

微波技术概说

目 录

第一章 关于超高频的一般知识	1
第二章 超高频电磁波的传输线	6
2.1. 电磁场	7
2.2. 传输线中的行波	9
2.3. 开路线中的驻波	15
2.4. 短路线中的驻波	22
2.5. 传输线的负载为各种不同的阻抗时的情形	24
2.6. 传输线的主要型式	27
2.7. 传输线的应用	31
第三章 波导	35
3.1. 波导的基本特性	35
3.2. 电磁波在波导中的传播	37
3.3. 波导中的波型	42
3.4. 波导内的波长和传播速度	47
3.5. 波在波导中的衰减	52
3.6. 波导的主要工作状态	53
3.7. 波导和其他电路的耦合	55
3.8. 波导的构造上的特点	57
第四章 超高频振荡系统	59
4.1. 普通型式的振荡回路	59
4.2. 谐振线形式的振荡回路	62
4.3. 谐振线的调谐	64
4.4. 谐振线和其他电路的耦合	68
4.5. 空腔谐振器	69
4.6. 空腔谐振器中的振荡形式	72

4.7. 空腔諧振器和其他电路的耦合	74
4.8. 空腔諧振器的調諧	75
4.9. 其他型式的振蕩回路	76
第五章 超高频电子管	78
5.1. 电子和电場的相互作用	78
5.2. 普通电子管在超高频波段上的工作特点	80
5.3. 电子管电路中的感应电流	84
5.4. 电子管的輸入阻抗和电子管內的能量損耗	89
5.5. 电子管的脉冲工作方式	96
5.6. 用于超高频的二极管和三极管	98
5.7. 直射速調管	105
5.8. 反射速調管	111
5.9. 磁控管	118
5.10. 行波管及返波管	129
第六章 分米波及厘米波的輻射与传播	134
6.1. 关于天綫-饋綫設備的一般知識	134
6.2. 半波振子	135
6.3. 单个振子的方向性	137
6.4. 双振子系統的方向性	140
6.5. 分米波振子天綫	143
6.6. 大地对于天綫的輻射和方向性的影响	155
6.7. 无线电波的繞射	160
6.8. 帶抛物面或角形反射器的天綫	161
6.9. 喇叭形天綫	164
6.10. 介质天綫	167
6.11. 裂縫天綫	168
6.12. 分米波和厘米波的传播	171
本书所用俄文下标的意义	175

第一章 关于超高频的一般知識

无线电技术发展的道路在很长一段时期内，是由长波而中波，中波而短波（即波长大于 10 米的波）。这些波段很快就被广播、通信、导航、气象业务、报时业务以及其他各种用途的无线电台“占满”了。在此同时，也对波长短于 10 米的超短波进行了研究。在伟大的卫国战争和战后的一段时期内，由于雷达、电视和脉冲通信的发展，使超短波技术迅速地向前迈进，并获得了极大的成就。

波长从 1 米到 10 米的波通常称为米波。从 10 厘米到 1 米的波称为分米波，从 1 厘米到 10 厘米的波称为厘米波。从 1 毫米到 10 毫米的波称为毫米波。分米波、厘米波、毫米波段的波，即波长从 1 米到 1 毫米的波，又统称为微波。相当于这些波段的频率，在本书中统称为超高频。

分米波段中最长的波（波长为 1 米）相当的频率为 300 兆赫。在这种频率下，电子在导线中每秒钟振动 3 亿次！波长愈短则频率愈高。例如当波长为 10 厘米时，频率将增为 10 倍，就是 3000 兆赫。为了便于计量这样高的频率，采用了新的频率单位——千兆赫，它等于 10^9 赫。在本书里将只讨论有关分米波和厘米波的技术。

相当于超高频的波（微波）与较长的波比较起来，具有很多特点，并且同一个特点在某些情况下是优点，而在另外一些情况下却是缺点。

超高频可用于多路脉冲通信。这种通信方法可以在一个载波频率上传输几十路、几百路（或更多路）电话。为此目的所

采用的脉冲调制方法需要传输极宽的频带，因此只能在超高频波段中实现。电视广播也需要很宽的频带，超高频也是唯一适用的波段。

频带极宽的超高频波段可以容纳很多无线电发射台而没有相互干扰。这一点也是由于超高频的无线电波通常都不能沿地面传得很远，因此一般没有远方电台的干扰。

微波的传播有很多有趣的特点。这些波的绕射本领，也就是绕过障碍物的本领较小，在电离层中的折射也很小。一般说来，它们不象长波和中波那样能绕过地球曲面而传得很远，也不象短波那样能在电离层中折射和反射而传至远方。天线所辐射的和地平线成某一角度的分米波和厘米波，一般都穿过电离层继续在星际空间中传播，而不再折返地面。只在某些特殊情况下，由于这些波在低空大气层中被折射或其他的原因，它们的路径才会弯曲而返回地面。

房屋、树木、丘陵和地面本身都吸收微波，而空气中的水和冰（雨、雾、雪、云）也能吸收一部分。实际上分米波和厘米波的传播好象光线一样，主要是在视线的范围以内。在这些波段上沿地球表面的可靠通信距离一般都不超过几十公里，而且即使是这样短的距离，如果在电磁波的途中有很多地上障碍物，接收天线和发射天线还必须装得很高。

超高频的重要优点是在这些频率上进行接收时，大气的干扰很小。

分米波和厘米波在各种障碍物上能产生良好的反射。与反射物的尺寸相比，波长愈短则反射愈好。反射现象剧烈地影响微波的传播，特别是在山地、丘陵地带和城市里。在把这些波用到通信和广播的情况下，这一点应当归为微波的缺点。

微波在特制反射器上的反射现象广泛地用来造成象探照灯

的光束一样的定向窄束辐射。这种定向无线电通信大大增加了作用的距离，并容许使用功率比较小的发射机，也减少了电台之间的相互干扰。

利用超高频波的定向辐射和随后产生的反射乃是雷达的主要原理之一。如果方向性尖锐的天线所产生的波束在传播路径上遇到了某个障碍物(目标)，例如空中的飞机，那末就会发生无线电波从目标向各方向反射的现象。一部分反射波回到雷达站，借助雷达站中的特殊设备，可以确定目标的方向和距离，也就是可以知道目标的位置。

把微波用到无线电通信的接力线路上去有很重大的意义。这种接力线路乃是装在需要通信的两个地点之间的一长串收发电台，电台与电台之间的距离约为几十公里。信号由通信一方的发射机送到最近的转发站，从这个转发站的接收机进入发射机，这发射机又把信号发送给第二个转发站，依此类推。这些转发站的工作可以是自动的，无须操作人员。在这种线路容许在同一时间内通几十路电话。转发站都有定向辐射天线。因此它们不会干扰其他的通信线路，它们的发射机的功率也可以很小。

天文学也采用米波、分米波和厘米波。根据雷达的原理，成功地接收了从月球、金星和水星反射回来的信号。应用类似的方法可以观察和确定在望远镜中看不见的流星的位置和运动的情况。这种观察可以在白天和有密云的情况下进行，而用普通的望远镜一般是不行的。此外，太阳、星和其他的天体本身也辐射属于米波、分米波和厘米波段的电磁波。观察这些波可以更好地研究天体上发生的过程。

微波很重要的应用是用来和人造地球卫星、宇宙飞船及自动行星际站通信。

在气象学中也利用微波被云、雾、雨、雪反射和吸收的现象来观测天气。

利用分米波和厘米波需要从根本上改变接收机和发射机的电路和部件的结构。在这些波段上使用新型的电子管。因为普通的放大和发射管都不适用于超高频。在这些频率上，电子从电子管的阴极到栅极或屏极的飞越时间已经和振荡的周期相近，因此普通电子管已经不再是无惯性的电子器件。在电子管中产生了电子迟延。

为了消除电子惯性的有害影响，制出了原理上完全新型的电子管——速调管。它特别适用于超高频波段。这种用来产生和放大超高频振荡的电子管中，电子飞越时间可以等于一个或几个周期，而且这样长的时间是无害的。

在厘米波段的发射机中广泛使用的还有磁控管。磁控管用永久磁铁或电磁铁产生外部磁场，使磁控管中的电子循所需的运动路径运动。

在分米波段中也采用普通类型的三极管，但电极的构造是特殊的，电极间的距离做得非常小，使电子的飞越时间很小。电极引线的构造都是尽可能使它的电容和电感为最小。

在测量仪器和接收机中，采用了特殊的、极间距离很小的二极管和半导体二极管来实行检波。采用半导体二极管显得特别方便。此外，振荡回路也改变了它的外貌。在分米波段中当 $\lambda = 40-100$ 厘米时，还能使用由一圈或半圈线圈和小电容器组成的回路，但在更短的波段上就不得不使用所谓空腔振荡电路或空腔谐振器。它们与线圈和电容器组成的普通回路比较，品质要高很多倍，使谐振器在某个频率范围内调谐的方法，是用某种装置来改变它的容积。

发射机和天线之间，接收机和天线之间以及某电路的各级

元件之間的連接，廣泛使用各種型式的傳輸綫，傳輸綫常有兩種型式：一種是对称傳輸綫（两根相同而平行的導綫），另一種是同軸綫即同心綫（由两根套在一起而被優良絕緣物隔開的管子組成）。長度約為四分之一波長或半波長的一小段這種傳輸綫，也常用來作為分米波段的接收機、發射機和測量儀器中的振盪回路。厘米波段成功地採用了空心管即所謂波導管來代替雙綫傳輸綫傳輸能量。電磁波在這種管子里傳播時，損耗的能量比雙綫傳輸綫中的小得多。很有趣的是利用圓形波導管代替電纜實現的超高頻遠距離通信。這種通信方法可以同時傳送幾十路電視節目和幾千路電話。

關於超高頻的能量損耗問題具有特別重要的意義，因為損耗隨頻率增高而增加。為了減少損耗，在所有超高頻設備中都採用特殊的、損耗極小的絕緣材料，並用增加導體表面的辦法來減少導體的電阻。

在超高頻波段研究出了很多新型的超高頻天綫設備。為了使輻射有很尖銳的方向性，裝置了由許多振子組成的複雜天綫和由金屬網或金屬板做成的凹面反射器。此外還制出了許多完全新型的天綫：如喇叭形天綫、介質天綫和裂縫天綫等。喇叭形天綫具有圓形或矩形截面的金屬喇叭的形式，它是波導管的延續。介質天綫是用優質的絕緣材料做成的棒的形式，並利用波導或傳輸綫把電磁波引到這些棒上去。裂縫天綫是在空腔諧振器的壁上所開的某種形狀的裂縫。電磁波從發射機出發，沿波導或同軸綫傳到這個諧振器，然後通過裂縫輻射到空中去。

到目前為止，超高頻技術的發展主要是解決通信的問題。近年來，在超高頻電子學的一個新的應用方面進行了很多工作——利用波導遠距離傳輸能量。這些工作還處在初始階段，但是可以相信，在最近幾年就可能實現用波導傳輸巨大功率的

电磁波。这种方法有显著的优点。波导管线路不需要能承受高压的电杆和绝缘子。波导管埋在地下不会遭受雷击，也完全不会危害人们的安全，因为电场只存在于波导内部。计算表明，通过截面为 1 平方米的波导可传输功率达 1 百万千瓦的电磁波；当波长为 3 厘米时，长度为 1000 公里的线路损耗约 10%。

产生大功率超高频振荡也许会用到一种新型的电子器件——平面磁控管 (Планатрон)。它是磁控管的一种变型。对平面磁控管的研究发现，它们(以及磁控管)不仅可以用来产生超高频，也可以用来将超高频振荡变回成为直流电能，而这一点恰好是波导输电线路的终端所必须的。有效地利用平面磁控管来传输能量需在提高这种器件的效率之后才可能实现。

在最近若干年内，超高频技术已经大大向前迈进了一步，目前它的发展特别迅速。很多无线电爱好者对这个新的领域发生了极大的兴趣。

第二章 超高频电磁波的传输线

超高频技术中最重要的问题之一是用传输线来传输电磁波的问题。在发射机和天线之间、接收机和天线之间广泛地用各种型式的传输线来连接，某一电路的个别元件之间也用传输线来连接，而且还用它作为振荡回路。

为了便于说明传输线的工作情况，先回忆一下电磁场的某些重要特性。

2.1. 电 磁 場

如果在导綫中流过交流电流，在导綫周围将产生交变的电場和磁場，共同組成电磁場。

在空間运动的电磁場又称为电磁波。交变的电場或交变的磁場都不可能单独地存在。电場的任何变化都将产生交变的磁場，反之，磁場的任何变化也必将产生交变的电場。同时存在在某一空間內的恒定的电場和磁場不能称为电磁場。在这情況下，两个場是独立的，它們之間沒有相互作用。而电磁場乃是对等的交变电場和磁場的結合体，两者之間有相互影响和相互依存的关系。

交变电場和磁場之間的相互联系可以說明电磁場在空間的运动。电場的变化在周围空間产生磁場，由于电場是变化的，磁場也就不可能是恒定的而是变化的；变化的磁場又会在周围产生电場，这电場也是变化的并将再产生磁場，依次类推。因此，电磁場乃是一个振蕩过程，它不断地传入新的空間。

电磁波在传播时，可以脱离最初产生它的导綫。如果关断导綫中的电流，电磁波将继续在空間中运动。通常說流过交流电的导綫向空間輻射电磁波。电磁波带走了从导綫中电流获得的能量。导綫中交流电流的功率愈大，輻射波的能量也愈大。很重要的一点是，这能量和頻率 ν 的平方成正比。只有在导綫长度和波长可以相比时，才能有效地輻射电磁波。

电磁波可以自由地在沒有空气的空間中传播，但决不可以錯誤地认为电磁波是在絕對真空中运动的能量，因为在自然界并不存在絕對真空和沒有物质的能量。根据近代科学的成就可以确信，电磁波乃是运动着的物质。

电磁場和組成它的电場和磁場的基本特性可簡述如下：

1. 电磁场恒以速度

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon \mu}}$$

在介质中运动， ϵ 和 μ 是介质的介电常数和导磁率， c 是电磁波在真空中传播的速度，等于 3×10^8 米/秒。对空气可认为 $\epsilon = \mu = 1$ ，因此 $v = c$ 。

2. 电力线和磁力线总是互相垂直的。

3. 磁力线是闭合曲线，它们围绕载流导线或者围绕交变的电场。

4. 电力线或者由一个电荷出发，终止在另一个电荷上，或者成为围绕交变磁场的闭合线。

5. 在载流导体表面附近的磁力线在这个表面平行。

6. 电力线不可能与理想导体的表面平行，而总是和这个表面垂直。

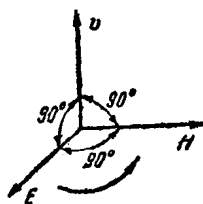
最后的两个性质决定了靠近导体表面的电磁场的结构，也就是在导体和外部空间交界处的电磁场结构。因此称它们为边界条件。电磁场的结构总满足边界条件。

在均匀介质中传播或是沿双线传输线传播的电磁波是横电磁波。在这种波中电力线和磁力线都处在与波的传播方向垂直的平面内，也就是在横向平面内。

换言之，在这种波中磁场和电场的力的方向都处在与波的运动方向垂直的平面内。

我们记得，场的力是用场强来表示的，它是一个向量。大家知道，向量是指不仅有某个数值而且还有一定方向的量。通常在图上都用箭头来表示。箭头的长度按一定比例表示向量的大小。箭头的方向则是所给向量的作用方向。在某一点上场强的向量总跟通过这点的力线相切。图 2.1 中示出横波的电场强

度向量 E ，磁場强度向量 H 和波的传播速度向量 v 。对横波来说这三个向量的相互位置服从以下规律：如果沿从 E 到 H 的最短距离旋轉螺釘，那么螺旋前进的方向就是向量 v 的方向（图 2.1）。



波朝向我們运动

波背离我們运动

图 2.1 在横电磁波中向量 E 、 H 和 v 的相互位置图 2.2 表示向量 E 、 H 和 v 的另一种方法

以后我們將只用箭头来表示两个向量，例如 E 和 H 。与图纸平面垂直的第三个向量如果它的方向是离开我們，則用 $\times$ 表示，如果它的方向是朝向我們，就用点表示（图 2.2）。

不应当忘記电磁波在空間的每一点上，向量 E 和 H 的数值都在不断地变化（例如按正弦律变化）。 E 和 H 也沿着波的传播方向变化。

电磁波的功率决定于 E 和 H 的数值。如果 E 的单位为伏/米，而 H 的单位为安/米，則它們的乘积將給出电磁波通过 1 米² 的横截面携带的能流的功率，单位为瓦/米²。向量 E 和 H 的乘积称为波印廷向量，它的方向和向量 v 的方向相同。

2.2. 傳輸綫中的行波

金属傳輸綫是分布参数电路。它和集中参数电路不同。在集中参数电路中，电感都集中在綫圈里，电容都集中在电容器里；但是傳輸綫的每一小段导綫都具有电容、电感和电阻。这

些参数在传输綫中是分布在整個导綫上的。

一般集中参数电路的尺寸都比波长小。在这种电路中，电压和电流传过整个电路所需要的時間，大大小于振蕩周期。因此这种电路中的过程只与時間有关。但是在无綫电技术中所使用的传输綫的长度有的約等于波长，有的甚至大于波长。电压和电流在传输綫中传播的時間和振蕩周期相近。因此在传输綫中不仅要研究过程和時間的关系，还必须研究过程和空間的关系。

用来传输高频电磁振蕩的传输綫，通常称为长綫，它和短綫不同，短綫的长度远远小于波长。按照这种看法，工作頻率為 50 赫而长度为 100 公里的輸电綫，应看成是一根短綫，因为在这样低的頻率下，波长約為 6000 公里。但是当頻率為 1000 兆赫時，长 10 厘米的传输綫却应算作长綫；因为波长在这种情况下等于 30 厘米。一般在无綫电技术中最好不用普通的长度单位而用波长来作为量度传输綫长度的单位。这样一来，我們很快就可以知道，长度为 $\frac{\lambda}{4}$ ， $\frac{\lambda}{2}$ ， 2λ ， 5λ 等等的传输綫，也就是长度和波长相近的传输綫，都是长綫。

同样也应当說明一下关于传输綫的橫向尺寸的概念。通常只有橫向尺寸远远小于波长的由两根平行导綫組成的系統才可以算作是传输綫，橫向尺寸是指导綫間的距离和导綫本身的直径。

当把交流信号发生器接到传输綫上时（图 2.3），就会有行波沿传输綫移动。行波就是由电磁場向某一个方向传播——在現在的情况下它是从发生器向传输綫的終端传播。

电磁行波沿传输綫传播的速度由以下公式确定

$$v = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}},$$

这里 L_1 和 C_1 是传输线上单位长度的电感和电容，它们以每单位长度若干亨和法来表示。

L_1 和 C_1 的数值决定于传输线的构造。传输线导线的表面愈大和导线间的距离愈小时，单位长度的电容 C_1 便愈大，而单位长度的电感 L_1 便愈小。一般 L_1 约为每米一微亨， C_1 约为每米几个微微法。

对于导线之间用空气绝缘的传输线来说，乘积 $L_1 C_1$ 恒等于常数 $\frac{1}{c^2}$ ，这里 $c = 3 \times 10^8$ 米/秒，因此 $v = c$ 。在这种传输线上当用某种方法来改变 C_1 时，例如改变导线的直径或导线间的距离，电感 L_1 的改变总相反，以致乘积 $L_1 C_1$ 保持不变。因此，在任何情况下，传播速度都等于 3×10^8 米/秒。

当导线之间有固体绝缘物或支持导线的绝缘子存在时，速度 v 将减小。事实上，如果导线之间有固体介质，那么单位长度的电容将增加，但电感不变。因此乘积 $L_1 C_1$ 增加而传播速度 v 减小。

当行波沿传输线传播时，在导线中引起了电子的振动，这振动不断地传递到传输线上的新的更远的部分。沿着传输线传播着交流电流和交流电压。在导线的每一点上，电流和电压（相对另一根导线或对地）随着时间而变，但同时振荡的过程又沿着传输线从一点传到另一点。

用一根长绳作实验可以清楚地看到由于机械振动的传播而形成的行波。只要把绳子一端固定住，摇晃另一端，就会有波沿着绳子“跑动”。

行波在传输线中的传播可以用图形来表示。我们来看一根导线上的图形。在另一根导线上过程完全一样，只是相位相反而已。我们用水平轴来表示导线，在与导线垂直的方向上按一定比例标示电压的数值。这时对应于不同瞬间的行波可用图

2.3 表示。

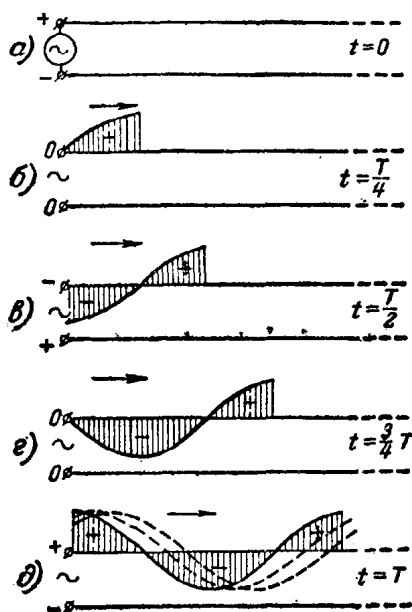


图 2.3 传输线中的行波

假定在接入信号发生器的瞬间，在发生器两端的电压恰好等于振幅值。因为在这一瞬间，波还来不及沿导线传开去，在传输线上没有任何电压和电流（图 2.3, a）。但经过四分之一周期以后，波传播了等于四分之一波长的一段距离，这时电压振幅也正好在离发生器四分之一波长的地方。但是在传输线始端在这一瞬间电压已等于零（图 2.3, b），因为这时发

生器的电压已减为零。再过四分之一周期，发生器的电压，也就是在传输线始端的电压，又等于最大值，但符号却相反。这时波沿着传输线走过的距离等于 $\frac{\lambda}{2}$ （图 2.3, c）。在图 2.3, e 和 d 中表示在过程开始后的 $t = \frac{3}{4}T$ 和 $t = T$ 的瞬间电压在传输线上的分布情形。此外在图 2.3, d 上还用虚线表示电压在以后几个瞬间的分布情形。

必须注意，在这些表示波的图中，沿水平轴的不是时间，而是距离。图 2.3 中的每一根正弦曲线都表示在某一个瞬间电压沿传输线的分布情形。在下一瞬间，曲线将沿横轴移动，因

为波在背离发生器而传播开去。我們也可以用曲线来表示在传输线的某一点上电压随时间的变化情况，它同样也是一根正弦曲线，但这时水平轴表示的是时间。这是传输线上某点的振荡波形，而不是行波的图形。

行波电流和电压的变化是同相的。如果在某一瞬间在传输线的某一点上电压最大，那么在这一瞬间电流在这里也最大。经过四分之一周期以后，在这点的电流和电压都将等于零。因此图 2.3 的曲线同时也按另一个标尺表示了电流的分布情形。

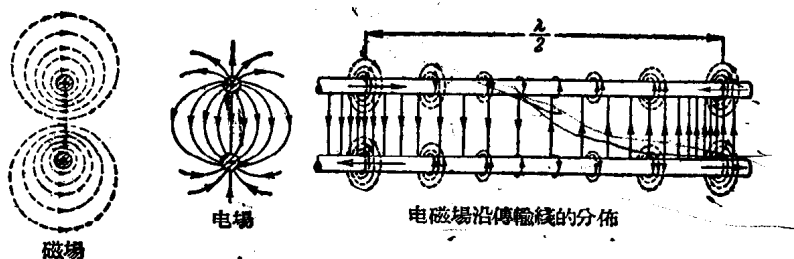


图 2.4 传输线中的电场和磁场

电压（电位差）总是和电场联系在一起，电流总是和磁场联系在一起，在传输线上电压最大的地方电场将最强，而在电流最大的地方，磁场也最强。因为在行波中电流和电压同相，所以电场和磁场的变化也应当同相。在图 2.4 中表示了在传输线的横截面上的电场和磁场以及这两个场沿传输线分布的情形。很显然，图 2.3 中的曲线不仅表示了电压和电流沿传输线分布的情形，也表示了电场和磁场强度的分布情形。

在每条传输线中，行波的电压振幅 U_m 与行波的电流振幅 I_m 的比或是它们的有效值 (U, I) 的比，等于常数。这个比值称为传输线的特性阻抗 Z_0 。它的数值决定于传输线的构造。

传输线的电容愈大，那么在一定的电压下在传输线中产生

的电流也愈大，就好象当电容器的容量增加时电容器的充电电流增加一样。但在增加传输线电感的情况下，由于增加了自感电动势的反作用，结果电流将减少。由此可见，当增加传输线电容时，特性阻抗减小；当增加它的电感时，特性阻抗增加。在数学上这一关系用公式

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L_1}{C_1}}$$

来表示。

双绞线平行式传输线的 Z_0 的数值通常约为几百欧。当导线的直径增加和导线间的距离减小时， C_1 增加而 L_1 减少，因而 Z_0 也减小。

因为行波的电压和电流同相，所以传输线的特性阻抗是一个纯电阻。行波的功率也是纯有效功率，可以按照常用的公式来求

$$P = IU = I^2 Z_0 = \frac{W^2}{Z_0}$$

为了获得行波状态，应在传输线的终端接一个数值等于特性阻抗 Z_0 的纯电阻 R (图 2.5)。于是全部行波的功率都被这个电阻吸收，也就是说，在所有时间内能量都是一去不返地从发生器传出。这时我们说传输线和负载阻抗是匹配的。

传输线的输入阻抗也就是传输线对信号发生器所呈现的阻

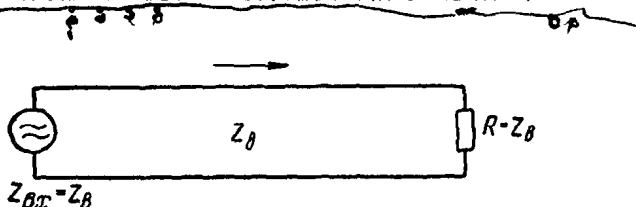


图 2.5 为获得行波状态所需要的传输线负载