

应用激光全息干涉术及有限元法对2050热连轧机机座自振特性的三维分析*

刘慰俭 蒋维兴 瞿志豪

(上海工业大学) (上海冶金专科学校)

摘 要

根据相似理论,进行了宝山钢铁总厂热轧厂2050热连轧精轧机机座自振特性的三维模拟研究,并应用全息干涉术进行了前三阶主振型分析,本文还进行了三维有限元数值分析与模拟值进行了映照,二者结果是吻合的。

关键词 自振特性 全息干涉 数值分析 固有频率 固有振型

一、引 言

从联邦德国SMS公司引进的、目前属于国内最先进的2050热连轧生产线已在上海宝山钢铁总厂进入安装、调试。图1是现场安装场景。为配合生产,本文进行了该机座自振特性的三维模拟研究和有限元数值计算。

对于板带材的生产,一个理想的板型是人们所期望的板型的控制一直是重要的研究课题。理论和实践证明,在连轧过程中,机座的振动是直接影响板型的一个重要因素,了解轧钢机机座,特别是精轧机机座特性,避免工作激励频率落在机座的共振域内是板控制的一个有意义的工作。

对于整个机座自振特性的研究,其意义还不仅是有益于板型的控制,它对机架应力峰值处的疲劳估计、机座连接件的疲劳估计及紧固、生产噪音的控制;以及动态响应的研究都有极其重要的参考价值。

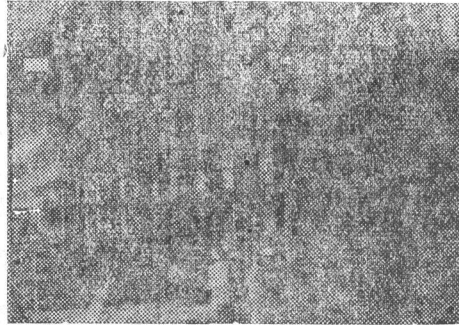


图1 测频率的实验仪器

* 创刊十周年暨一百期纪念特刊(Ⅲ)论文。刘人怀推荐,1990年5月19日收到。

二、自振特性的模拟分析

1. 振动分析的相似理论及误差处理

模拟研究成功与否的先决条件是要确立一定准确的相似关系。图2是精轧机机座实型的主要结构尺寸图，资料给出了三维结构自振频率相似关系：

$$K_p = \frac{P'}{P} = \frac{1}{K_l} \sqrt{K_E/K_\rho} \quad (2.1a)$$

$$K_\nu = \frac{\nu'}{\nu} = 1 \quad (2.1b)$$

$$K_x = K_y = K_z = K_l \quad (2.1c)$$

这里 K_p , K_ν , K_E , K_ρ , K_l 分别为频率、泊桑数、弹性模量、密度及几何相似准数，带撇的表示模型值。实型与模型的有关参数列于表1中。(2.1) 式中诸关系式表明频率相似转换的前题必须保证 (2.1b)、(2.1c) 二式。图3是根据 (2.1c) 式制作的环氧材料立体模型。

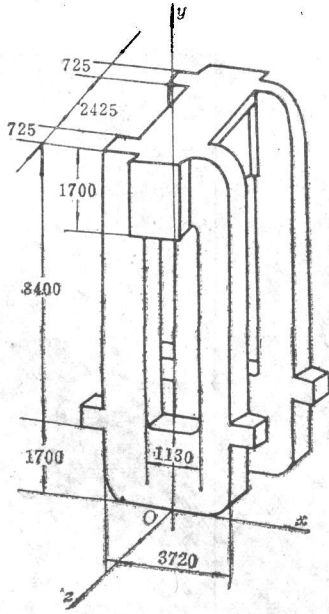


图 2

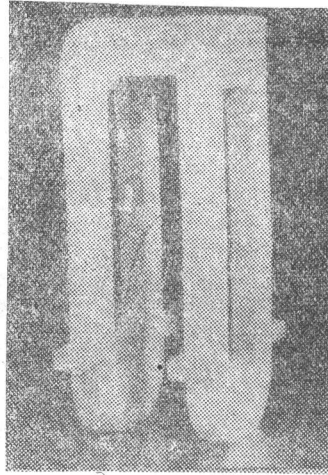


图3 精轧机机架的模型

环氧制作模型比钢材省事省钱，但因为 $K_\nu \neq 1$ ，在模拟中会带来转换误差，这种差值由下式估计

$$\delta = \frac{(K_L|_{K_\nu=1} - K_L|_{K_\nu})}{K_L|_{K_\nu=1}} \quad (2.2)$$

这里 $K_L = (\lambda' + G')/(\lambda + G)$ 。误差的补偿方法是根据误差值 δ 建立一个误差补偿修正系数

$$\Delta = \frac{1}{1 - \delta} \quad (2.3)$$

这样 (2.1a) 式在 $K_\nu \neq 1$ 情况下可以写成

$$K_p|_{K_\nu \neq 1} = K_p \cdot \Delta \quad (2.4)$$

表 1

	$\rho(\text{Ns}^2/\text{m}^4)$	$E(\text{N}/\text{m}^2)$	ν	$G(\text{N}/\text{m}^2)$	$\lambda^*(\text{N}/\text{m}^2)$	$l(\text{mm})$
ZG-25	7.8×10^3	200×10^9	0.25	80×10^9	80×10^9	10100
618号环氧	1.28×10^3	3.4×10^9	0.32	1.28×10^9	2.28×10^9	195
相似准数	0.164	1.7×10^{-2}	1.28	1.6×10^{-2}	2.8×10^{-2}	1.93×10^{-2}

* λ 为拉梅常数 $\lambda = [E/2(1+\nu)(1-2\nu)]$; G 为剪切弹性模量。

2. 模拟频率的测取方法及结果

(1) 激励与信号拾取

图4是测取频率的实验装置,其原理见图5.测取机座的自振频率是通过一个重量被弹簧

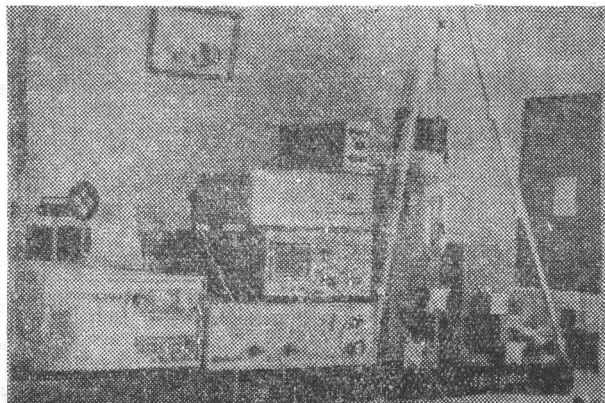


图4 测频率的实验仪器

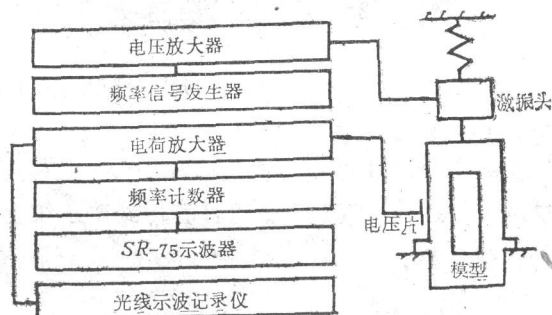


图 5

刚度抵消的激振头实现.信号拾取应用一块尺寸为 $10 \times 4 \times 0.5 \text{mm}$ 大小的压电陶瓷片贴在模型上得到,信号监视通过示波器.当激励频率接近模型共振点时,压电片输出电压幅值会急剧增高,过共振点时电压幅值又骤然下降,图6是激振过程中用光线示波记录的自振特性波形.图上 xOz 面指轧制线水平垂直方向, yOz 面指轧制线方向,坐标定义见图2.

(2) 模拟频率及其向实型值转换

在五阶模拟实测值见表2第二栏.由于本模拟实验中 $K_{\nu} \approx 1$,根据(2.2)、(2.3)、(2.4)式,得到修正后的频率相似准数

$$K_p |_{K_{\nu}=1} = 12.68 \quad (2.5)$$

由(2.5)式得到的实型频率列于表2第三栏.

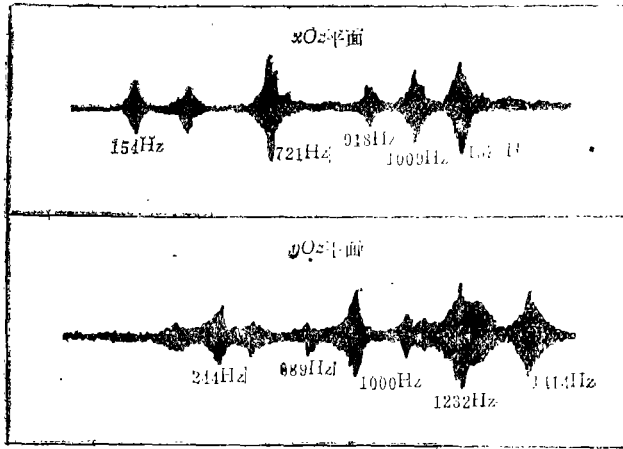


图 6

3. 应用激光全息干涉术进行机座的主振型摄取

(1) 激光全息干涉术测取物体的振型

该测取工作在如图7所示的激光光路中实现。从激光管射出一束光在分光镜上分成二束：一束照射物体并从物体反射到全息底片上；另一束直接照射全息底片。当物体发生振动时，从物面反射的光与另一光发生干涉，这样振动信息被记录，将该底片冲洗定影再放入激光中进行波前再现，就得到了如图13、14所示的振型照片。图上黑色条纹的数学描述是：

$$I^2 = I_0 J_0^2(x) \quad (2.6)$$

式中 I 表示光强， I_0 相当于物体静止时的光强， $J_0(x)$ 为零阶贝塞尔函数，其中 变量函数 x 表示为

$$x = \frac{2\pi}{\lambda} A(\cos\theta_1 + \cos\theta_2) \quad (2.7)$$

式中 θ_1, θ_2 为物光照射物面时的入射角和反射角， A 为对应 x 位置的振幅值， λ 为激光波长 ($\lambda = 6328\text{\AA}$)，图8是(2.6)式的函数图象。由图8可知：在 $x=0$ 处，有 I_{\max} ，即光强最亮，根据(2.7)式，光强最高处， $A=0$ ，这表明该位置是振动体的节点， I_{\min} 位置恰好是在贝塞尔函数的根 x_i 处，应用数学手册查到 x_i 值，原则上就可计算得到暗条纹上的振幅值 A_i ，因此应用激光全息术也可以进行振幅值分析。

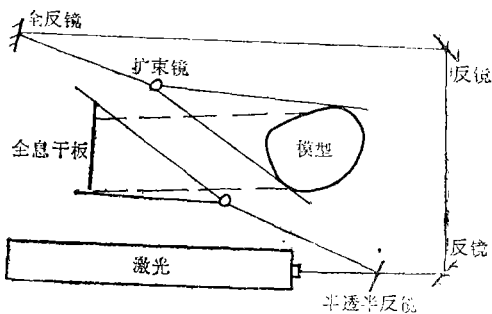


图 7

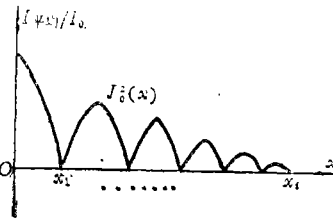


图 8

图12、13是以这种方法获得的第一、三阶主振型图，第二阶主振型与第一阶属反对称关

系, 全息图形是一样的; 有限元数值计算结果也证明了这种反对称关系的存在, 见图13、14。

三、自振特性的三维有限元数值分析

1. WILSON非协调单元和求自振性质的有限元过程

WILSON单元首先见于资料[3]上, 它是八节点空间等参元基础上的发展, 由于它的位移插值函数比形状插值函数阶数高, 因此成为非协调性, 但它的完备性还是满足的。资料[4][5]表明: 当在划分单元时取较规则的形状, 计算效果会比同样节点数的单元更好, 且上机费用也省。

自振性质的有限元过程首先也是将连续体离散化, 然后应用虚功原理导出单元的刚度阵, 再按照单元号和节点号组成总刚 $[K]$, 根据动力功的关系可以建立单元上的质量矩阵, 然后组成总的质量矩阵 $[M]$ 。忽略弹性体上的阻尼, 则由动力平衡方程得到

$$[M][\ddot{\delta}(t)] + [K][\delta(t)] = [0] \quad (3.1)$$

设 $[\delta(t)] = [\delta_0] \cos Pt$, 并代入(3.1)式经整理得

$$([K] - P^2[M])[\delta_0] = [0] \quad (3.2)$$

设 n 个自由度下的基本振型向量的组合为

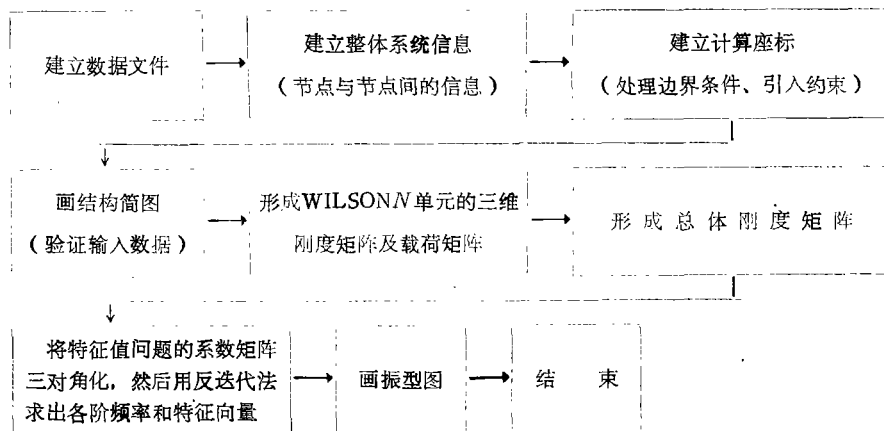
$$[x] = \{[\delta_0]_1, [\delta_0]_2, \dots, [\delta_0]_n\} \quad (3.3)$$

并以此作为一个新的坐标基对(3.2)式进行基的变换, 得到:

$$[H] - \lambda[I] [x] = [0] \quad (3.4)$$

它是一个对称矩阵的普通特征值求解方程, 这里 $\lambda = P^2$, $[x]$ 是振型向量, $[H] = [M]^{-1/2}[K][M]^{-1/2}$ 为一对称矩阵。

在求自振特性时应用了SAP84结构分析通用程序^[6], 其流程框图如下



2. 机座的网格划分及简化

资料[3][4]认为: 当单元取平行六面体时, WILSON单元有比较好的收敛性, 因此在机座的单元划分前, 首先作适当简化: (1)机架窗口的四个转角改为直角过渡; (2)将压下处凸台改为一个平面实体; (3)改图9所示上连接横梁的箱形截面为一个如图10所示的矩形实体, 图9与图10形状变化的等效过程是: 认为在二片机架的自振传递中, 弯曲刚度是主要因

素,所以等效原则为:箱形结构横梁的轴惯性矩应与实体结构的轴惯性矩相同,同时二图形的形心位置保持不变。

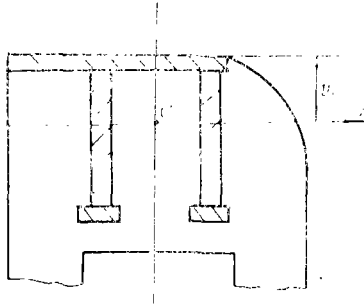


图9 箱形横截面

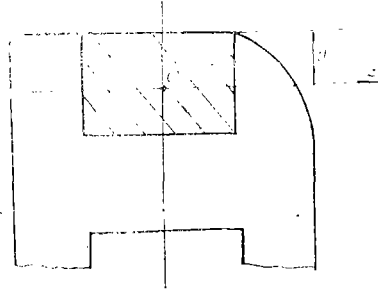


图10 矩形横截面

对于(2.1)、(2.2)、(2.3)的简化处理不会给计算结果带来大的误差,因为由(3.4)式看到,自振频率及振型是在总体刚度矩阵和质量矩阵下进行计算,这是区别于应力计算的。

图11为机座的网格划分。(a)为分解形式,(b)为组合后的情况。整个机座划分70个单元244个节点。

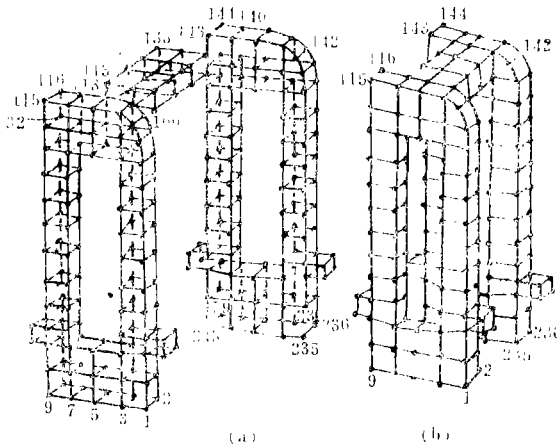


图11 机架的有限元划分

3. 结果与比较

(1) xOz 面内的自振特性

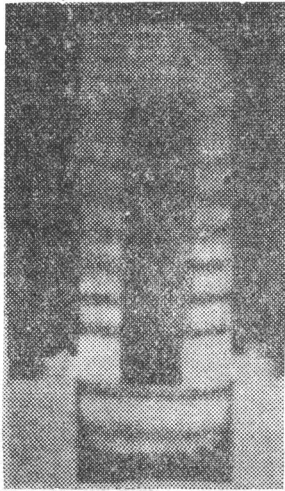
① 频率分析见表2第四栏,与实验值的误差列在第五栏。

② 计算机的前三阶振型见图14,图12是模型的实测振型全息图,应用(2.6)、(2.7)式可以证明条纹反映的物理意义同图14是一致的。

(2) yOz 面内的自振特性

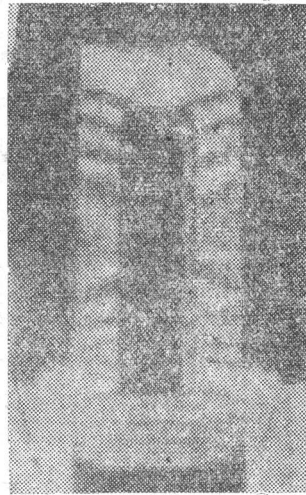
① 频率分析见表2第四栏,与实验值误差列于表2第五栏。

② 计算机计算的前三阶主振型见图15,图13是模型的实测振型全息图,同理图13反映的物理意义同图15一致。

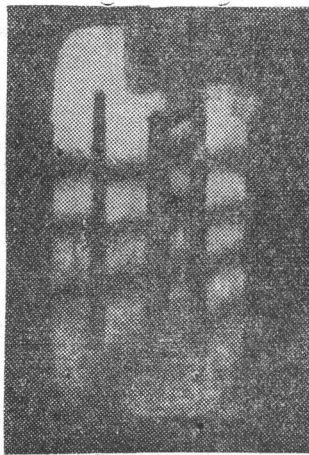


$P_1 = 12.14 \text{ Hz}$

图 12 (xOz 面)



$P_3 = 72.4 \text{ Hz}$

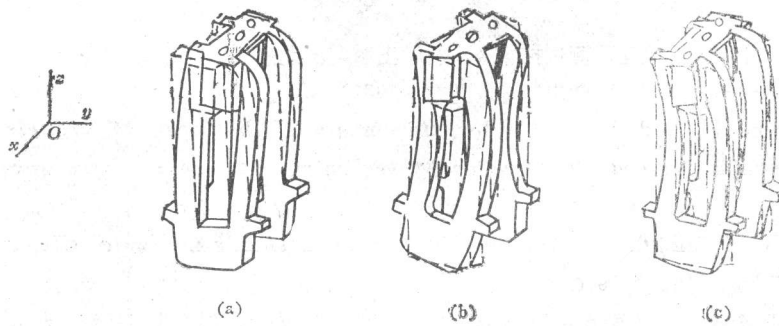


$P_1 = 19.12 \text{ Hz}$

图 13 (yOz 面)



$P_3 = 78.88 \text{ Hz}$



(a)

(b)

(c)

图14 xOz 面的振型

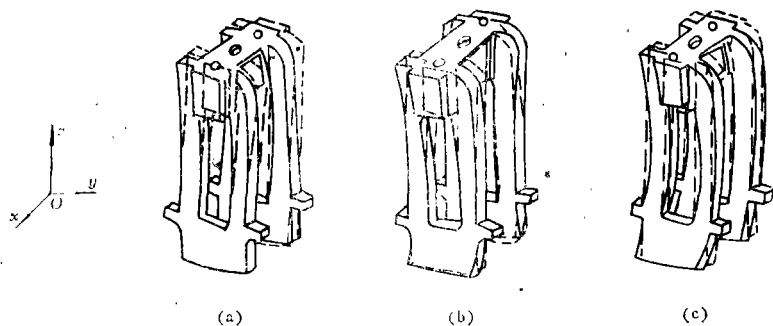
图15 yOz 面的振型

表 2

 yOz 面 xOz 面

振型阶数	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
实测值 P' (Hz)	244	889	1000	1232	1414	154	721	918	1009	1578
转换值 P (Hz)	19.12	70.1	78.88	97.2	111.5	12.14	56.9	72.4	79.6	19.12
有限元值 P_e (Hz)	19.00	79.8	91.35	98.3	119	11.99	51.44	70.08	76.14	108.6
误差 (%)	0.6	12	13.6	1.2	6.5	1.25	10.6	3.3	4.5	14.5

四、几点结论

1. 由 (2.1a) 式知, 模型尺寸与频率值成反比, 因此模拟研究之前应根据使用仪器的精度和测频范围设计模型尺寸。
2. 模拟过程一定要遵循相似关系, 特别当 $K_s \neq 1$ 时要考虑误差补偿, 补偿后的值仍为近似值。
3. WILSON 单元虽然是一个非协调元, 但在本机座分析中由于采用了较合适的单元形状, 计算结果与模拟值相比较是可靠的。
4. 频率计算结果表明: xOz 面的频率值低于 yOz 面, 因此沿轧制线垂直方向刚度较大。

参 考 文 献

- [1] 天津大学, 《光弹性原理及测试技术》, 科学出版社, 北京 (1980)。
- [2] 王永昭, 《光学全息》, 科学出版社, 北京 (1982)。
- [3] Wilson, E. L. and R. L. Taylor, *Incompatible Displacement Models, Numerical and Computer Methods in Structural Mechanics*, Academic Press Inc. New York (1973)。
- [4] Bathe, K. J. and E. L. Wilson, *Numerical Methods in Finite Element Analysis*, Practice Hall Inc. (1976)。
- [5] 郭成壁、陈全福, 《有限元法及其在动力机械中的应用》, 国防工业出版社, 北京 (1984)。
- [6] 北京大学力学系, 《SAP84 结构分析通用程序使用手册》(1986)。

The Three-Dimensional Analysis of the Self-Vibrational Characteristics of the 2050mm Hot-Strip Mill Housing by Means of Laser Holographic Interferometry and Finite Element Method

Liu Wei-jian

(Shanghai University of Technology, Shanghai)

Jiang Wei-xing Qu Zhi-hao

(Shanghai Technical College of Metallurgy, Shanghai)

Abstract

According to the theory of similarity, a three-dimensional simulation study on the self-vibrational characteristics of the 2050mm hot-strip finishing mill housing at Baoshan Iron and Steel Complex has been carried out. The analysis of the main vibrational modes of the first three orders by means of holographic interferometry has also been made. In addition, the authors have carried out the numerical analysis of finite elements in three dimensions. The comparison of the results of both analyses (simulation analysis and numerical analysis of finite elements) shows that they are consistent.

Key words self-vibration characteristic, holographic interferometry, numerical analysis, inherent frequency, inherent vibrational mode