

丁 伟 张甲田 著

DIZHEN KANTAN
JIANBOQI
DE LILUN YU YINGYONG

地震勘探

检波器的理论与应用

陕西科学技术出版社

地震勘探检波器的 理论与应用

丁 伟 张家田 著

陕西科学技术出版社

内 容 简 介

本书详细介绍了地震勘探检波器的理论与应用技术,内容包括地震检波器的工作原理、电动式传感器、动圈式地震检波器的误差分析、地震检波器惯性质量对其性能指标的影响、地震检波器用钕铁硼永磁体稳定性研究、新型地震检波器等。

本书主要取材于多年的研究成果与技术积累,重点突出,通俗易懂,实用性强。可供从事地震勘探开发、研究和生产的工程技术人员使用,亦可供高等院校的广大师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

地震勘探检波器的理论与应用/丁伟,张家田著.西安:
陕西科学技术出版社,2006.5
ISBN 7-5369-4097-1

I. 地... II. ①丁... ②张... III. 地震勘探—
地震检波器 IV.P631.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第054256号

出版者	陕西科学技术出版社
	西安北大街131号 邮编 710003
	电话(029)87211894 传真(029)87218236
	http://www.snstp.com
发行者	陕西科学技术出版社
	电话(029)87212206 87260001
印刷	西安永惠印务有限公司
规格	787mm×1092mm 16开本
印张	9.75
字数	210千字
版次	2006年7月第1版
	2006年7月第1次印刷
定价	25.00元

版权所有 翻印必究

前 言

地震勘探检波器是一种将机械振动转换为电信号的机电装置，是应用于地质勘探与工程测量领域的专用传感器。尤其在石油资源、煤炭资源的勘探中发挥着重要作用。它主要分为速度型、加速度型和压电型三种。压电型检波器主要用于水域及海洋的地震勘探，速度型、加速度型检波器主要用于陆地地震勘探。近年来数字地震检波器的研制成功表现出了很大的优越性，人们通过不断的实践，已逐步认识到地震检波器的性能已经成为制约高分辨率地震勘探数据采集的技术瓶颈。

野外资料的采集是整个油气勘探、开发的第一步。采集资料质量的好坏，决定着我们能否得到良好的地质剖面和正确的地质解释，而检波器作为野外资料采集的第一个环节，其重要性是不言而喻的。由于检波器自身存在的弊端，制约了数据采集质量的进一步提高。所以，提高检波器的性能是提高数据采集质量的关键之一。

地震检波器性能的提高和类型的改进，与计算机技术的发展，地震仪的不断更新，以及地震勘探技术新方法的不断变化密切相关。地震检波器的发展大致经历了三个阶段：① 1978 年前，地震检波器以窄频带（14~60Hz）、低灵敏度 30dB 为主，型号单一；② 上世纪 80 年代中期，地震仪器实现数字化，计算机数据处理也相继发展，出现了三维地震、高分辨率地震、VSP 地震测井技术，这样扩大了地震勘探领域（山地、戈壁、沙漠、滩海及海洋），地震检波器在性能上及型号等发生了根本性的变化，一大批不同技术指标的高通检波器相继出现，检波器的灵敏度、自然频率、失真度、假频系数等技术指标都得到较大改进，其性能及适用范围大大提高，井中检波器，海上压电检波器等先后研制成功；③ 上世纪 90 年代至今，三维地震、高分辨率地震日益成熟，出现了四维地震、多波多分量勘探，井间地震等新技术和新方法，与之相适应，检波器的型号和品种也越来越丰富，如三分量检波器、四分量检波器、涡流检波器、高性能压电检波器等。

本书共分 9 章。第 1 章地震勘探检波器的工作原理，简要介绍了检波器的理论基础与结构特点；第 2 章电动式传感器，介绍了电动式传感器的工作原理、结构特性分析、设计基础、误差分析、测量电路与应用等；第 3 章动圈式地震检波器误差分析，介绍了温度误差分析、测试仪器误差简介、环境噪音误差影响等内容；第 4 章地震检波器惯性体质量对其性能参数的影响，主要介绍了检波器各种参数的计算公式、检波器惯性体质量

量对灵敏度的影响、检波器惯性体质量对指标同步的影响等；第5章地震检波器用钕铁硼永磁体稳定性研究，简要介绍了解决稳定性的方法；第6章钕铁硼磁体地震检波器；第7章压电地震检波器；第8章数字地震检波器；第9章地震检波器的发展方向。

本书第1、3、4、5、8、9章由丁伟编写，第2、6、7章由张家田编写。全书由张家田统稿。本书在编写过程中参考了有关文献，在此对文献作者表示衷心的感谢。

本书的编写得到了西安斯坦地震技术有限公司的大力支持和帮助，在此也对他们表示衷心的感谢。

限于作者的学识水平，书中的缺点和错误在所难免，敬请读者指正。

作者于西安石油大学

2006年5月

目 录

第 1 章 地震勘探检波器的工作原理

1.1 地震检波器的基础理论	(1)
1.1.1 地震检波器的数学模型	(1)
1.1.2 地震检波器的固有振动	(5)
1.1.3 灵敏度 α	(12)
1.1.4 地震检波器特性	(13)
1.1.5 地震检波器参数的选择	(17)
1.1.6 线圈电阻的选择	(18)
1.1.7 电缆和输入线路电阻对检波器阻尼的影响	(18)
1.1.8 非线性失真(畸变)	(21)
1.1.9 固有频率	(25)
1.1.10 假频	(26)
1.1.11 检波器与地面的耦合	(29)
1.1.12 寿命	(31)
1.2 地震检波器的结构	(32)
1.3 地震检波器的计算举例	(32)
1.3.1 永久磁铁的磁路分析	(32)
1.3.2 永久磁铁的磁场分布	(36)
1.3.3 地震检波器的计算	(36)
1.4 高分辨率地震勘探对地震检波器的要求	(41)

第 2 章 电动式传感器

2.1 工作原理和结构特点	(43)
2.1.1 工作原理	(43)
2.1.2 结构特点	(46)
2.2 传感器动态特性分析	(48)
2.2.1 机械阻抗的基本概念	(48)
2.2.2 基本元件的机械阻抗	(48)

2.2.3	电动式传感器的机械阻抗	(51)
2.2.4	传感器网络分析理论及其传递矩阵	(53)
2.2.5	电动式传感器的传递函数	(56)
2.3	电动式传感器的设计基础	(58)
2.3.1	一般设计原则	(58)
2.3.2	磁路设计	(58)
2.3.2.1	永久磁铁的工作点	(58)
2.3.2.2	永久磁铁磁路的计算	(62)
2.3.2.3	永久磁铁材料及磁性能稳定性	(69)
2.3.2.4	工作气隙的选择	(71)
2.3.3	线圈设计	(71)
2.3.4	传感器动态参数的计算	(72)
2.4	电动式传感器误差分析	(75)
2.4.1	温度误差分析	(76)
2.4.2	永久磁铁的稳定性分析	(77)
2.4.3	非线性误差分析	(78)
2.5	电动式传感器的测量电路	(79)
2.5.1	测量电路方框图	(79)
2.5.2	积分测量电路	(80)
2.5.3	微分测量电路	(82)
2.6	电动式传感器的双向统一理论分析	(83)
2.6.1	传感器双向统一理论概述	(83)
2.6.2	电压源型双向传感器	(84)
2.6.2.1	理想传感器	(84)
2.6.2.2	实际传感器	(86)
2.6.3	双向传感器的实际应用	(88)
2.7	电动式传感器的实用	(89)
2.7.1	电动式传感器在航空上的应用	(89)
2.7.2	电动式传感器在兵器工业上的应用	(90)
2.7.3	电动式传感器在民用工业上的应用	(90)

第 3 章 动圈式地震检波器误差分析

3.1	温度误差分析	(91)
-----	--------------	--------

3.1.1 直流电阻温度误差分析	(91)
3.1.2 频率温度误差分析	(92)
3.1.3 灵敏度温度误差分析	(94)
3.1.4 阻尼系数温度误差分析	(96)
3.1.5 温度误差分析小结	(98)
3.2 测试仪器误差情况简介	(99)
3.3 环境噪音误差影响	(100)
3.4 检波器“允差”对地震道接收信号相位的影响	(100)
3.5 对用户选用检波器的一些建议	(101)

第 4 章 地震检波器惯性体质量对其性能参数的影响

4.1 检波器的各参数的计算公式	(103)
4.2 检波器惯性体质量对灵敏度的影响	(104)
4.3 检波器惯性体质量对指标同步的影响	(105)
4.4 结论	(108)

第 5 章 地震检波器用钕铁硼永磁体稳定性研究

5.1 概述	(109)
5.2 研究对象的选择	(109)
5.3 由材料引出的技术问题	(111)
5.4 解决稳定性的方法	(112)

第 6 章 钕铁硼磁体地震检波器

6.1 技术分析	(118)
6.2 技术、工艺问题及方案	(121)

第 7 章 压电地震检波器

7.1 地震压电检波器原理	(124)
7.2 地震压电检波器测试仪测试原理	(126)
7.3 地震压电检波器使用和测试的注意事项	(127)
7.4 压电加速度地震检波器	(128)
7.4.1 压电加速度地震检波器的工作原理及结构	(128)

7.4.2 压电加速度地震检波器的频率响应特性	(129)
7.4.3 压电加速度地震检波器的特点	(132)

第8章 数字地震检波器

8.1 MEMS 加速度计的结构模型及其工作原理	(133)
8.1.1 MEMS 微加速度计的结构模型	(133)
8.1.2 MEMS 微加速度计的工作原理	(134)
8.2 MEMS 微加速度计的制造工艺	(135)
8.3 MEMS 微加速度计主要性能指标的设计和控制	(136)
8.3.1 弹簧劲度系数的控制	(136)
8.3.2 阻尼因子的控制	(137)
8.3.3 灵敏度的控制	(137)

第9章 地震检波器的发展方向

9.1 地震检波器的主要参数及特点	(139)
9.1.1 检波器技术指标的主要参数	(139)
9.1.1.1 阻尼	(139)
9.1.1.2 自然频率	(139)
9.1.1.3 灵敏度	(139)
9.1.1.4 非线性	(139)
9.1.1.5 绝缘电阻	(139)
9.1.2 各类地震检波器的特点	(139)
9.2 检波器的工作原理	(141)
9.2.1 动圈式检波器基本工作原理	(141)
9.2.2 涡流式检波器基本工作原理	(141)
9.2.3 压电检波器基本工作原理	(142)
9.3 地震检波器的发展方向及对策	(143)
9.3.1 存在的问题	(143)
9.3.2 改造后的检波器(传感器)应具有的条件	(144)
9.3.3 地震检波的发展动向	(144)
9.3.4 光纤数字检波器	(147)
参考文献	(148)

第 1 章 地震勘探检波器的工作原理

1.1 地震检波器的理论基础

地震检波器是将地表振动变为电信号的一种传感器,或者说地震检波器是把机械振动转化为电信号的机电装置,以最大的逼真度产生地面运动垂直分量的电模拟。每一个现代地震检波器都是由机械部分和其相连的具有电负载的机电转换器所组成,地震检波器的电学部分和机械部分组成一个整体。要求它的振幅——频率响应在有意义的频率内是线性的,相位的响应也是线性的。

根据机电转换原理,可把常用的检测器分为三类:即变磁通式(或动圈式)、变磁阻式、压电式。由于动圈式检波器的输出电压与线圈相对磁铁的运动速度成正比,这种检波器也叫速度检波器。我国陆地上地震勘探工作中大部分使用变磁通式的检波器。根据用途不同,也可把地震检波器分为地面检波器、沼泽检波器和井中检波器等。

一个振动系统,它是由一个质量 M , 一个弹簧和一个阻尼器 Z 组成,地震检波器的装置如图 1-1 所示,地震检波器的外壳安置在地面上(或沉没于井中),于是,假设外壳的运动精确地重复着地面运动,外壳上具有伸长系数 K 的弹簧悬挂着称为惯性质量的重荷 M , 为了使用权惯性质量的振动平静下来,惯性质量中被放在胶质液体中,当外壳和惯性质量 M 产生相对位移时,在其电极上造成某个电动势 E 。

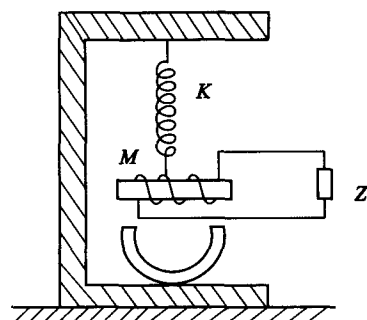


图 1-1 地震检波器的结构图

在地震勘探检波器中,主要应用各种感应转换器,在感应转换器中,根据电磁感应,将机械振动变成电振荡,感应机电转换器可以作为与质量 M 紧密相连的线圈和与外壳相连的永久磁铁之和(或者反过来),线圈在磁铁的磁场中移动时,在线圈内就发生电动势,转换器线圈内阻在内的某个电阻 Z 与转换器的两极相连。

可以把地震检波器作为机电系统来研究,这里,某个激发函数 $\zeta(t)$ ——例如外壳(地面)对固定读数系统的位移速度,作用于这个系统的输入端,在地震检波器的输出端发生从其电学部分中的负载电阻取得的某个变化的电压 $U(t)$,地震检波器数学模型应该确定这些值之间的关系。

1.1.1 地震检波器的数学模型

为了建立地震检波器的运动数学模型,先讨论其中的作用力。

假设在某个时刻,外壳运动平衡位置 ζ 值(图 1-2)质量 M 由于具有惯性而落后于

外壳的运动，并且，在此时刻移动 X_M 值。

因此，弹簧伸长值 $X = X_M - \zeta$ 。

显然 X 值确定质量和外壳的相对位移，而且，当外壳向下运动时，弹簧伸长， $X_M < \zeta$ ， $X < 0$ ，电动势 $E < 0$ ，相位 $\phi > 0$ ；当外壳向上运动时，弹簧缩短， $X_M > \zeta$ ， $X > 0$ ， $E > 0$ ， $\phi < 0$ 。

有下列的力作用于地震检波器内，重力 F_g 在平衡位置上与弹簧起始伸长的力平衡，这两个力为常数，它们互相平衡，因此，在讨论系统的运动时，在计算中可以不用它们的关系式。

$$F_y = -Kx$$

确定的弹性力 F_y 作用于仪器中，这个力的方向与弹簧位移相反。

惯性力也发生作用，这个力可以决定于公式 (1-1)。

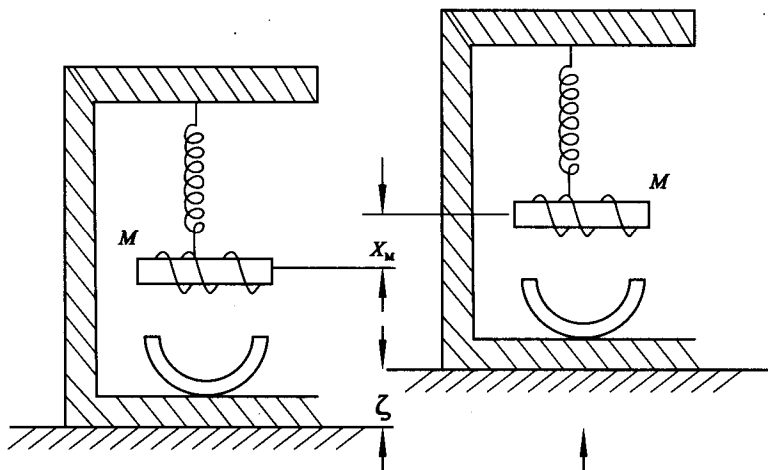


图 1-2 地震检波器的运动模型

$$F_u = -M \frac{d^2 X_M}{dt^2} = -M \frac{d^2}{dt^2} (X + \zeta) \quad (1-1)$$

惯性力的方向总是与惯性体质量加速度相反。

因为惯性体质量沉没在胶质液中，则胶质摩擦力 F_r 也发生作用，在不大的位移速度时，可以将这个力认为是和质量对于随着仪器外壳运动的液体介质的位移速度 X 成比例的。这个力决定于条件

$$F_r = -H \frac{dx}{dt}$$

H 值称为摩擦系数。

除开机械力以外，机电转换器所造成的电磁力也在地震检波器中发生作用，假设在地震检波器中有感应式转换器，转换器线圈以速度 $\frac{dx}{dt}$ 对磁铁运动。

因此在线圈中发生电动势 E ，根据法拉第电磁感应定律，这个电动势等于

$$E = W \frac{d\phi}{dx} \cdot X \quad (1-2)$$

式中 W ——线圈中的圈数;

ϕ ——通过线圈的磁通量 (磁流);

X ——弹簧伸长或缩短值;

$\frac{d\phi}{dx}$ ——磁流梯度 (以位移 $x=1\text{cm}$ 运动时穿过线圈的磁通量的变化)。

令 $W \frac{d\phi}{dx} = G$ 表示, G 值称为机电耦合系数。

于是, 方程式 (1-2) 可以写成:

$$E = G \cdot X \quad (1-3)$$

所以

$$G = \frac{E}{X}$$

它的意义是机电转换系统以速度 $\dot{X}=1\text{cm/s}$ 运动所产生的电动势 E , 单位是 $\text{V/cm} \cdot \text{s}$ 。

它决定于线圈的圈数与磁流梯度。

根据资料电磁力 $F_e = -\frac{G^2}{Z} \cdot \frac{dr}{dt} \quad (1-4)$

提高机电耦合系数 G , 可以通过提高磁通量 ϕ 和增加线圈圈数 W 来达到。

确定了在这个系统中作用的全部力以后, 设包括惯性力的所用力等于零。作系统的方程式: $F_y + F_u + F_r + F_e = 0$

$$-KX - M(\ddot{X} + \ddot{\zeta}) - H\dot{X} - \frac{G^2}{Z}\dot{X} = 0 \quad (1-5)$$

以及

$$M\ddot{X} + (H + \frac{G^2}{Z})\dot{X} + KX = -M\ddot{\zeta} \quad (1-6)$$

求得确定地震检波器外壳和惯性质量的相对位移 $X(t)$ 与检波器外壳的位移 $\zeta(t)$ 间关系的地震检波器微分方程式。

地面机械振动与检波器输出电压之间的关系:

讨论地震检波器输入端的函数 $U(t)$, 将 $U(t)$ 设为地震检波器电学部分的负载 Z_2 上的电压, 此时, 假设转换器线圈的内阻等于 Z_1 , 两个电阻是串联的 (图 1-3), 检波器的等效电路如图 1-4 所示。

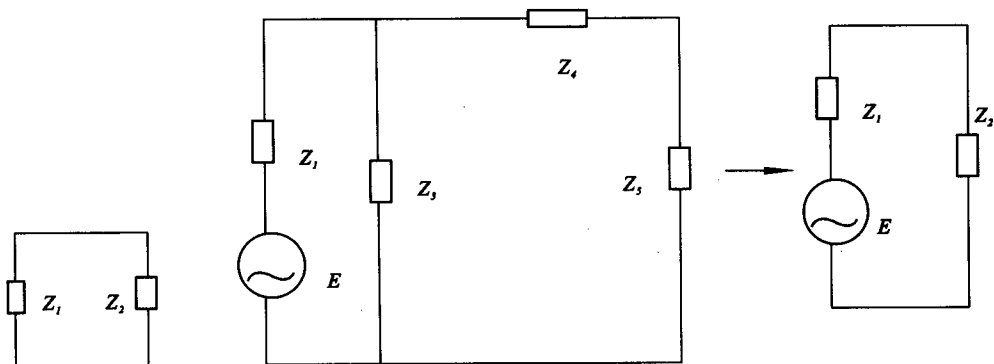


图 1-3 电子模型

图 1-4 检波器的等效电路

$$Z_2 = \frac{Z_3(Z_4 + Z_5)}{Z_3 + Z_4 + Z_5}$$

式中 Z_1 —— 检波器线圈的电阻;
 Z_3 —— 内阻尼电阻;
 Z_4 —— 大线电阻;
 Z_5 —— 地震放大器的等效输入电阻;
 E —— 线圈的感应电动势。

$$U = \frac{Z_2 E}{Z_1 + Z_2}$$

设 $Z = Z_1 + Z_2$

$$\text{所以 } U = \frac{Z_2 G}{Z} \dot{X}$$

$$\text{令 } \alpha = \frac{U}{\dot{X}} = \frac{Z_2}{Z} G$$

式中 $\alpha = \frac{Z_2}{Z} G$ 称为检波器的有效灵敏度, 它的意义是机电转换系统以速度 $\dot{X} = 1 \text{ cm/s}$ 运动时产生的输出电压。

检波器的有效灵敏度, 决定于机电耦合系数和负载阻抗与内阻的比值, 增大线圈圈数, 加粗线径, 采用强磁材料及合理设计磁系统可以提高仪器的灵敏度。

因为工作频率低, 线圈电抗小, 可以设 Z_1 、 Z_2 为纯电阻 R_1 、 R_2

$$Z_1 = R_1 \quad Z_2 = R_2 \quad Z = R_1 + R_2$$

式中 R_1 —— 转换器线圈电阻, 则 α 为:

$$\alpha = \frac{GR_2}{R_1 + R_2}$$

令典型放大器的输入阻抗为 1000Ω , 它的噪声电平为 $0.1\mu\text{V}$, 那么为了达到 1:1 的信噪比, 能有效地记录最弱的信号, 则输入电压至少是 $0.1\mu\text{V}$ 。

假定大线的电阻为 1000Ω , 这也是一个典型的值, 为了在放大器输出端建立 $0.1\mu\text{V}$, 检波器组合必须产生 $0.2\mu\text{V}$, 因为检波器组合输出电压的一半损失在克服电缆的电阻上了。

典型的现代反射检波器的灵敏度在 0.7 倍临界阻尼时, 可能是 $10\text{V/m}^{\cdot}\cdot\text{s}^{\cdot}$ 的数量级, 所以输出 $0.2\mu\text{V}$, 要求地面位移为 $0.2 \times 10^{-7} \text{ m/s}$ 。

于是, 如果只用一个检波器, 而且除了在放大器中产生的噪声之外, 不存在其他噪声, 当地面位移衰减至 $0.2 \times 10^{-7} \text{ m/s}$ 时, 记录实际上就终止了, 但是, 对于一个检波器组合, 上述情况的灵敏度实际上至少要乘上一个系数。

可以将方程式 (1-6) 写成:

$$M\ddot{U} + (H + \frac{G^2}{R_1 + R_2})\dot{U} + KU = -\frac{GR_2 M}{R_1 + R_2} \zeta \quad (1-7)$$

等式两边用 M 除, 并且令:

$$H' = \frac{G^2}{R_1 + R_2}$$

$$2h = \frac{H+H'}{M} = \frac{H + \frac{G^2}{R_1+R_2}}{M}$$

式中 H ——胶质液体的摩擦系数；

H' ——由导体发热而能量消失所造成的摩擦系数没有包括涡流阻尼。

$$n_0^2 = \frac{K}{M}$$

将地震检波器方程式写成形式

$$\ddot{U} + 2h\dot{U} + n_0^2 U = -a\ddot{\zeta} \quad (1-8)$$

1.1.2 地震检波器的固有振动

为了缩短仪器的固有振动延续时间来保证检波器有足够的分辨能力，能够很清楚地区分到达时差很短的有效波的振动，也就是说，要有足够大的阻尼，另一方面，过度阻尼将使仪器反应迟缓，灵敏度减小。

当作用于检波器的外力除去时，质量 M 由于惯性的作用不能立刻停止下来，这种运动称为检波器固有振动。

振动衰减的速度是对阻尼量的一种度量，结果是一切这类曲线的相继最大振幅形成一个等比级数，即任何两个相邻极大值之比是一常量，如图 1-5、图 1-6 所示。

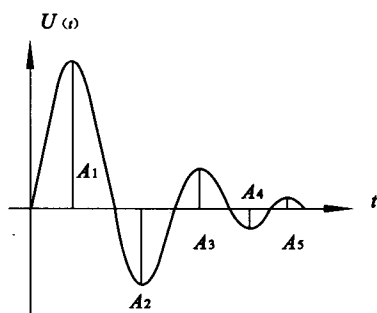


图 1-5 较小阻尼的振动

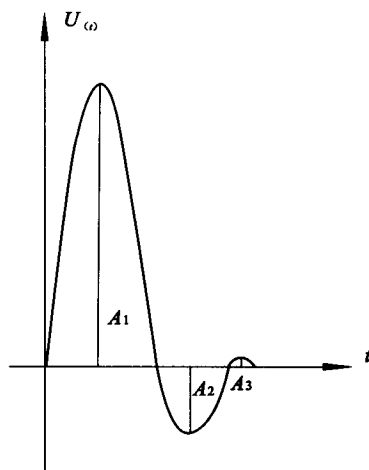


图 1-6 较大阻尼的振动

$$\frac{A^2}{A_1} = \frac{A_3}{A_2} = \frac{A_4}{A_3} = \frac{A_5}{A_4}$$

$$\frac{A^2}{A_1} = \frac{A_3}{A_2}$$

有一个阻尼程度使人们特别感兴趣，它的值相当于不产生“反冲”的最小阻尼量，也就是说它使质量体回到平衡位置而不在其相反方向上有任何偏移，称此为临界阻尼，并且在习惯上给它一个值 1 或 100%，所以其他的阻尼值都表示为临界阻尼的百分比。

如果系统的阻尼大于其临界值，则说它是过阻尼系统，假定它的值比 1 小，就称为

欠阻尼系统，如图 1-7 所示 (a、b、c)。

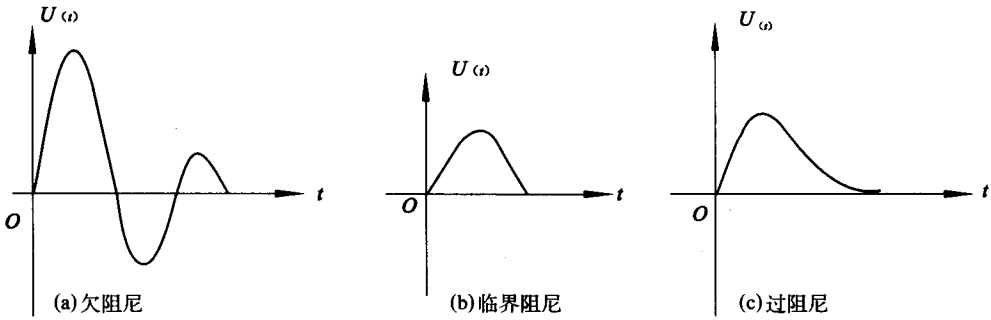


图 1-7 电动式检波器的固有振动

可以证明，阻尼系数 h 和相继峰值振幅的比值或反冲 r ，存在一定的关系，其示意图如图 1-8 所示。

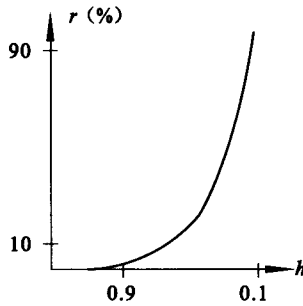


图 1-8 反冲百分比

于是，如果已知 r ，要获得任何系统的阻尼系数是很简单的。

以下分三种情况来讨论具有有效电学部分的地震检波器的固有振动，当 $\ddot{\zeta}=0$ 时，从检波器微分方程 (1-8) 中求得自由振动的微分方程式：

$$\text{有：} \ddot{U} + 2h\dot{U} + n_0 U = 0$$

求得它的根 r_1 和 r_2

$$r_1 = -h + \sqrt{h^2 - n_0^2} \quad r_2 = -h - \sqrt{h^2 - n_0^2}$$

如果根不是重复的 ($h \neq n_0$) 则按式确定固有振动 $U(t)$ 为：

$$U(t) = C_1 e^{r_1 t} + C_2 e^{r_2 t} \quad (1-9)$$

C_1, C_2 为待定常数。

(1) 当 $n_0 > h$ 或 $\frac{h}{n_0} < 1$ 时：

引入符号

$$n_1 = \sqrt{n_0^2 - h^2}$$

可以将方程式写成形式

$$U = e^{-ht} [C_1 \sin n_1 t + C_2 \cos n_2 t]$$

$$= e^{-ht} C'' \sin(n_1 t + C'_2) \quad (1-10)$$

式中 C_1, C_2 ——任意常数, 由方程式所描写的固有振动为周期性振动, 并且具有衰减正弦形状——欠阻尼, 如图 1-9 所示。

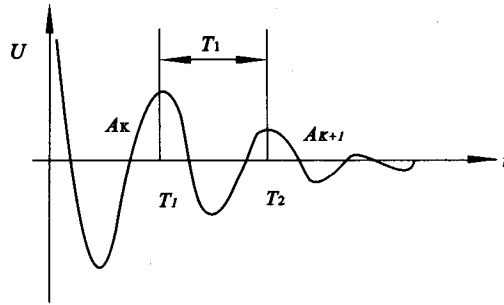


图 1-9 振幅特性

任意常数 C'_1, C''_2 确定其起始振幅和起始相位, 与地震检波器有关的参数 h 和 n_1 , 正如从公式中得出来的一样, 确定衰减程度和固有振动频率, h 值称为地震检波器的衰减系数, n_1 称为衰减振动的角频率, 随着衰减系数的增加, 固有振动迅速地衰减, 正如从图 1-9 中看出来的一样, 如果在系统中阻尼不大 ($h \approx 0$), 则 $n_1 = n_0$, 并且固有振动具有非衰减的正弦的形式

$$U = C''_1 \sin(n_1 t + C''_2)$$

n_0 称为固有 (非衰减) 振动的角频率, 即当振动系统作无阻尼振动时, 它有一定的频率, 这频率完全由系统本身的性质 (弹簧振子的质量和刚度) 所决定的, 称为系统的固有频率

$$n_0 = \sqrt{\frac{K}{M}}.$$

为了使地震检波器的分辨能力足够大, 必须使检波器的自由振动有足够的阻尼, 衰减系数值 h 一般选择在 $\frac{n_0}{\sqrt{2}} < h < n_0$ 范围之内, $h = \frac{n_0}{\sqrt{2}}$ 为最佳阻尼, $h = n_0$ 为临界阻尼,

或者 $\frac{1}{\sqrt{2}} < \frac{h}{n_0} < 1$, 获得曲线经过平衡位置的两项可见过渡的记录时, 阻尼被作为是正常的, 当第一次偏移有 15~20mm 的大小时, 在第二次过渡之后, 极大偏移不应超过记录线的厚度, 这时检波器的固有振动的延续时间的图形将近一个半周期, 如图 1-10 所示。

如果用固有周期振动的记录, 则可以计算地震检波器的系数 h 和 n_0 , 检波器固有振动的振幅按指数规律

$$A_t = C''_1 e^{-ht} \text{ 衰减}$$

$$A_1 = C''_1 e^{-ht_1}$$

$$A_2 = C''_1 e^{-ht_2} \quad \Delta t = t_2 - t_1$$

$$A_2 = C''_1 e^{-h(t_1 + \Delta t)}$$

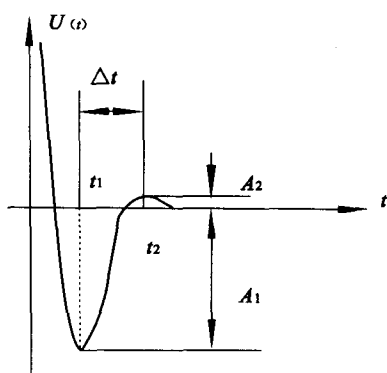


图 1-10 最佳阻尼

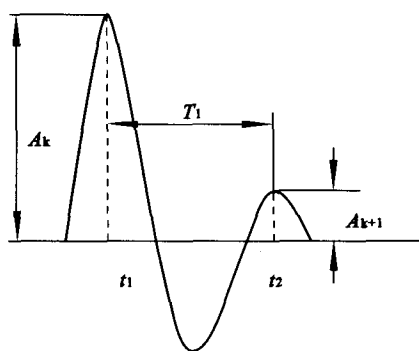


图 1-11 求对数衰减示意图

$$\begin{aligned} \text{令 } D &= \ln \frac{A_1}{A_2} \\ &= \ln \frac{C''_1 e^{-ht_1}}{C''_1 e^{-h(t_1 + \Delta t)}} \\ &= h \Delta t \end{aligned}$$

$$\text{所以 } h = \frac{\ln \frac{A_1}{A_2}}{\Delta t}$$

同理,如图 1-11 所示,将同号的两个相邻振幅值之比的对数称为对数衰减 $D = \ln \frac{A_k}{A_{k+1}}$

$$t_2 = t_1 + \frac{2\pi}{n_1} = t_1 + T_1$$

$$\text{可得 } h = \frac{\ln \frac{A_k}{A_{k+1}}}{\frac{2\pi}{n_1}} = \frac{\ln \frac{A_k}{A_{k+1}}}{T_1} \quad (1-11)$$

此处 $T_1 = \frac{2\pi}{n_1}$ —— 可以记录测定的衰减振动周期,利用公式 1-11 就可以求出检波器的阻尼系数 h 。

因而,阻尼系数 h 可视为单位时间内振幅的衰减量。阻尼系数大,意味着达到所需振幅衰减量的时间短,换句话说,阻尼系数大,意味着在相同的时间内,振幅衰减大。

(2) 当 $h > n_0$ 或 $\frac{h}{n_0} > 1$ 时:

$$\text{设 } n_2 = \sqrt{h^2 - n_0^2}$$

从方程式中求得

$$U = e^{-ht} (C_1 e^{n_2 t} + C_2 e^{-n_2 t})$$

在这个情况中,固有振动具有非周期性的形状,并且迅速地衰减。

(3) 当 $n_0 = h_{sp}$ 或 $\frac{h_{sp}}{n_0} = 1$ 时:

则 $t_1 = r_2$

并且方程具有形式