

文章编号:1006-2106(2006)03-0008-05

小半径曲线无缝线路稳定性有限元分析^{*}

罗信伟^{**} 雷晓燕 冯青松

(华东交通大学, 江西 南昌 330013)

摘要:研究目的:利用有限元法解决在温度力作用下无缝线路特别是小半径曲线的臌曲失稳问题。

研究方法:建立了包含钢轨、扣件、轨枕和道床阻力为一体的轨道框架模型,推导了相应的数值计算公式并编制了有限元程序。该模型还考虑了横向力对无缝线路稳定性的影响。

研究结果:得到了不同工况下钢轨横向位移-温度曲线,并与“统一公式”进行了比较。

研究结论:有限元方法在研究无缝线路稳定性方面是可行和有效的;有限元方法能计算出不同工况下的轨道结构从锁定轨温直到破坏全过程的横向位移,相对于“统一公式”,该方法可考虑各种复杂的工况,能更精确地反映轨道横向变形的趋势,从而为铁路工务部门养护维修提供理论指导。

关键词:无缝线路;稳定性;温度力;小半径曲线;有限元;统一公式

中图分类号:U213 **文献标识码:**A

Finite Element Method for Analyzing the Stability of Continuous Welded Rail Track on Minor Radius Curve

LUO Xin-wei, LEI Xiao-yan, FENG Qing-song

(East China Jiaotong University, Nanchang, Jiangxi 330013, China)

Abstract: **Research purposes:** The paper aimed at resolving the stability of continuous welded rail (CWR) under temperature forces by the finite element method, especially for minor-radius-curve CWR.

Research methods: A track-frame model has been developed, which includes rails, pads, sleepers and ballast resistance, and the finite element program has been exploited using numerical formulation. The influence of cross force was also considered in this model.

Research results: The dependence of the CWR displacement on temperature figures in different work conditions were arrived, and the result was compared with the result of universal formulation.

Research conclusions: Finite element method is effective on analyzing the stability of CWR. And it can analyze the lateral displacement of CWR track from locked-in temperature to damage. Compared with the universal formulation, the method can accurately present the trend of the lateral displacement of track in several work conditions, and provide an evidential material for railway department in planning of maintaining the track.

Key words: continuous welded rail; stability; temperature stress; minor radius curve; finite element method; universal formulation

无缝线路是铁路轨道结构的一大变革,它与有缝线路相比,不仅具有平顺性好、轮轨冲击力小、列车运

行平稳、旅客舒适等优点,还可大大降低线路维修费用和机车车辆的修理费用。但是无缝线路的铺设及养护

^{*} 收稿日期:2005-11-21

^{**} 作者简介:罗信伟,1977年出生,男,在读硕士研究生。

维修要求也较高,各国铺设无缝线路都规定了禁区,但随着新技术、新材料及新设计理论的应用,这些禁区正在逐步缩小。近 10 年来,欧美、日本和前苏联在正线上容许铺设无缝线路的最小曲线半径已有很大突破。

根据《无缝线路铺设养护维修办法》(TB 2098-89)规定,我国铺设无缝线路的曲线半径不能低于 400 m,最高轨温差不得超过 72 ℃。但随着轨道结构和养修手段的加强,上述限制有所突破。我国 1987 年在呼和浩特铁路局最大轨温差 94 ℃的条件下在 400 m 半径下成功铺设了无缝线路,并采取了增加轨枕配置数、加宽并堆高道碴、增设防胀挡板等措施,取得了较好的效果。北京铁路局秦皇岛工务段在半径 350 m,年最大温差 83 ℃的条件下成功铺设了无缝线路。最近几年,相继有不少铁路局进行了铺设小半径无缝线路的尝试,如上海铁路局就在外福线上铺设了半径为 300 m 的曲线无缝线路试验段,目前运营情况较好,可见在小半径曲线上铺设无缝线路仍然有潜力可挖。

从理论上进一步研究无缝线路的稳定性,具有重要的意义。目前铁路工务部门主要采用“统一公式”对轨道稳定性进行分析,本文将采用有限元方法进行分析并与“统一公式”进行比较。

1 目前我国主要采用的研究方法

1.1 解析法——“统一公式”^[3]

铁科院和长沙铁道学院为主的课题组提出的“统一无缝线路稳定性计算公式”,简称“统一公式”,该法假设变形曲线为多波正弦曲线,分定弦长和定曲率两种方法,其中以定曲率法应用较多:

$$P = \frac{\beta EI \frac{\pi^2}{l^2} (f - f_{oe}) + \frac{4}{\pi^3} Q l^2}{f + f_{oe} + \frac{4 l^2}{\pi^3 R'}} \quad (1)$$

$$l^2 = \frac{1}{Q} \left[B_1 + \sqrt{B_1^2 + \frac{\pi^3}{4} (f + f_{oe}) B_1 R' Q} \right] \quad (2)$$

式中 $B_1 = \frac{\beta EI \pi}{R'}; \frac{1}{R'} = \frac{1}{R} + \frac{8 f_{op}}{l^2}$
其中 f ——允许变形矢度 (cm);
 f_{oe}, f_{op} ——钢轨初始弹性、塑性变形 (cm);
 Q ——钢轨变形矢度 $f = 0.2$ cm 时的等效道床横向阻力 (N/cm)。

1.2 有限元方法^[1]

1.2.1 计算模型

无缝线路 60 kg/m 钢轨,钢轨弹性模量 $E = 2.1 \times 10^5$ MPa,钢轨的热膨胀系数 $\alpha = 1.18 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$,两钢轨间标准轨距 1.44 m;配置 1 760 根/km 预应力钢筋

混凝土枕,轨枕弹性模量 $E = 1.5 \times 10^4$ MPa,轨枕间距 0.568 m,轨枕长度 2.6 m,轨枕断面宽 0.25 m,高 0.20 m;扣件弹簧单元弹性系数 $k_{fx}, k_{fy}, k_{\theta}$ 分别为 0.833×10^4 N/cm、 5.0×10^4 N/cm、 2.07×10^4 N·cm/rad;假设初始不平顺的形状对称,不平顺矢度为 6 mm,不平顺弦长 6.248 m;道床肩宽采用 40 cm;钢轨一端简化为固定端约束,另一端为沿 Y 方向的定向支座,沿线路纵向取 141.5 m×0.568 m 长度作为计算模型(以下除特殊注明外,均采用上述假设值)。建立模型如图 1。

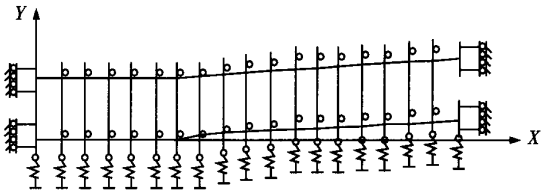


图 1 无缝线路稳定性有限元模型

图 1 中,钢轨和轨枕采用平面梁单元,且考虑剪切变形的影响;利用弹簧单元模拟钢轨与轨枕的扣件连接,扣件弹簧单元 X、Y 方向的弹性系数分别记为 k_{fx} 、 k_{fy} ,扭转弹性系数记为 k_{θ} ;轨枕看作弹性基础上的梁单元,在结点上通过弹簧元件与刚性基础相连,道床沿 X、Y 方向的弹性分别用弹性系数 k_{bx} 、 k_{by} 来表示,扭转弹性系数则用 $k_{b\theta}$ 表示;假设初始弯曲的形状是对称的,则可用图 1 表示整个模型的一半。

1.2.2 有限元方程

符号说明:
 k ——字母下横杠代表矩阵;
 k^e ——右上角 e 代表每个单元(的矩阵);
 K ——大写字母代表系统(的刚度矩阵);以下同。
假设 a 为经过升温 ΔT 以后梁的位移,
 $a = \{u_1 \ v_1 \ \theta_1 \ u_2 \ v_2 \ \theta_2 \ \dots \ u_n \ v_n \ \theta_n\}^T$
无缝线路失稳是一个非线性问题,应变与位移的非线性几何关系为:

$$\underline{\varepsilon} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_b \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{d_u}{dx} \\ \frac{d^2 v}{dx^2} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \frac{1}{2} \left(\frac{du}{dx} \right)^2 \\ \frac{1}{2} \left(\frac{dv}{dx} \right)^2 \\ 0 \end{Bmatrix} = \underline{\varepsilon}_e + \underline{\varepsilon}_N \quad (3)$$

式中, ε_x 和 ε_b 分别为轴向和弯曲应变, ε_e 代表线性应变, ε_N 代表非线性应变。

$$\Delta T \text{ 时的温度应变 } \underline{\varepsilon}_T = \{\alpha \Delta T \ 0\}^T \quad (4)$$

式中, α 是热膨胀系数。

根据能量法,梁单元升温后的势能为

$$U^e = U_B^e + U_R^e + U_\sigma^e \quad (5)$$

式中, U_B^e 为梁内的应变能, U_R^e 为约束弹簧的应变能,

U_e 为初应力产生的能量。

式(5)又可写成

$$U^e = U_e^e + U_N^e \quad (6)$$

式中, U_e 为线性应变引起的势能, U_N 为非线性应变引起的势能。

由势能驻值原理, 对式(6)取一阶变分

$$\begin{aligned} \delta U &= \delta \sum (U_e^e + U_N^e) \\ &= \sum \delta (\alpha^e)^T (\underline{K}_e^e \alpha^e - \underline{Q}_T^e + \underline{K}_R^e \alpha^e + \underline{Q}_{\sigma 0}^e) + \sum \delta (\alpha^e)^T \underline{K}_N^e \alpha^e \\ &= \delta \alpha^T \{ (\underline{K}_e + \underline{K}_R + \underline{K}_N) \alpha - \underline{Q}_T + \underline{Q}_{\sigma 0} \} \end{aligned} \quad (7)$$

令 $\delta U = 0$, 得:

$$(\underline{K}_e + \underline{K}_R + \underline{K}_N) \alpha = \underline{Q}_T - \underline{Q}_{\sigma 0} \quad (8)$$

式中

$$\underline{K}_e = \sum_e \underline{k}_e^e$$

$$= \sum_e \begin{bmatrix} \frac{EA}{l} & 0 & 0 & -\frac{EA}{l} & 0 & 0 \\ & \frac{12EI}{l^3} & -\frac{6EI}{l^2} & 0 & -\frac{12EI}{l^3} & -\frac{6EI}{l^2} \\ & & \frac{4EI}{l} & 0 & \frac{6EI}{l^2} & \frac{2EI}{l} \\ & & & \frac{EA}{l} & 0 & 0 \\ \text{对称} & & & & \frac{12EI}{l^3} & \frac{6EI}{l^2} \\ & & & & & \frac{4EI}{l} \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\underline{K}_R = \sum_e \underline{k}_R^e = \sum_e \begin{bmatrix} k_x & 0 & 0 & -k_x & 0 & 0 \\ & k_y & 0 & 0 & -k_y & 0 \\ & & k_\theta & 0 & 0 & -k_\theta \\ & & & k_x & 0 & 0 \\ \text{对称} & & & & k_y & 0 \\ & & & & & k_\theta \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\underline{K}_N = \sum_e \underline{k}_N^e = \sum_e (\sigma_{ex} - E\alpha\Delta T + \sigma_{0x}) \times$$

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{l} & 0 & 0 & -\frac{1}{l} & 0 & 0 \\ & \frac{6}{5l} & \frac{1}{10} & 0 & -\frac{6}{5l} & \frac{1}{10} \\ & & \frac{2l}{15} & 0 & \frac{1}{10} & -\frac{l}{30} \\ & & & \frac{1}{l} & 0 & 0 \\ \text{对称} & & & & \frac{6}{5l} & \frac{1}{10} \\ & & & & & \frac{2l}{15} \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\underline{Q}_T = \sum_e \underline{Q}_T^e = \sum_e \int \underline{B}_e^T \underline{D} \underline{\varepsilon}_T dx$$

万方数据

$$= \sum_e [-EA\alpha\Delta T \quad 0 \quad 0 \quad EA\sigma\Delta T \quad 0 \quad 0]^T \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \underline{Q}_{\sigma 0} &= \sum_e \underline{Q}_{\sigma 0}^e = \sum_e \int \underline{B}_e^T \underline{\sigma}_0 dx \\ &= \sum_e [-\sigma_{0x} \quad 0 \quad 0 \quad \sigma_{0x} \quad 0 \quad 0]^T \end{aligned} \quad (13)$$

\underline{k}_e^e 为通常的梁单元线性刚度矩阵, \underline{k}_N^e 是与位移有关的单元刚度矩阵, 称大位移矩阵, \underline{k}_R^e 是与约束弹簧刚度有关的矩阵, 称之为约束刚度矩阵。式(8)即为具有初始弯曲的梁在温度力作用下挠曲变形的非线性平衡方程。因篇幅有限, 在此不一一列出推导过程, 详见文献[1]、[5]。

1.2.3 轨枕梁单元

轨枕采用考虑剪切变形的弯曲梁单元, 其单元刚度矩阵同钢轨梁单元的线性刚度矩阵。

1.2.4 弹簧单元

弹簧单元模拟钢轨与轨枕的扣件连接, 其刚度矩阵见式(10)。

1.2.5 约束边界条件

利用弹簧表示道床对轨枕的弹性约束, 在每一个轨枕结点上作用一组弹簧, 其弹性系数分别为 k_{bx} 、 k_{by} 、 $k_{b\theta}$ 。

1.2.6 计算过程

为了能够得出一条完整的无缝线路挠曲失稳过程曲线, 采用增量法求解, 计算中, 在每一荷载增量步中进行两次计算, 首先令式(8)中的 $\underline{K}_N = 0$, 用高斯消元法求解, 得到增量线性位移 $\Delta\alpha_m'$, 进而可求得增量线性应变 $(\Delta\sigma_e)'_m$ 和线性应力 σ_e' 。根据 σ_e' 求得 \underline{K}_N , 再解式(8)即可得到 $m+1$ 荷载步时梁的总位移和总应力。由此, 便可得出梁在升温过程中无缝线路挠曲失稳变形曲线。当变形达到一定时, 结构处于失稳临界状态。

2 计算结果

2.1 统一公式计算结果

选取参数如下:

60 kg/m 钢轨线路, 钢轨弹性模量 $E = 2.1 \times 10^5$ MPa, 钢轨横截面积 $A = 77.45 \times 2$ cm², $\beta = 1.0$, $f = 0.2$ cm, $f_{oe} = 0.3$ cm, $f_{op} = 0.3$ cm。当初始不平顺弦长取 $l_0 = 4$ m时, 计算结果如表 1。

表 1 “统一公式”计算结果

曲线半径 R/m	允许变形 矢度 f/cm	等效道床阻力 $Q/(N \cdot cm^{-1})$	允许温升幅度 $\Delta T/^\circ C$	
			不考虑 安全系数	安全系数 $K=1.25$
300	0.2	87	38.9	31.1
400	0.2	87	45.0	36.0
500	0.2	87	49.7	39.7
600	0.2	87	53.2	42.6

2.2 有限元法计算结果

2.2.1 道床横向阻力的影响

(1) 不同道床肩宽的影响

取 $R=300\text{ m}$ 、 $R=500\text{ m}$ ，初始弯曲 $f=6\text{ mm}$ 的曲线轨道进行稳定性分析，分别在道床肩宽分别为 40 cm 、 30 cm 的条件下钢轨横向位移和温度关系曲线如图 2。

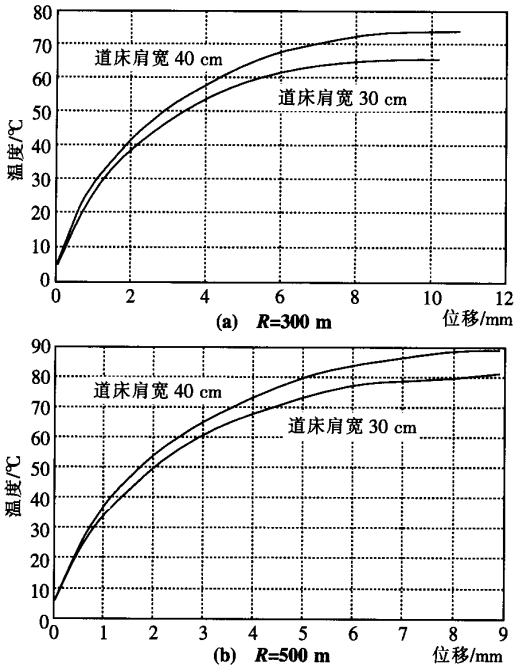


图 2 不同道床肩宽的影响

道床横向阻力的取值依据文献[3]，用单根轨枕的横向阻力 Q 和道床单位横向阻力 q 表示：

$$q = Q/a$$
$$q = q_0 - By^Z + Cy^{1/N}$$

(14)

式中： q ——单根轨枕下的道床横向阻力，单位为 N/根 ；

y ——轨枕横向位移，单位为 cm 。

横向道床阻力采用参数如表 2：

表 2 横向道床阻力参数

线路状况	q_0	B	Z	C	N
道床肩宽 30 cm	14	396	1	522	4/3
道床肩宽 40 cm	15	444	1	583	4/3

(2) 轨枕失效的影响

取 $R=300\text{ m}$ 、 $R=500\text{ m}$ 初始弯曲 $f=6\text{ mm}$ 的曲线轨道，分别对轨道结构在正常情况、不平顺中心处 1 根轨枕、2 根轨枕完全失效时进行稳定性分析，钢轨横向位移和温度关系曲线如图 3。

万方数据

2.2.2 轨道初始不平顺的影响

(1) 线路初始弯曲矢度的影响

取 $R=300\text{ m}$ 、 $R=500\text{ m}$ 的曲线轨道，分别对初始弯曲 $f=0\text{ mm}$ 、 6 mm 、 9 mm 、 12 mm 进行稳定性分析，钢轨横向位移和温度关系曲线如图 4。

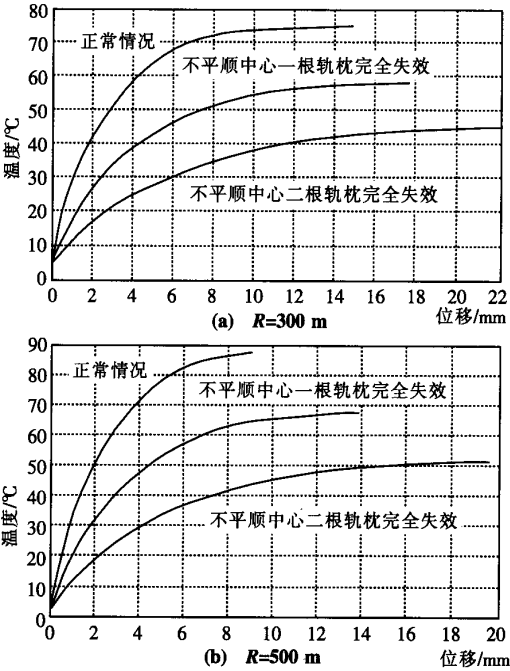


图 3 轨枕失效的影响

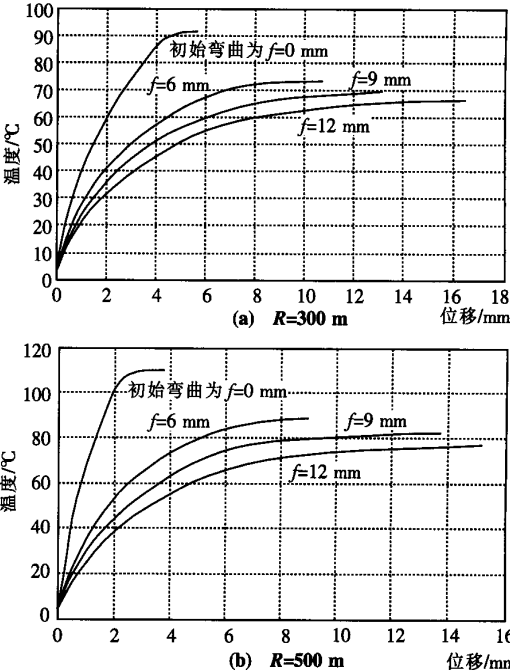


图 4 轨枕失效的影响

(2) 不同曲线半径的影响

取直线 $R=300\text{ m}$ 、 $R=400\text{ m}$ 、 $R=500\text{ m}$ 、 $R=600\text{ m}$

的曲线轨道,初始弯曲 $f=6\text{ mm}$ 进行稳定性分析,钢轨横向位移和温度关系曲线如图 5。

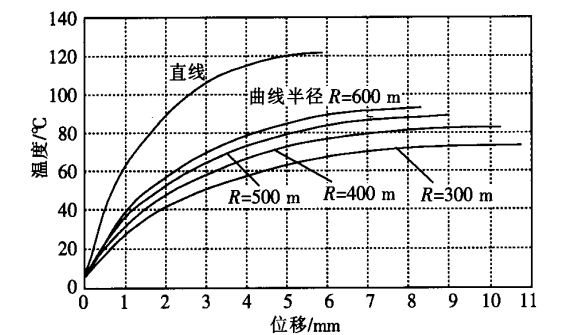


图 5 不同曲线半径的影响

2.2.3 考虑横向力的情况

当列车行驶在轨道上时,由于小半径曲线受到的径向力较大,所以本文在模型上考虑了温度及列车通过时产生的径向力的影响。

分析模型:按照《曲线钢轨调边使用技术条件研究报告》中的横向力值分别对 $R=300\text{ m}$ 、 $R=500\text{ m}$ 的小半径曲线进行稳定性分析。考虑到列车在通过曲线轨道时,其横向冲击力主要为前轮对曲线外股钢轨的作用力,近似地将其均布于曲线外股钢轨上,如图 6。计算结果如图 7。

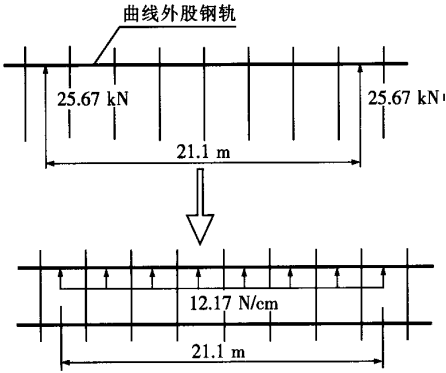


图 6 横向力加载示意图

3 结论

(1) 由于“统一公式”只计算 $f=2\text{ mm}$ 的情况,故二者只能在位移为 2 mm 且“统一公式”计算结果中不考虑安全系数的情况下对温升幅度进行比较,比较结果如表 3。

表 3 “统一公式”与有限元法计算结果的比较

曲线半径 R/m	统一公式计算结果/ $^{\circ}\text{C}$	有限元计算结果/ $^{\circ}\text{C}$
300	38.9	41.4
400	45.0	48.0
500	49.7	53.1
600	53.2	57.5

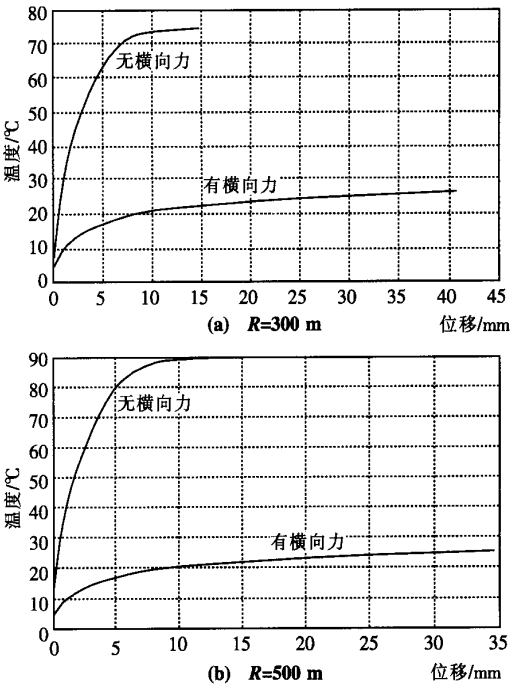


图 7 横向力的影响

通过比较我们发现,二者计算结果比较接近,说明有限元方法在研究无缝线路的稳定性方面是可行的。

(2) 有限元方法不必假设变形曲线,便于模拟各种线路状态,并且它能计算出轨道结构从锁定轨温直到破坏全过程的横向位移,相对于“统一公式”,该方法更精确地表现出了轨道横向运动的趋势。在文献 [6] 中,曾提出了适当修改允许铺设无缝线路的最大轨温幅度的建议,本文的计算结果正为此建议提供了依据;同时,本文计算结果也能为铁路工务部门制定养护维修的计划及措施提供依据。

(3) 道床肩宽的大小影响道床阻力的大小,从而影响轨道的稳定性,道床肩宽为 40 cm 与道床肩宽为 30 cm 的情况相比,前者的稳定性相对较好,故铺设无缝线路时应该适当考虑加大道床肩宽,以增大道床阻力。

(4) 轨枕失效对轨道稳定性影响很大,应加大对轨道的检查力度,尽量避免空吊板的出现。

(5) 曲线半径越小,其稳定性越差,因此在小半径曲线上铺设无缝线路应慎重,铺设后应当加大监控力度,及时消除事故隐患。

(6) 在轨道上加上横向力后,轨道稳定性大幅度下降,可见列车横向力对其影响较大,应予以高度重视,但本例所用假设值得进一步商榷,以寻求更好的横向力模型。

(7) 根据南昌铁路局的小半径曲线铺设情况和 (下转第 83 页)

理。

(7) 特许期的延长。一般由于政府履行义务的延误或不可抗力或情势变迁,造成投资方和项目公司工期延误或实质性损失,而这些损失又不能由政府来补偿,双方可协商延长特许期。

(8) 特许协议还将约定:项目工程的基本内容、建设工期要求、资金到位要求、资金筹措方案,建设用地、拆迁的执行标准,包括工程永久性用地、工程临时性用地,政府已完成的前期工作的处理、前期工作费用的承担,项目年度基本建设计划、设计变更、工程招标、工程监理、项目开工前审计、工程的监督、检查,项目工程交工验收和竣工验收、项目放弃,以及项目的转让和周边新项目的建设。政府最关心的将是项目公司股权的转让,一般在建设期不能接受初始投资方控股地位的转让。企业最关心的将是在投资项目的平行地区(一般30 km左右)建设新的高等级公路,一般是在运营期项目获得赢利前或交通流量达到设计流量前,不能接受政府在平行地区又投资新的高等级公路。

5.4 融资协议

项目融资的成功与否,是项目成功建设的关键,是企业以少量资金吸引主要资金建设高投资项目的关键所在,目前我国高速公路 BOT 项目建设的资金结构主要形式是:初始权益投资人投入35%的资本金,和初始债务投资人也就是商业银行投入的65%的商业贷款。因此融资协议主要是解决商业银行投入的65%的商业贷款,并且是以项目收费还贷为基础的贷款协议。其主要内容包括:

(1) 资金的数量和用途;

- (2) 利率及偿还期限;
- (3) 佣金及其它费用;
- (4) 贷款的先决条件;
- (5) 项目未来收入的使用。

5.5 高速公路 BOT 项目的法律框架

其还包括征地、拆迁合同,工程、物资、设备的采购合同,保险合同、运营和维护合同、担保文件等,这里不再一一叙述。

6 结束语

我国的高速公路发展到今天,已经初步形成了框架,建议,为加快地区经济的均衡发展,政府应该将有限的资金投入到公用事业、市政设施和有较大的国民经济效益(社会效益)的项目,而具有较好的财务效益的项目可以通过招商引资的方式由企业或民间资本来投资建设,使政府、企业达到双赢的目标。

参考文献:

- [1] 广西苍梧至广东郁南段高速公路建设、经营、移交合同书[S].
- [2] 广西岑溪至苍梧段高速公路建设、经营、移交合同书[S].
- [3] 山东菏泽至河南商丘段高速公路建设、经营、移交合同书[S].
- [4] 河南平舆至正阳段高速公路建设、经营、移交合同书[S].
- [5] 王守清. 特许经营项目融资[R]. 北京:清华大学,2005.

(编辑 王英娜)

(上接第12页)

本文计算结果,发现在温升幅度不大的地区,若适当加强轨道结构及监控措施,可以考虑铺设 $R=300\text{ m}$ 的无缝线路。

(8) 根据本文研究结果可以看出无缝线路温升幅度与轨道横向位移的关系曲线,是否可适当增大横向位移的允许限值,是值得进一步探讨的问题。

参考文献:

- [1] 雷晓燕. 轨道力学与工程新方法[M]. 北京:中国铁道出版社,2002.
- [2] 童大坝. 铁路轨道[M]. 北京:中国铁道出版社,1996.
- [3] 广钟岩,高慧安,陈岳源,等. 铁路无缝线路(修订版)

[M]. 北京:中国铁道出版社,1995.

- [4] 卢耀荣. 无缝线路研究与应用[M]. 北京:中国铁道出版社,2004.
- [5] 崔建初. 小半径曲线铺设无缝线路的研究与应用[J]. 铁道建筑,2003,(3):49-50.
- [6] 卢耀荣. 对修订无缝线路允许铺设条件的建议[J]. 铁道标准设计,1998,(4):46-48.
- [7] 吕光棋. 山区铁路小半径曲线地段铺设无缝线路探讨[J]. 铁道建筑,2004,(6):74-76.
- [8] 郭军锋,陈广兴. 大坡道小半径区段铺设全区间无缝线路[J]. 铁道建筑,2001(4):5-7.

(编辑 慕成娟)

作者: [罗信伟](#), [雷晓燕](#), [冯青松](#), [LUO Xin-wei](#), [LEI Xiao-yan](#), [FENG Qing-song](#)
作者单位: [华东交通大学](#), [江西](#), [南昌](#), [330013](#)
刊名: [铁道工程学报](#) 
英文刊名: [JOURNAL OF RAILWAY ENGINEERING SOCIETY](#)
年, 卷(期): 2006 (3)
被引用次数: 3次

参考文献(8条)

1. [雷晓燕](#) [轨道力学与工程新方法](#) 2002
2. [童大坝](#) [铁路轨道](#) 1996
3. [广钟岩](#); [高慧安](#); [陈岳源](#) [铁路无缝线路](#) 1995
4. [卢耀荣](#) [无缝线路研究与应用](#) 2004
5. [崔建初](#) [小半径曲线铺设无缝线路的研究与应用](#) [期刊论文]-[铁道建筑](#) 2003 (03)
6. [卢耀荣](#) [对修订无缝线路允许铺设条件的建议](#) 1998 (04)
7. [吕光棋](#) [山区铁路小半径曲线地段铺设无缝线路探讨](#) [期刊论文]-[铁道建筑](#) 2004 (06)
8. [郭军锋](#); [陈广兴](#) [大坡道小半径区间铺设全区间无缝线路](#) [期刊论文]-[铁道建筑](#) 2001 (04)

本文读者也读过(10条)

1. [张江峰](#). [吴亚平](#). [单旭](#). [ZHANG Jiang-feng](#). [WU Ya-ping](#). [SHAN Xu](#) [小半径曲线无缝线路稳定性计算及加固设计](#) [期刊论文]-[山西建筑](#) 2008, 34 (2)
2. [崔建初](#) [小半径曲线铺设无缝线路的研究与应用](#) [期刊论文]-[铁道建筑](#) 2003 (8)
3. [韩峰](#). [王保成](#) [小半径曲线地段铺设无缝线路主要力学参数研究](#) [期刊论文]-[甘肃科技](#) 2007, 23 (3)
4. [郭郦](#). [GUO Li](#) [小半径曲线地段桥上无缝线路的设计研究](#) [期刊论文]-[铁道工程学报](#) 2008, 25 (2)
5. [王美艳](#) [俄罗斯铁路无缝线路的前景](#) [期刊论文]-[铁道技术监督](#) 2001 (9)
6. [雷晓燕](#). [冯青松](#). [LEI Xiao-Yan](#). [FENG Qing-song](#) [提速铁路无缝线路稳定性的有限元分析](#) [期刊论文]-[交通运输工程与信息学报](#) 2004, 2 (3)
7. [刘建基](#). [Lin Jianji](#) [小半径曲线铺设冻结无缝线路的施工及养护](#) [期刊论文]-[铁道建筑](#) 2005 (12)
8. [赵晓敏](#) [寒冷地区铺设小半径曲线无缝线路的可行性分析](#) [期刊论文]-[黑龙江科技信息](#) 2009 (36)
9. [富跃玲](#) [对寒冷地区继续扩大铺设温度应力式无缝线路的认识](#) [期刊论文]-[中国新技术新产品](#) 2010 (15)
10. [周北利](#) [达万线小半径曲线地段铺设无缝线路可行性分析](#) [期刊论文]-[科技信息\(科学·教研\)](#) 2007 (34)

引证文献(3条)

1. [邹小魁](#). [李建仍](#) [无缝线路横向鼓曲失稳分析](#) [期刊论文]-[铁道技术监督](#) 2011 (8)
2. [单旭](#). [吴亚平](#). [张江峰](#) [动载效应对小半径无缝轨道横向位移影响分析](#) [期刊论文]-[兰州交通大学学报](#) 2008 (1)
3. [梁灿](#) [无缝线路稳定性及有效保证措施研究](#) [期刊论文]-[铁道工程学报](#) 2012 (1)

引用本文格式: [罗信伟](#). [雷晓燕](#). [冯青松](#). [LUO Xin-wei](#). [LEI Xiao-yan](#). [FENG Qing-song](#) [小半径曲线无缝线路稳定性有限元分析](#) [期刊论文]-[铁道工程学报](#) 2006 (3)