

文章编号:1000-582X(2008)04-0393-04

中厚板轧机非线性参激的振动

孟令启,徐如松,王建勋,雷明杰,吴浩亮

(郑州大学 机械工程学院,河南 郑州 450001)

摘要:建立了中厚板轧机两自由度非线性参激振动模型,分析了轧机振动系统在主参数共振情形下的振动特性,尤其是振动系统随激励参数变化的拟周期振动和混沌运动现象。分析结果表明:轧制过程中轧制力的周期性变化可以导致轧机振动系统混沌运动的产生;避免激振力频率与系统固有频率相近,以防止混沌的出现。

关键词:轧机; 颤振; 共振; 混沌; 参数激励

中图分类号: TG335.12

文献标志码: A

Parametrically excited nonlinear vibrations of medium and heavy plate milling

MENG Ling-qi, XU Ru-song, WANG Jian-xun, LEI Ming-jie, WU Hao-liang

(School of Mechanical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, P. R. China)

Abstract: A nonlinear parametrical excited vibration model with two degrees of freedom for medium and heavy plate milling system was established. The milling system vibration features when the rolling vibration system was in resonance vibration with the main parameters were analyzed, especially the quasi-periodic and chaotic vibrations of the vibration system with excitation parameters. The results indicate that in the periodical rolling process, variable rolling forces would result in chaotic vibrations and that the frequency of exciting force near the natural frequency of the vibration system should be avoided to eliminate chaos.

Key words: rolling milling; vibration; resonance vibration; chaos; parametric excitation

随着现代化工业的迅猛发展,各行各业对中厚钢板的需求量不断增大,同时对其质量的要求也越来越高。然而,轧制过程中常常发生的轧机颤振现象,不仅对轧件表面的粗糙度、轧件精度等产生不利影响,而且严重时,可能导致轧机设备的损坏,甚至造成人员伤亡。因此,长期以来许多科研人员致力于轧机颤振理论的研究以揭示其机理,掌握其规律,从而加以控制和利用^[1-3]。

Yatita 等人将轧机按上下辊系简化为两自由度线性垂振系统,研究了轧机的线性参激共振现象,并给出了参数共振的稳定性判别式^[3-5]。然而,实践证明,轧机系统的阻尼系数不可能是完全线性的,轧制

过程中轧制力的大小也是有波动的,轧制力的波动会造成轧件的厚度波动,这会使轧件表面产生振纹,从而影响到产品的质量和精度。为此,笔者建立了一种两自由度非线性参激振动模型,研究了轧机的非线性参激共振现象。通过功能强大的 MATLAB 软件对模型进行非线性动力学计算和分析,得到当参数激励频率在振动系统固有频率附近时该振动系统的振动状态,并研究了振动系统非线性参激共振时的稳定性。

1 轧机非线性参激振动模型

为便于分析,将轧辊按上下辊系简化为两自由

收稿日期:2007-12-18

基金项目:国家自然科学基金资助项目(10176010)

作者简介:孟令启(1962-),男,郑州大学教授,主要从事冶金机械力学行为研究,(E-mail)mengqi6388@163.com。

欢迎访问重庆大学期刊网 <http://qks.cqu.edu.cn>

度垂直振动系统(如图 1 所示)。其中 m_1 代表机架上部、上支承辊辊系和上工作辊辊系的质量, m_2 代表机架下部、下支承辊辊系和下工作辊系的质量, k_2 代表整个辊隙间刚度的均值。考虑轧机系统的非线性阻尼特性, 将 $c_1 + c_2 x_1^2$ 和 $c_3 + c_4 x_2^2$ 定义为轧机系统的非线性阻尼项, P 为轧制力, 是圆角频率为 ω 的参数激励。

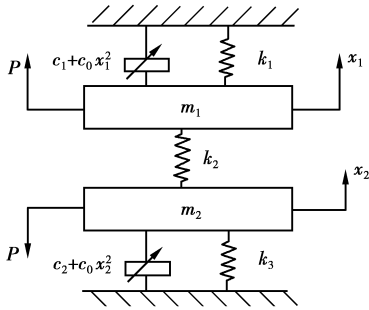


图 1 轧机非线性参激振动动力学模型

因此, 中厚板轧机非线性参激振动的运动方程的矩阵形式为^[4-5]

$$[\mathbf{M}]\{\ddot{\mathbf{x}}\} + [\mathbf{C}]\{\dot{\mathbf{x}}\} + [\mathbf{K}]\{\mathbf{x}\} = \{\mathbf{Q}(t)\}, \quad (1)$$

式中: $[\mathbf{M}]$ 、 $[\mathbf{C}]$ 、 $[\mathbf{K}]$ 分别为系统的质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵; $\{\ddot{\mathbf{x}}\}$ 、 $\{\dot{\mathbf{x}}\}$ 、 $\{\mathbf{x}\}$ 分别为各等效质量的加速度、速度和位移列阵; $\{\mathbf{Q}(t)\}$ 为随时间变化的轧制载荷列向量。

$$[\mathbf{M}] = \begin{bmatrix} m_1 \\ m_2 \end{bmatrix}; [\mathbf{C}] = \begin{bmatrix} c_1 + c_0 x_1 & \\ & c_2 + c_0 x_2 \end{bmatrix};$$

$$[\mathbf{K}] = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k \\ -k & k_2 + k_3 \end{bmatrix}, \text{ 将式(1)化为方程组形式}$$

$$\left. \begin{aligned} m_1 \ddot{x}_1 + (-c_1 + c_0 x_1^2) \dot{x}_1 + (k_1 + k_2)x_1 - k_2 x_2 &= P \\ m_2 \ddot{x}_2 + (-c_2 + c_0 x_2^2) \dot{x}_2 - k_2 x_1 + (k_2 + k_3)x_2 &= -P \end{aligned} \right\}, \quad (2)$$

在以往的研究中, 为了简化计算, 往往设定振动系统的阻尼为线性阻尼, 即比例阻尼, 阻尼是质量和刚度的线性函数, 表达式为 $[\mathbf{C}] = \alpha[\mathbf{M}] + \beta[\mathbf{K}]$, 根据实际情况适当选取 α 、 β 的值。这种假定在一定程度上可以用来分析轧机的振动, 但不能够很恰当的反

映出真实的阻尼情况, 所以也不能得到更为精确的分析结论。

文中的非线性模型考虑了非线性阻尼特性, 忽略式(1)中的非线性项, 根据 4200 中厚板轧机的实际物理参数值, 可以计算出两自由度振动系统的固有角频率分别为^[1]: $\omega_{n1} = 428$, $\omega_{n2} = 1\ 127$ 。

由非线性振动理论可知, 两自由度非线性振动系统可能导致多种共振现象, 如内共振、组合共振、主参数共振等。对于内共振, 系统的自由度振动角频率必须满足 $n_1 \omega_{n1} + n_2 \omega_{n2} = 0$, 其中 n_i 为整数, $i=1, 2$; 而对于组合共振现象, 系统的自由振动角频率必须满足 $n_1 \omega = n_1 \omega_{n1} + n_2 \omega_{n2}$, 其中 n 为自然数。对于两自由度振动系统, 组合共振角频率经常出现在 2 个固有频率之间^[6]。文中主要讨论参激角频率 ω 接近于线性系统某个固有角频率时的情况, 即主参数共振情况。

2 轧机振动系统主参数共振分析

对模型的计算和分析, 是通过 MATLAB 软件编程实现的, 同时采用时间历程图、相图、庞加莱映像图以及功率图谱来研究系统在不同参数条件下的动力学行为。

首先, 讨论参激角频率 ω 接近于固有角频率 ω_{n1} 时轧机振动系统的动力学行为。其时间历程图、相图、庞加莱映像图以及功率图谱如图 2-5 所示。图中(a)、(b)分别表示分布质量 m_1 和分布质量 m_2 所对应的运动状态。

相平面图为闭轨线, 说明运动是周期的; 相平面图比较杂乱, 说明运动并不是特别稳定, 非线性运动比较明显, 经过较长的周期不能判断轨线是否闭合。

随着时间的增加, 振幅基本保持不变, 功率谱只在基频处出现尖峰, 所以可判断运动为周期性的, 可以把轧机的振动视为轧机系统内部的非线性阻尼项和外部激励力共同作用, 从而使激励和耗散交织作用系统, 使之做周期运动, 并有向准周期运动过渡的趋势^[7]。

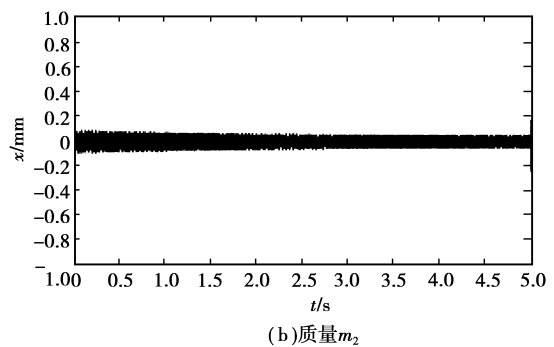
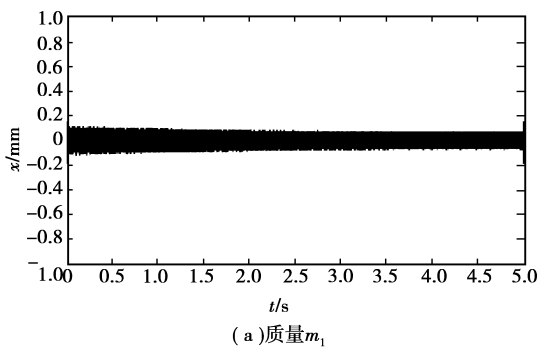


图 2 ω 接近 ω_{n1} 时的时间历程图
欢迎访问重庆大学期刊网 <http://qks.cqu.edu.cn>

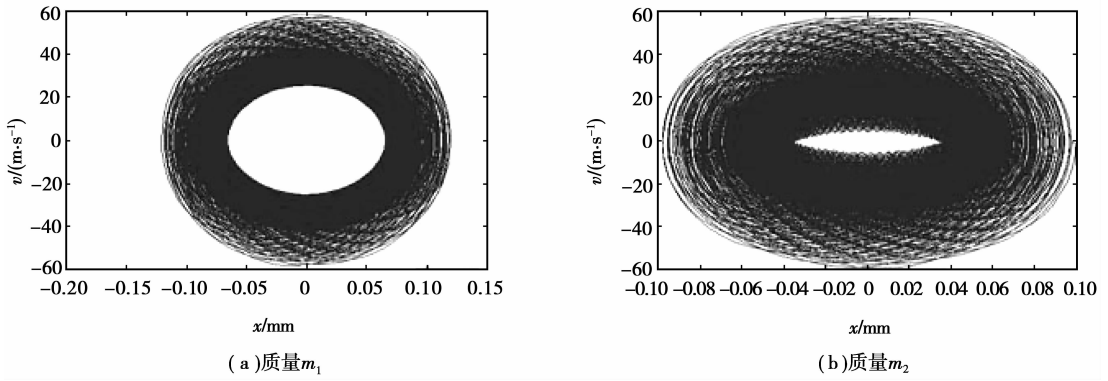


图 3 ω 接近 ω_{n1} 时的相图

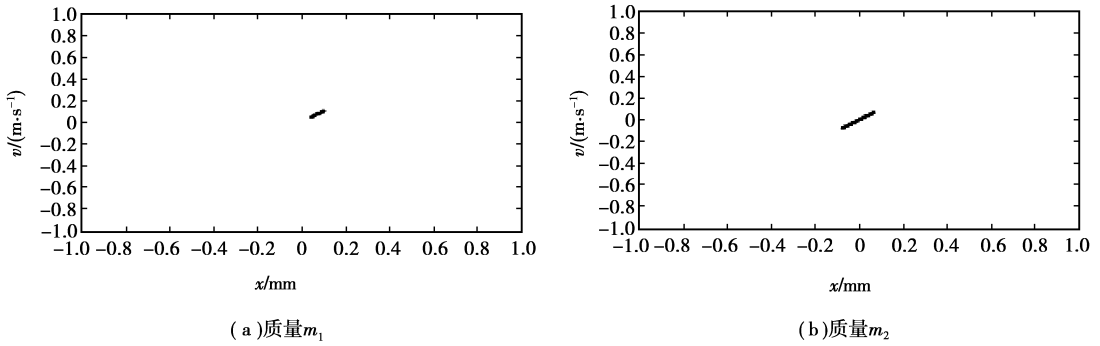


图 4 ω 接近 ω_{n1} 时的庞加莱映像图

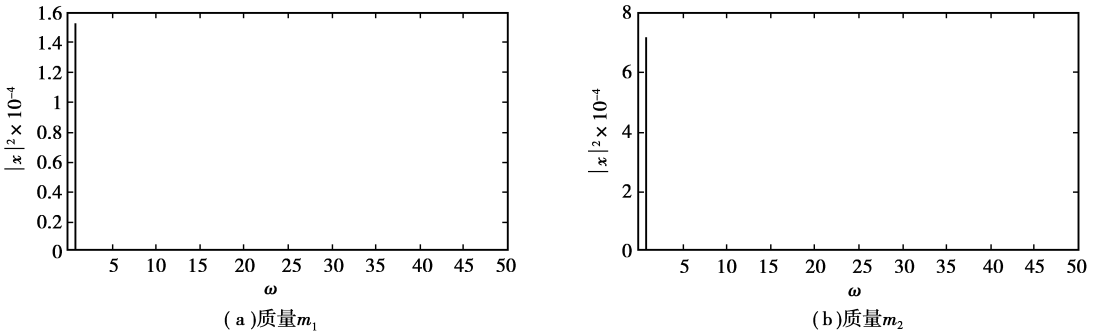


图 5 ω 接近 ω_{n1} 时的功率图谱

庞加莱映像图为一一些离散的不动点和类似闭合曲线,由此可以判断运动是周期的,但有向准周期运动发展的趋势。

其次,讨论参激角频率 ω 接近于固有角频率 ω_{n2} 时轧机振动系统的动力学行为,其时间历程图、相图、庞加莱映像图以及功率图谱如图 6-9 所示^[8]。

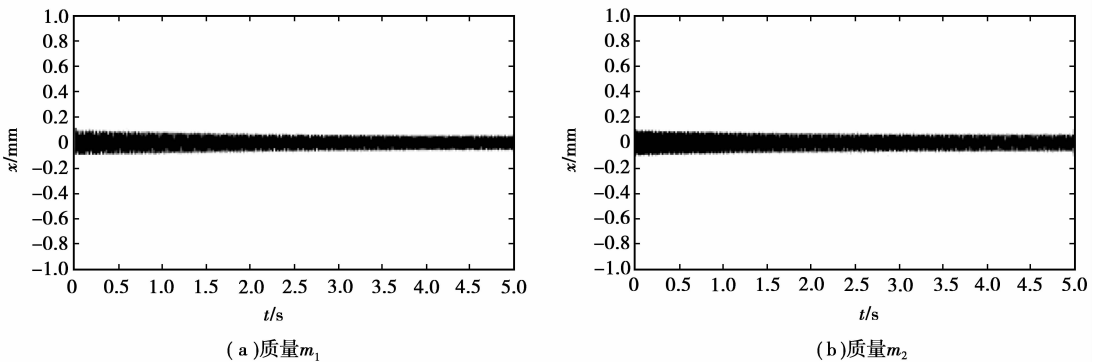
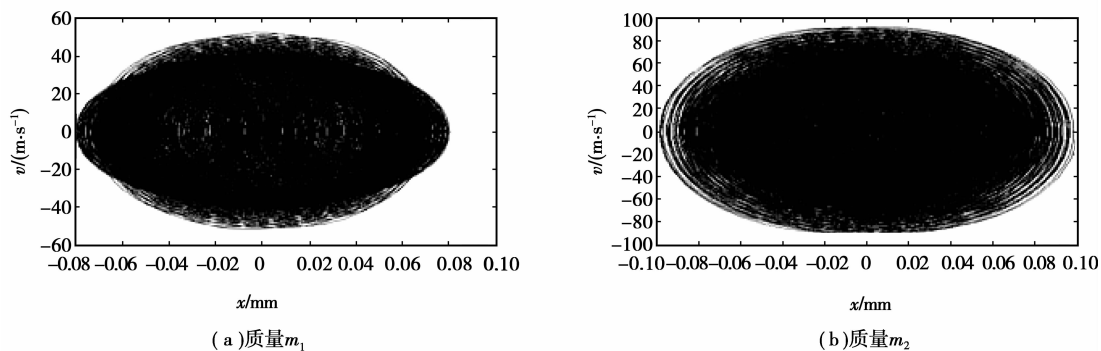
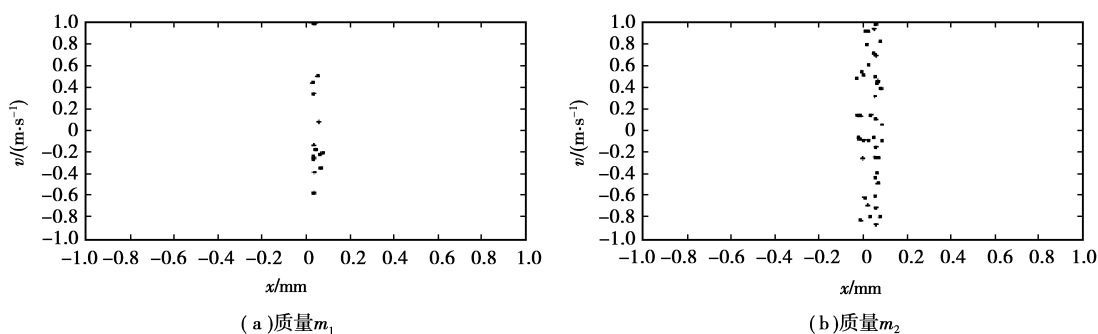
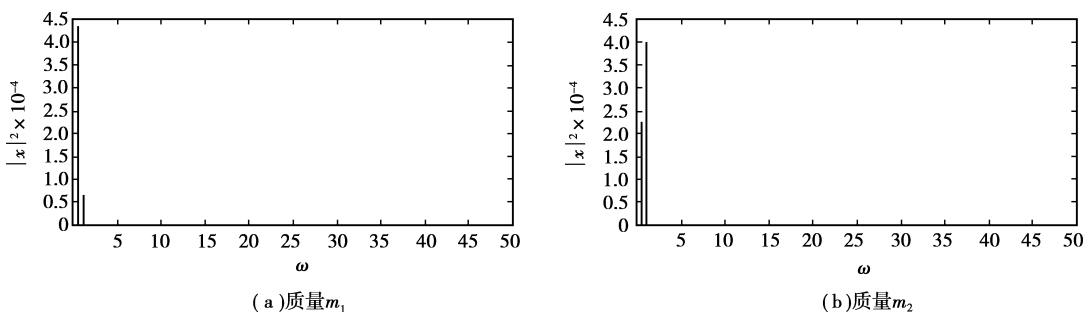


图 6 ω 接近 ω_{n2} 时的时间历程图

图7 ω 接近 ω_{n2} 时的相图图8 ω 接近 ω_{n2} 时的庞加莱映像图图9 ω 接近 ω_{n2} 时的功率图谱

由于系统有非线性阻尼的存在,起初系统的振动是衰减振动,随着时间的增加,振幅基本保持不变,这是由于激振力的作用^[9]。

相平面图为闭轨线,说明运动是周期的。相平面图比较杂乱,说明运动并不是特别稳定,非线性运动比较明显,经过较长的周期不能判断轨线是否闭合。

庞加莱映射图为一一些离散的不动点和类似闭合曲线,由此可以判断运动时周期的,但有向准周期运动发展的趋势^[10]。

功率谱只在基频处出现尖峰,所以可判断运动为周期性的,可以把轧机的振动视作为轧机系统内部的非线性阻尼项和外部激振力共同作用,从而使

激励和耗散交织作用系统,使之做周期运动,并有向准周期运动过渡的趋势。

3 结 论

1) 轧制力的周期性波动,可以导致振动系统产生混沌;

2) 实际生产中要避免激振力频率与系统固有频率相近的工况,以避免混沌的出现;

3) MATLAB 软件可以用来进行非线性动力学计算,而且实践证明具有较高的效率。

(下转第 412 页)

- tion with one cycle control [J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(19): 81-85.
- [5] ZHOU LUO-WEI, SMEDLY K M. Unified constant-frequency integration control of active power filters [C]. New Orleans: APEC, 2000: 406-412.
- [6] SMEDLY K M, ZHOU LUO-WEI, QIAO CHONG-MING. Unified constant-frequency integration control of active power filters: steady-state and dynamics [J]. IEEE Trans Power Electronics, 2001, 16(3): 428-436.
- [7] 谢品芳, 杜雄, 周维维. 单周控制直流侧单相有源电力滤波器 [J]. 电工技术学报, 2003, 18(4): 51-55.
XIE PIN-FANG, DU XIONG, ZHOU LUO-WEI. One cycle controlled DC side single phase active power filter [J]. Transaction of China Electrotechnical Society, 2003, 18(4): 51-55.
- [8] 王群, 姚为正, 刘进军, 等. 电压型谐波源与串联型有源电力滤波器 [J]. 电力系统自动化, 2000, 24(7): 30-35.
WANG QUN, YAO WEI-ZHENG, LIU JIN-JUN, et al. Voltage type harmonic source and series active power filter [J]. Automation of Power Systems, 2000, 24(7): 30-35.
- [9] 游小杰, 李永东, VALONCH V, 等. 并联型有源电力滤波器在非理想电源电压下的控制 [J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(2): 55-60.
YOU XIAO-JIE, LI YONG-DONG, VALONCH V, et al. SAF control strategy under the condition of non-ideal source voltages [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(2): 55-60.
- [10] ERTL H, KOLAR J W. A constant output current three-phase diode bridge rectifier employing a novel "electronic smoothing inductor" [J]. IEEE Trans Industrial Electronics, 2005, 52(2): 454-461.

(编辑 李胜春)

(上接第 396 页)

参考文献:

- [1] 孟令启, 胡尚峰. 中厚板轧机压力数学模型研究 [J]. 郑州大学学报, 2000, 66(2): 60-64.
MENG LING-QI, HU SHANG-FENG. Mathematical model of rolling pressure for middle-thicken plate mill [J]. Journal of Zhengzhou University, 2000, 66(2): 60-64.
- [2] 孟令启. 基于 BP 神经网络的中厚板轧机轧制力模型 [J]. 钢铁研究学报, 2006, 69(11): 100-108.
MENG LING-QI. Rolling force model of plate rolling mill based on BP neural network [J]. Journal of Iron and Steel Research, 2006, 69(11): 100-108.
- [3] 孟令启. 中厚板轧机宽展的神经网络预测 [J]. 中国机械工程, 2006, 17(18): 112-115.
MENG LING-QI. Width variable prediction in medium plate mill by means of neural network [J]. China Mechanical Engineering, 2006, 17(18): 112-115.
- [4] 李光耀, 谭长平. 基于遗传算法的变压边力模型及其在回弹控制中的应用 [J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2005, 32(2): 1-5.
LI GUANG-YAO, TAN CHANG-PING. A variable blankholder force model based on genetic algorithm and its application in springback analysis [J]. Journal of Huan University: Natural Sciences, 2005, 32(2): 1-5.
- [5] 孙一康. 带钢热连轧的模型与控制 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2002: 187-194.
- [6] 邹家祥. 轧钢机械 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1988: 151-175.
- [7] 孙占刚. 轧机闭式机架的有限元分析及优化设计 [J]. 冶金设备, 2004(3): 8-11.
SUN ZHAN-GANG. Finite element analysis and optimization design of close-top mill housing [J]. Metallurgical Equipment, 2004(3): 8-11.
- [8] 陆松年. 4200 四辊轧机机架辊接轴受力的实验分析和改进意见 [J]. 舞钢技术, 1987, 13(5): 1-12.
LU SONG-NIAN. Breast roller spadle's experimental analysis and improvement suggestion of 4200 four-high mill [J]. Wugang Technology, 1987, 13(5): 1-12.
- [9] 铁摩辛柯. 工程中的振动问题 [M]. 北京: 人民铁道出版社, 1978: 135-182.
- [10] 顾绳谷. 电机及拖动基础 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1991: 53-154.

(编辑 陈移峰)