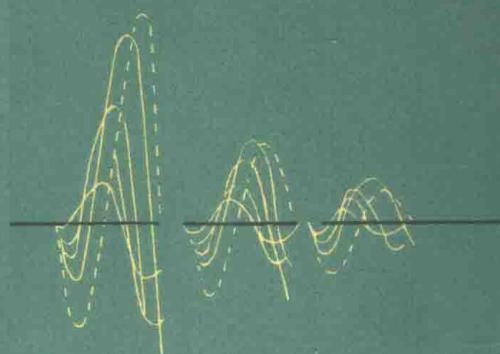




Г. А. 甘布尔采夫著

地震勘探原理

陆毅夫译

地震勘探原理

王德滋 主编

地质出版社

地震勘探原理

(仪器部份)

陆毅夫译

中国工业出版社

本书系根据《地震勘探原理》(Г.А. 甘布尔采夫)一书1959年第二版前半部分(仪器部分)譯出的。

书中共分七章，最后还附有仪器方面的专論六篇。

书内介绍了机电类比法原理，机械地震仪、机电轉換器等理論和它們的工作特性。

书中用机电类比法来阐述地震儀器的結構及其工作原理。

“双极”质量及正交变换法的应用，使机械的、电的与机电的綫性振动系統(具有集中常数的)的計算，成为可能。这种机电类比法不仅在地震勘探中有实用意义，而且还广泛地用在电声学領域中。

本书可供地震儀器設計、制造工程技術人員，儀器操作技術人員，地震勘探工程技術人員、科学研究的技術人員和院校師生参考。

Г.А. Гамбурцев
ОСНОВЫ СЕЙСМОРАЗВЕДКИ
ЧАСТЬ I
СЕЙСМИЧЕСКАЯ АППАРАТУРА
(ВТОРОЕ ИЗДАНИЕ)
ГОСГОПТЕХИЗДАТ
МОСКВА 1959

* * *

地震勘探原理
(仪器部份)
陆毅夫譯

*

石油工业部編輯室編輯(北京北郊六鋪炕石油工业部)

中国工业出版社出版(北京修脚园路丙10号)

(北京市书刊出版事业許可証出字第110号)

中国工业出版社第二印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店經售

*

开本850×1168 $\frac{1}{2}$ ·印張8 $\frac{1}{8}$ ·字数212,000

1963年10月北京第一版·1963年10月北京第一次印刷

印数0001—1,115·定价(10-7)1.40元

*

統一書号: 15165·2401(石油-147)

目 录

緒 論	1
第一章 机械地震仪的理論	7
§1 机械地震仪的微分方程式	7
§2 右端为零的地震仪微分方程式的解(固有振动)	9
§3 周期激发时地震仪的强迫稳定振动	12
§4 复杂周期性激发的情况	16
§5 地震仪在突然起始的正弦振动作用下的运动	16
§6 地震仪在突然开始的衰减正弦振动作用下的运动	20
§7 地震仪在任意激发函数形式下的运动	22
§8 貝尔拉格公式	25
§9 逐項积分法	27
§10 相位移的討論	30
§11 旋轉振动	32
§12 旋轉型垂直地震仪的方程式	34
§13 測量位移、速度或加速度的地震仪	37
§14 地震仪方向特性的討論	38
第二章 机电类比法	40
§1 机电类比法的基础	40
§2 第一类机电类比系統	41
§3 第二类机电类比系統	43
§4 单极的与双极的机械元件	44
§5 双极质量	45
§6 机械系統的綫路图示	47
§7 机械系統与电系統的相互反轉图示	49
§8 作机电类比的基本規則	52
§9 作类比的实例	54
§10 变压器的机械类比	55
§11 根据第二类机电类比法作类比的規則与实例	56
§12 計算复杂机械系統的方法稳定振动	58
§13 非稳定振动时复杂机械系統的計算	61
第三章 机电类比法对某些地震仪理論問題的应用	71
§1 “往复前进”式地震仪的电类比	71
§2 “三极”质量的概念	72
§3 旋轉型地震仪的电类比	73
§4 地震仪中寄生阻抗的清除	75
§5 安置于彈性底座上的地震仪的振动	78
§6 空气阻尼的理論	80
第四章 放大器中的畸变	87

§1	单級电阻放大器的頻率特性与相位特性	87
§2	頻率特性的对数陡度概念	90
§3	单級电阻放大器的頻率特性陡度	91
§4	单級电阻放大器中的不稳定現象	92
§5	多級放大器的頻率特性与相位特性	94
§6	多級电阻放大器的不稳定过程	96
§7	变压放大器中的畸变	101
§8	变压器电容器型放大器的畸变	104
第五章	电磁型机电轉換器理論	108
§1	机电轉換器的基本类型	108
§2	机电当量	109
§3	等效系統	112
§4	电磁地震儀的理論基础	117
§5	檢流計理論	119
§6	双重机电轉換器的理論	129
§7	机电共振	131
§8	多重机电換算作用理論在地震儀理論上的应用	132
第六章	机械滤波器与滤波地震儀	139
§1	作为电类比的机械滤波器	139
§2	“反地震”双极慣性元件	140
§3	高频机械滤波器	142
§4	滤波地震儀	143
第七章	地震記錄仪器	146
§1	机械地震儀	146
§2	电磁地震儀	150
§3	微音地震儀	161
§4	电容地震儀	174
§5	热微音地震儀	178
§6	压电石英加速儀	183
§7	論地震記錄仪器組中的畸变	188
§8	研究地震儀器的工作方法	191
有关地震儀器的参考文章		199
	論机电类比的存在的存在	199
	桥式磁系統的电磁地震儀	202
	感应式地震儀中电磁阻尼的理論	206
	論CH-5型电动地震儀的金属綫圈架的影响	210
	論放大器中的滤波系統	227
	混波器的理論	238
参考文献		253

緒 論

本書闡述儀器的理論。

在地震學中，即在研究天然地震的科學中，將記錄地震波的儀器稱為地震儀。在實用地震測計學發展時，對於用來記錄土壤、房屋、橋梁及其它建築物震動(與引起震動的原因無關)的所有儀器都應用這個名稱。

震動可以帶有前進(位移)性質與旋轉(傾斜)性質。

在每個給定的時刻上，土壤的運動決定於六個量：三個位移向量的分量與三個旋轉向量的分量。

在勘探地震測計學中，將測量水平位移與垂直位移的儀器分別稱為水平地震檢波器與垂直地震檢波器。記錄轉動的儀器時常稱為傾斜儀或陀螺儀(在技術中)。迄今為止，在勘探地震測計學中還沒有使用過傾斜儀。

土壤運動(位移)只能在觀測點的物體不參加土壤運動，或者至少部分地與震動隔絕的情況下，才能被記錄下來。在地震儀中起這種作用的物體是彈簧懸挂於地震儀支架上的慣性(或穩定)質量。如果慣性質量與地震儀平台之間的彈性連系很弱，則土壤(與地震儀支架)迅速振動時，就可以認為慣性質量實際上是不動的。在這種情況下，在每個給定時刻上，慣性質量對支架的視位移在數值上將等於土壤的位移，而符號相反。

可以採用下列方式使慣性質量與震動得到最完滿的隔離。我們將彈簧與重錘串聯所成的系統懸挂於地震儀支架上(將此種系統稱為低頻機械濾波器)。每個機械濾波器環節的固有振動周期越大，而且支架與慣性質量之間的環節數目越多，則將使慣性質量與震動的隔離越好。

慣性质量与震动隔离的完善程度决定于地震仪固有振动周期对所要记录的土壤振动周期之比。土壤振动的周期，根据其产生的原因，而在几百分之一秒(人工地震——地震勘探时的爆炸)到几分钟(远地震时的面波)的范围内变化。由于精确地记录必须使地震仪具有大于土壤振动周期几倍的周期，于是，在实用地震学中解决精确记录问题要比深地震学中简单，这个道理就是很清楚的了。

此处应该声明，在记录迅速的振动时，在杠杆系统与记录装置等的寄生阻抗方面有新的困难发生。

地震仪的周期对土壤振动周期之比越小(即慣性质量与震动隔离得越差)，地震仪的灵敏度就越低。此时地震仪已经不能精确地给出位移的记录。下面将要指出，随着地震仪周期之比的减小，位移记录变为速度记录，最后变成加速度记录。

在勘探地震测量学中，对取得土壤位移的精确记录则很少注意。相反，大部分情况下，都使记录产生人工畸变，以突出某种一定的频率。

因此，地震仪的周期常常做成等于土壤周期，或小于土壤周期。应用较灵敏的装置以补偿地震仪本身灵敏度的降低。

人工地震所造成的土壤位移的振幅很小(约 $10^{-6} \sim 10^{-4}$ 厘米)，因此，慣性质量的相对位移应该得到强的放大作用。根据放大装置与记录装置的类型，将地震仪称为机械的或电的地震仪。

具有纯机械记录或光学记录的仪器属于机械地震仪。第一种仪器由于灵敏度低，而不在勘探地质学中应用，但是，在研究房屋、桥梁等的震动时，曾经使用它们进行大量的测量。第二种仪器(光学记录的)在地震勘探方法发展的开始阶段，应用非常广泛(敏储普地震仪与什维达尔地震仪[74])。目前它们几乎全部为电地震仪所排挤掉。

用电学方法记录地震振动时，地震仪本身只是地震记录仪器组中的第一个环节。在此情况下，整个仪器组中由下列系统组成：“地震仪本身——机电转换器——放大器(与滤波器)——检

流計”、机电轉換器，即將機械振動變為電振動的儀器，它與地震儀一起組成一個整體。

根據机电轉換器的類型進行電地震儀的分類。大家都知道，最廣泛的有下列地震儀：電磁型（磁的與電動的）、壓電型、接觸型、電容型、熱偶型等。

電地震儀所發生的振動，大部分不得不事先利用電子管放大器加以放大。

放大器的作用常常不僅包括放大作用，而且還包括“濾波作用”。記錄反射波與折射波時，我們都遇到地震振動的濾波問題。

應用電濾波器對地震波的頻率分異作用，可以明顯地識別有效波。

上述系統的每個環節本身都帶有畸變作用。後面我們將要詳細地談到畸變性質的問題。

在地震實踐中引用電地震儀，大大地擴展了地震儀應用的範圍。

電記錄作用可以：

1) 利用包含一些（達60個）檢流計的示波儀（“中央記錄作用”），將整組地震儀的讀數記錄在一張照象紙上；

2) 在深鑽井中（利用井中地震儀）、湖底上與海底上等等，進行地震觀測；

3) 利用放大器（或靈敏檢流計）將地震記錄儀器的靈敏度提高到需要的程度。

4) 使地震儀器中加入濾波性能；

5) 進行地震輻射的方向接收。

還可以繼續往下列舉其作用。例如，可以指出儀器遷移方便、調節簡單等等。

在闡述地震儀器的理論之先，我們簡單地說明根據儀器的應用範圍對儀器所提出的要求。

反 射 波 法

反射波法在波譜成分上与和反射波同时到达的面波、横波及其它波都不相同。这种情况使我們有可能应用振动的頻率滤波作用清晰地識別反射。

假設曲綫 $\Phi_1(\omega)$ 确定反射波波譜成分，曲綫 $\Phi_2(\omega)$ 确定迭加于反射波之上的其它波譜成分(关于确定波譜成分的函数可見第二章§13)。函数

$$\Psi(\omega) = \frac{\Phi_1(\omega)}{\Phi_2(\omega)}$$

的情况，可以指出記錄反射波时應該保持的頻率或頻率帶。假如可以使地震仪器得到高度的選擇性能，則仪器設備的最佳頻率將決定于 $\Psi(\omega)$ 具有极大值的頻率。

实验工作的結果已經闡明：如果頻率在地震記錄上平均为50赫芝左右，則將最完善地識別出反射来(然而，我們不能从这里得出反射波頻率就保持此数值的結論)^①。

为了記錄反射波，要求有保証選擇灵敏度的仪器，但并不一定从整个波譜中只選擇一个窄的頻率帶。只是必須使灵敏度自高频向低频(約20~30赫芝以下)的降落很陡。从能量观点得出此問題的解答。为了記錄反射波而对仪器組頻率特性提出的要求，应与地震仪、放大器和檢流計的研究相当。通常在反射波法中，使放大器同时具有放大器本身的作用与高频滤波器的作用。

反射波是由許多仪器(12~60)同时进行記錄的。根据不同仪器所記錄的一組反射上极大的偏移，判断出反射面的傾斜。由于此时所测量的時間差不很大，則使許多单独記錄上的小相位移之差在觀測解釋中引起很大誤差。

因此，在反射波法中还对接收仪器提出此仪器組內同一名称

① 現在，在許多情況下，最好过渡到反射波較高頻成份(达100赫芝以上)的記錄[5, 6, 19, 27, 40]——原书編者。

的所有仪器的完全一致性的要求。此处不仅相同灵敏度很重要，而且频率特性与相位特性的相同形状也很重要。

折 射 波 法^①

在折射波法发展的最初阶段内，折射波法(初至法)仅以应用纵折射(首)波初至旅行时为根据。

初至法的观测以少量单独仪器进行。仪器是不一致的和没有滤波作用的。在初至法工作所得的地震记录上，照例除开第一个波的旅行时以外，不能够应用任何其它标志。

当时的仪器只是尽量地在有限频率范围(10~20周)内给出高的灵敏度，而且频率特性切割的陡度没有重要的作用；它们在宽广的范围内变化；此时，甚至于频率畸变也没有意义。

因此，当时存在的记录方法与技术不能完成反射波法及以后作为折射波对比法(KMIB)〔17〕基础中所用追踪并识别波的对比原则。在折射波对比法中，记录的方法与技术经过很大的改善，而所使用的仪器在技术资料上已经十分接近于反射波法(MOB)所用的仪器。已经使用可变滤波的多道地震站、地震仪组合法等。这些措施可以改善记录的分辨能力，减小干扰振动(其中包括微震)背景的水平，提高接收道的有效灵敏度。

所记录振动的频率域，在较低频率范围与较高频率范围内都得到巨大的扩展。现在折射波对比法的工作带是自5~10赫芝到80~100赫芝以上的频率域〔17〕。

将现代地震站中加入某些补充装置、滤波装置等，尽量地使它既适合于反射波法工作，同时也适用于折射波对比法工作。

本书中所发展的计算地震仪器的理论与方法，对于反射波法的仪器和折射波法的仪器，有同等的意义。

技术测震学

大家都知道，这部分测震学领域中包括很不同的任务：研究

^① 在此节内补充了折射波法发展中的现代观点——原书编者。

在周期与非周期扰动作用下建筑物、桥梁、堤坝及其它工程设施的振动，研究与交通情况、运输速度以及路况有关的各种交通运输工具所引起的震动、测量机器的振动等等。

完成上述研究时，大多要求精确记录原始运动(位移或加速度)，或识别某个一定频率带内部的振动。在技术地震学中，时常不得不用稳定振动进行讨论。由于这种缘故，在震动的波谱分析时，常常利用共振方法。

技术地震学的选择记录问题还表明，在某些情况下，与高频滤波器同时应用低频滤波器。作为实例可以指出，飞机在飞行过程中，对于加速度缓慢变化的测量，是在其马达所造成的高频振动背景上进行的。

我们指出，技术中所研究的振动通常具有很大的强度，因而常常不需要放大作用。

最近期间内，压电加速仪(加速度测量器)在技术地震学中具有首要意义。这种加速仪与直流放大器以及高频检流计联接起来，可以得出非常精确的加速度记录。



第一章 机械地震仪的理论

§1. 机械地震仪的微分方程式

在微小振动的情况下，机械地震仪的所有主要类型都具有同样形式的微分方程式；因此，在这里只讨论最简单地震仪的模型就够了。我们将图 1 ① 的系统作为这种简单地震仪的模型。

在强度用 K 来表示的弹簧上，悬挂着重荷 M ，重荷运动的自由是受到限制的，它只可能在垂直方向上产生位移。我们认为向下的方向为正。

重荷对仪器支架的位移，由于杠杆的作用而增加 V 倍。我们认为，杠杆系统并不使振动的形状畸变，它只使振动的“比例尺”增加。

在土壤运动时，也就是在仪器外壳运动时，地震仪的惯性质量一般地也产生运动。假定在振动过程中，悬挂点对于静止的起始位置偏移 ξ 值，而质量 M 也相对地偏移 x_M 值。

在此时刻上，除开惯性力以外，将有由于弹簧长度的变化 (x_{np}) 所引起的弹性力 $F_{np} = -Kx_{np}$ ，作用于固定质量之上。

如果弹簧得到附加的伸长 (x_{np} 为正)，则力 F_{np} 为负，即其方向是向上的。

应用达兰贝尔原理，我们可以写出

$$-M\ddot{x}_M - Kx_{np} = 0. \quad (I.1)$$

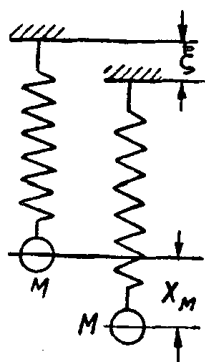


图 1

① 在本书中只讨论具有集中常数的线性系统。非线性振动的理论叙述见于文献 [1] 中——原书编者。

既然发现

$$x_m = x_{np} + \xi,$$

我們就可以将方程式(I.1)改写为下列形状:

$$M\ddot{x}_{np} + Kx_{np} = -M\ddot{\xi}.$$

方程式(I.1)对于杠杆端点运动(x)具有形式为

$$M\ddot{x} + Kx = -VM\ddot{\xi}, \quad (\text{I.2})$$

此处

$$x = Vx_{np}.$$

方程式(I.2)是在土壤运动的作用下, 不考虑摩擦与阻尼时, 地震仪指示器的运动微分方程式。

为了使慣性质量的固有振动比較小地引起土壤振动形状的畸变, 在地震仪中加入阻尼作用。在这种情况下, 通常尽量使用阻尼力与重荷相对运动速度的第一級成比例^①的阻尼器。在这种情况下, 方程式(I.2)的左端出現 $H\dot{x}$ 項。結果得到

$$M\ddot{x} + H\dot{x} + Kx = -VM\ddot{\xi}, \quad (\text{I.3})$$

此处 H 为比例系数。

大多数机械地震仪系統(不包含摩擦作用的)都可以导致公式(I.3)型方程式。除开公式(I.3)以外, 后面我們时常将地震仪方程式写成下列形式:

$$\ddot{x} + 2h\dot{x} + n_0^2x = -V\ddot{\xi}, \quad (\text{I.4})$$

此处

$$h = \frac{H}{2M}, \quad n_0^2 = \frac{K}{M}. \quad (\text{I.4a})$$

①我們將与速度有关而方向与其相反的力称为阻尼力。将此力按 $\dot{x}$ 的乘方展开, 我們得到幂級数

$$a_1\dot{x} + a_2\dot{x}^2 + a_3\dot{x}^3 + \dots$$

應該沒有自由項, 不然就將有摩擦存在。在液体阻尼作用的情况下, 如果阻尼板垂直于其面而运动, 則在相当大的运动速度时, 高方次項(尤其是平方項)就不能被忽略掉。然而, 到現在还没有証明, 在勘探地震学中常遇到的振幅及頻率条件下, 包含着 $\dot{x}$ 方次高于1的各项能够严重地影响振动过程的进行。

因此, 允許我們只討論理想阻尼器的特殊情况, 即其阻尼作用与速度成比例。

我們不准备討論摩擦作用, 因为在光学記錄或电学記錄(在勘探地震学中几乎毫无例外地都使用这种記錄方式)时, 摩擦的作用十分微小。

下面将要証明： n_0 是不受阻尼作用的地震仪质量的固有振动圓頻率，且

$$n_0 = 2\pi f_0 = \frac{2\pi}{T_0}, \quad (\text{I.46})$$

此处 f_0 为每秒钟內的振动数目， T_0 为非衰减的固有振动周期。

§2. 右端为零的地震仪微分方程式的解(固有振动)

我們首先研究地震仪慣性质量的固有振动。在这种情况下， $\xi = 0$ ，而方程式(I.4)具有形式：

$$\ddot{x} + 2h\dot{x} + n_0^2 x = 0. \quad (\text{I.5})$$

将 $x = e^{-h t} u$ 代入，方程式(I.5)变成下列形式：

$$\ddot{u} + (n_0^2 - h^2)u = 0. \quad (\text{I.5a})$$

應該划分为三种情况：

$$1) n_0 > h; \quad 2) n_0 < h; \quad 3) n_0 = h.$$

1. 其中第一种情况相当于方程式(I.5a)的周期性解答：

$$u = C_1 \cos n_1 t + C_2 \sin n_1 t, \quad (\text{I.5b})$$

此处

$$n_1^2 = n_0^2 - h^2. \quad (\text{I.5c})$$

考虑到前面所做的代換，我們得到：地震仪的质量(在 $n_0 > h$ 时)将完成衰减振动

$$x_1 = e^{-h t} (C_1 \cos n_1 t + C_2 \sin n_1 t) = A e^{-h t} \sin(n_1 t + \psi). \quad (\text{I.6})$$

2. 在 $n_0 < h$ 时，方程式(I.5a)具有形式为

$$u = C_1 e^{n_2 t} + C_2 e^{-n_2 t},$$

此处

$$n_2^2 = h^2 - n_0^2.$$

地震仪质量的运动将带有非周期的性质：

$$x_2 = e^{-h t} (C_1 e^{n_2 t} + C_2 e^{-n_2 t}). \quad (\text{I.7})$$

3. 在 $n_0 = h$ 时，方程式(I.5a)变换如下：

$$\ddot{u} = 0. \quad (\text{I.5d})$$

由此

$$u = C_1 t + C_2,$$

因之

$$x_s = e^{-h t} (C_1 t + C_2). \quad (\text{I.8})$$

这种情况称为非周期性边界。和它相应的阻尼作用称为临界阻尼。

在各种情况中，常数 C_1 与 C_2 都决定于运动偏移和速度的起始值。例如，在 $t=0$ 时

$$x = x_0 \quad \text{而且} \quad \dot{x} = 0,$$

则在：1) $n_0 > h$ 时，

$$x_1 = x_0 e^{-h t} \left(\cos n_1 t + \frac{h}{n_1} \sin n_1 t \right),$$

2) $n_0 < h$ 时，

$$x_2 = \frac{x_0}{2n_2} e^{-h t} [(n_2 - h)e^{n_2 t} + (n_2 + h)e^{-n_2 t}],$$

3) $n_0 = h$ 时，

$$x_3 = x_0 e^{-h t} (h t + 1).$$

我們比較詳細地研究周期性解答

$$x = A e^{-h t} \sin(n_1 t + \psi) \quad (\text{I.6a})$$

此处 $n_1^2 = n_0^2 - h^2$.

根据一般原則，我們求极小与极大的时刻：

$$\dot{x} = A e^{-h t} [n_1 \cos(n_1 t + \psi) - h \sin(n_1 t + \psi)] = 0,$$

因而

$$\operatorname{tg}(n_1 t + \psi) = \frac{n_1}{h} = \text{常数}. \quad (\text{I.9})$$

如果 t_0 是这个方程式的一个解答，則

$$t_k = t_0 + k \frac{\pi}{n_1} \quad (k = 1, 2, 3, \dots)$$

也将是方程式 (I.9) 的解答。

如果 t_k 相当于曲綫的极大，則 t_{k+1} 相当于极小。显然， $(t_{k+1} - t_k)$ 的差值将等于振动周期之半。因而，周期值为

$$T = 2(t_{k+1} - t_k) = \frac{\pi}{n_1}.$$

由此我們得出結論： n_1 是衰减振动的頻率。如果沒有衰减作用，則固有振动的頻率等于 n_0 。

衰减作用使固有振动的頻率减小，而使其周期增加。

其实，公式(I.56)还可以写成这样：

$$\left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 = \left(\frac{2\pi}{T_0}\right)^2 - h^2, \quad (\text{I.66})$$

此处 T_0 为非衰减振动的周期。

h 越接近于 n_0 ，周期 T 就越大。在 $h \rightarrow n_0$ 时， $T \rightarrow \infty$ ，而运动变成非周期性的。

我們来测定衰减振动时振幅随時間衰减的規律。

用 A_k 表示第 k 个振幅，用 A_{k+1} 表示第 $(k+1)$ 个振幅，我們将有

$$\begin{aligned} A_k &= Ae^{-h t_k}, \\ A_{k+1} &= Ae^{-h t_{k+1}} = Ae^{-h t_k - \frac{hT}{2}}, \end{aligned}$$

由此

$$\frac{A_k}{A_{k+1}} = e^{\frac{hT}{2}}.$$

后面两个振幅之比称为衰减（阻尼）系数。这个比值的对数（以十为底）称为对数衰减 Δ ：

$$\Delta = \lg e^{\frac{hT}{2}} = \frac{hT}{2} \lg e \quad (\text{I.10})$$

衰减作用具有这种特征：对数衰减与振幅（及時間）无关。

用 Δ 来代替 h ，可以将公式(I.66)化为下列形式：

$$T_0 = \frac{T}{\sqrt{1 + \frac{\Delta^2}{\pi^2 \lg^2 e}}} = \frac{T}{\sqrt{1 + 0.537 \Delta^2}}. \quad (\text{I.68})$$

可以利用这个公式，根据衰减作用下的周期值及对数衰减，計算出地震仪自由（非衰减的）振动的周期 T_0 。