机器基础设计与振动分析

长 岭 炼 油 厂 设 计 室
石油化学工业部第一石油化工建设公司设计研究所分所

湖　　南

毛主席语录

思想上政治上的路线正确与否是决定一切的。

团结起来，争取更大的胜利！

在生产斗争和科学实验范围内，人类总是不断发展的，自然界也总是不断发展的，永远不会停止在一个水平上。因此，人类总得不断地总结经验，有所发现，有所发明，有所创造，有所前进。

目　录

前　　言

本资料从工程设计出发，重点讨论了在天然地基上建造的各种离心式和活塞式动力机器基础的设计问题。基础的形式包括大块式、墙式和构架式基础。

在大块式和墙式基础计算中，一机部总院编的“动力机器基础设计规程”（以下简称规程）给我们提供了有精确法和近似法，这对我们开展设计工作带来方便。然而感到不足的是每次计算，都先要假定基础的全部尺寸才能进行，由于缺乏计算经验，往往难以做到一次成功，以后每调整一个尺寸又需从头计算一遍，而且有时不得要领以致白费其功，其结果难得理想。其实，目前普遍沿用的所谓精确法，无非亦是根据无重量弹簧理论（即地基系数法）而推导出来的公式，亦即把地基视为无重量的理想弹性体。显然这与实际情况是有出入的，因此，精确法是相对于上述假定为前提。所以从工程设计的实用观点出发，只要满足设计的可靠性和经济性，任何近似的方法都是有实用意义的。为此目的，为了明晰计算要领，加速设计进度，使初参加这项计算工作的同志易于掌握，我们把承受水平扰力的二次自由度的块式基础计算简化为用一次自由度的形式来处理，免去计算基础质量惯性矩之冗繁，根据这个方法可以直接

计算出所需要的基础底面积，并且从理论上可以人为地控制基础自振频率不进入共振区，使设计更趋合理性。

在构架式基础设计中，为了扩大装配化，加速施工速度，根据我们的初步实践，提供一个所谓“整板装配式”方案，这种基础我们叫做“榫接构架式基础”：即顶板和柱子分开预制，然后待安装时用湿式榫头浇成整体；若受起重条件限制时，可将顶板分成薄板预制和二次灌筑，或分成几块予制逐块吊装拼成整板。这种方案制作简单，施工方便，与普通装配式结构没有任何特别复杂之处，适用于中小型基础。

在作基础振动计算之前，必须要知道机器的离心力或扰力，而有些产品说明书中不附这些数据，在某种情况下有时需要对此进行估算。对旋转式机器离心力只要知道转子重量就可以计算出来，转子重量与机器重量也有一定的比例关系。然而对于活塞式压缩机的扰力值影响因素就比较多，要知道全部运动部件的重量和某些部件的几何尺寸才能计算，而这些部件的重量与机器重量的关系如何，目前尚未找到它的规律性。为了实际需要，根据我们已有的资料归纳整理了一个估计压缩机往复部分运动部件质量的经验公式，以此用来估计压缩机的扰力。

地脚螺栓埋置深度的长短也直接影响到我们对基础几何尺寸的合理规划。过去我们一直都是按等强度原理决定螺栓的埋深；就是说如果螺栓设计保守了基础设计也得跟着保守，这是很不合理的。为了克服这个缺点，我们建议可以按机器性能，即扰力和功率等数据决定螺栓的埋置深度。

最后还提到了关于提高大块式基础水平刚度，达到减小振动的几项简便措施。

总之，从工程实用出发，为了简化计算改进设计、方便施工，在保证质量的前提下以祈达到加快设计速度为目的。我们的想法是否得当，论点是否合适，有待兄弟单位和同志们提出宝贵意见，万胜至感。

1974年5月定稿

第 一 篇

大块式基础的简化计算

所谓大块式基础，就是指这种基础在外力作用下基础本体变形甚小可以视作绝对刚体。

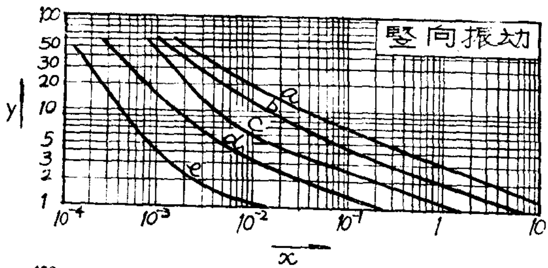
大块式动力机器基础的计算主要是指对振动的计算，因为静力强度的验算通常意义不大，一般都能满足。

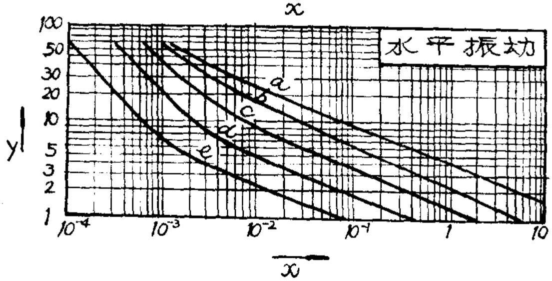
由于机器运转不平衡力（以下通称扰力）的作用使支承它的基础产生振动；反过来又影响机器的振动。振动计算的目的在于限制振幅使振动不致超过容许值。容许振幅限值如表 1 所示：

表（1）

机构 / 转数n(转/分) / 容许振幅（mm）	活塞式机器			离心式机器					
	<200	200～400	>400	<500	500～750	750～1000	1500	3000	>3000
〔A〕	0.25	0.20	0.15	0.20	0.15	0.10	0.04～0.06	0.02～0.03	$(0.02\sim0.03)\cdot\frac{3000}{n}$

显然，把振幅搞得太小，就会增加费用；如果振幅太大，也是不合适的。振幅过大会造成轴瓦严重磨损，降低机器使用寿命，甚至无谓的损功，同时也会引起厂房结构动应力的增加，严重的振动将会影响操作人员的健康。我们知道，不同频率与不同振幅的振动对人们有着不同程度的影响。而垂直振动比水平振动对人的影响较为敏感些。因此，用最低的造价建造振动最小的基础将是我们结构设计人员的责任。

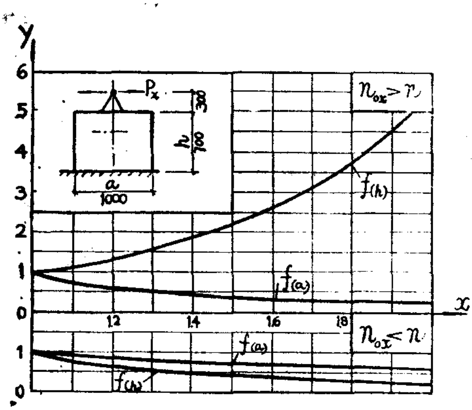




图线(一) 人体对振动的敏感度

x—振幅(1厘米)；y—频率(赫)；a—有害的振动；b—长时间内感觉不适；c—容易感觉到不适的振动；d—感觉到的振动；e—刚好感觉得到的振动

过去我们设计此类基础时通常采用的有两种方法：一种是古典法，一种是地基系数法。前者是根据不同性能的机器粗略地估计出相应基础所需要的最小重量。例如，对离心式机器其基础重量不小于该机器的三倍；对活塞式机器则不小于五倍。另外也有按马力计算的。例如，对空气压缩机每匹马力的基础重量为0.3～1.0吨等。应当指出，这种计算方法的最大缺点，在于把实际存在的地基弹性对基础的影响完全割离开来不加考虑。其实，在某种特定条件下，增加基础重量即加大基础体积不一定都能达到减小振幅的目的。从图线(二)可以清楚地看到，对于超共振后的基础（即 $n_{ox}>n$）增加基础高度不但不能达到减小振幅反而使振幅有所增加，只有在处于共振前的基础（$n_{ox}<n$）加大基础重量才有利，然以增加基础高度为显著。因此，合理选择或调整基础各



图线(二)　增加基础高度或增加基础振动方向边长时对振幅的影响

x—表示基础边长a＝1000毫米及h＝700毫米时的增值倍数

y—表示基础顶面处无因次水平振幅值

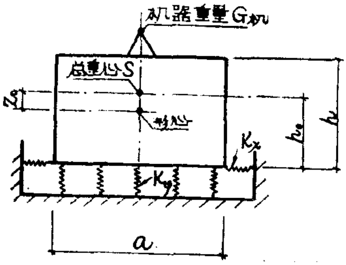
部尺寸将显得十分重要。

后一种方法，即目前普遍采用作为计算大块式机器基础比较精确的所谓地基系数法。它既考虑了机器的不同振动形式、扰力的大小，又考虑了基础的质量和地基的影响。确立理论的基本点有两个基本假定为前提：一、假定基础为绝对刚体；二、假定地基为无重量的理想弹性体，计算时以弹簧代替。这样，在研究基础振动时就可以用质量——弹簧——阻尼这样一个简单体系来研究；又因为在共振以外阻尼影响甚小，可以略而不计，这样上述体系还可以写成质量——弹簧这样更为简单的形式。只要选取正确的弹簧常数，应用这一理论既简单又能达到一定的正确性，是一种比较实用的方法。“规程”第二章就是根据这个振动体系来推导出各种精确和近似计算公式的。本文下面推导的简化公式皆以“规程”为基础并以“规程”精确公式为比较。

最后还要提到的是，由于地震学的发展，作为近代动力机器基础的计算，最近还提出一种所谓弹性半空间理论。这种理论的基础是建立在假定地基为一个各向同性的均质弹性半空间体上；尽管这种理论有它的严密性和合理性，但是由于它的基本假定往往不符合实际；加之经常遇到的机器都是水平和回转联合振动的，对这类基础，弹性半空间理论目前尚没有解答，因此，目前把它应用到实际工程计算中尚有争议，故本文暂不讨论。

自 振 频 率 的 计 算

基础受外力作用，当外力突然去除后发生的振动称为固有振动或自由振动。振动的频率称为固有振动频率或自由振动频率，简称自振频率。自振频率是用来计算基础强迫振幅的重要参数。如图（一）所示。



图(一)　计算水平和回转自由振动的简图

当基础作水平和回转振动时其自振圆频率按下列通式计算：

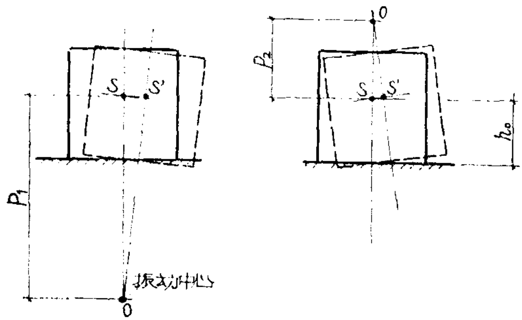
$$\lambda_{1.2}=\sqrt{\frac{1}{2r}\left[\lambda_x^2+\lambda_\varphi^2\mp\sqrt{(\lambda_x^2+\lambda_\varphi^2)^2-4r\lambda_x^2\lambda_\varphi^2}\right.}\quad\cdots(1)$$

其中：$\lambda_x^2=\frac{m}{kx}$——当回转刚度为无限大时，基础的水平自振圆频率的平方；

$\lambda_\varphi^2=\frac{k\varphi}{J_m+mh_0^2}$——当水平刚度为无限大时，基础的回转自振圆频率的平方；

$r=\frac{J_m}{J_m+mh_0^2}$——对总重心的质量惯性矩与通过基础底的质量惯性矩之比

由式（1）可知，基础的小频率λ_1永远小于λ_x和$\lambda\varphi$中的任一个值，而大频率λ_2则永远大于这些值。解释（1）的主要振动形式如下图（二）所示。振动半径表之为：



图(二)　基础的主要振动形式

$$\left.\begin{aligned} P_1 &= \frac{h_0}{1-\dfrac{\lambda^2{}_1}{\lambda^2{}_x}} \\ P_2 &= \frac{h_0}{1-\dfrac{\lambda^2{}_2}{\lambda^2{}_x}} \end{aligned}\right\} \cdots\cdots（2）$$

为了计算方便将式（1）写成下列形式：

$$\varepsilon_{1,2}=\frac{\lambda^2_{1,2}}{\lambda^2\varphi}=\frac{1}{2r}\left[1+u\mp\sqrt{(1+u)^2-4ru}\right] \qquad (3)$$

其中：$u=\dfrac{\lambda^2{}_x}{\lambda^2\varphi}$

就矩形实体基础而言，若假定$h_0=\frac{2}{3}h$，相应$Z_0=\frac{1}{6}h$，

令$\rho=\frac{a}{h}$则

$$\mu=\frac{\lambda^2{}_x}{\lambda^2\varphi}=\frac{\frac{K_x}{m}}{\frac{K\varphi}{J_m+mh^2{}_0}}=\frac{\frac{0.7C_zA}{m}}{\frac{2\times\frac{1}{12}C_zAa^2}{m\left[\frac{1}{12}(a^2+h^2)+Z^2{}_0+h^2{}_0\right]}}$$

$$=0.35+\frac{2.332}{\rho^2}$$

$$r=\frac{J_m}{J_m+mh^2{}_0}=\frac{m\left[\frac{1}{12}(a^2+h^2)+Z^2{}_0\right]}{m\left[\frac{1}{12}(a^2+h^2)+Z^2{}_0+h^2{}_0\right]}$$

$$=\frac{m\left[\frac{1}{12}(a^2+\frac{a^2}{\rho^2})+(\frac{a}{6\rho})^2\right]}{m\left[\frac{1}{12}(a^2+\frac{a^2}{\rho^2})+(\frac{6\rho}{a})^2+(\frac{2a}{3\rho})^2\right]}=\frac{1+\frac{1.334}{\rho^2}}{1+\frac{6.674}{\rho^2}}$$

…… （5）

由于 $\lambda^2\varphi=\frac{K\varphi}{J_m+mh^2{}_0}=\frac{2\times\frac{1}{12}C_zAa^2}{m\left[\frac{1}{12}(a^2+h^2)+Z^2{}_0+h^2{}_0\right]}$

$$=\frac{2C_zAa^2}{m\left[a^2+h^2+0.334h^2+5.34h^2\right]}$$