# 框架式动力设备基础设计

董秀玲

胜帮科技股份有限公司　上海　201210

**摘　要：**框架式动力设备基础作为石油化工、能源动力等领域关键设备的承载体，其设计核心在于控制动力荷载下的振动响应，保障设备运行稳定性与结构安全性。本文结合《动力机器基础设计标准》　、《离心式压缩机基础设计标准》等规范要求，从双自由度体系简化设计和多自由度空间体系精确分析两个维度，阐述了框架式动力设备基础的设计理论、计算方法以及两种方法的优缺点，并列举了工程实例，为工程实践提供理论参考与技术支撑。

**关键词：**框架式动力设备基础；双自由度体系；多自由度空间体系；动力响应；有限元分析

## 1 引言

一些压缩机、汽轮机组、电动机等动力机器，因工艺流程布置的缘故，需要设置在一定的高度，动力机器下面要留有足够的空间，因此这些机器的基础需要做成框架式基础。这种基础由横梁、纵梁和柱子构成了横向和纵向框架，其顶板和底板多为一块厚板。动力基础上部作用有机器传来的动扰力，这种动扰力会引起基础本身的振动，甚至影响到周围建构筑物的振动，计算时通过限制基础顶板的振动幅度和振动速度来满足规范要求。本文从双自由度体系简化计算与多自由度空间体系有限元计算，来探讨框架式动力基础的计算与设计要点。

## 2 双自由度体系简化设计

### 2.1 计算模型基本假定

根据设备与基础的质量分布特性，将其简化为“设备-基础”双自由度竖向振动体系，模型假定如下：$m_1$ 为集中于横梁中点的质量，包括作用于横梁的机器质量及横梁质量的一半；$m_2$ 为集中于柱顶的质量，包括纵梁质量、作用于纵梁的机器质量以及横梁和柱质量的一半；$K_1$ 为框架梁的竖向刚度，$K_2$ 为框架柱的竖向刚度。该简化模型的核心假设为：设备与基础均视为刚体，仅发生竖向平动，无转动变形；地基土视为线性弹性体，采用弹簧-阻尼模型模拟地基的支承作用[1]。

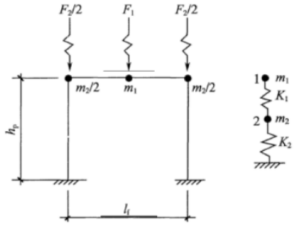



**图 1 横向框架的竖向振动简图**

### 2.2 自由振动计算

无阻尼自由振动方程组：

$$\begin{cases} m_1\ddot{x}_1 + K_1(x_1 - x_2) = 0 \\ m_2\ddot{x}_2 - K_1(x_1 - x_2) + K_2x_2 = 0 \end{cases}$$

设简谐解 $x = Asin(\omega t)$，代入得到频率特征方程，求解可得两阶固有圆频率：

$$\omega_{n1,2} = \frac{1}{2}\left(\frac{K_1}{m_1} + \frac{K_1+K_2}{m_2}\right) \pm \sqrt{\frac{1}{4}\left(\frac{K_1}{m_1} + \frac{K_1+K_2}{m_2}\right)^2 - \frac{K_1K_2}{m_1m_2}}$$

框架梁的竖向刚度：

$$K_1 = \frac{1}{\frac{L_f^3}{9bE_cI_b}\cdot\frac{1+2\delta}{2+\delta} + \frac{3}{5}\cdot\frac{L_f}{E_cA_b}}$$

$$\delta = \frac{H_pI_b}{L_fI_c}$$

柱的竖向刚度：

$$K_2 = \frac{2E_cA_c}{H_p}$$

对应两阶振型位移比，再引入设备扰力 $F = F_0sin\omega t$，即可求得受迫振动位移与动力系数。

### 2.3 工程实例（小型往复式压缩机框架基础）

#### 2.3.1 基础原始参数

某石化项目小型往复式压缩机框架基础，单榀横向框架：混凝土 C30，$E_c = 3.0\times10^4 MPa$；柱截面 $400\times400mm$，柱高 $h_p = 3.6m$；顶主梁截面 $500\times1200mm$，计算跨度 $l_i = 6.0m$；上层质点（设备 + 顶板）$m_1 = 28t$，下层梁柱等效质量 $m_2 = 16t$；机组工作转速 $n = 980r/min$，扰力圆频率 $\omega = 102.6rad/s$。

#### 2.3.2 计算过程

计算构件刚度：立柱轴向刚度 $K_2$ =

$2.12\times10^7 N/m$，横梁抗弯刚度 $K_1=3.75\times10^7 N/m$；双自由度固有频率：一阶固有频率 $\omega_{n1}=64.2rad/s$，二阶固有频率 $\omega_{n2}=168.5rad/s$；共振区间校核：机组扰力频率 $\omega=102.6rad/s$，介于一阶与二阶频率之间，避开 0.75~1.25 倍共振禁区，满足规范要求。

2.4 双自由度模型优缺点总结

优势：计算工作量小，手算或 Excel 即可完成，适合初步方案比选、小型机组施工图验算，数十年工程实践验证，满足常规设备的振动控制要求。

局限性：仅能模拟竖向平面振动，忽略水平振动、扭转振型；无法考虑多跨框架的空间耦合效应；不能精确计算梁柱节点局部振动，大中型高速压缩机基础不能单独依靠该方法设计[2]。

## 3 多自由度空间体系实例设计

3.1 空间体系理论基础

大型框架动力基础属于三维空间无限自由度体系，结构动力学中采用有限元离散方法，将梁柱划分为空间梁单元，底板采用板单元，形成整体刚度矩阵 $[K]$ 与质量矩阵 $[M]$。

无阻尼自由振动方程：

$$[M]\ddot{u}+[K]u=0$$

通过特征值求解，得到前若干阶固有频率与对应振型，即模态分析；再输入设备简谐扰力，采用振型叠加法求解受迫振动响应，得到各控制点的振动速度、位移幅值。

3.2 工程实例（大型离心式压缩机框架基础）

3.2.1 项目概况

某化工项目加氢装置离心式压缩机，设计资料包括以下内容：

压缩机组主要机器质量（Kg）：压缩机 35000，变速箱 14600，电机 36000；转子质量（Kg）：压缩机 148，变速箱 5400/255，电机 10800；设备额定转速（r/min）：压缩机 9941，电机 1496；设备 Z 向当量静荷载（±kN）：压缩机 245.20，变速器大齿轮 134.64，变速器小齿轮 42.25 电机 269.28；设备 Z 向动扰力（±kN）：压缩机 22.318，变速器大齿轮 4.649，变速器小齿轮 3.844，电机 16；设备静荷载（kN）：压缩机作用点 A1~ A4：113.75，变速箱作用点 B1~ B4：47.45，电机作用点 C1~C8：88。

压缩机组平面布置图如下：

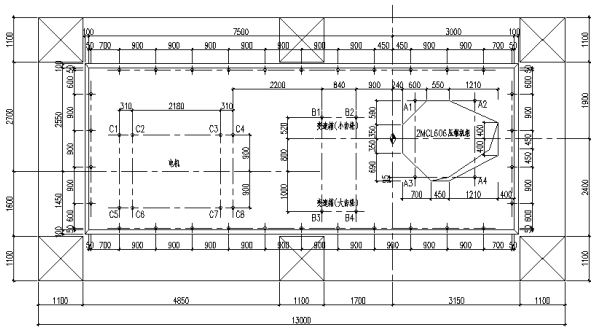


图 2 压缩机组平面布置图

3.2.2 有限元建模流程（盈建科动力模块）

建立三维框架模型：立柱、顶梁采用空间梁单元，基础底板采用弹性板单元，底部施加三向弹簧约束，输入地基刚度与阻尼参数；施加集中质量：将压缩机主机、电机、管道附加质量施加于顶板对应节点；进行模态分析：提取前 15 阶固有频率与振型，排查共振风险；输入简谐动荷载，开展频域响应分析，输出顶板各控制点振动幅值；若振动超标，调整柱截面、梁高、柱距，修改整体刚度，重新迭代计算。

3.2.3 计算结果

计算时，压缩机和小变速的起始频率为 124，终止频率为 208；电机和大变速的起始频率为 18，终止频率为 32；结果如下：

以机组平面图中 A2 为控制点，图 3 为 A2 节点的速度均方根值-频率曲线图以及对应的峰值表：

表 1 Z 向速度-频率曲线平方和开方值

| 频率 (Hz) | 31.75 | 67.5 | 172.8 |
|---|---|---|---|
| 速度 (mm/s) | 0.72 | 1.8 | 3.36 |

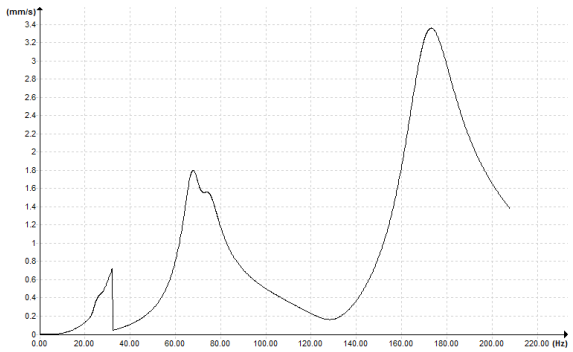



图 3 A2 节点速度-频率曲线图及峰值表

3.2.4 计算结果分析

模态分析：模型一共产生 40 阶有效振型，前 6 阶包含竖向振动、水平横向振动、水平纵向振动与扭

转振动；一阶竖向频率 23.04Hz，一阶水平横向频率 25.84Hz；机组工作频率 $f = 165.68Hz$，远高于基础前 10 阶固有频率，属于“刚性基础”设计方案，彻底避开共振区间。

动力响应：输入不同频率对应的扰力后，顶板设备支座处最大竖向振动速度 3.36mm/s，满足 HG/T 20555 振动限值要求[3]。

## 4 框架式动力基础整体设计要点

### 4.1 基础选型原则与设计要求

4.1.1 基础顶板应有足够的刚度和质量，为减少基础的振动，可适当加大扰力作用点下的梁重量。当柱中心与横梁中心不一致时，应适当增加纵梁刚度，顶板悬臂部分应尽量减少，并做成实腹式。顶板厚度不宜小于其净跨度的 1/4，并不得小于 800mm。

4.1.2 柱子一般采用矩形截面，在满足强度和稳定要求的前提下，宜适当减少柱子的刚度，柱子的长细比一般控制在 1/10~1/12，截面的最新宽度不得小于 450mm。

4.1.3 基础底板宜采用矩形板，底板形式和厚度的选择应结合地基情况综合考虑，一般情况下，为满足地板的刚度要求及满足柱脚嵌固与底板的计算假定，底板厚度取底板长度的 1/10~1/12，并且不宜小于 800mm，且不应小于柱截面的最大边长。

### 4.2 荷载与地基参数取值

静荷载包括设备自重、混凝土自重及管道附加荷载，管道荷载需计入充水重、保温重量；动荷载应严格采用设备制造厂提供的动扰力，若无厂家数据，则可根据转子质量按照 GB 50040 公式计算取值，动力系数最大可取 8；地基基床系数必须由岩土勘察报告提供，不得随意套用经验值[4]。

### 4.3 静力计算和动力响应要求

动力机器基础设计需同时满足静力平衡和动力响应双重控制要求，在静力设计层面，基础地面平均静压力设计值 p 应满足地基承载力要求。在动力设计层面，基础振动速度需满足规范要求：基础顶板振动速度峰值不大于 5.0mm/s，均方根值不大于 3.5mm/s，同时所有固有频率必须躲开机组工作转速 ±25% 区间。若计算无法满足，还可采取减振与隔振措施，常见的做法有：设置弹性支座（如橡胶隔振器，刚度范围 5~2050kN/mm）；填充阻尼材料（损耗因子≥ 0.1）；增加质量块协调（附加质量比宜为设备质量的 10%~30%）等。

## 结束语

规范 GB 50040-2020 附录 B 的双自由度串联模型，是单榀平面框架竖向振动的高效简化算法，手算便捷，竖向动力计算精度可靠，适用于小型往复式压缩机基础的方案设计与校核。三维空间多自由度有限元模型可以完整模拟框架基础所有振型，精准计算三向振动响应，是大中型石油化工离心压缩机框架基础的核心计算手段，工程设计应采用“简化模型初选刚度及空间有限元精细化验算”两级计算流程。框架式动力基础设计不能只依靠动力计算，还需要做到结构对称布置、质量与刚度中心重合、合理避让共振区间、严格把控配筋与地基刚度。后续研究可进一步开展考虑土 - 结构相互作用的动力时程分析，把地基土的非线性变形纳入计算，进一步提升动力基础数值模拟的准确度。

## 参考文献

[1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 动力机器基础设计标准:GB 50040-2020[S]. 北京: 中国计划出版社,2020.

[2] 中华人民共和国工业和信息化部. 离心式压缩机基础设计标准:HG/T 20555-2023 [S]. 北京: 化学工业出版社,2023.

[3] 王健, 李顺. 离心压缩机框架基础有限元动力计算与参数分析 [J]. 工程抗震与加固改造, 2021,43(02):102-108.

[4] 徐建. 动力机器基础设计指南 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社,2022:65-112.