第31卷 第3期 石家庄铁道大学学报(自然科学版) Vol. 31 No. 3
2018年9月 Journal of Shijiazhuang Tiedao University(Natural Science Edition) Sep. 2018

基于平稳性的旅游轨道线路平面参数研究

连义平， 牛天河， 王艳艳， 陈小红

(西安铁路职业技术学院,陕西 西安 710014)

摘要:从Sperling模型对铁路线路运行平稳性评价方法的设计理念出发,以陕西省旅游轨道线路设计要求为对象,考虑在陕西省范围内建设旅游轨道线路时,平面参数设计对列车平稳性的影响,通过建立平面曲线半径、运行速度和振动频率3个变量与列车运行平稳性之间的函数关系,分析计算了在线路设计速度80 km/h和100 km/h条件下旅游轨道交通平面设计参数的平稳性指标值,提出了符合运行平稳性标准要求的曲线半径推荐值,为陕西省旅游轨道平面线路设计规范提供依据。

关键词:旅游轨道线路;列车倾覆;Sperling;线路参数

中图分类号:U212.34 文献标志码:A 文章编号:2095-0373(2018)03-0051-05

0 引言

目前,我国旅游轨道所采用的线路主要为1 000 mm轨距线路。1 000 mm轨距旅游轨道的特点是投资低,运行有序安全可靠,对环境破坏小,与环境融合好,特别适合旅游观光类运输需求。其作为景区旅游交通体系可极好地串联各个景点,同时解决景区日益严重的节假日交通拥堵问题,对提升景观形象、提升景区通达、整合旅游资源、带动周边旅游等具有重要意义。随着旅游经济发展,必将形成新的旅游轨道交通产业链——勘察设计产业、设备研发制造产业、施工建设产业和运营服务产业等,成为带动地方经济增长的新引擎[1-2]。

旅游轨道目前已在国内旅游业中得到使用,并有加速发展之势,很多管理部门、设计部门和技术研究单位在旅游轨道设计和运行管理中也积累了一定的经验,但是目前国内尚缺乏可操作性的旅游轨道技术标准,用于指导旅游轨道的设计、建设和运行。总结经验,编制标准,对旅游轨道建设发展具有积极意义,也使旅游轨道建设全过程有一个技术标准进行控制,对保障旅游轨道建设质量、运行安全,以及主管部门有序监督都具有重要意义。

1 线路参数和评价指标计算方法

1.1 圆曲线半径

线路圆曲线半径的设置,很多情况下是受所在地区自然条件的影响,而对于旅游轨道来说,曲线设置会更加频繁,为了保护景区的自然环境,往往需要在线路上设置曲线。但是曲线的设置也需要满足很多的条件,当曲线半径设置较大时,车体运行平稳性较好,但加大曲线半径往往会耗费更多的工程造价。而曲线半径设置较小时,不仅限制列车运行的速度,也给旅客的舒适性带来很大的影响,因此,经济合理地选择曲线半径是线路设计的一个重要课题。

1.1.1 外轨超高设计

(1)舒适性要求。列车在曲线上运行时会产生离心力,故需在外侧钢轨设置一定超高度,使车体产生向心力作用,以平衡离心力,防止车体向外侧倾倒,保证列车运行的安全和平稳[3-5]。根据陕西省旅游轨道交通米轨设计规范,要求该种轨距条件下,曲线地段的外轨超高应设在125~138 mm之间,当列车在该

收稿日期:2017-03-29 责任编辑:车轩玉 DOI:10.13319/j.cnki.sjztddxxbzrb.2018.03.08

作者简介:连义平(1963—),男,副教授,研究方向为轨道交通行车组织及运营。E-mail:763732758@qq.com

连义平,牛天河,王艳艳,等.基于平稳性的旅游轨道线路平面参数研究[J].石家庄铁道大学学报:自然科学版,2018,31(3):51-55.

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

曲线超高情况下以速度为 80 km/h 和 100 km/h 的值运行时,产生的向心力基本可以平稳离心力的影响,不会让游客感到不适。

(2) 安全性要求。当列车在曲线超高区段停车时,列车受到自身重力向内的倾斜分力,此时,当曲线外侧受到的风力达到一定程度时,就有可能造成列车向曲线内侧倾覆的风险。同理,当列车在曲线超高区段运行时,由于离心加速度和内侧风力的作用,列车有向曲线外侧倾覆的风险。

车体在线路上的倾覆力矩[6]

$$M = C_M A h \cdot \frac{\rho v^2}{2} \tag{1}$$

式中,A 为车体侧向面积;h 为车体高度;ρ 为空气密度;C_M 为空气动力学倾覆力矩系数。

根据旅游轨道车体的设计图样,在车体正向受到风力情况下,计算得出旅游轨道车体和车辆倾覆临界风速的关系如表 1 所示。

表1 旅游轨道车体和车辆倾覆临界风速的关系表

车速/(km·h^{-1})	倾覆风速临界值/(m·s^{-1})							
	曲线半径 800 m				曲线半径 1 000 m			
	外轨超高 h = 125 mm		外轨超高 h = 138 mm		外轨超高 h = 135 mm		外轨超高 h = 138 mm	
	向内倾覆	向外倾覆	向内倾覆	向外倾覆	向内倾覆	向外倾覆	向内倾覆	向外倾覆
0	40.9	53.8	39.3	54.5	40.9	53.8	39.3	54.5
80	34.9	48.4	33.9	49.1	34.7	48.6	33.7	49.3
100	36.0	47.9	35.4	50.5	35.7	47.5	35.0	50.1

1.1.2 车速与曲线半径的关系

列车经过曲线地段的受力情况如图 1 所示。

根据三角函数特征,当夹角 θ 特别小时,可以认为 $\sin\theta = \tan\theta$,于是有:$\frac{BC}{AC} = \frac{BC}{AB}$,$\frac{QO}{PO} = \frac{QO}{PF}$。并且由图可知 $\Delta ABC \backsim \Delta POQ$,于是有$\frac{BC}{AC} = \frac{QO}{PO}$,即

$$\frac{h}{L} = \frac{F_N}{G} \tag{2}$$

列车在曲线上运动时产生的向心力为

$$F_N = m\frac{v^2}{R} = \frac{G}{g} \cdot \frac{v^2}{R} \tag{3}$$

结合公式(2)、(3)得出列车在曲线上运行时车速与曲线半径之间的关系为

$$\frac{h}{L} = \frac{v^2}{gR} \tag{4}$$

根据旅游轨道交通设计规范,取 $L = 1\ 000$ mm,代入式(4)得

$$v = 0.36\sqrt{hR} \tag{5}$$

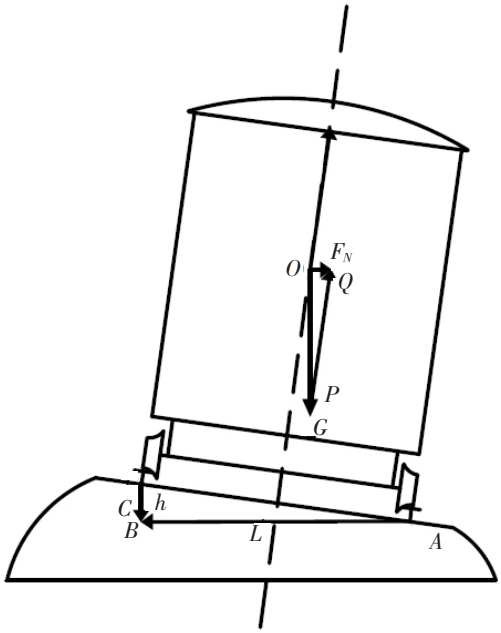

图1 曲线上列车受力分析图

1.2 Sperling 评价模型

1.2.1 评价原理

该评价方法规定的平稳性指标用于评定车辆本身的运行品质和旅客乘坐的舒适度,并认为运行品质由车辆本身来衡量,而舒适度则还与乘客对振动环境的敏感度有关。平稳性指标[5,7]

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

$$W = 0.896\sqrt[10]{\frac{a^3}{f}F(f)} \tag{6}$$

式中，a 为列车加速度，其值为 $a = z_0(2\pi f)^2$; z_0 为列车振荡幅度; f 为列车震荡频率; $F(f)$ 为频率修正函数，对于横向和竖向振动其值不同。

表 2　横向振动频率与修正函数关系表

f	0.5 ~ 5.4	5.4 ~ 26	> 26
$F(f)$	$0.8f^2$ 单增	$650/f^2$ 单减	1 常值

1.2.2　评价方法改进

将列车在运行过程类比为简谐振动，其振动方程[8]为

$$x = A\sin(wt + \varphi) \tag{7}$$

则列车在曲线半径最大处的速度和加速度值可以表示为

$$v = Aw \cdot \cos(wt + \varphi) = 2A\pi f \cdot \cos(wt + \varphi) \tag{8}$$

$$a = -Aw^2\sin(wt + \varphi) = -4A\pi^2 f^2\sin(wt + \varphi) \tag{9}$$

结合式(8)、式(9)，根据列车在曲线上运动规律，得出列车在曲线上运动时的加速度、速度和列车振动频率之间的关系为

$$v = 2\pi f \cdot A\sqrt{1 - \frac{a^2}{16\pi^4 f^4 A^4}} \tag{10}$$

Sperling 平稳性的评价原则是将反映冲动和反映振动动能两项的乘积作为衡量标准来评定车辆运行品质，即

$$W = A \cdot (2\pi f)^3 \times (A \cdot 2\pi f)^2 = (2\pi f)^5 \cdot A^3 = 0.896\sqrt[10]{\frac{a^3}{f}F(f)} \tag{11}$$

因此，通过简谐振动的特点将 Sperling 评价方法改进成为速度和频率对运行平稳性影响的评价，即

$$W = (2\pi f)^5 \cdot A^3 = (2\pi f)^5 \cdot \left[\frac{1}{4\pi^2 f^2}\sqrt{a^2 + \frac{v^2}{4}} + \frac{v^2}{32\pi^2 f^2}\right]^{\frac{3}{2}} \tag{12}$$

式中，A 为振幅; f 为振动频率; a 为加速度。

2　运行舒适度对线路设计参数的影响分析

2.1　评价标准

车体振动加速度由机车车辆与轨道结构状况决定，但从线路的几何结构方面考虑，线路的平纵断面情况，特别是列车通过平面曲线地段时因行车速度变化而产生的欠超高使得车辆产生未被平衡的横向离心加速度，和通过变坡点处竖曲线时产生的垂向离心加速度，是影响舒适度的主要因素[1,9]。Sperling 平稳性指标 W 确定列车平稳性等级见表 3。

表 3　Sperling 平稳性指标 W 确定列车平稳性等级表

平稳性等级	评定	平稳性指标 W
1	优	< 2.5
2	良好	2.5 ~ 2.75
3	合格	2.75 ~ 3.0

2.2　参数匹配

旅游轨道线路平面参数设计时选用曲线的半径在有条件时应尽可能选用较大的值，这样可以改善运营条件以及节省工程费用。最小圆曲线半径与旅游轨道线路运行速度和运营模式有关，既要满足游客乘坐的舒适度，又要满足运行安全和工程费用等条件。

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

根据该旅游轨道交通设计规范,线路上运行的列车车速主要有两种模式:80 km/h 和 100 km/h;在该种速度模式下行驶,曲线的最小半径计算公式为[8]

$$R_{\min}=7.9\frac{v^2}{h+h_g} \tag{13}$$

根据式(13)计算出的最小曲线半径推荐值如表4所示。

表4 最小曲线半径推荐值表

速度模式/(km·h^{-1})	最小曲线半径/m		
	良好	一般	困难
80	404.5	363.7	330.5
100	632	568.3	516.4

曲线半径和平稳性之间的函数关系如图2所示。

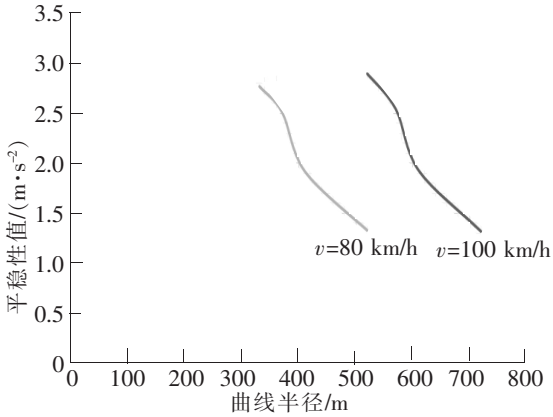

图2 曲线半径和平稳性之间的函数关系图

对上述最小曲线半径进行拟取值并进行舒适度评价分析,得出不同设计速度条件下的不同工况下曲线半径选取推荐值如表5所示。

表5 不同设计速度条件下的曲线半径选取推荐值表

速度	良好			一般			困难		
	最小半径	平稳性值	等级	最小半径	平稳性值	等级	最小半径	平稳性值	等级
80	410	1.95	优	370	2.51	良好	330	2.77	合格
100	640	1.71	优	570	2.54	良好	520	2.89	合格

3 结论

受 Sperling 评价模型构建过程的启发,认为旅游轨道列车在曲线上的运动类似为简谐振动,在列车不考虑自身弹性振动的情况下,将列车在曲线上运动时的最大速度和曲线半径与列车振动频率之间的关系进行公式化,通过对该项目旅游轨道交通线路在设计速度情况下的曲线半径进行振动平稳性评价,得出结论如下:

(1)在运行速度为80 km/h的线路上,在地面条件允许时,曲线半径 R 可设置大于410 m的值,此时的平稳性值为0.92,列车在经过该曲线时平稳性非常好;当地面条件有限制时,线路曲线半径可选择370~410 m之间,此时列车在曲线上的平稳性仍然为"优",但是平稳性值在急剧增大;在地面条件较困难时,线路曲线半径也可选择330~370 m,此时的平稳性值为2.67,列车在经过该曲线时平稳性较好,仍能满足列车安全性的设计要求,但是由于该列车的服务对象为游客,舒适性要求较高,一般不建议采用。

(2)在运行速度为100 km/h的线路上,在地面条件允许时,曲线半径 R 宜设大于230 m的值,此时的平稳性值为1.23;当地面条件有限制时,线路曲线半径可选择230~215 m之间;在地面条件较困难时,线路曲线半径也可选择215~190 m,此时的平稳性值为2.89,虽不影响列车运行安全,但考虑游客舒适性问题,一般不建议采用。

参 考 文 献

[1] 胡浩,王妓娥,金风君.基于可达性的中小文化旅游城市旅游潜力分析[J].地理科学进展,2012,31(6):808-816.
[2] 陆冠东.列车在强侧向风力作用下的倾覆力矩[J].铁道车辆,2008,9:9-10+47.
[3] 林署炯,曾平,林鹏威,等.高速列车引起的地基土振动研究综述[J].石家庄铁道大学学报:自然科学版,2016,29(4):

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

40-46.
[4] 王海涌,党建武,王晓明. 基于舒适度的高速铁路线路设计与优化 [J]. 铁道工程学报,2014(11):30-34.
[5] 仇飞剑. 基于旅客舒适度的高速铁路线路参数研究 [D]. 成都: 西南交通大学,2008.
[6] 王兴举,刘佳,周杨,等. 基于 GIS 铁路网络运营管理和分析系统 [J]. 石家庄铁道大学学报: 自然科学版,2015,28(3):99-104.
[7] 王海涌,党建武,王晓明. 基于线路参数的高速铁路乘坐舒适度评价方法研究 [J]. 兰州交通大学学报,2015,34(4):53-56.
[8] 刘转华. 铁道车辆运行平稳性评价方法研究 [D]. 成都: 西南交通大学,2007.
[9] 高云娇,娄国充,宋杨. 铁路隧道下穿施工引起既有铁路线路变形规律研究 [J]. 石家庄铁道大学学报: 自然科学版,2014,27(1):31-34+39.

Analysis and Research on the Plane Parameters of Tourism Rail Transit Lines Based on Stationarity

Lian Yiping, Niu Tianhe, Wang Yanyan, Chen Xiaohong

(Xi'an Railway Vlcational and Technical Institute, Xi'an 710014, China)

Abstract: In this paper, the Sperling model is used to design the evaluation method of railway line running stability. The influence of the plane parameters on the train stability in the construction of the tourist track in Shaanxi Province is studied based on the requirements of the design of Shaanxi tourist track line. The relationship between the three variables of the plane curve radius, the running speed, and the vibration frequency and running stability of the train is established. This paper analyzes and calculates the smoothness index value of the plane parameters of the rail transit under different speeds of 80 km/h and 100 km/h, respectively. The recommended value of curve radius is put forward, which can meet the requirements of the standard of running stability, to provide the basis for the design of the track plane circuit in Shaanxi province.

Key words: tourist track lines; train overturning; Sperling; line parameters

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net