第 1 章

在电力綫路上构成远动通道的原理

1. 頻譜分配及构成通道的方法

远动訊号的傳輸与电話和电报的傳輸相仿。远动訊号也象通訊訊号一样，可利用架空和电纜等有綫綫路、輸电綫和无綫电通道来傳輸。

目前，利用0.1～400千伏輸电綫作远动通道、高頻通訊通道和高頻保护的通道已日益广泛。在这种情况下，远动訊号用交流傳送，而远动通道就称为頻率通道。

与电話通道相比，远动頻率通道最显著的特点在于它們所占的頻带較窄。实际上根据动作速度、滤波器类型以及抗干扰性的要求等来看，远动通道占用的頻带为几赫到几百赫。在用有綫綫路傳輸訊号时工作頻率范圍从零（直流电）开始，并分成：低音頻段(0～300赫)，中音頻段（300～3000赫），高音頻段(3～6千赫)以及較高音頻段(超过6千赫)。

在輸电綫上各远动通道的頻率范圍为30～300千赫。但在短些的綫路上也可能采用較高的頻率(到1000千赫)，因为用高頻率傳輸訊号时衰耗較大。較低頻率（＜30千赫）之所以不被采用是由于干扰电平太高。輸电綫上的干扰强度随着頻率的降低而增加。

需要全本请访问 www.ertongbook.com

用专用設备可将整个工作頻带划分成一系列的远动通道。在最簡单的情况下，高頻电流本身就是遙控-遙訊(TY-TC)訊号。在綫路两端，各通道是利用滤波器来分隔的[2, 15]。

滤波器容許規定頻带內的电流通行无阻(衰耗很小)，而阻止在規定頻率范圍以外的电流通过(产生很大的衰耗)。为使在一条綫路上組成大量的通道，就必須有通带很窄的滤波器。但是过分压縮通带会使滤波器电路复杂化。

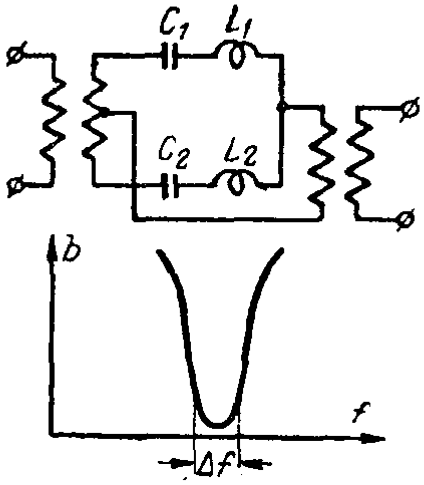


图1 桥式差接滤波器环节及其頻率特性曲綫

窄带滤波器多半是按照桥式差接电路配成的(图1)。在某些情况下，当需要极稳定的頻率特性时，則采用石英滤波器。

目前采用的遙控-遙訊系統中，多半用調制的高頻电流作远动訊号。在这种远动系統中，也象在高頻电話中一样，高頻(載波)被音頻(副載波)所調制。由于高頻通道就是为傳送訊号之用，故而整个音頻頻带不妨全部占滿，在整个音頻頻带中可以組織20路远动通道。

与滤分高頻頻率相比較，滤分音頻頻率所需的滤波器电路就要簡单一些，这样就有可能将整个音頻頻譜划分成很多寬約100～200赫的窄頻带。例如，在TMT-6M型装置中，音頻頻带被划分成16路通道，其中每路寬度为180赫。

目前簡单串联諧振回路形式的选頻器流行甚广，回路的电感綫圈繞制在鋁硅鉄心或鉄氧体心上，这样在低頻时可以得到較高的品质因数。电感綫圈做成自耦变压器的形式，在它的降压繞組上接入执行继电器。每一回路都調諧到与某一通道頻率諧振。所以，当有符合該頻率的訊号来临时，則与該

頻率諧振的回路中的继电器就动作。

采用ТЧ-60型环形磁心的电感时，在300～3000赫的音頻頻带內可以安排15～20个諧振頻率。

在通道的发送端对高頻电流进行調制和在接收端进行解調，可以采用調幅（AM）、調頻（ЧМ）或調相（ФМ）方法。实际上大致只采用前两种調制方法（图2）。

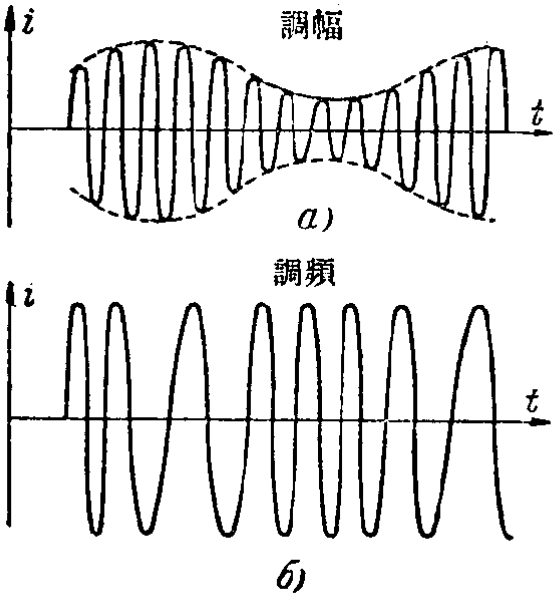


图2 已調制电流的波形
а—調幅（AM）的情况；
б—調頻（ЧМ）的情况

在調幅时（图2*а*），高頻电流（被調制者）的幅度随着低頻电流（調制者）的变动而变化。在調頻时（图2*б*），高頻电流的幅度沒有变化，而它的頻率則随着低頻电流幅度的变动而变化。

調制后，訊号是由載頻电流以及所謂"边頻"的电流組成。当調制电流是頻率为 f 的純粹正弦电流时，經过調幅后除了載頻 F 外，还产生上边頻 $F+f$ 和下边頻 $F-f$。在一般情况下往往不是一个边頻而是一个或几个边頻带。

在綫路上可以将两个边頻带电流一起傳送。这样，綫路（分組）滤波器的电路就比較簡单，但是每一路通道要占据相当寬的頻带 $(F+f)-(F-f)=2f$，而使通道数目显著减少。在大多数情况下只傳送一个边带；上边带或者下边带（載頻也不进行傳送）。这时，所占頻带要减少一半以上（約为 f），而綫路滤波器电路就要稍为复杂一点。

装設在通道接收端的反調制器，将綫路上送来的訊号恢复成原来在进入調制器以前的形式。調制器和反調制器可以采用各种电路，包含有非綫性元件、电子管、半导体二极管和三极管等等。

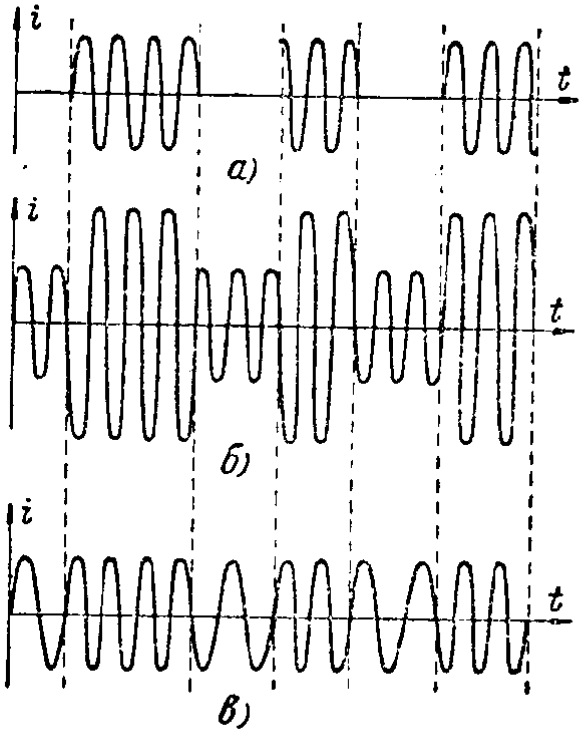


图3 电流曲綫

а、б—振幅鍵控； *в*—頻率鍵控

在振幅鍵控的情况下，于間隔(停息)期間，綫路电流应陡然下降或完全截止(图3*а*与*б*)。在頻率鍵控的情况下，从脉冲轉为間隔时，綫路电流的頻率要随之突变(图3*в*)。鍵控作用是利用电磁继电器或无触点继电器来实現的。

2. 在分支电力网上构成高頻通道的特点

与有綫通訊綫路相比，分支电力网具有一系列的特点，这些特点主要是由于綫路結构不同和綫路上有50赫电流存在而造成的。电力配电网上高頻通道的結构图示于图4。

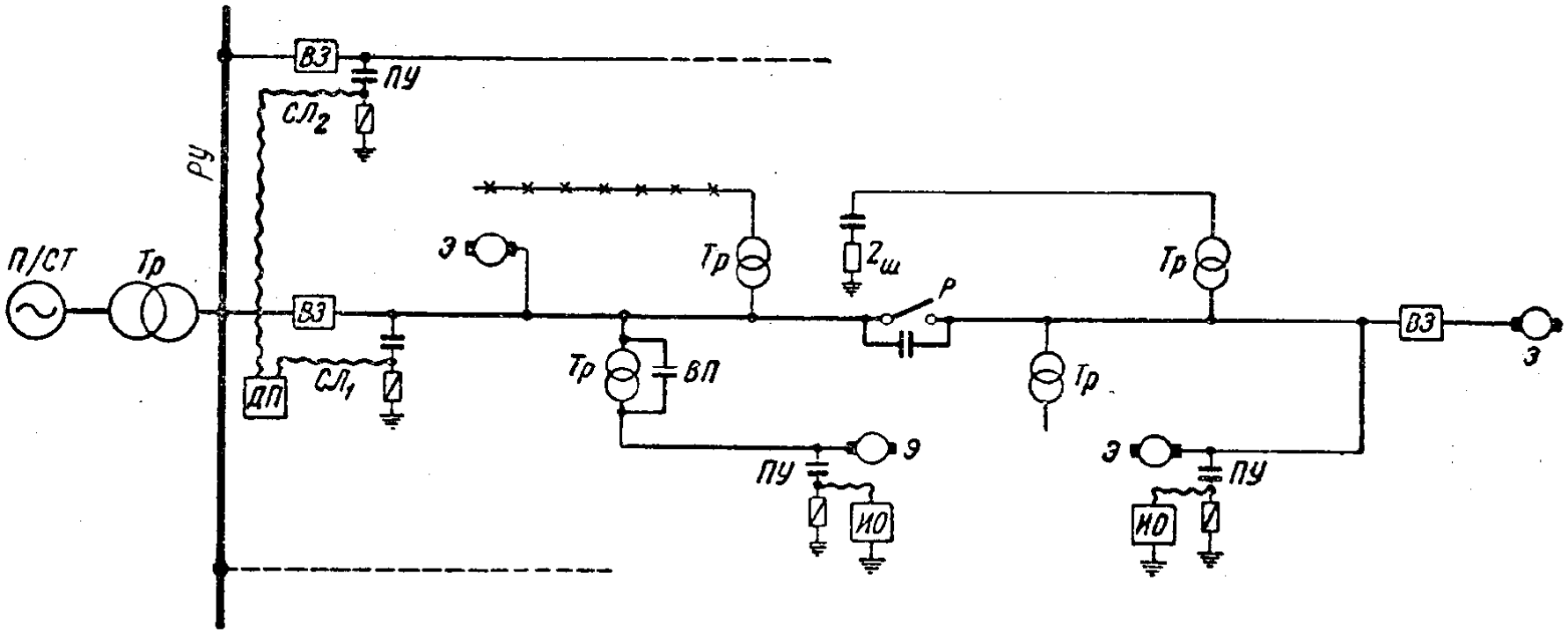


图 4　电力配电綫上高頻通道的結构图

П/СТ—牵引变电所；　*СЛ*—連接綫路；　*ВЗ*—高頻阻流器；　*ДП*—調度端；　*ИО*—执行对象

需要全本请访问 www.ertongbook.com

遙控-遙訊裝置是通过特殊的連接設备接到輸电网上去的，这种連接設备对保証机件和操作人員的安全都是必需的。連接設备中的主要元件是耦合电容器，它容許高頻电流通行无阻，而50赫的电流則实际上完全通不过。

分支电力网原来是为将电能分配給企业中的各主要对象而建設的。在建造时根本未曾考虑到作为通訊道的一些要求。在10/0.2千伏的配电网上接有各种不同的电气設备(电力变压器 Tp、发电机、电动机 ϑ、油断路器、变电所、高压电纜等等)。所有这些都对远动訊号的傳輸产生极不利的影响，使訊号的傳輸遭到意外的衰耗。

低輸入阻抗的一些接入設备所造成的影响最为显著。例如，大功率电动机、电纜、靜电电容器等都属于这一类。

各配电网的結构形式彼此差异极大，照例有很多分支綫，而其中有些分支綫的长度可能在一个或几分之一个波长上下。分支綫和干綫的終端大多是开路的。

长度在 $\frac{1}{4}\lambda$、$\frac{3}{4}\lambda$ 等等左右的开路分支綫的輸入阻抗很低，所以在它們的接入点，对高頻电流来說实际上等于短路。当通道电路中必須接入諸如此类的分支綫时，則在分支綫的終端必須接一个負載，負載的阻抗 $Z_{\text{н}}$ 应等于綫路的波阻抗。这样，分支綫的輸入阻抗也就提高到等于綫路波阻抗的数值。倘若有的分支綫上沒有遙控-遙訊对象，則分支綫与干綫联接处必須設置高頻阻流器(B3)。

为了构成一条統一的通訊电路，在电网的某些点上都要設置高頻跨接綫(BП)。例如，当每一个相互隔开的綫路区間都由自己的牵引变电所供电时，装設在电气机車接触饋电网上的分段隔离开关(P)两端必須接有高頻跨接綫。高頻跨接綫可装設在中間电力变压器(Tp)处，因为这种变压器对高頻

电流造成显著的損耗，高頻跨接綫也可以装在中間变电站的旁路綫以及其他的一些位置上。

特殊抗干扰滤波器形式的、降低干扰电平的装置也属于高頻通道設备。

3. 分支电力网的基本类型

对于构成通訊道来說，最有发展前途的是矿井、石油工业、鉄道运輸与城市运輸、农业与城市公用事业、巨型冶金联合企业以及建筑工地等工矿企业的电力配电网。

按照电流种类来分，这些电网可以分为交流綫路和直流綫路两种。属于直流綫路的有电机車、鉄道运輸、城市运輸和地下运輸的接触饋电网。

鉄道运輸接触电网的綫路很长，而在各变电站轄区內，不同分布形式的分支綫的数目不多。在一般情况下牵引变电所是通过架空饋电綫接入电网的。

城市电气运輸系統具有距离短得多而分支更多的接触电网。綫路长度可以从几公里到几十公里。煤矿接触电网在分布形式和长度方面都近似城市电气运輸系統的电网。在其他矿井中接触电网的长度更短而分支还要多。在这些矿井中綫路长度一般不超过1～2公里。牵引变电所与城市运輸和地下运輸接触电网之間是用电纜来連接的。在綫路上电机車运行的数量决定于矿井的規模。除某些結构上的不同以外，这些接触电网在电压等級上也不相同，有3300伏、600伏、260伏三种。

在經过适当的高頻改造后，接触电网可以有效地用来与电气列車进行高頻調度通訊以及进行运輸系統的遙控-遙訊。目前在地下和城市电气运輸方面已有一系列类似的系統。露

天矿場、冶金工厂、港口和建筑工地的接触电网也可以类似地加以利用。

为数最多、式样最繁的是电压为10/0.2千伏的交流配电网組。这些电网可能是架空綫、电纜或混合形式。由于这种

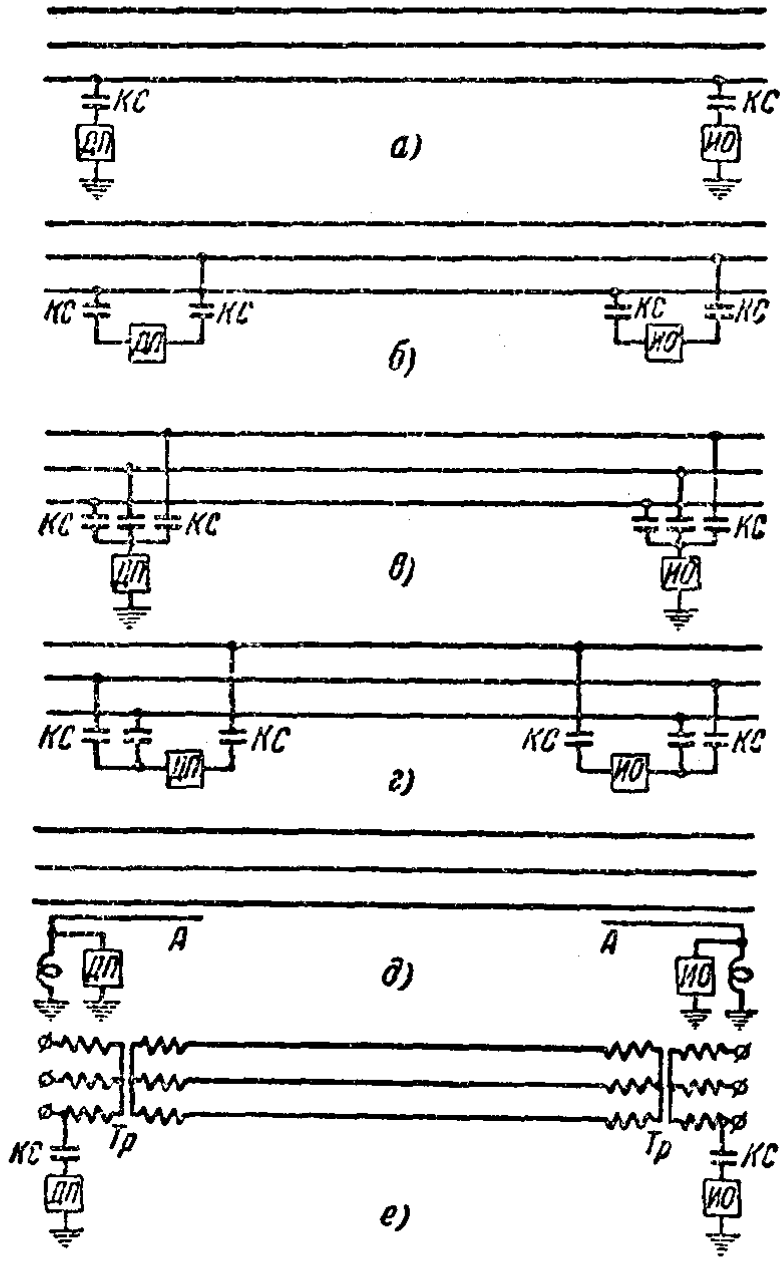


图5 高頻装置接到电力傳輸綫上去的方法

а、*б*、*в*、*г*—采用耦合电容器*КС*的"相-地"、"相-相"、"三相-地"及"两相-相"电路； *д*—天綫法； *е*—采用耦合电容器及电力变压器的方法

綫路具有多导綫的結构形式，因此有可能采用几种不同的高頻接入装置电路(图5)：(*а*)"相-地"制；(*б*)"相-相"制；(*в*)"三相-地"制；(*г*)"两相-相"制。

电路的选擇原則是：在連接設备最簡单的条件下使訊号衰耗最小。經常采用的是在高頻改造方面化費最少的"相-地"电路(只对綫路的一相进行改造)。

象高压輸电綫一样，电压为10/0.2千伏的分支电力网也能有效地用于高頻通訊和构成远动通道。近几年来所发表的一系列的著作[10~13, 25, 27]，都証实在进行适当的高頻改造的条件下，沿分支电力网将远动訊号送过一段所需的距离，在理論上是可能的。已經肯定：在分支电力网上只有少数的接入設备时，訊号在綫路中的衰耗并不很大，因而远动訊号的傳輸距离可达几十甚至几百公里。在接入設备增多的情况下，傳輸距离便急剧减短。例如，沿矿井接触电网的傳輸半徑总共只有几公里。在这种綫路上，訊号值由于每公里衰耗和高頻电流經过各种不同接入設备(分支綫、电动机等等)产生大量漏泄，故而迅速减小。

在接入設备不多的情况下，訊号衰耗主要决定于綫路的电气参数，这些参数則决定于綫路的結构(导綫数目、导綫悬挂物、导綫材料等)。为了减低分支电力网中各种不同接入設备所造成的損耗，必須对它們进行高頻改造。

为了分析高頻电流沿各种不同分支电力网的傳播情况，我們先介紹一些电訊理論的知識。

4. 若干电訊理論知識

如果綫路是由同一种材料和截面均匀的导綫构成的，导綫与导綫間的間隔相同，而且沿綫沒有任何負載，則这种綫路

需要全本请访问 www.ertongbook.com

称为均匀綫。当在綫路的始端接入一正弦电势的电源（供电电源、发电机）时，則有电磁波沿着綫路傳播，这波称为行波。

电磁行波的电压 U 与电流 I 間的关系为

$$Z_c=\frac{\dot{U}}{\dot{I}} \tag{1}$$

量值 Z_c 具有阻抗的量綱（欧），并称之为綫路的波阻抗。它是电磁波沿均匀綫傳播时，在綫路一切点上所遇到的阻抗。均匀綫的波阻抗是恒定不变的而且与它的长度无关。

为了保証通訊道的工作稳定可靠，綫路終端的負載阻抗 $Z_н$ 应等于波阻抗。这样，到达綫路終端的行波就完全被阻抗 $Z_н$（匹配阻抗）所吸收，与此同时，綫路中就达到稳定状态。在負載匹配的条件下，綫路上任何一点的輸入阻抗总等于波阻抗。

当綫路上只有行波存在（綫路以匹配阻抗构成閉路）时，綫路上离始端距离为 x 的任何一点上的电压 U_x 和綫路終端电压 $U_к$ 的关系为

$$\dot{U}_x/\dot{U}_к=e^{\gamma(l-x)} \tag{2}$$

电流之間也有类似的关系

$$\dot{I}_x/\dot{I}_к=e^{\gamma(l-x)} \tag{3}$$

在 $x=0$ 处，亦卽在綫路的始端

$$\dot{U}_н/\dot{U}_к=e^{\gamma l};\ \dot{I}_н/\dot{I}_к=e^{\gamma l} \tag{4}$$

式中 γ——傳播常数；

$e=2.71\cdots$——自然对数的底；

l——綫路长度；

$$\dot{U}_н=U_н e^{j\psi_н};\ \dot{U}_к=U_к e^{j\psi_к};$$

$$\dot{I}_н=I_н e^{j\varphi_н};\ \dot{I}_к=I_к e^{j\varphi_к}$$

以上的电压与电流都是复数；

$U_н, U_к, I_н, I_к$——各相应电压与电流的模数；

$\psi_н, \psi_к, \varphi_н, \varphi_к$——各相应电压与电流的相位。

傳播常数也是复数

$$\gamma=\beta+j\alpha \tag{5}$$

上式中的两个項通常是以每公里长的綫路确定的。量值 β 称为每公里的衰耗值，而量值 α 称为相位系数。

因此

$$\dot{I}_н/\dot{I}_к=\dot{U}_н/\dot{U}_к=e^{\beta l}e^{j\alpha l} \tag{6}$$

其中因子 $e^{\beta l}$ 表明在負載匹配的情况下，綫路終端处的电压模数 $U_к$ 或电流模数 $I_к$ 比綫路始端处的电压模数 $U_н$ 或电流模数 $I_н$ 所小的值。因子 $e^{j\alpha l}$ 則表明在負載匹配的条件下，綫路始端和終端处电压或电流之間的相位移

$$\alpha l=\psi_н-\psi_к=\varphi_н-\varphi_к \tag{7}$$

根据式(6)应得

$$\beta l=\ln\frac{I_н}{I_к};\quad \beta l=\ln\frac{U_н}{U_к};$$

$$\beta l=\frac{1}{2}\ln\frac{P_н}{P_к} \tag{8}$$

式中 $I_н, U_н$ 及 $P_н=U_нI_н$——綫路始端处的电流、电压及总功率；

$I_к, U_к$ 及 $P_к$——綫路終端处的电流、电压及总功率。

量值 βl 表征着綫路上的損耗，并用奈培来計量。

1 奈培的綫路衰耗意味着：电压与电流的幅度沿綫路减小成 2.7 分之一，而总功率减小成 7.4 分之一。

除奈培以外也常利用分貝作为衰耗的計量单位。这时，綫路衰耗为

$$\beta l = 10 \lg \frac{P_н}{P_к} = 20 \lg \frac{U_н}{U_к} = 20 \lg \frac{I_н}{I_к}$$

奈培与分貝的相互換算可利用下列两个关系式

1 分貝 $=0.115$ 奈培； 1 奈培 $=8.68$ 分貝。

量值 Z_c 与 γ 称为綫路的二次参数。

綫路的一次参数是：电阻 R、电感 L、电容 C 与泄漏电导 G。一次参数也是以每公里长的綫路确定的。

根据下列公式二次参数可以用一次参数来表达

$$Z_c = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} \tag{9}$$

$$\gamma = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} \tag{10}$$

相位系数可以通过电磁波的傳播速度 v 来表达

$$\alpha = \frac{\omega}{v} \text{ 弧度/公里} \tag{11}$$

对于有些綫路来說，可以取：$R \ll \omega L$，$G \ll \omega C$，亦即 $\gamma = j\omega\sqrt{LC} = j\alpha$。这样的綫路称为无耗綫。这时

$$v = \frac{1}{\sqrt{LC}} \tag{12}$$

电波沿架空銅綫傳播的速度 v 近似地等于光在眞空中的傳播速度 $c = 3 \times 10^5$ 公里/秒。在鋼綫回路中，v 值就稍有降低；在电纜綫路中傳播速度更低，这时 $v \approx \frac{1}{2} c$。

根据傳播速度可以确定行波的波长

$$\lambda = \frac{v}{f} \tag{13}$$

式中，f 为电流頻率。

在許多場合下，綫路終端的負載阻抗并不等于綫路的波阻抗 ($Z_н \neq Z_c$)。那时，在綫路終端，行波只部分地被吸收，它

的另一部分則被反射而返回綫路始端。从供电电源向綫路終端运动的电磁波称为入射波，而从綫路終端由于反射而产生的电磁波則称为反射波。反射波也象入射波一样，沿綫路傳播时在每一点上所遇到的阻抗都等于綫路的波阻抗 Z_c。

入射波与反射波电压或电流值之間的关系决定于綫路的負載阻抗

$$\frac{\dot{I}_o}{\dot{I}_п}=-p;\ \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_п}=p \tag{14}$$

$$p=\frac{Z_н-Z_c}{Z_н+Z_c} \tag{15}$$

式中 p——反射系数；

I_o, U_o——反射波的电流与电压值；

$I_п, U_п$——入射波的电流与电压值。

从式(15)可知，根据 $Z_н$ 值的大小，反射系数可在 -1 到 $+1$ 的范圍內变化，而当 $Z_н=Z_c$ 时通过零点。

如果 $p=-1$，就意味着 $Z_н=0$，亦卽綫路在終端处被短路；在这种情况下 $\dot{I}_o=\dot{I}_п$，而 $\dot{U}_o=-\dot{U}_п$。所以，由于电流振幅 I_o 与 $I_п$ 相加的緣故，短路綫終端处的合成电流具有最大值，等于一个波的电流振幅的两倍，而合成电压則等于零(图 6)。

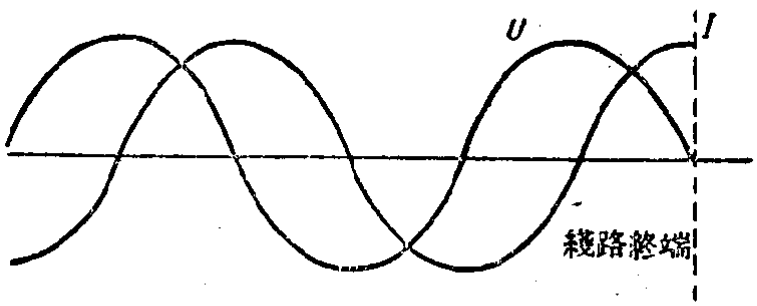


图 6 在綫路終端短路的情况下，无耗綫上电流与电压的分布情形

如果 $p=1$，则 $\dot{I}_0=-\dot{I}_n$ 而 $\dot{U}_0=\dot{U}_n$，这意味着綫路工作于終端开路的条件下（空載，$Z_н=\infty$）。开路綫路的終端电流等于零，而电压加倍。

反射波不仅可以在綫路的終端处产生，也能在綫路均匀性遭到破坏的任何一点上产生。分支綫以及不在綫路終端处接入的各种电气装备等等都可以造成不均匀性。

綫路短路时的輸入阻抗 $Z_к$ 和綫路空載时的輸入阻抗 Z_x 为

$$Z_к=Z_c \operatorname{th} \gamma l \tag{16}$$

$$Z_x=Z_c \operatorname{cth} \gamma l \tag{17}$$

根据已知的 $Z_к$ 与 Z_x 值不难确定波阻抗

$$Z_c=\sqrt{Z_к Z_x} \tag{18}$$

对具有任意負載 $Z_н \neq Z_c$ 的綫路来說，輸入阻抗为

$$Z_{вх}=Z_н \frac{\operatorname{ch} \gamma l+\frac{Z_c}{Z_н} \operatorname{sh} \gamma l}{\operatorname{ch} \gamma l+\frac{Z_н}{Z_c} \operatorname{sh} \gamma l} \tag{19}$$

当綫路具有任意負載时，綫路中訊号的衰耗并非单純由綫路衰耗 βl 来确定，而是由所謂工作衰耗 b_p 来确定的，它可用下列公式計算

$$b_p=\beta l+\ln\left|\frac{Z_{н1}+Z_c}{2\sqrt{Z_{н1}Z_c}}\right|+\ln\left|\frac{Z_{н2}+Z_c}{2\sqrt{Z_{н2}Z_c}}\right|$$

$$+\ln\left|1-\frac{Z_{н1}-Z_c}{Z_{н1}+Z_c}\cdot\frac{Z_{н2}-Z_c}{Z_{н2}+Z_c}e^{-2\gamma l}\right| \tag{20}$$

从式(20)可知，工作衰耗决定于每公里衰耗、綫路长度、波阻抗、綫路負載阻抗 $Z_{н2}$ 以及发生器的内阻 $Z_{н1}$。b_p 值由四个部分組成

第一部分是綫路的固有衰耗；

第二部分是由于发生器内阻与綫路波阻抗不匹配所引起的衰耗；

第三部分是由于綫路波阻抗与負載阻抗不匹配所引起的衰耗；

第四部分是由于多次反射所引起的衰耗。

当綫路的一端得到匹配时，第四項以及第二或三項就变为零。究竟是第二項还是第三項，則要看綫路的哪一端得到匹配。例如，假使 $Z_{н1}=Z_c$，則

$$b_p=\beta l+\ln\left|\frac{Z_{н2}+Z_c}{2\sqrt{Z_{н2}Z_c}}\right| \tag{21}$$

而当 $Z_{н1}=Z_{н2}=Z_c$ 时

$$b_p=\beta l \tag{22}$$

衰耗值 βl 大于 1.5 奈培的綫路常被称为"长"綫。在这种綫路上由于对訊号的衰耗很大，所以多次反射可以略而不計。

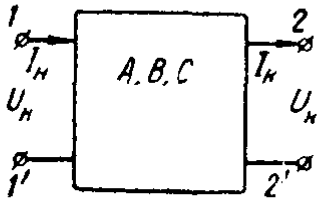


图7 綫路段的等效电路

在实际場合中很少遇到均匀綫。实际上，一个訊号傳輸系統在大多数情况下总包括若干段綫路。为了便于分析和計算这类复杂的綫路，通常将具有分布参数的各段綫路化成一些与它們等效的集中元件——四端网絡(图7)。四端网絡可以是任何一种具有四个綫端(接綫端)的电气系統，其中两个綫端是輸入端(*1—1'*)而另外两个为輸出端(*2—2'*)。

由集中元件(电阻、电感和电容器)按照一定电路图連接而成的四端网絡，能足够准确地反映出一段有分布参数的綫路的特性。被取代的那段綫路愈短則对应的結果愈确切。結

論是：任何一条綫路总可以表达成为若干連接在一起的四端网絡，它們不仅可取代綫路本身的各个綫段，而且也可取代任何接入設备(变压器、分支綫、通訊設备等等)。

取代均匀綫路段的四端网絡总是对称的。确定輸入端与輸出端的电压和电流关系的四端网絡基本傳輸方程，和长度为 l 的綫段的对应方程完全类同

$$\dot{U}_{н}=\dot{U}_{к}\operatorname{ch}\gamma l+\dot{I}_{к}Z_{c}\operatorname{sh}\gamma l=A\dot{U}_{к}+B\dot{I}_{к}$$

$$=\dot{U}_{к}\operatorname{ch}g+\dot{I}_{к}Z_{c}\operatorname{sh}g \qquad (23)$$

$$\dot{I}_{н}=\frac{\dot{U}_{к}}{Z_{c}}\operatorname{sh}\gamma l+\dot{I}_{к}\operatorname{ch}\gamma l=C\dot{U}_{к}+A\dot{I}_{к}$$

$$=\frac{\dot{U}_{к}\operatorname{sh}g}{Z_{c}}+\dot{I}_{к}\operatorname{ch}g \qquad (24)$$

式中 $A=\operatorname{ch}g=\operatorname{ch}\gamma l$

$B=Z_{c}\operatorname{sh}g=Z_{c}\operatorname{sh}\gamma l$

$C=\frac{\operatorname{sh}g}{Z_{c}}=\frac{\operatorname{sh}\gamma l}{Z_{c}}$

都是确定四端网絡电气特性的系数。

系数 A 是无量綱的，B 的量綱与电阻相同；而 C 与电导相同。它們的量值决定于四端网絡的电路，亦即决定于被取代綫路的参数 Z_{c}，γ 与 l 或任何其他对象的参数。它們相互間有下列关系

$$A^{2}-BC=1 \qquad (25)$$

对称四端网絡不仅可以用系数 A, B, C 来确定，也可象长綫一样，用对应于綫路段波阻抗的特性阻抗 Z_{c} 和傳輸常数 $g=\gamma l$ 来确定。它們可以用系数 A, B, C 来表达如下

$$Z_c=\sqrt{\frac{B}{C}};\quad g=\ln(A+\sqrt{BC}) \tag{26}$$

在实用上，宜用空載和短路状态时的輸入阻抗来确定四端网絡的参数 Z_c 和 g

$$Z_c=\sqrt{Z_xZ_k};\quad \text{th}\, g=\sqrt{\frac{Z_k}{Z_x}}$$

需要全本请访问 www.ertongbook.com