

大型动力机器基础防微振计算理论与实测研究

Theoretical and experimental study on micro-vibration reduction of large dynamic machine foundation

王振宇¹, 刘晶波¹, 裴欲晓², 张克峰²

(1. 清华大学 土木工程系, 北京 100084; 2. 北京石油化工工程公司, 北京 100101)

摘要: 基础平台防微振问题的研究对于高精密动力机器而言具有重要意义, 本文给出了大型动力机器基础防微振计算的动力三维有限元法, 该方法通过在大型通用有限元软件中植入等效单元, 考虑了基础与地基的动力相互作用。通过理论计算、现场实测结果的对比研究, 证明本文方法具有较高精度, 得到的若干结论可供工程设计参考。

关键词: 动力基础; 防微振; 有限元法; 现场实测

中图分类号: TU 435

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2002)03-0363-04

作者简介: 王振宇(1976-), 男, 湖北人, 2000年获西安建筑科技大学工学硕士学位。现为清华大学土木工程系博士研究生, 主要从事土-结构相互作用、高层及地下结构抗震研究。

WANG Zhen-yu¹, LIU Jing-bo¹, PEI Yu-xiao², ZHANG Ke-feng²

(1. Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Beijing Petrochemical Engineering Company, Beijing 100101, China)

Abstract: Study on micro-vibration of foundation plate is very important to high precision dynamic machine. Dynamic three-dimensional finite element method for computation of micro-vibration of large dynamic machine foundation is given in this paper. The equivalent element is constructed for considering soil-structure interaction by implementing this method with common FE program. Contrast between results of theory and experiment proves accuracy of this method. Finally, some useful conclusions are given for reference.

Key words: dynamic foundation; micro-vibration; FE method; field measurement

1 引言*

在现代化工业厂房设计中, 高精密动力机器往往由于工艺要求对基础平台防振有很高的要求, 一般讲要比《动力机器基础设计规范(GB 50040-96)》^[1](以下简称“规范”)相应的要求严格许多。基础平台的振动包括周围环境的振动和厂房内运转机械设备引起的振动, 而衡量振动物理效应的量标则有位移、速度和加速度三种。本文主要讨论低频范围内以振幅(位移)为量标由机器运转挠力引起的基础平台微振动。

为了较精确计算机器挠力作用下基础平台的振幅, 本文给出了考虑基础-地基动力相互作用的三维有限元法。分别运用本文方法、规范方法对某大型动力机器基础振动反应进行了计算分析, 并对理论计算结果与现场实测结果进行了对比研究。

2 机器挠力作用下基础振动分析的三维有限元法

2.1 动力机器基础与地基的动力相互作用

动力机器基础-地基动力相互作用对基础振动反应的影响主要表现在地基柔性和地基无限性对基础动力特性和动力反应的影响。从波动的概念上讲, 大型

机器基础-地基系统的动力反应是开放系统的波动问题, 如何有效模拟远区地基介质对近区波动的影响是问题的关键所在^[2]。解决这一问题广泛采用的数值模拟技术是引入虚拟的人工边界(artificial boundary)将广义结构包围起来, 形成计算区, 最后对计算区作三维有限元分析。因为在微振动范围内, 基础-地基都处于线弹性状态, 计算不存在理论上的困难, 困难的问题在于如何建立合适的人工边界模拟地基连续介质的辐射阻尼, 保证散射波从有限计算区内部穿过人工边界而不发生反射。

近30年来国内外对人工边界进行了广泛而深入的研究并发表了一系列综述^[2,3], 最终形成了两个主要的研究方向: 其一是模拟外行波通过整个人工边界进入无限域, 其二是模拟外行波穿过人工边界的每一点进入无限域。前者形成积分型人工边界, 称为全局人工边界, 后者形成微分型人工边界, 称为局部人工边界。全局人工边界保证穿出整个人工边界的外行波满足无限域内所有场方程和物理边界条件, 包括无穷远辐射条件。因而其导出思路是解析地研究无限域内波

* 基金项目: 国家自然科学基金项目(50078028); 北京市自然科学基金重点项目(8011002); 清华大学博士科研创新基金项目联合资助

收稿日期: 2001-09-21

动问题的解析解和控制方程组,而后建立精确的人工边界。由于全局人工边界所有边界节点的运动相互耦合,这将导致对计算机存储量和计算时间的高消耗。局部人工边界的主要特征是时空解耦,即一个边界节点在某一时刻的运动仅与其邻近节点在邻近时刻的运动有关,而与所有其他节点和其他时刻无关。由于这一解耦特征极大简化了数值计算,因此自 60 年代以来局部人工边界已成为人工边界研究的一个焦点,比较成熟的有黏性边界、一致边界、叠加边界、旁轴边界、透射边界、动力映射无穷元等^[3]。刘晶波等在 Deeks 等人研究的基础上定义了黏-弹性人工边界的概念,并完成了其精度验证^[4,5]。相对于黏性边界,黏-弹性边界避免了前者存在的低频稳定性问题,能够同时模拟散射波辐射阻尼和地基弹性恢复性能。文献[6]中首次采用黏-弹性边界对一大型动力机器基础振动问题进行了分析,并建立了黏-弹性边界的等效单元,本文详细讨论黏-弹性边界在三维动力分析中的实现机理。

采用柱面波模拟从广义结构射向无限介质的散射波,从极坐标原点射出的柱面波解的形式可表示为^[7]

$$w(r, t) = \frac{1}{\sqrt{r}} f\left(t - \frac{r}{c_s}\right) \quad (1)$$

式中 r 为极坐标值; c_s 为介质剪切波波速。由式(1)可得介质中任一点的剪应力

$$\begin{aligned} \tau(r, t) &= G \frac{\partial w}{\partial r} \\ &= -G \left[\frac{1}{2r\sqrt{r}} f\left(t - \frac{r}{c_s}\right) + \frac{1}{c_s\sqrt{r}} f'\left(t - \frac{r}{c_s}\right) \right] \end{aligned} \quad (2)$$

式中 f' 表示 f 对括号内变量的导数; G 为介质剪切模量。介质内任一点的速度可表示为

$$\frac{\partial w(r, t)}{\partial t} = \frac{1}{\sqrt{r}} f'\left(t - \frac{r}{c_s}\right) \quad (3)$$

将式(1)、(3)代入式(2)可得任一半径 r_b 处以矢径 r_b 为外法线的微元面上应力与该处速度和位移的关系:

$$\tau(r_b, t) = -\frac{G}{2r_b} w(r_b, t) - \rho_s \frac{\partial w(r_b, t)}{\partial t} \quad (4)$$

式中 ρ 为介质质量密度。式(4)说明如果在半径 r_b 处截断介质,同时在截断介质的边界上施加并联的黏性阻尼器 C_b 和线性弹簧 K_b :

$$C_b = \rho_s; K_b = \frac{G}{2r_b} \quad (5)$$

则边界条件与式(4)完全相同,即可以完全消除散射波在人工边界的反射。将上述边界定义为黏-弹性人工边界,并将二维柱面波推导扩展至三维,则可相应得到如图 1 所示的三维黏-弹性人工边界。

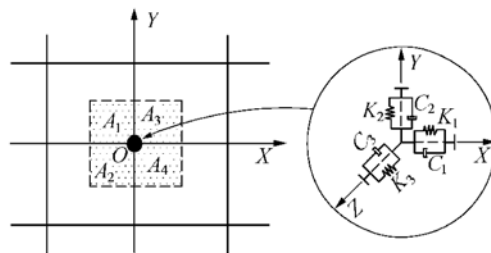


图 1 三维黏-弹性人工边界

Fig. 1 Three dimensional visco-elastic artificial boundary

图 1 中 A_i ($i = 1, 2, 3, 4$) 表示单元节点所代表的部分面积,图中人工边界参数:

$$C_1 = C_2 = \rho_s A; K_1 = K_2 = \frac{G}{2r_b} A \quad (6a)$$

$$C_3 = \rho_p A; K_3 = \frac{E}{2r_b} A \quad (6b)$$

式中 c_p 为介质压缩波波速; E 为介质动弹模; A 为人工边界节点代表的面积,即

$$A = \sum_{i=1}^4 A_i \quad (7)$$

2.2 黏-弹性边界等效单元的实现步骤

为了简化黏-弹性人工边界用于大型动力机器基础防微振分析的复杂程度,这里引入等效弹簧实体元模拟人工边界中三个方向上的弹簧^[6]。具体实现方法为在已建好的三维有限元模型人工边界面上沿法向延伸一层厚度相等、边界固定的实体单元,其物理参数取为

$$E' = \frac{h}{2r_b} E \quad (8)$$

式中 E' 为等效弹簧实体元的输入弹性模量; E 为与人工边界节点相连的介质弹性模量; r_b 为散射波源到人工边界的距离; h 为等效弹簧实体元沿人工边界法向的厚度。等效弹簧实体元的泊松比与相邻连续介质泊松比相同。因为单元弹性模量与剪切模量存在固定关系,容易证明,施加上述等效弹簧实体元之后的有限元模型相当于在人工边界节点上施加了相应的弹簧元件。关于人工边界节点上黏性阻尼器的实现方法,笔者采用直接编制外挂程序的办法将节点编号和相应的阻尼参数读入输入数据文件中。

上述方法易与大型通用有限元程序合并,从而为大型动力机器基础防微振分析提供了一条有效途径。

3 某大型动力机器基础防微振理论计算

3.1 计算模型和参数

某大型动力机器一次压缩机采用活塞式压缩机,六列交错布置,基础混凝土等级采用 C25。基础平面示意如图 2 所示,图中 A ~ F 点为振动控制点,基础持力层为厚约 6 m 的强风化岩层。

表 1 机器挠力函数表达式(作用点坐标: (0, 0, 4.5 m))

Table 1 Force functions resulted by dynamic machine

水平挠力/kN		力矩/(kN·m)	
X 向	Z 向	绕 Z 轴	绕 X 轴
81.441sin(5.47t + 148.71°) 17.877sin(10.94t + 105.65°)	2.503sin5.47t	56.670sin(5.47t + 24.79°) 12.440sin(10.94t + 167.61°)	1.206sin5.47t

表 2 计算模型中所用的材料参数

Table 2 Material parameters for the computational model

材 料	质量密度/(t·m ⁻³)	弹性模量/(kN·m ⁻²)	剪切模量/(kN·m ⁻²)	泊松比	厚度/m
刚性地坪	2.5	2.20 × 10 ⁷	9.16 × 10 ⁶	0.20	0.5
三七灰土	2.0	4.68 × 10 ⁵	1.80 × 10 ⁵	0.30	2.0
基础混凝土	2.5	2.80 × 10 ⁷	1.16 × 10 ⁷	0.20	4.135~ 6.365
基础反梁混凝土	2.5	2.80 × 10 ⁷	1.16 × 10 ⁷	0.20	1.0
强风化岩	2.3	8.96 × 10 ⁵	3.44 × 10 ⁵	0.30	6.0
弱风化岩	2.6	1.90 × 10 ⁷	7.16 × 10 ⁶	0.33	20.0

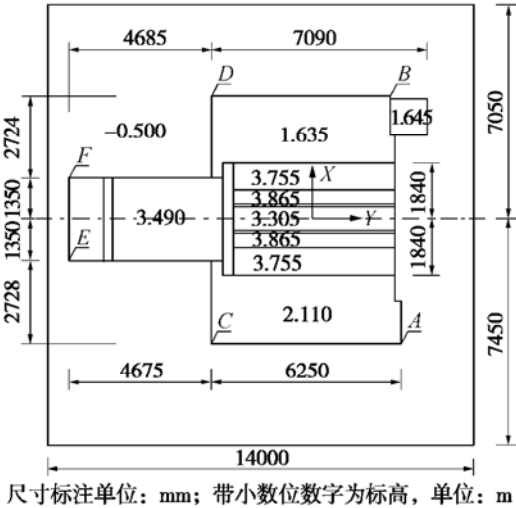


图 2 动力机器基础平面示意图

Fig. 2 Plan of dynamic machine foundation

该装置同时有 6 组荷载沿 X 向作用在基础上, 每组荷载包括两组不同频率、相位的正弦荷载。为了方便与规范计算结果比较, 这里将 6 组荷载集中于坐标原点, 表达式如表 1 所示。

计算模型截取周围土(岩)体的范围为 X 向向基础边缘各扩展 10.15 m, Y 向向基础边缘各扩展 9.50 m, Z 向自基础底面扩展 27.00 m。在整个模型计算范围内材料参数如表 2 所示, 注意表 2 中风化岩的动弹性模量依据现场静力平板荷载试验和动力弹性波速试验结果, 由激振频率插值得出。

3.2 三维有限元计算与规范计算

采用前述模型和参数, 在模型切取面上施加黏-弹性人工边界, 质量矩阵取用一致质量矩阵, 计算时间步长 0.01 s, 计算得到控制点振幅如表 3 所示, 表 3 同时列出了同样计算条件下(同样荷载与基础)规范的计算结果。因为基础 X 向振幅起控制作用, 故本文所有振幅结果均指基础 X 向的分析结果。

表 3 基础振动控制点振幅计算结果

Table 3 Calculated results of control points of machine vibration

计算 方法	振幅/μm					
	A	B	C	D	E	F
有限元	4.47	4.11	4.40	4.05	4.29	4.29
规范	13.31	12.91	12.97	12.16	15.38	15.38

表 3 表明本文方法与规范方法有相当大的差别, 单从计算结果来看, 规范方法偏于保守, 后面的实测结果将会证明这一点。

4 基础振动现场实测分析

为了检验计算结果的可靠性, 确保该基础振幅满足规定要求, 对该基础在设备安装前进行了现场振动实测。采用 200 kN 机械式偏心激振器强迫激振, 在基础各控制点布置 891 系列磁电式拾振器采集数据, 本文给出其中两种工况部分控制点的实测结果。

应该说明, 受基础外形和预留孔位置的限制, 现场实测中激振器位置、控制点拾振器位置与计算所用实际情况存在偏差, 实测过程中激振器与拾振器布置如图 3 所示。

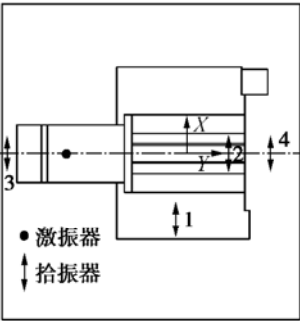


图 3 现场实测激振器与部分 X 向拾振器布置示意

Fig. 3 Distribution of field vibrator and some vibration pickups distributed along X direction

分别采用两种不同幅值、频率的简谐荷载激振,得到的各拾振器布置点振幅如表 4 所示。

表 4 现场实测部分控制点 X 向振幅

Table 4 Amplitude of control points distributed along X direction in field measurement

激振力/kN	振幅/ μm			
	测点 1	测点 2	测点 3	测点 4
$P1 = 2.492$	0.10	0.11	0.07	0.06
$P2 = 25.8$	0.91	0.79	0.58	0.43

5 理论计算与实测结果的对比研究

为了验证理论计算方法的准确性,将理论计算结果与现场实测结果进行对比研究无疑具有重要意义。因为现场实测激振点和拾振器位置布置的偏差,前述有限元法、规范方法计算结果与现场实测结果不具可比性,为此用本文有限元法以实测过程中实际的激振点、激振力函数进行计算,计算过程中基础条件不变,基础控制点采用实测过程中拾振器布置点。显然,这样计算的结果将与实测结果具有可比性,而且比较的结论可从一个侧面说明理论计算结果中本文方法与规范方法在计算精度上的差别。

图 4 给出了两种工况下各控制点水平 X 向振幅有限元计算与实测结果的比较图。由图 4 可看出,本文有限元方法计算的水平 X 向振幅与现场实测值比

较接近,一般控制点误差不超过 18%,个别点(工况 1 控制点 3)误差不超过 30%。考虑到计算模型简化误差、测量误差以及材料参数误差,可以认为本文有限元方法具有较好精度。这从一个侧面说明,表 3 给出的规范计算结果是一组相对粗略、过于保守的结果,这也表明用规范方法计算大型动力机器基础微振动时,采用单质点模型并忽略地基无限域辐射阻尼的影响将会给计算结果带来较大误差。

6 结 论

(1) 高精密动力机器基础防微振分析是保证机器正常运行的一个重要方面^[8,9],必须采用相对精确的计算方法充分考虑材料、周围地质环境的影响,对动力机器基础在给定动荷载作用下防微振能力进行合理评价。

(2) 对于防微振要求远比规范要求严格的大型动力机器基础,考虑地基、基础动力相互作用是必要的,本文给出的三维黏-弹性人工边界借助大型通用有限元软件,实现了地基-基础动力相互作用的简化考虑,实测结果证明本文方法具有良好精度。

(3) 现场实测结果与计算结果的对比研究表明,单纯利用规范方法,采用单质点模型计算防振要求严格的大型动力机器存在较大误差,其结果过于保守。

参考文献:

- [1] GB 50040-96, 动力机器基础设计规范[S].
- [2] 廖振鹏. 工程波动理论导引[M]. 北京: 科学出版社, 1996.
- [3] Wolf P J. A comparison of time-domain transmitting boundaries[J]. Earthquake Engineering and Structure Dynamics, 1986, 14: 655-673.
- [4] 刘晶波, 吕彦东. 结构-地基动力相互作用问题分析的一种直接方法[J]. 土木工程学报, 1998, 31(3): 55-64.
- [5] Liu Jingbo, Lu Yandong. A direct method for analysis of dynamic soil-structure interaction based on interface idea[A]. In: Zhang Chuhan, Wolf J P. Dynamic Soil-Structure Interaction[C]. Beijing: International Academic Publishers, 1997. 258-273.
- [6] 刘晶波, 王振宇, 等. 考虑土-结构相互作用大型动力机器基础三维有限元分析[J]. 工程力学, 2002, 19(3): 34-38.
- [7] Whitham G B. Linear and Nonlinear Waves[M]. New York: Wiley, 1974.
- [8] 严济宽. 机械振动隔离技术[M]. 上海: 上海科学技术文献出版社, 1986.
- [9] 刘艳华. 群桩支承基础板防微振分析与设计[D]. 北京: 清华大学工程力学系, 2001.

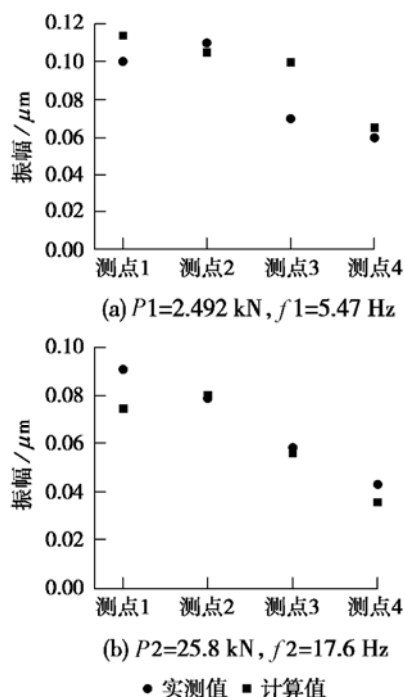


图 4 两种工况下有限元计算值与实测值的比较

Fig. 4 Comparison of FEM calculation with field measurement