

文章编号:1671-6833(2006)03-0050-05

双频振动在振动压实中的应用及试验研究

刘本学, 冯忠绪, 董秀辉

(长安大学道路施工技术与装备教育部重点实验室, 西安 710064)

摘 要: 针对当前单频振动压实机械的压实性能不足现象, 提出了一种基于双频合成技术的双频振动压实机械, 建立了该机械的动力学模型。经过试验研究, 得出双频振动压实优于单频振动压实, 以及相位角选择在 $(-300, 300)$ 对深层压实效果较好, 两激振频率比选择为3:2, 即高频为33.98 Hz, 低频为22.44 Hz时, 压实效果较好的结论。并给出了在设计双频振动压路机时, 频率、振幅、相位角等影响压实重要参数的合理选择。

关键词: 双频振动压实; 幅值比; 相位角; 频率比

中图分类号: U 415.521

文献标识码: A

0 引言

在工程机械领域, 振动的应用由来已久^[1], 如振动压路机、摊铺机等很早就得到了应用。现在的压实机械大多采用一个频率和振幅的方法, 这虽然能减少土壤内的摩擦力使压实效率大大提高, 但由于被压实材料的颗粒大小和组成不同, 即使在压实过程中变换振动频率及振幅, 采用单频振动也很难使压实材料达到共振压实的预想效果^[2,3]。为了强化压实过程, 可以采用多频振动压实技术^[4]。由于多频振动具有较宽的频率, 对土壤压实时引起更多不同颗粒的振动, 从而增加压实效果^[5]。笔者以双频振动为例, 通过试验结果分析, 探讨多频振动压实对土壤压实效果, 为土壤的压实寻找一种更有效的手段和方法。

1 双频振动的基本原理^[6,7]

设有两个简谐振动为

$$\begin{cases} x_1 = A_1 \sin(\omega_1 t + \varphi_1) \\ x_2 = A_2 \sin(\omega_2 t + \varphi_2) \end{cases} \quad (1)$$

如这两个简谐振动在同一直线方向上, 那么它们合成时, 直接将它们相加为

$$x = x_1 + x_2 = A_1 \sin(\omega_1 t + \varphi_1) + A_2 \sin(\omega_2 t + \varphi_2) \quad (2)$$

由(2)式看出, 两个简谐振动在同一个方向上的合成振动, 不再是一个简谐振动, 而是一个复杂的运动。若两个频率 ω_1 和 ω_2 是可以通约的, 合成

振动是一个周期振动; 若两个频率相等, 合成振动是一个简谐振动。下面分别讨论两个振动频率之间可能存在的3种不同情况。

1.1 两频率相等

当 $\omega_1 = \omega_2 = \omega$ 时, 由式(2)得到

$$\begin{aligned} x &= (A_1 \cos \varphi_1 + A_2 \cos \varphi_2) \sin \omega t + \\ &\quad (A_1 \sin \varphi_1 + A_2 \sin \varphi_2) \cos \omega t \\ &= A \sin(\omega t + \varphi) \end{aligned} \quad (3)$$

式中:

$$\begin{cases} A = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + 2A_1 A_2 \cos(\varphi_1 - \varphi_2)} \\ \varphi = \operatorname{tg}^{-1} \frac{A_1 \sin \varphi_1 + A_2 \sin \varphi_2}{A_1 \cos \varphi_1 + A_2 \cos \varphi_2} \end{cases} \quad (4)$$

式(3)表明, 两个相同频率的简谐振动在同一个方向上合成后的振动, 仍旧是简谐振动, 振动的频率与原来的两个简谐振动的频率相等, 振幅 A 及相位 φ 由式(4)确定。

1.2 两频率不等, 频率比值 ω_1/ω_2 为有理数

当两个简谐振动的频率不相等, 频率比 ω_1/ω_2 为一个有理数时, 由式(2)所表示的振动是一个周期运动, 周期等于两个简谐振动的周期的最小公倍数。不同的振幅比值 A_1/A_2 及相位差 $\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$, 可以得到不同波形的合成振动。图1表示频率比值 $\omega_1/\omega_2 = 3$, 相位差 $\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 = 0$ 时, 不同的振幅比值($A_1/A_2 = 1/2, 1, 2$), 对合成振动波形的影响。图2表示频率比值 $\omega_1/\omega_2 = 2$, 振幅比值 $A_1/A_2 = 1/2$ 时, 不同的相位差($\varphi = \varphi_1 -$

收稿日期: 2006-03-31; 修订日期: 2006-05-14

作者简介: 刘本学(1977-), 男, 河南新蔡人, 长安大学博士研究生, 主要从事工程机械理论及其优化设计方面的研究。

$\varphi_2 = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$), 对合成振动波形的影响.

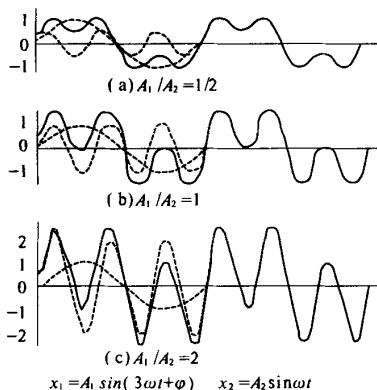


图1 不同的振幅比值时合成振动

Fig. 1 Compositing vibration with different amplitude ratio

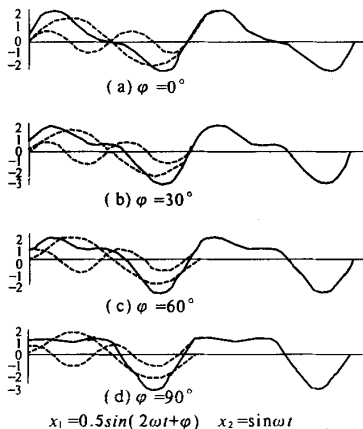


图2 不同的相位差时合成振动

Fig. 2 Compositing vibration with phase difference

1.3 两个频率不相等, 频率差是一个小值

当 $\omega_1 = \omega$, $\omega_2 = \omega + \Delta\omega$, $\Delta\omega < \omega$ 时, 式(3)变为

$$x = A_1 \sin(\omega t + \varphi_1) + A_2 \sin[(\omega + \Delta\omega)t + \varphi_2] \\ = A \sin(\omega t + \varphi) \quad (5)$$

式中:

$$\begin{cases} A = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2\cos(\Delta\omega t + \varphi_1 - \varphi_2)} \\ \varphi = \tan^{-1} \frac{A_1\sin\varphi_1 + A_2\sin(\varphi_2 + \Delta\omega t)}{A_1\cos\varphi_1 + A_2\cos(\varphi_2 + \Delta\omega t)} \end{cases} \quad (6)$$

式(5)表示的合成振动, 如图3所示, 在形式上仍旧是简谐振动, 但是现在的简谐振动的振幅 A 和相位 φ 是由式(6)确定的.

可以看到, 振幅 A 和相位 φ 不再是常数, 而是随着时间周期变化的. 合成振动的振幅将在最大值 $A_{\max} = |A_1 + A_2|$ 与最小值 $A_{\min} = |A_1 - A_2|$ 之间变化. 这种振幅随时间缓慢变化的周期振动称为拍振动, 如图3所示. 拍振动振幅的频率 $f = \Delta\omega/2\pi = (\omega_2 - \omega_1)/2\pi$; 拍振动振幅的周期 $T = 2\pi/\Delta\omega =$

$2\pi/(\omega_2 - \omega_1)$. 显然, 频率差 $\Delta\omega$ 越小, 拍振动的振幅 A 愈接近常数, 而拍振动也愈接近简谐振动.

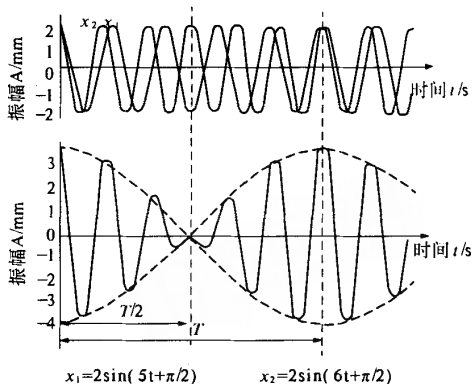


图3 拍振动

Fig. 3 Clap vibration

2 压实机械中双频振动的应用

通过对两个不同简谐振动合成的分析, 可以知道: 对于情况1, $\omega_1 = \omega_2 = \omega$ 时, 合成振动仍旧是一单频简谐振动, 振动频率没有改变, 只是振幅 A 和相位 φ 相应变化. 如将此原理应用在振动压实机械上, 并不能改变单频压实机的特性; 情况3 频率差 $\Delta\omega$ 是一小值时, 从合成振动的振幅随时间变化来看, 由于出现大的振幅和小的振幅相间隔的情况, 这不利于压实机保持稳定振幅及能量, 从而造成压实质量和工作速度的不均匀^[2]; 振动压实机中采用的两个谐波分量的频率应尽可能符合情况2的关系. 两个激振频率之一应适应于压实介质工作要求范围之内, 即确定为谐波频率 $\omega_1 = 45 \sim 65$ Hz. 为了适应对路基初压实的工作要求, 另一频率则相应为低频振动, 相应确定为基波频率. 为了使得合成振动仍具有一定的周期, 两个激振频率应为两个简谐振动的叠加, 且 $\omega_1/\omega_2 = Z$ (Z 为整数).

3 基于双频振动压实机力学模型的建立

3.1 双频振动压实试验样机简图

根据以上对两个谐波合成的分析, 以第二种情况为理论依据, 笔者设计了新型双频振动压实机械, 其结构简图如图4所示. 为了检验该压实机的行走速度、压实效果及能耗等重要参数, 对双频振动压实机进行土壤压实度在时域、频域的响应及功率谱的测量.

3.2 双频振动压实机的试验方案

试验在长安大学大型土槽试验室进行, 采用3个压力盒、3个加速度传感器及相应的电压电流表的方法, 用来测试压实过程中土壤的应力变化、机器本身的振动情况及工作过程中的能耗情况等.

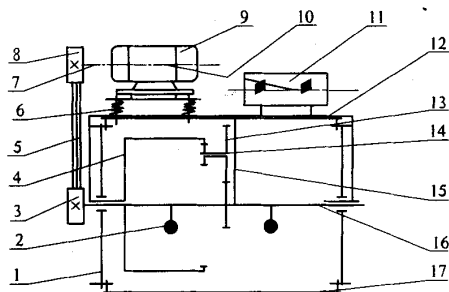
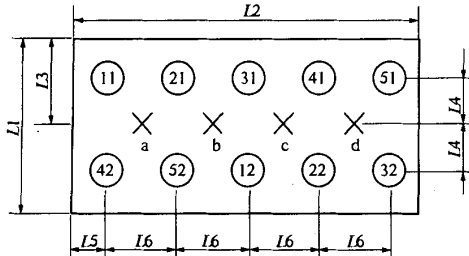


图4 双频振动压实机的结构简图

Fig.4 Structure of Double-frequency vibration compaction

1—左、右侧支撑板;2—下车偏心块;3—输入带轮;4—内齿轮;5—皮带;6—减振器;7—离合器;8—电机输出带轮;9—电机;10—传动装置;11—高频激励器;12—车架;13—双联齿轮;14—系杆;15—系杆安装板;16—下车轴;17—压实轮

用环刀法对压实土壤进行采样,采样点是依据 GB4478-84《振动压实机性能试验方法》的规定,结合样机实际压实工作面加以确定的,其试验方案如图5所示.考虑到不同的压实频率、压实遍数、振幅等都会对机械本身的性能产生较大影响,因此采用表1所列的试验方案.



× 沉降量测点 L1=580 mm, L2=5 000 mm, L3=290 mm
○ 环刀取土点 L4=290 mm, L5=900 mm, L6=800 mm

图5 土壤取样点和沉降量测点示意图

Fig.5 Definition of point for soil sampling and settlement testing

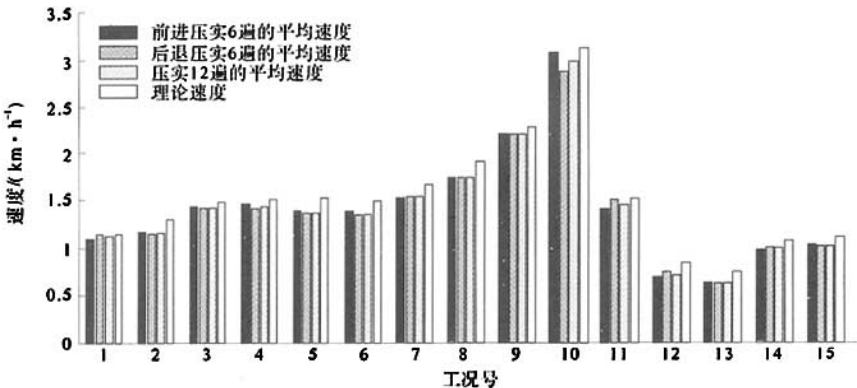


图6 速度测试结果

Fig.6 The test results of velocity

表1 试验工况参数及编号

Tab.1 Test work parameter and numbering

工况	频率/Hz		振幅/mm		激振力/kN		相位角
	f_1	f_2	A_1	A_2	F_1	F_2	$\phi/(^{\circ})$
1	37.50	18.75	0.30	1.20	6	6	0
2	41.80	21.09	0.30	1.20	8	8	0
3	47.66	23.83	0.30	1.20	10	10	0
4	47.66	23.83	0.30	1.20	10	10	60
5	47.66	23.83	0.30	1.20	10	10	120
6	47.66	23.83	0.30	2.40	10	20	0
7	50.00	25.00	0.30	1.20	12	12	0
8	58.20	29.30	0.30	1.20	15	15	0
9	37.11	24.81	0.30	1.20	6	10	0
10	48.83	32.40	0.30	1.20	10	26	0
11	23.83	—	2.40	—	20	—	—

4 试验结果分析

4.1 行走速度的试验

工作速度是指振动压实机在进行压实作业时
的行走速度,与静作用压实机相比,振动压实机
的工作速度对压实效果影响特别明显.如图6所
示,测得不同工况下的压实机的行走速度与理论
速度基本一致,说明自行式双频振动压实机行走
比较稳定.

4.2 不同工况的功率试验

压实机工作所需功率是评判压实机性能的一
项重要指标,随压实遍数的增加,所耗功率的变化
应能大致反映出“压实机—土壤”系统的动态变化
趋势.由图7得出,各工况下,功率随压实遍数的
增加,呈先减小后基本稳定的变化趋势,其中,前
6遍的减小明显.比较各工况,当激振力越大时
(如工况10、11),所需功率越大,这时压实机所需
的功率波动变大,这说明激振力的加大对压实机
性能的影响较大.

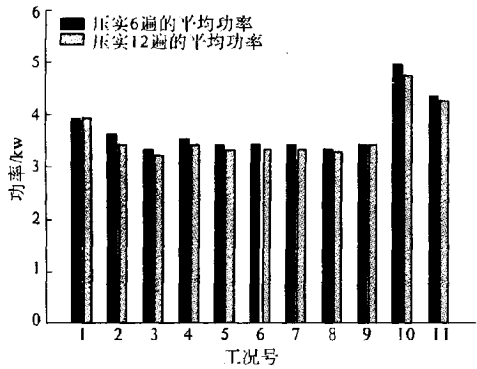


图 7 功率测试结果
Fig.7 Power test results

4.3 不同工况压实试验

通过对不同工况下振动压路机的压实性能的试验可以得出如下结论：

(1) 各工况中,压实 1~6 遍过程中,土壤的压实度增加十分明显;在压实 6~12 遍时,土壤表层压实度变化较小。

(2) 从各工况压实度随深度的变化图中可以看出:第三层的压实度普遍比较好,说明双频振动压路机对深层的压实效果比较好。

(3) 压实机都有比较深的压实影响深度,激振力增大会增强这种作用,但表层压实度随着激振力增加不是一直加大。对试验结果进行比较得知,两频率比为 2:3 时压实的深层效果要优于频率比为 1:2 的情况。

(4) 双频振动两频率振幅比不宜过大,参见图 8、图 11 和图 12,比较 1、2、3 三种工况,工况 1 的低频振幅是工况 2 低频振幅的 2 倍,两工况高频振幅相同。从图中可以看出,工况 1 的低频振幅大,激振力大和消耗功率大,同时压实效果比较好,说明双频振动两频率振幅比应在一定范围内,不宜过大或过小。

(5) 参见图 8、图 9,比较 1、4、5、6、7、8、9 这 7 种工况压实度随压实遍数的变化情况。考虑到相位角对土壤中层、下层的影响,本压实机相位差 $\varphi \in (-30^\circ, 30^\circ)$ 这一范围内时,压实效果最好。

(6) 参照试验结果及工况一的结果,同时综合考虑功率、速度、沉降量和压实度等几个因素,认为双频振动压实两频率比为 3:2,高频为 33.98Hz、低频为 22.44 Hz 时,压实效果最好。

(7) 频率对表层压实度的影响较大,振幅和

相位角对深层压实度的影响比较大。

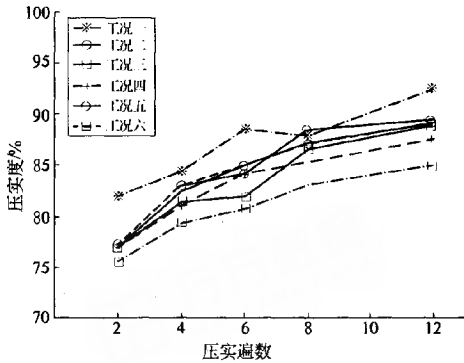


图 8 压实度随压实遍数的变化规律曲线
Fig.8 The relationship between compaction degree and compaction times (1st, 2nd, 3rd, 4th, 5th, 6th condition)

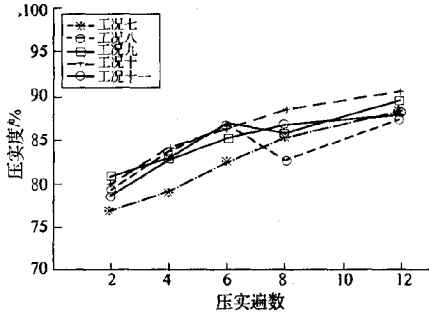


图 9 压实度与压实遍数的关系曲线
Fig.9 The relationship between compaction degree and compaction times (comparison at 7th, 8th, 9th, 10th, 11th condition)

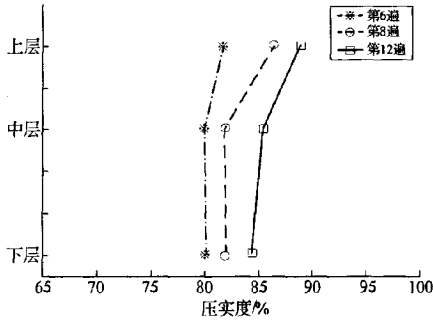


图 10 压实度与深度的关系曲线 (工况 3)
Fig.10 The relationship between compaction and depth (third condition)

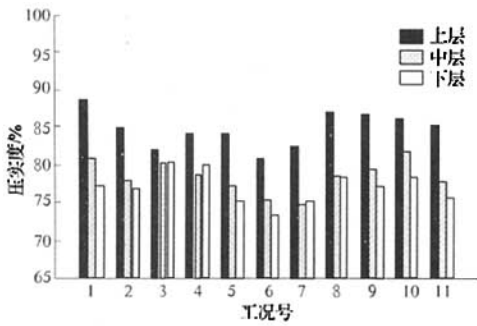


图 11 各工况压实度直方图(压实第 6 遍)

Fig.11 All conditions' histogram(at 6th compaction)

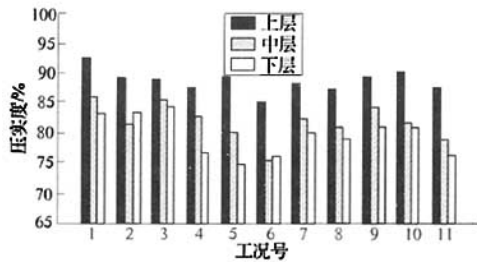


图 12 各工况压实度直方图(压实第 12 遍)

Fig.12 All conditions' histogram(at 12th compaction)

5 结论

- (1) 当两个简谐振动信号的频率不等, 频率比值 ω_1/ω_2 为一有理数时, 较适合应用于双频振动压实;
- (2) 设计了双频振动压路机的试验样机, 对不

同的压实工况进行了试验研究;

(3) 频率对表层压实度的影响较大, 振幅和相位角对深层压实度的影响比较大; 相位角应选择在 $(-30^\circ, 30^\circ)$ 范围内, 对深层压实效果较好, 频率比应为 3:2, 即高频为 33.98 Hz, 低频为 22.44 Hz 时, 压实效果较好.

参考文献:

- [1] 闻邦椿, 刘树英, 何勃. 振动机械的理论与动态设计方法[M]. 北京: 机械工业出版社, 2001.
- [2] 董秀辉. 双频振动压实作业参数的试验研究[D]. 西安: 长安大学. 2003.
- [3] 王复明, 李 嘉, 蔡迎春. 路面雷达电磁波的时域有限差分法模拟[J]. 郑州大学学报(工学版), 2005, 26(1): 28 ~ 32.
- [4] MURO T, HOSHIKA Y. Tractive performance and compaction effect of a road roller running on a weak sandy soil [J]. Journal of Terramechanics 1995, 32(5): 245 ~ 261.
- [5] YOO T S, SELIG E T. Cundamentals of vibrat - ory compaction of soil[C]. Japan: proceeding, ninth International Conference on Soil Mechanics and foundation Engineering, 1977. 375 ~ 380.
- [6] YOO T S. A theory for vibratory compaction of soils[D]. Buffalo: State university of New York at Buffalo, 1975. 44 ~ 52.
- [7] PIETZSCH D, POPPY W. Simulation of soil compaction with vibratory rollers [J]. Journal of Terramechanics, 1992, 29(6): 585 ~ 597.

Experimental Research and Application of Double - Frequency Vibration in Vibration Compaction

LIU Ben - xue; FENG Zhong - xu; DONG Xiu - hui

(Key Laboratory for Highway Construction Technology and Equipment of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: In view of the phenomena of insufficient compaction about the single - frequency vibration compaction, the paper puts forward the double - frequency vibration compaction based on double - frequency vibration superposition, and builds the dynamic model. The experimentation result indicates that the double - frequency vibration compaction is better than the single - frequency one, and it can also be known that the phase angle selected at $(-30^\circ, 30^\circ)$ is preferable for compaction on deep soil, and the compaction effect is better when the ratio of the two vibration frequencies are selected at 3:2, that the high frequency is at 33.98Hz, and the low one is at 22.44Hz. Some suitable parameter values affecting the soil compaction are given in the design of the double - frequency vibration compaction, such as ratio of vibration, ratio of amplitude and phase angle etal.

Key words: double - frequency vibration compaction; ratio of amplitude; phase angle; ratio of frequency