

电声系统数字化测量技术

丁永生 编著

中国计量出版社

内 容 提 要

本书对于近代电声系统的模拟和数字分析技术作了系统的介绍。书中着重把电声系统类比并抽象成电路网络以分析其传输特性,为此,详细介绍了如何分析电路网络的各种数学方法,其中包括适用处理离散信号的近代数字滤波系统、数字音响设备和数字测量系统的基础理论。除此之外,还从注重这些理论的实际应用出发,给出了许多例题,并向读者提供了一个实用的FFT(快速傅立叶变换)和逆FFT BASIC程序,它能在任何微型计算机系统上实行操作。

本书适用于从事音响工程和音响设备设计制造的工程技术人员、大专院校电子工程系、无线电系的师生阅读。

电声系统数字化测量技术

丁永生 编著

—*

中国计量出版社出版

北京和平门11区7号

中国计量出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

—*

开本 787×1092/32

印张 6 字数 131 千字

1988年4月第1版

1988年4月第1次印刷

印数 1—5 000

ISBN 7-5026-0042-6/TB·38

定价 1.70 元

序 言

在家用视听设备和剧场、影院、厅堂的视听设备中，往往需要把声信号转换成电信号，然后对它进行传输、记录、处理，再经过功率放大器把电信号放大，最终由扬声器系统把电信号转换成声信号重放出来。完成上述过程的系统，一般统称为电声系统。

随着人民物质和文化生活水平的不断提高，人们对于电声系统重放音质的要求越来越高。目前我国电子工业在电声系统方面已取得很大的发展。收音机已在我国城乡普及，收录机和彩色电视机亦正在普及之中。可以预料，我国民用电子工业将会面临一个新的市场需求，即满足我国人民对于高质量家用视听设备的需求，其中包括高质量大容量功率放大器和高保真立体声扬声器系统。当然，随着家用视听设备的更新和提高，人们对于公共娱乐场所，如剧场、影院和厅堂中的视听设备，亦会提出更高的要求。另一方面，从我国目前电声系统的设计生产技术水平来看，虽然传声器、扬声器和耳机等电声器件和各种整机中的音响系统基本上能满足国内的一般需要，但在质量方面，尤其是音质方面还急待大幅度的改进和提高。

改进电声系统的音质，必须采用先进的测试分析手段。中国古代有句名言：“工欲善其事，必先利其器”。因此，掌握电声系统传输特性的现代分析理论和新的数字化测试技术，将成为电声技术界的首要任务。作者编著本书的主要目的之一，就是要在这一方面给予读者一定的帮助，为振兴我

国的电声事业而出力。

电声系统是由传声器、扬声器等电声换能器和放大器、音响加工或信号处理电路、传输环节中的各种电路、功率放大器和分频网络等电路所组成。只有在深刻理解和掌握了网络、电路的各种分析方法之后，才有可能设计出高水平的电声系统，才能在系统出现质量问题时找到改进的方法。为此，本书在基础理论部分对模拟电路各种传输特性的表述方式作了较为系统和详尽的介绍。同时，为了适应近代电声系统数字化技术革命的新浪潮，在模拟电路系统分析的基础上，作者以深入浅出的方式，力求较为详细地介绍离散数字信号传输处理系统设计分析的基本方法。通过上述两部分内容的介绍，可以使读者系统地掌握模拟连续信号传输系统和离散数字信号处理系统的基本分析理论，为理解下文的电声系统分析测试技术打下较为坚实的理论基础。

电声系统的重放音质，最终还须依靠先进的测量技术来加以鉴定。电声系统中大部分电路网络的传输特性，均可以在普通实验室内进行测试，唯独每个电声系统的最终一个环节，即系统的声性能测量，却必须在自由声场的模拟环境（即消声室内）进行测量。消声室是一种非常昂贵的特殊实验室，它由隔声效果较好的厚墙密闭建筑为其外壳，内部六个墙面要用数千个由玻璃纤维或矿渣棉等吸声材料组成的吸声尖劈来覆盖。为了隔绝由地面传来的振动，整个沉重的建筑体还需由许多弹簧或橡胶皮等吸振材料支撑在空间。因此，建造这种消声室需要数十万元甚至近百万元的投资，这对于我国近年来迅速发展起来的许多中小型电声厂、收录机厂和电视机厂来说，每个厂都建一个这样的消声室是不可能的。然而，为了改进电声系统的质量，工厂又必须对产品进行声性能的测试分析。因此，解决这一矛盾又是作者编著本书的

主要目的之一。对电声系统的声性能,目前已能运用先进的数字测量技术在普通房间里进行非消声测量。数字测量技术的采用,不仅可以不要消声室,而且能对电声系统的声性能作出比以往的模拟系统更为详尽和深刻的测试分析。例如,可以把电声系统(特别是扬声器系统)看作一个近似的线性传输系统,通过对该系统冲激响应的测量以及对测得的冲激响应作傅立叶变换,即能得到扬声器的振幅频率特性和相位频率特性,从而可以完成全面估价扬声器传输特性的工作。例如,通过对这两个频率特性作希尔伯特变换,可以验证某个扬声器是否属于最小相位网络,如果是的话,通过计算又一定能给出一个补偿系统(电路),扬声器加上这一补偿电路后,可以使整个系统的频率响应无限地平滑,又可以消除相位失真。

上述测量方法,在模拟信号处理和测量系统的年代,实施起来是十分困难的,甚至是不可能的。现在数字信号处理技术应用于电声测量的新时代已经到来,带有A/D模数转换接口的计算机系统,在原则上说,可以替代任何一种仪器,当然也能替代各种音频测量仪器。除此之外,数字测量系统还能完成许多模拟仪器所不能完成的功能。例如,用于扬声器测试的数字化仪器大部分可以在普通房间里进行声性能测量而不必建造昂贵的消声室,数据和曲线显示灵活、多样而完善;记录装置可用普通的打印机代替;数据可以立即由计算机处理以及原始数据和测试结果都能存储在系统内供随时调用等优点。最近,价廉而功能强的微处理机的普遍使用,又使以计算机为核心的数字信号处理系统的价格可与一台中高档级的模拟仪器相比较,因此可以预计,在不久的将来,价廉而精确的数字测量仪器将会完全取代传统的模拟仪器。为了能帮助读者迅速掌握这些数字测量技术,著者在本书

的最后部分，较详细地介绍了目前国际上最为成功的几种电声系统声性能非消声室测量技术，如脉冲测试技术(FFT)，时间延迟谱技术(TDS)和近代猝发音测试技术等。

计算机技术的迅猛发展，也促进了电声系统数字化测量技术的进展，相应的各种微电脑化数字测量仪器亦应运而生。为了促进我国电声界早日广泛运用近代数字化测量技术，以便对系统的声性能作出更为深入而充分的测试分析，最后达到改进和提高我国电声音响产品音质的目的，就很有必要普及本书的内容。

对被测对象传输特性的理论分析，是提出与音质有关的新参数及其测量方法的基础，也是正确分析测得数据的重要依据。反之，只有对系统作过较全面的理论分析，才能掌握正确的测量技术。例如，当人们要用脉冲法测试电声系统的声频响应时，为了确定房间的大小和采样点数，就必须首先推导出被测系统在理想状况下的复频域传输函数，然后通过拉普拉斯变换而计算出系统的理论上的冲激响应函数，从而可以粗略地估计出它的持续时间，用以最后确定房间的大小和采样点数。由此可见，测试技术与基础理论分析是密切相关的。为此，本书特别着重于这两方面内容的阐述。

书中注重内容的实用性，因而并未引入太多数学推导，但对于公式的物理意义作了较为详细的解释。在书中附录里，献给读者一个实用、简单而比较精确的快速傅立叶变换(FFT)和逆变换(FFT⁻¹)的BASIC程序，这一程序所占内存极少，可以移植在任何微型计算机上使用。

书中大部分内容是作者在丹麦科学技术大学留学期间的研究报告和回国后的近期研究成果。本书曾先编成讲义作为电子工业部第三研究所举办的全国性“电声系统现代数字化测量技术”学习班上的讲课教材，现经补充修订而出版。

本书的出版一定会受到电声技术界广大科技人员的欢迎。

中国计量出版社总编辑

陈宽基

1987年6月12日

目 录

一、基 础 理 论

(一) 连续线性时不变系统 (CTLTI)	(1)
1 CTLTI 系统的各种表述方式	(2)
1.1 系统传输特性的常系数线性微分方程时域表述方式	(2)
1.2 系统传输特性的时域冲激响应表述方式	(6)
1.3 系统传输特性的复频域表述方式	(7)
1.4 系统传输特性的频域表述方式	(21)
1.5 电声系统中分频网络的设计与分析	(45)
1.6 CTLTI 系统表述方式要点	(60)
(二) 离散线性时不变系统 (DTLTI)	(61)
1 概 述	(61)
2 采样、保持、模/数和数/模转换	(61)
3 DTLTI 系统传输特性的表述方式	(70)
3.1 系统传输特性的常系数线性差分方程表述方式	(70)
3.2 系统传输特性的 z 域表述方式	(72)

二、扬声器系统传输特性的现代分析方法

(一) 扬声器系统等效传输电路及其传输函数的导出	(84)
(二) 从扬声器传输函数 $G(s)$ 来分析系统的性能	(86)
1 扬声器系统的低频响应	(86)
2 扬声器系统低频响应的补偿	(92)
3 扬声器系统瞬态失真的分析	(94)

三、电声系统和扬声器的近代数字测量技术

(一) 扬声器脉冲测量技术 (FFT)	(101)
1 扬声器频率响应的快速傅立叶算法 (FFT)	(102)
2 扬声器脉冲测试仪简介	(115)
3 扬声器脉冲测量技术要点	(127)
(二) 时间延迟谱测量技术 (TDS)	(131)
(三) 近代猝发音测量技术	(133)
1 扬声器大功率谐波失真测量原理	(133)
1.1 扬声器大功率谐波失真测试必要性及其测试困难	(133)
1.2 扬声器大功率谐波失真的测试原理	(138)
2 84 A 型扬声器大功率谐波失真仪简介	(140)
(四) 噪声信号法测量技术 (互相关谱法)	(144)
1 自相关函数和自相关谱	(144)
2 互相关函数和互相关谱	(145)
3 相关函数与系统传输函数的关系	(145)
(五) 扬声器低频响应的非消声室测量技术	(146)
1 扬声器低频响应测量方法的回顾	(146)
2 扬声器低频响应的短路接收态测量法	(149)
(六) 电声系统近代测量方法简评	(154)

附 录

(一) 拉普拉斯变换函数表	(156)
(二) 傅立叶变换函数表	(157)
(三) 快速傅立叶变换 (FFT) 程序	(164)
(四) 快速逆傅立叶变换 (FFTI) 程序	(172)
参考文献	(180)

一、基础理论

(一) 连续线性时不变系统 (CTLTI)

一个电声系统，一般由传声器、前置放大器、调音台、功率放大器和扬声器系统所组成。无论是整个电声系统，还是它的某个组成部分，都可以被近似地看作一个连续时间、线性、时间不变 (CTLTI) 的传输系统。例如，这里以扬声器系统为例，对于任何一个扬声器系统，在输入信号 (电激励信号) $x(t)$ 和输出信号 (声压响应) $y(t)$ 之间，满足如下的常系数线性微分方程的关系：

$$\begin{aligned} & \left(a_l \frac{d^l}{dt^l} + a_{l-1} \frac{d^{l-1}}{dt^{l-1}} + \cdots + a_0 \right) y(t) \\ &= \left(b_k \frac{d^k}{dt^k} + b_{k-1} \frac{d^{k-1}}{dt^{k-1}} + \cdots + b_0 \right) x(t) \end{aligned} \quad (1)$$

其中 a_l 、 b_k 系数都只是与系统中各等效元件 R 、 L 、 C 数值有关的常数， $k, l = 0, 1, 2, 3, \dots$ 整数。在大多数情况下 $k \geq l$ 。

因此，反过来说，式 (1) 定义了如图 1 所示的一个 CTLTI 系统。

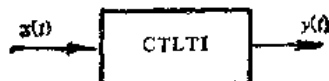


图 1

一般来说，大多数电声换能器件当基本上工作在线性区时，都能近似满足 CTLTI 的条件。由于这些传输系统能满

足对于连续时间函数 $x(t)$ 的一种常系数（即它们是不随时间而变化的 R 、 L 、 C 各元件的函数）线性（即一阶）微分方程，故定义为 CTLTI 系统。

1 CTLTI 系统的各种表述方式

所谓表述方式，即是指以何种方式来给出一个已知系统。按照这一给出方式，使用特定的数学工具，即能在输入信号 $x(t)$ 已知的条件下求出系统的输出信号 $y(t)$ 。

目前常用的系统表述方式有时域表述方式（其中又分常系数线性微分方程表述方式和冲激响应表述方式两种）、复频域表述方式和频域表述方式（只适用于稳定的 CTLTI 系统）。今分别地介绍如下。

1.1 系统传输特性的常系数线性微分方程时域表述方式

微分方程 (1) 即是这种表述方式，它的各系数 a_i 和 b_i 一确定，对应的系统电路也就确定了；反之，一个系统的网络形式和各元件值知道后，也能很方便地写出表述该系统的这种常系数线性微分方程，现举例说明如下。

例题 1

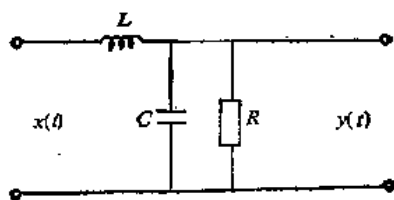


图 2

设图 2 给出了一个 CTLTI 系统，显然，

$$i_L + i_C + i_R = 0$$

其中 i_L 、 i_C 、 i_R 分别为流过 L 、 C 、 R 元件的电流。

$$\therefore \frac{di_L}{dt} + \frac{di_C}{dt} + \frac{di_R}{dt} = 0$$

$$\therefore i_L = \frac{1}{L} \int_{-\infty}^t [y(t) - x(t)] dt$$

$$\therefore \frac{di_L}{dt} = \frac{1}{L} [y(t) - x(t)]$$

$$\therefore i_C = C \frac{dy(t)}{dt}$$

$$\therefore \frac{di_C}{dt} = C \frac{d^2 y(t)}{dt^2}$$

$$\therefore i_R = \frac{y(t)}{R}$$

$$\therefore \frac{di_R}{dt} = \frac{1}{R} \frac{dy(t)}{dt}$$

$$\begin{aligned} \therefore \left(\frac{d^2}{dt^2} + \frac{1}{RC} \frac{d}{dt} + \frac{1}{LC} \right) y(t) \\ = -\frac{1}{LC} x(t) \end{aligned} \quad (2)$$

显然, (2) 是 (1) 的特例, $a_2 = 1$, $a_1 = -\frac{1}{RC}$,

$a_0 = \frac{1}{LC}$ 以及 $b_0 = -\frac{1}{LC}$, 其余系数均为零。

再假定 $L=2$, $C=0.1$, $R=5$ 以及输入信号为

$x(t) = 40 \sin t$ 求其输出响应 $y(t)$

首先把这些数据代入式 (2), 可得

$$\frac{d^2 y(t)}{dt^2} + 2 \frac{dy(t)}{dt} + 5 y(t) = 200 \sin t$$

考虑到初始条件为 $y(0) = 0$ 和 $\left. \frac{dy(t)}{dt} \right|_{t=0} = 0$, 可解得

$$y(t) = 22.361 e^{-t} \sin(2t + 116.565^\circ) + 44.721 \sin(t - 26.565^\circ) \quad (3)$$

例题 2 设有一传输系统如图 3(a) 所示, 对它输入一个如图 3(b) 所示的单位跃迁信号 $x(t) = \begin{cases} 1, & \text{当 } t \geq 0, \\ 0, & \text{当 } t < 0, \end{cases}$ 求该系统的输出响应 $y(t)$ 。

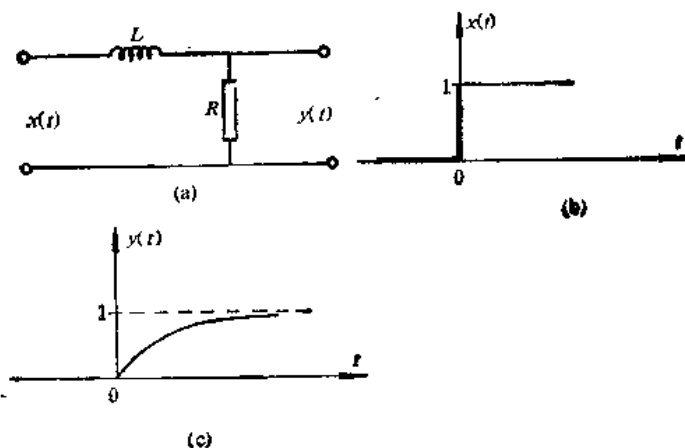


图 3

解: 设流过系统中电感 L 的电流为 i_L , 流过电阻 R 的电流为 i_R , 则

$$i_L + i_R = 0$$

$$\therefore \frac{di_L}{dt} + \frac{di_R}{dt} = 0$$

$$\therefore i_L = \frac{1}{L} \int [y(t) - x(t)] dt$$

$$\therefore i_R = \frac{1}{R} y(t)$$

$$\therefore \frac{di_R}{dt} = \frac{1}{R} \frac{dy(t)}{dt}$$

$$\therefore \text{当 } t \geq 0 \text{ 时 } x(t) = 1$$

$$\therefore \frac{dy(t)}{dt} + \frac{R}{L} y(t) = \frac{R}{L}$$

$$\therefore \frac{dy(t)}{1-y(t)} = \frac{R}{L} dt, \text{ 对它两边积分后可得,}$$

$$-\ln[1-y(t)] = \frac{R}{L} t + C$$

其中 C 为积分常数,

$$\therefore y(t) = 1 - e^{-\frac{R}{L} t + C}$$

$$\therefore y(0) = 0, \therefore C = 0$$

最后可得到

$$y(t) = 1 - e^{-at} \quad (4)$$

其中 $a = \frac{R}{L}$

$y(t)$ 的曲线示于图 3(c)。

由于在常系数线性微分方程的表述方式和解题过程中只出题时间变量 t , 因此它又属于时域表述方式之一。

1.2 系统传输特性的时域冲激响应表述方式

设某个 CT LTI 系统对于 $x(t) = \delta(t)$ 的响应为 $y(t) = g(t)$, $\delta(t)$ 是一个宽度无限窄的冲激脉冲, 则 $g(t)$ 称为系统的冲激响应。可以证明, 当系统的 $g(t)$ 函数已知后, 该系统的传输特性亦已完全确定, 运用卷积的数学处理, 可以求出该系统对于任意输入信号 $x(t)$ 的响应 $y(t)$,

$$y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} g(\tau)x(t-\tau)d\tau = \int_{-\infty}^{\infty} g(t-\tau)x(\tau)d\tau \quad (5)$$

例题 3 设某个系统的冲激响应 $g(t)$ 已给出或测知为:

$$g(t) = \begin{cases} e^{-2t}, & \text{当 } t \geq 0 \text{ 时} \\ 0, & \text{当 } t < 0 \text{ 时} \end{cases}$$

求该系统对于输入信号 $x(t) = \begin{cases} 4t, & t \geq 0 \\ 0, & t < 0 \end{cases}$ 的输出响应 $y(t)$ 。

解: 由式 (5) 得

$$\begin{aligned} y(t) &= \int_{-\infty}^{\infty} g(\tau)x(t-\tau)d\tau \\ &= \int_0^{\infty} e^{-2\tau}x(t-\tau)d\tau \\ \because x(t-\tau) &= \begin{cases} 4(t-\tau), & \tau \leq t \\ 0, & \tau > t \end{cases} \\ \therefore y(t) &= \int_0^t e^{-2\tau}4(t-\tau)d\tau \\ &= \int_0^t 4te^{-2\tau}d\tau - \int_0^t 4\tau e^{-2\tau}d\tau \\ &= e^{-2t} + 2t - 1 \end{aligned} \quad (6)$$

例题 4 设对图 3(a)所示的一阶低通滤波器系统测得的冲激响应为 $g(t) = \begin{cases} ae^{-at}, & t \geq 0 \\ 0, & t < 0 \end{cases}$

其中 $a = R/L$

求系统在图 3(b) 所示的单位跃迁信号作用下的输出响应 $y(t)$ 。

解：由式 (5) 得

$$y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} g(\tau)x(t-\tau)d\tau = \int_0^{\infty} ae^{-a\tau}x(t-\tau)d\tau$$

$$\therefore x(t-\tau) = \begin{cases} 1, & \tau \leq t \\ 0, & \tau > t \end{cases}$$

$$\therefore y(t) = \int_0^t ae^{-a\tau}d\tau = 1 - e^{-at}$$

这结果与式 (4) 完全一样，但所用的数学方法是不同的。

上例说明，冲激响应表述方式对于解某些特定的系统和输入信号形式较为方便。

1.3 系统传输特性的复频域表述方式

1.3.1 系统的表述

可以证明，CTLT 系统满足下面方程。

$$Y(s) = G(s)X(s) \quad (7)$$

其中， $G(s)$ 、 $X(s)$ 、 $Y(s)$ 分别是系统冲激响应 $g(t)$ 、任意输入信号 $x(t)$ 和系统对此输入信号的响应 $y(t)$ 的拉普拉斯变换函数； s 是一个复变量，这里称它为复频率。当知道了系统的 $G(s)$ 函数、输入信号 $x(t)$ 之后，只要首先把 $x(t)$ 通过拉氏变换变成 $X(s)$ ，从而可得 $Y(s) = G(s)X(s)$ ，把 $Y(s)$ 作逆拉氏变换，即可求出 $y(t)$ 来。

1.3.2 拉普拉斯变换

拉普拉斯变换可以查表，也可以使用积分和留数定律求出，下面列出经常用到的几个主要公式：

$$X(s) = \int_0^{\infty} x(t)e^{-st} dt \quad (8)$$

$$x(t) = \frac{1}{2\pi j} \int_0^{\infty} X(s)e^{st} ds \quad (9)$$

或者记作：

$$\mathcal{L}\{x(t)\} = X(s)$$

$$\mathcal{L}^{-1}\{X(s)\} = x(t)$$

“ $\mathcal{L}$ ”和“ $\mathcal{L}^{-1}$ ”分别表示拉普拉斯变换和逆拉普拉斯变换。

$$x(t) = \frac{1}{2\pi j} \int_0^{\infty} X(s)e^{st} ds = \sum_i R\{X(s_i)e^{s_i t}\}$$

式中 $R\{X(s_i)e^{s_i t}\}$ 表示对函数 $\{X(s)e^{st}\}$ 中的第 i 个极点求留数。留数的求法是这样的：使函数中的 s 变量等于极点 s_i ，去掉由 s_i 引起的无限大项，计算出函数的值即是极点 s_i 的留数。“ $\sum$ ”表示对所有极点的留数求和。

例题 5 设有一复变函数

$$F(s) = X(s)e^{st} = \frac{e^{st}}{[s + (1-j)][s - (5+2j)]}$$

求

$$\sum_i R\{F(s_i)\}$$

解： $F(s)$ 中有两个极点：

$$s_1 = -1 + j$$