

# 考虑碾压状态的振动压路机-路基耦合动力学分析

孙述鹏<sup>1,2</sup>, 王锋会<sup>1</sup>, 冯维明<sup>1</sup>, 郭超<sup>2</sup>, 张茂锋<sup>2</sup>

(1. 山东大学土建与水利学院, 山东 济南 250061; 2. 山东省共同体工程机械有限公司, 山东 济宁 272073)

**摘要:** 为了研究振动压路机钢轮在振动压实作业不同阶段的动力学响应, 引入状态向量  $\sigma$  来描述钢轮与路基之间的相互作用, 引入塑性参数  $\epsilon$  来描述路基的弹塑性状态, 建立了振动压路机-路基耦合动力学模型。基于该模型, 采用数值积分的方法, 得到了钢轮响应的时程、相图、频谱、庞加莱截面、分岔图等, 对不同塑性参数路基上钢轮的动态响应进行了分析。结果表明: 随着压实作业的进行, 振动压路机钢轮会经历“单周期运动-倍周期运动-混沌运动”的动力学演化, 在单周期运动时存在与路基持续和周期性失去接触的工况, 在倍周期以及混沌运动时出现“跳振”现象。

**关键词:** 振动压路机; 弹塑性路基; 压实过程; 动力响应

**中图分类号:** U415.52<sup>+</sup>1; TH113.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-4523(2023)05-1273-07  
**DOI:** 10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.2023.05.011

## 引言

振动压路机作为一种道路施工机械, 被广泛用于高等级公路、铁路、机场跑道、大坝、体育场等大型工程项目的填方压实作业。振动压路机的压实作业是压路机钢轮与路基填筑体相互作用的过程, 研究钢轮在此相互作用过程中的动态响应, 无论是对路基压实质量的控制还是压路机本身的设计, 都具有重要的意义<sup>[1-4]</sup>。然而, 由于压路机钢轮(刚体)与路基填筑体(弹塑性体)接触问题的复杂性, 以及碾压过程的动态性, 对压实过程中振动压路机钢轮动态响应的研究一直是工程界面临的难题。

长期以来, 由于车-路/桥相互作用既影响到行车安全与驾驶舒适性, 又牵涉到路/桥等结构物的维护保养, 因此在汽车、轨道交通、道桥工程等领域, 开展了大量关于车-路/桥耦合动力学的研究<sup>[5-9]</sup>。相比之下, 振动压路机作为一种相对特殊的道路施工车辆, 关于振动压路机-路基耦合动力学的研究则较少。Anderegg等<sup>[10]</sup>建立了一个单自由度的振动压路机-路基耦合动力学模型, 通过仿真计算, 发现了钢轮在压实作业后期的混沌运动。van Susante等<sup>[11]</sup>采用集总参数建模, 对于钢轮在压实过程的非线性耦合动力学行为进行了分析。Paulmichl等<sup>[12]</sup>提出了一种钢轮-路基相互作用的模型, 利用其捕捉

到了工程现场观测到的钢轮-路基相互作用系统的基本特征。管迪等<sup>[13]</sup>利用谐波线性化方法将滞回非线性力线性化为等效阻尼和等效刚度, 建立了土壤非线性力学模型, 通过数值仿真分析了钢轮的动力学特性。Shen等<sup>[14]</sup>利用由Bouc-Wen微分方程导出的非对称滞回模型, 研究了不同压路机参数引起的钢轮的动态响应, 提出了避免混沌振动的方法。上述关于钢轮动态响应的研究中, 路基多采用弹性路基模型或非对称滞回模型来表征, 然而考虑到路基在压实过程中会经历大塑性变形-小塑性变形-近弹性变形的演化过程, 弹性路基模型可以用于钢轮在压实末期(路基近弹性阶段)的动态响应分析, 但是并不能很好地反映前期弹塑性阶段路基的特性; 而非对称滞回模型能较好地刻画钢轮与路基的非线性相互作用, 但不能直接反映被压实材料的塑性变形, 故而无法直接评判压实效果。

为尽可能真实地反映整个压实过程中路基的力学特性, Pietzsch等<sup>[15]</sup>考虑路基的塑性变形, 提出了黏弹塑性振动压实模型, 并对压实过程中钢轮动态响应进行简单的研究, 但该模型较复杂, 应用起来比较困难。Kordestani<sup>[16]</sup>简化了黏弹塑性路基模型, 并基于该模型对钢轮动态响应进行了初步分析, 但未对钢轮随压实作业的进行, 路基碾压状态发生变化时的动力学行为演化规律进行深入研究。

收稿日期: 2022-01-15; 修订日期: 2022-06-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11802129); 山东省自然科学基金资助项目(ZR2020QA039)。

本文考虑路基在压实作业过程中力学特性的演变,引入状态向量 $\sigma$ 来描述钢轮与路基之间的相互作用,引入塑性参数 $\epsilon$ 来描述路基的弹塑性状态,建立了描述振动压路机钢轮运动状态的机-路耦合动力学模型,系统地研究了压实作业各个阶段振动压路机钢轮动力学响应及其演化规律,详细分析了钢轮在不同压实阶段的运动状态。

## 1 压路机-弹塑性路基耦合动力学模型

根据压路机的机械结构特征以及工作特点,对模型做如下假设:(1)将振动压路机的钢轮视作刚性体,简化为集中质量;(2)忽略压路机车架惯性力的影响,建模中只考虑其质量;(3)将振动压路机和路基模型简化为二维模型;(4)振动压路机钢轮上产生的激振力可以分为水平方向和竖直方向的分力,由于对路基起主要压实作用的是竖直方向的力,为了简化模型,只考虑压路机钢轮竖直方向上的运动。

图1所示为压路机-弹塑性路基耦合动力学模型,分为上下两部分,分别为振动压路机的模型和路基的模型。对于振动压路机,将钢轮等效为一个内部有偏心质量块旋转的刚体,将机架等效为一个集中质量;对于路基,考虑了路基的弹塑性特性,通过加入塑性元件来表示在压实过程中路基产生的塑性变形。其中,模型的主要参数为: $x_d$ 为钢轮竖向位移, $x_e$ 为路基的弹性变形, $x_p$ 为路基的塑性变形, $k_p$ 为路基的塑性刚度, $k_e$ 为路基的弹性刚度, $c_e$ 为路基的黏弹性阻尼, $m_d$ 为钢轮质量, $m_f$ 为车架的等效质量, $m_e$ 为钢轮内部偏心质量块质量, $r_e$ 为偏心质量块偏心距离, $\Omega$ 为偏心质量块旋转角速度,其中 $\Omega=2\pi f$ , $f$ 为质量块的旋转频率也是钢轮压实的激振频率。

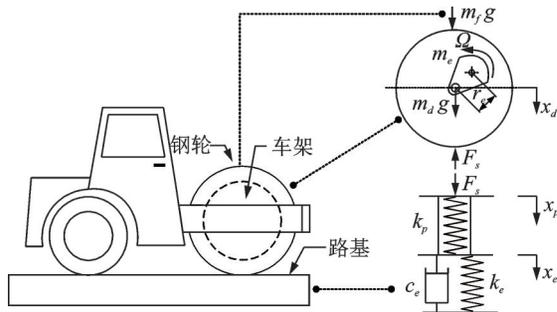


图1 振动压路机-路基耦合模型

Fig. 1 Vibratory roller-subgrade coupling model

本模型以路基静平衡位置为坐标原点,方向竖直向下为正,对振动压路机钢轮进行竖直方向的受力分析,由牛顿第二定律,可得其动力学方程:

$$m_d \ddot{x}_d + F_s = A_0 m_d \Omega^2 \cos(\Omega t) \quad (1)$$

式中  $A_0$ 为名义振幅, $A_0 = m_e r_e / m_d$ ;  $t$ 为时间; $F_s$ 为路基的动态作用力, $F_s = F_T - (m_d + m_f)g$ ,其中 $F_T$ 为路基与钢轮之间的接触力。

路基的动态作用力 $F_s$ 可分别根据路基的塑性变形和弹性变形得出:

$$F_s = k_p(x_d - x_e) = c_e \dot{x}_e + k_e x_e \quad (2)$$

故而:

$$c_e \dot{x}_e + (k_e + k_p)x_e = k_p x_d \quad (3)$$

模型的静平衡位移 $u_s$ 为:

$$u_s = \frac{(m_d + m_f)g}{k_s^*} \quad (4)$$

式中  $k_s^* = k_e k_p / (k_e + k_p)$ 。

引入塑性参数 $\epsilon$ 描述路基弹塑性特性:

$$\epsilon = \frac{k_p}{k_p + k_e}, \begin{cases} \epsilon = 0, & \text{路基为完全塑性} \\ 0 < \epsilon < 1, & \text{路基为弹塑性} \\ \epsilon = 1, & \text{路基为完全弹性} \end{cases} \quad (5)$$

该参数可以反映路基的压实程度,在路基压实过程中,塑性参数 $\epsilon$ 随着压实遍数的增加逐渐增大,从0逐渐趋近于1,具体数值根据试验确定。

将方程式(3)等式两端均乘以 $\epsilon$ ,结合式(5)整理可得钢轮位移 $x_d$ 与路基弹性变形 $x_e$ 的关系:

$$\epsilon c_e \dot{x}_e + k_p x_e = \epsilon k_p x_d \quad (6)$$

如图2所示,根据路基与钢轮之间的接触力和钢轮速度方向,将钢轮的一个压实周期的运动状态归为三类:

(a) 加载状态:钢轮向下压实路基,位移速度方向向下,此时钢轮与路基持续接触,路基产生弹塑性变形,直到钢轮速度为0,如图2(a)所示。

将式(2)代入式(1)可得:

$$m_d \ddot{x}_d + k_p x_d - k_p x_e = A_0 m_d \Omega^2 \cos(\Omega t), \\ F_T \geq 0 \quad \& \quad \dot{x}_d \geq 0 \quad (7)$$

式(7)两端均乘以 $\epsilon$ ,并求导,结合式(5)整理可得:

$$\epsilon \gamma m_d \ddot{x}_d + \epsilon c_e \dot{x}_d - \epsilon c_e \dot{x}_e = -\epsilon \gamma A_0 m_d \Omega^3 \sin(\Omega t), \\ F_T \geq 0 \quad \& \quad \dot{x}_d \geq 0 \quad (8)$$

式中  $\gamma = c_e / k_p$ 。

将方程(7)和(8)等式两端分别相加,结合式(6),消去 $x_e$ 和 $\dot{x}_e$ 相关项,整理可得关于 $x_d$ 及其导数的运动方程:

$$\epsilon \gamma m_d \ddot{x}_d + m_d \ddot{x}_d + \epsilon c_e \dot{x}_d + \epsilon k_e x_d = \\ -\epsilon \gamma A_0 m_d \Omega^3 \sin(\Omega t) + A_0 m_d \Omega^2 \cos(\Omega t), \\ F_T \geq 0 \quad \& \quad \dot{x}_d \geq 0 \quad (9)$$

(b) 卸载状态:钢轮由最大弹塑性变形位置向上运动,位移速度方向向上,路基在加载状态时产生的塑性变形不可恢复,路基只恢复弹性变形,直到路基完全恢复其弹性变形,同时钢轮保持与路基的接触,如图 2(b)所示。将式(2)代入式(1),可得系统动力学方程:

$$m_d \ddot{x}_d + k_e x_d + c_e \dot{x}_d = A_0 m_d \Omega^2 \cos(\Omega t),$$

$$F_T \geq 0 \ \& \ \dot{x}_d < 0 \quad (10)$$

(c) 脱离状态:分为两种工况,一种为钢轮与路基的实际表面失去接触,但是钢轮位移未超过未被压实的路基表面,此时钢轮与路基之间是周期性失去接触的状态;另一种工况则是钢轮位移超过未被压实的路基表面,为跳振状态。状态示意图如图 2(c)所示。脱离状态路基与钢轮之间的接触力  $F_T = 0$ ,由式(1)可得:

$$m_d \ddot{x}_d - (m_d + m_f)g = A_0 m_d \Omega^2 \cos(\Omega t),$$

$$F_T = 0 \quad (11)$$

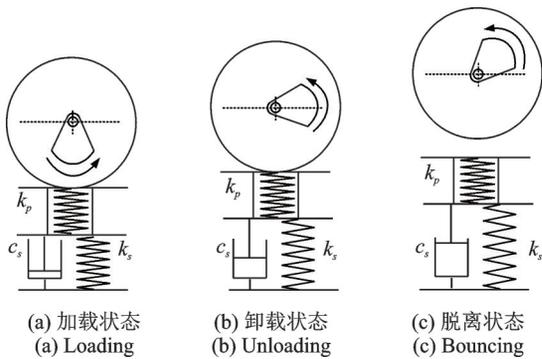


图 2 三种压实状态

Fig. 2 Three compaction status

为了更加简明地描述振动压实过程中振动压路机钢轮的运动状态,引入状态向量  $\sigma = (\sigma_0, \sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \sigma_4, \sigma_5)$  来表征钢轮与路基相互作用状态,取值如表 1 所示。其中  $\sigma_0$  为状态标识,  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \sigma_4, \sigma_5$  对应状态量。进而,钢轮的动力学方程可统一表示为:

$$\sigma_1 \gamma m_d \ddot{x}_d + m_d \ddot{x}_d + \sigma_2 c_e \dot{x}_d + \sigma_3 k_e x_d - \sigma_4 (m_d + m_f)g = -\sigma_5 \gamma A_0 m_d \Omega^3 \sin(\Omega t) + A_0 m_d \Omega^2 \cos(\Omega t) \quad (12)$$

为便于数值求解,进一步可将三阶常微分方程(12)写成状态空间方程的形式:

$$\dot{x} = Ax + F(t) \quad (13)$$

式中  $x = \begin{bmatrix} x_d \\ \dot{x}_d \\ \ddot{x}_d \end{bmatrix}, A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -\frac{\sigma_3 k_e}{\sigma_1 \gamma m_d} & -\frac{\sigma_2 c_e}{\sigma_1 \gamma m_d} & -\frac{1}{\sigma_1 \gamma m_d} \end{bmatrix},$

$F(t) =$

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{\sigma_4 (m_d + m_f)g - A_0 m_d \Omega^3 [\sigma_5 \gamma \sin(\Omega t) - \cos(\Omega t)]}{\sigma_1 \gamma m_d} \end{bmatrix} \circ$$

表 1 状态向量数值  
Tab. 1 State vector values

状态	$\sigma_0$	$\sigma_1$	$\sigma_2$	$\sigma_3$	$\sigma_4$	$\sigma_5$	状态判据
加载	1	$\epsilon$	$\epsilon$	$\epsilon$	0	$\epsilon$	$F_T \geq 0 \ \& \ \dot{x}_d \geq 0$
卸载	2	0	1	1	0	0	$F_T \geq 0 \ \& \ \dot{x}_d < 0$
脱离	3	0	0	0	1	0	$F_T = 0$

图 3 表示出了文中的钢轮压实位置关系,其中“路基的实际表面”为压实过程中任意时刻路基与钢轮接触的位置;而“未被压实的路基表面”则是路基还未被钢轮压实、处于自然状态下的表面位置。

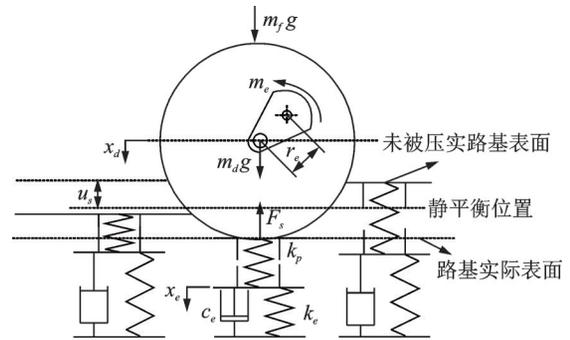


图 3 压实位置关系

Fig. 3 Compacting position relationships

## 2 数值仿真

针对某型号振动压路机进行仿真,压路机参数如表 2 所示。仿真中塑性参数  $\epsilon$  与压实遍数之间的关系参考文献[16],如图 4 所示,工程中具体可根据试验确定。在振动压路机压实过程中,随着压实遍数的增多,路基塑性参数在不断增大,压路机钢轮在不同塑性参数路基的情况下,动力学响应特征也存在差异。选取压实第 1,4,7 和 12 遍时的路基参数来研究振动压实过程中钢轮的动力学响应,路基参数的选取如表 3 所示,其中的路基刚度以及路基阻尼都是根据压路机施工现场历史数据所得。

表 2 压路机仿真参数

Tab. 2 Simulation parameters of the vibratory roller

参数	符号	数值
钢轮质量/kg	$m_d$	6450
车架质量/kg	$m_f$	6354
激振频率/Hz	$f$	32
名义振幅/mm	$A_0$	1.4

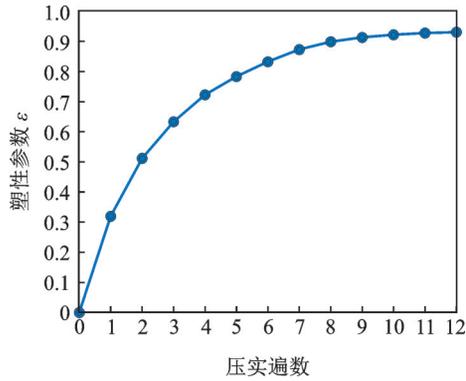


图4 塑性参数与压实遍数的关系

Fig. 4 Relationship between plastic parameters and compacting times

表3 弹塑性路基仿真参数 ( $c_r=130 \text{ kN}\cdot\text{s/m}$ )

Tab. 3 Simulation parameters of elastoplastic subgrade ( $c_r=130 \text{ kN}\cdot\text{s/m}$ )

压实遍数	塑性参数 $\epsilon$	弹性刚度/ ( $\text{MN}\cdot\text{m}^{-1}$ )	塑性刚度/ ( $\text{MN}\cdot\text{m}^{-1}$ )
1	0.34	30	15.5
4	0.72	60	206
7	0.87	80	334
12	0.93	90	1286

压实初期第1遍压实,塑性参数  $\epsilon=0.34$ ,此时钢轮的动态响应如图5所示,可以从时间历程的图像中看到路基显著的弹塑性变形,频谱图中只有一个主频存在,其中0频率成分对应钢轮压实时的静变形,Poincaré截面图中只存在一个孤立相点。由图6可知,压实力  $F_T$  是连续的曲线,说明钢轮在压实过程中一直与路基保持接触,钢轮运动是处于加载 ( $\sigma_0=1$ )-卸载 ( $\sigma_0=2$ )-脱离 ( $\sigma_0=3$ ) 不断切换的状态。

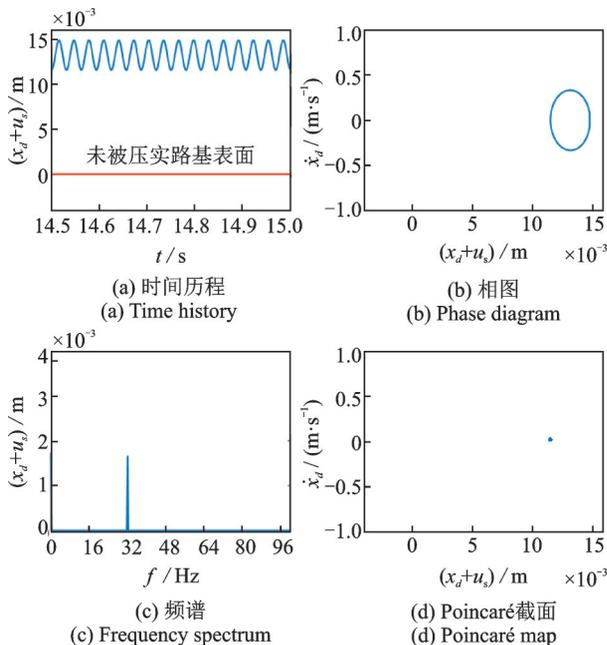


图5 塑性参数  $\epsilon=0.34$

Fig. 5 Plasticity parameter  $\epsilon=0.34$

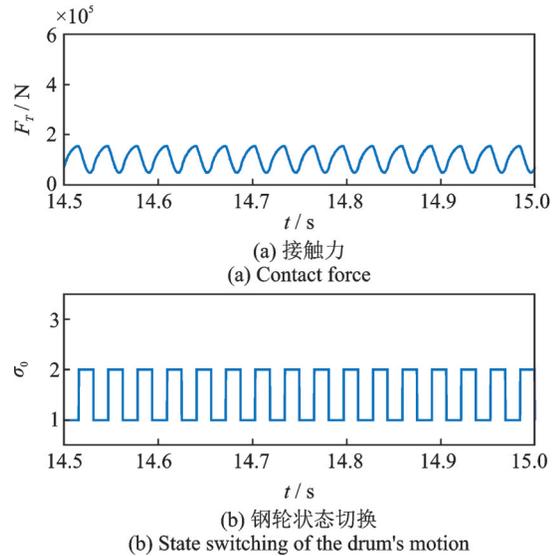


图6 塑性参数  $\epsilon=0.34$

Fig. 6 Plasticity parameter  $\epsilon=0.34$

压实中期第4遍压实,塑性参数  $\epsilon=0.72$ ,此时钢轮的动态响应如图7所示,从时间历程上可以看出钢轮仍然是在未被压实路基表面以下运动,但是在图8中  $F_T$  随时间变化会出现周期性为零的情况,即在压实过程中钢轮出现周期性脱离路基的运动。因此压实中期阶段振动压实处于加载 ( $\sigma_0=1$ )-卸载 ( $\sigma_0=2$ )-脱离 ( $\sigma_0=3$ ) 不断切换的状态。尽管有脱离地面振动的情况,但是钢轮的运动没有超出未被压实路基表面,因此不会对路基产生有害压实。

压实后期第7遍压实,塑性参数  $\epsilon=0.87$ ,钢轮的动态响应如图9所示,此时路基被压实到一定程度,塑性刚度很大,处于倍周期运动的状态,频谱中

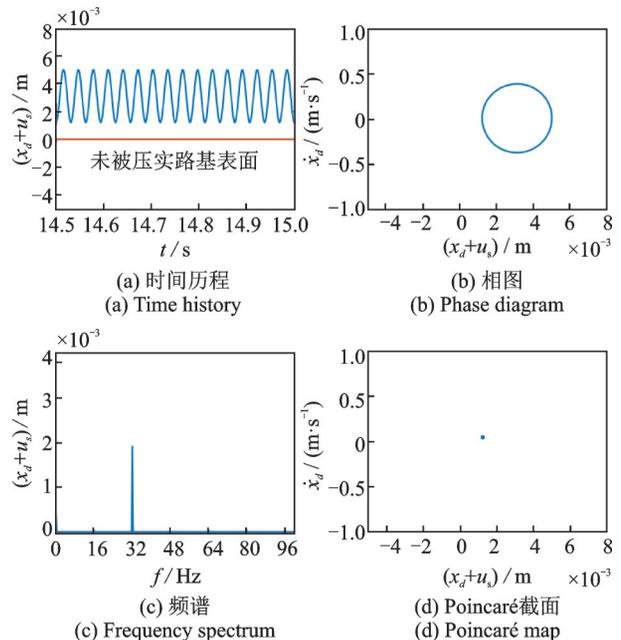


图7 塑性参数  $\epsilon=0.72$

Fig. 7 Plasticity parameter  $\epsilon=0.72$

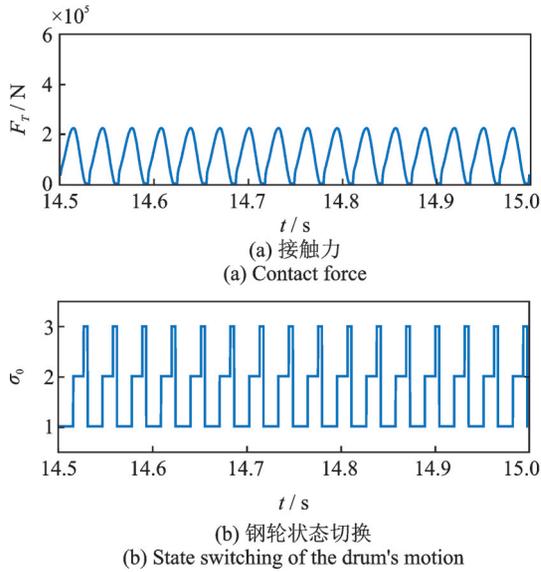


图 8 塑性参数  $\epsilon=0.72$   
Fig. 8 Plasticity parameter  $\epsilon=0.72$

出现次谐波成分,钢轮出现明显的“双跳”现象。据图 10 可知,此时振动压实处于加载( $\sigma_0=1$ )-卸载( $\sigma_0=2$ )-脱离( $\sigma_0=3$ )不断切换的状态,且钢轮运动会超出未被压实路基表面,会对路基产生有害压实。

压实末期第 12 遍压实,塑性参数  $\epsilon=0.93$ ,钢轮动态响应如图 11 所示,从时间历程、相图中可以看出,钢轮运动无规则,频谱图有一条连续的谱线,并且 Poincaré 截面中存在吸引子,说明钢轮已经进入混沌运动状态。从图 12 中可以清楚地看到,此时钢轮与路基之间的接触力  $F_T$  的变化也是无序的,易造成压实不均的情况,对路基产生有害压实。

为了研究钢轮在路基接近弹性状态时的动态响应,取  $\epsilon=0.93$  绘制以路基弹性刚度  $k_e$  为参数的分

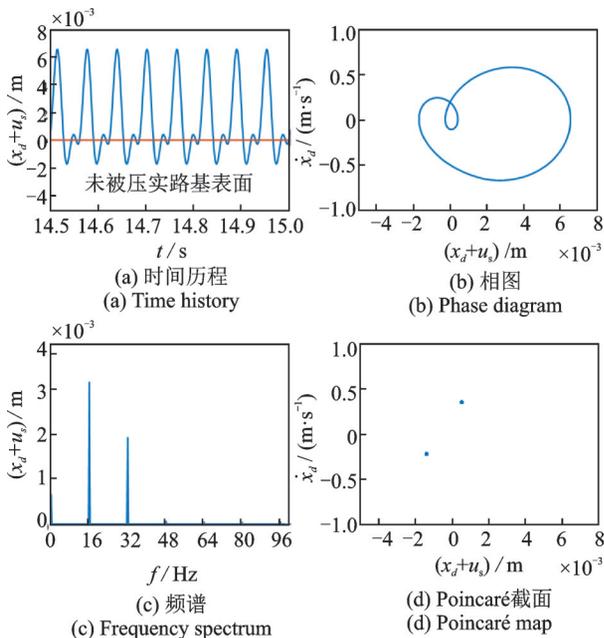


图 9 塑性参数  $\epsilon=0.87$   
Fig. 9 Plasticity parameter  $\epsilon=0.87$

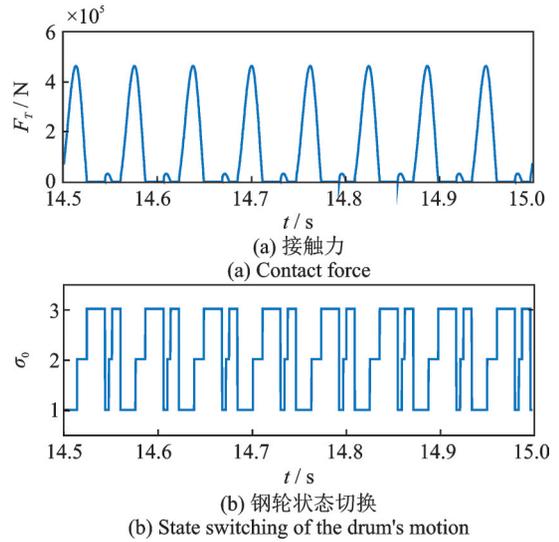


图 10 塑性参数  $\epsilon=0.87$   
Fig. 10 Plasticity parameter  $\epsilon=0.87$

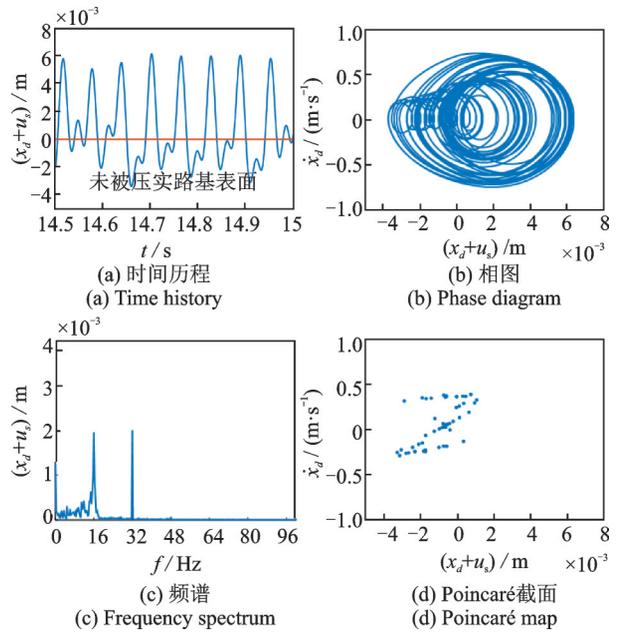


图 11 塑性参数  $\epsilon=0.93$   
Fig. 11 Plasticity parameter  $\epsilon=0.93$

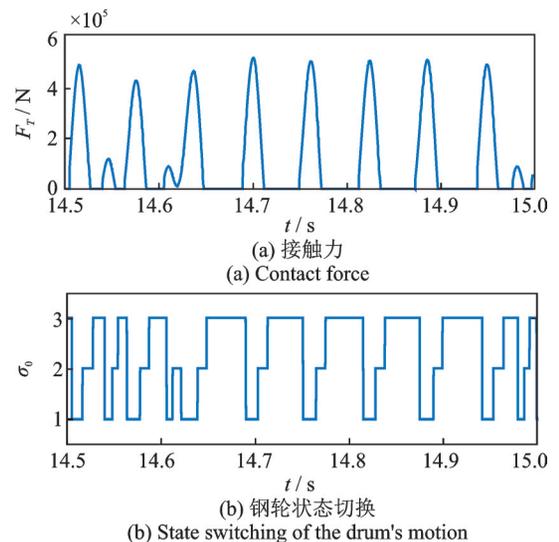


图 12 塑性参数  $\epsilon=0.93$   
Fig. 12 Plasticity parameter  $\epsilon=0.93$

岔图,范围为 70~90 MN/m,路基阻尼  $c_c=130$  kN·s/m,如图 13 所示。从图 13 中可以看出,路基刚度范围为 70~75.3 MN/m 之间时,钢轮在进行单周期运动,而在 75.3~85.1 MN/m 之间时,钢轮处于多周期运动窗口,在路基刚度大于 85.1 MN/m 之后,钢轮的运动通过倍周期分岔进入混沌。

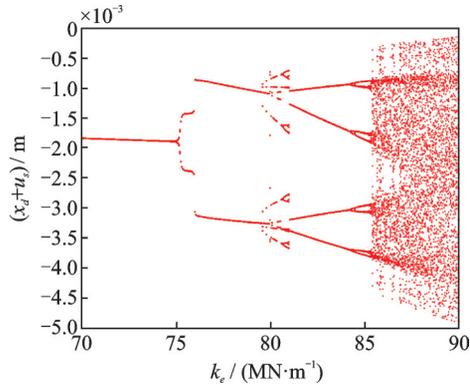


图 13  $\epsilon=0.93$  时以刚度为分岔参数的分岔图

Fig. 13 The bifurcation diagram with stiffness as bifurcation parameter  $\epsilon=0.93$

图 13 分析了路基参数对钢轮动响应的影响,由于在  $\epsilon=0.93$  时,路基弹性刚度达到一定程度,钢轮容易发生“跳振”工况,图 14 进一步研究了压路机参数对钢轮动响应的影响。图 14 中给出了由九幅分岔图(L1~L9)组成的三维图像,这些分岔图以激振频率为分岔参数,激振频率的变化区间为 10~35 Hz,名义振幅的取值区间为 0.5~2 mm,绘制时路基刚度和阻尼分别设定为 70 MN/m 和 130 kN·s/m。如图 14 所示,当名义振幅在 0.5~1.25 mm 的时候,在图示频率范围内,钢轮运动通常呈现单周期运动的状态;当名义振幅在 1.5~2.5 mm 时,随着激振频率的增加,钢轮的动态响应由单周期转向多周期,甚至进入混沌状态,最终又会恢复到单周期运动。另外,随着名义振幅的增加,出现“跳振”时的激振频率数值逐渐变小。

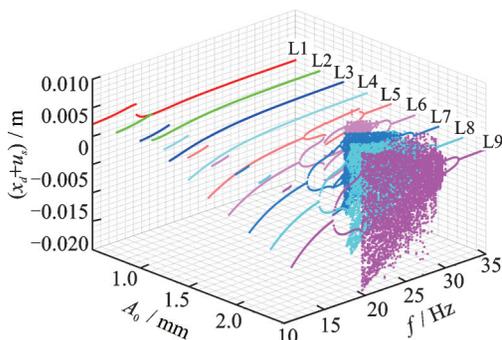


图 14 不同名义振幅下以激振频率  $f$  为分岔参数的分岔图

Fig. 14 Bifurcation diagrams with excitation frequency  $f$  as bifurcation parameter under different nominal amplitudes

### 3 结 论

本文引入状态向量  $\sigma$  来描述钢轮与路基之间的相互作用,引入塑性参数  $\epsilon$  来描述路基的弹塑性状态,建立了描述振动压路机钢轮运动状态的压路机-路基耦合动力学模型。基于该模型,采用数值积分的方法,对压实各个阶段压路机钢轮的响应特征进行了分析。主要结论如下:

(1) 本文通过引入描述钢轮与路基之间的相互作用的状态向量  $\sigma$  和塑性参数  $\epsilon$ ,建立了压路机-路基耦合动力学模型,考虑了振动压实过程中路基力学特性的变化,可以用于分析振动压实作业各阶段压路机钢轮的动响应。

(2) 随着压实作业的进行,振动压路机钢轮会经历“单周期运动-倍周期运动-混沌运动”的动力学演化,在单周期运动时存在与路基持续接触和周期性失去接触的工况,在倍周期以及混沌运动时出现“跳振”现象。

(3) 在压实作业的初期和中期,振动压路机钢轮运动呈现单周期运动的特点,尽管也有脱离路基的情况,但钢轮运动始终在未被压实路基表面以下,不会出现有害压实;而在压实的后期,无论是倍周期还是混沌运动,钢轮均会出现超出未压实路基表面的情况,对路基产生有害压实,应在现场施工时尽量规避。

(4) 在路基接近弹性的情况下,随着路基刚度的增加,振动压路机钢轮呈现“单周期运动-倍周期运动-混沌运动”的运动响应特征,与采用弹塑性路基模型分析的结果类似。

#### 参考文献:

- [1] 刘本学,冯忠绪,赵侃,等. 仿冲击振动压实机动力学模型的建立及压实试验[J]. 中国公路学报, 2007, 20(3): 121-126.  
LIU Benxue, FENG Zhongxu, ZHAO Kan, et al. Establishment and compaction experiment of dynamics model for impact-imitated vibratory roller[J]. China Journal of Highway and Transport, 2007, 20(3): 121-126.
- [2] 辛丽丽,梁继辉,闻邦椿. 振动轮跳振现象的振动压路机系统的动力学特性分析[J]. 中国工程机械学报, 2008, 6(2): 161-166.  
XIN Lili, LIANG Jihui, WEN Bangchun. Dynamic property analysis on pulsating vibratory roller[J]. Chinese Journal of Construction Machinery, 2008, 6(2): 161-166.
- [3] 郑书河,林述温. 考虑跳振现象的压实系统振动轮的滞回响应特性研究[J]. 中国机械工程, 2014, 25(11): 1530-1534.  
ZHEN Shuhe, LIN Shuwen. Research on hysteresis

- characteristics of vibratory drum with consideration on jump vibration[J]. *China Mechanical Engineering*, 2014, 25(11): 1530-1534.
- [4] 徐光辉. 路基连续压实控制动力学原理与工程应用[M]. 北京:科学出版社,2016.  
XU Guanghui. *Dynamic Principle and Engineering Application of Continuous Compaction Control for Subgrade*[M]. Beijing: Science Press, 2016.
- [5] 陈先华, 马耀鲁, 耿艳芬, 等. 路面工程中的车-路相互作用研究进展[J]. *机械工程学报*, 2021, 57(12): 18-30.  
CHEN Xianhua, MA Yaolu, GENG Yanfen, et al. Research progress of vehicle-road interaction in pavement engineering[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2021, 57(12): 18-30.
- [6] 王少钦, 彭培火, 杨淳, 等. 乘客-车辆-桥梁耦合振动分析[J]. *振动工程学报*, 2018, 31(1): 30-38.  
WANG Shaoqin, PENG Peihuo, YANG Zhun, et al. Coupling vibration analysis of passengers-vehicle-bridge system[J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2018, 31(1): 30-38.
- [7] 闫斌, 谢浩然, 潘文彬, 等. 考虑轨道伤损的列车-无砟轨道-桥梁系统动力特性[J]. *振动工程学报*, 2020, 33(4): 807-814.  
YAN Bin, XIE Haoran, PAN Wenbin, et al. Influence of track damage on dynamic characteristics of vehicle-ballastless track-bridge system[J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2020, 33(4): 807-814.
- [8] 谢娟娟, 李晋, 田震, 等. 考虑路面不平顺随机性的汽车过桥动力响应分析[J]. *振动与冲击*, 2021, 40(14): 299-306.  
XIE Juanjuan, LI Jin, TIAN Zhen, et al. Dynamic response analysis of vehicles crossing a bridge considering the randomness of road surface roughness[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2021, 40(14): 299-306.
- [9] 周瑞娇, 王艳, 陈淮. 在役大跨径曲弦桁梁桥车桥耦合振动分析[J]. *振动工程学报*, 2022, 35(1): 103-112.  
ZHOU Ruijiao, WANG Yan, CHEN Huai. Analysis of vehicle-bridge coupled vibration of long-span curved truss bridge in service[J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2022, 35(1): 103-112.
- [10] Anderegg R, Kaufmann K. Intelligent compaction with vibratory rollers: feedback control systems in automatic compaction and compaction control[J]. *Transportation Research Record*, 2004, 1868(1): 124-134.
- [11] van Susante P J, Mooney M A. Capturing nonlinear vibratory roller compactor behavior through lumped parameter modeling[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2008, 134(8): 684-693.
- [12] Paulmichl I, Adam C, Adam D. Analytical modeling of the stick-slip motion of an oscillation drum[J]. *Acta Mechanica*, 2019, 230(9): 3103-3126.
- [13] 管迪, 陈乐生. 振动压路机的一种非线性动力学建模与仿真[J]. *系统仿真学报*, 2007, 19(24): 5809-5811.  
GUAN Di, CHEN Lesheng. Nonlinear dynamic modeling and simulation of vibratory roller system[J]. *Journal of System Simulation*, 2007, 19(24): 5809-5811.
- [14] Shen P, Lin S. Mathematic modeling and chaotic identification for practice construction in vibratory compacting[J]. *Journal of Vibration Engineering & Technologies*, 2018, 6(1): 1-13.
- [15] Pietzsch D, Poppy W. Simulation of soil compaction with vibratory rollers[J]. *Journal of Terramechanics*, 1992, 29(6): 585-597.
- [16] Kordestani A. Ride vibration and compaction dynamics of vibratory soil compactors[D]. Montreal: Concordia University, 2010.

## Dynamic analysis of vibration roller-subgrade coupling considering the rolling state

SUN Shu-peng<sup>1,2</sup>, WANG Feng-hui<sup>1</sup>, FENG Wei-ming<sup>1</sup>, GUO Chao<sup>2</sup>, ZHANG Mao-feng<sup>2</sup>

(1.School of Civil Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China;

2.Shandong Community Construction Machinery Co., Ltd., Jining 272073, China)

**Abstract:** In order to study the dynamic response of the drum of vibratory roller during different compaction stages, the drum-subgrade coupling dynamic model describing the motion of the drum is established, by introducing state vector  $\sigma$  for the interaction between drum and subgrade, and plastic parameter  $\epsilon$  for the elastic-plastic state of subgrade. Based on the model, the time history, phase diagram, frequency spectrum, Poincaré map and bifurcation diagram of the drum's response are obtained by numerical integration method, and the dynamic responses of the drum associated with various plastic parameters are analyzed. The results show that the drum of vibratory roller exhibits a dynamic evolution of "single period motion-period doubling motion-chaos motion". In the single period motion, the drum is in constant contact or periodic loss of contact relative to the subgrade, while in the period doubling and chaos motion, the phenomenon "bouncing" occurs. The conclusion may help us in the optimization design of vibratory roller to some extent.

**Key words:** vibratory roller; elastoplastic subgrade; compaction process; dynamic response

**作者简介:** 孙述鹏(1986—),男,博士,副研究员。电话:(0531)88392812; E-mail:shpsun@sdu.edu.cn。