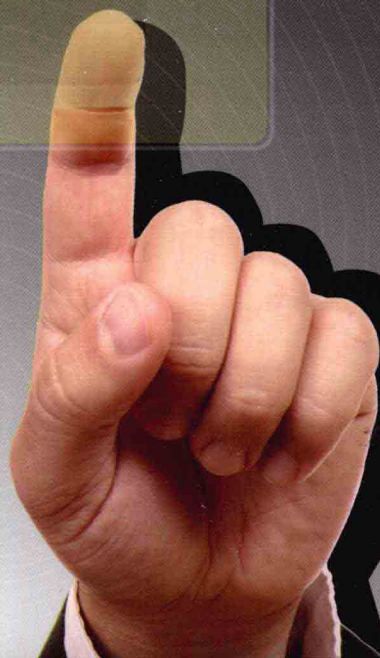


摸 触

翁小平 编著

感应技术及其应用

——基于 CapSense



北京航空航天大学出版社

内容简介

触摸感应技术及其应用

——基于 CapSense

翁小平 编著

北京航空航天大学出版社

内 容 简 介

从原理性和实用性出发,介绍了一般的触摸感应技术和赛普拉斯半导体公司基于 CapSense 模块的触摸感应技术。内容主要包括触摸感应技术概述,触摸感应技术的类型, CapSense 触摸感应技术,触摸按键、滑条、触摸板和触摸屏,触摸感应项目开发的流程和调试技术,触摸感应的低功耗应用,触摸感应的噪声缩减和抗干扰,电容感应触摸屏和多触点检测技术,用动态重配置实施 CapSense Plus 以及用 PSoC Express 实施触摸感应按键和滑条等。

本书适合对触摸感应技术感兴趣的读者和从事触摸感应应用开发的设计工程师阅读,也可作为大学电子技术相关专业高年级学生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

触摸感应技术及其应用:基于 CapSense/翁小平编
著. —北京:北京航空航天大学出版社,2010.1
ISBN 978-7-81124-997-2

I. ①触… II. ①翁… III. ①触摸屏—基本知识
IV. ①TP334.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 004627 号

© 2010,北京航空航天大学出版社,版权所有。

未经本书出版者书面许可,任何单位和个人不得以任何形式或手段复制本书内容。
侵权必究。

触摸感应技术及其应用——基于 CapSense

翁小平 编著

责任编辑 杨 昕 刘爱萍

*

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路 37 号(100191) 发行部电话:010-82317024 传真:010-82328026

<http://www.buaapress.com.cn> E-mail:emsbook@gmail.com

涿州市新华印刷有限公司印装 各地书店经销

*

开本:787×960 1/16 印张:14.75 字数:330 千字

2010 年 1 月第 1 版 2010 年 1 月第 1 次印刷 印数:4 000 册

ISBN 978-7-81124-997-2 定价:25.00 元



个角度对 CapSense 触摸感应技术进行介绍。首先,希望通过本书能使读者对触摸感应技术有一个总体的认知,对 CapSense 触摸感应技术有一个比较全面的了解;其次,希望读者了解这一技术的同时,能够掌握这一技术的软、硬件开发与调试方法和技巧。本书适合对触摸感应技术感兴趣的读者和从事触摸感应应用开发的设计工程师阅读,也可作为大学电子技术相关专业高年级学生的参考书。

本书的第 1 章、第 2 章和第 4 章介绍一般的触摸感应技术,包括触摸感应技术的概述、触摸感应技术的类型及触摸按键、滑条、触摸板和触摸屏。其余 7 章介绍基于 CapSense 的触摸感应技术及其应用。

感谢李石磊先生和北京航空航天大学出版社的策划,在写作过程中给予了许多宝贵的意见,使本书得以脱稿问世。也感谢我的同事秦政和李广海为本书提供了有价值的素材;胡敏华、柳玉仙、赵向阳帮助绘制了部分插图。由于编者的水平有限,错误和不妥之处难免,敬请读者批评指正。有兴趣的读者可以发送邮件到 WXP@cypress.com,与作者进一步交流;也可发送邮件到 buaffy@sina.com,与本书策划编辑进行交流。

编著者

2009 年 9 月

本书由李石磊先生和北京航空航天大学出版社的策划,在写作过程中给予了许多宝贵的意见,使本书得以脱稿问世。也感谢我的同事秦政和李广海为本书提供了有价值的素材;胡敏华、柳玉仙、赵向阳帮助绘制了部分插图。由于编者的水平有限,错误和不妥之处难免,敬请读者批评指正。有兴趣的读者可以发送邮件到 WXP@cypress.com,与作者进一步交流;也可发送邮件到 buaffy@sina.com,与本书策划编辑进行交流。



目 录

第 1 章 触摸感应技术概述	1
第 2 章 触摸感应技术的类型	4
2.1 基于电阻型触摸感应技术	4
2.2 基于电容型触摸感应技术	8
2.2.1 电场变化触摸感应技术	8
2.2.2 充电传输触摸感应技术	15
2.2.3 松弛振荡器触摸感应技术	16
第 3 章 CapSense 触摸感应技术	19
3.1 PSoC 基础	19
3.1.1 PSoC 的功能框图	19
3.1.2 PSoC 的数字模块	21
3.1.3 PSoC 的模拟模块	23
3.1.4 PSoC 功能模块的构造	26
3.2 CapSense 电容感应的基本概念	27
3.2.1 电容的物理基础	27
3.2.2 触摸应用人体的电容模型	28
3.2.3 开关电容及等效电阻	29
3.3 CapSense CSD 触摸感应模块	30
3.3.1 CSD 模块的硬件构造	30
3.3.2 CSD 模块的数学原理	36
3.4 CapSense CSA 触摸感应模块	37
3.4.1 CSA 触摸感应模块的硬件构造和工作原理	37
3.4.2 CSA 触摸感应模块的数学理论	40
3.5 CapSense CSR 触摸感应模块	41



3.6 基本线的概念和算法	43
3.7 CapSense 模块的参数和 API 函数	46
3.7.1 CSD 触摸感应模块参数	46
3.7.2 CSA 触摸感应模块参数	50
3.7.3 CSR 触摸感应模块参数	52
3.7.4 CapSense 模块的 API 函数	53
3.8 三种模块的比较	58
第 4 章 触摸按键、滑条、触摸板和触摸屏	61
4.1 触摸按键	62
4.2 触摸滑条	66
4.3 触摸板	72
4.4 触摸屏	76
4.4.1 触摸屏的主要类型和材料	76
4.4.2 触摸屏的典型特征	76
4.4.3 电阻式触摸屏原理	78
4.4.4 红外线触摸屏原理	80
4.4.5 表面声波式触摸屏原理	82
4.4.6 表面电容触摸屏原理	84
4.4.7 投影电容触摸屏	88
第 5 章 触摸感应项目开发的流程和调试技术	89
5.1 CapSense 触摸感应项目的开发流程	89
5.2 灵敏度和信噪比	97
5.3 用 RS232 串口调试触摸感应项目	98
5.3.1 用超级终端加 Excel 调试触摸感应项目	98
5.3.2 用专用串口软件调试触摸感应项目	107
5.4 用 I ² C-USB 桥调试触摸感应项目	115
5.5 CSD 用户模块触摸感应调试技巧	124
第 6 章 触摸感应的低功耗应用	131
6.1 影响功耗的因素	131
6.1.1 功耗在 PSoC 内各资源的分配	131
6.1.2 用 SLEEP 方式降低功耗	133

6.2 空闲方式	133
6.3 深度睡眠方式	134
6.4 充电泵	135
第 7 章 触摸感应的噪声缩减和抗干扰	136
7.1 布板与灵敏度和噪声	136
7.1.1 感应按键和地之间的间隙	137
7.1.2 感应按键之间的距离	137
7.1.3 滑条的尺寸和布板	138
7.1.4 触摸板	139
7.1.5 感应按键的走线	139
7.1.6 多层板	141
7.1.7 覆盖物	142
7.1.8 感应器在子板上	143
7.1.9 LED 背光	144
7.2 防水	144
7.2.1 使用参考感应块实施防水	144
7.2.2 使用保护电极实施防水	145
7.2.3 实施防水应用的参考设计	148
7.2.4 小水滴的防水策略	152
7.3 无线电干扰	152
7.3.1 无线电和 ESD 干扰分析	152
7.3.2 CSD 用户模块与 CSR 用户模块的抗干扰性能对比	157
7.3.3 无线电干扰的软件滤波	159
7.4 CapSense 触摸感应技术在手机中的应用	159
第 8 章 电容感应触摸屏和多触点检测技术	163
8.1 单触点和多触点的概念	163
8.2 电容感应触摸屏的结构和原理	165
8.2.1 投影电容触摸屏的基本概念	165
8.2.2 用 CapSense CSD 实现电容触摸屏的双触点手势应用	167
8.3 触摸屏的所有触点检测技术	173
8.3.1 自电容和互电容	173
8.3.2 用交叉点扫描技术实施电容触摸屏	175



8.3.3 使用全触点检测的电容触摸屏的构造	177
8.3.4 电容触摸屏的 ITO 图样	179
8.4 电容感应触摸屏的电学参数定义	181
8.5 电容感应触摸屏需要解决的问题	183
8.5.1 灵敏度与信噪比	183
8.5.2 手指的定位	186
8.5.3 LCD 的干扰	187
8.6 电容感应触摸屏用户模块 API	188
第 9 章 用动态重配置实施 CapSense Plus	193
9.1 什么是动态重配置	193
9.2 动态重配置的实施	194
9.3 怎样用动态重配置实施 CapSense Plus	195
9.4 用动态重配置实施 CapSense Plus 的注意事项	197
第 10 章 用 PSoC Express 实施触摸感应按键和滑条	199
10.1 PSoC Express 简介及系统级应用开发	199
10.1.1 芯片级应用开发	200
10.1.2 系统级应用开发	201
10.1.3 系统级应用开发项目的层次结构	201
10.2 PSoC Express 实施触摸感应按键和滑条	202
10.2.1 基于 PSoC Designer 5.0 的开发流程	202
10.2.2 PSoC Express 的开发环境	203
10.2.3 实施透明化的触摸感应应用开发	208
10.3 CapSense Express 实施触摸感应按键和滑条开发	211
附录 TX8 串口软件实现程序	222
参考文献	228

触摸感应技术概述

自从有了电,就有了开关。开关用于控制电气回路的导通与断开。开关的品种与形式多种多样,按键开关是开关的一种类型。它是通过人的手指按压开关的按钮,使开关的两个或多个机械金属触点产生闭合或断开。其中,按键开关又分为带锁的按键开关和不带锁的按键开关。带锁的按键开关是指手指按下开关的按钮后,按钮被自动锁定;手指松开按钮后,开关仍然保持被按下的状态;只有再次按下按钮,开关才回到原来的状态。不带锁的按键开关是指当手指松开按钮后,开关立即回到原来的状态。在大多数情况下,不带锁的按键开关主要是用于向系统提供信号,而不是由它的开关触点来直接控制电气设备的启动与关断。

在电子电路中,不带锁的按键开关被广泛使用。由于它不需要通过很大的电流,所以通常它的外形和体积都比较小,常被称之为轻触按键或微动开关。鼠标按钮和手机键盘就是不带锁按键开关的典型例子。现代电子设备和仪器仪表一般都具有人机交互功能,轻触按键是人机交互中输入设备里的主要元件之一。系统可以通过用户触按轻触按键的信息,包括触按时系统状态、触按的次数、触按的时间长短和哪一个键被触按来决定作出怎样适当的响应。

在人机交互界面发展的过程中,一种被称之为薄膜按键的技术在许多场合取代了轻触按键。薄膜按键(见图 1.1)可以根据用户的要求将多个金属触点嵌入到由数层薄膜组成的薄膜

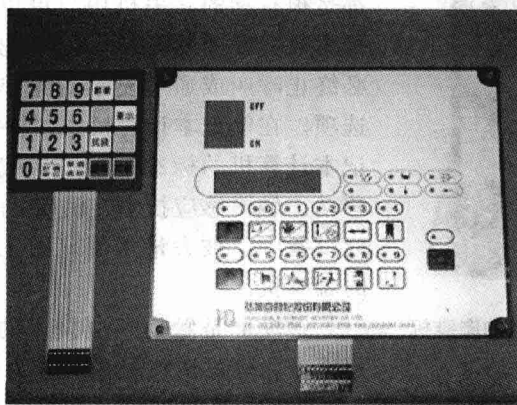


图 1.1 带薄膜按键的薄膜面板



面板中,并采用印刷的方法生成金属连线并通过 FPC 连接带使金属触点与外部的连接端子相连。薄膜按键触感小,可同时实现多按键,在美观的同时简化了面板的机械设计,此外,它还具有一定的防水性能,因而受到许多用户的欢迎。但由于薄膜按键需要定制,它的制作工艺复杂,导致其成本居高不下;同时,其机械的触点存在寿命的限制等因素,使得它的应用也受到一定的限制。

触摸感应技术给人机交互界面的输入设备带来了革命性的变化。它以捕捉人体手指的触摸动作信息为基本出发点,将手指触摸动作的信息转化成电信号并加以判断识别,使之与传统机械轻触按键的“按压”和释放动作等价。由于它不产生被触摸物实体的机械位移,也没有机械触点的磨损,所以触摸感应按键的寿命从理论上讲是半永久性的。另外,它仅靠手指触摸就可以产生用户输入信息,为工业设计师提供了更多想象和发挥创意的空间,设计出各种各样的美观、豪华的面板和人机交互界面。

主流的触摸感应技术使用的是电容感应原理,结合现代微电子技术集成电路能够可靠地捕捉手指的触摸信息。它不但可以实现单按键的检测,而且还可以同时实现多按键的检测。正是由于可以同时实现多按键的检测,使得触摸感应技术从原先仅有的触摸按键功能被扩展到了触摸滑条功能、触摸板功能和触摸屏的功能。这是普通的机械按键和薄膜按键技术所望尘莫及的。

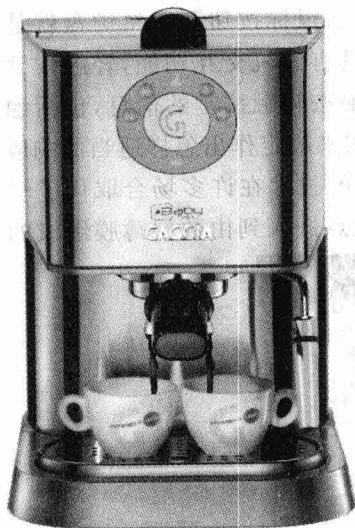


图 1.2 使用触摸感应技术的咖啡机

触摸感应技术可用于各种类型的电子设备中,实现控制功能的更小巧、更整洁也更灵活。在便携式消费设备中(尤其是手机、PDA 和笔记本电脑),它具有吸引力的界面和别具一格的产品特点,从而使系统的实际价值增加。同时,与采用普通开关和电位器的设计相比,它的设计成本和难度均较低,这对制造商和消费者而言都是很有利的。手机用户可以沿着话机显示屏滑动手指来改变呼叫的音量、屏幕的亮度或振铃的响度,而不必终止呼叫或通过复杂的菜单结构来点击相应的功能选项。在笔记本电脑中,“触摸板”传感器已经作为笔记本电脑的标准配置以取代外接鼠标来实现光标的移动。触摸感应技术在消费、工业、白色家电、汽车和医疗设备中已被大量采用。图 1.2 为使用触摸感应技术的咖啡机。

触摸屏是触摸感应技术的主要应用之一。根据触摸感应原理可以将触摸屏分为电阻式触摸屏、红外线触摸屏、声表面波触摸屏、表面电容触摸屏和投影电容触摸屏。在大屏中(如信息终端、ATM 机等)多使用电阻式触摸屏和红外线触摸屏,而在小屏(如手机、PDA 等)中多使用电阻式触摸屏

和投影式电容触摸屏。最近几年,投影式电容触摸屏技术发展迅速,有逐步取代电阻式触摸屏之势。自从苹果公司推出 iPhone 手机以来,多触点投影式电容触摸屏技术尤为引人注目。所谓多触点技术就是电容式触摸屏加专用软件在同一时刻能够同时检测到多于一个手指的触摸。使用这种技术,不但可以实现手指触摸具有类似鼠标的功能,如单击、双击以及滑条的功能,还可以实现一些手势功能,如两个手指的上下左右图像画面的拖动功能、两个手指的图像画面缩放功能和两个手指的图像画面旋转功能。另外该手机还包括快速闪屏功能,即当用户的手指在屏幕上快速滑动时,当前的画面迅速地切换到下一个或上一个画面。所有这些触摸功能给用户带来了前所未有的新体验。到目前为止,投影式电容触摸屏不仅可以同时检测两个触点,而且同时检测 $N(N>2)$ 个触点的投影式电容触摸屏技术已经问世。它为进一步丰富人机界面和新一代的人机交互方式提供了有利的条件和想象的空间。

触摸感应技术还在不断地发展。具有“力反馈的触摸屏”也已经问世,力反馈触摸屏技术给触摸屏添加了振动功能,当手指接触屏幕时将受到一个反作用力的振动,感觉就像是按下了一个真实的按键一样,它可以进一步改善用户的触摸感觉和触摸体验。而大屏的多触点技术和多手指手势应用将是触摸感应技术发展的新趋势。

未来,随着触摸感应技术的不断发展,投影式电容触摸屏技术将得到进一步推广和应用,成为人机交互的主要方式。同时,随着触摸感应技术的不断发展,触摸感应技术将与其他技术相结合,形成更加先进的人机交互技术。例如,触摸感应技术与语音识别技术相结合,可以实现更加自然的人机交互;触摸感应技术与图像识别技术相结合,可以实现更加智能化的交互。总之,触摸感应技术将在未来的人机交互中发挥越来越重要的作用。

第2章

触摸感应技术的类型

触摸感应技术的类型主要有基于电阻型的触摸感应技术和基于电容型的触摸感应技术。早期的触摸感应一般使用基于电阻型的技术,它的实现原理和电路都比较简单,使用分立元件、简单的模拟电路或简单的数字逻辑电路就可以实现,成本较低。但电阻型的触摸感应技术通常只能实现较少的感应按键个数,电路和人体之间不能完全隔离,给面板制作带来一定的难度,抗干扰性能也受到一定的影响,所以它大都被应用在简单的开关控制中,如台灯的控制。

基于电容型的触摸感应技术利用手指触摸面板时,手指与面板(非导电材料)下面的 PCB 板上的感应铜箔形成手指电容变化来实现触摸感应控制功能。由于手指触摸所产生的电容变化非常小,通常在 $0.1 \sim 3 \text{ pF}$,所以用于检测这个微小电容变化的电路和它的原理比电阻型的触摸感应技术要复杂。但由于现代电子技术的进步,电容型的触摸感应技术已经日臻成熟,成本也大幅下降,另外它还有很好的抗干扰性能,可实现多感应按键个数,由多感应按键进而可实现滑条功能、触摸板功能和触摸屏功能。现在电容型的触摸感应技术已经成为现代触摸感应技术的主流。

2.1 基于电阻型触摸感应技术

基于电阻型的触摸感应电子开关可以用分立的电子元件实现,也可以用数字逻辑电路来实现。555 电路可以很容易地实现触摸感应电子开关,但为了实现既有触摸按键的功能又有无级调光或调速的功能就需要使用专用的触摸感应集成电路。

图 2.1 是一个典型的使用分立元件实现的电阻型触摸通断电子开关电路。用手指触摸电路上的 2、3 铜箔覆盖层,由于手指的导电性,相当于在 2、3 铜箔上连接了一个电阻,则晶体管 Q2、Q3 和 Q4 导通,指示灯 L 发亮。如果触摸铜箔 1、2,则只有 Q1 导通,指示灯 L 不亮。

图 2.2 是用非门实现的电阻型触摸通断台灯控制电路。它采用一只 CD4069 中的 3 个非门 D1、D2 和 D3 组成开关控制电路,由于手指的电阻远小于 R_2 ,所以当手指触摸铜箔 M 时, C_2 上电压将直接被施加到 D1 的输入端使 D1、D2 和 D3 翻转,通过三极管 VT 控制继电器 K 进而来控制台灯的开和关。当手指移开时, D2 的输出电压通过 R_1 使 D1 的输入端的电压保持不变,而 D1 的输出电压将通过 R_2 给 C_2 充电(C_2 为低电平时)或放电(C_2 为高电平时),为

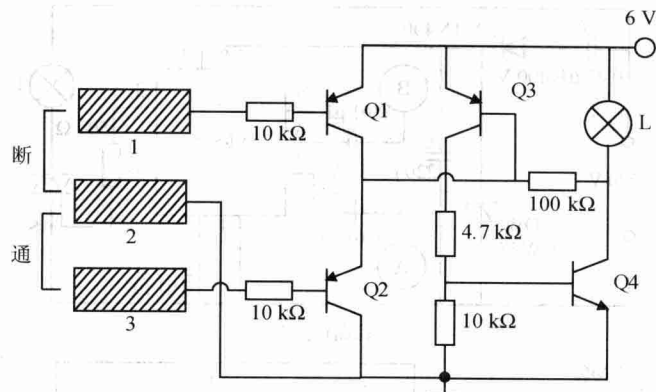


图 2.1 使用分立元件实现的电阻型触摸通断电子开关电路

下一次触摸改变状态作好准备。

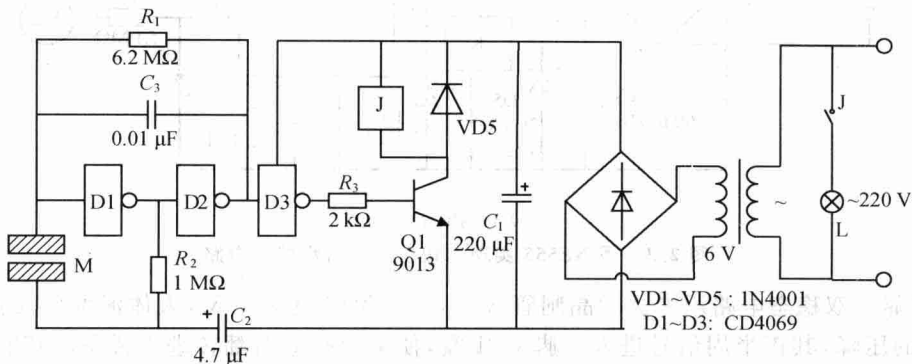


图 2.2 用非门实现的电阻型触摸通断台灯控制电路

图 2.3(a)是用 NE555 实现的触摸通断台灯控制电路。当人手触碰一下金属触片 A，人体上的杂波信号便通过 C_3 加到时基电路的 2 脚，2 脚被触发，整个触发器翻转，3 脚输出高电平，输出经限流电阻 R 加到可控硅控制极，可控硅 S 导通，灯 L 被点亮。

需要关灯时，用手触碰一下金属片 B，感应信号经 C_4 加到时基电路的 6 脚，6 脚被触发，3 脚输出低电平，可控硅失去触发电流而截止，电灯熄灭。电路中的 C_3 、 C_4 是耦合电容，能防止因个别元件的破坏而造成的麻电现象。电路中的 C_1 、 C_2 、 $D1$ 、 DW 组成 6 V 直流供电电源。

也可以在 NE555 电路的 2 和 6 脚输入端使用 $5.1\text{ M}\Omega$ 的电阻，输出通过继电器来控制电灯，如图 2.3(b)所示。触摸 $M1$ 可以开灯，触摸 $M2$ 可以关灯。

图 2.4 是用双 D 触发器制作的触摸开关。CD4013 是双 D 触发器，分别接成一个单稳态电路和一个双稳态电路。单稳态电路的作用是对触摸信号进行脉冲展宽整形，保证每次触摸

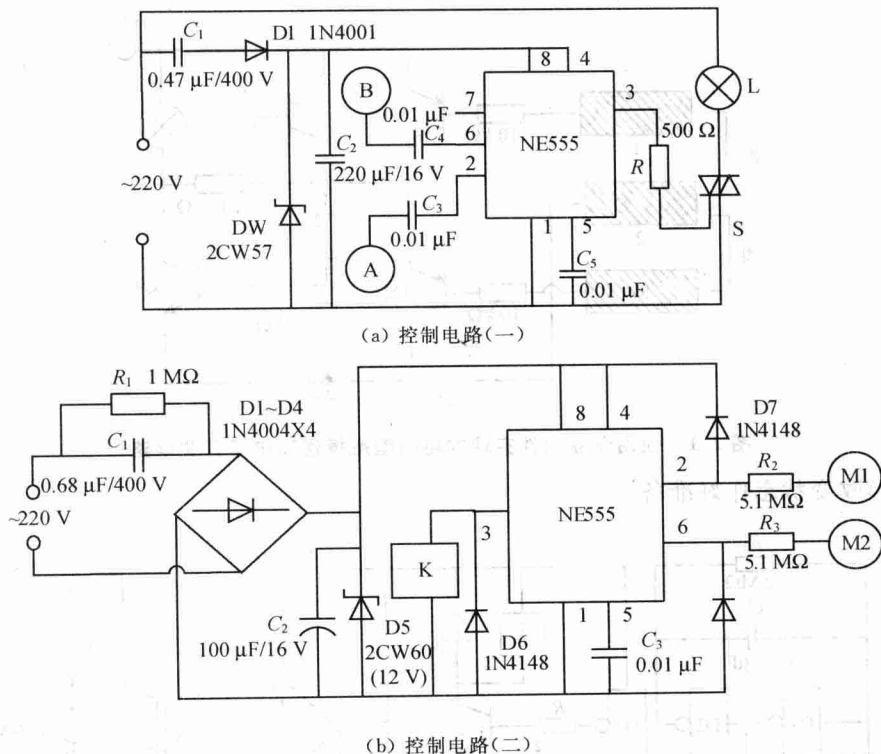


图 2.3 用 NE555 实现的触摸通断台灯控制电路

动作都可靠。双稳态电路用来驱动晶闸管 VS。当人手触摸一下 M, 人体泄漏的交流电在电阻 R_2 上的压降, 其正半周信号进入 3 脚 CP1 端, 使单稳态电路翻转进入暂态。其输出端 Q1 即 1 脚跳变为高电平, 此高电平经 R_3 向 C_1 充电, 使 4 脚电压上升, 当上升到复位电平时, 单稳态电路复位, 1 脚恢复低电平。所以每触摸一次 M, 1 脚就输出一个固定宽度的正脉冲。此正脉冲将直接加到 11 脚 CP2 端, 使双稳态电路翻转一次, 其输出端 Q2 即 13 脚电平就改变一次。当 13 脚为高电平时, VS 开通, 电灯 L 点亮。这时电容 C_3 两端的电压会跌落到 3 V 左右, 发光管 VD6 熄灭, 由于 CMOS 电路的微功耗特点, 所以集成块仍能正常工作。当 13 脚输出低电平时, VS 失去触发电流, 当交流电过零时即关断, L 熄灭。这时 C_3 两端电压又恢复到 VD5 的稳压值 12 V, VD6 发光用来指示开关的位置。由此可见, 每触摸一次 M, 就能实现电灯“开”或“关”, 它对外只有两根引出线, 故安装与使用都十分方便。

一种具有触摸按键式的带无级调光(调速)功能的集成电路 NB7232, 它与主要由双向可控硅元件及其他元件组成的外围电路一起, 可使用户采用触摸(或按键)的方式对光源(或马达)进行调光(或调速)及开/关的控制, 并具有调光(或调速)位置的记忆功能。该电路由零电平检测器、输入缓冲器、锁相环、逻辑控制器、亮度存储器、相角指示器、数字比较器和输出驱动

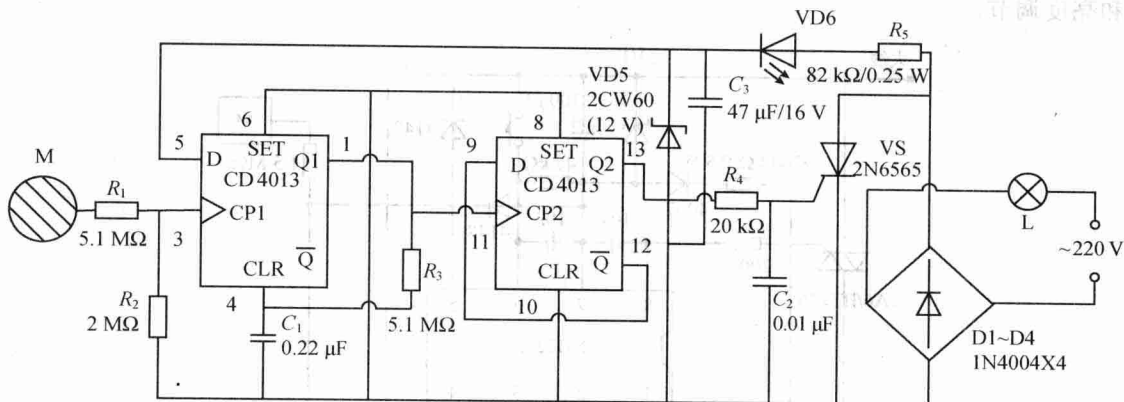


图 2.4 用双 D 触发器制作的触摸开关

器组成,其电路内部框图如图 2.5 所示。

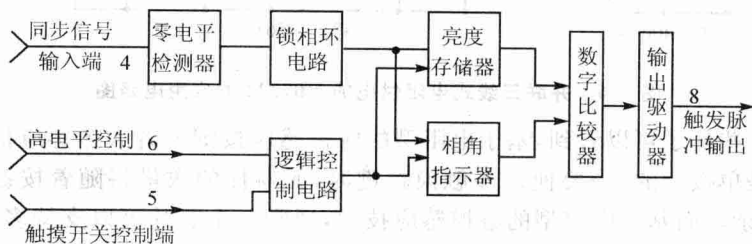


图 2.5 NB7232 电路内部框图

电路的基本工作原理为(调光为例):人体带电与市电同频,用手接触触摸片时,人体感应信号经输入缓冲器的削波,放大,整形,成为标准的 CMOS 电平。当触摸持续时间大于 50 ms 而小于 400 ms 时,控制逻辑部分将控制电路呈开关工作状态。当触摸持续时间大于 400 ms 时,控制逻辑部分将控制电路呈调光工作状态,输出触发脉冲相位角在 $41^{\circ} \sim 159^{\circ}$ 之间连续周期变化,并根据人的感受力,分为快、慢和暂歇 3 个过程。当触摸结束时,亮度存储器对该时的相位角进行记忆。若再施大于 50 ms 而小于 400 ms 的触摸,电路呈关闭状态,相位角仍由该部分记忆,保证电路在下一次的开状态时,保持原选定相位角光源保持原亮度。触发脉冲与市电的同步由锁相环保证,电路的工作时钟也由其产生。同时,电路还具有遥控(即远端触发)功能和渐暗功能(即由亮至暗,最后关闭),渐暗速度由外电路设置。

图 2.6 是采用并联三线式电阻供电的 NB7232 的应用电路图。触摸信号由铜箔 M 端经 $1.5 \text{ M}\Omega$ 电阻从 NB7232 的 5 脚输入,市电的同步信号由 4 脚输入,如果使用开关按键作为控制,则开关按键信号由 6 脚输入。带 * 号的 $100 \text{ k}\Omega$ 电阻为触发灵敏度调节电阻,可根据实际情况调节。8 脚为控制输出信号用于可控硅的导通与关断和导通时的导通角来实现灯的开关



和亮度调节。

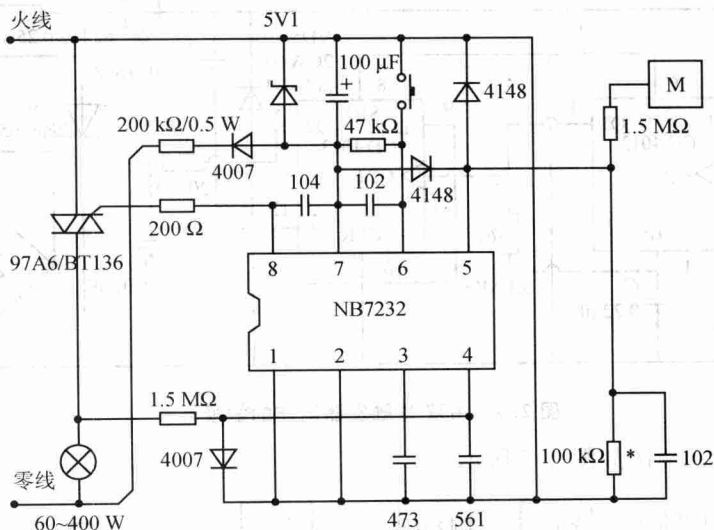


图 2.6 并联三线式电阻供电的 NB7232 的应用电路图

由上面的一些例子可以看到,基于电阻型的触摸感应按键或者人体感应信号的触摸感应按键基本上都是单按键的,当要使用多触摸按键时,元器件的数量将随着按键的个数成倍增加,系统变得复杂。而基于电容型的触摸感应技术,通常一个芯片可以支持多个感应按键,所以多感应按键的系统一般使用基于电容型的触摸感应技术。

2.2 基于电容型触摸感应技术

基于电容型的触摸感应技术按照电容感应的方式基本上可以分成三类:电场变化触摸感应技术、基于弛张振荡器的触摸感应技术以及电荷转移型的触摸感应技术。

2.2.1 电场变化触摸感应技术

电场传感器通常会使用一个数百 kHz 的正弦波,然后将这个正弦波信号施加在电容的一个极板导电块上,并检测另外一个导电块上的信号电平。当用户的手指或另外的导体对象接触(近)两个导电块的时候,接收器上的信号电平将改变。通过解调和滤波极板上的信号,可获得一个直流电压,这个电压随电容的改变而变化。将这个电压与阈值电压比较,即可以产生触摸/无触摸的信号。

PCB 板上两块(条)相互靠近的铜箔之间存在电容。这个电容的大小与两个铜箔之间的相对距离成反比,与两个铜箔之间的相对面积成正比。如果把这两个铜箔作为触摸感应传感