

连接子结构法及其在沸腾冷却床动力分析中的应用

张亚红, 许庆余, 赵玉成, 李 迎

(西安交通大学建筑工程与力学学院, 710049, 西安)

摘要: 采用连接子结构法计算 120T/H 沸腾冷却床结构的动力学特性, 将整结构分成 3 个子结构, 中间连接件部分取作连接子结构, 利用位移及力的双协调条件, 综合得到了整体结构动力学方程, 求得了其前 5 阶固有频率及振型, 并与 ANSYS 程序的计算结果进行了比较, 二者吻合良好. 为了验证计算模型及计算方法的合理性及可靠性, 设计了冷却床实验模型, 并对实验模型进行了理论计算, 通过对比实验结果及理论计算结果, 证实理论计算模型及方法合理可靠. 与 ANSYS 方法相比, 所提出的连接子结构法大大降低了系统自由度, 提高了计算效率. 通过对沸腾冷却床的振型分析, 找出了设计中存在的缺陷, 从而可为产品改进设计提供理论依据.

关键词: 连接子结构; 模态综合; 动力分析

中图分类号: TU311.13 **文献标识码:** **文章编号:** 0253 - 987X(2004)09 - 0963 - 04

Mode Synthetic Method of Connecting Substructure with Applications to Dynamic Analysis of Boiling-Cooling Lathe

Zhang Yahong, Xu Qingyu, Zhao Yucheng, Li Ying

(School of Architectural Engineering and Mechanics, Xi an Jiaotong University, Xi an 710049, China)

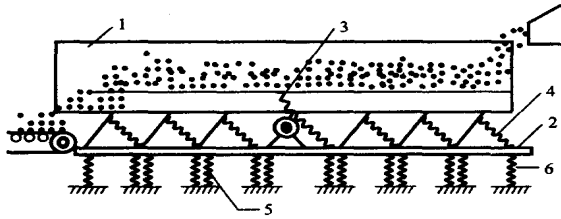
Abstract: The dynamic characteristics of 120T/H boiling-cooling lathe were investigated by mode synthetic method of connecting substructure (MSMCS), where the system was divided into three substructures and the joint part was regarded as connecting substructure. Considering the harmonization of force and displacement, the whole system dynamic equations were obtained, the lowest five orders of natural frequencies and modes were calculated. To verify the validity of the mechanical model and MSMCS, a test model of 120T/H lathe was designed and the testing modes were measured. The modes of the test model were calculated via MSMCS and ANSYS comparatively. The results indicate that the mechanical model of the 120T/H lathe is reasonable, MSMCS is suitable to the research, and the number of the system's degree of freedom is decreased remarkably, which provides a theoretical basis for lathe design.

Key words: connecting substructure; mode synthetic method; dynamic analysis

120T/H 沸腾冷却床是铸造生产线上的关键设备, 其工作原理是利用床身沿 45° 方向上的振动, 将型砂冷却运输. 它的结构简图见图 1, 由床身、共振簧、底梁及减振簧等部件组成. 生产现场出现的问题主要有: 共振簧易断; 型砂滞留、偏置, 容易堆积在床身的中尾部, 严重时床身后半部甚至振动不起来. 传统的设计方法是将冷却床简化成二自由度系统模

型, 不考虑床身的动态变形, 不分析沿型砂前进方向各弹簧受力的差异. 过去曾用 ANSYS 程序计算其动态特性, 但由于结构庞大复杂, 即使通过简化, 自由度仍高达 1 000 以上, 因此计算工作量大, 且不易对关键部分独立处理. 模态综合法的基本思想是“化整为零, 积零为整”, 将一个大型动态计算问题化为若干个子结构的小型动态计算问题, 便于进行局部

收稿日期: 2003 - 12 - 31. 作者简介: 张亚红 (1973 ~), 女, 讲师; 许庆余 (联系人), 男, 教授, 博士生导师. 基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50275113); 教育部高等学校博士学科点科研基金资助项目 (20030698017).



1:槽体;2:底架;3:连杆簧;4:共振簧;5:减振簧;6:撑杆

图1 120T/H沸腾冷却床示意图

参数的修改和识别,同时利用模态综合法的降阶功能,大幅度地缩减自由度,有效地减少计算量.为此,本文采用连接子结构模态综合法(简称连接子结构法)计算沸腾冷却床的动力学特性.通过对其固有频率及振型的分析,剖析设计中存在的缺陷,为改进设计提供理论依据.

1 计算原理

连接子结构法将一个整体结构人为地划分为若干个子结构,然后对每个子结构进行动力分析,得到子结构的动力特性,然后根据子结构之间的连接条件,利用子结构的模态特性和模态坐标将子结构的特性进行综合.具体在应用过程中,根据界面特性,它又分为固定界面法和自由界面法.本文采用固定界面连接子结构模态综合法.

固定界面连接子结构法的步骤分为以下4步^[1,2].

- (1) 将结构划分为子结构.
- (2) 计算子结构的各阶模态并进行第一次坐标变换.具体是先建立子结构在物理坐标上的振动方程,假定无阻尼,则有

$$M\ddot{x} + Kx = f \tag{1}$$

式中: M 、 K 、 x 、 f 分别表示系统的质量阵、刚度阵、位移向量及载荷向量.考虑界面固定,求得子结构对接主模态集 N ,再考虑振动方程对应的静力方程,求得子结构约束模态集 c .对子结构进行坐标变换,将坐标变换到模态坐标上,即

$$x = p$$

式中: $p = [N \quad c]$; p 为模态坐标.子结构振动方程变换为

$$Mp\ddot{p} + Kp = g \tag{2}$$

式中: $M = {}^T M$; $K = {}^T K$; $g = {}^T f$.

- (3) 建立系统方程及第二次坐标变换.考虑子结构间的位移协调方程,建立系统广义坐标与模态坐标之间的关系,将模态坐标 p 变换到广义坐标 q 上,则系统无阻尼自由振动方程为

$$M\ddot{q} + Kq = 0 \tag{3}$$

式中: M 、 K 为广义坐标下对应的质量阵和刚度阵.求解上式,得到系统固有频率和模态坐标下的振型.

- (4) 将结构返回物理坐标,得到整体结构的物理振型.

本文中的120 T/H沸腾冷却床结构复杂,由槽体、底梁、连杆簧、共振簧、减振簧及撑杆等主要部件组成.槽体由筛板、底板、侧板构成,按板单元处理;底梁由钢梁焊成框架结构,上置配重,按梁元及附加集中质量处理;连接簧、共振簧等效为杆元,减振簧处理为集中刚度附加在节点上;槽体内的型砂按照均匀分布处理.这样,就将整体结构离散成了由板、梁、杆组合而成的有限元力学模型.现取上槽体为子结构 A ,底梁框架为子结构 C ,中间连接部分为连接结构 B .

令 $i_A, j_A, i_B, j_B, i_C, j_C$ 分别表示 A, B, C 三个子结构的非连接自由度与连接自由度,而 j_B 又可分为 j_{BA} (B 与 A 的连接自由度)和 j_{BC} (B 与 C 的连接自由度).显然 $j_A = j_{BA}, j_C = j_{BC}$,故整体结构自由度

$$N = i_A + i_B + i_C + j_A + j_C$$

按模态综合固定界面法^[1]求出子结构 A, C 的固定界面主模态及约束模态作为基矢量,得模态坐标下 A, C 子结构的无阻尼动力学方程

$$\begin{bmatrix} I_k^A & M_{kj}^A \\ M_{jk}^A & M_{jj}^A \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} q_k^A \\ \dot{x}_{jA}^A \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} A_k & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & K_{jj}^A \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} q_k^A \\ x_{jA}^A \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{0} \\ f_{jA} \end{Bmatrix} \tag{4}$$

$$\begin{bmatrix} I_k^C & M_{kj}^C \\ M_{jk}^C & M_{jj}^C \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} q_k^C \\ \dot{x}_{jC}^C \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_k & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & K_{jj}^C \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} q_k^C \\ x_{jC}^C \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{0} \\ f_{jC} \end{Bmatrix} \tag{5}$$

连接子结构 B 的动力学方程为

$$\begin{bmatrix} M_{ii}^B & M_{iA}^B & M_{jC}^B \\ M_{jA}^B & M_{iA}^B & M_{jA}^B \\ M_{jC}^B & M_{jC}^B & M_{jC}^B \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_{iB} \\ \ddot{x}_{jBA} \\ \ddot{x}_{jBC} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{ii}^B & K_{jA}^B & K_{jC}^B \\ K_{jA}^B & K_{iA}^B & K_{jA}^B \\ K_{jC}^B & K_{jC}^B & K_{jC}^B \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_{iB} \\ x_{jBA} \\ x_{jBC} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{0} \\ f_{jA} \\ f_{jBC} \end{Bmatrix} \tag{6}$$

式中: q_k^A 为子结构 A 的低阶模态坐标; x_{jA} 为其连接自由度坐标; f_{jA} 为 A 与 B 子结构间的连接力; $M_{ij}^A, M_{kj}^A, M_{jj}^A, K_{ij}^A$ 的表达式可参见文献[3];其余类推.按

力与位移协调条件,有

$$x_{jBA} = x_{jA}; x_{jBC} = x_{jC}; f_{jBA} = -f_{jA}; f_{jBC} = -f_{jC} \quad (7)$$

由式(4)~式(7)中消去 f_{jC} 、 f_{jA} 、 f_{jBA} 、 f_{jBC} 、 x_{jBA} 和 x_{jBC} , 得整体结构综合方程

$$\begin{bmatrix} I_k^A & 0 & 0 & M_{kj}^A & 0 \\ 0 & I_k^C & 0 & 0 & M_{kj}^C \\ 0 & 0 & M_{ii}^B & M_{ijA}^B & M_{ijC}^B \\ M_{jk}^A & 0 & M_{jAj}^B & M_{ij}^A + M_{jAj}^B & M_{jAjC}^B \\ 0 & M_{jk}^C & M_{jCi}^B & M_{jCA}^B & M_{ij}^C + M_{jCi}^B \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_{iB}^A \\ \ddot{x}_{iB}^C \\ \ddot{x}_{jA} \\ \ddot{x}_{jC} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_k^A & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & K_k^C & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & K_{ii}^B & K_{ijA}^B & K_{ijC}^B \\ 0 & 0 & K_{jAj}^B & K_{ij}^A + K_{jAj}^B & K_{jAjC}^B \\ 0 & 0 & K_{jCi}^B & K_{jCA}^B & K_{ij}^C + K_{jCi}^B \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_{iB}^A \\ x_{iB}^C \\ x_{jA} \\ x_{jC} \end{Bmatrix} = 0 \quad (8)$$

设 A、C 二子结构主模态减缩后的低阶模态数分别为 i_{kA} 、 i_{kC} , 则综合方程(8)的阶数为 $J \times J$, 而 $J_s = i_{kA} + i_{kC} + j_B + j_A + j_C$. 在冷却床结构中, 构成连接子结构 B 的连杆簧与共振簧都处理成杆元, 则位移协调条件仅指连接点上的线位移相等, A、C 二子结构中连接点的转角位移按非连接自由度处理.

令式(8)中的总质量阵为 M, 总刚度阵为 K, 总位移矢量为 q, 则式(8)可写成

$$M\ddot{q} + Kq = 0 \quad (9)$$

相应的特征方程为

$$[K - \omega^2 M] = 0 \quad (10)$$

应用 Lanczos 法^[4]解特征方程(10), 可求得设计要求的截止频率下的各阶振型及固有频率.

将沸腾冷却床分成前述的 3 个子结构, 利用根据连接子结构模态综合法编制的程序, 求出冷却床的前 5 阶固有频率, 并与相同单元类型的 ANSYS 程序计算结果进行比较, 结果见表 1, 其各阶振型见图 2.

表 1 冷却床计算频率比较

方法	固有频率/Hz				
	1 阶	2 阶	3 阶	4 阶	5 阶
连接子结构法	11600 239	81547 178	91859 204	91863 945	121608 80
ANSYS 解	11583 631	81532 167	91424 161	91437 691	121514 32
误差/%	113	012	419	419	018

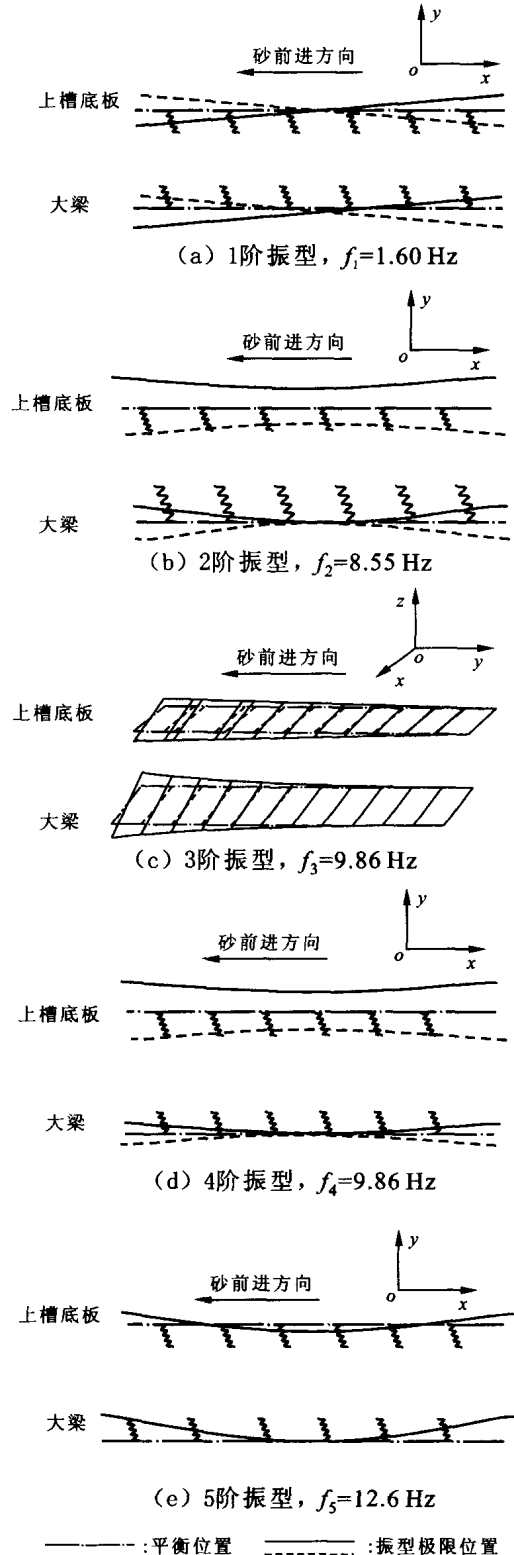


图 2 振型图

2 实验研究

为了进一步验证 120 T/H 沸腾冷却床建模的合理性以及用连接子结构法处理该问题时所得结论的

合理性,特意制作了冷却床模型,通过实验结果与连接子结构法模型所得结果的对比,验证前面理论计算的合理性及可靠性。

120 T/H 沸腾冷却床的实验模型如图 3 所示,结构分上、下 2 层,上层是 361 mm × 300 mm × 815 mm 的钢板,下层由 2 根 60 mm × 60 mm 角钢和 3 根 20 mm × 390 mm 的圆钢构成框架,并由 4 根弹簧支承,弹簧刚度为 414×10^3 kg/m。钢板与框架之间由 4 根 230 mm × 30 mm × 5 mm 的扁钢(撑杆)及 4 根刚度均为 219×10^3 kg/m 的弹簧连接。

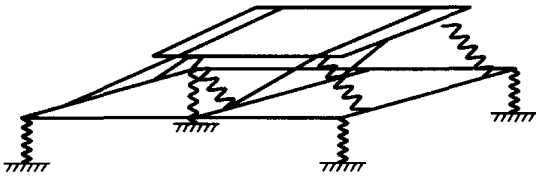


图 3 实验模型简图

实验采用瞬态激振方法,记录激振力及相应的信号,通过傅里叶分析建立其传递函数,计算各阶模态。在模型钢板上选取 25 个点,其中 19 个点作为测试点,安装 YE14103 加速度传感器,在其余点上用 8200 型力锤激振,所得信号经过信号放大器后进行记录,将记录的信号接入力信号分析仪进行曲线拟合并得到传递函数,进而计算出各阶模态。

针对图 3 所示的模型,对相同单元类型又分别采用连接子结构模态综合法及有限元方法计算。3 种方法所得的结果见表 2。

表 2 实验模型结果比较

方法	各阶振型对应的频率/Hz				
	1 阶	2 阶	3 阶	4 阶	5 阶
连接子结构法	3179	6119	7156	10120	72180
ANSYS 解	3181	6110	7141	9191	73130
实验解	3125	6100	8125	10150	68100

通过对上述 3 种方法所得的结果进行对比可以看出,实验结果和理论计算结果相吻合,虽有一定误差,但由于实验模型中的所有连接本身就与 120 T/H 冷却床存在一定差异,加上实验过程中的测量误差,因此认为理论分析方法及力学建模合理,计算结果有一定实际价值。

3 分析与讨论

依据图 2 的结果,对 120 T/H 冷却床分析如下。

(1) 第 1 阶振型表明减振簧刚度相对较小,形成了转角刚体型,但由于第 1 阶固有频率 1160 Hz 与激振频率 915 Hz 相差较远,故仅在开机与停机过程中发生该效应,在稳态工作时影响并不大。

(2) 第 2 阶固有频率在共振区内,第 4 阶固有频率更是接近共振频率,这 2 阶振型是冷却床的设计工作振型,但此振型明显地显示出上槽与大梁共同的弓形弯曲,这对抛运型砂显然是不利的。

(3) 第 3 阶振型表明上槽与大梁几乎作为一个整体绕 x 轴发生扭转,而沸腾冷却床进砂处不动,且第 3 阶固有频率亦落在共振频率上,振幅较大,这将使物体偏置,危害性较大。

(4) 第 5 阶振型表明上槽与大梁作为一个整体发生弯曲,这将使上槽产生 52 或 66 左右的反向抛砂料现象,对抛运型砂很不利,易使砂料堆积在槽中部。

根据以上分析,可看出沸腾冷却床原设计中由于没有分析床身的动态变形,因此存在着缺点。为此,提出以下相应的改进设计措施:

- (1) 提高共振簧的刚度,将 3、4 阶固有频率提高;
- (2) 加强出砂口处和进砂口处减振簧的刚度,抑制弓形弯曲及扭转振型;
- (3) 增加支承刚度,抑制第 5 阶振型中的反向抛型砂运动。

4 结 论

根据本文的建模、实验及计算结果可以看出,用连接子结构模态综合法求解 120 T/H 沸腾冷却床的动力学特性能够有效降低系统自由度,且能够保证足够的精度。将模型分为若干子结构,若要对结构进行局部调整、优化,只需对相关子结构进行动力修改,从而可以大大减少工作量。因此,对于工程实际中大型复杂结构的动力学特性分析,连接子结构模态综合法非常实用。

参考文献:

- [1] Lou M, Ghobarah A, Aziz T S. A modal synthesis method for dynamic substructuring [J]. Eur J Mech, A: Solid, 1993, 12 (13): 403 - 416.
- [2] 傅志方. 振动模态分析与参数辨识[M]. 北京:机械工业出版社,1990.
- [3] 王文亮,杜作润. 结构振动与动态子结构方法[M]. 上海:复旦大学出版社,1985.
- [4] Bathe KJ. Finite element procedures in engineering analysis [M]. Englewood Cliffs, USA: Prentice2Hall, 1982.

(编辑 葛赵青)