

# 真空泵用多台屏蔽电机模式切换与位置补偿偏差耦合同步控制\*

张永龙<sup>1</sup>, 安跃军<sup>1</sup>, 张志恒<sup>1</sup>, 王光玉<sup>2</sup>

(1. 沈阳工业大学 电气工程学院, 辽宁 沈阳 110870;

2. 中国科学院 沈阳科学仪器股份有限公司 真空干泵事业部, 辽宁 沈阳 110179)

**摘要:** 针对真空泵用多台屏蔽电机起动、突加随机扰动、突加周期性负载及单/多电机不同时刻故障停机过程, 设计了模式切换与位置补偿偏差耦合同步控制系统, 创新性地速度补偿器中引入位置补偿器, 同时在故障瞬间将偏差耦合控制方式切换为主从控制。将所提出的控制系统与传统的虚拟电机控制系统进行了对比。结果表明: 当发生单电机故障以及双电机不同时刻故障时, 在相同的模式切换和位置补偿条件下, 所提出的控制系统位置误差分别为  $4.6^\circ$  和  $4^\circ$ , 在  $5^\circ$  的误差允许范围内, 而传统虚拟电机控制系统的位置误差分别为  $15^\circ$  和  $20^\circ$ 。

**关键词:** 同步控制; 屏蔽电机; 偏差耦合; 虚拟电机; 主从控制; 位置补偿; 模式切换

中图分类号: TM 343 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2020)01-0021-08

doi: 10.12177/emca.2019.118

## Mode Switching and Position Compensation Deviation Coupling Synchronous Control of Multiple Canned Motors for Vacuum Pumps \*

ZHANG Yonglong<sup>1</sup>, AN Yuejun<sup>1</sup>, ZHANG Zhiheng<sup>1</sup>, WANG Guangyu<sup>2</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China;

2. Vacuum Dry Pump Business Division, SKY Technology Development Co., Ltd., Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110179, China)

**Abstract:** For the multiple-canned-motor system used for vacuum pumps, fault shutdown may occur under different conditions such as starting, sudden random disturbance, sudden cyclic load, single motor failure, and multi-motor asynchronous failure. Aiming at this problem, a mode switching and position compensation deviation coupling synchronous control system is designed. The position compensator is innovatively introduced into the speed compensator and the deviation coupling control mode is switched to master-slave control at the moment of fault shutdown. The proposed control system is compared with the traditional virtual motor synchronous control system. The results show that for single motor failure and two-motor asynchronous failure, after mode switching and position compensation, the position errors of the proposed control system are  $4.6^\circ$  and  $4^\circ$ , respectively, which are smaller than the position error tolerance value of  $5^\circ$ . In comparison, the position errors of the traditional virtual motor control system are  $15^\circ$  and  $20^\circ$ , respectively.

**Key words:** synchronous control; canned motor; deviation coupling; virtual motor; master-slave control; position compensation; mode switching

收稿日期: 2019-09-20; 收到修改稿日期: 2019-11-01

\* 基金项目: 国家重大科技专项项目(2017ZX02201005-0025)

作者简介: 张永龙(1995—), 男, 硕士研究生, 研究方向为特种电机及其控制。

安跃军(1962—), 男, 博士, 教授, 研究方向为特种电机及其控制。

## 0 引言

随着真空应用技术的不断发展,极大规模集成电路制造装备业、薄膜技术、电真空技术等领域对真空泵的需求越来越大。

针对真空泵用驱动电机的设计问题,文献[1-3]分别设计了一款适用于真空泵驱动电机,并通过软件仿真及试验对电机的性能进行了研究;针对真空泵用驱动电机的控制问题,文献[4]研制了一款真空泵用开关磁阻电机,涡旋真空干泵驱动电机的转子处于高真空状态,转子散热困难,而开关磁阻电机的转子上只有少量铁耗,发热少,适合用于涡旋真空干泵驱动电机,以降低转子的温升;文献[5]研制了一款真空泵用无刷直流电机,对比研究了采用有位置传感器和无位置传感器的控制方式,提高了涡旋真空泵运行的稳定性。为了进一步提高真空泵的抽速、控制良好的压缩比,文献[6]设计了单电机多齿轮的多轴真空泵。然而长时间负载运行时,多齿轮之间机械啮合将导致齿轮间隙增大,进而对真空泵的寿命产生影响,因此研究真空泵用多电机同步控制具有重要意义。

常用多电机同步控制策略有主令式、主从式、交叉耦合式、环形耦合式、虚拟主轴式、偏差耦合式等<sup>[7-12]</sup>。此外,为了改善系统的同步和抗扰性能,研究人员提出了许多适用于多电机速度同步控制系统的控制方案。张承慧等<sup>[13]</sup>提出模糊神经网络相邻耦合同步控制,即将人工神经网络与模糊逻辑推理相结合的智能算法;刘星桥等<sup>[14]</sup>提出基于二阶自抗扰技术的多电机同步控制策略,以三电机同步控制为例,采用“分离性原理”,独立设计跟踪微分器、误差反馈、扩张状态跟踪器,然后对各部分进行组合,最后进行相关试验,结果表明控制器在一定程度上能够克服超调量小与响应速度快之间的矛盾<sup>[15]</sup>。

目前,关于真空泵用多屏蔽电机同步控制的研究并不深入。主要原因有<sup>[16]</sup>:(1) 由于真空泵用屏蔽电机处于真空环境之中,所以电机温升导致真空泵用屏蔽电机参数易变;(2) 真空泵在实际运行时,易受到冲击负载的影响,这对传统控制系统在无规律冲击负载下的鲁棒性提出了更高的要求。

本文针对多屏蔽电机驱动系统的启动、突加随机扰动、突加周期性负载扰动过程,对比研究了偏差耦合控制及虚拟电机控制的位置同步效果;针对某台/2台驱动电机受到大冲击负载而导致整个系统同步停机的运行工况(单电机故障、双电机不同时刻故障),对比研究了将偏差耦合控制或虚拟电机控制切换为主从同步来控制整个驱动系统安全同步停机,且均在速度补偿器中额外引入位置补偿,探索多屏蔽电机的位置同步性能。利用 MATLAB/Simulink 软件,设计了三电机同步控制系统,并通过理论分析及软件仿真对上述同步控制策略的控制效果进行了对比。

为了便于区分,将本文提出的模式切换与位置补偿偏差耦合控制记为“本文方法”,模式切换与位置补偿传统虚拟电机控制记为“传统方法”。

## 1 真空泵用多屏蔽电机数学模型

### 1.1 真空泵及真空泵用屏蔽电机基本结构

罗茨泵是一种容积式真空泵,3根轴水平平行安装,转子与转子、转子与泵壁间彼此无接触,依靠间隙密封,如图1所示。中间轴为主动轴,与其相连接的为主动转子,左右两边的轴为从动轴,与其相连接的为从动转子。主动轴经由轴端的同步齿轮带动两侧的从动轴,从而带动主动转子分别与两侧的从动转子进行啮合。

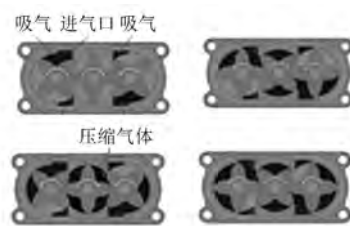


图1 3轴罗茨泵工作示意图<sup>[6]</sup>

图1中,主动轴顺时针旋转,两根从动轴逆时针旋转,同时标出了进气口与排气口的位置<sup>[6]</sup>,展示了真空泵一个完整的工作过程:抽气、压缩、做功、排气。从图1可以看出,三轴之间完全依靠同步齿轮进行机械啮合,长时间的负载运行会导致齿轮磨损,磨损到一定程度会导致3个罗茨转子发生碰撞,从而影响真空泵的可靠运行。为此,本文方法的控制系统取消了传统的齿轮结构,利用控制策略实现主动轴、从动轴之间的“无齿轮”啮



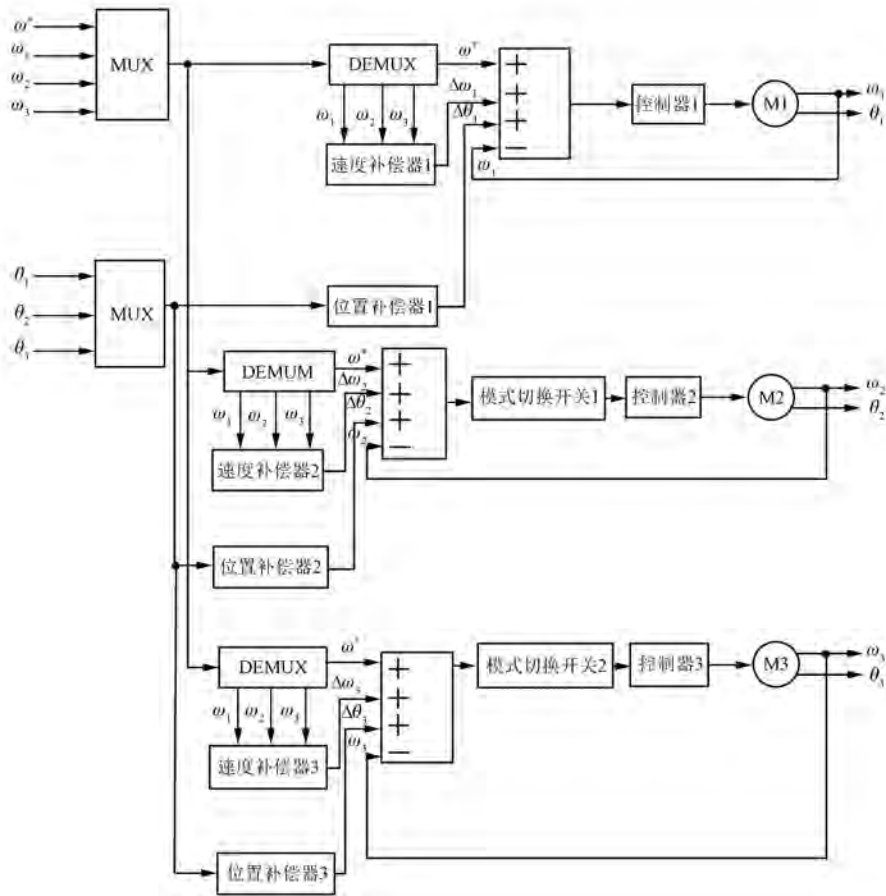


图4 模式切换与位置补偿偏差耦合控制系统结构图

2、3) 分别为电机1、2、3的位置角度值和机械角速度,  $\Delta\omega_i$ 、 $\Delta\theta_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ) 分别为速度补偿器1、2、3和位置补偿器1、2、3的补偿值。

系统正常运行时, 3台电机跟随给定速度稳定运行, 不引入位置补偿器与模式切换开关, 依靠偏差耦合实现3台电机之间同步同位置协调运行。

当多电机同步系统中单台/2台电机在不同时刻出现冲击负载时, 线路中会出现较大的冲击电流, 进而导致三电机系统减速停机。模式切换开关将偏差耦合控制切换为主从控制, 使其他2台电机的速度跟踪受冲击负载的电机的实时速度, 同时引入位置补偿, 保证电机之间的位置误差在  $5^\circ$  之内, 进而保证真空泵转子不发生碰撞。其中位置补偿器1、2、3均采用PI调节器, 位置补偿器的输入由3台电机的位置决定。对于3台电机, 位置补偿器的输入为

$$\theta_{in} = \begin{cases} (\theta_i - \theta_{i+1}) + (\theta_i - \theta_{i+2}) + \theta_i - (\theta_{i+1} + \theta_i + \theta_{i+2})/3 & i = 1 \\ (\theta_i - \theta_{i-1}) + (\theta_i - \theta_{i+1}) + \theta_i - (\theta_{i-1} + \theta_i + \theta_{i+1})/3 & i = 2 \\ (\theta_i - \theta_{i-1}) + (\theta_i - \theta_{i-2}) + \theta_i - (\theta_{i-1} + \theta_i + \theta_{i-2})/3 & i = 3 \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $\theta_{in}$  为位置补偿器  $i$  的输入;  $\theta_i$  为电机  $i$  的位置角度值。

位置补偿器的输出表达式为

$$\Delta\theta_i = K_p \theta_{in} + K_i \int \theta_{in} dt \quad (5)$$

式中:  $\Delta\theta_i$  为位置补偿器  $i$  的输出;  $K_p$  为比例系数;  $K_i$  为积分系数。

通过调节比例、积分参数来减小3台电机同步停机时的位置误差。

速度补偿器的表达式为

$$\Delta\omega_i = \begin{cases} (\omega_i - \omega_{i+1}) + (\omega_i - \omega_{i+2}) + \omega_i - (\omega_{i+1} + \omega_i + \omega_{i+2})/3 & i = 1 \\ (\omega_i - \omega_{i-1}) + (\omega_i - \omega_{i+1}) + \omega_i - (\omega_{i-1} + \omega_i + \omega_{i+1})/3 & i = 2 \\ (\omega_i - \omega_{i-1}) + (\omega_i - \omega_{i-2}) + \omega_i - (\omega_{i-1} + \omega_i + \omega_{i-2})/3 & i = 3 \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $\Delta\omega_i$  为速度补偿器  $i$  的输出;  $\omega_i$  为电机  $i$  的机械角速度。

模式切换开关通过实时监测 3 台电机的负载, 当某台电机突加冲击负载需要系统同步停机时, 模式切换开关将偏差耦合控制切换为主从控制, 使其他 2 台电机跟随突加冲击负载电机的速度, 同时突加冲击负载电机的给定速度切换为零, 这些过程由

MATLAB/Simulink 中的 S-function 实现。

## 2.2 模式切换与位置补偿虚拟电机控制

为了将本文所提出的模式切换与位置补偿偏差耦合控制进行对比, 结合虚拟电机控制策略及单电机磁场定向矢量控制系统, 搭建了多电机模式切换与位置补偿虚拟电机控制系统。

多电机模式切换与位置补偿虚拟电机控制系统结构图如图 5 所示。在虚拟电机控制拓扑结构的基础上, 引入位置补偿器与模式切换开关来减小多电机同步停机过程的位置误差。其中, 电机 1、2、3 在运行过程中跟随虚拟电机的运行轨迹, 从而减少运行过程中电机之间的同步误差。将电机 1、2、3 的输出转速作用于虚拟电机上, 各台电机之间不再有直接耦合作用, 由虚拟电机对各台电机进行同步控制, 从而简化转速同步补偿器模型<sup>[11]</sup>。

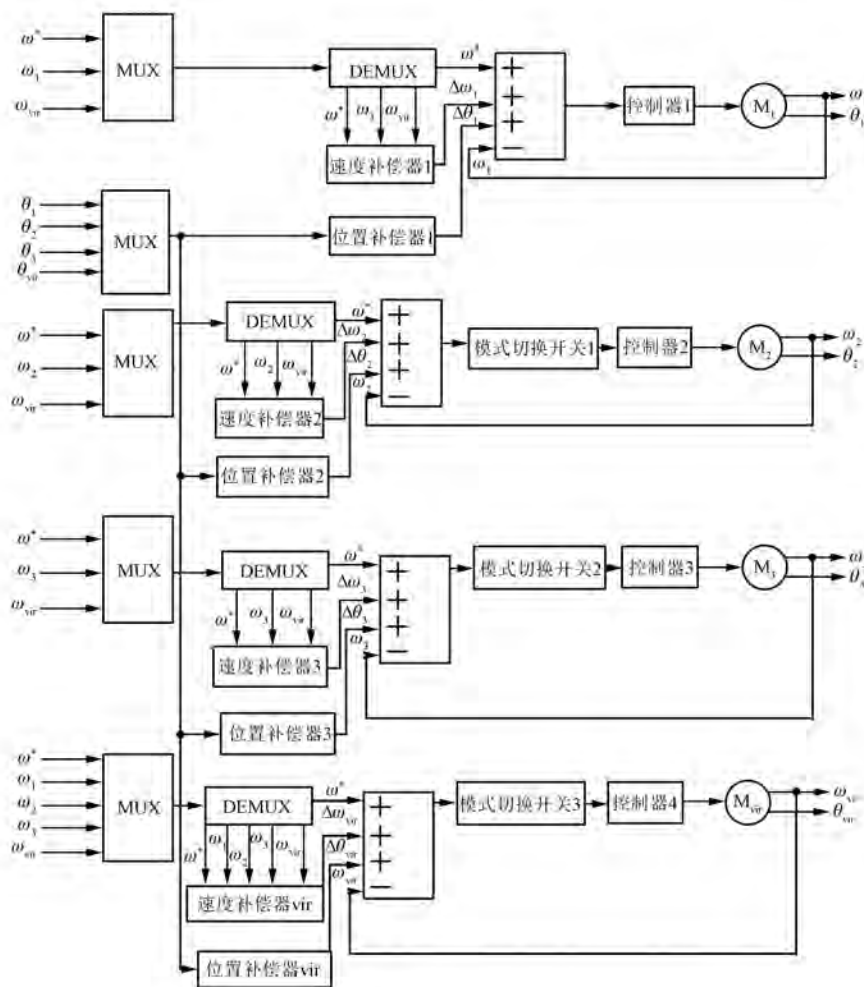


图 5 多电机模式切换与位置补偿虚拟电机控制系统结构图

图 5 中,  $\theta_{\text{vir}}$ 、 $\omega_{\text{vir}}$  为虚拟电机的位置和机械角速度。 $\Delta\omega_{\text{vir}}$ 、 $\Delta\theta_{\text{vir}}$  为虚拟电机机械角速度和位置的补偿值, 其表达式为

$$\Delta\omega_{\text{vir}} = (\omega_{\text{vir}} - \omega_1) + (\omega_{\text{vir}} - \omega_2) + (\omega_{\text{vir}} - \omega_3) - (\omega_{\text{vir}} + \omega_1 + \omega_2 + \omega_3)/4 \quad (7)$$

$$\Delta\theta_{\text{vir}} = K_p \theta_{\text{ivir}} + K_I \int \theta_{\text{ivir}} dt \quad (8)$$

$$\theta_{\text{ivir}} = (\theta_{\text{ivir}} - \theta_1) + (\theta_{\text{ivir}} - \theta_2) + (\theta_{\text{ivir}} - \theta_3) + \theta_{\text{ivir}} - (\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_{\text{ivir}})/4 \quad (9)$$

式中:  $\theta_{\text{ivir}}$  为虚拟电机位置补偿器的输入。

模式切换开关的设置及工作过程与 2.1 节相同。

### 3 仿真及分析

在 MATLAB/Simulink 中搭建仿真模型, 对本文所提方法进行分析。算法均采用变步长的 ode23tb 算法, 相对误差设置为 0.001。

#### 3.1 起动过程及单电机故障停机过程分析

针对起动过程及单电机故障停机过程, 仿真时间设置为 0.3 s。  $t=0$  s 时, M1、M2、M3 带额定风机泵类负载起动;  $t=0.12$  s 时, 3 台电机转速达到额定值 4 682 r/min 并稳定运行;  $t=0.20$  s 时, M1 突加冲击负载模拟单电机故障停机。图 6 所示为起动及停机过程的转速响应。

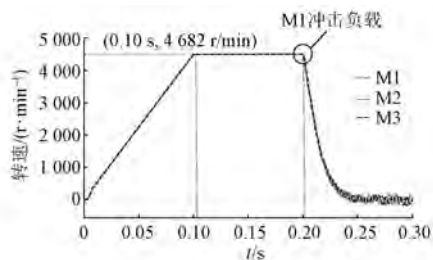


图 6 起动及停机过程的转速响应

图 7 为采用本文方法搭建的控制系统仿真结果。(1)  $t=0\sim 0.12$  s 时, 3 台电机实现平稳起动; (2)  $t=0.12\sim 0.20$  s 时, 3 台电机以 4 682 r/min 的额定转速运行, 电机之间的位置误差稳定在  $0.2^\circ$  之内; (3)  $t=0.20$  s 时, M1 突加冲击负载, 模式切换开关迅速动作, 将偏差耦合控制切换为主从控制, 此时 M1 为主电机, M2、M3 迅速跟随 M1 的运行情况, 同时引入位置补偿器, 以缩小停机过程中的相对位置误差, 最终 3 台电机之间的相对位置

误差控制在  $4.6^\circ$  之内(最大允许值为  $5^\circ$ ), 确保罗茨泵转子不会发生碰撞。

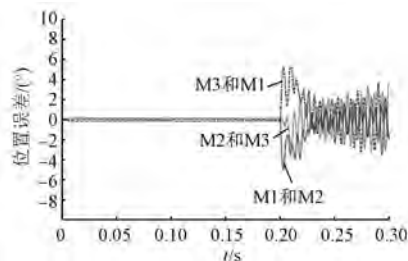


图 7 起动及停机过程的位置误差(本文方法)

图 8 为采用传统方法搭建的控制系统仿真结果。(1)  $t=0\sim 0.12$  s 时, 3 台电机实现平稳起动; (2)  $t=0.12\sim 0.20$  s 时, 3 台电机以 4 682 r/min 的额定转速运行, 电机之间的位置误差稳定在  $0.1^\circ$  之内; (3)  $t=0.20$  s 时, M1 突加冲击负载, 模式切换开关迅速动作, 将虚拟电机控制切换为主从控制, 此时 M1 为主电机, 模式切换开关将虚拟电机控制切换为主从控制, M2、M3 迅速跟随 M1 的运行情况, 同时引入位置补偿器, 最终 3 台电机之间的相对位置误差达到了  $15^\circ$ , 大于允许值  $5^\circ$ , 罗茨泵转子发生碰撞。

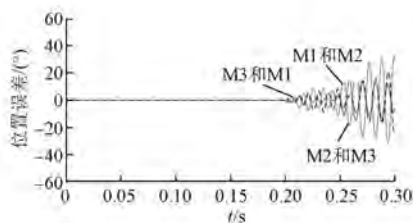


图 8 起动及停机过程的位置误差(传统方法)

#### 3.2 运行过程中单电机加随机扰动和周期性扰动分析

针对随机扰动过程及周期性扰动过程, 将仿真时间设置为 1.9 s。  $t=0.15\sim 0.35$  s 时, M1 突加随机扰动, M2、M3 带额定负载运行;  $t=0.55\sim 0.75$  s 时, M1 突加周期性扰动, M2、M3 带额定负载运行, 分析 M1 受到随机扰动及周期性扰动过程中 3 台电机之间的位置误差。图 9 所示为随机扰动及周期性扰动过程的转速响应。

图 10 为采用本文方法搭建的控制系统仿真结果。可以看出: (1)  $t=0\sim 0.15$  s 时, 3 台电机实现平稳起动, 且起动过程中 3 台电机之间的位置

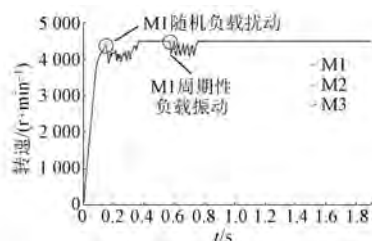


图9 随机扰动及周期性扰动过程的速度响应

误差基本稳定在  $0.3^\circ$  之内; (2)  $t=0.15\sim0.35$  s 时, M1 突加随机扰动, 3 台电机之间的位置误差控制在  $0.3^\circ$  之内; (3)  $t=0.35\sim0.55$  s 时, 3 台电机恢复到额定转速运行, 且位置误差稳定在  $0.1^\circ$  之内; (4)  $t=0.55\sim0.75$  s 时, M1 突加周期性扰动, 3 台电机之间的最大位置误差为  $1.5^\circ$  (最大允许值为  $5^\circ$ ); (5)  $t=0.75\sim1.90$  s 时, 经过系统调节之后, 最终 3 台电机之间的位置误差趋近于零。

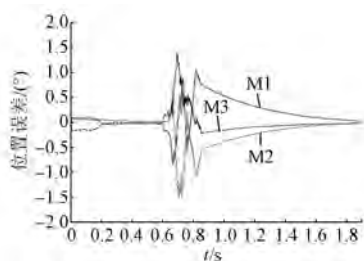


图10 随机扰动及周期性扰动过程位置误差(本文方法)

图 11 为采用传统方法搭建的控制系统仿真结果。可以看出: (1)  $t=0\sim0.15$  s 时, 3 台电机实现平稳起动并且起动过程中 3 台电机之间的位置误差稳定在  $0^\circ$  附近; (2)  $t=0.15\sim0.35$  s 时, M1 突加随机扰动, 3 台电机之间的位置误差控制在  $0.05^\circ$  之内; (3)  $t=0.35\sim0.55$  s 时, 3 台电机恢复到额定转速运行, 3 台电机之间的位置误差稳定在  $0.05^\circ$  之内; (4)  $t=0.55\sim0.75$  s 时, M1 突加周期性扰动, 3 台电机之间的最大位置误差为  $0.075^\circ$

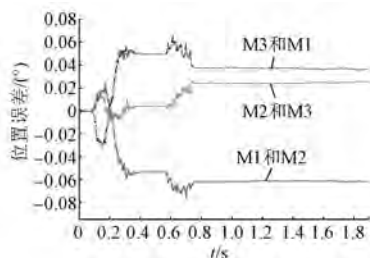


图11 随机扰动及周期性扰动过程位置误差(传统方法)

(最大允许值为  $5^\circ$ ); (5)  $t=0.75\sim1.90$  s 时, 3 台电机之间的位置误差稳定在  $0.04^\circ$ , 系统无法消除静差。

### 3.3 运行过程中多电机不同时刻加随机扰动和周期性扰动导致故障停机分析

为了进一步验证本文所提控制系统的可行性, 针对起动过程及 M1 突加冲击负载导致系统同步停机过程中 M2 又突加冲击负载的工况进行仿真, 仿真时间设置为 0.3 s。  $t=0$  s 时, M1、M2、M3 带额定负载起动;  $t=0.10$  s 时, 3 台电机达到额定转速并稳定运行;  $t=0.20$  s 时, M1 突加冲击负载;  $t=0.23$  s 时, M2 突加冲击负载, 以分析多电机在不同时刻发生故障时系统同步停机过程的位置误差。图 12 所示为 3 台电机在起动和停机过程的转速响应。

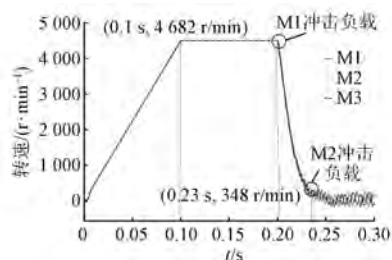


图12 3台电机在起动及停机过程中的转速响应

图 13 为采用本文方法搭建的控制系统仿真结果。可以看出: (1)  $t=0\sim0.10$  s 时, 3 台电机平稳起动, 且起动过程中 3 台电机之间的位置误差基本稳定在  $0^\circ$  附近; (2)  $t=0.10\sim0.20$  s 时, 3 台电机以额定转速运行, 位置误差约稳定在  $0^\circ$ ; (3)  $t=0.20\sim0.23$  s 时, 单独模拟 M1 故障时 3 台电机之间的位置误差, 在  $t=0.20$  s 时达到最大, 接近  $4.6^\circ$ , 经过一小段系统调节之后, 在  $t=0.23$  s 时减少至  $3.0^\circ$ ; (4)  $t=0.23$  s 时, M2 再突加冲击负载发生故障; (5)  $t=0.25$  s 系统停机时, 3 台电机之间的位置误差逐渐增大至  $4^\circ$  附近, 罗茨转子不会

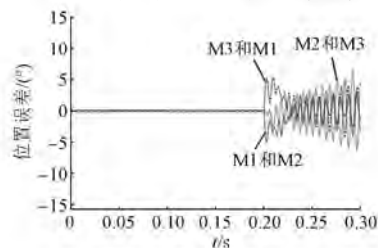


图13 3台电机起动和停机过程的位置误差(本文方法)

发生故障。

图 14 为采用传统方法搭建的控制系统仿真结果。可以看出:(1)  $t=0\sim 0.10\text{ s}$  时,3 台电机平稳起动,且起动过程中 3 台电机之间的位置误差在  $0^\circ$  附近;(2)  $t=0.10\sim 0.20\text{ s}$  时,3 台电机以额定转速运行,位置误差在  $0^\circ$  附近;(3)  $t=0.20\sim 0.23\text{ s}$  时,模拟 M1 故障导致 3 台电机之间的位置误差,在  $t=0.23\text{ s}$  时达到最大接近  $15^\circ$ ,而最大允许值为  $5^\circ$ ;(4)  $t=0.23\text{ s}$  时,M2 又突加冲击负载发生故障;(5)  $t=0.25\text{ s}$  系统停机时,3 台电机之间的位置误差逐渐增大至  $20^\circ$  附近,而最大允许值为  $5^\circ$ ,罗茨转子发生故障。

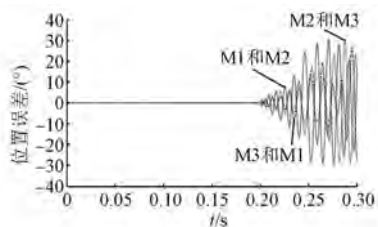


图 14 3 台电机起动和停机过程的位置误差(传统方法)

## 4 结 语

本文针对真空泵用多屏蔽电机的起动、突加随机扰动、突加周期性负载扰动 3 种典型过程,充分考虑单电机、多电机故障停机易造成主动轴、从动轴“失同步”,进而导致 3 个罗茨转子发生碰撞的极端故障,设计了真空泵用多台屏蔽电机模式切换与位置补偿偏差耦合同步控制系统,得出如下结论:

(1) 对比传统控制方法,本文所设计的控制系统可以将真空泵用多屏蔽电机的同步控制误差控制在最大允许值  $5^\circ$  之内。

(2) 当发生单电机故障以及双电机不同时刻故障导致系统停机时,本文所提出的控制系统位置误差分别为  $4.6^\circ$  和  $4.0^\circ$ ,采用传统模式切换与位置补偿虚拟电机控制系统时的位置误差分别为  $15^\circ$  和  $20^\circ$ ,后者远远大于位置误差允许值  $5^\circ$ 。

(3) 在常规偏差耦合控制拓扑结构的基础上引入了模式切换开关及位置补偿器,可以有效消除因单电机故障或多电机故障所引起的静态位置误差。

(4) 本文所提模式切换及位置补偿偏差耦合同步控制系统具有较好的鲁棒性及良好的工程应

用前景,下一步的研究重点将集中在该控制系统的参数优化以及实际生产线试验。

## 【参考文献】

- [1] 殷福久.半导体装备用真空泵屏蔽电动机设计与分析[D].沈阳:沈阳工业大学,2016.
- [2] 薛力铭.超洁净真空泵用永磁同步电动机多物理场分析[D].沈阳:沈阳工业大学,2017.
- [3] 吴炜桦.IC 装备制造无齿轮罗茨真空泵永磁同步电动机控制研究[D].沈阳:沈阳工业大学,2018.
- [4] 杨南.超洁净涡旋真空干泵用开关磁阻电动机研究与热场分析[D].沈阳:沈阳工业大学,2018.
- [5] 袁天清.涡旋真空泵用无刷直流电动机系统设计与分析[D].沈阳:沈阳工业大学,2016.
- [6] 刘坤,李培印,李强,等.三轴罗茨真空泵的抽气理论和结构设计[J].真空科学与技术学报,2015,35(8): 934.
- [7] 韩仁银,郭阳宽,祝连庆,等.多电机同步控制综述[J].电机与控制应用,2017,44(6): 8.
- [8] 杨帆.多电机速度同步控制系统研究[D].马鞍山:安徽工业大学,2016.
- [9] KOREN Y. Cross-coupled biaxial computer controls for manufacturing systems[J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 1980, 102(4): 265.
- [10] 刘然,孙建忠,罗亚琴,等.基于环形耦合策略的多电机同步控制研究[J].控制与决策,2011,26(6): 957.
- [11] 史婷娜,辛雄,夏长亮.采用虚拟电机的改进偏差耦合多电机同步控制[J].中国电机工程学报,2017,37(23): 7004.
- [12] PEREZ-PINAL F J, NUNEZ C, ALVAREZ R, et al. Comparison of multi-motor synchronization techniques [C] // 30th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society, 2004.
- [13] 张承慧,石庆升,程金.一种多电机同步传动模糊神经网络控制器的设计[J].控制与决策,2007,22(1): 30.
- [14] 刘星桥,唐琳,周丽.二阶自抗扰控制器在三电机同步系统中的应用[J].电工技术学报,2012,27(2): 179.
- [15] 李慧,刘星桥,李景,等.多电机同步协调系统控制策略[J].电机与控制应用,2014,41(4): 6.
- [16] 安跃军,张志恒,张振厚,等.真空干泵用屏蔽电机无速度传感器带速重投控制系统[J].电工技术学报,2018,33(12): 2665. (下转第 35 页)

- [ 8 ] RENU K, KUMARI N K, KRISHNA D S G. Sensorless control of permanent magnet synchronous motor with flux weakening operation for washing machine application [ C ] // 2018 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES), 2018.
- [ 9 ] 谢统辉. 基于单片机的永磁同步电机控制方法 [ J ]. 电子技术与软件工程, 2017(7): 264.
- [ 10 ] 李佑虹. 基于嵌入式 DSP 的小功率无刷直流电机控制系统的仿真研究 [ J ]. 科技风, 2018(9): 37.
- [ 11 ] 许中阳, 郭希铮, 邹方朔, 等. 永磁同步电机无速度传感器控制离散化方法研究 [ J ]. 电工技术学报, 2019, 34(增刊 1): 52.
- [ 12 ] 王维强, 曾晓松, 夏茂树, 等. 基于 dSPACE 的电动汽车电机调速控制策略研究 [ J ]. 电机与控制应用, 2018, 45(8): 86.
- [ 13 ] 杜常清, 徐懂懂. 基于 dSPACE 的混合动力汽车控制策略半实物仿真平台 [ J ]. 自动化与仪表, 2018, 33(1): 79.
- [ 14 ] 陈再发, 刘彦呈, 卢亨宇. 具有参数辨识的船舶永磁推进电机无位置传感器控制 [ J ]. 电机与控制学报, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1408.TM.20190626.1056.006.html>
- [ 15 ] WU J, WEI H, ZHANG Y, et al. Sensorless vector control of permanent magnet synchronous motor based on model reference adaptive system [ C ] // 2017 3rd IEEE International Conference on Computer and Communications (ICCC), 2017.
- [ 16 ] 陈杨. 基于 MRAS 无速度传感器的永磁同步电机转速跟踪控制 [ J ]. 科技通报, 2018, 34(10): 176.
- [ 17 ] NAIR R R, NARAYANAN G. Stator flux based model reference adaptive observers for rotor position and speed estimation in doubly-fed induction machines [ C ] // 2018 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES), 2018.
- [ 18 ] 朱瑞杰. 基于模型参考自适应的永磁同步电机无位置传感器控制 [ D ]. 北京: 北京交通大学, 2018.
- [ 19 ] 王杰, 谢源, 谢涛, 等. 基于 MRAS 的永磁同步电机无传感器矢量控制研究 [ J ]. 电机与控制应用, 2018, 45(1): 30.

(上接第 20 页)

- [ 7 ] 王如乾, 王国峰, 李存贺, 等. 开关磁阻电机固定频率预测电流控制策略 [ J ]. 电机与控制应用, 2018, 45(7): 1.
- [ 8 ] MAGNI L, RAIMONDO D M, ALLGOWER F. Nonlinear model predictive control [ M ]. Berlin: Springer, 2009: 345-369.
- [ 9 ] ZHANG R, ZHANG Y, QIAN X, et al. Direct instantaneous torque control of switched reluctance motor based on adaptive backstepping [ C ] // 2014 17th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2014.
- [ 10 ] 刘涛, 吴忠, 吕昊曦. 开关磁阻电动机转矩分配策略研究 [ J ]. 微电机, 2013, 46(7): 11.
- [ 11 ] 王喜莲, 许振亮, 王翠. 开关磁阻电机转矩脉动与铜耗最小化控制研究 [ J ]. 电机与控制学报, 2015, 19(7): 52.
- [ 12 ] VUJICIC V. Minimization of torque ripple and copper losses in switched reluctance drive [ J ]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(1): 388.
- [ 13 ] 王姣. 基于模糊滑模控制的开关磁阻电机转矩分配控制系统研究 [ D ]. 镇江: 江苏大学, 2016.
- [ 14 ] 王宏华. 开关型磁阻电动机调速控制技术 [ M ]. 北京: 机械工业出版社, 1995.

(上接第 28 页)

- [ 17 ] ERGENE L T, SALON S J. Determining the equivalent circuit parameters of canned solid-rotor induction motors [ J ]. IEEE Transactions on Magnetics, 2005, 41(7): 2281.
- [ 18 ] 陈伯时. 电力拖动自动控制系统 [ M ]. 3 版. 北京: 机械工业出版社, 2004: 180-182.
- [ 19 ] 林宏民, 吴晓新, 乐胜康, 等. 基于三电平优化矢量的异步电机模型预测直接转矩控制 [ J ]. 电机与控制学报, 2018, 22(8): 65.
- [ 20 ] 缪仲翠, 党建武, 巨梅, 等. 基于分数阶滑模观测的感应电机无速度传感器矢量控制 [ J ]. 电机与控制学报, 2018, 22(5): 84.