

幅度均衡器

杜丽冰 编著·人民邮电出版社



FUDU JUNHENGQI

幅度均衡器

杜丽冰 编著

人民邮电出版社

内 容 简 介

本书以国产60路以下载波电话设备为典型，详细地讨论了固定和可变幅度均衡器的电路结构、设计方法。特别是对当前生产中采用的设计方法作了理论分析，并列举了12路、60路载波电话设备中部分固定和可变幅度均衡器的设计实例，以便于读者学习和直接应用。

本书适于长途电信设计、维护方面的工程技术人员阅读，也可供电信专业的教师与学生参考。

幅 度 均 衡 器

杜丽冰 编著

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 1981年5月 第一版

印张：10 8/32 页数：164 1981年5月河北第一次印刷

字数：235千字 插页：3 印数：1—3,900册

统一书号：15045·总2462—有5195

定价：1.10元

前 言

长途通信中，随着话路容量的不断增加及通信距离的不断延长，幅度均衡器在载波通信中的作用就日益显得重要，它的数量和种类也不断增加，其性能的好坏、设计是否合理等对载波通信的质量和降低成本有着较大的影响。目前，我国晶体管12路、60路载波电话设备已获得广泛应用，因此企业、工厂和学校从事载波通信工作的同志迫切要求学习和掌握幅度均衡器的工作原理、设计方法，以提高对幅度均衡器的性能分析和设计能力，促进工作。不少同志要求编写这方面的书籍，为此，编写了本书，以适应这方面的需要。

幅度均衡器的电路结构很多，新的设计方法也在不断出现。本书所要讨论的主要内容，是根据邮电部门60路以下载波电话设备中已使用的固定和可变幅度均衡器的情况，介绍幅度均衡器的电路结构、性能分析、设计方法及其在载波通信系统中的应用。特别对目前实际生产中所采用的幅度均衡器的各种设计方法的原理作了理论上的分析，对其中一些重要公式进行了论证和推导，对这些设计方法作了总结和归纳，整理了必要的计算公式和设计曲线。整理并列举了晶体管12路和60路载波电话设备中部份固定和可变幅度均衡器的设计实例，以便读者学习和直接应用它们。为便于读者学习和使用，也简要地介绍了涉及到的一些必要的网络基础知识及生产维护知识。

本书涉及到的数学公式较多，在叙述时为保证正文内容的连贯性，将重点公式的论证和推导均列在附录中，以供阅读时

参考。

本书主要供从事载波设备中幅度均衡器的设计、科研及设备维护安装等工作的技术人员、通信院校有关专业的师生参考和查用。

在本书初稿的编写中，曾得到了邮电 519 厂、北京邮电学院有关老师的热情帮助和支持，在此表示衷心的感谢。由于本人的实践经验及水平所限，书中难免存在不妥甚至错误之处，恳切地希望读者批评指正。

作 者

1979年 3 月

附录 可变幅度均衡器的公式推导

(一) 证明当 $R_{T1} \cdot R_{T2} = R_0^2$ 时, 可变幅度均衡器的传输衰减值 是对 $\bar{B}$ 上下对称的。

(二) 式(5-1-15)的推导

(三) 式(5-1-16)的推导

(四) 证明 $R_0 = \sqrt{R_{max} \cdot R_{min}}$

(五) 证明 $\tilde{B} = \ln \left| \frac{1 + Y e^{-2(b+ja)}}{1 - Y e^{-2(b+ja)}} \right| = \frac{1}{2} \ln \frac{1 + 2YF + y^2 e^{-4b}}{1 - 2YF + y^2 e^{-4b}}$

(六) 证明 $\tilde{B} = \ln \frac{1 + x e^{\varphi}}{x + e^{\varphi}} = \ln \frac{1 + \frac{x-1}{x+1} \left(\frac{e^{\varphi} - 1}{e^{\varphi} + 1} \right)}{1 - \frac{x-1}{x+1} \left(\frac{e^{\varphi} - 1}{e^{\varphi} + 1} \right)}$

(七) 证明定阻桥T型固定幅度均衡器甲类结构的相移和衰减之间具有下式关系:

$$\cos 2a = \frac{1 - ch b_{max} + 2ch(b_{max} - 2b)}{1 + ch b_{max}}$$

(八) 证明 $b_{N2} = \frac{1}{2} \ln \frac{\tilde{B}'(f)}{\tilde{B}(f)}$

(九) 若 $Z_2 = \frac{Z_B}{2}$ 、 $Z_A \cdot Z_B = R_0^2$ 及理想调节特性是对称的, 则证

明

$$Z_1 = \frac{\frac{Z_B}{2}}{\frac{Z_B}{2} + \frac{R_0}{4}}$$

(十) 证明第Ⅲ类可变幅度均衡器实用电路之二的传输常数为:

$$\theta = \ln 2 + 2\varphi - \ln x + \ln \frac{1 + x e^{\varphi}}{x + e^{\varphi}}$$

(十一) 证明第Ⅲ类可变幅度均衡器实用电路之三的传输常数为:

$$\theta = \ln 2 + 2\varphi + \ln \frac{2+x}{x} + \ln \frac{1 + x e^{\varphi}}{x + e^{\varphi}}$$

目 录

第一章 幅度均衡器基础知识	(1)
第一节 概述.....	(1)
第二节 无源四端网络.....	(2)
一、无源四端网络的常用结构.....	(2)
二、阻抗匹配链接概念.....	(3)
三、无源四端网络的常用参数.....	(6)
四、无源四端网络匹配链接的特性参数.....	(16)
第三节 二端网络.....	(17)
一、纯电抗二端网络的电抗频率特性.....	(18)
二、二端网络的等效.....	(24)
三、二端网络的倒量.....	(27)
第四节 阻抗和频率标称化.....	(29)
一、阻抗标称化.....	(30)
二、频率标称化.....	(30)
三、元件标称化.....	(31)
第二章 幅度均衡器的作用和要求	(35)
第一节 传输系统无畸变传输信号的条件.....	(35)
第二节 均衡的概念.....	(40)
一、均衡的必要性.....	(40)
二、均衡的原理.....	(42)
第三节 幅度均衡器在载波通信中的应用.....	(44)
一、幅度均衡器在载波通信中的作用.....	(44)

二、载波通信系统中所采用的幅度均衡器结构···	(47)
第四节 对幅度均衡器的基本要求·····	(48)
一、对均衡幅度畸变均衡器的要求·····	(49)
二、对其它幅度均衡器的要求·····	(51)
第三章 固定幅度均衡器的结构及其特性·····	(52)
第一节 基本结构及其特性·····	(52)
一、定阻对称桥 T 型结构·····	(52)
二、 Γ 型结构·····	(56)
三、二端网络型结构·····	(57)
第二节 桥 T 型幅度均衡器的结构及其特性分析···	(58)
一、甲类结构·····	(59)
二、乙类结构·····	(66)
第四章 桥 T 型幅度均衡器的设计原理和方法·····	(80)
第一节 设计幅度均衡器的主要技术要求·····	(82)
第二节 试凑法的设计原理和方法·····	(83)
一、设计原理·····	(83)
二、设计步骤·····	(88)
三、设计实例·····	(92)
第三节 图表法的设计原理和方法·····	(106)
一、设计原理·····	(106)
二、设计步骤·····	(121)
三、设计实例·····	(131)
第四节 综合法的设计原理和方法·····	(137)
一、设计原理·····	(137)
二、设计步骤·····	(155)
三、设计实例·····	(176)
第五章 可变幅度均衡器·····	(186)

第一节 第Ⅰ类可变幅度均衡器	(188)
一、电路分析	(188)
二、电路设计	(196)
三、第Ⅰ类可变幅度均衡器小结	(198)
四、可变幅度均衡器的技术要求	(200)
五、第Ⅰ类可变幅度均衡器设计实例——晶体管	
对称电缆60路载波机(ZL-3型)平调网络的设计	(202)
第二节 第Ⅱ类可变幅度均衡器	(204)
一、电路分析	(204)
二、附加四端网络	(215)
三、电路设计	(221)
四、第Ⅱ类可变幅度均衡器小结	(229)
五、第Ⅱ类可变幅度均衡器设计实例	(230)
第三节 第Ⅲ类可变幅度均衡器	(261)
一、第Ⅲ类可变幅度均衡器的典型电路及其演变	(261)
二、电路分析	(264)
三、调节特性 $\tilde{B}_{max}(f)$ 与电路元件参数之间关系的推导	(273)
四、第Ⅲ类可变幅度均衡器设计实例——ZM-305	
型明线12路载波机B-A方向斜调网络 N_1 的设计	(278)
五、第Ⅲ类可变幅度均衡器小结	(282)
第四节 变阻型可变幅度均衡器小结	(284)
第六章 幅度均衡器的调测	(286)
第一节 元件制作要求	(286)
第二节 电感和电容元件的调谐	(290)
第三节 特性测试	(293)
第四节 幅度均衡器的障碍查找	(298)

第一章 幅度均衡器基础知识

本章首先概述幅度均衡器在载波通信中的作用，接着介绍了网络的阻抗匹配链接、无源四端网络和二端网络的性能分析及计算方法、阻抗和频率标称化等必要的基础知识，以便为分析无源幅度均衡器的作用、特性、设计原理和设计方法打下基础。

第一节 概 述

各种通信方式的传输系统所传输的信号（如电话、电报、传真、电视、广播及数据信号等），一般说来，都不是单一的频率，均是由一些不同频率的分量所组成（如电话信号是由300~3400赫芝这些频率分量所组成）。而且这些不同频率分量的幅度、相位之间都具有一定的关系。当信号从甲地传输到乙地时，可以认为由这许多不同频率的分量同时传输到乙地后，又合成为原来的信号波形。为了保证通信质量，总是要求信号从甲地无畸变地（或无失真地）传输到乙地。即要求在传输过程中应保持各不同频率分量之间的幅度、相位关系。使乙地收到的信号电压（或电流）与甲地发送的信号电压（或电流）的波形一样（而不要求大小一样），只有这样才能使传输的信号正确无误。这种传输称为信号无畸变传输。

但是由于种种原因，信号在传输系统中传输时，不可避免地会产生畸变。把信号在传输系统中所产生的畸变予以充分的

补偿，称为均衡。

另外，随着载波通信向大容量通信系统发展，线路的传输频带增宽、线路的最高传输频率增高，使通信线路中插入的增音机数目增多。为确保信号噪声比及防止增音机过负荷，也必须进行严格的均衡。

通常，均衡有幅度均衡和相位均衡两类。本书重点讨论幅度均衡。在通信系统中，为完成幅度均衡所设置的各种均衡网络通称为幅度均衡器。

载波通信系统中，广泛使用的各种无源幅度均衡器属于无源线性四端网络的范畴。而组成无源线性四端网络的各个支路的组成部份均由不同的二端网络构成。为能很好的掌握幅度均衡器的性能分析和设计方法，以及遇到一些较为复杂和新颖的均衡网络及一些新的设计方法时，也能具有分析、认识的能力。因此必须首先掌握无源网络的基本概念及基本分析方法。为此，在讨论幅度均衡器之前，先简要地介绍幅度均衡器的分析和设计中直接有关的必需的无源网络基础知识。

第二节 无源四端网络

一、无源四端网络的常用结构

凡是具有四个端子的任何复杂电路，都称为四端网络。由

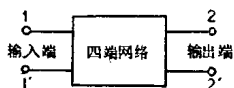


图 1-2-1

线性元件组成而且内部不包含电源的四端网络称为无源线性四端网络，简称无源四端网络或四端网络。

四端网络中 连接信号源的两个端子 1-1' 端为输入端，连接负载的两个端子 2-2' 端为输出端，如图 1-2-1 所示。

无源四端网络的常用结构 有 Γ 型(或称倒 L 型)、 T 型、 π 型、 X 型(或称桥型)和桥 T 型等几种。根据网络结构的对称性,又可分为对称和不对称的;平衡和不平衡的。其结构对中心垂直轴左右对称的网络称为对称四端网络,否则称为不对称四端网络;在结构上对中心水平轴上下对称的网络称为平衡四端网络,否则称为不平衡四端网络。见图1-2-2。

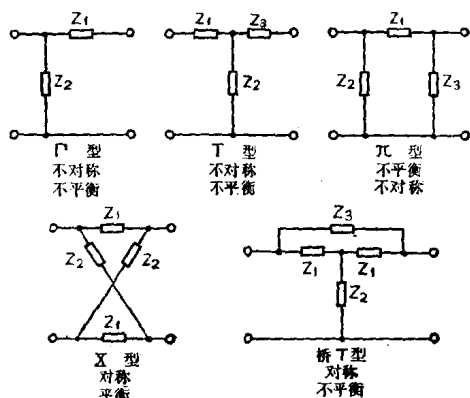


图 1-2-2

称的网络称为平衡四端网络,否则称为不平衡四端网络。见图1-2-2。

载波通信系统中所应用的幅度均衡器的结构,除有少量的平衡和对称的 X 型、不平衡和不对称的 Γ 型外,绝大多数是不平衡而对称的桥 T 型结构。

为了便于分析问题,把沿电流传输方向的支路称为串臂,如 T 型四端网络中的 Z_1 、 Z_3 即是;而把具有分流作用的、跨接在串臂之间的支路称为并臂,如 T 型四端网络中的 Z_2 即是。此外,将 X 型四端网络中的 Z_2 称为斜格臂。

二、阻抗匹配链接概念

在几个四端网络连接时,前一个四端网络的输出端和后一个四端网络的输入端相连接,如图1-2-3所示,这种连接的方式称为四端网络的链接。

四端网络的链接在工程实际中极为常见。如载波机中的幅

度均衡器，在其前后都是和其它部件相链接的。有时幅度均衡器本身就是由两节简单的幅度均衡器链接而成的。另外，载波通信系统中，还要求四端网络之间按阻抗匹配链接的原则进行链接。

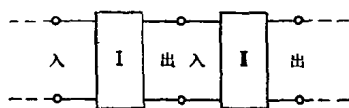


图 1-2-3

所谓阻抗匹配链接，就是要求各四端网络链接点两侧的阻抗均相等。具体地说，就是要求在整个传输通路中，各种传输线路、传输线路与载波机，以及载波机中各部件之间的链接处，两侧的阻抗彼此相等。

要求阻抗匹配链接的理由有以下两点：

(1) 电源可向负载输送最大功率

在几个四端网络链接时，对其中某一个四端网络而言，总可以把它前面的所有电路用一个等效电源（或称为信号源，它具有内阻 R_i 和电动势 E ）来代表，而把它后面的全部电路用一个等效负载电阻 R_L 来代表（在载波通信系统中，要求电源内阻抗及负载阻抗均为纯电阻），因此可以将电路简化为如图 1-2-4(a) 所示。同理，也可以将任何一点的前后电路简化为如图 1-2-4(b) 所示。

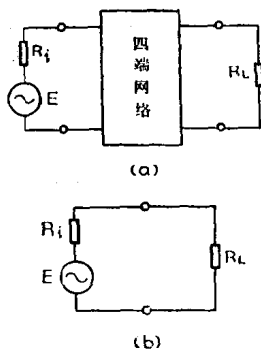


图 1-2-4

从图 1-2-4(b) 可见，等效电动势 E 输出的功率只有部份传送给负载电阻 R_L ，这一部份功率是有用的功率，而另一部份功率消耗在内阻 R_i 上。当 E 和 R_i 已经给定时，若负载电阻数值不同则其吸收的功率也就不同。经理论分析，当负载电阻 R_L 等于电源内阻 R_i 时，负载电阻 R_L 所吸收的功率为最大，其数值等于 $E^2/4R_i$ 。也就是说：负载电阻与电源内阻相等是电源

向负载输送最大功率的条件，也是信号具有最小衰减的传输条件。

应当指出：当电源向负载电阻输送最大功率时，电动势所供给的功率，有一半消耗在内阻上，另一半输送给负载电阻，效率只有50%。在通信传输中，由于信号电源的功率不大，而又要求传输效果好些，即力求负载电阻上能够获得最大功率。因此，在选择负载电阻时，总是使它能满足最大功率输送条件，即要求阻抗匹配链接。

(2) 可使信号无畸变传输

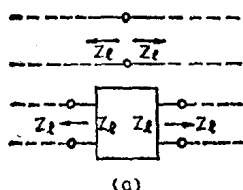
载波通信系统中的信号传输，除了要求满足最大功率输送条件外，还要求声音清晰、图像无畸变等，而这些要求只有在整个传输通路中满足阻抗匹配链接的条件时才可实现。这是因为，在满足阻抗匹配条件的传输通路中，信号电波的传播是直射的；而在阻抗失配（链接处两侧的阻抗不相等）的传输通路中，信号电波在链接处就会发生反射的现象。这种反射现象往往会给传输通路带来许多不良影响。例如：信号波形畸变、线对间互相串音、电路杂音增加等。

因此，阻抗匹配链接的概念在载波通信系统及网络分析中是比较重要的。为了保证通信质量，在传输通路中必须力求满足阻抗匹配链接的条件，对于每一个四端网络来说，要求在阻抗匹配情况下工作，即四端网络两侧的阻抗应分别与信号源内阻和负载电阻相等。这样对四端网络来说，就有一个特殊的要求：在阻抗为 Z_1 的传输通路中，插入或除去一个四端网络时，必须保证传输通路仍继续工作在阻抗匹配链接的情况下。当插入时，要求插入的四端网络两侧阻抗应为 Z_1 ，如图1-2-5(a)所示；而对于两侧阻抗分别为 Z_{11} 和 Z_{12} 的传输通路需要链接时，必须设法插入一个两侧阻抗分别为 Z_{11} 和 Z_{12} 的四端网络，以使

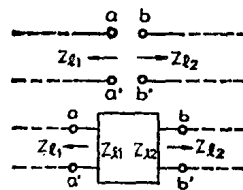
两个传输通路的链接处阻抗匹配，如图1-2-5(b)所示。

三、无源四端网络的常用参数

当信号经过无源四端网络传输以后，信号的幅度会受到衰



(a)



(b)

减、相位会发生变化，这种变化我们称为传输特性。无源四端网络的传输特性是由四端网络的特性决定的，这种特性可以用其输入、输出端的电压、电流或功率之间的关系来表示。这些关系又可以用四端网络的阻抗、传输常数（包括传输衰减、传输相位）等参数来表示。

由于分析和运用这些四端网络的参数的条件不同，这些参数可分以下两类：

图 1-2-5

(1) 特性参数（又称影象参数）

特性参数是四端网络本身所固有的。当网络内部的元件值和结构确定以后，特性参数也随之确定，所以它是表征四端网络本身特性的参数。当运用特性参数来分析四端网络的特性时，必须要求四端网络的输入、输出端均处于阻抗匹配链接的状况。

常用四端网络的特性参数有特性阻抗、开路、短路阻抗和固有传输常数等。

由于特性参数比较直接地表明了四端网络的阻抗特性和衰减特性，因此在网络的分析和设计中应用很广。

(2) 工作参数

由于载波通信系统所传输的信号频带比较宽，虽然力求在

各四端网络的链接处做到阻抗匹配，但实际上要在全部工作频带内都满足阻抗匹配的条件是很困难的，因此，必须考虑由于阻抗失配而引起的一些影响。我们把能够进一步反映四端网络在实际工作情况下，即阻抗失配时的实际工作特性的参数，称为工作参数。四端网络的工作参数不仅与网络本身的结构、元件值有关，而且还与电源内阻及负载电阻有关，因此，它不能完全表达网络本身的特性。

常用四端网络的工作参数有输入、输出阻抗、工作传输常数、介入衰减、传输衰减和反射衰减等。

为了更好地理解各种参数的概念和正确地使用它们，下面介绍这些参数的定义及计算方法。

(一) 无源四端网络的工作参数

1. 输入阻抗

当四端网络的输入端1-1'端与内阻为 R_i 、电动势为 E 的电源相连接，输出端2-2'端的负载电阻为 R_L ，从四端网络的1-1'端自左向右看进去的等效阻抗为四端网络1-1'端的输入阻抗，通常用符号 Z_{sr1} 表示。从四端网络的2-2'端自右向左看进去的等效阻抗为四端网络2-2'端的输入阻抗，通常用符号 Z_{sr2} 表示

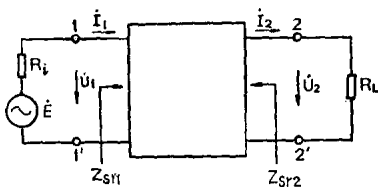


图 1-2-6

(由于2-2'端是输出端，所以有时也把从2-2'端自右向左看进去的阻抗称为输出阻抗)，如图1-2-6所示。

一般情况下，图中的电压 $\dot{U}_1$ 、 $\dot{U}_2$ 和电流 $\dot{I}_1$ 、 $\dot{I}_2$ 均为复数。

四端网络的输入阻抗也可以用四端网络输入端的电压与电流的比值来表示, 即

$$Z_{in} = \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_1} \quad (1-2-1)$$

输入阻抗值可以用测量的方法确定。如果测得输入端的电压 $\dot{U}_1$ 与电流 $\dot{I}_1$, 用式(1-2-1)即可求得输入阻抗值。

输入阻抗值也可以用计算的方法求得。如果网络的结构、元件值和负载电阻都给定时, 就可以用电工学中求电路总阻抗的方法求得。

2. 工作传输常数

为了衡量四端网络对信号的作用, 通常我们用一个标准的功率(或称参考功率) W_0 和实际四端网络的输出功率 W_2 进行比较, 且因这个标准功率与工作状态是相关联的, 所以这样便可以更好地反映实际情况。

当将电源与和其内阻相等的负载 R_i 连接时, 在负载 R_i 上得到的复数电压和电流的乘积 $\dot{U}_0 \dot{I}_0$ 与实际工作时负载 R_L 上所获得的复数电压和电流的乘积 $\dot{U}_2 \dot{I}_2$ 的比值, 取自然对数的二分之一, 称为工作传输常数(参见图1-2-7), 通常用符号 g 来表示。

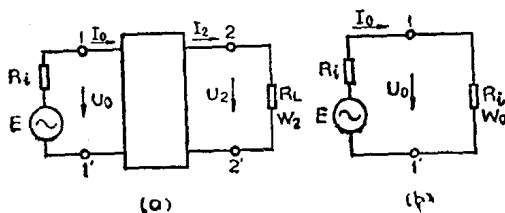


图 1-2-7