

文章编号:1671-8879(2013)02-0101-06

# 双频合成振动压路机的工业化试验

姚运仕<sup>1</sup>, 李彦伟<sup>2</sup>, 石鑫<sup>2</sup>, 冯忠绪<sup>1</sup>, 马军星<sup>1</sup>, 郭启华<sup>3</sup>

(1. 长安大学 道路施工技术 with 装备教育部重点试验室, 陕西 西安 710064; 2. 石家庄市交通运输局, 河北 石家庄 050051; 3. 广西柳工机械股份有限公司中央研究院压路机研究所, 广西 柳州 545007)

**摘要:**为了双频合成振动压实技术的工业化应用,在前期小型试验样机研究的基础上,研制了 20 t 级双频合成振动压路机的工业样机。采用现场对比试验方法,完成了工业样机的性能试验和与常规同吨位压路机的对比试验。试验结果表明:双频合成振动压路机工业样机任一挡位实现了 2 个频率及其振幅的合成;可靠性符合国家标准要求;与常规同吨位振动压路机相比,压实效果较好,中下层压实度分别提高 2.1% 和 3.4%,具有明显的深层压实优势;起振过程液压系统压力冲击相当,平稳工作时振动功率相近;停振过程液压冲击较小,停振时间变短,停振更柔和。说明双频合成振动压路机工业样机满足设计要求,工作性能优于同吨位常规机型,可工业化推广。

**关键词:**机械工程;双频合成振动;振动压路机;振动压实

**中图分类号:**U415.52 **文献标志码:**A

## Industrial experiment on double-frequency composed vibratory roller

YAO Yun-shi<sup>1</sup>, LI Yan-wei<sup>2</sup>, SHI Xin<sup>2</sup>,  
FENG Zhong-xu<sup>1</sup>, MA Jun-xing<sup>1</sup>, GUO Qi-hua<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory for Highway Construction Technology and Equipment of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. Shijiazhuang Bureau of Transportation, Shijiazhuang 050051, Hebei, China; 3. Roller R & D Center of Guangxi Liugong Machinery Co Ltd, Liuzhou 545007, Guangxi, China)

**Abstract:** In order to obtain industrial application of double-frequency composed vibratory compaction, 20 tons industrial prototype with double-frequency composed vibratory roller was designed based on experimental results of small prototype. The performance of industrial prototype and 20 tons ordinary vibratory roller was tested by field experiments and the results were compared. The results indicate that the industrial prototype at any time could realize composition of two frequencies and their amplitudes, and its reliability can meet national standard; the industrial prototype has obvious superiority in deep-seated compaction, which has better compaction ability than ordinary vibratory roller; compaction degree of midsoil and subsoil is improved by 2.1% and 3.4% respectively; the shock of the hydraulic system of the roller is the same in the process of starting vibration; the vibration power is similar in steady work; in the process of stop shock, the shock of hydraulic system is less and stop vibration time is shorter, and stop shock was softer. It was proved that the industrial prototype with double-frequency composed vibration meets design

收稿日期:2012-01-18

基金项目:国家“863”计划项目(2001AA422013);国家自然科学基金项目(51208044);

中央高校基本科研业务费专项资金项目(CHD2010JC140)。

作者简介:姚运仕(1979-),男,山东费县人,副教授,工学博士后,E-mail:yaoyys@chd.edu.cn。

requirements and has higher performance than ordinary vibratory roller, and can be developed in industrial application. 5 tabs, 8 figs, 10 refs.

**Key words:** mechanical engineering; double-frequency composed vibration; vibratory roller; vibrating compaction

## 0 引言

在公路、水利、机场、国防等建设工程中,压实设备广泛使用。随着工程质量和节能环保要求的提高,国内外学者分析了压实不足引起的种种危害,致力于寻找提高压实质量和压实效率、兼顾节能减排的新技术。Gregory 等分析了压实与路面承载力、耐久性的关系,认为压实是影响沥青路面性能的重要因素,压实不足会引起沥青路面早期失效、缩短沥青路面服务年限<sup>[1-2]</sup>; Scott 等调查了美国科罗拉多州 8 条高速公路的沥青路面裂缝成因,结果表明:压实不足和压实均匀性不佳是引起沥青路面发生大面积裂缝的主要原因<sup>[3]</sup>; Parag 等认为振动的频率和振幅是影响压实效果的主要因素,当振动频率与被压实材料固有频率一致时,被压实材料处于共振状态,需要克服的摩擦力较小,易于压实<sup>[4]</sup>。针对被压实材料复杂性,一些学者提出了混沌振动压实技术、复合振动压实技术和仿冲击振动压实技术,尝试用多个振动激励作用于被压实材料,力求解决压实度、平整度与均匀性的统一问题<sup>[5-7]</sup>。

为了强化压实过程、提高压实设备对多种材料的适应性,本文提出了多频合成振动压实技术,完成了小型双频合成振动压实机的参数优化和试验<sup>[8-9]</sup>。为双频合成振动压实技术的工业应用,设计了 20 t 级工业样机,并开展了工业化试验研究。

## 1 工业样机的设计

传统振动压路机只有 1 根振动轴,任一时刻仅产生一个简谐振动作用于被压实材料。双频合成振动有 2 根参数不同的振动轴,2 根轴产生的 2 个参数不同的简谐振动叠加,实现任一时刻的 2 个振动合成。双频合成振动压实滚轮结构如图 1 所示。图 1 中,低频偏心轴直接由液压马达驱动,2 根参数相同的高频轴由齿轮组驱动,对称于低频轴。齿轮组保证高频轴和低频轴的传动比(频率比),各轴振幅由轴上的偏心块决定。液压马达转动时,低频轴与高频轴同时转动,实现 2 个振动的合成。为适应不同压实要求,可通过液压马达正转和反转实现压实

能量不同的 2 个振动模式,每个振动模式始终是 2 个频率的合成。

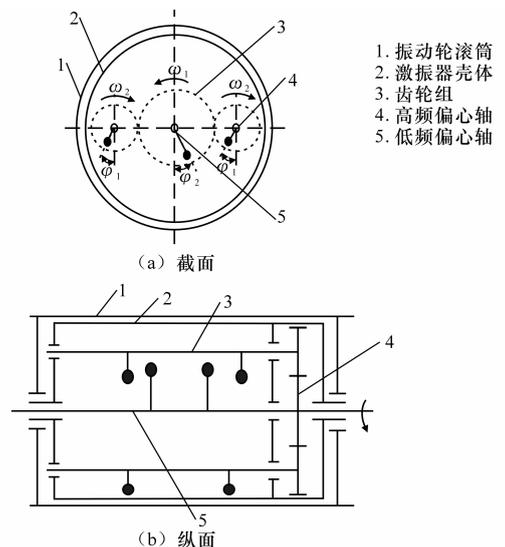


图 1 双频合成振动压实滚轮

Fig. 1 Double-frequency composed vibratory compaction roller

与双频合成振动有关的参数主要包括频率及频率比、振幅及振幅比、两频率相位差等参数,采用专利技术设计了大吨位双频合成激励器,如下页图 2 所示。对一台 20 t 级振动压路机进行技术改造,将其普通激励器更换为双频合成激励器后,得到双频合成振动压路机 1<sup>#</sup> 工业样机;变换振幅组合后得到 2<sup>#</sup> 工业样机。1<sup>#</sup> 工业样机与 2<sup>#</sup> 工业样机的区别主要是两频率轴的振幅比不同,因而 1<sup>#</sup> 工业样机高频轴振幅比 2<sup>#</sup> 工业样机高 0.24 mm。同普通振动压路机一样,双频合成振动压路机工业样机的高幅挡和低幅挡依靠振动马达的正反转实现切换,但每个挡位都是 2 个频率的合成,区别于普通振动压路机每个挡位只有单一频率。普通振动压路机及双频合成振动压路机工业样机主要设计参数对比见下页表 1。由表 1 可知,1<sup>#</sup> 工业样机主要参数为:高幅挡时低频轴频率为 26 Hz,频率比为 1 : 1.25,低频轴振幅为 1.68 mm,振幅比为 3.5 : 1,两频率相位差为 0;低幅挡时低频频率为 29 Hz,频率比为 1 : 1.25,低频轴振幅为 0.84,振幅比为 3.5 : 1,两频率相位差为 0。

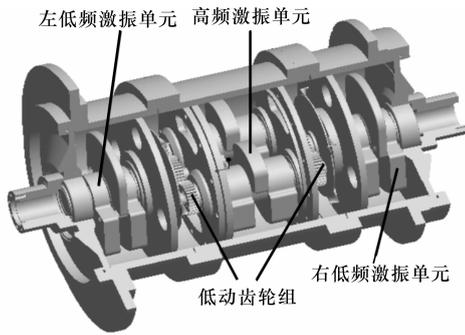


图 2 双频合成激励器

Fig. 2 Double-frequency composed vibration exciter

表 1 多机型主要设计参数对比

Tab. 1 Design parameters of rollers

	20 t 压路机	1 <sup>#</sup> 工业样机	2 <sup>#</sup> 工业样机
总功率/kW	128	128	128
额定转速/(r·min <sup>-1</sup> )	2 150	2 150	2 150
高频低幅挡频率/Hz	32	29 & 36	29 & 36
高频低幅挡振幅/mm	1.0	0.84 & 0.24	0.84 & 0.48
低频高幅挡频率/Hz	30	26 & 32.5	26 & 32.5
低频高幅挡振幅/mm	2.0	1.68 & 0.48	1.68 & 0.24
工作速度/(km·h <sup>-1</sup> )	2.6	2.6	2.6
压实宽度/mm	2 130	2 130	2 130

注:& 表示 2 个参数的合成。

表 2 1<sup>#</sup> 工业样机振动参数试验结果

Tab. 2 Test results of industrial prototype vibration parameters

工况	测点位置	低频频率/Hz	低频加速度峰值/(m·s <sup>-2</sup> )	低频振幅/mm	高频频率/Hz	高频加速度峰值/(m·s <sup>-2</sup> )	高频振幅/mm
高幅挡	1	26.2	46.4	1.71	32.8	20.8	0.49
	2	26.2	46.6	1.72	32.8	20.2	0.48
	3	26.2	46.8	1.73	32.8	20.8	0.49
	4	26.2	46.5	1.72	32.8	20.9	0.49
	5	26.2	46.6	1.72	32.8	20.7	0.49
	均值	26.2	46.6	1.72	32.8	20.7	0.49
低幅挡	1	29.3	28.5	0.84	36.6	12.5	0.24
	2	29.3	28.9	0.85	36.6	12.6	0.24
	3	29.3	28.8	0.85	36.6	12.6	0.24
	4	29.3	28.8	0.85	36.6	13.2	0.25
	5	29.3	28.6	0.84	36.6	12.4	0.23
	均值	29.3	28.7	0.85	36.6	12.7	0.24

较均匀。与表 1 中的设计值相比,2 个挡位下实测的振幅和频率与设计值有偏差,其中,振幅最大相对误差小于 3%,频率最大相对误差小于 2%,均满足国家标准对振动参数设计偏差的要求,说明工业样机符合产品设计要求。

### 2.3 可靠性试验及结果分析

按国家标准试验方法对 1<sup>#</sup> 工业样机进行可靠性试验,试验场地为某公司压路机试验场内的环形

## 2 工业样机性能试验

### 2.1 试验目的及主要试验内容

为了评价大型工业样机的作业质量、可靠性和经济性等性能,验证工业样机的频率合成,开展了工业样机性能试验。试验参照国家标准《振动压路机》(GB 8511—2005)在某公司压路机试验场内进行,对 1<sup>#</sup> 工业样机进行了振动参数测试、起停振特性测试、压实性能试验和可靠性试验。为了与同吨位普通振动压路机对比,在相同试验条件下也对常规振动压路机和 2<sup>#</sup> 工业样机进行了测试。

### 2.2 振动参数试验及结果分析

为了评价工业样机振动特性,将 1<sup>#</sup> 工业样机前钢轮置于废旧轮胎上,在振动轮上沿宽度方向均布 5 个加速度传感器,分别测试 1<sup>#</sup> 工业样机高幅挡和低幅挡原地振动时的振动参数,试验结果见表 2;振动曲线如下页图 3~图 4 所示。

由表 2 和图 3~图 4 可知:无论在高幅挡还是低幅挡,振动曲线不是标准的简谐振动曲线,而是 2 个频率的合成。从频谱图上可以读出 2 个频率及其对应的加速度峰值,进而获得对应的幅值,说明工业样机实现了 2 个频率的合成。同一挡位不同测点处的振幅相差不大,说明振幅沿振动轮宽度方向分布较

橡胶跑道,采用低幅挡和高幅挡交替工况,试验结果见表 3。

表 3 工业样机可靠性试验结果

Tab. 3 Reliability test results of industrial prototype

检测项目	标准规定值	检测值
首次故障前工作时间/h	≥100	105.0
平均无故障工作时间/h	≥150	181.8
可靠度/%	≥90	95.0

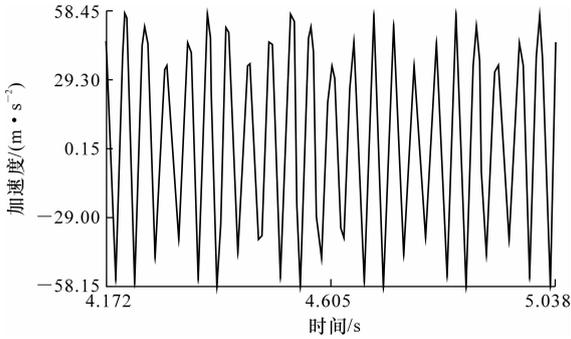


图3 高幅挡工况某测点时域曲线

Fig. 3 Time domain curve of high amplitude

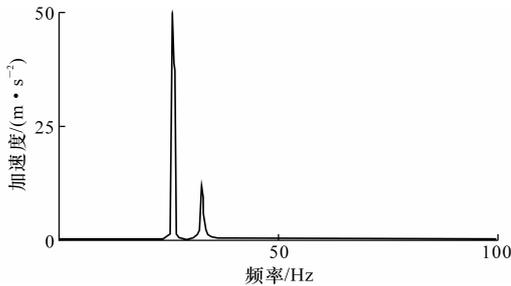


图4 高幅挡工况某测点频域曲线

Fig. 4 Frequency domain curve of high amplitude

由表3可知:首次故障前工作时间为105 h,平均无故障工作时间为181 h,可靠率达95%。说明1#工业样机可靠性符合国家标准要求。

### 3 对比试验及结果分析

#### 3.1 压实试验对比及结果分析

被压实材料是压实土槽内的级配土,重型击实法测得其最佳含水量为9.36%,最大干密度为 $2.03 \text{ g/cm}^3$ 。在相同的试验条件下,分别对一台常规20 t压路机和2台工业样机进行压实试验,试验时均采用高幅挡,虚铺层厚度50 cm,分别测试上层5 cm处、中层15 cm处和下层25 cm处的压实度,试验结果见表4;压实度与压实遍数的关系如图5~图8所示。

表4 压实试验结果对比

Tab. 4 Results of compaction tests

压实遍数		2	4	6	8	12
上层	某20 t压路机	87.9	90.7	92.5	92.8	94.2
	1#工业样机	89.2	92.6	93.6	94.8	95.3
	2#工业样机	88.1	90.4	90.8	92.3	93.8
中层	某20 t压路机	84.2	86.7	89.1	88.9	90.7
	1#工业样机	85.7	87.6	89.8	91.4	92.8
	2#工业样机	85.5	87.8	89.5	89.7	91.2
下层	某20 t压路机	82.7	83.9	84.7	86.2	86.8
	1#工业样机	82.9	85.6	86.7	88.6	90.2
	2#工业样机	83.9	85.1	85.3	87.6	88.9

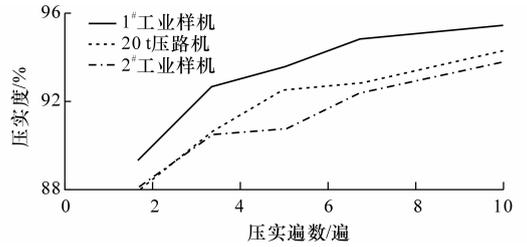


图5 上层压实度与压实遍数关系

Fig. 5 Relation of compaction degree for top soil and compaction times

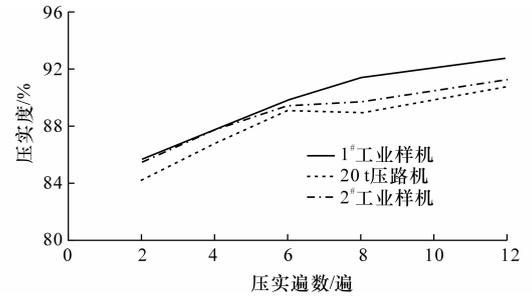


图6 中层压实度与压实遍数关系

Fig. 6 Relation of compaction degree for midsoil and compaction times

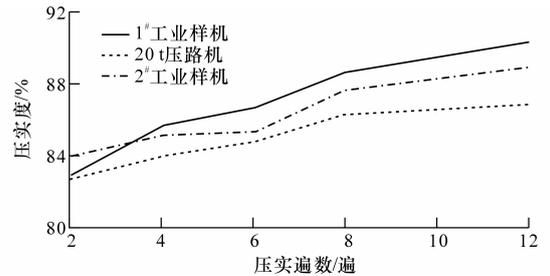


图7 下层压实度与压实遍数关系

Fig. 7 Relation of compaction degree for subsoil and compaction times

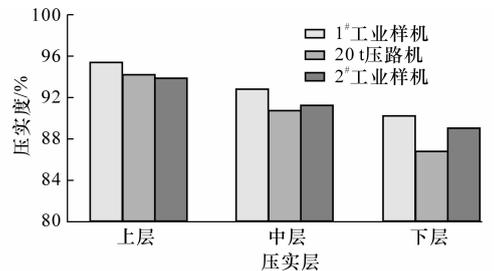


图8 压实12遍各层压实度对比

Fig. 8 Comparison of compaction degree after 12 compaction times

由表4和图5~图8可知:在各压实层处,压实度随压实遍数的增加而增加;8遍以前压实度增加较快,8遍以后压实度增加缓慢,上层压实度基本不增加。相同压实遍数下,对上层压实度而言,1#工业样机最高,常规20 t压路机次之,2#工业样机则

略低;对中下层压实度而言,1<sup>#</sup>工业样机最高,2<sup>#</sup>工业样机次之,常规 20 t 压路机最低。在压实 12 遍后,1<sup>#</sup>工业样机上层压实度达 95.3%,比常规 20 t 压路机高 1.1%;1<sup>#</sup>工业样机中下层压实度比 2<sup>#</sup>工业样机高约 1%,但分别比常规 20 t 压路机高 2.1%和 3.4%。压实试验结果说明,双频合成振动压实具有良好的压实效果,尤其是中下层压实优势明显,证明了双频合成振动压路机高频分量的小振幅能量主要作用于中上层,而低频分量的大振幅能量主要

表 5 起停振特性对比试验结果

Tab. 5 Vibratory characteristics comparison of start and stop

项 目		20 t 压路机高幅挡	20 t 压路机低幅挡	1 <sup>#</sup> 工业样机高幅挡	1 <sup>#</sup> 工业样机低幅挡
起振	起振时间/s	4.4	4.5	4.1	4.2
	起振时高压腔最大压力/MPa	41.3	42.1	41.6	41.8
	起振时低压腔最小压力/MPa	1.8	1.3	1.7	1.5
	起振终了高压腔压力/MPa	10.9	9.2	11.8	9.7
	起振终了低压腔压力/MPa	2.4	1.8	2.2	2.1
停振	停振时间/s	2.8	2.6	2.0	2.0
	停振初始高压腔压力/MPa	10.4	8.8	11.7	9.7
	停振初始低压腔压力/MPa	2.4	1.8	2.2	2.0
	停振过程高压腔最小压力/MPa	0.0	0.4	0.1	0.1
	停振过程低压腔最大压力/MPa	36.6	39.1	33.7	36.7

由表 5 可知:与常规 20 t 压路机相比,起振工况时 1<sup>#</sup>工业样机的高压腔最高压力和平稳压力均相差不大,而起振时间略短,说明 1<sup>#</sup>工业样机与常规 20 t 压路机起振过程液压冲击相当,起振时间略优。起振终了高压腔压力相当,说明振动功率相差不大。与常规 20 t 压路机相比,停振工况时 1<sup>#</sup>工业样机的同挡位低压腔最大压力均低约 3 MPa,而停振时间缩短 0.6 s 以上,说明 1<sup>#</sup>工业样机停振过程较柔和,优于常规 20 t 压路机。

## 4 结 语

(1)20 t 级双频合成振动压实的大型工业样机在任一挡位下,同时存在 2 个频率及其对应的振幅,振动参数和可靠性符合设计要求。

(2)与常规 20 t 压路机相比,双频合成振动压路机工业样机各层压实度较高,中下层压实度分别高 2.1%和 3.4%,具有深层压实优势。

(3)与常规 20 t 压路机相比,起振过程压力冲击相当,起振时间略短;平稳工作时压力相差不大,振动功率相近;停振过程液压冲击明显变小,停振时间更短,停振较柔和。

作用于中下层,与参考文献[10]中的结论吻合。

## 3.2 起停振特性试验对比及结果分析

双频合成振动压路机工业样机的振动液压系统与常规振动压路机相同,采用常见的变量泵定量马达组成的闭式系统。压路机起振和停振过程,由于激振单元的惯性作用,必然导致液压系统冲击,起振时高压腔压力急剧升高,停振时低压腔压力急剧升高,这种冲击会影响液压系统可靠性。起停振特性对比试验结果见表 5。

## 参考文献:

### References:

- [1] Gregory W W, Carthigesu T, Gnanendran. The influence of compaction method and density on the strength and modulus of cementitiously stabilised pavement materials[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2005, 6(2): 97-110.
  - [2] Saradhi K, Eyad M, Rajagopal K R. A thermomechanical framework for modeling the compaction of asphalt mixes[J]. Mechanics of Materials, 2008, 40(10): 846-864.
  - [3] Scott S, Michael D. Nobe. Edge cracking in residential development hot mix asphalt pavements[J]. International Journal of Construction Education and Research, 2007, 3(3): 179-197.
  - [4] Parag R, Murali K J, Rajagopal K R. Characterization of the non-linear response of asphalt mixtures using a torsional rheometer[J]. Mechanics Research Communications, 2007, 34(5-6): 432-443.
  - [5] 龙运佳. 混沌振动压路机的能耗效益分析[J]. 中国工程机械学报, 2008, 6(1): 111-113, 117.
- LONG Yun-jia. Energy consumption and efficacy a-

