

文章编号:1006-2106(2011)11-0006-07

曲线超高在铁路工程设计中的关键影响^{*}

陈 旭^{**}

(中铁第一勘察设计院集团有限公司, 西安 710043)

摘要:研究目的:结合工作实践、工作需要,针对曲线超高的力学作用,系统分析对铁路技术条件的关键影响。以便在铁路线路设计中具有参考价值和必要的指导作用。

研究结论:曲线超高是线路平面、纵断面设计和轨道设计的重要技术条件。(1) 影响曲线半径、速度目标值等主要技术标准的选择;(2) 影响着通过曲线的允许最高、最低速度、缓和曲线长度、铁路限界和轨道选型等技术条件的规定;(3) 影响着铁路运输安全、旅客舒适度、运营养护成本等运输安全经济指标。

关键词:超高;设计;影响

中图分类号:U212 文献标识码:A

Key Influences of Curve Super-elevation on Design of Railway Engineering

CHEN Xu

(China Railway First Survey and Design Institute Group Ltd, Xi'an, Shanxi 710043, China)

Abstract: Research purposes: In combination with the working practice and demand, the systematical analysis of the mechanic effect of the curve super-elevation on the railway technical condition is made for the purpose of providing the reference and guidance to the design of the railway track.

Research conclusions: The curve super-elevation is one of important technical conditions for the track plane design, the track vertical section design and the track design. (1) The curve super-elevation can influence the choice of the technical standards, such as the curve radius and the speed target value. (2) The curve super-elevation can influence the stipulating the technical conditions, such as the maximum and minimum speeds of the curved track, the length of the transition curve, the railway clearance and the model selection of the track. (3) The curve super-elevation can influence the railway traffic safe and economic indexes, such as the railway traffic safety, the passenger comfortableness and the operational and maintenance costs.

Key words: super-elevation; design; influence

当物体运动加速度与其速度不在同一方向上时,物体运动的速度不仅改变其大小,且不断地改变其速度(运动)方向,则称为物体的曲线运动。当加速度与速度方向夹角为 90° 时,物体则作圆周运动。物体在平曲线上运动,为了使物体不脱离运动轨迹,则必须使物体产生向心加速度,即需要一个向心力,实现物体运动速度方向的不断改变。而提供物体向心力通常无外

乎两种情况:一是靠外力;二是通过设置超高,依靠物体重力和支撑力产生水平合力。这必然引起超高、速度、曲线半径和欠超高、偏载系数等物理力学指标的相互作用和影响。在铁路线路设计中,就某一曲线其半径确定后,则曲线超高的设置不仅直接影响通过该曲线的最高速度、最低速度大小、缓和曲线长度和铁路限界的确定,而且直接影响着铁路运输安全、旅客舒适

* 收稿日期:2011-09-12

** 作者简介:陈旭,1961年出生,男,教授级高级工程师。

度、运营成本等运营安全经济技术指标。

1 曲线超高设置条件

1.1 设置曲线超高必要条件

曲线超高其实就是反映曲线运动的一系列特征。列车静止时,主要静力平衡问题,以稳定系数控制。列车运动时,主要反映横向水平离心力和未必平衡加速度力学运动关系。无论规定欠超高、过超高、最大超高,还是限制最高或最低速度,其根本目的是确定轮轨间合理受力状况和运动效果。

1.1.1 最高速度限值

曲线超高设置,在采用最大允许欠超高(h_{qy})的条件下,应满足列车以最高速度通过该曲线,且须保证行车运输安全。则:

$$h + h_{qy} \geq 11.8 \times v_{\max}^2 / R \quad (1)$$

即:通过该曲线最高列车运行速度应不大于 $v_{\max} \leq [(h + h_{qy}) \times R / 11.8]^{1/2}$ 。否则,当通过曲线速度不加限制,超过一定限值时,受离心力作用,车体会内轨悬空向外侧翻,发生重大事故。

1.1.2 最低速度限值

曲线超高设置,列车以较低速度通过曲线时,内轨不仅要承担偏载,且要承担横向内磨。采用最大允许过超高(h_{gy})最大限度的降低内轨偏载和内磨。

$$则: h - h_{gy} \leq 11.8 \times v_{\min}^2 / R \quad (2)$$

即:通过曲线最低列车运行速度不小于 $v_{\min} \geq [(h - h_{gy}) \times R / 11.8]^{1/2}$ 。其最不利条件为曲线上停车,因超高作用,荷载产生偏载,内轨承受巨大的附加荷载。但车体保持静止状态,轮轨作用力保持静态平衡。

1.1.3 速度界限

曲线超高设置,既要满足列车以最高速度通过该曲线,又要限制列车通过曲线最低速度,即,不仅要减少外轨的横向磨耗,而且要降低内轨偏载和内磨。故,最大限度的满足旅客舒适度的要求。则:

$$11.8 \times v_{\max}^2 / R - h_{qy} \leq h \leq 11.8 \times v_{\min}^2 / R + h_{gy} \quad (3)$$

1.2 最大超高设置条件

当车体停止在曲线时,内轨承受最大的偏载,而车体运动时,内轨偏载始终保持减小的趋势,但同时产生磨耗。而当车体高速通过曲线时,过超高可能转变为欠超高,则外轨产生偏载和磨耗。

1.2.1 内轨受力分析

列车停止在曲线时,根据稳定系数 $n = S/2e$ 和最大超高 $h = e \times S/H$ 以及偏载系数 $\beta = 1/n = 2Hh/S^2$ 等式,按照力学几何关系,内轨承受偏载后支承反力 P 有: $N \times S = P \times (e + S/2)$ $N = P \times (1/2 + e/S)$, 而 e/S

$= 1/2n$, 则有 $N = P/2 \times (1 + 1/n)$ 。即:内轨承受偏载后支承反力 N 较平衡状态的内轨承载力 ($N = P/2$) 增加了 $P/2n$ 值。根据不同的超高设置条件下,计算分析相应的稳定系数、偏载系数、偏心距和内轨承受最大的偏载值,如表 1 所示。

表 1 不同超高内轨承受最大偏载计算表

最大超高 h /mm	稳定系数 n	偏心距 e /mm	内轨支承 反力 P/N
51	10	75	1.1
75	6.82	110	1.147
102	5	150	1.2
110	4.65	161.3	1.215
150	3.41	220	1.293
170	3	250	1.333

由表 1 可知:当荷载偏心 1/10 的半个轨距时,即稳定系数为 10,内轨承受反力增加 10%;当荷载偏心 1/5 的半个轨距时,即稳定系数为 5,内轨承受反力增加 20%;当荷载偏心 1/3 的半个轨距时(250 mm),即稳定系数为 3,内轨承受反力增加 33%。此时,对应的最大超高为 170 mm。

受外轨超高和竖向荷载偏向内轨的影响,因为外荷载总值没有变化。内轨承受反力增加多少,相应外轨承受反力就减少多少。由于列车处于静止状态,钢轨仅承受竖向荷载,而无水平方向的荷载力。

列车停止在曲线上为最不利条件,一旦列车开始运动,因受离心力作用,内轨承受反力保持减少的趋势。则 $P = N/2 \times (1 + 1/n)$ 可改为 $P = N/2 \times (1 + \Delta h/511)$ $\Delta h = h - 11.8 \times v^2/R$,可看出超高设定,未必平衡的过超高随列车运行速度增加而减小。

当稳定系数为 3,最大偏心距为 250 mm 时,内轨承受反力增加 33%。若轴重按 25 t 考虑,最大超高达到 170 mm,则内轨承担的偏载增加值为 42 kN。那么对于四轴车体,就有 168 kN(16.8 t)附加力作用在内轨上。可见内轨承担附加力是非常巨大的。

对于客货共线铁路,考虑到轴重大、牵引质量重、行车密度高,轮轨作用集中。从内轨受力分析,通常规定稳定系数不大于 3,最大偏心距不大于 220 mm。最大设计超高不大于 150 mm。

1.2.2 外轨受力分析

当列车高速运行在曲线上,可能产生未必平衡的欠超高,必然向外轨方向产生偏心距,此时外轨不但承受竖向力,还要承受水平力,以平衡因运动而产生的离心力。

若列车以尽可能的高速运行在曲线上,则以稳定

系数为 1、外轨最大偏心距为 $S/2$ 。作用在外轨的水平力和竖向荷载的平衡条件: $F \times H = N \times S/2$, 则 $F = NS/(2H)$ 。即外轨不但要承受全部的竖向荷载 $P = N$ (相当于正常值的 2 倍) 而且需承受 $F = 0.341N$ 水平离心, 才能保持列车平衡不致发生侧翻或颠覆。换言之, 当稳定系数 $n = S/2e = 1$, 外轨最大偏心距为 $e = S/2 = 750 \text{ mm}$ 时, 由 $h = e \times S/H$ 等式得出, 外轨最大虚设超高为 $h = 511 \text{ mm}$, 是构成列车边界平衡条件。此时内轨竖向和横向均不再承受任何力, 而车体则有从切线方向飞出的可能。

理论分析, 受铁路运输轨距 1500 mm (中心距) 限制, 外轨最大偏心距也仅为半个轨距 750 mm , 理论最大超高值为 $h = S^2/2H = 511 \text{ mm}$ 。可由 $h_{\max} = 11.8 \times v_{\max}^2/R$ 得出 $v_{\max} = 6.6R^{1/2}$ 。即, 对于标准轨距 (1500 mm) 铁路的任何曲线, 通过曲线的理论最高速度为该曲线半径平方根的 6.6 倍, 而不是无限大。

由 $F_n/G = h/S \cdot v^2/gR = h/S$ 得出, 未必平衡的离心加速度 $a = v^2/R = gh/S$, 则有 $a = 0.341g = 3.338 \text{ m/s}^2$ 。也就是说, 无论是列车, 还是人体在此状况需承受其自重 34.1% 的水平力, 显然是非常难受和危险的处境。就一般人而言, 竖向或是横向未必平衡的加速度接近 1 m/s^2 时, 可能出现呕吐不适的感觉。应借助辅助措施 (安全带) 的保护。

通常规定, 以克服 15% 的重力加速度 (g) 大小的离心加速度而控制实设超高, 即 $a = v^2/R = gh/S = 0.15g$ 。而通过设置超高提供 $0.1g \approx 1 \text{ m/s}^2$ 的向心力和欠超高控制 $0.05g \approx 0.5 \text{ m/s}^2$ 离心力。则由设计超高 $h = 0.10S = 150 \text{ mm}$, 克服 10% 外部荷载的离心力, $F = 0.1N$ (相当于 25 kN); 由允许欠超高 $h_q = 0.05S =$

75 mm , 控制未必平衡的离心力在 5% 的外部荷载, 克服 $F = 0.05N$ 的水平力。相应的欠超高值为 75 mm 。

综上, 从内轨受力分析, 通常规定稳定系数不大于 3, 最大偏心距不大于 220 mm , 最大离心加速度控制在 $0.15g$ 以内。设计超高最大值不大于 150 mm , 相应的欠超高 $h_q = 75 \text{ mm}$ 。则可得出最高运行速度为: $v_{\max} = 4.3R^{1/2}$ 。也就是说, 实际应用中, 通过任何一条曲线的最高速度因受设计最大超高的控制, 一般不大于该曲线半径平方根的 4.3 倍。

1.3 最大欠过超高设置

1.3.1 允许欠超高 h_q

允许欠超高反映旅客舒适度要求, 也反映外股钢轨磨耗, 主要与客车运行速度和实设超高有关。由式 $h_q = 11.8 v_{\max}^2/R - h$ 得出, 对于一条曲线半径一旦确定, 影响欠超高大小的就是列车运行速度和实施超高。

由式偏载系数 $\beta = 1/n = 2H \times h_q/S^2$ 换算得 $\beta = h_q/511$ 。轮轨偏载系数与欠超高成线性正比关系, 欠超高越大, 外轨偏载值越大, 而内轨减载值也越大, 内外轨受力不等, 易出现侧翻或脱轨不安全现象。即: 外轨竖向荷载为 $P = N/2 \times (1 + 1/n)$ 或 $P = N/2 \times (1 + h_q/511)$, 内轨竖向荷载为 $P = N/2 \times (1 - h_q/511)$, 内外轨增减值为 $\pm h_q/511 \times N/2$ 。

同样, 因欠超高产生未必平衡的离心力, 由式 $F = Nh_q/S$, 水平方向离心力与欠超高成线性正比关系。由式 $h_q = 153 \times a_1$ 可知, 未必平衡的离心加速度与欠超高成线性正比关系。据此, 可根据不同的欠超高, 计算分析相应的偏心距、稳定系数和内外轨受力特征, 如表 2 所示。

表 2 欠超高产生内外轨受力变化对照表

欠超高 h_q /mm	偏心距 e /mm	稳定系数 n	外轨受力		内轨受力	未必平衡离心 加速度/(m/s^2)	一般旅客 (60 kg) 承受力 N
			水平力/kN	竖向力/kN	竖向力/kN		
50	73	10.2	8.333	137.222	112.777	0.327	19.6
70	103	7.3	11.666	142.111	107.888	0.457	27.5
90	132	5.7	15	147	103	0.588	35.3
110	161	4.6	18.333	151.888	98.111	0.718	43.1
153	224	3.3	25.500	162.400	87.600	1.000	60

由表 2 分析得出, 当欠超高分别为 70 mm 、 90 mm 、 110 mm 时, 横向水平力分别是 11.7 kN 、 15 kN 、 18.3 kN , 是极限平衡水平力 $F = NS/(2H) = 85.2 \text{ kN}$ 的 13.7% 、 17.5% 和 21.7% 。横向水平力的大小, 不但确定车体是否沿外轨侧翻的可能性, 而且对轨道结构的横向稳定起着决定性作用, 尤其无缝线路, 横向荷载、附加力的作用是轨道结构稳定的重要技术指标。

当欠超高分别为 70 mm 、 90 mm 、 110 mm 时, 内外轨偏载或减载增值分别为 17.1 kN 、 22 kN 、 26.9 kN , 是标准竖向荷载 $P = N/2$ 的 13.7% 、 17.5% 和 21.7% , 外轨偏载竖向力增大, 不利于轨道结构稳定, 且加大外轨磨耗, 内轨减载竖向力减小, 制造了列车脱轨的不利条件, 尤其在运行速度高, 欠超高值偏大, 再受外部附加条件 (大风) 影响, 列车安全运行存在隐患。

当欠超高分别为 70 mm、90 mm、110 mm 时, 未必平衡的离心加速度分别为 0.457 m/s^2 、 0.588 m/s^2 和 0.718 m/s^2 。对于客货共线铁路而言, 由此产生的横向水平力还是非常之大。

最大离心加速度应控制在 $0.15g$ 以内, 但由设计超高已提供 $0.1g \approx 1 \text{ m/s}^2$ 。故从旅客舒适度考虑, 未必平衡的离心加速一般应控制在不大于 0.5 m/s^2 , 而又考虑到实设超高一般皆小于设计超高, 可适当放宽离心加速度的限值, 但也不得大于 1 m/s^2 。综上欠超高 h_q 规定: 优秀 50 mm, 良好 70 mm, 一般 90 mm, 困难 110 mm。

1.3.2 允许过超高 h_{gy}

允许过超高反映内轨偏磨程度。客货共线运行线路, 且货运量较大时, 过超高不宜过大。在客运专线铁路, 主要限制低速列车运行速度不宜太低, 实设超高不应太大。允许过超高主要反映内股钢轨磨耗, 也应反映旅客舒适度要求, 与低速列车的运行速度和实设超高有关。

由式 $h_g = h - 11.8 v_{\min}^2 / R$ 得出, 对于一条曲线半径一旦确定, 影响过超高大小的就是实设超高和列车运行速度。过超高与实设超高成简单线性正比关系, 实设超高越大、过超高越大, 反之也成立。与速度值的平方成反比大幅度减小, 速度不断增大时, 过超高可转变为欠超高, 速度越小过超高则越大。

对于客货共线铁路, 由于过超高的存在, 内轨不仅要承受竖向偏载, 而且还需承受横向水平附加荷载。在横向水平力的作用下, 致使轮轨紧密接触, 并在竖向偏载共同作用, 加剧内轨磨耗。特别在货车通过对数多、轴重大、牵引质量重的条件下, 内轨磨耗、轨道结构变形失稳影响, 远大于因欠超高产生的结果。

在一条铁路线上, 通常按某一均衡速度设置超高。故曲线半径越小, 实设超高越大。致使半径小、速度低、反而超高大的现象, 加大了低速列车出现过超高的概率。故在客货共线铁路中, 不仅要严格限制过超高, 也需限制列车运行的最低速度。

当列车停止在曲线上, 因运行速度为零 0, 横向水平力也为 0, 轮轨作用是个静态平衡问题。此时“过超高”就是实施超高, 内轨承受较大的竖向偏载, 但也仅影响轨道结构稳定。只要在实施超高中, 稳定系数 $n > 3$ 是安全的。

综上, 过超高 h_g 一般规定: 良好 30 mm, 困难 50 mm。

1.3.3 允许欠过超高和规定 $h_{qy} + h_{gy}$

一条铁路或某一条曲线, 列车运行速度总是有最高速度和最低速度, 难免不出现欠超高和过超高, 也不可避免地产生内外轨磨耗和旅客舒适度降低的现象。

故在铁路设计中, 不但须对实设超高、欠超高、过超高进行限制和规定, 而且须对欠过超高之和作出规定。

由式 $h_q + h_g = 11.8 v_{\max}^2 / R - 11.8 v_{\min}^2 / R$ 可得出: 限制 $h_q + h_g$ 值的大小, 其实就是限制通过曲线(或某区段)的最高速度与最低速度的差值, 简称“速差”。在客货共线铁路(或兼顾低速线的客运专线), 为了合理有效地控制过多、过大欠超高或过超高频繁的出现。不仅要限制通过曲线的最高速度 h_{\max} 与最低速度 h_{\min} 值的大小, 而且要严格控制其最高速度与最低速度差值的大小。也就是说, 在客货共线的铁路上, 即使采用了较大曲线半径, 也不可能运行高速列车, 因为欠超高太大; 在线路平面标准很高的客运专线上, 也不可能运行速度很低的普速列车, 因为过超高太大。过大的速差必然导致过大的欠过超高, 这不仅加剧钢轨、轮对的磨耗和轨道结构的损伤, 而且形成安全的隐患。

1.4 实设超高

通常按照 $h = [11.8(v_{\max}^2 + v_{\min}^2) / R - (h_{qy} - h_{gy})] / 2$ 计算实设超高, 科学准确地反映了实设超高与最高或最低速度和曲线半径以及允许欠过超高的关系, 尤其对于客货共线铁路, 为避免出现偏大的过超高, 实设超高应充分考虑允许欠过超高差 $(h_{qy} - h_{gy})$ 的影响。若按 $v_{\min} = 1/2 v_{\max}$, $(h_{qy} - h_{gy}) / 2 = 10$, 可得出: 客货共线的最大超高宜为 125 mm。也印证了工程实际中, 实设超高一般均小于设计最大超高。

当 $11.8(v_{\max}^2 + v_{\min}^2) / R \leq (h_{qy} - h_{gy})$ 时, 说明设计速度太低或曲线半径太大, 应按最小超高设置曲线超高。当 $h = [11.8(v_{\max}^2 + v_{\min}^2) / R - (h_{qy} - h_{gy})] / 2$ 大于最大超高时, 说明曲线半径选择不合理或者速度太高、曲线半径太小, 应按最大超高设置曲线超高。

客运专线设计中, 通常按照 $h = [11.8(v_{\max}^2 + v_{\min}^2) / R] / 2$ 计算实设超高, 不再过多的考虑允许欠过超高的影响, 可理解 $h_{qy} - h_{gy} = 0$, 忽略其影响因素。

2 曲线超高在铁路设计中关键影响

2.1 对曲线半径的影响

在铁路设计中, 利用力学几何关系, 将向心加速度演变为: $h = 11.8 v^2 / R$ 曲线超高与曲线半径和运行速度的关系。但是一条曲线、一个超高值, 且要运行不同的速度, 即有最低速度、最高速度, 速度值有个取值范围。那么该曲线半径如何确定, 仍是一个较为复杂的问题。

2.1.1 设想选用一个超高 h 既满足最低速度和允许过超高的要求, 又能满足最高速度和允许欠超高的要求。则有: $11.8 v_{\max}^2 / R - h_{qy} \leq h \leq 11.8 v_{\min}^2 / R + h_{gy}$ 或 $11.8 \times (v_{\max}^2 - v_{\min}^2) / R \leq h_{gy} + h_{qy}$ 则既满足最高速

度和最低速度以及允许过超高和允许欠超高的要求曲线半径计算式。 $R_{\min_1} \geq 11.8 \times (v_{\max}^2 - v_{\min}^2) / (h_{gy} + h_{qy})$ 为客货共线铁路和兼顾低速客运专线确定曲线半径的主要计算依据。

2.1.2 对于以旅客列车为主的铁路或客运专线,速度差较小,应以满足最高行车速度要求确定最小曲线半径。曲线设置最大超高 h_{\max} ,欠超高采用规定允许值 h_{qy} 。则:

$R_{\min_2} \geq 11.8 v_{\max}^2 / (h_{\max} + h_{qy})$ 但是 $h_{\max} - h_{\min} \leq h_{gy} + h_{qy} \leq h_{\max} + h_{qy}$ 。说明最小曲线半径 R_{\min_1} 大于 R_{\min_2} 选用值,采用前式计算 R_{\min_1} 更为合理。

2.1.3 为了保证列车运行在曲线上的具有一定抗倾覆,引用稳定系数 $n = S/2e = S^2 / (2H \times h_q)$, 则有 $h_q = S^2 / (2H \times n)$ 。故最小曲线半径: $R_{\min_3} \geq 11.8 v_{\max}^2 / [h$

$+ S^2 / (2H \times n)]$ 可以看出,一般条件 $n = 10$ 时, $h_q = 51$ mm; 困难条件 $n = 3$ 时 $h_q = 170$ mm。即 $h_{gy} + h_{qy} \leq h + h_{qy} \leq h_{\max} + h_{qy}$ 也就是 $R_{\min_2} \leq R_{\min_3} \leq R_{\min_1}$ 按稳定系数计算 R_{\min_3} 在 R_{\min_2} 和 R_{\min_1} 之间,通常在最小曲线半径确定后,可作为稳定检算核对使用。

2.1.4 在客货共线中,考虑到速差大的因素。客运专线中,考虑兼顾较低速度客车运行的条件。基本按照 $R_{\min_1} \geq 11.8 \times (v_{\max}^2 - v_{\min}^2) / (h_{gy} + h_{qy})$ 计算确定最小曲线半径,能够有效地满足列车通过曲线最高速度和最低速度以及允许过超高和允许欠超高的总体要求。通常规定 $(h_{gy} + h_{qy})$ 取值:优秀 100 mm,良好 110 mm,一般 140 mm。按照良好条件, $h_{gy} + h_{qy} = 110$ mm,可不同速度匹配计算相应的最小曲线半径,如表 3 所示。

表 3 允许欠过超高条件下不同速度匹配最小曲线半径计算表

项目	350 ~ 200 km/h	300 ~ 160 km/h	250 ~ 120 km/h	200 ~ 100 km/h	160 ~ 80 km/h	120 ~ 60 km/h
最小半径 R_{\min} /m	9 000	7 000	5 000	3 200	2 000	1 200

从满足最高行车速度要求确定的最小曲线半径,可利用 $R_{\min_2} \geq 11.8 v_{\max}^2 / (h_{\max} + h_{qy})$ 式计算确定,按照

$h_{\max} + h_{qy} = 215$ mm 取值(相当于 $v_{\max} = 4.3 R^{1/2}$),则计算结果如表 4 所示。

表 4 允许最大超高欠超高条件下最小曲线半径计算表

项目	350 km/h	300 km/h	250 km/h	200 km/h	160 km/h	120 km/h
最小半径 R_{\min} /m	7 000	5 000	3 500	2 200	1 400	800

比较分析,按照允许欠过超高之和 $(h_{gy} + h_{qy})$ 较大超高与允许欠超高之和 $(h_{\max} + h_{qy})$ 计算确定的最小曲线半径,相当于提高了一个速度级别。

2.1.5 曲线半径上限。曲线半径大到一定程度,其欠超高和过超高已经很小,不会对舒适度和轮轨磨损产生明显影响;但曲线半径过大,曲线过长,不利于养护维修。当 $R = 12 000$ m 时,偏角 20° 的切线与曲线长度分别达 2 115 m 和 4 188 m; 20 m 弦中点正矢为 4 mm, 10 m 弦中点正矢仅 1.04 mm。考虑到工务养护维修有效性,轨检车技术数据的可靠性,保证线路状况的良好性,最大曲线半径不大于 12 000 m。

2.2 曲线超高对运行速度的影响

铁路设计中,两股钢轨的轨距是确定的,外轨超高值也是受限制的,列车通过曲线时,横向水平离心力和离心加速度总是要受控制的,即通过曲线的速度受超高和轨距的限制不可能任意大。由式 $v = [(h \pm \Delta h) R / 11.8]^{1/2}$ 可知,在曲线半径、实施超高一定时,运行速度受允许欠过超高的影响,速度存在一个取值范围。

2.2.1 通过曲线最大速度

根据 $v_{\max} = [(h + h_{qy}) R / 11.8]^{1/2}$,客货共线取 $h = 125$ mm、 $h_{qy} = 90$ mm,客运专线取 $h = 155$ mm、

$h_{qy} = 60$ mm,得 $h + h_{qy} = 225$ mm。则有: $v_{\max} = 4.3 R^{1/2}$ 为通过曲线最大速度。

2.2.2 通过曲线最小速度

同样,根据 $v_{\max} = [(h - h_{gy}) R / 11.8]^{1/2}$,客货共线取 $h = 125$ mm、 $h_{gy} = 50$ mm,客运专线取 $h = 155$ mm、 $h_{gy} = 80$ mm,得 $h - h_{gy} = 75$ mm。则有: $v_{\max} = 2.5 R^{1/2}$ 。通过曲线最小速度。

2.2.3 不同曲线允许最高、最低速度

曲线半径一旦确定,实设超高的大小将直接影响通过曲线速度的大小。根据 $11.8 v_{\max}^2 / R - h_{qy} \leq h \leq 11.8 v_{\min}^2 / R + h_{gy}$ 式,计算不同曲线的最高速度和最低速度,超高则是确定速度重要因素。计算结果如表 5 所示。

由表 5 看出,在满足过超高 $h_g \geq 60$ mm 时,通过曲线最低速度是有限制的,在 12 000 m 的曲线上,最低速度需在 120 km/h 以上,而在 7 000 m 的曲线上,最低速度则需在 200 km/h 以上。在满足欠超高 $h_q \geq 60$ mm 时,通过曲线最高速度也是有限制的,在 12 000 m 的曲线上,最高速度为 371 km/h 以上,远小于允许最高速度 470 km/h。而在 7 000 m 的曲线上,最高速度仅为 336 km/h 以上,也小于允许最高速度 360 km/h。可见,超高对速度影响的直接性和显著性。

表 5 不同曲线允许最高最低 (v_{\max}/v_{\min}) 计算表

曲线半径/m	h_s/mm	$v_{\min}, h_g < 60$		$v_{\min}, h_g < 40$		$v_{\max}, h_g < 90$		$v_{\max}, h_g < 60$		允许 $h_g + h_q$ /mm	换算 v_{\min} /(km/h)	换算 v_{\max} /(km/h)
		v_{\min} /(km/h)	h_g/mm	v_{\min} /(km/h)	h_g/mm	v_{\max} /(km/h)	h_q/mm	v_{\max} /(km/h)	h_q/mm			
12 000	75	124	60	189	40	410	90	371	60	120	124	371
11 000	85	153	60	205	40	404	90	368	60	120	153	368
10 000	95	172	60	216	40	396	90	362	60	120	172	362
9 000	110	195	60	231	40	391	90	360	60	120	195	360
8 000	120	202	60	233	40	377	90	349	60	120	202	349
7 000	130	204	60	231	40	361	90	336	60	120	204	336

2.3 曲线超高对缓和曲线的影响

缓和曲线之曲率随其长度变化而变,并满足: $\rho \times l = R \times l_0 = \text{常数}$ 。曲线一旦选定,缓和曲线长度是满足行车速度、旅客舒适度、保证列车运行安全的重要技术指标。而曲线超高又是确定缓和曲线长度的主要因素。

2.3.1 超高顺坡不致使车轮脱轨

满足不使车轮脱轨的缓和曲线长度为: $l_2 \geq h/i$ 。按照脱轨条件,根据机车、车辆和轮对构造,并考虑因装车偏载车辆重心偏移致使最外侧车轮悬空的最不利条件,可得不使车轮脱轨的临界超高顺坡度不大于 2‰。计算缓和曲线长度仅为 75 m,不能作为确定缓和曲线长度的控制条件。

2.3.2 超高时变率不使旅客不适

满足此条件的缓和曲线长度为: $l_2 \geq hv_{\max}/(3.6 \times$

$f)$ 和欠超高(或未被平衡离心加速度)时变率不应使旅客不适。满足此条件的缓和曲线长度为: $l_3 \geq hq_{\max}/(3.6 \times b)$,比较两式,则有 $h/f = h_q/b$ 。说明超高时变率与欠超高时变率的限制条件基本雷同。故通常利用超高、最大速度和超高时变率共同确定缓和曲线长度。 $l \geq hv_{\max}/(3.6 \times f)$

2.3.3 根据缓和曲线长度 $l \geq hv_{\max}/(3.6 \times f)$ 和超高顺坡 $i = h/l$ 可换算 $i = 3.6 \times f/v_{\max}$ 可知,当最大速度一定时,超高顺坡率是单位长度超高的变化,超高时变率是指单位时间超高的变化,二者呈线性关系。而实践运营显示,超高时变率 $f \geq 50 \text{ mm/s}$,旅客无大的不良感觉,通常规定超高时变率取值范围在 25 ~ 40 mm/s 之间。据此可计算出不同的速度、不同的超高时变率所对应的超高顺坡率 i 。计算分析如表 6 所示。

表 6 不同速度不同时变率对应的超高顺坡率

时变率 $f/(\text{mm/s})$	25	28	31	35	40	46
超高顺坡率	1/11V ‰	1/(10V) ‰	1/(9V) ‰	1/(8V) ‰	1/(7V) ‰	1/(6V) ‰
速度 $v/(\text{km/h})$						
350	0.257	0.288	0.319	0.360	0.411	0.473
300	0.300	0.336	0.372	0.420	0.480	0.552
250	0.360	0.403	0.446	0.504	0.576	0.662
200	0.450	0.504	0.558	0.630	0.720	0.828
160	0.562	0.630	0.697	0.787	0.900	1.035

据表 6 分析,由式 $l \geq hv_{\max}/(3.6 \times f)$,按照超高时变率分别取 25 mm/s、28 mm/s、31 mm/s 时,规定缓和曲线长度:优秀 $11Vh \times 10^{-3}$,良好 $10Vh \times 10^{-3}$,一般 $9Vh \times 10^{-3}$ 。对于客货共线铁路,路段设计速度大于 120 km/h 时,一般 $10Vh \times 10^{-3}$ 、困难可为 $8Vh \times 10^{-3}$ 。路段设计速度小于 120 km/h 时,一般 $9Vh \times 10^{-3}$ 、困难可为 $7Vh \times 10^{-3}$ 。

2.4 曲线超高对线间距的影响

2.4.1 曲线线间距加宽值

双线曲线地段,列车在曲线上运行,因为车体为刚体结构不能随线路曲度而弯曲,车体纵向中心线与线路中心线不相吻合,使车体两端向线路外侧偏移 W_2 ,车体中部向线路内侧偏移 W_1 ,同时,由于内外两条线

路的曲线超高可能不同,使车体内倾的程度也不同,故与直线地段的线间距相比,曲线地段的建筑限界和相邻两线的线间距应加宽。 $W = 84\,500/R + H \times h_{\max}/3\,000$,超高在线间距加宽中起着重要作用。

2.4.2 曲线隧道断面加宽

同样,双线曲线隧道地段,车体纵向中心线与线路中心线不相吻合,使车体两端向线路外侧偏移 W_2 ,车体中部向线路内侧偏移 W_1 ,同时,由于内外两条线路的曲线超高可能不同,使车体内倾的程度也不同,故曲线隧道地段的建筑限界也应加宽。单双线隧道 $W = 84\,500/R + H/1\,500 \times h$ 和 $W = 169\,000/R + H/1\,000 \times h$,现行国家标准《标准轨距铁路建筑限界》有明确规定。

4 结论

铁路设计和实际运营中,曲线超高主要反映列车在曲线运动中的一系列物理力学特征。列车静止时,主要轮轨的静力平衡问题,以稳定系数控制。列车运动时,主要反映横向水平离心力和未必平衡加速度力学运动关系。无论规定欠超高、过超高、最大超高,还是限制最高或最低速度,其根本目的是确定轮轨间合理受力状况和运动效果。

铁路线路设计中,曲线超高不仅影响曲线半径、速度目标值等主要技术标准的选择,而且直接影响或决定着通过该曲线允许最高、最低速度,缓和曲线长度、铁路限界和轨道选型等技术条件的规定,是线路平面、纵断面设计和轨道设计的重要技术条件,也是直接影响着铁路运输安全、旅客舒适度、运营养护成本等运输安全经济的一项主要技术指标。

但是,在各版《铁路线路设计规范》、《铁路技术管理规程》和《铁路轨道设计规范》中,均没有明确的条文规定,仅在《铁路线路设计规范》(条文说明)中,参

照以往的教科书和《线路设计手册》以及实际运营参数、实验数据等,罗列了一些说明。对工程设计、实际运营缺乏系统性、操作性和指导性。所以,建议对曲线超高应进行系统性研究分析,纳入以后将修改的规范中,并作出明确的条文规定,以便设计者更加全面良好地完成设计。

参考文献:

- [1] TB 10020—2009,高速铁路设计规范[S].
TB 10020—2009, Code for Design of High Speed Railway [S].
- [2] GB 50090—2006,铁路线路设计规范[S].
GB 50090—2006, Code for Design of Railway Line [S].
- [3] 杨岳勤. 新建 250 km/h 客货共线快速铁路主要技术的选择[J]. 铁道工程学报, 2009(7): 38—42.
Yang Yueqin. Choice of Main Technical Parameters for 250 km/h Railway Line for Mixed Passenger and Freight Traffic [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2009(7): 38—42.

(上接第 5 页)

梁)需增加投资 3800 余万元,但可大大减少今后复线施工的难度。

参考文献:

- [1] 中铁上海设计院集团有限公司. 新建铁路宁启线南通东至启东段可行性研究[R]. 上海: 中铁上海设计院集团有限公司, 2010.
China Railway Shanghai Design Institute Group Ltd. The Feasibility Study of Nanjing—Qidong Railway Line New Qidong, Nantong, East [R]. Shanghai: China Railway Shanghai Design Institute Limited, 2010.
- [2] 中铁上海设计院集团有限公司. 新建铁路宁启线南通东至启东段初步设计[R]. 上海: 中铁上海设计院集团有限公司, 2010.
Shanghai Design Institute of China Railway Group Ltd. Nanjing—Qidong Railway Line New Qidong, Nantong, East Section of the Preliminary Design [R]. Shanghai: China Railway Shanghai Design Institute Limited, 2010.
- [3] GB 50090—2006, 铁路线路设计规范[S].
GB 50090—2006, The Railway Line Design Specification [S].
- [4] 铁建设[2005]285号, 新建时速 200 公里客货共线铁路设计暂行规定[S].
Railway Construction [2005] No. 285, The New 200 km Railway Passenger and Freight Lines Were Designed Interim Provisions [S].
- [5] 祝建农, 平志斌, 等. 宁启铁路增建二线环保选线方案研究[J]. 轨道交通, 2010(2): 70—72.
Zhu Jiannong, Ping Zhibin, etc. Nanjing—Qidong Railway Additional Second Line Selection Program of Environmental Protection [J]. Rail Transport, 2010(2): 70—72.
- [6] 刘春明. 铁路选线应综合考虑的主要问题[J]. 铁道勘察, 2007(2): 69—72.
Liu Chunming. The Railway Line Selection Should be Considered a Major Problem [J]. Railway Surveys, 2007(2): 69—72.
- [7] 李洪斌. 张唐重载铁路的综合选线技术[J]. 铁道工程学报, 2011(6): 10—13.
Li Hongbin. Zhang Tang Comprehensive Heavy Rail Line Selection Technique [J]. Journal of Railway Engineering, 2011(6): 10—13.
- [8] 杨元明. 既有铁路扩能改造若干问题探讨[J]. 铁道工程学报, 2010(12): 1—6.
Yang Yuanming. The Existing Rail Capacity Expansion of a Number of Issues [J]. Journal of Railway Engineering, 2010(12): 1—6.
- [9] 吴伟. 平原及山区高速铁路选线的控制因素[J]. 铁道勘察, 2010(1): 87—89.
Wu Wei. Plains and Mountains High-speed Railway Line Selection Control Factors [J]. Railway Surveys, 2010(1): 87—89.