

第 1 章

计算机辅助光学测量的硬件与软件

计算机辅助光学测量的硬件系统由光学系统和计算机图像处理系统两大部分组成,图 1-1 为硬件系统的示意图。根据不同的工作原理和测量对象,可采用不同的光学系统,其主要部件为各种光源(激光和白光源),反射、分光、准直和扩束元件。有时也使用光纤作为光的传输器件以方便光路的布置,这些将在以后的章节中详述。计算机图像处理系统在 20 世纪 80 年代初大都由小型计算机构成。到 20 世纪 90 年代,微型计算机的快速发展已使其替代小型机成为图像系统的主机^[12],它因具有高性能、低价格、小体积、便携式等特点而受到普遍欢迎。图像系统的输入设备也基本上由固态摄像器件——电荷耦合器件(CCD)——承担。图像存储设备普遍采用可插入微型机扩展槽的各种不同性能和存储容量的图像卡。后来,模拟信号输出的 CCD 摄像机已被先进的数字 CCD 代替,它可以通过 USB 接口直接与微型计算机相连,无需另设图像卡,从而组成了体积小、质量轻的图像系统。

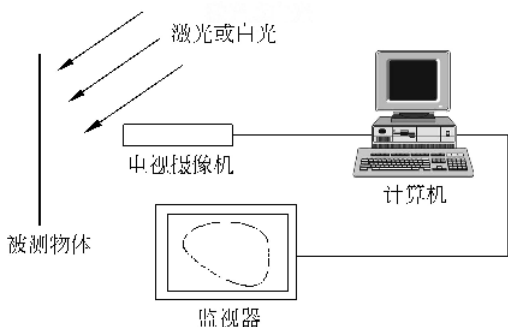


图 1-1 计算机辅助光学测量系统

软件是计算机图像系统的灵魂,它主要包括采图、存储、图像处理、各种运算以及结果数据的输出或图形输出。以 C 语言(包括 Turbo C, quick C, C++ 等)为主的计算机语言,由于其功能广、速度快已得到广泛应用。视窗(Windows)软件和 Linux 软件也已开始在图像处理中得到应用,这些软件具有同时运行多个应用程序和在应用程序之间传输信息的能力,这对充分发挥计算机性能提供了有效的工作环境。下面分别介绍这些常用设备的基本原理。

1.1 计算机图像系统的输入设备

1.1.1 摄像器件的一般概况

电子摄像器件可将二维辐射(光学图像)信息转换为容易处理和传输的电信号。从所接收的辐射来区分,主要是可见光以及不可见辐射(红外,紫外及 X 射线);从读出方式来区分,有电子束扫描摄像管(已很少使用,本书不作介绍)和以移位或电荷传输扫描的固态摄像器件。

摄像器件的主要性能指标有以下几方面:

(1) 光谱响应,也称光谱灵敏度。它表示器件对光波波长的响应。如硅靶视像管可工作在 $1.1\ \mu\text{m}$ 波长,用作近红外记录。普通 CCD 摄像机也可响应近红外波段。

(2) 光灵敏度,也称响应度。它表示给定光强(如单位辐射通量或单位辐射照度)均匀地照射到器件靶面所产生的输出信号电流。CCD 摄像机的光灵敏度可达 $0.01\ \text{lx}$ 。

(3) 光电变换特性,也称伽马度 γ 。它反映信号输出特性的斜率,通常可表示为 $S = \gamma E$,其中 E 为输入辐射或光量, S 为输出信号电流的变化。通常 γ 小于 1。

(4) 信噪比。用 dB 表示,通常应在 40 dB 以上,即信号比噪声大 100 倍。

(5) 暗电流,即无光照时摄像机的输出电流,一般为几到几十个 nA。暗电流会随时间和空间变化。

(6) 分辨率。表示器件对图像细节的鉴别能力。对电子束管,垂直分辨率受扫描线数的限制。一般 CCD 摄像机,根据制造过程采用像素表示,由于工艺限制通常对于一个像素摄像机靶面尺寸约为 $6\ \mu\text{m}$ 左右。目前普通 CCD 摄像机约为 780×680 ,高分辨率的摄像机可达 $1024 \times 1024, 1920 \times$

1035 像素。数码相机采用增大靶面分辨率可超过 2000 线。

(7) 帧率。表示器件每秒钟可输出图像数,它在考虑时间因素时十分重要。普通 CCD 帧率约为 15~25 帧/秒,某些高性能 CCD 可达 1000 帧/秒;而用于高速记录则高达 20 万帧/秒。

(8) 动态范围。它有两种含义,一是摄像机能感受一幅图像内最亮和最暗的光强比值;二是摄像机能容纳最亮一帧图像平均亮度和最暗一帧图像平均亮度的比值。某些视像管可达到 350:1,一般则为 60:1。

(9) 惰性。指输入光强发生变化时,输出信号的相应变化在时间上的滞后。

(10) 几何比率。通常以垂直与水平比为 3:4 作为标准,偶尔也有 1:1 标准。实际靶面尺寸有 6.6 mm×9 mm 和 9.5 mm×12.2 mm。

1.1.2 固态摄像器件

固态摄像器件是 20 世纪 70 年代在美国首先研制成的一种新型图像传感器。随着大规模集成电路工艺的不断完善和推广,许多高性能的摄像器件已在空间探测、光谱测量、高速传真、复印系统及各种成像技术领域得到广泛应用。由于它的基本工作原理为电荷通过半导体势阱发生转移,因此也称为电荷转移器件(CTD)。它主要包含两种类型:电荷耦合器件(CCD)和电荷注入器件(CID),尤以电荷耦合器件应用广泛。

CCD 器件是一种光电转换器件,有面阵和线阵之分,对于图像处理输入设备,主要采用面阵结构。CCD 器件是一种有独特功能的 MOS(金属氧化物半导体场效应管)集成电路,其基本结构如图 1-2(a)所示。它是在 P 型(或 N 型)硅衬底的表面上用氧化方法形成一层厚度约 0.1 μm 左右的二氧化硅层,再在二氧化硅上蒸镀一层金属膜并用光刻方法制成栅状电极。当在电极上加上比相应的绝缘栅场效应管的导通电压更高的偏压时,电极下面的空穴将远离二氧化硅表面,在二氧化硅层下形成一个表面耗尽层,也称表面势阱,势阱的深度与所加的电压成比例。电极上加的电压越高,则势阱越深。当一束光线投射到 CCD 器件时,光子穿过透明电极及氧化层进入衬底,产生电子跃迁,形成电子-空穴对,电子-空穴对在外加电场作用下分别向电极两端移动,这就是光生电荷。这些光生电荷将储存在电极形成的势阱中成为电荷包,因而可以把 CCD 器件看作在一个小方形或长方形固态表面形成的电荷的固定阵列。由于栅极间距很小,因此各栅极下面的表面势阱会发生耦合。当改变电极电压时,也即由图 1-2(a)中的 A 线加高电压

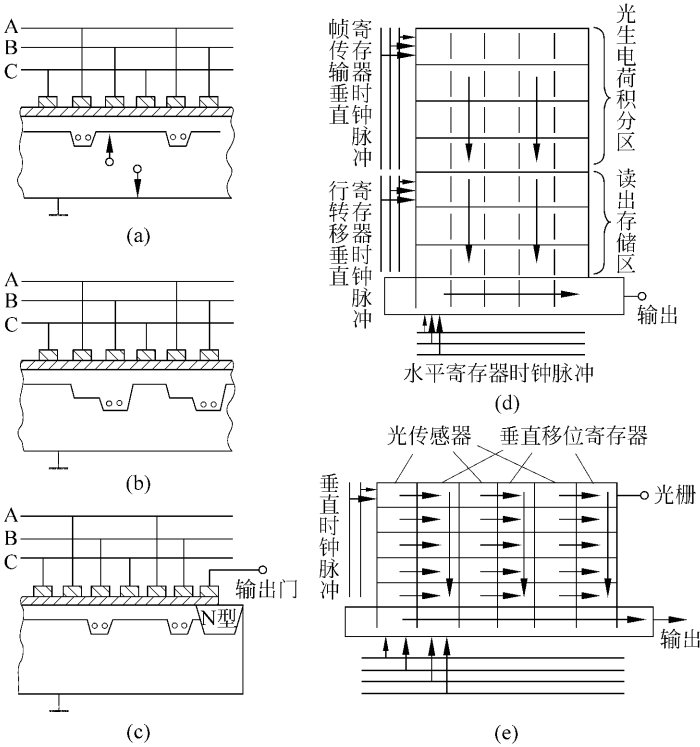


图 1-2 电荷耦合器件结构图

改为在下一组栅极 B 线加高电压时,电荷包将从 A 栅极下转移到 B 栅极下(见图 1-2(b),(c))。因此,如在栅极上加一个按时序变化的时钟脉冲电压,则电极下面的势阱也会按时序变化,这样电荷包也会从一端移到另一端,从而完成传送图像信号的功能,所以实际上 CCD 器件是一个移位寄存器。

面阵 CCD 器件根据转移和读出的结构方式可分为两种类型:帧转移 (FTCCD) 和行间转移 (ILTCCD)。使用帧转移方式,在场的正程时,景物经透镜成像在器件的光生电荷区形成光生电荷并进行时间积分;在场回扫时间内,在光生电荷积分区加帧转移高速时钟脉冲,使整场图像快速地转移到读出存储区。在下一个场扫描正程时间,新的图像信号在光生电荷积分区形成,而同时读出存储区在行转移垂直寄存器时钟脉冲的驱动下,以一步一行的方式将整场信号电荷转移到水平寄存器内,每一行在一个行扫逆程内完成,各行之间的间隔为一个行扫正程,因此正好在一场扫描正程时间内,

将读出存储区全部信号电荷输出完毕。同样,水平寄存器在水平时钟脉冲的驱动下,将信号电荷逐个位移到输出装置完成视频信号的输出,图 1-2(d)为这种转移方式的示意图。其中上面部分为光敏区,下面部分为存储区,其上覆盖金属层以遮光。光生电荷积分区有 $M \times N$ 个感光单元,读出存储区也是 $M \times N$ 个单元,而水平寄存器只有 M 个转移单元。

CCD 行间转移方式与帧转移方式在结构上不同,其光生电荷元件与存储元件相间排列在硅片上,它们一一对应。存储元件也称垂直移位寄存器,它采用不透明的金属栅列,底部仍然是一个水平读出寄存器(见图 1-2(e))。与帧转移方式一样,在光传感器接收图像产生光生电荷并进行积分的场扫描正程结束后,在垂直时钟脉冲的作用下,光传感器内的信号电荷便转移到相邻的垂直移位寄存器中,然后垂直移位寄存器中的信号电荷又以一次一行的方式转移到水平读出寄存器内,水平寄存器再逐位把这些信号电荷输出。

两种输出方法相比较,帧转移器件芯片面积较大;行间转移空间频率响应好、芯片小,但工艺实现比较困难。

除了 CCD 制成摄像机大量应用于各种图像设备外,电荷注入器件 CID 由于其特殊的功能——快速窗口扫描和帧复位功能,可以提高扫描帧率由 30 帧/秒增加到 715 帧/秒。这个快扫描功能是由控制 CID 摄像机的垂直移位寄存器的时钟脉冲来实现的。在需要摄取数据的行以常规速率($63.5 \mu\text{s}/\text{线}$)扫描而对要跳过的不需要摄取数据的行以 $0.4 \mu\text{s}/\text{线}$ 速率扫描,并且这种操作可以在多个窗口进行。另一种帧复位功能(frame reset)是在整个像扫描前中断正常扫描而只读很少几行甚至一行,这样,帧率会大大提高。美国 CIDTEC 公司的 CID 2250, CID 3710 摄像机具有以上功能。固态摄像器件是一种集成电路,具有体积小、质量轻、电压及功耗低、可靠性高、寿命长等一系列优点。它对红外频谱有较高的响应,具有理想的“扫描”线性,可进行行像素寻址,可变换“扫描”速度,畸变小,尺寸重现性好。CCD 器件还具有很高的光灵敏度(0.01 lx)和动态范围($106:1$),十分方便与同步信号、I/O 接口及微机兼容,组成高性能图像系统。

下面列举常用的 MTV-1801CB 黑白 CCD 摄像器件的具体技术参数供参考。

- ◆ 传感器: NXA-1011, 像素 604×588 , 帧转移型
- ◆ 扫描制式: CCIR 制, 行频 15625 Hz , 场频 50 Hz
- ◆ 分辨率: 大于 450 电视扫描线

- ◆ 输出信号: 1 V(峰-峰值),全电视信号正极性
- ◆ 光灵敏度: 0.02 lx
- ◆ 信噪比: 大于 46 dB
- ◆ 同步: 可内、外同步,并自动转换,外同步为负极性复合同步信号,幅度 4 V(峰-峰值)
- ◆ γ 校正: γ 为 0.5 或 1,可由 AGC 开关选择
- ◆ 工作温度: $-10\sim+50\text{ }^{\circ}\text{C}$
- ◆ 电源: DC 12 V,耗电 2 W

1.1.3 彩色摄像机

早期的彩色摄像机大多用滤色镜、分色棱镜、三只摄像管(用 R、G、B 分别代表红、绿、蓝三种色彩)组成的电子束管,后来又出现了设有分色棱镜而在管内直接镀在靶上的条状滤色器实现 R、G、B 分色作用的单管电子束摄像机。和单色摄像机一样,目前彩色 CCD 摄像机由于具备小型轻便和良好的性能而得到广泛使用。对于固态摄像机来说,彩色摄像机比黑白摄像机要求高得多,如光谱响应应适合彩色摄像要求,分辨率要高,固定图像噪声和峰值噪声要低,信噪比要高等。固态 CCD 彩色摄像机与电子束彩色摄像机一样亦有三片式和单片式之分,同样单片式彩色固态摄像机应用更为广泛。单片式彩色固态摄像机的分色作用是靠彩色滤色器,其制作方法有两种:一种是 CCD 芯片和滤色器分开制作,然后再组合在一起;另一种是在 CCD 芯片制作好后,再在其上制作滤色器。前一种方法工艺简单,目前用得较多。滤色器的结构也有两种:初期使用的是 R、G、B 垂直条重复间置的栅状滤色器;后来普遍使用的是棋盘格式滤色器。由于目前 CCD 摄像器件水平分辨率较低。使用对三基色同样的采样频率将难以匹配彩色电视机设计中 R、B 信号的限制,因而在滤色器中,将增加对 G 色光采样的数目,提高 G 信号的上限频率,以保持图像画面的彩色均匀性。图 1-3(a)为棋盘式滤色器结构示意图;图 1-3(b)为单片式 CCD 彩色摄像机结构图,它由摄像镜头,带棋盘式滤色器的 CCD 摄像器件、彩色信号分离电路以及彩色信号处理电路组成。摄像机所用 CCD 器件大都选用行间转移型。下面列出常用的 MTV-3301 彩色摄像机的技术性能。

- ◆ 靶面尺寸: 1/2 英寸(1 英寸=2.54 cm)
- ◆ 图像元素: 542×583
- ◆ 最低照度: 3 lx

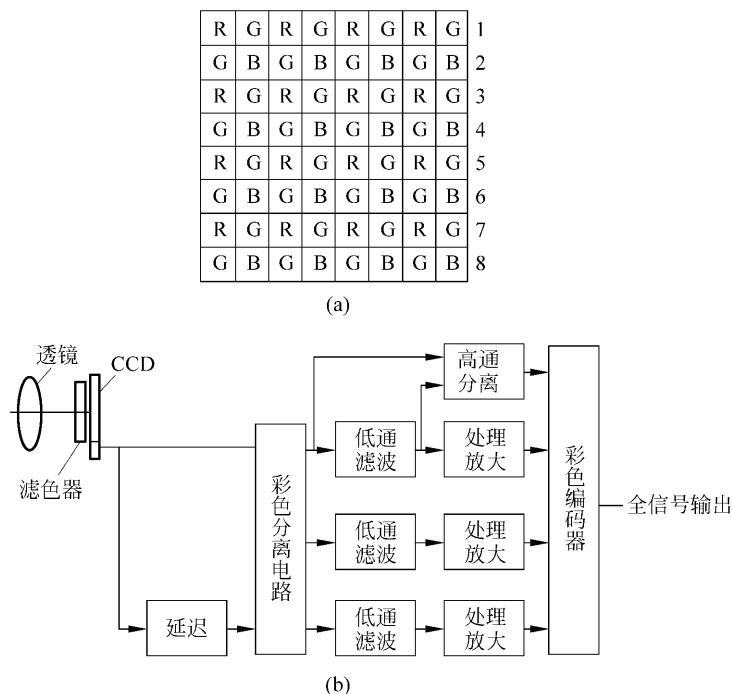


图 1-3 彩色摄像机的结构

- ◆ 水平清晰度：380 电视扫描线
- ◆ 信噪比：46 dB
- ◆ 电源：12 V, 3.6 W
- ◆ 外形尺寸：55 mm×62 mm×185 mm
- ◆ 质量：600 g
- ◆ 工作温度：0~40 ℃

1.1.4 数字摄像机

进入 21 世纪,数字摄像机已开始取代输出模拟信号固态 CCD 摄像头,数字摄像机的输出可以方便地与带有 IEEE1394 的微型计算机、笔记本电脑直接相连,某些数字摄像机还可经由 USB 2.0 串行口与计算机相连。数字摄像机无需图像卡,可与便携式笔记本电脑连接的方式使图像处理系统更为简单,将大大地促进计算机辅助光学系统的进一步推广应用。数字摄像机有彩色与黑白两种产品,下面列出德国 BASLER A100f 黑白数字摄像

机的技术指标:

- ◆ 传感器类型: CCD 2/3 英寸
- ◆ 分辨率: 1300×1030 像素
- ◆ 帧率: 最高 11.75 帧/秒
- ◆ 非线性: 12
- ◆ 扫描: 逐行
- ◆ 输出: 隔行
- ◆ 像素尺寸: $6.7 \mu\text{m} \times 6.7 \mu\text{m}$
- ◆ 光谱响应: $400 \sim 1000 \text{ nm}$
- ◆ 电源: 12 V(直流)
- ◆ 尺寸: $45 \text{ mm} \times 62 \text{ mm} \times 62 \text{ mm}$
- ◆ 质量: 320 g

下面再列举两种国产黑白及彩色数字 CCD(中国大恒公司)的技术指标,供参考。

(1) DH-1302UM

- ◆ 符合 USB 2.0 标准
- ◆ CMOS 单色数字图像传感器,分辨率: 1280×1024 像素
- ◆ 光学尺寸: 1/1.8 英寸
- ◆ 像素尺寸: $5.2 \mu\text{m} \times 5.2 \mu\text{m}$
- ◆ 模/数转换精度: 10 位
- ◆ 帧率, SXGA(1280×1024): 15 帧/秒; VGA: 25 帧/秒
- ◆ 图像窗口可无级设置,帧率也随之变化
- ◆ 增益可调
- ◆ 快门速度可调($1/100000 \sim 1 \text{ s}$)
- ◆ 外触发抓拍功能,光源控制接口
- ◆ 信噪比: $>45 \text{ dB}$
- ◆ 动态范围: 60 dB
- ◆ 灵敏度: 在 550 nm 的光源下为 $1.8 \text{ V}/(\text{lx} \cdot \text{s})$
- ◆ 清晰度: 750 线
- ◆ 工作温度: $0 \sim 60 \text{ }^{\circ}\text{C}$
- ◆ 工作湿度: $20\% \sim 80\%$
- ◆ 功耗: 额定功率 1.75 W; 最大功率 2.25 W
- ◆ C 制标准镜头接口

(2) DH-1302UC

- ◆ 符合 USB 2.0 标准
- ◆ CMOS 彩色数字图像传感器,分辨率 1280×1024 像素
- ◆ 光学尺寸: 1/1.8 英寸
- ◆ 像素尺寸: $5.2 \mu\text{m} \times 5.2 \mu\text{m}$
- ◆ 模/数转换精度: 10 位
- ◆ 帧率, SXGA(1280×1024): 15 帧/秒; VGA: 25 帧/秒
- ◆ 图像窗口可无级设置,帧率也随之变化
- ◆ 增益可调
- ◆ 快门速度可调($1/100000 \sim 1 \text{ s}$)
- ◆ 外触发抓拍功能,光源控制接口
- ◆ 信噪比: $>45 \text{ dB}$
- ◆ 动态范围: 60 dB
- ◆ 灵敏度(绿像素): 在 550 nm 的光源下为 $1.8 \text{ V}/(\text{lx} \cdot \text{s})$
- ◆ 清晰度: 750 线
- ◆ 工作温度: $0 \sim 60 \text{ }^{\circ}\text{C}$
- ◆ 工作湿度: $20\% \sim 80\%$
- ◆ 功耗: 额定功率 1.75 W; 最大功率 2.25 W
- ◆ C 制标准镜头接口

除了数字摄像头外,目前数码相机亦可用作图像记录设备替代数字摄像头用在计算机辅助光学测量中,它自备的大容量图像存储器使它可脱离计算机记录图像,更方便于野外、现场测试。数码相机价格便宜,但其缺点为镜头质量差、焦距变化小,有时不能得到理想的图像。

1.2 图像存储器——图像卡

由于微型计算机的普及,原来庞大的专用图像存储器已被淘汰,代之以在微型计算机扩展槽上加插一个或多个电路板,即通常所称的图像卡。由于集成电路的迅速发展,普通的单片图像卡可以完成 $1024 \times 1024 \times 8 \text{ b}$ 图像的存储。多片的已经可以满足存储 32 幅 $512 \times 512 \times 8 \text{ b}$ 的图像要求。在使用功能方面有单色和彩色图像卡。目前不少图像卡还装有各种不同功能的图像处理芯片,具有硬件快速图像处理能力。它们通过图像卡上的算术逻辑单元(ALU)、乘法器、查找表(LUT)可以实现对图像的卷积、形态

学、算术逻辑运算甚至高速傅里叶变换等功能。一些图像卡还具有窗口化功能,减少专用图像监视器,只要在微机上插上图像卡便可以实现各种图像处理功能,为图像处理的普及化提供条件。图 1-4 为一高性能图像卡结构图。这种高性能图像卡由三部分组成,即多扫描接口板、控制/显示板和备用帧存储缓冲器板。多扫描接口板可以通过选择器接收 4 个模拟摄像机输入和一个数字电视输入(RS-422 接口指标)。电视摄像机的视频信号经过一软件控制的范围和偏置处理,处理后的电视信号经 8 b A/D 转换; A/D 转换的速率可高至 15 MHz。由模数转换得到的数字数据进入查找表进一步调整像素值,随后数据被送到一个 2048 像素 $\times$ 16 b 触发缓冲器(FIFO buffer)完成图像窗口化和最佳使用帧存储器的功能。控制/显示板由每秒处理 15 兆指令、16 b 运算器和 Texas Instruments TMS 34010 图形显示处理器及其编程存储器、基本的 2 MB(2048 $\times$ 1024 $\times$ 8 b)帧缓冲器和一个包

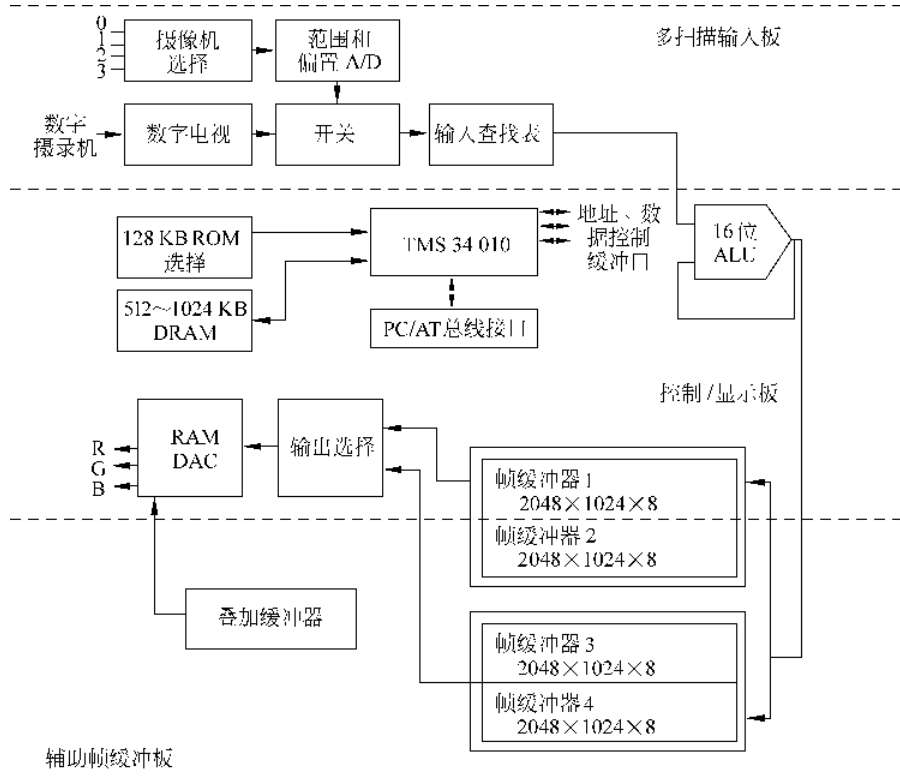


图 1-4 高性能图像卡的结构