

文章编号:1005-0523(1999)03-0007-05

侧磨钢轨强度计算的有限元方法

陈水生¹, 雷晓燕¹, 吕绍棣¹, 朱雪斌²

(1. 华东交通大学 土木工程学院, 江西 南昌 330013; 2. 南昌铁路局 勘察设计院, 江西 南昌 330002)

摘要: 提出了计算侧磨钢轨强度的有限元力学模型, 采用三维有限元单元, 分别对不同侧磨量钢轨和新轨进行强度对比计算¹⁹。为研究曲线轨道钢轨调边使用条件提供了强度方面的依据¹⁹。

关键词: 侧磨钢轨; 强度; 有限元

中图分类号: U 213.21 **文献标识码:** A

0 引言

铁路钢轨在大自然的影响和列车荷载作用下, 将因锈蚀、伤损和磨耗而不断更换, 在曲线轨道, 尤其在小半径曲线轨道上, 钢轨更换的主要原因是侧磨¹⁹。为此, 研究人员对钢轨侧磨的形成机理开展了大量的研究, 试图从理论上解释钢轨侧磨的原因, 并提出了合理缓解侧磨的措施¹⁹。研究人员普遍认为侧磨与轴重、曲线半径(导向力)、运量、轨缘滑动及钢轨材料特性有关, 各种因素的影响关系极为复杂¹⁹。目前还难以对侧磨进行准确的定量计算¹⁹。随着轴重的加大、运行速度的不断提高, 钢轨侧磨问题显得更加突出, 据南昌、北京、济南等铁路局的现场资料分析, 认为小半径曲线轨道上股侧磨是控制换轨的主要因素, 而这种磨耗不可避免, 对广大的铁路工务人员来说, 他们更关心的是: 1) 侧磨量为多少时是换轨的最佳时间, 做到既安全, 又充分发挥钢轨的作用; 2) 一侧受磨的钢轨是否可以换到下轨, 或换到反向曲线段的上轨, 换后钢轨的另一侧侧磨量允许多少即应下道, 对此均没有理论依据¹⁹。

长期以来, 由于人们对轮轨间荷载传递的机理认识不足, 制约了铁道技术的发展¹⁹。为此, 研究人员开展了大量的研究工作, 对轮轨间接触应力有了一定的认识, 普遍认为, 在轨头以下的某一深度的剪应力过大是导致轨头压溃的主要原因¹⁹。将钢轨应力分为两类是合适的, 即: 轮轨接触应力和钢轨弯曲应力¹⁹。笔者在前人研究的基础上, 依据经典赫兹理论求出的轮轨接触应力等结论, 运用有限元方法, 分别对不同侧磨量钢轨和新轨进行了强度对比计算¹⁹。

1 钢轨有限元计算模型

为安全起见, 参照文献[1]的做法, 取 1 m 长钢轨进行计算, 两端取为铰支, 计算模型如图 1 所示¹⁹。对模型做以下假设:

收稿日期: 1998-21-23; **修订日期:** 1999-03-01

基金项目: 铁道部科技开发计划项目(98J33)

作者简介: 陈水生(1968-), 男, 江西乐安人, 华东交通大学讲师, 工学硕士

- 1) 忽略轨道曲线的影响,认为计算模型为直梁;
- 2) 忽略磨耗不均匀的影响,认为计算模型为等截面梁¹⁹.

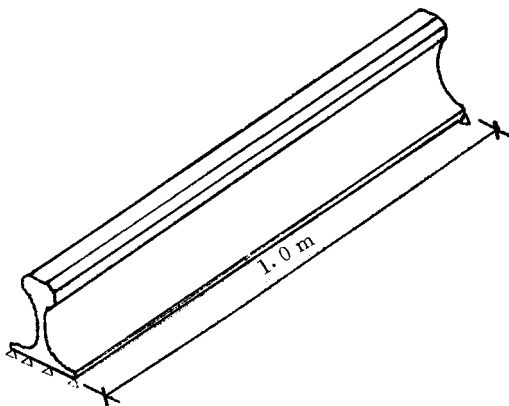


图1 钢轨强度计算模型

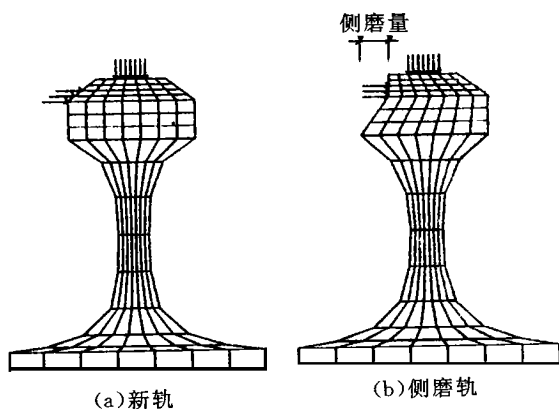


图2 钢轨计算模型的横截面有限元网格

2 赫兹接触理论在轮轨接触问题中的应用

赫兹接触理论是研究两个弹性体接触时应力和应变的出发点,当两接触的弹性体满足以下限制条件时,赫兹公式的解将是正确的:

- 1) 物体是均匀的、各向同性的、服从虎克定律且应力和应变均很小;
- 2) 接触表面无摩阻力;
- 3) 变形后接触表面的尺寸较未变形表面的主曲率半径大得多¹⁹这在表面反向接触的情况将是正确的;
- 4) 象线弹性半空间理论预计的那样,变形与接触区的应力有关;
- 5) 接触表面是连续的,在变形前可用二次多项式表示¹⁹.

并指出,变形后相互接触区域的外形函数可以近似的表示为椭圆形

$$(x/a)^2 + (y/b)^2 = 1 \quad (1)$$

式中:长、短半轴 a 、 b 与物体的表面形状、弹性常数有关⁽¹³⁾

作用在接触区域的接触应力 p 是一个椭圆体

$$\left(\frac{p}{p_0}\right)^2 + \left(\frac{x}{a}\right)^2 + \left(\frac{y}{b}\right)^2 = 1 \quad (2)$$

式中: p_0 为接触应力的最大值,由下式确定

$$p_0 = \frac{3P}{2\pi b} \quad (3)$$

式中: P 为两物体的相互作用力⁽¹³⁾

对没有磨耗的轮轨接触问题,赫兹公式要求的限制条件是满足的,可以得出以下结论:

- 1) 轮轨接触区域为椭圆形,沿椭圆面上的法向接触应力可以认为按椭圆规律分布,其长、短半轴由下式计算

$$a = m \sqrt[3]{\frac{3(1-\nu)^2 P}{2E(A+B)}}; b = na \setminus m, \quad (4)$$

其中: ν 为泊松比, $\nu = 0.25 \sim 0.3$; E 为钢的弹性模量, $E = 2.06 \times 10^{11} \text{ Pa}$.

$$A = 1 \setminus 2r_1; B = 1 \setminus 2r_2, \quad (5)$$

其中: r_1, r_2 分别为车轮踏面及钢轨顶面半径; m, n 为与 θ 角有关的系数^[3]

$$\cos \theta = \frac{B-A}{B+A} \quad (6)$$

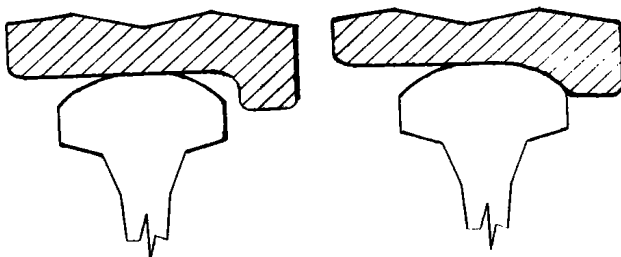
2) 控制钢轨轨头剥落伤损的最大剪应力 $\tau_{\max}$ 发生在轨头以下距离 n 处, 关系如下

$$\begin{aligned} b \setminus a = 1.00 & \quad n = 0.47a & \quad \tau_{\max} = 0.31p_0 \\ b \setminus a = 0.34 & \quad n = 0.24a & \quad \tau_{\max} = 0.31p_0 \end{aligned} \quad (7)$$

对于已有磨耗的轮轨接触, 由于接触区可扩大到轨头上的相当大部分, 为同相接触问题, 如图 3 示, 此时赫兹理论的第三个限制条件不成立, 为此我们尝试用数值的方法求解^[3]

3 有限元方法概述

随着计算工具的发展, 用有限元理论求解复杂力学问题是普遍采用的有效方法^[3]依据赫兹公式的关于接触区域为椭圆形的事实及弹性力学有限元理论, 笔者用数值模拟方法计算钢轨应力, 取得准确结果的关键在于正确的模型及合理的网格, 由于轮轨接触区域小, 应力在轨头的分布较集中等特点, 将荷载作用区域及轨头区域单元网格划分较密^[3]



(a) 新轮轨的反向接触

(b) 磨耗轮轨的同向接触

图3 轮轨接触类型

用有限元方法求算弹性静力学问题, 归结为求解线性方程组

$$K \Delta = P \quad (8)$$

式中: K 为整体刚度矩阵; Δ 为结点位移列阵; P 为荷载列阵. 文中采用空间 8 结点等参数单元, 单元的形函数为

$$N_i = (1 + \xi)(1 + \eta)(1 + \zeta) \setminus 8 \quad (9)$$

其中: $\xi = \xi \cdot \xi$, $\eta = \eta \cdot \eta$, $\zeta = \zeta \cdot \zeta$ ^[3]

单元刚度矩阵是一个 24×24 的方阵, 典型子矩阵为

$$K_{ij} = \iiint B_i^T D B_j d\Omega = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 B_i^T D B_j J d\xi d\eta d\zeta \quad i, j = 1, 2, \dots, 8. \quad (10)$$

其中: B 为应变矩阵; D 为弹性矩阵; J 为雅可比行列式^[3]

4 荷载分析

如果车轮和钢轨均用完全刚性的材料制成, 那么它们将在一点(也可能是一条线), 而不在

一个限定的面上接触,因此,车轮施加在这些假想刚体上的力将使这个接近于零的接触面产生无穷大的应力,但车轮和钢轨不是理想的刚体,它们具有弹性,能使接触点在加载过程中扩大到一个限定的面上,从而使接触应力限制在一个有限的数值内⁽¹³⁾显然,在对钢轨做强度分析时,合理选择接触面的形状及准确计算施加在模型上的面荷载值,都将极大地影响计算结果⁽¹³⁾

根据赫兹理论,作用在钢轨表面上的压应力可以视为按椭圆体分布,应以椭圆分布函数为面荷载施加在计算模型上,然而,这在进行有限元分析时带来较大困难,本文用静力等效的原则,将椭圆规律分布的荷载均匀施加在轨头表面的 6 个单元上,如图 4 所示⁽¹³⁾同时为提高计算的精度,将荷载作用及附近区域的单元网格划分较细,面荷载值为

$$q = P \backslash 6 \cdot a_1 \cdot b_1 \tag{11}$$

其中: a_1 为单元纵向尺寸; b_1 为单元横向尺寸; P 为准静荷载⁽¹³⁾

$$P = P_0 (1 + \alpha + \beta \backslash 2) \tag{12}$$

其中: α 为速度系数; β 为偏载系数; P_0 为轴重⁽¹³⁾

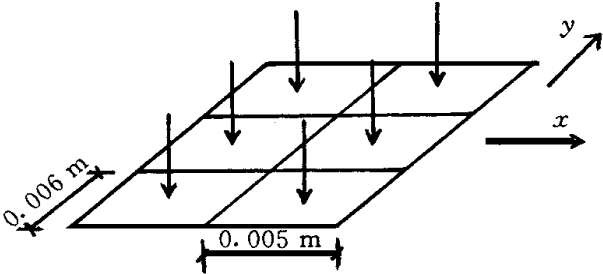


图 4 垂向荷载作用的有限元网格

当列车通过曲线地段时,钢轨提供的导向力是导致侧磨的重要因素⁽¹³⁾同时,对侧磨钢轨的强度也将产生较大的影响⁽¹³⁾文献[2]的研究表明,横向力大约为垂向力的 23%~25%,文中取垂向荷载的 1\4 作为横向荷载施加的模型上,如图 1 示⁽¹³⁾

5 算例分析

依据上述方法,运用 SuperSAP 力学分析程序,选用三维块体单元,分别对侧磨量为 8 mm, 12 mm, 16 mm 的钢轨及没有侧磨钢轨进行了分析⁽¹³⁾

采用 60 kg/m 钢轨,机车轴重 25 t,速度影响系数(附加动力系数) $\alpha=0.45$,文中模型为直线,所以取偏载系数为 0⁽¹³⁾

表 1 侧磨钢轨强度计算结果

侧磨量/mm	$2 \tau_{\max}$ /MPa	$\tau_{\max}$ 距轨顶 距离/mm	$\sigma_{\max}$ /MPa	$\tau_{\max} \setminus \tau$	
单边	8	653.5	3.9	-847.3	1.096
	12	665.3	3.3	-883.6	1.116
	16	673.7	3.0	-914.9	1.130
双边	8	611.3	4.5	-815.9	1.025
	12	619.6	4.2	-824.8	1.040
	16	628.2	4.0	-844.5	1.054

说明: $\tau_{\max}$ 为最大剪应力; $\sigma_{\max}$ 为最大正应力;新轨最大剪应力为 $2 \tau=596.2 \text{ MPa}$;新轨最大正应力为 773.0 MPa

6 结 论

通过上述算例结果分析,并参照最新的钢轨强度实验结果,可以得出以下结论:

1) 由文献[3]知,大部分钢轨的屈服强度大于 800 MPa,而强度极限大于 1 000 MPa,从表 1 的结果,我们认为:

a. 对曲线段轨道,侧面磨耗钢轨强度不是控制钢轨调换的主要原因;

b. 就强度条件来说,单侧磨损耗后的钢轨完全可以调换到反向曲线段的上轨继续使用,使另一侧受磨¹⁹.

2) 从表 1 的结果可知,最大剪应力发生在轨头以下的几个毫米处,这与经典 Hz 理论和现场测试结果是一致的,充分说明了本文计算方法和计算模型的正确性¹⁹.

3) 就本文的分析,我们估计,控制曲线段上股钢轨调换的主要原因在于疲劳强度,此强度与运量、材料等因素有关¹⁹.有关这方面的研究,我们正在进行之中¹⁹.

[参 考 文 献]

- [1] A D Kerr¹⁹轨道力学及轨道工程[M]¹⁹.北京:中国铁道出版社,1983¹⁹.
- [2] 孙琦、王五生等¹⁹曲线钢轨侧面磨耗研究[J]¹⁹铁道学报,1991,13(2)¹⁹.
- [3] 高速铁路有碴轨道结构设计参数研究[R]¹⁹.北京:铁道部科学研究院铁道建筑研究所,1996¹⁹.
- [4] 童大坝主编¹⁹铁路轨道[M]¹⁹.北京:中国铁道出版社,1990¹⁹.
- [5] 雷晓燕¹⁹高速列车对道碴的动力响应[J]¹⁹铁道学报,1997,19(1)¹⁹.
- [6] KLAUS-JUREGEN BAJHE¹⁹Finite element procedures in engineering analysis [J]. Prentice-Hall, inc., Englewood cliffs, New Jersey, 1982¹⁹.

Finite Element Method for Strength Computation of Side-wear Rail

CHEN Shui-sheng¹, LEI Xiao-yan¹, LU Shao-di¹, ZHU-Xuebin²

(¹. College of Civil Eng. East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China; ². Nanchang Railway Prospecting Designing Institute Bureau, Nanchang 330002, China)

Abstract: A FEM model for strength computation of side-wear rails is presented. Different kinds of side-wear rails are analysed and compared using three-dimension elements at FEM. A strength criterion is given for the research project on re-used condition for rails on curved line.

Key words: side-wear rail; stength; finite element method