

6-2-2020

Magnetic Levitation System Simulating and Its Chaos Research

Jiang Dong

College of Electrical & Electronic Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China;

Deshan Kong

College of Electrical & Electronic Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China;

Xukun Liu

College of Electrical & Electronic Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China;

Jiaxiang Yang

College of Electrical & Electronic Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China;

See next page for additional authors

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Magnetic Levitation System Simulating and Its Chaos Research

Abstract

Abstract: The physical model, mathematical model and simulation model of the magnetic levitation system were set up. *The function among magnetic force, electromagnet current and distance was deduced after the measuring. The dynamic equation of magnetic levitation ball was derived. The simulation model of the magnetic levitation ball system was set up. The simulation experiments for no vibration and external vibration and chaos state of the system were conducted. The phase trajectories of stable, quasi-periodic and chaotic states were researched.* The waveforms of no vibration and external vibration and chaos state were measured. The tests show that the measured waveforms are same as simulation waveforms. Using the established model, the stability of the magnetic levitation ball system impacted by various system parameters and acquire optimal parameters of the system could be understood. The chaotic characteristics of the magnetic levitation system could be understood further completing the data processing of the system.

Keywords

magnetic levitation, initial state, dynamic equation, simulation model

Authors

Jiang Dong, Deshan Kong, Xukun Liu, Jiaxiang Yang, and Deyu Wang

Recommended Citation

Jiang Dong, Kong Deshan, Liu Xukun, Yang Jiaxiang, Wang Deyu. Magnetic Levitation System Simulating and Its Chaos Research[J]. Journal of System Simulation, 2017, 29(3): 572-580.

磁悬浮系统仿真及混沌特性研究

江东, 孔德善, 刘绪坤, 杨嘉祥, 王德玉

(哈尔滨理工大学电气与电子工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘要: 建立了磁悬浮系统的物理模型、数学模型和仿真模型。实测基础上推导了磁悬浮球所受磁力与电磁铁电流及磁悬浮球与螺线管距离的变化关系, 得出了磁悬浮球的动力学方程。设计了磁悬浮系统的Simulink仿真模型, 对无振动、外加振动及混沌状态进行了仿真。研究了稳定、准周期和混沌状态的相轨迹。实测了稳定波形、外加振动和混沌波形。实验表明, 磁悬浮系统稳定, 混沌状态的运动规律与仿真结果相同。利用建立的模型了解系统参数对磁悬浮系统稳定性影响, 进而获得系统最佳参数, 了解磁悬浮球的混沌特性及进一步完成系统的数据处理。

关键词: 磁悬浮; 初始状态; 动力学方程; 仿真模型

中图分类号: TM 571.6

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2017) 03-0572-09

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201703015

Magnetic Levitation System Simulating and Its Chaos Research

Jiang Dong, Kong Deshan, Liu Xukun, Yang Jiexiang, Wang Deyu

(College of Electrical & Electronic Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China)

Abstract: The physical model, mathematical model and simulation model of the magnetic levitation system were set up. The function among magnetic force, electromagnet current and distance was deduced after the measuring. The dynamic equation of magnetic levitation ball was derived. The simulation model of the magnetic levitation ball system was set up. The simulation experiments for no vibration and external vibration and chaos state of the system were conducted. The phase trajectories of stable, quasi-periodic and chaotic states were researched. The waveforms of no vibration and external vibration and chaos state were measured. The tests show that the measured waveforms are same as simulation waveforms. Using the established model, the stability of the magnetic levitation ball system impacted by various system parameters and acquire optimal parameters of the system could be understood. The chaotic characteristics of the magnetic levitation system could be understood further completing the data processing of the system.

Keywords: magnetic levitation; initial state; dynamic equation; simulation model

引言

磁悬浮系统具有非接触、无摩擦和多自由度^[1-3]



收稿日期: 2016-07-01 修回日期: 2016-12-31;
基金项目: 国家自然科学基金(51377037);
作者简介: 江东(1960-), 男, 黑龙江, 博士, 教授,
研究方向为磁悬浮技术及信号处理; 孔德善(1992-),
男, 唐山, 硕士生, 研究方向为检测技术及传感器。

等优异特性。为了在军事、工业及民用等领域的实际应用, 需建立磁悬浮系统的物理模型、数学模型和仿真模型^[4-7]。通过建立模型可知系统参数对磁悬浮系统稳定性的影响^[8], 可实现对磁悬浮陀螺的稳定性^[9]、磁悬浮振动的测试、磁悬浮风力发电、磁悬浮系统的混沌特性等进行深入研究^[10], 指导磁悬浮系统位移传感器的安装、控制器参数的调节

及磁悬浮球的初始位置确定等^[11], 扩大磁悬浮系统的动态范围, 提高磁悬浮系统的抗冲击能力, 进而获得磁悬浮控制系统的最佳条件, 实现最优控制^[12]、小波分析和滤波等数据处理^[13], 可为磁悬浮系统在不同领域的应用奠定基础。

1 磁悬浮系统物理模型

磁悬浮系统模型包括: 磁悬浮球、电磁铁、控制器、差动放大器、功率放大器、红外发射和接收器、永久磁铁等, 见图 1。

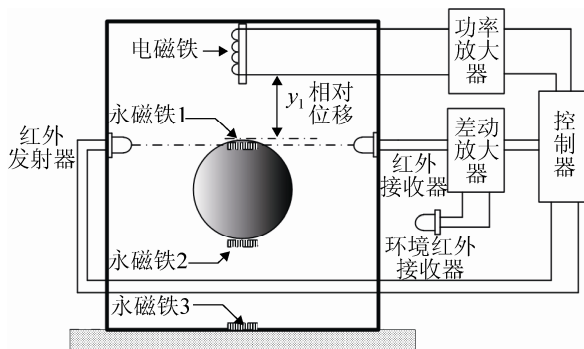


图 1 磁悬浮系统模型

Fig. 1 Magnetic levitation system model

磁悬浮球是一空心塑料球, 球体上、下嵌有圆形永磁铁 1 和永磁铁 2, 上磁铁 1 的磁性较强, 与电磁铁产生电磁吸力, 用于克服磁悬浮球的重力; 下磁铁 2 的磁性弱, 与壳体下方的电磁铁 3 产生电磁吸力, 用于使磁悬浮球保持在中心位置, 稳定磁悬浮球的运动。研究表明, 当磁悬浮球处于平衡位置时, 测得磁悬浮球嵌入的永磁铁较弱的一面朝向螺旋管时, 只有电流较大时控制电流与位移成线性关系, 所需控制电流较大, 磁悬浮球与电磁铁距离较近, 磁悬浮球动态范围较小; 当磁悬浮球嵌入的永磁铁较强一面朝向螺旋管时, 磁悬浮球平衡点附近的控制电流与位移基本呈线性关系, 磁悬浮球与电磁铁距离较远, 且磁悬浮球的动态范围较大。

设计磁悬浮球的半径 $R=0.1$ m, 质量 $m=0.198$ kg, 永磁铁的半径 $r_1=0.011$ m, 其厚度 $h=0.005$ m。螺旋管线圈内置圆形铁芯, 其半径 $r_2=0.01$ m, 长度 $r_3=0.1$ m, 铁芯上缠绕铜导线的线径 $r_4=0.001$ m,

匝数取 $N=1341$ 匝。红外发射接收对管型号分别选 OP133W 和 OP0505A。

设计磁悬浮球与螺旋管的距离为 0.023 m。磁悬浮球所受电磁吸力与螺旋管线圈的电流和磁悬浮球与螺旋管距离的关系见图 2。

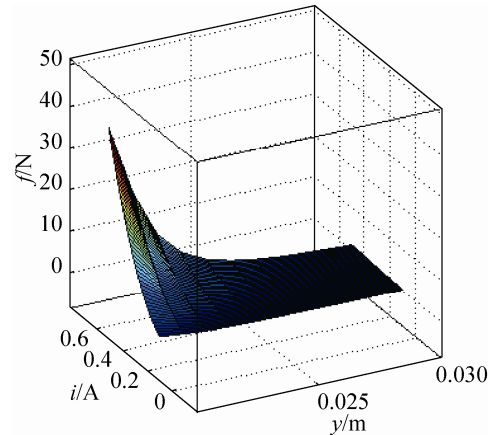


图 2 磁悬浮球所受磁力与位移和电流关系曲线

Fig. 2 Relationship between the magnetic force acting on magnetic levitation ball, displace and current

红外接收管输出电压与磁悬浮球位移之比为红外光电测量灵敏度。该灵敏度对磁悬浮球控制系统的影响很大。在 21~25 mm 之间实测红外接收管输出电压与磁悬浮球位移之间关系近似成线性关系。由实测值计算得到红外接收管的测量灵敏度为 $C_f \approx 3$ kV/m。

2 磁悬浮系统数学模型

磁悬浮球所受电磁吸力用 $f_{\text{电磁吸力}}(i, y)$ 表示, i 为螺旋管线圈的电流, y 为螺旋管线圈的底部与磁悬浮球顶部之间的长度, 根据奇异摄动法, 计算磁路中给定点磁悬浮球所受电磁吸力的表达式为^[14]:

$$f_{\text{电磁吸力}}(i, y) = Ci^2 \left\{ (y+l) \sin^{-1} \left(\frac{r_2}{y+l} \right) - \sin^{-1} \left(\frac{r_2}{y+l} \right) + y \left[\sin^{-1} \left(\frac{r_1}{y} \right) - \sin^{-1} \left(\frac{r_2}{y} \right) \right] \right\}^2 \quad (1)$$

其中: $C = \frac{(\mu_0 \mu_r n^2) S}{8 \mu_0}$; r_1, r_2 分别为螺旋管线圈

的内圈和外圈的半径; l 为其长度; S 为磁极的面积; μ_0 , μ_r 分别为真空磁导率以及相对磁导率。

根据数值分析方法, 式(1)可由多项式函数进行替换, 根据系统的精度要求, 多项式的最高项取 3 次, 得到:

$$f(i, y) = \frac{i^2}{a_3 y^3 + a_2 y^2 + a_1 y + a_0} \quad (2)$$

实测平衡点位移与电流测量数据见表 1。

表 1 平衡点位移与电流对应值
Tab. 1 Displacement and current corresponding value at equilibrium point

位移 y/m	电流 i/A	位移 y/m	电流 i/A
0.020	0.096	0.028	0.550
0.022	0.186	0.030	0.688
0.024	0.320	0.032	0.813
0.026	0.417	0.034	1.000

将表 1 数据代入式(2), 可通过最小二乘法拟合编程求出多项式的系数, 得到磁悬浮球所受电磁吸力表达式:

$$f_{\text{电磁吸力}}(i, y) = \frac{i^2}{6665y^3 + 1648y^2 - 71.96y + 0.7326} \quad (3)$$

在平衡点($i_0=0.3A$, $y_0=0.023\text{ m}$)处电磁吸力进行线性化处理, 采用泰勒级数展开:

$$f_{\text{电磁吸力}}(i, y) = f(i_0, y_0) + \left. \frac{\partial f}{\partial i} \right|_{(i_0, y_0)} \Delta i(t) + \left. \frac{\partial f}{\partial y} \right|_{(i_0, y_0)} \Delta y(t) \quad (4)$$

根据牛顿第二定律, 磁悬浮球动力学方程为:

$$mg - f_{\text{电磁吸力}}(i, y) = m \frac{d^2 y}{dt^2} \quad (5)$$

令平衡点处向上的电磁吸力与磁悬浮球的质量相等, 将电磁吸力表达式(4)代入(5)整理得到平衡点附近的磁悬浮球动力学方程为:

$$k_i \Delta i(t) + k_y \Delta y(t) = m \frac{d^2 \Delta y}{dt^2} \quad (6)$$

k_i 、 k_y 分别为电流变化系数和位移变化系数。

控制电路采用比例、微分电路实现, 电流的变化量可用位移及位移随时间的变化率表示, 即:

$$\Delta i(t) = c_1 \Delta y(t) + c_2 \frac{d\Delta y(t)}{dt} \quad (7)$$

将式(7)代入式(6)经过整理, 得到:

$$m \frac{d^2 \Delta y(t)}{dt^2} + c \frac{d\Delta y(t)}{dt} + k \Delta y(t) = 0 \quad (8)$$

为了获得系统的传递函数, 即位移与电流的传递函数, 将式(4)代入式(5)并进行拉氏变换, 得到系统传递函数:

$$H(s) = \frac{\Delta y(s)}{\Delta i(s)} = \frac{k_i}{ms^2 - k_y} \quad (9)$$

代入数值得:

$$H(s) = \frac{24.79}{(s-31)(s+31)} \quad (10)$$

式(10)中含有 31 和 -31 两个极点, 系统在 S 平面向含有正的极点。根据控制理论分析得知系统为不稳定系统。为使系统实现稳定设计加入超前校正环节, 控制器采用运算放大器 $\mu A741$ 构成, 实现系统超前控制以及输入信号的差动放大, 电流驱动电路由功率放大三极管、电容及电阻构成。由阻容电路的输入输出关系, 推导得到电路的传递函数:

$$\frac{U_2(s)}{U_1(s)} = \frac{s + \frac{1}{R_1 C}}{s + \frac{1}{R_1 C} + \frac{1}{R_2 C}} \quad (11)$$

用磁悬浮系统的固有角频率、阻尼率表示, 并将磁悬浮球质量 m 、等效阻尼系数 c 和等效弹簧弹性力系数(刚度) k 代入式(8)有:

$$\frac{d^2 \Delta y(t)}{dt^2} + 179.09 \frac{d\Delta y(t)}{dt} + 14054.21 \Delta y(t) = 0 \quad (12)$$

由此可知: 磁悬浮系统的动力学方程为二阶常系数线性微分方程。阻尼系数由控制电路中 R 、 C 的数值确定, 阻尼过小, 磁悬浮球振动剧烈, 阻尼过大磁悬浮球的反应速度过慢, 都将使系统不稳定, 甚至产生失衡。

3 磁悬浮系统仿真模型

由磁悬浮球动力学方程式(5)和控制电路得到磁悬浮球系统 Simulink 仿真电路, 见图 3。

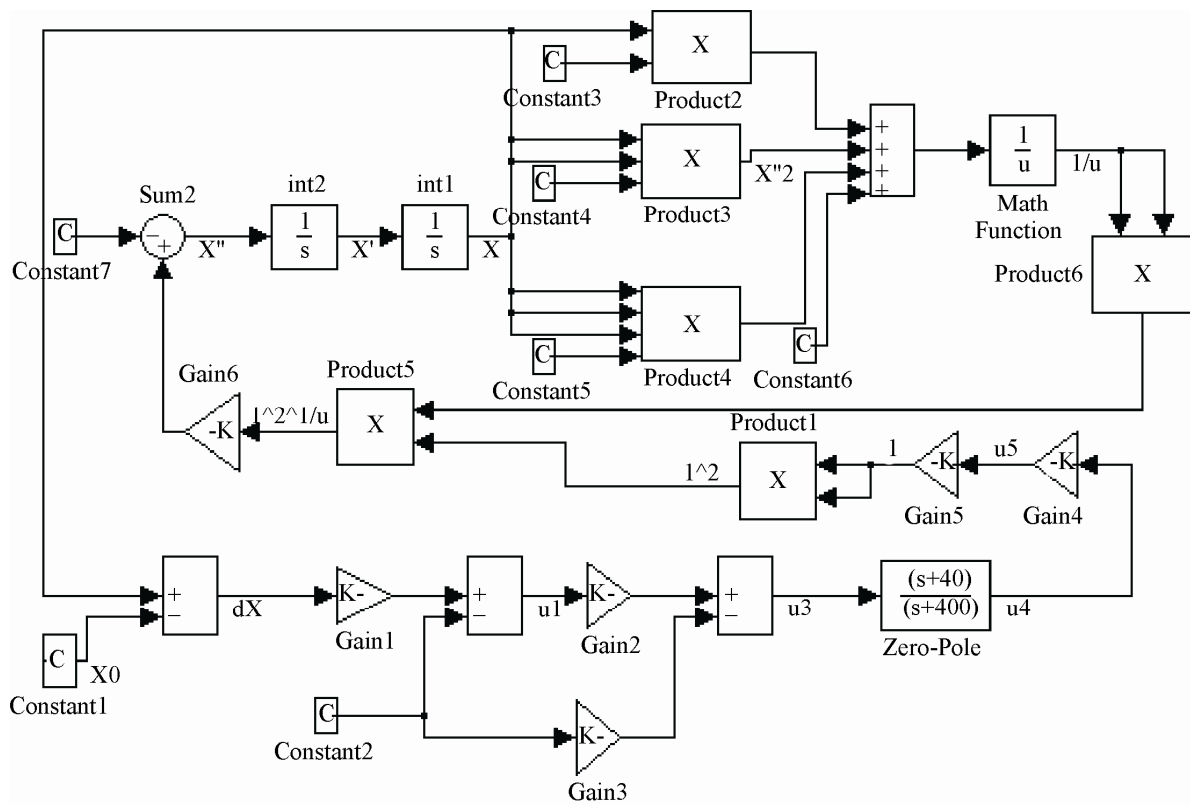


图 3 磁悬浮系统仿真框图

Fig. 3 Simulation schematic of magnetic levitation system

图 3 中 C_1 为红外位移传感器的安装位置; C_2 为环境红外传感器输出电压; $C_3 \sim C_6$ 为磁悬浮球所受电磁吸力式的多项式系数, 见式(3); C_7 为磁悬浮球的重力。磁悬浮球初始位置由位移 y 积分初始值给定。改变控制电路的电阻和电容即可改变零、极点值。从而可以研究零、极点对系统稳定性的影响。

4 系统仿真实验

4.1 无外加振动仿真

磁悬浮系统在无外加振动情况下, 设定位移传感器与螺旋管底部的距离 $H_0=0.021$ m, 磁悬浮球初始位置 $X_0=0.022$ m, $Z_0=-40$, $P_0=-400$, 仿真得到磁悬浮球位移信号见图 4。

图 4 显示磁悬浮球离开初始位置后, 能够很快达到平衡点位置, 在平衡点附近运动, 磁悬浮球能够实现动态平衡, 磁悬浮球的波动幅度较小。

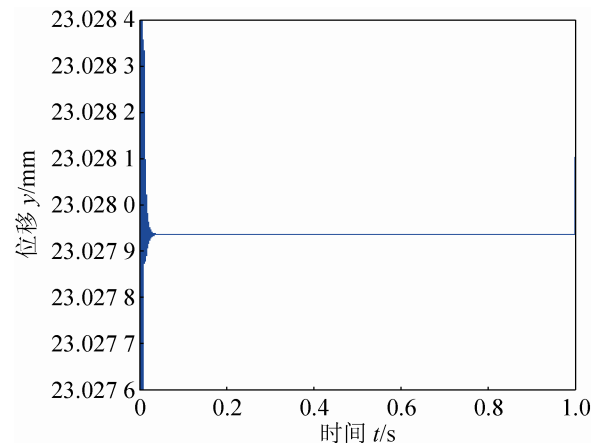


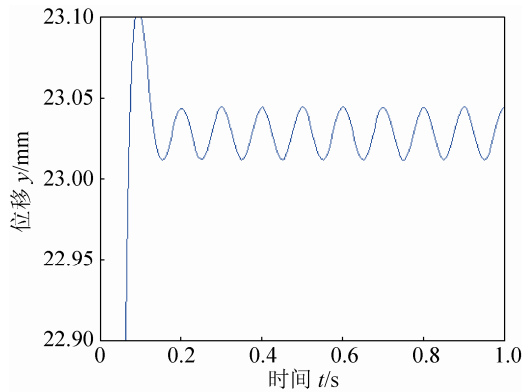
图 4 无振动时仿真波形

Fig. 4 Simulate waveform when no vibration

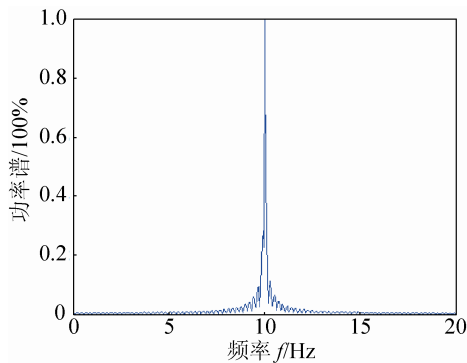
4.2 外加振动仿真

为考察系统稳定性及抗干扰能力, 在系统条件不变的情况下, 外加振动信号。振动信号的频率为 10 Hz, 仿真得到磁悬浮球的相对位移信号, 见图 5(a)。对外加 10 Hz 振动信号获得的磁悬浮球的相对位移信号进行功率谱分析, 见图 5(b)。

图5(a)可见,磁悬浮球相对位移信号的频率为10 Hz,与外加振动信号相同;由图5(b)功率谱分析得出,当外加10 Hz的振动信号磁悬浮球相对位移波形功率谱的主频为10 Hz。与外加振动信号的频率相同。



(a) 外加10 Hz 振动信号仿真波形
(a) 10 Hz vibration signal simulate waveform



(b) 外加10 Hz 振动信号仿真功率谱
(b) 10 Hz vibration signal power spectrum

图5 外加振动信号仿真波形和功

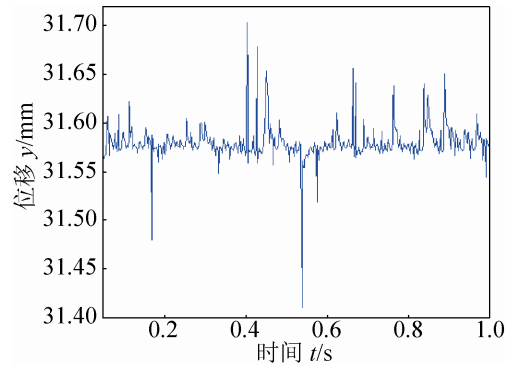
Fig. 5 Simulate waveform and power spectrum having vibration

4.3 系统混沌仿真

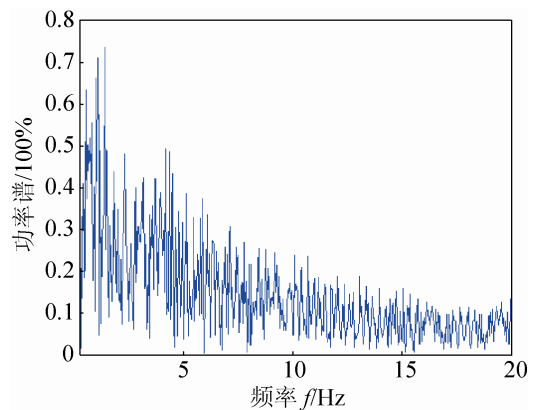
磁悬浮球所受电磁吸力与位移关系为非线性关系,一定条件下磁悬浮球的运动具有混沌特性。产生混沌条件与系统的零、极点及磁悬浮球的初始位置和位移传感器的安装位置均有关^[15]。令零、极点为 $Z_0=-8$ 、 $P_0=-80$,磁悬浮球初始位置 $X_0=0.0234$ m,位移传感器与螺旋管底部的距离 $H_0=0.0210$ m,仿真得到磁悬浮球位移信号见图6(a);进一步通过功率谱对混沌信号进行分析,见图6(b)。

图6(a)所示,磁悬浮球在平衡点附近出现了非周期剧烈振动,混沌状态处于稳定状态和不稳定状

态之间;由图6(b)功率谱图可见,不同频率处出现了多个高峰值功率谱,无规律多峰值的出现表明磁悬浮球不是周期运动状态。且功率谱中杂乱的峰值并不是等概率分布,因此可排除磁悬浮球随机运动状态。根据混沌判定方法可知,在此条件下,磁悬浮球处于混沌运动状态。



(a) 混沌状态仿真波形
(a) Chaos simulate waveform



(b) 混沌仿真波形功率谱
(b) Chaotic simulate power spectrum

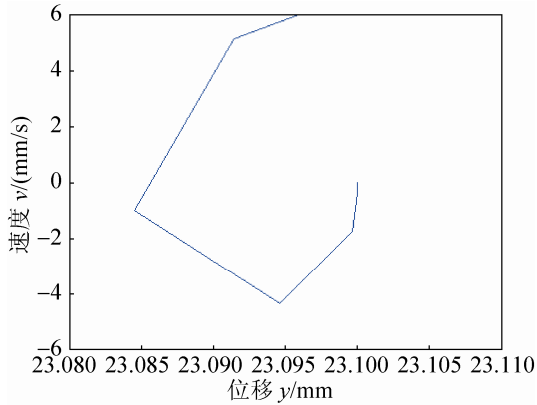
图6 混沌状态仿真波形及功率谱

Fig. 6 Simulate waveform and power spectrum when chaos

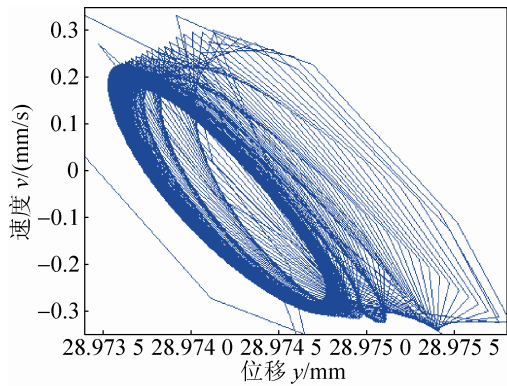
4.4 系统相轨迹分析

为进一步对系统进行深入研究,在不同的工作条件下,对磁悬浮球的运动轨迹进行相轨迹分析。首先作出无外加振动情况下的相轨迹,见图7(a);令零、极点为 $Z_0=-25$ 、 $P_0=-250$,磁悬浮球初始位置 $X_0=0.0235$ m,位移传感器与螺旋管底部的距离 $H_0=0.0210$ m,仿真得到磁悬浮球位移信号见图7(b);为进一步对系统的混沌特性进行深入研究,

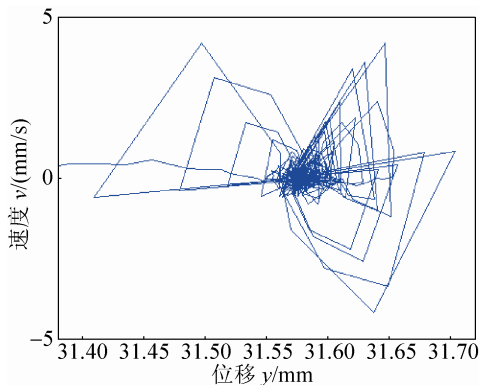
对混沌条件下磁悬浮球的运动轨迹进行相轨迹分析。改变控制系统参数, 零、极点由小到大增加时, 磁悬浮球的混沌特性逐渐减弱。零点 $Z_0=-8$, 极点 $P_0=-80$ 时的相轨迹见图 7(c)。



(a) 无振动仿真相轨迹
(a) Phase trajectory when no vibration



(b) 准周期仿真相轨迹
(b) Phase trajectory when quasi-periodic



(c) 混沌仿真相轨迹
(c) Phase trajectory when chaos

图 7 无振动、准周期和混沌仿真相轨迹

Fig. 7 Phase trajectory when no vibration, quasi-periodic and chaos

图 7(a)无振动情况下磁悬浮球的相轨迹表明, 无振动情况下, 磁悬浮球很快进入稳定状态, 相对位移收敛于 0.023 m 附近, 进入平衡状态; 图 7(b)显示磁悬浮球能够在平衡点附近运动, 处于准周期性的运动状态, 磁悬浮球在平衡点附近具有较大的波动。由图 7(c)可见, 相轨迹变化呈相似性。形成左右各为相似三角形或相似多边形的形状。研究表明: 当磁悬浮球初始值有微小变化时, 磁悬浮球的运动规律出现本质变化, 可以判定磁悬浮球进入了混沌运动状态。

5 实验数据及分析

5.1 无外加振动实验

为了验证磁悬浮系统仿真的正确性, 实测设计的磁悬浮系统模型不同工作情况下的输出波形和功率谱分析。

按照仿真获得的磁悬浮球处于混沌运动下的参数, 包括位移传感器与螺旋管底部距离, 磁悬浮球初始位置, 位移传感器灵敏度, 电流驱动传递函数, 零点和极点数据等, 首先在无振动情况下实测磁悬浮球位移信号见图 8。

图 8 可见, 系统无振动情况下, 磁悬浮球处于动平衡状态, 平衡点在 0.023 m 附近, 磁悬浮球的波动较小, 实测结果与仿真结果相近。

5.2 外加振动实验

为考察系统稳定性, 在系统参数不变的情况下, 外加激振信号对磁悬浮球的位移进行测量。激振器采用 HEV-20 型高能电动式激振器作为振源, 该激振器是一种电动式变换器, 其最大激振力为 20 N , 力常数为 8 N/A , 最大振幅 $\pm 5\text{ mm}$, 频率范围: $1\text{ Hz}\sim 10\text{ kHz}$ 连续可调。调节激振器频率 10 Hz , 振幅 0.05 mm 使系统产生振动, 实测磁悬浮球的相对位移, 见图 9(a); 实测波形功率谱, 见图 9(b)。

图 9(a)表明, 外加 10 Hz 时, 磁悬浮球相对位移波形与外加 10 Hz 仿真波形图相似, 由此再次说

明仿真电路设计正确；图 9(b)功率谱分析得出，外加 10 Hz 振动信号实测磁悬浮球相对位移波形功率谱的主频为 10 Hz。

5.3 混沌实验

根据仿真电路获得的系统产生混沌的条件，调节系统参数为混沌数值，实测磁悬浮球处于混沌运动状态时磁悬浮球的波形，见图 10(a)；对混沌条件下实测磁悬浮球的相对位移数据进行功率谱分

析，得到图 10(b)。

由图 10(a)可见磁悬浮球在不同时刻出现了不规则的非周期剧烈波动，与图 6(a)的磁悬浮球处于混沌运动状态下的仿真波形运动规律相同；图 10(b)中对应不同频率处出现了多个峰值功率谱，与图 6(b)的磁悬浮球处于混沌运动状态下的仿真波形的功率谱相似。

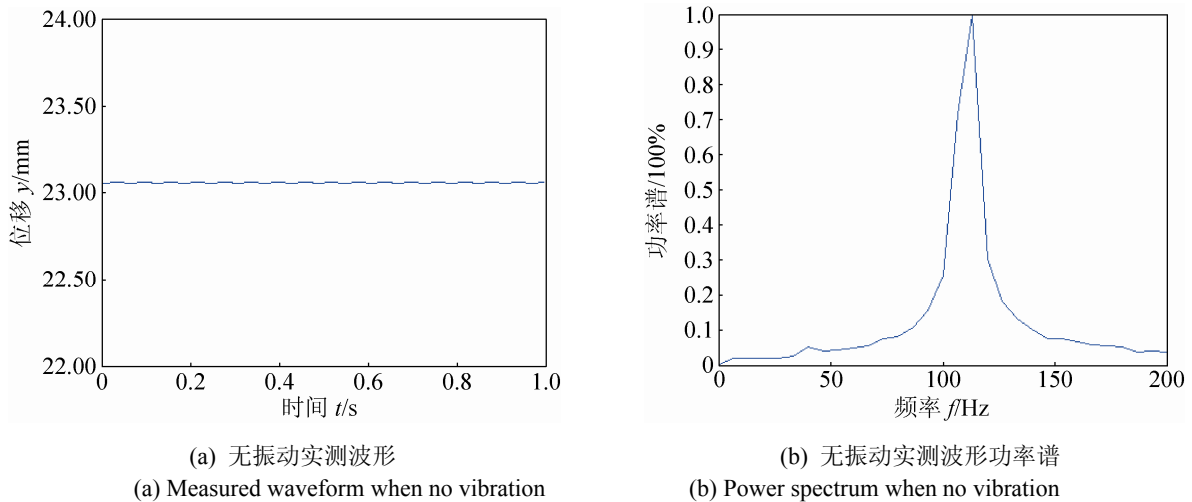


图 8 无振动实测波形和功率谱

Fig. 8 Measured waveform and power spectrum when no vibration

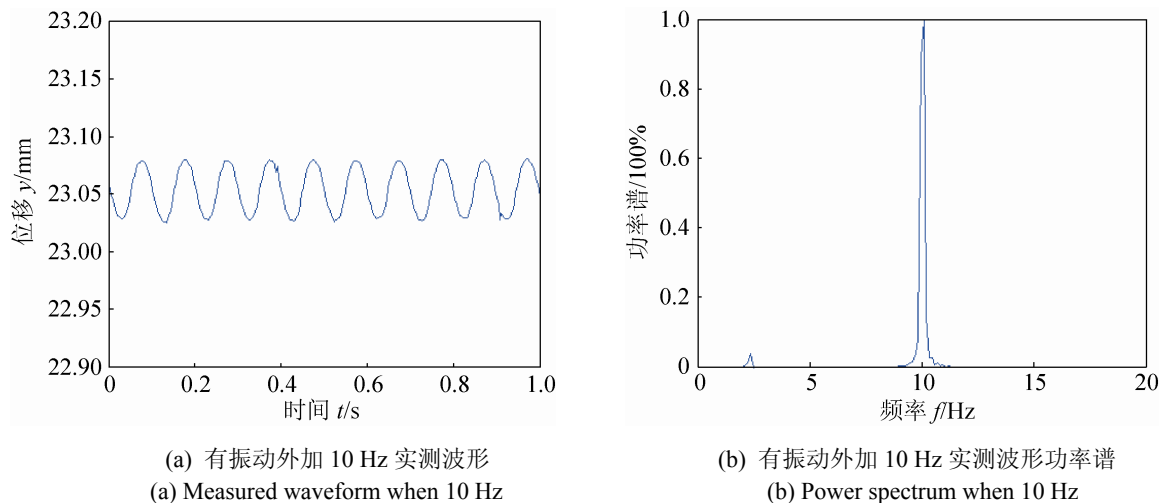


图 9 有振动外加 10 Hz 实测波形和功率谱

Fig. 9 Measured waveform and power spectrum when 10 Hz

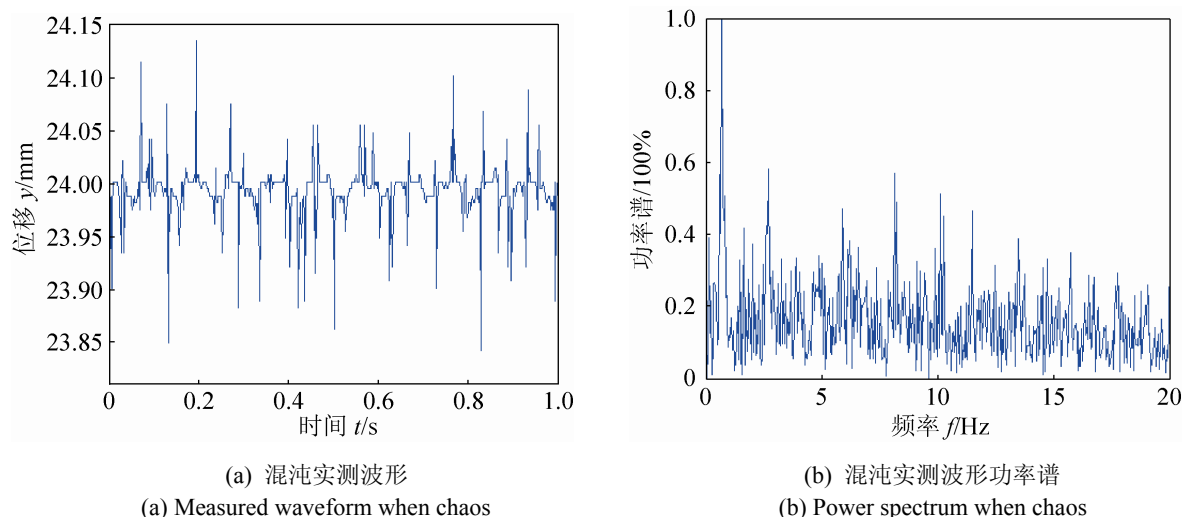


图 10 实测混沌波形及功率谱
Fig. 10 Measured waveform and power spectrum when chaos

6 结论

通过磁悬浮球的物理模型和数学模型获得了磁悬浮球系统的仿真模型。通过仿真结果和实验结果对比得到: 在无振动、外加振动和混沌三种状态下的仿真波形与实测波形相近似。通过功率谱分析得到三种状态的仿真功率谱和实测功率谱相近似; 通过相轨迹分析可实现对系统的工作状态和特性进行进一步的研究。其中包括系统结构参数对磁悬浮球稳定性的影响、磁悬浮球的混沌运动特性及磁悬浮球产生混沌的边界条件、磁悬浮系统的动态范围、磁悬浮球运动的最优参数以及利用仿真数据实现滤波和小波去噪等。

参考文献:

- [1] 江东, 杨嘉祥. 基于磁悬浮效应的三维振动测量 [J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(3): 557-562. (Jiang Dong, Yang Jiexiang. Three-dimensional vibration measurement based on magnetic levitation effect [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2011, 32(3): 557-562.)
- [2] 黎松奇, 张昆仑, 刘国清, 等. EMS 型磁浮列车上下坡过程仿真研究 [J]. 系统仿真学报, 2016, 28(1): 255-260. (Li Songqi, Zhang Kunlun, Liu Guoqing, et al. Simulation research of Maglev train during uphill and downhill process [J]. Journal of System Simulation (S1004-731X), 2016, 28(1): 255-260.)
- [3] Atsushi Miyamoto, Michael Dzadovsky. Magnetic levitation over large translation and rotation ranges in all

directions [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics (S1083-4435), 2013, 18(1): 44-52.

- [4] 岳彩旭, 蔡春彬, 黄翠, 等. 切削加工过程有限元仿真研究的最新进展 [J]. 系统仿真学报, 2016, 28(4): 815-825, 832. (Yue Caixu, Cai Chunbin, Huang Cui, et al. Recent advances in finite element simulation of machining processes [J]. Journal of System Simulation (S1004-731X), 2016, 28(4): 815-825, 832.)
- [5] 姜涛, 孙林. 环形微机械陀螺抗冲击性能的稳健性模型与优化 [J]. 系统仿真学报, 2016, 28(4): 793-799. (Jiang Tao, Sun Lin. Robust model and optimization of anti-impact performance for MEMS ring gyroscope [J]. Journal of System Simulation (S1004-731X), 2016, 28(4): 793-799.)
- [6] 李欣然, 徐婷婷, 谭绍杰, 等. 超级电容储能系统动态综合等效模型 [J]. 系统仿真学报, 2016, 28(4): 783-792, 799. (Li Xinran, Xu Tingting, Tan Shaojie, et al. Super capacitor energy storage system [J]. Journal of System Simulation (S1004-731X), 2016, 28(4): 783-792, 799.)
- [7] 崔铁军, 马云东, 王来贵, 等. 地震作用下废弃采空区引起地表沉降模拟与研究 [J]. 系统仿真学报, 2016, 28(3): 634-639. (Cui Tiejun, Ma Yundong, Wang Laigui, et al. Simulation and research on surface subsidence caused by abandoned goaf under earthquake [J]. Journal of System Simulation (S1004-731X), 2016, 28(3): 634-639.)
- [8] Peter Berkelman, Abdulkadir Balicki, Zivan Zabar, et al. Experimental performance investigation of a novel magnetic levitation system [J]. IEEE Transactions on Plasma Science (S0093-3813), 2013, 41(5): 1174-1181.

