

转子偏心对高速电主轴机电耦合动力学特性的影响*

邬再新, 张亚军, 王保民, 田旭东

(兰州理工大学机电工程学院, 兰州市, 730050)

摘要: 由于加工或装配误差等原因, 电主轴转子存在着一定的偏心量, 这个偏心量影响电主轴系统的机电耦合特性。本文基于绕组函数法, 计算电主轴在转子静态偏心状态下的电感参数, 在此基础上建立高速电主轴转子存在静态偏心量时的机电耦合动力学数学模型, 并对电主轴启动过程进行仿真分析。分析结果表明: 转子静态偏心量的存在会使电主轴启动时间增长, 电主轴进入额定状态后转子仍然存在较大的电流。该结论为进一步研究高速电主轴系统的机电耦合动力学特性提供理论基础。

关键词: 高速电主轴; 转子偏心; 机电耦合

中图分类号: TH122 **文献标识码:** A **文章编号:** 2095-5553(2016) 04-0143-06

邬再新, 张亚军, 王保民, 田旭东. 转子偏心对高速电主轴机电耦合动力学特性的影响 [J]. 中国农机化学报, 2016, 37(4): 143~147, 189

Wu Zaixin, Zhang Yajun, Wang Baomin, Tian Xudong. The influence eccentricity of the rotor makes on the electromechanical coupled dynamical characteristics of high speed motorized spindle [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2016, 37(4): 143~147, 189

0 引言

高速电主轴是实现高速加工的主要传动部件^[1], 电主轴将机床的主轴与电机轴合二为一, 即将主轴电机的定子、转子直接装入主轴组件内部, 也称为内装式电主轴, 不再使用皮带或齿轮等传统的传动副, 从而实现了机床主轴系统的“零传动”^[2]。高速电主轴系统是多变量、非线性、强耦合的系统, 其系统的机电耦合效应对电能转换为磁能、磁能转换为机械能的过程具有关键性影响。目前, 电主轴系统的设计生产是对其各个子系统进行独立设计来实现的, 如控制系统、内置电机系统等关键功能部件。由于该方法是将电主轴系统中机械功能部件与电磁功能部件分离开来设计, 忽视了高速电主轴系统内部固有的机电耦合效应。因此近年来国内外关于如何建立高速电主轴系统的机电耦合动力学模型进行了深入的研究。Brecher C 等^[3]综述了关于高速电主轴系统机电耦合动力学建模的研究成果; 孟杰等^[4-5]基于变分原理法和拉格朗日分析力学对高速电主轴系统建立了机电耦合动力学模型。吕浪等^[6]进一步建立了高速磨削中“逆变器 电主轴 砂轮 磨削载荷”系统的机电耦合动力学模型, 揭示了高

频变流诱发的高次谐波对电主轴系统机电耦合特性的影响。Bert R. Jorgensen 等^[7]以能量守恒为依据, 建立了高速电主轴的机电能量转换动力学模型。陈小安等^[8-9]建立了一种高速电主轴多场耦合动力学模型, 分析了轴承模型、热态模型、芯轴动力学模型和电主轴内部电动机电磁模型之间的耦合关系, 提炼了各种耦合因素, 并且研究了各种耦合因素对芯轴动力学特性的影响。上述文献在高速电主轴系统建模方面有了深入的研究。但由于加工或装配误差等原因造成的电主轴转子偏心不可避免, 转子偏心对高速电主轴系统机电耦合动力学特性的影响也不容忽视。本文建立了静态偏心状态下高速电主轴系统的机电耦合动力学模型。说明了静态偏心量的存在对电主轴机电耦合特性的影响, 揭示了电主轴在静态偏心状态下, 其机电耦合效应对电主轴系统机电能量转换、输入电压、电流与输出转矩、转速的关系。并用 Matlab/Simuhnk 软件对电主轴的启动过程分别进行了存在偏心量和不存在偏心量时的仿真对比。

1 高速电主轴的机电耦合模型

电主轴是将电动机与主轴融合在一起的部件, 转子通常为鼠笼式结构, 其机电耦合数学模型由定子及

收稿日期: 2014 年 12 月 12 日 修回日期: 2015 年 1 月 13 日

* 基金项目: 国家自然科学基金(51165024); 甘肃省自然科学基金(1208RJZA131)

第一作者: 邬再新, 男, 1971 年生, 浙江宁波人, 硕士, 副教授, 硕导; 研究方向为数控技术和机电控制。E-mail: wu_zaxin@sina.com

转子各个回路的电压方程、磁链方程和运动方程组成。转子具有 n 根导条的三相鼠笼式异步电动机,其定子三相分别为独立的 3 个回路;转子的相邻两导条与相应的端环构成 1 个独立回路,整个端环构成 1 个独立回路,所以转子一共有 $n+1$ 个回路,总的方程

$$U = p\Psi + RI \quad (1)$$

$$Y = LI = \begin{bmatrix} L_s & L_{sr} \\ L_{rs} & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_s \\ I_r \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$T_e - T_m = J \frac{d\omega}{dt} = J \frac{d^2\gamma}{dt^2} \quad (3)$$

式中: T_e ——电机电磁转矩, $T_e = \frac{1}{2} I^T \frac{\partial L}{\partial \gamma} I$;

U ——定子和转子各个独立回路电压所组成的列向量, $U = [u_a, u_b, u_c, u_1, u_2, \dots, u_n, u_e]^T$;

p ——算子, $p = d/dt$;

Ψ ——对应回路的磁链列向量, $\Psi = [\psi_a, \psi_b, \psi_c, \psi_1, \psi_2, \dots, \psi_n, \psi_e]^T$;

I ——各回路对应的电流列向量, $I = [i_a, i_b, i_c, i_1, i_2, \dots, i_n, i_e]^T$;

R ——相应的电阻矩阵;

L ——电感矩阵;

L_s ——定子各回路间的自感和互感组成的定子绕组电感矩阵;

L_{sr} ——定子回路与转子回路之间的互感矩阵;

L_r ——转子各回路间的电感矩阵;

L_{rs} ——转子回路和定子回路之间的互感矩阵;

T_m ——负载转矩;

J ——转子的转动惯量;

γ ——转子的旋转(机械)角度。

各矩阵的完整表达形式见文献[10]。电主轴机电耦合数学模型由式 1~式 3 组成,由于加工或装配的误差等原因转子存在着一定的静态偏心量,所以要将所有电感参数用静态偏心情况下的值代入,从而得到电主轴电机在转子静态偏心状态下的数学模型。

2 转子偏心时电感参数的分析

2.1 任意线圈的绕组函数

电机绕组是由一些沿电机气隙周围分布的导体以某种方式连接在一起而形成的,当电机绕组通电时,沿着气隙圆周产生电流层。这一电流层的分布情况用安导波来描述,安导波实际上就是沿气隙周围的电流层强度分布波^[11]。安导波用 $A(\theta)$ 来代表,其中变量 θ 是沿着定子表面的机械角,单位是弧度。若一匝数为 w_y 的单个线圈,放置于相距 θ_{ym} 的两个槽中,假设线圈的

轴线在坐标原点处,如图 1 所示。

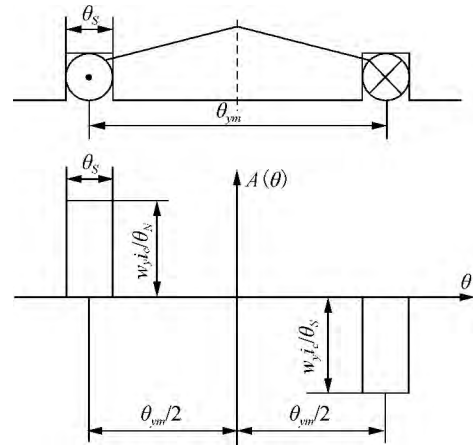


图 1 单个线圈的安导波

Fig. 1 Adjusting wave of the single coil

当电流 i_c 通过该线圈时,该线圈两个有效边的安导波按傅里叶级数展开分别为

$$A_1(\theta) = \sum_{v=1}^{\infty} \frac{w_y i_c k_{sv}}{\pi} \cos v \left(\theta - \frac{\theta_{ym}}{2} \right)$$

$$A_2(\theta) = - \sum_{v=1}^{\infty} \frac{w_y i_c k_{sv}}{\pi} \cos v \left(\theta + \frac{\theta_{ym}}{2} \right)$$

式中: k_{sv} —— v 对极谐波的槽口系数,取决于电机槽口的机械跨角 θ_s , $k_{sv} = 2 \sin(0.5v\theta_s) / v\theta_s$ 。

所以单个线圈的安导波分布为:

$$A(\theta) = A_1(\theta) + A_2(\theta) = \sum_{v=1}^{\infty} \frac{2w_y i_c k_{sv} k_{yv}}{\pi} \sin v \theta$$

式中: k_{yv} —— v 对极谐波的短距系数, $k_{yv} = \sin(0.5v\theta_{ym})$ 。

电机绕组最基本的特征之一是通以电流便产生磁场,因而沿气隙周围分布着磁动势,气隙周围某点的磁动势就是指该点的气隙磁压降,这种磁动势被称为绕组磁动势^[12]。由全电流定律可知,沿闭合回路的总磁压降应等于回路内的总电流,因此单个线圈的磁动势波

$$\begin{aligned} F(\theta) &= \int_0^{\theta} A(\theta) d\theta = \int_0^{\theta} \sum_{v=1}^{\infty} \frac{2w_y i_c k_{sv} k_{yv}}{\pi} \sin v \theta d\theta \\ &= \sum_{v=1}^{\infty} \frac{2w_y i_c k_{sv} k_{yv}}{v\pi} \cos v \theta - \frac{2w_y i_c k_{yv}}{v\pi} \end{aligned}$$

省去与 θ 无关的常数项后

$$F(\theta) = \sum_{v=1}^{\infty} \frac{2w_y i_c k_{sv} k_{yv}}{v\pi} \cos v \theta$$

绕组线圈的磁动势由绕组电流以及绕组线圈结构决定,电流和绕组匝数决定了磁动势的幅值,而磁动势的空间分布取决于绕组在空间的结构分布情况。绕组函数实质上是指线圈流过单位电流的气隙磁势分布函数^[13]。因此去掉绕组中的电流因素,仅仅考虑绕组匝数及绕组线圈结构对某一参考点的磁动势分布规律的

影响,就可得到线圈的绕组函数^[14]。则图 1 所示线圈的绕组函数

$$F(\theta) = \sum_{v=1}^{\infty} \frac{2w_y k_{sv} k_{yv}}{v\pi} \cos v\theta \quad (4)$$

2.2 定转子坐标系的建立

用绕组函数法计算电感参数之前首先要建立定、转子坐标系,沿着定子内径建立定子坐标轴 θ ,坐标原点规定在编号为 1 的线圈轴线处;沿转子的外径建立转子坐标轴 α ,坐标原点设定在编号为 1 的转子回路的轴线处, γ_0 为起始时刻定子与转子坐标原点之间的初始相位角, γ 为转子的旋转角度(机械角度)。

2.3 电机转子偏心的种类

电机的转子偏心可以分为两种基本情况,如图 2 所示。图 2(a)是静态偏心,这种偏心状态定子与转子的轴心不在同一位置,转子以自身的几何轴心为旋转轴,最小气隙的位置不随着转子的转动而发生变化;图 2(b)是动态偏心,定子与转子的轴心不在同一位置,转子以定子的几何轴心为旋转轴做旋转运动,这种情况下,最小气隙的位置随着转子的转动而发生着变化。其他一些复杂的偏心情况都是这两种基本类型的组合。电机转子偏心的种类可概括为静态偏心、动态偏心和混合偏心^[15]。

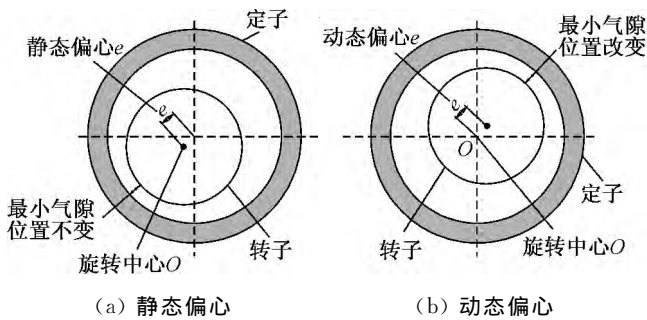


图 2 电机转子基本偏心类型

Fig. 2 Basic categories of air-gap eccentricity

2.4 定子绕组的电感参数计算

按本文设定的定子坐标系,由式 4 可得定子任意一个线圈的绕组函数

$$F_s(\theta) = \sum_{v=1}^{\infty} \frac{2w_y k_{sv} k_{yv}}{v\pi} \cos v(\theta - \theta_s) \quad (5)$$

式中: θ_s ——该线圈轴线的位置角。

根据定义,两线圈之间的电感为第一个线圈通过单位电流时所产生的与第二个线圈相交链的互感磁链,所以定子任意两线圈的电感

$$L_{s12} = lr \int_{-\pi}^{\pi} F_{s1}(\theta) F_{s2}(\theta) \lambda_{\delta}(\gamma, \theta) d\theta \quad (6)$$

式中: l ——为定子铁心的有效长度;

r ——定子内圆半径;

λ_{δ} ——单位面积的气隙磁导。

气隙磁导是一个与定转子气隙大小有关的常数

$$\lambda_{\delta}(\gamma, \theta) = \frac{\mu_0}{\delta(\gamma, \theta)}$$

式中: μ_0 ——真空磁导率;

$\delta(\gamma, \theta)$ ——电机的有效气隙长度。

静态偏心时: $\delta(\gamma, \theta) = \delta_0 [1 - k_s \cos \theta]$

动态偏心时: $\delta(\gamma, \theta) = \delta_0 [1 - k_s \cos(\theta - \gamma)]$

混合偏心时: $\delta(\gamma, \theta) = \delta_0 [1 - k_s \cos \gamma - k_d \cos(\theta - \gamma)]$

偏心度

$$k = \frac{e}{\delta_0} \times 100\%$$

式中: e ——转子偏心量。

本文仅考虑静态偏心问题,所以

$$\delta(\gamma, \theta) = \delta_0 [1 - k_s \cos \theta]$$

综上所述,式 6 可化为

$$L_{s12} = \frac{\mu_0 lr}{\delta_0} \int_{-\pi}^{\pi} \frac{F_{s1}(\theta) F_{s2}(\theta)}{1 - k_s \cos \theta} d\theta \quad (7)$$

计算定子绕组电感参数时,必须确定定子绕组各个线圈的轴线位置角 θ_s 。鼠笼式异步电机其定子三相绕组对称,定子绕组采用单层整距绕组时,每相有 p 个线圈组(p 为电机极对数),相邻的线圈组之间相隔 $6q$ (q 为每极每相槽数)个定子槽距 α_0 (机械角度)。以定子 a 相第 1 个线圈组中第 1 个线圈的轴线所在位置为定子坐标原点,则定子第 h 相($h=1, 2, 3$, 分别代表 a、b、c 三相)第 i 个线圈组中的第 j 个线圈轴线与坐标原点之间的位置角

$$\theta_s = \left[2q(h + 3i - 4) + j + \frac{y}{2} \right] \alpha_0$$

$$y = Q/2p$$

式中: y ——极距;

Q ——电机定子槽数。

依照此规律可以确定任意的定子线圈轴线的位置 θ_s ,从而利用式 5 计算出对应线圈的绕组函数,再将绕组函数带入式 7 并按照各线圈之间的连接规律即可以求得定子绕组的电感 L_s 。

2.5 转子回路的电感参数计算

鼠笼转子由 n 根均匀分布的导条构成,共有 $n+1$ 个独立回路,如图 3 所示。

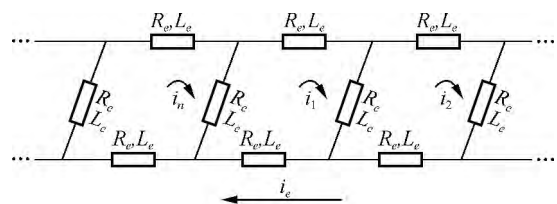


图 3 转子回路

Fig. 3 Rotor circuit

转子任意回路的绕组函数

$$F_r(\theta) = \sum_y \frac{2\omega_y k_{\omega y} k_{\gamma y}}{\pi \nu} \cos \nu(\theta - \theta_r + \gamma_0) \quad (8)$$

式中： θ_r ——该回路线圈轴线与第一个转子回路轴线之间的机械角度。

则任意两个转子回路之间的电感参数

$$L_{r12} = \frac{\mu_0 l r}{\delta_0} \int_{-\pi}^{\pi} \frac{F_{r1}(\theta) F_{r2}(\theta)}{1 - k_s \cos \theta} d\theta \quad (9)$$

按照本文所设定的转子坐标系,可得转子第 g ($g = 1, 2, 3, \dots, n$)回路轴线与转子第一个回路轴线之间的机械角 $\theta_r = 2\pi g/n$ 。利用式 8、式 9 可算得转子电感 L_r 。

2.6 定子和转子之间的电感参数计算

综合前述,定子任意一线圈与转子任意一回路之间的电感参数

$$L_{sr} = \frac{\mu_0 l r}{\delta_0} \int_{-\pi}^{\pi} \frac{F_s(\theta) F_r(\theta)}{1 - k_s \cos \theta} d\theta \quad (10)$$

将已经确定了定子和转子各个线圈的轴线位置参数代入式 5、式 8、式 10,即可求得定子与转子之间的电感参数 L_{sr} 与 L_{rs} 。

3 实例分析

将式 7、式 9、式 10 算得的电感参数代入式 1、式 2、式 3,即可得到高速电主轴转子静态偏心状态下的机电耦合动力学模型。该模型是一组含有时变系数的非线性微分方程组,可采用状态方程法来求解与仿真。将已经得到的微分方程组

$$\begin{cases} U = I \frac{dL}{dt} + L \frac{dI}{dt} \\ \frac{1}{2} I^T \frac{\partial L}{\partial \gamma} = J \frac{d\omega}{dt} + T_m \\ \frac{d\gamma}{dt} = \omega \end{cases} \quad (11)$$

应用 Matlab/Simulink 模块对电主轴进行仿真,依据已得到的电主轴数学模型,建立 Simulink 仿真模型。定子电流、转子电流、转子转速和转子电磁转矩是反映电主轴运行性能的重要参数,将它们作为仿真的输出量。对电主轴输入三相对称正弦电压,对其启动过程进行仿真分析。样机的参数^[16]如表 1 所示。

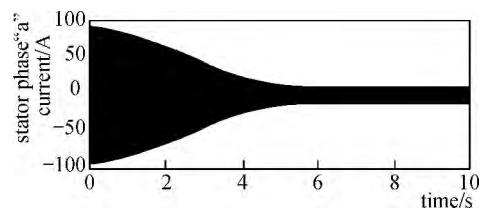
1) 不考虑偏心时让电主轴在额定状态下空载启动,仿真后的输出量定子 a 相电流、转子电流、转速与转矩的响应波形曲线如图 4 所示。由图 4 可以看出,不考虑偏心时电主轴在刚开始启动时定子电流和转子电流都比较大,超过了其额定电流 43.5A,这是因为开始启动时转速很低,旋转磁场以较大的相对速度切割转子导条,产生了较大的转子电动势。在 6s 左右时转速达到额定转速 12 000r/min,电主轴进入额定状态,转速很接

近同步转速,定子电流达到稳定的空载电流,而转子电流接近 0,在整个启动过程中电磁转矩由一个较大的初始值上升后又缓慢下降,到 6s 时达到稳定接近于 0。

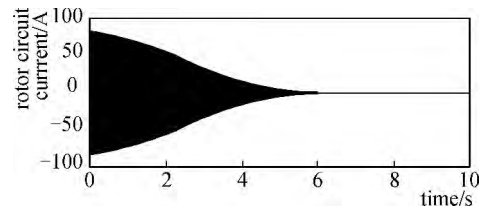
表 1 电主轴电机系统原始参数

Tab. 1 Original parameters of the high speed motorized spindle

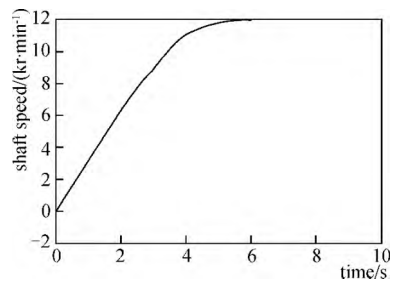
参数名	参数值
额定功率 P/kW	20
额定电压 U/V	380
额定转速 $n/(\text{kr} \cdot \text{min}^{-1})$	12
额定电流 I/A	43.5
定子电阻 R_s/Ω	0.22
转子电阻 R_r/Ω	0.90
级数	4
定子电流 I_s/A	46.2
转子电流 I_r/A	1 383.1
定子漏电抗 X_s/Ω	0.96
转子漏电抗 X_r/Ω	1.68
励磁电抗 X/Ω	19.03
转子惯量 $J/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	1.90



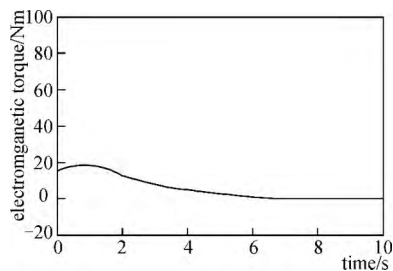
(a) 定子电流随运行时间的变化曲线



(b) 转子电流随运行时间的变化曲线



(c) 转速随运行时间的变化曲线

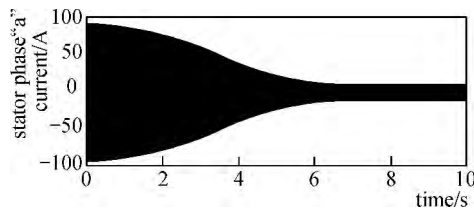


(d) 转矩随运行时间的变化曲线

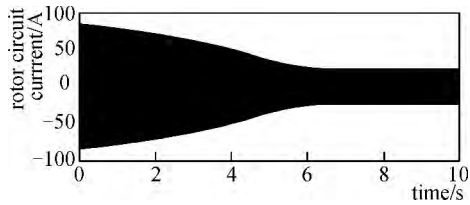
图 4 不考虑偏心时输出波形

Fig. 4 Output waveform without the eccentricity

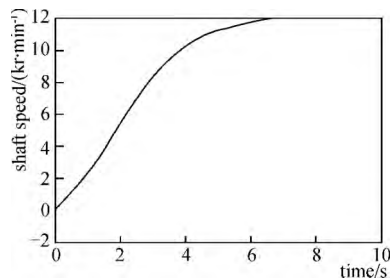
2) 假设转子存在 20% 的静偏心时, 让电主轴在额定状态下空载起动, 仿真后的输出量定子 a 相电流、转子电流、转速与转矩的响应波形如图 5 所示。



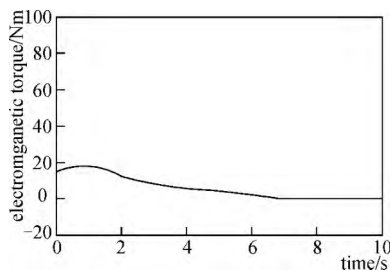
(a) 定子电流随运行时间的变化曲线



(b) 转子电流随运行时间的变化曲线



(c) 转速随运行时间的变化曲线



(d) 转矩随运行时间的变化曲线

图 5 存在 20% 静偏心时的输出波形

Fig. 5 Output waveform under 20% static eccentricity

由图 5 可看出, 考虑到偏心时电主轴在刚开始启动时定子电流和转子电流都比较大, 在 6.3s 左右时转速达到额定转速 12 000r/min, 电主轴进入额定状态, 定子电流达到稳定的空载电流, 但转子电流还保持一个较大的值。转矩也在 6.3s 左右时达到稳定接近于 0。

对比图 4 与图 5 不难发现, 静偏心的存在延迟了高速电主轴的启动过程, 由于静态偏心的存在导致气隙不对称, 延迟了气息中的磁动势波, 从而延迟了电主轴的启动。不考虑静态偏心时电主轴空载额定状态下转子电流很小, 可忽略; 而存在静态偏心量时电主轴进入额定状态后转子仍然存在较大的电流, 这会增加电机的稳态温升。

4 结论

1) 利用绕组函数法计算电主轴电机在静态偏心状态下的电感参数是可行的。

2) 转子静态偏心量的存在会使高速电主轴系统的启动时间增长。

3) 转子存在静态偏心量时, 电主轴空载启动达到额定状态后, 转子仍然存在着较大的电流。

参 考 文 献

- [1] 桂贵生, 何庆. 高速加工机理与关键技术的研究进展 [J]. 农业机械学报, 2004, 35(4): 192~195.
Gui Guisheng, He Qing. Mechanism of high speed machining and its key technology [J]. Transactions of the CSAM, 2004, 35(4): 192~195.
- [2] 严道发. 电主轴技术综述 [J]. 机械研究与应用, 2006, 19(6): 1~3.
Yan Daofa. Summarization of electronic spindle [J]. Mechanical Research & Application, 2006, 19(6): 1~3.
- [3] Brecher C, Spachholz G, Paepenmuller F. Developments for high Performance machine tool spindles [J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2007, 56(1): 395~399.
- [4] 孟杰, 陈小安, 合焯. 高速电主轴电动机—主轴系统的机电耦合动力学建模 [J]. 机械工程学报, 2007, 43(12): 160~165.
Meng Jie, Chen Xiaolan, He Ye. Electromechanical coupled dynamical modeling of high speed motorized spindle's motor-spindle subsystem [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(12): 160~165.
- [5] 孟杰. 高速电主轴动力学分析与实验研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2008.
Meng Jie, Dynamic analysis and experimental study on high speed motorized spindle [D]. Chongqing: Chongqing University, 2008.
- [6] 吕浪. 超高速磨削电主轴系统机电耦合参数优化及动态特性研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2006.
Lv Lang, Study on parameter optimization and dynamic characteristics of mechanical-electrical coupling of ultra-high speed grinding motorized spindle system [D]. Changsha: Hunan University, 2006.
- [7] Bert R J, Yung C S. Dynamics of machine tool spindle/bearing systems under thermal growth [J]. Tribology, 1997, 119(10): 875~882.
- [8] 陈小安, 张朋, 刘俊峰, 等. 高速电主轴多场耦合动力学特性研究 [J]. 振动工程学报, 2013, 26(3): 303~310.
Chen xiaolan, Zhang Peng, Liu Junfeng, et al. Multi-physical coupled dynamic characteristics of high speed motorized spindles [J]. Journal of Vibration Engineering, 2013, 26(3), 303~310.
- [9] 陈小安, 张朋, 合焯, 等. 高速电主轴功率流模型与热态特性研究 [J]. 农业机械学报, 2013, 44(9): 251~254.

(下转第 189 页)

大学学报(自然科学版), 2009, 6(4): 77~79.

Chen Yihou. Research on gap of roll-die of pellets plane-

die press [J]. Journal of Yangtze University (National

Science Edition), 2009, 6(4): 77~79.

Structure improvement and performance analysis of plat mold solid fuel forming machine

Wang Bin¹, Jiang Suqing¹, Zhou Jin²

(1. Jiangsu Vocational and Technical College of Finance & Economics, Huai'an, 223003, China;

2. Shandong Academy of Agricultural Machinery Sciences, Jinan, 250100, China)

Abstract: Aiming at the flat mold forming machine of short service life and low yield, it was improved. With the flat mold movement, by spring pressed and fixed in the barrel of the roller is used for processing biomass. Through a brief analysis, it shows that the improved to ensure flat mold forming machine has the advantages of simple structure, flexible manufacture, while it can improve the processing yield, reduce friction loss, prolong the service life and ensure the forming quality. It is provided ideas of improvement on the flat mold forming machine.

Keywords: biomass; flat mold; forming machine; roller; spring

(上接第 147 页)

Chen xiaoran, Zhang Peng, He Ye, et al. Power flow model of high speed motorized spindles and its thermal characteristics [J]. Transactions of the CSAM, 2013, 44(9): 251~254.

[10] 高景德, 王祥珩, 李发海. 交流电机系统的分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.

[11] 马宏忠. 电机状态监测与故障诊断[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.

[12] 戈宝军, 梁艳萍, 温嘉斌. 电机学[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.

[13] 刘振兴, 尹项根, 张哲. 基于绕组函数的鼠笼式异步电动机电感参数解析计算 [J]. 电力自动化设备, 2004, 24(6): 26~29.

Liu Zhenxing, Yin Xianggen, Zhang Zhe. Analytical calculation of inductances in squirrel cage induction motor based on winding function [J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 4(6), 26~29.

[14] 马宏忠. 感应电动机电感参数的准确工程计算及谐波的影响 [J]. 电工技术学报, 2004, 19(6): 63~68.

Ma Hongzhong. Accurate engineering calculate of induction motor inductance and the effects of space harmonics [J]. Transaction of China ElectroTechnical Society, 2004, 19(6): 63~68.

[15] 鲍晓华, 吕强. 感应电机气隙偏心故障研究综述及展望 [J]. 中国电气工程学报, 2013, 33(6), 93~100.

Bao Xiaohua, Lv Qiang. Review and Prospect of Air-gap Eccentricity Faults in Induction Machines [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(6): 93~100.

[16] 蔡海翔. 基于变频器性能匹配的高速异步型电主轴设计方法研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2006.

Cai Haixiang. The research on the methods of designing high speed inductive motorized spindle based on the matching characteristic of inverter [D]. Changsha: Hunan University, 2006.

Influence eccentricity of the rotor makes on the electromechanical coupled dynamical characteristics of high speed motorized spindle

Wu Zaixin, Zhang Yajun, Wang Baomin, Tian Xudong

(College of Electromechanical Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou, 730050, China)

Abstract: Some eccentricity always exists in the rotor in high speed motorized spindle because of processing or assembling error. The eccentricity can affect the electromechanical coupling characteristics of high motorized spindle system. Inductance parameters of the high speed motorized spindle in the condition of eccentric are calculated based on the method of winding function. On the basis of this, the electromechanical coupling mathematical model of the high speed motorized spindle in the condition of eccentric are developed and simulated. It is shown that the existence of the static eccentricity in the rotor delay the starting of the high speed motorized spindle. The mathematical model provides the theoretical basis for further research on the electromechanical coupled dynamical performance of high speed motorized spindle system.

Keywords: high speed motorized spindle; eccentricity of the rotor; electromechanical coupling