

· 隔振 ·

# 隔震器在核电站抗震设计中的应用

田千里

(中国科学院力学研究所)

## 一、概 述

地震会给人类带来灾难,而核电站在地震中如果遭到破坏那就会带来更大的灾难。因此在核电站建设中抗震设计是一个重要课题。一个简单的办法是将整个核电站建造在隔震基础上,早在1909年一位医学博士就曾提出过这个建议[1],可是由于一些技术问题,如怎样才能克服滑动量过大,如何保证在强烈地震时隔震器不致被破坏,以及保证在风载作用下建筑物的稳定性与舒适性等问题没有得到解决,这一建议被冷谈了很多年。直到70年代后期发展了一些与基础隔震器并联的能量吸收器,这项建议才重新引起人们的强烈兴趣。目前在欧洲,基础隔震已被用于高层建筑、铁路桥梁和核电站中,取得了成功的经验。它的优点很多,主要有以下几点。

(1) 能限制传到建筑物上去的地震载荷,从而减少了水平地震加速度超过设计值的危险性,提高了设计的可靠性

(2) 能控制响应谱,因而允许在高地震烈度区内对建筑物采用标准化设计以节省费用。

(3) 能够更准确的计算出建筑物的动力响应,从而使设计更为合理和可靠。这是因为计算结果表明建造在隔震器上的建筑物之动力响应主要取决于建筑物本身及隔震器二者之性能,与基础土壤性能关系较小,而隔震器性能要比土壤性能更易于精确测定。

(4) 在一般建筑物内对重要的仪器设备需要进行隔震处理,而经过基础隔震后仪器设备的响应可以大大降低,一般可以不再需要特殊

的隔震处理。文献[2]曾指出主结构的基础隔震有时可以使内部敏感设备响应降低30倍。

由于具有以上优点,所以这种技术日益被各工业化国家所重视,法国在核电站建设中首先采用了基础隔震,从而对核电站采取了标准化设计,制定了一套核电站标准化设计规则(SNOPPS)使设计费用大大降低,这一措施引起了美国学者的兴趣和重视[3]。

这种隔震器的原理简单,与一般机械设备的隔震原理相同。用隔震器使建筑物与震源解耦,原则上讲应采用尽量低频的隔震器,但由于地震源是宽频谱的,而隔震器频率太低又会导致建筑物在地震时振幅过大,使隔震器发生破坏,而且在经常的风载作用下会发生摇幌,影响建筑物的舒适性,所以必须有附加的保险或能量吸收装置,使隔震器具有延伸性,通常可以采用四种附加延性装置(1)钢制能量吸收器如图(1), (2)摩擦板加层叠式橡胶减震器如图(2), (3)机械保险丝, (4)液压阻尼器。机械保险丝为一脆性销钉,平时它将隔震器锁紧,结构如同座于一般的固定基础上,一旦发生强烈地震,销钉被切断,隔震器对地震载荷起滤波作用,因为它使用脆性断裂构件,一般不多采用。液压阻尼器好似飞机起落架作动筒可以起缓冲及阻尼作用,但因为需要经常的维护与检修所以也不太合适。在实践中取得成功的主要是前(1)(2)种装置,该两装置虽然构造不同,但其力学性能基本上相似,都具有双线性力-位移迟滞回线。摩擦板加橡胶隔震器已被法国及南非成功的用于核电站建设,一个示意图如图(3)。采用了整体隔震将上部建筑物建

造在统一的水平底板上,基础滑动时管线系统不受干扰,下部地基也是一块整体底板,有许多凸起的墩座安放滑板式隔震器,南非的Koeberg核电站在建筑物底部与地基之间共安放了1600个这种隔震器,每个具有 $70 \times 70 \times 13 \text{ cm}^3$ 尺度。上滑板是不锈钢板,下滑板是青铜铅板,后者同时也是层叠式加筋橡胶垫的顶板。摩擦板经过特殊处理,当压力在 $20 \text{ kg/cm}^2$ 到 $100 \text{ kg/cm}^2$ ,滑动速度在 $0.05 \text{ m/s}$ 到

$1 \text{ m/s}$ 范围内变化时摩擦系数在 $0.16 \sim 0.18$ 之间变化。当地震时结构之水平加速度使橡胶隔震器发生剪切变形(如图4),当地震烈度增大,水平力超过一特定值后两摩擦板间发生相对滑移,所以这种隔震系统具有双线性力-位移滞迟回线性能。

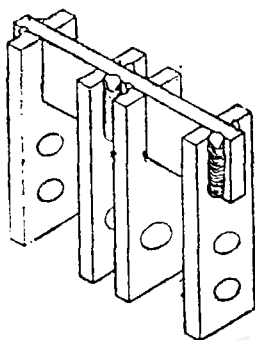


图1 钢制能量吸收器

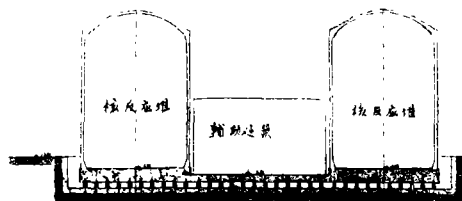


图3 核电站基础隔震

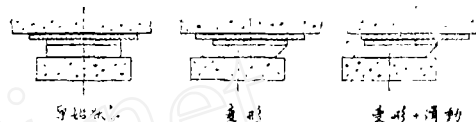


图4 基础隔震器受力后之变形

## 二、次谐波响应

一个严重的缺点是这种系统在简谐激励下会产生次谐波,以致使建筑物在受到低于基频的高谐激励时会有比不使用隔震器更大的响应。文献[4]在对单自由度振子作分析后指出了这一点,我们将摩擦力展开为傅氏级数,分析了位于滑动基础上单自由度与多自由度体系的高谐响应[5],很清楚的看出次谐波的出现是对应于干摩擦的高次谐波的,以文献[4]所分析的如图(5)的振子为例,对应于摩擦力的 $n$ 次谐波响应为

$$x_n(t) = \frac{4\mu g}{(1-\gamma)n\pi} \cdot \frac{\sin(n\omega t + \varphi_n)}{\sqrt{[(\omega_n')^2 - (n\omega)^2]^2 + [2\omega_n' \xi_1'(n\omega)]^2}} \quad (1)$$

$$n=1, 3, 5, \dots$$

$$\text{其中 } \varphi_n = \tan^{-1} \frac{2\xi_1' \omega_n'(n\omega)}{(\omega_n')^2 - (n\omega)^2} \quad (2)$$

$$\omega_n' = (1-\gamma)^{-1/2} \sqrt{\frac{K}{m_1}}$$

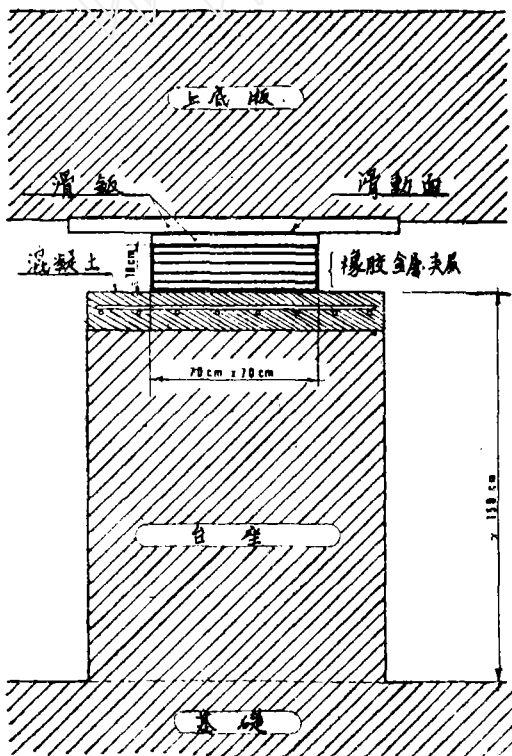


图2 滑动基础隔震器

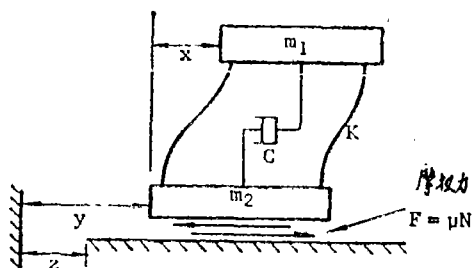


图5 滑动振子示意

$$\xi'_n = (1 - \gamma)^{-1/2} \frac{C}{2\sqrt{K}}$$

$$\gamma = m_1 / (m_1 + m_2)$$

当  $\omega = \sqrt{1 - 2\xi'^2} \omega'_n / n$  时

加速度响应具有峰值

$$\ddot{x}_n(t)_{\max} = -\sqrt{\frac{m_1 + m_2}{m_2}} \frac{2\mu g}{n\pi\xi} \quad (3)$$

因为以上诸式是对应于滑动状态的响应解，故如果控制摩擦力使得结构在基频共振以前不发生滑动，则此时图5之振子退化为一般的质量弹簧阻尼振子，它的加速度频率响应函数是

$$\ddot{x}(t) = \frac{\ddot{z}_0 \sin(\omega t + \phi)}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega_n}{\omega}\right)^2\right]^2 + \left(2\frac{\omega_n}{\omega}\xi\right)^2}} \quad (4)$$

$$\text{在 } \omega = \omega_n \text{ 时 } \ddot{x}(t)|_{\max} = \ddot{z}_0 / 2\xi \quad (5)$$

$\ddot{z} = \ddot{z}_0 \sin \omega t$  为地面运动加速度

因为共振响应远大于非共振响应，所以可以控制摩擦力使得当  $\omega$  小于  $\omega_n$  时不发生滑动，而只是在  $\omega = \omega_n$  时发生滑动，因此所有低于基频之次谐波将全部消失，当  $\omega = \omega_n$  时系统共振响应随时间线性增长，一旦振子根部动力响应超过了摩擦力则滑移开始，当振动稳定后响应将保持在一个数值，令  $\omega = \omega_n$  代入式(1)中可得

$$\ddot{x}_n(t) = |_{\omega=\omega_n} = \frac{4\mu g}{n\pi} \frac{1}{\sqrt{\left[(1-\gamma) - \frac{1}{n^2}\right]^2 + (2\xi)^2}} \quad (6)$$

因为基频响应占主导，故响应可以近似为

$$\ddot{x}(t)|_{\omega_n} = \sum \ddot{x}_n(t)|_{\omega_n} \approx \ddot{x}_1(t)|_{\omega_n}$$

$$= \frac{4\mu g}{\pi} \frac{1}{\sqrt{\gamma^2 + (2\xi)^2}} \quad (7)$$

而响应峰值由式(3)决定，发生于  $\omega = \sqrt{1 - 2\xi'^2} \omega'_n$  时，它不取决于地面运动的幅度大小，仅由摩擦系数及  $m_1, m_2$  的比值控制，相似的这一结果对具有滑动基础的多自由度体系也完全适用，我们曾将一悬臂结构安装在滑台上用基础简谐激励作过试验，分别测定它在基础滑动与固紧两种状态下之频率响应[6]。结果表明。

(1) 滑动基础之结构响应远小于固定基础的响应。

(2) 在基础可滑动与固定两种状态下，结构之基频只有微小的变化。

(3) 频率响应曲线显示了滑动基础在共振时由摩擦提供了显著的附加阻尼。

(4) 在低于基频时并无任何次谐波。

### 三、克服次谐波的新型隔震器

为了实现控制摩擦力使结构在基频共振前不滑动就需要再增加一个摩擦面，这种滑动基础的力学模型如图6[7]，其力-位移特性曲线如图7，有两个摩擦弹簧元件在此模型中， $\pm F_1$  代表附加摩擦面的摩擦力， $\pm F_2$  代表滑板与橡胶隔震器间之摩擦力。当基础激励很小，所有的摩擦面均被锁紧，此时  $x_0 = 0$  或常数

对应的力在图7中由垂线  $OA, CD, FG$  表示。当基础激励加大，结构根部切力  $Q(t)$  克服了摩擦力  $|F_1|$ ，在第一个摩擦面间发生滑移，此时隔震器的内力为  $F(x_0, t) =$

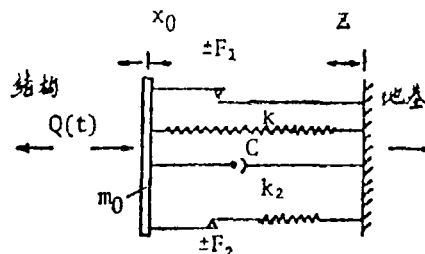


图6 滑动基础之力学模型

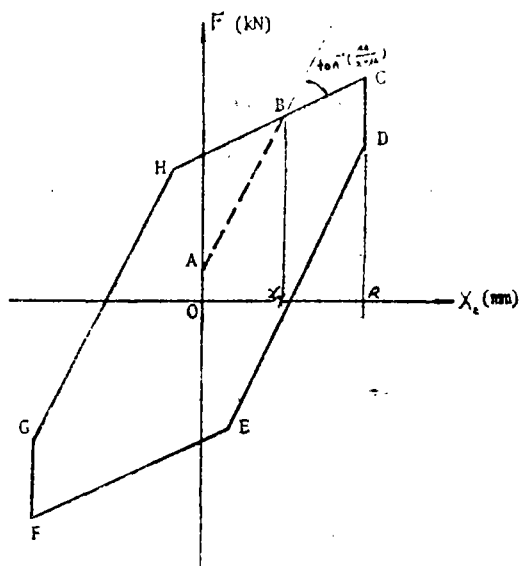


图7 滑动基础之力-位移曲线

$$F_1 \operatorname{sgn}(\dot{x}_0) + (K + K_2)x_0 + C\dot{x}_0 \quad (9)$$

对应于图7中的斜线AB, DE及GH当基础激励进一步增加,  $Q(t)$ 超过 $|F_1 + F_2|$ , 则在两个摩擦面向均发生滑移, 此时

$$F(x_0, t) = (F_1 + F_2) \operatorname{sgn}(\dot{x}_0) + Kx_0 + C\dot{x}_0 \quad (10)$$

对应于图7中之斜线HC及EF

故 $F(x_0, t)$ 为取决于激励幅度, 加载卸载过程的一个非线性函数

#### 四、具有滑动基础的结构之响应分析

具有非线性力 $F(x_0, t)$ 的基础隔震器的结构运动方程为

$$\underline{M}\ddot{x} + \underline{C}\dot{x} + \underline{K}x = -\underline{M}_1(\ddot{x}_0 + \ddot{z}) \quad (11)$$

$$\text{及 } Q(t) + m_0(\ddot{x}_0 + \ddot{z}) + F(x_0, t) = 0 \quad (12)$$

其简化的力学模型图如图8,  $Q(t)$ 为上部结构根部力, 为分析这种结构之响应必须将(11)(12)式与式(8)一(10)联立求解, 将滑动隔震器用一些适当的非线性杆件表示, 便可以利用ADINA程序求解, 可以用如图9之模型, 用三种不同的杆元代替隔震器, 图9中杆件3是线性元, 杆1与2是具有Von

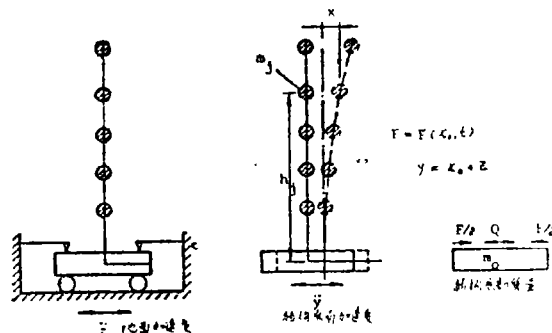


图8 具有摩擦滑动基础之结构简图

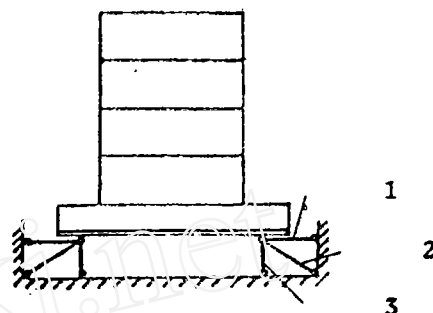


图9 等价基础

Mises 屈伏条件、运动硬化的弹塑性杆元, 适当的选择杆件参数可以得到图(7)的特性曲线, 例如令杆1为理想刚塑性材料, 选择其截面及屈伏应力使之具有屈伏力 $OA$ , 令杆2为双线性弹塑性材料, 其截面与模量 $E$ , 屈伏应力 $\sigma_y$ 及硬化模量 $E_r$ 由图(7)中 $AB$ 幅度及 $AB, BC$ 之斜率决定。

为了提高计算精度, 首先要使计算模型准确, 上部结构自由度很多, 所以要通过模态分析校验与修正有限元模型, 基础隔震器的性能很复杂要通过动态或准静态循环加载试验决定, 当二者均确定后再用ADINA程序进行分析, 在瞬态冲击基础激励情况下, 滑动基础与固定基础两种情况下的分析与实验结果比较如图(10), 由图可见滑动基础的结构响应大大低于固定基础的, 在该情况下分析结果与实验结果比较吻合, 由于实验中很难实现基础的绝对固定, 所以在该情况下分析与实验结果有较大差异。

## 五、具有滑动基础结构随机响应

在稳态随机激励时,  $F(x_0, t)$  可以用统计线性化法等效为弹性及阻尼

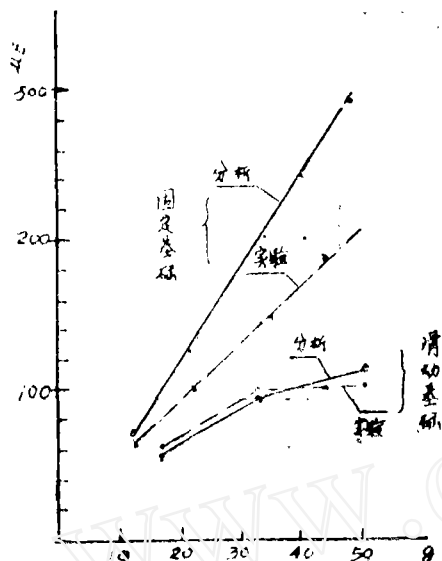


图 10 瞬态响应比较

$$F(x_0, t) = K_{eq}x_0 + C_{eq}\dot{x}_0 \quad (13)$$

$$C_{eq} = \frac{E[\dot{x}_0 F(x_0, t)]}{E[x_0^2]} \quad (14)$$

$$K_{eq} = \frac{E[x_0 \cdot F(x_0, t)]}{E[x_0^2]} \quad (15)$$

将  $F(x_0, t)$  分解为纯粹干摩擦  $F_1$  及双线性滞回线两部分, 则(14)(15)可以用现成的结果[8][9]求得

$$C_{eq} = \sqrt{\frac{\pi}{8}} \frac{F_1}{\sigma_{x_0}} + \frac{2\mu}{\sqrt{\pi}} \frac{1}{\omega_{eq} \lambda^{1/2}} \operatorname{erfc}\left(\frac{1}{\lambda^{1/2}}\right) \quad (16)$$

$$\omega_{eq}^2 = \frac{K_{eq}}{m_0} = 1 - \frac{8\mu}{\pi} \int_1^\infty [(z\lambda)^{-1}(z-1)^{1/2} + z^{-3}(z-1)^{1/2}] e^{-z^2/\lambda} dz \quad (17)$$

这里  $\lambda = 2\sigma_{x_0}^2/x_0^2$

$z = R/x_0$

$\mu, R, x_0$  示于图(12)

线性化后式(12)变为

$$Q(t) + m_0 \ddot{y} + K_{eq} \dot{y} = K_{eq} u + C_{eq} \dot{u} \quad (18)$$

这里  $y = x_0 + u$

令  $Q(t) = \bar{Q}(t) \ddot{y}$ ,  $\bar{Q}(t)$  为基础加速度为  $1g$  时结构根部切力, 则式(18)变为

$$(\bar{Q} + m_0) \ddot{y} + K_{eq} \dot{y} + C_{eq} \dot{y} = K_{eq} u + C_{eq} \dot{u} \quad (19)$$

式(19)为一单自由度体系承受基础运动之方程, 其响应谱为

$$S_{\ddot{y}\ddot{y}} = \omega^4 S_{yy} = \omega^4 |H(\omega)|^2 (K_{eq}^2 + C_{eq}^2 \omega^2) S_{uu} \quad (20)$$

$$S_{xx} = [H M_1] [H M_1]^T S_{\ddot{y}\ddot{y}} \quad (21)$$

上标  $T$  代表共轭并转置

响应之方差为

$$\sigma_{xx} = \int_0^\infty S_{xx}(\omega) d\omega$$

因为  $\sigma_{xx}$ ,  $S_{xx}$ ,  $S_{yy}$  及  $K_{eq}$ ,  $C_{eq}$  是互相有关的, 故须用迭代法求解或用焦点法求解

## 六 后 记

基础隔震器原理简单, 应用后隔震效果显著可使地震时之加速度与动力响应降低 3 倍, 某些典型谱由  $21g$  降到  $3.4g$ 。在核电站建设中能发挥很大作用, 但它要求地底板与隔震器的加工都均匀可靠, 能承受上部建筑的全部载荷。在建筑物抗震设计中允许在指定的部件上有小量的塑性变形, 可以显著的降低地震力, 因此在核电站的管路系统中设置一些吸收能量的支点也是减震的一个好办法, 分析结果表明用 Ramberg-Osgood 型滞后节点比刚塑性节点更能有效的进行减震。要得到一个经济的整体减震方案必须综合分析具有局部与基础减震的整体响应, 要研制各种稳定可靠的隔震器, 测定它们的性能, 加入结构整体模型进行综合分析, 建筑物本身自由度很多, 在设计时应作线性分析, 隔震器与隔震节点是非线性的, 但自由度较少, 所以是一个具有局部非线性节点的动力分析问题。由于地震载荷是非稳态随机的, 所以应当发展具有局部非线性结构的非稳态随机分析。

下转第 13 页

- 试验消声器, 压缩机技术, 1977.
- [4] 马大猷, 李沛滋, 戴根华及王宏玉, 湍流喷注噪声的压力关系, 物理学报, 27, 2 (1978) 121—125.
- [5] 马大猷, 李沛滋, 戴根华及王宏玉, 多孔材料的出流和多孔扩散消声理论, 物理学报, 27, 6(1978) 631—644.
- [6] 马大猷, 李沛滋, 戴根华及王宏玉, 喷注湍流噪声及扩散消声器, 物理学报, 7, 6 (1978) 343—348.
- [7] Maa Dah-you, Li Pei-zi, Dai Gen-hua and Wong Hong-yu, Experimental investigations on shock-associated noise, Scientia Sinica, 23, 10(1980) 1237—1246.
- [8] 马大猷, 李沛滋, 戴根华及王宏玉, 阻塞喷注的冲击噪声, 声学学报 3 (1980)(72—8).
- [9] 马大猷, 李沛滋, 戴根华及王宏玉, 排气噪声的有效降低, 环境科学学报, 1, 1 (1981) 2—11.
- [10] Maa Dah-you and Li Pei-zi, Pressure dependence of jet noise and silencing of flow-offs, Noise Control Engineering, Nov-Dec, 1981.
- [11] Maa Dah-you, Li Pei-zi, Mu Xiu-min and Wang Hong-Yu Characteristics of flow rate and noise radiation of micro-pore muffler, Chinses Journal of Acoustics 2(1983).
- [12] 马大猷, 李沛滋, 穆秀敏及王宏玉, 小孔消声器的流量和噪声辐射特性, 声学学报, 9, 4 (1984).

上接第 32 页

### 参 考 文 献

- [1] J. A. Calantarients, "Improvements In and Connected with Building and Other Works and Appurtenances to Resist the Action of Earthquakes and the Like", Paper No 325371, Engineering Library, Stanford University (1909).
- [2] J. M. Kelly, "Seismic Base Isolation: A Review" 2nd U. S. National Conf. on Earthq. Engng. 1979.
- [3] J. M. Eidingger "Seismic Isolation for Nuclear Power Plants" Struct. Mech. in Nuclear Tech. 1983 (K16/2).
- [4] B. Westermo and F. Udawadia "Periodic Response of a Sliding Oscillator System to Harmonic Excitation" Earthq. Engng. & Struct. Dym. Vol. 11. (1983).
- [5] T.C.Liau, G.L.Tian, Y.K. Cheung 'Dynamic Analysis of a Structure with Sliding Base' to be published.
- [6] 田千里 "提高建筑物抗震能力的一种新技术" 噪声与振动控制 1984年第4期.
- [7] T.C.Liau, Q.L.Tian, Y.K. Cheung 'Dynamic Response of Infilleed Irame with Sliding Device' to be Published on.
- [8] Caughey T. K "Random Excitation of a System with Bilinear Hysteresis" Tour. Appl. Mech., Dec., 1960.
- [9] Hedrick, J. K. "Applications of Statistical Linearization to Nonlinear Rail Vehicle Dynamics" Proc. of 8th Int. Conf. on Nonlinear Oscillations 1978. V1.

### 1986 年第四期要目预告

结构件的辐射噪声及其控制途径——唐振茹  
 蜂窝芯吸声结构——朱蓓丽  
 复合阻尼隔振器——勾厚渝  
 冷却水塔降噪减振综合治理——陈继成  
 涡轮增压器的噪声控制——蒋国鑫  
 铁路环境噪声预报——杨玉致