

21世纪
高职高专电子信息类规划教材



电子整机原理 ——激光视听设备

陈健尹 主 编
徐通泉 副主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



21 世纪高职高专电子信息类规划教材

电子整机原理——激光 视听设备

主 编 陈健尹
副主编 徐通泉
参 编 黎碧茵 葛惠民
主 审 全景才 梁永汉



机械工业出版社

本教材以 CD 唱机、DVD 视盘机工作原理为主线,阐述了激光视听设备的关键技术:激光读取信息技术,数字信号的编码及解码,MPEG-1、MPEG-2 数据压缩编码及解码;介绍了 CD、DVD 视盘机原理、VCD 视盘机的有关技术和 CD 唱机、DVD 视盘机故障分析的基本方法。

本教材适合高职高专电子信息类专业使用,也可供有关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电子整机原理——激光视听设备/陈健尹主编. —北京:机械工业出版社,2002.11

21 世纪高职高专电子信息类规划教材

ISBN 7-111-11003-X

I. 电… II. 陈… III. ①电子设备—原理—高等学校:技术学校—教材②音频设备—原理—高等学校:技术学校—教材③激光放像机—原理—高等学校:技术学校—教材 IV. TN05

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 076159 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑:袁克勤 版式设计:冉晓华 责任校对:唐海燕

封面设计:张毅 责任印制:付方敏

北京忠信诚胶印厂印刷·新华书店北京发行所发行

2003 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

1000mm × 1400mm B5 · 6.5 印张 · 2 插页 · 249 千字

0 001—5 000 册

定价:17.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

本社购书热线电话(010) 68993821、68326677—2527

封面无防伪标均为盗版

前 言

激光视听设备经历了 CD 唱机、VCD 视盘机、DVD 视盘机几个发展阶段。从社会拥有量上看,目前 VCD 视盘机占有绝对优势。但 DVD 视盘机以其优越的图、声性能,盘片的巨大容量,必将取代 VCD 视盘机,成为视听设备的主流产品。

20 世纪 90 年代以来,激光视听设备已经进入亿万家庭;激光视听设备已经成为家电产业的重要组成部分。随着科学技术的发展,市场需要一大批熟悉激光视听设备的专门人才,从事生产、维修服务等工作。相应地,相关专业的职业教育迫切需要适合职教特色的教材。为了适应市场需要,满足职业院校电子信息类专业学生学习 CD、DVD 技术的要求,机械工业出版社组织编写了这本较系统地介绍激光视听设备的教材——《电子整机原理——激光视听设备》。

根据职业教育的特色,本书摒弃了繁琐的理论推导和数学运算,着重定性阐述基本原理和基本概念。本书内容主要为数字技术基础知识;激光记录、读取信息原理;MPEG 数据压缩技术以及 CD 唱机、DVD 视盘机原理;同时介绍了 VCD 视盘机的有关技术,以及 CD、DVD 机的维修技术基础。在内容安排上,用了较大篇幅阐述数字信号编码、激光读取信息原理及 CD 唱机工作原理。这些内容是激光视听技术的基础,VCD、DVD 视盘机系统只是在此基础上增加了音、视频信号压缩及解压缩技术。因此,掌握了 CD 唱机工作原理,学习 VCD、DVD 视盘机原理就不困难了。

本书为高职高专电子信息类专业教材,参考教学时数为 90 学时。打“*”号的章节为选修内容,教师可根据需要取舍。

本书由陈健尹任主编,徐通泉任副主编。第一章由黎碧茵编写,第二、三章由陈健尹编写,第四章由葛惠明编写,第五章由徐通泉编写。全书由陈健尹统稿。全景才教授、梁永汉高级讲师担任主审。两位主审对全书的内容安排提出了许多宝贵的意见。本书在编写过程中得到了熊耀辉高级讲师的帮助,在此一并致以衷心的感谢!

实训内容可参阅本书的配套教材《电子整机实训——激光视听设备》。

由于时间仓促,作者水平有限,疏漏之处在所难免,恳切希望广大读者指正。

编 者

目 录

前言

第一章 激光视听技术基础	1
第一节 概述	1
第二节 数字信号的编码	5
第三节 纠错技术基础	14
* 第四节 数据压缩技术	22
第五节 激光唱片及其制作过程	24
本章小结	27
习题	27
第二章 激光信号拾取系统	29
第一节 激光拾音器	29
第二节 伺服系统	40
* 第三节 机芯工作原理	52
本章小结	59
习题	60
第三章 CD 唱机原理	61
第一节 CD 唱机基本组成	61
第二节 RF 放大与伺服信号处理	72
第三节 数字信号处理	83
第四节 数字滤波与数/模转换	89
第五节 CD 唱机整机电路分析	94
第六节 CD 唱机的维修	99
本章小结	103
习题	104
第四章 MPEG 压缩编码技术	105
第一节 视频信号数字化	105
第二节 静画数字压缩编码	109
第三节 活动图像压缩编码	113
第四节 音频信号压缩编码	129
本章小结	135
习题	135
第五章 DVD 视盘机	136

第一节 DVD 视盘机的特点	136
第二节 DVD 视盘机的整体系统结构	145
第三节 DVD 视盘机整机电路分析	170
第四节 DVD 视盘机常见故障分析	196
本章小结	198
习题	199
参考文献	200

第一章 激光视听技术基础

第一节 概 述

一、激光视听技术的发展和应用

激光视听设备是集数字技术、微电脑技术、激光技术、超大规模集成电路技术和精密机械制造技术于一体的高科技产品。其主流产品有 CD 唱机、VCD 视盘机和 DVD 视盘机，其记录媒体称为光盘，在记录和重放信息时都使用激光，而不用传统的直接接触的唱针来记录或读取唱片上的信息，消除了磨损和摩擦噪声，唱片的寿命和信号质量得到极大的提高。

激光视听设备的问世是在 1972 年，荷兰飞利浦公司成功开发了激光影碟机，激光技术首次应用于音视频录放系统。从此，利用激光来记录信息的技术革命便拉开了序幕。与此同时，荷兰飞利浦公司和日本索尼公司进行了数字激光唱机（简称 CD 唱机）的研究，从 1982 年起，CD 唱片（通称光盘）和 CD 唱机投放市场，从此激光数字音响开始在世界流行起来。CD 唱片取代了传统的唱片和磁带，逐步成为高音质、高密度记录载体的主流。激光光盘技术在科技、教育、文化等各个领域都得到了广泛的应用，用光盘来记录计算机数据，使我们不再担心数据丢失。激光技术在我们的工作和生活中发挥着越来越重要的作用。下面介绍激光光盘技术的发展和各方面的应用。

1. LD 激光影碟机

LD (LD Player) 激光影碟机是荷兰飞利浦公司于 1972 年开发的，并于 1978 年投放市场。

在 LD 中，图像信号、声音信号都是用调频方式调制，用频分多路方式传送并记录信号，即分别将视频图像信号和伴音音频信号用不同的载频进行调频 (FM) 处理，再合成一个信号记录到光盘上，在光盘上形成一圈圈螺旋形排列的坑槽。LD 信号的读取是利用激光束扫描信息轨迹（坑槽）来实现。

LD 激光影碟机所采用的光盘面积较大，直径分为 20cm 和 30cm 两种。直径为 30cm 的较常用，可记录 60min 的声音和图像信息。其图像水平清晰度可达 430 线，远远超过普通磁带录像机。

CD 唱机开发成功后，将数字音频记录技术移植到 LD 中，使 LD 盘兼有模拟音频信号和数字音频信号。

LD 激光影碟机通常兼有播放 LD、CD、CD-V 三种光盘功能。

2. CD 唱机

1980 年 6 月, 飞利浦公司和索尼公司提出了使用光学方式读取音频信息的方案, 1982 年, 将此方案提交给国际电工委员会, 形成 CD-DA (Digital Audio) 标准, 即激光光盘标准。这个标准是整个 CD 系统最基本的标准, 其他光盘标准都是在这个标准的基础上制定的。因标准文件的封面是红色的, 故又称此标准为“红皮书”。

CD 唱机于 1982 年投放市场。CD 是英文 Compact Disc 的缩写, 直译为小型唱片。唱片直径为 12cm, 最大播放时间为 74min。CD 唱机是利用激光拾取唱片信息的数字式唱机, CD 唱片与传统唱片的根本区别, 一是采用激光读取信号, 二是采用数字信号进行记录和重放, 因而电声指标极高。即使是普及机型, 其频响依然达 20Hz~20kHz, 信噪比大于 90dB, 动态范围大于 90dB, 抖晃小到测量不出。

3. CD-G

CD-G (CD-Graphics) 是在 CD 光盘的基础上, 利用数据结构中未用的子码通道 (参阅本章第二节第三款) 记录图像的 CD 光盘。由于该区域容量有限, 只能记录静止图像数据, 图像的清晰度也不高 (6bit 量化, 像素为 288×192), 颜色的种类也只有 16 种。一张光盘可以记录 2000 幅静止画面, 主要用于卡拉 OK 演唱。CD-G 完全采用红皮书标准规定的 CD 数据存储形式, 即运用数字方式将图声信息存储在光盘上, 使 CD 机增加了图像功能。子码通道记录的图像信号要使用 CD-G 专用的解码器, 才能将盘中的图像信号解调出来。

4. CD-V

CD-V (CD-Video) 是 LD 与 CD 技术的结合。CD-V 光盘录有 20min 数字音频信号和 5min 的活动图像信号, 其中的视频信号采用与 LD 相同的调频方式记录, 音频信号采用与 CD 相同的数字方法记录, 音频信号记录在内圈, 图像信号录在外圈。CD-V 光盘一般用 LD 机播放, CD 机能播放其中的音频信号。

5. CD-ROM

1983 年, 为了将 CD 光盘用作计算机的外部存储器, 飞利浦和索尼公司定义了用只读存储光盘形式存储数据的 CD-ROM (CD-Read Only Memory) 标准 (又称“黄皮书”), 解决了把 CD 光盘用作计算机存储器的问题。读取 CD-ROM 光盘数据的设备称为 CD-ROM 驱动器, 其读取原理与 CD 机相同, 所以 CD-ROM 驱动器也能用来播放 CD 和 VCD 光盘。CD-ROM 的最大特点是数据容量大, 可达 650MB。CD-ROM 促进了计算机技术的发展, CD-ROM 这种大容量的装置装入计算机中, 使光盘信息产品迅速增加, 如计算机软件、书籍、游戏、百科全书、专业杂志和小说等, 应有尽有。

6. CD-I

1988年,飞利浦公司和索尼公司发表了CD-I (CD-Interactive)交互式光盘标准(称为“绿皮书”)。CD-I激光唱片由CD-ROM派生而来,其上录有视频、音频等多种信息。绿皮书规定了CD-I唱片的数据信息的构成、编码等处理方法,规定了软、硬件的规格。

CD-I是将声音、图像和计算机数据融合为一体的一种多媒体系统,按照交互对话式的要求存储数据。所谓交互对话式,是指人和机器对话。在CD-I中,用户可以根据显示器上的画面对话方式,按需要边对话边重放,操作控制更加方便。

7. VCD 视盘机

VCD是Video CD的英文缩写,意为视频小影碟。它采用了MPEG(活动图像专家组)数据压缩技术,在直径为12cm的光盘上记录了74min的视频、音频信号。

1994年,飞利浦、索尼、胜利、松下四家公司联合发表了VCD1.0版本标准(称为白皮书),相继又推出了VCD1.1版本标准、VCD2.0版本标准。VCD技术标准是以MPEG-1为基础的国际技术准则。它规定VCD的信息存储格式与CD相同,都采用帧编码记录方式,光盘转速、读取方法与CD一致,具有相同的编码体制。

VCD机播放的图像水平清晰度为250线,低于LD的水平。但由于其光盘成本低,因而得到了快速的普及。

8. SVCD 视盘机

SVCD视盘机是我国创造的播放音频和视频图像的设备。它部分采用了MPEG-2的压缩技术,但光盘的记录密度与VCD相同,其图像质量介于VCD和DVD之间;图像水平清晰度达350线,优于VCD的水平,但低于DVD的水平;其播放时间为45min。由于其价格和VCD接近,并能兼容VCD和CD,因此在我国占有一定的市场。

9. MD (微型磁光盘)

MD(Mini Disc)是为补救CD唱片不能抹录的缺点,索尼公司开发的一种微形唱片。MD唱片是利用磁光技术制造的可供多次录、放音的磁光盘,其结构形式和3.5in(英寸)软盘相似。MD唱片置于一个直径为64mm的塑料卡盒中,在卡盒的一边设计了供激光读取用的窗口。

MD唱片有两种型式,一种是专供放音用的光盘,另一种是可录、放的磁光盘,两种光盘都具有74min的播放容量。

10. CD-R 光盘

CD-R(CD-Recordable)光盘是一种一次性写入光盘,即只允许写一次,

写完之后不可擦除重新再写，因而又被称之为 CD Write - Once，简称 CD - WO。

CD - R 光盘同 CD 光盘相比是增加了一层专用于记录信息的材料，这种材料当受到被写入信息调制的激光束照射时会因受热而熔解，形成信息坑槽。为记录方便，在 CD - R 盘上预先刻制了预刻槽，以便写入信号时对信息轨迹进行控制。

11. CD - RW 光盘

CD - RW (CD - ReWritable) 光盘是一种可多次擦写的光盘。在光盘记录面上覆盖一层厚度为 40nm 的薄膜，薄膜的主要成分是硒或碲，在被数字信号所调制的激光束照射下，这层薄膜在结晶和非结晶状态之间互相转换，从而将信号记录下来。由于材料的关系，晶体状态改变次数有限，大约在 1500 次左右。

12. DVD 视盘机

DVD (Digital Video Disc) 采用了 MPEG - 2 数据压缩技术，其音频和视频图像的质量达到了专业级水平。DVD 光盘提高了记录密度，使其信息容量也大幅度提高，单面单层的 DVD 光盘可记录 133min 的信息，所以又称为高密度光盘。DVD 光盘的信息读取要采用波长更短、光束更细的激光头。

DVD 视盘机的图像水平清晰度为 480 线，超过目前普通电视机的清晰度水平。音频信号采用 5.1 声道环绕声标准，是家庭影院的理想设备。由于 DVD 视盘机具有优良的电声性能，因而它已经成为激光视听设备的主流产品。

二、数字信号及其优越性

1. 模拟信号

模拟信号的特点是信号幅度随时间连续变化。图 1 - 1 所示是模拟信号波形。

对模拟信号的处理通常包括放大、调制、变频、解调、换能等。模拟信号在处理过程中，常会由于电路系统指标不良而产生失真。如传输线路频带不足导致波形失真，处理电路动态范围不够造成限幅失真，放大器的线性不良产生非线性失真，传输系统内部产生的噪声使信噪比降低等。

模拟系统中的噪声与失真等影响是积累的，模拟信号经过多次处理后，信号质量会明显变劣。

为了克服模拟信号在传输过程中由于受到系统质量指标的影响而造成的信号变形和失真，并对信号进行更有效的处理与保存，必须对模拟信号进行数字化处理，即通常说的模/数转换 (A/D 转换)。

2. 数字信号及其优越性

数字信号只有高电平和低电平两个不同的状态，通常用“1”和“0”来表示。相应地，数字电路中只有导通和截止两种状态，因而电路的工作稳定可靠。

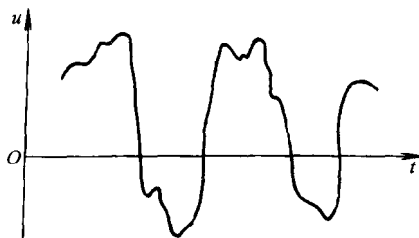


图 1 - 1 模拟信号波形

更主要的是数字信号可以用计算机技术来处理，使传统的电路概念发生了深刻的革命。

数字信号仅有 0 与 1 两个不同的状态，传输过程中只要能区分这两种状态，信号就不会失真。就是说，在传输时即使遇到干扰或失真，只要仍能区分高电平和低电平，就可以将信号复原。

图 1-2 所示是数字信号的优点。图中 A 代表传输的模拟信号，用模拟系统传输时，传输系统的噪声和失真使信号质量降低；而用数字系统传输时，虽然传输系统也会引入噪声和失真，但只要能判别 0 和 1 这两个符号，就能很容易地恢复出原信号，从而保持信号的高质量。

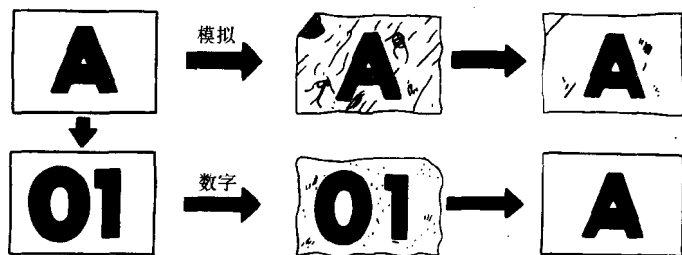


图 1-2 数字信号的优点

由于数字信号传输中优良的抗干扰性、处理上的灵活性以及存储的持久性，使数字技术成为信号处理的发展方向。

模拟信号的数字化处理，通常要经过取样、量化、保持、编码四个步骤。CD 系统的取样频率规定为 44.1kHz；每个取样点用 16bit 编码。

第二节 数字信号的编码

一、音频数据码

模拟信号经 A/D 转换，形成只有 1 和 0 组成的二进制码。这些由 1 和 0 组成的数码不能直接用于传输或记录，因为音频信号在低频时可以低到 20Hz，甚至更低。若变换成数字信号，就会出现连续很长的 1；当输入零信号时，就会出现连续很长的 0。这样，一段时间内信号的大小就没有变化，这种情况数字处理电路很难识别信号。为了避免发生这种现象，不直接记录 A/D 转换后的音频数字信号，而是将音频数字信号通过调制变换成一种容易记录和读取的波形。经过调制的音频信号称为音频数据码。

为了便于对数据进行处理，必须将连续信号分组。CD 标准规定，音频信号的 L 和 R 声道的各 6 个取样数据合编为一组，称为数据帧（又称 CD 帧）。一个取样数据是 16 位，在传输时把它分为高位和低位各 8 位，即两个字节，因此一

个 CD 帧有 $6 \times 2 \times 2 = 24$ 字节的音频数据。由于取样频率是 44.1kHz ，所以数据帧的重复频率为 $44.1\text{kHz}/6 = 7.35\text{kHz}$ 。

另外，为了能准确重放信号和实现重放控制，还需要在数据帧里插入纠错码、控制码、同步码以及其他工作数据。

二、纠错码

数字信号的优越性是在记录和重放过程中，对系统造成的失真和噪声，只要能辨认出原来的数字 0 或 1，就能恢复原来的数字信号，最后还原出高质量的模拟信号。但是，如果信号丢失或出错，仍然会造成失真。丢失和出错的信号称为误码。数字信号在记录和读取过程中不可避免地要产生误码，其影响比模拟信号更严重。容易理解，高权值位的 0 变成 1 或 1 变成 0，造成的失真是很大的。所以，CD 系统必须有误码纠正措施。

CD 系统中为了达到误码纠正的目的，采用了 CIRC 交叉交织纠错编码。信号记录前对每帧 24 个音频数据进行 C2 编码和 C1 编码，附加 4 个 C2 纠错字节（Q 纠错码）和 4 个 C1 纠错字节（P 纠错码），重放时经纠错解码可以将大多数误码纠正过来。

纠错编码无论在理论上或者电路上都是非常复杂的，图 1-3 是纠错原理示意图，这是一个简单的例子，说明了纠错的原理，较详细的说明在下一节叙述。

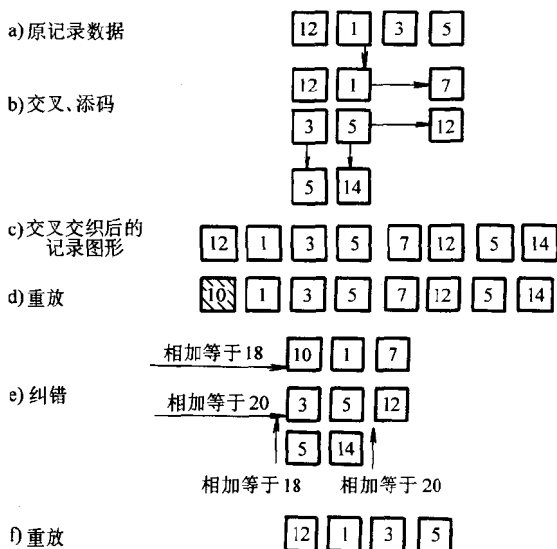
在图 1-3 中，图 a 是 4 个原记录数据。为简单起见，图中使用十进制数。图 b 是将记录数据交叉排列、添码，添码的规则是：连同添加的数码，每一行、每一列的和都等于 20；添加的数码相当于纠错码。图 c 表示将数据和添码一起记录。图 d 表示重放时第一个数据出错。图 e 表示纠错解码过程：将重放数据交叉排列，经微处理器运算可知，第二行与第二列的和均等于 20，说明没有误码；第一行与第一列的和均等于 18，说明出现了误码，且是少了 2；可以判断出误码在第一行与第一列的交叉点上。将误码加上 2，即可恢复原数据。图 f 表示将数据重排，丢弃纠错添码，输出正确的数据。

三、控制码

CD 光盘上的信息是从最内圈开始到最外圈结束。开始段为引入区，结束段为引出区。引入区与引出区之间为节目区。节目区内有若干乐曲。播放时，为了能随意选取乐曲和显示曲目信息，在每个 CD 帧里设置了 8bit（1 字节）的控制码。

控制码又称子码，这 8 位子码通道（在数字技术系统中，对数字信号的调制常称为通道调制，1 位二进制数称为 1 个通道）依次命名为 P、Q、R、S、T、U、V、W。CD 唱机只使用了 P 通道和 Q 通道。通道 R、S、T、U、V 和 W 的内容未定义，CD-G 利用它存储静止图像和卡拉 OK 文字显示。

1. 子码帧结构



(2) 索引(X) 用2位BCD码表示。00表示节目间隔, 01~99将节目细分, 在引出期间, $X=01$ 。

(3) 乐曲内的经过时间 分、秒、帧号码各2位。帧号为00~74, 这是因为1s有75个子码帧。经过时间表示每一段乐曲的时间, 每一乐曲从0开始, 播放区时间增加, 间隔区时间减少, 间隔结束处时间回到0。

(4) 绝对时间 分、秒、帧号码各2位。表示光盘的总播放时间, 引入区不计, 从引入区结束处开始计时, 直到引出区结束处。

用书的章节和页码作比喻: 书的章号相当于乐曲, 节号相当于索引, 页码相当于帧号。

在书的最前面有目录, 如果没有目录, 就不能方便地找出书中的内容。CD光盘也一样, 在光盘的最里圈记录的是相当于目录的内容, 这部分内容就叫做TOC(目录表)。重放时首先读出这部分内容, 只要重放某乐曲的指令一到, 立刻移动激光头(读取信号的装置), 就可找出目标的位置。

TOC的内容就放在引入区内。图1-6是TOC格式, 其形式与子码类似。其中POINT的内容为00~99, 其数字表示各乐曲开始的绝对时间。选曲时, 根据曲目号对应的绝对时间, 可以很容易找到曲目的起始位置。

图1-7表示了P子码和Q子码的控制示意图(假设光盘由3个乐曲构成)。

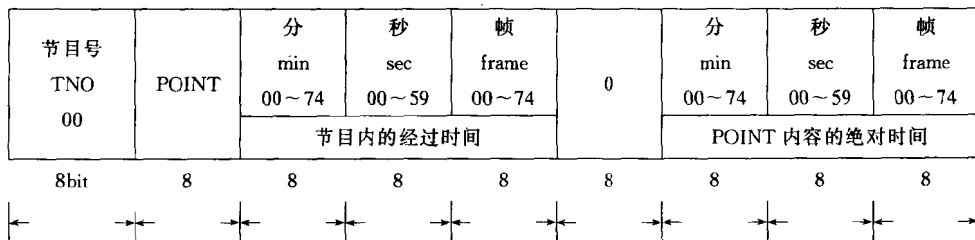


图1-6 TOC格式

四、EFM调制

1. EFM调制的必要性

EFM调制就是“8位转换到14位”的编码, 即把一个8位的数据用14位来表示。

为什么要做EFM调制? 在数字系统中做EFM调制的原因有两个: 一是为了改善读出信号的质量, 二是为了在记录信号中提取同步信号。前面提过, 音频数字信号可能有连续多个字节的全1或者全0, 这个信号如果不作EFM调制就把它们记录到盘上, 光盘上形成较长距离没有坑槽, 读出时的输出信号就是一条直线(直流), 电路很难区分有多少个0或者有多少个1信号。而对于没有规律的音频数字信号, 读出时信号幅度和频率的变化范围都很大, 电路也很难把0和1区分开, 读出的信息就很不可靠。另外, 信号中的直流成分, 会使伺服系统的

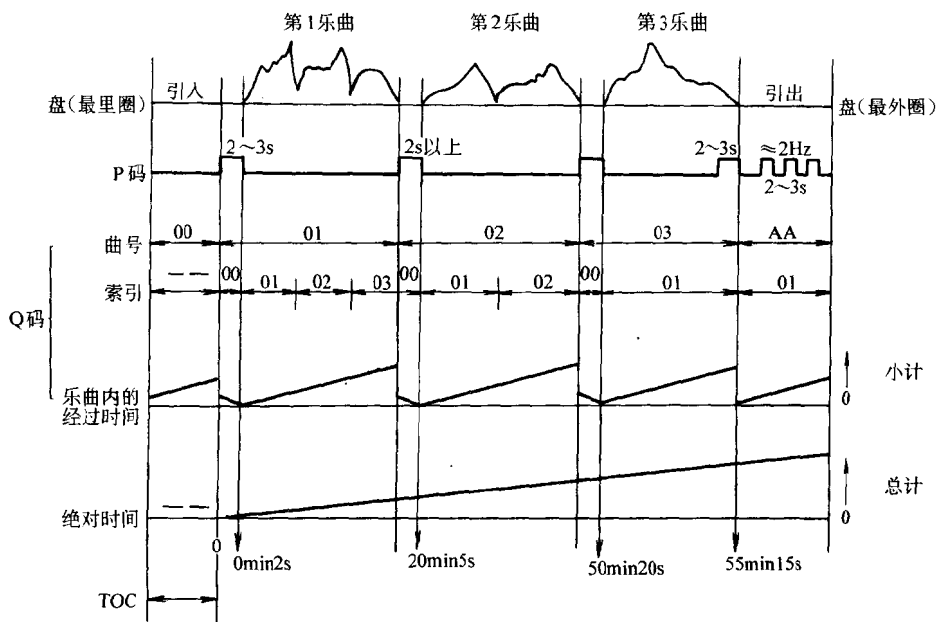


图 1-7 P 子码和 Q 子码的控制示意图

工作不稳定，并影响时钟信号的提取。

为了避免上述造成不稳定的因素，就要设法减少信号中的直流成分，降低信号的带宽。为此，记录在 CD 唱片上的信号必须尽量满足以下要求：

1) 记录信号波长的最小时间宽度 $T_{\min}$ 愈长愈好，而最大时间宽度 $T_{\max}$ 则愈短愈好。

2) 在记录信号的频谱中含有的低频成分和直流成分尽量少。

在 CD 系统中，伺服系统（用来保证激光头正确读取光盘信号）的误差信号与主信号一样也是由激光头拾取出来的，伺服误差信号主要是 5kHz 以下的低频成分，如果调制后的主信号低频成分较多，则伺服误差信号的信噪比就要降低，从而使伺服的稳定性变差，甚至无法进行伺服。

EFM 调制实际上就是要在连续的 1 之间插入若干个 0，并对 0 的连续长度加以限制。

理论分析和实验表明，把 0 的行程长度最短限制在两个，而最长限制在 10 个，光盘上的信号就能够可靠读出。即两个 1 之间至少要有两个 0，最多不超过 10 个 0。

2. EFM 调制的方法

我们知道，8 位数据有 256 种代码，14 位数据共有 16384 种代码。在这 16384 种代码中有 267 种代码能够满足 0 连续长度的要求。在这 267 种代码中选取 256 种，就得到了与 8 位数据相对应的 256 种代码，这就是 EFM 码。

将 256 个 EFM 码放进 ROM 检查表中, 8 位数据的 256 种代码与 256 个 EFM 码一一对应, 通过查表的方式即可完成 EFM 调制。解调时, 通过查反变换表即可恢复原来的 8 位数据, 完成 EFM 解调。

表 1-2 是部分 EFM 码变换表, 它是由 CD 技术标准 (红皮书) 规定的。

表 1-2 EFM 码变换表

序号	数据码	EFM 码	序号	数据码	EFM 码
0	00000000	01001000100000	128	10000000	01001000100001
1	00000001	10000100000000	129	10000001	10000100100001
2	00000010	10010000100000	130	10000010	10010000100001
3	00000011	10001000100000	131	10000011	10001000100001
4	00000100	01000100000000	132	10000100	01000100100001
5	00000101	00000100010000	133	10000101	00000000100001
6	00000110	00010000100000	134	10000110	00010000100001
7	00000111	00100100000000	135	10000111	00100100100001
8	00001000	01001001000000	136	10001000	01001001000001
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
123	01111011	10001000000010	251	11111011	10001000010010
124	01111100	01000000000010	252	11111100	01000000010010
125	01111101	00001000000010	253	11111101	00001000010010
126	01111110	00010000000010	254	11111110	00010000010010
127	01111111	00100000000010	255	11111111	00100000010010

此外, 当 EFM 码合并时, 为了继续满足行程长度的要求, 在各 EFM 码之间再增加了 3 个结合码 (又称耦合位), 于是在 CD 唱盘中 8 位的数据就转换成了 17 位的代码。

结合码的选取除了要满足 EFM 规定外, 还要尽量降低信号的低频分量。结合码是由 CD 系统的微处理器分析前后两个数据的结构来选取。

光盘刻录时, 是用 EFM 码的“1”去控制激光束的通断, 逢 1 转换通断状态, 逢 0 状态不变。激光通时, 原盘上烧出一个坑槽, 激光断时, 原盘上保留镜面状态。结合码的选取就是要使相邻两个数据形成的坑槽总长度和镜面总长度尽量相等, 这时低频分量最少。图 1-8 所示为 EFM 码与光盘坑槽关系。

由图 1-8 可见, 只有坑槽边缘是信号 1, 其他地方不管是坑槽还是镜面上的信号都为 0, 并且无论在坑槽, 还是镜面的数据位, 都只包含一个 1; 一个 1 加上至少两个 0 组成“3T” (T 为一个数据位在光盘上的记录长度, 大约 $0.3\mu\text{m}$), 而一个 1 加上最多 10 个 0 就是“11T”, CD 唱片上的坑槽及镜面间隔的长度对应地从 $0.9\mu\text{m}$ (3T) 到 $3.3\mu\text{m}$ (11T)。就是说, 经过 EFM 调制, 数据信号在 CD 光盘上仅形成 9 种长度的坑槽。