

地震动的谱分析入门

〔日〕大崎顺彦 著 吕敏申 谢礼立 译

45
52

地震出版社

地震动的谱分析入门

〔日〕大崎顺彦 著
吕敏申 谢礼立 译

地震出版社

1980

内 容 提 要

本书是一本关于地震记录谱分析的基础读物,结合地震工程中的问题,对当前常用的有关数字分析方法作了系统的介绍与说明,并附有各种计算例题和计算机程序。

实际观测资料的数字频谱分析方法是目前地震及地震工程领域中一项有效方法,对于提取记录中的有用信息,以及压制干扰,排除噪音、误差等,都有良好的效果。

本书可供地震及地震工程科研工作者、从事结构动力设计(抗震、抗风浪、抗爆等)的工程设计人员、有关高等院校教师与高年级学生参考。

大崎顺彦 著

地震动のスペクトル解析入門

鹿岛出版会

昭和 51 年 7 月 30 日发行

地震动的谱分析入门

[日] 大崎顺彦 著

吕敏申 谢礼立 译

地震出版社出版

北京三里河路 54 号

北京印刷一厂印刷

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

850×1168 1/32 $9\frac{1}{8}$ 印张 237 千字

1980 年 3 月第一版 1980 年 3 月第一次印刷

印数: 0001—4,500

统一书号: 13180·69 定价: 1.10 元

序

对于白色光通过棱镜后分成七色的光谱，人们在小学的时候已经熟悉了。在自然界出现的虹就是一种巨大的谱。谱，并不局限于光，它的应用范围非常广泛，这种概念在很久以前就已经有了。今天，在自然科学和工程的各个领域，它将广泛地用来反映各种各样事物的本质特征。

在抗震设计中，地震动或地震时结构物的振动可以说是谱分析中一个最适合的对象。然而，在地震工程的领域内，谱的概念开始通用还是比较近的事情。在建筑领域内，由于高层建筑的动力设计和大型土木结构物的出现，才开始使用谱。到了今天，各式各样的谱已在实用设计中经常出现和得到应用。

本书是关于谱分析的初步的入门书。说得具体些，是一本讲解地震方面常见谱的种类、工程意义、以及“求谱的”分析方法的简明的读本。在谱的种类上，将谈到周期频度谱、概率密度谱、富里叶谱、功率谱、自相关函数和反应谱等。

本书以初学者容易读懂和理解为目标，采用了尽可能平易而细致的写法。作者总在考虑，如何才能使这本书在某种程度上达到这个目标。为了使它浅近易懂，宁肯省略掉一些必要的公式推导，改用言词来说明，同时使读者能在理论上获得提高。在这些方面作者尽了最大的努力。

但是，尽管如此，在下列两种情况下，某些读者还会感到本书存在难懂的地方。首先，本书是从最基本的地方说起的，因而只有在理解了这些最基本的东西以后，以此作为基础，才能逐步地循序渐进。它不象字典，可以从任何地方开始都能读懂。所以当读者遇到难懂的地方，其原因之一是对以前的某些地方存在理解消化不足

之处。遇到这种情况，只好请读者从头进行复习。

另一个难懂的原因，涉及到写这种入门书的一个重要问题，是作者不了解读者不懂的原因究竟在那里。作者时常旁听自己的大学生长子回答中学生次子提问的数学问题，作者和他们相比应该说是具有高深的数学水平了，但时常感到他的讲解方法之好是使我吃惊的。这可能是由于大学生通过自身最近的体验，能够确切地抓住中学生难懂的关键在什么地方。如果由于本书存在这一类难懂的地方，认为作者写入门书还不合格的话，那就只好无可奈何了。

前面说过，本书是讲解“求谱的”分析方法的。但本书的标题“谱分析”中还包含“使用谱的”分析的另一个方面。也许这一个方面倒是谱分析的舞台，是本书的任务。但是感到，详细讲解这一方面，本书的内容就过于冗长了，所以只在最后一章中大致地提一提。

如果由于读了这本书以后，读者能够进一步进入高级的谱分析的领域，作者是最为高兴的。对于工作繁忙的读者，在取得了对谱的大致理解以后，感到比以前更加熟悉的话，作者也是感到欣慰的。

作 者

1976 年 6 月

目 录

序	1
第一章 前言	1
1.1 谱	1
1.2 本书的目的	2
1.3 算例与程序	6
1.4 记录的数字化	11
第二章 周期-频度谱	15
2.1 零交法	15
2.2 峰点法	23
2.3 分析周期-频度分布的程序	25
第三章 概率密度谱	34
3.1 概率密度	34
3.2 高斯分布	38
3.3 概率密度分布的程序	39
第四章 富里叶谱	44
4.1 有限富里叶近似	44
4.2 计算有限富里叶系数的程序	61
4.3 富里叶谱	64
4.4 巴什瓦定理	76
4.5 有限复富里叶级数	78
4.6 快速富里叶变换	87

4.7	快速富里叶变换程序	95
4.8	富里叶级数	103
4.9	富里叶积分	107
4.10	富里叶谱的意义	111
第五章 功率谱, 自相关函数		120
5.1	功率谱	120
5.2	谱密度函数	123
5.3	自相关函数	125
5.4	求自相关系数的程序	130
5.5	自相关函数与功率谱	133
第六章 求谱和自相关函数的程序		137
6.1	计算程序	137
6.2	打印程序	143
第七章 谱的平滑化		152
7.1	褶积的富里叶变换	152
7.2	数据窗	155
7.3	谱窗	159
7.4	滞后窗	164
7.5	数字滤波器	168
7.6	谱窗的选择	171
7.7	谱的平滑化程序-1	175
7.8	谱的平滑化程序-2	180
第八章 反应谱		187
8.1	单质点系的振动	187

8.2	无阻尼自由振动	190
8.3	阻尼自由振动	192
8.4	冲击振动	197
8.5	叠加积分	200
8.6	地震动的反应	202
8.7	反应的数值计算	205
8.8	地震反应谱	222
8.9	标准反应谱	230
8.10	反应谱的意义	232
8.11	反应谱与富里叶谱的关系	236
第九章 求反应谱的程序		240
9.1	计算程序	240
9.2	打印程序	249
第十章 时域与频域		257
10.1	微分	257
10.2	积分	262
10.3	微分、积分的程序	267
10.4	反应分析体系	276
第十一章 后记		282

程序目录

计算程序

PERD	(周期-频度分布).....	28
PROD	(概率密度分布).....	40
FOUG	(有限富里叶系数).....	61
FAST	(快速富里叶变换).....	99
AUTO	(自相关系数).....	130
SPAG	(富里叶谱、功率谱、自相关函数).....	138
LWIN	(用滞后窗作平滑化谱).....	176
SWIN	(用谱窗使谱平滑化).....	181
INAG	(加速度记录的积分).....	211
RESS	(反应谱的计算).....	241
RESP	(单质点系的最大反应).....	245
DIFR	(富里叶变换微分).....	270
INFR	(富里叶变换积分).....	273

打印程序

SPAR	(谱、自相关函数的打印).....	147
WAPR	(波形的打印).....	216
REPR	(反应谱的打印).....	251

第一章 前言

1.1 谱

提起谱，人们最先想到的恐怕是太阳光通过棱镜时出现的红、橙、黄、绿、青、蓝、紫七色并列的美丽的光谱。太阳光线看起来是没有颜色的或者是白色的，它通过棱镜能分解成七色，这是牛顿在 1666 年首先观察到的。分解后的七种颜色，由波长约 8000 埃的红色起，到 4000 埃的紫色为止，以波长为序，依次排列。

谱，除了光谱以外，还有将复杂的谐音分解为单纯的音调并按频率顺序排列的音响谱，将粒子依其质量排列的质量谱等。它是多种多样的。

如果对谱的概念，下一个最一般的定义，可以这样说：将含有复杂组成的东西，分解为单纯的成份，然后按照这些成份的特征量的大小，依次排列成的东西。

在概率统计论中，所谓频度分布或者概率密度，就其意义说，也是一种谱。学校考试，将班内的学生按 5 分、4 分等评分所进行的分类，我们也可以把它叫做成绩谱。

将前述的白色光的谱仔细观察，色与色之间的分界是不清楚的，例如，红色与橙色之间，绿色和青色之间，是逐渐变化的。也就是说，颜色的变化是连续的。因而这样的谱叫做连续谱。与此相反，钠所发出光的谱，清清楚楚地只有一条黄色的光线；氢原子所发出光的谱也是由红、青、蓝、紫四条线组成的。这样由不连续的、互相分隔的线所组成的谱叫做不连续谱或线谱。

一般说来，发光物质谱的排列状态和物质的微观构造有密切的

关系，谱分析的意义就在于，依靠这种物理方法，可用来探索物质世界的信息。借助天体所发的光来了解天体及其周围物质的状况时，也广泛地使用着谱分析的方法。

1.2 本书的目的

当然，不打算在这本书中讲光谱分析。我们要学的是比光更为实际的地震工程中地震波的谱分析问题，这才是本书的目的。

不过。由于光也是一种电磁波，与地震波在谱分析的本质上也并没有什么区别。事实上，在地震波分析中，很多地方仍然借用着光谱方面的语言，例如线谱、分辨率等。但从不同点来说，光的波长，是以埃 ($1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{m}$) 为量度单位的，而地震波的波长为几十米到几百米。

顺便提一下，在抗震工程的理论上，可把结构和地基看作一种电气回路，在许多场合下可借用电气回路中的阻抗、导纳之类的有关术语。事实上，要是这样来讲解地震波的谱分析，连同地震工程中的阻抗、导纳等在内，内容是非常深的。在这本入门书中，将不涉及这样高深的内容。

首先请看图 1.1。这是在高层建筑的动力分析中常用的、读者所熟悉的。或者至少在名称上曾经多次听到过的，即1940年5月18日在埃尔森特罗 (El Centro) 记录到的加速度波的南北向 (NS) 分量。最大加速度为 326 伽；持续时间，是从实际记录上截取的，为 8 秒。

附带提一下，伽(gal)是加速度单位。

大家知道， $\text{gal} = \text{cm}/\text{sec}^2$ 。因而，重力加速度 $g = 980 \text{ gal}$ ，静力法抗震设计所用的 $0.2 g$ 就是

$$0.2 \times 980 = 196 \text{ gal}$$

类似地，用 kinc 表示地震动的速度单位， $\text{kinc} = \text{cm}/\text{sec}$ 。gal 的名

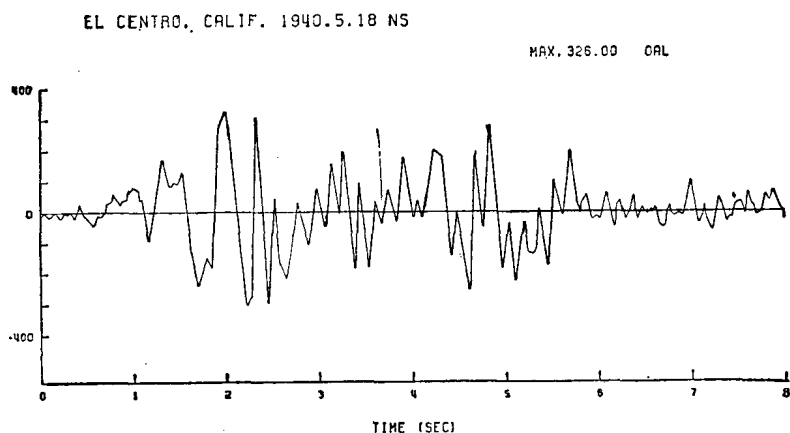


图 1.1 埃尔森特罗地震波

称是由说过“地球仍然在转动”这句名言的伽利略而来的。kine的来源则还不知道，如果读者中有知道的，请告知为感。

图 1.1 的埃尔森特罗波形的出名是有来历的。以前在历次大地震发生时，地震仪的指针早就振飞了。因此大地震的记录一次也没有得到过。著名的关东地震(1923年)的记录，虽然最近对它进行了各种各样的复原尝试，实际上所完成的还是不能如同真实的一样。这样不行，所以就制作了强震仪。强震仪，按照设计要求，在破坏性大地震时不会震坏，能如实地记录加速度波形。这一点，和飞机坠落时飞行记录器留下的记录是相似的。

这样的强震仪，在美国从三十年代初期起，主要在加利福尼亚各地开始设置。直到 1940 年，才完好地记录到最大加速度超过 300gal 的强地震。这就是图 1.1 中的记录。它才能说是“人类第一次抓到的地震的整体”。这个地震通常称为埃尔森特罗地震，正式名称是 1940 年的帝谷 (Imperial Valley) 地震，震级 $M=7.1$ ，这个地震记录就以取得记录的街名埃尔森特罗命名。

图 1.2 为美国加利福尼亚州的地图，埃尔森特罗在避暑胜地帝

谷的南端，与墨西哥十分接近。作者曾经特意到那里去看过，虽然叫做谷，和日本的狭谷不一样。两侧的山像是隐约望不到头的大平



图 1.2 加利福尼亚州，埃尔森特罗与塔夫特

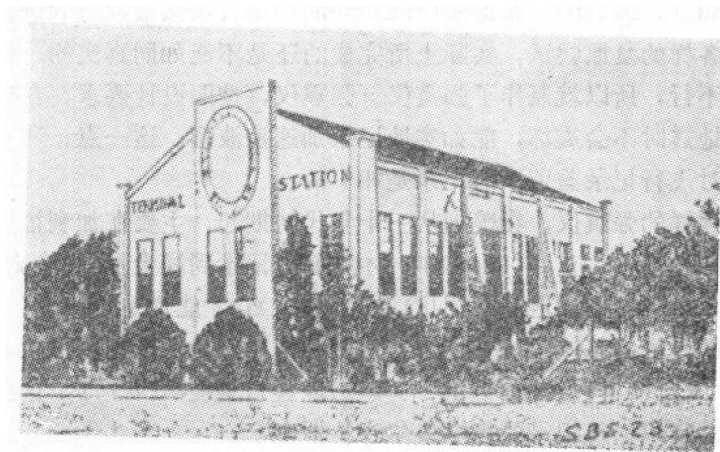


图 1.3 南希阿拉电力公司埃尔森特罗变电所

地，从笔直的公路可以看到零星的农舍屋顶。埃尔森特罗是这样的农村地带的中心街，在那里有一个变电所(图 1.3)的地下室至今仍放着纪念性的强震仪。

在图 1.2 中，除了埃尔森特罗，还标有在动力分析方面人们所熟悉的地名塔夫特 (Taft)，在这里曾记录了东西向最大加速度为 147 gal 的地震，即 1952 年 7 月 21 日的阿尔文-塔哈查皮 (Arvin-Tahachapi) 地震。

在地震波的特性中，对抗震工程有重要意义的量是地震波的

- i) 最大振幅
- ii) 持续时间
- iii) 波数
- iv) 振动周期
- v) 能量。

其中 i) 最大振幅，因地震仪的灵敏度是已知的，所以只要采用比长仪，将标尺对准记录，就可直接读取。ii) 持续时间，记录中通常有时间讯号，可以直接读出。iii) 波数，由主波大致持续的个数来粗略估计。

然而，iv) 振动周期，以图 1.1 的地震波为例，它是由什么样的频率成份组成的，其中究竟哪些成份是主要的，是不大清楚的。v) 能量，几乎难以估计。而且这些波对结构物会有什么样的作用，仅从记录上是根本看不清楚的。拿埃尔森特罗地震波的记录来说，初次看到的读者，对于这个地震波中含有周期 2.5 秒的波，因而隐藏着对高层建筑有严重影响的周期很长的分量，这大概是难以想象的。这正象看上去什么也没有的白色光，通过棱镜就会出现七色光似的。谱分析的目的就是，将本来什么也看不出来的地震波记录，作某些加工，使波的性质清楚地显示出来；与此同时，采取某种有效的方法来考虑它对结构物的影响。另一方面，根据观测到的波的谱，能够研究波经过的途径，以及途中受到过哪些影响，也可以说

能弄清它的来龙去脉。

这本书就是为了掌握这类地震波的谱分析。通过实际操作，对于各式各样的谱，其中主要的都能接触到，有可能的话，还希望把相互关系也能弄清楚。为了这个目的，对于复数、富里叶变换、概率统计理论、振动理论等，有不少或许是读者感到棘手的東西，必须加以学习。本书也尽可能浅近地给以解说，同时尽可能浅近地讲解各种各样谱的分析方法和理论根据，以及分析结果的工程意义等。

1.3 算例与程序

有关富里叶谱和反应谱的教科书和参考书是很多的。本书在内容上也没有什么特别的地方。不过，为了加深读者的理解，仍想另外作些新的尝试。

首先，根据作者自身的经验，在学习有关理论和计算方法时，有例题和算例就非常容易了解。因为有了实际的数字、图形等具体材料，就不会单纯只用“头”思考，而且可用“眼”来看，这就起到了帮助理解的重要作用。因而，在本书中打算多举一些例题。图 1.1 的埃尔森特罗地震波，将多次作为例题出现。

另外，如图 1.4 中的极简单的波形，也要作为例题多次引用。它大体上具有地震波的形式，从这一点上说是不能有比它更为简单的了。以后就简单地称这个波为例题波。这样做，有如下的理由。

我们一般并不是特殊的天才，用“眼”读了理论文章，虽自以为“懂得了”，实际上并不是这样的，只不过是陷入一种错觉，这是常有的事。作者在学生时代，讲课老师教导：“读科学论文，要一段一段地读，读完后把它翻拢，用自己的手，从最初的式子起全部复述出来，能完全这样做时，才可以说对这个论文已经理解了。”老师自然是很了不起的，作者则不是好学生，到现在为止，实际上实行得并不怎么样。但感到，理解学问，不仅要用“眼”，而且要用“手”，

则是一项真理。

因此，为了让读者也能充分利用“手”来理解，就提出了图 1.4 的简单波来作例题。由于波形极为简单，读者可用手算或用简单的电子计算机自行复算，不难看出结果是否正确。

其次，由地震仪记录下来的实际地震动，和有意义的波形一起，往往将毫无意义的不规则“噪音”也记录下来了。不用说，谱分析的对象只是有意义的波形。而后一种不规则波多为外来干扰，应尽量把它去掉。但是从另一方面说，将地震波当作一种噪音，即当作随机波来处理，也是适宜的。

在本书中，不准备深入地涉及随机波的理论。但是，噪音也是一个重要的问题，在这里对噪音进行讲解，怎么说也不是没有意义的。为此，用图 1.5 的波形作为第 3 号例题波，称它为随机例题波。这个波完全是由前后之间毫无关系的相邻点随机地连成的，完全不是由某种特定的频率成份组成的。在这一点上，它和包含各种色彩的白色光相似，称为白噪声(white noise)。

这本入门书的另一个尝试是，为了使所有的学习内容都尽可能结合实际应用，对于谱分析的电子计算机程序作了充分的说明。在本书中，计算式与程序的表达式之间存在某些不同的地方，应加以注意。例如，对 N 个 x 数值的总和，通常在数学上的表达式写作

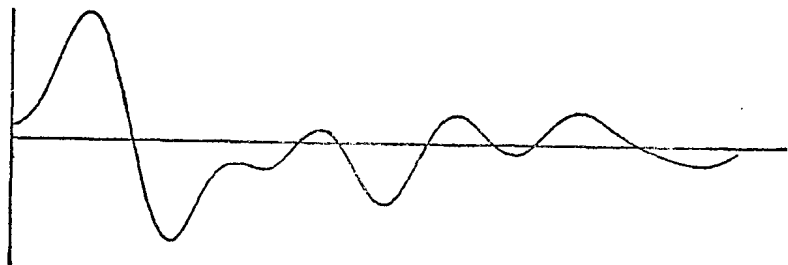


图 1.4 简单的例题波

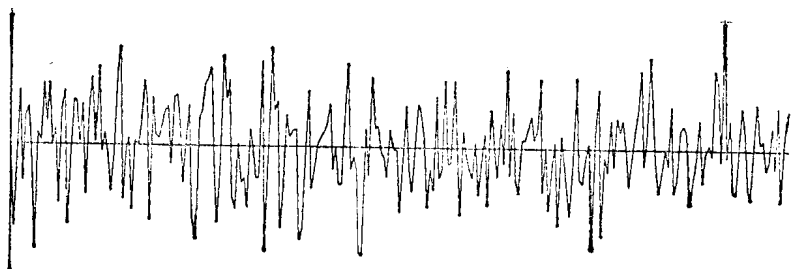


图 1.5 随机例题波

$$x_0 + x_1 + x_2 + \cdots + x_{N-1} = \sum_{m=0}^{N-1} x_m \quad (1.1)$$

在本书中，当然也是这样书写算式的。然而在计算机的程序中， x 的下标不是从 0 开始，而是从 1 开始，因而在程序中，每项都要添个 1，式(1.1)就改写为

$$X(1) + X(2) + \cdots + X(N) = \sum_{M=1}^N X(M) \quad (1.2)$$

因而在算式中凡有 k 或 m 的地方，在程序中通常改为 $(K-1)$ 或 $(M-1)$ 。但是在计算机的输出处，仍旧都还原为式(1.1)的形式。

此外，由于计算机不同，其输入、输出形式也是不同的，用来作图(plot)的方法也是千差万别的。在这里，为了不涉及这些因素和计算机的容量，尽可能用某种一般性子程序形式来表示程序。对于调用它们的主程序，请读者自行分别制作。还有，这里所说的程序都是按 FORTRAN (水准 7000) 语言写的，因本书不是 FORTRAN 的入门书，对 FORTRAN 就不作专门说明。不了解的读者，请另找参考书学习。还有，对于不适合水准 7000 的计算机，在不能计算复数的情况和排列的匹配大小不能使用的情况下，往往就必须直接写出一部分程序。这里也涉及到程序最优化 (optimization) 的问题。例如在写下列程序