



T/CECS 1129-2022

中国工程建设标准化协会标准

振动试验台基础技术规程

Technical specification for foundation of vibration test table



中国建筑工业出版社

中国工程建设标准化协会标准

振动试验台基础技术规程

Technical specification for foundation of vibration test table

T/CECS 1129 - 2022

主编单位：中国汽车工业工程有限公司

机械工业第四设计研究院有限公司

批准单位：中国工程建设标准化协会

施行日期：2 0 2 3 年 1 月 1 日

中国建筑工业出版社

2022 北 京

中国工程建设标准化协会公告

第 1256 号

关于发布《振动试验台基础 技术规程》的公告

根据中国工程建设标准化协会《关于印发〈2019 年第一批协会标准制订、修订计划〉的通知》（建标协字〔2019〕12 号）的要求，由中国汽车工业工程有限公司、机械工业第四设计研究院有限公司等单位编制的《振动试验台基础技术规程》，经本协会建筑振动专业委员会组织审查，现批准发布，编号为 T/CECS 1129-2022，自 2023 年 1 月 1 日起施行。

中国工程建设标准化协会

2022 年 8 月 8 日

前 言

根据中国工程建设标准化协会《关于印发〈2019 年第一批协会标准制订、修订计划〉的通知》（建标协字〔2019〕12 号）的要求，编制组经深入调查研究，认真总结实践经验，参考国内外先进标准，并在广泛征求意见的基础上，制定本规程。

本规程共分 8 章，主要技术内容包括：总则，术语和符号，基本规定，地基动力特征参数，荷载与荷载效应组合，基础设计，施工、检测与验收，监测与运维。

本规程的某些内容可能直接或间接涉及专利，本规程的发布机构不承担识别这些专利的责任。

本规程由中国工程建设标准化协会建筑振动专业委员会归口管理，由中国汽车工业工程有限公司负责具体技术内容的解释。执行过程中，如有意见或建议，请反馈给中国汽车工业工程有限公司（地址：天津市南开区长江道 591 号，邮编：300113）。

主 编 单 位：中国汽车工业工程有限公司
机械工业第四设计研究院有限公司

参 编 单 位：中国机械工业集团有限公司
机械工业勘察设计研究院有限公司
北方工程设计研究院有限公司
国机集团科学技术研究院有限公司
北京强度环境研究所
隔而固（青岛）振动控制有限公司
北京市建筑设计研究院有限公司
苏州苏试试验集团股份有限公司
同济大学

主要起草人：万叶青 杨 俭 钱春宇 宫海军
胡明祎 周兴广 黄 伟 梁希强
尹学军 王建宁 段世昌 朱江峰
高广运 董本勇
主要审查人：徐 建 李忠献 周 云 张令心
陈 骝 郭小华 冯知夏 余尚江
陈志强

目 次

1	总则	(1)
2	术语和符号	(2)
2.1	术语	(2)
2.2	符号	(3)
3	基本规定	(6)
4	地基动力特征参数	(8)
4.1	一般规定	(8)
4.2	现场测试	(8)
4.3	参数修正	(15)
5	荷载与荷载效应组合	(20)
5.1	一般规定	(20)
5.2	静力荷载	(20)
5.3	振动荷载	(20)
5.4	荷载效应组合	(23)
6	基础设计	(25)
6.1	一般规定	(25)
6.2	静力设计	(25)
6.3	动力分析	(26)
6.4	构造设计	(40)
7	施工、检测与验收	(43)
7.1	施工	(43)
7.2	检测与验收	(44)
8	监测与运维	(45)
8.1	监测	(45)

8.2 运行和维护	(46)
用词说明	(47)
引用标准名录	(48)
附：条文说明	(49)

1 总 则

1.0.1 为统一、规范振动试验台基础的技术要求，提高工程质量，做到技术先进、安全适用、经济合理、环境协调，制定本规程。

1.0.2 本规程适用于振动试验台基础的勘察、设计、施工、检测、验收、监测与运维。

1.0.3 振动试验台基础的技术要求除应符合本规程规定外，尚应符合国家现行有关标准和现行中国工程建设标准化协会有关标准的规定。

2 术语和符号

2.1 术 语

2.1.1 机组 machine-foundation system

振动试验台基础和基础上的机器、附属设备、填土的总称。

2.1.2 地基刚度 foundation stiffness

地基抵抗变形的能力，为施加于地基上的力与它引起位移的比值。

2.1.3 静力荷载 static load

在结构使用期间，不随时间发生变化的荷载，或随时间变化缓慢，且变化值与平均值相比可忽略不计的荷载。

2.1.4 振动荷载 vibration load

在结构使用期间，荷载随时间变化，且变化的效应不能忽略。

2.1.5 振动试验台 vibration test table

用于模拟振动环境效应，以检验各种工业产品或工程设施动力学性能的振动试验装置，包括液压振动试验台、电动振动试验台和机械振动试验台等。

2.1.6 液压振动试验台 hydraulic vibration table

以液压作动器为驱动、电液伺服控制的振动试验装置。

2.1.7 电动振动试验台 electric vibration table

以电磁感应驱动的振动试验装置。

2.1.8 机械振动试验台 mechanical vibration table

电机驱动偏心质量或偏心凸轮机构产生振动的试验装置。

2.1.9 额定激振力 rated force

振动试验台在不同试验载荷下所有最大激振力的最小值。

2.1.10 最大振动加速度 maximum vibration acceleration

振动试验台在工作频率范围内, 台面所能达到的最大加速度。

2.1.11 最大振动速度 maximum vibration velocity

振动试验台在工作频率范围内, 台面所能达到的最大速度。

2.1.12 最大振动位移 maximum vibration displacement

振动试验台在工作频率范围内, 台面所能达到的最大位移, 为振动试验台行程的二分之一。

2.1.13 块状基础 block foundation

一种利用基础质量控制设备振动, 通常为长方体形状的基础形式。

2.1.14 坑式基础 pit foundation

一种上部呈凹状的基础形式, 便于振动试验台的安装与使用。

2.1.15 参振质量 mass of vibration

振动体系中参与振动质量的总和, 通常包括基组和参振地基土的质量。

2.2 符 号

2.2.1 作用和响应

F_z ——作动器或激振器的竖向扰力;

F_x 、 F_y ——作动器或激振器的水平扰力;

p_k ——基础底面平均静压力标准值;

$M_{\theta x}$ 、 $M_{\varphi y}$ ——回转激振扰力矩;

M_{ψ} ——扭转激振扰力矩;

$u_{x\varphi}$ ——基组控制点处绕 y 轴转动, 沿 x 向振动线位移 (m);

$u_{z\varphi}$ ——基组控制点处绕 y 轴转动, 沿 z 向振动线位移 (m);

- u_{y0} —— 基组控制点处绕 x 轴转动, 沿 y 向振动线位移 (m);
 u_{z0} —— 基组控制点处绕 x 轴转动, 沿 z 向振动线位移 (m);
 u_z —— 基组控制点的 z 向振动位移;
 θ_x —— 基组绕 x 轴回转振动角位移;
 φ_y —— 基组绕 y 轴回转振动角位移;
 ψ_z —— 基组绕 z 轴扭转振动角位移;
 ω —— 激振扰力的圆频率;
 ω_{nz} —— 基组竖向固有圆频率;
 ω_{nx} 、 ω_{ny} —— 基组水平向固有圆频率;
 $\omega_{n\varphi}$ —— 基组回转固有圆频率;
 $\omega_{n\psi}$ —— 基组扭转固有圆频率;
 ω_{n1} —— 基组沿一水平轴运动、绕另一水平轴回转耦合振动第一振型固有圆频率;
 ω_{n2} —— 基组沿一水平轴运动、绕另一水平轴回转耦合振动第二振型固有圆频率。

2.2.2 计算指标

- C_z —— 天然地基抗压刚度系数;
 C_θ 、 C_φ —— 天然地基抗弯刚度系数;
 C_x —— 天然地基抗剪刚度系数;
 C_ψ —— 天然地基抗扭刚度系数;
 C_{pz} —— 桩尖土的当量抗压刚度系数;
 C_{pr} —— 桩周各层土的当量抗压刚度系数;
 K_z —— 天然地基抗压刚度;
 K_θ 、 K_φ —— 天然地基抗弯刚度;
 K_x —— 天然地基抗剪刚度;
 K_ψ —— 天然地基抗扭刚度;
 K_{pz} —— 桩基抗压刚度;

- $K_{p\theta}$ 、 K_{pp} —— 桩基抗弯刚度；
 m —— 基组的质量；
 $\bar{m}$ —— 基组质量比；
 ζ_z —— 天然地基的竖向阻尼比；
 $\zeta_{x\varphi 1}$ 、 $\zeta_{y\theta 1}$ —— 天然地基的水平与回转耦合振动第一振型阻尼比；
 $\zeta_{x\varphi 2}$ 、 $\zeta_{y\theta 2}$ —— 天然地基的水平与回转耦合振动第二振型阻尼比；
 ζ_ψ —— 天然地基扭转振动阻尼比；
 $[u]$ —— 基础容许振动位移；
 $[v]$ —— 基础容许振动速度；
 $[a]$ —— 基础容许振动加速度。

2.2.3 几何参数

- A —— 基础底面积；
 I —— 基础底面对通过形心轴的惯性矩；
 J —— 基组对通过重心轴的转动惯量；
 I_z —— 基础底面通过形心轴的极惯性矩；
 J_z —— 基组通过重心轴的极转动惯量；
 h —— 基础高度；
 h_1 —— 基组质心至基础顶面的距离；
 h_2 —— 基组质心至基础底面的距离。

3 基本规定

3.0.1 振动试验台基础设计的技术参数应满足下列条件：

1 液压振动试验台单个作动器额定激振力不应大于 1000kN，激振频率不应大于 200Hz；

2 电动振动试验台单个激振器额定激振力不应大于 200kN，激振频率应在 5Hz~5000Hz 范围内；

3 机械振动试验台额定激振力不应大于 200kN，激振频率应在 5Hz~80Hz 范围内，额定负载不应大于 1000kg。

3.0.2 振动试验台基础设计时，应取得下列资料：

1 振动试验台的类型、型号、规格；

2 作动器的技术参数，包括最大激振力、最大振动加速度、最大振动速度、最大振动位移、设备总质量、运动部件质量与工作频率范围等；

3 多轴向振动试验台的技术参数与资料，包括作动器布置、作动器数量、作用方向、作用位置与高度，设备底座安装图等；立柱式振动试验台的技术参数与资料，包括作动器数量、平面布置、安装方式等；

4 相关的辅助设备资料，包括平面布置、立面布置、管线布置、控制柜、液压泵房等；

5 被试对象的相关资料，包括最大尺寸、最大质量，以及动力特性等；

6 场地的工程地质勘察资料，包括地基土的静力和动力参数；

7 工程设计资料，包括工程设计施工图；

8 周边大型振动设备资料以及相关的振动参数等；

9 振动试验台周边环境的容许振动要求。

3.0.3 振动试验台基础设计时，建设场地的地基土类别应按现行国家标准《动力机器基础设计标准》GB 50040 的有关规定确定。

3.0.4 振动试验台基础设计时，应根据设备安装要求和地基动力特征选取相应的基础形式，并应根据基础的刚度特性选取合适的分析方法。

3.0.5 振动试验台地基基础形式应根据振动试验台安装要求和地基土的动力特性确定，宜采用块状基础、坑式基础、桩基加块状基础或桩基加坑式基础等形式（图 3.0.5）。

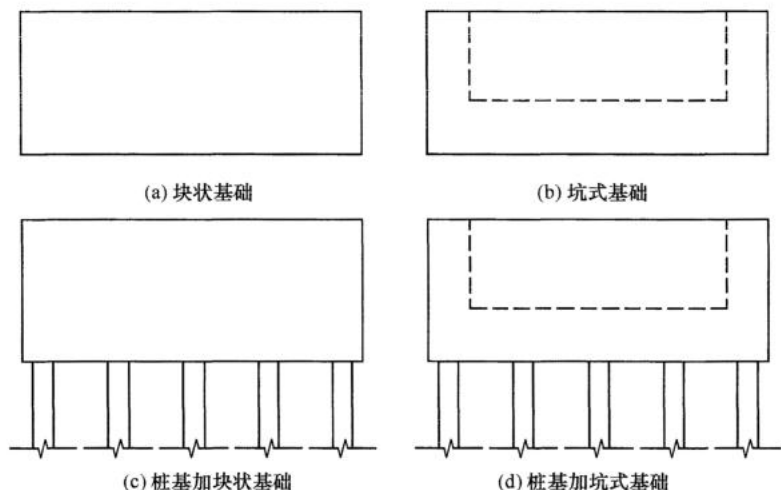


图 3.0.5 基础主要形式示意图

3.0.6 振动试验台基础动力分析应满足下列条件：

- 1 当采用经验公式法时，基础的刚度特性应满足刚性假定条件；
- 2 当基础不满足刚性假定条件时，动力分析应采用数值分析法。

4 地基动力特征参数

4.1 一般规定

4.1.1 振动试验台基础设计所需的地基刚度、地基阻尼比等地基动力特征参数宜由现场测试确定。

4.1.2 当地基动力特征参数无法由现场测试得到时,可按现行国家标准《动力机器基础设计标准》GB 50040 的有关规定确定。

4.2 现场测试

4.2.1 地基动力特征参数应包括地基刚度、地基阻尼比、地基参振质量和基组体系的固有频率等。

4.2.2 模型基础动力特性参数试验应符合现行国家标准《地基动力特性测试规范》GB/T 50269 的有关规定。

4.2.3 地基阻尼比计算方法的采用应符合下列规定:

1 对于稳态振动,当测试数据在共振频率以下时,可采用点峰法;当测试数据在共振频率区间内时,可采用双峰法;

2 对于冲击振动宜采用自由振动衰减法。

4.2.4 地基阻尼比的计算应符合下列规定:

1 点峰法计算中,对于激振器激振试验,可根据基础振动位移的频响曲线,选取共振峰点 0.50~0.85 范围内不少于 3 个点的频率和振动位移(图 4.2.4-1 和图 4.2.4-2),可按下列公式计算:

$$\zeta = \frac{\sum_{i=1}^n \zeta_i}{n} \quad (4.2.4-1)$$

$$\zeta_i = \left[\frac{1}{2} \left(1 - \sqrt{\frac{\beta_i^2 - 1}{\alpha_i^4 - 2\alpha_i^2 + \beta_i^2}} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4.2.4-2)$$

$$\beta_i = \frac{U_m}{U_i} \quad (4.2.4-3)$$

$$\alpha_i = \begin{cases} \frac{f_m}{f_i} & \text{变扰力} \\ \frac{f_i}{f_m} & \text{常扰力} \end{cases} \quad (4.2.4-4)$$

式中： ζ ——基组阻尼比；

ζ_i ——第 i 点计算基组阻尼比；

β_i ——基组振动的共振频率与幅频响应曲线上选取第 i 点频率比值；

n ——幅频响应曲线上选取计算点的数量；

U_m ——基组共振频率处的幅值 (m)；

U_i ——基组对应位移幅频响应曲线上第 i 点频率处的幅值 (m)；

f_m ——基组振动的共振频率 (Hz)；

f_i ——基组位移幅频响应曲线上第 i 点的频率 (Hz)。

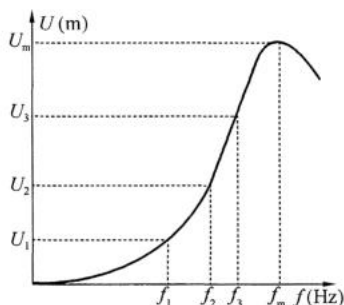


图 4.2.4-1 变扰力位移
频响示意图

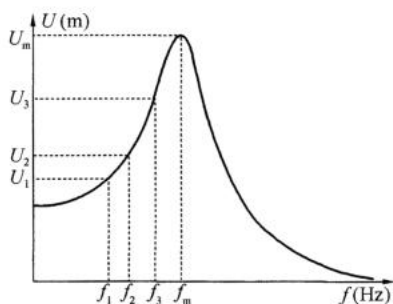


图 4.2.4-2 常扰力位移
频响示意图

2 双峰法计算中，基组阻尼比测试可采用激振器激振进行

受迫振动试验，阻尼比计算宜根据变扰力试验得到的峰值频率 f_{nc} 和常扰力试验得到的峰值频率 f_{ne} 确定（图 4.2.4-3），可按下列式计算：

$$\zeta = \sqrt{\frac{1}{2} \left(1 - \frac{f_{nc}}{f_{ne}} \right)} \quad (4.2.4-5)$$

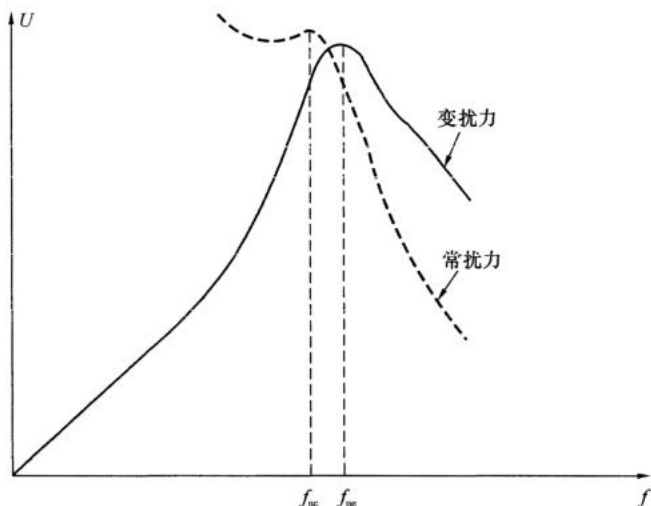


图 4.2.4-3 双峰法位移频响应示意图

3 自由振动衰减法计算应符合下列规定：

- 1) 振动试验台基础地基振动体系的固有频率应按下列式计算：

$$f_{n0} = \frac{1}{T_0} \quad (4.2.4-6)$$

- 2) 振动体系的阻尼比应按下列式计算（图 4.2.4-4）：

$$\zeta_i = \frac{1}{2\pi n_i} \ln \frac{U_i}{U_{i+1}} \quad (4.2.4-7)$$

式中： U_i ——基础振动位移衰减过程第 i 个峰值（m）；

U_{i+1} ——基础振动位移衰减过程第 $(i+1)$ 个峰值（m）；

n_i —— 振动衰减的周期数；

T_0 —— 位移衰减过程中，两个波峰之间的时长，亦即自由振动的固有周期（s）。

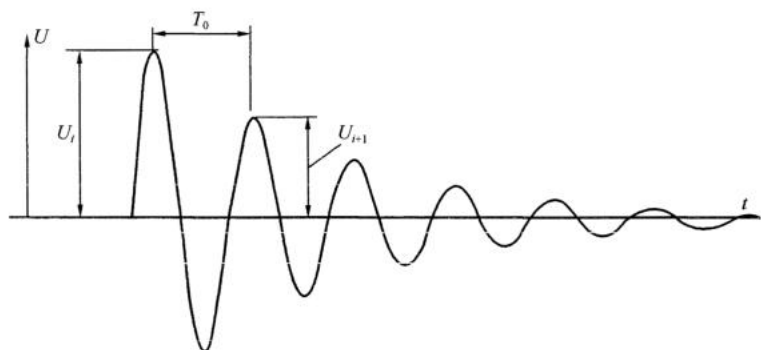


图 4.2.4-4 自由振动位移衰减示意图

4.2.5 地基竖向振动的参振总质量应符合下列规定：

1 当变扰力试验时，地基竖向振动的参振总质量应按下列式计算：

$$m = \frac{m_0 e_0}{d_m} \cdot \frac{1}{2\zeta_z \sqrt{1 - \zeta_z^2}} \quad (4.2.5-1)$$

2 当常扰力试验时，地基竖向振动的参振总质量应按下列公式计算：

$$m = \frac{P}{d_m (2\pi f_{nz})^2} \cdot \frac{1}{2\zeta_z \sqrt{1 - \zeta_z^2}} \quad (4.2.5-2)$$

$$f_{nz} = \frac{f_m}{\sqrt{1 - 2\zeta_z^2}} \quad (4.2.5-3)$$

式中： m —— 基组参振总质量（t），当 m 大于基础质量 2 倍时，应按基础质量 2 倍取值；

m_0 —— 机械激振器旋转部分质量（t）；

e_0 —— 机械激振器旋转部分质量的偏心距（m）；

d_m ——基础竖向振动的共振振动线位移 (m);

P ——电磁激振器的激振力 (kN);

f_{nz} ——基础竖向无阻尼固有频率 (Hz)。

4.2.6 地基抗压刚度、地基抗压刚度系数、单桩抗压刚度和桩基抗弯刚度计算应符合下列规定:

1 当为变扰力时, 应按下列公式计算:

$$K_z = m (2\pi f_{nz})^2 \quad (4.2.6-1)$$

$$C_z = \frac{K_z}{A} \quad (4.2.6-2)$$

$$K_{pz} = \frac{K_z}{n_p} \quad (4.2.6-3)$$

$$K_{pq} = K_{pz} \sum_{i=1}^{n_p} r_i^2 \quad (4.2.6-4)$$

$$f_{nz} = f_m \sqrt{1 - 2\zeta_z^2} \quad (4.2.6-5)$$

式中: K_z ——地基或桩基抗压刚度 (kN/m);

C_z ——地基抗压刚度系数 (kN/m³);

K_{pz} ——单桩抗压刚度 (kN/m);

K_{pq} ——桩基抗弯刚度 (kN·m);

r_i ——第 i 根桩的轴线至基础底面形心回转轴的距离 (m);

n_p ——桩数。

2 当为常扰力时, 地基抗压刚度系数、单桩抗压刚度和桩基抗弯刚度应按式 (4.2.6-2)~式 (4.2.6-4) 计算, 地基或桩基抗压刚度应按下式计算:

$$K_z = \frac{P}{d_m} \cdot \frac{1}{2\zeta_z \sqrt{1 - \zeta_z^2}} \quad (4.2.6-6)$$

4.2.7 地基抗剪刚度和抗剪刚度系数计算应符合下列规定:

1 当为变扰力时, 应按下列公式计算:

$$K_x = m_{xp} (2\pi f_{nx})^2 \quad (4.2.7-1)$$

$$C_x = \frac{K_x}{A} \quad (4.2.7-2)$$

$$f_{nx} = \frac{f_{nl}}{\sqrt{1 - \frac{h_2}{\rho_1}}} \quad (4.2.7-3)$$

$$f_{nl} = f_{ml} \sqrt{1 - 2\xi_{x\varphi l}^2} \quad (4.2.7-4)$$

式中: K_x ——地基抗剪刚度 (kN/m);

$m_{x\varphi}$ ——基础水平回转耦合振动的参振总质量 (t);

C_x ——地基抗剪刚度系数 (kN/m³);

f_{nx} ——基础水平向无阻尼固有频率 (Hz);

f_{nl} ——基础水平回转耦合振动第一振型无阻尼固有频率 (Hz);

h_2 ——基础底面至基础质心的距离 (m);

f_{ml} ——基础水平回转耦合振动第一振型共振频率 (Hz)。

2 当为常扰力时,地基抗剪刚度和地基抗剪刚度系数应按式 (4.2.7-1)~式 (4.2.7-3) 计算,基础水平回转耦合振动第一振型无阻尼固有频率应按式 (4.2.7-4) 计算:

$$f_{nl} = \frac{f_{ml}}{\sqrt{1 - 2\xi_{x\varphi l}^2}} \quad (4.2.7-5)$$

4.2.8 地基抗弯刚度和地基抗弯刚度系数计算应符合下列规定:

1 当为变扰力时,应按下列公式计算:

$$K_\varphi = J (2\pi f_{n\varphi})^2 - K_x h_2^2 \quad (4.2.8-1)$$

$$C_\varphi = \frac{K_\varphi}{I} \quad (4.2.8-2)$$

$$f_{n\varphi} = \sqrt{\rho_1 \frac{h_2}{\rho_r^2} f_{nx}^2 + f_{nl}^2} \quad (4.2.8-3)$$

式中: K_φ ——地基抗弯刚度 (kN·m);

J ——基础对通过重心轴的转动惯量 (t·m²);

C_φ ——地基抗弯刚度系数 (kN/m³);

- I ——基础底面对通过形心轴的惯性矩 (m^4);
 f_{np} ——基础回转无阻尼固有频率 (Hz);
 ρ_1 ——基组一阶振型的回转半径 (m);
 ρ_r ——基础回转半径 (m)。

2 当为常扰力时,地基抗弯刚度和地基抗弯刚度系数应按式 (4.2.8-1)~式 (4.2.8-3) 计算,基础水平回转耦合振动第一振型无阻尼固有频率应按本规程式 (4.2.7-5) 计算。

4.2.9 地基扭转向阻尼比应在扭转力矩作用下的水平振动线位移随频率变化的幅频响应曲线上选取,基础扭转振动的共振频率和基础扭转振动的共振频率为 0.707 时所对应的水平振动线位移,可按下式计算:

$$\zeta_{\psi} = \begin{cases} \left\{ \frac{1}{2} \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{u_{\text{x}\psi}}{u_{\text{m}\psi}} \right)^2} \right] \right\}^{\frac{1}{2}} & \text{变扰力} \\ \left\{ \frac{1}{2} \left[1 - \sqrt{1 + \frac{1}{3 - 4 \left(\frac{u_{\text{m}\psi}}{u_{\text{x}\psi}} \right)^2}} \right] \right\}^{\frac{1}{2}} & \text{常扰力} \end{cases} \quad (4.2.9)$$

式中: ζ_{ψ} ——地基扭转阻尼比;

$u_{\text{m}\psi}$ ——基础扭转振动共振峰点水平振动线位移 (m);

$u_{\text{x}\psi}$ ——基础水平与回转耦合振动第一振型共振频率所对应的水平振动线位移 (m)。

4.2.10 基础扭转振动的参振总质量可按下列公式计算:

$$m_{\psi} = \frac{12J_z}{l^2 + b^2} \quad (4.2.10-1)$$

$$J_z = \begin{cases} \frac{m_0 e_0 e_c l_{\psi}}{u_{\text{m}\psi}} \cdot \frac{1}{2\zeta_{\psi} \sqrt{1 - \zeta_{\psi}^2}} & \text{变扰力} \\ \frac{M_{\psi} l_{\psi}^2}{u_{\text{m}\psi} \omega_{\text{np}}^2} \cdot \frac{1 - 2\zeta_{\psi}^2}{2\zeta_{\psi} \sqrt{1 - \zeta_{\psi}^2}} & \text{常扰力} \end{cases} \quad (4.2.10-2)$$

$$f_{n\psi} = \begin{cases} f_{m\psi} \sqrt{1 - 2\zeta_\psi^2} & \text{变扰力} \\ \frac{f_{m\psi}}{\sqrt{1 - 2\zeta_\psi^2}} & \text{常扰力} \end{cases} \quad (4.2.10-3)$$

$$\omega_{n\psi} = 2\pi f_{n\psi} \quad (4.2.10-4)$$

式中： m_ψ ——基础扭转振动的参振总质量 (t)；

J_z ——基础对通过重心轴的极转动惯量 ($t \cdot m^2$)；

l ——基础长度 (m)；

b ——基础宽度 (m)；

e_e ——激振设备的水平扭转力矩力臂 (m)；

$f_{n\psi}$ ——基础扭转振动无阻尼固有频率 (Hz)；

$\omega_{n\psi}$ ——基础扭转振动固有圆频率 (rad/s)；

m_0 ——激振设备的旋转部分质量 (t)；

e_0 ——激振设备质量偏心距 (m)；

M_ψ ——激振设备的扭转力矩 ($kN \cdot m$)；

l_ψ ——扭转轴至实测线位移点的距离 (m)。

4.2.11 地基抗扭刚度和地基抗扭刚度系数可按下列公式计算：

$$K_\psi = J_z \omega_{n\psi}^2 \quad (4.2.11-1)$$

$$C_\psi = \frac{K_\psi}{I_z} \quad (4.2.11-2)$$

式中： K_ψ ——地基抗扭刚度 ($kN \cdot m$)；

C_ψ ——地基抗扭刚度系数 (kN/m^3)；

I_z ——基础底面对通过形心轴的极惯性矩 (m^4)。

4.3 参数修正

4.3.1 振动试验台基础设计应采用修正后的地基动力特征参数。采用现场模型试验测试得到的地基动力特征参数，应按模型基础和实际基础面积的比例关系，并计入基底静压力和埋深等因素的影响进行修正。

4.3.2 由明置块体基础测试取得的地基抗压、抗剪、抗弯、抗扭刚度系数以及由明置桩基础测试取得的抗剪、抗扭刚度系数，应乘以基础底面积与基础底面静压力的换算系数，换算系数应按下式计算：

$$\eta_A = \sqrt[3]{\frac{A_0}{A_d}} \cdot \sqrt[3]{\frac{P_d}{P_0}} \quad (4.3.2)$$

式中： η_A ——基础底面积与基础底面静压力的换算系数；

A_0 ——模型基础底面积（ m^2 ）；

A_d ——设计基础底面积（ m^2 ），当 A_d 大于 20m^2 时，应取 20m^2 ；

P_0 ——模型基础底面静压力（ kPa ）；

P_d ——设计基础底面静压力（ kPa ），当 P_d 大于 50kPa 时，应取 50kPa 。

4.3.3 设计基础时，地基抗压、抗剪、抗弯和抗扭刚度等参数的提高系数，应根据基础埋深条件按下列公式计算：

$$\alpha_z = \left[1 + \left(\sqrt{\frac{K'_{z0}}{K_{z0}}} - 1 \right) \frac{\delta_d}{\delta_0} \right]^2 \quad (4.3.3-1)$$

$$\alpha_x = \left[1 + \left(\sqrt{\frac{K'_{x0}}{K_{x0}}} - 1 \right) \frac{\delta_d}{\delta_0} \right]^2 \quad (4.3.3-2)$$

$$\alpha_\varphi = \left[1 + \left(\sqrt{\frac{K'_{\varphi 0}}{K_{\varphi 0}}} - 1 \right) \frac{\delta_d}{\delta_0} \right]^2 \quad (4.3.3-3)$$

$$\alpha_\psi = \left[1 + \left(\sqrt{\frac{K'_{\psi 0}}{K_{\psi 0}}} - 1 \right) \frac{\delta_d}{\delta_0} \right]^2 \quad (4.3.3-4)$$

$$\delta_0 = \frac{h_1}{\sqrt{A_0}} \quad (4.3.3-5)$$

$$\delta_d = \frac{h_d}{\sqrt{A_d}} \quad (4.3.3-6)$$

式中： α_z ——基础埋深对地基抗压刚度的提高系数；

α_x ——基础埋深对地基抗剪刚度的提高系数；

α_{φ} ——基础埋深对地基抗弯刚度的提高系数；
 α_{ψ} ——基础埋深对地基抗扭刚度的提高系数；
 K_{x0} ——明置模型基础的地基抗压刚度 (kN/m)；
 K_{x0} ——明置模型基础的地基抗剪刚度 (kN/m)；
 $K_{\varphi 0}$ ——明置模型基础的地基抗弯刚度 (kN·m)；
 $K_{\psi 0}$ ——明置模型基础的地基抗扭刚度 (kN·m)；
 K'_{x0} ——埋置模型基础的地基抗压刚度 (kN/m)；
 K'_{x0} ——埋置模型基础的地基抗剪刚度 (kN/m)；
 $K'_{\varphi 0}$ ——埋置模型基础的地基抗弯刚度 (kN·m)；
 $K'_{\psi 0}$ ——埋置模型基础的地基抗扭刚度 (kN·m)；
 δ_0 ——模型基础的埋深比；
 δ_d ——设计块体基础或桩基础的埋深比；
 h_1 ——模型基础的埋置深度 (m)；
 h_d ——设计基础的埋置深度 (m)。

4.3.4 由明置模型基础测试的地基竖向阻尼比、水平回转向第一振型阻尼比和扭转向阻尼比，可按下列公式换算：

$$\zeta_z^c = \zeta_{x0} \xi \quad (4.3.4-1)$$

$$\zeta_{x\varphi_1}^c = \zeta_{x\varphi_1 0} \xi \quad (4.3.4-2)$$

$$\zeta_{\psi}^c = \zeta_{\psi 0} \xi \quad (4.3.4-3)$$

$$\xi = \frac{\sqrt{m_{\tau}}}{\sqrt{m_{d\tau}}} \quad (4.3.4-4)$$

$$m_{\tau} = \frac{m_f}{\rho A_0 \sqrt{A_0}} \quad (4.3.4-5)$$

$$m_{d\tau} = \frac{m_d}{\rho A_d \sqrt{A_d}} \quad (4.3.4-6)$$

式中： ζ_{x0} ——明置模型基础的地基竖向阻尼比；

$\zeta_{x\varphi_1 0}$ ——明置模型基础的地基水平回转向第一振型阻尼比；

$\zeta_{\psi 0}$ ——明置模型基础的地基扭转向阻尼比；

- ζ_z^c ——明置设计基础的地基竖向阻尼比；
 $\zeta_{x\varphi_1}^c$ ——明置设计基础的地基水平回转向第一振型阻尼比；
 ζ_ψ^c ——明置设计基础的地基扭转向阻尼比；
 ξ ——与基础的质量比有关的换算系数；
 m_f ——模型基础的质量 (t)；
 m_d ——设计基础的质量 (t)；
 m_τ ——模型基础的质量比；
 $m_{d\tau}$ ——设计基础的质量比；
 ρ ——地基的质量密度 (t/m³)。

4.3.5 基础埋深对设计基础地基的竖向阻尼比、水平回转向第一振型阻尼比和扭转向阻尼比的提高系数，应按下列公式计算：

$$\beta_z = 1 + \left(\frac{\zeta_{z0}'}{\zeta_{z0}} - 1 \right) \frac{\delta_d}{\delta_0} \quad (4.3.5-1)$$

$$\beta_{x\varphi_1} = 1 + \left(\frac{\zeta_{x\varphi_1 0}'}{\zeta_{x\varphi_1 0}} - 1 \right) \frac{\delta_d}{\delta_0} \quad (4.3.5-2)$$

$$\beta_\psi = 1 + \left(\frac{\zeta_{\psi 0}'}{\zeta_{\psi 0}} - 1 \right) \frac{\delta_d}{\delta_0} \quad (4.3.5-3)$$

式中： β_z ——基础埋深对竖向阻尼比的提高系数；

$\beta_{x\varphi_1}$ ——基础埋深对水平回转向第一振型阻尼比的提高系数；

β_ψ ——基础埋深对扭转向阻尼比的提高系数；

ζ_{z0}' ——埋置测试的模型基础的地基竖向阻尼比；

$\zeta_{x\varphi_1 0}'$ ——埋置测试的模型基础的地基水平回转向第一振型阻尼比；

$\zeta_{\psi 0}'$ ——埋置测试的模型基础的地基扭转向阻尼比。

4.3.6 当计算基础的固有频率时，由明置模型基础测试取得的地基参加振动的当量质量，应乘以设计基础底面积与模型基础底面积的比值。

4.3.7 当设计的桩基础超过 10 根时，由 2 根桩基础测试取得的单桩抗压刚度应乘以群桩效应系数 0.75；由 4 根桩基础测试取得的单桩抗压刚度应乘以群桩效应系数 0.90。

5 荷载与荷载效应组合

5.1 一般规定

5.1.1 振动试验台基础设计应包括静力分析和动力分析。

5.1.2 对于高地震烈度区的大型地震试验台，应按照现行国家标准《建筑抗震设计规范》GB 50011 的有关规定计算地震作用组合。

5.2 静力荷载

5.2.1 静力荷载取值应符合现行国家标准《建筑结构荷载规范》GB 50009 的有关规定。

5.2.2 振动试验台基础静力分析采用的永久荷载应包括基础及支承结构的重量、上部填土重量、土压力、水压力等。

5.2.3 振动试验台基础静力分析采用的可变荷载应包括振动试验台及辅助设备的重量、被试对象与其支承结构，以及操作人员和一般工具等活荷载。

5.2.4 等效静力荷载应由设备与被试对象重量乘以动力系数计算得到。

5.3 振动荷载

5.3.1 振动试验台的振动荷载应符合下列规定：

1 振动荷载可由振动试验台设备厂家提供的扰力资料确定，扰力资料应包括振动频率范围、扰力作用位置、方向和大小，以及设备的动力特性等；

2 当无法提供扰力资料时，可由设备厂家提供设备有关技术参数，宜按本规程第 5.3.3 条规定确定；

3 当无法根据本条第 1 款和第 2 款的规定得到振动荷载时,宜按现行国家标准《建筑振动荷载标准》GB/T 51228 的有关规定取值。

5.3.2 振动试验台基础动力设计应进行频域分析,对于大型多自由度模拟振动试验台尚应采用时域分析进行补充验证。频域分析时应采用频域荷载,时域分析时应采用时域荷载。

5.3.3 进行频域稳态分析时,动力分析采用的频域振动荷载应由惯性质量和加速度特性确定,频域振动荷载可按下列公式计算:

$$F_t(f) = m_t a_t(f) \quad (5.3.3-1)$$

$$m_t = m_s + m_0 \quad (5.3.3-2)$$

式中: $F_t(f)$ ——单个作动器满载条件下不同频率的激振力 (kN);

$a_t(f)$ ——在试验条件下不同加载频率下的加速度 (m/s^2);

m_0 ——振动台台面运动部分质量 (t);

m_s ——振动台上被试对象负载质量 (t);

m_t ——振动台运动部分总质量 (t)。

5.3.4 振动试验台的加速度幅频特性应符合下列规定:

1 液压振动试验台频域荷载的振动特性应根据液压作动器技术条件确定,并应满足低频位移、中频速度和高频加速度三段线的控制条件,同时尚应满足激振力的限制条件。

2 电动振动试验台频域荷载的振动特性应根据激振器技术条件确定。对于正弦试验,应满足中频速度和高频加速度两段线控制条件;对于常规电动振动试验台冲击振动试验,最大激振力应由正弦试验激振力乘以 2 得到。

3 机械振动试验台激振力应符合下列规定:

1) 偏心式机械振动台激振力应按下列公式计算:

$$P_r(t) = m_r r \omega^2 \sin(\omega t) \quad (5.3.4-1)$$

$$\omega = 2\pi f \quad (5.3.4-2)$$

式中： r ——驱动装置的偏心距（mm）；

m_r ——运动部分质量（kg），按不超过 500kg 取值；

f ——振动台激振频率（Hz）；

ω ——圆频率（rad/s）；

t ——时间（s）。

2) 离心式机械振动台激振力应按式计算：

$$P_e(t) = m_e e \omega^2 \sin(\omega t) \quad (5.3.4-3)$$

式中： e ——偏心质量的偏心距（mm）；

m_e ——偏心质量（kg），按不超过 100kg 取值。

5.3.5 振动试验台基础时域分析采用的时域荷载应按照试验条件使用的时域振动信号确定。时域振动荷载可按下列规定选取：

1 振动试验台基础设计都应进行特定正弦波简谐振动荷载时程分析；

2 振动试验台基础应在工作频率范围进行扫频振动时域分析，计算振动峰值和扫频通过隔振频率点的基础振幅变化结果；

3 液压和电动振动试验台应分别选取典型的随机振动和冲击振动信号进行时程分析。

5.3.6 当被试对象振动特性复杂或高宽比大于 4 时，振动试验台基础设计应计入被试对象的附加荷载作用，附加荷载应按下列规定确定：

1 当被试对象为高大结构，且具有水平振动荷载作用时，基础设计应计入倾覆力矩的影响。倾覆力矩可按式计算：

$$T_c = m_c a_c h_c \quad (5.3.6)$$

式中： T_c ——试验对象作用于基础上的倾覆力矩（kN·m）；

m_c ——试验对象质心处的折算质量（t）；

a_c ——试验对象质心处的加速度（m/s²）；

h_c ——试验对象质心处的距离基础顶面的高度（m）。

2 对于被试对象高宽比或长宽比大于 4 的试验模型和被试对象自带隔振装置的试验模型，基础设计时应均计入被试对象的

动力放大作用。基础振动计算时，振动荷载应乘以动力放大系数。

5.4 荷载效应组合

5.4.1 静力荷载的效应组合应符合下列规定：

1 对于承载能力极限状态，应按荷载基本组合或偶然组合计算荷载效应组合的设计值，并应符合下式规定：

$$\gamma_0 S_d \leq R_d \quad (5.4.1-1)$$

式中： γ_0 ——结构重要性系数，对安全等级为二级、三级的结构构件不应小于 1.0，对安全等级为一级的结构构件和大型振动试验台不应小于 1.1；

S_d ——静力荷载效应组合的设计值；

R_d ——结构构件抗力的设计值，应按各有关建筑结构设计标准的有关规定确定。

2 对于正常使用极限状态，应按荷载的标准组合，并应符合下式规定：

$$S_d \leq C \quad (5.4.1-2)$$

式中： S_d ——静力荷载效应组合的标准值；

C ——结构或结构构件达到正常使用要求的规定限值。

5.4.2 振动荷载的效应组合根据现行国家标准《建筑振动荷载标准》GB/T 51228 的有关规定，按照正常使用极限状态设计时，应按荷载标准组合，并应符合下式规定：

$$S_v \leq D \quad (5.4.2)$$

式中： S_v ——振动荷载效应的组合值；

D ——结构或结构构件达到容许振动标准限值。

5.4.3 振动试验台地基基础振动对环境的影响程度应符合下式规定：

$$S_E \leq E \quad (5.4.3)$$

式中： S_E ——环境振动荷载效应的标准值；

E ——环境振动容许标准限值。

5.4.4 采用时域分析振动荷载效应组合时，应在时域进行组合计算；采用频域分析振动荷载效应组合时，可采用统计平均的方法。

5.4.5 振动荷载组合方法宜符合下列规定：

1 当多个周期性振动荷载或稳态随机振动荷载组合时，振动荷载均方根效应组合值，宜按下式计算：

$$S_{vg} = \sqrt{\sum_{i=1}^n S_{vgi}^2} \quad (5.4.5-1)$$

式中： S_{vg} —— n 个振动荷载均方根效应的组合值；

S_{vgi} ——第 i 个振动荷载效应的均方根值；

n ——振动荷载的总数量。

2 当两个周期性振动荷载作用时，振动荷载效应组合的最大值，宜按下式计算：

$$S_{\max} = S_{1\max} + S_{2\max} \quad (5.4.5-2)$$

式中： $S_{\max}$ ——两个振动荷载效应组合的最大值；

$S_{1\max}$ ——第1个振动荷载效应的最大值；

$S_{2\max}$ ——第2个振动荷载效应的最大值。

3 当冲击荷载起控制作用时，振动荷载效应组合，宜按下式计算：

$$S_{vp} = S_{v\max} + \alpha_k \sqrt{\sum_{i=1}^n S_{vgi}^2} \quad (5.4.5-3)$$

式中： S_{vp} ——当冲击荷载控制时，在时域范围上效应的组合值；

$S_{v\max}$ ——冲击荷载效应在时域上的最大值；

α_k ——冲击作用下的组合系数，可取1.0。

6 基础设计

6.1 一般规定

- 6.1.1 振动试验台基础周边宜设置相应的防振缝。
- 6.1.2 当采用天然地基进行静力计算时，大型地震模拟振动试验台和多轴向振动试验台基础底面不应出现零应力区；仅有竖向激振的振动试验台基础底面不宜出现零应力区。
- 6.1.3 当振动试验台采用刚性基础或柔性基础设计时，应符合下列规定：
- 1 底面长厚比不超过 3 的块状基础可按刚性基础计算振动响应；
 - 2 底面长厚比大于 3 的基础应按柔性基础计算振动响应；
 - 3 异形基础应采用数值方法分析。

6.2 静力设计

- 6.2.1 振动试验台基础承载力极限状态和正常使用极限状态设计应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 和《建筑地基基础设计规范》GB 50007 的有关规定。
- 6.2.2 地基承载力计算应符合下列规定：
- 1 振动试验台基础底面的平均静压力值，应符合下式规定：

$$p_k \leq a_v f_a \quad (6.2.2-1)$$

式中： p_k ——相应于作用的标准组合时，基础底面的平均静压力值（kPa）；

a_v ——地基承载力的动力折减系数，其中液压振动台取 0.8，电动振动台取 0.85；

f_a ——修正后的地基承载力特征值 (kPa)。

2 当偏心荷载作用时,除应符合式 (6.2.2-1) 规定外,尚应符合下式规定:

$$p_{kmax} \leq 1.2a_v f_a \quad (6.2.2-2)$$

式中: p_{kmax} ——相应于作用的标准组合时,基础底面边缘的最大压力值 (kPa)。

3 计算振动试验台基础底面的平均静压力时,静力荷载的计算应包括下列内容:

- 1) 基础自重和基础上回填土重;
- 2) 振动试验台自重、被试对象的重力和传至基础上的其他荷载;
- 3) 地基基础静力计算中的动力系数。

6.2.3 振动试验台基础静力计算时,上部活荷载应计入动力系数;地基承载力验算时,动力系数可取 1.1。

6.2.4 基础采用桩基时,桩基静力计算应符合现行行业标准《建筑桩基技术规范》JGJ 94 的有关规定。

6.3 动力分析

6.3.1 振动试验台基础动力计算应根据基础的刚度特性选用计算方法,并应符合下列规定:

1 刚性基础可根据现行国家标准《动力机器基础设计标准》GB 50040 中规定的质弹阻模型计算基础的振动响应;

2 柔性基础或异形基础的振动响应可采用数值方法计算。

6.3.2 振动试验台的刚性基础可按经验公式进行动力响应计算,并应符合下列规定:

1 在刚性基础动力设计时,应将基础设定为质点或刚体,地基作为基础的弹簧和阻尼边界。振动试验台下的刚性基础,应根据基础动力特性和扰力作用,分别计算沿 x 轴、 y 轴和 z 轴的

平动，以及绕 x 轴、 y 轴和 z 轴的转动（图 6.3.2-1）；基础运动的方向应与扰力作用（ F_x 、 F_y 、 F_z 、 $M_{\theta x}$ 、 $M_{\varphi y}$ 和 $M_{\psi z}$ ）（图 6.3.2-2）的方向对应。

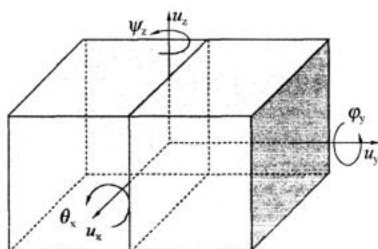


图 6.3.2-1 刚性基础运动形式示意图

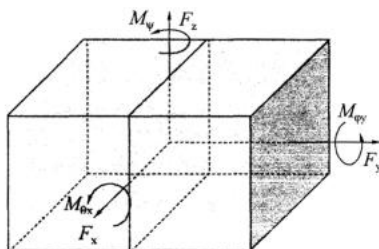


图 6.3.2-2 基础上作用力示意图

2 振动试验台刚性基础的动力分析应按扰力作用特点进行分类，基础的振动分析可分成下列 6 种计算工况：

- 1) 基组在通过质心的竖向扰力作用下，产生竖向振动；
- 2) 基组在绕 z 轴的扭转扰力矩作用下，产生扭转振动；
- 3) 基组在绕 y 轴回转的扰力矩作用下，产生绕 y 轴的回转振动；
- 4) 基组在绕 x 轴回转的扰力矩作用下，产生绕 x 轴的回转振动；
- 5) 基组在沿 x 轴水平扰力作用下，产生 x 向水平和绕 y 轴回转的耦合振动；
- 6) 基组在沿 y 轴水平扰力作用下，产生 y 向水平和绕 x 轴回转的耦合振动。

3 基础的振动响应应符合下列规定：

- 1) 对于通过质心的竖向扰力（ F_z ）作用工况，基础竖向振位移可按下列公式计算：

$$u_z = \frac{F_z}{K_z} \eta_z \quad (6.3.2-1)$$

$$\eta_z = \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_{nz}^2}\right)^2 + 4\zeta_z^2 \frac{\omega^2}{\omega_{nz}^2}}} \quad (6.3.2-2)$$

$$\omega_{nz}^2 = \frac{K_z}{m} \quad (6.3.2-3)$$

式中: u_z —— 基组质心处的竖向振动线位移 (m);

F_z —— 基组的竖向扰力 (kN);

K_z —— 基组的竖向刚度 (kN/m);

ω_{nz} —— 基组的竖向固有圆频率 (rad/s);

m —— 基组的质量 (t);

η_z —— 对应圆频率的基组竖向振动的传递率;

ω —— 竖向扰力的圆频率 (rad/s);

ζ_z —— 基组的竖向阻尼比。

- 2) 当基础在水平扭转扰力矩 (M_ψ) 作用下, 基组产生水平扭转振动 (图 6.3.1-3) 时, 基础顶面控制点的振动位移可按下列公式计算:

$$u_{x\psi} = \psi_z l_y \quad (6.3.2-4)$$

$$u_{y\psi} = \psi_z l_x \quad (6.3.2-5)$$

$$\psi_z = \frac{M_\psi}{K_\psi} \eta_\psi \quad (6.3.2-6)$$

$$\eta_\psi = \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_{n\psi}^2}\right)^2 + 4\zeta_\psi^2 \frac{\omega^2}{\omega_{n\psi}^2}}} \quad (6.3.2-7)$$

$$\omega_{n\psi}^2 = \frac{K_\psi}{J_z} \quad (6.3.2-8)$$

式中: $u_{x\psi}$ —— 基组控制点处绕 z 轴转动, 沿 x 向振动线位移 (m);

$u_{y\psi}$ —— 基组控制点处绕 z 轴转动, 沿 y 向振动线位移 (m);

M_ψ —— 基组绕 z 轴的扰力扭矩 (kN·m);

- l_x —— 基组质心距离控制点 x 轴方向的长度 (m);
 l_y —— 基组质心距离控制点 y 轴方向的长度 (m);
 ϕ_z —— 基组绕 z 轴的角位移 (rad);
 J_z —— 基组绕 z 轴的转动惯量 ($t \cdot m^2$);
 η_ψ —— 基组绕 z 轴的振动传递率;
 $\omega_{n\psi}$ —— 基组绕 z 轴转动的固有圆频率 (rad/s);
 ζ_ψ —— 基组绕 z 轴的转动阻尼比;
 K_ψ —— 基组绕 z 轴的转动刚度 (kN/rad)。

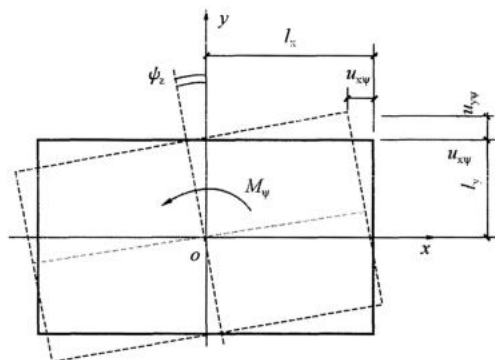


图 6.3.2-3 基组扭转振动示意图

- 3) 当基础在纵向仰俯运动回转扰力矩 ($M_{\varphi y}$) 作用下, 基组产生绕 y 轴的回转振动 (图 6.3.2-4) 时, 基础顶面控制点的振动位移可按下列公式计算:

$$u_{x\varphi} = \varphi_y l_z \quad (6.3.2-9)$$

$$u_{z\varphi} = \varphi_y l_x \quad (6.3.2-10)$$

$$\varphi_y = \frac{M_{\varphi y}}{K_{\varphi y}} \eta_{\varphi y} \quad (6.3.2-11)$$

$$\eta_{\varphi y} = \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_{n\varphi y}^2}\right)^2 + 4\zeta_{\varphi y}^2 \frac{\omega^2}{\omega_{n\varphi y}^2}}} \quad (6.3.2-12)$$

$$\omega_{n\varphi y}^2 = \frac{K_{\varphi y}}{J_y} \quad (6.3.2-13)$$

式中: u_{xp} —— 基组控制点处绕 y 轴转动, 沿 x 向振动线位移 (m);

u_{zp} —— 基组控制点处绕 y 轴转动, 沿 z 向振动线位移 (m);

$M_{\varphi y}$ —— 基组绕 y 轴的扰力矩 ($\text{kN} \cdot \text{m}$);

l_x —— 基组质心距离控制点 x 轴方向的长度 (m);

l_z —— 基组质心距离控制点 z 轴方向的长度 (m);

φ_y —— 基组绕 y 轴的角位移 (rad);

J_y —— 基组绕 y 轴的转动惯量 ($\text{t} \cdot \text{m}^2$);

$\eta_{\varphi y}$ —— 基组绕 y 轴的振动传递率;

$\omega_{n\varphi y}$ —— 基组绕 y 转动的固有圆频率 (rad/s);

$\zeta_{y\varphi}$ —— 基组绕 y 轴的转动阻尼比;

$K_{\varphi y}$ —— 基组绕 y 轴的转动刚度 (kN/rad)。

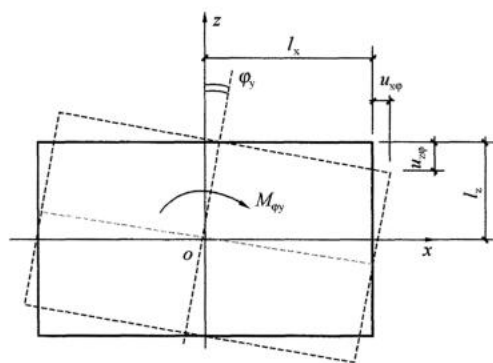


图 6.3.2-4 基组纵向回转振动示意图

- 4) 当基础在回转扰力矩 ($M_{\theta x}$) 作用下, 基组产生绕 x 轴的回转振动 (图 6.3.2-5) 时, 基础顶面控制点的振动位移可按下列公式计算:

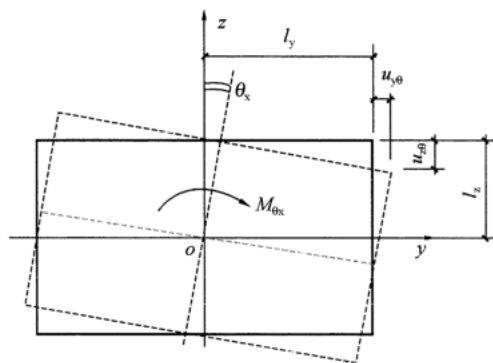


图 6.3.2-5 基组回转振动示意图

$$u_{y0} = \theta_x l_z \quad (6.3.2-14)$$

$$u_{z0} = \theta_x l_y \quad (6.3.2-15)$$

$$\theta_x = \frac{M_{\theta x}}{K_{\theta x}} \eta_{\theta x} \quad (6.3.2-16)$$

$$\eta_{\theta x} = \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_{n\theta x}^2}\right)^2 + 4\zeta_{x\theta}^2 \frac{\omega^2}{\omega_{n\theta x}^2}}} \quad (6.3.2-17)$$

$$\omega_{n\theta x}^2 = \frac{K_{\theta x}}{J_x} \quad (6.3.2-18)$$

式中： u_{y0} ——基组控制点处绕 x 轴转动，沿 y 向振动线位移 (m)；

u_{z0} ——基组控制点处绕 x 轴转动，沿 z 向振动线位移 (m)；

$M_{\theta x}$ ——基组绕 x 轴的扰力矩 ($\text{kN} \cdot \text{m}$)；

l_y ——基组质心距离控制点 y 轴方向的长度 (m)；

l_z ——基组质心距离控制点 z 轴方向的长度 (m)；

θ_x ——基组绕 x 轴的角位移 (rad)；

J_x ——基组绕 x 轴的转动惯量 ($\text{t} \cdot \text{m}^2$)；

$\eta_{\theta x}$ ——基组绕 x 轴的振动传递率；

$\omega_{\text{н}0x}$ —— 基组绕 x 转动的固有圆频率 (rad/s);

ζ_{x0} —— 基组绕 x 轴的转动阻尼比;

K_{0x} —— 基组绕 x 轴的转动刚度 (kN/rad)。

5) 在沿 x 轴的偏心水平扰力 (F_x) 作用下, 应计算基组两阶振动模态的振动响应, 包括沿 x 向水平和绕 y 轴回转 (图 6.3.2-6), 计算基组顶面位移时, 基础顶面控制点的水平振动位移和竖向振动位移可按下列公式计算:

$$u_{xp} = \varphi_{y1}(r_{\varphi1} + h_1) + \varphi_{y2}(h_1 - r_{\varphi2}) \quad (6.3.2-19)$$

$$u_{zp} = (\varphi_{y1} + \varphi_{y2})l_x \quad (6.3.2-20)$$

$$\varphi_{y1} = \frac{M_{\varphi1}}{(J_y + mr_{\varphi1}^2)\omega_{\text{н}p1}^2} \cdot \eta_{\varphi1} \quad (6.3.2-21)$$

$$\varphi_{y2} = \frac{M_{\varphi2}}{(J_y + mr_{\varphi2}^2)\omega_{\text{н}p2}^2} \cdot \eta_{\varphi2} \quad (6.3.2-22)$$

$$\eta_{\varphi1} = \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_{\text{н}p1}^2}\right)^2 + 4\zeta_{x\varphi1}^2 \frac{\omega^2}{\omega_{\text{н}p1}^2}}} \quad (6.3.2-23)$$

$$\eta_{\varphi2} = \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_{\text{н}p2}^2}\right)^2 + 4\zeta_{x\varphi2}^2 \frac{\omega^2}{\omega_{\text{н}p2}^2}}} \quad (6.3.2-24)$$

$$\omega_{\text{н}p1}^2 = \frac{1}{2} \left[(\omega_{\text{н}x}^2 + \omega_{\text{н}p}^2) - \sqrt{(\omega_{\text{н}x}^2 - \omega_{\text{н}p}^2)^2 + \frac{4mh_z^2}{J_y} \omega_{\text{н}x}^4} \right] \quad (6.3.2-25)$$

$$\omega_{\text{н}p2}^2 = \frac{1}{2} \left[(\omega_{\text{н}x}^2 + \omega_{\text{н}p}^2) + \sqrt{(\omega_{\text{н}x}^2 - \omega_{\text{н}p}^2)^2 + \frac{4mh_z^2}{J_y} \omega_{\text{н}x}^4} \right] \quad (6.3.2-26)$$

$$\omega_{\text{н}x}^2 = \frac{K_x}{m} \quad (6.3.2-27)$$

$$\omega_{\text{np}}^2 = \frac{K_{\varphi y} + K_x h_2^2}{J_y} \quad (6.3.2-28)$$

$$K_{\varphi y} = C_{\varphi y} I_y \quad (6.3.2-29)$$

$$M_{\varphi 1} = F_x (h_1 + h_0 + r_{\varphi 1}) \quad (6.3.2-30)$$

$$M_{\varphi 2} = F_x (h_1 + h_0 - r_{\varphi 2}) \quad (6.3.2-31)$$

$$r_{\varphi 1} = \frac{\omega_{\text{nx}}^2 h_2^2}{\omega_{\text{nx}}^2 - \omega_{\text{np1}}^2} \quad (6.3.2-32)$$

$$r_{\varphi 2} = \frac{\omega_{\text{nx}}^2 h_2^2}{\omega_{\text{np2}}^2 - \omega_{\text{nx}}^2} \quad (6.3.2-33)$$

- 式中： $u_{\text{x}\varphi}$ ——基础顶面控制点的 x 向水平振动线位移 (m)；
 $u_{\text{z}\varphi}$ ——基础顶面控制点的竖向振动线位移 (m)；
 φ_{y1} ——基组 x - φ 向耦合振动的第一振型回转角位移 (rad)；
 φ_{y2} ——基组 x - φ 向耦合振动的第二振型回转角位移 (rad)；
 $r_{\varphi 1}$ ——基组 x - φ 向耦合振动的第一振型转动中心至基组重心的距离 (m)；
 $r_{\varphi 2}$ ——基组 x - φ 向耦合振动的第二振型转动中心至基组重心的距离 (m)；
 $M_{\varphi 1}$ ——绕 x - φ 向耦合振动的第一振型转动中心的总扰力矩 (kN·m)；
 $M_{\varphi 2}$ ——绕 x - φ 向耦合振动的第二振型转动中心的总扰力矩 (kN·m)；
 ω_{np1} ——基组 x - φ 向耦合振动的第一振型的固有圆频率 (rad/s)；
 ω_{np2} ——基组 x - φ 向耦合振动的第二振型的固有圆频率 (rad/s)；
 $\eta_{\varphi 1}$ ——对应第一振型圆频率的基组扭转振动的传递率；

$\eta_{\varphi 2}$ ——对应第二振型圆频率的基组扭转振动的传递率；

ω_{nx} ——基组 x 向水平固有圆频率 (rad/s)；

$\omega_{ny\varphi}$ ——基组绕 y 轴回转的固有圆频率 (rad/s)；

h_2 ——基组重心至基础底面的距离 (m)；

h_0 ——水平扰力 F_x 作用线至基础顶面的距离 (m)；

$K_{\varphi y}$ ——基组绕 y 轴的抗弯刚度 ($\text{kN} \cdot \text{m}$)；

J_y ——基组对通过重心的绕 y 轴的转动惯量 ($\text{t} \cdot \text{m}^2$)；

I_y ——基组对通过基础底面形心 y 轴的惯性矩 (m^4)；

h_1 ——基组重心至基础顶面的距离 (m)；

$\zeta_{x\varphi 1}$ ——基组 $x\varphi$ 向耦合振动第一振型阻尼比；

$\zeta_{x\varphi 2}$ ——基组 $x\varphi$ 向耦合振动第二振型阻尼比。

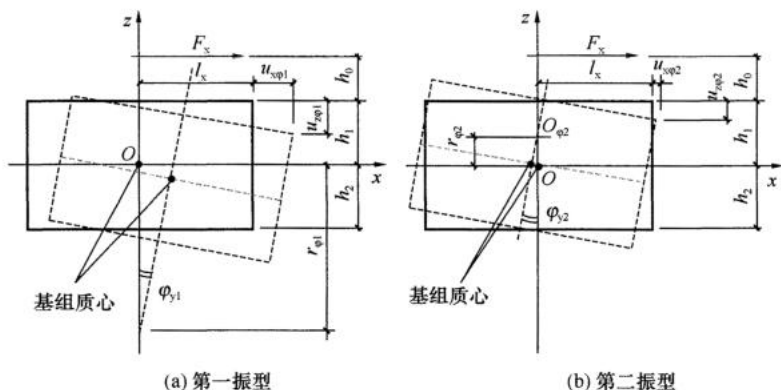


图 6.3.2-6 基组耦合振动示意图

- 6) 当基础在沿 y 轴的偏心水平扰力 (F_y) 作用时, 基组产生 y 向水平和绕 x 轴回转的耦合振动应具有两阶振动模态 (图 6.3.2-7), 基础顶面控制点的水平振动位移和竖向振动位移应按下列公式计算:

$$u_{y\theta} = \varphi_{x1}(r_{\varphi 1} + h_1) + \varphi_{x2}(h_1 - r_{\varphi 2}) \quad (6.3.2-34)$$

$$u_{z\theta} = (\varphi_{x1} + \varphi_{x2})l_y \quad (6.3.2-35)$$

$$\theta_{x1} = \frac{M_{\theta 1}}{(J_x + mr_{\theta 1}^2)\omega_{n\theta 1}^2} \cdot \eta_{\theta 1} \quad (6.3.2-36)$$

$$\theta_{x2} = \frac{M_{\theta 2}}{(J_x + mr_{\theta 2}^2)\omega_{n\theta 2}^2} \cdot \eta_{\theta 2} \quad (6.3.2-37)$$

$$\eta_{\theta 1} = \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_{n\theta 1}^2}\right)^2 + 4\zeta_{x\theta 1}^2 \frac{\omega^2}{\omega_{n\theta 1}^2}}} \quad (6.3.2-38)$$

$$\eta_{\theta 2} = \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_{n\theta 2}^2}\right)^2 + 4\zeta_{x\theta 2}^2 \frac{\omega^2}{\omega_{n\theta 2}^2}}} \quad (6.3.2-39)$$

$$\omega_{n\theta 1}^2 = \frac{1}{2} \left[(\omega_{ny}^2 + \omega_{n\theta}^2) - \sqrt{(\omega_{ny}^2 - \omega_{n\theta}^2)^2 + \frac{4mh_z^2}{J_x} \omega_{ny}^4} \right] \quad (6.3.2-40)$$

$$\omega_{n\theta 2}^2 = \frac{1}{2} \left[(\omega_{ny}^2 + \omega_{n\theta}^2) + \sqrt{(\omega_{ny}^2 - \omega_{n\theta}^2)^2 + \frac{4mh_z^2}{J_x} \omega_{ny}^4} \right] \quad (6.3.2-41)$$

$$\omega_{ny}^2 = \frac{K_y}{m} \quad (6.3.2-42)$$

$$\omega_{n\theta}^2 = \frac{K_{\theta x} + K_y h_z^2}{J_x} \quad (6.3.2-43)$$

$$K_{\theta x} = C_{\theta x} I_x \quad (6.3.2-44)$$

$$M_{\theta 1} = F_y (h_1 + h_0 + r_{\theta 1}) \quad (6.3.2-45)$$

$$M_{\theta 2} = F_y (h_1 + h_0 - r_{\theta 2}) \quad (6.3.2-46)$$

$$r_{\theta 1} = \frac{\omega_{ny}^2 h_z}{\omega_{ny}^2 - \omega_{n\theta 1}^2} \quad (6.3.2-47)$$

$$r_{\theta 2} = \frac{\omega_{ny}^2 h_z}{\omega_{n\theta 2}^2 - \omega_{ny}^2} \quad (6.3.2-48)$$

式中: $u_{y\theta}$ ——基础顶面控制点的 y 向水平振动线位移 (m);

- u_{z0} ——基础顶面控制点的竖向振动线位移 (m);
 θ_{x1} ——基组 $y\text{-}\varphi$ 向耦合振动的第一振型回转角位移 (rad);
 θ_{x2} ——基组 $y\text{-}\varphi$ 向耦合振动的第二振型回转角位移 (rad);
 $r_{\theta 1}$ ——基组 $y\text{-}\varphi$ 向耦合振动的第一振型转动中心至基组重心的距离 (m);
 $r_{\theta 2}$ ——基组 $y\text{-}\varphi$ 向耦合振动的第二振型转动中心至基组重心的距离 (m);
 $M_{\theta 1}$ ——绕 $y\text{-}\varphi$ 向耦合振动的第一振型转动中心的总扰力矩 ($\text{kN} \cdot \text{m}$);
 $M_{\theta 2}$ ——绕 $y\text{-}\varphi$ 向耦合振动的第二振型转动中心的总扰力矩 ($\text{kN} \cdot \text{m}$);
 $\omega_{n\theta 1}$ ——基组 $y\text{-}\varphi$ 向耦合振动的第一振型的固有圆频率 (rad/s);
 $\omega_{n\theta 2}$ ——基组 $y\text{-}\varphi$ 向耦合振动的第二振型的固有圆频率 (rad/s);
 $\eta_{\theta 1}$ ——对应第一振型圆频率的基组扭转振动的传递率;
 $\eta_{\theta 2}$ ——对应第二振型圆频率的基组扭转振动的传递率;
 ω_{ny} ——基组 y 向水平固有圆频率 (rad/s);
 $\omega_{n\theta}$ ——基组绕 x 轴回转的固有圆频率 (rad/s);
 h_2 ——基组重心至基础底面的距离 (m);
 h_0 ——水平扰力 F_x 作用线至基础顶面的距离 (m);
 $K_{\theta x}$ ——基组绕 x 轴的抗弯刚度 ($\text{kN} \cdot \text{m}$);
 J_x ——基组对通过重心的绕 y 轴的转动惯量 ($\text{t} \cdot \text{m}^2$);
 I_x ——基组对通过基础底面形心 y 轴的惯性矩 (m^4);
 h_1 ——基组重心至基础顶面的距离 (m);
 $\zeta_{x\theta 1}$ ——基组 $y\text{-}\varphi$ 向耦合振动第一振型阻尼比;
 $\zeta_{x\theta 2}$ ——基组 $y\text{-}\varphi$ 向耦合振动第二振型阻尼比。

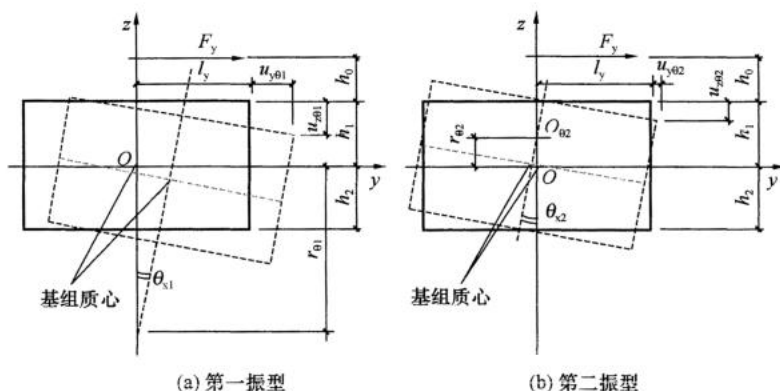


图 6.3.2-7 基组耦合振动示意图

6.3.3 采用数值分析方法计算振动试验台基础动力响应时，应符合下列规定：

- 1 基组振动体系应符合下列假定条件：
 - 1) 基础为各向同性和均质弹性；
 - 2) 地基土可按照弹簧和阻尼比边界分析；
 - 3) 计算基础控制点的振动响应时应根据作用在基础上的扰力建立分析工况。
- 2 基础的单元模型应符合下列规定：
 - 1) 基础的有限元模型宜采用实体单元，且网格单元边长不宜超过 1m；基础模型长、宽方向的网格划分数不应小于 8；基础模型高度方向网格划分数不应小于 4。
 - 2) 混凝土结构的质量密度、弹性模量、变形模量和强度等级等参数应按现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的有关规定选取。
 - 3) 钢结构的质量密度、弹性模量、剪变模量和强度等级等参数应按现行国家标准《钢结构设计标准》GB 50017 的有关规定选取。

4) 单元阻尼比参数宜符合表 6.3.3 的规定。

表 6.3.3 单元阻尼比参数

结构类型	阻尼比
混凝土结构	0.05
钢结构	0.02

5) 地基土的参振质量应按现行国家标准《动力机器基础设计标准》GB 50040 的有关规定确定。

6) 进行模态分析时, 计算振型数不应少于 15。

3 边界条件应符合下列规定:

1) 各方向的面弹簧刚度可按下列公式计算:

$$k_{Az} = C_z \quad (6.3.3-1)$$

$$k_{Ax} = 0.7C_z \quad (6.3.3-2)$$

$$k_{Ay} = 0.7C_z \quad (6.3.3-3)$$

式中: k_{Az} 、 k_{Ax} 、 k_{Ay} ——分别表示 z 轴、 x 轴和 y 轴方向的面刚度 (kN/m^3);

C_z ——地基土 z 轴向的抗压刚度系数 (kN/m^3)。

2) 各方向的面阻尼比应按下列公式计算:

$$\zeta_{Az} = \zeta_z \quad (6.3.3-4)$$

$$\zeta_{Ax} = 0.5\zeta_z \quad (6.3.3-5)$$

$$\zeta_{Ay} = 0.5\zeta_z \quad (6.3.3-6)$$

式中: ζ_{Az} 、 ζ_{Ax} 、 ζ_{Ay} ——分别表示 z 轴、 x 轴和 y 轴向的面阻尼比;

ζ_z ——天然地基竖向阻尼比。

3) 各方向的点弹簧应按下列公式计算:

$$k_{pz} = \sum_{i=1}^n C_{pri} A_{pri} + C_{pz} A_p \quad (6.3.3-7)$$

$$k_{px} = 0.98C_z \quad (6.3.3-8)$$

$$k_{py} = 0.98C_z \quad (6.3.3-9)$$

式中: k_{pz} 、 k_{px} 、 k_{py} ——分别表示 z 向、 x 向和 y 向的节点刚度 (kN/m);

C_{pri} ——桩周第 i 层土的当量抗剪刚度系数 (kN/m³);

A_{pri} ——第 i 层土的桩周表面积 (m²);

C_{pz} ——桩端土的当量抗压刚度系数 (kN/m³);

A_p ——桩的截面积 (m²)。

4) 各方向的点阻尼比应按下列公式计算:

$$\zeta_{px} = 0.5\zeta_{pz} \quad (6.3.3-10)$$

$$\zeta_{py} = 0.5\zeta_{pz} \quad (6.3.3-11)$$

式中: ζ_{pz} 、 ζ_{px} 、 ζ_{py} ——分别表示 z 轴、 x 轴和 y 轴向上的点阻尼比。

4 动力分析中选用的计算条件应符合下列规定:

- 1) 振动荷载的加载位置应设在设备连接节点处, 加载方向应与激振力作用方向一致;
- 2) 时域振动荷载可选用实测数据或人工模拟信号, 应包含调试阶段和正常使用阶段的试验波形, 每个阶段不得少于 3 个时程波;
- 3) 频域振动荷载应为具备全频域包络特性的频域信号。

5 振动控制点应符合下列规定:

- 1) 对于振动试验的控制精度, 振动控制点应设在激振装置与基础的连接部位;
- 2) 对于周边环境的振动控制, 振动控制点宜设在基础的角点、边上和中点处;
- 3) 对于结构安全和疲劳强度, 振动控制点应设在应力集中和应力幅循环最大的位置。

6 振动分析应符合下列规定:

- 1) 振动分析应包括模态分析、频域响应分析和时程响应分析;
- 2) 基础的固有频率和振型状态应通过模态分析得到;

- 3) 频域响应分析可按设备的频域荷载加载;
- 4) 时程响应分析可按振动试验的典型时程信号加载。

6.4 构造设计

6.4.1 振动试验台基础的设计应符合下列规定:

- 1 振动试验台基础宜采用整体现浇混凝土结构;
- 2 基础混凝土的强度等级不宜低于 C30, 受力钢筋应采用 HRB400, 二次灌注材料应采用强度高一个等级的微膨胀混凝土或专用灌浆料;
- 3 垫层厚度不宜小于 100mm, 垫层混凝土的强度等级不宜低于 C20;
- 4 混凝土保护层的厚度不宜小于 40mm, 且不应低于现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 和《建筑抗震设计规范》GB 50011 中混凝土保护层的最小厚度要求;
- 5 当振动试验台基础与周边结构设置防振缝脱开时, 防振缝宽度不应小于 50mm, 可用聚苯板、沥青麻丝等软性材料填充, 并应做好防水处理;
- 6 对于大型振动试验台基础, 当设计桩基时应采用实心桩, 且应满足抗拔桩最小配筋率和锚固长度的要求。

6.4.2 液压振动台基础的构造应符合下列规定:

- 1 基础尺寸应符合下列规定:
 - 1) 基础底面边长均不应小于基础厚度;
 - 2) 立柱式振动试验台基础底面长边与短边之比、短边与厚度之比均不宜大于 2.0;
 - 3) 多轴向振动试验台基础底面长边与短边之比、短边与厚度之比均不应小于 1.5;
 - 4) 基础厚度不宜小于 2.0m。
- 2 基础重量应符合下列规定:
 - 1) 只有竖向激振力作用的立柱式振动试验台基础, 基础

重量不应小于最大总激振力的 15 倍；

2) 多自由度振动试验台的基础，基础重量不应小于各方向最大总激振力的 20 倍；

3) 大型地震模拟振动试验台的基础，基础重量不应小于各方向最大总激振力的 25 倍。

3 基础配筋应符合下列规定：

1) 基础内应布置三向分布钢筋，直径不宜小于 14mm，间距不宜大于 500mm；

2) 基础侧面、顶面及底面应设置双向分布钢筋，直径不宜小于 14mm，间距不宜大于 150mm。

4 基础预留螺栓孔时，孔边与基础边的距离不宜小于 300mm。

5 地震模拟振动试验台和多轴向（MAST）振动试验台竖向激振合力中心应与基础质心重合，当无法重合时，偏心距与基础相应边长的比值不宜超过 5%。

6.4.3 电动振动台基础的构造应符合下列规定：

1 基础尺寸应符合下列规定：

1) 基础底面边长均不应小于基础厚度；

2) 竖向激振的振动台基础底面长边与短边之比、短边与厚度之比均不宜大于 2.0；

3) 水平向激振的振动台基础底面沿激振方向的边长和厚度之比均不应小于 1.5；

4) 基础厚度不宜小于 1.0m。

2 基础重量应符合下列规定：

1) 有隔振装置的电动台基础，基础重量不应小于激振力的 4 倍；

2) 无隔振装置的电动台基础，基础重量不应小于激振力的 6 倍。

3 基础配筋应符合下列规定：

1) 基础内应布置三向分布钢筋，直径不宜小于 12mm，

间距不宜大于 500mm；

2) 基础侧面、顶面及底面应设置双向分布钢筋，直径不宜小于 12mm，间距不宜大于 200mm。

4 基础预留螺栓孔时，孔边与基础边的距离不宜小于 200mm。

5 振动台竖向激振力作用线应与基础竖向质心重合，当无法重合时，偏心距与基础短边边长的比值不宜超过 5%。

6 振动台水平激振力作用线应与基础水平向质心重合，当无法重合时，偏心距与基础短边边长的比值不宜超过 5%。

6.4.4 机械振动台基础的构造应符合下列规定：

1 机械振动试验台基础宜选用块状基础；

2 设备质心处的竖向轴线应与基础质心处竖向轴线重合，当无法重合时，偏心距与基础短边边长的比值不宜超过 5%；

3 机械振动台基础重力不宜小于激振力的 5 倍。

7 施工、检测与验收

7.1 施 工

7.1.1 振动试验台基础的施工应符合现行国家标准《大体积混凝土施工标准》GB 50496 和《混凝土结构工程施工规范》GB 50666 的有关规定。

7.1.2 当振动试验台底座与基础连接的预埋件安装精度要求较高时，施工中应采取避免因浇筑造成移位的措施。

7.1.3 振动试验台底座与基础连接处的平整度应满足设备技术文件的要求，若无特殊要求，平整度可按 $\pm 2\text{mm}$ 执行。

7.1.4 基础与振动台底座连接处，应预留二次灌浆层。二次灌浆层应在设备安装就位、调试后浇筑，厚度不宜小于 50mm，且应与混凝土基础面结合。

7.1.5 二次灌浆应采用专用灌浆料或微膨胀混凝土，并应符合下列规定：

1 专用灌浆料的性能指标应符合现行国家标准《水泥基灌浆材料应用技术规范》GB/T 50448 中Ⅲ类水泥基灌浆材料的规定；

2 微膨胀混凝土的强度应比基础的混凝土强度高一个等级。

7.1.6 基础施工宜连续浇筑。夏季施工时，应采取防止混凝土温度过高的措施；冬期施工时应采取相应的保温措施。

7.1.7 基础施工完成后，周边基坑回填应符合下列规定：

1 应排除基坑内的积水，并清理松散填土和杂物；

2 回填材料应采用级配砂石，分层夯实回填；

3 压实系数不应小于 0.94。

7.2 检测与验收

7.2.1 振动试验台的基础检测应符合现行国家标准《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB 50204 的有关规定。

7.2.2 设备安装调试后 3 个月内，应进行动力响应测试。应检测振动台基础在满载、空载等多种工况下的动力响应，并应满足设备厂家提供的容许振动指标和现行国家标准《建筑工程容许振动标准》GB 50868 的要求。

7.2.3 振动试验台的基础验收应符合现行国家标准《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB 50204 的有关规定。

8 监测与运维

8.1 监 测

8.1.1 振动试验台基础的监测应包括下列内容：

- 1 基础沉降监测；
- 2 基础倾斜监测；
- 3 基础振动监测；
- 4 环境振动监测。

8.1.2 振动试验台基础的监测应符合国家现行标准《岩土工程勘察规范》GB 50021、《建筑地基基础设计规范》GB 50007、《建筑地基检测技术规范》JGJ 340、《建筑工程容许振动标准》GB 50868 和岩土工程勘察报告及设计文件的相关规定。

8.1.3 振动试验台在正常工作状态，宜进行基础振动监测。特殊情况可增加监测频度。

8.1.4 振动试验台基础振动监测应符合下列规定：

- 1 振动试验台在正常工作状态下，基础顶面的振动响应应符合现行国家标准《建筑工程容许振动标准》GB 50868 的有关规定；
- 2 振动测点可布置在基础顶面中点和角点；
- 3 振动监测方向应包括竖向和两个水平方向；
- 4 沉降变形监测应控制监测点。

8.1.5 振动环境监测对象应包括下列内容：

- 1 作为振源的设备基础；
- 2 振动试验室建筑结构的振动，包括厂房地基基础，建筑梁、柱结构；
- 3 厂区振动，包括附近办公室、会议室、精密仪器设备等；
- 4 厂界振动等。

8.2 运行和维护

8.2.1 运行和维护应确保振动试验台基础的正常使用。

8.2.2 振动试验台在试验过程中，当进行设备振动的监测时，宜同时监测基础振动。若基础振动有异常，应做出报警；超出限值时，应立即停机。

8.2.3 设备运行过程中，基础振动若有超限，应由使用方会同有关单位和部门制定治理方案，并按方案进行处理。

8.2.4 应由国家认可的第三方检测机构进行监测检查，做好沉降、倾斜、振动、裂缝等的观测记录。

8.2.5 国家认可的第三方检测机构应根据监测结果进行分析评估。

用 词 说 明

为便于在执行本规程条文时区别对待，对要求严格程度不同的用词说明如下：

- 1 表示很严格，非这样做不可的；
正面词采用“必须”，反面词采用“严禁”；
- 2 表示严格，在正常情况下均应这样做的；
正面词采用“应”，反面词采用“不应”或“不得”；
- 3 表示允许稍有选择，在条件许可时首先应这样做的；
正面词采用“宜”，反面词采用“不宜”；
- 4 表示有选择，在一定条件下可以这样做的，采用“可”。

引用标准名录

本规程引入下列标准。其中，注日期的，仅该日期对应的版本适用本规程，不注日期的，其最新版适用于本规程。

- 《建筑地基基础设计规范》GB 50007
- 《建筑结构荷载规范》GB 50009
- 《混凝土结构设计规范》GB 50010
- 《建筑抗震设计规范》GB 50011
- 《钢结构设计标准》GB 50017
- 《岩土工程勘察规范》GB 50021
- 《动力机器基础设计标准》GB 50040
- 《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB 50204
- 《地基动力特性测试规范》GB/T 50269
- 《水泥基灌浆材料应用技术规范》GB/T 50448
- 《大体积混凝土施工标准》GB 50496
- 《混凝土结构工程施工规范》GB 50666
- 《建筑工程容许振动标准》GB 50868
- 《建筑振动荷载标准》GB/T 51228
- 《建筑桩基技术规范》JGJ 94
- 《建筑地基检测技术规范》JGJ 340

中国工程建设标准化协会标准

振动试验台基础技术规程

T/CECS 1129 - 2022

条 文 说 明

制 定 说 明

本规程制定过程中，编制组针对振动试验台基础进行了广泛深入的调查研究，总结了我国工程建设中振动试验台基础的实践经验。同时参考了国外先进技术法规、技术标准，编制过程中也引入了一些成熟的技术成果，包括：（1）增加振动试验台基础的数值分析方法，有益于提升设计能力；（2）根据地基动力特征参数阻尼比测试中的不同测试数据，提出了双峰法和点峰法的适用条件，有利于提高测试精度；（3）首次提出了振动试验台基础对环境影响的控制要求，便于有效降低环境振动。

为便于广大技术和管理人员在使用本规程时能正确理解和执行条文规定，编制组按章、节、条顺序编制了本规程的条文说明，对条文规定的目的、依据以及执行中需注意的有关事项等进行了说明。本条文说明不具备与标准正文同等的法律效力，仅供使用者作为理解和把握标准规定的参考。

目 次

1	总则	(54)
2	术语和符号	(56)
2.1	术语	(56)
2.2	符号	(56)
3	基本规定	(57)
4	地基动力特征参数	(63)
4.1	一般规定	(63)
4.2	现场测试	(65)
4.3	参数修正	(67)
5	荷载与荷载效应组合	(69)
5.1	一般规定	(69)
5.2	静力荷载	(69)
5.3	振动荷载	(70)
5.4	荷载效应组合	(85)
6	基础设计	(88)
6.1	一般规定	(88)
6.2	静力设计	(90)
6.3	动力分析	(91)
6.4	构造设计	(97)
7	施工、检测与验收	(102)
7.1	施工	(102)
7.2	检测与验收	(103)

8 监测与运维 (104)

8.1 监测 (104)

8.2 运行和维护 (105)

1 总 则

1.0.1 振动试验台是一种用于环境振动模拟的试验装置，在工程试验和产品研发中应用广泛。振动试验台工作时会产生较大振动，若没有进行有效的振动控制，可能对周边工作环境和振动敏感设备的使用条件造成影响，甚至可能危害振动试验台基础和相邻房屋的结构安全。因此，振动试验台基础设计作为振动控制的关键环节尤为重要。制定本规程的目的是要确保振动试验台基础工程的安全可靠、经济合理、便于实施，并对周围环境的振动影响予以有效控制。

1.0.2 在工程建设和产品试验过程中，振动试验台的主要用途是模拟环境的振动，以检验设计方法和工程对象的可靠性和适用性；模拟产品在制造、组装运输及使用过程中所遭遇的各种振动环境，考核产品在环境振动中的耐受能力。适用于机械电子、建筑工程、医疗卫生、航空航天等领域的研究、开发、品管和制造。振动试验台的类型非常多，按照驱动形式主要分为三类：液压式、电动式和机械式（图 1）。本规程主要针对液压式、电动式和机械式三类振动试验台的基础工程作出规定。



图 1 振动试验台主要类型

本条明确了本规程的适用范围，适用于振动试验台基础工程建设的全过程，包括勘察、设计、施工、检测、验收、监测与运维。

1.0.3 本规程对振动试验台基础设计与建设作出了规定。在振动试验台基础建设过程中不仅要满足本规程的技术要求，同时还要满足国家现行有关标准、中国工程建设标准化协会有关标准和法律法规的有关规定。例如，动力计算应符合现行国家标准《动力机器基础设计标准》GB 50040、《建筑工程容许振动标准》GB 50868 和《建筑振动荷载标准》GB/T 51228 等的规定；地基基础的静力计算应符合国家现行标准《建筑地基基础设计规范》GB 50007、《混凝土结构设计规范》GB 50010 和《建筑桩基技术规范》JGJ 94 等的规定。

2 术语和符号

2.1 术 语

2.1.1~2.1.15 本节所列的术语均按照现行国家标准《工程振动术语和符号标准》GB/T 51306、《工程结构设计基本术语标准》GB/T 50083 和《动力机器基础设计标准》GB 50040 等的有关规定，并结合振动试验台基础设计中的专用名词编写。

2.2 符 号

2.2.1~2.2.3 本节中采用的符号是按照现行国家标准《工程振动术语和符号标准》GB/T 51306、《工程结构设计通用符号标准》GB/T 50132、《工程结构设计基本术语标准》GB/T 50083 和《动力机器基础设计标准》GB 50040 等的有关规定，并结合振动试验台基础设计中所用的物理量进行编写。

3 基本规定

3.0.1 振动试验台主要用于机械、电子、国防、航空、航天、建筑、通讯、汽车、家电等行业的产品振动性能测试与检验，也用于土木工程中结构动力性能的分析研究。本条根据振动试验台产品通用技术条件，规定了本规程中振动试验台技术参数的适用范围。

1 根据国家标准《液压振动台》GB/T 13316 - 2007 的有关规定，液压振动试验台参数应符合表 1 的规定。

表 1 液压振动试验台参数系列表

额定负载 (kg)	50、100、200、500、1000、1500、2000、2500、5000
额定正弦激振力 (kN)	2、5、10、50、80、100、200、300、500、800、1000
额定位移 (p-p) (mm)	10、20、25、50、60、100、160、200、300、400
额定速度 (m/s)	0.1、0.2、0.3、0.5、1.0、1.5、2.0
额定频率范围 (Hz)	0.1(1)~10、1(1)~20、0.1(1)~50、0.1(1)~100、0.1(1)~150、 0.1(1)~200、0.1(1)~350、0.1(1)~500、0.1(1)~1000

2 根据国家标准《电动振动台》GB/T 13310 - 2007 的有关规定，电动振动试验台参数应符合表 2 的规定。

表 2 电动振动台参数系列表

额定正弦激振力 (kN)	1、2、3、6、10、15、20、30、40、50、65、80、100、 120、160、200
-----------------	---

续表 2

额定位移 (p-p) (mm)	25、40、50、60、80、100
额定速度 (m/s)	1.0、1.5、2.0、2.5、3.0
额定加速度 (m/s ²)	250、500、600、800、1000、1200、1600
额定频率范围 (Hz)	2 或 5~1500、2 或 5~2000、2 或 5~2500、2 或 5~3000、 2 或 5~3500、2 或 5~4000、2 或 5~4500、2 或 5~5000

3 按照国家标准《机械振动台技术条件》GB/T 13309-2007 的有关规定,本规程适用于额定负载不大于 1000kg 的机械振动试验台。机械振动试验台的工作频率通常在 5Hz~80Hz 范围。

3.0.2 本条规定了振动试验台基础设计时需要收集的基本资料。

1 振动试验台的类型包括液压式、电动式和机械式,对于不同的设备厂家会有相应的产品规格。

2 振动试验台工作时是通过台面运动来模拟环境振动。振动台的技术参数取决于振动台作动器(激振器)的特性,其中包括可能输出的最大位移、最大速度、最大加速度、最大激振力和激振频率范围,以及被试对象大小和质量要求。

3 多轴向振动试验台的激振器数量和布置方式不尽相同。基础设计时需要考虑激振器布置对基础的振动影响,同时也关系到激振器与基础的连接节点设计。

4 振动试验台基础设计时也要考虑辅助设施,例如,振动试验台所需的液压油源和泵站、液压油管、电控装置、冷却塔和管线等配套设备。

5 被试对象的最大尺寸、最大质量和动力特性等也是基础设计时的必要资料。例如,地震模拟试验中建筑模型的高度、刚度、质量和倾覆力矩,减振产品的簧下质量和满载质量等。被试

对象的动力特性可能对基础有附加作用，因此需要考虑这些动力效应对基础的影响。

地震模拟振动试验台如图 2 所示，汽车轮耦合道路模拟试验如图 3 所示。

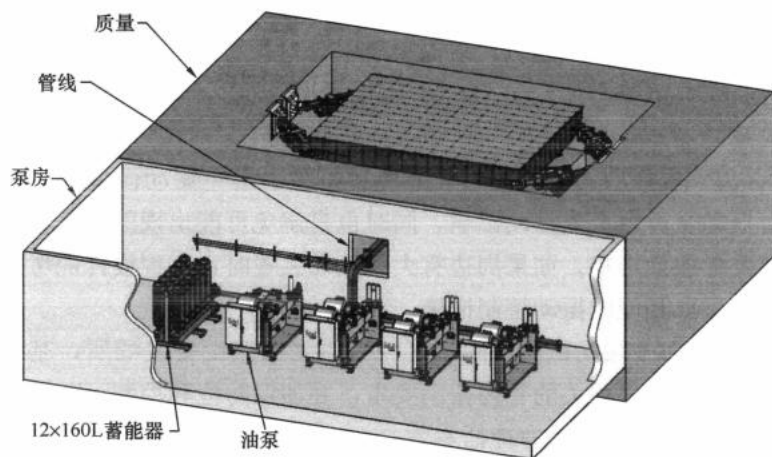


图 2 地震模拟振动试验台



图 3 汽车轮耦合道路模拟试验

6 本款为地基土地勘报告的要求。由于振动试验台振动作用较为复杂，在基础设计时，除了需要提供常规的地基工静力参数外，还需提供地基土或桩基的动力特性参数。

7 本款是对振动试验台基础相邻或相关工程建设资料的要求。振动试验台基础设计，需要满足工艺布置条件。资料包括相关区域总平面图、建筑、结构和公用等专业的施工图和工艺布置资料图，以确定振动试验台基础与邻近建筑基础的位置与埋深关系。

8 收集周边大型振动设备资料是为了避免振动设备工作时对振动试验台造成振动影响，同时也是避免可能出现的相互作用和叠加振动影响。如果周边有大型振动装置时，工程设计应考虑是否采取相应的振动控制措施。

9 对于振动试验台附近区域有振动敏感设备或场所，基础设计时应收集相关的容许振动要求，并加以防范和控制。

3.0.3 地基土的动力特征参数是振动试验台基础动力设计的必要条件。应根据国家标准《动力机器基础设计标准》GB 50040—2020 中对天然地基的地基土的分类确定相应的特征参数，该国家标准中第 3.3.5 条给出了地基土分类的规定（见表 3）。

表 3 地基土类别

土的名称	地基承载力特征值 f_{ak} (kPa)	地基土类别
碎石土	$f_{ak} > 500$	一类土
黏性土	$f_{ak} > 250$	
碎石土	$300 < f_{ak} \leq 500$	二类土
粉土、砂土	$250 < f_{ak} \leq 400$	
黏性土	$180 < f_{ak} \leq 250$	
碎石土	$180 < f_{ak} \leq 300$	三类土
粉土、砂土	$160 < f_{ak} \leq 250$	
黏性土	$130 < f_{ak} \leq 180$	

续表 3

土的名称	地基承载力特征值 f_{ak} (kPa)	地基土类别
粉土、砂土	$120 < f_{ak} \leq 160$	四类土
黏性土	$80 < f_{ak} \leq 130$	

需要注意的是大型振动试验台基础不应直接落在四类土上。当基础底面为四类土时,可以采用桩基。

3.0.4 基础的结构形式与振动试验台的设备类型、布置方式、荷载大小和地基土类别有关。在进行振动试验台基础工程设计和动力分析时,首先要确定基础的形式(即几何特征),再根据地基基础的刚度特性(即物理特征)选择合适的设计与分析方法。

3.0.5 本规程将振动试验台基础按几何特征分为四类。主要包括块状基础、坑式基础、桩基加块状基础和桩基加坑式基础等。

地震模拟振动试验的被试对象为建筑模型。通常建筑模型高度较高,受空间条件限制,许多大型地震模拟振动试验台的台面与地面平齐,激振设备位于地面以下。因此,地震模拟试验台基础多为坑式基础(图4)。当地基条件较弱时,基础下还需要布置桩基,这就成为桩基加坑式基础。

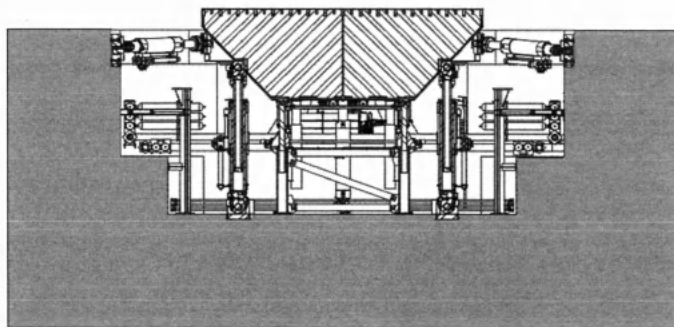


图4 坑式基础示意图

一些用于机械、电子产品的振动环境模拟试验的振动试验

台，为便于操作和试件安装，振动试验台往往位于地面以上，基础顶面与地坪面同标高。此类设备的基础形式多数为块状基础（图 5）。

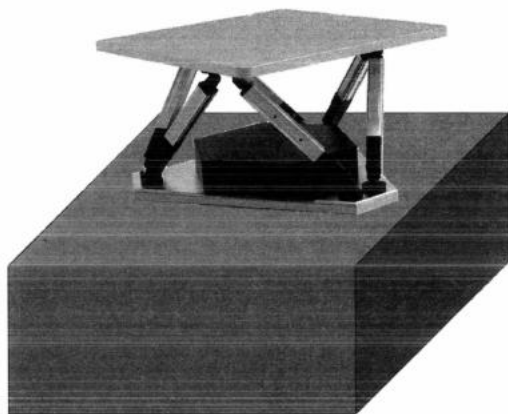


图 5 块状基础示意图

3.0.6 本规程提供两种振动试验台基础动力分析方法，应根据基础所满足的假定条件选用经验公式法或数值分析法。当采用经验公式法计算时，振动试验台基础的刚度特性应满足刚性基础的假定条件。对于柔性基础，需要采用数值分析法来分析基础的动力特性。关于振动试验台刚性基础和柔性基础的技术条件应按本规程第 6.1.3 条的规定执行。

4 地基动力特征参数

4.1 一般规定

4.1.1、4.1.2 地基动力特征参数是振动试验台基础设计的基本条件，属于工程地质勘探内容。常规的工程地质勘探提供的是地基静力设计参数，而振动试验台基础设计时需补充地基的动力特征参数。

地基动力特征参数和基组振动体系的动力参数，主要包括地基刚度、地基阻尼比、地基参振质量和基组体系的固有频率等。这些参数均用于振动试验台基础的动力分析，而基础的静力计算无需这些参数。

通常情况下，确定振动试验台基础的地基动力特征参数可采用两种方法，分别是现行国家标准《地基动力特性测试规范》GB/T 50269 中规定的现场测试法和现行国家标准《动力机器基础设计标准》GB 50040 中规定的计算方法。在有条件时，可采用现场测试法获得地基动力特征参数，特别是大型振动试验台基础设计时，应通过现场地基振动试验测试获得地基动力特征参数。现场测试应按现行国家标准《地基动力特性测试规范》GB/T 50269 的有关规定在建设场地内进行模型试验。如果无法进行现场地基动力特征参数测试时，可采用现行国家标准《动力机器基础设计标准》GB 50040 中规定的方法计算地基动力特征参数。

在工程设计的不同阶段，具备的设计资料也不同。在可行性研究和初步设计阶段，往往缺少详细的地勘资料，此时可根据地勘经验数据对振动试验台基础进行动力计算与分析。

国家标准《动力机器基础设计标准》GB 50040 - 2020 中第

3.4 节第 I 组规定了天然地基的抗压刚度系数（表 4）。这些参数是在大量天然地基振动试验基础上得到的，由此可计算得到地基的刚度和阻尼等计算参数。

表 4 天然地基的抗压刚度系数 C_z 值 (kN/m^3)

地基承载力特征值 f_{ak} (kPa)	土的名称		
	黏性土	粉土	砂土
300	66000	59000	52000
250	55000	49000	44000
200	45000	40000	36000
150	35000	31000	28000
100	25000	22000	18000
80	18000	16000	—

国家标准《动力机器基础设计标准》GB 50040 - 2020 中第 3.4 节第 II 组规定了桩基的抗压刚度系数（表 5 和表 6）。这些参数是在大量桩基振动试验基础上得到的，由此可计算桩基的刚度和阻尼等计算参数。

表 5 桩周土的当量抗剪刚度系数 C_{pr} 值 (kN/m^3)

土的名称	土的状态	当量抗剪刚度系数 C_{pr}
淤泥	饱和	6000~7000
淤泥质土	天然含水量 45%~50%	8000
黏性土	软塑	7000~10000
	可塑	10000~15000
	硬塑	15000~25000
粉土、粉砂、细砂	稍密~中密	10000~15000
中砂、粗砂、砾砂	稍密~中密	20000~25000
圆砾、卵石	稍密	15000~20000
	中密	20000~30000

表 6 桩端土的当量抗压刚度系数 C_{pz} 值 (kN/m^3)

土的名称	土的状态	桩尖埋置深度 (m)	当量抗压刚度系数 C_{pz}
黏性土	软塑、可塑	10~20	500000~800000
	软塑、可塑	20~30	800000~1300000
	硬塑	20~30	1300000~160000
粉土、粉砂、细砂	中密、密实	20~30	1000000~1300000
中砂、粗砂、 砾砂圆砾、卵石	中密	7~15	1000000~1300000
	密实		1300000~2000000
页岩	中等风化	—	1500000~2000000

4.2 现场测试

4.2.1、4.2.2 国家标准《地基动力特性测试规范》GB/T 50269-2015 对测试仪器、试验模型、测试方法等作出如下规定：在进行强迫振动测试时，若采用机械式激振器，要求其隔振频率为 $3\text{Hz} \sim 60\text{Hz}$ ；采用电磁式激振器，要求激振力不小于 2000N 。在进行自由振动测试时，重锤质量不宜小于基础质量的 $1/100$ ，下落高度宜为 $0.5\text{m} \sim 1.0\text{m}$ 。传感器的通频带应为 $2\text{Hz} \sim 80\text{Hz}$ 。块体基础的尺寸宜采用 $2.0\text{m} \times 1.5\text{m} \times 1.0\text{m}$ ，每组数量不宜少于 2 个。

桩基础建议采用 2 根桩，桩间距取设计桩基础的间距；承台的长宽比为 $2:1$ ，其高度不宜小于 1m ；承台沿长度方向的中心轴应与两桩中心连线重合，承台宽度宜与桩间距相同。

4.2.3、4.2.4 地基阻尼比是振动试验台基础设计中非常重要的一个参数。地基阻尼比的测试与分析具有一定的难度。经过近几十年的试验研究工作取得了一些成果，专家和学者先后提出了三种地基阻尼比的测试方法。

点峰法和自由振动衰减法在现行国家标准《地基动力特性测

试规范》GB/T 50269 有相关的规定。双峰法早在 20 世纪 70 年代,就由我国地基动力学专家叶鹤秀先生给出了理论证明。当时,由于试验技术和分析方法制约,双峰法一直未推广和应用。近年来有技术人员把双峰法用到实际工程当中,并做了积极尝试。在测试方法和测试模型方面,双峰法与点峰法具有相似之处,不同的是在数据分析和适用频率区间。

本规程对点峰法、双峰法和自由振动衰减法的适用性作了规定。对模型试验数据分析计算地基阻尼比时,上述分析方法的适用条件为:①对于稳态振动试验,若测试数据都在共振频率以下,应采用点峰法;②对于稳态振动试验,若测试的数据点处在共振频率区间,且可能包含峰值,可采用双峰法;③当采用重锤跌落法测试时,宜采用自由振动衰减法。

4.2.5~4.2.8 由 d_2-f 幅频响应曲线计算的地基竖向动力参数,其计算值与选取点有关,在曲线上选不同的点,计算所得的参数不同。为了统一,除选取共振峰点外,尚应在曲线上选取三点,计算平均阻尼比及相应的抗压刚度和参振总质量。这样计算的结果,差别不会太大。该计算方法,必须要把共振峰点测准; $0.85 f_m$ 以上的点不取,是因为这种计算方法对试验数据的精度要求较高,略有误差,都会使计算结果产生较大差异;另外,低频段的频率也不宜取得太低,频率太低时,振动线位移很小。受干扰波的影响,测量的误差较大,使计算的误差加大。在实测的共振曲线上,有时会出现小“鼓包”,不能取用“鼓包”上的数据,否则会使计算结果产生较大的误差,因此要根据不同的实测曲线,合理地采集数据。根据过去大量测试资料数据处理的经验,应按下列原则采集数据:

- (1) 对出现“鼓包”的共振曲线,“鼓包”上的数据不取;
- (2) $0.85 f_m \leq f \leq f_m$ 区段内的数据不取;

(3) 低频段的频率选择,不宜取得太低,应取波形好、测量误差小的频率段进行,一般在 $0.5 f_m \sim 0.85 f_m$ 间取值较为适宜。

由于在一些情况下不能测到共振峰,这时只能采用低频求刚度的方法计算。但是由于 f_1 、 f_2 值的选取十分重要,为了减少人为的误差,规定选取的点,要在尽量靠近测试的最大频率的 70%附近选取。这样能够近似地对应于测出共振峰情况下的 $0.5f_m \sim 0.85f_m$ 的情况。

4.2.9~4.2.11 由于水平回转耦合振动和扭转振动的共振频率一般都在 10Hz~20Hz 之间,低频段波形较好的频率大约为 8Hz,而 $0.85f_m$ 以上的点不能取,则共振曲线上剩下可选用的点就不多了。因此,水平回转耦合振动和扭转振动资料的分析方法与竖向振动不一样,不需要取 3 个以上的点,而只取共振峰峰点频率及相应的水平振动线位移和另一频率为 $0.707f_m$ 点的频率及相应的水平振动线位移代入公式(4.2.9)计算阻尼比,而且选择这一点计算的阻尼比与选择几点计算的平均阻尼比很接近。

4.3 参 数 修 正

4.3.1~4.3.5 由于地基动力参数值与基础底面积大小、基础高度、基底应力、基础埋深等有关,而模型基础的面积大小、基础高度、基底应力、基础埋深与设计的实际动力机器基础在这些方面不可能完全相同。因此,由试验模型基础实测得到的地基动力参数应用于振动试验台基础的振动和隔振设计时,必须进行相应的换算后才能提供给设计使用。

基础四周的填土能提高地基刚度系数,并随基础埋深比的增大而增加,因此,应将模型基础实测的地基刚度系数乘以基础埋深提高系数,即修正后的地基刚度系数,才能用于设计有埋置的振动试验台基础。桩基的抗剪、抗扭刚度系数换算方法可与模型块体基础的相同。

基础下地基的阻尼比随基底面积的增大而增加,并随基底静压力的增大而减小,因此,由模型基础试验得出的阻尼比用于设计振动试验台基础时,应将测试基础的质量比换算为设计基础的

质量比后才能用于振动试验台基础的设计。

基础四周的填土能提高地基的阻尼比，并随基础埋深比的增大而增加。因此，按设计基础的埋深比进行修正后的阻尼比，才能用于设计有埋置的振动试验台基础。

4.3.6 基础振动时地基土参振质量与基础底面积的大小有关，因此，由模型块体基础在明置时实测幅频响应曲线计算的地基参振质量，应换算为设计基础的底面积后才能应用于振动试验台基础设计。

4.3.7 由于桩基的刚度与试验时的桩数有关。根据 2 根桩桩基实测幅频响应曲线计算的 1 根桩的抗压刚度与 4 根桩桩基础测试资料计算的 1 根桩的抗压刚度相比，前者为后者的 1.3 倍；与 6 根桩桩基础测试资料计算的抗压刚度相比，为 1.36 倍。桩数再增加时，其变化逐渐减小，做测试桩基础的桩数规定为 2 根桩。根据工程需要，也可能做 2 根桩和 4 根桩的桩基础振动测试。因此，本条规定由 2 根或 4 根桩的桩基础测试资料计算的抗压刚度值，应分别乘以群桩效应系数 0.75 或 0.90 后，才能提供给设计群桩基础应用。

5 荷载与荷载效应组合

5.1 一般规定

5.1.1 振动试验台工作时会产生较大振动，基础设计应包括静力设计和动力设计两部分内容。因此，振动试验台既要计算静力荷载效应，也要分析动力荷载效应。

5.1.2 一般振动试验台试件高度不大，相对于振动试验的作用，地震作用对基础的影响较小，可以忽略。对于7度以上高烈度区的大型地震模拟试验台，试验对象可能是高大的建筑模型，此时地震作用的影响较大，不能忽略。可以按照现行国家标准《建筑抗震设计规范》GB 50011的有关规定计算地震作用组合。

5.2 静力荷载

5.2.2 振动试验台基础设计采用的永久荷载，应符合国家标准《建筑结构荷载规范》GB 50009-2012第4.0.1条的规定。验算振动试验台基础承载力和强度时应采用静力荷载。静力荷载包括永久荷载、可变荷载和等效静力荷载。通常情况下，静力荷载与时间无关，可忽略时间因素，不考虑结构的惯性作用。

5.2.3 振动试验台基础设计采用的可变荷载是指基础上部的活荷载，其中包括振动试验台及其辅助设备的重量、被试对象与其支承结构的重量，以及操作人员和一般工具等活荷载。

5.2.4 振动试验台在进行试验的过程中会产生较大振动，也就是振动试验台设备对基础具有较强的动力作用。因此，在静力设计时需要考虑振动荷载效应。采用等效静力方法来处理，具体做法是根据振动作用的包络效应，得到一个等效系数，将设备自重乘以等效系数得到等效静力荷载，也就是拟静力荷载，该等效系

数为动力系数。在工程上,类似的做法有很多,例如风荷载中的脉动风可等效为静力风压;交通荷载对路基的动力作用可采用等效静力荷载进行拟静力分析等。

5.3 振动荷载

5.3.1 在进行振动试验台基础动力分析时应采用动力荷载(或称振动荷载),动力荷载数值随时间有明显变化,必须考虑结构的惯性作用。振动试验台基础设计所需的振动荷载可按以下三种方式得到:

1 由振动试验台设备厂家直接提供作用于基础上的振动扰力参数。扰力参数包括扰力值、扰频区间、作用位置、方向和数量等,同时还需要提供设备的动力特性技术指标。

2 当设备厂家无法提供上述扰力资料时,可根据作动器或激振器的技术参数计算振动荷载,技术参数包括:最大振动位移、最大振动速度、最大振动加速度和最大激振力等。该方法得到的荷载为频域振动荷载。

3 设计前期缺少设备资料时,可按国家标准《建筑振动荷载标准》GB/T 51228-2017 中第 11 章振动台的有关规定取值。

不同振动试验台的扰力参数会有一定差异,因此,基础设计时应优先以设备厂家提供的扰力资料为准。

结构振动响应与振动荷载频率有关。扰力频率与结构的固有频率相同或接近时会产生较大振动,即共振现象。共振会直接影响结构的适用性和舒适性,严重的还会危及结构和人身安全。

5.3.2 振动试验台基础动力分析包括频域分析和时域分析两部分内容。频域分析时应采用频域荷载,时域分析时应采用时域荷载。频域荷载在工作频率范围具有包络特性,因此具有统计意义。时域荷载是针对具体工况的典型振动信号。

1 频域振动荷载

先假定一个多自由度系统的运动微分方程，可以表示为：

$$[M]\{\ddot{u}(t)\} + [C]\{\dot{u}(t)\} + [K]\{u(t)\} = \{f(t)\} \quad (1)$$

经过拉普拉斯变换得到

$$(s^2[M] + s[C] + [K])\{U(s)\} = \{F(s)\} \quad (2)$$

或

$$[Z(s)]\{U(s)\} = \{F(s)\} \quad (3)$$

式中 $Z(s) = s^2[M] + s[C] + [K]$ 为阻抗矩阵。其傅里叶变换形式为

$$[Z(\omega)] = -\omega^2[M] + j\omega[C] + [K] \quad (4)$$

这个阻抗矩阵的逆矩阵即为系统的导纳矩阵，也就是传递矩阵。

$$[H(\omega)] = (-\omega^2[M] + j\omega[C] + [K])^{-1} \quad (5)$$

于是式 (1) 可写为

$$\{U(\omega)\} = [H(\omega)]\{F(\omega)\} \quad (6)$$

这就是完整的频域解析结果。

频域分析可按式 (6) 计算，其中传递矩阵可根据振型叠加法计算得到。式中的 $F(\omega)$ 即为频域振动荷载，其频域分布形式如图 6 和图 7 所示。

2 时域振动荷载

时域分析则是式 (1) 采用弹塑性动力时程分析方法，包括线性加速度法、Newmark 法和 Wilson 法等，式中的 $f(t)$ 即为时域振动荷载。

时程分析过程如下：

根据微分方程式 (1) 解 $\{\dot{z}(t)\}$

$$\{\dot{z}(t)\} = [M]^{-1}(\{f(t)\} - [C]\{\dot{z}(t)\} - [K]\{z(t)\}) \quad (7)$$

先确定增量数列 $\{\Delta z\}$

$$[\bar{K}]\{\Delta z\} = \{\bar{\Delta f}\} \quad (8)$$

其中

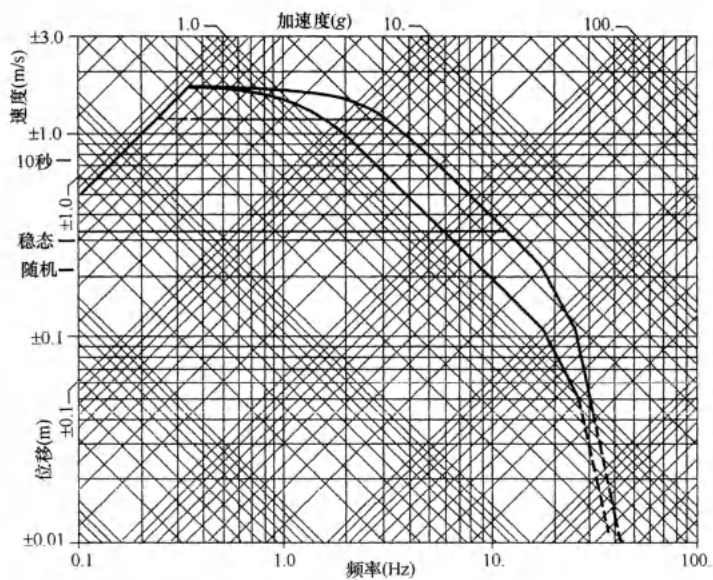


图 6 地震台水平激振特性

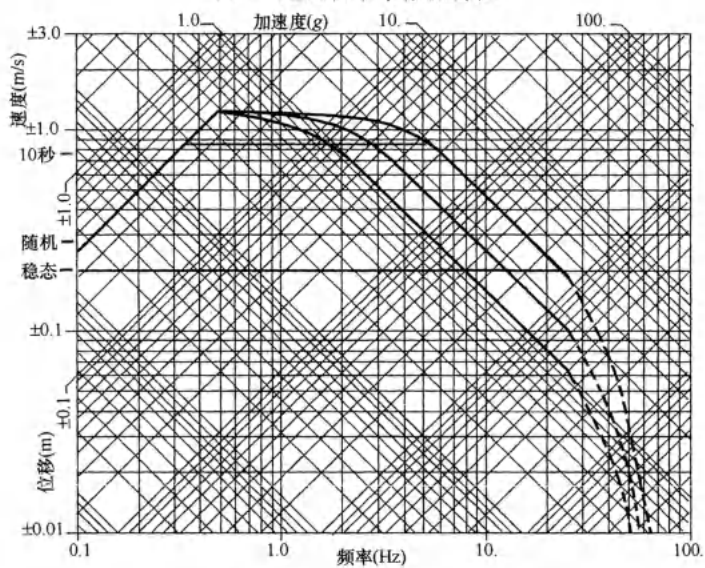


图 7 地震台竖向激振特性

$$[\bar{K}] = [K] + \frac{1}{\beta \cdot \Delta t^2} [M] + \frac{\gamma}{\beta \cdot \Delta t} [C] \quad (9)$$

$$\begin{aligned} [\Delta \bar{f}] = \{ \Delta f \} + \left(\frac{1}{\beta \cdot \Delta t} \{ \dot{z} \} + \frac{1}{2\beta} \{ \ddot{z} \} \right) [M] \\ + \left(\frac{\gamma}{\beta} \{ \dot{z} \} + \left(\frac{\gamma}{2\beta} - 1 \right) \Delta t \{ \ddot{z} \} \right) [C] \end{aligned} \quad (10)$$

根据 $\{ \Delta z \}$ 求出 $\{ z(t + \Delta t) \}$ 和 $\{ \dot{z}(t + \Delta t) \}$

$$\{ z(t + \Delta t) \} = \{ z(t) \} + \{ \Delta z \} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \{ \dot{z}(t + \Delta t) \} = \frac{\gamma}{\beta \cdot \Delta t} \{ \Delta z \} + \left(1 - \frac{\gamma}{\beta} \right) \{ \dot{z}(t) \} \\ - \left(\frac{\gamma}{2\beta} - 1 \right) \Delta t \{ \ddot{z}(t) \} \end{aligned} \quad (12)$$

时域振动荷载可以是时程地震波、路面激励时程信号或模拟环境振动时域信号等。图 8 为一组地震时程波曲线。

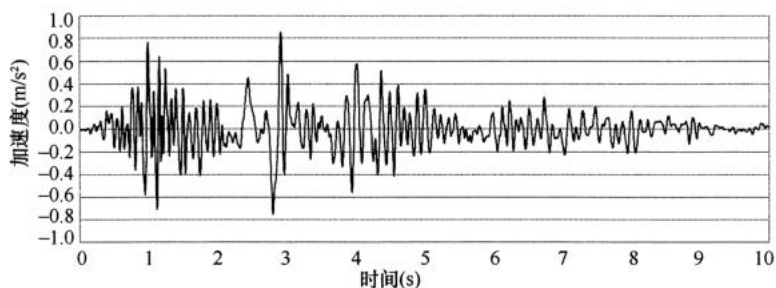


图 8 地震时程波曲线

5.3.3、5.3.4 振动试验台频域振动荷载与设备类型有关。

1 液压振动台和电动振动台的频域振动荷载分为位移控制段、速度控制段和加速度控制段，通常用诺模图表示。图 6 和图 7 即为地震模拟振动台激振特性诺模图。这是由振动试验台设备

厂家提供的频域振动扰力的动力特性技术指标。

缺少扰力资料时,可按振动试验台作动器的最大振动位移、最大振动速度、最大振动加速度和最大激振力等技术参数来确定频域振动荷载,其原理见图 9。

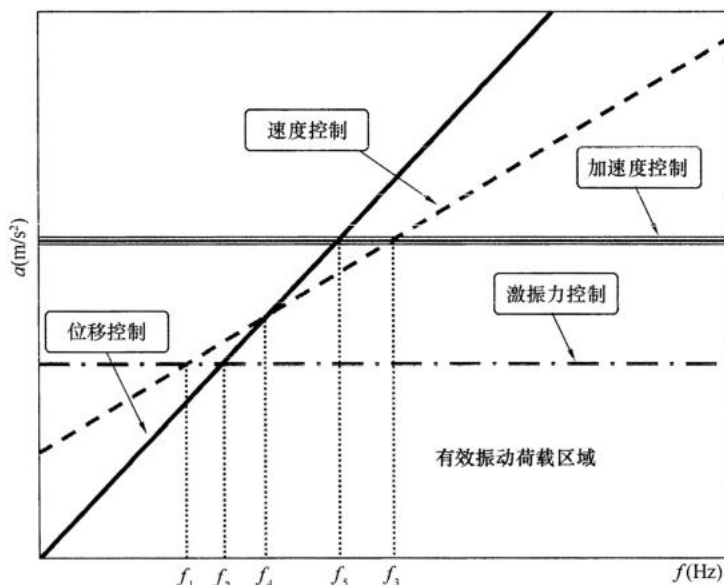


图 9 振动台激振力频域折线图

液压振动试验台振动荷载与其振动加速度特性曲线相对应,可按照试验台运动部件和被试对象的总惯性力作为振动荷载反作用于振动台基础,并应分别考虑空载和满载条件下的两种工况。

$$a = \min[a_1(f), a_2(f), a_3(f)] \quad (13)$$

$$a_1(f) = U_{\max} (2\pi f)^2 \quad (14)$$

$$a_2(f) = V_{\max} (2\pi f) \quad (15)$$

$$a_3(f) = A_{\max} \quad (16)$$

式中: a —— 振动试验台的振动加速度 (m/s^2);

$a_1(f)$ —— 位移控制段加速度函数 (m/s^2);

$a_2(f)$ —— 速度控制段加速度函数 (m/s^2);

$a_3(f)$ —— 加速度控制段的加速度函数 (m/s^2);

$U_{\max}$ —— 作动器最大位移, 是最大行程的二分之一 (m);

$V_{\max}$ —— 作动器最大加载速度 (m/s);

$A_{\max}$ —— 试件最大加速度 (m/s^2);

f —— 试件加载频率 (Hz)。

电动振动台振动荷载应按下列公式计算:

$$F_0(f) = m_0 a_0(f) \quad (17)$$

$$F_t(f) = m_t a_t(f) \quad (18)$$

$$m_t = m_e + m_0 \quad (19)$$

式中: $F_0(f)$ —— 单个作动器空载条件下不同频率的激振力 (kN);

$F_t(f)$ —— 单个作动器满载条件下不同频率的激振力 (kN);

$a_0(f)$ —— 空载条件下不同加载频率下的加速度 (m/s^2);

$a_t(f)$ —— 满载条件下不同加载频率下的加速度 (m/s^2);

m_0 —— 振动台运动部分质量 (t);

m_e —— 振动台额定负载质量 (t);

m_t —— 振动台运动部分总质量 (t)。

荷载计算应考虑被试对象的动力特性, 包括轮胎耦合道路模拟试验机, 可乘以 1.25 的放大系数; 被试对象高宽比大于 4 时, 应考虑试件运动时产生的倾覆力矩; 其他情况下, 应将被试对象的动力特性计入振动荷载; 闭式加载的振动试验台, 通常是液压式, 可按额定激振力的 5% 考虑。

2 电动试验台激振力的确定可按下列方法确定: 电动振动试验台工作时, 激振器驱动运动部件和被试对象产生振动, 由运

动部分质量的惯性力，反作用力为基础的振动荷载；振动荷载应按照激振器动力特性曲线计算，振动荷载应分别考虑空载和满载条件下两种工况。

振动荷载应按下式计算：

$$F_t(f) = m_t a_t(f) \quad (20)$$

式中： $F_t(f)$ —— 激振器最不利荷载作用下，不同频率的激振力 (kN)；

$a_t(f)$ —— 最不利荷载作用下，不同加载频率下的加速度 (m/s^2)；

m_t —— 振动台运动部分总质量 (t)。

电动振动台激振器的加速度特性曲线见图 10。图中有五条频谱曲线，由下至上分别为：下中断限 (C_{lb})，下报警限 (C_{ll})，平均限 (C_{av})，上报警限 (C_{ul})，上中断限 (C_{ub})。振动荷载应分别考虑空载和满载条件下两种工况。

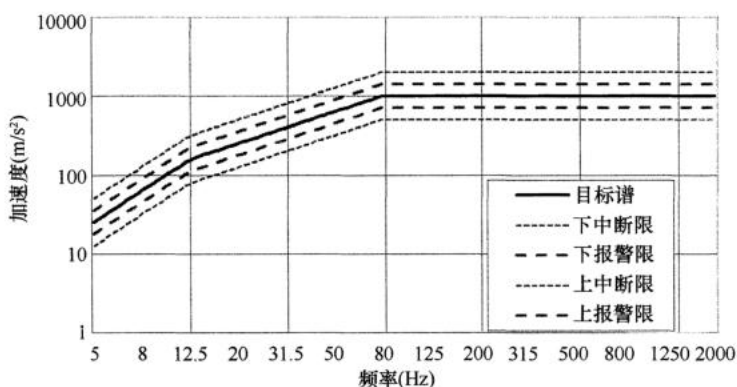


图 10 电动振动台动力特性曲线

5 条频谱曲线代表 5 个不同的界限值，其中平均限 (C_{av}) 为基准，其他界限可按下列公式计算：

$$C_{ll} = \frac{C_{av}}{\sqrt{2}} \quad (21)$$

$$C_{lb} = \frac{C_{av}}{2} \quad (22)$$

$$C_{ul} = \sqrt{2}C_{av} \quad (23)$$

$$C_{ub} = 2C_{av} \quad (24)$$

对于通用振动台设备，在额定加载试验条件下，振动台设置了超过激振作用 $\sqrt{2}$ 倍振动的报警限和2倍的停机限。安全起见，电动振动台的荷载效应可按照额定振动荷载的2倍作为振动荷载设计的条件。

在一些特殊试验条件下，冲击荷载作用可能会达到额定振动荷载的3倍或者更高。因此，对于非标振动台设备，应以设备厂家提供的振动荷载为准。

常用电动振动台都自带隔振装置，因此，在激振器和底座之间设置空气弹簧。激振力通过隔振装置将振动荷载传递到基础上。多数电动振动试验台有效工作频率为5Hz~1000Hz。其隔振频率通常在3Hz以下。因此，隔振装置可以有效减小振动台对基础的振动影响。振动台隔振系统简化模型见图11。

该模型的振动传递率可按下式计算：

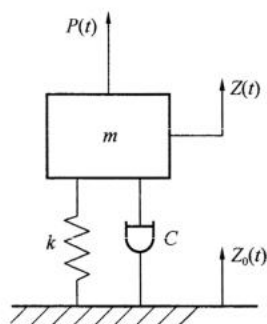


图 11 电动台隔振系统模型

$$|H_e(f)| = \frac{1}{\sqrt{[1 - (f/f_n)^2]^2 + (2\zeta_x f/f_n)^2}} \quad (25)$$

电动振动台通常带有空气弹簧隔振系统，振动台激振器的振动作用力隔振后传到基础上。基础设计的振动荷载应考虑隔振系统的频响特性，计算公式为：

$$F_e(f) = F_t(f)H_e(f) \quad (26)$$

式中： $F_e(f)$ ——隔振后传到基础上的振动荷载作用力（kN）；

$H_e(f)$ ——振动台设备自带隔振体系的频响特性。

3 机械振动试验台分为偏心式机械振动台和离心式机械振动台，其激振力的确定可按下列方法确定：

偏心式机械振动台是以轴偏心或者偏心杆转动来驱动振动台运动。工作原理如图 12 所示。

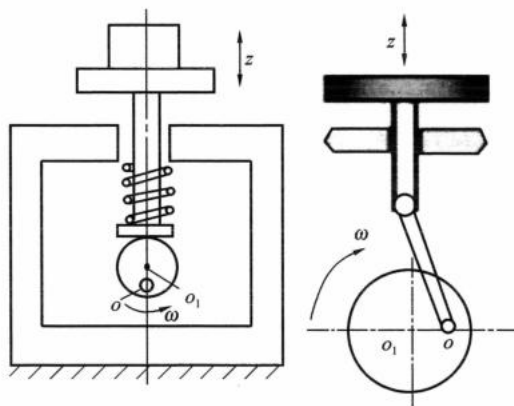


图 12 偏心式振动台（偏心距 $r=o_1o$ ）

离心式机械振动台的工作原理如图 13 所示。

机械振动台的激振力与频率的平方成正比，是一个二次曲线。图 14 给出了不同偏心参数条件下的激振特性曲线。

5.3.5 时域振动荷载应为真实试验条件下的时域振动信号，用

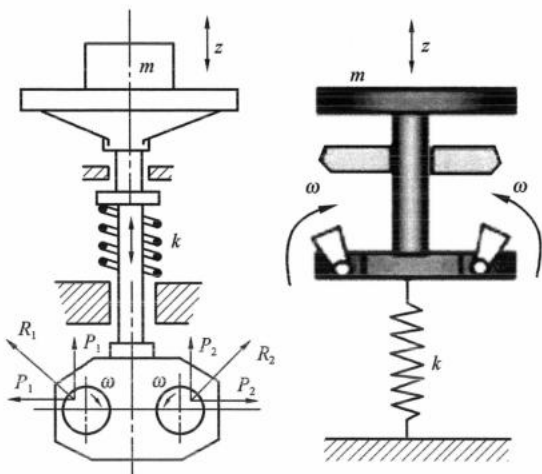


图 13 离心式振动台

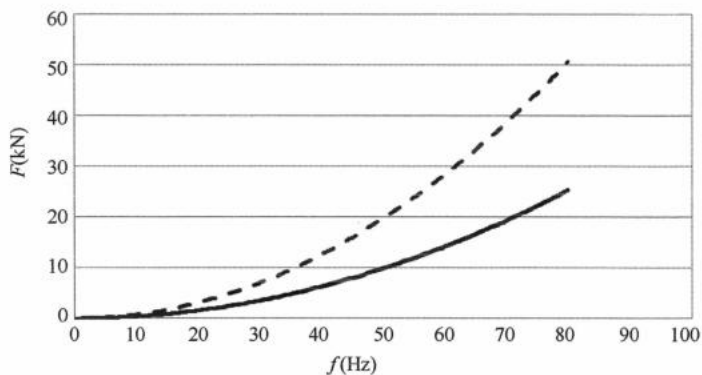


图 14 机械振动台激振特性曲线

于振动试验台基础设计的时程分析，也可作为典型试验工况验证分析的荷载条件。时域振动荷载包括下列内容：

(1) 特定频率和幅值条件下的正弦波激励，表现为简谐振动时程信号，其表达式为：

$$u(t) = u_0 \sin(\omega t) \quad (27)$$

式中： $u(t)$ —— 振动位移时程函数 (m)；

u_0 —— 振动位移幅值 (m)；

ω —— 振动圆频率 (rad/s)；

t —— 时间 (s)。

简谐振动时程信号如图 15 所示。正弦波试验是各类振动试验台都具备的试验条件。

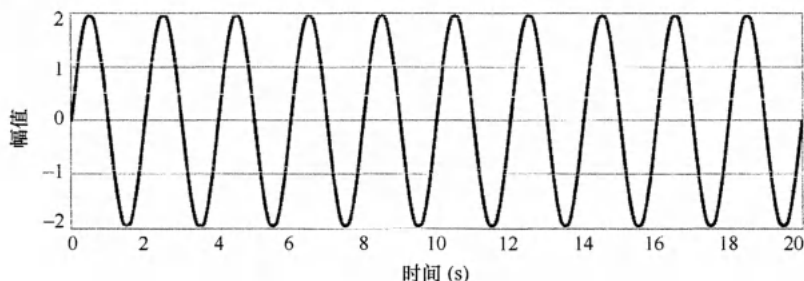


图 15 简谐振动

(2) 扫频实验是各类振动试验台需要开展的工作。振动试验台基础设计应根据其工作频率范围进行扫频振动分析。扫频振动分析可以计算出基础的最大振动峰值，还可以分析振动频率变化在共振点区域的通过特性，包括激发共振的最大峰值和通过共振区域的时间过程等。图 16 给出了一段扫频振动信号数据资料。

(3) 液压和电动振动试验台可以进行随机振动和冲击振动试验。随机振动和冲击振动包含的频率成分多、振动幅值较大，其危害程度较大，需要进行随机振动和冲击振动的时程分析。

随机振动包含宽带随机振动和窄带随机振动。图 17 为一个宽带随机振动信号，包括随机时程信号和频谱曲线。

冲击振动可以采用实测振动信号，也可以进行人工模拟。冲击振动信号可分为五种函数形式：1) 矩形波；2) 对称三角波；3) 后峰齿波；4) 半正弦波；5) 正矢波。冲击振动函数的表达

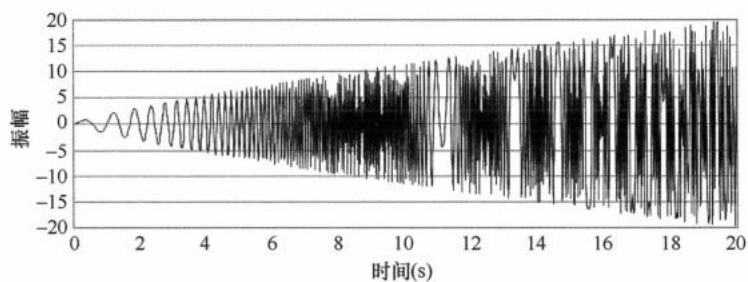
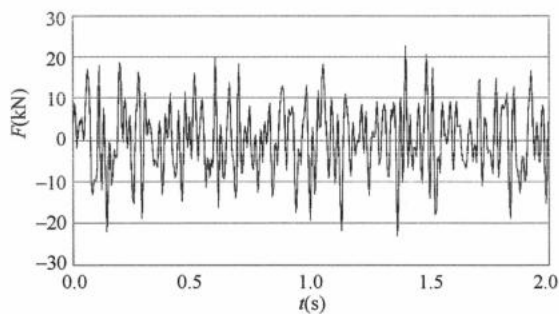
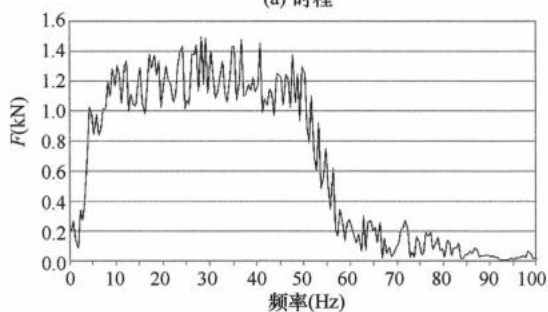


图 16 扫频振动



(a) 时程

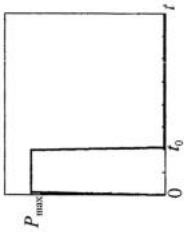
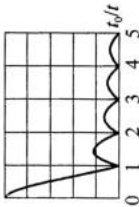
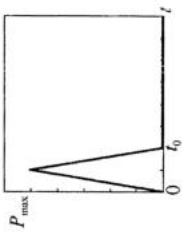
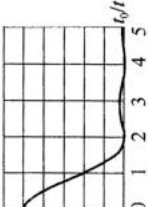


(b) 频谱

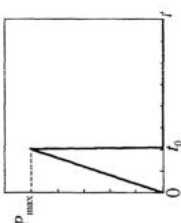
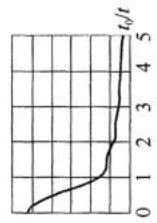
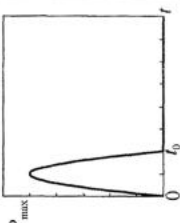
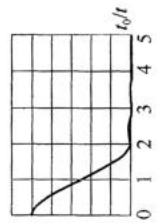
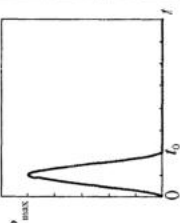
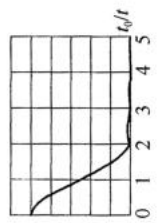
图 17 随机振动

式与波形应符合表 7 的规定。

表 7 冲击振动函数

名称	函数	时域特性	冲击响应谱
矩形波	$P(t) = \begin{cases} P_{\max} & (0 \leq t \leq t_0) \\ 0 & \text{(其他情况)} \end{cases}$		
对称三角波	$P(t) = \begin{cases} P_{\max} \frac{2t}{t_0} & (0 \leq t \leq \frac{t_0}{2}) \\ 2P_{\max} (1 - \frac{t}{t_0}) & (\frac{t_0}{2} \leq t \leq t_0) \\ 0 & \text{(其他情况)} \end{cases}$		

续表 7

名称	函数	时域特性	冲击响应谱
后峰齿波	$P(t) = \begin{cases} P_{\max} \frac{t}{t_0} & (0 \leq t \leq t_0) \\ 0 & \text{(其他情况)} \end{cases}$		
半正弦波	$P(t) = \begin{cases} P_{\max} \sin\left(\frac{\pi t}{t_0}\right) & (0 \leq t \leq t_0) \\ 0 & \text{(其他情况)} \end{cases}$		
正矢波	$P(t) = \begin{cases} \frac{P_{\max}}{2} \left(1 - \cos \frac{2\pi t}{t_0}\right) & (0 \leq t \leq t_0) \\ 0 & \text{(其他情况)} \end{cases}$		

5.3.6 振动试验时，除了振动试验台激振器产生的动力作用外，有些被试对象的几何尺寸或动力特性产生附加的振动效应作用于基础上，例如超高层建筑模型建筑、长细比较大的高耸建筑模型，亦即带有隔振装置的试件等。

对于高层或超高层建筑模型的地震模拟振动试验，建筑缩尺模型也具有高大的几何特征，如图 18 所示。在水平地震模拟振动作用下，建筑模型会有较大的倾覆力矩，因此，基础设计应当考虑试件倾覆力矩的附加作用。倾覆力矩应根据模型质心高度、模型质量和质心处振动加速度计算，按本规程式 (5.3.6) 计算。

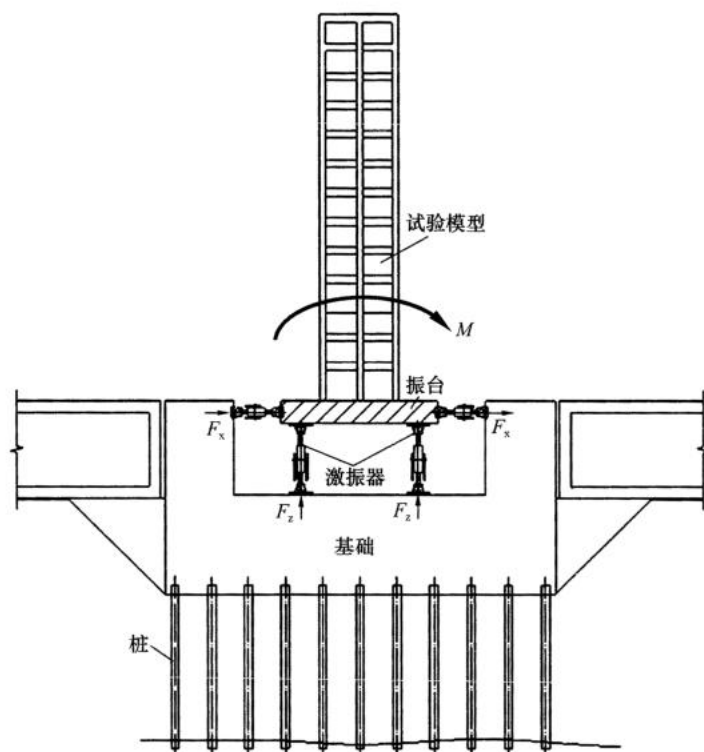


图 18 地震模拟试验

对于被试对象为带有减振隔振装置的试件，例如汽车轮胎耦合道路模拟试验、隔振减振座椅振动试验等，试件的悬架机构刚度较小，是弹性部件。在进行模拟振动试验时，被试对象是一个振动体系，见图 19，此类弹簧阻尼器悬架系统的动力效应会作用于试验设备以及支承设备的基础上。因此，基础设计时需要考虑被试对象动力效用的附加动力作用。通常，设备厂家建议轮胎耦合道路模拟试验机对基础动力作用的附加放大系数为 1.25。

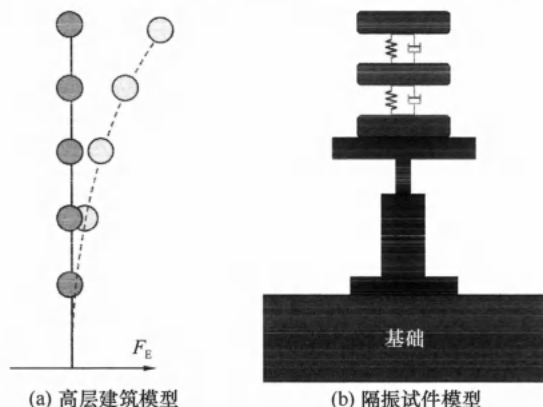


图 19 弹性试件动力模型示意

5.4 荷载效应组合

5.4.1 承载能力极限状态的静力荷载效应组合计算，应按国家标准《建筑结构荷载规范》GB 50009-2012 第 3.2.2 条的规定，按荷载基本组合或偶然组合计算荷载效应的设计值。荷载基本组合效应的设计值应按国家标准《建筑结构荷载规范》GB 50009-2012 第 3.2.3 条～第 3.2.6 条的规定计算。正常使用极限状态的静力荷载效应组合应按国家标准《建筑结构荷载规范》GB 50009-2012 第 3.2.7 条的规定计算，荷载效应组合设计值应按国家标准《建筑结构荷载规范》GB 50009-2012 第 3.2.8 条～

第 3.2.10 条的规定计算。

根据国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 - 2010 第 3.3.2 条关于结构重要性系数的取值规定：在持久设计状况和短暂设计状况下，对安全等级为一级的结构构件不应小于 1.1，对安全等级为二级的结构构件不应小于 1.0，对安全等级为三级的结构构件不应小于 0.9；对地震设计状况下应取 1.0。因此，本规程规定：对于安全等级为二级、三级的结构构件不应小于 1.0，对于安全等级为一级的结构构件和大型振动试验台不应小于 1.1。

5.4.2 振动控制指标可以是位移、速度、加速度、应力、应变和疲劳极限等。容许振动限制可采用现行国家标准《建筑工程容许振动标准》GB 50868 的有关规定。

建筑工程振动控制应符合下列公式的规定：

$$u \leq [u] \quad (28)$$

$$v \leq [v] \quad (29)$$

$$a \leq [a] \quad (30)$$

式中： u ——建筑工程计算或测试的振动位移；

v ——建筑工程计算或测试的振动速度；

a ——建筑工程计算或测试的振动加速度；

$[u]$ ——建筑工程的容许振动位移；

$[v]$ ——建筑工程的容许振动速度；

$[a]$ ——建筑工程的容许振动加速度。

振动荷载效应组合按本规程第 5.4.5 条的规定执行，并应符合国家标准《建筑振动荷载标准》GB/T 51228 - 2017 中第 3.2 节的有关规定。

5.4.3 本条规定了振动试验台基础对周边建筑、社会环境产生振动环境影响的要求，包括安全性和适用性等方面。

5.4.4 振动试验台振动荷载需要考虑激振器激振力的数量、作用位置、作用方向、作用力的幅值、频率和相位等因素。如果有

多个振动荷载作用，应考虑振动荷载叠加影响，也就是需要进行振动荷载的组合效应计算。对于时域分析结果，应在时域进行振动荷载组合计算；对于频域分析结果，应在频域进行振动荷载组合计算。对于复杂荷载的组合问题可采用概率统计方法计算。

5.4.5 振动荷载效应组合按国家标准《建筑振动荷载标准》GB/T 51228-2017 第 3.2 节的有关规定执行。

6 基础设计

6.1 一般规定

6.1.1 振动试验台激振力较大，会引起基础较大的振动。根据现行国家标准《建筑工程容许振动标准》GB 50868 的有关规定和一般设备厂家提出的基础容许振动限值，通常为：振动位移小于 0.1mm；振动速度小于 10mm/s；振动加速度小于 1.0m/s^2 。

对于短期承受振动的建筑结构基础，应满足现行国家标准《建筑工程容许振动标准》GB 50868 的有关规定，建筑基础容许振动速度应满足表 8 的限值要求。德国标准《结构容许振动标准》(Structure vibration. Part 3: Effects vibration on structures) DIN 4150-3 规定，建筑基础容许振动速度应满足表 9 规定的限值。与上述标准对比，振动试验台的容许振动标准是合理的(图 20)。

表 8 GB 50868 建筑基础容许振动速度 (mm/s)

建筑类型	图中代号	基础振动频率			
		1Hz	10Hz	50Hz	100Hz
工业建筑	CHN-Line1	6	6	12	15
居住建筑	CHN-Line2	3	3	6	8
振敏建筑	CHN-Line3	1.5	1.5	3	4

表 9 DIN 4150-3 建筑基础容许振动速度 (mm/s)

建筑类型	图中代号	基础振动频率			
		1Hz	10Hz	50Hz	100Hz
工业建筑	DIN-Line1	20	20	40	50
居住建筑	DIN-Line2	5	5	15	20
振敏建筑	DIN-Line3	3	3	8	10

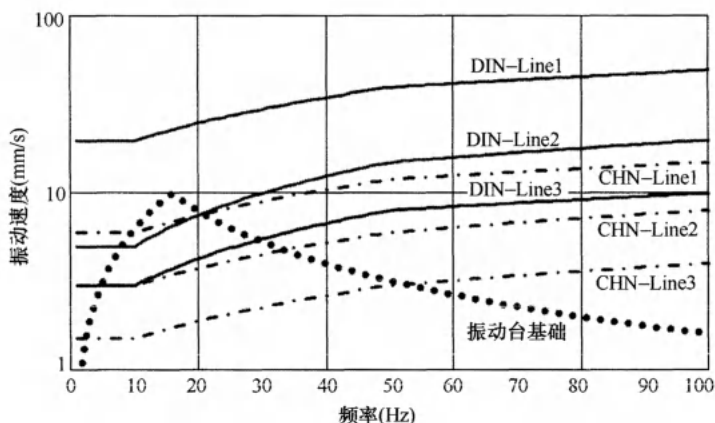


图 20 基础容许振动标准

大型液压振动试验台基础的一阶固有频率多数都在 10Hz 以下，一般不超过 20Hz。此类振动试验台和激振力对基础作用较大的频率区域通常也在 20Hz 以内。从图 20 中可以看出，振动影响最大的频率区间是 10Hz~30Hz。对照容许振动标准，可得到如下结论：振动试验台基础的振动会影响建筑的舒适性，对于振动敏感建筑可能会影响结构的安全性和适用性。因此，建议振动试验台基础应与相邻建筑的基础和结构脱开，设置防振缝。

6.1.2 多数大型地震模拟振动试验台和多轴向振动试验台在试验过程中，往往激振器的作用位置比较高，加上被试对象的质心也比较高，容易产生较大的倾覆力矩。为确保结构安全，避免基础不均匀沉降或倾斜，设计中基础地面应力分布应满足不出现拉应力的情况，对于单向振动试验台基础可适当放宽。

6.1.3 本规程给出的经验公式法是以假设基础为刚体，与地基构成质弹阻模型，运用弹性理论方法计算基础振动响应。该方法是现行国家标准《动力机器基础设计标准》GB 50040 中规定的

计算内容,适用于长厚比不超过 3 的块状基础。

近年来随着计算机技术的飞速发展,数值方法被广泛应用于动力机器基础的振动分析。对于柔性基础,若采用经验公式计算会有较大偏差。本规程根据大量工程经验和试验研究,拟定了振动试验台基础的振动计算方法。

6.2 静 力 设 计

6.2.1 振动试验台基础同时承受静力荷载和较大的振动荷载作用。在激振器或作动器与基础连接部位会有较大振动作用。基础设计首先要满足静力设计中的承载力要求。此时,可以将振动荷载乘以动力系数,将其等效为拟静力荷载,并按照静力荷载效应验算基础的承载力。振动试验台基础的承载力极限状态设计包含正截面、斜截面力、抗冲切和局部承压等承载力验算;正常使用极限状态设计包含裂缝控制验算和受弯构件变形验算等。

6.2.2 地基承载力计算在国家标准《动力机器基础设计标准》GB 50040-2020 中第 3.3.1 条有明确的规定。地基承载力动力折减系数的取值是根据国家标准《动力机器基础设计标准》GB 50040-2020 中第 3.3.3 条的规定选取:

- 1) 旋转式机器基础,可取 0.8;
- 2) 锻锤基础,宜按下式计算:

$$a_v = \frac{1}{1 + \beta_v \frac{a}{g}} \quad (31)$$

- 3) 其他机器基础,可取 1.0。

振动试验台可以模拟稳态、随机和冲击振动等,激振条件比较复杂。液压振动试验台基础容许振动加速度为 0.1g。对照地基承载力的动力折减系数比较,结果见表 10。

表 10 振动试验台基础的动力折减系数

地基土类别	β_v	振动台 α_v
一类土	1.0	0.91
二类土	1.3	0.88
三类土	2.0	0.83
四类土	3.0	0.77

由于液压振动试验台基础地基不能直接落在四类土，液压振动试验台基础的动力折减系数取 0.8 可以包络适用情况。通常电动振动试验台自带隔振装置，对地基的影响较小，可以适当放宽，取 0.85。

本条第 3 款的规定是振动试验台地基基础进行静力设计时的荷载计算要求。振动试验台属于动力设备，按照现行国家标准《建筑结构荷载规范》GB 50009 的有关规定，在有充分依据时，可将重物或设备的自重乘以动力系数，按静力计算方法设计。振动试验台基础容许振动加速度为 $0.1g$ 。如果基组总质量为 m ，则基底重力可通过下式计算得到：

$$N = m(a + g) \approx 1.1mg \quad (32)$$

6.3 动力分析

6.3.1 本规程为振动试验台基础动力设计提供了两种方法：一种是基于现行国家标准《动力机器基础设计标准》GB 50040 中规定的质量-阻尼-弹簧模型计算方法。该方法中基础假定为刚性块体，根据动力学原理建立计算公式，该方法也称为经验公式法。另一种方法是数值分析方法。该方法将基础视为弹性实体，运用有限元分析基础的振动响应。当振动试验台基础不满足刚性条件时，应采用数值计算方法。近年来，数值计算方法在振动试验台基础设计应用中得到推广。编制组总结了近年来的一些工程

经验，在本规程中形成了一些必要的规定。

6.3.2 本条针对经验公式法的适用条件和计算方法作了有关规定。

1 振动试验台基础设计属于动力机器基础设计中一种较为特殊的部分。基础可按照参数等效方法建立质量-阻尼-弹簧模型，经过大量试验来确定模型参数。在模型中进行了下列假定：（1）振动作用下，基础底面的地基土呈线性刚度；（2）地基土仅考虑刚性作用；（3）基础为只有惯性质量而无弹性的刚体（或质点）；（4）地基土具有粘滞阻尼作用。

作用于基础上的激振力按照刚体的六阶振型划分为相应的六种扰力工况，分别计算基础控制点的单工况振动响应。针对六种扰力工况可分别进行单扰力作用效应计算。两种或两种以上类型的扰力同时作用在基础上时，可先按本条提供的单扰力作用工况分别计算单扰力的振动响应，再按照本规程第 5.4 节规定的振动效应组合方法计算不同扰力工况的振动效应。

2 扰力和扰力作用工况可分为以下 6 类：

- 1) 基组在通过质心的竖向扰力作用下，产生竖向振动（图 21）；
- 2) 基组在绕 z 轴的扭转扰力矩作用下，产生扭转振动（图 22）；
- 3) 基组在绕 y 轴回转的扰力矩作用下，产生绕 y 轴的回转振动（图 23）；
- 4) 基组在绕 x 轴回转的扰力矩作用下，产生绕 x 轴的回转振动（图 24）；
- 5) 基组在沿 x 轴向水平扰力作用下，产生 x 向水平、绕 y 轴回转的耦合振动（图 25）；
- 6) 基组在沿 y 轴向水平扰力作用下，产生 y 向水平、绕 x 轴回转的耦合振动（图 26）。

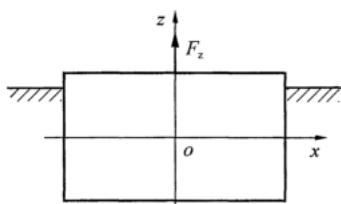


图 21 z 向扰力作用

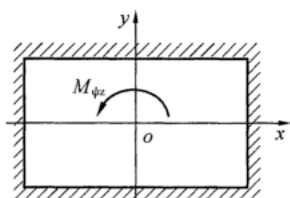


图 22 水平扰力矩作用

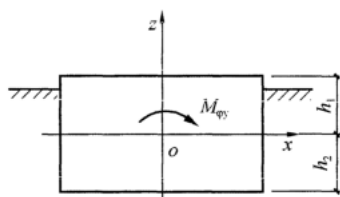


图 23 绕 y 轴扰力矩作用

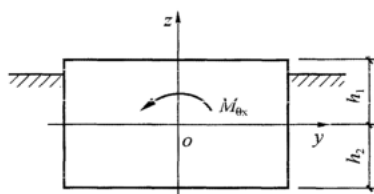


图 24 绕 x 轴扰力矩作用

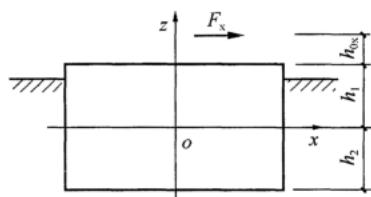


图 25 x 向扰力作用

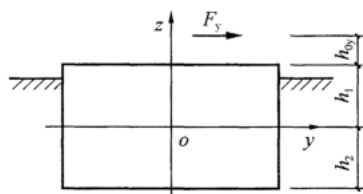


图 26 y 向扰力作用

如果振动扰力沿 z 轴作用于基础质心处，基础呈现出沿 z 轴的竖向振动，此时可以将图 21 简化为图 27 的单质点振动模型，其运动微分方程为：

$$m\ddot{z} + c\dot{z}' + kz = F_z \quad (33)$$

不难得到其频域解为

$$u_z = \frac{F_z}{k_z \sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_{nz}^2}\right)^2 + 4\zeta_z^2 \frac{\omega^2}{\omega_{nz}^2}}} \quad (34)$$

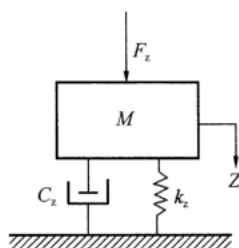


图 27 单质点模型

式中： u_z ——基础质心的 z 轴向振动位移。

振动试验台种类很多，激振器规格和布置也非常复杂。例如液压试验台是由液压作动器提供激振力，其作动器的布置如图 28 所示。

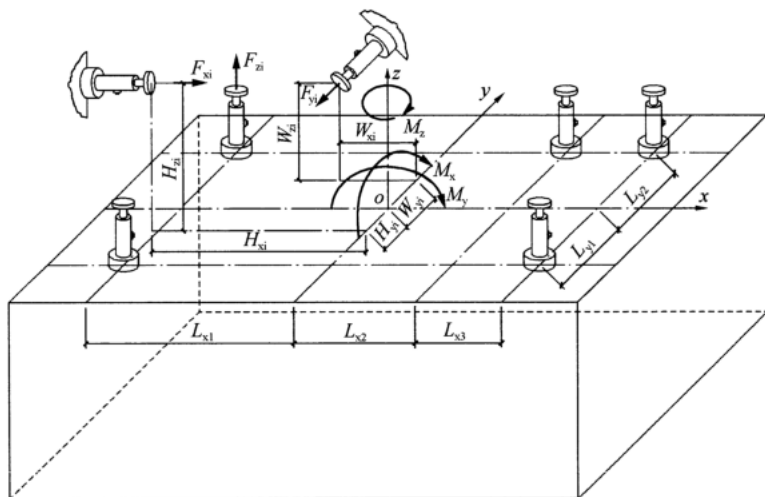


图 28 液压振动试验台基础示意

相对而言，电动振动试验台的结构形式简单一些，主要包括下列三种典型结构形式，如图 29 所示：

1) 竖向振动台：基础设计仅需要考虑竖向激振的作用。基

础的质量中心和底面积几何中心应与激振作用力在同一竖向轴线上。

2) 水平振动台: 基础作用既有水平作用力, 也有在 $y-z$ 平面内的水平振动力和振动力矩作用。因此, 基础设计需要考虑水平力和力矩共同作用的效应。

3) 既可以进行沿 z 轴竖向激振, 也可以沿 y 轴水平向激振。竖向激振为偏心作用, 试验时伴随力矩作用。对于这种情况既要考虑竖向偏心振动, 也要考虑水平激振作用, 同时还需要考虑在 $y-z$ 平面内水平力和扰力矩作用。

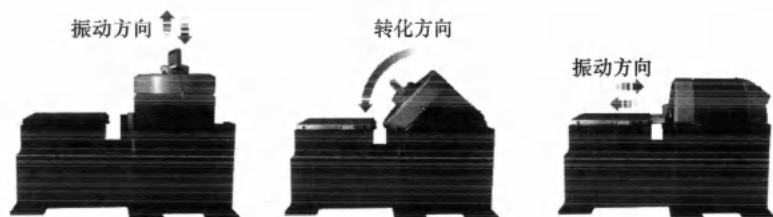


图 29 电动振动台加载示意

按照刚体振动的振型与振动荷载作用方式可将其分解成 6 种振动状态: ①沿 z 轴的竖向振动; ②绕 z 轴的扭转振动; ③绕 x 轴的回转振动; ④绕 y 轴的回转振动; ⑤在 $y-z$ 平面内的水平+回转振动; ⑥在 $x-z$ 平面内的水平+回转振动。

6.3.3 当基础尺寸较大时, 基础不再满足刚体的假定条件。通常可采用有限元方法来计算基础控制点振动响应, 即数值分析方法。有限元分析的计算结果也可作为经验公式方法的补充和验证。

1 本款对数值分析方法的建模假定条件作了规定, 假定条件包括: 振动响应为小变形; 基础为各向同性和均质弹性; 地基土在小变形条件下为线性, 可简化为弹簧和阻尼边界。

2 本款对基础的单元模型作了规定。计算单元的网格划分

会直接影响计算精度。对于振型分析，单元数不应少于振型数。建议单元数大于振型数的 3 倍。

3 本款对计算模型的边界条件作了规定。根据结构设计条件和计算软件功能确定采用点边界单元还是面边界单元。对于桩基础使用点边界单元，天然地基可采用面边界单元；当有限元软件无面弹簧时，可以采用等效方法转化为点弹簧和点阻尼。振动试验台基础边界应设为弹簧和阻尼边界。弹簧边界单元包括面弹簧和点弹簧、面阻尼和点阻尼等。天然地基可采用面弹簧和面阻尼，桩基宜采用点弹簧和点阻尼。

4 本款对分析方法作了规定。振动试验台的频域振动荷载可根据设备的关键技术参数确定。由额定作用力、作动器最大行程、最大速度和最大加速度这四个关键技术参数得到三折线激振力包络值，作为频域分析的振动荷载。对于典型工况的试验，还需要根据实验条件进行时程分析。时程激振信号可以通过振动实测记录信号或人工模拟生成，由此作为时程振动荷载。

5 本款对振动控制点作出了规定。基础振动控制点是用来评估基础振动的安全性、适用性、耐久性和舒适性的关键部位。技术条件不同，控制点的位置也会有所差别。

6 本款对振动分析的内容作出了规定。

为减小振动影响，对于刚性地基（也称为固定地基）设计方案，要求适当提高地基刚度，将一阶固有频率设计的高一些。一阶固有频率尽量大于 10Hz，并且前三阶模态宜接近刚体运动的形态。

频域振动响应分析的加载方式是按照三折线谱的激振作用，计算基础的频域振动响应。三折线谱是由设备基本参数确定，其中基本参数包括设备最大振动位移，最大振动速度、最大振动加速度和额定激振力。三折线谱加载方法是一种极端情况下，具有振动荷载包络特性。一般情况下，频域分析即可满足设计要求。频域分析在宏观上具有统计意义，是满足基础设计安全性的条

件。而振动试验工况是一种常态化的工作，不但要满足结构的疲劳强度要求，还需要满足基础振动适用性和环境振动舒适性的条件。

根据实际振动试验工况，利用实测或模拟信号加载进行时域分析，可作为设计补充验算结果。时域分析可采用加速度积分法。

采用数值分析方法应根据有限元法的分析步骤和计算内容，振动试验台基础振动分析的工作流程可参照图 30 所示的流程图进行。

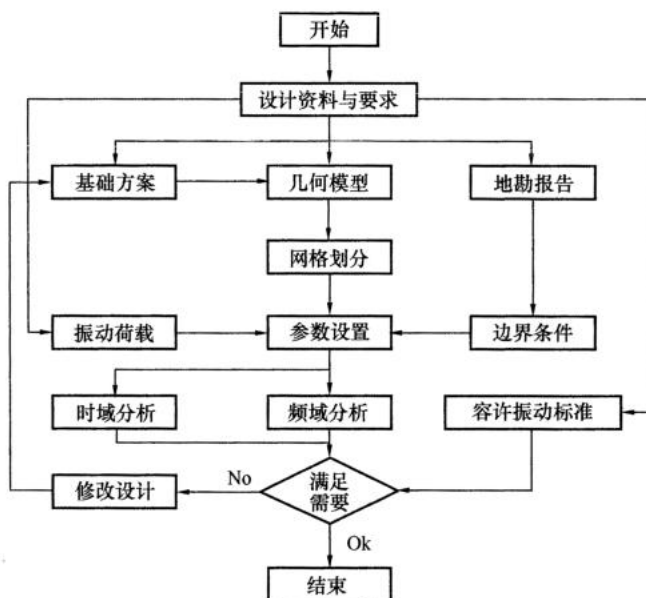


图 30 数值分析流程图

6.4 构造设计

6.4.1 振动试验台种类很多，包括液压振动试验台、电动振动

试验台、机械振动试验台和其他振动试验设备等。本节主要针对振动试验台基础的构造设计给出了通用技术条件。

1 振动试验台基础多以现浇整体基础为主，基础质量作为配重块，用以控制振动中的惯性力。坑式基础和其他异形基础也可参照执行。

2 根据现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的有关规定，钢筋混凝土结构的混凝土强度等级不应低于 C20；振动试验台基础有动力荷载作用，基础混凝土强度等级应适当提高，要求不宜低于 C30，同时，也要求受力钢筋应采用 HRB400。为确保二次灌浆的表面结合质量，本款规定二次灌浆料的强度应高一个等级。

3 本款规定与现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 的有关规定保持一致。

4 通常情况下，振动台基础混凝土保护层厚度不应小于 40mm。同时，还需要符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010 和《建筑抗震设计规范》GB 50011 关于混凝土保护层的最小厚度要求。

5 混凝土结构刚度较大，振动可以沿结构构件传播到较远的地方。为减小振动的传播影响，需要将振动试验台基础与周边结构设防振缝脱开。振动台基础周边结构设置的防振缝缝宽不应小于 50mm，可用软质材料填充，如采用聚苯板、沥青麻丝等。为避免设缝处漏水、渗水，需要做好防水处理。

6 大型振动试验台振动和冲击荷载较大。为确保结构的安全性，当进行桩基基础设计时，应采用实心桩。在有充分依据条件下，可采用空心桩。振动具有上下双向荷载作用，会引起桩的振动响应。因此，在进行桩基设计时，需要考虑桩体振动的影响，按照抗拔桩的构造要求设计。

6.4.2 本条对液压振动台基础的尺寸、重量和配筋三方面的构造作了规定。

1 液压振动试验台激振力大，工作频率较宽，低频特性好。
液压振动试验台主要采用整体块式基础。为确保基础具有较好的承载力和减振能力，一般基础厚度建议不小于 2.0m。当振动试验台具有偏心作用，会产生较大振动力矩时，要求基础底面边长适当加大一些，且要求长短边比例适宜，基础底面边长均不应小于基础厚度。

一般情况下，立柱式振动试验台激振力作用点偏低，产生的力矩也相对比较小，基础底面长边与短边之比、短边与厚度之比均不宜大于 2.0。而多轴向振动试验台，激振力作用点较高，通常在基础顶面之上，会产生较大的倾覆力矩。因此，基础底面长边与短边之比、短边与厚度之比均不应小于 1.5，要求稍严。

2 振动试验台基础重量比是设计中的一个重要指标。为满足设备的使用条件，对于液压振动试验台非隔振基础，设备厂家一般要求基础重量比不得小于 10。考虑到不同的地基条件和环境要求，基础重量比适当提高。

- 1) 道路模拟试验机为立柱式或轴耦合式试验台，立柱式以竖向激振力作用为主，轴耦合式具有闭环激振特点，此类振动试验台基础，其基础重量不应小于最大激振力的 15 倍。
- 2) 多自由度振动试验台，由于激振力的作用位置高，具有较大倾覆力矩，需要基础具有更大的抗力矩能力，因此，基础重量不应小于最大总激振力的 20 倍。
- 3) 对于大型地震模拟振动试验台，可能会有高大建筑试验模型。试验时，在水平激振力作用下，倾覆力矩很大，需要更加稳固的地基来支撑振动台和被试模型，此时。基础的重力比应取 25 倍。

一般认为，当基础质量比大于 50，且基础宽高比尺寸合理时，基础可不做动力分析。对于大型地震模拟试验台基础，建议质量比大于 30 为宜。实际工程中，由于受到场地和经济条件的

限制，基础质量比达不到上述要求，此时，应根据设备参数对基础动力特性进行深入的分析 and 试验评估，同时还应进行环境振动影响的评估。

3 液压振动试验台基础多为大体积混凝土结构，施工中容易产生水化热和温度裂缝。因此，需要配置防裂钢筋和防温度收缩钢筋。基础混凝土块状内应设置三向分布钢筋。分布钢筋的直径不宜小于 14mm，间距不宜大于 500mm。振动试验台基础侧面、顶面及底面应设置双向分布钢筋，直径不宜小于 14mm，间距不宜大于 150mm。目的是防止基础表面出现裂缝以及出现振动疲劳破坏。

4 设备底座边缘至基础边缘的距离一般不小于 100mm。考虑到螺栓与设备底座尚有一定距离，在设计设备地脚锚栓预留孔时，应当确保预留孔边与基础边距离的最小要求。本规程要求最小距离不宜小于 300mm。

5 地震模拟振动试验台和 MAST 振动试验台的竖向激振合力中心应尽量与基础质心重合，偏心距与基础相应边长的比值不宜超过 5%。这项要求是为了确保振动试验台的精度，从构造要求上减小振动影响。

6.4.3 本条对电动振动台基础的尺寸、重量和配筋构造作出了规定：

1 电动试验台的激振力相对液压振动试验台小一些，工作频率较高。电动振动试验台基础主要采用整体块式基础。为确保基础的稳定，要求基础底面边长均不应小于基础厚度。

2 带有隔振装置的电动振动台，振动作用小于非隔振的振动台，其基础要求可以适当放宽，通常基础重力不应小于激振力的 4 倍；无隔振装置的电动振动台振动作用较大，需要加大基础重量，要求重力比不小于 6 倍。

3 振动试验台基础多为大体积混凝土结构，施工中容易产生水化热和温度裂缝，因此，需要配置防裂钢筋和防温度收缩钢

筋。要求基础混凝土块状内设置三向分布钢筋，目的是防止基础表面裂缝和振动疲劳破坏。

5 为确保基础的适用性，要求具有竖向激振的振动台其作用力应尽量与基础质心处竖向轴线重合，且偏心距与基础短边边长的比值不宜超过 5%。

6 水平向激振的振动台会产生相应的力矩作用。激振力和力矩处于同一平面内。因此，要求激振力和力矩的作用线或作用面应尽量与基础纵向轴线上的垂直平面重合，且偏心距与基础短边边长的比值不宜超过 5%。

6.4.4 本条对机械振动台基础的构造要求作了规定。

1 机械振动台激振力相对较小，频率范围也偏小，基础推荐选用块状基础；

2 为避免振动的偏心作用，振动试验台设备振动作用力应尽可能与基础重力重合，本条规定设备与基础的偏心率不超过 5%；

3 基础作为振动体系的配重质量，要求基础重力与激振力的比值宜大于 5。

7 施工、检测与验收

7.1 施 工

7.1.2 振动试验台与基础的连接有精度要求。连接件和预埋件定位应当准确，为避免施工中造成预埋件移位应当采取必要的固定措施。

7.1.3 通常设备厂家对基础与振动台底座连接会有平整度的要求，在厂家没提供平整度要求时，连接件的平整度可按 $\pm 2\text{mm}$ 执行。

7.1.4 为满足设备的安装精度要求，基础与振动台底座连接处都有调平装置，同时应预留二次灌浆层，其厚度不宜小于 50mm 。二次灌浆层应在设备安装就位、调试后浇筑。

7.1.5 本条对基础与设备底座之间的安装部位采用的二次灌浆料作出了规定。

根据国家标准《水泥基灌浆材料应用技术规范》GB/T 50448-2015 的要求，灌浆料建议选用Ⅲ类水泥基灌浆材料。通常采用的二次灌浆材料为强度高一个等级的微膨胀混凝土或者是专用灌浆料。

灌浆料的使用条件为：

- (1) 初始截锥流动度不小于 290mm ；
- (2) $3\text{h}\sim 24\text{h}$ 的膨胀率为 $0.02\%\sim 0.50\%$ ；
- (3) 1d 抗压强度大于或等于 20MPa ， 3d 抗压强度大于或等于 40MPa ， 28d 抗压强度大于或等于 60MPa 。

2 当选用微膨胀混凝土作为二次灌浆材料时，应提高一个强度等级。

7.1.6 为确保基础施工的质量，以采用连续浇筑方式施工为宜。

应在施工中采用有效措施避免混凝土温度过高的影响。夏季、冬期施工时，应采取控制温度过高或保温的技术措施。

7.1.7 基础周边回填土的施工质量对振动试验台正常使用会有影响，在施工中应满足下列要求：

1 基坑开挖和施工过程中，遇到雨雪天气或场地内的地下水位较浅，都可能引起基坑积水。在进行基础周边基坑回填时，需要排除可能的积水。基坑内的松散填土和杂物也会影响回填施工的质量，需要清除干净。

2 基坑回填材料需要采用级配砂石，碎石、卵石占全重的30%~50%。

3 基础周边部分需要分层夯实回填，根据国家标准《建筑地基基础设计规范》GB 50007-2011第6.3.7条的规定，回填压实系数不小于0.94。

7.2 检测与验收

7.2.1 现行国家标准《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB 50204是混凝土结构施工的依据。振动试验台的混凝土基础施工应符合相关规定的要求。

7.2.2 通常情况下，振动试验台基础的容许振动标准应由设备厂家提供，当无法提供时，可采用国家标准《建筑工程容许振动标准》GB 50868-2013中第5.7节的有关要求。振动台基础的测试工况应包括满载、空载等多种工况。振动试验台在调试阶段的荷载工况较为恶劣，因此，在设备调试阶段检测为宜，建议不超过调试后的3个月内。

7.2.3 振动试验台的混凝土基础的验收条件，应满足现行国家标准《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB 50204的有关规定。

8 监测与运维

8.1 监 测

8.1.1 本条对振动试验台基础振动监测的内容作了规定。

1 基础沉降监测目的是确保基础满足现行相关国家标准对基础沉降的规定；

2 基础倾斜监测目的是确保基础满足现行相关国家标准对基础不均匀沉降的规定；

3 电液伺服液压振动试验台基础振动监测在时域范围内的容许振动值，推荐按表 11 确定，电动振动试验台基础振动监测在时域范围内的容许振动值，推荐按表 12 确定。

表 11 液压振动试验台基础在时域范围内的容许振动值

振动形式	振动位移峰值 (mm)	位移均方根值 (mm)	振动加速度峰值 (m/s ²)	加速度均方根值 (m/s ²)
稳态振动	0.1	—	1.00	—
随机振动	—	0.07	—	0.70

注：1 表中数值适用于单个作动器激振力不大于 500kN，激振频率范围不超过 200Hz，最大加速度不大于 300m/s²，行程不大于 300mm；

2 振动测试频率不宜大于 100Hz。

表 12 电动振动试验台基础在时域范围内的容许振动值

激振力 (kN)	容许振动速度峰值 (mm/s)	容许振动加速度峰值 (m/s ²)
≤6.0	6.3	0.5
>6.0	10.0	0.8

注：电动振动试验台最大激振力不大于 200kN，激振力频率不超过 2000Hz，最大加速度不大于 1000m/s²，行程不大于 55mm。

4 环境振动监测应满足环境振动的相关要求。

8.1.2 为确保振动试验台的正常使用，作为振动设备支承结构可通过基础振动监测作保障。本条列出了基础振动监测相关的主要依据，包括现行国家标准、行业标准和有关文件。

8.1.3 振动试验台在正常工作期间，可以对基础进行定期的振动监测。特殊情况下可增加监测频度。

8.1.4 本条规定了振动试验台基础振动监测具体要求，包括监测方法、测点布置、测试方向等要求。

8.1.5 振动环境监测根据振动传递路径排列振动检测对象，分别为：振源设备、试验室建筑、试验室所在厂区，以及厂界区域等。

8.2 运行和维护

8.2.1 振动试验台基础作为设备的支承结构，优良的工程质量可为设备正常运行提供基本保障。

8.2.2 振动试验台通常都有设备自带的监测报警装置。振动试验台基础是振动体系重要的组成部分，建议进行振动监测以确保振动试验的正常开展。一旦出现异常便可做出报警并及时停机，以确保现场的设备不被损坏，保障人身安全。

8.2.3~8.2.5 对于振动监测数据应当定期评估，一旦振动过大出现超限情况，就应进行深入分析，及时处理，必要时采取有效的控制措施。振动试验台基础容易出现的问题是：沉降、倾斜、振动和裂缝。长期做好这些数据的记录也是工程运维管理的一项重要工作内容。