

连轧机主传动系统扭振现象的研究

张登山 李华德

(北京科技大学控制工程系 100083)

摘 要 针对冶金轧机主传动系统存在的非线性机电振荡现象, 根据负荷观测控制策略设计了抑制方案, 并进行了仿真和实验。其结果证明了该控制器在调速系统中具有较好的振荡抑制性能, 从而验证了该反振荡控制策略的可行性和正确性。

关键词 轧机振动 两质量弹性系统 负载扰动观测器

1 前言

冶金轧机主传动系统的机电振荡是轧钢过程中普遍存在的现象, 严重时会影响轧钢生产, 甚至会导致轧辊断辊、断轴等恶性事故发生, 对生产安全造成严重危害。此种情况在国内外均有发生, 所以针对轧机主传动系统中的非线性振荡抑制的控制策略, 已成为电力传动系统中非常重要的研究课题。

轧钢过程中产生的机电振荡有多种, 如轧机机械固有频率与电动机控制系统的响应频率合拍时产生的机电共振现象; 轧制过程中, 由于轧件上存在黑印, 表面摩擦系数不均匀, 轧辊和轧件产生打滑, 发生振荡; 突加负载时产生的扭转振荡^[1]。

本文主要研究对突加负载时产生的扭振。对于轧钢机来说, 其负载冲击大, 变化频繁, 容易引起机械轴系的扭振, 是最常见的机电振荡现象。目前随着主轧机常用的控制系统交-交变频控制系统以及 GTO—NPC 变频控制系统响应越来越快, 扭振现象也随之增加。与直流电动机一样, 轧钢机主传动同步电机调速系统采用的也是经典的双闭环 PI 控制。对于由轧辊、电机联轴器、齿轮座减速机等构成的“质量弹性系统”而言, 双闭环 PI 控制已不能满足控制的需求。

2 控制对象的两质量弹性系统模型

由大容量的传动装置交-交变频或 GTO—NPC 驱动的轧机轴系布置如图 1 所示。

一般情况下, 由于安装、布置条件的制约, 轧机牌坊中均有较长的联接轴, 即使此联接轴是用钢造成的, 有很好的弹性特点及很低的振荡频率, 也会引起轧机的扭振现象发生^[2]。

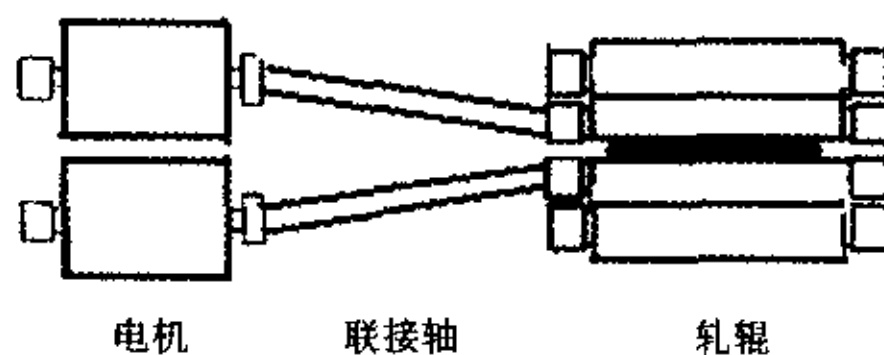
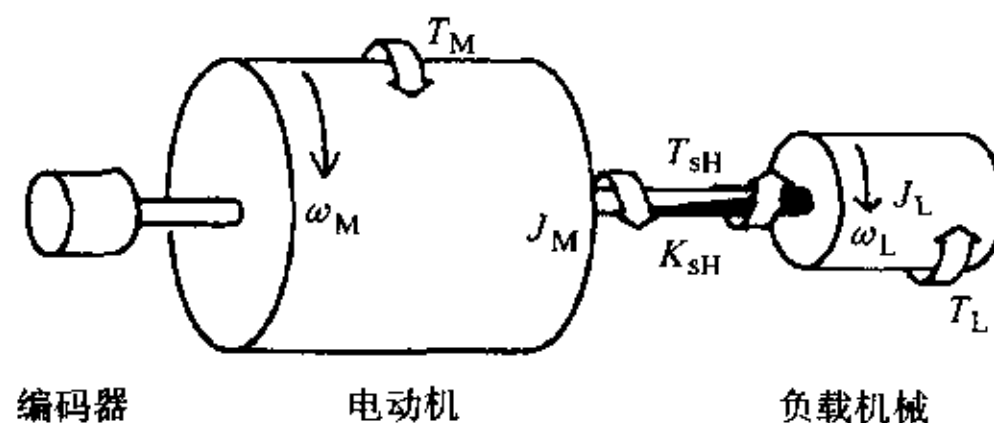


图 1 轧机轴系布置图示

可以用图 2 两质量弹性系统来描述轧机的力学模型。



J_M —电动机转动惯量 J_L —负载转动惯量

T_L —负载转矩 ω_M —电动机转速

ω_L —负载转速 K_{SH} —联接轴的弹性系数

图 2 两质量弹性系统

轧机系统机械轴系的结构框图如图 3 所示。

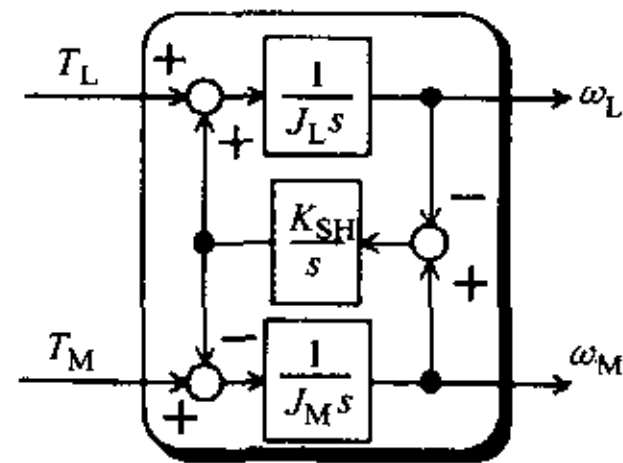


图 3 轧机机械轴系结构

其中存在以下关系

$$\omega_M = \frac{1}{J_M s} (T_M - T_{SH})$$

$$\omega_L = \frac{1}{J_L s} (T_{SH} - T_L)$$

$$T_{SH} = \frac{K_{SH}}{s} (\omega_M - \omega_L)$$

从电动机转速到电动机转矩 $\omega_M \rightarrow T_M$ 的传递函数记为 $T_1(s)$, 从电动机转速到负载转矩 $\omega_M \rightarrow T_L$ 的传递函数记为 $T_2(s)$, 则

$$\begin{aligned} T_1(s) &= \frac{\omega_M(s)}{T_M(s)} = \frac{1}{J_M(s)} \cdot \frac{s^2 + K_{SH}/J_L}{s^2 + K_{SH}(\frac{1}{J_M} + \frac{1}{J_L})} \\ &= \frac{K_{SH}}{J_L J_M} \cdot \frac{s^2 + \omega_a^2}{s^2 + \omega_0^2} \\ T_2(s) &= \frac{\omega_M(s)}{T_L(s)} = \frac{-1}{J_L(s)} \cdot \frac{K_{SH}/J_M}{s^2 + K_{SH}(\frac{1}{J_M} + \frac{1}{J_L})} \\ &= \frac{-K_{SH}}{J_L J_M} \cdot \frac{1}{s^2 + \omega_0^2} \end{aligned}$$

该模型的特征方程为 $|sI - A| = s^3 + (\frac{K_{SH}}{J_M} + \frac{K_{SH}}{J_L})s = 0$

此特征方程有三个特征根, $s_{1,2} = \pm j \sqrt{K_{SH}(\frac{1}{J_M} + \frac{1}{J_L})}$, $s_3 = 0$ 。其中有一对虚轴共轭极点。根据李亚普诺夫稳定理论得知, 此轧机系统是临界不稳定的。其中 $\omega_0 = \sqrt{K_{SH}(\frac{1}{J_M} + \frac{1}{J_L})}$ 为轧机系统固有振荡频率, $\omega_a = \sqrt{\frac{K_{SH}}{J_L}}$ 为弹性反振荡频率。

$T_1(s)$ 和 $T_2(s)$ 的传递函数波特图如图 4~5 所示。

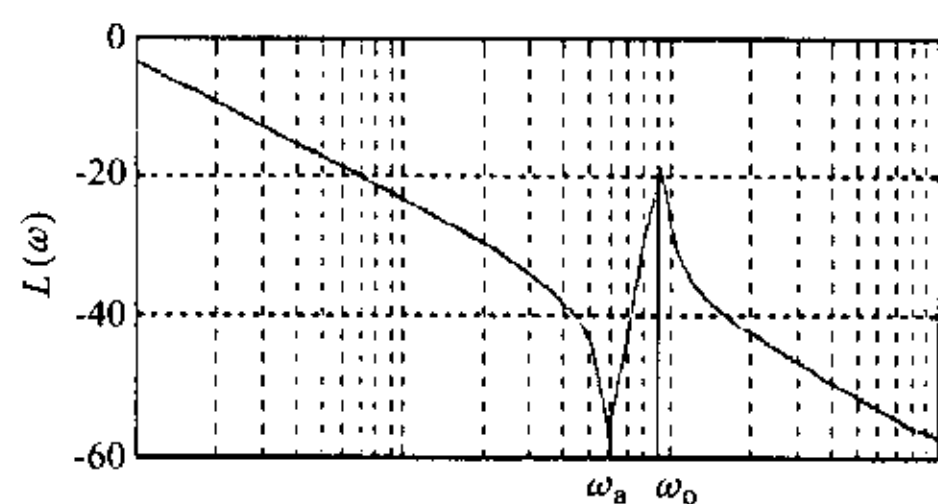


图 4 $T_1(s)$ 波特图

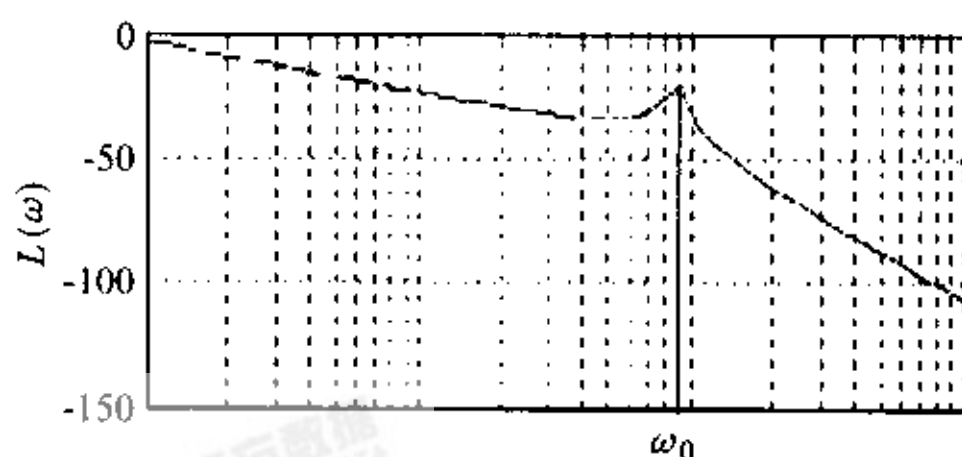


图 5 $T_2(s)$ 波特图

可以看出 $T_1(s)$ 中存在 ω_a 反振荡频率, 而 $T_2(s)$ 中只有 ω_0 固有振荡频率, 因而 T_L 发生变化时, 轧制系统易发生扭振现象。

3 抑制扭振方法的研究

轧机系统存在着固有振荡频率 ω_0 , 此固有振荡频率是产生扭振的根源。采用实际轧机参数, $J_M = 0.7314$, $J_L = 0.7267$, $K_{SH} = 2794$ 。从图 5 可以看出此轧机在 $\omega_0 = 95.4$ 即 $f = 15.2\text{Hz}$ 时, 系统已发生振荡。通过改变轧机的机械参数可以改变轧机的固有振荡频率, 使之远离交-交变频器频率的控制范围 $0 \sim 20\text{Hz}$, 以避免扭振发生。此方案往往因机械改动太大而无法实现, 另外也不经济。

近年来, 采用负荷观测器来解决轧机扭振现象的研究越来越多。从理论上构造负荷观测器可以抵消负载转动扰动。引入负荷观测器的目的就是要减小由负载扰动 (例如突加负载转矩) 给系统带来的影响。这种负荷观测器可以较为准确实时地反映系统的负荷状态变化。采用该控制系统后, 热连轧机主传动系统咬钢时的动态速降和恢复时间可以大大减少, 并且有效地抑制了机电扭振^[3,4]。

具体实现的控制思路为: 根据实际电动机的角速度 ω_M 乘以 $J_M s$ 推算出抵消负载转矩扰动部分实际的输出转矩, 使其与正常扭矩值相比较 (即电流给定值与轴弹性系数相乘之值), 二者之差即是应该抑制的干扰扭矩值。把其叠加到电流给定值上, 通过对其进行反馈补偿来实现负载扰动的抑制。但在实际使用时, 为了避免纯微分引入干扰, 可以采用积分负反馈的方法来构造微分项。具体控制思路见图 6。

4 MATLAB 实验仿真研究

综上所述, 我们得到带负荷观测器的轧机控制系统基本构成如图 7 所示。

图 8 和图 9 是利用 MATLAB/SIMLINK 对传统速度电流双闭环控制、带负荷观测器的反馈控制在阶跃负载的情况下的电动机速度、联接轴上所承受的力矩的阶跃响应所作的仿真的对比^[5]。在突加负载时, 双闭环控制的动态速降大约为 4.3%, 恢复时间大约为 425ms; 带负荷观测器的反馈控制系统动态速降大约为 2.5%, 恢复时间大约为 125ms; 联接轴上所承受的扭矩强度减小, 时间缩短 70%。

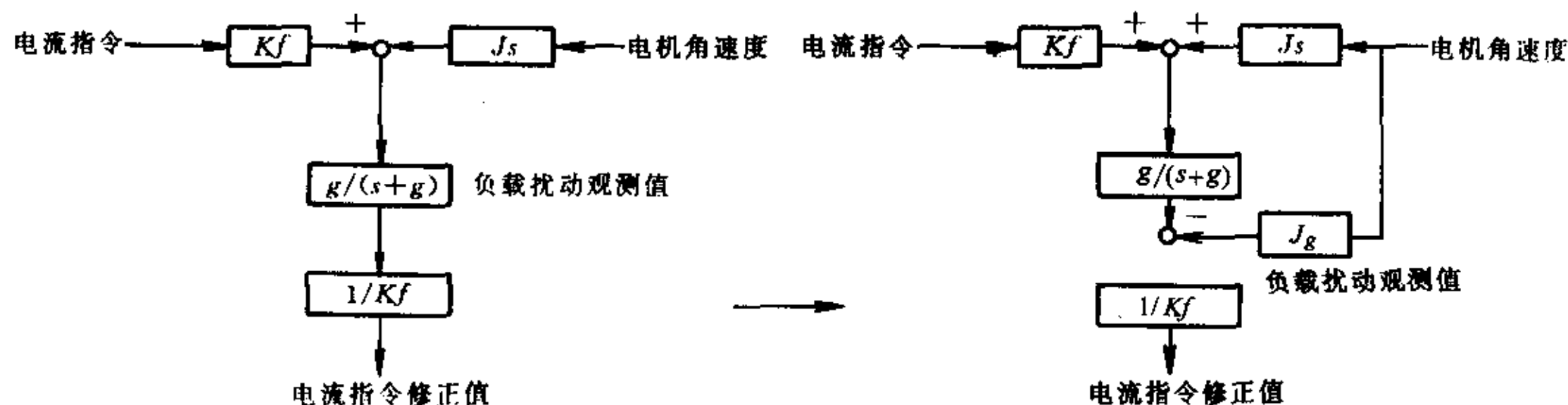


图 6 负载干扰观测器

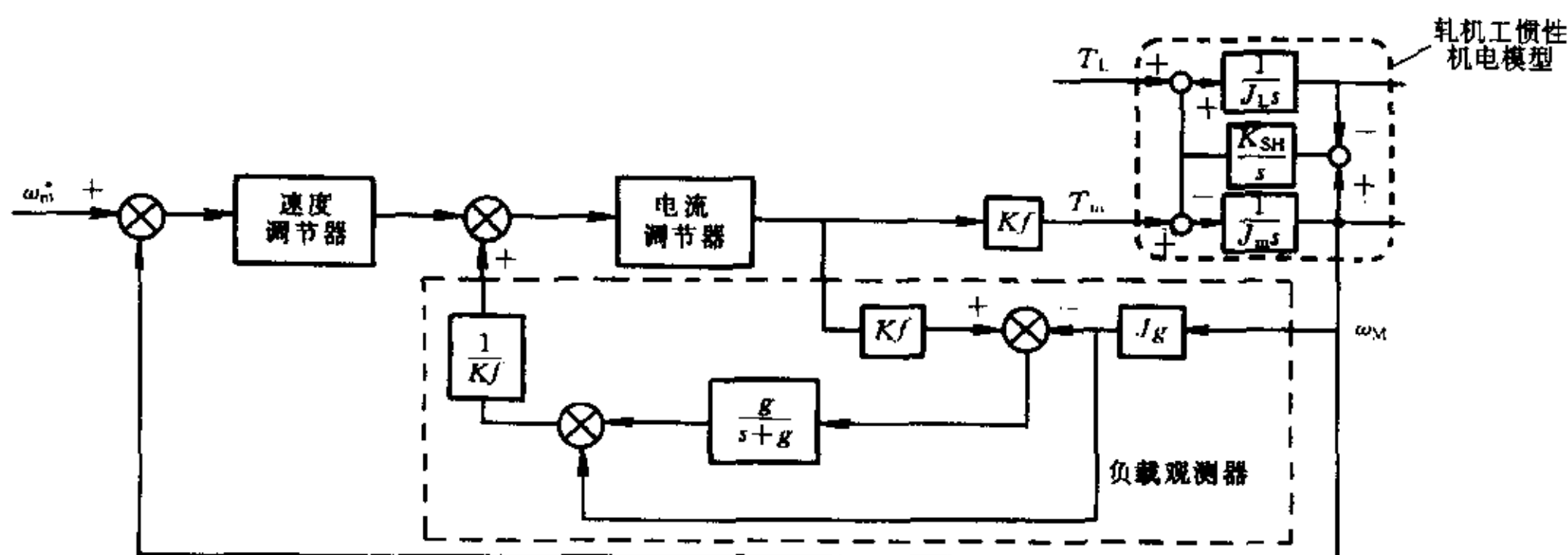


图 7 带负荷观测器的反馈控制系统

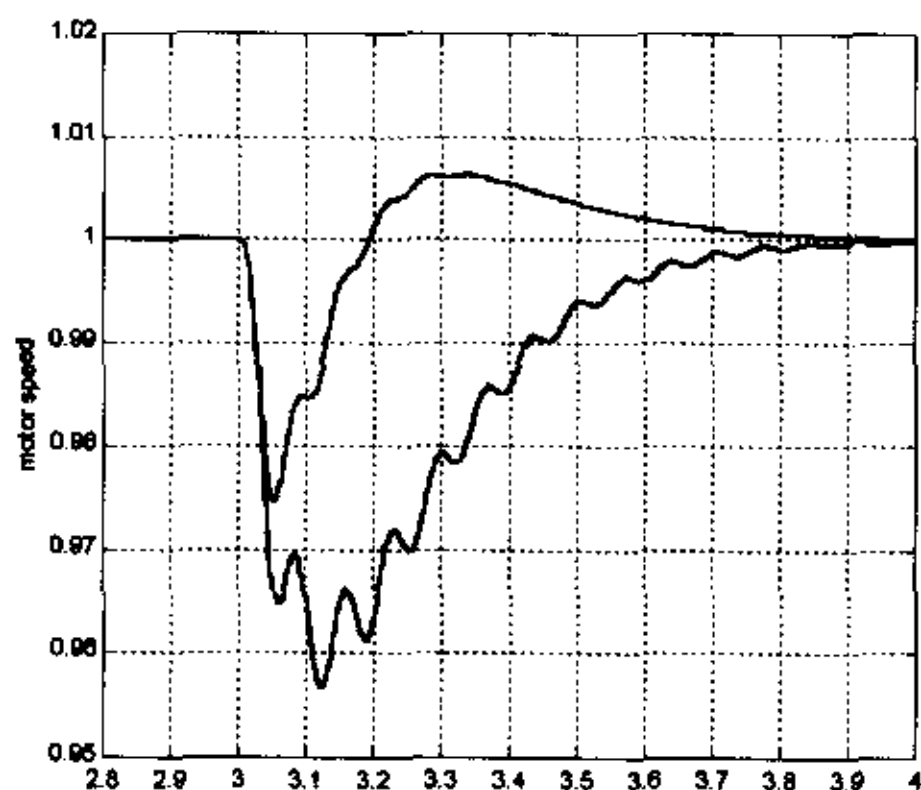


图 8 电动机速度的阶跃响应的对比

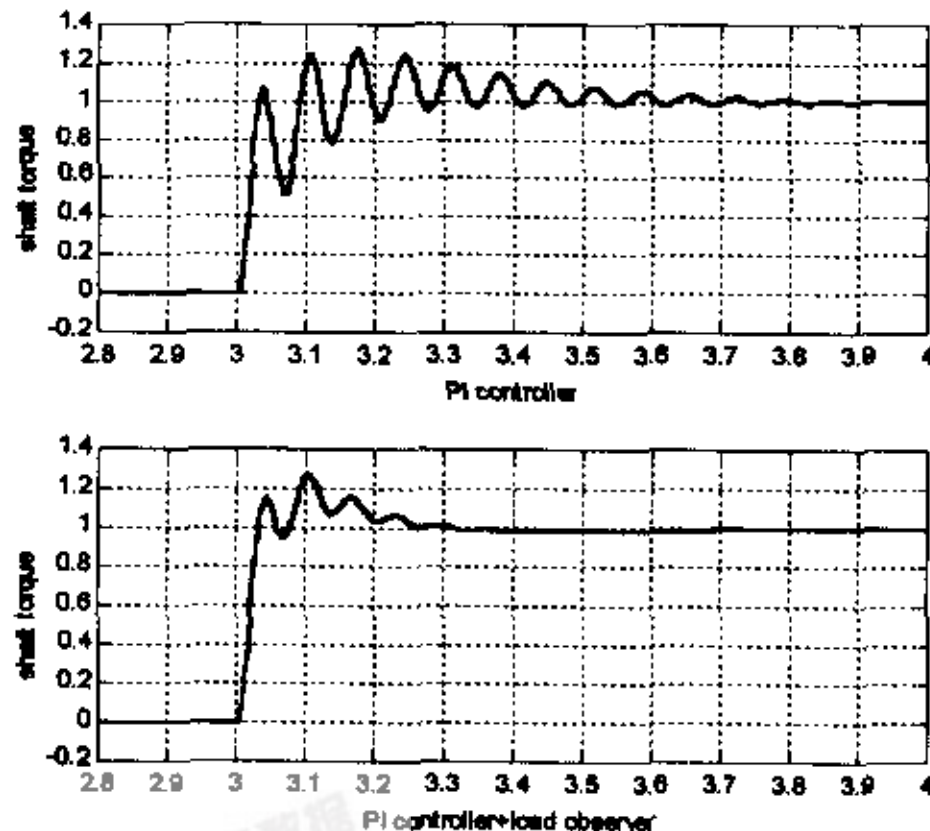


图 9 联接轴扭矩的阶跃响应对比

因此对比双闭环控制, 采用带负荷观测器的反馈控制系统对轧机突加负载的动态响应特性和连接轴的扭振现象有很大程度的改善。

5 结束语

在国内, 老的热连轧机组多采用直流调速系统。根据热连轧机的工艺特点, 交流调速系统应具有比直流调速高得多的动、静态调速性能指标, 其动态速降小于 1.9%, 动态恢复时间小于 70ms, 静态调速精度小于 0.1%, 以满足热连轧机精轧主传动工艺的要求。在工程改造后, 轧机交流传动功率增加 40%, 系统动态响应大大加快, 由原 500ms 提高到 100ms 以内。但该轧机仍保留原机械。因此, 功率强大、快速敏捷的交流调速系统与原有的旧机械之间配合存在的矛盾就尤为突出。机械与控制系统共振现象, 轧辊偏心是负荷周期性变化引起电流振荡现象以及突加负荷的冲击扭振现象都明显存在, 严重影响连轧机的正常运行。

本文将负荷观测器引入交流矢量控制系统中, 构造出负荷观测器反馈控制系统应用实际工程中, 取得了良好的效果。工程实际测量波形表明, 采用

(下转第 48 页)

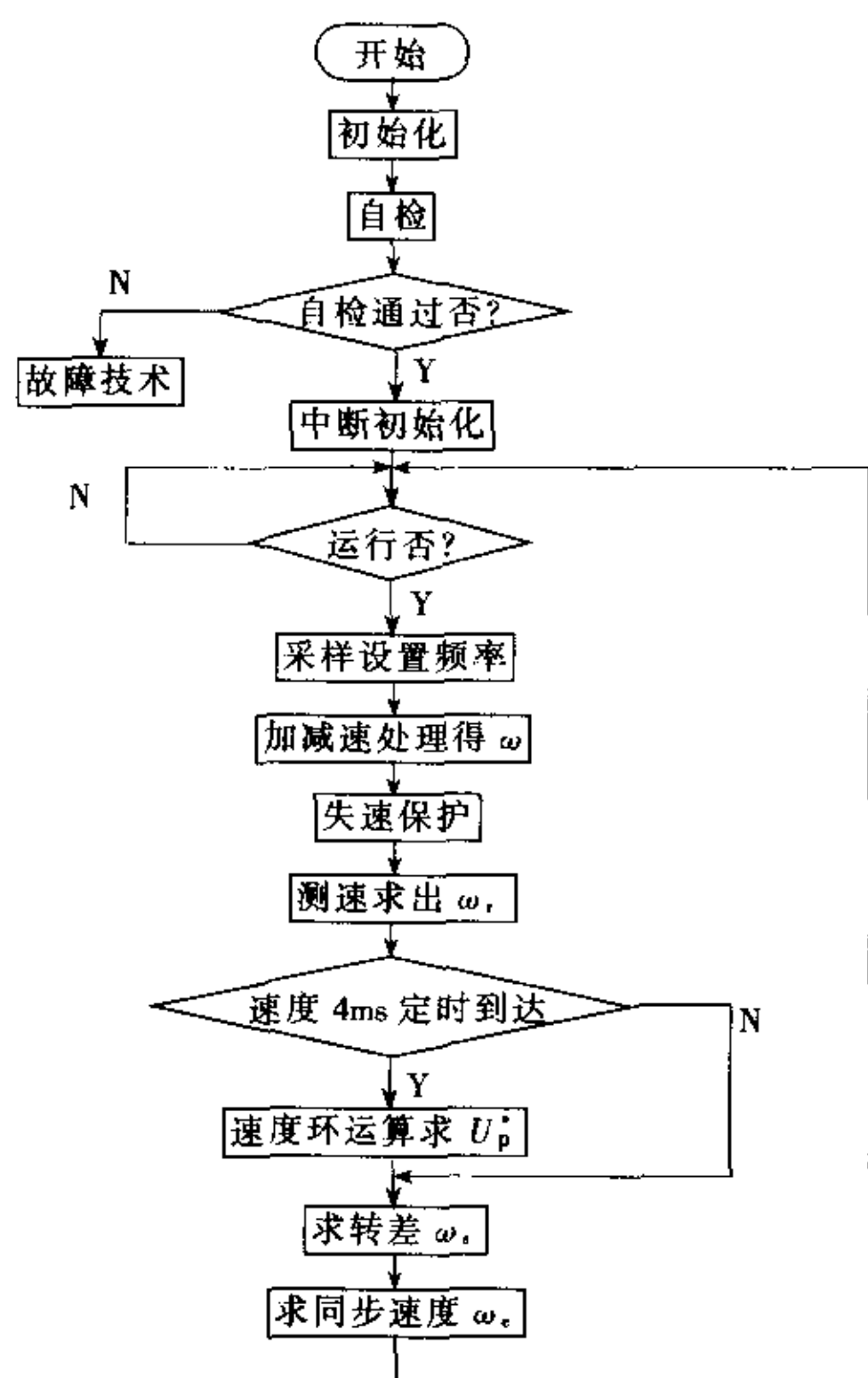


图 5 主程序流程图

参考文献

- 1 陈坚等. 交流电机数字模型调速系统. 北京: 国防工业

出版社, 1989

- 2 Van Der Brock HW, Skudelny H-CH. Analysis and realization of a pulse width modulator based on voltage space vectors. IEEE Transaction on IA, 1988
- 3 北京闻亭科技发展有限公司. TMS320F24X 高速数字信号处理器原理与应用. 北京: 机械工业出版社, 1998
- 4 卫之民. 联 H 桥多变频器电压空间矢量控制算法. 清华大学学报 (自然科学出版社), 2003, 43 (3)

The Adjustable-speed System with Varying Frequency of Intelligent Control Based on DSP

Guo Xiaoding

(Hunan Science and Technology University)

Abstract The construction, principle hardware, software plan of the adjustable-speed system based on voltage space vector, in which DSP has been used as a core part, has been introduced. And the neural fuzzy controller is applied to it so that the problem insured of the parameter of the model of motor has been resolved efficiently. The experiment results indicate that the system has both good dynamic and good static perforates.

Keywords frequency conversion vector control voltage space vector DSP

收稿日期: 2004-01-08

参考文献

- 1 陈坚等. 交流电机数字模型调速系统. 北京: 国防工业

出版社, 1989

The Study of Rolling Mill Torsion Vibration Suppression

Zhang Dengshan

(University of science and Technology Beijing)

Abstract Focus on torsion vibration of rolling mill main drives system, the load vibration observer control method be proposed to restrain vibration in this paper. After simulation and actual runs of this control scheme on site, the control method be approved with high suppression of vibration.

Keywords rolling mill vibration two mass system load disturbance observer

收稿日期: 2004-06-20

(上接第 38 页)

负荷观测器的控制系统具有较强的抗负荷扰动性, 明显的减少了轧机动态速降和恢复时间, 为交流调速系统在大型热连轧机中成功应用奠定了基础。

参考文献

- 1 邹家祥, 徐乐江. 冷连轧机系统振动控制. 北京: 冶金工业出版社, 1998
- 2 高龙, 熊光悖, 梁德全. 状态观测器在调速系统中的应用. 清华大学学报, 1980, 20 (4): 30~45
- 3 Young Seok Kim, Seoung-Beom Kim et al. Two-Degree-of-freedom speed control of induction motor having two-mass resonant system. IEEE PP, 1996: 1210~1215
- 4 Zhang Guoguang. Comparison of control schemes for two-inertia system. IEEE PP, 1996: 573~578
- 5 薛定宇. 控制系统计算机辅助设计-MATLAB 语言和应

用. 北京: 清华大学出版社, 1998