会成为约束条件。

可以发现，开行快慢车的市域(郊)铁路在曲线超高设置方面的工况与铁路线路更为接近。《铁路轨道设计规范》是轨道设计中的重要依据，其制定综合考虑了各种不同工况，不仅有理论依托，也有国内外多年工程经验的总结参考。因此，建议市域(郊)铁路在进行超高设计时，以《铁路轨道设计规范》作为超高设计的主要参考。

目前我国已经开通运营以及正在规划建设

的(郊)铁路主要存在两种运营模式：一种是线路与国铁接轨，运营采用委托铁路局的模式，这种情况建议以《铁路轨道设计规范》为主，兼顾国家铁路局发布的《市域(郊)铁路设计规范》及《城际铁路设计规范》执行；另一种是与地铁线路接轨，由地方地铁公司独立运营，建议以《铁路轨道设计规范》为主，兼顾住房和城乡建设部发布的《地铁快线设计标准》或《市域快速轨道交通设计标准》执行。

3.1 最大设计超高值

在曲线上设置的最大超高必须有所限制。如设置的超高过大，当列车以低速运行时，会产生过大的未被平衡向心加速度，列车的重量偏压在内股钢轨上，会加剧内股钢轨的磨耗和压宽。如在曲线上停车，车体向内侧倾斜量较大，可能造成偏载，对行车安全不利，极端情况下可能造成列车的倾覆。根据铁路工务的养护维修经验，当超高值大于 150 mm 时，容易出现钢轨波磨等病害，且不利于养护维修作业。考虑到《铁路轨道设计规范》中城际铁路的最高设计速度较高(200 km/h)，故而最大设计超高值也较大。在市域(郊)铁路设计中，针对设计速度最大为 160 km/h 的情况，综合考虑养护维修及其他 3 本规范对最大设计超高值的要求，建议取 150 mm 较为合适。

3.2 最小设计超高值

最小设计超高值在《铁路轨道设计规范》中做出了 15 mm 的要求，但在其他规范中并未提出相应要求。考虑到市域(郊)铁路线路条件较好，通常圆曲线及缓

和曲线长度较长,若超高值过小,不利于施工及养护维修,甚至产生反超高,危及行车安全。因此,在市域(郊)铁路曲线超高设计中建议同样按照最小设计超高值 15 mm 的原则进行设置。

3.3 欠超高及过超高允许值

未被平衡的欠超高及过超高在《市域(郊)铁路设计规范》及《市域快速轨道交通设计标准》中均分为一般及困难条件,其困难条件下的允许值相同(90 mm),但其一般条件下的允许值有所不同(60 mm、70 mm)。

在国家铁路局《铁路轨道设计规范》局部修订条文送审稿(科法函[2023]213号)中,针对“设计速度 200 km/h 以下的铁路,曲线欠超高允许值建议调整为一般条件 70 mm、困难条件 90 mm”。

综上所述,建议在市域(郊)铁路超高设计时,欠超高及过超高允许值的要求统一按照《市域(郊)铁路设计规范》的相关规定执行。若偏地铁的项目列车最高运行速度为 100~120 km/h 时,按《地铁快线设计标准》中的相关要求执行。

3.4 超高顺坡率

在《铁路轨道设计规范》及《市域快速轨道交通设计标准》中对 $160 \text{ km/h} \geq v_{\max} > 120 \text{ km/h}$ 时的超高顺坡率提出了相同的要求,但在其他 3 本规范中并无此类要求。在超高顺坡地段,轨道的轨面呈扭曲状态,列车通过时,不但车辆车轮有偏载,而且车辆外轮的升降速度对乘客的舒适性有直接影响,故对超高顺坡率需要适当控制。另外,为保证行车安全,应使车轮轮缘不爬越内轨顶面,由此可得最大超高顺坡率不应大于 2‰^[6]。因此,在市域(郊)铁路曲线超高设计中同样需要考虑超高顺坡率的影响。

此外,针对 $v_{\max} < 120 \text{ km/h}$ 的情况,在《铁路轨道设计规范》中属于客货共线铁路,其规定:一般条件取 $1/(10v_{\max})$,困难条件取 $1/(9v_{\max})$;仅当设计时速为 80 km 及以下时,一般条件取 $1/(9v_{\max})$,困难条件取 $1/(8v_{\max})$ 。综上考虑,建议在市域(郊)铁路设计中统一按照《铁路轨道设计规范》中超高顺坡率的相关要求执行。若偏地铁的项目不能满足相关要求时,可适当放宽,按《市域快速轨道交通设计标准》中的相关要求执行。

3.5 设计超高与欠超高之和允许值及欠超高与过超高之和允许值

这两项指标在《城际铁路设计规范(条文说明)》与《市域(郊)铁路设计规范(条文说明)》中对应的最不利等级的要求相同,且该两项指标一般为指导线路平面设计时所用,轨道超高设计时通常均能够满足要求,不会成为限制条件。

4 设计超高设置实例分析

在市域(郊)铁路开行的列车中,通常同时存在站站停慢车及大站停快车两种情况,可能出现进出站附近曲线列车通过速度的不同。虽然与铁路相比,设计工况及超高设置要求均有所不同,但超高计算方法可参考铁路设计中的方法进行设计,即根据行车专业提供的行车速度,分别计算出通过该曲线的最高平均速度和最低平均速度下的平衡超高,在尽量满足设计速度目标值要求的情况下,依次通过超高顺坡率、过超高及欠超高在满足一般情况下的相应要求进行选择设置。

以某接轨铁路线路的市域(郊)铁路线路为例进行超高计算,其部分设计速度为 160 km/h 曲线的曲线要素、行车牵引计算结果及超高设计情况如表 2 所示。

表 2 曲线设计超高计算及设置

Table 2 Curve design superelevation calculation and setting

交点号	曲线半径/m	缓和曲线长度/m	行车牵引计算速度/(km/h)			平衡超高/mm		设计超高/mm	过欠超高/mm		超高顺坡率		允许通过速度/(km/h)	轨道限速/(km/h)
			慢车 4 辆编组	慢车 8 辆编组	快车 8 辆编组	按速度大值	按速度小值		欠超高	过超高	—	%		
JD5	3 500	110	90.01	86.29	86.29	27	25	25	2	—	$1/(48.9v_{\max})$	0.227	184.7	—
JD7	11 500	40	66.46	66.46	66.46	5	5	15	—	10	$1/(40.1v_{\max})$	0.375	319.9	—
JD8	4 500	80	94.87	94.89	94.89	24	24	20	4	—	$1/(42.2v_{\max})$	0.250	204.8	—
JD9	2 600	160	119.13	119.15	119.15	64	64	60	4	—	$1/(22.4v_{\max})$	0.375	181.8	—
JD10	3 200	120	134.81	134.83	134.83	67	67	65	2	—	$1/(13.7v_{\max})$	0.542	205.0	—
JD12	1 400	180	156.93	156.71	156.71	208	207	130	78	—	$1/(8.8v_{\max})$	0.722	161.6	—
JD13	1 300	180	156.82	156.63	156.63	218	218	130	88	—	$1/(8.9v_{\max})$	0.778	155.7	155
JD14	1 800	160	156.89	156.77	156.77	161	161	100	61	—	$1/(10.2v_{\max})$	0.625	170.2	—
JD18	1 500	230	68.10	61.94	103.74	85	30	115	—	85	$1/(19.3v_{\max})$	0.500	161.4	—
YJD9	2 606	160	119.13	142.66	142.66	92	64	60	32	—	$1/(18.7v_{\max})$	0.375	182.0	—

可以发现,在快慢车均停车的车站及其附近区间,列车通过同一曲线的行车牵引速度基本相同,在此情况下,曲线超高仅需考虑超高顺坡率及欠超高或过超高的某一项即可,不会存在欠超高与过超高差异过大而需进行取舍的情况。如表2中JD5~JD10,除JD7为满足最小设计超高值15 mm而存在10 mm过超高外,其他曲线均可通过超高设置使得曲线仅存在几毫米的欠超高。

而在快车通过、慢车停站的车站及其附近区间,列车通过同一曲线的行车牵引速度可能会有较大差异,同一曲线可能同时存在欠超高与过超高。当欠超高及过超高存在相同数值时,过超高会引起较大的钢轨侧磨,因此在欠超高与过超高可能同时存在时,可通过超高设计值的设置,使曲线仅存在欠超高。如表2中YJD9,按速度大值及速度小值得到的平衡超高分别为92 mm与64 mm,但是设计超高并未选择两者的平均值,而是按照以尽量不产生过超高为原则,按60 mm设置。

超高的设置应以满足设计速度目标值要求为前提,即不能仅根据行车牵引计算速度得到的平衡超高设置设计超高,又需考虑该超高下的曲线允许通过速度,使其不低于线路设计速度。如表2中JD18,通过该曲线的快慢车均未达到160 km/h的速度目标,按速度大值及速度小值得到的平衡超高分别为85 mm与30 mm,如在此范围内设置超高,根据式(5)检算,该曲线的允许通过速度最大仅能达到149.2 km/h,并未达到160 km/h的线路设计速度。虽然开通先期会有较小的欠超高或过超高,但若后期运营模式改变,需要列车以线路设计速度通过该曲线时,会由于前期轨道超高设置过低而产生轨道限速,无法达到线路设计速度。根据计算可以得到,当超高值设置为115 mm时允许通过速度为161.4 km/h,达到了线路设计速度,因此按115 mm设置。

当线路条件存在困难时,可能出现欠超高与超高顺坡率不能同时满足一般条件的情况,这时需要在其中做出取舍。参考《高速铁路线路维修规则》“欠超高或超高顺坡率需采用困难条件时,应优先采用欠超高困难条件”^[12],首先满足超高顺坡率的一般要求,选用欠超高困难值进行设置。如表2中JD14,若不考虑超高顺坡率,可以按照最大设计超高值150 mm设置,但此时超高顺坡率为 $1/(9.4v_{\max})$,不满足 $1/(10v_{\max})$ 的一般条件。调小超高设计值至140 mm,此时超高顺

坡率为 $1/(10.2v_{\max})$,欠超高为61 mm,分别满足各自一般条件及困难条件下的要求。

若在满足超高顺坡率一般条件下,欠超高不能满足要求或因此而无法达到设计速度,则可适当增大超高值,以允许通过速度达到设计速度为目标,使超高顺坡率可以满足困难条件的要求。如表2中JD12,在满足设计速度且超高顺坡率满足困难条件的要求时,可以选择设置的超高值范围为130~140 mm,按照优先选用欠超高困难值的设置原则,按130 mm设置。

若在满足设计速度要求的最低条件下,超高顺坡率依然不能满足困难条件下的要求,则需对该曲线进行轨道限速。如表2中JD13,若不考虑超高顺坡率,可以按照最大设计超高值150 mm设置,但此时超高顺坡率为 $1/(7.7v_{\max})$,不满足 $1/(8v_{\max})$ 的困难条件。减小超高值至140 mm后,超高顺坡率可以满足困难条件,但此时允许通过速度不能达到设计速度,因此需要做出限速处理,此时的曲线限速由轨道超高设置引起。将曲线限速值调整至155 km/h后,可以选择设置的超高值范围为130~140 mm,按照优先选用欠超高困难值的设置原则,按130 mm设置。

5 结论

1) 在进行超高设计时以《铁路轨道设计规范》为主,根据建设运营模式同时兼顾《市域(郊)铁路设计规范》、《地铁快线设计标准》或《市域快速轨道交通设计标准》执行。

2) 最大设计超高值取150 mm;最小设计超高值取15 mm;欠超高及过超高一般条件下不应大于60 mm,困难条件下不应大于90 mm;超高顺坡率最大值不应大于2‰,还需满足一般条件 $1/(10v_{\max})$ 、困难条件 $1/(8v_{\max})$ 的要求。

3) 超高的设置应以满足设计速度目标值要求为前提,不能仅根据行车牵引计算的速度设置超高,而使曲线允许通过速度低于线路设计速度。

4) 存在停站及过站列车的车站附近的曲线,超高设置应同时考虑快慢两种车速的要求,在欠超高与过超高可能同时存在时,可通过超高设计值的设置,使曲线仅存在欠超高,以减少钢轨侧磨。

5) 当线路条件存在困难时,优先满足超高顺坡率的一般要求,选用欠超高困难值进行设置。

6) 若在满足设计速度要求的最低条件下,超高顺坡率依然不能满足困难条件下的要求,则需对该曲线进行轨道限速。

(下转第83页)