

齿轨铁路的线路设计参数研究^{*}

王 飞^{1,2}

(1. 轨道交通工程信息化国家重点实验室(中铁一院), 710043, 西安; 2. 陕西省铁道及地下交通工程重点实验室(中铁一院), 710043, 西安//工程师)

摘 要 以张家界七星山观光火车项目为研究背景,在参考传统轮轨线路计算理论的基础上,根据齿轨车辆与齿轨线路空间线形的匹配关系,结合齿轨车辆运行的安全、平顺和舒适度要求,从静态计算角度初步拟定了齿轨铁路的线路主要平纵断面设计参数,提出了齿轨线路圆曲线、缓和曲线、线间距、最大坡度、竖曲线、坡段长度的建议取值范围,可为我国齿轨铁路建设和拟定相关技术标准提供参考。

关键词 齿轨铁路; 线路平纵断面设计; 静态计算; 设计参数

中图分类号 U234.2

DOI:10.16037/j.1007-869x.2021.07.047

Research on Design Parameters of Rack Railway Line

WANG Fei

Abstract Taking the tourism train project of Qixing Mountain in Zhangjiajie as the research background, according to the traditional wheel-rail system calculation theory and the matching relationship between the space line and the rack rail vehicles, combined with the safety, smoothness and comfort requirements of rack rail vehicles, the main planar and vertical section design parameters of the line are preliminarily decided from the angle of static calculation. The recommended value range of circular curve, transition curve, line spacing, maximum slope, vertical curve and length of slope for rack railway line are proposed. It provides reference for rack railway construction and formulation of relevant technical standards.

Key words rack railway; line planar and vertical section design; static calculation; design parameters

Author's address State Key Laboratory of Rail Transit Engineering Informatization (FSDI), 710043, Xi'an, China

齿轨铁路是国内引进服务于地形起伏较大的山地城市/景区的交通系统,可服务于国家新型城镇化建设及“交通+旅游”融合发展战略。我国在

客运齿轨铁路方面的研究尚属空白。本文结合张家界七星山观光火车项目的初步设计,对齿轨铁路的线路主要设计参数进行初步探究。

1 研究基础

1.1 概述

齿轨铁路选用齿轨车辆,采用齿轮齿条传动。其与普通的铁路线路最大的区别在于在普通路轨间加装了齿条,通过齿轨机车的齿轮与齿条啮合力提供行走动力,有效克服了普通铁路线路轮轨黏着力不足的问题。因此,齿轨铁路的线路爬坡能力较强。目前,国外已建成的齿轨铁路近180条^[1],有着丰富的应用实例,轨道形式有7种,轨距多为800~1422mm;齿轨车辆上下坡的最高速度可分别达到40km/h和30km/h;线路最大坡度为25%~48%。

1.2 张家界七星山观光火车项目基础参数

张家界七星山观光火车项目是国内第1条采用齿轨铁路承担景区游客旅游观光及景区人员通勤的交通线路,线路全长8.4km^[2]。该项目采用的齿轨车辆由国内自主研发,其编组形式采用“Mc(带司机室动车)+M(齿轨动车)+Mc(带司机室动车)”方式;齿轨采用strub系统,即只采用1条较宽的齿条。车辆总体设计参数见表1。

2 齿轨铁路线路平面设计参数研究

如图1所示,齿轨车辆牵引动力主要依托齿轮驱动,扭矩为 M , c 为牵引点高度, b 为轴距, θ 为坡度角。前后轮牵引力 F_1 、 F_2 与牵引阻力 F 实现坡面纵向平衡。重力 W 与前后轮支撑力 N_1 、 N_2 实现坡面垂向平衡。齿轨车辆的齿轮与齿条啮合的有关力系也实现平衡,故在平面设计参数研究时暂简化齿轮与齿条的接触关系。

^{*} 中铁第一勘察设计院集团有限公司科研项目(院科17-64)

表 1 张家界七星山观光火车项目车辆主要技术参数

技术参数	参数值
轨距/mm	1 000
车辆最高运行速度/(km/h)	30
车辆长/mm	19 872
车辆宽/mm	2 500
车辆高/mm	3 800
车辆地板面距轨面高度/mm	1 100
车辆定距/mm	11 600
转向架固定轴距/mm	2 800
最大允许轴重/t	12
车钩中心线高度/mm	720

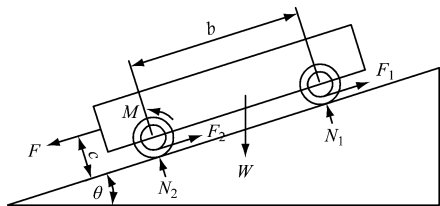


图 1 齿轨车辆纵向受力示意图

2.1 曲线外轨超高

参考国外铁路设计资料,米轨铁路可采用 50 kg/m 标准轨,轨头宽 70 mm^[3],则两股钢轨轨头中心距 S_1 为 1 070 mm。按照外轨超高与圆曲线半径关系,齿轨铁路曲线外轨超高值的计算式为:

$$h = 8.4 v^2 / R \quad (1)$$

式中:

h ——外轨超高值,mm;

v ——列车通过速度,km/h;

R ——圆曲线半径,m。

2.1.1 设计最大外轨超高允许值 h_{\max}

列车通过或停在曲线时,其所受的合力作用点应落在车轮支承点内,此时可保证车辆稳定和行车安全。如图 2 所示, H 为车体重心 C 至轨顶面高度估算值,轨顶连线为 BA ,对应的内外轨超高分别为 0、 h_{\max} ;未被平衡超高 Δh 引起的合力未通过轨道中心 O ,由此产生了偏心距 e 。

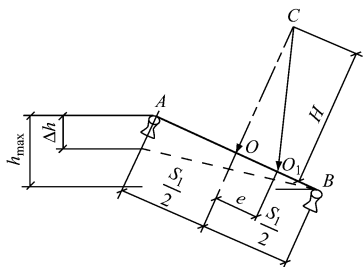


图 2 外轨最大超高计算示意图

车辆稳定度采用稳定系数 n 表示。 n 在一般条件下不应小于 3,其计算式为:

$$n = S_1 / (2e) \quad (2)$$

结合图 2 的几何关系,可得 e 的计算式为:

$$e = H \Delta h / S_1 \quad (3)$$

根据式(2)、(3)的计算,当列车在曲线上停车时,超高全是过超高,此时 n 取 3, H 为 1 200 mm(容许设置的最大超高为 159 mm)。考虑风力、车辆状态不良等因素,综合齿轨线路的运营维护实际及项目特点, n 的取值不大于 5.5,计算得到 h_{\max} 为 85 mm。

2.1.2 欠超高允许值 h_q

考虑旅客乘坐舒适度的计算式为:

$$h_q = S_1 a_L / g \quad (4)$$

式中:

a_L ——未被平衡的离心加速度, m/s^2 ;

g ——重力加速度, m/s^2 。

国内轨道交通经大量实践,规定 a_L 不得超过 0.30 ~ 0.65 m/s^2 ,最大取值为 1.0 m/s^2 。对于齿轨线路,参考一般条件(保证旅客良好的乘坐舒适度的线路条件)下取 a_L 为 0.40 m/s^2 ,困难条件(保证旅客的乘坐舒适度满足最基本要求的线路条件)下取 a_L 为 0.60 m/s^2 。按式(4)计算, h_q 在一般条件时取 40 mm,在困难条件时取 60 mm。

2.1.3 过超高允许值 h_g

齿轨车辆的轴重小,牵引质量单一,过超高时对乘客舒适度的影响与欠超高相同,因此 h_g 的取值与 h_q 相同。

2.1.4 超高限值

结合乘坐舒适度条件,设计超高与欠超高之和的允许值在一般条件时取 140 mm,困难条件时取 160 mm。欠超高与过超高之和的允许值一般条件时取 100 mm,在困难条件时取 120 mm。

2.2 平面曲线半径

2.2.1 最小曲线半径

2.2.1.1 满足舒适度条件的最小曲线半径

受齿轮与齿条的机械磨损及上下行车辆高低速运行要求的影响,齿轨线路需要考虑不同速度列车共线运营的条件,其最小曲线半径的计算式为:

$$R_{\min} = 8.4 (v_{\max}^2 - v_{\min}^2) / (h_q + h_g) \quad (5)$$

式中:

R_{\min} ——高低速匹配时的最小曲线半径,m;

v_{\max} ——设计最高速度,km/h;

v_{\min} ——列车最小旅行速度, km/h。

结合齿轨车辆参数及国外的运营实践, v_{\max} 取 30 km/h, v_{\min} 按 5 km/h 考虑。根据超高限值及式 (5), 计算取整后得到最小曲线半径在一般条件时不小于 75 m, 在困难条件时不小于 65 m。

2.2.1.2 满足车辆安全运行的最小曲线半径

为满足齿轨车辆的安全运行, 避免齿轨啮合不良等安全隐患, 根据目前齿轨车辆构造的要求, 齿轨线路最小曲线半径在一般条件下不小于 120 m, 在困难条件时不小于 90 m。

综上, 齿轨铁路设计最小曲线半径在一般条件时不小于 120 m, 在困难条件时不小于 90 m。

2.2.2 最大曲线半径

结合传统轮轨交通线路测量及养护维修经验, 考虑齿条制造工艺, 齿轨铁路的线路最大曲线半径不宜大于 5 000 m。

2.3 缓和曲线

2.3.1 线型选用

比对外国齿轨铁路及国内轮轨线路的设计经验^[4], 缓和曲线线型采用线形简单、设计方便、长度短且易于铺设养护的直线超高顺坡三次抛物线形式。

2.3.2 缓和曲线长度

2.3.2.1 安全指标

齿轨铁路缓和曲线的取值应不致使车轮脱轨, 其安全指标采用超高顺坡率 i_0 来衡量。按现有的齿轨车辆参数, 计算得 i_0 不大于 4.6‰。考虑必要的安全系数^[5], i_0 在一般条件下不超过 2.0‰, 在困难条件下可取 2.5‰。

2.3.2.2 舒适度指标

齿轨铁路缓和曲线的舒适度指标包括超高时变率 f 和未被平衡横向加速度的时变率 b 。其中: f 的取值应不致使引起乘客不适, 需实测确定; b 应根据工程条件难易度进行取值。

参考表 2 国内相关规范 f 和 b 的取值, 因齿轨铁路速度较低, 一般条件时 f 取 35.0 mm/s, 困难条件时 f 取 40.0 mm/s。考虑到张家界七星山观光火车项目的选线灵活性, b 在一般条件时取 45.0 mm/s, 在困难条件时取 52.5 mm/s。

2.3.2.3 缓和曲线长度 l_0

l_0 应综合满足上述条件并取最大值, 其计算式为:

$$l_0 = \max \{ l_{01}, l_{02}, l_{03} \}$$

(6)

表 2 国内相关规范中 f 和 b 取值				
规范名称	$f/(\text{mm/s})$		$b/(\text{mm/s})$	
	一般条件时	困难条件时	一般条件时	困难条件时
TB 10621—2014 《高速铁路设计规范》	28.0	31.0	23.0	38.0
TB 10098—2017 《铁路线路设计规范》	28.0	32.0	45.0	52.5
TB 10623—2014 《城际铁路设计规范》	28.0	35.0	23.0	38.0
GB 50157—2013 《地铁设计规范》	40.0	40.0	45.0	45.0

式中:

l_{01} ——满足车辆安全性要求的缓和曲线长度, $l_{01} = h/i_0$;

l_{02} ——满足超高时变率条件的缓和曲线长度, $l_{02} = hv_{\max}/(3.6f)$;

l_{03} ——满足欠超高时变率条件的缓和曲线长度, $l_{03} = h_q v_{\max}/(3.6b)$ 。

齿轨铁路 v_{\max} 取 30 km/h, h 取最大值 85 mm。根据式 (6) 及相关参数计算得到其缓和曲线长度的建议值, 如表 3 所示。

表 3 齿轨铁路的线路缓和曲线长度建议值		
曲线半径/m	缓和曲线长度/m	
	一般条件时	困难条件时
1 000	20	20
200	20	20
150	30	25
120	35	30

2.4 夹直线和圆曲线最小长度

为避免 1 节车辆同时跨越在直线、缓和曲线和圆曲线 3 种线型上, 造成车辆运动轨迹过渡不顺畅, 影响运行安全, 齿轨铁路的线路夹直线和圆曲线的最小长度拟定为不小于 1 节车的长度, 即不小于 20 m。

2.5 线间距

参照城市轨道交通线路的相关计算方法, 齿轨铁路的的线路限界校核按列车速度 35 km/h 计算, 供电方式采用接触轨下部授流, 接触轨间距不小于 500 mm, 曲线段设备限界的横向加宽量及竖向加宽量分别取 20 mm 与 25 mm。由此计算得到直线段的最小线间距为 3.6 m, 曲线段需加宽至 3.7 m。因齿轨铁路多用于山区, 曲线较多, 正线线间距暂统一为 3.7 m。

3 齿轨铁路线路纵断面设计参数研究

3.1 最大坡度

3.1.1 列车功率确定的最大坡度 i_{\max}

i_{\max} 主要取决于齿轨列车的功率、牵引性能和制动性能,其计算式为:

$$i_{\max} = (3\ 600\ p_k - w_0 g v_{\max}) / (g v_{\max}) \quad (7)$$

式中:

i_{\max} ——齿轨铁路的最大坡度,‰;

p_k ——牵引每吨列车所需功率,kW/t;

w_0 ——列车以最高速度运行时受到的单位基本阻力,N/kN。

拟定齿轨车辆以设计最高速度 30 km/h 恒功运行, p_k 为 22.5 kW/t。因齿轮提供的牵引力远大于齿轮转动的阻力,可忽略齿轮阻力, w_0 为 3.674 N/kN。由式(7)得, i_{\max} 为 271.8‰。

3.1.2 安全条件所限制的最大坡度

3.1.2.1 工况一

工况一为齿轨车辆损失一半动力,可利用剩余动力在最大坡度条件下运行至指定地点,以 0.5 m/s^2 作为判定车辆在最大坡道上能够启动的最小加速度,即:

$$(F_q - W_q - W_{il})/m \geq 0.5 \quad (8)$$

$$W_{il} = mgw_{il}/1\ 000 \quad (9)$$

式中:

F_q ——车辆启动牵引力,kN;

W_q ——车辆启动基本阻力,kN;

W_{il} ——线路坡道附加阻力,kN;

w_{il} ——车辆的单位坡道附加阻力,N/kN;

m ——列车质量,t。

工况一下,齿轨车辆损失了一半牵引力,此时 F_q 为 687 kN, m 取 168 t,单位启动基本阻力主要考虑粘着轮为 8 N/kN, W_q 为 13 kN,由式(8)~(9)计算可得, w_{il} 最大值 358.3 N/kN。根据《列车牵引计算规程》规定, w_{il} 可用坡道坡度千分数表示,数值相等,则该工况下坡道坡度的最大值为 358.3‰。

3.1.2.2 工况二

工况二为齿轨车辆完全丧失动力时可通过齿轨工程车救援,需满足齿轨车辆最大坡道制动平均减速度不小于 1.2 m/s^2 ,即:

$$(B + W_0 - W_{i2})/m_{i2} \geq 1.2 \quad (10)$$

$$W_{i2} = m_{i2} g w_{i2} / 1\ 000 \quad (11)$$

式中:

m_{i2} ——工况二下联挂列车质量,t;

B ——车辆制动力,kN;

W_0 ——车辆制动基本阻力,kN;

W_{i2} ——线路坡道加速力,kN;

w_{i2} ——车辆的单位坡道加速力,N/kN。

工况二下,列车质量需增加救援工程车质量,故 $m_{i2} = 2m$,即 m_{i2} 取 336 t。此时 B 为 1 342 kN, W_0 为 12 kN,由式(10)、(11)计算可得, w_{i2} 的最大值为 288.8 N/kN,则该工况下坡道坡度的最大值为 288.8‰。

综上,齿轨铁路的最大坡度不应超过 271.8‰。因齿轨列车的停放制动需要满足 AW1(列车满员)工况下 250‰坡道上安全、可靠地停放,并为给后续设计预留空间,齿轨铁路的最大坡度在一般条件时取 235‰,困难条件时取 250‰。如遇桥梁路段,需考虑到结构受力及安全施工条件进行单独计算。

3.2 竖曲线

3.2.1 线型选择

因圆弧形竖曲线测设、养护方便,齿轨铁路的竖曲线线型采用圆曲线形竖曲线。

3.2.2 竖曲线半径

3.2.2.1 安全条件下的竖曲线半径

齿轨列车在凸形竖曲线上运行时,因竖向离心力引起的车辆制动纵向压力及向上分力合力的减载作用可用减载率 q 表示,其计算式为:

$$q = (mv_{\max}^2/3.6^2 + lS)/(mgR_{SH1}) \quad (12)$$

式中:

R_{SH1} ——满足安全的竖曲线半径,m;

l ——车辆钩舌距,m;

S ——制动纵向压力,N。

按最不利情况,保证车轮不脱轨,根据日本相关资料,减载率不得超过 10%。结合公式(12), $R_{SH1} \geq 0.8v_{\max}^2$,最小竖曲线计算取整为 100 m。

3.2.2.2 舒适度条件下的竖曲线半径

舒适度标准以竖向加速度为评价标准,满足舒适度条件的 R_{SH2} 计算式为:

$$R_{SH2} = v_{\max}^2 / (3.6^2 a) \quad (13)$$

式中:

a ——竖向离心加速度, m/s^2 ;

国内外轨道交通线路中^[6], a 在一般条件时取 $0.07 \sim 0.30\text{ m/s}^2$ 。综合齿轨线路的特点, a 在一般条件时取 0.20 m/s^2 ,困难条件时取 0.40 m/s^2 , v_{\max} 取 30 km/h。根据式(13)计算取整, R_{SH2} 在一般条

件时取 400 m,在困难条件时取 200 m。

结合运行安全和舒适性条件,齿轨铁路最小竖曲线半径在一般条件时取 400 m,在困难条件时取 200 m。

3.2.2.3 最大竖曲线半径

比对国内轮轨交通的相关要求,齿轨铁路的最大竖曲线半径不宜大于 4 000 m。

3.2.3 竖曲线设置的坡度差

齿轨列车的质量较小,且采用密接式车钩,相邻坡段的坡度差不受限制,故齿轨线路竖曲线的坡度差可参照 GB 50157—2013《地铁设计规范》规定设置。

3.3 相邻竖曲线间的夹直线长度

夹直线长度需保证齿轨车辆在竖曲线路段的振动衰减完全。经初步研究,不同速度下车体在竖曲线起点处的振动衰减距离约为 7 ~ 11 m,因此相邻竖曲线间最小夹直线长度暂推荐为 15 m。

3.4 最小坡段长度 l_{\min}

l_{\min} 应结合竖曲线半径和相邻坡段最大坡度差计算,其计算式为:

$$l_{\min} = 2 R_{\text{SH}} \Delta i_{\max} / 2\,000 + 0.4 v_{\max} \quad (14)$$

式中:

R_{SH} ——竖曲线半径,m;

Δi_{\max} ——相邻坡段最大坡度差,‰。

齿轨列车按 3 节编组考虑,车辆两端预留 15

m,由式(14)可得 l_{\min} 为 100 m。

4 结语

本文从静态计算的角度出发,参考国内轮轨铁路平纵断面参数计算理论及实际运行经验,以张家界七星山观光火车项目为案例,研究了齿轨铁路的线路平纵断面主要技术参数,初步分析了齿轨铁路的线路曲线半径、缓和曲线、线间距、最大坡度及竖曲线设置、坡段长度的限制条件,并给出了相应的取值范围。本文的研究成果可以在工程设计中作参考运用。

参考文献

- [1] 李发福,刘梦汝.关于齿轨制式车辆的特点及应用于山地旅游项目工程化的要点[J].科学技术创新,2019(18):15.
- [2] 中铁第一勘察设计院集团有限公司.新建张家界七星山观光火车项目初步设计[R].西安:中铁第一勘察设计院集团有限公司,2019.
- [3] 冯慧森.菲律宾北吕宋窄轨铁路线路设计标准研究[J].铁道标准设计,2011(11):24.
- [4] 欧阳全裕,李际胜,杨作刚.城市轨道交通市郊线特点与线路技术参数研讨[J].城市轨道交通研究,2008(9):9.
- [5] 王彦琛.时速 140 km 地铁线路主要技术标准探讨[J].铁道标准设计,2016(7):69.
- [6] 蒋登伟,谢毅,易思蓉,等.莫斯科至喀山高速铁路竖曲线半径研究[J].铁道标准设计,2018(6):25.

(收稿日期:2021-01-05)

(上接第 210 页)

生了裂纹,裂纹产生的比例为 1/6;而装用新闸瓦后先进行小级别的纯空气制动,待闸瓦与踏面的有效接触面积达到 80% 以上后再进行较大级别(包括紧急制动)的纯空气制动,1 列车 48 块闸瓦中仅有 1 块闸瓦产生了裂纹,裂纹产生比例为 1/48,且该裂纹的深度较浅,无需更换闸瓦。

5 结论

1) 应力集中是引起地铁列车新的 JURID J2338 合成闸瓦产生裂纹的主要原因。

2) 新的 JURID J2338 合成闸瓦安装后,地铁列车不宜立即施加较大级别的纯空气制动,闸瓦压力不宜超过 36 kN。建议先采用小级别(闸瓦压力 30 kN 以下)的纯空气制动进行闸瓦磨合,使闸瓦与踏

面有效接触面积达到 80% 以上。

3) 新的 JURID J2338 合成闸瓦安装后,应做好闸瓦运用状态的检查工作。如发现闸瓦出现裂纹,尤其是贯穿型裂纹,应立即予以更换,保证地铁列车的运行安全。

参考文献

- [1] International Union of Railways. Brakes-Brakes with components brake blocks-General conditions for certification of composite brake blocks;UIC 541-4[S]. Paris: International Union of Railways, 2010:2.
- [2] 中国城市轨道交通协会技术装备专业委员会.城市轨道交通车辆电空制动系统装车后的试验规则:CZJS/T 0006—2015[S].北京:中国城市轨道交通协会,2015:7.

(收稿日期:2019-06-28)