

变摩擦力下板带轧机垂扭耦合振动控制技术

曾家谦

(贵州建设职业技术学院, 贵阳 550018)

摘要: 当前对板带轧机垂扭耦合振动的控制过程未考虑变摩擦力的影响, 无法对振动特性进行准确分析, 导致控制效果不理想; 提出一种变摩擦力下基于振动摩擦模型的板带轧机垂扭耦合振动控制技术; 将垂扭耦合振动参数作为输入向量, 理想状态下变摩擦力作为输出向量, 确定垂扭耦合振动参数; 采用遗传算法对已确定的最优垂扭耦合振动参数进行辨识, 构建振动摩擦模型, 完成对垂扭耦合振动特性的准确分析, 解决控制过程中的变摩擦力影响问题; 利用振动摩擦模型对系统位移响应和频域响应振动特性进行控制, 实现板带轧机垂扭耦合振动的控制; 与传统控制技术进行对比, 得出实验结果, 所提控制技术控制精度可达 98%, 能够减小控制过程的变摩擦影响, 可对振动特性进行准确分析, 大大提高了控制精度。

关键词: 板带轧机; 垂扭耦合; 振动控制; 变摩擦力; 振动特性

Control Technology of Vertical and Torsion Coupling Vibration of Strip Mill under Variable Friction

Zeng Jiaqian

(Guizhou Polytechnic College of Construction, Guiyang 550018, China)

Abstract: At present, the control process of the vertical and reverse coupled vibration of the strip mill does not consider the influence of the variable friction force, and the vibration characteristics cannot be accurately analyzed, resulting in unsatisfactory control effect. A vertical and vibration coupled vibration control technology for strip mill based on vibration friction model is proposed. The vertical-torsional coupled vibration parameter is taken as the input vector, and the frictional force is used as the output vector under ideal conditions to determine the vertical-torsional coupled vibration parameters. The genetic algorithm is used to identify the optimal parameters of the coupled vibration and vibration, and the vibration friction model is constructed to accurately analyze the coupled vibration characteristics of the vertical and torsion, and to solve the problem of variable friction in the control process. The vibration and friction model is used to control the system displacement response and the frequency domain response vibration characteristics to realize the control of the vertical and reverse coupled vibration of the strip mill. Compared with the traditional control technology, the experimental results are obtained. The control precision of the proposed control technology can reach 98%, which can reduce the variable friction effect of the control process. It can accurately analyze the vibration characteristics and greatly improve the control precision.

Keywords: strip mill; vertical and twist coupling; vibration control; variable friction; vibration characteristics

0 引言

板带轧机的振动问题不但影响着产品的质量, 而且会危害设备的安全运行, 机电传动系统是轧机装备中的重要部分, 对该系统的垂扭耦合振动进行控制, 是保证板带轧机生产产品质量的关键因素^[1]。板带轧机的振动形式主要为机电传动系统的扭转振动和轧机基座的垂直振动, 两者之间不可避免的存在耦合特性, 因此, 对板带轧机电系统垂扭耦合振动进行控制, 具有重大的意义^[2]。传统轧机垂扭耦合振动控制技术在机电传动系统垂扭耦合振动进行控制过程中, 虽然采用了智能控制特性技术对摩擦力进行识别, 达到了控制目的, 但是没有考虑到轧制界面间存在变摩擦力, 无法对振动特性进行有效控制^[3]。为此,

提出一种变摩擦力下板带轧机垂扭耦合振动控制技术。

1 板带轧机垂扭耦合振动控制技术的实现

板带轧机中安装有机电传动系统, 机电传动系统是一个比较复杂系统, 它是结合刚性机械系统动力学分析设计而成的^[4]。板带轧机中的垂扭耦合振动是影响机电传动系统驱动力的关键因素, 因此要对板带轧机垂扭耦合振动进行有效控制。通过构建振动摩擦模型对垂扭耦合振动进行控制。在建模前需充分考虑振动摩擦参数的辨识度和操作性, 使得构建的振动摩擦模型能够满足复杂的条件。

振动摩擦模型即是板带轧机的机电传动系统垂扭耦合振动受到摩擦力转换为速度函数, 将垂扭耦合振动摩擦力转换为速度与位移函数, 该模型不但能够解决传统控制技术受变摩擦力影响的问题, 还能完成对振动特性的准确分析, 从而实现板带轧机垂扭耦合振动的有效控制。考虑振动摩擦模型自身自由度和弹性负载, 需确定垂扭耦合振动参数, 并在实际操作中实现对垂扭耦合振动参数的辨识。

收稿日期: 2018-08-03; 修回日期: 2018-08-24。

作者简介: 曾家谦(1960-), 男, 贵州黔西人, 大学本科, 讲师, 主要从事机械工程设计及材料应用方向的研究。

1.1 变摩擦力下板带轧机垂扭耦合振动参数分析

在变摩擦力的作用下，分析板带轧机垂扭耦合振动因素，更加具有可靠性，也更加符合实际情况，下图为变摩擦力下板带轧机垂扭耦合振动模型。

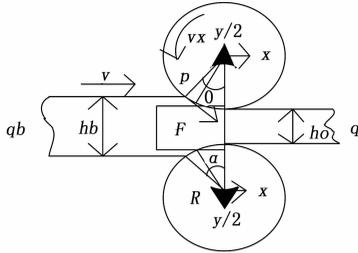


图 1 变摩擦力下板带轧机垂扭耦合振动模型

其中：\$q\$ 和 \$qb\$ 分别为稳态时入口和出口张力；\$hb\$ 和 \$h_0\$ 分别为稳态时入口和出口厚度；\$x\$ 和 \$y/2\$ 分别为水平和垂直振动位移；\$F\$ 为变摩擦力；\$v_x\$ 为轧辊转速；\$v\$ 为轧件变形速度；\$R\$ 为轧辊半径；\$P\$ 为轧制力；\$\alpha\$ 为咬入角；\$hf = h_0 + y\$ 为振动时轧件出口厚度。此时轧制界面间的摩擦力为：

$$F\mu = \mu'p \tag{1}$$

采用如下常见的变摩擦力形式：

$$\mu = a\exp(-bv + c) \tag{2}$$

其中：\$a, b, c\$ 为待定常数，与系统的润滑状态、润滑油的黏度和浓度有关。

板带轧机垂扭耦合振动因素在变摩擦力下，得到垂扭耦合振动参数为：

$$h = aF\mu + b\frac{qb}{q} + cv \tag{3}$$

将垂扭耦合振动参数作为输入向量，理想状态下变摩擦力作为输出向量，以此为基础确定模型参数^[5]。该阶段全部数据都可用来描述变摩擦力对板带轧机电传动系统造成动态影响。选取不同垂扭耦合振动参数进行等步长取值，作为输入到模型之中的向量，以此为基础可在后续对模型进行计算，将变摩擦力进行方差处理，作为输出向量对处理结果进行输出。遵循各垂扭耦合振动参数对系统影响，通过不断缩小步长取值达到最优垂扭耦合振动参数确定目的。

1.2 垂扭耦合振动参数的辨识

采用遗传算法对已经确定好的最优垂扭耦合振动参数进行辨识，具体辨识过程如图 2 所示。

由图 2 可知：该辨识需要经过编码、群体生成、检测评估、选择、交叉、变异等步骤来实现。其中编码是将空间中摩擦鬃毛变量 \$x\$ 作为遗传过程表现形式，从表现形式到基因形式一一映射统称为编码。采用遗传算法进行编码之前，需先将空间中数据表示成基因型数据，并将不同数据进行串联，组合成不同点；将编码过程所产生串联数据结构组织成一个群体，以该群体作为初始群体进行迭代计算；设置迭代次数，对适应度值进行检测并评估^[6]。利用适应度来度量群体，使群体中每个个体都有可能接近于最优解，将个体最优解遗传到下一代概率将会增加；选择父

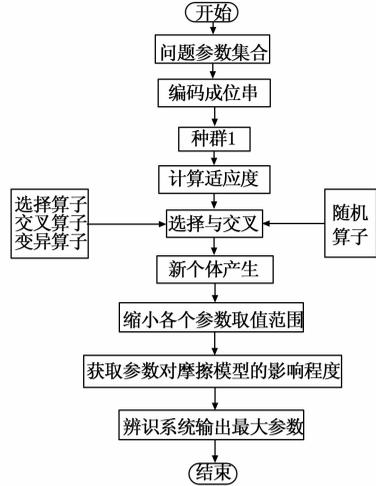


图 2 垂扭耦合振动参数辨识流程

代群体中的单一个体遗传到下一代，使用交叉运算，对两个配对染色体进行部分基因交换，进而形成两个新的个体。还可将个体染色体进行编码，对基因进行交替处理，进而形成一个新的个体^[7-8]。根据上述遗传算法，使用 MATLAB 工具箱，编辑适应度函数，缩小各个垂扭耦合振动参数取值范围，对振动特性进行准确分析，获取振动特性对振动摩擦模型构建精度的影响程度，进而辨识出对板带轧机电传动系统的输出影响最大的垂扭耦合振动参数。

1.3 变摩擦力下垂扭耦合振动摩擦模型的构建

结合 1.1 垂扭耦合振动参数确定的结果和 1.2 垂扭耦合振动参数辨识的结果，同时采用弹性鬃毛模型构建原理^[9]，完成垂扭耦合振动摩擦模型的构建。图 3 为板带轧机垂扭耦合振动模型。

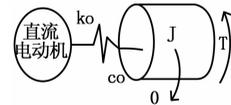


图 3 为板带轧机垂扭耦合振动模型

\$k_0\$ 为等效刚度，\$c_0\$ 为等效阻尼，\$T\$ 等效振动时间，\$\theta\$ 为旋转角度，\$J\$ 为轧机设备。

将板带轧机电传动系统与外界物质基础表面视为具有随机行为弹性鬃毛，该模型是基于鬃毛平均变形构建的振动摩擦模型，其数学表示为：

$$\frac{qx}{qt} = k_0 - \frac{c_0x}{g(v)} |v| \tag{4}$$

$$f_{\text{摩}} = \alpha_1 x + \alpha_2 \frac{qx}{qt} + \alpha_3 v \tag{5}$$

$$g(v) = hf_1 + (f_2 - f_1)T^{-c_1 v^2} \tag{6}$$

该模型是由公式 (4) ~ (6) 组成的，其中公式 (1) 表示鬃毛变量 \$x\$ 的平均变形状态，\$t\$ 为变形时间，\$v\$ 为变形速度，\$\alpha_1\$ 为鬃毛刚度，\$g(v)\$ 为摩擦效应；公式 (5) 表示系统受到的摩擦力，\$\alpha_2\$ 和 \$\alpha_3\$ 分别表示微观阻尼和黏性阻尼系数；公式 (6) \$f_2\$ 位静摩擦力，是由弹性变形所产生的，\$f_1\$ 为库伦摩擦力，是由正压力函数产生的，\$v_0\$ 是摩擦效应常数，因

此对变形速度 v 取定值时，公式 (4) 可简化成：

$$\frac{qx}{qt} = \frac{\alpha_1 x}{g(v)} |v| \quad (7)$$

将公式 (7) 代入公式 (5) 可得：

$$f_{\text{摩}} = \alpha_1 x + \alpha_2 \frac{\alpha_1 x}{g(v)} |v| + \alpha_3 v \quad (8)$$

通过公式 (8) 可看出，变形速度 v 对 $f_{\text{摩}}$ 影响较大，由此可知该振动摩擦模型不但可描述基本振动摩擦行为，也可描述板带轧机电传动系统的振动特性，准确对振动特性进行准确分析，最大程度地减小控制过程受变摩擦力的影响。

1.4 基于振动摩擦模型的垂扭耦合振动的控制

根据上述构建的振动摩擦模型，可对机电传动系统中垂扭耦合振动特性进行准确分析，以降低控制过程中的摩擦影响。图 4 为垂扭耦合振动控制结构图。

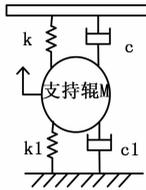


图 4 为垂扭耦合振动控制结构图

将振动摩擦模型代入到板带轧机电传动系统之中，可得到包含非线性摩擦属性的伺服子系统^[10]，具有稳定且高精度传动的性能，其中稳定性是保持系统正常工作前提，因此，所构建的振动摩擦模型能够确保板带轧机电传动系统在稳定运行的基础上实现对垂扭耦合振动的有效控制。

针对系统垂扭耦合振动位移响应控制，需从系统垂扭耦合振动阶段响应位移和方波信号响应位移两方面进行。

1.4.1 垂扭耦合振动阶段响应位移

依据垂扭耦合振动阶段响应位移振动特性，需设置如图 5 所示的响应位移图。

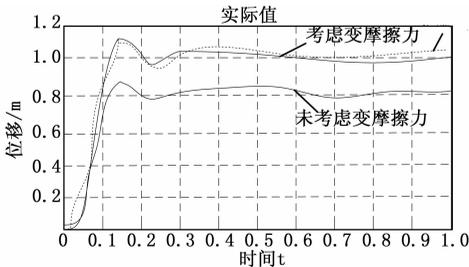


图 5 垂扭耦合振动阶段响应位移图

从图 5 中可看出，在考虑变摩擦力和未考虑变摩擦力垂扭耦合振动阶段响应位移总体呈上升趋势，并在时间为 0.3 t 时，系统处于稳定状态，在考虑变摩擦力情况下，阶段性响应位移基本稳定在 1.0 m 左右，在未考虑变摩擦力情况下，阶段性响应位移基本稳定在 0.8 m 左右，正是考虑了变摩擦力，使新模型下的响应位移略大，这与系统摩擦力产生阻碍相吻合，与实际值更加吻合。当时间为 0.15 t

时，在未考虑变摩擦力情况下，阶段性响应位移达到最大值，为 0.9 m；在考虑变摩擦力情况下，阶段性响应位移达到最大值，为 1.1 m；从该曲线中可看出在考虑变摩擦力下对于垂扭耦合振动的控制阶段响应位移与实际值更加吻合，具有很高的实际意义。

1.4.2 方波信号响应位移

依据方波信号响应位移振动特性，需设置如图 6 所示的响应位移图。

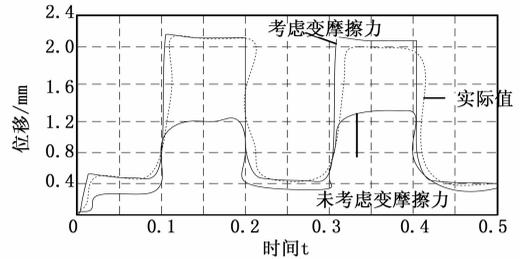


图 6 方波信号响应位移图

从图 6 中可看出，方波信号响应位移总体呈上升→平稳→下降趋势。当时间在 0.1 t 左右时，未考虑变摩擦力情况下，方波响应位移达到最大值，为 1.1 mm；在考虑变摩擦力情况下，方波响应位移达到最大值，为 2.2 mm，与实际值更加吻合；当在 0.1~0.2 t 范围内时，方波响应位移达到稳定状态；当时间在 0.2 t 左右时，方波响应位移开始下降，并在时间为 0.223 左右时，方波响应位移达到了最小值。同理，第二次方波信号也呈现上升→平稳→下降趋势。从该曲线中可看出考虑变摩擦力的引入对信号跟踪能力较强，与上述描述的阶段性信号响应实际情况相符合，直观反应了考虑变摩擦力对垂扭耦合振动进行控制更具有实际应用性。

综合系统垂扭耦合振动阶段响应位移和方波信号响应位移曲线分析结果可知，引入考虑变摩擦力，大大提高了对跟踪信号反应能力，也很好说明所提的垂扭耦合振动控制技术的实际应用性。

2 实验结果与分析

为了验证所提的变摩擦力下板带轧机垂扭耦合振动控制技术的有效性，进行了一次实验。针对构建的振动摩擦模型对板带轧机电传动系统中振动特性分析的准确性进行测试，采用来自某大学轧机实验室的 200 台轧机作为实验设备，表 1 为 200 台轧机平均参数值。

表 1 轧机平均参数

参数	取值	参数	取值
m	13.4t	K_0	5.32e9N/m
h	0.0152m	C_0	8.3e9N·s/m
qf	5.6Mpa	μ	0.36
q	3.6Mpa	R	0.45m

通过全数字调速系统对直流电机进行传动，并对轧机

机电传动速度进行控制，整个轧机系统有效结合，相互协作，可实现闭环板带轧机的闭环控制。

2.1 实验过程及结果

根据上述实验环境，对研究系统位移响应和频域响应两方面对变摩擦力下机电传动系统振动特性进行控制。将传统位移响应结果与引入振动摩擦模型的位移响应结果进行对比，查看是否满足实际位移响应标准，并对结果进行分析，只有响应结果符合标准，才能对其垂扭耦合振动特性进行控制具体对比内容如下所示：

2.1.1 位移响应振动特性控制的验证分析

根据上述研究内容可知，针对系统位移响应振动特性，需从系统垂扭耦合振动阶段响应位移和方波信号响应位移两方面进行控制。为了使实验结果更具有可靠性，分别采用传统方法与引入振动摩擦模型方法对变摩擦力下板带轧机电传动系统垂扭耦合振动阶段响应位移振动特性的控制结果进行对比，结果如图 7 所示。

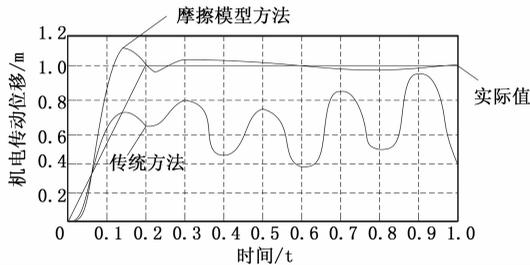


图 7 不同方法垂扭耦合振动阶段时间响应振动特性控制结果

由图 7 可知：当时间为 0.15 t 时，采用传统方法机电传动位移达到 0.7 m，而采用摩擦模型机电传动位移达到 1.15 m，实际值为 0.9 m；当时间为 1.0 t 时，采用传统方法机电传动位移达到 0.4 m，而采用摩擦模型机电传动位移达到 1.0 m，实际值为 1.0 m。由此可知，引入摩擦模型，使系统在该模型下的响应位移略大，这与系统摩擦力产生的阻碍相吻合。从对比结果可知，采用传统方法对机电传动位移值与实际值相差较大，而采用摩擦模型机电传动位移值与实际值相差较小。因此，采用摩擦模型方法对板带轧机电传动系统垂扭耦合振动阶段响应位移振动特性分析结果较为准确，实现的控制效果较好。

采用传统方法与引入振动摩擦模型方法对变摩擦力下板带轧机电传动方波信号响应位移振动特性控制结果进行对比，结果如图 8 所示。

由图 8 可知：当时间为 0.09 t 时，采用传统方法和摩擦模型机电传动位移与实际值一致，可达到 0.5 mm；当时间为 0.11 t 时，采用传统方法机电传动位移达到 0.7 mm，而采用摩擦模型机电传动位移与实际值一致，可达到 2.2 mm；当时间为 0.4 t 时，采用传统方法机电传动位移达到 0.95 mm，而采用摩擦模型机电传动位移与实际值一致，可达到 2.1 mm。由此可知，变摩擦力下，采用传统方法对机电传动位移值与实际值相差较大，而采用摩擦模型机电传

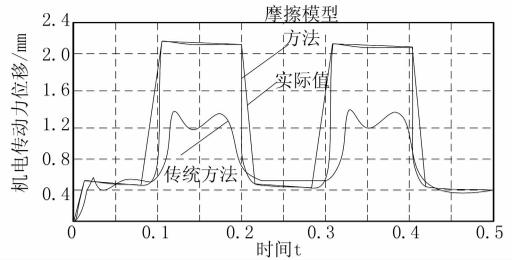


图 8 不同方法方波信号响应位移移动特性控制结果

动位移值与实际值相差较小。因此，采用摩擦模型方法对板带轧机电传动系统方波信号响应位移移动特性分析结果较为准确，能够有效的对垂扭耦合振动进行控制。

2.1.2 频域响应振动特性控制的验证分析

根据上述研究内容可知，针对频域响应振动特性，需从主要元件数学模型角度出发，将传统方法与引入振动摩擦模型方法对板带轧机电传动频域响应振动控制结果进行对比分析，结果如图 9 所示。

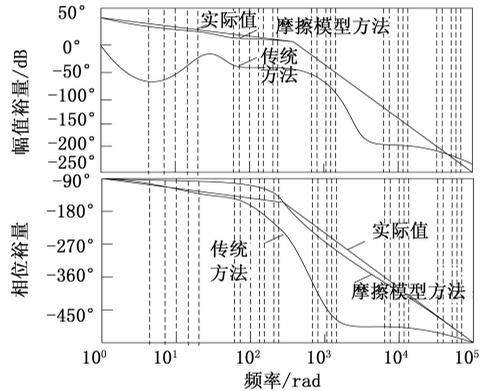


图 9 不同方法频域响应振动特性控制结果

由图 9 可知：当运行频率为 10^1 rad 时，传统方法相位裕量与实际值一致，都为 -100° ，而振动摩擦模型方法幅值裕量与实际值相差较小，分别为 25 dB 和 24 dB；当运行频率为 10^2 rad 时，振动摩擦模型方法相位裕量与实际值一致，都为 -110° ，传统方法相位裕量与实际值相差较大。而振动摩擦模型方法幅值裕量与实际值一致，都为 5 dB；当运行频率为 10^3 rad 时，振动摩擦模型方法相位裕量与实际值相差较小，分别为 -270° 和 -210° ，传统方法相位裕量已经达到 -490° ，与实际值相差较大。而振动摩擦模型方法幅值裕量与实际值一致，都为 -20 dB；当运行频率为 10^4 rad 时，振动摩擦模型方法相位裕量与实际值相差较小，分别为 -380° 和 -370° ，传统方法相位裕量已经达到 -500° ，与实际值相差较大。而振动摩擦模型方法幅值裕量与实际值一致，都为 -120 dB；当运行频率为 10^5 rad 时，振动摩擦模型方法相位裕量与实际值一致，都为 -520° ，传统方法相位裕量已经达到 -530° ，与实际值相差较大。而振动摩擦模型方法幅值裕量与实际值一致，都为 -250 dB。由此可知，采用传统方法对机电传动相位裕量与幅值裕量控制结果与实际值对比相差较大，而采用振动摩擦模型机电传动相位裕量与

幅值裕量控制结果与实际值对比相差较小, 甚至基本一致。因此, 采用摩擦模型方法对板带轧机电传动系统频域响应振动特性的控制结果较为准确。

2.2 实验分析及结论

通过对系统垂扭耦合振动阶段响应位移和方波信号响应位移两方面对位移响应振动特性进行控制, 可得出如下结论: 在变摩擦力下, 采用振动摩擦模型方法对板带轧机电传动系统垂扭耦合振动阶段响应位移与方波信号响应位移振动特性的控制结果较为准确。

通过对系统频域响应振动特性控制结果进行验证分析, 可得出如下结论: 在变摩擦力下, 采用振动摩擦模型机电传动相位裕量与幅值裕量控制结果与实际值对比相差较小, 甚至基本一致。因此, 在变摩擦力下, 采用摩擦模型方法对板带轧机电传动系统垂扭耦合振动控制效果较为理想。

3 结论

在变摩擦力下, 采用振动摩擦模型对板带轧机电传动系统垂扭耦合振动进行控制, 改善了传统方法受到摩擦影响, 无法准确分析振动特性, 导致控制结果不准确的问题, 并作出了如下创新性研究: 采用遗传算法对大量传动数据进行辨识, 分析了不同参数对系统传动影响; 研究由于振动摩擦对系统所引起的振动特性。通过实验验证结果可知, 该方法对系统振动特性控制结果较为准确, 只有对垂扭耦合振动特性进行准确的准确分析, 才能减少控制过程受到的摩擦影响, 从而实现垂扭耦合振动的有效控制。

虽然在变摩擦力下采用振动摩擦模型能够准确分析出系统垂扭耦合振动的振动特性, 但仍有轧机传动系统自身特性对垂扭耦合振动产生变化情况有待进一步研究完善,

(上接第 92 页)

制异步电机的矢量。由于 PWM 传感器与逆变器侧在结构上有很大的相似性, 所以二者都可以采用 DSP 做主控制器, 运行各个核心算法, 同时选取 FPGA 采取各个信号, 分析系统的运算逻辑, 根据磁链观测算法设置软件程序。

设计的系统具有很强的鲁棒性, 控制性能良好, 但是本研究依旧存在一些需要优化的地方, 具体可以概括为如下几点:

1) DSP 控制器虽然具有较高的控制性能, 但是对电机参数要求较高, 必须要具备全面的电机参数, 才能确保控制维度, 因此必须要引入分数阶 PI 控制器, 增强控制器的控制维度, 提高控制系统的能力。

2) 本文研究的矢量控制方法皆为理论值, 但是在实际研究中, 电机运行会产生额外转速, 系统必须要考虑异步电机额外转速产生的矢量, 这样才能得到真实值。

3) 目前该系统使用的通信网络数据线主要是 CAN 数据线, 占地面积较大。未来必然会向着网络芯片的方向发展, 实现系统各参数同步显示。

参考文献:

[1] 彭俊, 刘艳翠. 基于 DSP 控制器的双 PWM 三相异步电机系

获取更精准模型参数, 方便后续对在变摩擦力下垂扭耦合振动控制工作进行深入研究。

参考文献:

- [1] 樊立萍, 邓永娟, 王若然. 镁板轧机主传动系统的模糊免疫 PID 控制 [J]. 机械制造与自动化, 2017, 46 (3): 208-211.
- [2] 彭艳, 牛山. 板带轧机板形控制性能评价方法综述 [J]. 机械工程学报, 2017, 53 (6): 26-44.
- [3] 姬亚锋, 田敏, 郭鹏程, 等. 板带热连轧机活套控制系统优化 [J]. 中国机械工程, 2017, 28 (4): 410-414.
- [4] 刘光明, 王麒, 陈曦, 等. 四辊轧机滚动轴承偏载与板形影响因素分析 [J]. 机械设计与制造, 2017, 13 (10): 129-132.
- [5] 王红岩, 武裕民, 范竟韬, 等. 镰刀弯控制技术在 550 mm 热轧板带轧机上的应用 [J]. 热加工工艺, 2017, 18 (5): 174-175.
- [6] 何英春. 冷轧机液压辊缝控制系统分析 [J]. 辽宁科技学院学报, 2017, 19 (2): 4-5.
- [7] 董敏, 马昌飞, 杨利辉, 等. 基于 AMESim 与 ADAMS 联合建模的轧机厚控系统仿真 [J]. 机床与液压, 2017, 45 (5): 124-128.
- [8] 王涛, 黄庆学, 申光宪, 等. 四辊轧机叼板窜辊问题的解析 [J]. 钢铁, 2017, 42 (11): 81-86.
- [9] 孙孟辉, 王益群, 贾文华, 等. 冷带轧机液压 AGC 系统的 MAC-PID 串级控制 [J]. 机床与液压, 2017, 45 (20): 118-120.
- [10] 彭艳, 牛山. 板带轧机板形控制性能评价方法综述 [J]. 机械工程学报, 2017, 53 (6): 26-44.
- [11] 杨子凯, 王建林, 于涛, 赵利强. 基于二阶带通滤波器的加速度计结构化动态建模 [J]. 电子设计工程, 2016, 24 (2): 72-75.
- [12] 王洪希, 鲁长贺, 田伟. 基于双 PWM 变换器的能馈型交流电子负载研究 [J]. 现代电子技术, 2018, 13 (2): 56-59.
- [13] 罗俊骁, 王盛, 叶海峰, 等. 风力发电全阶段定子磁链观测器的设计 [J]. 电器与能效管理技术, 2017, 12 (9): 63-66.
- [14] 李瑾. 双 PWM 控制的双馈调速系统在泵站电机上的应用 [J]. 长江科学院院报, 2017, 34 (10): 155-158.
- [15] 程启明, 黄伟, 程尹曼, 等. 双级矩阵变换器驱动永磁同步电机的混合非线性控制系统 [J]. 电工技术学报, 2017, 32 (4): 101-111.
- [16] 叶天华, 王京, 杨欢, 等. 基于矢量控制的电动汽车用永磁同步电机系统研究 [J]. 轻工机械, 2018, 36 (2): 48-55.
- [17] 任宏理, 窦金生. 基于模糊 PID 的永磁同步电机矢量控制系统的仿真研究 [J]. 电子设计工程, 2017, 25 (5): 112-115.
- [18] 赵玉颖, 姜香菊, 曾幼涵. 基于 Anti-windup PID 的四旋翼飞行器姿态控制研究 [J]. 计算机科学, 2016, 43 (s2): 551-553.
- [19] 杜丽霞. 无速度传感器的异步电机矢量控制系统设计 [J]. 电子科技, 2017, 30 (7): 110-113.
- [20] 徐益飞, 张鹏, 张博, 等. 异步电机全分数阶矢量控制系统的设计与实现 [J]. 西安交通大学学报, 2017, 51 (3): 111-115.