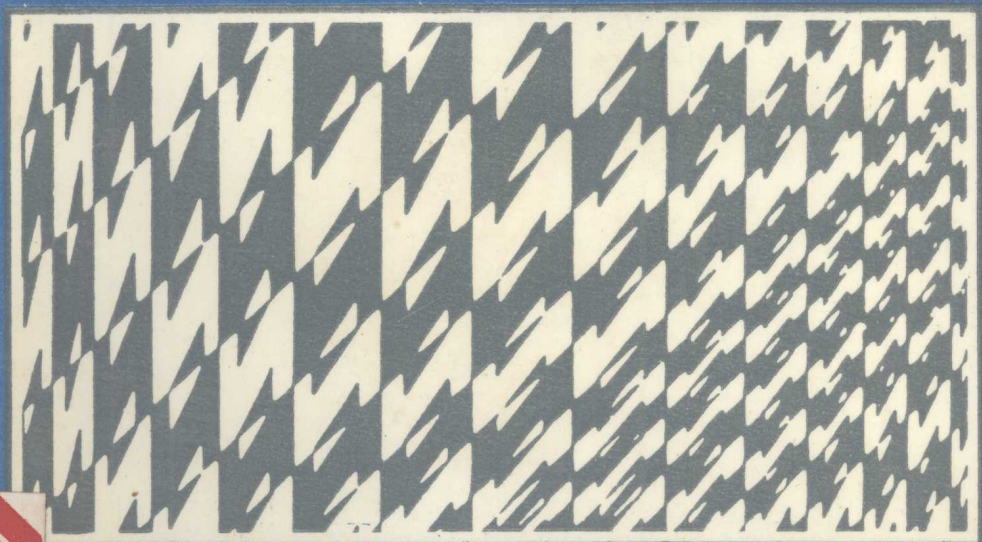


李彦硕 编著

水电站建筑物的 振动



大连理工大学出版社

水电站建筑物的振动

VIBRATION OF WATER
POWER STRUCTURES

李彦硕 编著

LI YAN SHUO

大连理工大学出版社

内 容 提 要

本书重点介绍了水电站厂房、发电机层楼板、坝上拦污栅空间刚架和压力钢管等水电站建筑物的振动与抗震设计问题。内容包括基本理论简介、微机程序的编制与使用以及实验方法介绍。对各类型建筑物都附有生产设计专题的计算成果和实验成果。

本书可作为水利水电工程建筑专业本科生和研究生的选修课参考教材,也可供水利水电工程技术人员科研和设计时参考。

水电站建筑物的振动

Shuidianzhanjianzhuwu de Zhendong

李彦硕 编著

大连理工大学出版社出版

辽宁省新华书店经销

(大连市凌水河)

朝阳新华印刷厂分厂印刷

开本: 850×1168 1/32 印张: 6.5625 字数: 170千字

1989年5月第一版

1989年5月第一次印刷

印数: 0001—1500册

责任编辑: 刘 杰

责任校对: 孙心伟

封面设计: 羊 戈

ISBN 7-5611-0122-8/TV·5

定价: 1.79元

VIBRATION OF WATER POWER STRUCTURES

This book gives a brief but comprehensive introduction on the problem concerning vibration of water power structures such as power house, floor on generator level, bearing structure of trash rack, and exposed penstock and others. The method guiding aseismic design of these structures is also discussed.

The emphasis is put not only on basic theories, but also on programming the micro-computer and on model tests. Rich material from case studies and abundant computational and experimental results are provided.

The book is expected to be used as a text for senior undergraduate and graduate students as well as a reference for professional engineers.

前 言

本书所要研究的水电站建筑物振动问题，主要针对以下几种典型结构：水电站厂房结构；发电机层、水轮机层楼板结构；坝上拦污栅空间刚架与平台板组合结构；压力钢管结构等。这些结构无论从外形尺寸，还是从构件组成上来说，都是比较复杂的。国内外多年运行经验表明，在地震波和正常运行中的有关外荷载干扰力作用下，或者在脉动、冲击和爆炸荷载的作用下，建筑物结构会产生较大的动应力和强烈的振动，这对结构的安全和运行人员的身心健康，都会产生较大的影响。为此，在测定、分析和研究地震引起的地面运动以及运行中有关外荷载干扰力特性、大小的同时，必须研究各种水电站建筑物结构的自振特性，才能有效地、经济合理地解决它们的抗震和消振问题。本书将重点介绍解决上述问题的微机电算程序、模型实验与设计的方法。并结合刘家峡、龙羊峡和安康水电站实例，介绍它们的电算、实验与设计的成果。

本书是水力发电专业课的教材，工程实用性较强。是《结构动力学》、《有限元及程序设计》和《水工动力模型实验》等课程内容在解决水电站建筑物振动问题时的具体应用。1985~1987年作为学生教材使用三届，收到较好的效果。在使用过程中又进行了修改和补充。

书中介绍的几个专题实例，皆为十年来生产设计单位委托我室完成的部分生产科研任务，在完成这些任务时，杨文超、俞亚南、

刘立强、吴铁、刘锐和王溢波等同志，参加了部分电算与实验工作。书中第五章第四节由杨文超同志计算并撰稿。

因作者水平有限，书中难免有缺点错误，诚请读者批评指正。

土木系水电站教研室

李彦硕

1987年11月

目 录

前 言

第一章	水电站建筑物振动系统的划分与外荷载干扰力	1
§ 1	水电站建筑物振动系统的划分	1
§ 2	水电站建筑物外荷载干扰力的特性	5
第二章	水电站厂房的振动与抗震设计	13
§ 1	计算简图及自振特性计算	13
§ 2	水电站厂房的抗震设计	22
第三章	水电站厂房承受冲击和随机荷载时的结构反应	52
§ 1	冲击荷载的类型与计算	52
§ 2	受冲击(或脉动)荷载, 厂房结构振动的基本方程及其求解	53
§ 3	水电站厂房承受爆炸冲击荷载动力计算举例	60
第四章	水电站厂房楼板的振动	68
§ 1	水电站厂房楼板的特点	68
§ 2	弹性薄板基本方程及薄板有限元	69
§ 3	水电站厂房楼板的自振特性	75
§ 4	刘家峡厂房楼板自振特性电算与实验	81
第五章	水电站进水口拦污栅空间刚架的振动	90
§ 1	空间刚架的自振特性	90
§ 2	安康水电站拦污栅刚架自振特性与抗震设计	96
§ 3	其它类型的拦污栅刚架自振特性及抗震设计	123
§ 4	拱坝坝上拦污栅刚架的抗震设计	133
§ 5	模态综合法简介	134

§ 6	坝上拦污栅刚架动水压简介.....	154
第六章	水电站压力钢管振动.....	158
§ 1	压力钢管径向振动.....	158
§ 2	压力钢管的横向振动.....	169
§ 3	其它边界的钢管.....	172
附录一		173
附录二		181
附录三		185
参考文献		201

第一章 水电站建筑物振动系统的划分与外荷载干扰力

§ 1 水电站建筑物振动系统的划分

水电站建筑物是复杂的组合结构。以厂房结构为例，它是由厂房刚架、楼板、发电机风罩、机墩和蜗壳、尾水管混凝土块体耦合起来的一个整体结构。整体结构中包含有局部结构。从振动系统简图来说，可以认为一个大的振动系统中包含有若干个小的子系统。子系统（局部结构）又由若干个自由度互相耦合。显然，要想同时解决这样一个大系统的动力特性是非常复杂的，一般是没有必要。这就要根据准备研究的主要结构对象，合理地简化研究系统和结构简图。一般可根据各局部结构之间的耦联密切程度分为主、从结构计算，或采用弹性支座、刚性基础边界等假定，将局部结构分开计算的方法。理论和实验和计算都证明：一个大的振动系统，由自振频率和质量皆相差较大的两个或几个子系统组成时，其大振动系统各阶自振频率值和各子系统单独计算得到的各阶自振频率值混在一起再按大小排列后的各阶自振频率值基本一致。下面我们通过两个主、从子系统的耦合振动例子，证明之。

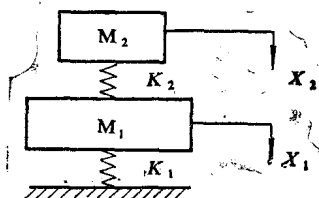


图 1—1

一、两个子系统的耦合振动

图 1—1 为两个单自由度子系统的耦合振动计算简图。此时

可写成无阻尼自由振动微分方程式

$$\begin{bmatrix} M_1 & 0 \\ 0 & M_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{X}_1 \\ \ddot{X}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_1 + K_2 & -K_2 \\ -K_2 & K_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (1-1)$$

令其解为 $\begin{Bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} A_1 \sin(\omega t + \theta) \\ A_2 \sin(\omega t + \theta) \end{Bmatrix}$ (1-2)

将(1-2)代入(1-1)式, 得

$$\begin{bmatrix} K_1 + K_2 - M_1 \omega^2 & -K_2 \\ -K_2 & K_2 - M_2 \omega^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} A_1 \\ A_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (1-3)$$

(1-3) 式为线性齐次代数方程组, 为得非零解其系数行列式必须等于零, 即

$$\begin{vmatrix} K_1 + K_2 - M_1 \omega^2 & -K_2 \\ -K_2 & K_2 - M_2 \omega^2 \end{vmatrix} = 0 \quad (1-4)$$

(1-4) 式即为两个子系统 (此处即两个自由度) 互相耦合时的频率方程式。

令子系统 1 和 2 不耦合, 各自单独自由振动时的圆频率各为 ω_{01} 和 ω_{02} , 则有

$$\omega_{01} = \sqrt{\frac{K_1}{M_1}}$$

$$\omega_{02} = \sqrt{\frac{K_2}{M_2}}$$

这样, 频率方程式 (1-4) 则可写成

$$Z^2 - [1 + (1+a)\xi]Z + \xi = 0 \quad (1-5)$$

式中 $Z = \frac{\omega^2}{\omega_{01}^2}$ ——主、从耦合系统的无因次自振圆频率 (平方

值);

$a = \frac{M_2}{M_1}$ —— 从系统 2 与主系统 1 的质量比；

$\xi = \frac{\omega_{02}^2}{\omega_{01}^2}$ —— 主、从系统不耦合时，两者自振频率之间的

错开程度。当 $\xi = 0$ 或 ∞ 时，则 ω_{01} 与 ω_{02} 错开度最大；当 $\xi = 1$ 时，两者重合，即 $\omega_{01} = \omega_{02}$ 。

解 (1-5) 方程式，可得主、从耦合系统的两个 (阶) 无因次圆频率 Z_1 和 Z_2 ，其值为

$$Z_{1,2} = \frac{1 + (1+a)\xi \pm \sqrt{[1 \pm (1+a)\xi]^2 - 4\xi}}{2}$$

(1-6)

式中 $Z_1 = \frac{\omega_1^2}{\omega_{01}^2}$

$$Z_2 = \frac{\omega_2^2}{\omega_{01}^2}$$

ω_1 —— 主、从耦合系统的第一阶圆频率、

ω_2 —— 主、从耦合系统的第二阶圆频率。

质量比 a 给定时，频率方程 (1-5) 的解 Z_1 和 Z_2 是频率错开系数 ξ 的函数，其函数曲线如图 1-2 所示。

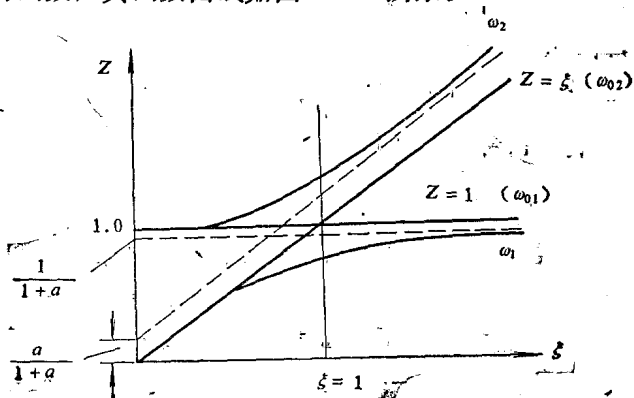


图 1-2

显然(1—5)式为双曲线方程,其两根渐近线方程为

$$Z = \frac{1}{1+a}$$

$$Z = \frac{a}{1+a} + (1+a)\xi$$

如图 1—2 中的两根虚线。

二、分析与推论

图 1—2 的 $Z=1$ 的直线表示只有一个主系统时的自振频率,即 $\omega^2 = \omega_{01}^2$ 。斜线 $Z=\xi$, 即 $\omega^2 = \omega_{02}^2$, 表示从系统单独存在时的自振频率。从图中可以看出,主系统和从系统单独存在时的自振频率 ω_{01} 和 ω_{02} 直线落在它们耦合后的主、从系统的两阶自振频率 ω_1 和 ω_2 曲线之间。由此可见,耦合系统的第一阶频率 ω_1 , 始终比不耦合时任何一个子系统的自振频率低些;而耦合系统的第二阶自振频率,即较高的那个频率必定比系统不耦合时任何一个子系统的频率要高些,这一结论在分析复杂系统的振动时是十分有用的。

由图还可看出,如果两个子系统的自振频率 ω_{01} 和 ω_{02} 错开很大,即系数 ξ 远离 1 而趋于 ∞ 或 0, 则说明主、从系统的耦合关系较松,耦合后的两阶自振频率为

当 $\xi=0$, 得 $Z_1=0$, $\omega_1^2=0$

$$Z_2=1, \text{ 即 } \omega_2^2 = \omega_{01}^2$$

当 $\xi \rightarrow \infty$, 得 $Z_1 \approx \frac{1}{1+a}$, 即 $\omega_1^2 \approx \frac{\omega_{01}^2}{1+a}$

$$Z_2 \rightarrow \infty, \text{ 即 } \omega_2^2 \rightarrow \infty$$

前一种情况 ($\xi=0$) 相当于从系统刚度很小,自振频率 $\omega_{02} \rightarrow 0$ 的情况。此时耦合系统的两阶频率即为耦合前两个子系统的自振频率, $\omega_1 = \omega_{02} \rightarrow 0$, $\omega_2 = \omega_{01}$ 。后面一种情况 ($\xi \rightarrow \infty$) 相当于从系统刚度很大,自振频率 $\omega_{02} \rightarrow \infty$ 的情形。此时耦合系统的两阶圆频率为 $\omega_2 = \omega_{02} \rightarrow \infty$, $\omega_1 = \omega_{01} / \sqrt{1+a} = \sqrt{K_1 / (M_1 + M_2)}$, 此即

M_2 与 M_1 刚性联结时自振频率。即从、主系统不需考虑弹性耦合, 只是在主系统加上一个 M_2 。

下面再分析一下质量比 a 的影响。从图1—2可见, a 越大, 则耦合系统的自振频率与独立系统的自振频率相差越大。当 a 远小于 1 而趋于零时, 则耦合系统的自振频率 ω_1 、 ω_2 与 ω_{01} 、 ω_{02} 相差甚微。从(1—5)式亦可看出, 当 $a \rightarrow 0$ 且 ξ 远离 1 时, $Z_1 \approx 1$, 即 $\omega_1 \approx \omega_{01}$, $Z_2 \approx \xi$, 即 $\omega_2 \approx \omega_{02}$ 。

最后, 当系统的两阶自振频率重合时, 即 $\xi = 1$, 此时主、系统耦合得最紧, 由(1—6)式可得

$$Z_{1,2} = \frac{2+a \pm \sqrt{a(2+a)}}{2}$$

若 $a = 0.01$, 则由上式可得 $Z_1 \approx 0.934$, $Z_2 \approx 1.075$ 或 $\omega_1 \approx 0.966 \omega_{01}$, $\omega_2 \approx 1.038 \omega_{01}$, 这就是说, 当从系统质量 M_2 是主系统质量 M_1 的 1% 时, 则在耦合最紧时系统自振频率与未耦合的主系统自振频率相差 3 ~ 4%。

§ 2 水电站建筑物外荷载干扰力的特性

一、稳态谐振干扰力 (由发电机转子偏心引起)

发电机转子重心因制造工艺精度影响, 必然有一点偏心。则在运转中, 离心力将产生谐振干扰力, 这种干扰力用式(1—7)表示。

$$P = P_0 \sin \theta t \quad (1-7)$$

式中 P_0 ——干扰力幅, $P_0 = M e_0 \theta^2$, M 为转子质量, e_0 为偏心距, θ 为转子圆频率。即 $\theta = 0.104 n$, n 为发电机每分钟转数。

比如, 某发电机总重 500kN, 转子重 $W = 297.4 \text{ kN}$, n 为 300r/min, $e_0 = 0.0005 \text{ m}$, 则 P_0 将等于

$$P_0 = M e_c \theta^2 = \frac{29.74}{9.81} \times 0.0005 \times (0.104 \times 300)^2$$

$$= 14.8 \text{ kN}$$

二、稳态谐振干扰力（由不均匀磁拉力引起）

由于转子与定子之间的缝隙不均匀，将在运转中产生周期性磁拉力。目前准确定量还有一定困难，可进行原型实测。一般力幅能达到450kN，频率为每分钟的转速。

三、随机脉动荷载（由水流脉动或尾管涡带引起）

溢流式厂房的溢流脉动压力为厂房顶的随机荷载，可以按实测的随机荷载输入。尾管涡带脉动较为严重，它是水轮机组甚至厂房楼板等产生剧烈振动的原因之一。因受各种水轮机型式、尾管型式和运行工况等不同影响，目前正处在研究阶段。尾水管低频涡带频率一般为

$$\text{涡带频率} = \frac{n}{3.5} \sim \frac{n}{5} \quad (\text{r/min}) \quad (1-8)$$

式中 n ——水轮发电机组每分钟转数。

但各点脉动压力幅的规律太小尚在观测研究阶段。

四、冲击波和爆炸冲击荷载

厂房承受冲击波和爆炸冲击荷载，一般为很短时间内的冲击力。可根据炸药量和等级计算，详见第三章实例。

五、动水压力

水电站建筑物在水中（如拦污栅刚架）或一面接触水（如厂房下游墙）振动时，因扰动水体将产生动水压力，即所谓附加质量。理论与实验都证明它对建筑物频率、动应力都将产生一定影响，参见第五章第六节。

六、地震荷载

地震荷载是地震地区水电站建筑物承受的一项特殊荷载。它是随机的地震加速度从地面直接或间接作用于建筑物产生的惯性力。我国规范（文献〔1〕）规定采用反应谱理论及方法，计算其

最大幅值。下面作一概括介绍。

1. 地震加速度反应谱

设 $\ddot{u}_0(t)$ 为地震时建筑物基础地面运动的某一水平加速度，因为建筑物对地面有相对运动，理论可以证明此相对运动可作为强迫振动来处理。以单质点结构（其质量为 m ）为例，强迫干扰力则相当于作用在单质点自由度体系上的动力荷载为 $P(t) = -$

$m\ddot{u}_0(t)$ 。忽略阻尼时，单质点强迫振动方程式则为 $m\ddot{u}(t) + ku(t) = -m\ddot{u}_0(t)$ 。利用杜哈米积分或逐步积分法，给定一自振圆

频率 ω ，对某一次地震随机加速度记录求解以上方程，可得到质点相对位移 $u(t)$ 。从中可以找到一个最大的 u_{max} 值。同样，对给定不同的 ω （或周期 T ）都可以选出一个相应的 u_{max} 值。这样，就可以得到一条 $u_{max} \sim T$ 之间的关系曲线。这就是单质点相对位移反应谱。上述方程还可写成原始形式 $m(\ddot{u} + \ddot{u}_0) + ku = 0$ ，即

$\ddot{u} + \ddot{u}_0 = -\frac{k}{m}u$ 或写成 $|\ddot{u} + \ddot{u}_0| = \omega^2 u$ 。将 u_{max} 值代入后，就可

得质点最大绝对加速度 $a(t)_{max} = |\ddot{u} + \ddot{u}_0|_{max} = \omega^2 u_{max}$ ，最后也可以得到一条 $a(t)_{max}$ 与 T 的关系曲线。此即为地震加速度反应谱，如图 1—3 所示。（规范考虑了阻尼比， $D=0.05$ ，其原理、解法基本一样）。

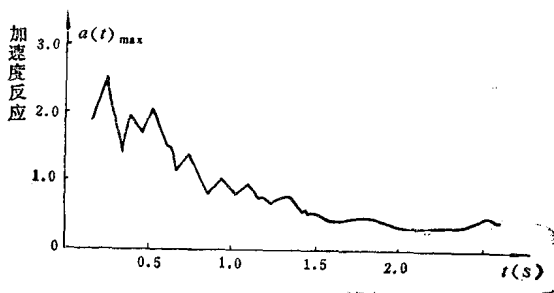


图 1—3

2. 地震荷载计算

地震荷载是由于地面运动使建筑物产生绝对加速度 $a(t)$ ，而引起的惯性力，即

$$P(t) = -ma(t)$$

对工程设计来说，只需求其最大值，得最大地震荷载为

$$P_{max} = ma(t)_{max}$$

$a(t)_{max}$ 可在 $a(t)_{max} \sim T$ 加速度反应谱曲线上查得。

但是以上加速度反应谱是根据某地某次某一烈度地震记录所得到的加速度 $\ddot{u}_0(t)$ 时程曲线作出的。为了设计未来某地设防烈度地震反应谱，规范作了如下处理：

$$P = ma = m \cdot g \left(\frac{\ddot{u}_{0max}}{g} \right) \left(\frac{\ddot{a}}{\ddot{u}_{0max}} \right) = W K_H \beta \quad (1-9)$$

式中 $K_H = \frac{\ddot{u}_{0max}}{g}$ 为水平向地震系数，表示水平地震强烈程度

的系数。为地面水平最大加速度的统计平均值与重力加速度的比值。规范规定地震烈度为7度时， $K_H = 0.1$ ，地震烈度为8、9度时， $K_H = 0.2、0.4$ 。

$\beta = \frac{\ddot{a}}{\ddot{u}_{0max}}$ 为动力系数，亦称放大系数。即以地面最大加

速度作为单位的地震加速度反应谱。规范中收集了国内外各类地基共183个地震加速度记录；按上法作出183条加速度反应谱，各除以其相应的地面最大加速度。经修正找到一条有代表性的偏于安全的外包曲线作为设计依据。此曲线称为标准反应谱曲线，如图1—4所示。图中 β_{max} 为最大地震加速度反应谱，在阻尼比为0.05时， β_{max} 取2.25。 T_0 为地震主震周期，与地基类别有关，岩石地基取0.2S，一般非岩性地基取

0.3s, 软弱地基取0.7s。

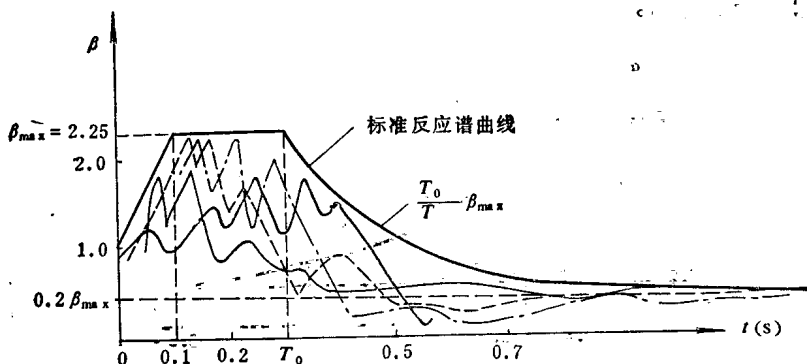


图 1—4

K_H 和 β 这两个参数的乘积综合代表地震的影响,叫作地震影响系数,用 α 来表示,即 $\alpha = K_H \beta$,则(1—9)式将化为

$$P = W\alpha \quad (1-10)$$

从(1—9)可知 $\alpha = \frac{a}{g}$, 所以地震影响系数 α 也是质点在地震

时的最大加速度(以重力加速度为单位)。由地震影响系数 $\alpha = K_H \beta$,可写出最大地震影响系数 $\alpha_{max} = K_H \beta_{max} = K_H \times 2.25$,对
不同地震烈度其值见表1—1

表 1—1

地震设防烈度	7	8	9
水平地震系数 $K_H = \frac{\ddot{u}_{e \max}}{g}$	0.1	0.2	0.4
最大地震影响系数 α_{max}	0.23	0.45	0.90

由图 1—4 标准反应谱 $\beta \sim T$ 曲线,考虑地区地基类别的影响,经适当修正后,可以得到《工业与民用建筑抗震设计规范》TJ