

文章编号:1671-6833(2008)02-0073-04

轧机传动系统转速波动测量模型及仿真的研究

张翠英, 温卫中

(太原科技大学 化学与生物工程学院, 山西 太原 030021)

摘 要: 为了测量恒定转速上叠加的随机波动转速引起的振动, 通过弹性转轴和电机轴的转速波动研究了轧机传动系统的动态特性, 并建立轧机传动系统瞬时转速的测量模型; 运用级数解耦方法, 把非线性运动微分方程转化为代数方程获得转速波动的快速分解代数算法, 最后通过在扭振实验平台进行模拟轧制过程的实验验证了该算法的正确性和可行性。

关键词: 轧机; 转速波动; 测量模型; 分解算法

中图分类号: TG 333.15

文献标识码: A

0 引言

轧机是带钢热轧厂的重要设备, 其运行状况不仅关系到轧机的寿命, 而且还直接影响到产品的质量^[1]。轧机在稳定工况运行时, 瞬时转速呈现出波动现象。从微观上看, 这种波动并无严格的周期性, 存在着时域上的不均匀性, 这种不均匀波动蕴含着丰富的传动系统运行状态信息。利用轧机动力学理论和测试信号分析技术认识和研究轧机扭振故障机理, 探求各种故障状况下瞬时转速波动的外在表现。

轧机主传动轴系稳态运转时外力的周期变化引起速度周期波动, 从而引发转动轴中附加动压力及轴系的弹性振动。轧机主传动轴系受各种干扰力矩激励而产生扭振, 导致传动轴的速度波动。速度波动过大会破坏传动系统稳态运转的平稳性, 同时交变转矩引发的交变应力会使轴系零部件疲劳寿命降低。利用扭振时转速和负载发生改变的性质, 通过对轧机主传动轴系的实际测试提取轧机主传动系统的瞬时转速来诊断各类扭振现象, 对扭振指标统计, 评估轴系疲劳寿命, 获得轴系扭振动力特性和状态信息十分必要。但是从实测瞬时转速信号本身难以剖析转速信号与主传动轴系部件之间的动力学内在联系^[2-3]。

笔者从轧机主传动系统的动力学方程出发经推导得到主传动系各部件的转矩输出与瞬时转速之间的关系^[4-5]。在弹性联接轴模型的基础上, 通

过合理抽象轧机主传动系统为二质量自由度转动惯量系统, 得到瞬时转速的辨识方法。再通过级数解耦方法把传动系的非线性稳态运动微分方程解耦成非线性代数方程组, 获得传动系的转速波动解。最后通过扭振测试实验, 用辨识机制测得的转速波动测量值修正理论转速波动值, 作为预测控制的输入, 来控制电机转速输出。

1 轧机传动系统模型

被分析的轧机结构, 如图1所示。轧机主传动系统的转速波动测量对于研究轧机扭振动力学或某些工艺过程的自动控制与调节是不可缺少的。当钢坯被咬入及抛出时, 轧机主传动系统会因动力或负载发生改变使转矩发生短暂或持续的变动或振荡, 从而激发起轴系的自由或强迫性扭转振动(轧机传动系统的转速低于200 r/min, 因此轧机扭振是低频扭振), 电机转速会有短时微小的下降及上升^[6]。又如带钢热轧轧机轧制时, 各机座转速之间的波动会引起轧件张力、轧制压力、厚度、前后滑等因素发生变化, 从而导致各机座之间的动力再分配。当速差波动超过一定值时, 将使连轧关系遭到破坏而使轧制无法进行下去。对这一转速微小波动的精确测量, 是分析电机与轧件、轧辊之间的能量交换所不可缺少的。通过测量辨识系统中的动态参数, 对控制器调整速度环参数零极点分布进行调整, 以提高系统的动态性能^[7-8]。

收稿日期:2007-10-24; 修订日期:2008-03-17

基金项目:山西省软科学研究计划项目(2007041001-02)

作者简介:张翠英(1971-), 女, 太原科技大学讲师, 硕士, 主要从事复杂工业过程的建模与控制等研究。



图1 某型轧机结构图

Fig.1 Rolling mill structure

根据轧机主传动系统的结构特点,驱动电机端的转动惯量远大于负载端的转动惯量,可以把动力学模型简化为一端是驱动电机,一端是负载的二自由度动力学模型,如图2所示。

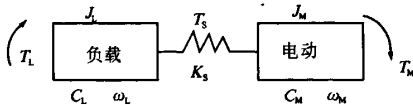


图2 轧机主传动系统动力学模型

Fig.2 Rolling mill master drive systems dynamics model

该系统的状态方程为:

$$\begin{bmatrix} \dot{\omega}_M \\ \dot{\omega}_L \\ \dot{T}_{SH} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{C_M}{J_M} & 0 & -\frac{1}{J_M} \\ 0 & -\frac{C_L}{J_L} & \frac{1}{J_L} \\ K_{SH} & -K_{SH} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_M \\ \omega_L \\ T_{SH} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{J_M} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{J_L} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_M \\ T_L \end{bmatrix} \quad (1)$$

当忽略系统的阻尼效应后,可以得到电机转子转速和电磁转矩之间的传递函数为

$$G_M(s) = \frac{\omega_M(s)}{T_M(s)} = \frac{1 + J_L s^2 / K_{SH}}{J_\Sigma \cdot s(1 + J_L J_M s^2 / J_\Sigma K_{SH})} \quad (2)$$

式中: s 为拉普拉斯算子; J_M 为驱动电机转动惯量; J_L 为负载端转动惯量; T_M 为驱动电机端转矩; T_L 为负载端转矩; C_M 为驱动电机端阻尼; C_L 为负载端阻尼; ω_L 为负载转速; ω_M 为驱动电机转速; K_{SH} 为连接轴的刚度系数; T_{SH} 为连接轴的转矩; $J_\Sigma = J_M + J_L$ 是系统的总的惯量。

由式(2)有

$$\omega_M = \frac{T_M}{s J_\Sigma} + \frac{s V_j T_M(s)}{J_\Sigma (s^2 + \omega_0^2)} \quad (3)$$

式中: $V_j = J_L / J_M$ 为负载与电机转子转动惯量比, $\omega_0 = \sqrt{K_{SH} J_\Sigma / (J_M J_L)}$ 是系统的自然角频率。由式(3)知,速度的响应分成两部分

$$\bar{\omega}_M = \frac{T_M(s)}{s J_\Sigma}$$

$$\omega_{\text{surge}} = \omega_M - \bar{\omega}_M = \frac{s V_j T_M(s)}{J_\Sigma (s^2 + \omega_0^2)} \quad (4)$$

式中: $\bar{\omega}_M$ 为角速度的平均响应; ω_{surge} 为角速度响应的振荡部分。

由式(4)看出,电机转速相当于在一个平均转速上叠加了一个振荡项。依据式(4)原理可实现电机端瞬时速度的辨识与测量。

轧机扭振的转速波动非平稳性表现为频率不变,与时间无关,信号随幅值调制。为能定量分析稳态下转速波动的特点,借用传统的分析非平稳信号短时傅立叶变换的思想,在一个固定的时间窗函数内研究,把非平稳信号在窗函数内看作平稳信号来研究,从而可以按傅立叶级数的形式展开,得到包含稳态特点的转速波动的定量表达式。

由功能转化原理轧机主传动系统中所有的外力做功总和等于系统的动能增量。即 $\Delta W = \Delta E$, 有

$$d\omega/d\varphi = [T_M(\omega) - T_L(\omega) - \omega^2 (dJ(\varphi)/d\varphi)/2] / \omega J(\varphi) \quad (5)$$

$$T_M = a + b\omega \quad (6)$$

轧机驱动力矩 T_M 是角速度函数,而阻力矩 T_L 看作是角位移函数。且阻力矩和转动惯量是周期为 2π 的 ϕ 的函数,则它们能表示成为

$$J = J_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (J_n e^{in\varphi} + J_{-n} e^{-in\varphi}) \quad (7)$$

$$T_L = T_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (T_n e^{in\varphi} + T_{-n} e^{-in\varphi}) \quad (8)$$

此处 J_n, J_{-n}, T_n, T_{-n} 都为复数。考虑到 J, T_L 为实数,因此有

$$J_n = \bar{J}_{-n}, T_n = \bar{T}_{-n} \quad (9)$$

上标“—”表示共轭复数。以下各式中“r”表示实部,“s”表示虚部,令

$$J_n = J_{nr} + iJ_{ns}, T_n = T_{nr} + iT_{ns} \quad (10)$$

$$J_{-n} = J_{nr} - iJ_{ns}, T_{-n} = T_{nr} - iT_{ns} \quad (11)$$

传动轴系稳态运转期间,角速度是 φ 的周期函数,周期为 2π ,可展成以下级数形式

$$\omega = \omega_0 + \sum_{m=1}^{\infty} (\omega_m e^{im\varphi} + \omega_{-m} e^{-im\varphi}) \quad (12)$$

如式(10)(11)一样,有

$$\omega_m = \omega_{mr} + i\omega_{ms}, \omega_{-m} = \omega_{mr} - i\omega_{ms} \quad (13)$$

把以上各式整理并比较各阶 ω_{mr}, ω_{ms} 系数,得一组代数方程以求解未知量 ω_{mr}, ω_{ms} ,若取 $m=0, 1, 2, \dots, n$, 则得 $2n+1$ 个方程,由此计算出 $\omega_0, \omega_{1r}, \omega_{1s}, \dots, \omega_{nr}, \omega_{ns}$ 。

2 轧机主传动系统转速波动测量模型仿真实验

轧机主传动系统作为旋转系统进行分析和实验要采用静止和旋转坐标系同时来描述。当旋转部件是轴对称、周期或准周期分布时,其模态特性不同于非旋转机械结构;另外旋转状态会有不平衡导致振动。这些特点必须在旋转机械模态分析理论中予以解决。如果在测量中采用的不是直接检测的物理量,则在数据处理中必须进行坐标变换处理,数据处理工作量很大。为此实验测试中选择能最直接反映轧机扭振特性的物理量——角速度作为测取的振动参数。

检测转轴角速度的变化一般可以采用光电编码器、光电码盘等传感器。但是他们都不宜在轧机传动系统扭振引起的角速度波动检测中使用^[6]。研究决定采用直流测速发电机测量转速,因为它能连续而又准确地将转速线性地转换成电压量,再通过光线示波器描绘出转速与时间的变化规律。用直流测速发电机测量转速时,为减小非线性误差,使负载电阻越大越好,即不低于额定值,同时所测的速度值也不应大于额定值。若被测轴转速在测速发电机的额定转速范围内时,可以直接测量,但要防止打滑和不同心。

笔者利用直流测速发电机测速原理测量转速的微小波动。轧机电动机转速的波动量(速差)较小,为提高测量转速差的精度及分辨力。可将波动转速最低值作为零点,并按其最高值选择指示仪表量程。图3是测量转速波动的原理图。

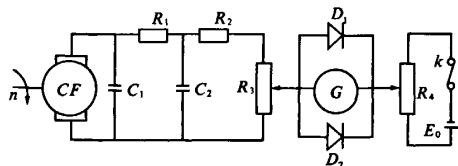


图3 测速发电机测量转速波动原理

Fig.3 Speed fluctuations measurement principle of tachogenerator

实验中主要检测的振动参数有弹性转轴的扭矩,电动机一端的转速波动,弹性转轴的瞬时转速及功率4个参数。依据上述原理在轧机主传动系统的接轴等处布置扭振监测点监测整个系统的运行状态,测取接轴的转速波动瞬时值,测得的弹性转轴的瞬时转速信号如图5所示,其前端放大如图6所示。可见,二者的波动变化趋势一致,都是在均值53 r/min上下波动,基频没有改变。对其进行FFT

变换,即可得扭振频谱,如图8所示。为防止谱线的“泄漏”,应尽量采用整周期采样。由电机端转速辨识算法公式(3)并结合式(13)得到电机端瞬时转速辨识值如图7所示,与图5比较,可见二者的变化趋势和变化节奏相当一致。说明系统负载变化时形成的扭振也改变了电机驱动轴的动特性。

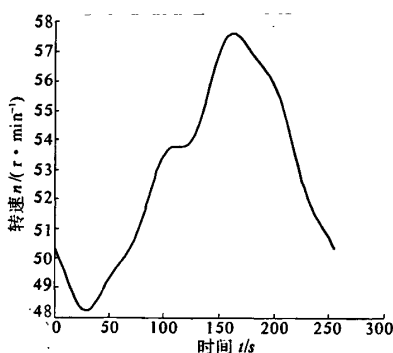


图4 弹性转轴转速波动的理论曲线

Fig.4 Theoretical speed oscillation curve of elastic driving shaft

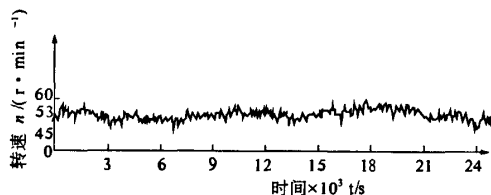


图5 弹性转轴转速波动实测曲线

Fig.5 Measured speed oscillation curve of elastic driving shaft

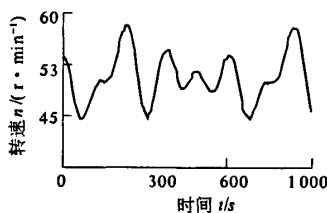


图6 弹性转轴的转速波动实测曲线前端放大

Fig.6 The enlarged head-end of the measured speed oscillation curve

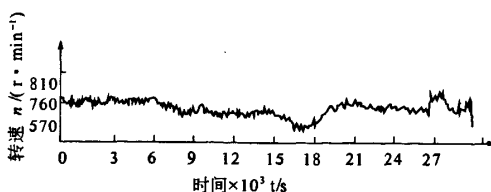


图7 电机端转速波动实测曲线

Fig.7 Measured speed oscillation curve of motor shaft

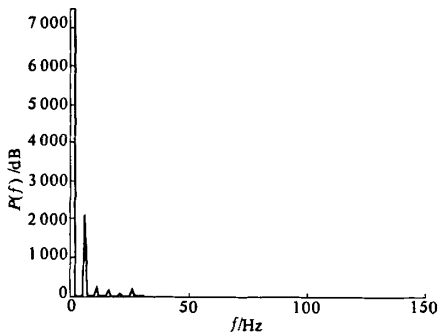


图8 弹性转轴的频谱分析图

Fig.8 Spectral analysis of elastic driving shaft

3 结论

通过构造一种级数解耦方法把轧机主传动系统的非线性稳态运动微分方程解耦成非线性代数方程组,从而解得转轴系真实转速波动。代数法易于编程,计算效率高于数值积分方法,在轧机扭振模拟实验平台上进行了模拟轧机实际轧制工况的实验,通过代数法编程实现高效率在线实时轧机扭振故障监测预测,实验结果证明了转速波动分解算法理论推导的正确性和可行性。

参考文献:

- [1] 张翠英,田建艳. 钢坯加热炉炉温仿人智能控制策略的研究[J]. 郑州大学学报:工学版. 2007,28(3): 91-94.
- [2] 陈立群,刘延柱. 振动力学发展历史概述[J]. 上海交通大学学报. 1997,31(7):132-136.
- [3] SMITH D, SMITH S, TLUSTY J. High performance milling torque sensor[J]. ASME Journal of Manufacturing Science&Engineering, 1998, 120(3): 504-514.
- [4] 董全林,刘彬. 在伽利略坐标变换下的二端面弹性转轴相似动力学方程[J]. 物理学报, 2002,51(10):2191-2196.
- [5] 董全林,刘彬. 二端面弹性转轴的相对论性相似动力学方程[J]. 中国机械工程,2003,14(20):1725-1728.
- [6] 刘彬,杨海马,刘谨. 轧机接轴动态扭矩测量及反馈控制模型的研究[J]. 仪器仪表学报,2005,26(5):537-541.
- [7] 张浩. 宝钢2030 mm冷连轧机速度控制系统的分析和仿真研究[J]. 冶金自动化,1989,(1).
- [8] 郑申白. 轧制过程自动化[M]. 北京:冶金工业出版社,2005.

Study on the Simulation and Measurement Model of Speed Oscillation of the Drive System of Rolling Mill

ZHANG Cui-ying, WEN Wei-zhong

(Institute of Chemical and Biological Technology, Taiyuan University of Science & Technology, Taiyuan 030021, China)

Abstract: To measure the vibration caused by the random speed fluctuations superimposed on the constant speed, this paper discusses the dynamic characteristics of the rolling mill's drive system when the elastic driving shaft and motor shaft had speed oscillation, and an instantaneous speed measurement model of rolling mill's drive system was established. A new highly active calculation decomposition algorithm was proposed by using series decoupled method. The decomposition algorithm can develop nonlinear differential equation into a series of algebraic equation. The research work verified the correctness and feasibility through the experiment of the simulative rolling processing on the torsion vibration laboratory platform.

Key words: rolling mill; speed oscillation; measuring model; decomposition algorithm