

# 四辊轧机的六自由度垂直振动模型研究

马维金<sup>1</sup> 李凤兰<sup>2</sup> 王俊元<sup>1</sup> 熊诗波<sup>2</sup>

1. 中北大学,太原,030051 2. 太原理工大学,太原,030024

**摘要:**提出一种四辊轧机工作机座垂直振动的六自由度集中质量模型,利用 MATLAB 软件平台对机座垂直振动的固有频率进行了数值计算。现场振动测试结果表明,计算结果比较精确。所构建的轧机工作机座垂直振动模型可以用于进行动力学仿真分析和结构动力学修改,对于全面掌握和了解四辊轧机的振动特性、避免轧机产生垂直自激振动和提高轧机的生产效率及轧制产品质量都有重要的理论和实际意义。

**关键词:**轧机工作机座;垂直振动模型;固有频率;数值计算

**中图分类号:**TG333.7;TH113 **文章编号:**1004—132X(2011)24—2962—04

## Modelling and Validation of Vertical Vibration with 6 Degrees of Freedom for 4—high Hot Strip Mill Stand

Ma Weijin<sup>1</sup> Li Fenglan<sup>2</sup> Wang Junyuan<sup>1</sup> Xiong Shibo<sup>2</sup>

1. North University of China, Taiyuan, 030051

2. Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan, 030024

**Abstract:** A lumped mass model with 6 degrees of freedom for the vertical vibration of 4—high hot strip mill stand was proposed, and then its modal frequencies were calculated by MATLAB package. Field vibration testing results confirm that the numerical calculation is relatively accurate. This vertical vibration model can be used for dynamics simulation and structural dynamics modification, which provides important theoretical and practical significances for mastering and understanding the vibration characteristics of 4—high mill stand, avoiding vertical self—excited vibration, enhancing rolling efficiency and improving product quality.

**Key words:** hot strip mill stand; vertical vibration model; modal frequency; numerical calculation

## 0 引言

机架是轧机中最重要的零部件之一,用来安装轧辊辊系和轧辊调整装置并承受轧制力,其振动特性和变形将影响整个设备的可靠性和产品的轧制精度<sup>[1]</sup>。轧机机架垂直振动系统的固有频率是其重要的动力学特性,对判断轧机振动的类型、性质和决定抑振措施等都是必不可少的基本参数<sup>[2-4]</sup>。

四辊轧机垂直振动固有特性指标也是现代轧机动态设计和动力学修改的重要参数。轧机机座发生的自激振动是与轧机本身的固有频率及其振型密切相关的,因此,全面掌握和了解四辊轧机的固有频率及其振动特性,是轧机振动分析的基本条件<sup>[5]</sup>。

国内外已有不少学者研究了轧机垂直振动系统固有频率的计算问题,所提计算模型主要有有限元模型和集中质量模型两大类<sup>[6-9]</sup>。对于轧机机架,采用有限元整体模型法进行分析计算,其模

型计算精度较高,但是模型描述过于复杂,不适合作为轧机系统仿真分析的数字化模型<sup>[9]</sup>。在分析轧机系统的垂直振动时,由于研究的侧重点不同,往往采用不同的简化模型。根据研究的目的和精度要求,通常将轧机系统简化为六自由度、四自由度、二自由度或单自由度系统。二自由度模型和单自由度模型对实际的轧机系统做了很大的简化,使得模型精度描述不足,轧机的许多振动特性未得到充分表达<sup>[10]</sup>。本文将轧机工作机座垂直振动系统简化为非对称六自由度模型,简化适度,有利于进一步在机架整体振动控制仿真模型中应用,现场振动测试表明,计算结果比较精确。

## 1 轧机工作机座的六自由度垂直振动模型

某钢厂热连轧机工作机座简图见图 1,该轧机六自由度弹簧质量系统的简化模型如图 2 所示。

图 2 中, $m_1$  为机架立柱及上横梁(包括油缸)的等效质量; $m_2$  为上支撑辊及其轴承、轴承座的等效质量; $m_3$  为上工作辊系的等效质量; $m_4$  为下

收稿日期:2010—10—08

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50975188);山西省回国留学人员科研基金资助项目(20101477)



观察图 3 可以发现,该热连轧机机架的第一阶 52.9Hz、第二阶 114.1Hz 和第五阶 383.4Hz 模态频率对应的振型恰好是两工作辊反向运动的振型,符合轧机发生自激振动的特征。

### 3 现场振动测试及模型参数验证

精轧第五机架轧出板带厚度为 3mm,咬钢时板带速度为 4.9m/s,抛钢时板带速度为 5.3m/s,工作辊直径为 650mm。试验时,通过钢带咬入时激起的机架振动波形测量垂直振动系统的固有频率。现场轧机垂直振动测试的测点布置如图 4 所示。测点布置在驱动侧机架顶部右肩和上支撑辊轴承座上,以反映机架和上辊系的动态特性。图 4 中,X 方向为轧制板带流向,Y 方向平行于轧辊轴线指向驱动侧,Z 向为垂直方向。5 号、6 号和 7 号加速度计为集成的三向加速度计,用于检测驱动侧机架顶部的 X、Y、Z 三向振动响应;15 号加速度计用于检测驱动侧上支撑辊轴承座的 Z 向振动响应。图中的测点号和 DEWETRON 数据记录仪的通道号一致,测点号后的 *x*、*y* 和 *z* 表示坐标方向。采样频率 2000Hz,分析频带宽 1000Hz,记录长度 141s,为轧制两块板带的时间过程。

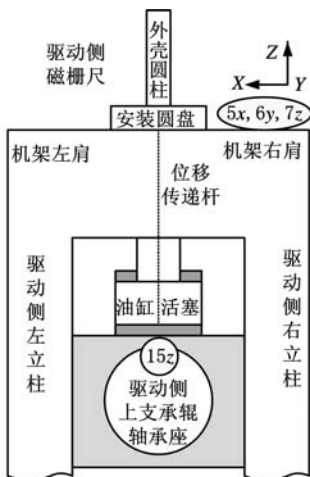
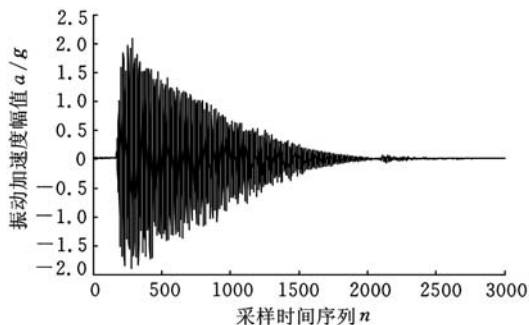


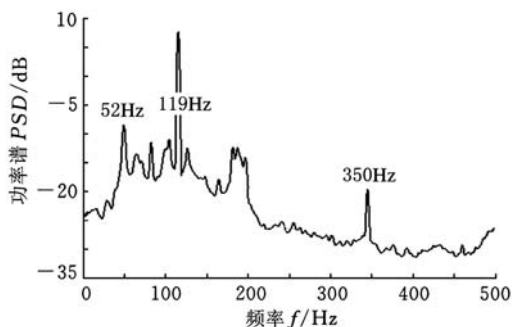
图 4 轧机工作机座振动测试的测点布置示意图

X 方向和 Y 方向的信号强度较弱,不予考虑,实际只分析两个测点的 Z 方向信号。采用 MATLAB 软件进行功率谱分析的结果如图 5 和图 6 所示。分析信号截取咬钢瞬间长度为 1.5s 的 3000 个样本,分析频带 1000Hz,图 5 中仅显示 500Hz 以下的谱分布。

从图 5 和图 6 的原始信号可见,在咬钢的瞬间机架开始剧烈振动,此后振幅衰减,大约 1s 以后振动消失,进入稳态轧制过程。从图 5 和图 6

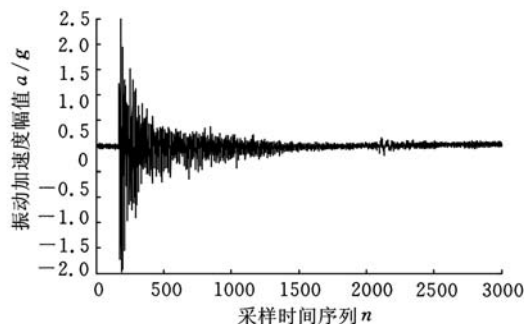


(a)原始信号

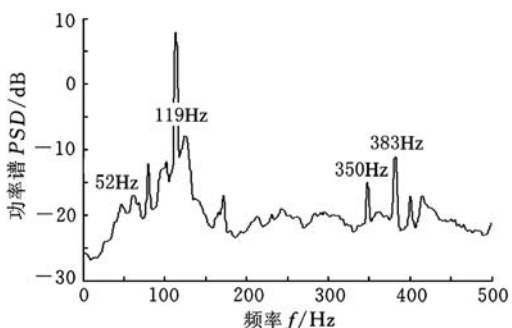


(b)功率谱

图 5 上支撑辊轴承座垂直方向 15 号测点的振动加速度信号及其功率谱



(a)原始信号



(b)功率谱

图 6 驱动侧机架顶部右肩部垂直方向 7 号测点的振动加速度信号及其功率谱

的功率谱上提取的机架垂直振动各阶模态频率如表 2 所示,表中列出了理论计算值以做对比。

从图 5 的功率谱可见,上支撑辊的垂直振动主要包括第一阶模态频率(52Hz)的成分、第三阶

模态频率(119Hz)的成分以及第四阶模态频率(350Hz)的成分。从图6的功率谱可见,机架顶部的垂直振动主要包括第三阶模态频率(119Hz)、第四阶模态频率(350Hz)以及第五阶模态频率(383Hz)的成分。机架的振动信号频率分布中,没有出现第二阶(114Hz)和第六阶(470Hz)的频率成分,这可能反映了轧机机架的实际振动特性,所以,实际构建仿真模型时可以将此两个自由度省略,简化为四自由度模型。

由表2可见,测试信号中包含的第一阶模态频率52Hz、第三阶模态频率119Hz和第五阶模态频率383Hz,与前面的理论计算结果相比较,误差都小于1Hz。而测试信号中包含的350Hz频率成分,如果认为是第四阶模态频率的话,与理论计算结果(366Hz)相比误差仍然小于5%。表明本文所提计算模型的计算精度较高,固有频率的计算结果与实测值具有良好的一致性,对轧机的动态分析是适宜的。

#### 4 结论

将轧机工作机座垂直振动系统简化为非对称六自由度模型,理论计算了系统的六阶固有频率和振型。经过现场振动测试证实,该系统实际振动信号中包含有四阶模态频率,固有频率的计算结果与实测值具有良好的一致性,计算误差小于5%,表明本文所提出的模型的计算精度较高。分析结果表明,此振动系统可以适度简化为四自由度模型,有利于进一步在机架整体振动控制仿真模型中应用。

#### 参考文献:

- [1] 王怀民,刘正士. 四辊热轧机机架动态特性分析[J]. 合肥工业大学学报,2009,32(3):351-354.
- [2] 杨其俊,连家创. 高速冷带轧机垂直自激振动稳定性分析的数值计算方法[J]. 振动与冲击,1996,15(3):16-21.
- [3] 蔡敢为,段吉安,易幼平,等. 一种轧机动力分析有限元模型[J]. 机械工程学报,2000,36(7):66-68.
- [4] 汤宏海,李友荣,刘安中. 四辊轧机机架有限元分析[J]. 武汉科技大学学报,2009,32(2):149-153.
- [5] 肖云平,刘义伦,周贤. 四辊轧机机座垂直振动仿真与分析[J]. 机械,2008,35(1):17-18.
- [6] 马维金,李凤兰,熊诗波. 热连轧机自激振动诊断与

振动机理分析[J]. 振动测试与诊断,2006,26(4):261-264.

- [7] Ma Weijin. Experimental Modal Analysis of Roller Gap Sensor Structure on Hot Rolling Mill[C]//International Conference on Manufacturing Science and Engineering, ICMSE 2009. Zhuhai, China, 2009:4328-4331.
- [8] 马维金,熊晓燕,李凤兰,等. 热连轧机位移传感器的结构动力学分析[J]. 机械工程学报,2009,45(7):259-264.
- [9] Ishino Kazushige, Kabeya Kazuhisa, Yoshikawa Takao. Vibration Analysis of Chatter in Cold Rolling Mill (Theoretical Study on Self-excited Vibration by a Two-DOF Mass-Spring-Damper Model)[J]. 日本機械学会論文集C編,2003,69(687):2975-2982.
- [10] Yun I S, Wilson W R D, Ehmann K F. Review of Chatter Studies in Cold Rolling[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 1998, 38:1499-1530.

(编辑 苏卫国)

作者简介:马维金,男,1957年生。中北大学机械工程与自动化学院教授。研究方向为机械系统动力学与故障诊断。获山西省科技进步二等奖1项,获中国发明专利2项。发表论文13篇。  
李凤兰,女,1957年生。太原理工大学机械工程学院高级工程师。  
王俊元,男,1968年生。中北大学机械工程与自动化学院教授。  
熊诗波,男,1939年生。太原理工大学机电所教授、博士研究生导师。

(上接第2922页)

- [8] 吕延军,张永芳,季丽芳,等. 固定瓦-可倾瓦滑动轴承转子非线性系统的动力特性分析[J]. 中国电机工程学报,2010,30(20):79-87.
- [9] 李旗,吕延军,戴融,等. 轴承-转子系统不平衡周期响应的稳定性和分岔[J]. 振动、测试与诊断,2008,28(3):191-195.
- [10] 吕延军,虞烈,刘恒. 椭圆轴承-转子系统非线性运动及稳定性分析[J]. 机械工程学报,2006,42(4):88-95.

(编辑 苏卫国)

作者简介:黑 林,男,1983年生。陕西铁路工程职业技术学院机电工程系助教、工学硕士。主要研究方向为非线性动力学。  
郑美茹,女,1983年生。陕西铁路工程职业技术学院机电工程系助教、工学硕士。