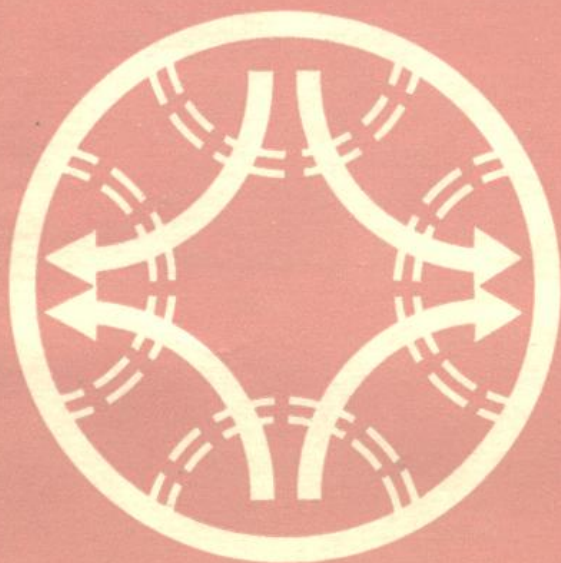


[日] 小西良弘 著



卢 懋 贺 瑞 霞 王 守 平 译

# 电磁波电路

人 民 邮 电 出 版 社

# 电 磁 波 电 路

〔日〕小西良弘 著  
卢 懋 贺瑞霞 王守平 译  
叶培大 审



人民邮电出版社

4011150

# 電 磁 波 回 路

小西良弘 著

オーム社

## 内 容 提 要

本书首先介绍了传输系统的种类,用统一的电磁波观点和网络的分析方法来处理电磁波电路问题。其中重点地、较深入地分析了波导传输系统和谐振系统。最后讲述了电磁波电路的几种网络参数的测试方法。

本书可供大专院校微波专业师生和从事微波工作的技术人员参考。

# 电 磁 波 电 路

〔日〕小西良弘 著

卢 懋 贺瑞霞 王守平 译

叶培大 审

\*

人民邮电出版社出版

北京东长安街27号

北京印刷一厂印刷

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2月第一版

印张: 10 8/32 页数: 164 1981年2月北京第一次印刷

字数: 234 千字 印数: 1—8,000 册

统一书号: 15045·总2451-无6124

定价: 1.05元

## 写在前面

### (一)

由于光纤通信的迅猛发展，人们不免要问微波、毫米波等的前途怎样？会不会被淘汰？提出这个问题是很自然的，但说它会被淘汰是不正确的。微波、毫米波、甚至更长的波段有它们的特点，有它们适宜的应用。譬如说，卫星通信、移动通信总不能由光纤通信来替代吧！地形很坏的地方，总还是用微波中继方便经济。又如毫米波圆波导  $H_{01}$  波长距离通信，比较肯定地说没有什么希望实现了，但毫米波还可以有其它的用途，例如雷达、卫星通信、遥感等等。所以说光纤通信在发展，微波、毫米波和较长波长的技术和应用也在发展，同样也有广阔的前途。



对于各个波段都有相应的传输手段和各种元部件，都有它们的谐振腔、分支线、方向耦合器、滤波器以及由它们构成的电路，结构不同，作用却相同。教学时如果逐个讲授，将成为繁琐哲学，需要多少学时才能学完？显然需要采取统一的处理方法，概括的方法，举些实例，才能学到分析和解决问题的能力，举一反三，再进而有所发现、有所发展。

4011150

本书的特点就在于采取了统一的处理方法，把传输手段、各种元部件和由它们组成的电路统一到人们经常应用的等效电路方面去。

本书把传输手段、谐振腔、各种不连续性、耦合等等，应用电磁场理论，得出等效电路和参量。

### (三)

应用电磁场理论和必要的数学工具，主要是数理方程和几种直接计算方法，这是理解和分析微波、毫米波以至光波元部件的根本途径。不用电磁场理论和必要的数学工具，将无法分析，无法理解，最多只能知其然而不能知其所以然。但是这是很困难的工作，计算也是十分麻烦的。在理解的基础上，采用测量的方法，以求取等效电路的参量是十分必要的。应用近代的精密仪器例如微波网络分析仪，可以精确快速地得出所需要的参量。

因此，本书最后一章介绍了测量参量的方法。

### (四)

总起来，本书理论性较强，数学用得比较多，适宜于高等学校微波、物理、应用数学等教学人员和相应的科技工作者参考，也可供相应专业高年级学生参考。

不妥之处，请读者指正。

叶培大

一九八〇年于北京邮电学院

## 序 言

甚高频(VHF)至特高频(UHF)频段的电磁波已在广播通信中大量采用,超高频(SHF)频段的电磁波则广泛应用于微波中继通信等方面。近年来,超高频频段的电磁波在广播通信及遥感技术等方面应用频繁。目前,毫米波波段的电磁波以地下埋设的波导管电路的形式用于宽频带通信。

这样,电磁波的利用就涉及到非常宽的频率范围,其利用率将会日益增加。因此,为适用于上述那样广泛的频率范围,就需分别采用不同结构形式的电磁波电路。同时,可预想到,今后从事这方面工作的技术人员将会增多。

过去,对于电磁波电路的研究,一般像甚高频至特高频频段的电路,超高频频段的电路,以及毫米波电路等,多数情况是根据不同频段分别研究的。若对这些不同频段的电路尽可能用统一的观点研究的话,不但能更好地理解上述各种电路,而且,将有助于创造出新的电路。为此,作者用电磁波的电路这样的含意来命名本书,把它叫做“电磁波电路”。

不同频段的电磁波,分别用不同结构形式的电路,常用的电路有同轴电路、微带电路、波导管电路等。用统一的观点研究这些电路时,最有效的方法就是大家所熟知的等效网络法。对于一般的网络,必须要用电压电流的概念,而上述的同轴电路和微带电路是由两根导体所构成的,考虑其电压电流时,立即就可得到其等效网络。而波导管电路则不同,因电磁波是在用一个导体所围起来的空间内传输的,要得到它的等效网络就变得困难了。因此,在本书中首先研究用什么样的等效网络来

表示这类电路，并举例说明如何求出这些网络参量。另外，对于电磁波电路参量的测试，采用等效网络的方法也是非常有用的。

一般在过去的测试技术中，主要是以驻波测量仪测试输入阻抗，以测试相位和衰减量求传输特性的方法。而近年来已有很方便的测试仪器出售，用这种仪器可以立即测出网络参量。所谓近代的测试技术，其中很重要的一点就是如何更好地使用这些仪器测得所希望的数据。因此，本书中把问题归结为一点，即如何设法使用近代的测试仪器求得电磁波电路的等效网络参量。

基于上述观点写出的本书内容，分章介绍如下：

第一章，介绍了电磁波电路的功能和构造，同时，说明了集中参数电路和分布参数电路的区别。

第二章，为了得出电磁波电路的等效网络，首先叙述连接到网络各端口的导波系统的等效传输线路的确定方法，叙述中同时还谈到了含有几个传输模的情况，如多线路传输理论。其次，叙述了用这些等效传输线表示等效电路的各种网络矩阵。为了从这些矩阵能更容易得到网络的性质，还叙述了矩阵的特征值和它的性质。最后介绍了网络的性质和网络中能量的关系。

第三章，介绍了求等效传输线时所需的各种导波系统中的模和传输特性及其求法。同时，介绍了在这些导波系统中不连续问题的等效网络及其求法。最后特别叙述了用实用的变分法解题的几个具体例子。

第四章，叙述了用于分波器等方面的谐振系统的一般性质，特别详细地介绍了近来研制的介质谐振腔，以及立体平面电路的谐振腔。接着叙述了关于这些谐振系统的谐振频率的求

法，并通过几个实例，阐述了严格的解、微扰法、变分法等。

第五章，研究上述谐振系统与导波系统之间，以及谐振系统与谐振系统之间的耦合问题。这个问题对于把电磁波电路作为网络处理时，是非常重要的。这里所指的网络就是取一个闭合区域，在此区域内几个导波系统电磁波能量相互之间的耦合关系。在研究或计算这类耦合关系时，最有效的一种方法就是模匹配法。用模匹配法求解时，若用变分法，则取很少的几项就可得到高的精确度。本章中推导了这个方法，而且列举了具体实例加以说明。

第六章，叙述了电磁波电路的测试方法，运用等效网络的概念求网络参量作为重点。

以上是正文，在正文的叙述过程中，有关基本知识的补充内容全部列入附录中。同时，一部分计算时需要补充的内容放在“注”中。

为使读者容易理解本书的内容，尽可能多列举一些例子。

本书是以研究电磁波电路的基本知识为目的，如果对有关研究人员、技术人员在进行电路设计、分析、以及创造新电路方面有益的话，作者将感到高兴。

1976 年 小西良弘

# 目 录

|                                           |    |
|-------------------------------------------|----|
| 第一章 电磁波电路的种类 .....                        | 1  |
| 1.1 按功能分类 .....                           | 1  |
| 1.1.1 导波系统 .....                          | 1  |
| 1.1.2 不同导波系统的转换装置 .....                   | 2  |
| 1.1.3 分支电路 .....                          | 4  |
| 1.1.4 分配合成电路 .....                        | 4  |
| 1.1.5 方向耦合器和电桥 .....                      | 5  |
| 1.1.6 谐振系统和滤波器 .....                      | 6  |
| 1.1.7 非可逆电路 .....                         | 6  |
| 1.1.8 匹配电路 .....                          | 8  |
| 1.2 电路结构的种类 .....                         | 9  |
| 1.2.1 同轴电路 .....                          | 9  |
| 1.2.2 波导管电路 .....                         | 9  |
| 1.2.3 微带电路 .....                          | 9  |
| 1.2.4 立体平面电路 .....                        | 10 |
| 1.3 集中参数电路和分布参数电路 .....                   | 10 |
| 第二章 电磁波电路的网络处理及其性质 .....                  | 16 |
| 2.1 电磁波电路的等效电路的定义 .....                   | 16 |
| 2.1.1 连接在电磁波电路开孔处的导波系统其电压、<br>电流的定义 ..... | 16 |
| 2.1.2 连接在开孔处的导波系统的等效传输线 .....             | 21 |
| 2.1.3 与开孔处相联的导波系统的基准模 .....               | 24 |
| 2.1.4 用独立的等效传输线表示多模传输的<br>均匀导波系统 .....    | 26 |
| 2.1.5 多根平行线的 TEM 模的基准化及其等效传输线 .....       | 29 |

|                                                                    |            |
|--------------------------------------------------------------------|------------|
| 2.2 电磁波电路的矩阵及其性质 .....                                             | 35         |
| 2.2.1 阻抗矩阵及导纳矩阵的性质 .....                                           | 36         |
| 2.2.2 散射矩阵及其性质 .....                                               | 46         |
| 2.3 电路的特征矢量激励及特征值 .....                                            | 52         |
| 2.3.1 特征矢量及特征值的意义 .....                                            | 52         |
| 2.3.2 各种电路矩阵的特征值之间的关系 .....                                        | 54         |
| 2.3.3 对称电路的特征矢量之例 .....                                            | 55         |
| 2.3.4 电路矩阵的特征值及其频率变分与电路内能量<br>之间的关系 .....                          | 61         |
| 2.4 可逆电路与非可逆电路 .....                                               | 63         |
| 2.4.1 可逆电路与非可逆电路的定义 .....                                          | 63         |
| 2.4.2 实现非可逆电路的必要条件 .....                                           | 64         |
| <b>第三章 导波系统和导波系统电路 .....</b>                                       | <b>77</b>  |
| 3.1 在导波系统中传输的模及其特性 .....                                           | 77         |
| 3.1.1 传输模的种类和具体例子 .....                                            | 77         |
| 3.1.2 TEM 波的诸性质 .....                                              | 81         |
| 3.1.3 TM 波, TE 波, LSM 波( $TM_x$ 波), LSE 波<br>( $TE_x$ 波)的诸性质 ..... | 83         |
| 3.2 波导系统中的电能和磁能 .....                                              | 95         |
| 3.2.1 在传输域中波导系统的电能和磁能 .....                                        | 95         |
| 3.2.2 在截止域波导系统的消散能量 .....                                          | 97         |
| 3.3 波导系统电路的等效电路 .....                                              | 99         |
| 3.3.1 求等效电路的步骤 .....                                               | 99         |
| 3.3.2 等效的原理 .....                                                  | 102        |
| 3.3.3 在波导系统内格林函数的求解法 .....                                         | 103        |
| 3.3.4 波导中不连续部分及障碍物的等效电路 .....                                      | 114        |
| 3.3.5 不同尺寸的均匀波导系统连接处的等效电路 .....                                    | 131        |
| <b>第四章 谐振系统及其性质 .....</b>                                          | <b>139</b> |
| 4.1 谐振系统的性质 .....                                                  | 139        |

|            |                            |            |
|------------|----------------------------|------------|
| 4.1.1      | 谐振系统内的电磁场能量                | 139        |
| 4.1.2      | 含有各向同性媒质的谐振系统内的电磁场的相位      | 143        |
| 4.1.3      | 谐振系统的 $Q$ 值                | 146        |
| 4.2        | 谐振系统的种类和特性                 | 148        |
| 4.2.1      | 同轴谐振腔                      | 148        |
| 4.2.2      | 微带谐振器                      | 150        |
| 4.2.3      | 空腔谐振腔                      | 154        |
| 4.2.4      | 介质谐振腔                      | 157        |
| 4.2.5      | 铁氧体谐振腔                     | 172        |
| 4.3        | 谐振系统内的模激励                  | 175        |
| 4.4        | 谐振频率的主要求法                  | 177        |
| 4.4.1      | 严格求解                       | 177        |
| 4.4.2      | 近似求解法                      | 183        |
|            | 参考文献                       | 197        |
| <b>第五章</b> | <b>包含谐振系统的电路及其等效电路</b>     | <b>198</b> |
| 5.1        | 谐振系统和单孔导波系统的耦合             | 198        |
| 5.1.1      | 开有单孔谐振系统的等效电路              | 198        |
| 5.1.2      | 开有单孔谐振系统的外部 $Q$ 值          | 203        |
| 5.2        | 谐振系统和二端口导波系统的耦合            | 211        |
| 5.2.1      | 带通的情况                      | 211        |
| 5.2.2      | 带阻的情况                      | 214        |
| 5.3        | 谐振系统和谐振系统之间的耦合             | 216        |
| <b>第六章</b> | <b>用测量求解电磁波电路等效电路参数的方法</b> | <b>226</b> |
| 6.1        | 二端对等效电路及其测试方法              | 226        |
| 6.1.1      | 二端对电路的等效电路                 | 226        |
| 6.1.2      | 等效电路参数的测试法                 | 229        |
| 6.2        | 三端对( $T$ 分支, $Y$ 分支等)等效电路  |            |

|                                               |     |
|-----------------------------------------------|-----|
| 及其参数的测试法 .....                                | 232 |
| 6·2·1 三端对电路的性质和等效电路 .....                     | 232 |
| 6·2·2 三端对等效电路参数的测试 .....                      | 235 |
| 6·3 四端对等效电路及其参数测试法 .....                      | 238 |
| 6·3·1 四端对电路的种类和等效电路 .....                     | 238 |
| 6·3·2 四端对等效电路参数的测试法 .....                     | 247 |
| 6·4 含有谐振系统电路的测试 .....                         | 255 |
| 6·4·1 谐振系统空载 $Q$ 值( $Q_0$ )的测试 .....          | 255 |
| 6·4·2 谐振系统外部 $Q$ 值的测试 .....                   | 258 |
| 6·4·3 谐振系统相互之间耦合系数的测试 .....                   | 259 |
| 参考文献 .....                                    | 263 |
| 附录 1 矩阵的特征值和特征矢量 .....                        | 264 |
| 附录 2 麦氏方程式 .....                              | 268 |
| 附录 3 用电磁场的矢量位表示电场、磁场 .....                    | 273 |
| 附录 4 矩形波导管和圆形波导管的相移常数 .....                   | 275 |
| 附录 5 表示 LSM 和 LSE 模导波系统中<br>横向谐振条件的等效电路 ..... | 280 |
| 附录 6 等效的原理 .....                              | 281 |
| 附录 7 谐振系统的变分表示式 .....                         | 302 |
| 附录 8 二端对电路参量的 $S$ 曲线测试法 .....                 | 309 |

# 第一章 电磁波电路的种类

## 1.1 按功能分类

### 1.1.1 导波系统

传播电磁波的传输线有如图 1.1 所示的几种结构, 图(a)称为同轴线, (b)为微带线, (c)为悬挂线, (d)为三重线, 这

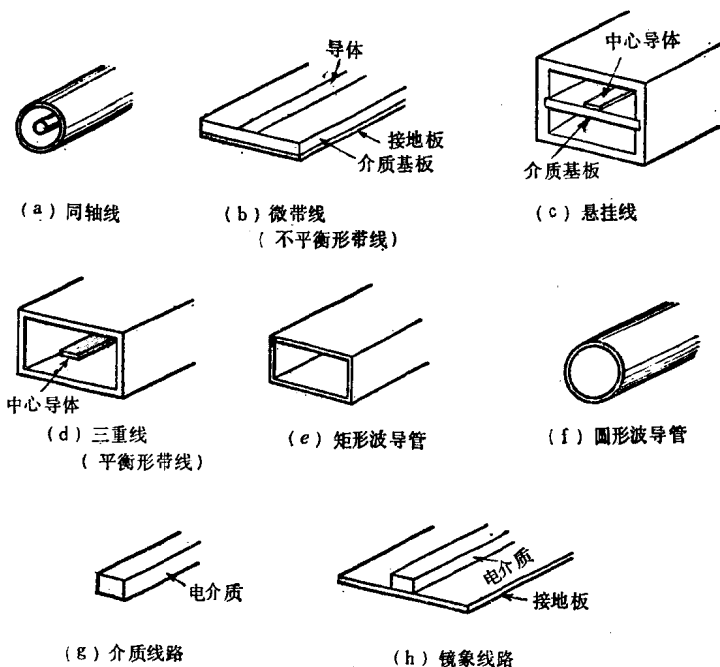


图 1.1 各种主要传输系统

些传输线均有两个导体系统。例如，(a)是由内导体和外导体组成的，(b)是由介质基片上的导体和接地板组成的。其次，也有用图(e)和(f)所示的一个导体壁围起来的空心管子传播电磁波的。凡此皆称为波导管，并依其横截面的形状将图(e)和(f)各称为矩形波导和圆波导。另外电磁波还具有集中于相对介电系数和相对导磁率大的物质中传播的性质，利用这一性质又有图(g)所示的介质线路。由于这种线路的截面上下是对称的，所以即使在对称面处置一金属板，横截面的场分布仍保持不变，如仅取其中一半，即成为图(h)所示的结构。另外，在图(g)截面的电磁场分布中，因为对称面的上下部分的分布互为镜像关系，而(h)只用其中一半的分布所以又叫做镜像线路。

再者，图(a)使用于X波段以下，图(b)~(d)是用于微波集成电路，(e)，(f)用于特高频(UHF)至毫米波频段。又(g)，(h)用于正在发展的毫米波集成电路方面。

以上叙述了各种导波系统，这些导波系统由于具有各自的特点，故按其应用而分类。例如，图(e)，(f)的波导管，由于传输损耗最小，故适用于长距离传输，图(b)由于在基板上可以构成各种性能的小型化电路，所以都用于集成电路。而图(a)的同轴线如第二章将要说明，由于传输的是TEM波，其端阻抗与频率无关，多用于需要具有宽频带特性的测试仪器等方面。

### 1.1.2 不同导波系统的转换装置

在1.1.1节叙述了不同种类的导波系统，在使用中必然会出现各种类型导波系统之间的连接问题。用得较多的是：同轴线，微带线和波导管之间的连接，它们之间连接时，应尽可能

在宽频带内变换而损耗最小。图 1·2 给出了三种主要的转换器，图(a)是连接同轴线和波导管的同轴——波导转换器，图(b)是连接同轴和微带的同轴——微带转换器，图(c)是连接微带和波导的微带——波导转换器。

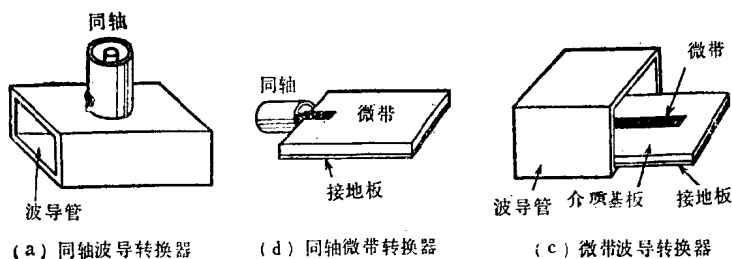


图 1·2 几种主要转换器

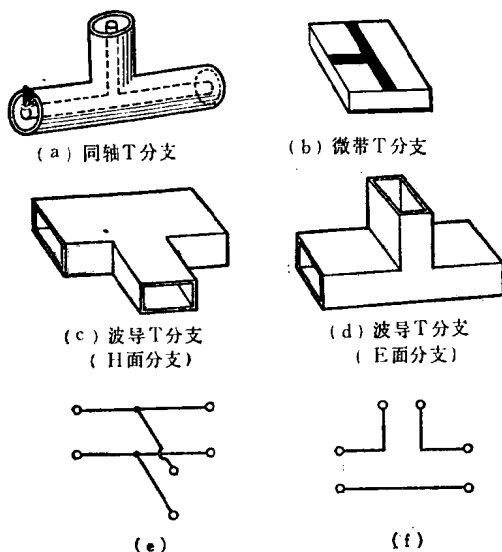


图 1·3 各种 T 分支及其等效电路

### 1.1.3 分支电路

图 1.3 表示的是导波系统分支电路。分支电路有 T 形和 Y 形两种，分别称为 T 分支和 Y 分支。这些分支电路多用于下述的功率分配合成电路及电桥等。图(a)和图(b)表示同轴和微带分支电路，这种电路等效于图(e)的并联分支电路。其次，波导管的情况，是用了图(c)和(d)的分支方法，例如，当传输  $TE_{10}^0$  模时，其等效电路如图(e)和(f)所示。

### 1.1.4 分配合成电路

所谓分配合成电路，是指将某一功率分配到几个端子，或相反地，将加到各端子的功率合成后再输出。如图 1.4 (a) 所

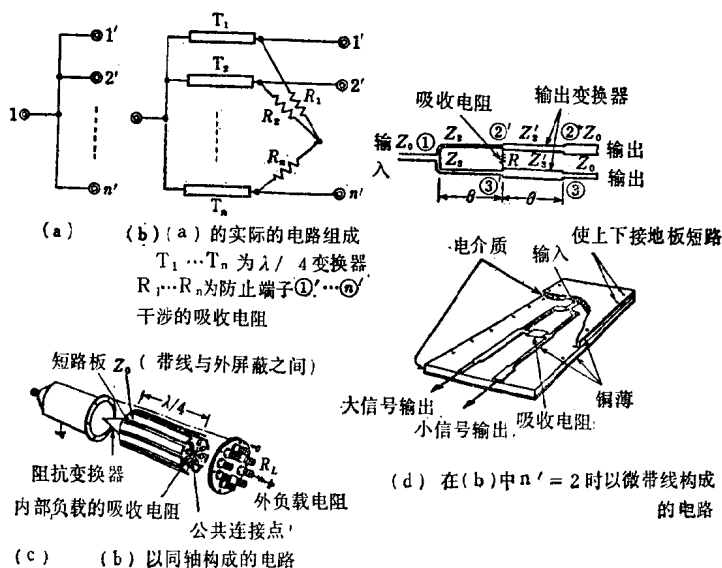


图 1.4 分配合成电路

示, 将加到端子①的功率分配到①', ②', ..., ②'各端子。这时, 分配到各端子的功率相互间应无影响。例如, 即使①'的驻波比变坏, 所引起的反射波不应出现在②'~②'。同样, 这对合成电路也是成立的。即加到①'~②'的功率相互间应无影响地在①端子合成输出。图(b)所示的电路即为分配合成电路的一例, 若将该电路用同轴线和微带线构成时, 就成为图(c)和(d)的电路。另外, 这样的分配合成电路也可以由下述的方向耦合器和电桥组成。

### 1.1.5 方向耦合器和电桥

如图 1.5 所示, 连接端子①和②的主线路上只要存在实线箭头方向行进的电磁波时, 则与主线路相耦合的电路 (图中用点划线线围成的部分) 的端子③就出现了电磁波, 而端子④则无。其次, 若主线路上电磁波沿虚线箭头所示的方向行进时, 在端子④出现了电磁波, 而端子③则无。这种电路是根据行进于主线路的电波方向来定电磁波是在端子③还是在端子④出现的, 因而称为方向性耦合器。同图中, 若加到①的功率, 分配到②与③, 而其中大部分在主线路输出时, 则端子③就用来监测由①传向②的功率。若将功率加到②时, 则端子④就用来监测由②传向①的功率。举一例, 现加到①的功率, 若平均分配到②与③时, 则由①到②的衰减量即为 3 db, 故将此称为 3 db 耦合器, 或称为 3 db 电桥。这个电桥也可以成为功率分配合成电路。如将此电桥和滤波器组合起来, 也可以构成定阻抗滤波器。



图 1.5 方向耦合器的示意图