

高等职业教育轨道交通控制类规划教材

光 纤 通 信

主 编 孙 颖

副主编 李开丽 冀勇刚 李世鹏

主 审 朱凤文 赵 锐

西南交通大学出版社

·成都·

.....
图书在版编目 (C I P) 数据

光纤通信 / 孙颖主编. — 成都 : 西南交通大学出版社, 2014.8
高等职业教育轨道交通控制类规划教材
ISBN 978-7-5643-3325-6

I. ①光... II. ①孙... III. ①光纤通信 - 高等职业教育 - 教材 IV. ①TN929.11

.....
中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 196522 号
.....

高等职业教育轨道交通控制类规划教材

光纤通信

主编 孙 颖

责任编辑	李芳芳
特邀编辑	李庞峰 秦志慧
封面设计	原谋书装
出版发行	西南交通大学出版社 (四川省成都市金牛区交大路 146 号)
发行部电话	028-87600564 028-87600533
邮政编码	610031
网 址	http://www.xnjdcbs.com
印 刷	四川川印印刷有限公司
成品尺寸	185 mm×260 mm
印 张	16
字 数	398 千字
版 次	2014 年 8 月第 1 版
印 次	2014 年 8 月第 1 次
书 号	ISBN 978-7-5643-3325-6
定 价	35.00 元

图书如有印装质量问题 本社负责退换
版权所有 盗版必究 举报电话 : 028-87600562

前 言

光纤通信是轨道交通运输自动控制信息传输的主要手段。从为轨道交通自动控制系统服务的通信骨干网络到用户信息的接入网以及移动通信网络都，离不开光纤通信设备。学习光纤通信基础知识，了解光纤通信系统原理，掌握光纤通信设备的组成和维护方法，掌握光缆施工与维护方法，了解光纤通信的新技术，对于从事轨道交通运输自动控制相关专业的技术人员、管理人员和高职院校的相关专业学生来说都非常重要。

近年来我国的信息化建设推动经济的发展成效显著。目前，信息消费产业已经成为国民经济新的增长点，国家已确定信息消费产业发展的方向。其中一个重要的方面是宽带基础设施的建设，加快宽带网络升级改造，大幅度提高网速和服务质量。光纤通信基础设施的工程和维护需要大量懂得光纤通信施工维护技术的技能型人才。

按照高职院校基于工作过程课程开发的教学改革要求，我们对本教材的内容和结构进行了合理的编排，便于开展“项目导向、任务驱动、理论实践一体化”的教学模式，突出培养学生的职业技能。本书将光传输设备维护和光缆线路维护与测试分别独立成章，与工作任务相结合。

本书内容如下：

第1章介绍光纤通信的基本知识。

第2章介绍光纤光缆的结构、传输特性和光缆施工。

第3章介绍光纤通信器件的结构和工作原理。

第4章介绍光端机的基本原理、备用系统和辅助系统；PDH设备原理与应用；系统指标与测试。

第5章介绍SDH帧结构与复用结构；SDH原理与设备；SDH网络结构；SDH网络管理等。

第6章介绍DWDM技术原理与应用；DWDM的网络单元。

第7章介绍SDH传输设备组成与维护；SDH网络管理系统。

第8章介绍光缆线路维护、测试；光缆线路接续；光缆线路成端等。

第9章介绍光纤通信新技术，包括光纤新技术；光波长锁定技术；偏振模色散补偿技术；OTN技术的应用与发展趋势。

本教材由辽宁铁道职业技术学院的骨干教师和沈阳铁路局锦州电务段工程技术人员共同编写。由辽宁铁道职业技术学院孙颖任主编，辽宁铁道职业技术学院李开丽、冀勇刚、沈阳

铁路局锦州电务段李世鹏任副主编。具体分工如下：第1章、第2章、第3章由李开丽编写；第4章、第5章、第6章、第7章，第8章第4~7节由孙颖编写；第8章第1~3节由李世鹏编写；第9章由冀勇刚编写。

本书由辽宁铁道职业技术学院朱风文副教授和锦州勘察设计院有限公司赵锐高级工程师审阅。他们对本书的编写提出了宝贵的意见和建议。在选题和编写过程中得到了沈阳铁路局锦州电务段、大连电务段、锦州铁道勘察设计院、辽宁铁道职业技术学院电信系及通信技术教研室教师的大力支持。在此表示衷心的感谢。

由于编写时间仓促，加之作者水平有限，书中有难免存在不妥之处，敬请读者批评指正。

编 者

2014年7月

目 录

第 1 章 光纤通信概述	1
1.1 光纤通信的发展	1
1.2 光纤通信系统的组成及原理	6
1.3 光纤通信的特点	8
本章小结	9
复习思考题	9
第 2 章 光纤和光缆	10
2.1 光纤的结构和类型	10
2.2 光纤的导光原理	12
2.3 光纤传输特性	19
2.4 光纤的测量	22
2.5 光纤的型号	27
2.6 光缆的结构与类型	29
2.7 光缆线路施工	34
本章小结	50
复习思考题	51
第 3 章 通信用光器件	52
3.1 光源	52
3.2 光电检测器	64
3.3 光放大器	68
3.4 光无源器件	71
本章小结	76
复习思考题	78
第 4 章 光端机	79
4.1 光发送机	79
4.2 光接收机	86
4.3 光中继器	90
4.4 备用系统和辅助系统	91
4.5 PDH 光传输系统	93

4.6 PCM 零次群	97
4.7 系统性能及测试	98
4.8 PDH 技术的应用	101
本章小结	105
复习思考题	105
第 5 章 光同步传输网	107
5.1 SDH 的特点	107
5.2 SDH 帧结构	108
5.3 SDH 的映射与复用	112
5.4 SDH 复用原理	114
5.5 定 位	121
5.6 开销字节	124
5.7 SDH 设备原理	128
5.8 网络结构和保护	139
5.9 SDH 光接口参数	147
5.10 SDH 网同步	150
5.11 SDH 网络管理系统	154
5.12 MSTP 简介	157
本章小结	158
复习思考题	158
第 6 章 波分复用技术 (WDM)	162
6.1 波分复用技术基本概念	162
6.2 DWDM 系统的构成	165
6.3 DWDM 设备工作方式	166
6.4 DWDM 的主要技术	167
6.5 DWDM 的几种网络单元类型	167
6.6 光监控信道/通路 (OSC)	170
6.7 DWDM 的应用形式	170
6.8 DWDM 网络的一般组成	171
本章小结	173
复习思考题	174
第 7 章 光传输设备的管理与维护	176
7.1 SDH 传输设备的组成和功能	176
7.2 网络管理系统	180
7.3 SDH 设备维护	183

本章小结	191
复习思考题	192
第 8 章 光缆线路的维护	193
8.1 光缆线路维护用仪表	193
8.2 光缆线路接续	194
8.3 光缆线路全程衰减测试	199
8.4 运用 OTDR 光时域反射仪测量光纤光缆的方法	201
8.5 光缆线路日常维护	208
8.6 光缆线路故障分析与处理	209
8.7 光缆成端	214
本章小结	214
复习思考题	215
第 9 章 光纤通信新技术	217
9.1 光纤新型材料	217
9.2 光纤拉曼放大技术	218
9.3 波长锁定技术	221
9.4 偏振模色散补偿技术	224
9.5 OTN 技术的应用与发展趋势	226
本章小结	246
复习思考题	246
参考文献	248

第 5 章 光同步传输网

光传输网在通信网络中处于核心地位。可以说光传输网络技术的发展引领着通信技术的进步。自光纤通信投入使用以来,对光纤的合理运用,提高光纤通信系统容量,构建一个安全、高效、便于管理的光纤传输网路是通信行业追求的目标。在 1990 年以前光纤通信一直沿用准同步数字体系(PDH)。随着电信网络的发展和用户需求的不断提高,SDH 技术成为实现该目标的主要技术之一。

5.1 SDH 的特点

PDH 技术与模拟技术相比,在提高信号质量和通信容量、有利于集成、缩小设备体积、减少功耗等方面有显著优点,现在铁路通信小容量的业务接入中也有应用。但是,PDH 有以下不完善的几个方面,限制了其发展和应用。

5.1.1 PDH 的特点

- ① 只有地区性电接口规范(北美、日本和欧洲标准),造成国际互通困难;
- ② 无光接口规范,各厂家自行开发线路码型,无法实现各厂家横向兼容;
- ③ 只有基群速率是同步的,二次群以上是异步的,需要进行逐级码速调整,配备背对背的复用分解设备,系统复杂,硬件数量多,速率越高,层次越多,会使传输性能下降;
- ④ 主要为语音业务设计,而现代通信要求业务多样化、宽带化(高速数据和视频);
- ⑤ 传输以点对点为主,缺乏网络拓扑的灵活性,主要靠人工进行交叉连接;
- ⑥ 开销比特少,运行、管理和维护(OAM)能力差,无法实现传输网的分层管理和对通道实现端到端的监控。开销是运行、管理和维护设备必须附加的字节。

由上可见,PDH 不能满足电信网向大容量和智能化网管系统发展的需要,一种结合了高速大容量光纤传输技术和智能化网络技术的新体制——光同步传输网应运而生,光同步传输网的概念是由美国贝尔通信研究所提出来的,称之为 SONET(Synchronous Optical Network)。被当时的国际电报电话咨询委员会(CCITT)接受,并更名为同步数字体系 SDH(Synchronous Digital Hierarchy),并批准了一系列有关 SDH 的标准,使之成为不仅适合于光纤通信,也适用于微波通信和卫星通信的全世界统一的技术体制。

目前,长途网、本地网和接入网广泛采用 SDH 设备。

5.1.2 SDH 的基本特点

SDH 克服了以上所述 PDH 的缺点，SDH 具有通信容量大、传输性能好、接口标准、组网灵活方便和管理功能强大等优点。

① 对网络节点接口进行了统一的规范（速率、帧结构、复接方法、线路接口等），使各厂家设备横向兼容。

② 适合高速大容量通信，基本模块是 STM-1。STM-N 采用字节间插方法同步复用而成，方法简单，便于操作，也便于升级和扩容。

③ 可容纳北美、日本和欧洲现有数字标准（1.5 M、2 M、6.3 M、34 M、45 M 和 140 M），便于 PDH 向 SDH 过渡，具有前向兼容能力。

④ 低阶和高阶的复用和分解是一步到位，使设备大大简化。

⑤ DXC 数字交叉连接设备的引入使网络增强了自愈能力，便于动态组网。

⑥ 帧结构中安排了丰富的段开销，提高了运营维护管理（OAM）能力。

⑦ 采用级联技术，实现了 IP over SDH，具有后向兼容能力。

图 5.1 给出了 PDH 与 SDH 复用的比较示意图。从图中可以看出，PDH 的复用与分接是逐级进行的，而 SDH 的 ADM 可以直接从高速信号中复接和分接 2 Mb/s 信号，十分灵活和方便。

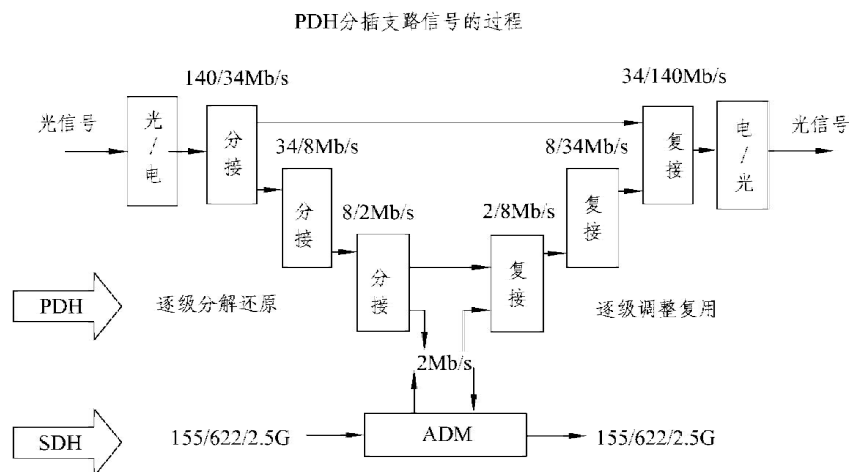


图 5.1 SDH 与 PDH 的比较

5.2 SDH 帧结构

5.2.1 SDH 速率等级（见表 5.1）

表 5.1 SDH 速率等级

简称	SDH 等级 (话路数)	标称速率
155 M	STM-1 (1920CH)	155 520 kb/s
622 M	STM-4 (7680CH)	622 080 kb/s
2.5 G	STM-16 (30720CH)	2 488 320 kb/s
10 G	STM-64 (122880CH)	9 953 280 kb/s
40 G	STM-256 (491520CH)	39 813 120 kb/s

5.2.2 SDH 帧结构

SDH 的一个关键功能是能对支路信号进行同步的数字复用、交叉连接和交换。帧结构必须适应这些功能，同时也希望支路信号在一帧中的分布是均匀的、有规律的，以便接入和提取，还要求帧结构对 1.5 Mbit/s 系列和 2 Mbit/s 系列信号同样的方便和实用，这就导致了与 PDH 不同的以字节 (8 bit) 为基础的矩形块状帧结构。

SDH 帧结构由 $270 \times N$ 列，9 行 ($N=1, 4, 16, 64, 256$) 字节构成。 N 表示 SDH 等级，每帧时间为 $125 \mu\text{s}$ ，帧的重复速率为 8 000 帧/秒，与语音的取样频率相同。STM-N 的帧结构如图 5.2 所示。主要由段开销 (SOH)、信息净荷 (含通道开销 POH) 和管理单元指针 (AU-PTR) 组成。

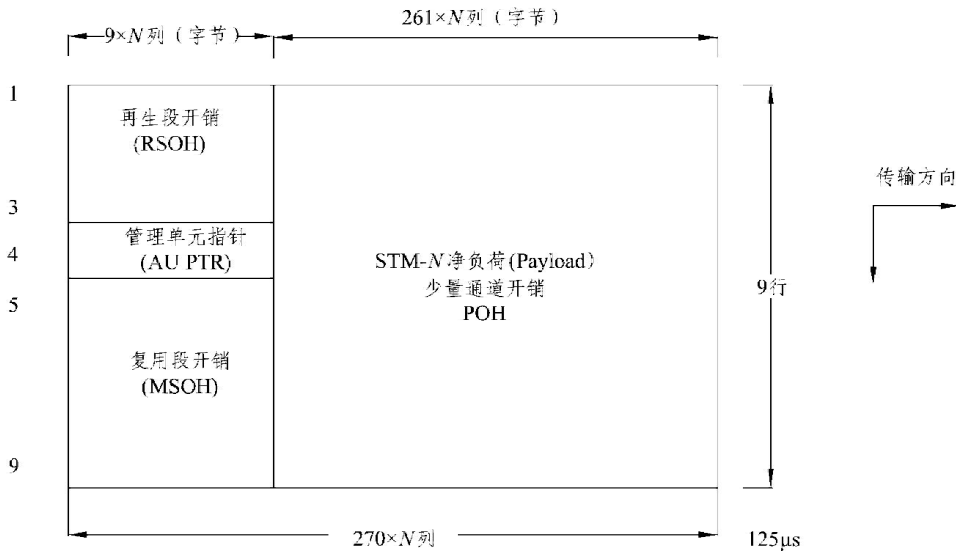


图 5.2 STM-N 帧结构

字节的传输由左到右、由上到下逐行传输，直到传输完一帧再传下一帧，每秒钟传输 8 000 帧，即 $125 \mu\text{s}$ 传完 1 帧，满足 PCM 通信的帧结构要求。

从图 5.2 SDH 的帧结构可以计算出 STM-1 的速率为 $9 \text{ 行} \times 270 \text{ 列} \times 8 \text{ bit} / 125 \mu\text{s} =$

155.520 Mbit/s ，STM-N 的速率为 $N \times 155.520 \text{ Mbit/s}$ 。

整个帧结构大体分为三个主要区域，段开销区域 (RSOH/MSOH)、净负荷 (含 POH) 区域和管理单元指针区域 (AU-PTR)。净负荷是结构中存放各种信息容量的地方，其中含有少量的用于通道监测、管理和控制的通道开销字节 (POH :Path Overhead)，段开销 (SOH :Section Overhead) 是为了保证信息净负荷正常、灵活地传送所必需的附加字节，主要供网络运行、管理和维护使用。SOH 分为两部分，第 1 行至第 3 行为再生段开销 (RSOH)，第 5 行至第 9 行为复用段开销 (MSOH)，帧结构中前 $9 \times N$ 列的第 4 行为管理单元指针 (AU PTR)，这是一种指示符，主要用来指示信息净负荷的第 1 个字节在 STM- N 中的准确位置。

5.2.3 SDH 的段开销安排及功能

所谓段开销是帧结构中的分别用于复用段和再生段的维护管理的字节，例如帧定位、误码监测、数据通信、公务通信和自动倒换等。

再生段开销 (RSOH) 用于对 STM- N 整体信号进行监控，复用段开销 (MSOH) 用于对 STM- N 中的净荷进行监控，通道开销 (POH) 则对每个通道进行监控。因此，SDH 可实现分层管理，维护十分方便。

各种开销的管理范围如图 5.3 所示。

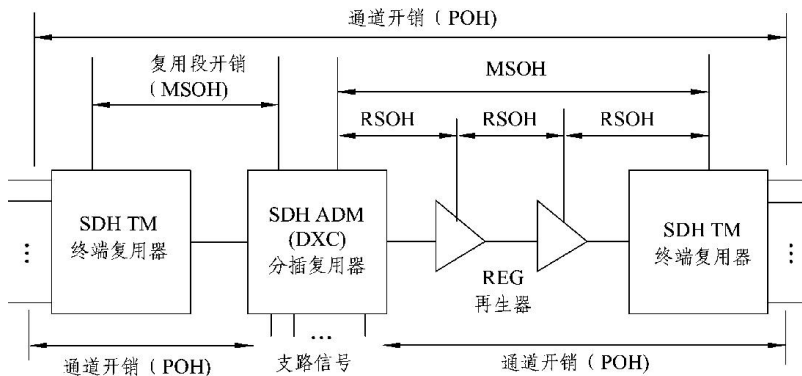


图 5.3 SDH 开销的管理范围

1. STM-1 段开销的字节安排

段开销安排在 STM-1 帧结构中的 9×9 列中，第 1 行到第 3 行为再生段开销 (RSOH)，负责对再生段的监控与管理。第 4 行的 9 个字节是管理单元指针 (AUPTR)，用于指出净负荷在 STM-1 帧中的位置。第 5 行至第 9 行为复用段开销 (MSOH)，用于对复用段的管理。具体安排如图 5.4 所示。

1	9B									9 10									261B									270		
	A1	A1	A1	A2	A2	A2	J0	*	×*	STM-1 净负荷																				
	B1	Δ	Δ	E1	Δ		F1	×	×																					
	D1	Δ	Δ	D2	Δ		D3	×	×																					
4	管理单元指针 AUPtr																													
	B2	B2	B2	K1			K2																							
	D4			D5			D6																							
	D7			D8			D9																							
	D10			D11			D12																							
9	S1					M1	E2	×	×																					
	SOH																													

× 为国内使用的保留字节

Δ 与传输媒质有关的特征字节

* 不扰码字节

图 5.4 STM-1 字节安排

×——国内使用的字节

Δ——与传输媒质有关的特征字节

*——不扰码字节

注：所有未标记字节为将来国际标准确定

2. 段开销字节功能

(1) 帧定位字节 A1、A2：A1 = 1111 0110，A2 = 0010 1000，用于帧同步，识别帧的起始位置。

(2) 再生段踪迹 J0：用来重复地发送段接入点识别，使接收机能确认其与指定的发射机处于持续连接状态。

(3) 数据通信通路 (DCC)：D1~D3 提供 192 kb/s 信道，用于再生段终端之间交流 OAM 信息；D4~D12 提供 576 kb/s 信道，用于复用段终端之间交流 OAM 信息，如图 5.5 所示。

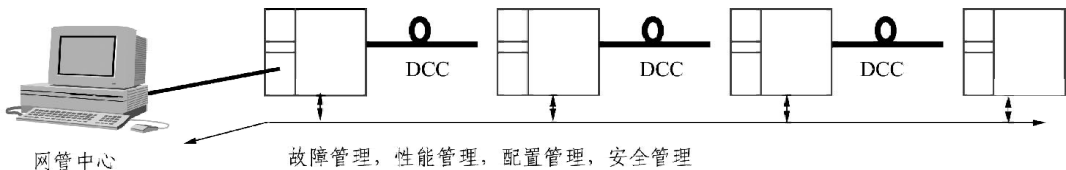


图 5.5 DCC 通道

(4) 再生段 8 位误码监测字节 B1。

(5) 复用段 $N \times 24$ 位误码监测字节 B2。

(6) 公务联络字节 E1、E2：E1 为再生段公务联络电话，可在再生器接入。E2 为复用段公务联络电话，可在复用段终端接入。每个通路速率为 64 kbit/s。

(7) 使用者通路字节 F1：该字节分给网络运营者，用于特定维护目的临时公务的

64 Kbit/s 的数据或话音信道。

(8) 自动保护倒换通路字节 K1、K2：用于传送自动保护切换 (APS) 信息。K1 表示请求倒换的信道号；K2 表示确认桥接到保护信道的信道号。

(9) 复用段远端故障指示：K2 的 b6 ~ b8 = 110。

(10) 同步状态 S1 (b5 ~ b8)：用于同步状态指示。

(11) 段远端误块指示 M1：用于检出误块数。

(12) 与传输媒质有关的字节 Δ ：专用于具体传输媒质的特殊功能，如单纤双向传输。其余字节供国内使用安排。

3. STM-N SOH 字节安排

以字节交错间插方式构成高阶段开销时，第一个 STM-1 的段开销被完整保留，其余 STM-1 的段开销仅保留 A1、A2 和 B2，其他均应略去。

综上所述，SDH 帧结构中左边 9 列×8 行 (除去第 4 行) 共 72 个字节是段开销区域，即 576 bit (4.608 Mbit/s)，这些容量均可用于维护管理，保证了 SDH 系统强大的维护管理能力。

4. 信息净负荷区域

信息净负荷区域是帧结构中用于传送电信业务信号的部分，对于 STM-1 而言，图中右边 261 列×9 行共 2349 个字节都属于净负荷区域。其中含有少量通道开销字节 (POH)，用于通道的性能检测、管理和控制。通道开销字节作为净负荷的一部分在网络中传输。同步的、异步的支路信号经过“映射”之后放在净负荷区域，具体的方法后续介绍。

5. 管理单元指针

SDH 中的指针是一种指示符，其值定义为净负荷 VC 相对于支持它的传送实体参考点的帧偏移。

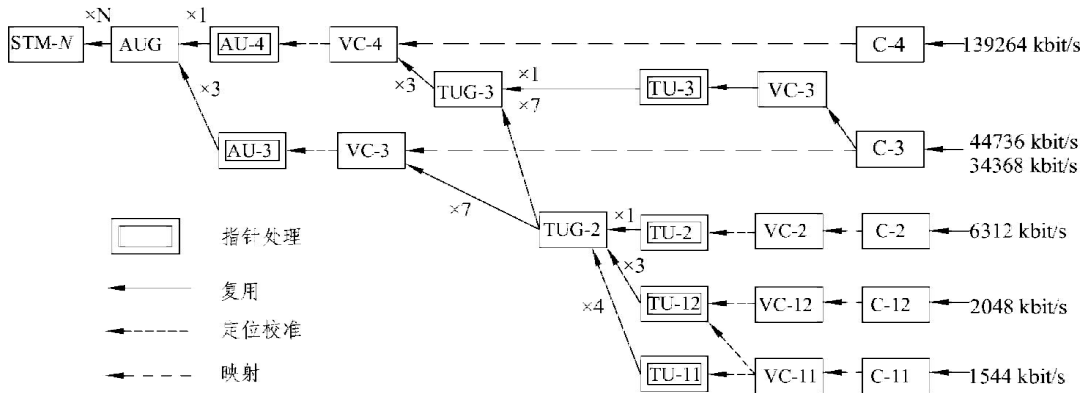
在我国的复用映射结构中，指针有 AU-4 PTR、TU-3 PTR 和 TU-12 PTR，此外还有表示 TU-12 位置的指示字节 H4。

5.3 SDH 的映射与复用

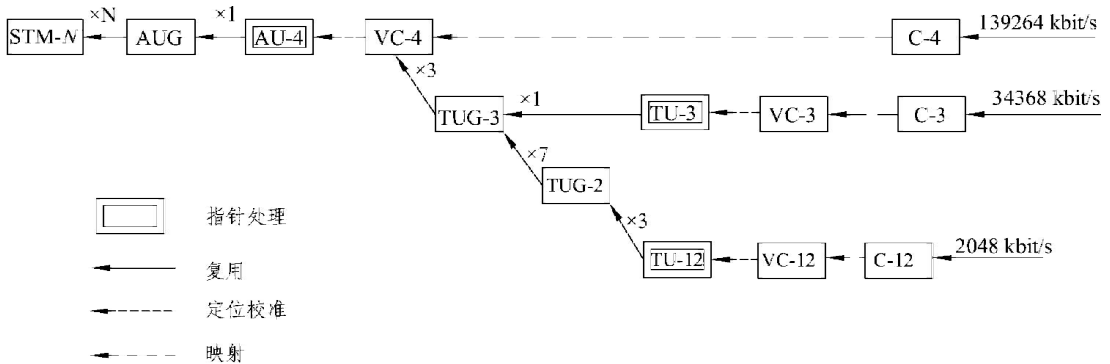
1. SDH 复用映射结构

如图 5.6 (a) 所示：ITU-T 规定了一套完整的复用结构，通过这些路线可将 PDH 的三个系列的数字信号以多种方法复用成 STM-N 信号。从图中可以看出复用结构包含了一些基本的复用单元：C (容器)、VC (虚容器)、TU (支路单元)、TUG (支路单元组)、AU (管理

单元)、AUG(管理单元组),这些复用单元后面的数字表示与此复用单元相对应的信号级别。我国的光同步传输网技术体制规定选用 AU-4 的复用路线。我国 SDH 的复用映射结构如图 5.6 (b) 所示。



(a) G.709 建议的 SDH 复用映射结构



(b) 我国 SDH 复用映射结构

图 5.6

复用是一种使多个低阶通道层的信号适配到高阶通道层,或把多个高阶通道层信号适配进复用段层的过程。SDH 网的兼容性要求 SDH 既能将 PDH 信号复用进 STM-N,又能将低阶的 STM 信号复用进高阶的 STM 信号。因此,SDH 的复用包括两种情况:

(1) 低阶的 SDH 信号 STM-N (N = 1 , 4 , 16 , 64) 复用成 STM-4N 信号,例如 STM-1 复用进 STM-4。

(2) 低速 PDH 支路信号 (例如 2 Mb/s , 34 Mb/s 等) 复用成 SDH 信号 STM-N (N = 1 , 4 , 16 , 64 , 256)。

复用的基本方法是将低阶信号按字节间插后再加上一些塞入比特和规定的开销形成高阶信号。

第一种情况是通过字节间插的方式进行复用完成。在复用的过程中,各帧的信息净负荷和指针字节按原值进行字节间插复用,段开销重新处理。复用后的 STM-N 帧中的段开销,

要舍弃某些低阶帧中的段开销。而第二种情况则不同，各种 PDH 业务信号复用进 STM-N 帧的过程都要经历映射、定位和复用三个步骤。

从图 5.6(b) 可以看出，我国 PDH 复用结构为 139.264 Mbit/s 信号装入 C-4 映射进 VC-4；34.368 Mbit/s 装入 C-3 映射进 VC-3，经 TU-3 指针处理复用到 TUG-3，再复用至 VC-4；2.048 Mbit/s 适配至 C-12，映射进 VC-12，经 TU-12 指针处理，经过 TUG-2 和 TUG-3 的复用到 VC-4。VC-4 由 AU-4 指针调整复用到 AUG 和 STM-N。

每一种速率的支路信号只有唯一的一条复用线路到达 STM-N 帧。其中 STM-1 可装入 1 个 140 Mb/s (经 C-4)，或装入 $3 \times 1 = 3$ 个 34 Mb/s (经 C-3)，或装入 $3 \times 7 \times 3 = 63$ 个 2 Mb/s (经 C-12)。

2. 2 Mb/s 信号的复用映射过程

2 Mb/s 信号是常用的支路信号。下面先给出其复用到 STM-N 的过程，以便进一步理解复用的概念。2 Mb/s 信号的复用映射过程如图 5.7 所示。从图中可见，在复用与映射的环节中加入了码速调整、指针 (PTR)、管理和维护的字节 (POH)。

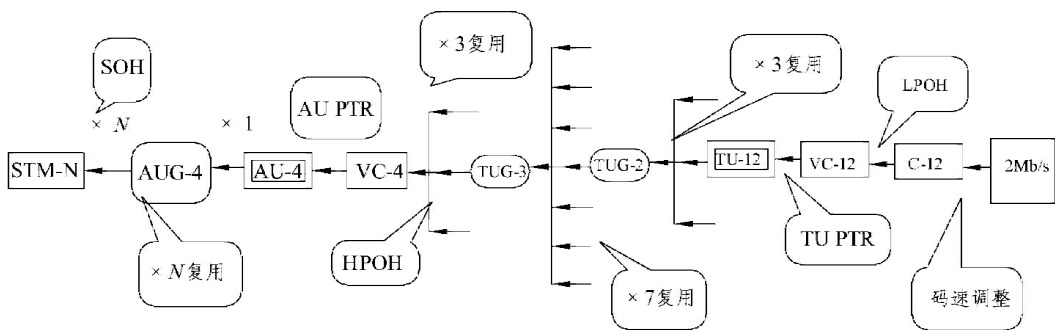


图 5.7 2 Mb/s 信号的复用映射过程

3. 复用单元的功能

1) 容器 C

容器 C 是用来装载各种速率业务信号的信息结构，主要完成适配功能 (如速率调整)，以便让那些常用的准同步数字体系信号能够进入有限数目的标准容器。针对 PDH 速率系列规范了 C-11、C-12、C-2、C-3、C-4 五种标准容器。每一种容器分别对应一种标称的输入速率，分别为 1.544 Mb/s、2.048 Mb/s、6.312 Mb/s、34.368 Mb/s、139.264 Mb/s。我国的 SDH 复用映射结构仅涉及 C-12、C-3 和 C-4。

2) 虚容器 VC

虚容器 VC 是用来支持 SDH 通道层连接的信息结构。由信息净负荷和通道开销组成。 $VC-n = C-n + VC-n POH$ ，VC-1，VC-2 为低阶，VC-3，VC-4 为高阶，它们分别作为支路单元 TU 和管理单元 AU 的信息净负荷。我国的复用结构中的虚容器有 VC-12、VC-3 和 VC-4。

3) 支路单元和支路单元组 (TU 和 TUG)

提供低阶通道层和高阶通道层间适配的信息结构, 即 $TU - n = VC - n + TU - n PTR$, 一个或多个 TU 的集合称为 TUG。

4) 管理单元 AU 和管理单元组 AUG

AU 是提供高阶通道层和复用段层之间适配的信息结构。 $AU - n = VC - n + AU - n PTR$, ($n = 3, 4$), 一个或多个 AU 的集合称为 AUG。

5) 同步传输模块 (STM-*N*)

$STM - N = AUG - N + SOH$ 。

5.4 SDH 复用原理

下面分别介绍 PDH 系列信号映射到 VC-4 的过程以及 STM-*N* 信号的复用方法。

5.4.1 2.048 Mbit/s 基群复用到 VC-4 的过程

将 PDH 体系中的各种速率的数字信号经过“容器 C”纳入各种规格的“虚容器 VC”中, 这个过程就是“映射”。

1. 2.048 Mbit 信号映射进 VC-12

将语音信号进行取样、量化、编码, 变为 PCM 信号。每路占用的速率为 64 kb/s。

将 30 个话路信号、帧同步和信令等进行汇总 (32 个时隙), 组成基群帧结构, 其速率为 2.048 Mb/s。32 个时隙即 32 个字节 (32B)。

加入两个塞入字节 R1 和 R2, 将 2.048 Mb/s 信号装入容器 C-12, C-12 占 34B, 标准速率为 2.176 Mb/s。

再加入一个字节的通道开销, 组成虚容器 VC-12, 占 35B, 速率为 2.24 Mb/s。如图 5.8 所示。

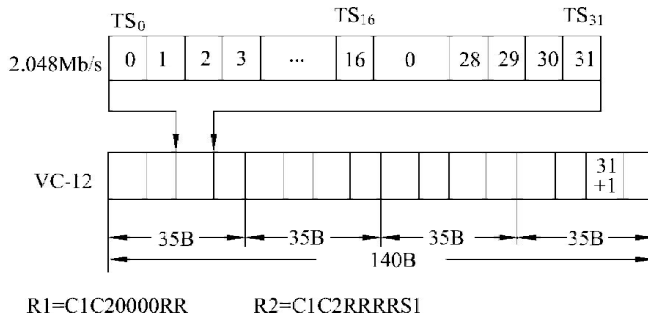


图 5.8 从 2.048 Mb/s 到 VC-12 映射

V5、J2、N2、K4 通道开销的加入采用复帧结构，4 帧构成一个复帧，在每一帧分别加入 V5、J2、N2、K4。可见，VC-12 等于原来的 2.048 Mb/s 信号，加上塞入字节，再加上通道开销字节，共计 35 个字节，写成公式为 $8 \times 35 \times 8 \text{ 000 b/s} = 2.24 \text{ Mbit/s}$ ，一帧为 35 B，125 μs ，一复帧有 $4 \times 35 = 140 \text{ B}$ ，如图 5.9 所示。

V5字节
R
32B
R
J2
C1C10000RR
32B
R
N2
C1C10000RR
32B
R
K4
C1C2RRRRRS1
S2IIIIII
31B
R

图 5.9 VC-12 复帧的字节安排

一复帧有下列内容：

信息比特 (I) 1 023 (= $32 \times 3 \times 8 + 31 \times 8 + 7$)；

塞入比特 (R) 49；

调整机会比特 (S1 , S2) 2；

两套调整机会控制比特，使用 3 位码组，用来分别控制 2 个调整机会比特 S1 和 S2。

C1C1C1 = 000 时，表示 S1 是信息比特；

C1C1C1 = 111 时，表示 S1 是调整比特；

C2C2C2 = 000 时，表示 S2 是信息比特；

C2C2C2 = 111 时，表示 S2 是调整比特。

2. 支路单元 TU-12 的构成

VC-12 复帧的每一帧分别加入一个字节的指针(V1、V2、V3、V4)，组成支路单元 TU-12。每一帧为 36 B。写成公式为 $TU - 12 = VC - 12 + (V1 + V2 + V3 + V4)$ (复帧)，此时速率 (1 帧) 变为 $(35 + 1) \times 8 \times 8\ 000\ \text{b/s} = 2.304\ \text{Mbit/s}$ 。

如图 5.10 所示，TU-12 一帧的 36 B 排列成 4 列 9 行，以便复用到高阶 VC。

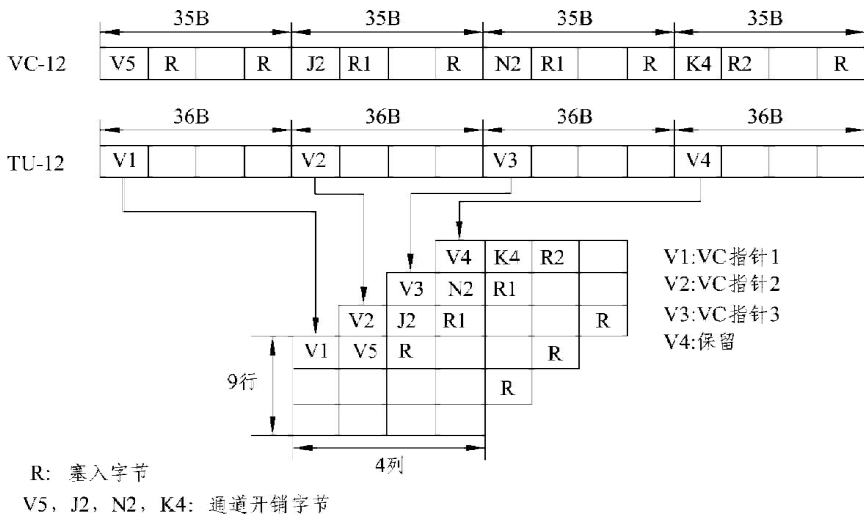


图 5.10 从 VC-12 到 TU-12

3. TU-12 复用到 TUG-2

由 3 个 TU-12 以字节间插复用方式进行复用，复用的结果形成了 9 行×12 列块状结构的支路单元组 TUG-2，速率为 $2.304\ \text{Mbit/s} \times 3 = 6.912\ \text{Mbit/s}$ 。如图 5.11 所示。

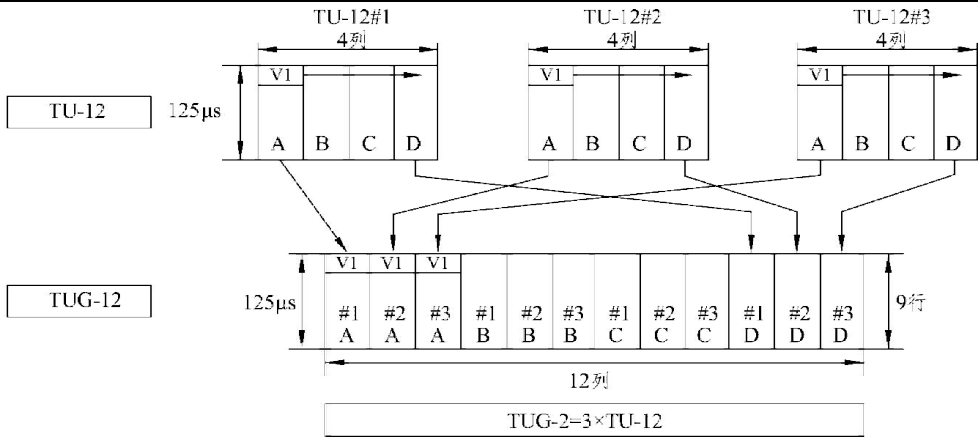


图 5.11 TU-12 到 TUG-2 的复用

4. TUG-2 复用到 TUG-3

由 7 个 TUG-2 进行间插复接，组成更高一级的支路单元组 TUG-3。写成公式为

$$TUG - 3 = 7 \times (TUG - 2) + 2$$

7 个 TUG-2 复接为 84 列，加上 2 列填充，共 86 列。如图 5.12 所示。此时速率变为 $86 \times 9 \times 8 \times 8\,000 \text{ bit/s} = 49.536 \text{ Mbit/s}$ 。

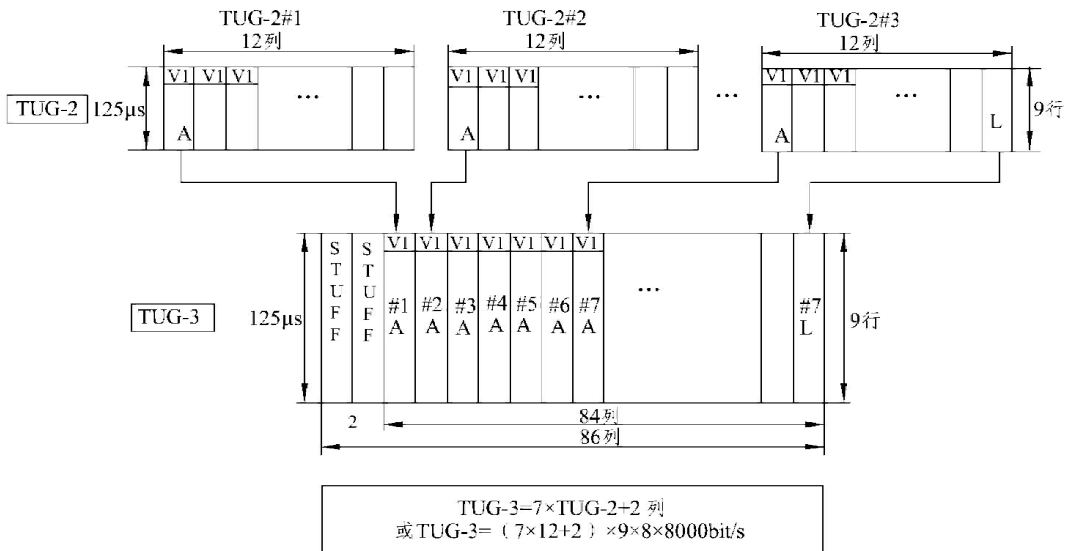


图 5.12 由 TUG-2 到 TUG-3 的复用

5. 形成高阶虚容器 VC-4

由 3 个 TUG-3 进行字节间插复接，并加入 1 列通道开销 POH 和 2 列填充，组成高阶虚容器 VC-4，如图 5.13 所示。写成公式为 $VC - 4 = 3 \times (TUG - 3) + POH + 2$ ，它有 9 行 261 列，

所以此时速率变为： $261 \times 9 \times 8 \times 8\ 000\ \text{bit/s} = 150.336\ \text{Mbit/s}$ 。

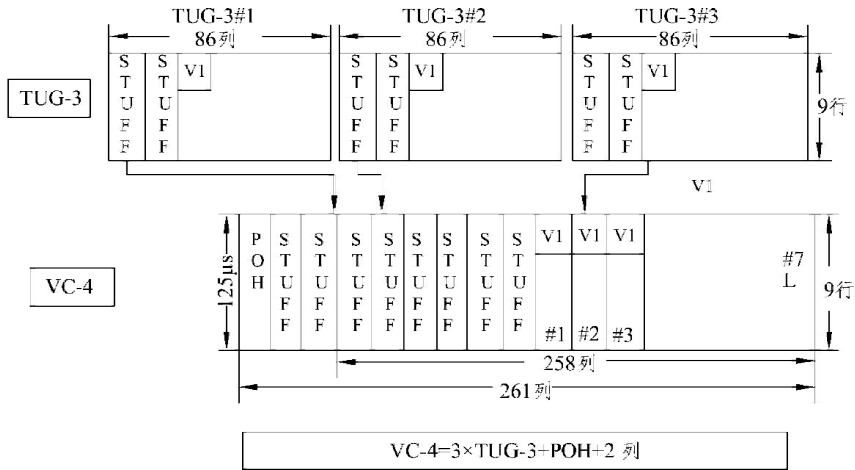


图 5.13 从 TUG-3 到 VC-4 的复用

以上是 63 个 2.048 Mbit/s 信号复用到 VC-4 的过程。

5.4.2 4 次群信号复用进 VC-4 的过程

标称速率为 139.264 Mbit/s 的 4 次群信号进入 C-4 容器，经速率调整后，C-4 的标称速率为 149.760 Mbit/s。

C-4 是块状结构，由 9 行×260 列组成，如图 5.14 所示，字节数为 2 340 B，所以，C-4 的标称速率为 $C-4 = 9 \times 260 \times 8 \times 8\ \text{kb/s} = 149.760\ \text{Mbit/s}$ 。

C-4 加上每帧 9 个字节的 POH (相当于 576 kbit/s) 后便成了 VC-4 (150.336 Mbit/s)，如图 5.14 所示。

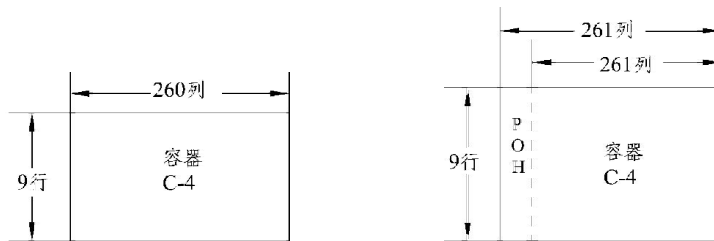


图 5.14 从 139.264 Mbit/s 到 VC-4

$VC-4 = C-4 + POH$ ，即 VC-4 的标称速率为 $149.76\ \text{Mb/s} + 0.576\ \text{Mb/s} = 150.336\ \text{Mbit/s}$ 。

5.4.3 3 次群信号 34.368 Mbit/s 映射进 VC-4

1. 将 34.368 Mb/s 装入容器 C-3 映射至 VC-3

C-3 的帧结构由 9 行×84 列净负荷组成,如图 5.15 所示,每帧周期为 125 μs。净负荷又分为 3 个子帧 T1, T2, T3。3 个子帧结构相同,其中包括信息比特,固定塞入比特,调整机会比特和调整控制比特。可以实现正-零-负码速调整。

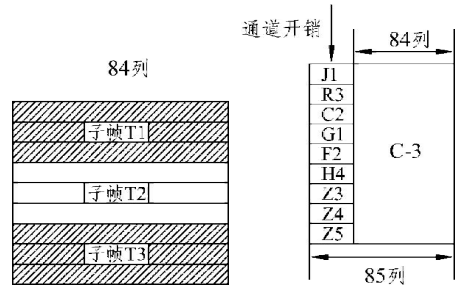


图 5.15 C3 与 VC-3 的结构

C-3 容器为 756 B, 速率为 $9 \times 84 \times 64 \text{ kbit/s} = 48.384 \text{ Mbit/s}$ 。

由容器 C-3 加上 9 个通道开销字节组成虚容器 VC-3, 所以 VC-3 由 9 行×85 列组成, 如图 5.15 所示。VC-3 的速率为 $48.384 \text{ Mb/s} + 0.576 \text{ Mbit/s} = 48.960 \text{ Mbit/s}$ 。

2. 加入支路单元指针形成支路单元 TU-3

由 VC-3 经定位校准后加上 3 字节的支路单元指针 TU-PTR (H1, H2, H3) 便形成了具有 9 行×85 列 + 3 字节结构的支路单元 TU-3。TU-PTR 用以指示低阶 VC 的起点在支路单元 TU 中的具体位置。支路单元 TU-3 加上 6 个填充字节组成 TUG-3, 它是 9 行×86 列的块状结构, 如图 5.16 所示。

其速率为 $9 \times 86 \times 64 \text{ kb/s} = 49.536 \text{ Mbit/s}$ 。

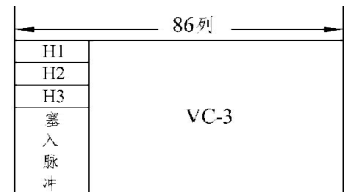


图 5.16 TUG-3

3. TUG-3 复用至 VC-4

由 3 个 TUG-3 以字节间插方式进行复用, 结果是形成 9 行×258 列的块状结构, 然后在附加上两列固定填充字节 R1、R2 和 1 列通道开销组成 VC-4。

如图 5.17 所示, VC-4 由 9 行×261 列组成。速率为 $9 \times 261 \times 64 \text{ kb/s} = 150.336 \text{ Mbit/s}$ 。

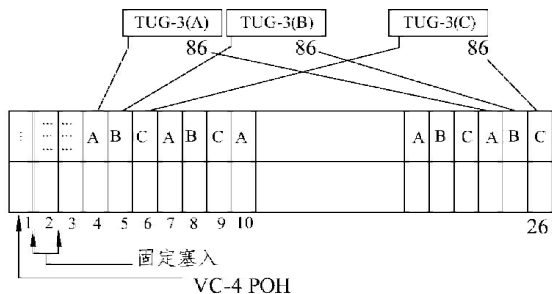


图 5.17 从 TUG-3 到 VC-4

5.4.4 管理单元 AU 及管理单元组 AUG 的形成

VC-4 与 AU-4 的净负荷容量一样,但速率可能不一致,需调整。AU 指针的作用就是指明 VC-4 相对 AU-4 的相位,它占 9 个字节,速率为 576 kbit/s。于是,考虑 AU 指针后的 AU-4 速率为 150.912 Mbit/s。AU-4 的组成如图 5.18 所示。

$AU-4 = VC-4 + AU \text{ 指针}$ 。

速率为 $150.336 \text{ Mbit/s} + 0.576 \text{ Mbit/s} = 150.912 \text{ Mbit/s}$ 。

对于我国规定的复用与映射结构来讲,AU-4 就是管理单元组 AUG。

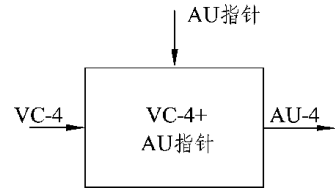


图 5.18 管理单元 AU-4 的组成

5.4.5 STM-1 信号的形成

在管理单元 AU-4 的一行 9 个管理单元指针字节之上加再生段开销字节,之下加复用段开销字节,就形成了 STM-1 的 270 列×9 行完整的一帧。对于含有 63 个 2M 的净负荷,由于复接过程一直是按列顺序复接,63 个支路单元 TU-12 (每个 4 列 9 行)从 19 列 (9 列段开销 + 1 列通路开销 + 8 列填充字节 = 18 列)开始均匀地分布着。63 个支路单元的第一列之后是 63 个第二列、63 个第三列、63 个第四列。它们均匀而有规律而且位置固定,给话路的复分接带来了很大方便。

5.4.6 STM-N 信号的形成

1. 形成管理单元组 AUG

由若干个 AU-3 或单个 AU-4 按字节间插方式,就可组成管理单元组 AUG。AUG 由 9 行 261 列的净负荷加上第 4 行的 9 个字节 (为 AU 指针) 所组成。

2. 加入段开销形成 STM-1。

在 AUG 的基础上加入段开销就可以形成 STM-1。

3. STM-N 信号的形成

N 个 AUG 复用进 STM- N 的安排如图 5.19 所示。从 N 个 AUG 复用进 STM- N 帧是通过字节间插方式完成的,且 AUG 相对于 STM- N 帧来说具有固定的相位关系。

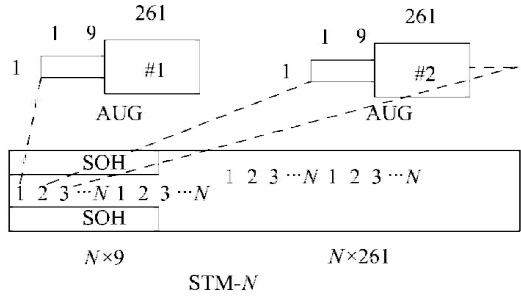


图 5.19 STM-N 的形成

5.4.7 级联和虚级联

当标准的虚容器不能有效地传送净负荷时，可采用 VC 级联的方式。

当净荷要求采用 VC-12 颗粒传送但其容量大于一个 VC-12 时，可采用 VC-12 的级联来传送；当净荷要求采用 VC-3 颗粒传送但其容量大于一个 VC-3 时，可采用 VC-3 的级联来传送；当净荷要求采用 VC-4 颗粒传送但其容量大于一个 VC-4 时，可采用 VC-4 的级联来传送。

目前定义了两种 VC 级联方式：相邻级联和虚级联。这两种级联的共同特点是，在通道终结处都可以提供标准容器 C-n 的 x 倍级联带宽，而两者的差异主要体现在通道终结点之间的传送过程。对于相邻级联而言，在整个传送过程中，级联带宽保持不变，而虚级联则把级联带宽分割为单个的 VC-n 进行传送，在传输的终点再重新组合这些单个的 VC-n 为完整的级联带宽。另外，相邻级联要求业务通道通过的每个网络节点都必须支持相邻级联功能，而虚级联则仅要求业务通道终结点设备支持虚级联功能。

相邻级联表示为 VC-n-Xc，虚级联表示为 VC-n-Xv，其中 VC-n 表示虚容器的等级，取值分别为 VC-12、VC-3、VC-4 等；X 表示级联的虚容器的个数，取值与虚容器等级有关；c 表示级联类型为相邻级联，v 表示级联类型为虚级联。

5.5 定位

5.5.1 定位的概念

定位是一种当支路单元或管理单元适配到它的服务层帧结构时，将帧偏移量收进支路单元或管理单元的过程。它依靠 TU-PTR 或 AU-PTR 功能来实现。定位校准总是伴随着指针调整事件同步进行的。

5.5.2 指针

采用指针是 SDH 的重要创新。指针是用来定位的，通过定位使收端能准确地从 STM-N 码流中取出相应的 VC，再从 VC 包封中分离出承载的信号，即实现从 STM-N 中直接分支出低速支路信号的功能。指针的作用如下：

① 当网络处于同步工作状态时，指针用于进行同步的信号之间的相位校准。

② 当网络失去同步时，指针用作频率和相位校准；当网络处于异步工作时，指针用作频率跟踪校准。

③ 指针还可以用来容纳网络中的相位抖动漂移。

STM-1 信息帧的第一列到第九列中的第四行用作管理单元指针。它定位低速信号在 STM-1 帧中的位置，使低速信号在高速信号中的位置可预知。

发端在将低速支路信号装入 STM-1 净负荷时，加入 AU-PTR，指示低速支路信号在净负荷中的位置，收端根据 AU 指针值，从 STM-1 帧净负荷中直接拆分出所需的低速支路信号。

AU-PTR 的另一个功能是用于码速调整，以便实现网络各支路的同步工作。

在 STM-1 中，每个字节都有其相应的位置编号，净负荷的起始位置的编号就包含在指针中。从技术上讲指针调整是一种净负荷的定位方法，通过数据字节的位置调整和修改相应的指针值，使净负荷在 STM-1 帧中动态浮动，实现频率和相位调整。进入 SDH 网络单元的数字流的定时信号与网络单元本身的定时信号之间不可避免地存在相位差和频率差，引入可调指针和正-零-负码速调整机理就可以避免产生数据的丢失。利用指针还可以简化分接处理：在 STM-N 信号中，每种类型支路信号的位置都可以由一个或两个指针值计算得到，这样，在网络节点中可以实现 SDH 各支路的信号进行交叉连接和交换。

指针分为管理单元指针 AU 和支路单元指针 TU，下面以管理单元指针 AU-4 和支路单元指针 TU-3、TU-12 为例，讲述其调整原理。

1. 管理单元指针 (AU-PTR)

AU-4 指针提供了 AU-4 帧中灵活和动态的 VC-4 定位方法。动态定位意味着允许 VC-4 在 AU-4 帧内浮动。

如图 5.20 所示，AU-4 指针占用 STM-1 帧结构中的第 4 行前 9 列，AU-4 指针包含在 H1、H2、H3 字节中。H1、H2 分别占用 1 字节，H3 占用 3 字节。图中 Y 字节为 1001SS11 (S 比特不规定)，1* 为全 1 字节。H1、H2、H3 字节功能：H1、H2 字节主要用于指示指针值，H3 字节用于码速调整。

具体的分配如图 5.21 所示。

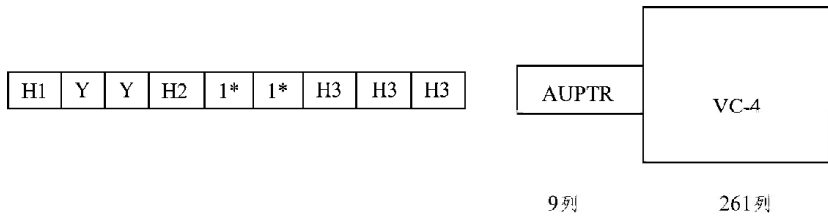


图 5.20 AU-PTR

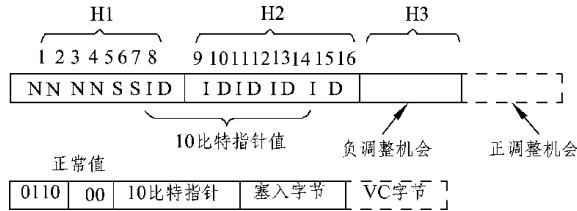


图 5.21 AU/TU-3 指针功能分配

图 5.21 中 I 为增加比特，D 为减少比特，N 为新数据标识，S 比特表示 AU/TU 类型。ID 比特用于载入指针值。

净负荷位置指示：10 比特指针指示净负荷 VC-4 的第一个字节 J1 相对于第三个 H3 字节的偏移量。

对净负荷 VC-4 进行速率调整：三个 H3 字节为负调整机会字节；第 4 行第 10、11、12 这三个字节为正调整机会字节。正调整：5 个 I 比特反转，在净负荷前面加 3 个填充字节，指针值加 1。负调整：5 个 D 比特反转，净负荷前面 3 个字节移到 3 个 H3 字节中，指针值减 1。显然，每次正、负调整相当相位变化三个字节，如图 5.22 所示。所以，对频率偏移不大的净负荷，只需增加或减少指针值即可，但对过大的频率偏差无法调整。

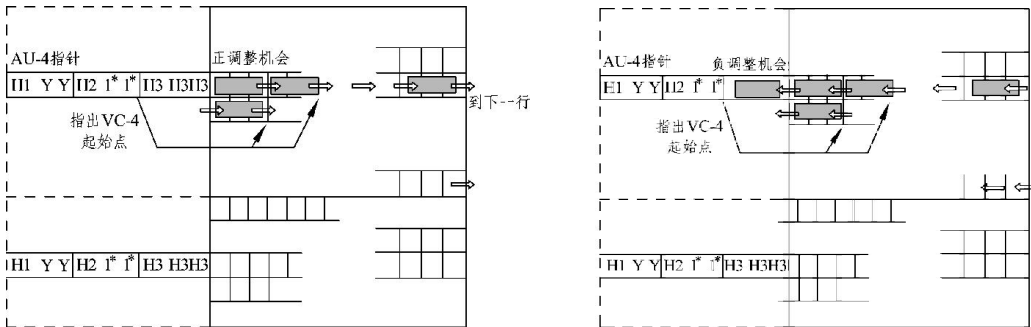


图 5.22 正、负调整机会

新数据标识 NDF：指示净负荷中的新数据变化。正常时，NDF = 0110；有新数据时，NDF = 1001。

级联指示 CI：当若干个 AU-4 需要级联起来以便传送大于单个 C-4 容量的净负荷时，则除了第一个 AU-4 以外的其余 AU-4 指针都设置为 CI，其内容为 1001SS1111111111，SS 未规定。

因为 H3H3H3 调整单位为 3 个字节 ($261 \times 9 / 3 = 783$), 所以指针范围为 0~782, 否则为无效指针。当接收端连续 8 帧收到无效指针时, 即产生 AU 指针丢失告警 AU-4LOP。

图 5.23 给出了 AU-4 指针偏移编号。指针调整间隔为 3 帧。

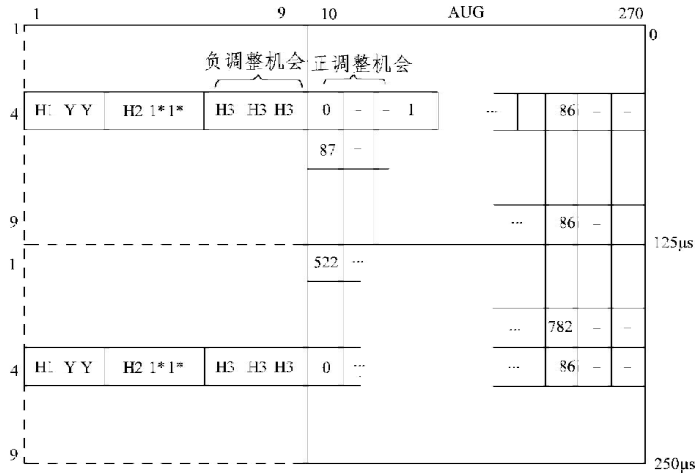


图 5.23 AU-4 指针偏移编号

由于 VC 的起始位置可以在 STM-1 帧内浮动, 即可以从 783 个位置中的任何一个起始, 并按码速调整的需要, 起始的位置可以逐次前移或后滑。VC-4 在 STM-1 帧内灵活地浮动的这种动态定位功能, 使得在同步网内能够对信号方便地进行复用和交叉连接。例如, 如果是正调整, 指针值要增加 1。进行这一操作的指示是将指针字节中的 5 个 I 比特反转 (H1H2 字节从 01101000001010 变为 0110100010100000), 在 AU-4 帧的这一帧内立即出现 3 个正调整字节。在接收端用“多数判决”的准则来识别 5 个 I 比特是否取反, 如果是则判明 3 个正调整机会字节的内容是填充而非信息。在下一帧表示 VC 起点位置编号的指针值应当增加 1, 即 H1H2 字节的后 10 比特由 1000001010 变为 1000001011, 其十进制值为原先的 522 变为 523, 并持续至少 3 帧。指针调整状态汇总于表 5.2。

表 5.2 指针调整状态

状态名称	STM-1 帧第 4 行字节编号和内容						速率关系
	7	8	9	10	11	12	
零调整	H3	H3	H3	信息	信息	信息	信息 = 容器
正调整	H3	H3	H3	填充	填充	填充	信息 < 容器
负调整	信息	信息	信息	信息	信息	信息	信息 > 容器

2. 支路单元 TU-3 指针

如图 5.24 所示, TU-3 指针位于 TU-3 的 H1、H2、H3 字节, 功能是用于指示净负荷 VC-3 的位置。其字节功能分配与 AU-4 类似, 10 比特指针指示净负荷的第一个字节相对于 H3 字

节的偏移量。并可以对净负荷 VC-3 进行速率调整。正调整：5 个 I 比特反转；在净负荷前面加 1 个填充字节；指针值加 1。负调整：5 个 D 比特反转；把净负荷前面 1 个字节移到 H3 字节中；指针值减 1。新数据标识 NDF：指示净负荷中的新数据变化。

正常时：NDF = 0110。与 AU-4 指针不同的是，TU-3 指针值用十进制数表示的有效范围是 0~764。因为 TU-3 以一个字节为单位进行调整，需要 $9 \times 85 = 765$ 个指针值来表示（编号是 0~764），该值表示了指针和 VC-3 第一个字节的相对位置。指针每增、减 1 代表一个字节的偏移量。当 VC-3 帧速率与 TU-3 帧速率相同时，时钟频率没有偏差，无需调整，H3 字节填充为伪信息，指针值为“0”。

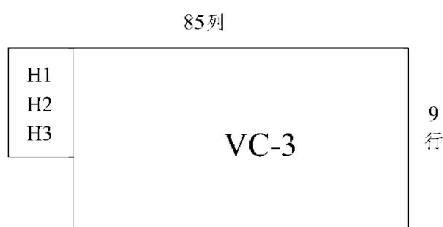


图 5.24 TU-3 指针的位置

3. TU-12 指针

如图 5.25 所示，TU-12 采用 $500 \mu\text{s}$ 的复帧结构，每帧占用 36 个字节，其中指针为一个字节，其余 35 个字节是 VC-12 帧。TU 指针用以指示 VC-12 的首字节 V5 在 TU-12 净负荷中的具体位置，以便收端能正确分离出 VC-12。TU-12 指针为 VC-12 在 TU-12 复帧内的定位提供了灵活动态的方法。

除 V1，V2 外，V3 用于负码速调整，V3 后的第一个字节用于正码速调整，V4 备用。V2 后的第一个字节是指针值为零的位置，以一个字节为一个调整单位，由于 TU-12 复帧的字节总数为 144 个，除去 4 个指针字节，所以指针共有 0~139 个取值。超出取值范围的值为无效指针。若连续 8 帧收到无效指针或 NDF 则设备的收端即出现支路单元指针丢失告警 TU-12-LOP，并下插 AIS 告警信号。V1，V2 字节中各比特的安排与 AU-4 指针类似。V1 字节中的第 1~4 个比特是新数据标志(NDF) 比特；第 5、6 比特为 TU 类别标志，V1 字节的第 7、8 比特和 V2 字节的 8 比特共 10 比特用于给出指针值，同样也分成 I 比特和 D 比特，其调整规则也和 AU-4 类似。

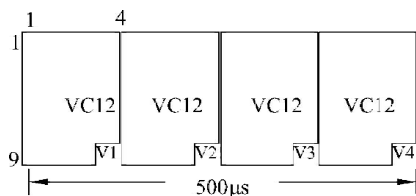


图 5.25 V1、V2、V3 和 V4 位置