

# 新型气液联合液压锤冲击器系统的仿真研究

严东兵,梅丽芳,易际明

(厦门理工学院 机械与汽车工程学院,福建 厦门 361024)

**摘 要:**在介绍一种新型气液联合液压锤冲击器控制系统工作原理的基础上,对其冲击器系统打击过程进行动力学分析并建立数学模型,最后利用 Matlab 软件对数学模型进行仿真分析,仿真分析研究对优化改进液压锤冲击器的主要设计参数具有指导意义。

**关键词:**气液联合;冲击器;动力学建模;仿真

**中图分类号:**TH137 **文献标志码:**A **doi:**10.3969/j.issn.1671-6833.2014.04.029

## 0 引言

液压锤从 20 世纪 70 年代中期开始研制,随着世界各国对节能和环保问题的重视而发展起来的.与柴油锤相比,它具有能量传递效率高、噪声低、无油烟污染、打击能量大且可以实现在软地基上连续作业.整个冲击器可以是完全封闭的,减少了打击声波的传出,并可以用于水下作业.由于锤体的运动受油缸控制,因此可以实现打斜桩.目前国外发达国家已广泛使用,并形成系列化.而我国对液压锤的研究起步晚,进展缓慢,只是对国外几种液压回路进行建模仿真研究,目前我国并没有真正意义上的液压锤产品,因此对液压锤新型控制系统的研究具有重要意义<sup>[1-2]</sup>.

## 1 新型气液联合液压锤冲击器系统的液压回路

图 1 是新型气液联合液压锤冲击器系统原理图,新型气液联合液压锤冲击器与国外液压单作用和液压双作用冲击器相比较,最大的特点在于该冲击器也属于双作用,但上腔为氮气,依靠压缩氮气的爆炸能和锤体的重力势能共同作用实现打桩,其冲击器的一个工作周期分为 4 个阶段:增压阶段、回程阶段、冲程阶段和保压沉桩阶段。

在起始阶段,由于系统压力为零,所以当系统启动后,首先要建立工作压力才能打桩,插装阀 11 打开,插装阀 15 关闭,主泵 1 泵出的液压油经

气液联合主控阀 20 分别流入冲击器下腔和高压蓄能器 17,冲击器下腔压力从零上升到可以平衡锤体重力,此阶段为增压阶段;随着系统压力继续增加,冲击器进入回程阶段,锤体开始加速上升;当上升到一定高度,冲击器上腔氮气压力大于设定的控制压力时,气液联合主控阀向左运动,此时插装阀 11 关闭,插装阀 15 打开,此时进入冲程阶段,冲击器下腔的液压油进入低压蓄能器 16 和回油箱,主泵 1 泵出的液压油进入高压蓄能器 17,锤体在自身重力和冲击器上腔的压缩氮气爆炸能共同作用下,开始加速下打;从锤体接触到桩帽开始进入保压沉桩阶段,持续到与桩帽脱离,即打击力为零的时候,锤体上升,进入下一个工作循环周期,不断完成打桩过程<sup>[2]</sup>。

与其它液压打桩锤冲击器系统相比较,该系统还具有以下功能。

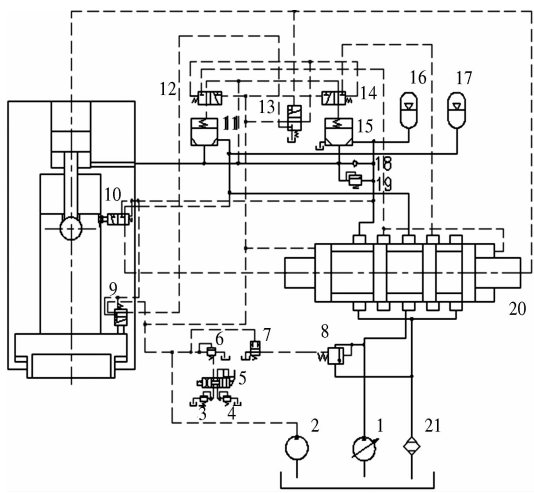
(1)具有防空打功能即脱桩保护功能.在施工过程中出现断桩和脱桩的情况,控制系统中阀 9 上位工作,从而使阀 12 左位工作和阀 13 右位工作,从而使冲击缸下腔的回油经过阀 12 和阀 13 进入插装阀 11 和 15 的上腔,锁死插装阀,实现冲击器锤头制动,避免空打对液压桩锤的损害;

(2)可以实现打击能和打击频率在一定范围内无级可调.通过调整控制系统中阀 3 和 4 的溢流压力,实现控制气液联合控制阀 20 所需要换向的氮气压力,即控制了冲击缸活塞压缩氮气的行程,实现调节打击能和打击频率。

收稿日期:2013-04-03;修订日期:2013-07-06

基金项目:科技型中小企业技术创新基金资助项目(12C26214305029)

作者简介:严东兵(1982-)男,江苏盐城人,厦门理工学院助教,硕士,研究方向为工程机械设备电液控制理论与技术,E-mail: 416864121@qq.com.



1—主泵;2—辅泵;3,4,6,19—先导溢流阀;5—手动换向阀;6,8—远程控制先导溢流阀;7,12,13,14—液控换向阀;10—冲击缸;11,15—三通插装阀;16—低压蓄能器;17—高压蓄能器;18—单向阀;20—气液联合换向阀;21—回油过滤器

图 1 新型气液联合液压锤冲击器系统原理图

Fig.1 The schematic of Hydro-pneumatic hydraulic pile hammer impactor system

2 冲击器系统数学模型的建立

2.1 系统增压阶段的数学描述

假定临界压力为  $p_L$ ,蓄能器在初始状态下气体体积为  $V_{01}$ ,其值 25 L;锤体质量为  $m$ ,其值为 7 000 kg;重力加速度为  $g$ , $G$  为气体常数, $A_2$  为冲击缸活塞杆腔有效作用面积,其值为 0.007 77  $m^2$ ,则根据气体定律和锤体的平衡条件  $pV^n = G$  及  $p_L A_2 = mg$ ,可推导出临界压力  $p_L = mg/A_2$ ,蓄能器内气体的容积<sup>[3]</sup>为

$$V_L = \sqrt[n]{GA_2/mg}. \tag{1}$$

2.2 冲击器回程阶段的数学描述

冲击缸上腔为氮气,初始氮气体积为  $V_{N_20}$ ,其值为 34.9 L;初始压力为  $p_{N_20}$ ,其值为 1.2 MPa;冲击缸上腔面积为  $A_1$ ,其值为 0.025 4  $m^2$ ,冲击缸活塞的运动学方程为

$$m \frac{dv}{dt} = p_1 A_2 - p_{N_2} A_1 - mg - Bv. \tag{2}$$

式中: $v$  为冲击缸活塞的瞬时速度; $p_1$  为系统压力,其值为 21 MPa; $p_{N_2}$  为冲击缸上腔氮气瞬时压力; $A_1$  为冲击缸上腔有效作用面积; $B$  为黏性阻尼系数.

冲击缸上腔氮气压力

$$p_{N_2} V_{N_2}^n = p_{N_20} V_{N_20}^n = \text{const}. \tag{3}$$

式中: $V_{N_2}$  为冲击缸上腔氮气瞬时体积;冲击器工

作过程为绝热过程,故绝热指数  $n$  取 1.4. 由于黏性阻力相对于锤体重力很小,可以忽略不计,将式 (2) 和式 (3) 整理冲击器回程阶段的数学描述为<sup>[4-5]</sup>

$$\begin{cases} \frac{dv}{dt} = (p_1 A_2 - p_{N_2} A_1 - mg)/m; \\ \frac{dy}{dt} = v; \\ y(0) = 0, v(0) = 0. \end{cases} \tag{4}$$

2.3 冲击器冲程阶段的数学描述

同理可得出冲程阶段的数学描述为

$$\begin{cases} \frac{dv}{dt} = (p_{N_2} A_1 + mg - p_b A_2)/m; \\ \frac{dy}{dt} = v; \\ y(0) = 0, v(0) = 0. \end{cases} \tag{5}$$

式中: $p_b$  为卸荷时输油管道的背压对活塞的反向阻力,其值为 1 MPa,其余参数意义同上.

2.4 冲击器保压沉桩阶段的数学描述

由于地基的原因,冲击器打桩过程是一个复杂的受力过程,打桩过程中的冲击器、桩、土构成一个相当复杂的动态系统. 结合 ZCY07 液压桩锤冲击器冲击系统的具体主体结构,提出一种冲击器系统模型,该模型充分考虑锤击系统中各部分对打桩性能的影响. 描述冲击系统动力学模型,如图 2 所示. 用质量块分别表示桩锤、桩帽和机架装置,用弹簧表示桩垫,用一并联的弹簧和阻尼器表示锤垫的黏弹性. 由于本模型不仅考虑锤垫、桩垫和机架的共同作用,而且还考虑了锤垫的黏弹性,其适用性更强、更广泛<sup>[6-7]</sup>.

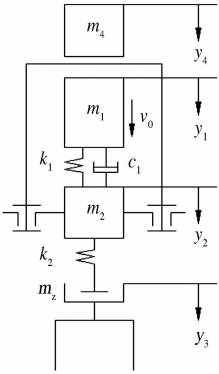


图 2 冲击器系统动力学模型

Fig.2 The impactor dynamical model

图中  $m_1$  为锤头质量,  $m_1 = 7\,000\text{ kg}$ ;  $m_2$  为桩座、桩帽质量,  $m_2 = 1\,000\text{ kg}$ ;  $m_3$  为预制桩的波阻,  $m_3 = 1\,439\,250\text{ N} \cdot \text{s/m}$ ;  $m_4$  为机架、控制集成阀组质量,  $m_4 = 10\,000\text{ kg}$ ;  $k_1$  为锤垫等效刚度,  $k_1 =$

480 000 kN/m; $c_1$  为锤垫的阻尼系数;由于锤垫的黏滞系数较小,取为零; $k_2$  为桩垫等效刚度, $k_2 = 620\,000\text{ kN/m}^{[7]}$ .

根据图 2 建立动力学方程,其中由于锤垫垫层的黏滞阻力对系统影响较小,可以忽略不计,因此系统的动力学方程可表示为

$$\begin{cases} m_1 \ddot{y}_1 = m_1 a - k_1 (y_1 - y_2); \\ m_2 \ddot{y}_2 = k_1 (y_1 - y_2) - k_2 (y_2 - y_3); \\ m_z \ddot{y}_3 = k_2 (y_2 - y_3); \\ \ddot{y}_4 = g. \end{cases} \quad (6)$$

初始条件为

$$\begin{cases} y_1(0) = y_2(0) = y_3(0) = y_4(0) = 0; \\ \dot{y}_2(0) = \dot{y}_3(0) = \dot{y}_4(0) = 0; \\ \dot{y}_1(0) = 6.01. \end{cases} \quad (7)$$

3 冲击器系统仿真及分析

针对 ZCY07 气液联合液压锤冲击器系统参数,利用 Matlab 软件中的 Simulink 工具箱对以上建立起来的冲击器系统分别对各阶段的数学模型进行仿真求解,从而计算并记录了冲击过程中各组成部分的位移、速度、加速度和所有冲击力变量随时间变化的过程,其变化过程如图 3~8 所示.

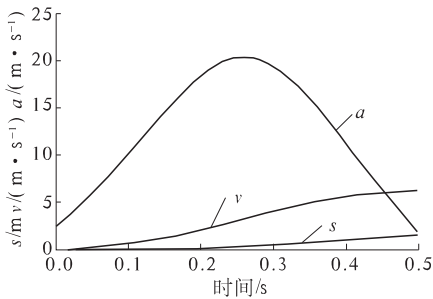


图 3 回程冲击器位移、速度和加速度与时间关系曲线  
Fig.3 The relationship between displacement, velocity, acceleration and time of the impactor in backhaul cycle

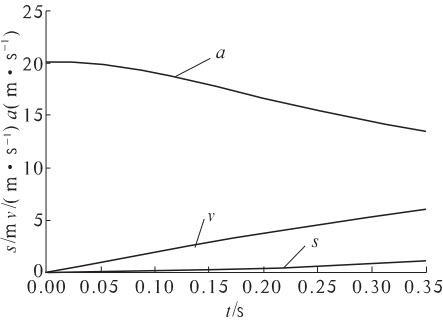


图 4 冲程冲击器位移、速度和加速度与时间关系曲线  
Fig.4 The relationship between displacement, velocity, acceleration and time of the impactor in stroke cycle

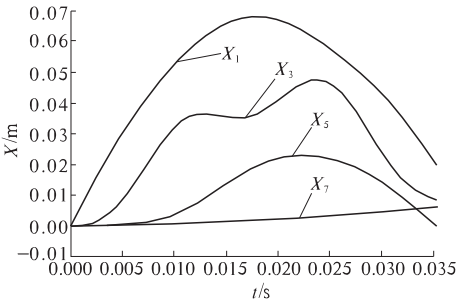


图 5 保压沉桩阶段冲击器位移与时间关系曲线  
Fig.5 The relationship between displacement and time of the impactor system in piping cycle

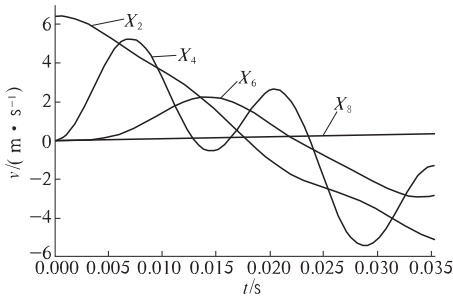


图 6 保压沉桩冲击器系统速度与时间关系曲线  
Fig.6 The relationship between velocity and time of the impactor system in piping cycle

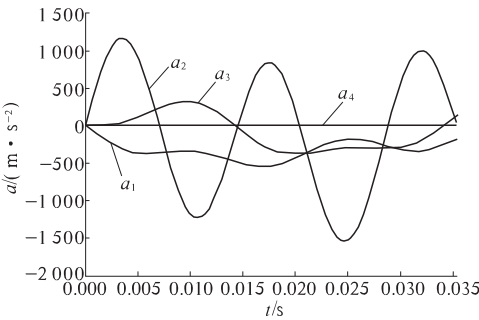


图 7 保压沉桩冲击器系统加速度与时间关系曲线  
Fig.7 The relationship between acceleration and time of the impactor system in piping cycle

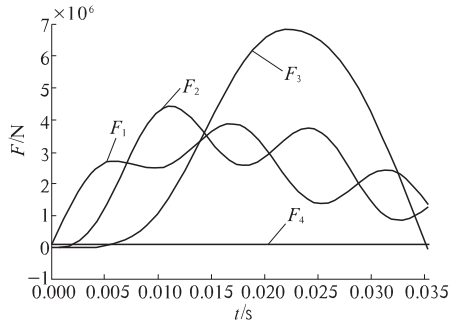


图 8 保压沉桩冲击器系统打击力与时间关系曲线  
Fig.8 The relationship between hitting power and time of the impactor system in piping cycle

由图 3 可知,冲击器系统在高压蓄能器和控制系统压力工作作用下,冲击器锤体上升的加速度加大,在 0.26 s 的时候达到最大,此时冲击器系统所受的内力最大;由图 4 可知冲击器锤体在自身重力和上腔氮气爆炸压力共同作用下,以大于一个重力加速度加速下打,最大值达到  $20.23\text{ m/s}^{-2}$ ;根据冲击过程的定义<sup>[7]</sup>,图 5 中  $X_1, X_3, X_5, X_7$  分别代表冲击器、砧座、桩顶、机架位移;由图可知一次冲击过程的时间为 35.2 ms;图 6 中  $X_2, X_4, X_6, X_8$  分别代表冲击器、砧座、桩顶、机架速度,由图 6 可知,冲击器锤体在冲击过程中最大位移为 68 mm;图 7 中  $a_1, a_2, a_3, a_4$  分别代表冲击器、砧座、桩顶、机架的加速度,由图 7 可知冲击器锤体振动加速度不高,这对于控制系统控制主阀组工作的可靠性是有利的;图 8 中  $F_1, F_2, F_3, F_4$  代表冲击器对锤垫打击力、砧座对桩垫打击力、桩体对地层的打击力、机架所受的重力,由图 8 可知冲击器系统的最大冲击力  $F_3$  可达到 6 840 KN.

4 结论

通过建立液压锤冲击器的打桩过程的各阶段数学模型,并对其动态运动过程进行分析,得到冲击器打桩过程中的速度、加速度、位移与系统流量和压力等参数的变化规律,为分析和研究相关参

数对冲击器的打击力和打击能量的影响具有直接的指导意义,并为液压锤冲击器系统参数的优化提供理论依据.

参考文献:

[1] 胡均平,郭勇,张郑勇,等. 液压打桩锤主控阀换向性能的动态特性分析[J]. 中南大学学报:自然科学版,2012,43(7): 2622 - 2628.

[2] 胡均平,宋光伟,郭勇,等. 电气液一体化打桩锤控制系统设计研究[J]. 郑州大学学报:工学版,2011,32(01):72 - 74.

[3] 杨永梅,吕景忠,隋振,等. 加速下落冲击式液压桩锤设计[J]. 农业机械学报,2005,36(5): 150 - 152.

[4] 胡小江,谷立臣. 打桩锤液压系统的设计及动态仿真[J]. 机床与液压,2005(1): 77 - 79.

[5] 谢永健,朱合华,王怀忠,等. 打桩锤击模型的解析算法[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(1): 171 - 176.

[6] 胡均平,史天亮,张灵. 新型气液联合液压打桩锤的仿真研究[J]. 计算机仿真,2009,26(8): 274 - 277.

[7] 沈景凤,王新华,查德根. NH 型液压锤液压回路及数学描述[J]. 上海理工大学学报,2002,24(4): 357 - 362.

Simulation of a New Hydro-pneumatic Hydraulic  
Pile Hammer Impactor System

YAN Dong-bing, MEI Li-fang, YI Ji-ming

(College of Mechanical and Automotive Engineering, Xiamen University of Technology, Xiamen 361024, China)

**Abstract:** On the basis of the working principle of a new hydro-pneumatic pile hammer impactor control system, we made the dynamic modeling for its impactor system piling process. Finally, each dynamic modeling is simulated and analyzed with Matlab software, and the result of simulation research is helpful for improving and optimizing key design parameters of pile hammer impactor system.

**Key words:** hydro-pneumatic; impactor; dynamic modeling; simulation