

在数字系统中,除了有负责执行运算和控制的逻辑电路外,还有与外部世界交互的各种设备。作为数字电路设计者,准确理解外围电路的工作原理是非常必要的,否则所设计的逻辑电路有可能无法与这些外设正确交互。本章将硬件实验中常用的外设分为输入、显示、机电控制和其他四个种类,分别介绍这些外设的工作原理及其典型控制电路。在阅读本章内容的基础上可进一步查阅相关文献及芯片手册等资料,并阅读实验台或开发板的原理图,以此逐步积累电路知识,提高电路识图能力。

5.1 输入模块

5.1.1 开关和按键

开关是一种能够使电路开路,使电流中断或流到其他电路的电子元件。开关闭合时,电路导通,允许电流流过;开关断开时则形成开路,不允许电流流过。开关的种类很多,按照结构可分为按键开关、轻触开关、滑动开关、拨码开关、微动开关、船型开关、薄膜开关等,其中按键开关、轻触开关、滑动开关和拨码开关最为常用。

按键开关是一种按下去就可接通的开关,它的接触电阻小,手感好,按下或弹起时常有“滴答”的清脆声。根据按键开关的机械结构,通常可分为自锁和无锁两种。无锁型开关按下时接通,释放时断开。自锁型开关具有自锁功能,按键按下时,开关接通并保持;再次按下并释放后,开关断开,且按键弹起。

轻触开关是靠金属弹片受力弹动实现通断的,使用时轻轻点按开关按钮就可使开关接通,压力撤销后则断开。轻触开关属于按键开关的一种,只是行程较短,特点是体积小、重量轻,在数码、通信、家用电器、医疗器材、汽车等产品中得到广泛使用。

滑动开关由一组接触点和滑动轨道组成,当滑块滑动到不同位置时会改变接触点之间的连接,从而打开或关闭电路。滑动开关有二刀、三刀、四刀和六刀等多种型号,位数通常有二位和三位等。

拨码开关是一种能用手拨动的微型开关,通常也称指拨开关。拨码开关上的每个拨杆对应一个开关,拨至 ON 端时,表示该路接通,反之为断开,因此拨动拨杆可构成由 0 和 1 组成的二进制编码。位数为 n 的拨码开关可组成 2^n 种状态,当拨码开关处于某种状态时,对应的二进制编码可作为输入信号控制电路的运行。

图 5.1 是常用按键和开关实物图。图 5.1(a)、5.1(b)为轻触开关,图 5.1(c)为按键开关,包含自锁和无自锁两种结构,图 5.1(d)、5.1(e)分别是滑动开关和拨码开关,需通过“拨动”操作实现通断。无论哪种开关,由于其自身特有的机械结构,在闭合及断开的瞬间通常会伴有一连串的抖动,实际工作中应视情况做消抖处理。本书中将需要短时触发的称为按键,将需要长期保持通断状态的称为开关。

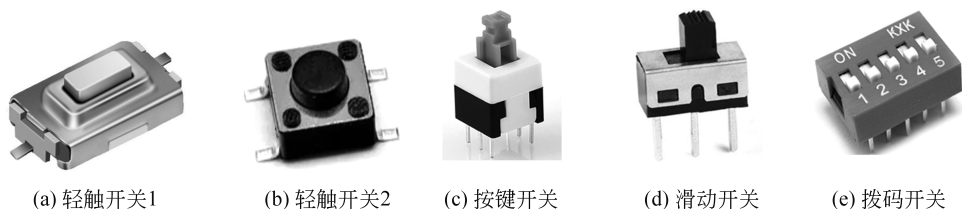


图 5.1 常用按键和开关实物图

图 5.2 是常见的按键电路原理图。图 5.2(a)中 S1 是一个两引脚的按键,下端接地,上端通过 R1 与 VCC 相接,BTN1 从 S1 和 R1 间引出,接控制器输入端。R1 阻值为 $10\text{k}\Omega$,除了起限流作用外,还作为上拉电阻。当按键未按下时,BTN1 通过 R1 与 VCC 相连,被钳位在高电平;按键按下后,BTN1 与 GND 相连,被拉至低电平。通过读取 BTN1 的电平值就可知道按键的状态。如果没有电阻 R1,对于内部无上拉电阻的控制器,端口将处于悬浮状态,无法确定电平的高低。图 5.2(b)电路中的 S1 上端接 VCC,下端通过 R1 接地,BTN1 在 S1 未按下时为低电平,按下为高电平。电阻 R1 起限流和下拉电阻的作用。图中 S1 使用了一个 4 引脚的按键符号,实体按键的引脚 1 和 2、3 和 4 在内部是连通的。从本质上来说,4 引脚按键也是一个两端口元件,增加的两个引脚在焊接后可增强元件在电路板上的附着力,绘制原理图时可按图示将相通的引脚短接。

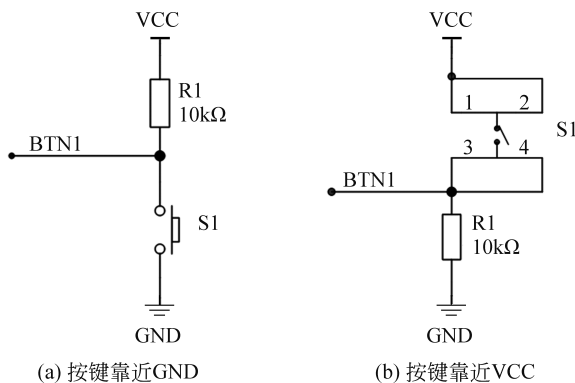


图 5.2 常见的按键电路原理图

图 5.3 是电路中常见的开关原理图,工作原理与图 5.2 类似。图 5.3(a)中的 S1 代表了一个 2 挡 3 脚的开关,其中 2 脚是常触点,拨动到位置 3 时与 VCC 相连,反之与 GND 相连。图 5.3(b)电路选用了 2 挡 6 脚的开关,该开关内部为两组独立开关,可同时控制两条线路的通断,其中 1、2、3 脚为一组,4、5、6 脚为另一组,1、5 脚是常触点。此处只控制一路信号,故将两组开关中对应位置的引脚直接相连,即当成了一个开关使用,开关拨至 2、4 脚时接 VCC,拨至 3、6 脚时接地。当然,也可任选一组使用,另一组做悬空处理。

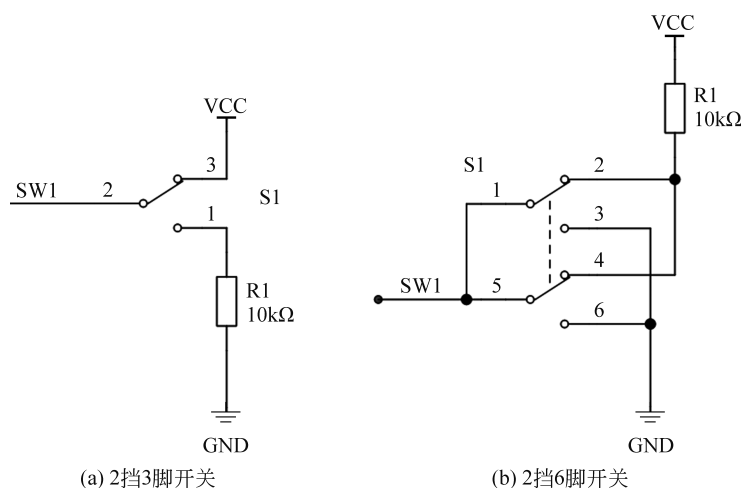


图 5.3 电路中常见的开关原理图

5.1.2 矩阵式键盘

根据 5.1.1 节介绍,通过控制器的 I/O 端口可以识别按键状态。当按键数量不多时,可以参考图 5.2 将每个按键与控制器的一个 I/O 端口相连,分别对按键进行识别,但是当系统中需要较多按键时,如常见的 POS 机、计算器等,如果还采用这种方案,I/O 口有可能不够用(按键仅是系统中的一个外设,显示、通信等功能也需要 I/O 端口),此时可以将按键排列成矩阵形式,通过逐行或逐列“扫描”的方式读取各按键的状态,这种设计方式称作矩阵式键盘。

图 5.4 是一个按逐行扫描方式设计的 4×4 矩阵式键盘原理图。16 个按键被排列成 4 行 4 列,共 4 条水平线和 4 条垂直线,交叉处通过按键相连,各列线再通过一个 $10\text{k}\Omega$ 电阻接至 VCC,这种设计方式只需占用 8 个 I/O 端口。

该矩阵式键盘的工作原理是:当键盘上没有按键按下时,所有的行线和列线处于断开状态,列线 SWC0~SWC3 呈高电平。当某键按下时,该键所在的行线和列线短路。例如,数字 6 键(SW7)按下时,SWC2 与 SWR1 短路,此时 SWC2 电平由 SWR1 电平决定。因此,可以把列线接到控制器的输入端,行线接到控制器的输出端,控制器发出信号使行线 SWR0 为低电平,其余三根行线 SWR1、SWR2、SWR3 为高电平,然后通过输入端读取列线的状态,如果 SWC0、SWC1、SWC2、SWC3 都为高电平,说明 SWR0 行没有键按下;如果读出的列线状态中有低电平,说明该列线和 SWR0 行线相交处的按键处于闭合状态。用同样的方法依次检查 SWR1 行、SWR2 行和 SWR3 行,即循环向 SWR0、SWR1、SWR2 和 SWR3 输出 0111、1011、1101 和 1110,通过读取 SWC0、SWC1、SWC2 和 SWC3 的状态,就可以判定哪个键被按下。

这里补充一点,读取按键状态时,应通过原理图去了解按键所处的行列位置,而不是只看电路板的实物布局。例如,图 5.5 是原理图 5.4 在实际布线时所采用的两种布局,其中图 5.5(a)中按键的位置和原理图是一致的,这种情况下选择原理图或实物图来设计扫描电路都是可以的,但是如果采用了图 5.5(b)布局,按键的行列位置从表面看与原理图完全不

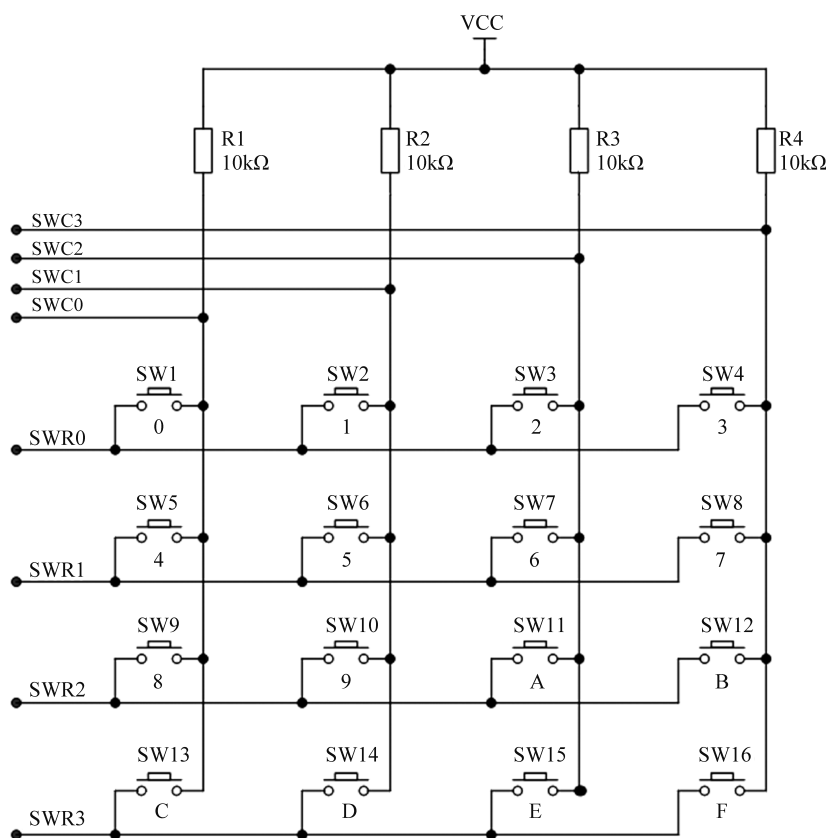


图 5.4 4×4 矩阵式键盘原理图

一样,但实际上只是为了某种习惯调整了按键的位置,并没有改变线路的连接关系,这种情况下如果按实物图中的行列位置去设计扫描电路必然会出现逻辑错误,因此,任何时候都应该以原理图为准。

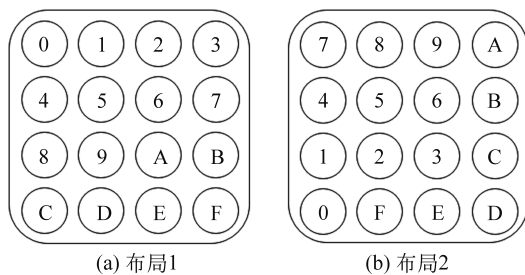


图 5.5 4×4 矩阵式键盘按键布局图

5.2 显示模块

5.2.1 发光二极管

发光二极管(Light Emitting Diode, LED)是一种应用广泛的半导体发光或显示元件,

它是由Ⅲ-Ⅳ族化合物制成的,如 GaAs(砷化镓)、GaP(磷化镓)、GaAsP(磷砷化镓)等半导体材料。LED 的核心是 PN 结,因此具有 PN 结正向导通、反向截止的特性。在正向电压下,电子由 N 区注入 P 区,空穴由 P 区注入 N 区,进入对方区域的部分少数载流子(少子)与多数载流子(多子)复合后发光。通过使用不同的材料及工艺,可以制造出红、绿、黄、白、蓝、橙等不同颜色的 LED。以 LED 为基本元件,还可以生产出数码管、米字管、符号管、点阵显示屏、LED 背光、LED 照明灯等多种产品。

图 5.6 是 LED 常用的两种封装形式,一种是直插型,另一种是贴片型,每种封装形式根据尺寸又可分成不同的型号,主要区别在于功率的不同。直插型封装的长脚为正极,短脚为负极。贴片型封装的正负极可以从正面和底面的印刷标识上来区分,从正面看标注彩色线条的一侧为负极,另一侧为正极;底部通常印有“T”字形或倒三角形符号,“T”字形上部横道对应的是正极,另一侧为负极,三角形符号则是靠近“边”的一侧为正极,靠近“角”的一侧为负极。

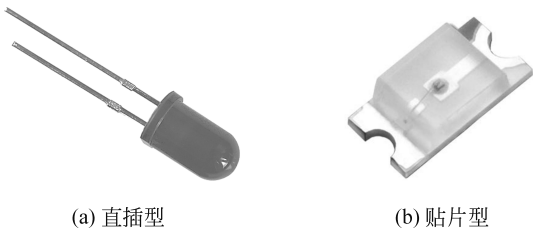


图 5.6 LED 常用的两种封装形式

LED 有额定的工作电流,使用时不能直接与电源相连,否则会由于电流过大烧毁器件。设计驱动电路时通常串联一个限流电阻,以保护 LED,限流电阻阻值可以根据 LED 数据手册中的参数 V_F 和 I_F 算出,计算公式为

$$R = \frac{V_S - V_F}{I_F} \tag{5-1}$$

其中, V_S 为电源电压, I_F 为正向工作电流,是发光二极管正常发光时的正向电流值,通常小功率 LED 的 I_F 是 20mA。LED 发光亮度与电流大小有关,工作电流在 2mA 时就可发光,20mA 时亮度较高,实际使用时可根据需要调整工作电流,确保亮度适合。 V_F 是正向工作电压,是在给定正向电流下(通常取 $I_F = 20\text{mA}$)测得的。一般小功率红、黄、橙、黄绿 LED 的 V_F 是 1.8~2.4V,纯绿、蓝、白 LED 的 V_F 是 3.0~3.6V。

表 5.1 是某款 LED 的光电参数,波长 630nm 表明为红光 LED,在 20mA 工作条件下, V_F 典型值为 2.0。假设 V_S 为 3.3V, V_F 取 2.0V, I_F 按 20mA 计算,代入式(5-1),得出限流电阻为 65Ω。计算得出的电阻值并非绝对要求,首先,商品化的电阻标称值本身就有一定误差;其次,制造商不会生产所有阻值的电阻,而是按照标准对照表中的阻值来生产,因此选取与计算结果接近的阻值即可。

表 5.1 某款 LED 的光电参数(温度=25℃)

参 数 名	符号	条件	最小值	典型值	最大值	单位
反向电流	I_R	$V_R = 5\text{V}$	—	—	10	μA
视角度	$2\theta_{1/2}$	—	—	130	—	deg.

续表

参 数 名	符号	条件	最小值	典型值	最大值	单位
正向电压	V_F	$I_F = 20\text{mA}$	1.6	2.0	2.6	V
峰值波长	λ_P		—	630	—	nm
主波长	λ_d		615	620	630	nm
半波宽度	$\Delta\lambda$		—	15	—	nm
光强	I_V		67	115	195	mcd

图 5.7 为 LED 常用电路原理图,其中 5.7(a)所示电路可用于电源指示灯,为减少电能消耗还可适当增大限流电阻, I_F 选择 $0.5\text{mA}\sim 3\text{mA}$ 即可。单片机或 FPGA 的 I/O 灌电流可达 20mA (具体参数以数据手册为准),因此可以用这些芯片的 I/O 口去控制 LED 的亮灭,如图 5.7(b)所示。其中,LD1、LD2 为控制端口的信号名,LD1 接 LED 阳极,高电平时 LED 点亮,低电平时熄灭;LD2 接 LED 阴极,高电平时 LED 熄灭,低电平时点亮。如果 LED 灯较多,需要的限流电阻相应增多,为节省器件占用空间,可以选择排阻进行连接,如图 5.7(c)所示。该电路中共有 4 个 LED 灯,其中 RN1 为排阻,内部封装了 4 个电阻,每个电阻与 1 个 LED 相连,图中采用总线式绘制方式,符号 LD[4:1]代表信号 LD4、LD3、LD2 和 LD1,分别与 4 个电阻相连。当同类信号位数较多或电路复杂庞大时,合理设置总线可以缩短绘制过程,且绘制出的电路图简洁明了。

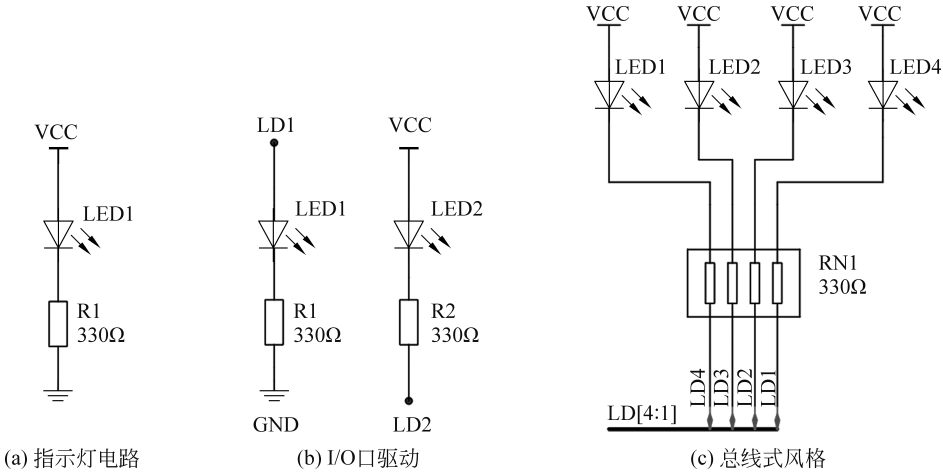


图 5.7 LED 常用电路原理图

当电路中需要点亮多个 LED 时,从工程实际考虑,并不推荐直接用 I/O 口驱动,因为 I/O 口驱动能力有限,长时间工作会增大控制器的功耗,甚至会烧毁芯片。更优的方法是在电路中引入三极管,通过小电流控制三极管的基极,实现三极管的打开与关闭,从而控制更大的电流从电源端直接流过 LED。图 5.8(a)采用了 NPN 三极管,当 I/O 口为高电平时,三极管导通,因三极管有电流放大作用,集电极电流可以达到毫安级,足以点亮 LED;当 I/O 口为低电平时,三极管关闭,LED 熄灭。图 5.8(b)采用了 PNP 三极管,原理与 NPN 三极管类似,只是控制电平相反。

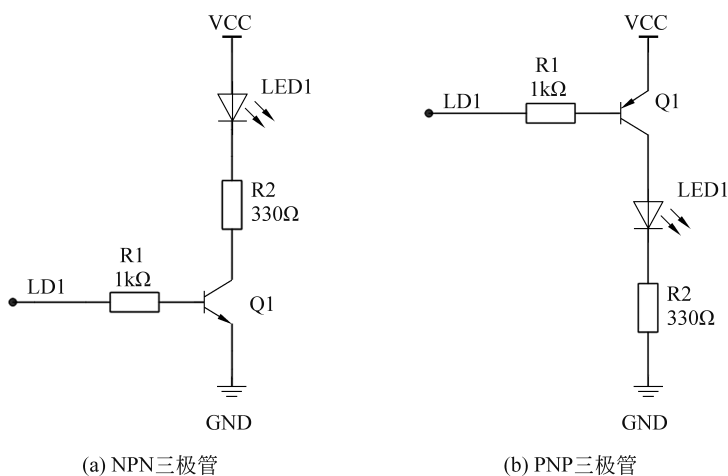


图 5.8 三极管控制 LED 原理图

5.2.2 数码管

数码管是将多个 LED 组成固定的字形,放入聚苯醚、ABS 等材料构成的外壳中,通过封胶、灌胶、抽真空等工艺加工而成。由于这些 LED 的引线在内部已经实现了连接,只需引出各个笔端和公共电极。

LED 数码管种类繁多,按照外形尺寸可分为 0.3 英寸、0.5 英寸、0.8 英寸等;按照显示的位数可分为一位、双位和多位;按照字形结构可分为 8 字形、米字形、符号管等;按照电路内部公共端的连接形式,可分为共阳极和共阴极两大类。图 5.9(a)中所有数码管的阳极接在一起,称为共阳极数码管,使用时公共端必须接电源正极;图 5.9(b)中所有数码管的阴极接在一起,称为共阴极数码管,使用时公共端必须接地。

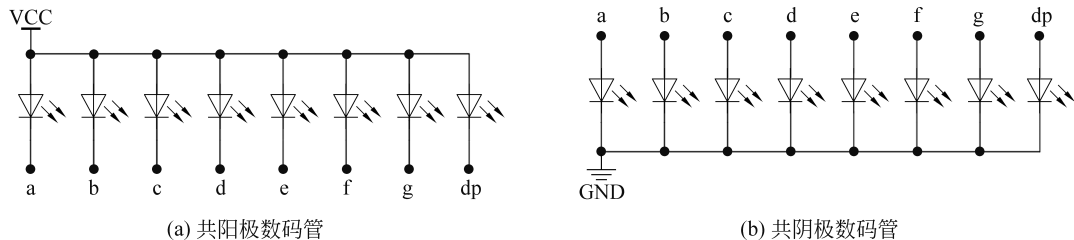


图 5.9 数码管原理图

数码管有两种驱动方式:一种是静态显示,另一种是动态显示。下面以 8 字形数码管为例介绍这两种驱动方式,8 字形数码管也称作七段数码管,内部有 8 个 LED,其中 7 个 LED 组成 8 字形,可显示 0~9 或自定义的一些图形,剩下 1 个 LED 用来显示小数点,这些段分别由字母 a、b、c、d、e、f、g 和 dp 表示,七段数码管结构图如图 5.10 所示,如需显示 3,只需点亮 a、b、c、d、g 五段。

静态显示的工作原理是将数码管的段选信号接在一个 8 位的数据线上,数据线提供显示的字形码。如果有 n 个数码管,需要 $8n$ 个数据线。送入字形码后,显示字形可一直保持,直到送入新字形码为止。图 5.11 是 1 位共阳极数码管显示原理图,数码管内部元件是

LED,因此数码管与控制器之间需要加限流电阻,DG 为公共端,共阳极数码管公共端接电源正极,A~DP 端为低电平时对应的段点亮,该电路用到 8 个 I/O 端口。实际电路中有时会在控制器和限流电阻间加一个缓冲器来提高驱动能力,如 74HC244、74HC245 等芯片。

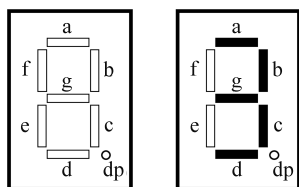


图 5.10 七段数码管结构图

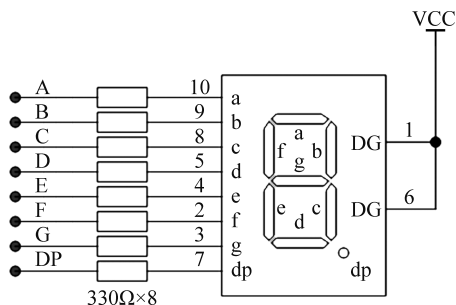


图 5.11 1 位共阳极数码管显示原理图

静态显示的优点是电路结构简单,显示稳定、清晰,不会产生闪烁,适用于固定信息的显示,它的缺点是随着显示位数的增加,需要的 I/O 引脚和译码器数量成倍增加,增大了硬件电路的成本和功耗,因此不适用于显示位数较多的场合。

如果需要显示较多位数,可以采用动态显示方式。动态显示也称为扫描显示,主要原理是将所有数码管的段选线(段选信号)并联在一起,并为每一位数码管的公共端增加选通控制信号(位选信号)。当输出字形码时,所有数码管都会接收到该码,但究竟由哪个数码管显示,取决于位选信号,所以只需要将待显示数码管的选通控制打开,该数码管就可以显示出字形,没有选通的数码管则不会显示。虽然某一时刻只有一位数码管被点亮,但只要扫描频率足够快(至少大于 24Hz),就可以利用 LED 的余辉和人眼视觉暂留作用,让用户感觉到这些数码管被同时点亮。

动态显示的优点是能够节省 I/O 口资源、具有较好的通用性和扩展性,适用于显示多位数字或需要频繁更新的信息;缺点是容易产生闪烁和干扰,显示效果不如静态显示稳定、清晰。

图 5.12 是一个 4 位共阳极数码管动态显示原理图,整个电路使用了 12 个 I/O 引脚(4 个位选信号和 8 个段选信号)。为了减小控制器功耗,图中使用了三极管。DS1~DS4 是位选信号,分别接至 PNP 三极管 Q1~Q4 的基极,低电平时三极管导通,相当于数码管公共端接 VCC,高电平时三极管断开,公共端即与 VCC 断开,通过这 4 个位选信号就可以选择对应的数码管。R1~R4 为上拉电阻,确保位选信号无效时,PNP 三极管处于关断状态,增加电路的可靠性。A~DP 是段选信号,接 NPN 三极管 Q5~Q12 的基极,高电平时三极管导通,低电平时断开,在公共端接至 VCC 的前提下,控制段选信号就可以显示对应的字形。R25~R32 为下拉电阻,确保段选信号无效时,NPN 三极管处于关断状态。有时为简化电路,R1~R4 和 R25~R32 会被省掉。图 5.12 中 LA~LDP 为内部网络名,是对电路中的线路或端口所做的标注,相同网络名实际上是连在一起的。采用这种方式可以避免因连线过多造成凌乱,方便电路识图。

在一些设计中,为了节省控制器的 I/O 口会使用串口转并口芯片来驱动数码管,如 74HC595。该芯片内部包含一个 8 位的串入并出移位寄存器和一个 8 位的存储寄存器,这

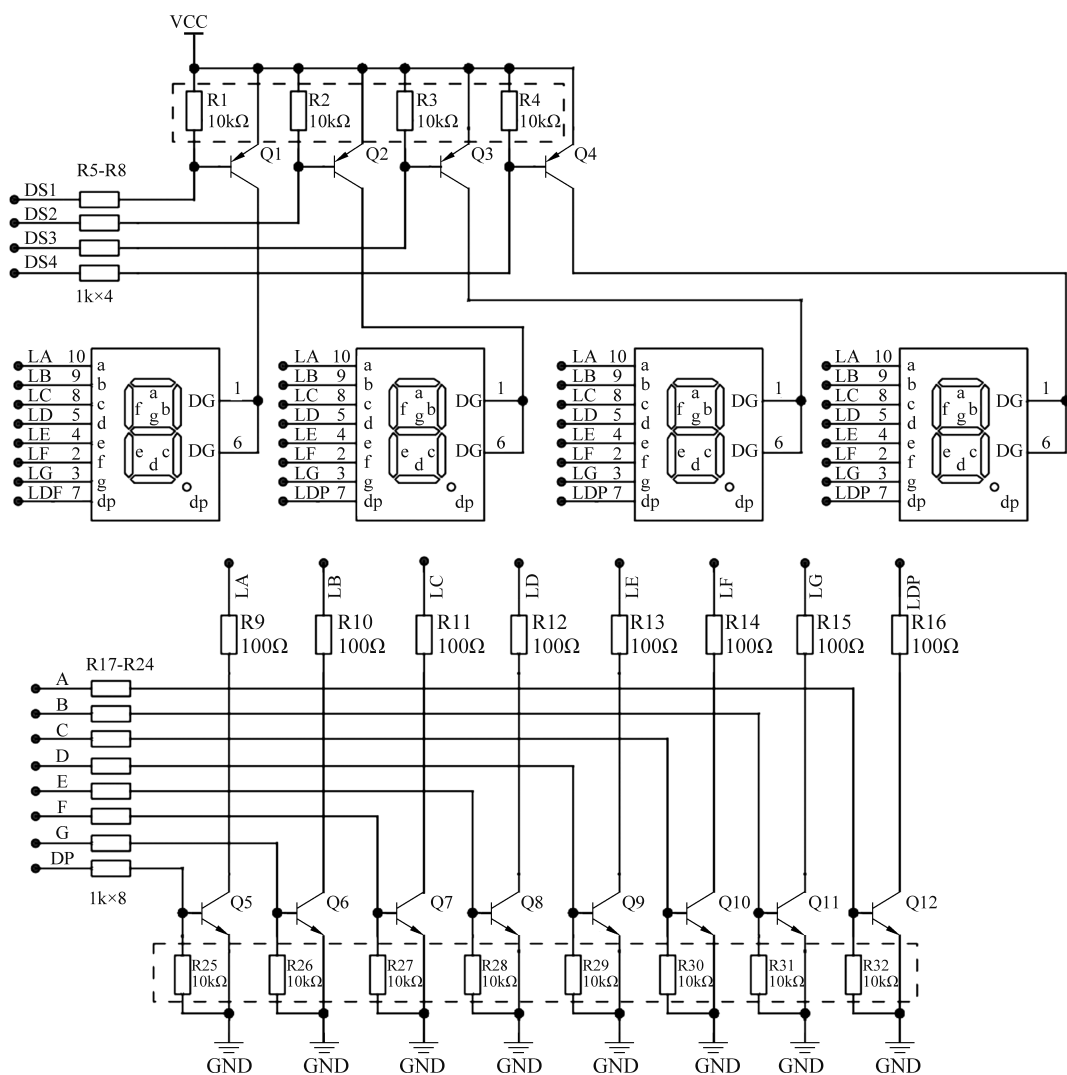


图 5.12 4 位共阳极数码管动态显示原理图

两个寄存器分别由时钟 SCK 和 RCK 控制, SCK 上升沿时将 SI 端输入的数据由高位至低位存入移位寄存器中, RCK 为存储寄存器的时钟引脚, 上升沿时将移位寄存器中的数据一次性存入存储寄存器中; SQH 为串行输出端口, 接下一片的 SI 端口可以实现级联; MR# 是复位信号, 低电平有效, 数据操作时保持高电平; OE# 是输出使能信号, 低电平时允许输出, 高电平时为高阻态, 实际应用时 OE 可固定为低电平。

图 5.13 是用两片 74HC595 驱动 4 位共阳极数码管原理图, 仅使用了 3 个 I/O 口。U1 的输出 Q0~Q7 用于控制数码管的段选信号, U2 的输出 Q0~Q3 用于控制数码管的位选信号。这 12 位信号按照先位选后段选的顺序经 DATA 端口(U1 的 14 脚)逐位传入, SCK 为移位时钟信号, 全部传入后利用 RCK 将数据锁存, 对应的数码管上就可以显示出字符。如果需要显示 4 位数据, 可参照图 5.12 电路中的扫描方式输出段选和位选数据, 只是这些数据是通过串行方式传入的。

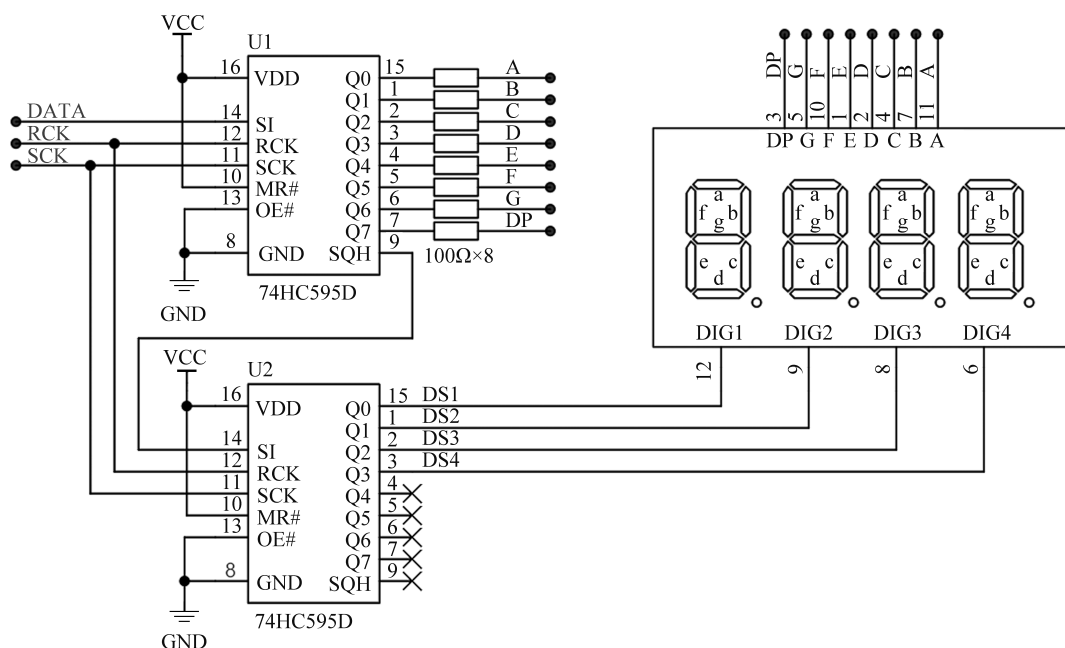


图 5.13 两片 74HC595 驱动 4 位共阳极数码管原理图

5.2.3 LED 点阵

LED 点阵由 LED 组成,通过灯珠的亮灭显示文字或图形,如果将多个 LED 点阵组装起来还可以形成显示屏,用来显示动画、视频等信息,广泛应用在各类公共场合。LED 点阵有单色、双色和全彩三类,可显示红、黄、绿、橙等颜色,有 5×7 、 5×8 、 8×8 、 16×16 、 32×32 等多种规格。

LED 点阵通常由显示模块、控制系统及电源系统组成。显示方式分为静态显示和动态显示。静态显示原理简单、控制方便,但当点阵中 LED 较多时硬件接线复杂,还会占用大量的控制器 I/O 端口,实际应用中一般采用动态扫描方式。动态扫描是通过逐行或逐列的方式控制 LED 灯的亮灭,优点是控制线路简单,便于扩展。

下面以 8×8 LED 点阵为例介绍动态扫描原理, 8×8 LED 点阵由 64 个 LED 组成,被排成 8 行 8 列,封装后对外引出 16 个引脚,其中 8 个接行线,8 个接列线。每个行线和列线的交叉点上放置一个 LED,根据接线方式可分为两种结构:一种是行共阳、列共阴,另一种是行共阴、列共阳,如图 5.14 所示,图中展示了它们的内部结构及相应的引脚图。

LED 点阵的扫描方式可分为行扫或列扫。以图 5.14(b)为例,行扫时,由于行线共阴,可以先将行线设置为低电平,然后根据需要设置列线的电平,列线为高电平时,交叉点上的 LED 亮;反之,LED 不亮。例如,希望第 1 行 LED 全亮,可将第 9 脚接低电平,再将 13、3、4、10、6、11、15 和 16 引脚接高电平即可。行扫就是轮流设置行线为低电平,然后通过列线控制该行线上 LED 的亮灭。同理,采用列扫时,由于列线所接为 LED 阳极,可以将列线设置为高电平,再根据需要设置行线的电平,行线为低,对应交叉点上的 LED 亮;反之,LED 不亮。例如,希望第 1 列全亮,将 13 引脚接高电平,9、14、8、12、1、7、2 和 5 引脚接低电平即可。列扫就是轮流设置列线为高电平,通过控制行线就可以控制该列线上 LED 的亮灭。无