

基于轨底应变的轮轨垂向力检测方法分析

顾龙宇

大连交通大学 116028

DOI: 10.12238/ems.v7i5.13208

[摘要] 轨底应变是测量轮轨力、判断轨道状态的重要参数之一。本文基于钢轨连续弹性基础梁模型, 提出一种利用轨底应变确定轮轨垂向力的简要方法。通过有限元方法对模型理论计算出的轨底应变数值进行验证。数据表明, 理论计算值与仿真值偏差在 4% 左右。

[关键词] 轨底应变; 测力钢轨法; 轮轨垂向力; 钢轨仿真模型

引言

列车运行状态监测的理论基础是车辆与轨道系统动力学, 列车车轮与轨道之间的相互作用动力学问题是轮轨研究中最基本且最重要的问题之一。轮轨力作为车轮与轨道相互接触、相互作用的产物, 是用以描述轮轨相互作用的重要参数。轮轨力可以分解为三个方向的作用力: 轮轨横向力、垂向力和纵向力。准确检测轮轨力对于保障列车安全运行、延长轨道使用寿命具有重要意义^[1-4]。

现有的轮轨力检测方法根据设备安装位置的不同可以分为车载检测方法和地面检测方法, 也被称为测力轮对法和测力钢轨法^[5]。测力轮对法将应变传感器安装在轮对辐板上, 通过检测车辆轮对上特定位置的应变来实现轮轨力的检测^[6]。早期的测力轮对法检测是不连续的且成本高昂, 直到 20 世纪 60 年代 Weber^[7] 研制了辐条式测力轮对才实现了对轮轨力的连续测量。然而, 使用测力轮对法检测轮轨力时, 需要用测力轮对替换列车使用的普通轮对, 操作复杂且成本不易控制。相比之下, 测力钢轨法将传感器安装于钢轨上, 通过检测钢轨响应来间接测量轮轨力, 避免了测力轮对法需要更换轮对的问题。测力钢轨法根据使用的原理、方法不同, 传感器安装位置和检测的钢轨响应也不同。目前, 常用的测力钢轨法多以应变片组桥的形式检测轨腰处剪应力和轨枕处轨底位移来间接测量轮轨力^[8, 9]。

本文提出了一种基于轨道连续弹性基础梁模型理论, 利用钢轨轨底中性轴应变检测轮轨垂向力的方法, 并利用有限元方法进行了仿真验证, 论证了该方法的可行性。

1 理论分析和计算

1.1 挠度与垂向力关系分析

钢轨连续弹性基础梁模型将钢轨轨道简化为 Euler 梁或是

Timoshenko 梁。两种梁模型计算得到轮轨间相互作用力差别不大, 因此在本研究中将钢轨简化为 Euler 梁进行计算^[3, 10, 11]。

基于连续弹性基础梁模型将轨道简化为连续弹性基础梁结构, 并对其施加集中恒定的垂向力 P。

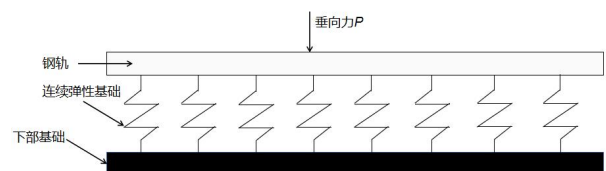


图1 轨道连续弹性基础梁模型图

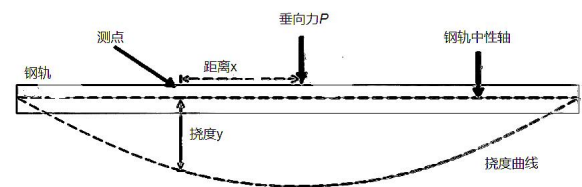


图2 挠曲线示意图

如图2所示, 若连续弹性基础梁上测点与垂向力之间的距离为 x , 测点处挠度为 y , 那么测点处由于轮轨垂向力引起的挠曲线方程可表示为:

$$y = \frac{KP}{2u} \{e^{-Kx} (\cos Kx - \sin Kx)\} \quad (1)$$

式中 $K = \sqrt{\frac{u}{4EI}}$, K 为轨道的刚比系数, EI 为钢轨抗弯刚度, u 是对应于连续弹性基础梁模型中连续弹性基础的弹性特征, 是单位钢轨产生单位下沉所需的分布力^[6]。

现实的铁路轨道大多都是采用离散轨枕支撑的方式, 由于轨道的抗弯刚度作用, 建立轨枕等间隔分布的轨道离散弹性支撑与连续弹性基础梁模型中的连续弹性特征 u 之间的转换关系。 u 与钢轨支座刚度 D 、两轨枕之间的距离 d 有如下近似关系:

$$u = \frac{D}{d} \quad (2)$$

挠度 y 与垂向力 P 之间的关系公式可表示为:

$$y = \frac{K P d}{2 D} \{e^{-K x} (\cos K x - \sin K x)\} \quad (3)$$

1.2 应变与垂向力关系分析

首先, 分析轨底应变与挠度之间的关系, 对轨道连续弹性基础梁模型中轮轨垂向力作用点处梁取微段, 垂向力作用点处附近微段图如图 3 所示。

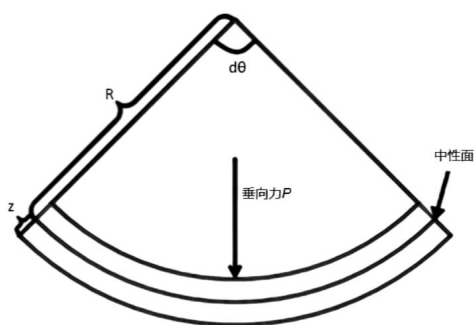


图3 垂向力作用下钢轨简化模型弯曲微段图

在轨道垂向力作用下, 与中性面距离为 z 的底面的应变 ε 与半径 R 之间的关系为:

$$\varepsilon = \frac{(R+z)d\theta - R d\theta}{R d\theta} = \frac{z}{R} \quad (4)$$

半径与曲率 k 互为倒数, 因此可以推得:

$$\varepsilon = z k \quad (5)$$

Euler 梁的中性轴上任一点的曲率 k 与挠度 y 之间存在如下关系:

$$k = \frac{\left| \frac{dy^2}{dx^2} \right|}{\left(1 + \left(\frac{dy}{dx} \right)^2 \right)^{\frac{3}{2}}} \approx \left| \frac{dy^2}{dx^2} \right| \quad (6)$$

那么钢轨连续弹性基础梁模型中与梁中性面距离为 z 的梁底面中性轴上任一点的应变 ε 可表示为:

$$\varepsilon = z k = z \frac{K^3 P d}{D} e^{-K x} (\cos K x - \sin K x) \quad (7)$$

2 基于轨底应变的轮轨垂向力检测方法验证

2.1 钢轨模型简化

令钢轨中两个相邻枕木和铁轨为一跨, 与两轨枕等距处为横向跨中线, 根据铁道行业标准《43kg/m—75kg/m 钢轨标准》(TB/T 2344.1-2020) 以及《弹条 II 型扣件标准》(TB/T3065-2020) 建立钢轨枕木受力模型^[12, 13]。钢轨采用 60kg/m 钢轨, 整个钢轨系统包括: 钢轨轨道、轨距挡板、挡

板座、II 型弹条、螺母、道钉和轨下橡胶垫板。装配模型如图 6 所示。

表1 仿真材料特性表

	密度 (kg/m ³)	泊松比	弹性模量 (Pa)
钢轨	7860	0.3	2.1×10^{11}
橡胶垫板	1050	0.47	7.8×10^6
弹条	7850	0.3	1.72×10^{11}
挡板座	1130	0.34	2.42×10^9
轨距挡板	7860	0.34	1.67×10^{11}
道钉	7860	0.288	1.67×10^{11}

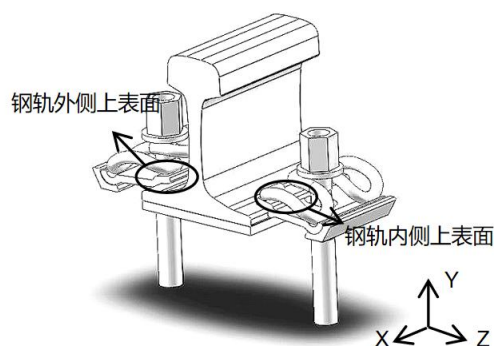


图4 钢轨枕木压缩模型图

由于钢轨扣件约束条件复杂, 为节约计算资源, 参照徐广论文^[1]简化条件对钢轨模型进行合理简化。分析带扣件系统的钢轨在垂向力作用下的位移和变形得到如图 7 所示 (X、Y、Z) 三个方向的等效刚度, 如表 2 所示。

表2 垂向力作用下不同位置及方向刚度等效

位置方向	X (N/mm)	Y (N/mm)	Z (N/mm)
钢轨外侧上表面	1.9×10^6	1.6×10^6	2000
钢轨内侧上表面	1.6×10^6	1.3×10^6	8300

钢轨模型经过简化, 在模型中添加弹簧支撑以取代钢轨扣件系统对钢轨的约束力, 弹簧单元具体参数配置参照上表。钢轨简化模型如图 9 所示。

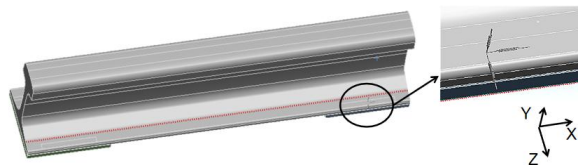


图5 钢轨简化模型图

2.2 有限元仿真验证

为避免钢轨两侧端面对仿真结果的影响, 以 2.1 的钢轨

条件和材料性质建立钢轨 5 跨的模型，总长度 3000mm，钢轨仿真模型图如图 8 所示：

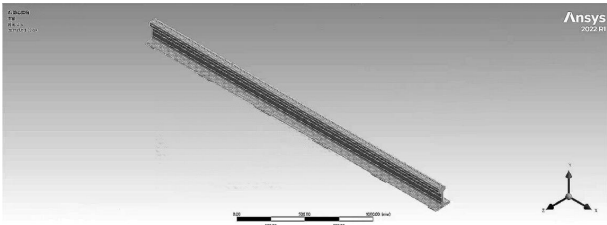


图 6 钢轨简化仿真模型

在 5 跨长轨模型中心跨横向跨中处施加载垂向力，模拟车轮作用在钢轨上的状态。垂向载荷施加图如图 9 所示，垂向力施加大小均为 20kN。

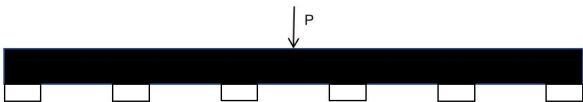


图 7 垂向载荷施加位置

在长轨模型中心跨轨底中性轴上布置多个应变检测点，测点沿轨底中性轴纵向等 24mm 间隔分布，总计 9 个检测点，其中测点 9 位于横向跨中点处。

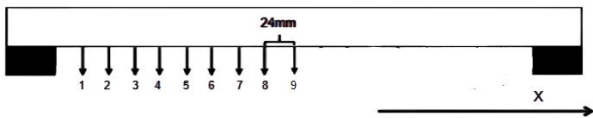


图 8 测点分布位置

垂向力作用于横向跨中点处时，轨底应变计算与仿真结果对照如表 2 所示。

表 2 垂向力作用于横向跨中时计算与仿真结果验证表

测点位置	计算值 ($\mu\epsilon$)	仿真结果值 ($\mu\epsilon$)	相对偏差
1	24.343	22.352	8.53%
2	27.256	25.960	4.87%
3	30.314	28.143	7.42%
4	32.817	32.008	2.49%
5	35.169	35.899	2.05%
6	37.570	39.112	4.02%
7	39.023	40.223	3.03%
8	41.529	42.543	2.41%

9 44.090 44.926 1.87%

当垂向力作用于跨中时，最大相对偏差为 8.53%，最小相对偏差为 1.87%，平均相对偏差为 4.07%。

3 结语

本文提出了一种基于轨底应变的轮轨垂向力简要计算方法，并通过有限元方法验证。数据表明，轨底应变理论计算值与仿真值平均相对偏差在 4%左右，证明了该方法的可行性。

[参考文献]

[1]徐广.应变式轨旁轮轨力传感器研究[D].大连：大连交通大学，2021

[2]J Jónsson, E Svensson and J T Christensen. Strain gauge measurement of wheel-rail interaction forces[J].Engineering Physics, 1997, 32 (3): 183-191

[3]农汉彪.轮轨垂向载荷连续测量与识别方法研究[D].成都：西南交通大学，2007

[4]Akira, Malsumolo, 曲文强.一种测试轮轨力的新方法[J].国外铁道车辆，2013, 50 (4): 89-90

[5]张胜龙, 王文斌, 沈凯明等.中国城市轨道交通轮轨力检测技术研究综述[J].科技与产业，2023, 23(4): 247-253

[6]刘可达.利用钢轨位移测定垂向轮轨力的研究[J].山西建筑，2016, 42 (35): 145-147

[7]Weber H. Zur Ermittlung der Kraftor Zwischen Rad and Schiene.Eigenerlag der Institues forFlugzeugustatick and Leichtbau der ETH zurich. 1968.

[8]李奕璠, 刘建新, 王开云, 等.测力钢轨轮轨力连续输出的算法研究[J].交通运输工程学报,2011,11(4):36-40.

[9]洪溢飏.地面连续测量轮轨力方法研究[D].成都：西南交通大学，2012

[10]丁奥.地面轮轨力连续测试方法和装置研究[D].成都：西南交通大学，2019

[11]陈伯靖, 钱小益, 秦超红等.铁路钢轨受力分析模型比较研究[J].工程力学，2013, 30 (6): 93-95

[12]国家铁路局.TB/T 2344.1-2020 钢轨第一部分：45kg/m-75kg/m 钢轨[S].北京：国家铁路局，2020

[13]国家铁路局.TB/T 3065-2020 弹条 II 型扣件标准[S].北京：国家铁路局，2020