

《通信系统原理与实践》系列讲义（四）

光纤通信系统 原理与实践

中兴通讯实验室 编

南昌大学教务处印制

第二版说明

中兴通讯实验室编写的通信系统原理与实践系列讲义，主要介绍了现代通信系统的基本原理，并且以中兴通讯产品为对象。

原书第一版为整册共六部分，在两年多的使用中，随着技术的不断发展和实验内容的更新，讲义内容不断丰富，因此，讲义现分成六个分册，分别是：GSM 移动通信系统原理与实践，CDMA 移动通信原理与实践，PCS 个人通信系统原理与实践，光纤通信系统原理与实践，视频通信系统原理与实践，以及数字程控交换原理与实践。

参加系列实验讲义编写的有（按拼音顺序排列）：陈桢，陈利民，陈其伦，陈荣伶，陈燕彬，丁杰，段荣行，方安安，干学仁，洪向共，赖青梧，雷向东，李安，李迟生，李春泉，李建华，梁音，刘晔，刘云来，龙承志，卢金平，卢新发，罗斌，罗晓梅，沈志勤，史秀艳，孙丽华，陶凌，万国金，王平，王艳庆，王玉喙，魏庆国，吴毅强，夏瑞华，熊镛，熊殷，徐立兵，许凯，薛侠，杨文玲，叶小丽，虞礼贞，喻嵘，张文全，张焯，赵安，赵庆敏，周南润，周辉林等。全部系列讲义由李迟生负责统稿。

讲义中错误之处请读者批评指正。

中兴通讯实验讲义编写组

2007年5月于南昌

第一章 同步数字体系（SDH）

1.1 同步数字体系（SDH）

1.1.1 SDH 简介

SDH 全称同步数字体系（Synchronous Digital Hierarchy），SDH 规范了数字信号的帧结构、复用方式、传输速率等级、接口码型特性，提供了一个国际支持框架，在此基础上发展并建成了一种灵活、可靠、便于管理的世界电信传输网。这种传输网易于扩展，适于新电信业务的开展，并且使不同厂家生产的设备互通成为可能，这正是网络建设者长期以来追求的目标。

1.1.2 SDH 的优越性

SDH 是为克服 PDH 的缺点而产生的，它是先有目标再定规范，然后研制设备，这个过程与 PDH 正好相反。显然，这就可能最大限度地以最理想的方式来定义符合未来电信网要求的系统和设备。下列的 SDH 特点反映了这些要求。

1. 使北美、日本和欧洲三个地区性的标准在 STM-1 及其以上等级获得了统一。数字信号在跨越国界通信时不再需要转换成另一种标准，因而第一次真正实现了数字传输体制上的世界性标准。
2. 统一的标准光接口能够在基本光缆段上实现横向兼容，允许不同厂家的设备在光路上互通，满足多厂家环境的要求。
3. SDH 采用同步复用方式和灵活的复用映射结构。各种不同等级的码流在帧结构净负荷内的排列是有规律的，而净负荷与网络是同步的，因而只需利用软件即可使高速信号一次直接分出低速支路信号，也就是所谓的一步解复用特性。参照图 1.1 - 1，要从 155Mbit/s 码流中分出一个 2Mbit/s 的低速支路信号，采用了 SDH 的分插复用器 ADM 后，可以利用软件直接一次分出 2Mbit/s 的支路信号，避免了对全部高速信号进行逐级分解后再重新复用的过程，省去了全套背靠背的复用设备。所以 SDH 的上下业务十分容易，网络结构和设备都大大简化，而且数字交叉连接的实现也比较容易。
4. SDH 采用大量的软件进行网络配置和控制，使得配置更为灵活，调度也更为方便。
5. SDH 帧结构中安排了丰富的开销比特，这些开销比特大约占了整个信号的 5%，可利用软件对开销比特进行处理，因而使网络的运行、管理和维护能力都大大加强。

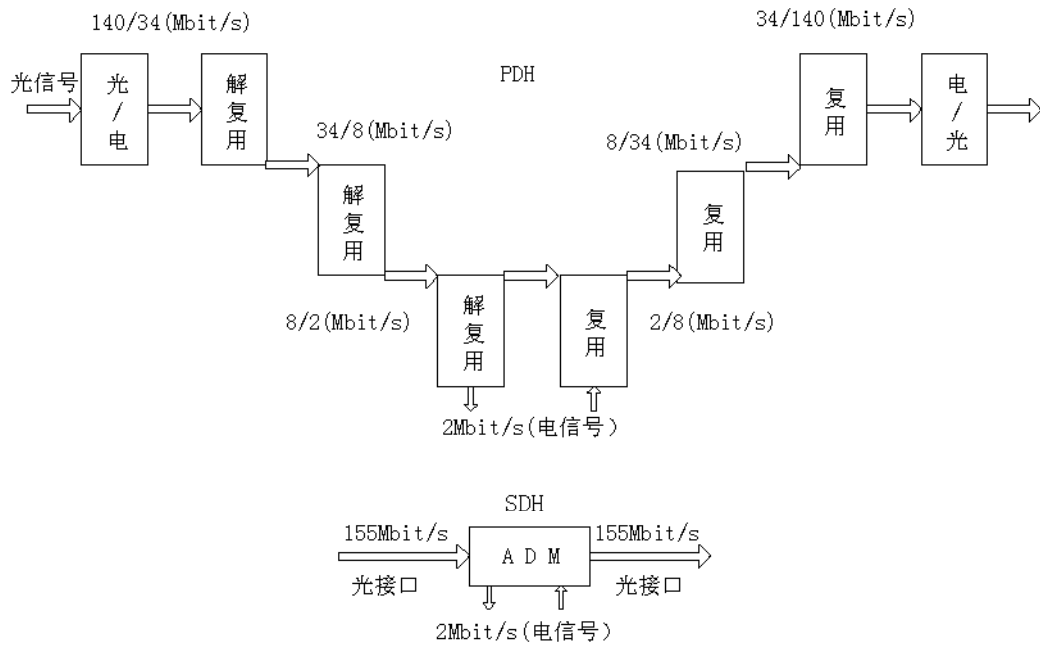


图 1.1 - 1 SDH 与 PDH 分插信号的比较示意图

6. ..SDH 网与现有网络能够完全兼容，即 SDH 兼容现有 PDH 的各种速率，使 SDH 可以支持已经建起来的 PDH 网络，同时也有利于 PDH 向 SDH 顺利过渡。同时，SDH 网还能容纳像 ATM 信元等各种新业务信号，也就是说，SDH 具有完全的后向兼容性和前向兼容性。

1.1.3 SDH 速率

SDH 信号的速率等级表示为 STM-N，其中 N 是正整数。目前 SDH 只能支持一定的 N 值，即 N 只能为 1，4，16 和 64，其中最基本、也是最重要的模块信号是 STM-1，其速率是 155.520Mbit/s，更高等级的 STM-N 信号是将基本模块信号 STM-1 经过字节间插后得出，STM-4 等级的速率为 622.080Mbit/s，STM-16 等级的速率为 2488.320Mbit/s，STM-64 等级的速率为 9953.280Mbit/s。

1.1.4 SDH 帧结构

SDH 帧结构如图 1.1 - 2 所示。

1. SDH 以字节为单位进行传输，它的帧结构是一种以字节结构为基础的矩形块状帧结构，它由 $270 \times N$ 列和 9 行 8bit 字节组成。

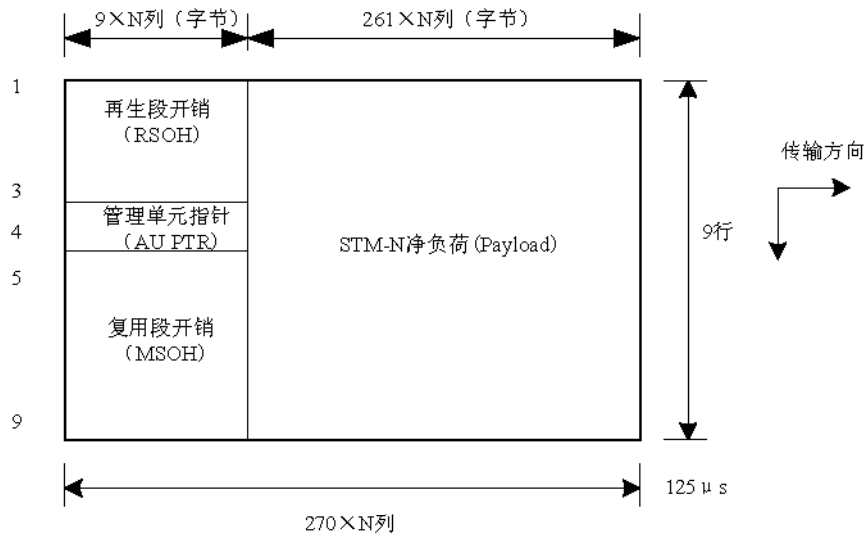


图 1.1 - 2 SDH 帧结构示意图

2. SDH 的矩形帧在光纤上传输时是逐行传输的，在光发送端经并/串转换后逐行进行传输，而在光接收端经串/并转换后还原成矩形块状进行处理。
3. 在 SDH 帧中，字节的传输是从左到右按行进行的，首先由图中左上角第一个字节开始，从左向右按顺序传送，传完一行再传下一行，直至整个 $9 \times 270 \times N$ 个字节都传送完再转入下一帧，如此一帧一帧地传送。每秒可传 8000 帧，帧长恒定为 $125\mu\text{s}$ 。
4. SDH 的帧频为 8000 帧/秒，这就是说信号帧中某一特定字节每秒被传送 8000 次，那么该字节的比特速率是 $8000/\text{s} \times 8\text{bit} = 64\text{kbit/s}$ ，也即是一路数字电话的传输速率。

以 STM-1 等级为例，其速率为 270 （每帧 270 列） $\times 9$ （共 9 行） $\times 64\text{kbit/s}$ （每个字节 64kbit） $= 155520\text{kbit/s} = 155.520\text{Mbit/s}$ 。

从图 1.1 - 2 中看出，STM-N 的帧结构由三部分组成：

1. 段开销（SOH）区域

段开销是指 STM-N 帧结构中为了保证信息净负荷正常灵活传送所必需的附加字节，用于网络的运行、管理和维护。

SDH 帧中的第 1 至第 $9 \times N$ 列中，第 1 至第 3 行和第 5 行至第 9 行分配给段开销。段开销还可以进一步划分为：

- (1) 再生段开销（RSOH）。第 1 行至第 3 行分给 RSOH，RSOH 既可在再生器接入，又可在终端设备接入。
- (2) 复用段开销（MSOH）。第 5 行至第 9 行分给 MSOH，MSOH 将透明地通过再生器，只能在终端设备处终结。

2. 信息净负荷 (Payload) 区域

信息净负荷区域是 SDH 帧结构中用于存放各种业务信息的地方。

横向第 $10 \times N$ 列至第 $270 \times N$ 列, 纵向第 1 至第 9 行都属于信息净负荷区域, 在这里面还含有通道开销字节 (POH), 也作为净负荷的一部分并与之一起在网络中传送, 用于通道性能的监视、管理和控制。

3. 管理单元指针 (AU PTR) 区域

AU PTR 是一种指示符, 用来指示信息净负荷的第一个字节在 STM-N 内的准确位置, 以便在接收端正确地进行信息分解。

它位于 STM-N 帧结构中 1 至第 $9 \times N$ 列中的第四行。采用指针方式是 SDH 的重要创新, 可使之在准同步环境中完成复用同步和 STM-N 信号的帧定位。

1.1.5 SDH 复用映射结构和复用映射过程

ITU-T 规定了一套完整的复用结构 (如图 1.1-3), 通过这些路线可将 PDH 的 3 个系列的数字信号以多种方法复用成 STM-N 信号。我国为了使每种净负荷只有一条复用映射途径, 规定了一个较为简单的复用映射结构 (如图 1.1-4), 它是标准复用映射结构的一个子集。

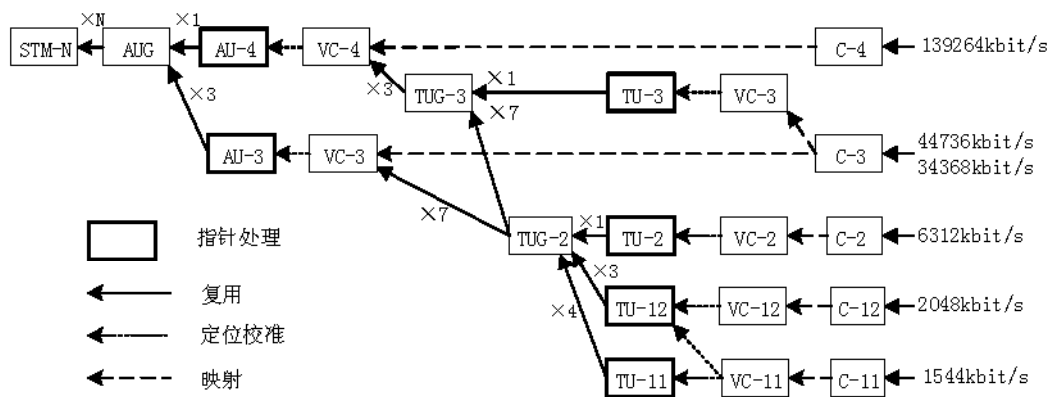


图 1.1-3 ITU-T 规定的 SDH 复用结构示意图

各种信号装入 SDH 帧结构的净负荷区都需经过映射、定位校准和复用三个步骤：

1. 映射相当于一个对信号打包的过程, 它使不同的支路信号和相应的 n 阶虚容器 (VC- n) 同步。

各种速率等级的数字流先进入相应的接口容器 C, 让那些最常使用的准同步数字体系信号能进入有限数目的标准容器, 完成像速率调整这样的适配功能。

这些容器 C 是一种用来装载各种速率业务信号的信息结构，完成适配功能（例如速率调整），目前有 5 种标准容器：C-11，C-12，C-2，C-3 和 C-4。

我国定义 C-12 对应速率是 2.048Mbit/s，C-3 对应速率是 34.368Mbit/s，C-4 对应速率是 139.264Mbit/s。由标准容器出来的数字流加上通道开销 POH 后就构成了虚容器（VC），这一过程就是映射。

例如对于各路来的 2M 信号，由于各路的时钟精度不同，所以有的可能是 2.0481Mbit/s，有的可能是 2.0482Mbit/s，都将在 C 里做容差调整，适配成速率一致的标准信号。

2. .. 定位校准即加入调整指针，用来校正支路信号频差和实现相位对准。

VC 是 SDH 中最重要的一种信息结构，支持通道层连接。VC 的包封速率是与网络同步的，因而不同 VC 的包封是互相同步的，而包封内部却允许装载各种不同容量的准同步支路信号。

除在 VC 的组合点和分解点（即 PDH 网和 SDH 网的边界处）外，VC 在 SDH 中传输时总是保持完整不变的，所以 VC 可作为一个独立的实体在通道中任一点取出或插入，可以进行同步复用和交叉连接处理，十分灵活和方便。VC 可分为低阶虚容器和高阶虚容器两类，这里，VC-12 和 VC-3 为低阶虚容器，VC-4 为高阶虚容器（AU-3 中的 VC-3 为高阶虚容器，若通过 TU-3 把 VC-3 复用进 VC-4，则 VC-3 属于低阶虚容器）。由 VC 出来的数字流再按规定的路线进入管理单元 AU 或支路单元 TU。在 SDH 帧中，VC-n 是一个独立的整体，传送过程中不能分割。因此 VC-n 到 TU-n 和 VC-n 到 AU-n 的转换是一个速率适配的过程，也就是复用结构中的定位校准过程。

3. 复用即字节间插复用，用于将多个低阶通道层信号适配进高阶通道或将多个高阶通道层信号适配进复用段层。

AU 是一种为高阶通道层和复用段层提供适配功能的信息结构，它由高阶 VC 和 AU PTR 组成。其中 AU PTR 用来指明高阶 VC 在 STM-N 帧内的位置，因而允许高阶 VC 在 STM-N 帧内的位置是浮动的，但 AU PTR 本身在 STM-N 帧内位置是固定的。一个或多个在 STM-N 帧内占有固定位置的 AU 组成管理单元组 AUG，它由 3 个 AU-3 或单个 AU-4 按字节间插方式组成。同样，TU 是一种为低阶通道层和高阶通道层提供适配功能的信息结构，它由低阶 VC 和 TU PTR 组成。TU PTR 用于指明低阶 VC 在帧结构中的位置。一个或多个在高阶 VC 净负荷中占有固定位置的 TU 组成支路单元组 TUG。最后，在 N 个 AUG 的基础上再附加上段开销 SOH 便形成了最终的 STM-N 帧结构。

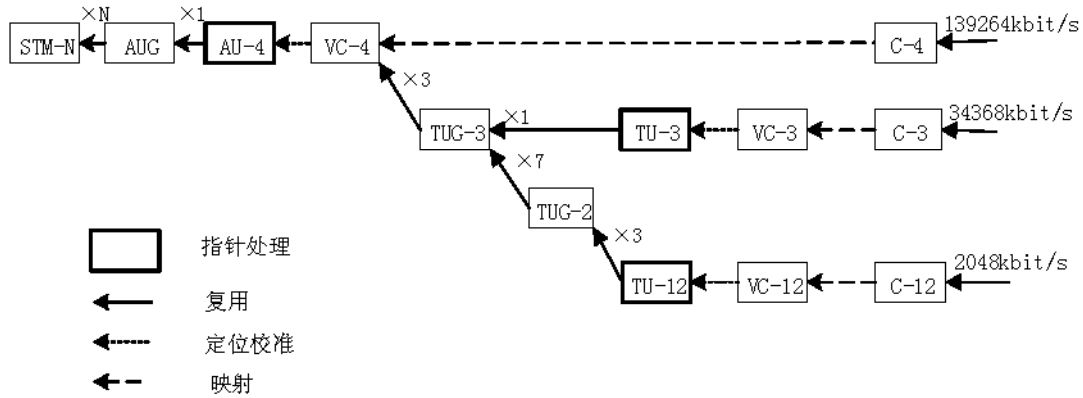


图 1.1 - 4 我国规定的 SDH 复用结构示意图

以 2M 支路信号的复用映射过程为例来说明。标称速率为 2.048Mbit/s 的信号先进入 C-12 进行适配处理，C-12 加上 POH 映射后构成 VC-12，经过定位校准，TU-12 中 PTR 就指明 VC-12 相对 TU-12 的相位，3 个 TU-12 经过均匀的字节间插后复用成 TUG-2，7 个 TUG-2 同样经字节间插后复用成 TUG-3，3 个 TUG-3 再经字节间插并加上高阶 POH 后构成 VC-4 净负荷，定位校准后加上 PTR 组成 AU-4，单个 AU-4 直接置入 AUG，最后 N 个 AUG 通过字节间插，附上 SOH 就得到 STM-N 信号。

1.2 SDH 开销功能

1.2.1 开销类型

SDH 帧结构中安排有两种不同的开销，即段开销 SOH 和通道开销 POH，分别用于段层和通道层的维护，即 SDH 系统的开销是分层使用的。

1. SOH

SOH 包含有定帧信息、用于维护和性能监视的信息以及其它操作功能。SOH 可以进一步划分为再生段开销 (RSOH) 和复用段开销 (MSOH)。其中 RSOH 既可以在再生器接入，又可以在终端设备接入；MSOH 透明通过再生器，只能终结在 AUG 的组合和分解点，即终端设备处。在 SOH 中，第 1 至第 3 行分配给 RSOH，而第 5 至第 9 行分配给 MSOH。

2. POH

POH 可以分为两类：低阶 VC POH 和高阶 VC POH。

(1) 低阶 VC POH：将低阶 VC POH 附加给 C-1/C-2 即可形成 VC-1/VC-2。其功能有 VC 通道功能监视、传送维护信号以及告警状态指示。

(2) 高阶 VC POH：将 VC-3 POH 附加给 C-3 或者多个 TUG-2 的合体便形成了 VC-3，而将 VC-4 POH 附加给 C-4 或者多个 TUG-3 的合体便形

成了 VC-4。高阶 VCPOH 的功能是 VC 通道功能监视、传送维护信号、告警状态指示以及复用结构指示。

1.2.2 段开销安排

SDH 帧结构中的段开销包括帧定位字节 (A1, A2)、再生段踪迹字节 (J0)、数据通信通路 (D1~D12)、公务字节 (E1, E2)、使用者通路 (F1)、比特间插奇偶校验 8 位码 (B1)、比特间插奇偶校验 $N \times 24$ 位码 (B2)、自动保护倒换通路 (K1, K2) 字节。以下将分别介绍段开销字节的位置和功能。

1. 段开销字节的位置

各种不同 SOH 字节在 STM-1 帧中的安排, 如图 1.2 - 1 所示。



图 1.2 - 1 STM-1 字节安排示意图

在 SDH 中, STM-N 帧的 SOH 字节也是由 N 个 STM-1 帧的 SOH 交错间插排列构成, 但构成时仅完整保留第一个 STM-1 的段开销, 其余 N-1 个 STM-1 帧的段开销仅保留帧定位字节 A1, A2 和 B2 字节, 其它字节均略去。

一个段开销字节在 STM-N 帧中的位置, 可以用坐标矢量 $S(a,b,c)$ 来表示, 其中 a 表示行数, 取值为 1 到 3, 或 5 到 9; b 表示复列数, 取值为 1 到 9; c 表示复列数内的间插层数, 取值可为 1 到 64。该字节在 STM-N 帧中的实际行数、列数与 a, b, c 间的关系如下:

$$\text{行数} = a$$

$$\text{列数} = N(b-1) + c$$

2. 段开销功能

(1) 帧定位字节：A1 和 A2

SOH 中的 A1 和 A2 字节可用来识别帧的起始位置。A1 和 A2 具有固定的二进制数值，即 A1 为 11110110，A2 为 00101000。当连续 5 帧以上收不到正确的 A1，A2 字节，即连续 5 帧以上无法区分出不同的帧，那么接收端进入帧失步状态，产生帧失步告警（OOF）。

若 OOF 持续了 3ms 则进入帧丢失状态，设备产生帧丢失告警（LOF），插入告警指示信号（AIS），整个业务中断；在 LOF 状态下若收端又连续 1ms 以上处于定帧状态，那么设备恢复到正常状态。

(2) 再生段踪迹字节：J0

该字节用来重复发送段接入点标识符，使段接收端能据此确认其与指定的发送端处于持续连接状态。在同一个运营者的网络内该字节可为任意字符，而在两个不同运营者的网络边界处要使设备收、发两端的 J0 字节相互匹配，通过 J0 字节可使运营者提前发现和解决故障，缩短网络恢复时间。

J0 字节还有一个用法，在 STM-N 帧中每一个 STM-1 帧的 J0 字节定义为 STM 的标识符 C1，用来指示每个 STM-1 在 STM-N 中的位置，即指示该 STM-1 是 STM-N 中的第几个 STM-1（间插层数）和该 C1 在该 STM-1 帧中的第几列（复列数）。

(3) 数据通信通路（DCC）：D1~D12

SOH 中的 DCC 用来构成 SDH 管理网（SMN）的传送链路。

在传统的准同步系统中尽管也有控制通路，但都是专用的，外界无法接入，而 DCC 则是通用的，嵌入在段开销中，所有网络单元都具备，便于构成统一的管理网，也避免了为每个设备都配备专用的数据通讯链路。

其中 D1~D3 字节称为再生段 DCC，用于再生段终端之间的 OAM（操作、维护、管理）信息的传送，速率为 192kbit/s（3×64kbit/s）；D4~D12 字节称为复用段 DCC，用于复用段终端之间的 OAM 信息的传送，速率为 576kbit/s（9×64kbit/s）。上述总共 768kbit/s 数据通路为 SDH 网的管理和控制提供了强大的通讯基础结构。

例如，SDH 网络管理控制的一个重要目标是实现快速的分布式控制，有了 DCC 通路后，网络管理系统所算得的最佳路由表可以随时经 DCC 通路迅速传给网络单元。

(4) 公务字节：E1 和 E2

这两个字节用来提供公务联络语音通路。E1 属于 RSOH，用于本地公务通路，可以在再生器接入；E2 属于 MSOH，用于直达公务通路，可以在复用段终端接入。公务通路的速率为 64kbit/s。

(5) 使用者通路：F1

该字节保留为使用者（通常指网络提供者）专用，为特定维护目的而提供临时的数据/语音通道连接。

(6) 比特间插奇偶校验 8 位码（BIP-8 码）：B1

B1 字节（8 个比特）用作再生段误码监视，是使用偶校验的比特间插奇偶校验码。BIP-8 码对扰码后的前一个 STM-N 帧的所有比特进行计算，结果置于扰码前的 B1 字节位置。这种误码监视方式是 SDH 的特点之一，它以比较简单的方式实现对再生段的误码自动监视，但是，对于在同一监视码组内恰好发生偶数个误码的情况，这种方法无法检出，但这种情况出现的概率很小，因而总的误码检出概率还是很高的。

(7) 比特间插奇偶校验 $N \times 24$ 位码（BIP- $N \times 24$ 位码）：B2

B2 字节用于复用段误码监视，段开销中安排有 3 个 B2 字节（共 24 比特）作此用途。B2 字节是使用偶校验的比特间插奇偶校验 $N \times 24$ 位码，其产生方式与 BIP-8 类似。

BIP- $N \times 24$ 码对前一个 STM-N 帧（除 SOH 中的第 1 到第 3 行以外）的所有字节进行计算，结果置于扰码前的 B2 字节位置，STM-N 帧中有 $N \times 3$ 个 B2 字节，每 3 个 B2 对应于一个 STM-1 帧的奇偶校验码。

SDH 除在再生段和复用段中安排 B1 字节和 B2 字节用于误码监视外，还在 VC-3/VC-4 高阶通道层 POH 中安排了 1 个 B3 字节做误码监视，在 VC-1/VC-2 低阶通道层 POH 中安排了第 1 和第 2 比特做误码监视。可以看出 SDH 在误码性能监视上是十分周到的，每一层网络都有性能监视，共分 4 个不同层次，可以对小至一个再生段，大至任意一个 VC-1/VC-2 通道进行误码监视。

(8) 自动保护倒换（APS）通路：K1 和 K2（b1~b5）

这两个字节用作复用段保护的 APS 信令，由于 K1，K2（b1~b5）是专门用于保护目的的嵌入信令通路，因此可以实现很快的保护响应速度。K1 和 K2（b1~b5）提供的是网络保护方式，当某工作通路出故障后，下游端会很快检测到故障，并利用上行方向的保护光纤送出 K1 字节，K1 字节包含有故障通路编号。上游端收到 K1 字节后，将本端下行工作通路的光纤桥接到下行保护光纤，同时利用下行方向的保护光纤送出保护字节 K1，K2（b1~b5），其中 K1 字节作为倒换要求，K2（b1~b5）字节作为证实。下游端收到 K2（b1~b5）字节后对通道编号进行确认，并最后完成下行方向工作通路和下行方向保护光纤在本端的桥接，同时按照 K1 字节要求完成上行方向工作通路和上行方向保护光纤在本端

的桥接。为了完成双向倒换的要求，下游端经上行方向保护光纤送出 K2 (b1~b5) 字节。上游端收到 K2 (b1~b5) 字节后将执行上行方向工作通路和上行方向保护光纤在本端的桥接，从而将两根工作通路光纤几乎同时倒换至两根保护光纤，从而完成了自动保护倒换。

(9) 同步状态：S1 (b5~b8)

STM-N 帧结构中，属于第 1 个 STM-1 帧的第 1 个 S1 字节 (9, 1, 1) 的第 5 至第 8 比特表示同步状态消息，这四个比特可以有 16 种不同编码，因而可以表示 16 种不同的同步质量等级，S1 (b5~b8) 的值越小，表示相应的时钟质量级别越低。设备据此判定接收的时钟信号质量，并决定是否进行时钟源切换，即切换到较高质量的时钟源上。

(10) 复用段远端误码块指示 (MS-REI) 字节：M1

M1 字节是个对告信息，由接收端回传给发送端，M1 字节内容为接收端由 BIP-N×24 (B2) 码所检出的误块数，以便发送端据此了解接收端的收信误码情况。

(11) 与传输媒质有关的特殊字节

这些字节用于与传输媒质相关的特殊应用，例如微波 SDH 中保护倒换的早期告警、自动发送功率控制、快速无损伤倒换控制以及传播监视。

1.2.3 高阶通道开销安排

高阶通道开销包括 VC-3/VC-4 POH 通道踪迹字节 (J1)、通道 BIP-8 码 (B3)、信号标志字节 (C2)、通道状态字节 (G1) 字节，以下将分别介绍高阶通道开销字节的位置和功能。

1. 高阶通道开销字节的位置

VC-3 结构由 9 行 85 列组成，其中第 1 列的 9 个字节作为 VC-3 POH；VC-4 结构由 9 行 261 列组成，其中第 1 列的 9 个字节作为 VC-4 POH。VC-3/VC-4 POH 包含的 9 个字节分别用 J1, B3, C2, G1, F2, H4, F3, K3 和 N1 表示。

2. 高阶通道开销功能

(1) VC-3/VC-4 POH 通道踪迹字节：J1

该字节被用来重复地发送高阶通道接入点标识符 (HO APId)，以便使通道接收终端能据此确认其与指定的发送端处于持续连接状态，用于追踪通道连接状态。利用 J1 字节运营者可以提前发现和解决故障，防止传送的业务受到影响，缩短网络恢复时间。

(2) 通道 BIP-8 码：B3

B3 字节（8 个比特）用作通道误码监视，是使用偶校验的比特间插奇偶校验码。BIP-8 码对前一个 VC-3/VC-4 的所有比特进行计算，结果置于当前 VC-3/VC-4 的 B3 字节位置。

(3) 信号标志字节：C2

C2 字节表示 VC-3/VC-4 的组成或维护状态，该字节对应的 16 进制码字及其含义见表 1.2 - 1 所示。

表 1.2 - 1 C2 字节编码规定列表

C2 的 8 比特编码	16 进制码字	含义
00000000	00	未装载信号或监控的未装载信号
00000001	01	装载非特定净负荷
00000010	02	TUG 结构
00000011	03	锁定的 TU
00000100	04	34.368Mbit/s 和 44.736Mbit/s 信号异步映射进 C-3
00010010	12	139.264Mbit/s 信号异步映射进 C-4
00010011	13	ATM 映射
00010100	14	MAN (DQDB) 映射
00010101	15	FDDI
11111110	FE	0.181 测试信号映射
11111111	FF	VC-AIS (仅用于串接)

(4) 通道状态字节：G1

G1 字节用于向 VC-3/VC-4 路径源端回送在路径宿端检出的通道终结状态和性能情况，从而允许在路径的任一端或路径中的任意点监视全双工路径的状态和性能。

(5) 通道使用者通路字节：F2, F3

这两个字节供通道单元间进行通信联络，与净负荷有关。

(6) 位置指示字节：H4

该字节为净负荷提供一般位置指示，也可以指示特殊的净负荷位置，如作为 VC-1/VC-2 的复帧位置指示。

(7) 自动保护倒换 (APS) 通路：K3 (b1~b4)

用作高阶通道级保护的 APS 指令。

(8) 网络操作者字节：N1

该字节提供高阶通道的串接监视 (TCM) 功能。

(9) 备用比特：K3 (b5~b8)

这几个比特留作将来使用，接收机应忽略其值。

1.2.4 低阶通道开销安排

低阶通道开销是指 VC-1/VC-2 的通道开销字节 (V5, J2, N2, K4), 以下将分别介绍低阶通道开销字节的位置和功能。

1. 低阶通道开销字节的位置

VC-1/VC-2 POH 由 V5, J2, N2, K4 字节组成, 它们分别位于 4 个连续的 VC-1/VC-2 帧的第 1 个字节, 即 VC-1/VC-2 POH 每 4 帧 (500 μ s) 完整传送一次。

2. 低阶通道开销功能

(1) V5 字节

V5 字节可提供关于 VC-1/VC-2 通道的误码检查、信号标志和通道状态的功能。V5 字节的第 1 和 2 比特完成通道的误码性能监视, 第 3 比特用于通道远端差错指示 (REI), 第 4 比特用于通道远端失效指示 (RFI), 第 5, 6, 7 比特提供 VC-1/VC-2 信号标志功能, 第 8 比特用于 VC-1/VC-2 通道远端缺陷指示 (RDI)。

(2) 通道踪迹字节: J2

该字节用来重复地发送低阶通道接入点标识符 (LO APId), 以便使通道接收终端能据此确认其与指定的发送端处于持续连接状态。

(3) 网络操作者字节: N2

该字节提供低阶通道的串接监视 (TCM) 功能。

(4) 自动保护倒换 (APS) 通路: K4 (b1~b4)

这 4 个比特用来提供低阶通道保护的 APS 指令。

(5) 保留比特: K4 (b5~b7)

这 3 个比特是保留的任选比特, 由产生 K4 字节的路径源端自行决定是否使用。

(6) 备用比特: K4 (b8)

该比特留作将来使用, 接收机应忽略其值。

1.3 SDH 设备的逻辑组成

SDH 传输网是由不同类型的网元通过光缆线路连接组成的, 通过不同的网元完成 SDH 网的传送功能, 这些功能包括: 上下业务、交叉连接业务、网络故障自愈。SDH

网中常见网元有终端复用器 TM、分插复用器 ADM、再生中继器 REG、数字交叉连接设备 DXC。

1.3.1 终端复用器 (TM)

终端复用器用于网络的终端节点上，如图 1.3 - 1 所示。

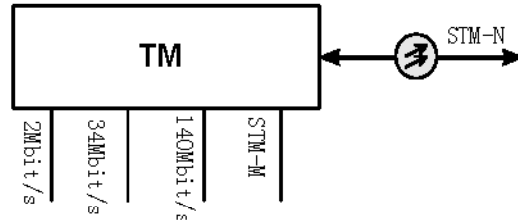


图 1.3 - 1 终端复用器模型图

它的作用是将支路端口的低速信号复用到线路端口的高速信号 STM-N 中，或从 STM-N 的信号中分出低速支路信号。它的线路端口输入/输出一路 STM-N 信号，而支路端口可以输入/输出多路低速支路信号。在将低速支路信号复用进线路信号的 STM-N 帧时，支路信号在线路信号 STM-N 中的位置可任意指定。

1.3.2 分插复用器 (ADM)

分插复用器用于 SDH 传输网络的转接点处，例如链的中间节点或环上节点，是 SDH 网上使用最多、最重要的一种网元，如图 1.3 - 2 所示。

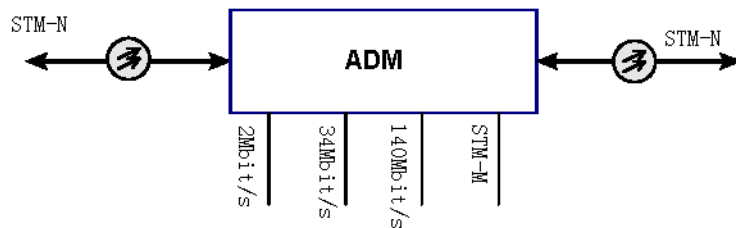


图 1.3 - 2 分插复用器模型图

ADM 有两个线路端口和一个支路端口。两个线路端口各接一侧的光缆（每侧收/发共两根光纤），为了描述方便我们将其分为西向（W）、东向（E）两个线路端口。ADM 的作用是将低速支路信号交叉复用到线路上去，或从线路端口收到的线路信号中拆分出低速支路信号。另外，还可将东/西向线路侧的 STM-N 信号进行交叉连接。ADM 是 SDH 最重要的一种网元，通过它可等效成其它网元，即能完成其它网元的功能，例如：ADM 可等效成两个 TM。

1.3.3 再生中继器 (REG)

光传输网的再生中继器有两种，一种是纯光学的再生中继器，用于光功率放大以延长光传输距离；另一种是用于脉冲再生整形的电再生中继器，通过光/电变换(O/E)、电信号抽样、判决、再生整形、电/光变换(E/O)等处理，以达到不积累线路噪声、保证传送信号波形完好的目的。此处指的是后一种再生中继器，REG只有两个线路端口，如图1.3-3所示。



图 1.3 - 3 再生中继器模型图

REG的作用是将接收的光信号经O/E、抽样、判决、再生整形、E/O后在对侧发出。

真正的REG只处理STM-N帧中的RSOH，并且不具备交叉连接功能。而ADM和TM因为要完成将低速支路信号复用到STM-N帧中，所以不仅要处理RSOH，而且还要处理MSOH，另外ADM和TM都具有交叉连接功能。

1.3.4 数字交叉连接设备 (DXC)

数字交叉连接设备完成STM-N信号的交叉连接，它实际上相当于一个交叉矩阵，完成各个信号间的交叉连接，如图1.3-4所示。

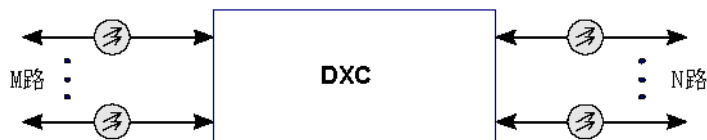


图 1.3 - 4 数字交叉连接设备模型图

DXC可将输入的M路STM-N信号交叉连接到输出的N路STM-N信号上，DXC的核心是交叉矩阵，功能强大的DXC能够实现高速信号在交叉矩阵内的低级别交叉。

通常用DXC_{m/n}来表示一个DXC的类型和性能($m \geq n$)，m表示可接入DXC的最高速率等级，n表示在交叉矩阵中能够进行交叉连接的最低速率级别。m越大表示DXC的承载容量越大；n越小表示DXC的交叉灵活性越大。数字0表示64kbit/s电路速率，数字1, 2, 3, 4分别表示PDH体制中的1至4次群速率，其中4也代表SDH体制中的STM-1等级，数字5和6分别代表SDH体制中的STM-4和STM-16等级。例如DXC_{1/0}表示接入端口的最高速率为PDH一次群信号，而交叉连接的最低速率为

64kbit/s; DXC4/1 表示接入端口的最高速率为 STM-1, 而交叉连接的最低速率为 PDH 一次群信号。

1.4 SDH 传送网的物理拓扑

网络的物理拓扑泛指网络的形状, 即网络节点和传输线路的几何排列, 它反映了网络节点在物理上的连接性。网络的效能、可靠性、经济性在很大程度上都与具体的网络结构有关。网络的基本物理拓扑结构有 5 种, 用于 SDH 网络时, 如图 1.4 - 1 所示。

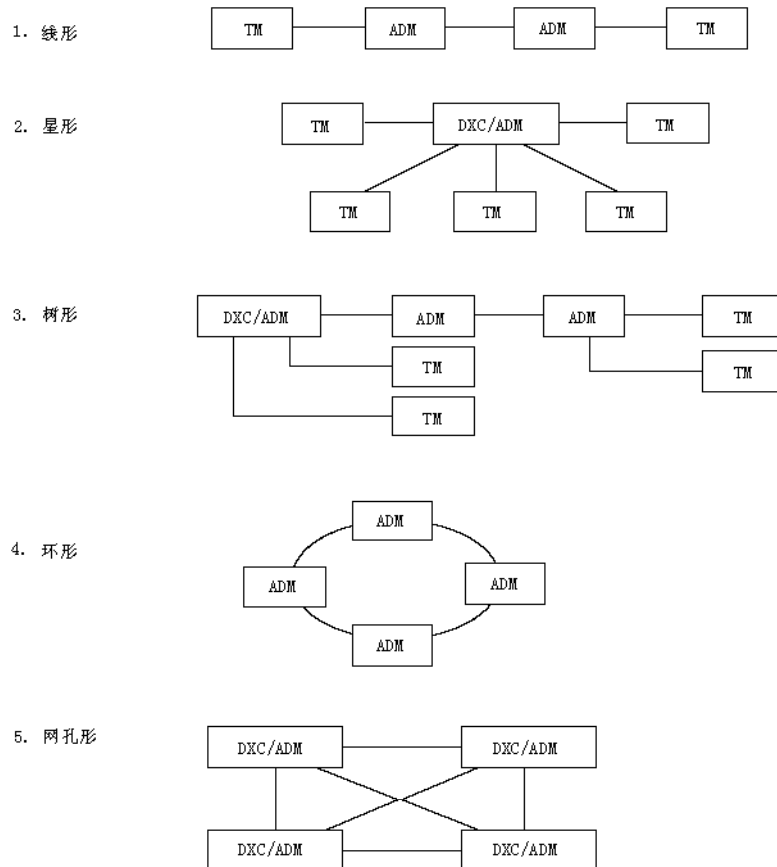


图 1.4 - 1 SDH 网的物理拓扑图

1. 线形

将通信网中的所有节点串联起来, 并使首尾两个节点开放时就形成了线形拓扑。在这种拓扑结构中, 为了使两个非相邻节点之间完成连接, 其间的所有节点都应完成连接。线形拓扑是 SDH 早期应用的比较经济的网络拓扑形式。这种结构无法应付节点和链路失效问题, 生存性较差。

2. 星形 (枢纽形)

将通信网中的一个特殊的枢纽节点与其余所有节点相连，而其余所有节点之间互相不能直接相连时，就形成了星形拓扑，又称枢纽形拓扑。在这种拓扑结构中，除枢纽节点之外的任意两节点间的连接都是通过枢纽节点进行的，枢纽节点为经过的信息流进行路由选择并完成连接功能。这种网络拓扑可以将枢纽站节点的多个光纤终端连接成一个统一的网络，进而实现综合的带宽管理。这种结构对枢纽节点依赖性过大，存在枢纽点的潜在瓶颈问题和失效问题。

3. 树形

将点到点拓扑单元的末端节点连接到几个特殊节点时就形成了树形拓扑。树形拓扑可以看成是线形拓扑和星形拓扑的结合。这种拓扑结构适合于广播式业务，但存在瓶颈问题和光功率预算限制问题，不适用于提供双向通信业务。

4. 环形

将通信网中的所有节点串联起来，而且首尾相连，没有任何节点开放时，就形成了环形网。线形网的首尾两个开放节点相连时就变成了环形网。在环形网中，为了完成两个非相邻节点之间的连接，这两个节点之间的所有节点都应完成连接功能。这种网络拓扑的最大优点是具有很高的生存性，这对现代大容量光纤网络是至关重要的，因而环形网在 SDH 网中特别受到重视。

5. 网孔形

将通信网的许多节点直接互连时就形成了网孔形拓扑，如果所有的节点都直接互连时则称为理想网孔形拓扑。在非理想网孔形拓扑中，没有直接相连的两个节点之间需要经由其它节点的连接功能才能实现连接。网孔形结构不受节点瓶颈问题和失效的影响，两节点间有多种路由可选，可靠性很高，但结构复杂、成本较高，适用于业务量很大且分布又比较均匀的干线网。

综上所述，所有这些拓扑结构都各有特点，在网中都有可能获得不同程度的应用。网络拓扑的选择应考虑众多因素，如网络应有高生存性、网络配置应当容易、网络结构应当适于新业务的引进。

实际网络中，不同的网络部分采用的拓扑结构也可以不同，例如本地网（即接入网或用户网）中，一般采用环形和星形拓扑结构，有时也采用线形拓扑；在市内局间中继网中，一般采用环形和线形拓扑；长途网则采用网孔形拓扑。

1.5 SDH 自愈网

1.5.1 网络生存性

随着现代社会对通信的依赖性越来越大，通信网络的生存性已成为至关重要的设计指标。

所谓自愈网就是无需人为干预，网络就能在极短的时间内从失效故障中自动恢复所携带的业务，使用户感觉不到网络已出了故障。其基本原理是使网络具备发现故障和重新建立通信的能力。自愈网只涉及重新确立通信，而不管具体失效元部件的修复和更换，后者仍需人工干预才能完成。

1.5.2 自愈网的类型和原理

按照自愈网的定义可以有多种手段来实现自愈网。各种自愈网都需要考虑下面一些共同的因素：初始成本、要求恢复的业务量比例、用于恢复任务所需的额外容量、业务恢复速度、升级或增加节点的灵活性、易于操作运行和维护。自愈网的实现可以分为线路保护倒换和自愈环网两种基本形式，在自愈环网中又可划分为多种类型。下面分别介绍各种自愈网的保护方式和实现方法。

1. 线路保护倒换

最简单的自愈网形式就是传统 PDH 系统常采用的线路保护倒换方式，它同样可应用于 SDH 系统。其工作原理是当工作光纤的业务传输中断或性能劣化到一定程度后，系统倒换设备将主信号自动转至备用光纤传输系统，从而使接收端仍然接收到正常的信号而感觉不到网络已出了故障。这种保护方式的业务恢复时间很快，可短于 50ms，它对于网络节点的光或电元部件失效故障十分有效。但是，当光缆被切断时，往往是同一缆芯内的所有光纤（包括主用和备用）一齐被切断时，上述保护方式就无能为力了。

进一步的改进是采用地理上的路由备用，即主用、备用光纤通过不同的地理路由铺设。这样，当主用通道的光缆被切断时，备用通道的光缆不受影响，仍能将信号安全地传输到对端。这种路由备用方法配置容易、网络管理简单，且保持了快速恢复业务的能力。但该方案需要至少双份的光纤光缆和线路设备，而且备用路由往往较长，因而成本较高。此外，该保护方法只能保护传输链路，无法提供网络节点的失效保护，因此适用于点到点应用的保护。对于两点间有稳定的较大业务量的场合，路由备用线路保护方法仍不失为一种较好的保护手段。

2. 自愈环网

将网络节点连成一个环形可以进一步改善网络的生存性和成本，一个环形自愈网也称为自愈环网。

自愈环网的网络节点可以是 DXC，也可以是 ADM，通常都采用 ADM，利用 ADM 的智能分插能力构成的自愈网是 SDH 的特色之一，也是目前研究工作十分活跃的领域。

自愈环网分为通道保护倒换环和复用段保护倒换环两大类。

从功能结构观点来划分，通道倒换环和复用段倒换环分别属于子网连接保护和路径保护。

对于通道保护倒换环，业务信息的保护是以每个通道为基础的，根据环内每个通道信号质量的优劣决定是否进行倒换。

对于复用段保护倒换环，业务量的保护是以复用段为基础的，根据每一对节点间的复用段信号质量的优劣决定是否进行倒换，当复用段出现故障时，整个节点间的所有复用段业务信号都倒换到保护回路。

通道保护倒换环与复用段保护倒换环的一个重要区别是前者往往使用专用保护，即正常情况下保护段也在传送业务信号，而后者往往使用共享保护，即保护段在正常情况下是空闲的，保护时隙由每对节点共享。

按照环中节点间信息的传送方向来区分，自愈环又可分为单向环和双向环。正常情况下，单向环中所有业务信号的收、发均按同一方向（顺时针或逆时针）在环中传输，双向环中业务信号的收、发按相反方向在环中传输。

按照业务通路和保护通路的利用情况，自愈网中存在 1:1, 1+1 等保护形式。1:1 保护形式是指正常情况下业务信号只在工作通路上传输，在保护通路上可以传输额外的业务信号，当工作通路发生故障时，节点将保护通路上的额外业务舍弃，切换为传输业务信号，实现业务信号的保护。

1+1 保护形式是指业务信号同时跨接在工作通路和保护通路，接收业务的节点从工作通路和保护通路中择优接收业务信号，即当工作通路发生故障时，节点自动切换到保护通路接收业务信号。

按照环中每一对节点间所用光纤的最小数量来区分，自愈环可以划分为二纤环和四纤环。

按照上述各种不同的分类方法可以得出多种不同的自愈环结构。通常情况下，通道保护倒换环工作在单向二纤方式，复用段保护倒换环既可以采用单向方式，又可以采用双向方式，既可以是二纤方式，又可以是四纤方式。下面以 4 个节点的环为例，分别介绍 4 种典型、实用的自愈环结构。

(1) 二纤单向通道保护倒换环

二纤单向通道保护倒换环的保护方式为通道 1+1 保护，也是基于“并发优收”的原则，以 PATH-AIS 为倒换的判据，不需要 APS 协议。它有两根光纤，一根是用于传送业务信号的 S 光纤，另一根是用于保护的 P 光纤。它采用“首端桥接，末端倒换”的结构，即在 A 和 C 节点中，进入环的信号同时接入 S 光纤和 P 光纤，而分路节点的信号是靠倒换来获得的。

二纤单向通道保护倒换环如图 1.7-1 所示。

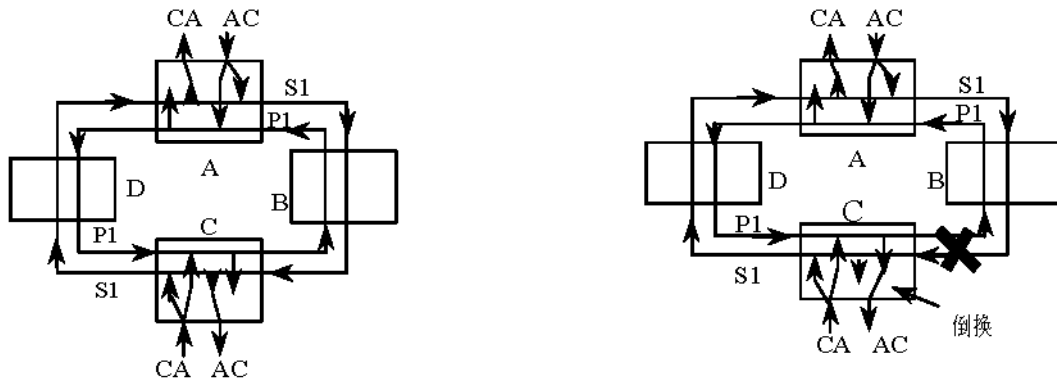


图 1.5 - 1 二纤单向通道保护倒换环示意图

在图 1.5 - 1 中，在节点 A，进入环的以节点 C 为目的地的支路信号 AC 同时馈入发送方向光纤 S1 和 P1，其中 S1 光纤按顺时针方向将业务信号送至分路节点 C，而 P1 光纤则按逆时针方向将同样的支路信号送至分路节点 C。接收端分路节点 C 同时接收到两个方向来的支路信号，按照分路通道信号的优劣决定选哪一路信号为分路信号。

正常情况下，以 S1 光纤送来的信号为主信号。当 B 和 C 节点间的光缆被切断时，在节点 C，由于从 A 经 S1 来的 AC 信号丢失，按并发优收原则，倒换开关将由 S1 转向 P1，接收由 A 节点经 P1 而来的 AC 信号作为分路信号，从而使 AC 间的业务信号得以维持，不会丢失。故障排除后，开关返回原来位置。

(2) 二纤单向复用段保护倒换环

二纤单向复用段保护倒换环如图 1.5 - 2 所示。在二纤单向复用段倒换环中，节点在支路信号分插功能前的每一高速线路上都有一保护倒换开关，正常情况下，低速支路信号仅仅从 S1 进行分插，P1 是空闲的，由 A 到 C 以及由 C 返回 A 的信号都是沿 S1 顺时针方向传送的，所以它是一个单向环。

在图 1.5 - 2 中，当 B 和 C 节点间的光缆被切断，B 和 C 节点中的保护倒换开关将利用 APS 协议执行环回功能，在 B 节点，S1 上的 AC 信号经倒换开关从 P1 返回，沿逆时针方向经过 A 和 D 节点到达 C 节点，并经过 C 节点的倒换开关环回到 S1 并落地分路。这种环回倒换功能能保证在故障状况下仍维持环的连续性，使低速支路上的业务信号不会中断，故障排除后，倒换开关返回原来位置。

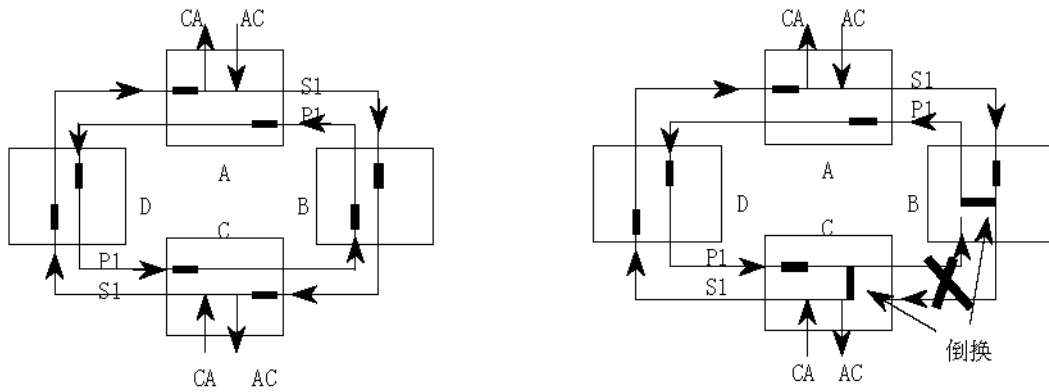


图 1.5 - 2 二纤单向复用段保护倒换环示意图

(3) 四纤双向复用段倒换环

四纤双向复用段倒换环有两根分别对应收发方向的业务光纤 S1 和 S2，以及两根分别对应收发方向的保护光纤 P1 和 P2。

四纤双向复用段倒换环如图 1.5 - 3 所示。

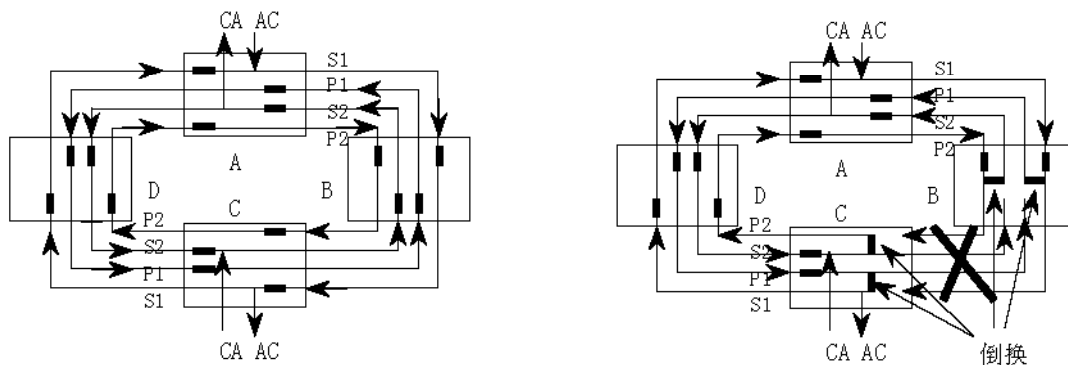


图 1.5 - 3 四纤双向复用段倒换环示意图

如图 1.5 - 3 所示，正常情况下，从 A 节点进入环，以 C 节点为目的地的低速支路信号沿 S1 顺时针传输，而由 C 节点返回 A 节点的低速支路信号则沿 S2 逆时针传输，所以它是一个双向环；而保护光纤 P1 和 P2 是空闲的。当 B 和 C 节点间的光缆被切断时，利用 APS 协议，B 和 C 节点中各有两个倒换开关执行环回功能，从而得以维持环的连续性。光纤 S1 和 P1 沟通，S2 和 P2 沟通，沿 S1 的 AC 信号在 B 节点经倒换开关从 P1 返回，沿逆时针方向经过 A 和 D 节点到达 C 节点，并经倒换开关回到 S1 光纤落地分路，CA 信号也类似。其原理和前述二纤单向复用段倒换环类似，故障排除后，倒换开关返回原来位置。

(4) 二纤双向复用段倒换环

从图 1.5 - 3 中可以看出，S1 上的业务信号与 P2 上的保护信号的传输方向完全相同，都是顺时针。利用时隙交换技术，可使光纤 S1 和 P2 上的信号都置于一根光纤上，

这根光纤就称为 S1/P2 光纤，这时，这根光纤上的一半时隙如奇时隙用于传业务信号，而另一半时隙如偶时隙留给保护信号，同样也有 S2/P1 光纤。S1/P2 上的保护信号时隙可保护 S2/P1 上的业务信号，而 S2/P1 上的保护信号时隙可保护 S1/P2 上的业务信号。于是，四纤环就可以简化为二纤环。对于二纤双向复用段倒换环我们一般采用奇偶时隙保护，也有其他的保护形式，如前半时隙传业务信号，后半时隙传保护信号。二纤双向复用段倒换环如图 1.5 - 4 所示。

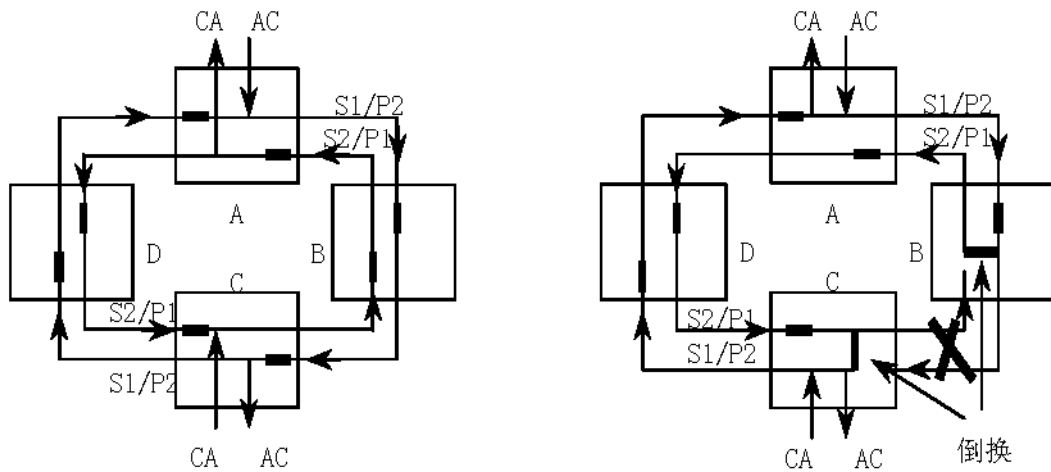


图 1.5 - 4 二纤双向复用段倒换环示意图

当 B 和 C 节点间光缆被切断，B 和 C 节点内的倒换开关将根据 APS 协议，将 S1/P2 与 S2/P1 沟通，利用时隙交换技术，可将 S1/P2 和 S2/P1 上的业务信号时隙移到另一根光纤上的保护信号时隙，从而完成保护倒换作用，保护倒换时间小于 30ms。例如，S1/P2 的业务信号奇时隙可转移到 S2/P1 上的保护信号偶时隙，即把所有的业务信号置于一根光纤上传输，并且在 A, B, C, D 这四个站点都要进行这种时隙交换。当故障排除后，倒换开关返回原来位置。