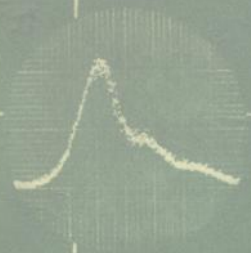


I. A. D. 勒威斯 F. H. 威尔斯



毫微秒脉冲技术



科学出版社

72.6
546

毫秒脉冲技术

I. A. D. 勒威斯 F. H. 威尔斯 著

席德明等译

3305/58



科学出版社

1976.5

I. A. D. LEWIS, F. H. WELLS
MILLIMICROSECOND PULSE TECHNIQUES
PERGAMON PRESS
1959

本书是一本比较系统地阐述毫微秒脉冲技术的专著。书中介绍了毫微秒脉冲的传输、变换、产生、放大、显示等基本原理, 电路单元及设备部件; 最后还叙述了毫微秒脉冲技术在有关方面的应用, 特别是在原子核物理实验方面的应用。

本书可供电子学工作者、有关科学研究人员及工程师们参考。

参加本书翻译工作的有席德明、郭瑞琪、陈芳、戴玉林、汪诗才、韩惠泉和陆坤元。钟培贤、王婷等参加了稿件整理工作。

毫微秒脉冲技术

[英] I. A. D. 勒威斯 F. H. 威尔斯 著

席德明等译

*

科学出版社出版

北京朝阳门内大街 117 号

北京市书刊出版业营业许可証出字第 061 号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1965 年 11 月第 一 版 开本: 850×1168 1/32

1965 年 11 月第一次印刷 印张: 12 1/4

印数: 0001—3,500 字数: 319,000

统一书号: 15031·213

本社书号: 3337·15—7

定价: [科六] 1.80 元

第一版作者序

应用电子学技术是有关利用电学器件来处理讯息的技术。实用中的系统可以相当肯定地分成两类：采用调制的连续波技术或者采用纯粹的脉冲方法。第一类中包括大家所熟悉的用无线电或载波电话以传递讯息；而在第二类中则包括如雷达定时电路、电子数字计算机以及在原子核物理研究中应用的计数设备。原先由调制的连续波讯号的频谱所引入的频宽概念也适用于纯粹的脉冲系统。在这两类系统中，处理讯息的速度和准确度是由系统的频宽决定的；从有线电报到现代的脉冲调制微波线路的历史发展表明了，在扩展频宽以及使脉冲更短和更陡方面人们作了不懈的努力。

时间间隔在 10^{-6} 到 10^{-10} 秒的范围是令人感兴趣的范围，我们可以规定它为毫微秒范围。前一个数字可以作为第二次世界大战末期达到的脉冲技术发展状况的标志，而后一个数字是由物理上考虑所决定的乐观的下限。相应的频宽包括从 1 兆赫（或低于 1 兆赫）到 10000 兆赫，但在目前的发展阶段，1000 兆赫的上限是较为现实的目标。这个范围覆盖了从全部无线电短波段直到微波的范围。然而，正象本书书名所指出，我们只讨论在第二类系统中应用的电路技术；除了在处理高频分量时提供一些基本知识和经验之外，短波无线电方法对我们来说不发生直接的兴趣。例如，具有频宽约为 1000 兆赫而中心频率在 10000 兆赫的调制连续波的微波系统正在研制，这种系统的视频通道处在我们感兴趣的范围内。这方面正在取得重要的发展，但是本书将不涉及任何这种完整的设备。

在微秒范围内那些大家所熟悉的电路参量，即电阻、电感和电

容,可以作为分立的实体来处理,意即它们的直线尺寸要比与含有的最高频率分量相对应的电磁波辐射波长短得多;而在热发射真空管中电子飞越时间的影响小至可以忽略不计。在另一个极端,在微波范围内,例如在波导电路及空腔谐振器中,直线尺寸极为重要,而电子的飞越时间现象则成为所用电子管的工作基础。毫微秒范围正处在这两个范围的中间,它要用到这两个范围内所用到的技术。因此,一方面我们要试图改进通用的脉冲电路,把它们推进到速度的极限,而另一方面要发展一些装置,其中的电路参量在空间内妥为分布,并且具有波传播的特性。我们的主题在于发展具有宽频带的并且扩展至相当低的频率(1兆赫)的各种装置,例如我们研究了工作在主模的传输线,而不研究具有色散特性的波导结构。可以发现,通常的电路理论可以应用于这些分布电路,但必须准备着在发生疑问的情况下借助于更为普遍的电磁波理论。

看一下目录表就可以知道本书的范围了。为了便于非电子学的物理学者以及澄清所用术语,书中编入一章简单的导论。本书的大部分篇幅是专门讨论一些基本电路单元以及通用设备的部件。在最后两章中详细叙述一些特殊的应用,主要是在原子核物理仪器中的应用。最后列有简单的书目和丰富的参考文献表作为本书的结束。

作者期望,本书对在电子学技术方面的经验可能不多,但是欲求助于这种新技术的物理学者能起一定的作用。对于电子学工程师来说,本书的目的在于,整理从电子学工程各已知领域中收集来的有关资料,同时考虑到在毫微秒范围内的特殊发展。

I. A. D. 勒威斯

F. H. 威尔斯

第二版作者序

自本书第一版问世以来，毫微秒脉冲技术有了许多进展。最值得注意的是具有高开关速率的晶体管式器件的发展。在本版中增添了有关这方面的新的一节。为了使本书能够反映最新成就和弥补上版的疏漏，在本版中增添入许多更新的内容。与上版相同的叙述方式和材料的分类方法，证明本书有可能吸收新的资料。

目 录

第一版作者序	(iii)
第二版作者序	(v)
第一章 导论	(1)
1.1 电路分析的定律	(1)
1.2 正弦变化的电流	(2)
1.3 脉冲波形的傅里叶分析	(4)
1.4 单位阶跃函数	(6)
1.5 拉普拉斯变换	(8)
1.5.1 方法的基础	(8)
1.5.2 趋近法	(10)
1.6 简单的变参量电路	(12)
1.7 分布参量的电路	(13)
第二章 传输线	(16)
2.1 导言	(16)
2.2 均匀的直线性传输线	(16)
2.2.1 特性摘要	(16)
2.2.2 分析	(18)
2.2.3 概述	(20)
2.2.4 终端联接和不连续性	(21)
2.2.5 作为电路元件的传输线	(31)
2.2.6 损耗	(36)
2.3 螺旋线	(42)
2.3.1 导言	(42)
2.3.2 单位长度电感的公式	(42)
2.3.3 单位长度的电容	(47)
2.3.4 相位畸变	(47)
2.3.5 概述	(51)
2.4 集中参量的延迟线	(53)
2.4.1 导言	(53)
2.4.2 常 k 式滤波器	(53)
2.4.3 导出式滤波器	(56)
2.5 传输线原理的某些进一步应用	(60)
2.5.1 概述	(60)
2.5.2 传输线滤波器	(60)
2.5.3 定	

向耦合器(61) 2.5.4 可变长度的传输线节(61)

第三章 变压器.....(62)

3.1 导言.....(62)

3.2 基本的匹配网络.....(63)

3.3 集中参量的脉冲变压器.....(64)

3.3.1 导言(64) 3.3.2 等效电路(64) 3.3.3 性能的限制(65)

3.4 锥削线.....(66)

3.4.1 导言(66) 3.4.2 四分之一波长的变压器(66)

3.4.3 平滑锥削的传输线的分析(67) 3.4.4 高斯线(77)

3.4.5 指数线(80) 3.4.6 直线性锥削的同轴线(89)

3.4.7 阻抗变化的其他规律(91)

3.5 由同轴线组成的变压器.....(92)

3.5.1 脉冲倒相器(92) 3.5.2 迭接线的变压器(98)

3.5.3 灯丝隔离用的变压器(100)

3.6 耦合线的变压器..... (100)

第四章 脉冲发生器..... (103)

4.1 导言..... (103)

4.2 传输线放电型的脉冲发生器..... (104)

4.2.1 分析(104) 4.2.2 机械继电器(106) 4.2.3 闸流管脉冲发生器(112) 4.2.4 火花隙(117) 4.2.5 锥削放电管(120)

4.3 使用二次发射管的脉冲发生器..... (123)

4.3.1 导言(123) 4.3.2 简单的触发电路(124) 4.3.3 实际电路(125) 4.3.4 其他电路(127)

4.4 其他类型..... (132)

4.4.1 间歇振荡器(132) 4.4.2 电子束偏转管(133)

4.4.3 其他可能性(136)

4.5 循环脉冲发生器..... (137)

4.5.1 导言(137) 4.5.2 单方向脉冲(138) 4.5.3 微波脉冲(140)

4.6 衰减器..... (140)

4.6.1 导言(140)	4.6.2 电阻在高频的限制(141)	4.6.3 简单的集中参量衰减器(142)	4.6.4 高频的改进(145)	4.6.5 损耗传输线型衰减器(148)
4.7 反射式峰值真空管电压表	(149)			
4.7.1 导言(149)	4.7.2 工作原理(149)	4.7.3 间歇振荡器的变压器结构(151)		
第五章 放大器	(153)			
5.1 导言	(153)			
5.2 电子管的性能	(153)			
5.2.1 导言(153)	5.2.2 高频的限制(154)	5.2.3 对电子管的要求——优值(156)	5.2.4 几种电子管的类型(159)	
5.3 级联放大器中的级间耦合	(161)			
5.3.1 导言(161)	5.3.2 实际电路(161)	5.3.3 二次发射管中二次发射极的利用(163)	5.3.4 概述(164)	
5.4 分布式放大器	(166)			
5.4.1 导言(166)	5.4.2 基本理论(167)	5.4.3 进一步的考虑(174)	5.4.4 实际电路(186)	5.4.5 传输线管(193)
5.5 带通放大器	(196)			
5.5.1 导言(196)	5.5.2 在微波电路中的超高频三极管(197)	5.5.3 分布式放大器(198)	5.5.4 行波管(198)	
第六章 阴极射线示波器	(199)			
6.1 导言	(199)			
6.2 阴极射线管的设计	(199)			
6.2.1 飞越时间的限制(200)	6.2.2 偏转板的联接(202)	6.2.3 普通偏转板结构的总的频率限制(205)	6.2.4 减小由偏转板引起的显示畸变的方法(209)	6.2.5 光点大小和偏转灵敏度(216)
6.2.6 亮度(219)	6.2.7 电子束在偏转后的加速(221)	6.2.8 照相记录用密封的和密封的阴极射线管的比较(222)	6.2.9 照相技术(223)	6.2.10 几种阴极射线管的性能(223)

6.3	记录瞬变的示波器的电路设计.....	(225)
6.3.1	引言(225)	
6.3.2	讯号延迟电路(226)	
6.3.3	扫迴电路(227)	
6.3.4	辅助电路(233)	
6.3.5	照相设备(234)	
6.4	显示重复波形的示波器.....	(235)
6.5	利用脉冲取样技术来显示重复脉冲的示波器.....	(235)
6.5.1	引言(235)	
6.5.2	混合电路(237)	
6.5.3	频率限制依赖于取样脉冲宽度(238)	
6.5.4	显示电路(240)	
6.5.5	显示的亮度(242)	
6.5.6	应用于时间间隔无规律的脉冲显示(242)	
6.5.7	概述(244)	
第七章	在原子核物理中的应用.....	(245)
7.1	引言.....	(245)
7.2	一般的测量问题.....	(245)
7.3	闪烁计数器.....	(246)
7.3.1	引言(246)	
7.3.2	电流脉冲的形状(247)	
7.3.3	现有闪烁计数器的性能(250)	
7.3.4	光电倍增管的飞越时间歧离(250)	
7.3.5	光电倍增管的假脉冲效应(252)	
7.3.6	闪烁计数器的输出电路(253)	
7.3.7	利用契林柯夫辐射的粒子计数(257)	
7.3.8	光电倍增管的脉冲试验(257)	
7.4	火花计数器.....	(258)
7.5	幅度鉴别器.....	(259)
7.5.1	实际电路(259)	
7.5.2	幅度鉴别器的应用(265)	
7.5.3	脉冲幅度分析器(265)	
7.6	快定标电路.....	(267)
7.7	符合电路.....	(273)
7.7.1	引言(273)	
7.7.2	具有二极管混合电路的脉冲限幅器(276)	
7.7.3	符合单元用的脉冲幅度选择(281)	
7.7.4	符合电路的稳定性(284)	
7.7.5	决定最小可能分辨时间的因素(285)	
7.7.6	混合电路(286)	
7.8	用延迟符合电路测量时间间隔.....	(294)
7.8.1	引言(294)	
7.8.2	时间选择器(298)	
7.8.3	利	

用多道脉冲幅度分析器的符合电路(298)	7.8.4 多道时间间隔测量单元(299)
7.9 用积分法测量时间间隔	(301)
7.9.1 引言(301)	7.9.2 时间-幅度的变换器(303)
7.10 记录用示波器的测量	(305)
第八章 各种应用	(307)
8.1 引言	(307)
8.2 用于测量窄带无线电接收机的毫微秒脉冲发生器	(307)
8.3 波导和电缆测试	(308)
8.4 毫微秒脉冲在雷达传播测量中的应用	(309)
8.5 波调仪	(309)
8.6 视频脉冲列的时间晃动的测量	(310)
8.7 用瞬变记录示波器来研究放电现象	(311)
8.8 用于高速照相的电-光闸	(311)
8.8.1 引言(311)	8.8.2 克尔盒(311)
8.8.3 影象变换器(313)	
8.9 调制电子束的分析	(315)
8.10 毫微秒领域中晶体管	(315)
8.10.1 引言(315)	8.10.2 高频晶体管的类型(316)
8.10.3 快速开关电路(320)	8.10.4 晶体二极管和三极管中的雪崩和击穿效应(322)
8.11 结束语	(325)
附录 I 符号注释	(326)
附录 II 一般无损耗的传输线	(328)
附录 III 传输线的特性阻抗	(332)
附录 IV 几种电子管的数据	(337)
附录 V 放大器增益-带宽的关系	(339)
附录 VI 放大器总性能的优值	(347)
参考文献	(351)

第一章 导 论

这一章试图给希望回忆一些电路工程师常用术语的非电子学的物理学者作个导论,并且对他们来说,比较粗浅地重温一下电路理论可能是有帮助的[参阅爱尔莫(Elmore)^[101]], 所给出的定义的表达并非特别严格,但却使含糊之处得以澄清以及使全书大部分章节中所用的词句避免重复。

1.1 电路分析的定律

克希霍夫定律提供了所有电路理论依据的基础。首先我们考虑集中参量的电路,即由导线联接起来的分立实体(如电阻)所组成的电路。欧姆定律引入线性电路元件的概念;即在元件两端的电位差与流经它的电流成正比。

将这些定律应用于任一网络中的几个节点或迴路时,就可以写出一些联立方程式(称为网络方程式)。假定电路元件为线性时,这些方程式是以电压和电流为变量的线性方程式。在本书的理论分析中,除非特别说明,我们将假定所有的电路元件都是线性的。因此我们在电路中可以利用迭加原理;如果作用在电路某一点(叫输入)的一个任意特性的电动势 E_1 , 在任一点(叫输出)产生一电流 I_1 , 而作用在输入的第二个电动势 E_2 产生电流 I_2 流入输出,那末,等于 $E_1 + E_2$ 的输入电动势将产生 $I_1 + I_2$ 的输出电流。

连续应用图 1.1 所示的基本规则以及利用戴维南定理往往可以减轻求解网络方程式的劳动量,甚至可全部免去。这个定理说明:任何由线性电阻和电动势源组成的两端网络等效于一个电动势 E 与一个电阻 R 串联组成的电路。任意两个节点 A 和 B 可以选

作相关联的两“端”，而 R 称为（相对于 AB 的）网络的内电阻或输出电阻。电动势 E 等于任何外部电路接入之前， AB 两端间的电位差，而等效电阻等于从这两端看进去的电阻，此时电动势源仍联接着但是不工作。 R 亦由 E/I 之比来决定，此处 I 为流过 AB 端在外部短路时的电流。表示等效电路的两种形式如图 1.2 所示；

电动势源 E 或者恒压发生器，具有等于零的内电阻；而恒流发生器 I 具有无穷大的内电阻。

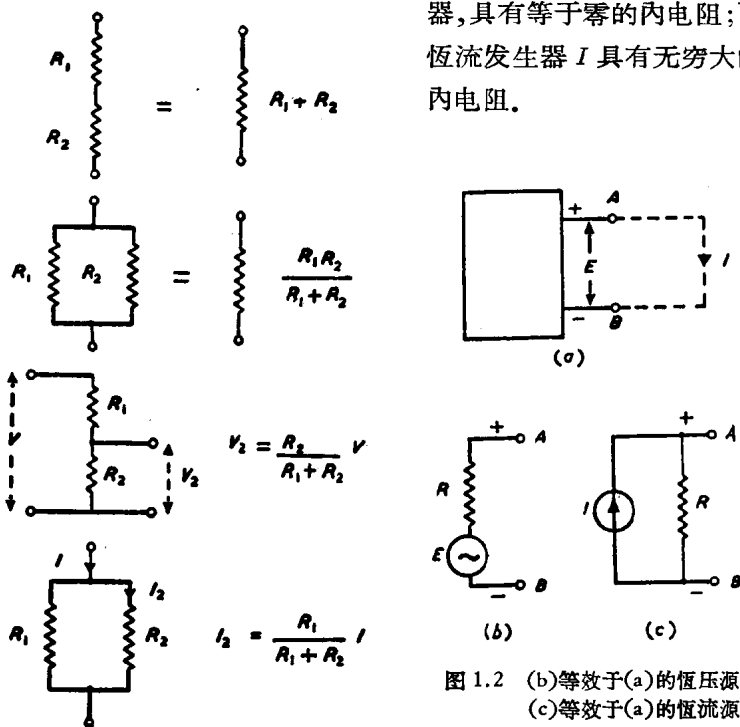


图 1.1 电路分析的基本规则

图 1.2 (b)等效于(a)的恒压源；
(c)等效于(a)的恒流源

1.2 正弦变化的电流

上述原理首先应用于只含有直流的电路中。当考虑到随时间变化的电流时，克希霍夫定律应该仍然满足。除了对于纯电阻有欧姆定律之外，我们还有下列基本关系：

对于电感有¹⁾

$$V = L \cdot \frac{dI}{dt}, \quad (1.1)$$

对于电容有

$$V = \frac{1}{C} \int I \cdot dt. \quad (1.2)$$

假定 L 和 C 的值 (R 也是同样的) 不随时间变化, 则这些方程式都是线性的 (如果考虑用理想的电容器和电感器)。除了特别说明之外, 我们将完全限于探讨参量不变的电路。

在目前情况下网络方程式是一组联立的常系数线性微分方程式。例如, 当所有的变数随时间作正弦变化时, 这些方程式是满足的; 因而, 这些方程式将简化成为含有不同振幅和相角的代数方程式。利用复数代数我们可以不必先写下微分方程式, 而直接写出代数方程式。例如, 一个具有振幅为 V_0 和相角为 θ 的, 以角频率 ω 作正弦变动的电压 V , 可以写成为复数的实数部分

$$V_0 e^{j(\omega t + \theta)} = \bar{V} e^{j\omega t},$$

式中 $\bar{V} \equiv V_0 e^{j\theta}$ 是复振幅, 它包括真实的振幅和相角在内。在方程式 (1.1) 和 (1.2) 中代入复变量后²⁾, 时间的因子会消失, 电压和电流的复振幅的关系式则与欧姆定律相似。电抗 $j\omega L$, $-j/\omega C$ 起着与电阻 R 一样的作用。假定利用复电抗 $j\omega L$ 和 $-j/\omega C$ (和 $\bar{R}$) 以及电动势、电位差和电流的复振幅, 则克希霍夫定律继续适用于复振幅的情况, 并且可以利用图 1.1 中所熟悉的规则。戴维南定理同样能够成立, 但如果电动势含有几个不同的频率, 则网络对外接电路 (或反过来) 的影响应该利用对应于各个不同频率的等效电路算出。因而, 总的电流或电压按加法求得。

1) 这个关系式首先见到的形式是 $E = -L \cdot \frac{dI}{dt}$, 但是把电感看作由于有电流流过而产生一个电位差的某种阻抗, 比诸把电感看作为电路中的一个电动势源更为合适些。

2) 积分常量表示一个迭加的恒定电压 (直流电平), 它并不影响交流特性, 因而可以令它等于零。

1.3 脉冲波形的傅里叶分析

我们感兴趣的是, 计算在输入端加有脉冲波形而不是一串无穷的正弦振荡时的电路性能。傅里叶定理说明: 任何一个时间函数等效于频率从零到无穷大的, 并且具有相应振幅和相角的许多连续正弦波之和。如果这个时间函数是周期性的, 则频谱包含许多分立的线, 它们成谐波的关系, 而每个分量的振幅是一定的。对于一个单次脉冲来说, 频谱变成是连续的; 每个分量的振幅趋近于零, 并且由单位频率范围内的振幅来代替, 而加法就由积分来代替。如果 $f(t)$ 是一个表示脉冲的时间的 (实) 函数, 则在角频率 ω 和 $(\omega + d\omega)$ 之间的相对复振幅 $A(\omega) \cdot d\omega$ 有下列形式

$$A(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{-j\omega t} f(t) dt. \quad (1.3)$$

在图 1.3 上比较了一个单次矩形脉冲的频谱和一个宽度相同而峰值幅度大一倍的对称三角形脉冲的频谱。在矩形脉冲的情况下, 由于它的上升时间比三角形脉冲的上升时间短, 它的高频分量显得更为重要。

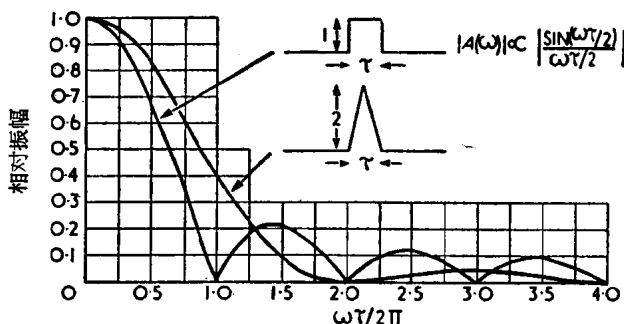


图 1.3 矩形脉冲和三角形脉冲的傅氏频谱

第一步是将输入脉冲分析成它的傅里叶分量, 然后分别计算其相应的输出分量。利用迭加原理, 总的输出将等于各个分量的积分 (或相加)。这样, 如果振幅为 $A(\omega)$ 的正弦波输入产生 $G(\omega) \cdot A(\omega)$ 的输出, 此处 $G(\omega)$ 是网络的特性, 则相应于输入 $f(t)$

的输出脉冲 $\phi(t)$ 为

$$\phi(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} G(\omega) \cdot A(\omega) e^{j\omega t} d\omega. \quad (1.4)$$

这个方法含有二次积分,并且常常是封闭积分,而下一节讨论的拉普拉斯变换方法往往只须要一次这样的积分。后一种方法对脉冲分析更为方便,但是在傅里叶方法中固有的频率分量的概念是非常有用的,它可以很快地对电路性能作出近似的估计。

为了使输入脉冲能够无畸变地再现,则(a)电路必须将所有频率分量同样程度地放大(或衰减),以及(b)通过电路后引起的每个分量的相角变化等于零,或者与频率成正比(波形没有畸变地延迟一段时间是允许的)。在条件(a)不能满足时,每一个实际系统都有振幅畸变¹⁾;在条件(b)不能满足时,则要产生相角畸变。任何一个系统都具有一定的振幅带宽,在这段频率范围内放大系数明显地与频率无关,而在这频带以外则下降到零;系统也具有一定的相角带宽,在这范围内相角变化与频率成正比。显而易见,与矩形输入脉冲相对应的输出脉冲前沿的上升时间,不能比这个系统的振幅响应的上限频率的四分之一周期短很多。此外,输出脉冲的总宽度不能比下限频率的半周期大很多(当然,它不能短于上升时间的两倍)。也许对相角带宽的概念比较生疏,但是在脉冲电路中,它的重要性必须强调。从获得最小畸变的观点来看,宁愿频率分量不能全部复现,而不让它们以不正确的相角到达输出端。在后一种情况下,高频分量并不能正确地相加以获得一个快的脉冲上升,而仅仅在输出脉冲的前沿上迭加了一串不希望有的“起伏”。这些“起伏”可能在主脉冲到达之前不久或在到达时发生,同样也可能保持到脉冲的顶部。这种现象是容易明了的,但是很难消除。这是因为相角带宽和振幅带宽常常是紧密相联的,一般不容易做到在相角特性偏离线性时使振幅响应曲线很快地“截止”。

关于带宽与脉冲畸变之间的关系,包括决定上升时间的最好

1) 往往采用“频率畸变”的术语来表示本书的“振幅畸变”的含义;“振幅畸变”是与任何已知频率下振幅离开直线性的偏差相关联。

方法的探讨,已经做了许多理论工作。如果读者须要知道更多的有关这方面的报导,请查阅陈 (Cheng)^[102], 伊格司费耳 (Eaglesfield)^[103], 萨谬隆 (Samulon)^[104,105], 狄托罗 (Di Toro)^[106], 提许 (Tischer)^[107,108] 和特克 (Tucker)^[109] 等人的文章。一个简单而实用的上升时间测量是,决定相当于最终幅度的 10% 到 90% 的时间间隔。因而,上升时间 t_r 可由下式近似地决定

$$t_r = 0.45/f_c, \quad (1.5)$$

式中 f_c 是在均匀响应的频带内的上限频率,并且由振幅下降到它的中频数值的 $1/\sqrt{2}$ (或下降 3 分贝) 的点来决定¹⁾。

当许多网络级联时,振幅-频率特性曲线是相乘的(或者,采用分贝标度时是相加的),而相角-频率特性曲线是相加的。我们所关心的是在脉冲通过整个系统时所产生的上升时间的积累性变坏。如果 t_r 是每节网络分别加上矩形脉冲时的上升时间,则整个系统的总上升时间 τ 为

$$\tau = \sqrt{\sum t_r^2}. \quad (1.6)$$

这个关系式只有假定脉冲为高斯 (Gauss) 形而且没有上冲的情况下才能严格地适用[例如,参阅伐莱 (Valley) 和华尔门 (Wallman)^[110]]. 但是在一般应用中,这个方程式给出一个非常有价值的指引(请参阅附录 V)。

系统的下限频率决定可能维持的最大脉冲宽度,除非在变压器的设计以及某种型式的行波放大管里,通常促使我们考虑此问题的原因并不多。这个极限处在微秒范围内,可以利用“普通”的脉冲技术使它做到我们所希望的那样低。当然,采用这种方法不能间接地影响到超高频的性能,因为这是我们在毫微秒范围内首要的关心所在。

1.4 单位阶跃函数

在脉冲工作中,不管在理论研究以及在实验工作方面,海维赛

-
- 1) 上升时间可以定义为两点之间的时间差;这两点为在半幅度处对波形所作的切线与(i)基线相交以及(ii)最终静止状态(往后延伸)相交的交点。于是式(1.5)中的数值 0.45 用 0.5 来代替。