

无线电技术丛书



张家智 编

海洋出版社

无线电导航仪器

渔业电子技术丛书

无线电导航仪器

张家智 编

海洋出版社

内 容 简 介

无线电导航技术在航海及其他海上活动中的作用是不容置疑的。本书较全面地介绍了目前广泛使用的几种船用导航仪器，并分别对各种导航仪器的工作原理、技术参数作了详细的阐述。本书分为四章，第一章介绍了船用雷达导航系统；第二章介绍了劳兰A导航系统；第三章介绍了劳兰C导航系统；第四章介绍了卫星导航系统。

本书内容充实，知识面广，原理清晰，是从事无线电通信的技术人员的有益参考书，也可作为中等技术学校的教科书。

责任编辑：陈泽卿

责任校对：俞丽华

渔业电子技术丛书

·无线电导航仪器

张家智 编

海洋出版社出版（北京市复兴门外大街1号）
新华书店北京发行所发行 昌平兴华印刷厂印刷
开本：787×1092 1/16 印张：17.75 字数：400千字
1990年12月第一版 1990年12月第一次印刷
印数：1-1000

ISBN 7-5027-0927-4/TN·11 定价：12.30元

前 言

为了尽快提高广大渔业电信技术人员的理论水平和使用维修电子设备的实际技能，使之适应渔业生产发展和实现渔业科学管理的要求，我们组织水产系统的有关院校、科研单位、企业及行政管理部门的部分教师和工程技术人员编写了《渔业电子技术丛书》，拟作为水产系统培训中等电子技术专业人员的教材，并作为对从事通信、助渔、导航等技术人员进行技术考试和考核的统一参考资料。

众所周知，近代电子技术不仅在工业、农业、科学技术和国防方面获得了广泛应用，而且已深入到水产业的许多领域，并有日益发展的趋势。电子技术的发展及其在水产业各个领域的广泛应用，已成为水产业技术发展和科学管理的重要标志。为了加快水产系统科学技术发展的进程，普及电子技术是十分重要的。

电子技术包含的内容十分广泛，该丛书根据水产系统应用电子技术的现状，结合发展应用新技术的重点编写，力求实用。该丛书由《电工基础》、《无线电基础》、《无线电收发信原理》、《单边带通信原理》、《电波传播与天线》、《电源》、《无线电通信设备的维修》、《助渔仪器及其维修技术》、《无线电导航仪器》九分册组成。

该丛书主要针对具有中等文化程度的电子技术人员，力求内容系统全面，且理论联系实际，以提高理论水平和使用维修电子设备的实际技能为目的，而着重叙述电路的基本工作原理、物理概念和基本计算方法，并在此基础上介绍电子设备的测试、使用和维修的方法。为了学好这套教材，读者应具有初中以上程度的物理、数学和电工原理知识，在系统学习基础部分后，根据自己所从事的工作，选学有关的各个分册。在学习过程中，希望读者尽可能将学到的理论与实际结合起来，学以致用。

我们组织编写这套丛书是初步尝试，由于该丛书涉及面广，加上经验不足，时间匆促，不当之处难免，欢迎读者提出指正。

该丛书在编写过程中，得到了上海交通大学、福建省电子研究所、福建省广播电视厅、上海海运局、上海无线电二厂，以及水产系统有关同志的大力支持。在此，我们对所有为该丛书出版付出辛勤劳动的同志一并致以谢意。

农牧渔业部渔政渔港监督管理局

1980年1月于北京

目 录

第一章 船用雷达	(1)
第一节 雷达的基本原理	(1)
一、概述	(1)
二、雷达测向测距的基本原理	(1)
三、船用导航雷达的组成及其技术参数	(2)
第二节 雷达的微波系统及天线	(5)
一、传输线	(6)
二、波导管和微波元件.....	(11)
三、雷达天线.....	(16)
第三节 雷达的发射系统	(19)
一、预调制器.....	(21)
二、调制器.....	(25)
三、磁控管振荡器.....	(29)
四、高压延迟接通电路.....	(32)
第四节 雷达接收系统	(35)
一、收发开关.....	(35)
二、速调管本机振荡器.....	(37)
三、混频器.....	(39)
四、中频放大器.....	(44)
第五节 雷达显示器	(50)
一、雷达显像管及其供电电路.....	(52)
二、门信号产生电路.....	(53)
三、扫描电路.....	(55)
四、距标电路.....	(57)
五、船首标志和同步调整电路.....	(61)
六、视频放大器和混合级.....	(63)
七、中心偏移及电源电路.....	(67)
第六节 数字电路基础	(69)
一、逻辑门电路.....	(69)
二、触发器.....	(77)
三、数字逻辑电路.....	(84)
第七节 距离数字显示电路	(89)
一、时标距离的显示方法.....	(89)
二、电路原理.....	(91)
第八节 雷达的电源系统	(94)
一、中频交流机组.....	(94)

二、中频逆变器.....	(97)
第九节 雷达的安装与使用	(103)
一、雷达的安装.....	(103)
二、雷达的操作.....	(104)
三、雷达的调整.....	(105)
第十节 雷达的保养与检修	(108)
一、雷达的保养.....	(108)
二、雷达的检修.....	(109)
第二章 劳兰A导航系统及其接收机	(114)
第一节 劳兰A导航系统.....	(114)
一、定位原理.....	(114)
二、劳兰A导航系统的设置.....	(115)
三、劳兰A电波的传播.....	(118)
第二节 劳兰A接收机	(120)
一、面板结构及各旋钮、开关的作用.....	(121)
二、劳兰A测定时差原理.....	(122)
三、劳兰A定位仪的使用方法.....	(123)
四、保养与安装.....	(125)
五、定位仪的技术指标.....	(126)
六、定位图表的使用说明.....	(126)
第三节 电路原理概述.....	(128)
一、显示部分.....	(128)
二、测量部分.....	(130)
第四节 测量部分	(144)
一、主振及分频.....	(144)
二、主延时电路.....	(154)
三、副延时电路.....	(161)
四、自动频率控制电路.....	(174)
第五节 接收部分	(178)
一、东方红-Ⅱ型接收机部分	(179)
二、DSW-Ⅰ型接收机部分.....	(184)
第六节 显示器和电源部分	(186)
一、显示器.....	(186)
二、电源部分.....	(189)
第七节 定位仪的调整	(192)
一、东方红-Ⅱ型机的调整	(192)
二、DXS-Ⅱ型机的调整.....	(200)
三、DSW-Ⅰ型机的调整.....	(202)
第八节 定位仪的维修.....	(203)
一、故障种类.....	(204)
二、修理方法.....	(204)

三、各种故障的分析与判断.....	(206)
第三章 劳兰C导航系统及其接收机	(209)
第一节 劳兰C导航系统	(209)
一、劳兰C导航系统的特点	(209)
二、劳兰C导航系统的设置	(211)
三、劳兰C电波传播	(213)
第二节 劳兰C定位接收机	(216)
一、劳兰C定位接收机的分类	(216)
二、LR-747 劳兰接收机的操作和使用.....	(216)
三、LR-747 劳兰接收机的技术性能.....	(219)
四、LR-747 劳兰接收机方块图	(220)
第四章 卫星导航系统及接收机	(227)
第一节 子午仪卫星导航系统概述	(227)
一、子午仪导航系统的设置.....	(227)
二、子午仪系统的定位原理.....	(228)
第二节 子午仪卫星导航仪	(234)
一、子午仪卫星导航仪的分类	(234)
二、MX-1112机的设备和性能	(234)
三、MX-1112卫星导航仪的简单工作原理	(236)

第一章 船用雷达

第一节 雷达的基本原理

一、概述

雷达是无线电测向测距这几个英文字缩写后 (Rader) 的音译。雷达的工作原理与蝙蝠飞行时不断发射超声波的原理相似。雷达天线发射的脉冲式极高频电磁波, 当碰到目标后, 电磁波被反射, 并由雷达的同一天线接收, 然后在显示器上显示出来, 这样我们就知道, 周围有障碍物。雷达作为导航仪器有很多优点, 最主要的是不受昼夜、气候的影响, 并且有相当远的作用距离和较高的测量精度, 因此, 雷达在国防、国民经济和科学研究等领域都有着广泛的应用。

船用导航雷达是船舶航行的重要导航仪器, 它可用作避碰、定位、测距等。目前我国大部分渔轮都装有导航雷达, 且以753型和“海燕”航海雷达为多数, 所以本章将以这两种雷达为例作较详细的分析。

随着雷达应用的日益广泛, 雷达制造工艺迅速发展, 国内外新型的雷达不断出现, 特别是在省电、体积小等方面有很大的改进。目前在国外已普遍采用二单元雷达, 即整部雷达由两个单元组成, 其中收发机和天线组成一个单元, 显示器组成一个单元, 其体积和重量都为减小。特别是省去交流机组, 这就为减少能源的消耗, 提高效率创造了极为有利的条件, 使得在小型的机帆船上也能装备雷达, 这样, 雷达的使用范围就更广泛了。

二、雷达测向测距的基本原理

雷达所发射的电磁波和声波一样, 在空间的传播过程中遇到障碍物时会被反射, 利用电磁波的这个特性, 雷达就能在该方位上发现目标。因电磁波按直线规律传播, 且传播的速度不变, 利用电磁波的这个特性就可测定目标的方位和距离。

1. 雷达测距

电磁波在空气中的传播速度 (v) 大约等于光速, 即 $v=3 \times 10^8$ 米/秒。由于发射和反射电磁波具有同样的传播速度, 所以只要测得发射和反射波到达雷达的时间间隔 t , 将此时间的二分之一乘以传播速度 v , 则可得到目标的距离 R , 即 $R=1/2vt$ 。

这里 R 的单位为米, t 的单位为秒, v 的单位为米/秒。因为电磁波的传播速度极快, 时间单位用秒太大, 常用微秒 (μs) 表示, 这时上述的测距公式可改写为

$$R = \frac{1}{2} t \times 10^{-6} \times 3 \times 10^8 \text{ (米)} = 150t \text{ (米)}$$

由上式可见, 要测定目标的距离 R , 只需测定时间 t 就可以了。雷达测量时间 t 的方法是在雷达显示器的荧光屏上, 产生一条标准的时间刻度线, 如图 1.1 所示。这条时间刻度线的

起点(0)和发射机发射脉冲的时间严格同步,即发射脉冲时正好是扫描线的起点。根据回波所处的位置就能方便地读出时间 t ,由于我们要测量的是距离而不是时间,因此雷达显示器上根据测距公式,将时间换算成距离刻度,这样就可方便地直接读出目标的距离了。

为了测定各个不同方向目标的距离,这个距离刻度就不只是一条直线上的几个点,而是由这些点组成的圆圈(称距标圈),如图1.2所示。这样,任何方位上的目标回波都能方便地读取距离读数。

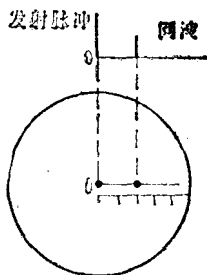


图 1.1 雷达测距原理

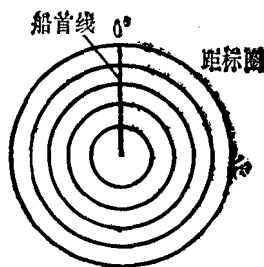


图 1.2 雷达距标圈

2. 雷达测向

雷达天线具有良好的方向性,它可将电磁波集中成很窄的波束,向一定的方向发射出去。当天线旋转时,它发射的电磁波也在空中旋转扫描,所以要求显示器中的扫描线准确地与天线同步旋转,即天线指向某一方向,扫描线也处于同一方位。如图1.3将荧光屏上的圆周分成 0° — 360° 的刻度,且使 0° 线指向船首的方位,那么目标所处的方位就容易从方位刻度上读得。显然,图上目标处于偏离船首右方 30° 的方位上。

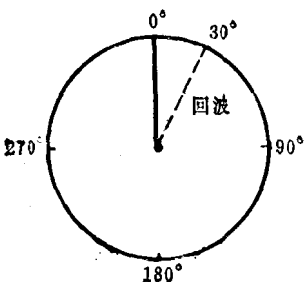


图 1.3 雷达的测向原理

雷达测向的精度决定于天线的方向性,如果天线所形成的电磁波波束的宽度很窄,只要天线的轴线稍为偏离目标,辐射到目标的电磁波能量就减弱很多,回波的强度也很快减弱,方位误差较小。如果天线辐射的波束很宽,那么即使天线的轴线较大地偏离目标,辐射到目标上的能量减弱不多,回波强度变化不大,这样方位误差就较大。

三、船用导航雷达的组成及其技术参数

(一) 简要方框图

船用导航雷达通常由五大部分组成,即发射机、接收机(同装在一个机箱里称为收发机)、显示器、天线和变流机,其简要方框图如图1.4所示。下面简要介绍各部分的功用和它们之间的关系。

变流机组:一般船用雷达需要单相中频(频率为1000赫)交流电源,但通常船电是直流或频率为50赫的交流电源,其电压和频率都不符合要求,所以必须通过变流机组把船电变为所

需的中频交流电。

发射机：发射机的作用是产生一定持续时间和重复频率的极高频大功率脉冲信号，然后经天线辐射出去。其持续时间和重复频率都与距离量程相对应。脉冲的载波频率采用微波波段，一般有两种，一种波长为3厘米（频率是9375兆赫），另一种波长为10厘米（频率为3000兆赫）。用这样高的频率作为载波是由于微波具有和光波相似的特性（即直线传播），几乎不受气候的影响，且波长越短，对同样尺寸的目标的反射方向性越好，同样尺寸的天线，波长越短的电磁波所形成的波束也越窄，

角度分辨力和测向精度也越高，因此目前船用雷达都用微波作为载波。在上述常用的两种波长中，3厘米波长的雷达，其角度分辨力和测向精度比10厘米波长的雷达高，但10厘米波长的雷达，抗雨雪干扰能力比3厘米波长的雷达好，因而有些远洋船上各装有3厘米和10厘米波长的雷达各一台，以取长补短。

接收机：接收机的作用是将回波信号转变为视频脉冲信号送到显示器上。雷达接收机采用超外差式，故接收机包含有本机振荡、中频放大、检波等几部分。通常发射机、接收机、收发开关等装在同一机箱里，称为收发机。

天线及馈线系统：雷达的天线是定向天线，它将电磁波聚成细束后集中向某一方向发射，因而它具有很好的方向性。同时它接收由目标反射回来的回波，并将其输送到接收机，所以雷达天线是收发共用天线。天线要收发两用就要有一个称为收发开关的器件与它配合，收发开关的作用是控制天线和接收机的通道。当发射机在发射的持续期间里，收发开关关闭，使大功率的发射信号不致输入接收机，保护了接收机的零件；其余的时间开关都打开，以便让回波信号顺利地通过它进入接收机。

显示器：显示器的作用是把目标的回波显示出来，并以其所处的位置来判断目标的距离和方位。因此，显示器有一个标准的计时装置，即距离标志电路和扫描发生器等电路。

图1.5是753型雷达的结构方框图，“海燕”航海雷达除了没有活动距标外，其余部分几乎和753型雷达相同。

（二）主要技术参数

1. 收发机

波长：发射信号的载波波长，通常为3厘米。

发射脉冲宽度 τ 和重复频率 f ：脉冲宽度是指发射脉冲信号的持续时间，它决定了雷达的距离分辨力。当测量近距离目标时用窄脉冲；而远距离时用宽脉冲。重复频率指每秒钟发射的脉冲次数。重复频率的高低要保证在发射第二个脉冲时，已经收到第一个脉冲在最大作用距离上的目标回波信号，并留有余地。近程时重复频率应高，远程时重复频率应低。

753型雷达近程时是窄脉冲 $\tau=0.05-0.08$ 微秒， $f=2000$ 赫，远程时为宽脉冲 $\tau=0.45-$

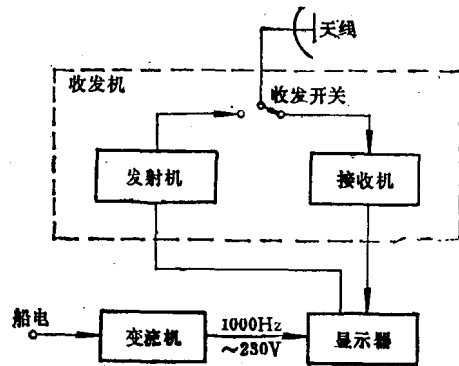


图 1.4 雷达的简要方框图

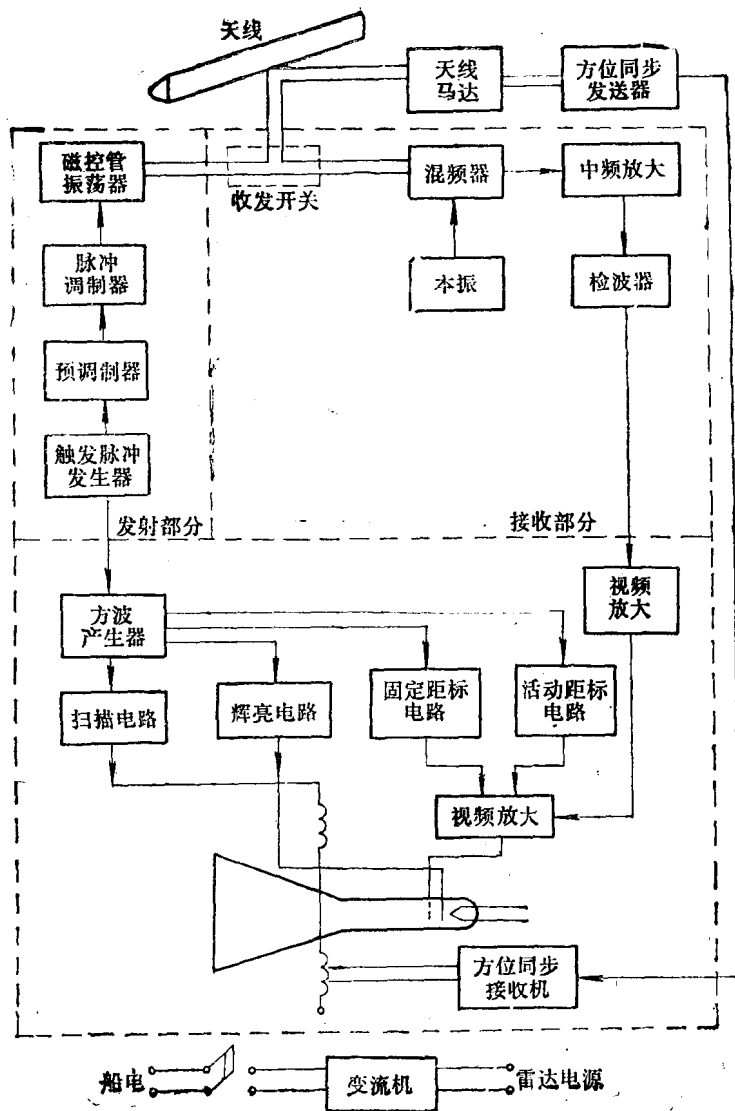


图 1.5 雷达的方框图

0.6微秒, $f=1000$ 赫。

“海燕”雷达只有一种频率 ($f=1500$ 赫), 近程时 $\tau=0.12$ 微秒, 远程时 $\tau=0.3$ 微秒。

发射脉冲功率: 在高频脉冲持续期间内, 753型雷达发射机的输出峰值功率为10—70千瓦, “海燕”雷达为2千瓦。

接收机灵敏度: 指保证接收机的输出端信/噪比满足要求时, 接收机输入端的最小信号功率, 一般为 10^{-12} 瓦。

接收机中频频率：60兆赫。

接收机频带宽度：宽脉冲时为 5 ± 0.5 兆赫，窄脉冲时为 18 ± 1 兆赫。753型雷达和“海燕”雷达相同。

2. 天线

水平波束宽度：天线波瓣图的形状如图1.6所示，其中最大的称为主波瓣。水平波束的宽度指两个半功率点方向间的夹角 $\theta_{0.5}$ ，半功率点是指偏离辐射功率最强的方向，功率下降为一半，即场强为0.707时的方向。为了提高目标分辨率，一般水平波束的宽度很窄约为 $1.5^\circ - 2^\circ$ 。

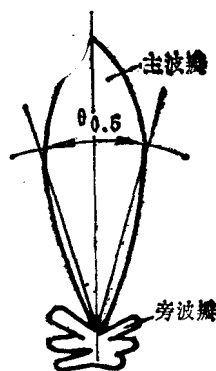


图 1.6 天线波瓣图

垂直波束宽度：和水平波束相似，指垂直方向上半功率点的夹角，一般为 20° 左右。

天线转速：18—25转/分。

3. 显示器

距离量程及相应的固定距标读数：下面分别给出753型雷达和“海燕”雷达的量程及固定距标读数（见表1.1）。

测量精度：误差不超过该量程的 $\pm 1.5\%$ 。

表 1.1 雷达的量程及固定距标读数

	档 次	量 程 (海里)	固定距标环 (环)	每环距离 (海里)
753型 雷达	1	0.5	2	0.25
	2	1	4	0.25
	3	2	4	0.5
	4	4	4	1
	5	8	4	2
	6	16	4	4
	7	32	4	8
“海燕” 雷达	1	1.5	2	0.25
	2	2.5	5	0.25
	3	10	5	2
	4	25	5	5

第二节 雷达的微波系统及天线

微波是指波长为1毫米至1米的无线电波。其特点是：（1）由于波长短，天线的尺寸可以做得很小（一般在2米左右），且具有良好的方向性。（2）频率范围宽、容量大，且

工作频段间的干扰较小。(3) 直线传播, 且传播的衰减大, 因此作用距离短(相对于波长长的无线电波)。

关于电磁波传播的基本知识, 已在本套丛书的另一分册作了专题介绍, 这里只是简要地介绍有关微波传输系统的基本原理。

一、传输线

在发射机和天线, 以及接收机和天线之间, 高频信号的传输采用什么元件和方法, 这在雷达设备里是一个特殊的问题, 一般必须采用微波传输线。

(一) 传输线的基本概念

最常见的传输电力的传输线是两根长导线, 这样的传输线用来传输频率为50赫的低频电能, 其长度可长可短, 最长的可达几十千米。如果用这样的长线来传输超高频信号, 就会产生下列问题: 由于信号频率极高(波长只有几毫米至几分米), 导体的趋肤效应严重。趋肤效应的作用使得电流只在导体很薄的表面流动, 流过电流的导线截面积很小, 导线的电阻很大, 电磁能很快就被导体消耗掉了, 也就是说, 频率越高衰减越快。此外, 由于频率高, 电磁能在传输过程中将产生辐射, 即电磁能除了由信号源一端定向地传输到负载外, 还有一部分向自由空间辐射, 这部分能量到达不了负载端, 而是白白损失掉。这种现象随着频率的升高而愈加严重。理论和实践证明, 若传输线的长度可与信号的波长相比拟时, 它将明显地辐射能量。例如电力线长100千米, 有电力的频率只有50赫, 其波长约6000千米, 导线虽长但比信号的波长短得多, 不会辐射电能。但是如果用长度为3厘米的导线来传输波长为3厘米的电能, 这时传输线已成了辐射天线, 它将大量地辐射能量, 不能用来传输电磁能。由于上述原因, 双线传输线不能用来传输微波能量, 必须采用波导管和同轴线(波导管和同轴线的 basic 工作原理和双线传输线相似)。

1. 双线传输线的特性阻抗及等效阻抗

当传输线的长度(如几米)比信号的波长(几厘米)大得多时, 我们可将传输线看成为无限长线。在这样高的频率下, 传输线上的分布电容(两根导线间的等效电容)和电感(导线的固有电感, 每米长度约为2毫亨)不能忽略, 如果将长线分成很多依次连结的很小段 ΔX , 那么传输线可等效成如图1.7的等效电路, 其中 $L/2$ 是小线段导线的电感, C 是线间的电容, R 是单位长度线段上的电阻, G 是单位长度线段上两导体间的漏电导。由此可见, 传输线可看成是四端网络, 其输入和输出端是对称的。从网络的输入端看的阻抗和从输出端看的阻抗是相等的, 都称为特性阻抗, 用 Z_c 表示。特性阻抗定义为入射波电压 \dot{U}_i 与入射波电流 \dot{I}_i 之比或反射波电压 \dot{U}_r 与反射波电流 \dot{I}_r 之比, 即

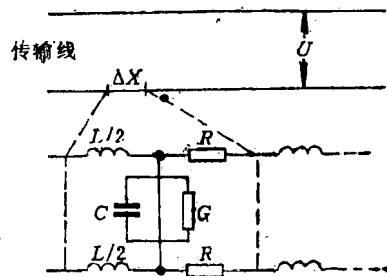


图 1.7 长线及其等效电路

$$Z_c = \frac{\dot{U}_i}{\dot{I}_i} = \frac{\dot{U}_r}{\dot{I}_r}$$

一般来说，传输线的特性阻抗是一复数，它不仅与线路的参数 L, C, R, G 有关，而且与信号源的频率有关。但通常因传输线工作在极高频状态，满足关系 $\omega L \gg R, \omega C \gg G$ ，所以传输线的特性阻抗可表示成 $Z_0 = \sqrt{L/C}$ ，实际应用上，双线传输线的特性阻抗用它的结构尺寸来表示：

$$Z_0 = 276 \lg \frac{2D}{d}$$

式中 D 为两线的中心距离， d 为导线的直径。可见，满足上述条件的传输线其特性阻抗与频率无关，通常等于几百欧姆，这样的传输线称为无损耗线。

若传输线的终端接有负载时，如图1.8所示。在传输线上任一点的电压 \dot{U} 与电流 \dot{I} 之比，称为该点的等效阻抗，用符号 Z_e 表示，即 $Z_e = \frac{\dot{U}}{\dot{I}}$ 。一般来说，等效阻抗也是复数，它是距离 x 的函数。当负载的阻抗 Z_L 等于特性阻抗时，即 $Z_L = Z_0$ ，线上各处的等效阻抗相等，且等于特性阻抗，即

$$Z_e = Z_0 = Z_L$$

2. 传输线上的行波

电磁波在传输线上传输过程中，若没有反射，则传输线上的波称为行波。为了得到行波状态，应在传输线的终端接一个数值等于其特性阻抗 Z_0 的电阻，这时行波的全部功率都被负载电阻所吸收，线上不存在反射波，称匹配工作状态，此时从线路的输入端或任一端看的输入阻抗都等于传输线的特性阻抗，且为纯电阻，其值为 $\sqrt{L/C}$ 。因此，导线上每一点电流和电压的变化是同相的。

如果忽略传输线上的损耗，则行波在导线上传输时的电压或电流的幅度始终不变。但实际上传输线存在趋肤效应和辐射等，能量的损耗是不可避免的，线上的行波电流或电压将随距离的增大而减小，不过通常 R 和 G 都较小，所以行波状态下的传输线的效率较高。

3. 传输线上的驻波

电磁波在传输线上自始至终传播时，若存在反射波，且入射波全部被反射，即反射波的幅度和入射波相等，两者在线上叠加就产生驻波。例如终端开路的无损耗线，入射波到达终端时全部被反射，在线上就产生驻波。

驻波的特性：先说明两个术语，波腹——入射波和反射波的合成波（电流或电压）振幅的最大值处称波腹。波节——合成波（电流或电压）振幅为零处称为波节。在图1.9所示的

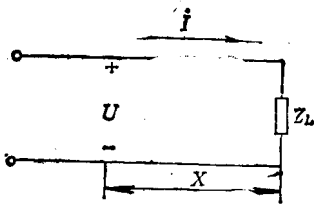


图 1.8 终端接 Z_L 的长线

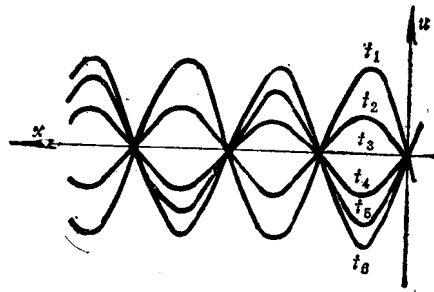


图 1.9 长线上的驻波

驻波波形中，表明了波腹、波节的位置，还标出了不同时刻驻波的电压分布情况。

当 $t=t_1$ 时，线上各点电压同为各该点电压的极大值，而线上各点电流全为零，随后线上各点电压同步地减小。

当 $t=t_2$ 时，全线电压为零，而电流同时达到各该点的最大值。 $t>t_2$ 时，沿线电压又同向相反方向增大，电流由最大值减小。可见在驻波的情况下，虽然线上各点电压或电流随时间变化，但电压沿线分布不会随时间而变化，即波腹和波节的位置不变。

驻波的电流波节与电压波腹处于同一位置，而电流波腹与电压波节也处于同一位置，即线上各处电压相位与电流相位差 $\frac{\pi}{2}$ 。由于沿线各点电压和电流的相位相差 $\frac{\pi}{2}$ ，所以各点的等效阻抗为纯电抗。

当传输线工作于驻波状态时，能量的传输效率比行波状态低，即输入的能量没有全部被负载吸收，一部分消耗在传输线上。

(二) 开路线、短路线及不同负载时的情况

1. 终端开路线

终端开路线工作于驻波状态，所以线上的电流和电压具有纯驻波的特性，下面分析不同长度开路线的性质。

长度 $L < \frac{\lambda}{4}$ (λ 是工作信号波长) 时，各点电流超前于电压 $\frac{\pi}{2}$ ，等效阻抗是电容性。

$L = \frac{\lambda}{4}$ 时，始端成为电压波节电流波腹，等效阻抗 $Z = \frac{\dot{U}}{\dot{I}} = 0$ ，相当于串联谐振回路。

上述两种情况如图 1.10 所示。

$\frac{\lambda}{4} < L < \frac{\lambda}{2}$ 时，各点电流落后于电压 $\frac{\pi}{2}$ ，等效阻抗呈电感性，如图 1.10(c) 所示。

$L = \frac{\lambda}{2}$ 时，始端是电压波腹电流波节，等效阻抗为 ∞ ，相当于并联谐振回路，如图 1.10(d) 所示。以后每隔 $\frac{\lambda}{4}$ 长度电抗性质就改变一次，而每隔 $\frac{\lambda}{2}$ 长度就重复上述的阻

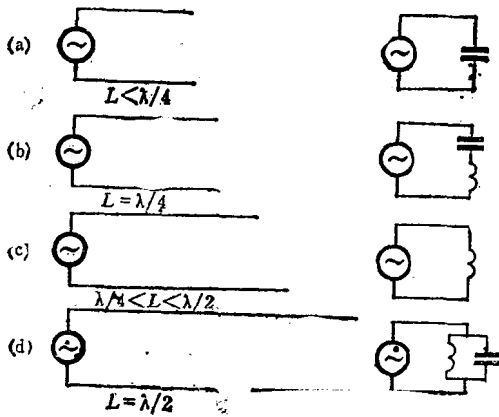


图 1.10 开路线及其等效电路

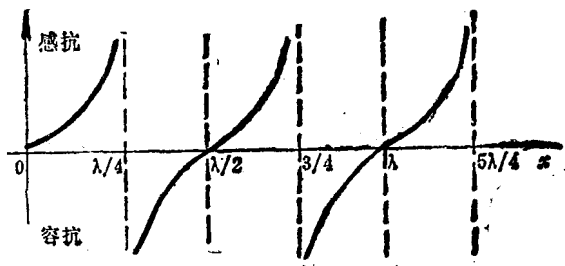


图 1.11 开路线上各点的等效阻抗

抗特性。图1.11画出了沿线等效阻抗的分布曲线，由图可见，在 $x = \frac{n\lambda}{2}$ ($n=0, 1, 2, \dots$)

处，等效阻抗为无限大。在 $\frac{n\lambda}{2} < x < \frac{(2n+1)\lambda}{4}$ 范围内，等效阻抗为电容性。在

$x = \frac{(2n+1)\lambda}{4}$ 处，等效阻抗为零。在 $\frac{(2n+1)\lambda}{4} < x < \frac{(n+1)\lambda}{2}$ 范围内，等效阻抗为感性。

2. 终端短路线

由理论分析知道，与开路线相似，无耗线在终端短路工作状态下，末端不会吸收能量，入射波的能量全部反射回去，线路上电压和电流也都是纯驻波。

但等效阻抗的性质与开路线不同，图1.12画出了短路线等效阻抗沿线上各处的分布情况，由图可见，在 $x = \frac{n\lambda}{2}$ ($n=0, 1, 2, \dots$) 处是电压波节和电流波腹，该处等效阻

抗为零。在 $\frac{n\lambda}{2} < x < \frac{(2n+1)\lambda}{4}$ 范围内，电压超前于电流 $\frac{\pi}{2}$ ，等效阻抗为电感。

在 $x = \frac{(2n+1)\lambda}{4}$ 处是电压波腹和电流波节，该处等效阻抗为无限大。在 $\frac{(2n+1)\lambda}{4} < x < \frac{(n+1)\lambda}{2}$ 范围内，电压落后于电流 $\frac{\pi}{2}$ ，等效阻抗为电容性。图1.13是不同长度的短

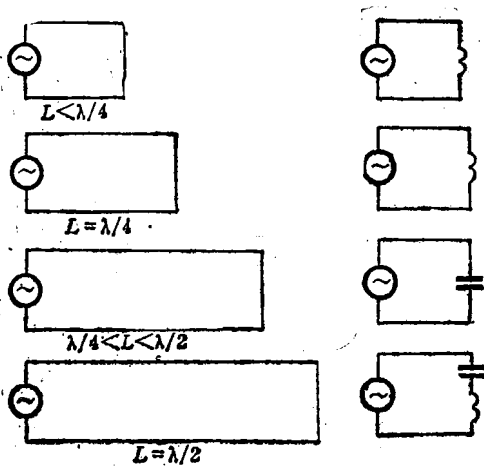


图 1.12 短路线及其等效电路

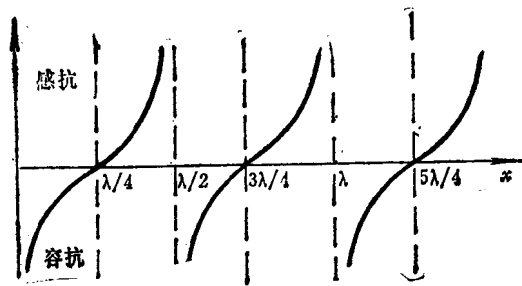


图 1.13 终端短路线上各点的等效阻抗曲线

路线的等效阻抗曲线。

3. 终端接任意负载的无耗线

由上述的分析可知，当负载电阻等于传输线的特性阻抗时，传输线上没有反射波，工作于行波状态，传输线上电压振幅处处相等；在开路线和短路线上是驻波状态，电压波节和波腹交替排列，在开路线的终点是电压波腹，在短路线的终点是电压波节。

当 $Z_0 < R_L < \infty$ ，负载电阻大于传输线的特性阻抗，传输线处于混波状态，因 $R_L \neq Z_0$ ，

一部分入射波的能量被吸收，其余的反射。这种情况下的电压分布情况与开路线相似，但由于反射波的幅度比入射波小，在驻波状态波节处，合成电压不为零，而是一个最小值 U_{\min} 。在波腹处，合成电压有一个最大值 U_{\max} ，此值比驻波状态小， R_L 越大， U_{\min} 和 U_{\max} 就越接近于驻波状态。

当 $Z_L > R_L$ 时，传输线也处于混波状态，但线上的电压分布与短路线相似。

为了表示任意负载传输线的工作情况，故引入行波系数和驻波系数。行波系数定义为 $K = \frac{U_{\min}}{U_{\max}}$ ，当行波状态时， $U_{\min} = U_{\max}$ ， $K = 1$ ；混波状态 $0 < K < 1$ ，驻波时 $K = 0$ 。

驻波系数定义为 $P = \frac{1}{K} = \frac{U_{\max}}{U_{\min}}$ ，当驻波时 $P \rightarrow \infty$ ，混波时 $0 < P < \infty$ ，行波时 $P = 1$ 。

(三) 传输线的构造和应用

1. 同轴传输线

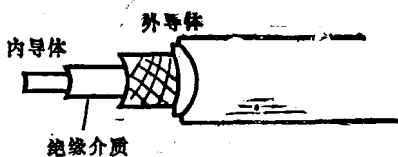


图 1.14 同轴线的结构

在雷达设备中，同轴传输线用来传输高频电能，其结构如图1.14所示。它是由一根内导体和外导体组成的长线，其中外导体由铜丝编织成网状圆筒体，内导体处于其中心。内外导体间充有聚苯乙烯等绝缘材料，所以同轴线实质上是双线传输线的一种形式。其外导体起屏蔽作用，高频电磁波沿线上传播不会产生辐射

也不会受外界干扰。

同轴线的特性阻抗 Z_0 。

$$Z_0 = \frac{138}{\sqrt{\epsilon_r}} \lg \frac{D}{d} \quad (\Omega)$$

其中 D 为外导体的直径， d 为内导体的直径， ϵ_r 为绝缘材料的介电系数。

一般雷达中所采用的同轴线的特性阻抗为75欧，为了使高频信号在传输过程中能全部被负载吸收，即工作于行波状态，必须使同轴线的终端负载电阻等于同轴线的特性阻抗，所以接收机的中频放大器的输入端接有75欧的匹配电阻。同轴线的衰减系数为

$$\beta = 0.036 \frac{\sqrt{f}}{DZ_0} \left(1 + \frac{D}{d} \right) \quad (\text{dB/m})$$

由上式可见，随着工作频率 f 的升高，传输线的衰减增大，雷达设备中同轴线用来传输中频和视频信号。

在负载电阻一定的情况下，不能随意更换同轴线，否则将使机器的性能达不到最佳状态。如果需要更换不同尺寸的同轴线，就要相应地改变终端的匹配电阻。

2. 双线传输线

这种传输线常用作超高频电抗元件和绝缘支架滤波器，也可用来延迟脉冲信号等。下面简要说明雷达中用作延迟脉冲信号的仿真长线。由于电磁波以一定的速度沿传输线传播，因此信号从传输线的一端传到另一端就需要一定的时间，线越长，信号的延迟时间也越长。但是，若用真正的传输线来延迟信号，因电磁波的传播速度太快，为延迟很短的时间就需要很长的线，这就使机器的体积变得膨大，因此实际上是采用仿真线来延迟信号。传输线上均匀地