



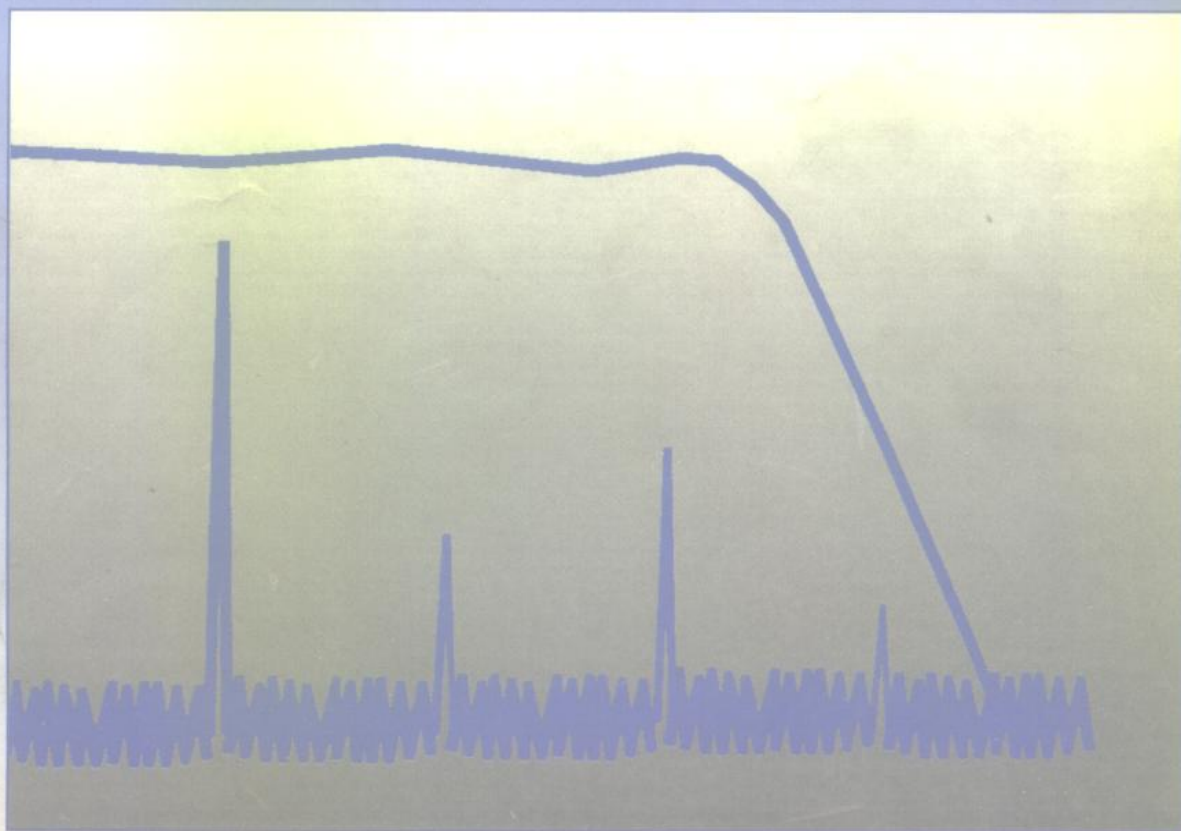
Hewlett-Packard
Academy



HEWLETT
PACKARD

频谱和网络测量

[美] 罗伯特·A·威特 著



科学技术文献出版社



西蒙与舒斯特国际出版公司

73.15
952

DG45/21

频谱和网络测量

[美]罗伯特·A·威特

中国惠普有限公司

李景威 张 伦 译

蒙 西 学 锋 审



科学技术文献出版社
西蒙与舒斯特国际出版公司

016136

(京)新登字 130 号

内 容 简 介

本书从理论和实践两方面介绍了频谱分析的基础理论、频谱分析仪的几种主要应用、传输线和网络分析的基础知识、网络分析仪在传输与反射两类测量中的应用等。在测量领域,全书具有:①实用性:从测量实践出发讲直接在实践中用到的理论及方法。②浅近性:设有理论推导,选材得当,配有图形和计算实例。③时新性:该领域的最新成果,如数字信号处理技术等都在书中有反映。本书适合从事电子工程和通信领域工作,特别是测量工作人员,以及大专院校无线电工程、通信工程、电子测量与仪器等专业的师生阅读。

Spectrum and Network Measurements

Robert A. Witte

©1993 by Robert A. Witte

Authorized Chinese language edition by PTR Prentice-Hall, Inc.

本书中文简体字版由科学技术文献出版社和美国西蒙与舒斯特国际出版公司联合出版。未经出版者书面许可,本书的任何部分不得以任何方式复制或转载。

本书封面贴有 Prentice Hall 防伪标签,无标签者不得销售。

图书在版编目(CIP)数据

频谱和网络测量/(美)威特(Witte, R. A.)著;李景威,张伦
译. —北京:科学技术文献出版社,1997. 5
ISBN 7-5023-2722-3

I. 频… II. ①威… ②李… 张… III. ①频谱分析仪—应用—测量
②网络分析仪—应用—测量 IV. TN911.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(96)第 22811 号

版权登记号:图字 01—97—0195

科学技术文献出版社出版

(北京复兴路 15 号 邮政编码 100038)

北京建华胶印厂印刷 新华书店北京发行所发行

1997 年 5 月第 1 版 1997 年 5 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 16 开本 15.75 印张 403 千字

科技新书目:415—145 印数:1—5000 册

定价:30.00 元

译者的话

在无线电工程和通信工程中,频谱分析和网络分析占有相当重要的地位,它是了解这些领域的工作对象——信号和网络的重要手段。本书是一本关于频谱和网络测量的专著,它从理论和实践两个方面着重介绍了频谱分析的基础理论知识、两种主要类型的频谱分析方法(FFT 分析和扫频分析)、频谱分析仪的几种主要应用、传输线和网络分析的基础理论知识、网络分析仪在传输与反射两大类测量中的应用等内容。虽然主要讨论的是 0 至 500 MHz 频率范围的有关问题,但绝大多数内容亦完全适用于微波领域。

在测量领域,这是一本颇具特色的书籍。首先是它的实用性。本书从测量实践出发讲理论,讲那些直接在实践中用到的理论,讲在这样的理论指导下的测量方法及其中问题的分析。显然,这对于工作在测量第一线而无暇阅读、钻研理论性著作的读者提供了很大的方便。读过本书之后,相信这一专业领域的读者不但“知其然”,也必能“知其所以然”了。其次是它的浅近性。本书内容深入浅出,语言简明扼要,虽然阐述了不少理论,但没有繁复的过程推导,选材得当,通俗易懂。为了加强读者对内容的理解与避免常见的错误,还配有许多图形和计算实例。更可贵的是,本书从测量应用的角度展开叙述,特别注重测量中使用的各种术语和概念的阐明,注重对影响测量结果的各种因素的讨论与分析。还专门辟出一章(第十七章)介绍了仪器性能与技术指标中各专门术语的概念及对测量的作用。所有这些,无疑将对从事实际工作的读者裨益匪浅。本书的另一特点是它的时新性。在频谱分析和网络分析两技术领域里的最新成果,特别是数字信号处理技术,都在书中有反映。诸如 FFT 与 IFFT 技术、时频转换与加窗技术、信号平均技术、归一化技术、误差修正技术等等,都是现代化智能仪器经常采用的新技术,书中比较详细地论述了它们的基本概念和原理,说明了它们如何在测量仪器中得到应用。读者阅读本书后再去实际操作仪器,自然而然地掌握了许多测量新技术。

本书适于从事电子工程和通信领域工作,特别是测量工作人员,大专院校无线电工程、通信工程、电子测量与仪器等专业的师生阅读参考。

图书馆藏

中国惠普有限公司谨识

1996 年 10 月

016136

序 言

本书是一本论述电子系统中频谱和网络测量的理论和实践问题的专著。它十分适于那些具有电气工程基本知识并利用频谱分析仪和网络分析仪在频域中表示电信号或系统特征的读者阅读。

尽管书中对频谱分析仪和网络分析仪的某些内部功能进行了讨论,但真正的重点是放在频域测量的理论和实践上。书中包含了大量理论内容,可以使读者充分理解如何去完成一项特定的测量任务、有哪些误差来源以及测量结果的有效精度。为了帮助读者理解书中的内容以及将理论同实践相联系,书中还列举了大量计算实例。

频谱分析仪和网络分析仪在电子设计、生产制造和工程维护中得到广泛应用。频谱测量能显示一特定信号中存在的频谱成分。它的典型应用场合有雷达系统、无线电广播、移动通信、有线电视、电子侦察、电磁干扰和监管、振荡器的表征以及音频测量。网络测量则用来确定某一电路会对一定频率范围的信号产生何种响应。它常用于对诸如放大器、滤波器、电缆、衰减器这样一类器件以及某些电路组件进行表征。网络测量常常是指配备有 S 参量测试装置的完整网络分析仪系统,但许多测量(特别是传输测量)则可用较简单的设备来完成。

由于电气工程师们一般都接触到分贝、傅氏理论、双口网络等专业术语,故读者可能会发现本书中有许多熟悉的内容。然而,大多数读者通常是通过涉及多门课程的各种教材来接触到这些概念的,而这些教材往往并不是针对实际测量编写的。所以,本书的目的之一,就是要将有关的内容归纳为统一的频域测量理论。

本书主要是为在 1 GHz 以下频率范围从事测量的人员而编写的。这些基本理论对更高的频率同样也适用。不过,本书没有对微波电路的细节如带状线、速调管、波导以及信号流图进行深入的研究。即便如此,从事微波技术的工程师们仍会发现本书的内容对他们的工作会有所帮助。

数字技术所产生的影响在频域测量领域同样也有所反映。数字技术最初用于显示图形的存储,它为消除显示闪烁和实现诸如峰值保持、归一化和网络测量的误差修正这样一些测量功能提供了有效手段。这是通过对仪器进行微处理器控制,使某些操作和控制任务自动完成的。如今,数字信号处理已被用于完成取平均、数字滤波和快速傅氏变换。本书的一些章节对频谱和网络测量中使用的这些数字处理技术进行了介绍。

书中的大部分内容都是针对测量中使用最普遍的扫频频谱分析仪和扫频网络分析仪来论述的。不过,也专辟了一章介绍利用快速傅氏变换来确定信号成分的频谱分析仪。这类频谱分析仪的优点是测量速度快和频谱分辨力极高,但目前

在频率范围方面稍受限制。兼用扫频技术和快速傅氏变换(FFT)技术的混合型频谱分析仪则能在较高频率上进行测量。

本书当然可以从头至尾阅读,但它也是按照独立的章节来编排的。这就允许读者有选择性地阅读,以提高作为参考书的使用效率。

第一章是频谱和网络测量的基础。分贝是经常使用、也经常误用的概念,所以,第二章对它进行专门讨论。第三章概述了作为频谱分析理论基础的傅氏理论。第四章和第五章讨论了频谱分析仪的两种主要型式(FFT 频谱分析仪和扫频频谱分析仪)。第六章至第九章讨论了几种重要的测量应用:已调信号、信号失真、噪声和脉冲波形。平均和滤波在第十章中一并进行讨论。

第十一章和第十二章讨论了传输线和测量连接技术。第十三章介绍了作为网络分析的基础的双口网络理论。第十四章至第十六章讨论了网络分析仪及其在传输和反射测量中的应用。最后,第十七章讨论了仪器性能和技术指标。

有许多人直接或间接地对本书的编写作出过贡献,其中包括在我的职业生涯中有联系的那些教授、工程师和技术员,因为通过与他们的学术交流使我获益匪浅。我要特别感谢以各种方式帮助我编写此书的下列 HP 公司工程师:Jerry Daniels, Glenn Engel, Bryan Hoog, Roy Mason, Harry Plate, Bill Spaulding, Joe Tarantino 以及 Ken Wyatt。

罗伯特·A·威特

目 录

译者的话

序言

第一章 频谱和网络测量的基础 1

- 1.1 信号和系统 1
- 1.2 时域和频域的关系 1
- 1.3 系统的传递函数 2
- 1.4 采用频域测量的优点 2
- 1.5 频谱测量 3
- 1.6 频谱分析仪 5
- 1.7 网络测量 5
- 1.8 网络分析仪 6
- 1.9 频谱/网络分析仪 6
- 参考文献 8

第二章 分贝 9

- 2.1 分贝的定义 9
- 2.2 一些基本数据 10
- 2.3 绝对分贝值 11
- 2.4 增益和损耗计算 13
- 2.5 分贝和百分数 15
- 2.6 用分贝表示的误差 16

第三章 傅氏理论 18

- 3.1 周期性 18
- 3.2 傅氏级数 18
- 3.3 方波的傅氏级数 20
- 3.4 其它波形的傅氏级数 24
- 3.5 傅氏变换 26
- 3.6 脉冲的傅氏变换 26

-
- 3.7 傅氏逆变换 27
 - 3.8 傅氏变换关系式 27
 - 3.9 离散傅氏变换 27
 - 3.10 离散傅氏变换的限制因素 31
 - 3.11 快速傅氏变换 31
 - 3.12 将理论运用到测量实践时遇到的实际问题 32
 - 3.13 测量时间的限制 33
 - 参考文献 33

第四章 快速傅氏变换分析仪

35

- 4.1 多通道滤波器式分析仪 35
- 4.2 频率分辨力 36
- 4.3 FFT 分析仪 37
- 4.4 取样波形 38
- 4.5 取样定理 39
- 4.6 FFT 的基本特性 42
- 4.7 调节测量的带宽 43
- 4.8 频谱分析时频带的选择 44
- 4.9 泄漏 46
- 4.10 汉宁窗口 46
- 4.11 平顶窗口 47
- 4.12 均匀窗口 49
- 4.13 指数窗口 52
- 4.14 选择窗口函数 52
- 4.15 振荡器特性的表征 53
- 4.16 时域显示 56
- 4.17 网络测量 57
- 4.18 相位 58
- 4.19 谱图 58
- 4.20 电子滤波器特性的表征 58
- 4.21 交叉功率谱 59
- 4.22 相干性 61
- 4.23 相关测量 63
- 4.24 自相关 63
- 4.25 互相关 65
- 4.26 直方图 67
- 4.27 实时带宽 68
- 4.28 实时带宽和有效值平均 69
- 4.29 实时带宽和瞬变事件 70

-
- 4.30 覆盖技术 73
 - 4.31 扫频正弦测量 74
 - 4.32 倍频程测量 75
 - 参考文献 76

第五章 扫频频谱分析仪

77

- 5.1 波形分析仪 77
- 5.2 外差的工作原理 77
- 5.3 扫频频谱分析仪 79
- 5.4 一些实际考虑 80
- 5.5 输入级 80
- 5.6 分辨带宽 81
- 5.7 对扫描的限制 81
- 5.8 专用扫频方式 84
- 5.9 本振馈通 84
- 5.10 检波器 84
- 5.11 数字中频级 85
- 5.12 跟踪发生器 85
- 5.13 FFT 与扫描的关系 85
- 5.14 混合型分析仪 86
- 参考文献 86

第六章 调制测量

87

- 6.1 载波 87
- 6.2 幅度调制 87
- 6.3 调幅测量 92
- 6.4 零扫宽测量法 92
- 6.5 幅度调制的其它形式 93
- 6.6 角度调制 94
- 6.7 窄带角度调制 97
- 6.8 宽带角度调制 98
- 6.9 调频测量 100
- 6.10 调幅和调频的组合 101
- 参考文献 103

第七章 失真测量 105

- 7.1 失真模型 105
- 7.2 单音频输入 105
- 7.3 双音频输入 106
- 7.4 高阶模型 108
- 7.5 截获概念 109
- 7.6 谐波失真测量 110
- 7.7 在信号源上利用低通滤波器 111
- 7.8 互调失真测量 112
- 7.9 分析仪内部的失真 112
- 参考文献 113

第八章 噪声和噪声测量 115

- 8.1 随机噪声的统计性质 115
- 8.2 平均值、方差和标准偏差 116
- 8.3 功率谱密度 116
- 8.4 噪声的频率分布 117
- 8.5 噪声等效带宽 118
- 8.6 噪声的单位和分贝之间的关系 119
- 8.7 噪声测量 121
- 8.8 自动噪声电平测量 121
- 8.9 本底噪声 122
- 8.10 对本底噪声的修正 122
- 8.11 相位噪声 123
- 参考文献 126

第九章 脉冲测量 127

- 9.1 脉冲波形的频谱 127
- 9.2 有效脉冲宽度 128
- 9.3 线状谱 128
- 9.4 脉冲谱 130
- 9.5 脉冲射频信号 132
- 9.6 脉冲的退敏效应 132
- 参考文献 134

第十章 平均和滤波

136

- 10.1 预检波滤波 136
- 10.2 预检波滤波器 137
- 10.3 后检波滤波 138
- 10.4 后检波滤波器 140
- 10.5 平均 140
- 10.6 方差比 142
- 10.7 广义平均 142
- 10.8 线性加权 143
- 10.9 指数加权 143
- 10.10 频谱分析仪和网络分析仪中的平均 145
- 10.11 平均与滤波的关系 145
- 10.12 平滑 147
- 10.13 FFT 分析仪中的平均 147
- 参考文献 150

第十一章 传输线

151

- 11.1 对传输线的要求 151
- 11.2 分布模型 151
- 11.3 特性阻抗 151
- 11.4 传输速度 152
- 11.5 发生器、传输线和负载 152
- 11.6 阻抗变化 157
- 11.7 正弦波电压 158
- 11.8 复反射系数 158
- 11.9 回波损耗 159
- 11.10 驻波 159
- 11.11 传输线的输入阻抗 162
- 11.12 阻抗失配引起的测量误差 163
- 11.13 传输线的损耗 166
- 11.14 同轴线 166
- 参考文献 167

第十二章 测量连接

168

- 12.1 加载效应 168
- 12.2 最大电压与功率传输 168
- 12.3 高阻抗输入 169
- 12.4 高阻抗探头 170
- 12.5 Z_0 阻抗输入 171
- 12.6 输入接头 171
- 12.7 Z_0 终端 172
- 12.8 功率分配器 172
- 12.9 衰减器 173
- 12.10 回波损耗的改善 176
- 12.11 经典的衰减器问题 177
- 12.12 阻抗匹配器件 179
- 12.13 测量滤波器 181
- 参考文献 183

第十三章 双口网络

184

- 13.1 正弦信号 184
- 13.2 传递函数 185
- 13.3 改进的双端口模型 186
- 13.4 阻抗参量 187
- 13.5 导纳参量 188
- 13.6 混合参量 188
- 13.7 传输参量 189
- 13.8 散射参量 189
- 13.9 传递函数和 s_{21} 191
- 13.10 为什么使用 s 参量? 191
- 参考文献 191

第十四章 网络分析

193

- 14.1 基本的网络测量 193
- 14.2 示波器和扫描发生器 193
- 14.3 带扫描发生器的频谱分析仪 193
- 14.4 带跟踪发生器的频谱分析仪 195

14.5 比值法	195
14.6 定向耦合器	196
14.7 s 参量测试装置	196
14.8 源	197
14.9 扫描的限制	198
14.10 幅度的扫描	199
14.11 频率偏移测量	199
14.12 利用快速傅氏逆变换进行时域测量	200
参考文献	201

第十五章 传输测量 202

15.1 无失真传输	202
15.2 非线性	204
15.3 线性失真	204
15.4 插入增益和损耗	205
15.5 测量误差	206
15.6 归一化	208
15.7 线性相位的重要性	210
15.8 对线性相位的偏离	210
15.9 相位误差	211
15.10 群延迟	213
15.11 延迟孔径	214
15.12 测量面	214
15.13 线的伸缩	216
参考文献	216

第十六章 反射测量 217

16.1 直角坐标显示方式	217
16.2 极坐标显示方式	217
16.3 定向电桥和耦合器	221
16.4 插入损耗	223
16.5 耦合系数	223
16.6 方向性	224
16.7 反射接法	224
16.8 归一化	225
16.9 反射测量的误差	225
16.10 误差修正	227

16.11 再论归一化	227
16.12 二项误差修正	227
16.13 三项误差修正	228
16.14 电阻电桥	229
16.15 双端口误差修正	229
16.16 开路、短路和 Z_0 负载	229
参考文献	230

第十七章 分析仪的性能和技术指标	231
-------------------------	------------

17.1 源/跟踪发生器的技术指标	231
17.2 接收机特性	232
17.3 动态范围	234
参考文献	236

第一章 频谱和网络测量的基础

1.1 信号和系统

一个电系统通常有一个或多个输入端口以及一个或多个输出端口。图 1-1 示出有单一输出和单一输入的系统。像滤波器、衰减器和放大器这样一些电子元器件便属于这类系统。图中，输入端的信号为 $x(t)$ ，而输出端的信号为 $y(t)$ 。

图 1-2 示出较复杂的系统(锁相环)。尽管该系统只有一路输入和一路输出，但包含了若干个单元或子系统，每个单元或子系统都有它自己的输入和输出(该系统的每个单元都可以看成是一个单独的系统)。设计工程师在设计该系统时可以用独立的单元和信号加以考虑。当他们在设计阶段对这些独立的单元和信号进行核查时，便会用到测量仪器。这类系统在生产以及随后的现场维护过程中，也要对信号和系统单元进行测量。

网络测量所表征的是系统的电路单元，而频谱测量所表征的则是在电路单元中存在的信号。例如，输出 $y(t)$ 的相位噪声或寄生频率分量可能是系统性能中的关键参量，这些参量就是用频谱分析仪来测量的。类似地，在需要了解低通(环路)滤波器的传递特性的场合，则要使用网络分析仪来进行测量。

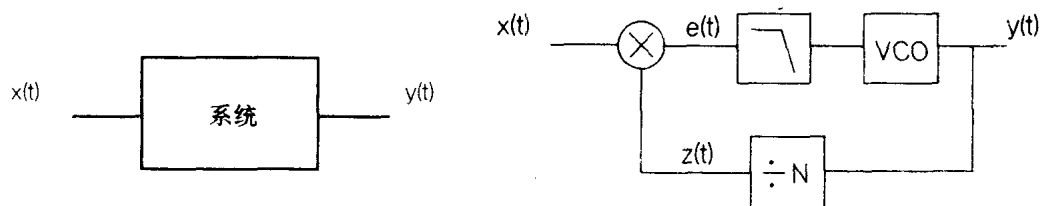


图 1-1 有一路输入 $x(t)$ 和一路输出 $y(t)$ 的简单系统 图 1-2 锁相环是有多个单元和多个信号的复杂系统

1.2 时域和频域的关系

描述电信号最直观的途径是采用时域表象方式(即给出电压和电流随时间变化的关系)，如图 1-3a 所示。示波器所显示的是信号的时域表象。在时域中，各个系统单元可通过测量阶跃响应、脉冲响应或其它输入信号在输出端引起的响应来加以表征。

描述信号的另一个途径是利用频域表象方式(即给出信号幅度随频率变化的关系)，如图 1-3b 所示。傅氏理论将时域表象和频率表象联系起来。适当利用傅氏级数、傅氏变换和离散傅氏变换(DFT)能将时域函数 $x(t)$ 变换成频域函数 $X(f)$ 。

频谱分析仪的选频电路能在所考察的整个频率范围内测量出信号的幅度。因此，频谱分析仪属于频域表象方式，而示波器则属于时域表象方式。网络测量要求在输入端有一个对系统的激励信号(通常由测量仪器提供)。这个激励信号必须覆盖宽频率范围，以使输出信号正确反映被测系统的频域性能。在大多数情况下，可采用能自动在所考察的频率范围扫频的正弦波信号

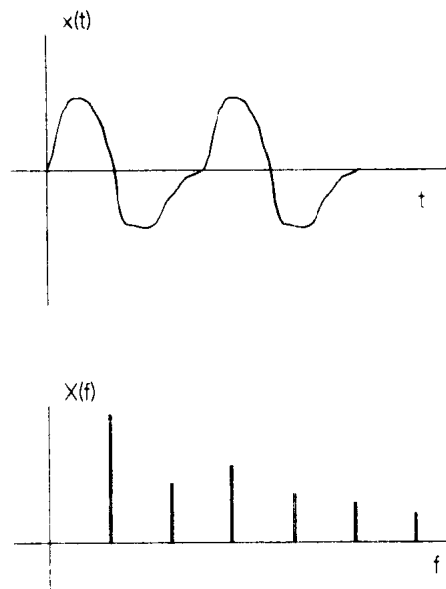


图 1-3 (a)随时间变化的信号(b)随频率变化的信号

源提供激励信号,但也可采用宽带噪声源。

1.3 系统的传递函数

在系统的输入端加激励信号 $X(f)$ 并测量输出 $Y(f)$ (图 1-4)。传递函数是输出与输入之比,两者均是频率的函数。

$$\text{传递函数: } H(f) = \frac{Y(f)}{X(f)}$$

这样便可用简单的模型来反映被测系统,亦即由输入信号和传递函数能完全决定输出信号,而不必考虑其它因素的影响。我们将在第十三章中讨论如何用二端口参量给出系统更完整的模型。

1.4 采用频域测量的优点

为什么要采用频域测量技术呢? 回答也许各不相同,但频域测量仪器确实有一些突出优点。

窄带频域测量较之时域测量具有更高的灵敏度。由于测量带宽几乎可以被任意压缩,故频域分析仪能大大减少测量中的噪声数量。此外,窄带测量还能除去某些频率上的强干扰信号。现在来研究对接近理想的正弦波谐波失真的测量。频谱分析仪在测量谐波电平时,可以避免较强的基频。采用示波器的时域测量则必须同时测量信号中的基频和相对小得多的谐波。用示波器进行谐波失真测量被局限到百分之几,而频谱分析仪往往允许进行 0.01% 的失真测量。

某些系统原本就与频域相关。例如,电信系统中所用的频分复用(FDM)系统就是利用在

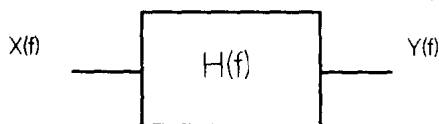


图 1-4 一个系统的传递函数可以描述该系统在频域中的特性

频域中将多路信号穿插在一起来运行的。广播电台也采用了频域多用方式,每个电台在一定的地区占据特定的频段。无线电接收机本质上也是一个频域装置,因为它实质上是一个选频检波器。

甚至一些通常未被认为具有频域特性的系统仍可能需要频域测量。例如,数字电路接线的杂散电容和电阻损耗可能限制电路的带宽和数字脉冲的速度。网络分析仪通过测量在频域中电路的传递函数来确定电路带宽。

多重信号在频域中往往比在时域中更容易分离。例如,假定开关电源的输出包含有较大的 60 Hz 交流市电频率(及其谐波)和开关电源产生的频率。虽然通过时或测量可以辨别两者中哪一个最大,然而,若存在多个频率便难以用示波器观察,利用频谱分析仪则能区分这些频率成分并精确加以测量。

1.5 频谱测量

用频谱分析仪可以显示一个信号的特性,如图 1-5 所示。测量时,通常只需简单地将分析仪与信号源相连。不过,还需要考虑加载效应和其它测量误差源。信号的频域表示将出现在分析仪的显示器上(图 1-6 示出一个实例)。

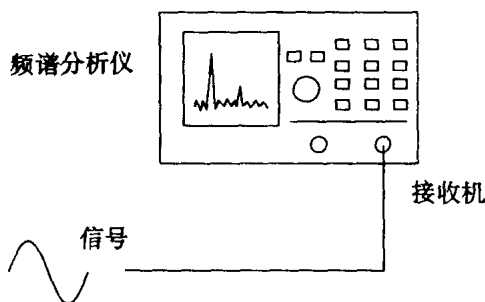


图 1-5 将待分析的信号加到频谱分析仪的输入端来完成频谱测量

测量的复杂性随应用场合而变。在简单情况下,频谱分析仪可用来测量信号谱线的幅度和频率。在大多数情况下,信号的频谱成分还包含多重响应,如谐波、调制边带和寄生响应。利用频谱分析仪还能测量噪声电平(只要被测噪声大于分析仪的噪声),并显示噪声电平随频率的变化情况。

频谱分析仪上的标准垂直刻度是对数刻度,并以分贝标注。这就能在各种尺寸的屏幕上显示大的动态范围。为了满足那些用伏特(V)进行测量的用户的需要,许多分析仪还能提供线性垂直刻度。水平刻度自然是频率。它通常是线性频率刻度,但也有采用对数频率刻度的应用场合。