

文章编号: 1672-8785(2007)05-0015-06

# 海洋一号卫星水色仪步进电机的角速度振动特性研究

郑列华, 尹达一, 冯 鑫

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083)

**摘 要:** 本文以海洋一号卫星水色扫描仪的转动机构为模型, 设计了用以进行状态模拟的角速度振动试验, 分析了步进电机的振荡机理, 建立了步进电机+角速度振动条件下电机运动状态的数学模型, 并进行了不同参数条件下的计算机仿真。结果表明, 步进电机在角速度振动环境下会产生耦合振动, 造成工作状态变差。

**关键词:** 海洋水色扫描仪; 步进电机; 角速度振动; 数值仿真

**中图分类号:** V447 **文献标识码:** A

## Research on Velocity Vibration Characteristics of Stepping Motor in COCTS

ZHENG Lie-hua, YIN Da-yi, FENG Xin

(Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

**Abstract:** In this paper, a special velocity vibration test is designed to simulate the operating environment of the rotating mechanism of COCTS; The vibration characteristics of the stepping motor are discussed; and a dynamic model of the stepping motor+velocity vibration environment is established. According to this model, the numerical emulation is done by using different parameters. The results have indicated that the operation state of the stepping motor can be abnormal under the velocity vibration condition.

**Key words:** COCTS; stepping motor; velocity vibration; numerical emulation

### 1 引言

由步进电机驱动的转动机构在航天器以及遥感仪器扫描机构中已得到广泛的应用, 人们对它的静态和动态运行性能已有了相当深入的研究。这些研究较多是着重于保持转矩的增大、牵入和牵出转矩的提高、运行频域的拓宽以及分辨率和步距精度的提高等。然而, 步进电机与其它电机不同的是, 由于开环脉冲控制而存在容易产生振荡的倾向, 尤其是在承受外界角速度振动的条件下, 电机会表现出在某些频段内

振动明显, 噪声增大, 负载能力下降, 严重时甚至会失步以致不能正常运行。这些现象在海洋一号卫星水色仪的空间应用中均有发生, 因而迫切需要对步进电机的振动特性作进一步的研究。

### 2 海洋一号卫星水色仪的耦合振动情况

十通道海洋水色扫描仪(以下简称水色仪)是海洋一号卫星的主要载荷之一, 它有 6 个可见

**收稿日期:** 2007-01-23

**作者简介:** 郑列华(1966—), 男, 广东汕头人, 研究员, 曾担任海洋卫星水色仪、实践 7 号卫星多谱段相机副主任设计师, 主要负责相机光机设计工作。

光波段、2个近红外波段和2个热红外波段。可见光波段用于获取水色景象,近红外波段用于进行水色遥感数据的大气辐射校正,获取海水中悬浮物质的含量,具有飞行中辐射校正能力的2个红外波段则用于获取定量的海面温度图。水色仪中有45°扫描和K镜消像旋两个转动机构,均采用永磁式步进电机,以恒压四相八拍方式驱动。

卫星发射入轨后,根据陀螺仪传回的卫星姿态角遥测数据(如图1和图2),发现在水色仪转动机构未开机时,卫星姿态角呈基本平稳状态,但也有微小波动。当水色仪转动机构开机时,伴随电机的转动,卫星姿态角和姿态角速度均有较大的反应,其滚动和偏航姿态角速度出现快速周期变化的特征,表明星体发生一定频率的抖动,幅度(遥测显示值)在0.02°/s~0.06°/s的范围内,并随星下点的纬度而变化。水色仪关机后,该振动消失。证明水色仪与整星之间存在动力学耦合。在此情况下,水色仪K镜机构的运动状态受到了影响,表现为驱动电流变化增大,运行状态不稳,严重时产生失步。说明卫星的振动对步进电机的工作状态产生了不利影响。

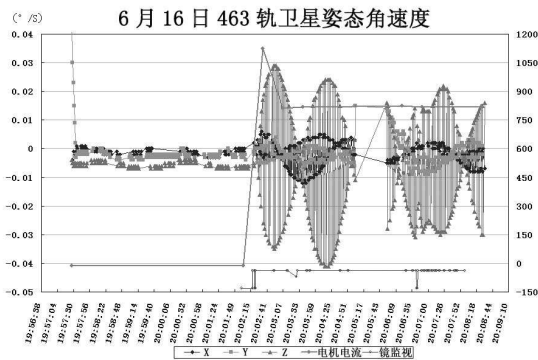


图1 水色仪开机时的卫星姿态

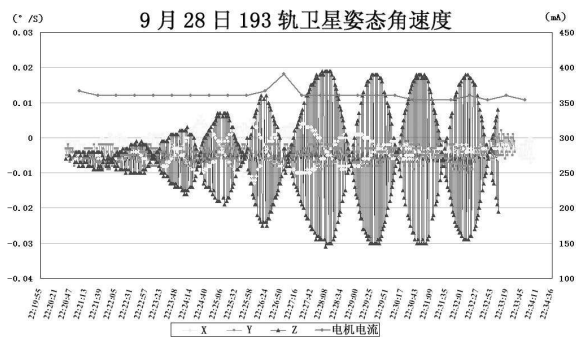


图2 水色仪正常工作时的卫星姿态

### 3 水色仪步进电机的角速度振动试验

卫星环境的振动对步进电机而言,等效为在定子上施加一定频率的角速度振动。为了研究步进转动机构受角振动影响的特性,我们专门设计制作了两种模拟试验装置:一种由振动台通过连杆带动试验转台,对转台的转动机构施加角振动,通过改变振动台的量级和频率形成不同振动量级的角振动扫频(见图3)。另一种是直接试验转台的力臂上安装一台带有偏心负载的直流电机,通过改变偏心负载位置和重量对试验转台产生不同量级的激振,并通过调整直流电机转速改变振动频率,从而对转动机构施加微角振动扫频(见图4)。采用第一种装置进行的角振动试验的结果(见图5)表明,水色仪步进电机的特征谐振频率为26Hz左右,与驱动频率无关。在特征频率点附近,电机工作电流明显增大,在26Hz的特征点上达到最大值,呈共振状态。此电流峰值随着激振量级的增大而变大。而当激振频率远离此谐振频率时,电机电流无明显变化,与激振量级关系不大。特征谐振频率值随振动量级的变化略有改变。改用激励电机带动偏心块旋转来激励活动基座产生角振动,以进一步减小基座的角振动量级。结果表明,在轻微角振动的环境下,同样存在共振特征。在共振点处,电机电流有明显的峰值。试验结果如图6所示。

### 4 步进电机振荡机理的分析

步进谐振一直是步进电机最显著的特点之一,在物理上表现为电机转速的波动(一般称为振荡或抖动等),单步运行时甚至会导致位移上的前后振动,直接威胁着步进电机的转速稳定性。步进电机存在以下四种振荡模式。

#### 4.1 低频共振

电机低频运行时,转子有充足的时间围绕定子稳定平衡位置进行振荡,如同弹性体一样。在特殊情况下,如果输入脉冲频率等于电机的自然频率,电机就会产生共振,转子振幅就会越来越大直至失步。低频振荡频率为

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{Z_r \times M_k \times 10^3}{J}} \text{ 步数/s} \quad (1)$$

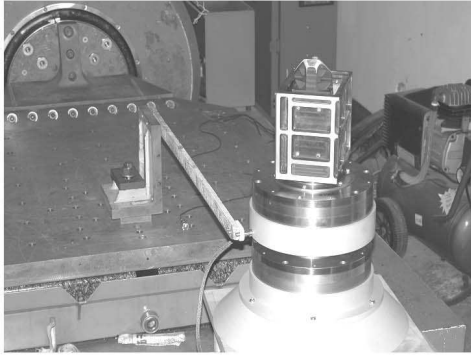


图 3 角速度振动试验装置

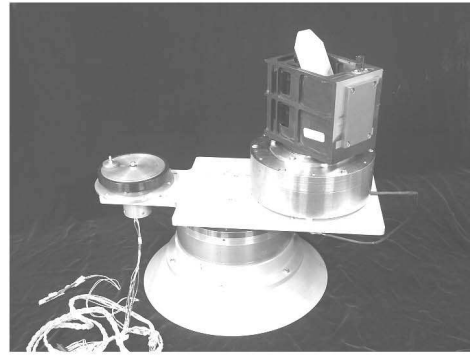


图 4 微角速度振动试验装置

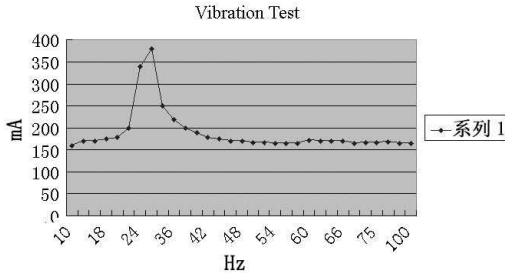


图 5 角速度振动试验结果

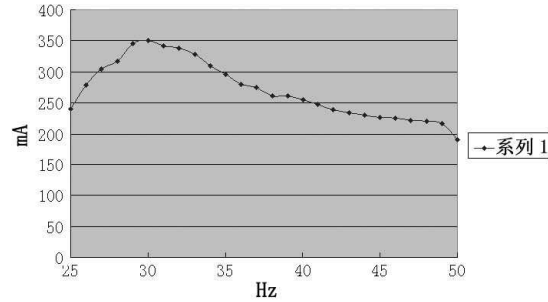


图 6 微角速度振动试验结果

式中,  $Z_r$  为转子齿数,  $M_k$  为最大保持力矩,  $J$  为转子与负载惯量之和。

#### 4.2 高频振荡

高频是指外加脉冲频率  $f > 4f_0$  的频段。步进电机在较高频率运行时, 有时也会明显地表现出振荡现象。此时, 电机电流摆动、转子转动会不均匀, 甚至失步直至停转。但是, 在脉冲频率快速越过这一频段达到更高频率时, 电机又能稳定运行。产生这种振荡的机理不同于低频共振。它是由电机内部电磁阻尼转矩的特性引起的。高频振荡频率为

$$f_k = \frac{m_1}{2\pi} \times T = \frac{1}{\theta} \times T = 204.6\text{pps} \quad (2)$$

式中,  $m_1$  为电机运行拍数,  $T$  为绕组时间常数,  $L$  为绕组电感,  $R$  为绕组电阻。

#### 4.3 电机与安装基座的共振

步进电机在振动基座上通电运行时, 如果基座振频与电机的高频振动频率合拍, 则可能引起电机振荡, 表现为电机输入电流明显上升。随着振幅的加大, 电机会出现异常。其共振频率即为按照每相绕组通电周期计算的最大电磁阻尼

转矩对应运行频率:

$$f'_k = \frac{f_k}{mi} \quad (3)$$

#### 4.4 由电机径向电磁吸力引起的振动

由于电机定子、转子均是壳体结构, 在径向电磁吸力作用下会产生压缩、扩张振动。

径向磁吸力基波频率为

$$f''_k = \frac{n \times N_r}{60} \quad (4)$$

通过分析水色仪步进电机振荡频率可知, 自然振荡频率  $f_0 = 1.3\text{pps}$ , 远小于电机运行频率  $600\text{pps}$ , 不会出现低频共振。高频振荡频率  $f_k = 204.6\text{pps}$ , 远小于  $600\text{pps}$ , 因此也不会出现高频共振; 与安装基座的共振频率为

$$f_k = \frac{204.6\text{pps}}{m_1} = \frac{204.6}{8} = 25.575\text{Hz} \quad (5)$$

这与振动台  $26\text{Hz}$  的振频相当接近, 而由电机径向电磁吸力引起的振动频率  $f''_k = 75\text{Hz}$ , 该频率接近振动台  $26\text{Hz}$  振频的三倍, 比较合拍。说明电机在振动台  $26\text{Hz}$  强振动的作用下产生了高频振荡。与由径向电磁吸力引起的振动作用迭加, 加剧了步进电机的振动。

### 5 步进电机 + 角速度的振动模型

为了进一步研究步进电机在角速度振动环境下的行为特征, 作者等人通过与哈尔滨工业大学航天学院进行合作<sup>[1]</sup>建立了角速度振动环境下步进电机工作状态的数学模型, 并进行了计算机仿真。图 7 所示为水色仪的 K 镜机构在进行角振动试验时的简化原理图, 其中  $B_1$  是水色仪中步进电机的定子等固定部分, 包括和定子相固接的台体部分,  $B_2$  是水色仪中的电机转子及其上面安装的部件,  $C$  是  $B_1$  加  $B_2$  的总质心,  $C_2$  是  $B_2$  的质心,  $CXYZ$  是惯性参数系,  $X$  与试验台回转轴重合, 坐标系的基矢为  $\vec{e}^T = (\vec{e}_1 \ \vec{e}_2 \ \vec{e}_3)$ ,  $\vec{e}_1$ 、 $\vec{e}_2$ 、 $\vec{e}_3$  分别与  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  轴重合。  $C_2$  也位于  $X$  轴上。将转台的某处设为  $CY$  轴上的  $A$  点, 用激振器使  $A$  点产生沿  $Z$  轴的正弦振动。当振幅不太大时, 可以认为转台将绕  $CX$  轴作正弦角振动。

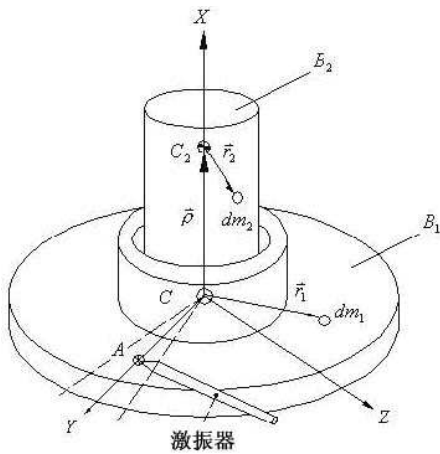


图 7 K 镜机构角振动试验原理图

对于矢量数学模型的分量形式, 设矢量和并矢的分量表达式为

$$J = \vec{e}^T \begin{bmatrix} J_x & & \\ & J_y & \\ & & J_z \end{bmatrix} \vec{e}, \quad J_2 = \vec{e}^T \begin{bmatrix} J_2 & & \\ & J_{2t} & \\ & & J_{2t} \end{bmatrix} \vec{e}, \quad (6)$$

$$\vec{H} = J_2 \vec{\Omega} = \vec{e}^T \begin{bmatrix} J_2 \Omega \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\vec{M} = \vec{e}^T \begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_z \end{bmatrix}, \quad \vec{M}_2^1 = \vec{e}^T \begin{bmatrix} M_{2x}^1 \\ M_{2y}^1 \\ M_{2z}^1 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

$$\vec{M}_2 = \vec{e}^T \begin{bmatrix} M_{2x} \\ M_{2y} \\ M_{2z} \end{bmatrix}$$

$$\vec{\omega} = \vec{e}^T \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix}, \quad \vec{\Omega} = \vec{e}^T \begin{bmatrix} \Omega \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

运用矢量运算法则, 可求得

$$\begin{aligned} J_x \dot{\omega}_x - (J_y - J_z) \omega_y \omega_z + J_2 \dot{\Omega} &= M_x \\ J_y \dot{\omega}_y - (J_z - J_x) \omega_z \omega_x + J_2 \Omega \omega_z &= M_y \\ J_z \dot{\omega}_z - (J_x - J_y) \omega_x \omega_y + J_2 \Omega \omega_y &= M_z \end{aligned} \quad (9)$$

和

$$\begin{aligned} J_2 (\dot{\omega}_x + \dot{\Omega}) &= M_{2x}^1 + M_{2x} \\ J_{2t} \dot{\omega}_y - (J_{2t} - J_2) \omega_z \omega_x + J_2 \Omega \omega_z &= M_{2y}^1 + M_{2y} \\ J_{2t} \dot{\omega}_z + (J_{2t} - J_2) \omega_x \omega_y - J_2 \Omega \omega_y &= M_{2z}^1 + M_{2z} \end{aligned} \quad (10)$$

我们所要研究的是绕  $X$  轴的运动, 只取式 (9) 和式 (10) 的第一式, 就是我们需要用的数学模型, 而且认为  $Y$  轴和  $Z$  轴方向无运动 ( $\omega_y = \omega_z = 0$ ), 于是有

$$\begin{aligned} J_x \dot{\omega}_x + J_2 \dot{\Omega} &= M_x \\ J_2 \dot{\omega}_x + J_2 \dot{\Omega} &= M_{2x}^1 + M_{2x} \end{aligned} \quad (11)$$

式中,  $M_{2x}^1$  和  $M_{2x}$  分别为电动机定子作用于转子的驱动力矩和阻尼力矩,  $M_x$  为激振器作用于试验台的力矩和试验台的阻尼力矩,  $J_x$  为试验台 (包括水色仪) 绕振动轴的转动惯量,  $J_2$  为电动机转子的转动惯量,  $\ddot{\theta}$  为电动机转子角加速度,  $\ddot{\beta}$  为转台角加速度。

如令  $X_1 = \theta$ ,  $X_2 = \dot{\theta} = \Omega$ ,  $X_3 = \beta$ ,  $X_4 = \dot{\beta} = \omega_x$ ,  $X_5 = i_1$ ,  $X_6 = i_2$ ,  $X_7 = i_3$ ,  $X_8 = i_4$ , 则式 (11) 可写为

$$\begin{bmatrix} J_2 & J_2 \\ J_2 & J_x \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta} \\ \ddot{\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{2x}^1 + M_{2x} \\ M_x \end{bmatrix} \quad (12)$$

或

$$\begin{bmatrix} \ddot{\theta} \\ \ddot{\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{J_2 J_x - J_2^2} \begin{bmatrix} J_x (M_{2x}^1 + M_{2x}) - J_2 M_x \\ -J_2 (M_{2x}^1 + M_{2x}) + J_2 M_x \end{bmatrix} \quad (13)$$

再应用步进电机电流表达式, 可获得步进电机 + 角速度振动数学模型的状态方程式:

$$\begin{cases} \dot{X}_1 = X_2 \\ \dot{X}_2 = a(M_{2x1}^1 - M_{2x}) - a_2 M_x \\ \dot{X}_3 = X_4 \\ \dot{X}_4 = -a_1(M_{2x}^1 + M_{2x}) + a_2 M_x \\ \dot{X}_5 = [u_1 - RX_5 - k_t X_2 \sin(nX_1)]/L \\ \dot{X}_6 = [u_2 - RX_6 - k_t X_2 \sin(nX_1 - \pi/2)]/L \\ \dot{X}_7 = [u_3 - RX_7 - k_t X_2 \sin(nX_1 - \pi)]/L \\ \dot{X}_8 = [u_4 - RX_8 - k_t X_2 \sin(nX_1 - 3\pi/2)]/L \end{cases} \quad (14)$$

而

$$M_{2x}^1 = -k_t \sum_{j=1}^4 X_{j+4} \sin \left[ nX_1 - (j-1) \frac{\pi}{2} \right] \quad (15)$$

$$M_{2x} = -dX_2 \quad (16)$$

$$M_x = -b_1 \sin(\omega_x^* t) - b_2 X_3 - d_1 X_4 \quad (17)$$

$$\begin{cases} a_1 = \frac{J_x}{J_2 J_x - J_2^2}, & a_2 = \frac{J_2}{J_2 J_x - J_2^2} \\ b_1 = \frac{J_x \omega_x^{*2} \Delta}{r_a}, & b_2 = J_x \omega_x^{*2} \end{cases} \quad (18)$$

式中,  $\Delta$  为线性振动的幅值,  $r_a$  为激振点半径,  $\omega_x^*$  为激振器频率,  $k_t$  为力矩系数,  $u_j$  为第  $j$  相的驱动电压,  $R$  为定子绕组的内阻,  $L$  为定子绕组的电感,  $n$  为转子齿数。

### 6 角速度振动仿真

仿真的目的是考察振动环境对步进电机工作状态的影响, 并研究参数改变的作用。图 8 所示为电机正常运行状态的仿真结果, 每幅图由 5 幅小图组成, 自上而下分别是转子转角  $\theta(rad)$  与时间  $t(s)$  的关系、转子角速度  $\dot{\theta}(1/s)$  与时间  $t(s)$  的关系、环境系统转角  $\beta(rad)$  与时间  $t(s)$  的关系、环境系统速度  $\dot{\beta}(1/s)$  与转角  $\beta(rad)$  构成的相轨迹图、四相电流  $i_j(A)$ 、( $j = 1, 2, 3, 4$ ) 与时间  $t(s)$  的关系。以下通过改变电机各设计参数和环境振动参数, 对电机不同条件下的运行状态进行仿真分析。

参数的改变主要包括: 阻尼系数、转动惯量、力矩系数、节拍频率、激振频率、激振幅度、摩擦力矩、帆板自振频率、转子阻尼、卫星姿态

控制比例系数。以下各图是在每种参数变化组中选取的有代表性的仿真结果图, 它们反映了不同参数变化对电机状态的影响。

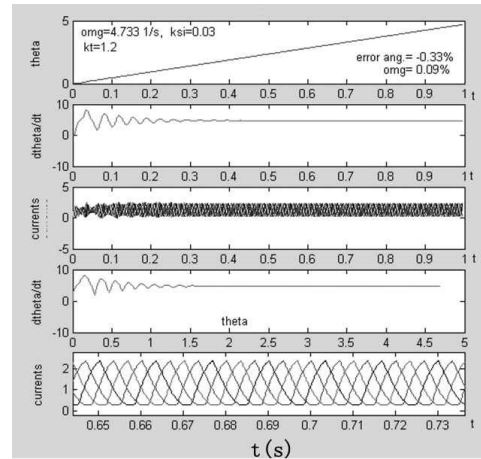


图 8 电机的正常运行状态

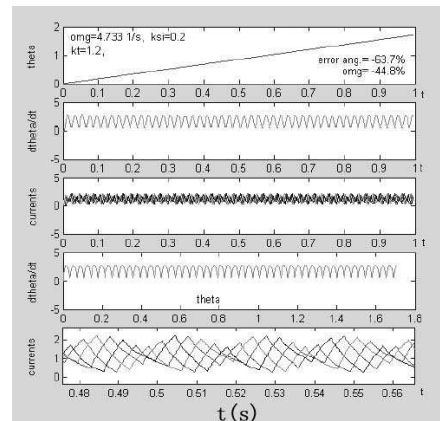


图 9 阻尼系统的影响

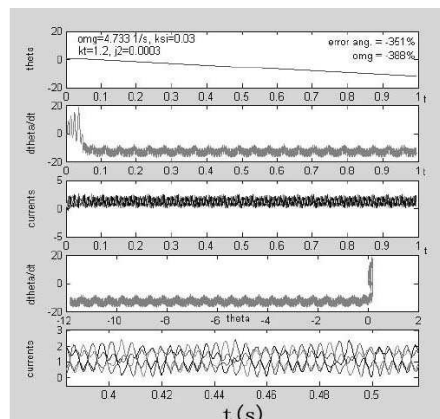


图 10 转动惯量的影响

图 9 至图 12 反映步进电机在无外界扰动情况下通过改变自身设计参数产生的变化。仿真

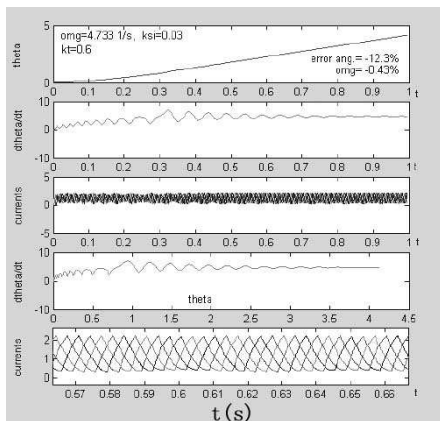


图 11 力矩系数的影响

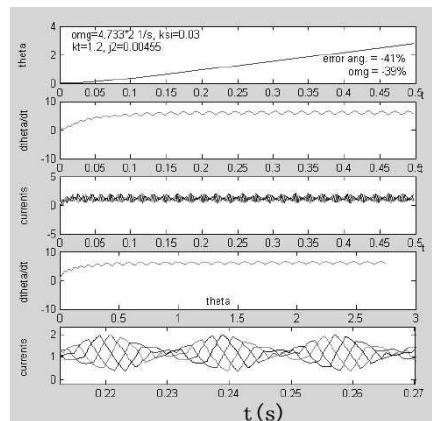


图 12 节拍频率的影响

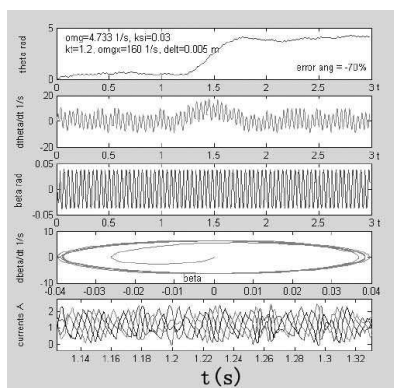


图 13 激振频率的影响

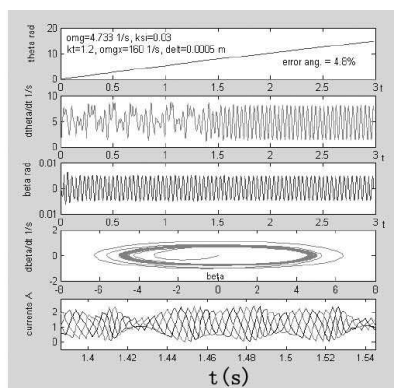


图 14 激振幅度的影响

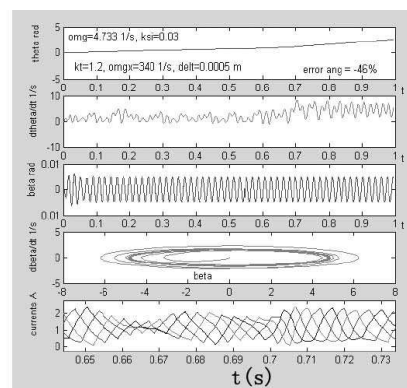


图 15 摩擦系数的影响

结果表明, 如果阻尼系数过小或过大, 电机不能正常运行; 如果转动惯量过小或过大, 电机不能正常运行; 如果力矩系数过小, 或节拍频率过高, 电机也不能正常运行。

图 13 至图 15 反映步进电机在受外界角速度振动条件下通过改变振动条件产生的变化。仿真结果表明, 给定 5mm 振幅, 激振频率无论如何变化, 电机均不能正常工作, 而减小振幅, 电机受影响程度也会减小。在激振频率较高时, 摩擦系数的增大也可导致电机运行不正常。

## 7 结论

通过上述分析可知, 步进电机驱动的转动机构对环境的振动比较敏感, 这是因为电机的驱动力矩与转子和定子的相对位置有关。很小

一点角度差就能改变力矩的大小和方向, 振动虽然施加在步进电动机的定子上, 但改变定转子之间的角度差, 会对系统产生有害影响。在相同的外界环境条件下, 阻尼系数、转动惯量、力矩系数、节拍频率、摩擦力矩等参数的改变, 都会对步进电机的运行状态产生很大的影响。因此设计用于空间的步进电机时, 应在抗外界扰动方面对电机各设计参数进行优化, 以避免电机固有谐振频率与系统的某低阶自振频率过于接近, 从而避免步进电机因耦合振动而使工作状态变差。

## 参考文献

- [1] 刘曦. “神舟”号飞船帆板驱动系统堵转校核 [J]. 空间科学学报, 2002, 22(10月 第 22 卷 增刊 2)。