

平面磨床的电力拖动控制模型研究与仿真

平面磨床的电力拖动控制系统是整个磨床电气控制的核心,是保证磨床稳定运行的关键。传统的平面磨床电力拖动控制模型采用基于PID神经元自适应控制的电力拖动控制系统和基于模糊控制理论的电力拖动控制模型,在磨床控制电压骤升时,输出功率出现差拍谐振,电力拖动稳定性下降,控制性能不好。提出一种基于改进PID无差拍控制的平面磨床电力控制模型,采用SPIDNN变结构理论,构建控制学习网络,设计平面磨床电力拖动系统的电力传动控制电路和驱动电路,设置迟滞控制算子。采用自适应算法在线调整权值,实现对电力拖动控制系统的无阻尼非线性控制,得到平面磨床电力拖动控制系统的电动机组的运行状态的SPIDNN最佳控制状态输出。仿真结果表明,该算法进行平面磨床的电力拖动控制,具有较高的电压和功率输出增益,控制性能和品质较优,克服了迟滞控制和重复控制,展示了较好的应用价值。

郭晋秦/太原工业学院 张晓朋/国网山西省电力公司太原供电公司
乔俊福/中北大学电子测试技术国家重点实验室



郭晋秦/副教授

关键词/Keywords

平面磨床·
电力拖动·
控制模型·

平面磨床作为数控机床的一种,主要用砂轮旋转研磨工件以使其达到要求的平整度。平面磨床根据工作台形状可分为矩形工作台和圆形工作台两种,根据轴类的不同可分为卧轴及立轴磨床。平面磨床通过磨削工件平面成形,实现对工件的磨削,主要类型有卧轴矩台、卧轴圆台、立轴矩台、立轴圆台和各种专用平面磨床。但无论是哪一类平面磨床,平面磨床的电力拖动系统是整个机床控制系统的核心。平面磨床的电力拖动系统有交流双速电动机、交流调压调速系统及变频变压调速系统。随着电子元器件的高速发展,大功率高反压场效

应三极管IGBT的问世,平面磨床的电力拖动系统采用变频变压调速系统设计的方式,通过直流拖动和变频拖动,实现平面磨床的控制和运行^[1]。

平面磨床的电力拖动系统是一种多变量、非线性和强耦合的系统,其在运行过程中,受外电场环境作用下,呈现一种时变非线性特征,出现迟滞控制、重复控制。然而平面磨床的电力拖动控制系统是整个磨床电气控制的核心,是保证磨床稳定运行的关键,研究平面磨床电力拖动控制模型的优化设计受到广大专家学者的关注^[2]。传统的电力拖动控制模型主要有基于PID神经元自适应控制的电力拖动控制系统、基于虚拟样机技术的电力拖动控制模型和基于模糊控制理论的电力拖动控制等^[3]。其中,基于PID神经元自适应控制的电力拖动控制系统应用最为广泛,其中文献[4]提出一种采用自适应模糊控制技术的平面磨床电力拖动电动机控制方法,设计定电力拖动转速调节器,实现PID自适应电力拖动控制。算法在设计中没有考虑到超宽带外电场对电动机外部势能的作用,导致电力拖动系统的电动机输出转动惯量失真现象严重。文献[5]提出一种基于静止无功功率补偿器的非线性控制设计的磨床电力拖动控制模型,直线反馈线性化超导转动惯量设计,实现对电力拖动控制系统的无阻尼非线性控制。然而,该模型在磨床控制电压骤升时,输出功率出现差拍谐振,磨床的电力拖动稳定性下降,控制品质较差。

针对上述问题,本文提出一种基于

山西省高等学校科技创新项目(2013162),国家自然科学基金项目(61071193;60772102)。

改进PID无差拍控制的平面磨床电力控制模型,并进行仿真分析。首先构建平面磨床电力拖动系统的电动机机组结构模型,进行电力拖动系统结构设计与控制性能分析,得到平面磨床电力拖动系统的组成结构,设计PID无差拍控制算法,实现算法改进。基于平面磨床电力拖动系统的电力传动控制电路和驱动电路模型,进行控制算法仿真实验,验证了本文设计的模型的优越性能。

电力拖动系统结构设计与控制性能分析

1. 平面磨床电力拖动系统的组成结构模型

在分析平面磨床电力拖动控制模型和控制算法设计之前,首先给出平面磨床电力拖动系统的电动机机组系统结构和组成,用以指导电力拖动控制算法的设计。平面磨床的电力拖动系统主要由柴油发电机、中频发电机、拖动电动机、超导转子整流器、直流变换器和系统终端设备组成。系统组成示意图如图1所示。

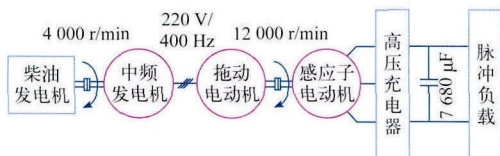


图1 平面磨床电力拖动系统的组成结构

图1中,柴油发动机带动中频发电机旋转发电,也可以通过交流电压直接供电;中频发电机的电能驱动电动机旋转,提供给系统中的各种控制器,实现磨床的功能控制;电动机带动感应子电动机旋转,电容电能将供给脉冲负载。

磨床的叶轮在运行中,选择SIMPLEC速度与压力耦合方式,动叶片固定安装在轮毂上,通过电力拖动,气流压力将使叶片产生弯曲应力,实现对工件的磨削。电力拖动系统的转子和平面磨床实现关联耦合,通过合理的电力拖动控制模型,提高叶轮的转动惯量,保证电力拖动电动机具有较大的旋转储能。电力拖动系统的转子和磨床叶轮示意图如图2所示。

平面磨床电力拖动系统的电力传动控制电路和驱动电路设计图如图3所示。

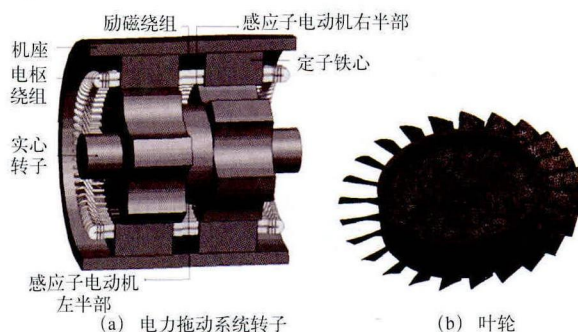


图2 电力拖动系统的转子和磨床叶轮耦合示意图

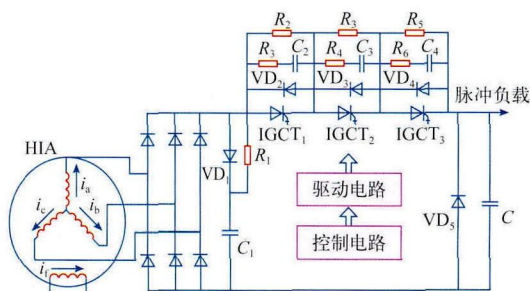


图3 平面磨床电力拖动系统的电力传动控制电路和驱动电路

通过上述平面磨床电力拖动系统设计和电路图分析可见,电动机组的目标电流为 i_s^* ,定子旋转电流误差为 $|\Delta i_{\max}^*|$,在机组供电过程中,随着实际电流矢量的波动变化。电力拖动系统采用双向四象限工作特性,采用双向流动补偿的思路,控制系统电路设计中, QS_2 同PNP发射级与基极之间 $U_{BE} = 0.7 \text{ V}$,整流电路发射端电流表示为

$$I_c = \frac{U_{BE}}{RQ_1 + RQ_2} \quad (1)$$

电路设计中,设定 RQ_1 和 RQ_2 分别为 175Ω ,由 QS_1 集电极发出的整流信号为 $I_c = 4 \text{ mA}$ 。 $SIG (IN+)$ 一端输出电流补偿周期分量。假设 L 为电力拖动发电机等效的放电电感, R 为发电机内电阻。通过上述系统电路设计,完成了平面磨床电力拖动系统的组成结构分析,并分析了系统工作原理,用以指导平面磨床的电力拖动控制算法模型的设计。

2. 平面磨床的电力拖动控制电路及稳定性分析

在上述设计的电路与系统中,以图3为基础,进一步对平面磨床的电力拖动控制系统进行稳定性分析。图3中,采用动态均压与静态均压技术,运算放大器具有高速 -3 dB 带宽: 80 MHz ($G =$

+1)。为了提高共模抑制比,设计低功耗放大器,电源电流3.3 mA(典型值),无反相。图3中,假设平面磨床电力拖动控制系统的发电机带整流谐振角为 ω_0 ,电流有效值 I_r ,电力拖动系统发电机带整流容性电流有效值为 I_s ,通过上述电路图分析,可以计算得到

$$\begin{aligned} I_s &= \frac{\omega_0 M_{ps} I_p}{R_s + Z_{sr}} \\ I_r &= \frac{\omega_0^2 M_{ps} I_p}{R_s + Z_{rl}} \\ I_o &= \frac{M_{rl} I_r}{L_o} \end{aligned} \quad (2)$$

通过对电动机转子的双闭环控制和速度调节,控制输出电流,生成目标电压,同时经过恒流源的加速度传感器传回的信号由IN+口进入运算放大器,得到电力拖动系统中的三相电流平衡状态方程为

$$\begin{aligned} u &= u_{eq} + u_0 = h_n(\varphi_a, \dot{\varphi}_a) + M_n \ddot{\varphi}_{ad} - \\ &M_n c e_2 - \text{sgn}(M_n) \bar{\rho}(t) \text{sgn}(s) \end{aligned} \quad (3)$$

式中, φ_a 为拖动电路的电容电压; M_n 为电流变化率; $\dot{\varphi}_{ad}$ 为电动势幅值; u_0 为电动机旋转角频率。在磨床电力拖动控制中,需要进行换流设计,换流过程电力拖动同步控制的反射阻抗 Z_{rl} , Z_{sr} , Z_{ps} 可以通过下式计算得出

$$\begin{aligned} Z_{rl} &= \frac{M_{rl} R_o}{L_1^2} \\ Z_{sr} &= \frac{\omega_0^2 M_{sr}^2}{\frac{M_{rl} R_o}{L_1^2} + R_r} \\ Z_{ps} &= \frac{\omega_0^2 M_{ps}^2}{Z_{sr}} \end{aligned} \quad (4)$$

考虑直流参考电压 u_{dc} 和平面磨床电力拖动配直流侧能量 e_u ,通过Neumann方法可以得到互感值,其中 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$,得到电力拖动系统耦合系数 $k = M / \sqrt{L_{l1} L_{22}}$ 。

从上述可见,传统的平面磨床电力拖动控制系统中,模型的功率传输效率较低,对此,本文建立包含直流输出性能的模型,建立在谐振点附近电流波形为近似正弦时的包含整流模型的精确

模型,得到系统控制结构的稳态工作点为

$$\begin{aligned} \omega_0 &= \frac{1}{\sqrt{L_{lx} C_x}} = 2\pi f_0 \\ Z_0 &= \sqrt{\frac{L_{lx}}{C_x}} = \omega_0 L_{lx} = \frac{1}{\omega_0 C_x} \end{aligned} \quad (5)$$

分析其控制性能,在磨床电力拖动运行过程中,受外电场环境作用,呈现一种时变非线性特征,出现迟滞控制、重复控制,需要进行控制算法改进。

电力拖动控制算法改进设计与关键技术实现

1. 改进的PID无差拍控制算法设计

针对传统算法的缺陷,本文提出一种基于改进的PID无差拍控制算法(SPIDNN),电力拖动系统控制系统设计中,选取SPIDNN作为学习网络,设计3层前向神经网络,为 $2 \times 3 \times 1$ 结构。它的输入层有2个神经元,接收外部输入信息;它的隐含层有3个神经元,分别为比例元、积分元和微分元,完成比例、积分和微分运算;它的输出层只有1个神经元,完成控制规律的综合和输出,其结构如图4所示。

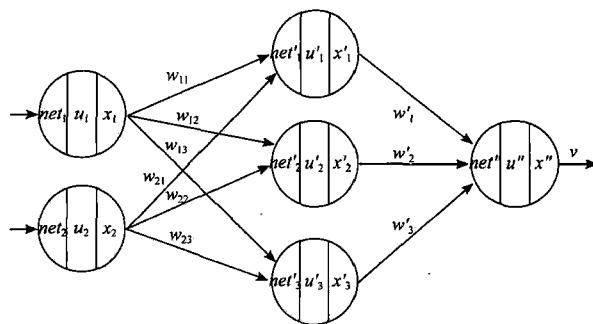


图4 改进的PID无差拍控制SPIDNN的结构形式

图4中,在任意时刻 t ,对于神经网络的第 j 个神经元,其总输入 net_j 等于与其相连的各支路输出量 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 分别乘上权重值 $w_{1j}, w_{2j}, \dots, w_{nj}$ 后的总和,考虑直流参考电压 u_{dc} 和GIS配直流侧能量 e_u ,利用离散傅里叶变换计算控制模型中两相换流平均值为

$$E = \sum_{p=1}^n E_p = \frac{1}{l} \sum_{p=1}^n \sum_{k=1}^l [r_p(k) - y_p(k)]^2 \quad (6)$$

式中, E_p 为输出电压平均值; $r_p(k)$ 为电力拖动控制

模型的有功损耗； $y_p(k)$ 为两相换流的频率。得到无差拍控制磁链控制方程为

$$W(n+1)=W(n)-\eta\frac{\partial E}{\partial W}+\partial\Delta W(n)\tag{7}$$

结合使用转速控制逆变器对电力拖动控制模型进行输出功率自适应调整，得到平面磨床的转速控制器使用零阶保持器设计传递函数为

$$w'_{sjh}(n_0+1)=w'(n_0)-\eta'_{sjh}\frac{\partial J}{\partial w'_{sjh}}\tag{8}$$

式中， $w'(n_0)$ 为 n_0 时刻采样电流； η' 为系统滞后拍SPIDNN模糊控制系数； $w'_{sjh}(n_0+1)$ 为磨床电力拖动转子刷新时刻的无差拍控制输出。由此实现了平面磨床的电力拖动控制的无差拍控制。

2. 平面磨床电力拖动无差拍控制关键技术

基于上述设计的改进的PID控制算法，得到差拍控制SPIDNN结构，实现对电力拖动控制算法的改进，为最终实现对电力拖动系统的无差拍控制，提高输出功率和系统的稳定性，设置迟滞控制算子，采用自适应算法在线调整权值，取

$$\begin{aligned}\hat{\omega}&=\eta\left|sM_n^{-1}\right|\sigma(\varphi_a,\dot{\varphi}_a)\\ \eta&=\left|M_n^{-1}\right|(\varepsilon_0-\varepsilon_1)>0\end{aligned}\tag{9}$$

为实现对电力拖动控制系统的无阻尼非线性控制，定义Lyapunov函数，对平面磨床的电力拖动无差拍控制系统的输出功率增益最大化

$$V=\frac{1}{2}s^2+\frac{1}{2}\eta^{-1}\tilde{\omega}^T\tilde{\omega}\tag{10}$$

在电力拖动系统发电机相电压一定的前提下，固定输入层至隐含层的权值 $\omega_{ij}(i=1,2;j=1,2,3)$ ，仅调节隐含层至输出层的权值 $\omega'_j(j=1,2,3)$ ，将网络的输入设定为 $x=[\varphi_a\ \dot{\varphi}_a]$ ，得到电容电压的极限值为发电机线电压的幅值，构建平面磨床电力拖动控制系统的发电机组的运行状态的SPIDNN最佳控制状态输出表达式为

$$\begin{aligned}\frac{dw}{dt}&=\frac{w_\infty(V)-w}{\tau_M(V)}\\ w_\infty(V)&=\frac{1}{1+e^{-0.1(V+35)}}\\ \tau_M(V)&=\frac{400}{3.3e^{0.05(V+35)}+e^{-0.05(V+35)}}\end{aligned}\tag{11}$$

式中，差分电压为 ΔV ； E 为SPIDNN控制器的输出比例因子。通过上述控制算法设计，实现了对平面磨床的电力拖动控制算法的改进，提高控制准确度，提高功率增益，改进平面磨床的电力拖动性能。

仿真实验与控制性能测试分析

为了验证本文提出的基于改进的PID无差拍控制SPIDNN算法在平面磨床电力拖动控制中的性能，进行仿真实验。仿真建立在Matlab Simulink软件基础上，设计控制参数： $N_p=N_s=20$ ， $f=20.5\text{ kHz}$ ， $C_p=C_s=0.57\text{ }\mu\text{F}$ 。平面磨床的电力拖动系统中，使用了12 V、7.2 A·h的蓄电池作为主供电系统，再通过两个DC-DC电源转换模块分别将12 V电压转换为5 V和 $\pm 15\text{ V}$ 电源，电路内部再通过LM1117-33将5 V电压转换为3.3 V电压。平面磨床电力拖动系统的电力传动控制电路的转子模型线圈距离100 mm，输入电压24 V。平面磨床的电力拖动系统定子电阻为 $R_s=0.734\text{ }\Omega$ ，转子电阻 $R_r=0.740\text{ }\Omega$ ，以上述参数模型为基础，对设计的平面磨床电力拖动系统的电力传动控制电路进行测试，得到电路系统的输出电流和电压波形如图5所示。通过定量测试，得到不同的控制频率下的输入信号和输出信号测试结果如下表所示。

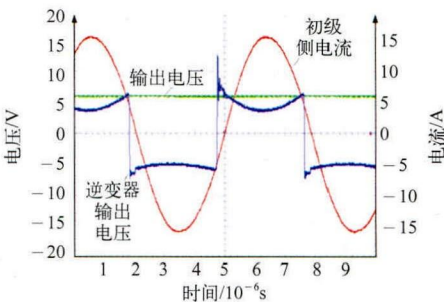


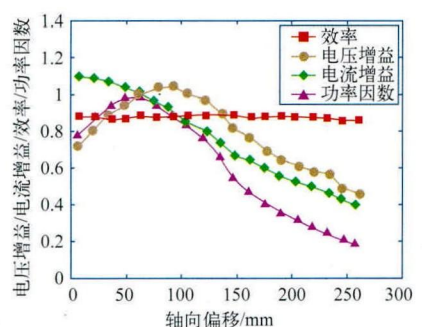
图5 控制电路系统测试输出电流/电压波形

表 平面磨床电力拖动系统的电力传动控制电路测试结果

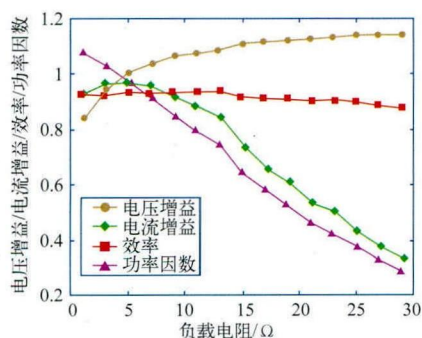
测试项目	测试值							
频率/Hz	10	20	25	30	35	40	50	60
输入信号	20	20	20	20	20	20	20	20
输出信号	1.80	1.89	1.95	2.00	2.01	1.80	1.80	1.55

从图5和上表的测试结果可见，采用本文设计的电力拖动控制电路，控制调理电路的低通截止频率为80 Hz，中心频率为40 Hz，电路放大倍数

为100倍。说明本文设计的电力控制电路具有较大的输出增益,满足设计需求,为实现电路拖动控制模型的改进奠定了基础。以此为基础,对平面磨床的电力拖动控制模型进行仿真测试,采用本文算法和传统的PID控制算法,在相同条件下,进行电力拖动控制实验,以电力拖动系统的电压增益、电流增益、控制效率和功率增益为性能测试指标,得到不同的磨床轴向距离、电力拖动带载能力等不同控制指标下的平面磨床电力拖动控制系统的输出结果如图6所示。



(a) 磨床轴向距离



(b) 电力拖动带载能力

图6 控制性能输出

分析图6结果可见,采用本文设计的控制模型,平面磨床的电力拖动控制耦合器对于偏心偏移有很好的适应性,偏心100 mm时,电压增益仍稳定在5.8%。通过采用无差拍PID控制,通过SPIDNN谐振频率进行动态调整,以跟踪最佳的输出功率因数,提高了输出的电流增益、电压增益和功率增益,控制效率提高。而传统PID控制模型,在磨床控制电压骤升时,输出功率出现差拍谐振,磨床的电力拖动稳定性下降,控制品质较差。本文改进的控制算法能有效避免上述缺陷,

通过分析图6b结果可以看出,本文算法在较大的电力拖动负载范围内,能实现稳定的电压输出,并且实验控制准确度在偏芯情况下仍保持90%以上,展示了较好的控制性能。

结束语

平面磨床的电力拖动系统是一种多变量、非线性和强耦合的系统。其在运行过程中,受外电场环境作用下,呈现一种时变非线性特征,导致平面磨床电力拖动控制系统迟滞控制和重复控制,研究平面磨床电力拖动控制模型的优化设计具有重要意义。本文提出一种基于改进PID无差拍控制的平面磨床电力控制模型,以SPIDNN作为学习网络,设计平面磨床电力拖动系统的电力传动控制电路和驱动电路,结合使用转速控制逆变器对电力拖动控制模型进行输出功率自适应调整,得到平面磨床电力拖动控制系统的电SPIDNN最佳控制状态输出。通过仿真实验得出,本文设计的控制电路和控制模型,具有较高的电压和功率输出增益,控制性能和品质较优,在平面磨床电气自动化领域具有较高的应用价值。

参考文献

- [1] 王海峰,陆军.复杂电力设备突发故障诊断方法研究与仿真[J].计算机仿真,2013,30(3):127-129.
- [2] 李寿强.基于模糊神经网络电力系统无功功率控制研究[J].电气应用,2012,31(8):32-34.
- [3] 朱珍.基于神经网络集成分类器预处理的支持向量机分类算法[J].科技通报,2013,29(4):26-30.
- [4] 辛清明,于克训,袁满,等.感应子发电机带整流大容性负载的瞬态特性分析[J].中国电机工程学报,2014,34(24):4109-4117.
- [5] 任章鳌,于克训,姜振袖,等.同极性感应子发电机整流容性负载特性的一种简化平均值分析方法[J].电工技术学报,2011,26(6):113-128.

(收稿日期:2014-10-25) EA