

相 移 均 衡 器

陈叔远 颜绍书 编著

人 民 邮 电 出 版 社

内 容 提 要

本书介绍相移均衡器、延迟线和宽带 90° 定相差网络的原理和具体设计方法。

全书共分六章。分别讲述相移失真对信号传输波形的影响；延迟线、宽带 90° 定相差网络及全通网络的原理，图解设计和综合的方法；各种类型时延特性的均衡方法；全通网络的有源和无源实现法；用电子数字计算机实现自动设计相移均衡器的原理和方法并给出程序。

本书可供从事通信设备设计制造和使用的人员及高等院校有关专业师生参考。

相 移 均 衡 器

陈叔远 颜绍书 编著

责任编辑：李 树 岭

*

人民邮电出版社出版

北京东长安街27号

河北省邮电印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

◆

开本：787×1092 1/32 1984年2月第 一 版

印张：11 8/32页数：180 1984年2月河北第一次印刷

字数：256千字 插页：3 印数：1—5,500册

统一书号：15045·总2731—有5302

定价：1.60元

目 录

绪 论	(1)
第一章 相移失真对信号波形的影响	(5)
§ 1-1 通信系统与基本信号	(5)
一、通信系统的构成	(5)
二、基本信号	(6)
三、用基本信号合成复杂波形的信号	(9)
§ 1-2 正弦信号作用下的网络特性	(17)
一、转移电压比函数	(18)
二、工作传输函数及工作传输常数	(19)
三、相移和时延的概念	(21)
§ 1-3 信号传输的无失真条件	(22)
一、什么是信号失真	(22)
二、无失真传输对网络的要求	(23)
三、信号通过网络的响应举例	(25)
四、基带传输对网络的要求	(32)
五、频带传输对网络的要求	(35)
§ 1-4 衰减和相移波动产生的失真	(42)
一、衰减和相移波动的产生	(42)
二、衰减波动引起的失真	(43)
三、相移波动引起的失真	(45)
第二章 全通网络与延迟线原理	(49)
§ 2-1 桥型全通网络的参数	(49)
一、桥型网络的特性参数	(49)

二、全通网络的特性参数	(52)
三、全通网络的工作传输常数与转移函数	(53)
§ 2-2 一阶全通网络	(54)
一、传输常数	(54)
二、零极点图	(55)
三、工作相移与群时延	(57)
四、一阶全通网络的另一形式	(59)
§ 2-3 二阶全通网络	(61)
一、传输常数	(61)
二、零极点图	(63)
三、工作相移与群时延	(64)
§ 2-4 全通网络的桥 T 等效网络	(67)
一、变换网络结构的必要性	(67)
二、等效网络的证明	(68)
三、实用的等效桥 T 网络	(69)
§ 2-5 无限多节全通网络组成的延迟线	(71)
一、基本概念	(71)
二、时延特性	(72)
三、主要结论	(74)
§ 2-6 有限节全通网络组成的延迟线	(75)
一、分析方法简述	(75)
二、结论	(78)
§ 2-7 有限节全通网络组成的带通延迟线	(80)
一、零极点分布	(80)
二、主要结论	(82)
第三章 延迟线与宽带90°网络的图解及综合	(84)
§ 3-1 图解的几何基础	(84)
一、函数及其图形表示	(84)

二、坐标平移	(86)
§ 3-2 非标称化样板	(87)
一、一阶全通网络的样板	(87)
二、二阶全通网络的相移与时延	(88)
§ 3-3 用样板设计延迟线	(93)
一、初始参数的估算	(93)
二、试加平过程	(95)
三、电路元件计算	(97)
§ 3-4 机助加平设计延迟线	(99)
一、特点简述	(99)
二、初始值的确定	(100)
三、加平过程	(103)
四、元件计算	(109)
§ 3-5 用最平时延理论综合延迟线	(115)
一、原理简介	(115)
二、综合实例	(121)
§ 3-6 切比雪夫延迟线	(126)
一、时延特性简介	(127)
二、设计举例	(133)
§ 3-7 带通延迟线设计简介	(136)
一、频率变换式	(136)
二、主要计算公式	(138)
三、设计举例	(140)
§ 3-8 宽带 90° 定相差网络的综合设计	(142)
一、宽带 90° 定相差网络用途简介	(142)
二、宽带 90° 定相差网络综合原理	(143)
三、设计举例	(153)
第四章 相移均衡器的设计	(159)

§ 4-1	用非标称化样板设计的方法	(159)
一、	低通网络的相移均衡	(159)
二、	带通系统的相移均衡	(171)
§ 4-2	用标称化样板设计的方法	(186)
一、	标称化样板	(187)
二、	设计步骤与参数修正量	(194)
三、	设计实例	(197)
§ 4-3	中频带通滤波器相移均衡器	(205)
一、	不对称抛物线分解的方法	(207)
二、	全通网络时延公式的另一形式	(211)
三、	对称抛物线时延的均衡	(214)
四、	斜直线时延的均衡	(221)
五、	计算举例	(225)
第五章	全通网络的实现	(241)
§ 5-1	损耗的影响	(241)
一、	元件损耗对零极点的影响	(242)
二、	元件损耗对特性参数的影响	(243)
§ 5-2	元件偏差对输入阻抗的影响	(245)
§ 5-3	全通网络实现的限制	(247)
一、	元件值范围的限制	(248)
二、	元件损耗的限制	(248)
三、	元件比值的限制	(250)
四、	温度系数的限制	(251)
§ 5-4	桥型全通网络元件损耗的补偿	(256)
一、	元件损耗补偿的原理	(257)
二、	计算实例	(262)
§ 5-5	无源全通网络的调测	(268)
一、	全通网络的调测顺序	(268)

二、全通网络相移和时延的测定	(270)
§ 5-6 全通网络的有源实现	(274)
一、运算放大器简介	(274)
二、二阶有源全通网络举例	(276)
三、一阶有源全通网络	(280)
§ 5-7 可变延迟网络	(281)
一、参数范围的选取	(281)
二、可变时延均衡器基本节	(282)
三、模拟电感简介	(286)
第六章 相移均衡器的计算机辅助设计	(288)
§ 6-1 引言	(288)
一、最小二乘逼近	(289)
二、时延均衡举例	(292)
§ 6-2 相移均衡器设计程序	(293)
一、程序的功能简介	(295)
二、输入的内容和格式	(296)
§ 6-3 设计举例	(298)
一、A型输入的例子	(298)
二、C型输入例子	(302)
三、半自动设计方式的例子	(305)
附录6-1 相移均衡器自动设计源程序	(插页)
附录6-2 最优化方法简介	(310)
附录6-3 多元函数的泰勒级数	(333)
附录6-4 附录6-2 中式(15)的推证	(335)
附表一 无源全通网络元件公式表	(336)
附表二 时延样板	(341)

绪 论

在人类社会里，人们总离不开消息的传递。由一地向另一地传递消息就是通信。在各种通信方式中，利用“电”来传递消息的通信方式（简称电通信）具有迅速、有效、而又准确的优点，因而获得广泛应用和迅速发展。

电通信所传递的消息包括语音、数据、图片、活动画面等等。电通信的过程是：把消息转换成电信号，从甲地发送到乙地后，再将电信号还原为消息提供给接收用户。要保证消息准确无误，必须要求发送端信号的波形在接收端准确地重现。

若波形因传输而受到损害，不能精确地重现时，就叫做波形失真。产生失真的原因有如下几种〔1〕

（1）信道中存在的电子管、晶体管、铁芯线圈等元件的非线性失真；

（2）信道对不同频率的信号有不同的增益或衰减引起幅度失真；信道相移与频率不呈线性关系时产生的相移失真（也有称时延失真，或延迟失真的）；

（3）信道中阻抗不匹配的各链接点产生回波引起的失真；

（4）干扰和噪声引起的失真。

本书主要讨论相移引起的信号波形失真。

我们知道幅度和相移都可能引起信号的波形失真。但是实践证明语言、音乐这一类由人耳收听的消息，由于人耳听觉的特点（人耳具有沿鼓膜立体分解信号的能力，因而不同频率的分量可以分开听，很少有相位依赖关系），对幅度失真引起的波形失真十分敏感，而对相移失真引起的波形失真几乎感觉不

出来。所以，电话信道规定了严格的衰减失真容限，而相移失真通常不考虑。但是对于传输图象信号或数据的信道，幅度失真或相移失真引起的波形失真都会对传输质量造成损害。例如使用一个带有相移失真的信道传输脉冲群，由于脉冲被“展宽”，邻近的脉冲波形就会重迭而相互干扰。这对数据传输来说会增加误码率；对传真会降低图象分辨力；当传送电视时，会引起画面部分不清楚、色彩减退、色调混乱。下面可以举出一个比较形象的例子来说明相移失真的影响〔2〕。某微波通路在传送电视时曾作过一个实验，一位演员手持缀有红缨的马鞭在舞台上飞舞。将马鞭的挥动作为一个特写镜头来拍，当色度信号延迟为十几毫微秒时还感不到异样，但当延迟增大到400毫微秒之后，马鞭上的红缨不见了，只见马鞭附近好像有几只红蝴蝶随着鞭子飞舞。这是由于彩色电视低频段和色副载波附近频段相移失真引起的，可见对图象及数据信号要考虑相移。

为了克服相移失真，可加入相移均衡器，使得信道的总相移与频率呈线性关系，从而消除信道的相移失真，这种方法称为相移均衡技术。相移均衡技术广泛地应用于通信系统中，例如在电视的发送和接收过程中〔8〕，图象发射机残余边带滤波器带来的低频失真会产生拖影、超白现象，可以通过采用低端相移均衡器加以解决；高频端的相移失真产生过冲、振铃现象可以用高端相移均衡器进行均衡。在电视接收机中伴音载波也会在3~4兆赫间产生相移失真，若不采取措施就会出现色彩重合不良现象。但在接收机中采用相移均衡器是不经济的，所以一般都在发射机中采取预均衡，但称它为接收机相移均衡器。例如联邦通信委员会(FCC)和日本电波法规定的接收机相移均衡器，就是由四节二阶全通网络构成的。对于数据传输来说〔4〕，低速率的不必考虑相移均衡，只有当速率高于2400比

特/秒才需要考虑信道的相移特性。数据信道多数是利用电话网的信道，而早已发展起来的电话信道，对相移的直线性要求很低，因此其相移失真远大于数据传输允许的容限。为了把传输数据的电话信道的相移失真减少到允许值，可以加入相移均衡器。相移均衡器视使用的条件不同也有许多种^[4]：直通专线数传电路使用专门为它而设计的相移均衡器，能达到较高的均衡效果，其相移与直线偏差只有 $3^{\circ}\sim 6^{\circ}$ ；对于要经常进行交换的信道，线路不固定，可按统计平均特性设计相移均衡器，当然精度不会太高，在工作频带内相移与直线偏差均衡到 $15^{\circ}\sim 20^{\circ}$ ；在交换的信道中还要设置可变相移均衡器，它依据信道测试信号指示器进行调节，以便使其相移与直线的偏差达到容限。这时，该信道就可以使用了。可调相移均衡器有步进的和连续的两类，它们虽然可以用无源LC网络实现，但更多情况是用有源RC或RLC实现。除以上所述外，在高速传真（如60路报纸新闻传真）也需要对载波信道的滤波器进行相移均衡；对于使用调幅制的传真来说，为了提高频带利用率，常常使用残余边带滤波器来实现不对称边带传输。这时残余边带滤波器的过渡带的幅度特性要满足对载频奇对称，由这个要求可以设计出一个滤波器，但残余边带方式通常还要求滤波器在整个工作频带内具有线性相移，所以还要设计一个相移均衡器使滤波器具有线性相移才能满意地工作。

大家知道信道中相移失真主要来自高选择性的那些部件，如选择性放大器、滤波器等。近些年来设计线性相移滤波器的理论有很大进展，预料今后相移均衡的任务会减轻一些，但不能取消。因为首先是传输线本身存在相移失真，少不了相移均衡；其次，广泛用于电视、传真、数据传输中的残余边带滤波器多半使用滤波器加相移均衡器来实现；其三，由于建立专

门的数据通信网不经济，通常多利用已建成的电话网传输数据信号也要相移均衡。还要指出在某些情况下，宁用相移均衡器加滤波器的方案而不用线性相移滤波器方案。例如卫星通信系统中〔5〕，往往把滤波器放在卫星上，而把相移均衡器放在卫星地面站内。这是因为线性相移滤波器的重量和体积都要比仅只考虑幅度特性的滤波器来得大些（相对比较而言尽管线性相移滤波器的元件总数要比相移均衡器加上只考虑幅度特性的滤波器的元件总和来得少），为了节省卫星上的极为珍贵的重量和空间，宁愿在地面站内均衡。可见均衡技术仍有它存在的必要。

相移均衡多半使用非最小相移网络，如 m 式非最小相移滤波器，或全通网络。但是用得最多的还是全通网络。设计相移均衡器的主要困难是需要选择多个二阶全通节的参数。通常一个相移均衡器用几节乃至几十节二阶全通网络，而每节又需要确定两个参数，常常要算许多方案之后才能找到合适的方案，因而计算量大，设计十分麻烦。由于相移均衡对象不同，给定的相移特性千差万别，初始参数的选取各不相同，到目前为止，很难找出一个对各种情况均能适应的理想的万能方法。早期的设计方法是凭经验试探，后来针对高频窄带系统采用数学近似来选参数〔6〕；对低频宽带系统则用延迟线理论近似求参数〔7〕，然后核算调整参数逐次逼近；或用样板〔8〕定初始值而后逐次调整逼近。后来电子数字计算机日益普及，这样，使用各种近似算法并借助电子计算机设计相移均衡器的方法不断出现。但是，若初始值选取得不好则往往不能接近目标，甚至会产生发散。目前多数设计仍然是利用前述各种方法例如样板法定初始值，而后用电子计算机进一步优化。除了设计外，元件的精度，调整的方法和损耗的影响都会对相移均衡器的质量产生影响，对此我们将在书中逐一加以讨论。

第一章 相移失真对信号 波形的影响

内 容 提 要

本章是相移均衡器的理论基础，将分析几个基本信号通过信道的响应；介绍正弦信号作用下的网络特性，并引出相移和时延的概念以及如何实现信号波形的无失真传输。最后介绍使用均衡技术后，剩余的衰减或相移波动会对信号造成什么影响。

§ 1-1 通信系统与基本信号

一、通信系统的构成

人们在进行通信时，按照信息论的观点，传递消息就意味着传递了信息。这里所谓信息，是指在消息中所包含的对受信者有意义的内容。理想的通信系统模型可以绘成为图1-1的形式。其中信息源代表需要传送到对方去的信息。发送部分的任务是把信息转换成信号。信号经信道传送到对方，而信道本身包括各种无线、有线线路，中继设备，交换设备等等。信号经过信道传送给接收部分后，由接收部分把信号“翻译”（加工）成与原发送信息十分接近的信息然后提供给用户。在传输过程中不可避免地要受到外界电力线路、厂矿动力设备，以及强电力开关、广播等等的干扰，在图1-1中用噪声来代表它们的干

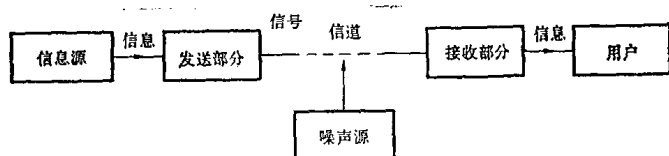


图 1-1 通信系统模型

扰。为着今后讨论方便，信道部分可以近似地看成一个线性系统（或称线性二端对网络），有时为了便于称呼就简称为“系统”或“网络”，并用图 1-2 表示之。

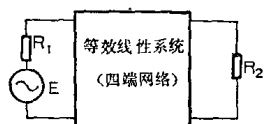


图 1-2 等效线性系统

二、基本信号

在图 1-1 中，信道传输的信号就其波形而言是各式各样的，例如传送数据信号则是脉冲群；传送电视信号则既有周期重复的方波，又有不规则的图像信号。不过好在信道可以近似地看做一个线性系统，所以我们能用迭加原理将一些基本信号近似地迭加出任何一种实际信号来。下面就介绍几种最有用的基本信号〔9〕。

1. 正弦信号

正弦信号的数学表达式是

$$u(t) = U_m \sin \omega t \quad (1-1)$$

式中 ωt 代表正弦信号的相位角（又称相角或相位），如图 1-3 所示，它类似于一个动点沿着半径为 U_m 的圆周逆时针作等角速度运动时的角位移； $u(t)$ 代表正弦信号的瞬时值，它类似于在 t 这一瞬间，上述作圆周运动的点与原点连线 OA 在纵轴上的投影 OB ； ω 称为角频率，它类似动点的角速度，单位为弧度/秒； U_m 是正弦信号的最大值或称为振幅。十分明显，当 $t =$

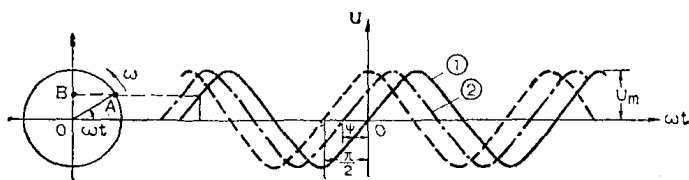


图 1-3 正弦信号的波形

0 时, $u(t)|_{t=0} = 0$, 其波形位于坐标原点, 如图 1-3 曲线①所示。另外若 $t=0$ 时电压不为零, 可以认为正弦波移动了一个相角 ψ (称为初相), 则 $u(0) \neq 0$, 其形状如图 1-3 曲线②, 表达式为

$$u_1(t) = U_m \sin(\omega t + \psi).$$

当初相 $\psi = 90^\circ$ 时, 正弦波就成为余弦波了, 因为 $u_2(t) = U_m \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}) = U_m \cos \omega t$ 。可见正弦和余弦是可以互相联系互相转化的。例如有一已知正弦信号 $u_1(t)$, 也可以同时表示为余弦信号的形式

$$u_1(t) = U_m \sin(\omega t + \psi) = U_m \cos(\omega t + \theta)$$

其中 $\theta = (\psi - \frac{\pi}{2})$ 。既如此, 今后就把正弦及余弦信号看做同一类信号, 并统称为“正弦信号”。从图 1-3 看出正弦波形是以相角 2π 为周期的周期信号, 若令

$$\omega T = 2\pi$$

$$\text{则} \quad T = \frac{2\pi}{\omega} \quad (1-2)$$

T 称为周期信号的周期, 它的单位用秒。一秒钟重复的周期数称为频率并用 f 表示, 即

$$f = \frac{1}{T} \quad (1-3)$$

频率的单位为赫兹，简称赫，并且用符号 Hz 表示。

我们又把 $(\omega t + \psi)$ 叫做 $u_1(t)$ 在时刻 t 时的相位，把 ψ 叫做初始相位（简称初相）。

2. 单位阶跃信号

单位阶跃信号的波形如图1-4(a)所示，即当 $t < 0$ 时，

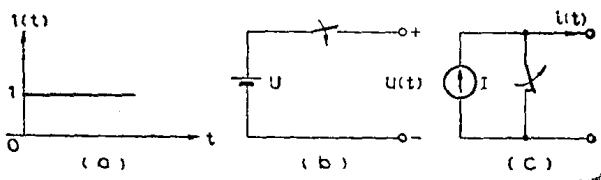


图 1-4 单位阶跃信号

信号值为零；当 $t > 0$ 时信号值为1；在 $t = 0$ 瞬间信号值是不确定的。不难想像单位阶跃信号是实际开关波形的理想化。如果用数学公式表示单位阶跃信号可以写成

$$1(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ 1 & t > 0 \end{cases} \quad (1-4)$$

在图1-4(b)中，绘出了开关接通电源 U 的情况，设开关在 $t = 0$ 时刻闭合，则闭合前输出电压为 $u(t) = 0$ ， $t < 0$ 。当开关闭合后输出电压为 $u(t) = U$ ， $t > 0$ 。把它们写成一个式子时，即为

$$u(t) = U \cdot 1(t) \quad (1-5)$$

同理，图1-4(c)的开关打开后，电流源才能由输出端流出，所以可写成为

$$i(t) = I \cdot 1(t) \quad (1-6)$$

3. 单位冲激信号

单位冲激信号，也称 δ 函数，其数学公式为

$$\begin{cases} \int_{-\infty}^{\infty} \delta(t) dt = 1 \\ \delta(t) = 0 \quad t \neq 0 \end{cases} \quad (1-7)$$

先谈谈冲激两字的含意。因为这种信号的特点是作用时间极短而强度很大，很象生活中钉钉子的情况，榔头打击之前和打击之后钉子都不受力，只有打击在钉子上的极短时间钉子受很大的冲击。现在请看图1-5中两个图，在图(a)中绘出三个四方形，第一个是正方形，它表示信号作用时间是1秒，电压是1伏，两者乘积就是正方形包围的面积为1单位（伏·秒）。如果将信号作用时间缩为0.5秒而电压增为2伏则面积保持为1单位；如果把作用时间再缩短成0.25秒，那么为了保持面积仍为1单位，必须把电压增加到4伏才行。可见，在保持面积为1单位的条件之下，作用时间越短，信号的幅度就越大。当作用时间越来越小并且趋近于零时，幅度就越来越大并且趋向无限大，只有在此时才叫做冲激信号，并由图1-5(b)来表示它。

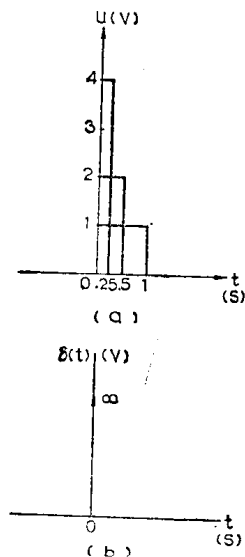


图 1-5 单位冲激信号

三、用基本信号合成复杂波形的信号

1. 利用正弦信号分析周期信号

正弦信号对电路的作用可以通过线性集总参数网络的稳态计算方法即电工学里已经学过的符号法求得。例如图 1-6(a)

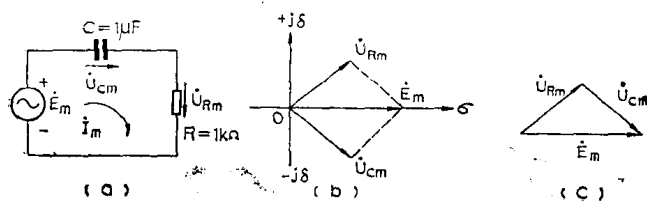


图 1-6 正弦信号的矢量图

的电路图，设电动势为

$$e(t) = \sqrt{2} \sin 1000t (\text{伏}),$$

加在电容量为 $1 \mu\text{F}$ 的电容器和电阻值为 1000Ω 的电阻器串联的电路，求稳态电压 $u_R(t)$ 、 $u_C(t)$ 和电流 $i(t)$ 。

根据符号法写出电动势的复数最大值为

$$\dot{E}_m = \sqrt{2} e^{j0} (\text{伏})$$

电路的串联阻抗 Z 为

$$\begin{aligned} Z &= R + 1/j\omega C = 10^3 + 1/j10^3 \cdot 1 \cdot 10^{-6} \\ &= 10^3 - j10^3 = 10^3 \sqrt{2} e^{-j\frac{\pi}{4}} (\text{欧}) \end{aligned}$$

回路中电流复数最大值 $\dot{I}_m$ 为

$$\dot{I}_m = \dot{E}_m / Z = \sqrt{2} e^{j0} / \sqrt{2} \cdot 10^3 e^{-j\frac{\pi}{4}} = 10^{-3} e^{j\frac{\pi}{4}} (\text{安})$$

于是电容器和电阻器上的电压复数最大值可以求出如下：

$$\dot{U}_{Rm} = \dot{I}_m R = 10^{-3} e^{j\frac{\pi}{4}} \cdot 10^3 = 1 e^{j\frac{\pi}{4}} (\text{伏})$$

$$\dot{U}_{Cm} = \dot{I}_m Z_C = 10^{-3} e^{j\frac{\pi}{4}} \cdot 10^3 e^{-j\frac{\pi}{2}} = 1 e^{-j\frac{\pi}{4}} (\text{伏})$$

在求出各复数最大值之后，就可以写出电流、电压的瞬时表示式

$$i(t) = I_m \sin(\omega t + \varphi_3) = 10^{-3} \sin\left(1000t + \frac{\pi}{4}\right) (\text{安})$$