

继电保护丛书

继电保护高频通道

根 祥

水利电力出版社

73

继电保护丛书
继电保护高频通道

黄 根 祥

*

水利电力出版社出版、发行

(北京三里河路6号)

各地新华书店经售

水利电力出版社印刷厂印刷

*

787×1092毫米 32开本 5.875印张 128千字

1989年6月第一版 1989年6月北京第一次印刷

印数0001—5110册 定价3.70元

ISBN 7-120-00685-1/TM·187



内 容 提 要

本书是继电保护丛书之一，与《输电线路高频保护》一书配合成套，它较全面地讨论了高频信号沿输电线路传输的基本理论，同时注重实用，较详细地介绍了通道有关参数的工程计算方法。本书内容包括高频通道的基本概念，输电线高频通信的理论基础，高频通路的分析方法（对称分量分析法和模式分析法），通道损耗的计算和加工结合设备的讨论等。

本书可供从事高频保护、自动装置和电力载波通信方面的工程技术人员和技术工人阅读，也可供有关专业的大中专学校师生参考。

前 言

为了确保现代大型电力系统运行的稳定性和安全可靠，对继电保护和自动装置的要求越来越高，于是按各种原理工作的高频保护和自动装置得到了广泛地应用。这类装置的工作都需要远距离传输各种信息量，因此在发信和收信端之间，必须架设高质量的通道。通道的形式可以是多种多样的，但由于经济、可靠等优点，复用电力线仍是目前通道的主要形式。

高频通道这一技术内容，是介于继电保护和高频通信两者之间的边缘学科，它的研究工作是随着高频保护、自动装置和高频通信技术的发展而发展的。我国从50年代起在输电线路开始采用高频保护和高频通信等高频技术，高频通道的研究工作也与此同时开展起来。三十多年来，我国在采用分裂导线通道、架空避雷线通道、模分量分析法、电子计算机在通道计算中的应用、杂音的统计特性、新型加工结合设备等方面的研究工作都取得了一系列可喜的成果。

本书着重在理论上较详细地讨论了高频信号的传输特性，较充分地展开了对模分量分析方法的讨论。同时，考虑到实际工作的需要，较全面地介绍了有关通道参数和损耗的工程计算方法，并引用了IEC推荐的经验公式和苏联近几年来在通道计算方面的研究成果。

本书经贵州电力试验研究所吴世楷审稿。在编写过程中，上海电力学院陈增田和陈鸿两位副教授曾提过很多宝贵意

见，编者在此一并表示感谢。限于编者的水平，书中错误和疏忽之处在所难免，欢迎广大读者批评指正。

编 者

1988.4

目 录

前 言

第一章 通道的基本概念.....	1
第一节 概述.....	1
第二节 高频设备与输电线路的连接方式.....	3
第三节 载频通道的基本结构.....	6
第四节 复用通道.....	10
第二章 输电线高频通信的理论基础.....	13
第一节 均匀传输线方程.....	13
第二节 传播常数和特性阻抗.....	16
第三节 输入阻抗(Z_{in}).....	23
第四节 传输单位和传输电平.....	32
第五节 几个衰耗的概念.....	44
第三章 高频通路的分析方法.....	50
第一节 对称分量法.....	50
第二节 模分量分析法.....	54
第四章 高频通路的衰耗计算.....	86
第一节 按对称分量法计算通路衰耗.....	86
第二节 按模分量分析法计算通路衰耗.....	102
第五章 加工和结合设备.....	131
第一节 高频阻波器.....	131
第二节 结合滤波器和耦合电容器.....	158
第三节 高频电缆.....	176

第一章 通道的基本概念

第一节 概 述

为了将线路一侧反应其运行特征的电气量或逻辑量（即保护所需之信息量）传输到线路的另一侧，高频保护必须设置通道。通道可以有线的，也可以是无线的。

在电力系统中，有线通道通常由输电线路本身兼任，称之为复用电力线。在这种复用电力线上同时进行着工频电流的传输和保护所需之信息量的传输，为了使它们易于区分，保护信息量通常采用高频传输，其实施方法是：将保护信息量加载（又称调制）到高频振荡波上，然后经通道向对方传送。此处高频振荡波起着运载保护信息量的工具作用，常称之为载波，载波的频率称为载频。因此，高频保护又称为载波保护，高频通道又称为载频通道。

载频通道的优点是：

- （1）不需要专门的线路初建费用和维修费用；
- （2）绝缘水平高，机械强度大，即使在大风、暴雨或冰冻等恶劣气候条件下，也能在较高程度上保证通信的可靠性。

但载频通道也存在着下列主要缺点：

- （1）输电线是不对称的多导线系统，因此分析和计算通道的参数相当复杂。
- （2）电力设备和分支线对高频电流的传输起着极为不利的旁路作用，而这些作用又难以彻底克服。

(3) 输电线上的工频高电压有窜入高频设备的可能,以致危及人身和设备的安全。同时,输电线路本身的运行状况(例如短路或线路断线等)严重地影响着通道的工作。

(4) 输电线上发生电晕、绝缘子放电、短路、断路器操作或遭受雷击等时,将产生严重的电干扰。

(5) 在电力系统中,当用同一条输电线的不同相或用相邻输电线同时作为高频保护、载波通信和远动设备的通道时,这些相邻通道之间往往会发生互相干扰(这种干扰称为窜音干扰)。此外,需用通道的设备接入愈多,则它们所占的频带愈拥挤,甚至使高频设备使用频带的选择发生困难。

目前,高频保护用载频通道传输的信号频率范围一般为 $50\sim 400\text{kHz}$,最高不超过 500kHz 。载频低于 40kHz 时,使工频与载频的分离发生困难;载频过高,将导致对中波广播、导航电台等产生严重的干扰。

采用无线通道时,一般不用中波和短波波段,而采用微波波段。因为微波在传播时方向性强,具有较宽的频带,可适应多路通信或传送大容量信息,所以它符合高频保护、载波通信、远动设备等对通道的综合要求。采用微波波段传输信号的通道称为微波通道,依靠微波通道构成的继电保护称为微波保护。由于此类通道不属于本书讨论的范围,故以后不再述及。

必须指明,在载频通道中,“通道”与“通路”的含义不同。通道系指从发信机输出端开始,一直到收信机输入端为止的整个高频信号传输系统,其中包括发信端的高频电缆、加工和结合设备、复用电力线、收信端的加工和结合设备、高频电缆。而通路仅指整个通道中复用电力线的那一部分。

第二节 高频设备与输电线路的连接方式

高频设备接入输电线路的方式有：接在输电线的一相或几相导线上；接在绝缘架空避雷线上或接在分裂导线上。

1. 利用相导线作为通路

这种通路可能采用的接线示意图如图1-1。其中 (a)、(b)、(c) 三图表示高频设备接在一相导线、二相导线或三相导线与地之间，这样构成的通道统称为相-地制通道。在高频保护中采用得最多的是一相对地的连接方式。其中图1-1 (d)、(e)、(f) 表示高频设备接在相与相、一相与二相、不同线路的相与相之间的连接方式，这样构成的通道统称为相-相制通路。

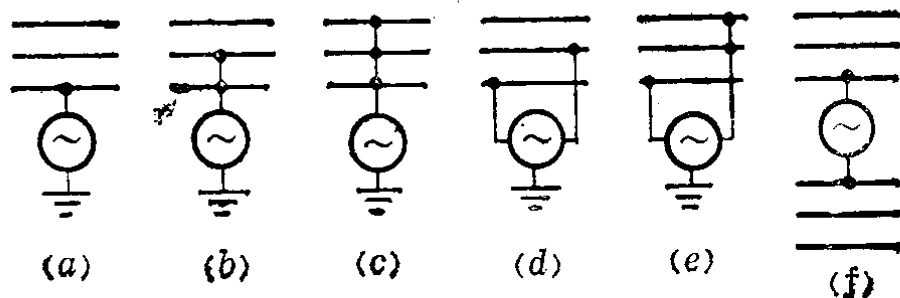


图 1-1 高频设备连接到相导线上的接线示意图

(a) 相-地连接；(b) 二相-地连接；(c) 三相-地连接；
(d) 相-相连接；(e) 相-二相连接；(f) 双回路上的相-相连接

2. 利用绝缘架空避雷线作为通路

在35 kV 以上的输电线路，一般都有一根或二根架空避雷线，这类避雷线通常是可靠接地的。为了利用架空避雷线作通路，则必须把避雷线挂在绝缘子串上，使其与地绝缘。这时避雷线的避雷性能是经各杆塔上装设的保护间隙或绝缘子串表面对地放电实现的。

高频设备与架空避雷线连接方式的示意图见图1-2。其中图（a）为避雷线-地的连接方式；图（b）为两根避雷线-地的连接方式；图（c）为避雷线-避雷线连接方式。

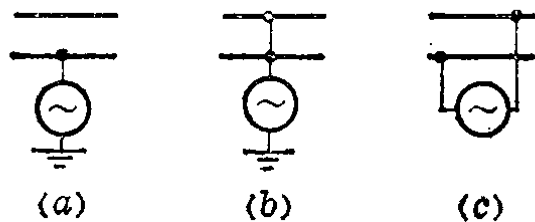


图 1-2 高频设备连接到架空避雷线上的接线示意图
 (a) 避雷线-地连接；(b) 二根避雷线-地连接；(c) 避雷线-避雷线连接

为了减少工频交流电在绝缘架空避雷线上因感应而产生的功率损耗，对采用二根架空避雷线的输电线路，其避雷线必须实行换位措施。高频电流沿着换位的架空避雷线传播时，每经一换位处，就要多增加一部分衰耗。

利用绝缘架空避雷线作通路具有如下优点：架空避雷线上的工频电流、电压均大大低于相导线上的电流、电压，而且不与母线和其它厂、站电力设备相连，所以，避雷线通路的可靠性高，且不易受电网接线方式的影响；避雷线上的杂音比相导线上的电晕杂音低，当避雷线采用良导体导线（如铝包钢）时，在同一发信电平下，避雷线通路的传输距离较远。

3. 利用分裂导线作为通路

超高压重负载的输电线路，或超高压直流输电线，它们的相线或极线都是由几根导线组成（分导线的根数为 2、3、4、6），这样的导线叫分裂导线。用分裂导线可以减少集肤效应和电晕现象。这种分裂导线的排列可以有水平、垂直和方型等方式。通常，各分裂导线之间的距离约为 0.4~0.6m，并沿着输电线路的方向，相隔一定跨度（约为 40~70m），用金属支架或间隔棒把各分裂导线固定，以加强机械

性能和防止彼此碰撞。为了将它复用为高频通路，必须将各分裂导线加以绝缘，其方法是在绝缘子串下面的金具与分裂导线之间加一个绝缘子，并将金属支架或间隔棒改用绝缘材料作成。于是各分裂导线间在沿线全长内都是彼此绝缘的，只有到线路两侧终端，才用高频阻波器将它们作电气连接，这样的分裂导线就可作为高频通路。

在三相输电线路，利用相线的分裂导线作为高频通路又称为相内通路，其接线示意图见图 1-3，图 (a)、(b)、(c) 分别为每相导线为二分裂、三分裂和四分裂时高频设备接入的情况。

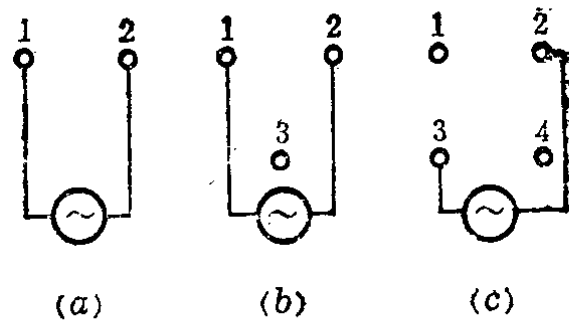


图 1-3 高频设备接到分裂导线的接线示意图

分裂导线通路的优点是：线路衰耗常数小，而输电线各相之间的跨越衰耗很大，因此，这种通路不仅在厂、站两侧的输电线上可以重复使用频率，而且在同一线路的不同相上，也有重复使用频率的可能，这就大大简化了频率分配的设计工作。分裂导线通路对地处于平衡状态，对外的干扰小，受外界干扰的电平也低，因此，使用频谱宽，为开通大容量通信或脉码通信提供了有利条件；另外这种通路还能简化和改善结合加工设备及融冰装置。分裂导线通路的缺点是：导线覆冰积雪时，衰耗增加较快，这是在采用这种通路时应该注意的主要问题。

第三节 载频通道的基本结构

把低压的高频设备接到高压的输电线路，需解决以下三个问题：

(1) 防止高压强电窜入低压高频设备，以免危及人身和设备安全；

(2) 应使传送信息的高频电流顺利地发送和接收；

(3) 高频电流要有目的地从一端发送到另一端，尽量减少各种分流，以降低高频能量的无谓损耗。

因此，在高频设备连接到输电线上时，就必须加入一些必要的有关设备。高频设备接入某一相，通常称做为“结合”到某一相，或称做为“加工”在某一相上（称该相为加工相），所以这些必要的有关设备通常称为加工和结合设备。

由相-地制通路构成一个高频电流传输系统的方框图如图1-4所示，现将其主要元件的名称和作用简要分述如下。

1. 高频阻波器

图1-4中，高频阻波器1是一个由电感和电容构成的并联谐振回路，其参数选择得使该回路对高频设备的工作频率发生并联谐振，因此高频阻波器对该工作频率呈现很大的阻抗，使高频电流只能在被保护线路上传递，而不致分流到其它线路上去。高频阻波器对50Hz的工频电流呈现的阻抗值很小，约为 0.04Ω ，所以工频电流的传输不受影响。

2. 耦合电容器

耦合电容器2的电容量比较小，因其电抗值 $X_c = \frac{1}{2\pi fC}$ ，故它对工频电流呈现很大阻抗，使工频电流泄漏很小，阻止了高压强电侵入低压高频设备。同时，耦合电容器对高频电流

呈现的阻抗很小，高频电流能顺利传递。

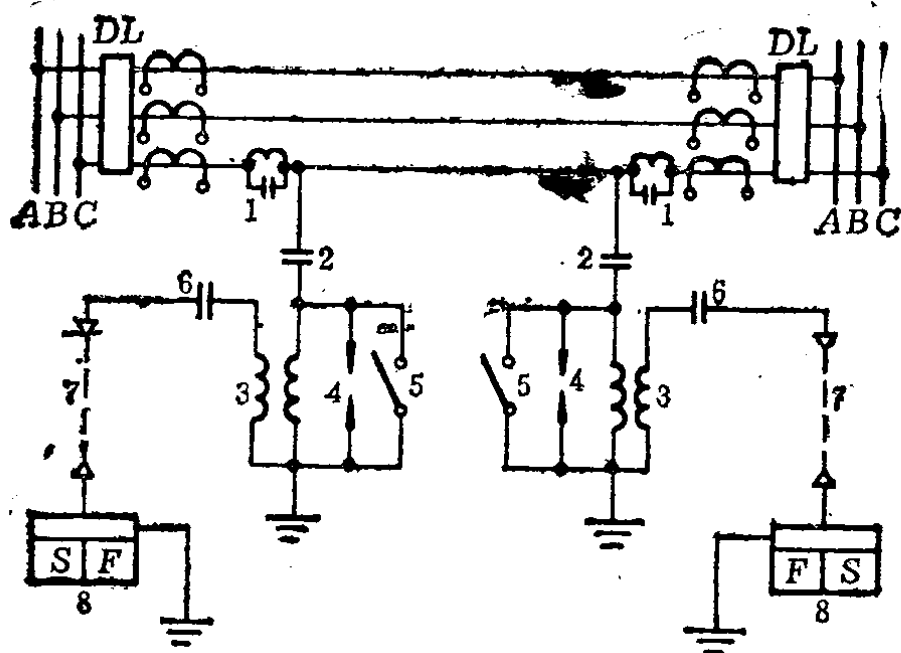


图 1-4 相-地制通路构成通道的原则接线

1—高频阻波器；2—耦合电容器；3—结合滤波器；4—避雷器；
5—接地刀闸；6—电容器；7—高频电缆；8—收发信机

3. 结合滤波器

结合滤波器 3 是一个绕组匝数可以调节的变压器，这个变压器与耦合电容器 2 和电容器 6 共同组成一个带通滤波器，这个带通滤波器有两个作用：

(1) 它的通频带就是高频保护使用的工作频带，高频电流能顺利地通过，而工频和其它频率电流不能通过，这样一方面使高压强电与高频设备进一步隔离，另一方面也抑制了其它频率的干扰；

(2) 带通滤波器又是个阻抗匹配器，它的一端通过耦合电容器与输电线相连，另一端与高频电缆相连，由于这个阻抗匹配器的作用，使高频通路的输入阻抗与高频电缆的输入阻抗互相匹配起来，以利于高频能量的传输。

上述的高频阻波器通常称为加工设备；耦合电容器、结合滤波器通常称为结合设备，这二者统称为加工和结合设备。

4. 接地刀闸和避雷器

图中 5、4 分别为接地刀闸和避雷器。接地刀闸用来在高频保护停止工作或调整收发信机时进行安全接地用；避雷器用来当输电线上遭受大气过电压或操作过电压时起保护作用的，使高频设备免受击毁。

5. 高频电缆

高频电缆 7 将位于主控制室内保护屏上的收发信机与位于户外高压配电装置中的结合滤波器连接起来，其长度一般不超过几百米，但因其工作频率较高，故采用普通电缆将会引起很大衰耗，因此，它通常采用单芯同轴电缆。

6. 收发信机

收发信机 8 的作用是为了发送或接收高频信号。

对于相-相制通路构成的载频通道来说，它有着高频传输衰耗小，稳定性高等优点，但由于高频设备要同时加工到两相上，所以在一条输电线路上不能组织较多通路，且所用的加工和结合设备需多一倍。这种连接方式与相-地制通路相比，后者获得了广泛地应用。构成相-相制通路的原则接线如图1-5所示，其中相应的设备名称见图注。

在采用架空避雷线作高频通路时，其通道的原则接线如图1-6所示。其中图(a)为带排流线圈的接线，图(b)为不带排流线圈的接线。后者在短路电流大的输电线及良导体的避雷线上采用，这种线路通过排流线圈的电流相当大，排流线圈需制作得十分笨重，因此这类线路不用排流线圈，而采用大容量电容器耦合的结合滤波器。图1-6中 1 为耦合电容器；2 为阻抗比100/500的结合滤波器（一般高频电缆的

特性阻抗为 100Ω ，一根架空避雷线的特性阻抗为 500Ω)；3 为避雷器；4 为排流线圈，它为避雷线提供接地点，它与耦合电容器构成半节高通滤波器，使高频电流能顺利通过电容器而进入结合滤波器，其电感量一般为 2 mH ；5 为高频电缆。

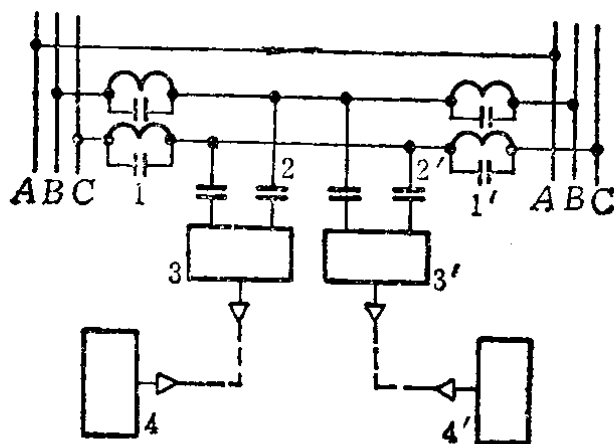


图 1-5 相-相制通路构成通道的原则接线图
1、1'—高频阻波器；2、2'—耦合电容器；3、3'—结合滤波器；
4、4'—高频收发信机

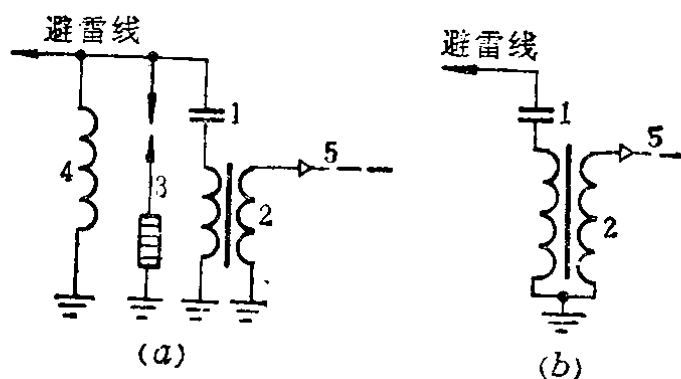


图 1-6 架空避雷线-地通路构成通道的原则接线图
(a)带排流线圈的接线；(b)不带排流线圈的接线

在采用分裂导线作高频通路时，其通道的原则接线如图 1-7 所示，其中 1 为带中心抽头的高频阻波器，A 点为接到变电站母线去的分裂导线会合点，2 为放电间隙，3 为高频自耦变压器，4 为耦合电容器，5 为结合滤波器，6 为高频电缆，7 为分裂导线的绝缘支架。

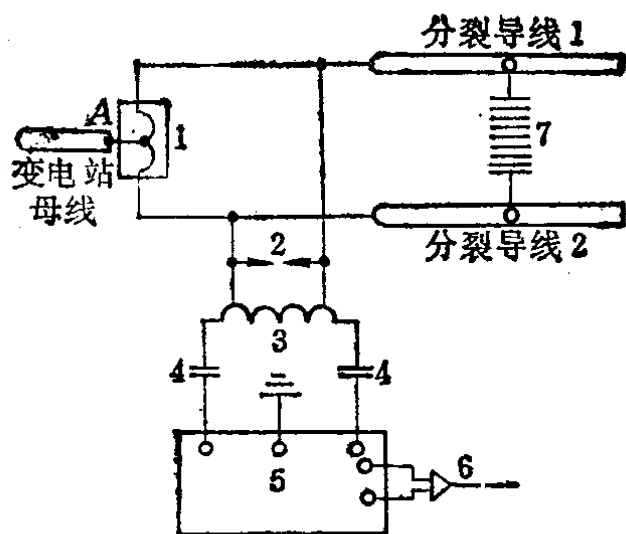


图 1-7 分裂导线（二分裂）构成通道的原则接线图

第四节 复 用 通 道

随着电力系统继电保护、载波通信和远动技术的发展，需要用载频通道的设备越来越多，由三相输电线作为高频通路就显得非常拥挤，以至使每种设备各自都用单独的通道而感到困难，有时甚至是不可能的。为了解决这个问题，就出现了几套高频设备共用一条通道的传输形式，这就称为复用通道。这样，一方面解决了通道拥挤的问题；另一方面因公用一套加工和结合设备，可节省通道的投资。

复用通道的实施原则，主要有如下两种形式。

1. 频率复用

频率复用也称频率划分或频分制，这种复用方法是把不同用途的多种高频设备采用不同的工作频率，然后各自经过相应的分频设备，把不同频率的高频电流送到公共的结合设备上，继而通过公共的高频通路送到对侧，再经对侧的公共结合设备，然后经过各自的分频设备送至各台相应的收信机，这样就可达到在同一条通路上进行多路通信的目的。

频率复用的原则接线见图 1-8, 其中 F_1 和 F_2 是两套高频设备的发信机, FL_1 和 FL_2 是它们各自的分频设备, 将它们并联后接到高频电缆上, 然后经过公共的结合设备加工到输电线上。

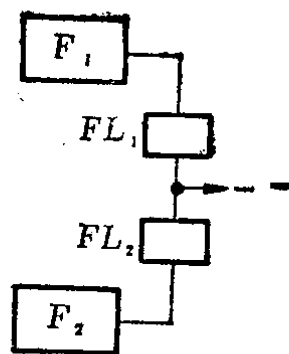


图 1-8 频率复用通道的示意图

分频设备就是分频过滤器, 发信机 F_1 的工作频率 f_1 处在 FL_1 的通频带内, 发信机 F_2 的工作频率 f_2 处在 FL_2 的通频带内, 由此可见, 它们只允许本机工作频率的信号顺利地通过, 而其它频率的信号都被阻止。

为了实现上述通道复用, 除分频设备外, 还需对加工和结合设备作相应的改进, 以使这些设备对频率 f_1 和 f_2 都能起到相应的作用。

这种复用方式虽然解决了通道拥挤的问题, 但随之出现了如下一些问题: 引起较大的分流衰耗和窜音干扰; 两个不同频率的高频信号有可能同时进入一台收信机, 产生频拍和交叉调制现象, 引起保护的误动作; 其中任一套设备维修或故障时, 就会影响另一套设备的安全运行等; 同时, 给正常的维护运行也增加了麻烦。

为了解决上述问题, 加装的分频设备必须使两套高频设备之间的互相干扰降低到尽可能小的程度。

2. 时间复用

时间复用也称时间划分或时分制, 将多路通信的信号, 在时间上按先后次序, 依次发送和接收, 以实现在一条通道上进行多路通信的目的。为了使信号传递不致发生错误, 发送和接收双方必须是同步的, 这借助同步旋转切换装置来实