

基于混沌振动力学的压路机工程

龙运佳, 杨 勇, 王聪玲

(中国农业大学, 北京 100083)

[摘要] 为将混沌振动力学的理论研究转化为压路机工程的新技术成果, 研制了三种混沌振动压路机 (0.75 t, 10 t, 14 t), 并进行了振动测试、数值仿真与压实试验, 证明混沌振动压路机比普通振动压路机提高工效 12.2%。其中, 14 t 重型混沌振动压路机已用于我国西部高速公路开发。

[关键词] 混沌; 振动; 压路机工程

1 引言

在非线性振动系统中, 当系统参数满足一定条件时, 即使在确定性输入下, 输出仍呈现不规则的振动, 称为混沌振动^[1,2]。近年来, 各国研究者对工程领域内的混沌振动进行了研究^[3]。但多数研究侧重于混沌振动的避免, 例如, 列车的混沌振动。本课题的研究侧重于混沌振动的利用。1993—1995年, 本文第一作者主持了国家自然科学基金项目“混沌振动实验识别及其发生机构参数研究”(59275173), 获得了“混沌激振器”^[4], “混沌振动台”^[5]两项国家专利 (ZL95217738.2 与 ZL95214278.3)。混沌振动比单频振动有着更丰富的频率成分和更剧烈的速度变化, 有利于用作振动压实、振动筛选和振动分离等作业, 对国民经济中的机械、化工、食品等工业, 矿冶、土建、筑路等工程, 制药、制茶、制陶等各行业, 均具有广阔的应用前景。它在振动装备中的应用, 将是人类振动利用技术的进步。

1996年, 本文第一作者在 CVE-1 型混沌激振器的基础上, 又研制了 CVE-2 型混沌激振器, 装于 0.75 t 轻型混沌振动压路机, 其力学模型与数值仿真见文献 [6]。为进一步进行深入研究, 1999年开始主持国家博士点基金项目“混沌振动压实力学”(980112) 的研究。

振动压路机是建筑基础施工、水坝、港口、铁路、公路和矿山工程中必不可少的施工设备。由于被压实工料的结构成分异常复杂, 且其物理力学性能具有多样性, 即不同颗粒要在不同的振动加速度下才能达到较好的压实效果, 故用 CVE-2 型激振器装备重型混沌振动压路机^[7], 使其振动轮产生由主频下的宽频带和宽幅域组成的混沌振动, 将大小不同颗粒间的摩擦进一步减小, 呈现流动状态, 而充填间隙, 从而可比常规振动压路机更有效地压实各类土壤铺层及岩石填方。本文介绍了对重型混沌振动压路机进行的振动测试、数值仿真与压实试验。

2 压路机压实力学模型

考虑振动轮在垂直方向的运动, 且假定振动轮始终与地面接触。混沌振动压路机“机架-振动轮-土”系统的力学模型如图 1 所示。CVE-2 型激振器由偏心 1— OO_1 , 偏心 2— O_1C_2 , 和偏心 3— O_2C_3 组成。 C_1 , C_2 和 C_3 分别为偏心 1, 偏心 2 与偏心 3 的质心。 $\varphi_0 = \omega t$, ω ——偏心 1 的角速度。 M_f ——机架的当量质量。 C_f ——减振器阻尼, K_f ——减振器刚度, m_d ——振动轮质量, C_s ——土壤阻尼, K_s ——土壤刚度。

对图 1 的四自由度力学模型, 用 Lagrange 第二类方程, 以机架位移 y_f , 振动轮位移 y_d , 偏心 2

[收稿日期] 2000-06-21; 修回日期 2000-07-18

[基金项目] 国家博士学科点专项科研基金资助项目 (980112)

[作者简介] 龙运佳 (1937-), 男, 广东广州市人, 中国农业大学教授, 博士生导师

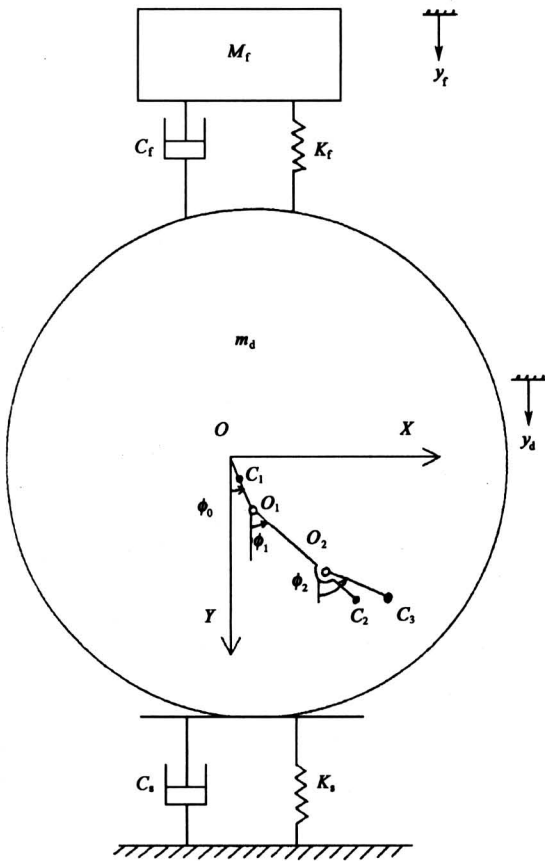


图 1 “机架-振动轮-土”系统力学模型
Fig.1 The mechanical model for the system of frame-drum-soil

转角 φ_1 ，偏心 3 转角 φ_2 为广义坐标，建立 14 t 混沌振动压路机的相应运动微分方程为：

$$\begin{aligned}
 k_1 \ddot{y}_f &= -u_6(y_f - y_d) - r_2(\dot{y}_f - \dot{y}_d) + u_3 \\
 k_2 \ddot{y}_d - k_9 \sin \varphi_1 \ddot{\varphi}_1 - k_{10} \sin \varphi_2 \ddot{\varphi}_2 &= k_8 \omega^2 \cos \omega t + \\
 & k_9 \cos \varphi_1 \dot{\varphi}_1^2 + k_{10} \cos \varphi_2 \dot{\varphi}_2^2 - u_5 y_d + \\
 & u_6(y_f - y_d) - r_1 \dot{y}_d + 2r_2(\dot{y}_f - \dot{y}_d) + u_4 \\
 k_3 \ddot{\varphi}_1 - k_9 \sin \varphi_1 \ddot{y}_d + k_7 \cos(\varphi_1 - \varphi_2) \ddot{\varphi}_2 &= \\
 & k_5 \omega^2 \sin(\omega t - \varphi_1) - k_7 \sin(\varphi_1 - \varphi_2) \dot{\varphi}_2^2 - \\
 & u_1 \sin \varphi_1 + r_3(\omega - \dot{\varphi}_1) - r_4(\dot{\varphi}_1 - \dot{\varphi}_2) \\
 k_7 \cos(\varphi_1 - \varphi_2) \ddot{\varphi}_1 - k_{10} \sin \varphi_2 \ddot{y}_d + k_4 \ddot{\varphi}_2 &= \\
 & k_6 \omega^2 \sin(\omega t - \varphi_2) + k_7 \sin(\varphi_1 - \varphi_2) \dot{\varphi}_1^2 - \\
 & u_2 \sin \varphi_2 + r_4(\dot{\varphi}_1 - \dot{\varphi}_2)
 \end{aligned}$$

式中常系数： $k_1 = 1\,464\text{ kg}$ ， $k_2 = 4.071\,2 \times 10^3\text{ kg}$ ， $k_3 = 0.078\,6\text{ kg}\cdot\text{m}^2$ ， $k_4 = 2.419\,6\text{ kg}\cdot\text{m}^2$ ， $k_5 = 0.001\,5\text{ kg}\cdot\text{m}^2$ ， $k_6 = 0.022\,5\text{ kg}\cdot\text{m}^2$ ， $k_7 = 0.011\,5\text{ kg}\cdot\text{m}^2$ ， $k_8 = 0.768\,1\text{ kg}\cdot\text{m}$ ， $k_9 = 0.394\,4$

$\text{kg}\cdot\text{m}$ ， $k_{10} = 5.769\,3\text{ kg}\cdot\text{m}$ ， $u_1 = 3.864\,6\text{ N}\cdot\text{m}$ ， $u_2 = 56.539\,2\text{ N}\cdot\text{m}$ ， $u_3 = 1.434\,7 \times 10^4\text{ N}$ ， $u_4 = 3.989\,8 \times 10^4\text{ N}$ ， $u_5 = 14 \times 10^6\text{ N/m}$ ， $u_6 = 5.25 \times 10^6\text{ N/m}$ ， $r_1 = 7 \times 10^4\text{ N}\cdot\text{s/m}$ ， $r_2 = 2.625 \times 10^3\text{ N}\cdot\text{s/m}$ ， $r_3 = 0.311\,4\text{ N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}$ ， $r_4 = 3.517\,8\text{ N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}$ 。

3 数值仿真与混沌识别

用 MATLAB 语言对 14 t 混沌振动压路机的压实力学模型进行数值仿真，得到振动轮相轨图（图 2），加速度功率谱图（图 3）及 Lyapunov 指数（0.056 5）。

Lyapunov 指数为正，相轨缠绕（图 2），功率谱为宽频（图 3），均表明振动是混沌的。

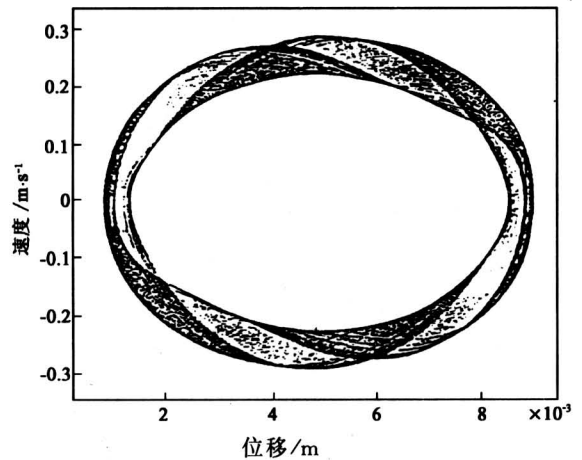


图 2 振动轮相轨图
Fig.2 The trajectory of drum

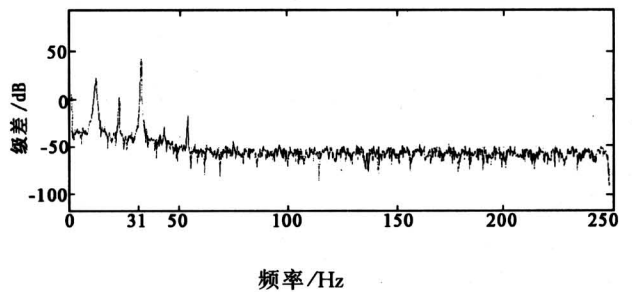


图 3 振动轮加速度功率谱
Fig.3 The spectrum of acceleration for drum

4 振动试验

4.1 试验工况

对重型混沌振动压路机（14 t）进行了振动试验，试验时，压路机停在混凝土地面上，振动轮下

垫轮胎，加速度传感器放在振动轮上，信号由 B.K.2034 信号分析仪进行实时处理。

4.2 试验结果

振动轮振动自相关图（图 4）的衰减性体现了振动的不规则性。振动轮加速度实测功率谱（图 5）的宽频性体现了振动在主频附近有丰富的频率成分，这都证实压路机作混沌振动。

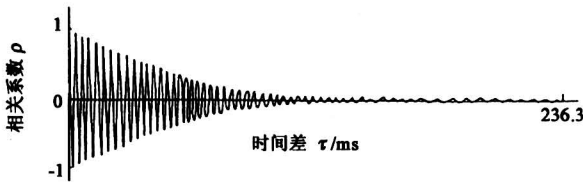


图 4 振动轮自相关图

Fig.4 The autocorrelation of drum

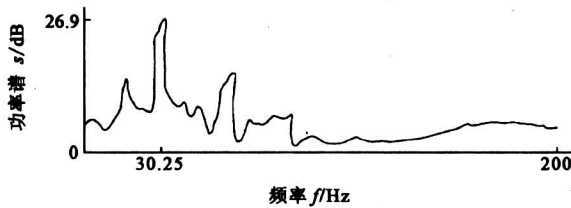


图 5 振动轮实测功率谱图

Fig.5 The power spectrum of drum

5 压实试验

5.1 试验工况

对重型混沌振动压路机（10 t）与同吨位的普通振动压路机用级配土进行压实对比试验。两台压路机平行轮流交替碾压，在不同压实遍数后用取土环刀取土样，每次取三个点，每点取三层：表层，中层（深 20 cm），下层（深 40 cm），取样位置见图 6。

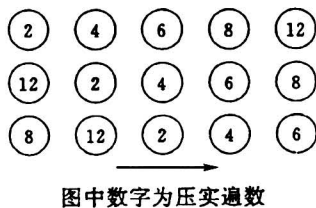


图 6 不同压实遍数后的取样位置

Fig.6 The sample position after different number of compaction times

5.2 试验结果与分析

图 7 为压实 6 遍后的压实曲线，可见混沌振动压路机中层压实度已达到 94.12%，而普通振动压路机仅为 91.23%。

若以中层压实度 95% 为压实合格，从图 8 可见，混沌振动压路机只需压 7.9 遍，而普通振动压路机要压 9 遍。故可提高压实效率 12.2%。试验的其它数据证明，混沌振动压路机所有压实度均大于普通振动压路机。

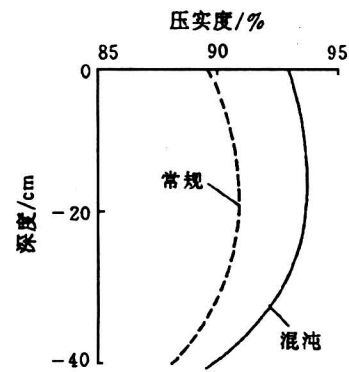


图 7 压实曲线

Fig.7 Compaction curve

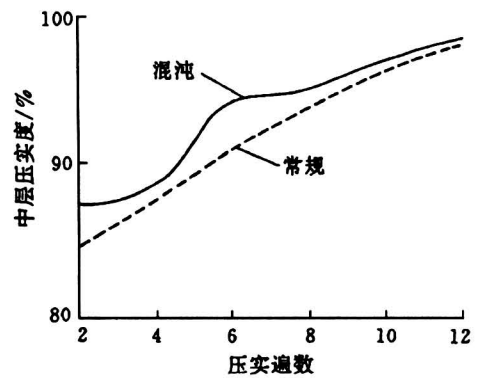


图 8 压实度与压实遍数关系

Fig.8 The relation of compaction degree and number of compaction times

6 结 语

振动试验与仿真结果表明：振动轮的振动是混沌的。

压实试验结果表明：混沌振动压路机比普通振动压路机可提高工效 12.2%。

14 t 重型混沌振动压路机已用于我国西部高速

公路开发。这是混沌在重型机械中的首次应用，它从理论与实践上证实了混沌的可控性与可用性。

7 致 谢

在 14 t 与 10 t 混沌振动压路机的研制中，对作为合作单位的上海工程机械厂和徐州工程机械厂的大力协作，谨致谢意。

参考文献

[1] 龙运佳. 混沌振动研究: 方法与实践[M]. 北京: 清华大学出版社, 1997

[2] 龙运佳, 梁以德. 近代工程动力学——随机·混沌[M]. 北京: 科学出版社, 1998

[3] 龙运佳. 混沌振动的研究与实践[A]. 见: 庄逢甘. 现代力学与科技进步(第一卷)[C]. 北京: 清华大学出版社, 1997. 447~450

[4] 龙运佳, 张平, 苏元升, 等. 强非线性宽频带混沌激励器及其应用[J]. 农业工程学报, 1995(4): 43~47

[5] 龙运佳, 苏元升, 欧阳怡, 等. 强非线性水平振动台[J]. 农业工程学报, 1996(1): 109~113

[6] 龙运佳, 王书茂, 王聪玲, 等. 混沌振动压路机[J]. 建筑机械, 1998(6): 18~21

[7] 龙运佳, 杨勇, 王书茂, 等. 重型混沌振动压路机[J]. 工程机械, 2000, (8): 6~7

Road Roller Engineering Based on Chaotic Vibration Mechanics

Long Yunjia, Yang Yong, Wang Congling

(China Agricultural University, Beijing 100083, China)

[Abstract] The vibration test, numerical simulation and compaction experiment of the chaotic vibratory rollers (three types: 0.75t, 10t and 14t) are completed for transform theoretical research of chaotic vibration mechanics into technology achievement in road roller engineering.

It is proved that the working efficiency of chaotic vibratory roller is 12.2% higher than that of traditional one. One type of heavy chaotic vibratory roller (14t) is used in highway development in west China.

[Key words] chaos; vibration; road roller engineering.

《中国工程科学》2000 年第 10 期要目预告

中国防洪减灾对策研究 中国工程院
 “21 世纪中国可持续发展水资源战略研究”项目组
 组织工程学——现代生物生命科学的前沿
 张涤生
 人类遗传病的家系收集疾病基因定位克隆与疾病基
 因功能的研究 夏家辉
 中国核电的可持续发展 赵仁恺
 上海金茂大厦的施工技术 叶可明等
 静电防护工程的研究与进展 刘尚合等
 论电力牵引轨道交通的技术发展 刘友梅
 以东为鉴 秀丽晚成
 ——西部风景林园林开发浅议 孟兆祯
 半圆形防波堤的设计和研究进展 谢世榜

关于西部大开发对新疆工作的要求 刘守仁
 知识表示中的不确定性 李德毅
 一种新型葡激酶分子的设计基因构建表达纯化及性
 质研究 宋 钢等
 超光速问题与电磁波异常传播 黄志洵
 膨化硝酸铵自敏化理论研究 吕春绪
 连拱坝的工作形态研究 顾冲时等
 XB 高精度火箭橇试验滑轨 杨兴邦
 高效加工技术及其应用研究 艾 兴
 关于大规模并行处理机系统可扩展性设计
 卢锡城
 中国气象预报业务工程体系建设和发展
 颜 宏等