

双机振动系统的自同步过程分析与试验研究

陈晓哲, 孔祥希, 窦景欣, 闻邦椿
(东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘 要: 以双机反向回转驱动振动系统为研究对象, 将两电机的转速与激振器间的相位差作为指标对双机驱动振动系统的自同步过程进行分析与试验研究. 通过对比相位差的变化发现电机部分对自同步过程的影响最为重要, 其次是激振器部分, 最后为振动体部分. 仿真与试验结果表明: 两激振器的初始相位差和两电机的初始转速对实现双机的自同步运动几乎没有影响; 在满足同步性条件时, 不同供电频率的两电机可以实现同步; 当两激振器质量不同时, 质量大的激振器相位落后质量小的激振器; 当两激振器回转中心至机体质心距离不等时, 距离大的激振器相位落后距离小的激振器; 可通过调节电机供电频率来减小由电机参数、激振器质量及电机安装位置等内部扰动导致的相位差, 使双机实现同步运动.

关 键 词: 振动系统; 自同步过程; 相位差; 同步; 激振器

中图分类号: TH 113.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2017)01-0076-05

Self-Synchronous Process Analysis and Experiment Investigation of Vibration System Driven by Two Motors

CHEN Xiao-zhe, KONG Xiang-xi, DOU Jing-xin, WEN Bang-chun
(School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China.
Corresponding author: CHEN Xiao-zhe, E-mail: xzchen1986@163.com)

Abstract: The self-synchronous process of a vibration system driven by two exciters rotating oppositely was investigated by simulation and experiment. The rotational velocities of the two motors and phase differences between the two exciters were chosen as indexes to represent for the self-synchronous process. By comparing the changes of the phase difference, the most important influence factor of the phase difference is motor, and the second is exciter, while the last one is the vibration rigid. The simulation and experimental results show that the initial phase difference between the two exciters and the initial velocities of the two motors have no effect on the self-synchronization. When the synchronous condition is satisfied, the two motors can achieve synchronous motion with different power supply frequencies. When change the masses of the two exciters, the phase of the bigger mass lags behind the smaller one. When the distances between the rotary centers of the two exciters and the mass center of the vibration rigid body are different, the phase of the bigger distance lags behind the smaller one. The phase difference can be reduced by adjusting the power supply frequency, which are caused by motor parameters, the mass of exciters, and the motor installation position and so on.

Key words: vibration system; self-synchronous process; phase difference; synchronization; exciter

同步现象普遍地存在自然界和人类生活中^[1-2]. 在1953年, Blekhman^[3]首先提出了双机驱动振动机的同步理论. 我国学者闻邦椿^[1-2]将

同步理论应用到工程中, 并且创建了振动利用工程这一学科. 目前同步理论的研究方法主要有两种, 分别为直接运动分离法^[3-5]和小参数平均

法^[6-11].

振动系统的同步实质上是机电耦合的过程, 振动系统的运动状态很大程度上取决于电机参数和振动系统结构参数^[6-11]. 现有文献对同步过程分析是基于理想状态下, 部分文献仅对激振器(偏心转子)质量矩不同时的同步力矩和稳定性作了分析, 而对相位差的变化并未讨论^[10-11]. 系统的相位差决定机器的运动轨迹, 是工程上最重要的考核指标. 为了更好地研究振动同步过程, 进一步阐释和完善系统耦合动力学特性, 本文通过仿真与试验方法从系统参数不对称的角度对振动系统同步过程进行研究.

1 振动系统的动力学模型

图 1 为双机反向回转驱动振动系统的动力学模型, 由振动台 m 以及两激振器 m_1 和 m_2 组成. 弹簧对称地安装在固定架上并支撑着振动台 m , 同时 m_1 和 m_2 对称地安装在振动台 m 左右两侧.

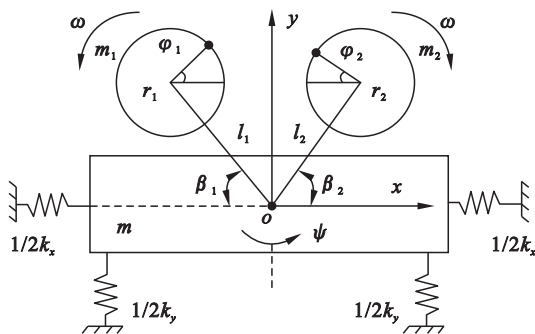


图 1 双机反向回转驱动振动系统的动力学模型

Fig. 1 Dynamic model of the vibration system with two motors rotating in the opposite directions

由动力学模型可知, 振动台可产生 3 个自由度的运动, 分别为水平方向 x 的运动, 竖直方向 y 的运动和绕质心 o 摆动方向 ψ 的运动. 两激振器分别绕电机轴旋转, 需要 2 个角度 φ_1 和 φ_2 来确定位置, 见图 1. 因此, 振动系统有 5 个自由度. 应用拉格朗日方程, 选择 x, y, ψ, φ_1 和 φ_2 作为广义坐标, 得到振动系统的运动方程如下^[6-11]:

$$M\ddot{x} + f_x\dot{x} + k_x x = \sum_{i=1}^2 (-1)^{i-1} m_i r (\dot{\varphi}_i^2 \cos \varphi_i + \ddot{\varphi}_i \sin \varphi_i), \quad (1)$$

$$M\ddot{y} + f_y\dot{y} + k_y y = \sum_{i=1}^2 m_i r (\dot{\varphi}_i^2 \sin \varphi_i - \ddot{\varphi}_i \cos \varphi_i), \quad (2)$$

$$J\ddot{\psi} + f_\psi\dot{\psi} + k_\psi \psi = \sum_{i=1}^2 (-1)^i m_i r l_i [\dot{\varphi}_i^2 \sin(\varphi_i + \beta_i) - \ddot{\varphi}_i \cos(\varphi_i + \beta_i)], \quad (3)$$

$$J_1\ddot{\varphi}_1 + f_1\dot{\varphi}_1 = T_{e1} - m_1 r [\ddot{y} \cos \varphi_1 - \ddot{x} \sin \varphi_1 - l_1 \dot{\psi}^2 \sin(\varphi_1 + \beta_1) - l_1 \ddot{\psi} \cos(\varphi_1 + \beta_1)], \quad (4)$$

$$J_2\ddot{\varphi}_2 + f_2\dot{\varphi}_2 = T_{e2} - m_2 r [\ddot{y} \cos \varphi_2 + \ddot{x} \sin \varphi_2 + l_2 \dot{\psi}^2 \sin(\varphi_2 + \beta_2) + l_2 \ddot{\psi} \cos(\varphi_2 + \beta_2)]. \quad (5)$$

式中: $M = m + m_1 + m_2$ 为振动系统的质量; J 为振动系统的转动惯量; $J_i \approx m_i r^2$ 为激振器的转动惯量; k_j 为弹簧的刚度; f_j 为阻尼系数; T_{ei} 为电机的电磁转矩; f_i 为电机轴的摩擦系数; l_i 为激振器旋转中心与振动台 m 质心之间的距离; β_i 为激振器旋转中心与振动台 m 质心连线与水平方向的夹角; $i = 1, 2, j = x, y, \psi$.

感应电机的电磁转矩公式^[12]为

$$T_e = 2T_{\max} s_m n_N \frac{n_N - n}{s_m^2 n_N^2 + (n_N - n)^2}. \quad (6)$$

式中: n_N 为电机的额定转速; $T_{\max} = K_T T_N$ 为电机的最大转矩; $s_m = s_N (K_T + \sqrt{K_T^2 - 1})$ 为电机的临界转差率; T_N, s_N 和 K_T 分别为电机的额定转矩、额定转差率和过载系数.

2 自同步过程的数值仿真

双机驱动振动系统是由感应电机、电机驱动的激振器(带有偏心块的转子)和振动体三部分共同组成. 首先电机由电源供电并输出转矩和转速, 电机轴带动偏心块作旋转运动; 接着偏心块旋转过程中产生惯性力; 然后惯性力合力作用于振动体上, 振动体产生相应的响应; 由于电机固定在振动体上, 偏心块将随机体一起运动; 最后机体的运动影响偏心块绕电机轴的旋转运动, 体现在电机负载转矩的变化, 同时负载转矩的变化也会导致电机输出转速的变化. 如此反复, 所以振动同步过程是电机不断调整转矩和转速的过程.

研究振动系统的自同步过程实质上是研究两电机的转速和激振器间相位差的变化规律^[6-11]. 如果振动系统的物理参数条件和结构尺寸条件完全对称, 在振动系统运行过程中两电机将一直处于同步状态, 且它们的相位差将一直为 0, 转速和转矩将保持相等, 水平方向和摆动方向的振幅将为 0. 实际上, 电机的参数、电机的安装位置、偏心块的质量等不可能完全一样或对称, 振动系统必然会发生从不同步到同步的过渡过程^[1].

如图 2 所示, 本文采用 Matlab/Simulink 软件对双机反向回转驱动振动系统自同步过程进行数值仿真, 仿真参数见表 1. 图中电机 1 和电机 2 模块是根据电机的电磁转矩公式(6)建立, 激振器 1 和

激振器 2 模块是根据式(4)和式(5)所建立,振动体模块是根据式(1),式(2)和式(3)建立. 根据前面自同步过程的分析,接下来分别研究电机、激振器和振动体三部分对振动系统同步运动的影响.

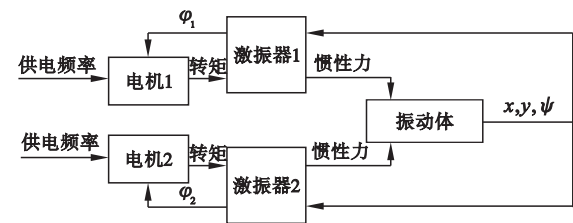


图 2 振动系统的 Matlab/Simulink 仿真模型
Fig. 2 Simulink model of the vibration system

表 1 振动系统仿真参数 Table 1 Parameters of the vibration system		
主要参数	单位	数值
振动系统质量 M	kg	300
振动系统转动惯量 J	$\text{kg} \cdot \text{m}^2$	35
激振器质量($r=0.05\text{ m}$) m	kg	4
方向弹簧刚度 $k_x=k_y$	N/m	154 000
方向弹簧刚度 k_ψ	$\text{N}/(\text{rad} \cdot \text{m}^{-1})$	6 000
方向阻尼系数 $f_x=f_y$	$\text{N}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	540
方向阻尼系数 f_ψ	$\text{N}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	440

2.1 电机参数不同时振动系统的同步过程

由于制造和安装过程中或多或少存在着误差,振动机械所采用的两台电机型号即使相同,其几何和物理参数也不可能绝对相同.

如图 3 所示,初始阶段两电机的供电频率均为 50 Hz,并且电机 2 晚于电机 1 3 s 后启动. 因为电机 1 先行启动,电机 2 停止不动,两激振器间的相位差($2\alpha = \varphi_1 - \varphi_2$)迅速变大,最终相位差 2α 在 $(-180^\circ, 180^\circ)$ 之间振荡. 在 3 s 后电机 2 供电,两电机经过数个周期后,两电机的转速稳定在 996 r/min 左右. 在电机 2 追赶电机 1 的过程中,由于两电机转速差的减小,其相位差也逐步减小,最终两激振器实现零相位差的同步运动. 这证明了初始速度和相位并不影响系统最终状态.

振动同步传动是切断同步运动的两电机中的一台电机的供电电源,两电机由原来的同步状态过渡到新的同步状态^[1]. 在 25 s 时切断电机 2 的供电,由于只有一个电机输入能量,两电机转速快速下降,最终稳定在 992 r/min. 因为振动系统是通过调节相位差来进行能量分配的,其将电机 1 的驱动力矩传递给电机 2 来克服电机 2 的负载力矩,此时相位差增加到 21.5°.

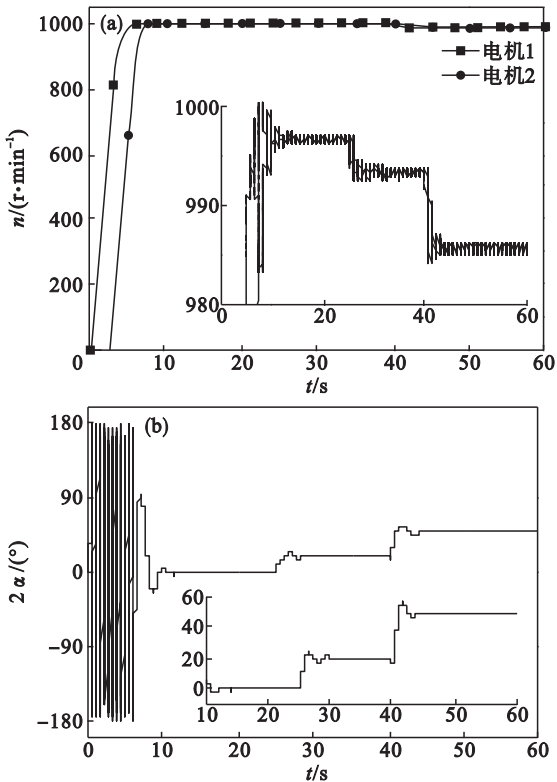


图 3 电机参数不同时的转速与相位差
Fig. 3 Rotational velocity and phase difference of different motor parameters
(a)—两电机的转速;(b)—两激振器间的相位差.

电机物理特性的不同和供电电源的波动及差异均会导致电机稳态转速的变化. 在 40 s 时,电机 2 的电源导通并且将供电频率调成 49 Hz,两电机的转速在 986 r/min 附近稳定运行,此时相位差为 48.7°,小于 90°满足同步条件.

2.2 结构参数不同时振动系统的同步过程

如图 4a 所示,将激振器 1 的质量减小到 40%,则相位差在 40,45 和 50 Hz 供电频率下分别是 14.2°,12.3°和 11.5°. 如图 4b 所示,将 l_1 减少 0.4 m,则相位差在 40,45 和 50 供电频率下分别是 17.6°,16.4°和 15.5°. 从仿真结果可知,激振器质量大的相位落后质量小的相位,激振器回转中心至机体质心距离大的相位落后距离小的相位. 随着供电频率的增加,相位差逐渐减小,这是因为随电机转速的增加激振器产生的惯性力在增加,同步力矩(也称俘获力矩)也在变大^[1]. 质量不同的相位差变化幅度大于距离不同的相位差变化幅度,这是因为激振器质量的变化直接影响其惯性力的变化^[10-11].

2.3 不同供电频率时振动系统的同步过程

由前面三组仿真分析可知,电机参数、安装位置、激振器质量三部分中任一部分或多部分出现不相等或不平衡,两激振器之间的相位差必不为

零. 在实际过程中, 由于制造精度和装配误差等原因难以保证两激振器间的相位差为零. 当出现较小相位差时, 而振动机械的结构因为出厂后无法改动或者激振器难以调节成完全相等的情况, 此时只有调节电机的供电频率较为容易. 可通过调节两电机的供电频率来改变转速进而使相位差趋于零.

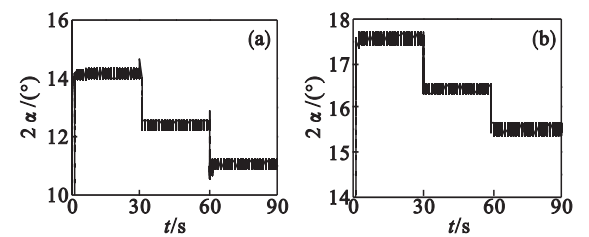


图 4 结构参数不同时的相位差

Fig. 4 Phase difference of different structure parameters

(a) — 两激振器质量不同; (b) — 两电机安装位置不同.

根据 2.1 节电机部分的分析可知, 根据相位差的正负可以判断出两个电机中哪个电机相位超前. 可根据实际情况选择增大相位滞后电机的供电频率或者减小相位超前电机的供电频率. 因为改变供电频率会导致同步转速稳定在新的状态下. 如图 5a 所示, 将 l_2 减少 0.1 m, 系统运行稳定后激振器 1 相位滞后于激振器 2 接近 8.5° . 在 30 s 时, 将电机 1 的供电频率提高 0.25 Hz, 当系统再一次稳定时相位差趋于零. 图 5b 为振动系统水平方向的振幅, 由于相位差的存在, 两激振器所产生的惯性力在水平 x 方向无法抵消进而导致水平方向上机体产生振动. 当 30 s 后相位差趋于零时, 水平方向的振幅也趋于零.

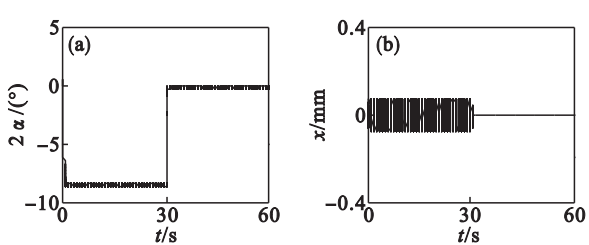


图 5 强制同步的相位差和响应

Fig. 5 Phase difference and response of forced synchronization

(a) — 两激振器间的相位差; (b) — 水平 x 方向的振幅.

3 自同步特性的试验分析

图 6 为双机振动试验台结构由固定架、弹簧、振动台和两台振动电机组成. 图中 1, 2 为光电转速传感器, 型号为 MM0360, 使用丹麦 B&K 公司

3650D 前端来采集两台电机的转速.

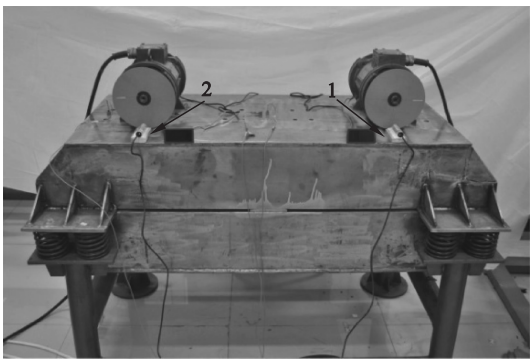


图 6 振动试验台

Fig. 6 Vibration test machine

3.1 电机参数不同时的自同步试验

图 7 所示与 2.1 节仿真条件一样, 首先两电机供电频率均为 50 Hz, 接着电机 2 晚于电机 1 3 s 后启动, 然后在 30 s 附近断掉电机 2 的电源, 最后在 45 s 附近让电机 2 在 49 Hz 供电频率下运行. 两台电机三种情况下稳定运行时的平均转速分别为 995, 991 和 984 r/min, 平均相位差分别为 2.9° , 20.3° 和 46.5° , 这与仿真结果较为接近. 从试验数据可知, 两电机转速接近时波动最大; 其次是不同供电频率情况, 单电机供电情况下波动较小, 这一现象从相位差曲线上也可以观察到. 因为系统受到外界干扰后会有相位差产生, 此时同步力矩就会起作用, 体现在两电机的负载转矩上. 同步力矩会施加负载力矩在相位超前的电机上, 同时施加驱动力矩在相位滞后的电机上^[6-11]. 断电前, 由于相位差较小, 同步力矩也较小, 两台电机受电网波动等原因, 最终导致电机转速波动频繁. 断电后, 只有一个电机在驱动系统, 所以电机转速波动较小. 不同频率供电下, 因为两电机转速不同, 同步力矩始终施加负载力矩在频率高的电机上, 同时施加驱动力矩在频率低的电机上. 图 7 中所示不同供电频率下电机 2 的稳态转速已经大于其同步转速 994 r/min, 所以在满足同步条件下, 在一定供电频率差情况下, 两台电机仍然能实现同步运动.

3.2 结构参数不同时的自同步试验

为了验证仿真结论的正确性, 进行两组不同结构参数的试验. 首先将激振器 1 的激振力调到 40%, 将激振器 2 的激振力调到 100%, 进行偏心块质量不同的试验. 然后将两激振器的激振力调到 70%, 接着将电机 1 安装在振动台中间位置, 进行安装距离不同的试验. 上面两组试验结果如表 2 所示.

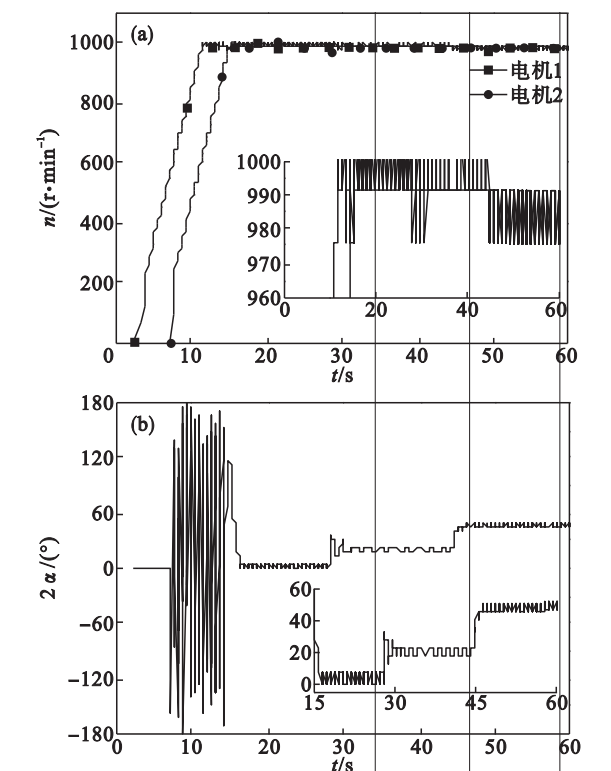


图 7 振动台自同步过程试验结果
Fig. 7 Experimental results of self-synchronous process
(a)—两电机转速; (b)—两激振器间相位差.

表 2 相位差的仿真与试验结果对比				
Table 2 Phase differences comparison between simulation and experiment (°)				
供电频率/Hz	偏心块质量不同		电机安装位置不同	
	仿真	试验	仿真	试验
40	14.2	14.0	17.6	18.7
45	12.3	12.5	16.4	18.2
50	11.5	11.6	15.5	17.4

4 结 论

- 1) 通过建立振动系统的动力学模型以及电机的电磁转矩数学模型,将振动系统的自同步过程考虑成由电机、激振器和振动体三部分共同作用的机电耦合过程.
- 2) 通过试验和仿真的分析,电机部分对自同步过程的影响最为重要,其次是激振器部分,最后为振动体部分.
- 3) 两电机的初始速度和激振器间的初始相位差并不影响自同步过程;在满足同步性条件下,两电机不同供电频率也可实现同步;激振器质量

大的相位滞后质量小的相位;激振器回转中心至机体质心距离大的相位滞后于距离小的相位.

4) 在相位差较小的情况下,可以采用两电机不同频率供电的方法来使相位差趋于零.

参考文献:

[1] Wen B C, Fan J, Zhao C Y, et al. Vibratory synchronization and controlled synchronization in engineering [M]. Beijing: Science Press, 2009.

[2] Wen B C, Zhang H, Liu S Y, et al. Theory and techniques of vibrating machinery and their applications [M]. Beijing: Science Press, 2010.

[3] Blekhman I I. Self-synchronization of vibrators in some types of vibrational machines [J]. *Inzhenerny Sbornik*, 1953, 16: 49 – 72.

[4] Blekhman I I, Fradkov A L, Nijmeijer H, et al. On self-synchronization and controlled synchronization [J]. *System and Control Letters*, 1997, 31 (5): 299 – 305.

[5] Blekhman I I, Fradkov A L, Tomchina O P, et al. Self-synchronization and controlled synchronization: general definition and example design [J]. *Mathematics and Computers in Simulation*, 2002, 58: 367 – 384.

[6] Zhao C Y, Zhu H T, Wang R Z, et al. Synchronization of two non-identical coupled exciters in a non-resonant vibrating system of linear motion. Part I: theoretical analysis [J]. *Shock and Vibration*, 2009, 16 (5): 505 – 516.

[7] Zhao C Y, Zhu H T, Bai T J, et al. Synchronization of two non-identical coupled exciters in a non-resonant vibrating system of linear motion. Part II: numeric analysis [J]. *Shock and Vibration*, 2009, 16 (5): 517 – 528.

[8] Zhao C Y, Zhu H T, Zhang Y M, et al. Synchronization of two coupled exciters in a vibrating system of spatial motion [J]. *Acta Mechanica Sinica*, 2010, 26 (3): 477 – 493.

[9] Zhao C Y, Zhao Q H, Zhang Y M, et al. Synchronization of two non-identical coupled exciters in a non-resonant vibrating system of plane motion [J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2011, 25 (1): 49 – 60.

[10] Zhang X L, Wen B C, Zhao C Y. Vibratory synchronization transmission of two exciters in a super-resonant vibrating system [J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2014, 28 (6): 2049 – 2058.

[11] Zhang X L, Zhao C Y, Wen B C. Theoretical and experimental study on synchronization of the two homodromy exciters in a non-resonant vibrating system [J]. *Shock and Vibration*, 2013, 20: 327 – 340.

[12] Li Y, Li H, Wei X P, et al. Self-synchronization theory of a nonlinear vibration system driven by two exciters. Part 1: theoretical analysis [J]. *Journal of Vibro-Engineering*, 2014, 16 (2): 893 – 902.