

# 双机驱动振动系统的控制研究与仿真分析

王得刚,赵春雨,林君哲,闻邦椿

WANG De-gang,ZHAO Chun-yu,LIN Jun-zhe,WEN Bang-chun

东北大学 机械工程与自动化学院,沈阳 110004

School of Mechanical Engineering and Automation,Northeastern University,Shenyang 110004,China

E-mail:wangdg@126.com

WANG De-gang,ZHAO Chun-yu,LIN Jun-zhe,et al.Control study and simulation analysis of vibration system driven by two motors.Computer Engineering and Applications,2010,46(6):238-240.

**Abstract:** Synchronization problem is the key of system driven by two or more motors.The dynamic model of vibration system driven by two motors and the mathematics model of induction motor are established.The dynamic characteristic of vibration system is analyzed by using dynamic theory,and the conditions of realizing frequency capture and the scheme to control phase difference of the two eccentric rotors are obtained.The computer simulation program in self-synchronous condition and that based on phase difference control of realizing frequency capture's conditions are run,and results of computer simulations show that the vibration system can realize speed synchronization and phase synchronization rapidly after has been controlled.The simulation results verify the effectiveness of the control scheme.

**Key words:** vibration system;dynamic analysis;frequency capture;control;simulation

**摘 要:** 同步问题是多机驱动系统需要解决的核心问题。通过建立双机驱动振动系统的动力学模型和感应电机的数学模型,运用动力学理论分析了振动系统的动力学特性,得到了系统实现频率俘获的条件和对两个两偏心转子相位差进行控制的策略。分别运行自同步条件下的仿真程序和基于振动系统频率俘获条件的相位差控制仿真程序,计算机仿真结果表明对振动系统施加控制后,该系统能够快速实现速度同步和相位同步,验证了控制策略的有效性。

**关键词:** 振动系统;动力学分析;频率俘获;控制;仿真

DOI:10.3778/j.issn.1002-8331.2010.06.069 文章编号:1002-8331(2010)06-0238-03 文献标识码:A 中图分类号:TH113;TP391.9

## 1 引言

由两台感应电动机分别驱动的同向回转振动机在工业部门中广泛使用并推广,如自同步式振动给料机、自同步概率筛和自同步振动成型机等<sup>[1-2]</sup>。

随着工业的快速发展,人们对各种机械设备的性能和产品质量的要求逐渐提高,单单针对一台电机的控制在某些场合已经不能满足现代化高科技发展的要求,而需要人们控制多台电机,使其更好地协调运行。

在一定系统参数条件下,带偏心块的电机转子的转速由零起动到振动系统的固有频率附近时,转子转速会被系统的固有频率“俘获”,以近似等于固有频率的转频旋转,而不再继续上升到额定转速,这种电机转子转频被振动机械的固有频率所俘获的现象即回转频率俘获。通过动力学分析研究系统频率俘获条件,进而研究多机传动机械系统同步的理论和办法,对保证机械同步运行、实现产品的优化设计,从而使这类机械有效、可靠、稳定地运转,都有着非常重要的现实意义<sup>[3-5]</sup>。

## 2 双机驱动振动系统的数学模型

### 2.1 振动系统的动力学模型

由两个异步感应电动机分别驱动的同向回转振动系统的动力学模型如图1所示。两电机在图中用两偏心块表示。电机

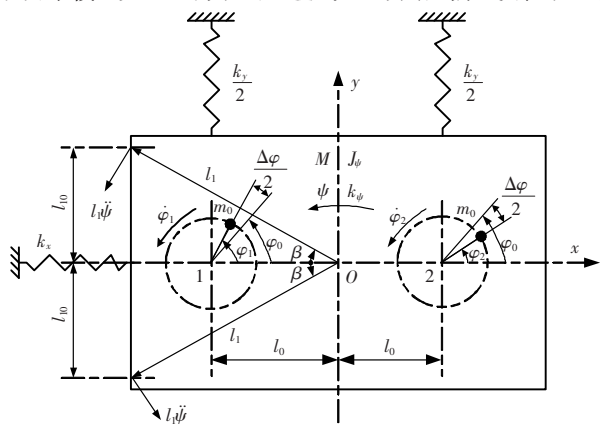


图1 振动系统的动力学模型

基金项目:国家自然科学基金(the National Natural Science Foundation of China under Grant No.50535010)。

作者简介:王得刚(1975-),男,博士研究生,主要研究方向:现代机械动态优化设计和智能优化设计;赵春雨(1963-),男,副教授,主要研究方向:机械系统动力学及控制;林君哲(1978-),博士研究生,主要研究方向:机电液一体化设计;闻邦椿(1930-),男,教授,中国科学院院士,主要研究方向:机械动力学、非线性振动理论与应用、机械系统故障诊断、机械系统控制理论。

收稿日期:2008-09-19

修回日期:2008-12-02

旋转时,偏心块产生的激振力带动振动机机体振动。振动机发生的运动为水平方向  $x$ , 竖直方向  $y$  和扭摆方向  $\psi$  的振动。

选择机体运动坐标  $x, y, \psi$  和两偏心转子的旋转相位  $\varphi_1, \varphi_2$  为广义坐标, 求出系统动能、势能及能量散逸函数, 代入拉格朗日方程可得系统的运动方程如式(1)所示<sup>[6-7]</sup>

$$\begin{cases} M\ddot{x} + f_x\dot{x} + k_x x = \sum_{i=1}^2 m_0 r (\ddot{\varphi}_i \cos \varphi_i - \dot{\varphi}_i \sin \varphi_i) \\ M\ddot{y} + f_y\dot{y} + k_y y = \sum_{i=1}^2 m_0 r (\ddot{\varphi}_i \sin \varphi_i + \dot{\varphi}_i \cos \varphi_i) \\ J\ddot{\psi} + f_\psi\dot{\psi} + k_\psi \psi = -mrl_0(\ddot{\varphi}_1 \sin \varphi_1 - \dot{\varphi}_1 \cos \varphi_1) + \\ \quad mrl_0(\ddot{\varphi}_2 \sin \varphi_2 - \dot{\varphi}_2 \cos \varphi_2) \\ J_0 \ddot{\varphi}_1 + f_1 \dot{\varphi}_1 = T_{e1} - m_0 r (\ddot{y} \cos \varphi_1 - \ddot{x} \sin \varphi_1 - l_0 \ddot{\psi} \cos \varphi) \\ J_0 \ddot{\varphi}_2 + f_2 \dot{\varphi}_2 = T_{e2} - m_0 r (\ddot{y} \cos \varphi_2 - \ddot{x} \sin \varphi_2 + l_0 \ddot{\psi} \cos \varphi_2) \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $M$  为振动系统(包括电机与偏心块)的质量;  $m_0$  为偏心块 1 和 2 的质量;  $J$  为振动系统(包括电机与偏心块)的转动惯量;  $J_0$  为偏心块对振动机体质心的转动惯量;  $k_x, k_y, k_\psi$  分别为  $x, y, \psi$  方向上的弹簧刚度;  $f_x, f_y, f_\psi$  分别为振动系统在  $x, y$  和  $\psi$  方向的阻力系数;  $r$  为偏心块的偏心距离;  $x, y, \psi$  分别为水平方向、垂直方向和扭摆振动位移;  $\varphi_1, \varphi_2$  分别为轴 1 和轴 2 偏心块的角位移;  $l_0$  为两偏心块安装位置到机体质心的距离;  $T_{e1}, T_{e2}$  分别为电动机 1 和 2 的电磁转矩;  $f_1, f_2$  分别为电动机 1 和 2 的轴系摩擦系数。

### 2.2 感应电机的数学模型

定子电压为输入量, 则感应电动机在转子同步坐标系( $d$ - $q$ )下的状态方程为<sup>[6,8-9]</sup>:

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_s \\ \dot{\lambda}_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s \\ \lambda_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_1 \\ 0 \end{bmatrix} v_s \quad (2)$$

式中,  $i_s = [i_{ds}, i_{qs}]^T$ , 电机的定子电流;  $\lambda_r = [\lambda_{dr}, \lambda_{qr}]^T$ , 电机的转子磁链;  $v_s = [v_{ds}, v_{qs}]^T$ , 表示电机的输入电压;

$$\begin{aligned} A_{11} &= -[R_s/\sigma L_s + R_r(1-\sigma)/\sigma L_r]I - \omega_e J \\ A_{12} &= -[L_m R_r/\sigma L_s L_r]I - [\omega_e L_m/\sigma L_s L_r]J \\ A_{21} &= (L_m R_r/L_r)I \quad A_{22} = -(R_r/L_r)I - (\omega_e - \omega_r)J \\ B_1 &= I/\sigma L_s; I = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, J = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

式中,  $R_s, R_r$  分别为电机的定子和转子电阻;  $L_s, L_r$  分别为电机的定子和转子自感系数;  $L_m$  为电机的定转子互感;  $\sigma$  为漏感系数;  $\omega_e$  为电机转动的角速度;  $\omega_e$  为电机的同步角速度;  $v_s, i_s$  分别为  $d$ - $q$  坐标下的电压和电流;  $\lambda_r$  为  $d$ - $q$  坐标下转子磁通。

感应电动机的电磁转矩用定子电流和转子磁通表示为:

$$T_e = n_p \frac{L_m}{L_r} (i_{qs} \lambda_{dr} - i_{ds} \lambda_{qr}) \quad (3)$$

式中,  $n_p$  为感应电动机的极对数。

式(1)中  $\omega_{r1}, \omega_{r2}$  和  $\varphi_1, \varphi_2$  之间的关系如式(4)所示<sup>[10]</sup>:

$$\begin{aligned} \omega_{r1} &= n_p \dot{\varphi}_1 \\ \omega_{r2} &= n_p \dot{\varphi}_2 \end{aligned} \quad (4)$$

### 3 振动系统实现频率俘获的条件

回转频率俘获是指振动系统起动过程中通过共振区时,电

机转子的转速达不到额定转速,而被束缚在固有频率附近的稳态振动现象<sup>[11]</sup>。因此,系统实现频率俘获的两个条件如式(5)和式(6)所示<sup>[12-15]</sup>:

$$(T_{e1} + T_{e2}) - 2a_f - (f_1 + f_2)\omega_{m0} = 0 \quad (5)$$

$$(T_{e1} - f_1\omega_{m0}) - (T_{e2} - f_2\omega_{m0}) = 2a_a \quad (6)$$

式中,  $a_f$  为每个电动机上由于系统阻尼作用而产生的阻力矩;  $\omega_{m0}$  为两个偏心转子在单周期内的平均速度;  $a_a$  为系统惯性施加在每个偏心转子上的调节力矩。

在式(5)中,第一项为两个电动机驱动力矩之和,第二项  $2a_f$  是由于系统阻尼作用而分别施加在两个电动机上的阻力矩;第三项为由于电动机轴系摩擦产生的阻力矩。因此,式(5)即为系统实现频率俘获时振动机单周期的力矩平衡方程式。

在式(6)中,等式左边第一项是电动机 1 的电磁转矩与其轴系阻力矩的差值,这个差值即电动机 1 的实际输出转矩,第二项是电动机 2 的实际输出转矩,等式右边是由于系统惯性附加在两个偏心转子上的调节力矩。

根据文献[15],调节力矩的大小与  $\sin 2\alpha$  成正比,其关系式如式(7)所示:

$$2a_a = m_0^2 r^2 \omega_{m0}^2 W \sin 2\alpha \quad (7)$$

在此可以将  $2a_a$  的系数定义为

$$T_{Capture} = m_0^2 r^2 \omega_{m0}^2 W \quad (8)$$

$T_{Capture}$  称为系统频率俘获力矩。

$$\text{即 } T_{Capture} \sin 2\alpha = 2a_a \quad (9)$$

把两个电动机实际输出转矩差值的绝对值定义为  $T_{diff}$  如式(10)所示:

$$T_{diff} = |(T_{e1} - f_1\omega_{m0}) - (T_{e2} - f_2\omega_{m0})| = |(\Delta T_e - \Delta T_l)| \quad (10)$$

式中,  $\Delta T_e = T_{e1} - T_{e2}$ ;  $\Delta T_l = (f_1 - f_2)\omega_{m0}$ 。

因为  $|\sin 2\alpha| \leq 1$ , 因此由式(6)、式(9)和式(10)可以得到实现两个电机同步运转的频率俘获条件为:

$$T_{Capture} > T_{Diff} \quad (11)$$

即系统频率俘获力矩大于两个电动机实际输出转矩差值的绝对值。

由式(10)和式(11)可见,当两个电动机参数越相近,  $|\Delta T_e - \Delta T_l|$  越小,同步条件越容易满足。而当电动机参数差异较大时,会出现系统频率俘获力矩小于或接近于  $|\Delta T_e - \Delta T_l|$  情况。当  $T_{Capture} < T_{Diff}$  时,系统不可能实现频率俘获而达到两电动机同步运行;当  $T_{Capture} \approx T_{Diff}$  时,系统为弱同步;当  $T_{Capture} \gg T_{Diff}$  时,系统为强同步。以上结论与文献[16]中的结果相同。

分析振动系统实现频率俘获的条件,发现在振动系统的运行过程中,由于振动机体的圆周运动而产生的惯性力和由于振动机体的摇摆运动产生的惯性力都会改变两个电机的负载转矩,从而影响振动系统的同步状态。

在频率俘获过程中,振动系统对相位超前的偏心转子施加阻力矩,对相位滞后的偏心转子施加驱动力矩。由此可见,振动系统通过调节两偏心转子的相位差,进而调节施加在两电动机的负载转矩来实现系统频率俘获。

### 4 基于振动系统频率俘获条件的相位差控制

#### 4.1 控制策略分析

根据上文对振动系统实现频率俘获条件的动力学分析,为

为了使振动系统更好、更快地实现速度同步和相位同步,可以考虑对振动系统施加一个控制系统,加快调节振动系统两偏心转子的相位差,进而加快调节电动机的负载转矩来实现系统频率俘获,从而迅速实现速度控制同步和相位控制同步。

目前,工业过程中的控制方法主要有:以古典控制理论为主要基础的PID控制方法,以现代控制理论为主要基础的自适应控制和预测控制等方法以及神经网络控制、模糊控制等智能控制方法。PID控制是Proportional(比例)、Integral(积分)、Differential(微分)三者的缩写,是连续系统中技术最为成熟、行之有效、应用最为广泛的一种调节方式。

在多机传动的机械系统中,采用PID调节器对系统进行控制存在超调现象<sup>[6]</sup>,而PI调节器能够很好地满足控制要求,因此采用PI调节器对自同步振动机进行控制仿真分析。

具体实现多机同步的控制方案有两种:一是对等控制方式,二是主从控制方式。在主从控制方式中主动电机以用户给出的速度和位置作为参考值,在运行过程中紧密地跟踪系统的给定值,而从动电机以主动电机的速度和位置的输出作为参考值,在运行过程中紧密地跟踪主动电机。这样,在运行过程中,两台电机并不是分别跟踪系统的给定值,而是由从动电机跟踪主动电机,使得系统的同步精度大为提高。

在双机驱动同向回转振动系统中,由于振动机体的圆周运动而产生的惯性力和由于振动机体的摇摆运动产生的惯性力都会影响两个偏心转子相位差的变化,而偏心转子的相位差也可以及时准确地反映系统的同步状态。因此,可以考虑把两个偏心转子的相位差作为反馈信号,通过闭环控制系统中PI控制器的调节作用来实现两个电机的相位同步。

把电机1定义为主动电机,由电源电路供电,电机2定义为从动电机,由变频器供电,控制偏心转子2跟踪偏心转子1的相位。控制系统中使用一个PI控制器来调节变频器的频率。基于偏心转子1和2相位差的控制系统框图如图2所示。

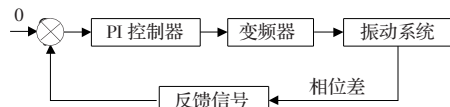


图2 基于相位差的控制系统框图

### 4.2 计算机仿真分析与结果讨论

根据振动系统的动力学模型和感应电机的数学模型,以及基于振动系统频率俘获条件进行相位差控制的原理,建立控制系统的仿真程序。

系统启动时对主动电机施加10 Nm的转矩,在自同步条件下,运行未对振动系统施加控制的仿真程序,得到两个电机的转速差和相位差如图3和图4所示。

从图3和图4可以看出:系统启动0.2秒后基本达到稳定状态,但转速差还存在一定的波动,相位差约为-8°且存在一定

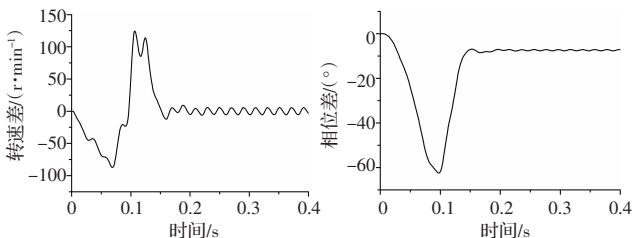


图3 自同步条件下两个电机的转速差

图4 自同步条件下两个电机的相位差

的波动。仿真结果表明:在自同步条件下,振动系统未能达到稳定的同步状态。

系统启动时对主动电机施加大小为10 Nm的转矩,运行对振动系统施加控制的仿真程序,得到图5和图6的仿真结果。

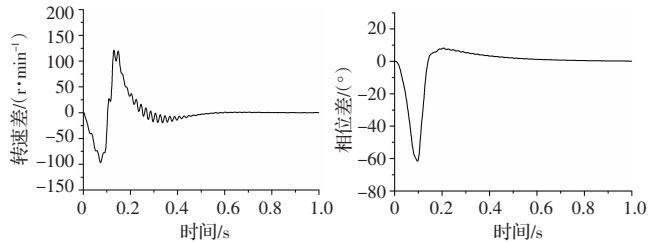


图5 控制条件下两个电机的转速差

图6 控制条件下两个电机的相位差

从图5和图6可以看出,运行基于相位差控制的仿真程序,系统在0.8秒时达到稳定状态,转速差和相位差没有波动且数值为0。仿真结果表明:振动系统在基于相位差控制的调节作用下,系统的速度和相位能够快速达到稳定的同步状态,验证了控制方案的有效性。

### 5 结论

建立了同向回转双机驱动振动系统的动力学模型,经过对振动系统的动力学分析,得到了实现频率俘获的条件,并在此基础上得到了基于振动系统频率俘获条件的相位差的控制策略。

计算机仿真结果表明振动系统在基于频率俘获条件进行相位差控制的作用下,实现了速度控制同步和相位控制同步,取得了良好的控制效果。

提出的对振动系统进行同步控制从而实现优化设计的方法具有广泛的理论意义和工程实用价值,为把理论研究推向实际应用打下了良好的基础。

### 参考文献:

- [1] 闻邦椿,李以农,张义民,等.振动利用工程[M].北京:科学出版社,2005.
- [2] 闻邦椿,刘树英,何勃.振动机械的理论与动态设计方法[M].北京:机械工业出版社,2001.
- [3] Blekhman I I. Synchronization in science and technology [M]. New York: ASME Press, 1988.
- [4] 闻邦椿,赵春雨,苏东海,等.机械系统的振动同步与控制同步[M].北京:科学出版社,2003.
- [5] 熊万里,陆名彰,闻邦椿.一类非理想振动系统的回转频率俘获特性[J].湖南大学学报:自然科学版,2003,30(3):44-48.
- [6] 赵春雨,朱洪涛,闻邦椿.多机传动机械系统的同步控制[J].控制理论与应用,1999,16(2):179-183.
- [7] Zhang T X, Wen B C, Fan J. Study on synchronization of two eccentric rotors driven by hydraulic motors in one vibrating systems[J]. Shock and Vibration, 1997, 4(5/6): 305-310.
- [8] Lee D C, Su S K, Parkl M H. High performance current regulator for a field-oriented control induction motor drive[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1994, 30: 1247-1257.
- [9] Salvaio L, Stasi S, Tarchioni L. A new EKF-algorithm for flux estimation in induction machines[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1993, 40(5): 496-501.