

# Dynamic Model of Vibratory Roller Compaction Process and Analysis

Kunyang ZHANG

School of Civil Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing, China

**Abstract:** Based on the process of vibration compaction of asphalt pavement as the research object, this paper expounds the road vibration compaction mechanism, set up the process of vibration compaction vibratory roller - soil system dynamics model of two degree of freedom, and the dynamics equations are solved, it is concluded that the relevant model parameters effect on the pavement compaction. Analysis parameters relationship found that in this model, the vibration acceleration is only related to soil stiffness and damping, and the process of vibration compaction parameters of asphalt mixture is changing, so the vibration acceleration is also a process of dynamic change; Homework at the same time, along with the process of vibration compaction, the second order natural frequency of vibration compaction system increases gradually, near the natural frequency of the excitation frequency, easy to produce resonance, so the best vibration frequency and the corresponding larger; Analyzes the relations between vibration wheel pressure amplitude and vibration strength, found that increasing the amplitude of vibration wheel, can improve the dynamic force of wheel and the soil vibration, obtain good compaction effect.

**Keywords:** Vibratory roller; Vibration acceleration; Dynamic model; Vibration frequency; The amplitude

## 振动压路机压实过程的动力学模型及分析

张坤阳

重庆交通大学, 土木工程学院, 重庆, 中国, 400074

**摘要:** 本文以沥青路面振动压实过程为研究对象, 阐述了路面振动压实机理, 对振动压实过程建立了振动压路机-土壤系统的二自由度的动力学模型, 并对动力学方程进行了求解, 得出了相关模型参数对于路面压实度的影响。分析参数关系发现, 在此模型下, 振动加速度仅与土基刚度和阻尼有关, 而由于振动压实过程沥青混合料的参数是变化的, 所以, 振动加速度也是一个动态变化的过程; 同时, 随着振动压实作业的进行, 振动压实系统的二阶固有频率逐渐变大, 当激振频率在固有频率附近时, 容易产生共振, 故最佳激振频率也相应变大; 分析振动轮振幅和振动压实力的关系发现, 增大振动轮的振幅, 可以提高振动轮与土壤的动态作用力, 获得较好的压实效果。

**关键词:** 振动压路机; 振动加速度; 动力学模型; 激振频率; 振幅

### 1 引言

路面压实度是评定路面性能的一个重要指标, 充分有效的压实使路基和路面各结构层具有足够的稳定性、耐久性、平整度、密实度, 使路基与路面结构层的强度和刚度充分发挥, 达到高密实度后, 公路在使用过程中几乎可以消除沉陷, 提高承载能力、抗渗水能力和使用寿命。振动压实的过程是被压材料和振动压路机相互作用的动态过程, 能取得良好压实效果的压路机振动参数由沥青混合料的性质和施工现场环境条件决定, 而沥青混合料的压实效果取决于压路机的行走速度、振动频率、振幅、激振力等作业参数决

定。为了研究在激振力作用下振动压路机和沥青混合料的动态响应, 研究振动压路机的振动参数变化对沥青路面压实效果的影响, 探究压路机振动压实作业过程中沥青混合料的参数的变化情况, 进一步探究振动压实作业的机理, 需要建立起一个尽可能接近实际工况的动力学模型, 以便进行理论分析和计算。

### 2 振动压路机的压实机理分析

振动压路机的压实是一个复杂的随机过程, 振动压实的过程是被压材料和振动压路机相互作用的动态过程, 二者相互作用的过程是复杂且随机的, 能取得良好压实效果的压路机振动参数由被压材料的性质和

影响被压实材料的环境条件决定，同时被压实材料的压实效果取决于压路机的行走速度、振动频率、振幅、激振力等作业参数。

## 2.1 压实概述

### 2.1.1 压实定义

压实是指被压实材料在专用的器械或者工具的加载下，其内部间的摩擦力与粘结力得到有效克服，重新排列并相互靠近，减少了被压实材料固体颗粒间的间隙，被压实材料逐渐变得愈加密实。

被压实材料的稳定性的提高以及强度的增加都可以由压实得以实现。诸多工程实践表明，当压实不断作用在路面与路基的各结构层的材料以后，被压实材料的密实度随之增大，使道路各结构层的强度和水稳定性都得到了显著提高。

### 2.1.2 压实的物理过程

在振动荷载的作用下，被压实材料受到振动轮的作用而变得密实，大颗粒的孔隙中会进入小颗粒，而大小各异的颗粒、单个颗粒以及被压实材料的内部颗粒都将重新排列而且会相互靠近。

上述过程结束后，单位体积内被压实材料的孔隙率会减小而且固体颗粒会变多，被压实材料变得更加密实。

### 2.1.3 压实的基本方法

振动压实的时候，被压实材料想要实现内部共振，则压实机械的激振机构在工作时的振动频率的大小必须与材料的固有频率的大小相接近，颗粒发生相对位移并重新排列，此时小颗粒填充在大颗粒的孔隙之中，被压实材料的孔隙率减小，密实度增加。这种方法的特点是加载频率大，所产生的表面应力相对较小，局限了对摩擦力的克服作用。因为颗粒间的粘结力基本不受振动压实作用的影响，故不适用于粘性土的压实。

## 2.2 振动压实技术

### 2.2.1 振动压实理论

在专家学者对振动压实机理的研究中，提出了以下几种振动压实理论：颗粒发生相对位移并重新排列，此时小颗粒填充在大颗粒的孔隙之中，被压实材料的孔隙率减小，密实度增加。经过大量工程实践证明，当两者的频率接近或者相同时，被压实材料会产生

非常明显的共振，振动压实所达到的效果质量是最优的。但是，被压实材料所固有的频率在振动压实的作用下在持续地进行相应的变化，这种现象要求调节振动压路机的振动频率以得到更好的压实效果。

共振学说。该学说认为不同的被压实材料有不同的固有振动频率，当振动压路机的激振频率与被压实材料的振动频率相近或一致时，材料内部颗粒的运动会变得相当激烈，

反复荷载学说。该学说认为被压实材料在受到振动轮的周期性振动作用下，产生周期性压缩运动，进而达到压实的目的。试验研究表明，在低频率振动的范围内，被压实材料会呈现出周期性的特性，具有现实意义。而在高频率振动的范围内，没有充分的理论依据。

内摩擦减小学说。该学说认为被压实材料在振动轮的振动作用下，受到往复的冲击力作用，随着冲击波沿着被压实材料的纵向不断扩散，材料内部颗粒的状态由静止变为相对运动时，它们之间的摩擦也从静摩擦变成为动摩擦，振动轮不断地产生振动，内部摩擦力在此作用下急剧变小，摩擦力的大小减小到未振动状态的 1/5 左右，被压实材料的抗压阻力会大大降低，在这种情况下压实变得相对容易。

交变剪应力学说。该学说认为依据土力学理论，被压实材料在振动轮的振动作用产生的交变剪应力作用下，产生剪应变，材料内部颗粒间的位置通过相对运动进行重排，使间隙急剧缩小直至密实。

上述理论从不同的切入点阐述了振动压实的作用机理，各理论互有联系同时也互为补充。各学说针对被压实材料的研究都存在不足点，需要在充分考虑其不同种类以及性质的条件下进行完善和创新。

### 2.2.2 振动压实的过程

振动压实的时候，振动轮工作原理如下图 1 所示：

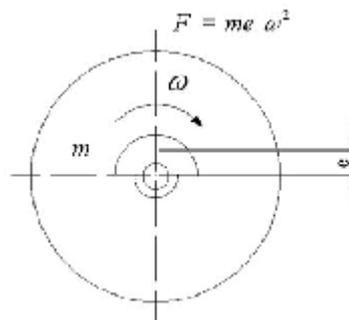


图 1. 振动轮工作示意图

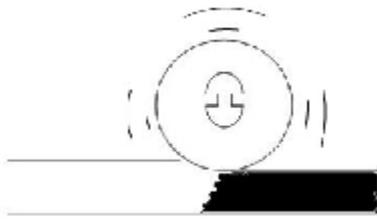


图 2. 振动冲击波在土中的传递

式中： $F$ --离心力； $m$ --偏心块质量； $e$ --偏心距； $\omega$ --角速度。

如图 1、图 2 所示为振动压实的机理，当振动压路机在作业时，振动轴带动偏心块高速旋转，此时偏心块产生的离心力形成了“压路机—土体”的振动系统的干扰力。振动压路机的振动轮在这个干扰力的作用下产生强迫振动，强迫振动的频率等于干扰力的频率，振动轮将其振动作用传递到土或其他被压实材料上。

由于振动轮的振动使其对被压实材料作用一个往复冲击力，振动轮每冲击一次，

被压实材料中就产生一个冲击波，同时，这个冲击波在被压实的材料内沿着纵深方向扩散和传播。

以垂直振动压路机的四组偏心块的激振机构的振动原理为例。四组偏心块同步反向旋转，水平方向的力相互抵消，垂直方向的力相互叠加，使钢轮只产生垂直方向的振动。当偏心块运转  $90^\circ$  时，四组偏心块合力抵消，此时钢轮无运动趋势；当偏心块运转  $180^\circ$  时，四组偏心块合力向上，钢轮向上运动；当偏心块运转  $270^\circ$  时，四组偏心块合力抵消，钢轮无运动趋势；当偏心块运转  $360^\circ$  时，四组偏心块合力合力向下，钢轮向下运动。

### 3 二自由度振动轮-土体动力学模型的建立和分析

建立的振动压实系统模型应在尽可能接近实际工况的前提下尽量简化，以便进行理论分析和数值计算。由于振动压路机的纵向轴线与其各组成结构对称，因此可将振动压实系统简化为平面振动模型。

#### 3.1 对振动模型中振动压路机的考虑

在振动压路机进行压实作业的过程中，沥青混合料以及压路机减振系统的变形比较明显，不能忽略，而振动轮和机架接近于刚体，可忽略其变形。因此，

振动轮和机架的振动可采用质量集中的动力学模型来表述，而减振系统则采用阻尼、弹簧来表述。

在振动压实系统中，除了激振力作用参与受迫振动的除了振动轮之外，还应包括一部分随着振动轮振动的土体。在研究土壤的动力学特性时，一般采用阻尼—弹簧—质量集中的系统模型来表征土体受到的振动作用。因此，可以采用阻尼—弹簧系统来等效振动压实过程中沥青路面受到的振动轮的动态作用。

振动压路机的激振力是由振动轴带动偏心块高速旋转产生的离心力形成的，这种离心力实质上是一种横幅离心力，因而振动轮的运动并不只是垂直方向上的运动，而是多方向的空间运动。然而起主要作用的力是垂直方向上的力，故为了简化模型，在建立动力学模型时只考虑振动轮在垂直方向上的运动。

#### 3.2 对振动模型中土体的考虑

土体具有弹塑性，对土体模型最重要的要求是能够在模型中既考虑其塑性变形，也要考虑其弹塑性变形的描述。在循环作用下，土体塑性变形增加，土体密实，这就是土体模型构成的基础。原则上可把土体振动压实分为 A 阶段、B 阶段和 C 阶段如下文所述。

A 阶段：土体密度小，土体在周期动载荷作用下，产生较大的塑性应变，并表现为土体内阻尼性能的存在，形成载荷—变形的滞回圈，表明土体颗粒在压力下调整相对位置需要花费时间，并较多地吸收振动轮振实作业产生的能量，这是土体变形的第一阶段。

B 阶段：土体密实度在增加，土体在周期载荷作用下，产生以弹性变形为主的弹塑性应力—应变关系，土体的变形量相对减少，吸收振动轮振实的能量减少，土体弹性增加，塑性减少，这是土体变形的第二阶段。

C 阶段：土体密实度增加到一定程度，土体在周期动载荷的作用下，表现为完全刚性的应力—应变关系，土样不再产生变形，不再吸收振动轮的振实能量，振动轮振动参数组合成的工作状态已对土样不产生有效的压实，该状态下振动轮的压实潜力已充分发挥，应停止压实，或更换、调整相应的工作参数，方能进行进一步的压实。在这一阶段，压实轮将产生跳振现象，即压实轮会在一定时刻脱离地面，而在 A 和 B 阶段则不会出现这种现象。

#### 3.3 动力学模型的建立及方程求解

基于以上为了理论分析需要而进行的简化以及样本振动压路机的实际结构，沥青路面振动压实过程的动力学模型如图 1 所示。模型将随动土体的振动响应考虑在内，可以比较准确地模拟沥青路面振动压实过程。

以动力学模型中各质量块在未受激振力作用时所处的位置为坐标原点，由牛顿第二定律力的平衡关系可得对应的动力学方程：

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1 + c_1 \dot{x}_1 + k_1 x_1 - c_1 \dot{x}_2 - k_1 x_2 = 0 \\ m_2 \ddot{x}_2 + c_1 (\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + k_1 (x_2 - x_1) + F_s = F_0 \sin \omega t \\ m_3 \ddot{x}_3 + c_2 \dot{x}_3 + k_2 x_3 = F_s \end{cases} \quad (1)$$

在振动压路机进行压实作业的初期，由于沥青混合料的刚度和密实度较小，振动轮与沥青混合料一直处于接触状态，称这种工况为接地工况，此时  $x_2 = x_3$ ， $F_s > 0$ ；随着压实作业的进行，沥青混合料的刚度和密实度逐渐增大，在压实作业的后期，可能会出现振动轮脱离沥青路面的情况，称这种工况为跳振工况，此时  $F_s = 0$ 。

当振动轮处于接地状态时，由于  $x_2 = x_3$ ，动力学方程(1)可以改写为如下的矩阵形式：

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 + m_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_1 & -c_1 \\ -c_1 & c_1 + c_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 & -k_1 \\ -k_1 & k_1 + k_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ F_0 \sin \omega t \end{bmatrix} \quad (2)$$

由于本模型为线性时不变系统，激励力为谐振力，因而系统的稳态响应为谐振位移。使用复数矢量表示法求解方程(1)，激励力用  $F_0 e^{i\omega t}$  表示，令： $x_1 = X_1 e^{i(\omega t - a_1)}$ ， $x_2 = X_2 e^{i(\omega t - a_2)}$ ，其中， $X_1$ 、 $X_2$  为瞬时位移  $x_1$ 、 $x_2$  的幅值， $a_1$ 、 $a_2$  为瞬时位移  $x_1$ 、 $x_2$  落后于激励力  $F_0$  的相位角。

由于  $\dot{x}_1 = i\omega x_1$ ， $\ddot{x}_1 = -\omega^2 x_1$ ， $\dot{x}_2 = i\omega x_2$ ， $\ddot{x}_2 = -\omega^2 x_2$ ，代入(2)式有：

$$\begin{cases} x_1 = F_0 \left( \frac{A_1^2 + B_1^2}{C^2 + D^2} \right)^{\frac{1}{2}} \\ x_2 = F_0 \left( \frac{A_2^2 + B_2^2}{C^2 + D^2} \right)^{\frac{1}{2}} \end{cases} \quad (3)$$

其中  $A_1 = k_1$ ， $B_1 = c_1 \omega$

$$C = (k_1 - m_1 \omega^2) [k_2 - (m_2 + m_3) \omega^2] - \omega^2 (c_1 c_2 + k_1 m_1) \quad (4)$$

$$D = \omega \left\{ c_1 [k_2 - (m_2 + m_3) \omega^2 - m_1 \omega^2] + c_2 (k_1 - m_1 \omega^2) \right\} \quad (5)$$

$A_2 = k_1 - m_1 \omega^2$ ， $B_2 = c_1 \omega$

若系统没有阻尼，振动系统下的一阶、二阶固有

频率为

$$\omega_1 = \left( \frac{E - \sqrt{E^2 - 4m_1(m_2 + m_3)k_1k_2}}{2m_1(m_2 + m_3)} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

$$\omega_2 = \left( \frac{E + \sqrt{E^2 - 4m_1(m_2 + m_3)k_1k_2}}{2m_1(m_2 + m_3)} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

$$E = m_1 k_2 + k_1 (m_1 + m_2 + m_3)$$

可以看到：

$$\begin{aligned} |\ddot{x}_2| &= \omega^2 x_2 = \omega^2 F_0 \left( \frac{A_1^2 + B_1^2}{C^2 + D^2} \right)^{\frac{1}{2}} \\ &= f(k_2, c_2) \end{aligned} \quad (8)$$

当激振力一定时，其他参数都是不变的，只有  $k_2$ 、 $C^2$  在变化。故从式中可以看出振动加速度的大小只与土体的刚度和阻尼有关。

一阶固有频率和二阶固有频率分别反映减振器和机架间的动态响应特性以及沥青混合料和振动轮间的动态响应特性，其中，一阶固有频率主要影响振动压路机减振系统的减振效果，二阶固有频率随沥青混合料的密实度和性质的变化而变化，对沥青混合料的压实效果有较大的影响。

#### 4 模型参数对压实效果的影响

动力学方程(1)是个含参方程，振动参数和沥青混合料参数都包含在内，压实效果和系统的动态响应在较大程度上都受这些参数的影响。

沥青混合料的参数在振动压实过程中不是保持不变的，而是一个动态变化的过程。外界环境的变化以及沥青面层压实度的变化都会导致沥青混合料阻尼和刚度的改变。在振动压实系统中，振动轮与沥青混合料间的动态作用力  $F^s$  是表征压实效果的重要指标， $F^s$  越大，压实效果越好。振动轮接地状态时，由于  $x_2 = x_3$ ，可得：

因此，

$$|F_s| = X_2 \sqrt{(k_2 - m_3 \omega^2)^2 + c_2^2 \omega^2} \quad (9)$$

式中： $X_2$  为振动轮振幅。

由式(9)可以看出：

影响振动轮与沥青混合料间的动态作用力  $F_s$  的因素不仅包括频率、振幅等振动参数，还包括沥青面层的刚度和阻尼等参数，由于沥青混合料的参数是动态变化的，因而  $F_s$  也是动态变化的；

(1) 振动轮振幅  $x_2$  与  $F_s$  是正相关，增大振幅  $x_2$ ，可提高  $F_s$ ；

(2) 随着振动压实作业的进行，系统的二阶固有

频率  $\omega_2$  逐渐增大, 动态作用力  $F_s$  也随之增大;

(3) 动态作用力  $F_s$  随沥青混合料的阻尼  $c_2$  的增加而增大。

若以振动轮与沥青混合料间的动态作用力  $F_s$  与激振力  $F_0$  的比值表示激振力的有效率  $R_r$ , 则  $R_r$  为:

$$R_r = \frac{|F_s|}{F_0} \quad (10)$$

工程实践表明, 振动轮与沥青混合料间的动态作用力与压实效果呈正相关关系。观察上式得出, 在压路机的激振力  $F_0$  确定后, 若  $R_r$  较大, 则  $F_s$  较大, 即压实效果较好。而选择合理的振动轮振幅  $x_2$  是提高  $R_r$  值的关键。

## 5 结语

根据动力学理论对建立的二自由度振动压路机压实模型进行了求解, 在此模型下, 分析振动加速度和振动压路机的相关参数及路面参数的关系发现, 振动加速度的大小仅和土基的刚度和阻尼有关。通过探讨振动压路机的激振频率和振幅对振动压实效果的影响规律, 得到结论: (1) 振动压实系统的二阶固有频率随着土壤密实度的增加而有所提高; (2) 增加振动轮振幅, 可提高振动轮和土壤间的动态作用力, 提高压实效果。

## References (参考文献)

- [1] Qing-zhe Zhang. Study on model and parameters of soil-based vibration compaction system [D]. Chang'an University, 2010.
- [2] Sicheng Qin, Longzhu Chen. Dynamic Analysis of Vibratory Roller-Soil System of Vibratory Roller [J]. Journal of Tongji University (Natural Science Edition), 2001, 29 (9): 1026-1031.
- [3] Shihong Wan, Zizheng Zhang, Zhongfu Zhang. Dynamic Analysis of Vibration Compaction System [J]. Journal of Wuhan Institute of Technology, 1987, 9 (1): 101-112.
- [4] Jirong Xia. Analysis of Technical Measures for Compaction Construction of Subgrade and Pavement of Highway Engineering [J]. Science and Technology Innovation Guide, 2012 (14): 67-70.
- [5] Zhongfu Zhang, Mingtai Rao, Shihong Wan, etc. Experimental Study on Soil - Mechanical System Similarity Model in Vibration Compaction [J]. Journal of Wuhan University of Technology: Information and Management Engineering Edition, 1986 (3).
- [6] Shirong Yan, Bangchun Wen. A non-linear dynamic study of vibratory roller [J]. Journal of Fuzhou University: Natural Science Edition, 2000, 28 (5): 64-67.
- [7] Yunjia Long, Yong Yang, Congling Wang. Based roller chaotic vibration engineering mechanics [J]. China Engineering Science, 2000, 2 (9): 76-79.
- [8] Sheng Qiu. Study on the relationship between vibration acceleration and compactness of vibratory roller [D]. Chongqing Jiaotong University, 2011.
- [9] Changxiong Zhou, Chuanlin Zhou. Dynamic model of vibratory roller and control of working parameter [J]. Journal of East China Shipbuilding Institute, 2000, 14 (6): 28-31.
- [10] Zuwang Sun, Xueli Wei, Que Wang. Study on Dynamic Process and Response Characteristics of Oscillation Compaction [J]. Chinese Journal of Highway, 1998 (2): 117-126.
- [11] Lili Xin, Wenhui Liang, Bangchun Wen. Analysis of dynamic characteristics of vibratory roller system with vibrating wheel jumping phenomenon [J]. Chinese Journal of Engineering Mechanics, 2008, 6 (2): 161-166.
- [12] Bing Li, Shengjie Jiao. Vibratory roller and compaction technology [M]. Beijing: People's Communications Press, 2001.
- [13] Juyun Yuan, Jiangu Qian, Hongming Zhang. Soil Science and Soil Mechanics [M]. Beijing: People's Communications Press, 2009.02.