

文章编号:1005-0523(1999)02-0001-06

高速铁路轨道结构力学模型参数研究

雷晓燕, 刘林芽, 陈水生

(华东交通大学 土木工程学院, 江西 南昌 330013)

摘要: 对高速铁路轨道结构力学模型中的参数进行了研究,给出了各参数计算公式和取值范围^[1]。同时提供了轨道结构各主要部件动力响应特征参数,如轮轨动力系数、自振频率、振动加速度的实测值范围以及关键部位的最大允许值,供理论模型计算结束后进行校核^[1]。

关键词: 高速铁路;轨道结构;参数研究

中图分类号: U 213.21

文献标识码: A

0 引言

近年来在高速重载铁路运输方面出现的新问题,迫切要求我们对轮轨动力相互作用有更深入的了解^[1]。数值分析方法是研究轮轨动力相互作用的强有力的手段^[1]。目前已有许多将车辆—轨道—路基作为一体的理论模型^[1]。利用理论模型对轨道结构的综合响应和长期稳定性作出预测、对通常需要经过现场检验的新型轨道结构的初步设计进行评定是数值分析方法的突出优点^[1]。把一个具有复杂分散参数体系的轨道结构,描述成一个具有单个自由度的集总参数模型或具有多个自由度的离散结构是各种计算模型常用的做法^[1]。无论何种理论分析模型都需要预先确定一些必要的参数,如:简化的弹簧刚度系数、轨道结构各部分的等效质量、轮轨接触挠度系数^[1]。笔者在本文中对理论模型中主要的计算参数进行了分析研究,综合得到了各参数计算公式和取值范围,为进一步用数值方法研究轨道结构提供了方便^[1]。文章还给出了轨道结构各主要部件动力响应特征参数,如轮轨动力系数、自振频率、振动加速度的实测值范围以及关键部位的最大允许值,供理论模型计算结束后进行校核^[1]。

高速铁路轨道结构目前大体分为道碴轨道和板式轨道,欧洲各国多采用道碴轨道,道碴轨道具有造价低,线路的弹性和减振性能较好且噪音小的特点,但抗横向力性能较低^[1]。日本国铁在隧道和高架桥上采用板式轨道,其它地段仍采用道碴轨道^[1]。根据“高速铁路有碴轨道结构设计参数研究”课题组建议,我国高速铁路采用有碴轨道结构^[2]。其具体组成为:

UIC 60 自然硬度钢轨;跨区间无缝线路;Ⅲ型混凝土轨枕,长 2.6 m,1680 根/km;弹条Ⅲ型扣件,60-10-17 型胶垫;碎石道床 35 cm 厚,特级道碴;垫碴层厚 ≥ 20 cm^[1]。

高速铁路有碴轨道结构的横断面如图 1 所示^[1]。本文中高速铁路轨道结构分析模型的参数研究主要针对有碴轨道结构^[1]。

收稿日期:1998-11-10;修订日期:1999-01-04

作者简介:雷晓燕(1956-),男,江西丰城人,华东交通大学教授

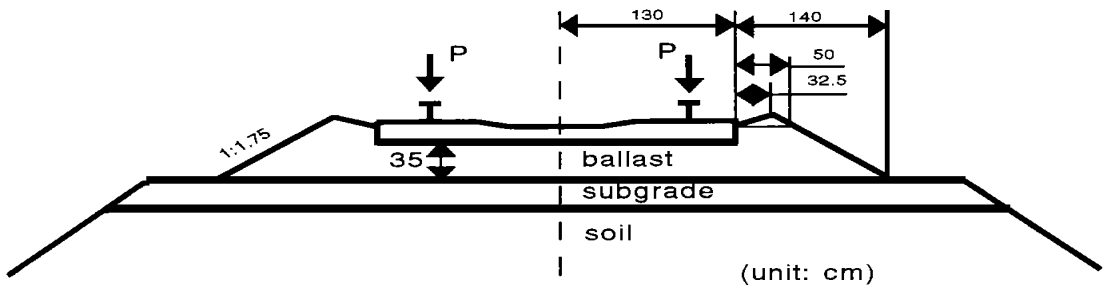


图 1 高速铁路有砟轨道结构横断面

1 点支承轨道模型弹簧刚度计算

如果把钢轨视为一根支承在有限个弹性点支承上的连续梁,则钢轨弹簧刚度可表示为^[3]

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{k_{pc}} + \frac{1}{k_{bs}} \quad (1)$$

式中: k 为钢轨扣压件刚度、道床—路基刚度串联在一起时的换算刚度; k_{pc} 为钢轨扣压件刚度, k_{bs} 为轨枕底部道床—路基刚度之半串联在一起时的刚度^[13]其中:

钢轨扣压件刚度 k_{pc} 等于扣件刚度 k_c 与轨枕弹性垫板刚度 k_p 之和^[4],即

$$k_{pc} = k_c + k_p \quad (2)$$

一般扣件刚度小,弹性垫板刚度大^[13]

弹条式扣件 $k_c = 3.92 \text{ MN/m}$ ^[13]

60-10-17 型胶垫,其静刚度为 $k_p = 55 \sim 80 \text{ MN/m}$

道床—路基刚度 k_{bs} 为

$$\frac{1}{k_{bs}} = \frac{1}{k_b} + \frac{1}{k_s} \quad (3)$$

道床的有效刚度取决于轨枕荷载面积的大小及形状、荷载压力的分布以及道床的弹性^[13]应用一个均布荷载并假设向下作锥体分布,使每一道床深处的压力分布均匀的简化模型,可以得到^[3]

$$k_b = \frac{c(l-b)E_b}{\ln \left[\frac{l(b+ch_b)}{b(l+ch_b)} \right]} \quad (4)$$

其中: E_b 为道床的弹性模量 MN/m^2 ; l 为荷载面积的长度,轨枕有效支承长度的一半 b m ; b 为荷载面积的宽度,即轨枕平均底宽, m ; h_b 为道床厚度, m ; $c = 2 \tan \Phi$ 其中 Φ 为内摩擦角,对道床, Φ 通常取为 37° ^[13]

路基刚度 k_s 按下式近似计算

$$k_s = E_s(l + ch_b)(b + ch_b)/h_0 \quad (5)$$

其中: E_s 为路基弹性模量, h_0 为路基计算深度^[13]

若将钢轨视为支承在连续弹性基础上的无限长梁,则钢轨均布弹簧刚度可由下式计算

$$K = \frac{k}{\alpha} \quad (6)$$

其中: α 为轨枕间距^[13]

2 均布质量的计算

2.1 钢轨的均布质量

钢轨的均布质量 m_r , 可由每米钢轨的重量计算得到^[13]例如 60 kg 钢轨, $m_r = 60.64 \text{ kg/m}$ ^[13]

2.2 轨枕的均布质量

轨枕的均布质量可用下式计算

$$m_i = m_s / a \quad (7)$$

式中: m_s 为半根轨枕质量^[13]

2.3 道床的均布质量

计算道床的有效质量还没有一个成熟的方法^[13]通常与计算道床的弹性模量一样, 假设道碴参与振动质量以扩散角 φ 按直线扩散规律从道床顶面传递到路基面, 由此可得半根轨枕下道床的均布质量为

$$m_b = h_b \rho (b + h_b \tan \varphi (e + h_b \tan \varphi) \quad (8)$$

式中: ρ 为道碴密度; h_b 为道床厚度; b 为混凝土轨枕的平均宽度; e 为轨枕一侧端部有效支承长度^[13]

3 集总参数模型集总质量和弹簧刚度的计算

在集总参数模型中, 需要用到集总质量和弹簧刚度, 参见文献[5]^[13]

3.1 轨道的有效集总弹簧刚度

轨道结构另一种分析模型是把钢轨视为支承在弹性基础上的连续弹性梁^[13]虽然实际的轨道结构是支承在一系列等间距的轨枕上, 而不是连续的基础, 但对常见的轨道结构来说, 理论模型结果和实验数据非常接近^[13]根据这一模型, 在集中荷载 P 的作用下, 梁上任意一点 x 处的挠度 y 可用下式表示

$$y = P \beta \alpha(x) / (2K) \quad (9)$$

式中: $\alpha(x) = e^{\beta x} (\cos \beta x + \sin \beta x)$, $\beta = \sqrt[4]{\frac{K}{4EI}}$, m^{-1} ; K 为基础刚度, N/m^2 ; 见(6)式; EI 为钢轨弯曲刚度, $\text{N} \cdot \text{m}^2$; x 为离集中荷载 P 的水平距离, m ^[13]

若已知钢轨的弯曲刚度及基础刚度, 则每根钢轨的轨道刚度为

$$K_r = \frac{2K}{\beta} = 2 \sqrt[4]{4EIK^3} \quad (10)$$

式中: K_r 也称轨道的有效集总弹簧刚度, N/m ^[13]

3.2 轨道的有效集总参数质量

轨道的有效集总参数质量可由弹性基础梁的第1固有频率求得

$$M = 1 / (m_r + m_i + m_b) / (2\beta) \quad (11)$$

4 轮轨接触系数

轮对间的接触弹簧系数, 不仅与轮对间的接触力、相对接触位移、材质的弹性系数有关, 还与轮轨踏面的形状有关^{[6](13)}

1) 轮对接触时, 把钢轨和车轮都看成圆柱体, 根据两圆柱体垂直相交接触的赫兹公式, 有

$$y = cp^{2/3}$$

(12)

其中, c 为挠度系数⁽¹³⁾
接触弹簧系数 K_0 由下述公式计算

$$K_0 = \frac{dp}{dy} = \frac{3}{2c}p^{1/3}$$

(13)

2) 当车轮为锥形踏面时, 接触力与接触相对位移关系为

$$y = Gp^{2/3}$$

(14)

接触挠度系数为

$$G = 4.57R^{-0.149} \times 10^{-8}$$

(15)

接触弹簧系数 K_0 为

$$K_0 = \frac{3}{2Gp^{1/3}}$$

(16)

3) 当车轮为磨损形踏面时, 接触力与接触相对位移关系仍为式 (14), 但接触挠度系数为

$$G = 3.86R^{-0.115} \times 10^{-8}$$

(17)

实验结果证明, 钢轨类型及荷载变人, 对 K_0 的影响并不大, 车轮直径的变化影响大些, 但一般均在 12 250~14 210 kN/cm 范围内⁽¹³⁾

5 轨道横向弹性刚度

轨道的横向弹性由两部分提供⁽¹³⁾第一部分为轨枕弹性, 设单位长度弹簧刚度为 K_1 , 由混凝土轨枕的轨下垫板剪切变形和蠕变形成, 一般可近似地取为常值⁽¹³⁾第二部分为道床弹性, 设单位长度弹簧刚度为 K_2 , 由道床弹性位移形成, 也可近似取为常值⁽¹³⁾这两部分弹簧的弹簧刚度可通过实验确定, 当假设为连续均匀分布时, K_1 一般可取为 70 000 N/cm², K_2 为 2 000 N/cm² 19.

阻尼也是理论模型中的重要参数⁽¹³⁾鉴于目前还无成熟的计算方法和普遍能接受的实测资料, 只能假设取值范围⁽¹³⁾轨道结构各参数取值范围见表 1⁽¹³⁾

表 1 轨道结构各参数取值范围 MN · m⁻¹

参数	取值范围
k_p	55~80
k_c	3.92
k_{pc}	59~84
k_b	165~220
k_s	40~133
k_{bs}	40~60(新线) 80~100(既有线)
k	34.5~48.9(混凝土轨枕) 40.25~57.5(宽轨枕)
K_0	1 225~1 421
k_1	402.5
k_2	11.5

说明: 表中数值为假设钢轨为点支承时的弹性刚度, 如假设钢轨为连续梁时, 其弹性刚度(轮轨接触弹簧刚度 K_0 除外) 等于表中各值除于轨枕间距

6 轮道结构动力响应实测值范围及关键部位的最大允许值

6.1 轮轨动力附加系数实测值^[2]

轮轨动力附加系数实测值见表 2

表 2 轮轨动力附加系数实测值

速度范围/km·h ⁻¹	80~160	160~210	>210
动力附加系数	0.15~0.22 (广深准高速试验值)	0.32~0.41 (环线高速试验值)	0.75~1.00 (德国 ICE 试验值)

6.2 Ⅲ型混凝土轨枕抗道床纵、横向阻力实测值^[2]

Ⅲ型混凝土轨枕抗道床纵、横向阻力实测值见表 3

表 3 Ⅲ型混凝土轨枕抗道床纵、横向阻力

	道床阻力类别	京山线	京广线
纵向	单枕阻力	19.20	24.00
	单位长度阻力	33.68	42.11
横向	单枕阻力	14.45	11.20
	单位长度阻力	25.40	19.65

6.3 轨道结构各主要部件自振频率实测值范围^[3]

自振频率:车辆簧上质量:0~10 Hz;车辆簧下质量:

20~125 Hz;钢轨:1 400~2 800 Hz;道床:120~250 Hz

6.4 轨道结构各主要部件振动加速度实测值范围^[3]

当列车以 140 km/h 速度运行时,钢轨加速度为 170

g;当列车以 300 km/h 速度过行时,钢轨加速度为 400 g;

当列车以 140 km/h 速度运行时,轨枕加速度为 17 g;当列车以 300 km/h 速度运行时,轨枕加速度为 18 g;

当列车以 80~140 km/h 速度运行时,道床加速度为 4 g;当列车以 300 km/h 速度运行时,道床加速度略大于 4 g;

6.5 轨道结构关键部位的最大允许值

道床顶面和路基面的容许应力为:碎石[σ]=0.49 MPa;筛选卵石[σ]=0.39 MPa

对于用一般沙粘土填筑的路基,规定路基面的容许应力为:新建线路[σ]=0.13 MPa;既有线路[σ]=0.15 MPa

振动加速度是轨道结构振动控制中重要的指标之一⁽¹³⁾根据日本高速铁路测试数据表明,轨道各部产生的振动,其中特别是钢轨和道床的振动,应使它们的振动加速度不超过在使用维修期间的最大允许值⁽¹³⁾振动加速度限值随通过列车次数和列车编组不同而异⁽¹³⁾当列车次数较多时,钢轨和道碴振动加速度的限值,分别规定为 200 g 和 15 g;当列车次数较少时,钢轨和道碴振动加速度的限值,分规定为 400 g 和 25 g⁽¹³⁾其中 25 g 是考虑不使道碴从道床中塌下来,从而使道床破坏¹⁹鉴于目前尚无其它国家对钢轨和道碴振动加速度的限值提出具体的数值,因此,我们暂按日本的数据作为我们控制振动加速度的限制^[6] 19.

[参 考 文 献]

- [1] 雷晓燕. 铁路轨道结构数值分析方法[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1998
- [2] 高速铁路有碴轨道结构设计参数研究报告[R]. 北京: 铁道部科学研究院, 1996
- [3] A D Kerr. 轨道力学及轨道工程[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1983
- [4] 童大坝主编. 铁路轨道[M]. 中国铁道出版社, 1990
- [5] 重载铁路线路结构与养护, 1991 年重载铁路线路结构与养护学术讨论会论文件, 中国铁道出版社, 1992
- [6] 王午生. 轨道结构振动及其控制[M]. 上海铁道学院土木系, 1994 19.

Research on Parameters of Mechanical Model for High Speed Railway Truck

LEI Xiao-yan, LIU Ling-ya, CHEN Shui-sheng

(College of Civil Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: Research on parameters of mechanical model for high speed railway truck is performed and the calculated formulas and the value ranges corresponding to these parameters are given in this paper. At the same time, the dynamic response characteristic parameters for the main components of truck structure, such as wheel/rail dynamic coefficients, nature frequencies, vibration accelerations measured on site and their ranges, and allowable maximum values in some key positions, are presented, which can be used to check the computational results by a theoretical model.

Key words: high speed rail line; railway structure; parameter research