

电动钢轨打磨车恒力磨削控制方法的研究

刘真 周严

(南京理工大学机械工程学院 南京 210094)

摘要:电气驱动的钢轨打磨装置在磨削过程中钢轨不平顺、振动等强干扰因素的影响下会产生磨削力的波动,导致打磨精度的下降。为了有效抑制打磨压力的波动,本文基于矢量控制原理设计了用于稳定打磨电机转速的电机调速系统;基于干扰估计器(负载转矩估计器)和系统在线逼近模型(小波神经网络“无延迟负载——电流”模型)设计了控制磨削力稳定的 Smith 预估控制器。仿真结果表明:相比 PID 控制,本文设计的控制器能够实现阶跃输入的无超调、无振荡的快速跟踪响应;另外,控制器对外界强干扰的抑制作用明显,整个控制过程中反映磨削力波动情况的打磨电机主轴电流的波动幅度很小。

关键词:钢轨磨削;矢量控制;恒定磨削力;Smith 预估控制

中图分类号: TP271.4 TN-9 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.8030

Research on the control of the constant-milling-force for the electric-rail-milling train

Liu Zhen Zhou Yan

(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: Because of the influence of track irregularity and vibration, the milling force of the electrical drive rail-milling equipment will fluctuate in the milling process. It may lead to the decline of the milling precision. To restrain the fluctuation of the grinding pressure, a controller which consists of two parts was designed. Based on the principle of vector controlling, the motor speed control system used to stabilize motor speed was designed. Based on a “disturbance estimator” (load-torque estimator) and “system online identification model” (a “no time delay load-current model” based on “wavelet neural network”), the “smith-controller” used to stabilize the milling force was designed. The simulation result indicates that: compared with PID control, the controller designed in this paper could achieve a fast tracking and response of the step input without overshoot and oscillation. And in the whole control process the current of the grinding motor, which reflects the grinding force, waves within a small scale. And it shows that the controller could restrain the external interference effectively.

Keywords: rail milling; vector controlling; stable milling force; Smith-control

1 引言

钢轨打磨是目前公认的治理钢轨病害、延长钢轨使用寿命的有效方法,采用打磨车定期地对钢轨进行打磨,可有效地消除钢轨表面不平顺、轨头表面缺陷,将轨头轮廓修复至最佳廓形,减缓钢轨表面缺陷发展、提高钢轨表面平滑度、降低轮轨噪声、延长钢轨使用寿命^[1-3]。

钢轨打磨过程中钢轨表面的不平顺、磨削装置的振动以及砂轮的磨损等因素都会引起磨削力的波动,影响打磨质量甚至导致钢轨损伤。因此控制磨削力的稳定是保证磨削质量的关键。气动、液压驱动型磨削装置通过抑制设

备压力波动的方式保证磨削力的稳定^[4-5],目前被广泛应用,但存在压力泄露、缸体压力波动的隐患。电气驱动控制方式较复杂,但其具有控制响应速度快、控制输出精确高,故障率低、维护方便、成本低等优点,是目前较为先进的控制方式,受到业界学者及技术专家的重视,并开展了相应的研究。刘真兵等人采用内模控制方法对打磨磨削力的控制进行了研究^[6],实现了磨削力的无静差跟踪;胡军科等人采用广义预测控制方法对磨削力的控制进行了研究与试验^[7],提高了系统的响应速度和响应质量,增强了系统的抗模型失配的鲁棒性;沈正强采用滑模控制方法进行了对磨削力的跟踪研究^[8],获得了较高的稳态精度和

良好的动静态性能。

本文在设计包络式打磨装置机械结构的基础上,采用改进的 Smith 预估器对所设计的打磨装置进行磨削力控制控制技术研究,旨在克服电机系统中存在的电机电流变化滞后于负载变化这一滞后特性,实现剧烈波动情况下打磨装置磨削力的稳定控制。

2 磨削装置机械结构及工作原理

磨削装置由磨削力控制系统和磨削角度调整系统组成。磨削力控制系统(如图1所示)由打磨电机、砂轮和电动伺服缸组成,采用电动伺服缸驱动,通过平行四边形机构调整砂轮的磨削深度。磨削角度调整系统(如图2所示)由转动架、连杆、滑块、电动推杆等组成,采用电动推杆驱动,通过曲柄滑块机构调整打磨角度。

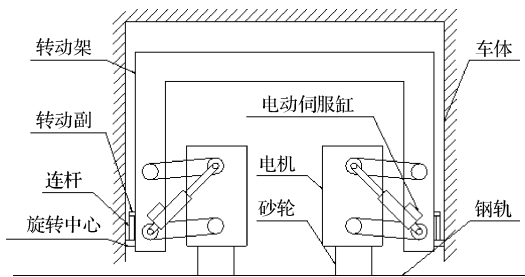


图1 打磨机构示意

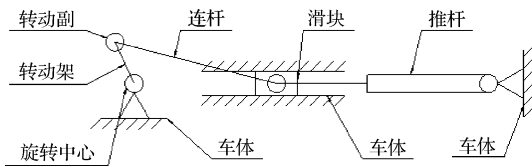


图2 旋转机构示意

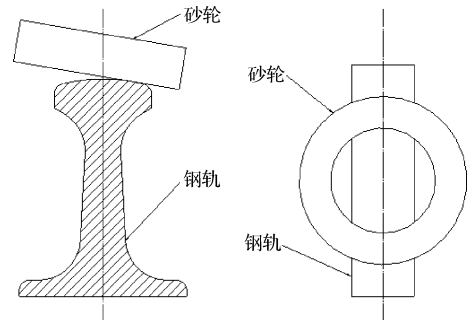


图3 包络打磨示意

一次磨削作业完成后会在钢轨踏面留下一条沿钢轨方向分布的细长的打磨带。通过调整磨削装置的打磨角度进行多次磨削作业,可以实现对整个踏面的打磨,打磨后的多条打磨带可以拟合出踏面的标准轮廓。通过辅以后续的轮廓式打磨可以消除打磨带衔接处的棱角,得到理想的钢轨踏面。

当磨削力小于设定值时,驱动砂轮向下移动,增大磨削深度,提高磨削力;当磨削力大于设定值时,驱动砂轮向上移动可以降低磨削力。通过伺服电动缸的调节保证磨削力的稳定。

3 磨削装置控制系统设计

3.1 电机转速控制系统

磨削过程中^[9],除了磨削深度外,砂轮的转速也是影响打磨质量的重要因素:砂轮线速度的变化会引起磨削力的变化^[10],因此,磨削作业过程中需要保持砂轮转速的恒定^[11-12]。文中采用按转子磁链定向的矢量控制方式实现打磨电机(三相笼型异步电机)的转速控制。按转子磁链定向的矢量控制系统工作原理如图4所示。

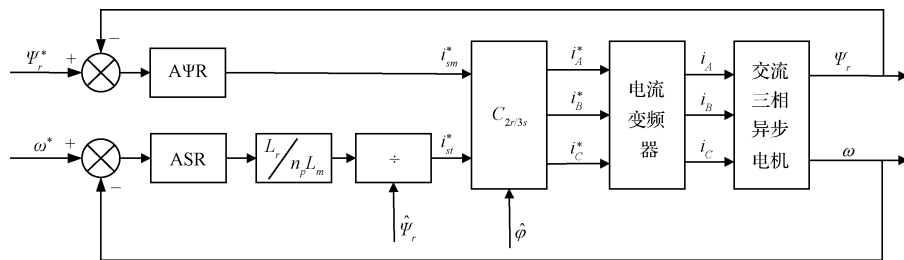


图4 按转子磁链定向的矢量控制系统

图中 Ψ_r 为转子磁链, $\hat{\Psi}_r$ 为转子磁链计算值, ω 为转子转速, i_A, i_B, i_C 为定子三相电流, i_{sm}^* 、 i_{σ}^* 分别为定子等效励磁电流分量和转矩电流分量(可通过相电流由坐标变换获得), $A\Psi R$ 、 ASR 分别为磁链调节器和转速调节器, $\hat{\varphi}$ 为转子磁场定向角的计算值, L_r 、 L_m 分别为转子自感和定转子互感, n_p 为极对数, $C_{2r/3s}$ 为坐标转换矩阵。

3.2 改进的 Smith 预估器控制系统

3.2.1 预估器控制系统模型

由磨削装置的机械结构可知,磨削装置中不存在阻尼、惯性等元件,因此可视为纯刚性结构。控制过程中通过反馈的电流信号适当地调整电动伺服缸的输出位移,改变砂轮的磨削深度,使磨削力保持恒定,也即使电机输出

转矩或者电流保持恒定。电动伺服缸的输出位移的精确控制通过其控制子系统实现,Smith 预估器控制系统中不涉及。系统的控制量为砂轮的位移,输出量为电机的电流。

控制系统如图 5 所示,前向通道采用 PID 控制,3 路反馈通道分别是“无延迟负载-电流”模型 $\hat{G}_i(s)$ 的输出电流 \hat{I}_i 、人工电机模型的输出电流 \hat{I} 以及电机输出电流 I 。

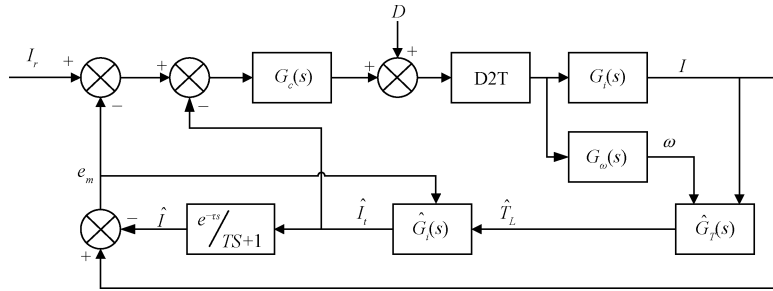


图 5 改进的 Smith 预估控制器

图中 I_r 为跟随电流设定值; $G_c(s)$ 为 PID 控制器, 输出为砂轮的位移; D 为钢轨表面的不平顺位移和打磨机构的振动引起的位移之和; $D2T$ 为磨削力仿真环节^[12], 实现将砂轮的磨削深度转换为负载转矩; $G_i(s)$ 和 $G_o(s)$ 为实际电机模型; $\hat{G}_i(s)$ 为负载转矩估计器; \hat{T}_L 为负载转矩的估计; $\hat{G}_i(s)$ 为电机的“无延迟负载-电流”模型(即负载转矩平衡时电机的输出电流与负载转矩的关系), 通过小波神经网络实现; $e^{-TS}/TS+1$ 为纯延迟加一阶惯性环节, 即由负载转矩突变到负载转矩平衡所经历的过程; \hat{I} 为实际电机系统电流的估计; e_m 为人工电机模型的电流估计误差。

通过在 $\hat{G}_i(s)$ 中引入小波神经网络, 可根据误差 e_m 在线调节 $\hat{G}_i(s)$ 的网络, 修正模型 $\hat{G}_i(s)$, 减小 \hat{I}_i 的误差, 保证控制的精度。

3.2.2 负载转矩估计器

交流异步电机的机械方程:

$$T_e = J \frac{d\omega}{dt} + B\omega + T_L \quad (1)$$

电磁转矩方程:

$$T_e = \frac{n_p L_m i_{st} \Psi_r}{L_r} \rightarrow T_e = K_t i_{st} \quad (2)$$

式中: T_e 为电磁转矩, J 为电机转动惯量, B 为粘滞摩擦系数。

根据机械方程和电磁转矩方程, 在已测得电机电流和转速的情况下可根据式(3)获得负载转矩的估计:

$$\hat{T}_L = K_t i_{st} - J \frac{d\omega}{dt} - B\omega \quad (3)$$

3.2.3 小波神经网络的求解

小波神经网络, 如图 6 所示。

本文所采用的小波神经网络算法^[13-14], 采用 1- n -1 的网络结构; 隐层神经元的激活函数采用常用 Morlet 小波函数; 输出层神经元激活函数采用 S 函数——Sigmoid 函数, 方便算法的归一化处理; 目标函数采用全局误差熵函数^[15], 一方面加速网络的学习速度, 另一方面方便反向求

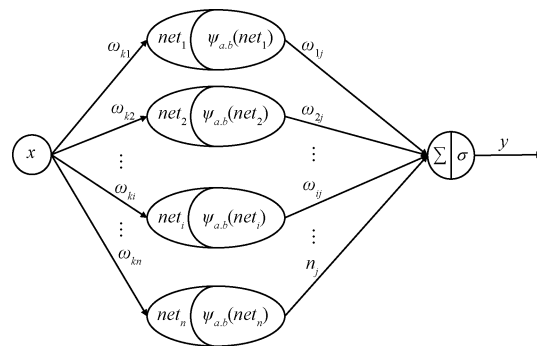


图 6 小波神经网络

导计算; 采用 BP 算法以批处理方式训练, 自适应地调整小波系数和网络权重。

x 为输入层输入, ω_{ki} 为连接输入层与隐层的权值, net_i 为隐层输入, $\Psi_{a,b}(net_i)$ 为隐层输出, $\Psi(h)$ 为小波函数, ω_{ij} 为连接隐层与输出层的权值, $\sigma(s)$ 为 Sigmoid 函数, $n(i = 1, 2, \dots, n)$ 为隐层神经元个数。

小波函数:

$$\psi(h) = \cos(1.75h) \exp(-h^2/2) \quad (4)$$

Sigmoid 函数:

$$\sigma(s) = 1/(1 + \exp^{-s}) \quad (5)$$

全局误差熵函数 ($M(m = 1, 2, \dots, M)$ 为训练样本模式个数):

$$E = - \sum_{m=1}^M [d^m \ln y^m + (1 - d^m) \ln(1 - y^m)] \quad (6)$$

4 仿真结果分析

仿真过程中采用的三相笼型异步电机的参数: 电机采用星形连接方式, 线电压 $V_n = 460$ V, 转子的电阻和自感分别为 $R_r = 0.451 \Omega$, $L_r = 4.152 \times 10^{-3}$ H, 定转子互感 $L_m = 0.1486$ H, 极对数 $n_p = 2$, 负载转动惯量 $J = 0.05 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, 粘滞摩擦系数 $B = 8.141 \times 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}$ 。通过 Simulink 建立仿真控制模型, 进行控制系统的阶跃

响应分析,干扰情况下的调速、模型跟踪、电流稳定分析。

4.1 阶跃响应分析

如图7所示为传统PID与改进后的Smith预估控制器控制下的系统阶跃响应。

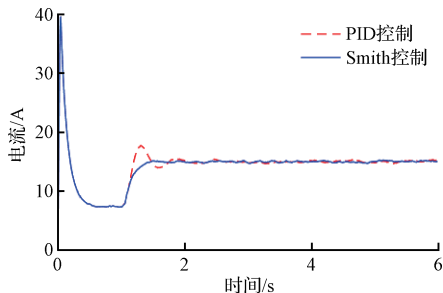


图7 控制系统阶跃响应

图中电流为经低通滤波后的定子等效转矩电流分量 i_s , 开始部分反映的是电机的启动电流。由图可知,改进后的Smith预估控制具有响应快,无超调,稳定快的特点。

4.2 扰动作用下控制效果分析

在Simulink仿真过程中打磨车行走速度 $v = 1.8 \text{ km/s}$,对钢轨施加高低不平顺、水平不平顺、轨距不平顺、方向不平顺扰动(不平顺程度依据美国5级轨道谱),通过SIMPACK软件获得的不平顺和振动合成信号如图8所示。

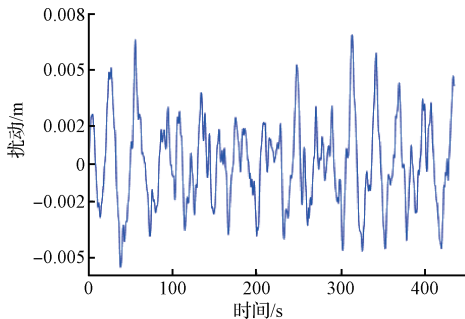


图8 轨道干扰信号

如图9所示为施加半正弦波形负载时,Smith控制器反馈通道人工模型对实际电机系统的逼近情况。启动阶段,电机的转速变化较大,惯性负载较大,同时考虑到仿真步长等因素,逼近的效果较差;而工作阶段电机转速保持恒定,逼近精度较高。

在施加图8所示扰动作用下,通过矢量控制和改进的Smith预估控制,电机在工作过程中的转速始终维持在设定转速 120 rad/s ,如图10所示。

在磨削力的稳定控制过程中,通过图11所示的定子等效转矩电流分量 i_s 可知,在改进的Smith预估控制下电流 i_s 始终维持在设定值附近,波动较小,实现了良好的控制效果。

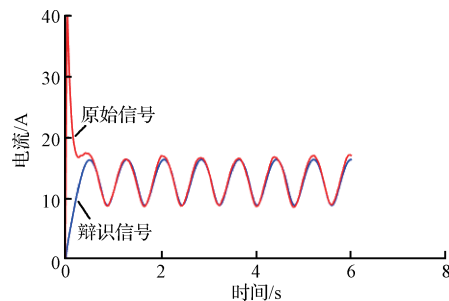


图9 模型逼近特性

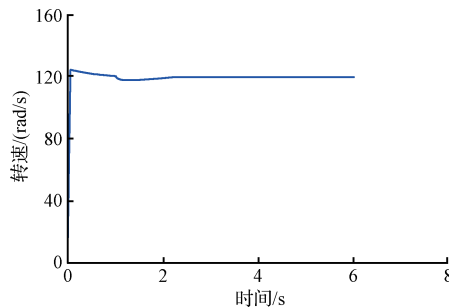


图10 电机转速

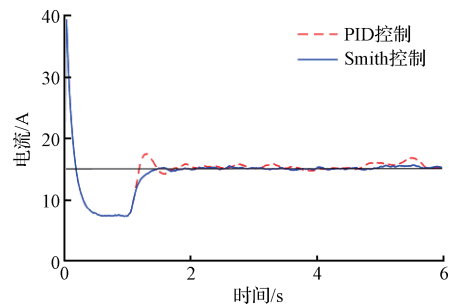


图11 扰动作用下控制效果

5 结论

本文对强扰动下电气驱动钢轨打磨装置的恒力磨削控制进行了研究,通过控制磨削用量3要素中的磨削深度、砂轮转速实现恒力磨削,取得了以下成果:

- 1)通过按转子磁链定向的矢量控制实现了砂轮的恒定转速控制;
- 2)在Smith预估控制的反馈通道引入负载转矩估计器和小波神经网络“无延迟负载-电流”模型,弥补了传统Smith预估控制易受外界扰动因素和模型失配因素干扰的缺陷;
- 3)改进后的Smith预估控制克服了系统时滞的影响,实现了外界强干扰下的恒力磨削。

磨削用量中的钢轨纵向进给通过打磨车的牵引系统实现,文中不做研究。

参 考 文 献

- [1] 刘月明,李建勇,蔡永林,等. 钢轨打磨技术现状和发展趋势[J]. 中国铁道科学, 2014, 35(4): 29-37.
- [2] 金学松,杜星,郭俊,等. 钢轨打磨技术研究进展[J]. 西南交通大学学报, 2010, 45(1): 1-11.
- [3] ZAREMBSKI A M, 宋忠明, 胥金荣. 钢轨磨削的效果[J]. 轨道交通装备与技术, 2014 (5): 51-52.
- [4] 聂蒙,李建勇,沈海阔,等. 钢轨打磨压力波动的影响机理[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2013, 44(8): 3546-3551.
- [5] 汤万文. 钢轨打磨车打磨力波动抑制方法研究[D]. 长沙:中南大学, 2013.
- [6] 刘真兵,胡军科,王清标,等. 钢轨铣磨车恒力磨削的内模控制研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2013(1): 117-122.
- [7] 胡军科,蒋亚军,方健康,等. 钢轨铣磨车磨削力的广义预测控制[J]. 中国铁道科学, 2014, 35(6): 84-90.
- [8] 沈正强. 基于滑模控制的钢轨打磨车磨削力控制研究[J]. 上海铁道科技, 2016 (1): 42-44.
- [9] LI Q, HAN Q, PENG B, et al. The Research of contour error compensation control for XC non-circular grinding in polar coordinates[J]. Instrumentation, 2014, 1(1): 31-39.
- [10] 谢桂芝,尚振涛,盛晓敏,等. 工程陶瓷高速深磨磨削力模型的研究[J]. 机械工程学报, 2011, 47(11): 169-176.
- [11] 丁硕,崔总泽,巫庆辉,等. 基于 SVPWM 的永磁同步电机矢量控制仿真研究[J]. 国外电子测量技术, 2014, 35(6): 81-85.
- [12] 邱忠才,肖建,郭冀岭,等. 永磁同步电机速度预测电流解耦控制[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(5): 648-654.
- [13] 黄良沛,吴超威,王靖. 小波包分析和 BP 神经网络在滚动轴承故障模式识别中的应用[J]. 电子测量技术, 2016, 39(4): 164-168.
- [14] 杨维新,唐伶俐,汪超亮,等. 基于遗传小波神经网络的光电稳定平台系统辨识[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(3): 517-523.
- [15] 张小秋,田雨波,徐荣青. 基于熵误差函数的 BP 算法及其应用[J]. 计算机仿真, 2008, 25(2): 183-185.

作者简介

刘真,1991年出生,硕士研究生,主要研究方向为地震勘探系统无线传输系统设计、钢轨打磨设备控制系统设计等。

E-mail:steveliu121@163.com

(上接第 37 页)

参 考 文 献

- [1] 孙琛琛. 大幅面丝网疵点的图像识别算法研究[D]. 杭州:浙江理工大学, 2009.
- [2] 冯玉田,刁志蕙,李园辉,等. 基于图像的远程燃气表直读系统研究与实现[J]. 电子测量技术, 2016, 39(6): 76-80.
- [3] 杨扬. 基于帘子布疵点检测系统的研究[D]. 郑州:中原工学院, 2014.
- [4] 朱丹丹,潘如如,高卫东. 基于傅里叶特征谱和相关系数的织物疵点检测[J]. 计算机工程与应用, 2014, 50(19): 182-186.
- [5] 付宁,施睿,宋凌云,等. 基于欠采样的单音周期信号幅频测量方法实现[J]. 国外电子测量技术, 2015, 36(10): 73-78.
- [6] 薛乐. 基于傅里叶变换和 Gabor 变换的机织物纹理分析方法研究[D]. 上海:东华大学, 2015.
- [7] 陈传峰,朱长仁,宋洪芹. 基于巴特沃斯低通滤波器的图像增强[J]. 现代电子技术, 2007, 30(24): 163-165.
- [8] 付明明. 基于维纳滤波及 BP 神经网络的光学相关识别研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2010.
- [9] 梁金祥. 织物疵点检测与自动化等级评定系统研究[D]. 苏州:苏州大学, 2011.
- [10] 石佶,左保齐. 基于小波分析和阈值分割的织物疵点检测[D]. 苏州:苏州大学, 2013.
- [11] 杜磊,李立轻,汪军,等. 几种基于图像自适应阈值分割的织物疵点检测方法比较[J]. 纺织学报, 2014, 35(6): 56-61.
- [12] 时峰. 基于 OpenCV 的织物疵点自动检测技术研究[D]. 青岛:青岛大学, 2014.
- [13] 陈明亮,陈成新,古建平. 一种基于直方图的自适应分段线性变换法[J]. 国外电子测量技术, 2015, 36(2): 36-38.
- [14] 李智勇,余小萍,姜真,等. 基于蛙眼检测模型的双阈值判定目标跟踪方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(2): 187-195.

作者简介

王延年,1963年出生,教授,主要研究方向为工业控制信息系统。

杨万里(通讯作者),1991年出生,硕士研究生,主要研究方向为控制网络与工程、图像处理。

E-mail:846238088@qq.com