

# NR22型旋挖钻机钻挖系统动力学分析

## Dynamic Analysis on Drilling System of NR22 Type Rotary Drilling Rig

秦四成<sup>1</sup>, 刘晓敏<sup>1,2</sup>, 王雪莲<sup>1</sup>, 郝晓梅<sup>3</sup>

QIN Si-cheng<sup>1</sup>, LIU Xiao-min<sup>1,2</sup>, WANG Xue-lian<sup>1</sup>, HAO Xiao-mei<sup>3</sup>

1. 吉林大学 机械科学与工程学院, 吉林 长春 130025

2. 北华大学 工程训练中心, 吉林 吉林 132021

3. 包头市产品质量计量检测所, 内蒙古 包头 014030

1. School of Mechanical Science & Engineering, Jilin University, Changchun 130025, Jilin, China

2. Engineering Training Center, Beihua University, Jilin 132021, Jilin, China

3. Baotou Product Quality and Metrology Inspection Institute, Baotou 014030, Inner Mongolia, China

**【摘要】** 应用有限元方法将钻挖系统划分为若干单元, 通过拉格朗日方程获得了钻挖系统的动力学方程, 并得到钻具中心在地下的运动轨迹; 在ADAMS/Vibration中建立了钻挖系统的振动仿真模型, 获得了钻挖系统的固有频率和振型, 分析了钻挖过程的动态特征, 对避免共振、提高成孔质量具有一定的指导意义。

**【Abstract】** The Finite Element Method is applied to divide one beam into some units, the kinetic equation of the drilling system is established according to the Lagrange equation, and the path motion of the center of the drill bit underground is obtained. At the same time, the vibration model of the drilling system in ADAMS/Vibration is built, natural frequency and mode shape are gained. It is useful to avoid resonance and improve the quality of hole.

**【关键词】** 有限元; 钻挖系统; 动力学; ADAMS

**【Key words】** finite element; drilling system; dynamic; ADAMS

中图分类号: U445.31

文献标识码: A

文章编号: 1000-033X(2008)03-0070-03

## 0 引言

旋挖钻机是一种多功能、高效率的灌注桩成孔设备, 其工作部分的核心——钻挖系统, 主要由钻杆和钻具组成。钻杆一般为多节伸缩式, 采用优质合金钢材料制成; 钻具通常根据不同的地层来选取。

钻孔的过程中, 钻杆要将动力头的全部扭矩和加压液压缸的压力传到孔底的钻具上, 同时钻杆在孔内以一定的回转速度运动, 这将会产生振动。所以, 旋挖作业时钻挖系统的受力状况和工作环境异常恶劣。因此, 有效地预测和控制孔下钻具的运动规律, 改善钻杆的动力学性能, 提高钻具和钻杆的强度与刚度, 实现对孔眼轨迹的精确控制是目前桩基础施工中亟待解决的关键技术难题。相对静力学而言, 钻杆的动力学分析更能反映地下钻杆的实际工作状态, 对孔眼的轨迹控制、防斜打直、钻杆的设计和使用都有重要的意义。

## 1 模型简化

NR22型旋挖钻机, 采用摩阻式钻杆, 共有5节, 每节钻杆长13 m, 5节钻杆采用内外键连接。钻杆杆体采用优质合金钢无缝钢管, 各层钻杆通过内外键配合以传递扭矩和压力, 工作时最大扭矩为200 kN·m, 最大推压力为240 kN, 最内层钻杆下端与钻具相连接, 上端通过回转接头和主卷扬钢丝绳相连接, 主卷扬最大提升力为140 kN。应用有限元方法对钻挖各种深度时的钻挖系统进行动力学分析<sup>[1]</sup>, 建模之前作如下假设。

(1) 在研究钻杆横向振动时, 不考虑纵向和扭转振动的影响。

(2) 钻杆为弹性杆, 孔眼轴线与钻杆轴线重合。

(3) 不考虑钻杆与孔壁之间的摩擦。

用有限元法分析钻挖系统时, 由于钻杆的轴向长度远远大于其径向长度, 因此钻挖系统的简化模型如图1所示。



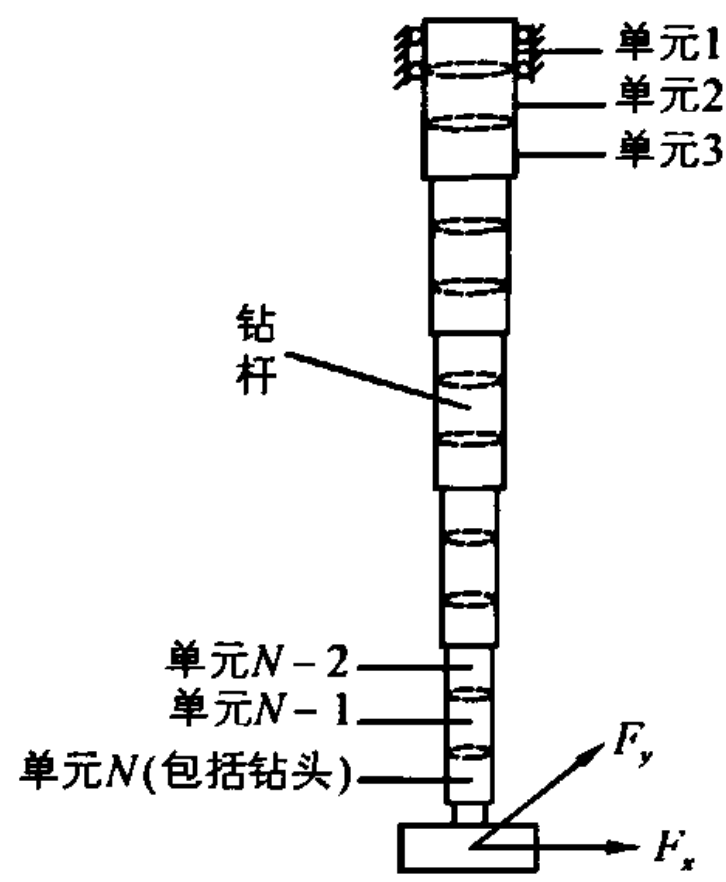


图1 钻控系统简化模型

## 2 基于ADAMS/Vibration的分析

### 2.1 5种工况下钻控系统的幅频特性曲线

旋挖钻机在作业过程中,随着钻孔深度的增加,钻杆一节节打开,钻杆长度不断增大,当5节钻杆全部打开时达到最大钻控深度。在整个旋挖钻进的过程中,钻杆长度不断增大,横截面积不断发生变化,截面惯性矩也随之变化,因此钻控系统简化梁的固有频率及其振型也随之变化。对于结构特征随着时间不断变化的系统,本文采取了分段建模的方法。按照钻杆悬伸长度的变化,将旋挖钻进的过程划分为5种工况状态。

- (1) 工况1 旋挖钻机就位,初始钻进阶段,钻孔深度为  $0 \leq H \leq 12$  m。
- (2) 工况2 钻孔深度为  $12 \text{ m} \leq H \leq 24$  m。
- (3) 工况3 钻孔深度为  $24 \text{ m} \leq H \leq 36$  m。
- (4) 工况4 钻孔深度为  $36 \text{ m} \leq H \leq 48$  m。
- (5) 工况5 即将达到最大钻孔深度为  $48 \text{ m} \leq H \leq 60$  m。

根据不同工况下钻控系统的状态,在ADAMS/Vibration中分别建立了5种工况下的钻控系统模型<sup>[2]</sup>,选取系统的最后一个单元作为输出点,观察输出点的幅频特性(图2),并由此获得5种工况下钻控系统的基频值,见表1。

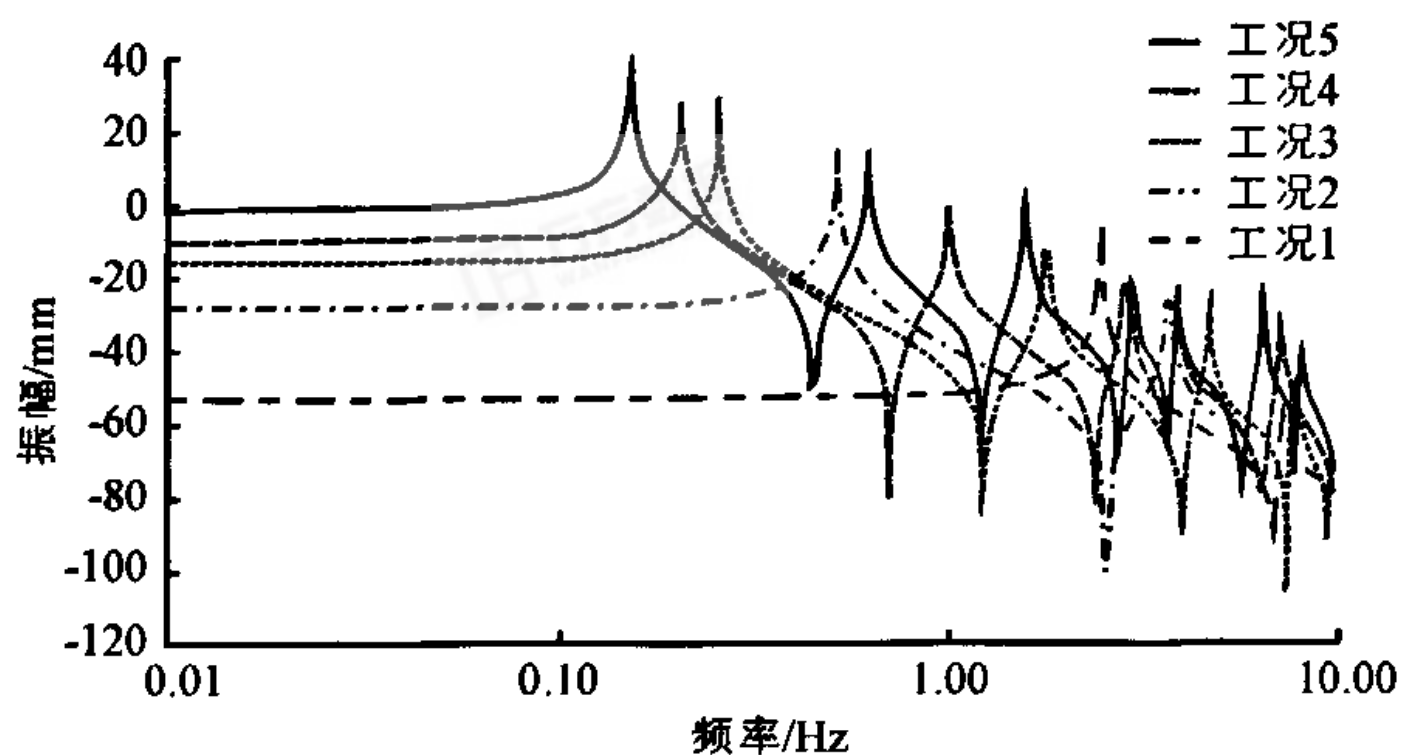


图2 不同工况下的幅频特性曲线

工况	1	2	3	4	5
基频	2.471 8	0.511 4	0.257 7	0.167 0	0.125 4

可以看出,随着钻孔深度的增加,钻杆伸长,钻控系统的刚度降低,导致系统的固有频率值降低。同时,在钻控工作频率范围内,幅值变化较大的区域增多,且越来越集中。因此,

有必要分析5节钻杆全部伸出时钻控系统的固有频率和振型,为避免发生共振、保证孔的垂直度提供理论依据。

### 2.2 最大钻深时系统的动态特性

由于旋挖钻机的工作转速较低,高阶的固有频率对其影响不大,下面列出了系统前7阶的固有频率和振型,固有频率值见表2。

阶数	1	2	3	4	5	6	7
频率	0.125 4	0.607 2	1.467 0	2.744 3	4.668 8	6.844 3	9.581 4

通过计算可知:旋挖钻进阶段,动力头的额定转速为35 r/min,激振频率为0.583 Hz,故在此工况下,应尽量避免在转速为7.5 r/min、36.4 r/min附近工作,防止系统发生共振。

图3(a)~(g)分别为系统的第1阶至第7阶振型。这些振型形式同时表现为沿x轴的左右振动和沿y轴的前后振动。图3(a)为第1阶振型,它表现为一次弯曲形式,只有1个节点;图3(b)为第2阶振型,它表现为二次弯曲形式,有2个节点。它们会使孔歪斜,严重影响成孔质量。随着阶数的升高,振型节点数目逐渐增多,弯曲次数增多。此时接近孔底的钻杆便沿着孔壁开始上下滑动,表现为一种“波浪形”的运动,距离钻具很近的一段钻杆表现出很强的柔性状态。这种情况必须及时得到有效控制,不然孔底钻具和与它相连的钻杆在这种极不稳定的情况下会发生损坏和破裂,造成钻孔过程的重大损失。

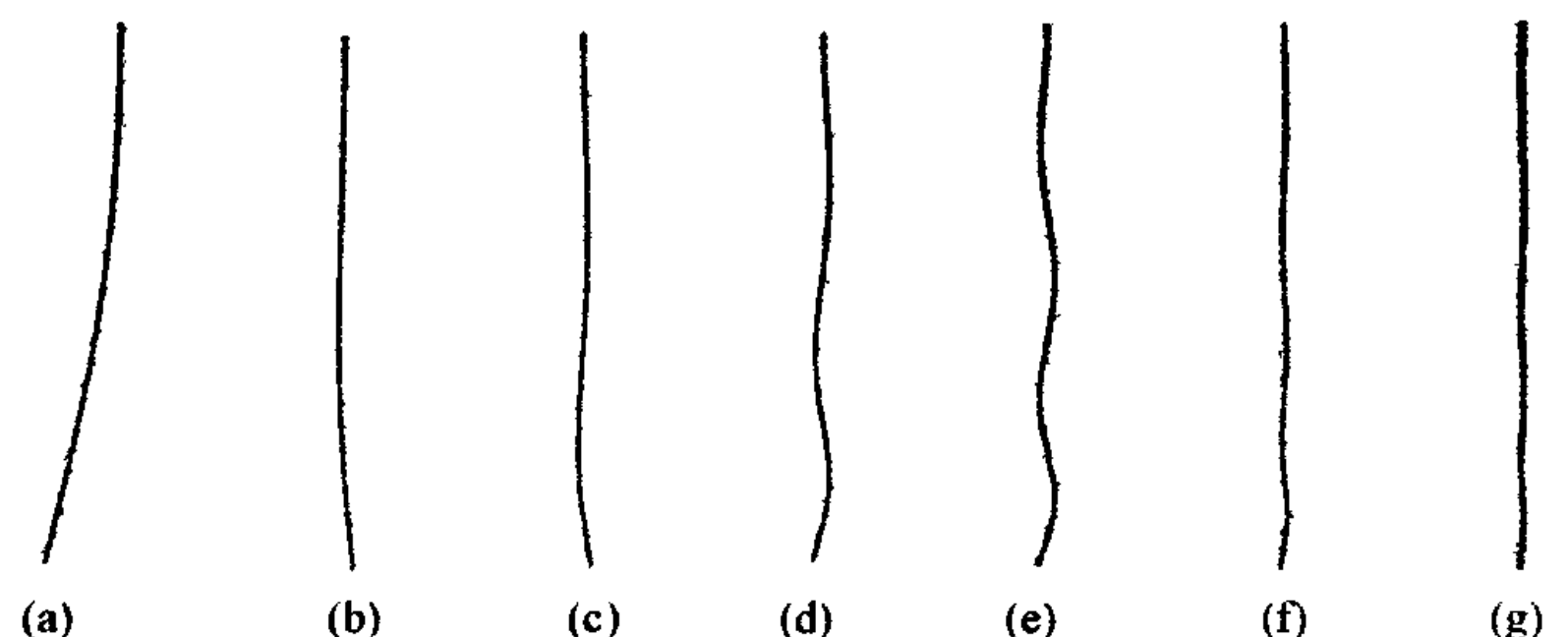


图3 最大钻深时的固有振型

由上可知:旋挖钻机在进行作业时,横向振动分布于全孔深钻杆的各个阶段。尤其在深孔作业时,发生横向共振的几率相对较大,此时横向振动会引起钻杆出现“波浪形”的运动方式,加大深孔施工的作业难度。

## 3 钻具中心的运动轨迹计算

根据拉格朗日方程,得到钻控系统的基本动力学方程

$$M\ddot{q} + Kq = F(t) \quad (1)$$

式中: $M$ ——钻杆的整体质量矩阵;

$K$ ——整体刚度矩阵;

$F(t)$ ——钻具在 $t$ 时刻所受到的广义力向量;

$\ddot{q}$ ——系统上任意点的广义加速度向量;

$q$ ——系统上任意点的广义位移向量。

钻控过程中横向振动时的阻力主要由地下土壤的阻力



和钻杆本身的结构阻尼组成。

在应用有限单元法时,若钻控系统由 $N$ 个结点、 $N-1$ 个梁单元连接组成,系统的整体质量矩阵和整体刚度矩阵由结点之间的连接关系决定其组合方式<sup>[3]</sup>。本系统的单元矩阵在进行拼装时,相同结点的数值相加,由此获得整体质量矩阵 $M$ 和整体刚度矩阵 $K$ 是 $2N \times 2N$ 的对称稀疏矩阵,半带宽为4。由于不考虑钻杆与孔壁之间的摩擦,故系统在作横向振动时所受的广义力向量即为钻具与土壤之间的作用力,所以将此时系统所受的作用力施加在系统的最后一个单元上。为了方便计算,将系统所受的横向力在径向平面内分解为沿 $x$ 方向的广义力向量 $F_x(t)$ 和 $y$ 方向的广义力向量 $F_y(t)$ ,均为 $2N \times 1$ 的矩阵

$$\dot{q} = -M^{-1}Kq + M^{-1}F \quad (2)$$

式中: $\dot{q}$ ——系统上任意点的广义速度向量。

令 $R = \begin{Bmatrix} \dot{q} \\ q \end{Bmatrix}$ , 设 $K_M = -M^{-1}K$ ,  $F_M = -M^{-1}F$ ,  $E$ 为单位矩阵,  $O$ 为零矩阵。则上式可以转化为

$$R = \begin{Bmatrix} \dot{q} \\ q \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} O\dot{q} + K_M q + F_M \\ E\dot{q} + O q + O \end{Bmatrix} \quad (3)$$

令 $A = \begin{bmatrix} O & K_M \\ E & O \end{bmatrix}$ ,  $B = \begin{Bmatrix} F_M \\ O \end{Bmatrix}$ , 则式(2)可以变形为

$$\dot{R} = AR + B \quad (4)$$

设系统的初始位移向量为 $q_0$ , 初始速度向量为 $\dot{q}_0$ , 则系统的初始条件为

$$R_0 = \begin{Bmatrix} \dot{q}_0 \\ q_0 \end{Bmatrix}$$

根据四阶龙格-库塔算法,可以得到钻杆上各个单元的振动位移情况。将每节钻杆划分为4个长度为3 m的单元,则5节钻杆共划分20个单元,此时系统的节点数目为21个,所得的整体质量矩阵和整体刚度矩阵阶数为 $42 \times 42$ 。

图4和图5分别为工况5钻具截面中心点在 $x$ 方向和 $y$ 方向的振动位移曲线,图6为工况5钻具截面中心点在 $xy$ 平面的运动轨迹<sup>[4]</sup>。

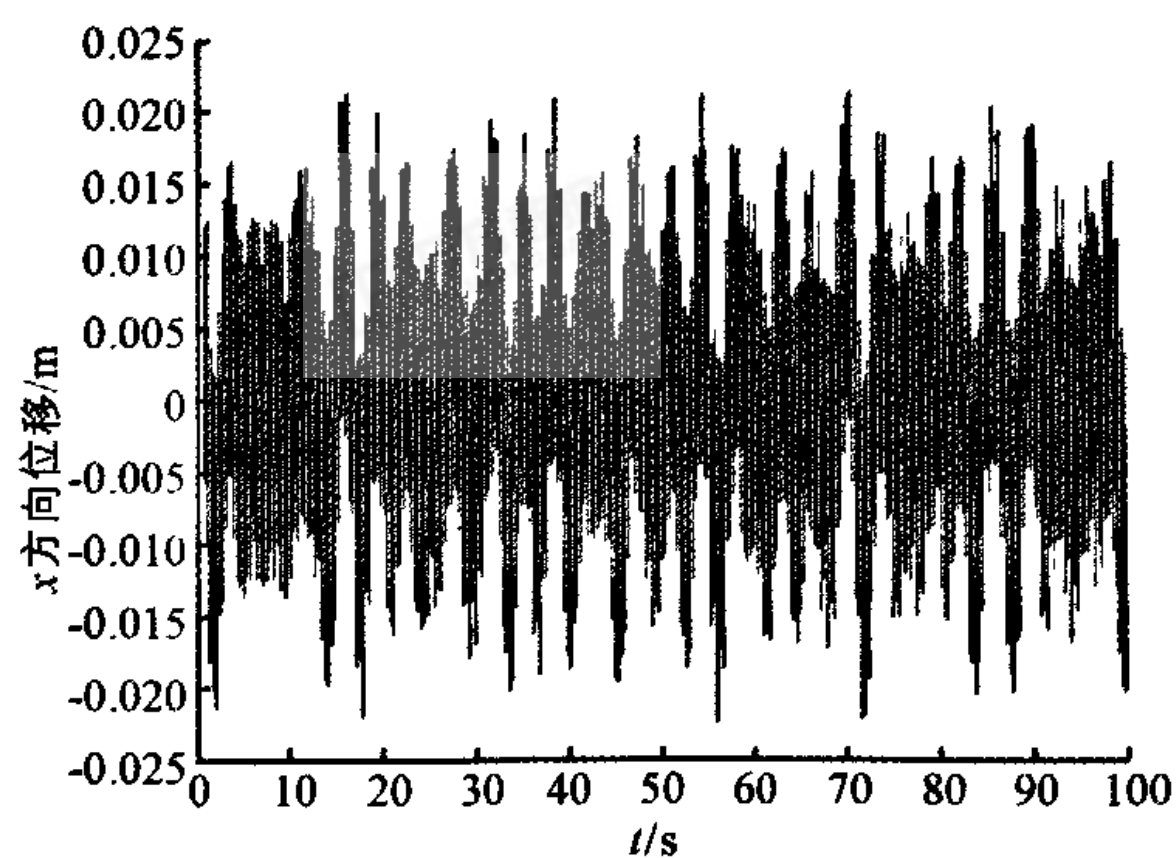


图4 工况5钻具沿 $x$ 方向的振动位移

从图4~6可以看出:钻杆在孔内前后、左右振动,钻具中心在地下一定范围内运动。在工况5,即钻孔深度达到60 m时,钻进过程中钻杆有明显的振动现象,钻具中心在地下的横向振动振幅在 $x$ 和 $y$ 方向分别为0.025 m和0.060 m,此时所成孔的倾斜度为0.1%,在施工允许的范围之内<sup>[5-6]</sup>。

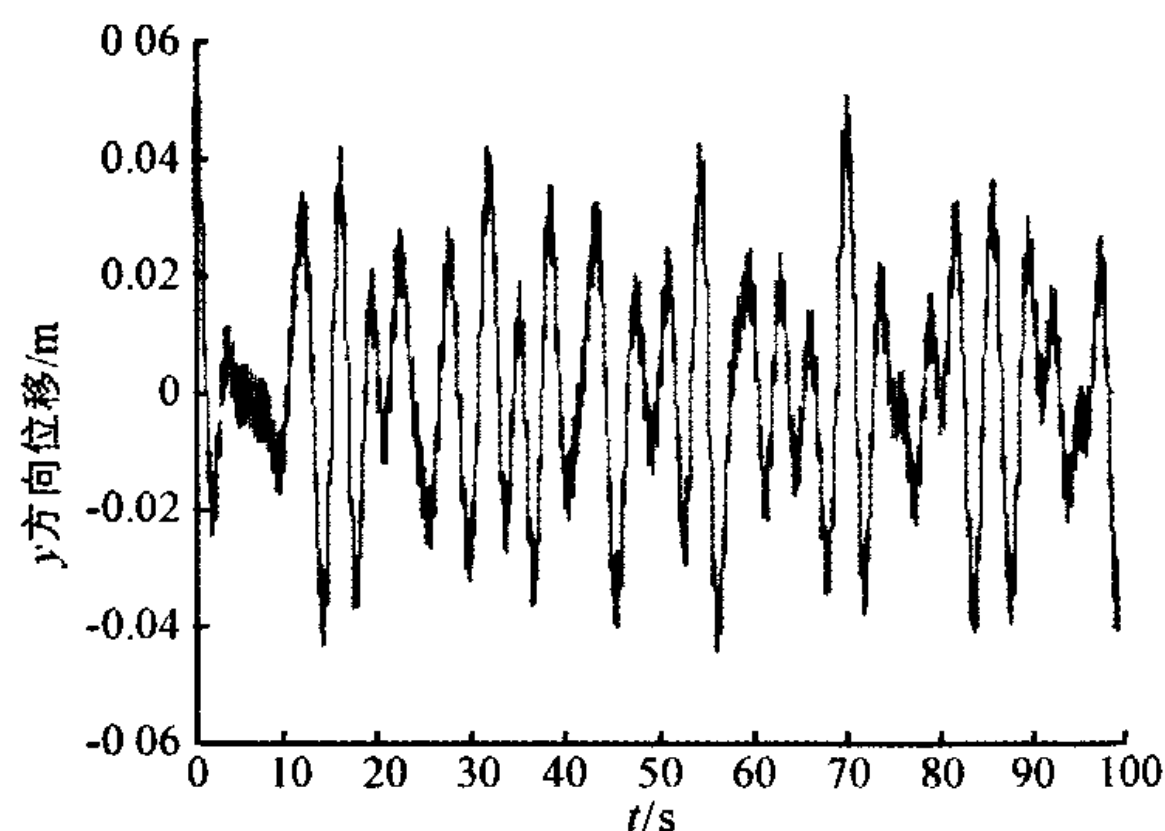


图5 工况5钻具沿 $y$ 方向的振动位移

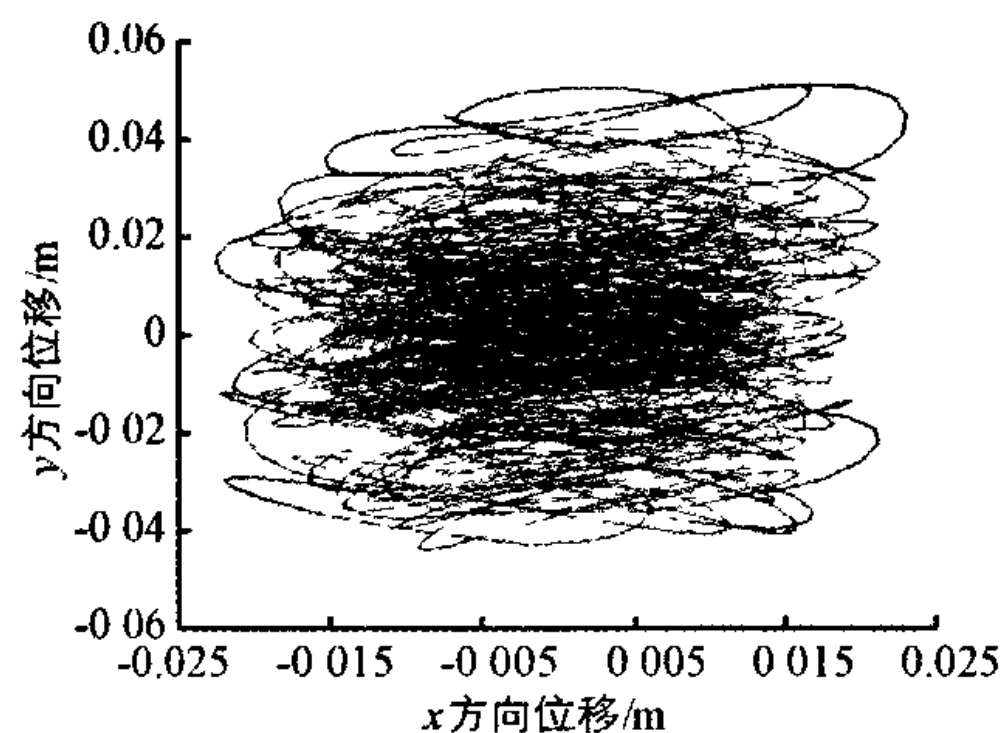


图6 工况5钻具中心的运动轨迹

## 4 结语

钻控系统的横向振动使钻具中心实际运动轨迹偏离了孔眼中心,而不再是铅直线。随着钻深、振动阶数、振型节点数目的增加,钻杆表现为较强的柔性状态。当钻具横向振动的振幅较大时,将造成孔歪斜,不能保证孔的垂直度。当然,在钻控不同地层、不同孔深时,振动的特征也是不一样的,这就要求操作者应该及时了解地下钻具的运动轨迹,确保成孔的位置和几何形态,提高施工质量。一旦钻具的运动轨迹发生偏离,应该在允许的范围内调整工作参数,如钻控转速等,但在严重情况下,应该提起钻头重新开钻。

### 参考文献:

- [1] 叶远林,秦四成.ZY-200型旋挖钻机钻杆应力的有限元分析[J].工程机械,2004,35(3):15-17.
- [2] 傅武军,廖小波,朱昌明.基于ADAMS的电梯横向振动频域分析及参数优化[J].系统仿真学报,2005,17(6):1 500-1 504.
- [3] 王助成,邵敏.有限单元法基本原理和数值方法[M].北京:清华大学出版社,1997.
- [4] 苏金明,阮沈勇.MATLAB6.1实用指南[M].北京:电子工业出版社,2002.
- [5] 王国强,张进平,马若丁.虚拟样机技术及其在ADAMS上的实践[M].西安:西北工业大学出版社,2002.
- [6] 柳波,何清华,杨忠炯.基于转速感应的液压旋控钻机功率匹配模糊控制[J].中国公路学报,2007,20(1):123-126.

收稿日期:2007-08-29

[责任编辑:张宗涛]