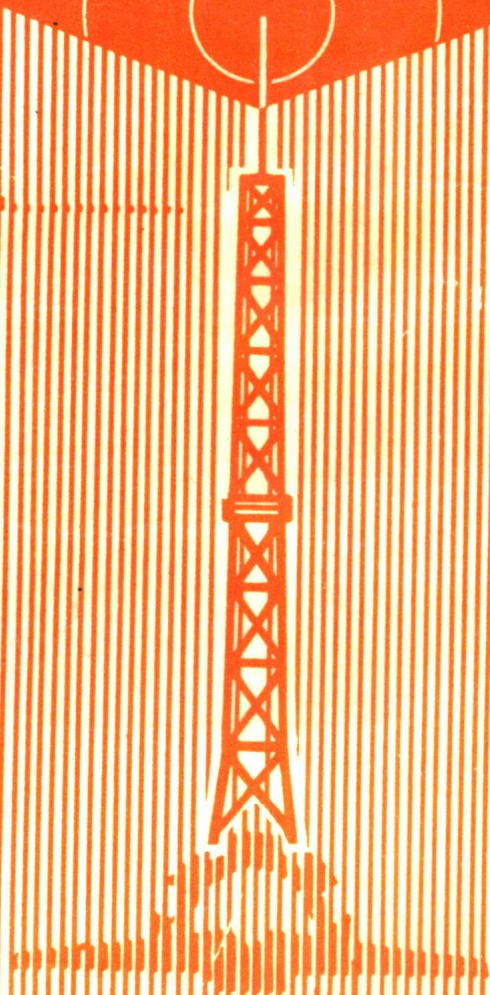


高等学校教材

现代时域测量

孙圣和 等编著



哈尔滨工业大学出版社

现代时域测量

孙圣和 刘明亮 施正豪 编著

哈尔滨工业大学出版社

内 容 提 要

本书较系统地阐述了现代时域测量的基本内容。主要讨论脉冲波形参数的定义和算法、获得数字反卷积稳定解的方法和最佳估计的判据、时域测试的基本仪器与系统以及从测试系统应用角度阐明时域测量的基本技术。

本书可作为电子仪器、测量技术以及无线电电子技术类专业本科生和研究生的教材或参考书，也可供有关专业工程技术人员参考。

现 代 时 域 测 量

孙圣和 刘明亮 施正豪 编著

*

哈尔滨工业大学出版社出版
新华书店首都发行所发行
哈尔滨工业大学印刷厂印刷

*

开本787×1092 1/16 印张17.75 字数350 000

1989年8月第1版 1989年8月第1次印刷

印数 1—2 000

ISBN 7-5603-0159-2/TN·11 定价3.30元

前 言

本教材是按电子工业部的工科电子类专业教材1986—1990年编审出版规划，由无线电技术与信息教材编审委员会仪表与测量编审小组征稿，推荐出版，责任编辑张世箕。

本教材由哈尔滨工业大学担任主编，成都电讯工程学院张世箕教授担任主审。

本课程的参考学时数为30学时，其主要内容为现代时域测量的基本概念、基本理论、基本工具和基本应用。第一章概论，介绍时域测量的一般知识。第二章是现代时域参数测量的基础，主要介绍时域测量中的基本概念、定义、算法及脉冲波形参数估计理论。第三章主要讨论快速傅里叶变换与快速卷积。第四章是现代时域测量的基本理论。主要讨论有噪声时获得数字反卷积稳定解的方法及最佳稳定解的判据。第五章和第六章是现代时域测量的工具，主要阐述其原理。第七章从时域测试系统应用角度，阐明时域测量基本技术。本书作者多年为研究生讲授“现代时域测量技术”课程，并从事多项国家自然科学基金资助的有关时域测量课题的研究。因此，本书内容反映了作者的教学经验和科研成果，同时汇集了国内外许多时域测量专家的研究成果，其中，着重参考了美国 N.S. Nahman 教授1982年8月在哈尔滨工业大学讲学的讲稿。在使用本教材时应加强上机练习和实验。

本书第一章、第二章和第七章的作者为孙圣和；第三章和第四章的作者为刘明亮；第五章和第六章的作者为施正豪。全书由孙圣和统稿。由于作者水平和经验有限，书中难免还存在一些缺点和错误，殷切希望广大读者批评指正。

作 者

于哈尔滨工业大学

目 录

前言

第一章 概论

§1-1 时域测量学的对象与任务	(1)
§1-2 时域测量的特点	(2)
§1-3 线性系统的特性	(3)
§1-4 线性系统的估计	(6)
参考文献	(8)

第二章 脉冲波形参数与频谱幅度

§2-1 脉冲标准	(10)
一、基本脉冲术语及定义	(10)
二、脉冲测量与分析	(12)
§2-2 脉冲波形参数估计	(18)
一、RC 电路参数估计	(19)
二、高斯系统参数估计	(20)
三、非高斯系统参数估计	(25)
§2-3 脉冲频谱幅度	(28)
一、傅里叶变换的基本原理	(29)
二、傅里叶变换的复量特性	(29)
三、傅里叶变换的单位特性	(31)
四、傅里叶变换的连续特性	(33)
五、傅里叶变换的应用实例	(34)
附录2-1 有限时间重复函数傅里叶变换 $V_r(f)$ 的推导	(37)
附录2-2 单个矩形脉冲函数 $v_p(t)$ 的推导	(38)
参考文献	(38)

第三章 快速变换与卷积

§3-1 引言	(39)
§3-2 快速傅里叶变换	(40)
一、DFT的矩阵表示法	(40)
二、时间抽取算法	(42)
三、频率抽取算法	(46)
§3-3 IDFT 的算法	(48)
§3-4 实输入序列的FFT算法	(49)
一、同时计算两个实序列的FFT算法	(49)
二、用 N 点变换计算 $2N$ 个样本点的变换	(51)
§3-5 FFT用于时域测量中应注意的问题	(52)
§3-6 FFT在频谱分析应用中的举例	(54)
一、脉冲激励信号的频谱分析	(51)
二、用FFT分析阶跃波形	(55)

§3-7 FFT 卷积	(56)
一、周期卷积	(56)
二、圆周卷积	(58)
三、线性卷积	(60)
四、各卷积之间的关系	(61)
§3-8 维诺格兰算法 (WFTA)	(62)
一、一维DFT的多维映射	(62)
二、短序列的WFTA	(65)
三、长序列的WFTA	(68)
§3-9 其它快速变换	(73)
一、数论变换	(73)
二、沃尔什变换	(76)
参考文献	(76)
第四章 反卷积	
§4-1 引言	(77)
§4-2 变换域反卷积	(78)
§4-3 傅里叶变换(频域)反卷积	(79)
一、噪声对反卷积解的影响	(79)
二、双参数滤波法	(81)
三、单参数滤波法	(84)
四、补偿法	(87)
五、单参数滤波法与补偿法的性能评估	(90)
§4-4 倒谱反卷积	(93)
一、基本知识	(94)
二、离散希尔伯特变换	(97)
三、相位的断折与伸展	(99)
四、避免相位断折的方法	(100)
五、倒谱反卷积的计算流程	(102)
六、一些典型序列的倒谱	(103)
七、倒谱反卷积的应用举例	(107)
§4-5 时域反卷积	(109)
一、经典时域反卷积	(109)
二、迭代时域反卷积	(112)
三、时域平均滤波反卷积	(113)
四、时域复合滤波反卷积	(115)
§4-6 共轭梯度反卷积	(118)
§4-7 用卷积计算反卷积	(120)
一、用圆周卷积计算反卷积	(121)
二、用线性卷积计算反卷积	(124)

§4-8 反卷积稳定解的判据	(126)
一、组合判据	(126)
二、最佳判据	(127)
参考文献	(131)
第五章 时域测量的基本仪器与设备	
§5-1 引言	(133)
§5-2 脉冲信号发生器	(134)
一、概述	(134)
二、常见脉冲波形的幅度谱	(137)
三、水银开关脉冲发生器	(140)
四、雪崩晶体管脉冲发生器	(141)
五、阶跃恢复二极管脉冲发生器	(143)
六、射频脉冲发生器	(144)
七、微波脉冲发生器	(147)
八、脉冲波形及其FFT	(147)
§5-3 时域接收设备与取样技术	(155)
一、概述	(155)
二、通用电子示波器	(156)
三、取样示波器	(157)
四、取样头	(160)
五、取样系统	(162)
§5-4 参考脉冲发生器与校准器	(165)
一、参考脉冲发生器	(165)
二、时间校准器	(170)
三、幅度校准器	(172)
§5-5 传输线与接头	(173)
一、传输线	(173)
二、接头	(175)
参考文献	(180)
第六章 时域自动测试系统	
§6-1 时域自动测试系统的组成及工作原理	(182)
一、基本时域自动测试系统	(182)
二、外差式时域自动测试系统	(183)
三、几种实际系统的介绍	(184)
§6-2 接口系统设计考虑	(190)
一、初级接口设计考虑	(190)
二、次级接口设计考虑	(191)
三、控制时序	(192)

§6-3 时域自动测试系统的误差分析	(194)
一、误差分类	(194)
二、随机误差	(194)
三、系统误差	(204)
四、时域到频域的变换误差	(208)
五、机械位移误差	(209)
§6-4 由时域噪声引起的频域误差	(209)
一、频域误差上限	(210)
二、频域误差下限	(214)
三、误差功率	(216)
四、噪声实例	(217)
§6-5 减小误差的方法与系统校准	(221)
一、波形平均和最佳扫描方法	(221)
二、垂直非线性校正	(226)
三、水平非线性校正	(227)
四、三点自适应扫描	(229)
五、水平时间校准	(232)
参考文献	(234)
第七章 时域自动测试系统的应用	
§7-1 引言	(236)
§7-2 脉冲波形时间参数和频谱幅度测量	(239)
一、脉冲波形时间参数测量	(240)
二、脉冲频谱幅度测量	(241)
§7-3 时域反射测量	(242)
一、时域反射测量的典型电路接法	(242)
二、时域反射测量原理	(243)
三、时域反射计系统	(246)
§7-4 时域传输测量	(250)
一、时域传输测量基本电路接法	(250)
二、传输参数 S_{21} 的测量原理	(253)
三、反射参数 S_{11} 的测量原理	(255)
§7-5 实际应用举例	(255)
一、同轴与波导元件的测量	(256)
二、传输线的测量	(263)
三、材料的测量	(266)
四、脉冲电磁场与天线的测量	(269)
五、光导开关的测量	(273)
参考文献	(275)

第一章 概 论

本章讨论时域测量学的对象和任务、时域测量的特点、线性系统的特性以及线性系统瞬态响应的估计。

§ 1-1 时域测量学的对象与任务

测量就是利用专门的技术工具,通过实验的方法获得客观事物定量信息的过程。具体地说,测量就是将描述事物特性的待测物理量与同类已知量相比较,拿这个已知量作为计值单位,定出被测量是该单位的若干倍或几分之几。换句话说,测量就是通过实验求出被测量与计值单位比值的过程。这个比值连同测量单位一起,称为被测量的量值。

在无线电电子测量技术中,测量对象就是宽频率范围(直流到光频)内信号与系统的参数及特性。作者认为,将经常遇到的测量对象归为信号特性和系统特性两类较为科学。信号特性主要包含信号的电压与功率、频率与波长、周期与时间、相位与延迟、波形与频谱等;系统特性,包括集总与分布参数系统的特性,例如,电阻、电感、电容、品质因数、阻抗、导纳、介电常数、导磁率、驻波比、反射系数、散射系数、衰减以及单位阶跃响应或单位冲激(脉冲)响应与传递函数等。对于有些参数,例如,频率、相位和延迟等,既可列为信号特性测量也可列为系统特性测量,将其归为信号特性测量类,是因为信号特性测量除其本身任务外,又作为系统特性测量的基础。

同一物理信号和系统特性可以在时间和频率两个域内描述。因此,对信号和系统特性的分析与测量相应地采用时域和频域两种方法。频域测量是以被测信号和被测系统在频率领域的特性为依据,研究的是被测对象的复数频率特性(包括幅度-频率特性和相位-频率特性),即信号的频谱和系统传递函数。时域测量则以被测信号和系统在时间领域的特性为依据,研究的是被测对象的幅度-时间特性,即信号波形和系统的单位阶跃响应或单位冲激响应。

在频域测量中,常用的测试信号和待测信号是正弦波,故人们常把频域测量又称为正弦测量;而在时域测量中,常用的测试信号和待测信号是脉冲及方波或阶跃信号,因而也相应地把时域测量称为脉冲测量。另外,在频域测量中,必须待被测系统达到稳定状态时进行测量,故又将其称为稳态测量;而在时域测量中,待测信号和系统的特性全是瞬变过程,因此,又称为瞬态测量。

在时域测量中,信号波形的采集与分析是最根本的任务。应当注意,信号(或脉冲)与波形不同(见图1-1),此处的波形是指人们利用一定的工具和技术观测得到的,而信号是实际的客观存在。由于测量过程的不完善,观测得到的波形不可能精确地复制信号。因此,时域测量学的主要任务是研究精确采集高速脉冲信号的工具与技术;

讨论测量系统输出的波形不同于输入信号的原因以及如何描述和减小波形与信号（或脉冲）之间的差别；讨论波形数据的处理和利用问题。例如，对波形数据进行平均、滤波、拟合、相关等处理，提高其信噪比；对波形数据进行反卷积，可得到信号和线性系统冲激响应的估计；对波形数据进行傅里叶变换，可得信号和线性系统的频域特性；利用波形数据可以描述脉冲天线、光纤、电磁场一类的多模宽带系统和信号的特性；可以描述在激光、数字电路和非线性控制中产生振荡的非线性系统的特性；还可以描述随机过程总体特性，进行相关测量，对相关数据进行傅里叶变换分析等等。

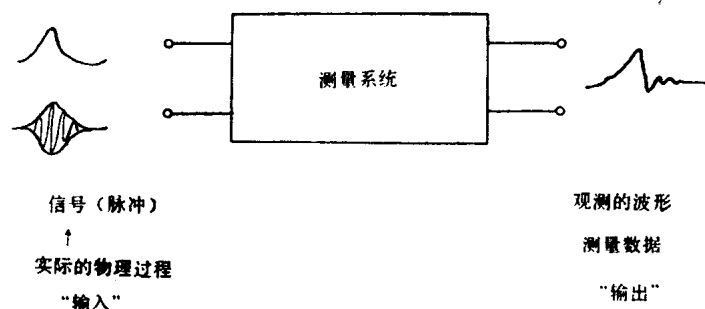


图 1-1 测量系统的输入与输出

为了解决上述问题，从事时域测量的工作者应具有下列电气工程技术领域的知识：

- (1) 信号理论——连续和离散信号，调制信号，信号的变换分析，信号的数据处理。
- (2) 系统理论——线性系统与非线性系统，因果与非因果系统，网络理论。
- (3) 电子物理学——电磁场和波，电子光学，电子器件，电、磁相互作用。
- (4) 计算机科学——计算机硬件与软件。
- (5) 仪器与测量学——误差理论，脉冲发生器，脉冲测量仪器，脉冲传输信道，脉冲自动测量系统。

§ 1-2 时域测量的特点

近几年兴起的现代时域测量，尽管目前尚不够成熟，但与比较成熟的频域测量相比，具有不少独特的优点。

1. 从所需的设备来看，时域测量只需要一台高速隧道二极管脉冲发生器便可包括 $0 \sim 30\text{GHz}$ 的全部频带，体积小，成本很低（约几千美元）；而频域测量一般需几台扫频发生器联合复盖这样的频带，且按程控步骤改变频率，构造复杂，体积庞大，成本约几万美元。作为接收设备，时域测量仅需一台 $0 \sim 18\text{GHz}$ 的取样示波器，价格不过 $1 \sim 2$ 万美元；而频域测量所需的两路变频式幅相接收机则非常复杂和昂贵。就计算机及其外设和编程成本来说，两种测量相差不多。

2. 从频率复盖上看，频域网络分析技术不能从零频（即直流）开始，一般只能从 0.1GHz 开始，目前最高达 40GHz ，但能使频率按极小间隔跳变，因而能进行宽带和

窄带测量；对于时域测量，15ps 的阶跃波发生器，可用频带能达 30GHz，若用射频和微波脉冲源，同时将示波器的可用频带扩展到频率响应下降的部分，则时域测量的频率范围可达 50GHz 以下。若采用下变频技术扩展示波器应用的频段，时域测量同新兴的六端口技术一样，可跨入毫米波段。

3. 从测量精度来看，在 12.4GHz 以下的频段内，现代时域测量技术的精度，已达到最复杂的商品型自动网络分析仪的水平。由于时域测量技术能消除不匹配引起的反射影响以及避免利用影响精度的定向耦合器，加上采用较精密的数据处理技术，其精度有可能超过频域测量所能获得的精度。

4. 从测试能力来看，利用时域测量可以观测由一个起始脉冲和一系列延迟或反射脉冲组成的信号序列。改变时间窗位置，即可分析任何一个延迟或反射脉冲。这一独特的优点，在反射测量中不仅能测出一个反射的大小和性质，且能确定出产生反射的不连续点的位置（即距测试口的距离）；特别是当被测系统中包含有多个不连续点时，还能分辨出各自的距离和大小；在频域测量驻波和反射时，所测的结果只能代表被测系统中所有的若干个不同来源的反射到达测试口端面时互相迭加的总效果，而它们迭加的相位关系又随信号频率不同而有显著的变化。因此，频域测量一般不能达到分析多个反射点的目的。

5. 从测试方法上看，利用时域测量技术，能简单地描述线性系统的一切特性。当需要系统脉冲响应或阶跃响应的信息时，利用单频的正弦波测试做不到这点。相反，必须进行一系列稳态测量或扫频测量。虽然瞬态响应可以根据频域测量推断出来，或利用傅里叶变换技术计算出来，但不是直截了当的，有时还不易作出简单明确的解释。利用 §1-4 中所述的时域方法却很简单、直观。

时域测量的主要缺点是，只能在有限时间窗内采集数据，因此，在傅里叶变换时，只能获得离散频率点上的数据，且频率分辨率较低。因此，在观测频率响应的微细结构而进行窄带测量的能力上，时域测量不如频域测量。

时域测量与频域测量本应相辅相成，并驾齐驱。但长期以来，由于历史发展的原因，对于电信网络的理论分析和测试技术一直以频域稳态方法为主，即以单一正弦波作为测试信号而研究输出信号的变化推断被测网络的特性。在 30 年代期间，由于电子示波器的出现以及电视、雷达和脉冲通讯等技术的需要，人们开始在视频和普通射频范围内采用时域测量网络特性的方法，即将被测网络输入端加入矩形脉冲或方波，用示波器观察输出波形和反射波形的畸变情况，从而判断网络的传输特性和反射特性。60 年代后期，由于有了超高速脉冲信号源和取样示波器，时域测量开始步入微波领域。70 年代中期，计算机技术和数字信号处理技术引起时域测量技术的变革，开始形成现代时域测量这个分支。时域自动测试系统的诞生，数字信号处理理论，尤其是数字反卷积理论的成功应用，是现代时域测量的重要标志。

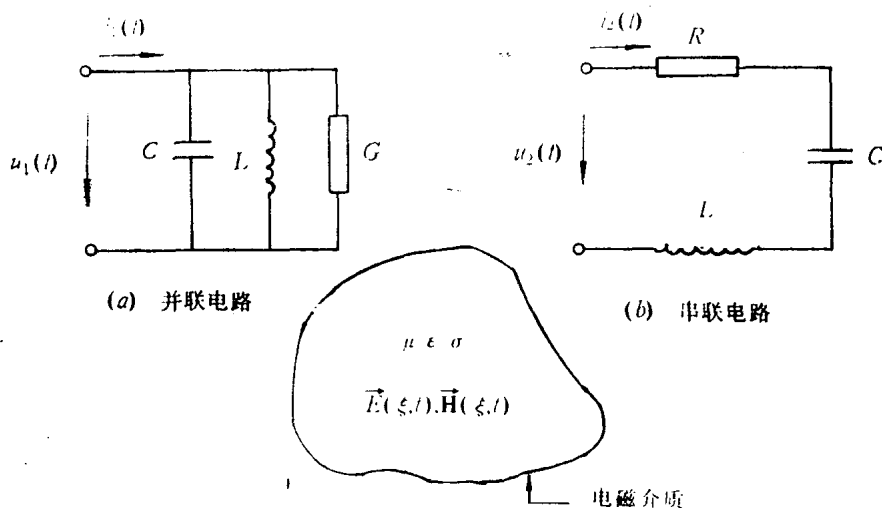
§ 1-3 线性系统的特性

这里的系统包含集中参数和分布参数电路，各种网络和电磁介质等，它是一个内涵

较广的抽象概念。

对于线性系统，其主要特性如下：

1. 组成系统的元器件及电磁介质的参数值与独立变量无关。如图 1-2 所示，组成并联和串联电路的元件参数 R 、 L 、 C 、 G 与电压 $u(t)$ 和电流 $i(t)$ 无关；传播平面波的电磁介质参数 μ 、 ϵ 、 σ 与电场 $\vec{E}(\xi, t)$ 和磁场 $\vec{H}(\xi, t)$ 无关。



(c) 沿 ξ 方向传播的平面电磁波

图 1-2 线性系统实例

2. 如果已知线性系统的结构和参数，则描述其激励与响应的数学方程式一般是常系数线性微分方程组。就是说，在方程中独立变量及其任何导数或积分只出现一次幂，且独立变量与导数或积分之间没有乘积形式。例如，对图 1-2 中的并联电路 (a)，根据节点理论，满足方程 (1-1)；对串联电路 (b)，根据网孔理论，满足方程 (1-2)；对沿 ξ 方向传播的平面电磁波 $\vec{E}$ 和 $\vec{H}$ 的电磁介质 (c)，根据电磁场理论，满足方程组 (1-3)。即

$$i_1(t) = C \frac{du_1(t)}{dt} + \frac{1}{L} \int u_1(t) dt + Gu_1(t) \quad (1-1)$$

$$u_2(t) = L \frac{di_2(t)}{dt} + \frac{1}{C} \int i_2(t) dt + Ri_2(t) \quad (1-2)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 \vec{E}(\xi, t)}{\partial \xi^2} - \mu \epsilon \frac{\partial^2 \vec{E}(\xi, t)}{\partial t^2} - \mu \sigma \frac{\partial \vec{E}(\xi, t)}{\partial t} = 0 \\ \frac{\partial^2 \vec{H}(\xi, t)}{\partial \xi^2} - \mu \epsilon \frac{\partial^2 \vec{H}(\xi, t)}{\partial t^2} - \mu \sigma \frac{\partial \vec{H}(\xi, t)}{\partial t} = 0 \end{cases} \quad (1-3)$$

注意，如果 R 、 L 、 C 、 G 和 μ 、 ϵ 、 σ 分别与独立变量 (u, i) 和 $(\vec{E}, \vec{H})$ 无关，而是时间的函数，则系统仍是线性的。

3. 线性系统满足迭加原理。就是说, 如果输入 $x_1(t)$ 产生输出 $y_1(t)$, 输入 $x_2(t)$ 产生输出 $y_2(t)$, 则输入 $ax_1(t) + bx_2(t)$ 产生输出 $ay_1(t) + by_2(t)$ 。这里 a 和 b 为常数。同时满足响应不随时间平移而变化的特性。就是说, 如果输入 $x(t)$ 产生输出 $y(t)$, 则输入 $x(t - t_0)$ 产生输出 $y(t - t_0)$ 。这表明响应与加上输入的时间无关。

4. 如果已知线性系统的单位冲激响应为 $h(t)$, 则其输入 $x(t)$ 和输出 $y(t)$ 满足下述卷积方程:

$$y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau) h(t - \tau) d\tau \quad (1-4)$$

5. 对于线性系统, 可利用傅里叶变换和拉普拉斯变换方法求解常系数线性微分方程组或卷积方程。利用傅氏变换可求得信号的频谱, 而利用拉氏变换可求得含有初始条件的微分方程全解。

下面将证明, 对于一个线性系统, 能够利用傅里叶变换方法计算它对任何输入的响应, 并且对正弦波的响应仍是正弦的。

对式 (1-4) 两边进行傅里叶变换, 则得

$$Y(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{-j\omega t} \left[\int_{-\infty}^{\infty} x(\tau) h(t - \tau) d\tau \right] dt \quad (1-5)$$

然后交换积分顺序

$$Y(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau) \left[\int_{-\infty}^{\infty} h(t - \tau) e^{-j\omega t} dt \right] d\tau \quad (1-6)$$

进行变量代换, 令 $t - \tau = u$, 则得

$$Y(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau) e^{-j\omega\tau} \left[\int_{-\infty}^{\infty} h(u) e^{-j\omega u} du \right] d\tau \quad (1-7)$$

括号内的量在下面用 $H(\omega)$ 表示, 是 $h(t)$ 的傅里叶变换。由于 $H(\omega)$ 不是 τ 的函数, 故可以把它从第一个积分号中移出来, 然后第一个积分就变为 $X(\omega)$, $X(\omega)$ 是 $x(t)$ 的傅里叶变换。于是

$$Y(\omega) = H(\omega) \cdot X(\omega) \quad (1-8)$$

由式 (1-8) 可见, 对于线性系统, 输出频谱是输入频谱和系统函数 $H(\omega)$ 的乘积。 $H(\omega)$ 是冲激响应的傅里叶变换。输出时间函数 $y(t)$ 是 $Y(\omega)$ 的逆傅里叶变换。

如果 $x(t)$ 是频率为 ω_0 的正弦波, 则

$$X(\omega) = \delta(\omega - \omega_0) \quad (1-9)$$

而 $Y(\omega) = H(\omega_0) \delta(\omega - \omega_0)$, 它是输入的正弦波乘以 $H(\omega_0)$ 。因此, 任何线性系统, 对正弦波输入均有正弦波响应。对任意输入来说, 每个正弦分量都有自己的 $H(\omega)$ 倍的正弦响应, 而输出则为所有这些输出正弦波之和。

最后, 还要讨论一种理想的线性系统, 即无失真传输系统的特性。所谓无失真传输系统, 是指系统输入任何波形时, 其输出端能复现出输入波形, 而不改变波形形状的系统。更确切地说, 对任何输入 $x(t)$, 这种系统的输出应为 $y(t) = ax(t - t_0)$, 此处 a 和 t_0 均为常数, 分别表示标度变化和延时。这样一来,

$$Y(\omega) = ae^{-j\omega t_0} X(\omega)$$

于是, 根据式 (1-8), 在 $|X(\omega)| > 0$ 的 ω 范围内, $H(\omega) = ae^{-j\omega t_0}$ 。因此, 一个无失真传输系统的特性是, 其频率响应在所考虑的频率范围内具有恒定的幅度和线性相位 $\theta = \omega t_0$ 。

不满足上述准则的电路, 就会产生频率失真*。相位失真 (即相移与频率不成比例) 往往是不太重要的, 而且在大多数情况下, 被测电路是最小相位电路, 或具有附加的恒定延迟, 这时频率失真唯一地取决于幅度-频率特性。所以通常只需研究幅度-频率特性。

严格说来, 实际系统并不满足上述的线性系统特性。但是, 在某些约束条件下, 许多实际系统又可近似作为线性系统看待。当输入信号幅度增大时, 系统将产生非线性失真。所谓非线性失真, 不仅指输出波形与输入波形的形状不同, 而且输出波形含有输入波形所没有的频谱分量, 就是说, 系统的非线性能产生新的频率分量。

对于线性和非线性失真的检验, 正弦波测试远优于脉冲测试, 因为偏离人们熟悉的正弦波形是很容易发现的。

§ 1-4 线性系统的估计

因为信号及测量系统中的噪声限制了系统的测量能力, 所以对测量数据进行处理的结果, 只能给出信号或系统的估计。

线性系统瞬态响应估计就是确定线性系统的阶跃响应和脉冲响应。

图 1-3 表示直接获得系统阶跃响应的方法。(a) 表示测试信号是发生器直接输出的阶跃波; (b) 表示通过对一个冲激脉冲进行积分以便获得阶跃状测试信号; (c) 表示通过对冲激响应积分以获得阶跃响应。

图 1-4 表示直接获得系统冲激响应的方法。(a) 表示测试信号是发生器直接输出的冲激脉冲; (b) 表示通过对输入阶跃进行微分以获得一个脉冲测试信号; (c) 表示通过对阶跃响应进行微分以获得冲激响应。

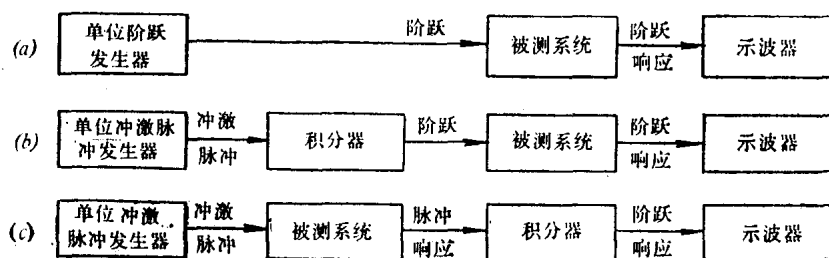


图 1-3 获得阶跃响应的方法

严格地说, 在这种直接测试方法中, 只有当测试信号是理想的阶跃或冲激脉冲, 而示波器具有理想的瞬态响应时, 才能获得真实的阶跃及冲激响应。实际上, 这种方法只能近似地测得冲激响应和阶跃响应。当测试系统 (包括信号发生器和示波器) 和被测系统

* 在有的文献中, 称此为线性失真, 表示与电路非线性产生的非线性失真相对照。

的阶跃响应过渡持续时间（上升时间）与冲激响应的持续时间（脉冲宽度）可比较时，这种直接测试方法将给出不精确的结果。此时，利用反卷积的间接方法能给出令人满意的结果。

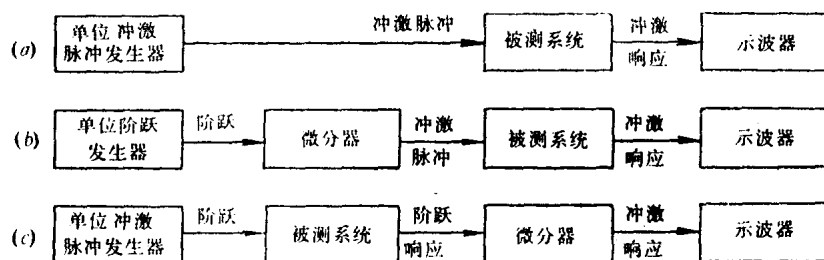


图 1-4 获得冲激响应的方法

如上所述，对图 1-5 所示的任意线性系统，在时域内满足式 (1-4) 所示的卷积积分方程；而在频域内却满足相乘关系，即输入信号的频谱 $X(j\omega)$ 乘以系统的传递函数 $H(j\omega)$ ，等于输出信号的频谱 $Y(j\omega)$ 。这就存在三种不同的测量情况，即在每种情况中，上述三个量中的任何两个是已知的，而第三个是要求测定的。下面分别讨论这三种情况。

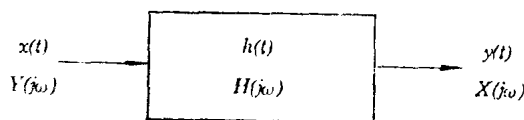


图 1-5 任意输入的线性系统

1. 已知 $X(j\omega)$ 和 $H(j\omega)$ ，求 $Y(j\omega)$

这是一种确定响应问题。通常用于估计滤波作用，其中 $Y(j\omega) = X(j\omega) \cdot H(j\omega)$ 。 $Y(j\omega)$ 项往往被称为 $X(j\omega)$ 和 $H(j\omega)$ 之间的交叉频谱。在输出端仅出现 $X(j\omega)$ 和 $H(j\omega)$ 共有的那些谱线。这里， $H(j\omega)$ 可以是任何一个惯用的模拟滤波器函数，尽管尚有许多从物理角度来看是不可实现的滤波器，然而用数字方法却很容易实现。例如，很容易使信号幅度衰减而不引起任何相移。矩形滤波器变得很简单，并且能做得极窄，以便只选出一个频率。

2. 已知 $X(j\omega)$ 和 $Y(j\omega)$ ，求 $H(j\omega)$

这是系统识别问题。具体地说，就是求测量系统的传递函数。式 $H(j\omega) = Y(j\omega) / X(j\omega)$ 可以用数字方法以相当高的精确度来实现。如果 $X(j\omega)$ 不是精确已知，则除法运算可能引起误差，所以希望 $X(j\omega)$ 在全部频率上都尽可能大。

3. 已知 $H(j\omega)$ 和 $Y(j\omega)$ ，求 $X(j\omega)$

这是信号恢复问题。通常，用于使原始信号通过已知滤波器 $H(j\omega)$ 后，再将其重建起来。式 $X(j\omega) = Y(j\omega) / H(j\omega)$ 与上述情况类似，但由于 $H(j\omega)$ 控制得不够精确而引入的误差此时可能很大。这种技术还可用于改善时域反射测量中的时间和距离分辨力，或用于对某一预定的传输路径进行均衡以便恢复原来的波形。

问题 1 称为卷积。问题 2 和 3 在数学上是相同的，被称为反卷积。

利用反卷积确定系统冲激响应的方法如图 1-6 所示。

求解反卷积的算法很多，但最核心的问题是在有噪声时寻求反卷积的最佳稳定解。

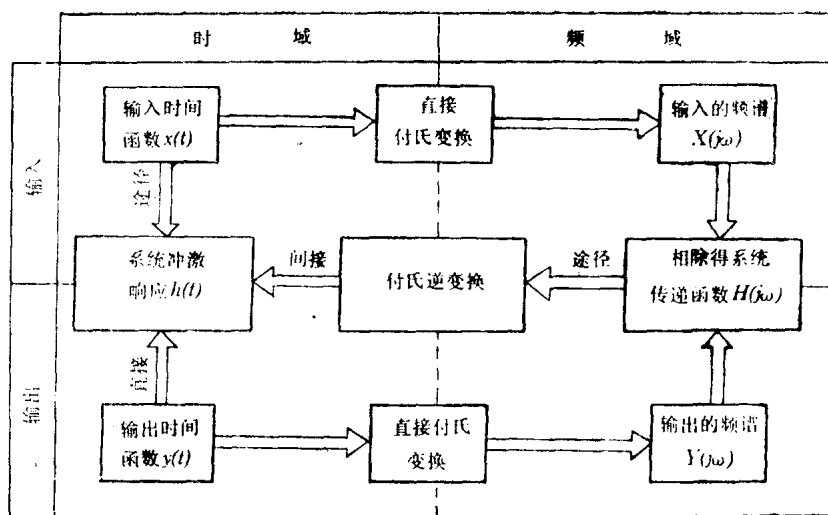


图 1-6 确定冲激响应的两种反卷积方法

因为反卷积在频域内是一种除法运算，故在分母 ($H(j\omega)$ 或 $X(j\omega)$) 为零的点上反卷积结果是发散的，而在零点附近区域内反卷积结果的精度很差，有用信息几乎完全被丢失，以致无法恢复波形与正确辨识系统。此外，当分母不等于零而非常小时，数据中的随机起伏或测量仪器的有限字长效应，使 $H(j\omega)$ 和 $X(j\omega)$ 都总有噪声。当它们跌落到噪声电平以下时，反卷积的结果就会引入很大的不确定度。时域反卷积，通常利用迭代法。此时，初值的选取，特别是有噪声的情况下，对反卷积解的稳定性有很大影响。因此，在有噪声时，如何获得反卷积稳定解的问题一直是人们关注的问题。由于噪声的存在，反卷积只能得到被测量真值的估计。人们试图利用各种方法寻求“最佳”估计。什么是“最佳”估计？这个问题目前有各种不同的准则，在很大程度上取决于应用。有关上述的反卷积问题在第四章中将详细地论述。

在频域内测定系统的频率响应（幅度-频率特性和相位-频率特性），然后按傅里叶反变换公式计算瞬态响应，或按熟知的典型网络的频率响应与阶跃响应关系来推断瞬态响应的方法不属本书所述内容。

参 考 文 献

- [1] 张伦等译，《电子测量与仪器》，科学出版社，1978年。
- [2] 张世箕等编，《无线电计量测试概论》，计量出版社，1985年。
- [3] 汤世贤编，《微波测量》，国防工业出版社，1981年。
- [4] 郑家祥等编，《电子测量原理》，国防工业出版社，1979年。
- [5] 孙圣和译，《无线电测量》，人民邮电出版社，1981年。
- [6] Edward W. Ernst, The Study of Electronic Measurement, "Tech. Notes, University of Illinois," Urbana, Illinois, 1969.
- [7] H. W. Loeb, Time Domain and Frequency Domain Measurement Tech-

- niques, "COA NOTE E and C", No. 4, The College of Aeronautics, Cranfield, 1969.
- [8] Tapan K. Sarkar et al, Impulse Response Determination in the Time Domain, "Rep. No. TR-81-10", Rochester Institute of Technology, Rochester, NY, 1981.
- [9] H. M. Cronson and G. F. Ross, Current Status of Time Domain Metrology in Material and Distributed Network Research, "IEEE Trans. on IM," Vol. IM-21, No.4, Nov. 1972.
- [10] J. R. Andrew, Automatic Network Measurements in the Time Domain, "Proc. of IEEE", Vol. 66. No. 4, Apr. 1978.