

进入 STM32 世界

本章是嵌入式技术学习的先导篇,介绍嵌入式系统的基础知识、STM32 单片机的引脚结构和单片机最小系统,阐述 STM32 程序的 4 种开发环境,并重点讲解使用 Proteus 软件绘制仿真电路图的方法。

知识目标

- (1) 了解嵌入式系统的定义和应用领域。
- (2) 熟悉 STM32 单片机的命名规则。
- (3) 掌握单片机最小系统的设计。
- (4) 了解 STM32 单片机的内部结构。

技能目标

- (1) 学会 Keil MDK 开发环境的搭建。
- (2) 能使用 Proteus 仿真软件绘制电路原理图。

素养目标

落实立德树人根本任务,提高学生的社会责任感和公民意识,让学生认识到嵌入式系统的应用不仅需要技术能力,还需要道德、法律等方面的素养,以保障公民的权益和社会利益。

1.1 嵌入式系统简介

嵌入式系统是一种电子设计方法,通过将微型计算机嵌入电子产品内部实现。嵌入式系统并没有一个非常明确的定义,但是几乎所有的现代计算机系统,除了个人计算机(PC)和服务器等专用计算机外,都可以被视为嵌入式系统,如空调、冰箱、洗衣机、智能手机、智能手表等。嵌入式系统表示将计算机系统嵌入其他电子产品中。

1.1.1 嵌入式系统的定义

嵌入式系统是以应用为中心,以现代计算机技术为基础,能够根据用户需求(功能、可靠性、成本、体积、功耗、环境等)灵活裁剪软硬件模块的专用计算机系统。关键词解释如下。

(1) 以应用为中心:强调嵌入式系统的目标是满足用户的特定需求。就绝大多数完整的嵌入式系统而言,用户打开电源即可直接享用其功能,无须二次开发或仅需少量配置操作。



(2) 专用性：由于嵌入式系统通常是面向某个特定应用的，所以嵌入式系统的硬件和软件，尤其是软件，都是为特定用户群设计的。

(3) 软硬件可裁剪：从嵌入式系统专用性的特点来看，嵌入式系统的供应者理应提供各式各样的硬件和软件以备选用，力争在同样的硅片面积上实现更高的性能，这样才能在具体应用中更具竞争力。

1.1.2 嵌入式系统的组成

嵌入式系统是集软硬件于一体的、可独立工作的计算机系统，其组成如图 1-1 所示。



图 1-1 嵌入式系统组成

硬件系统主要包括：嵌入式处理器、存储器、模拟电路、电源、接口控制器、接插件等，嵌入式处理器是嵌入式系统的核心，分为嵌入式微控制器(MCU,又叫单片机)、嵌入式微处理器(MPU)、嵌入式 DSP 处理器(DSP)、嵌入式片上系统(system on chip)。软件系统主要包括基础系统软件、可复用组件库、应用软件等。

1.1.3 嵌入式系统的应用领域

嵌入式系统在多个领域都有广泛的应用，以下是一些具体的例子。

(1) 工业：嵌入式系统在工业自动化中控制和监测机器人、生产线等设备，提升生产效率和质量。

(2) 医疗：嵌入式系统帮助实现医疗设备的智能化和便捷化，如心电监测仪、血糖仪等。

(3) 家庭：利用嵌入式系统的高效性能和智能化特性，实现家用电器集中控制和管理。家庭安防系统中的监控摄像头和报警器等设备也基于嵌入式系统设计，提供全方位安全保障。

(4) 交通：嵌入式系统在智能交通系统中负责优化控制、实时公交信息显示、车辆定位和导航等，提高交通效率并减少拥堵。

(5) 教育：嵌入式系统也在教育领域有所应用，如学生成绩跟踪和管理软件，以及交互式教学设备等。

(6) 航空航天：嵌入式系统在飞行控制系统、地面控制系统和通信系统中发挥作用，确保飞机安全和精确操控。



(7) 国防：嵌入式系统在导弹、雷达、无人机、潜艇等领域扮演关键角色，涉及制导控制、指挥调度、侦察监视等功能。

(8) 其他：嵌入式系统还被应用于金融、能源、公共设施管理等众多领域，不断拓展其应用范围和技术深度。

1.2 ARM 和 STM32 单片机

1.2.1 什么是 ARM

ARM 是 advanced RISC machine 的缩写，既代表一家公司，全球领先的半导体知识产权提供商，从事基于 RISC 技术的芯片标准的设计；又代表一种技术，具有高性能、低成本、低功耗的特点；还是一类微处理器的统称。

Cortex 是 ARM 公司推出的新一代处理器（类似 Intel 推出的“奔腾”处理器），Cortex 现有 3 种系列：Cortex-A 系列面向高性能计算应用，如智能手机、平板电脑、服务器等；Cortex-R 系列面向实时性要求较高的嵌入式应用，如汽车电子、工业控制等；Cortex-M 系列面向低功耗、低成本的微控制器，如 STM32 微控制器。

1.2.2 什么是 STM32 单片机

STM32 单片机（又称 STM32 芯片、STM32 微控制器）是意法半导体有限公司（ST 公司）推出的基于 ARM Cortex-M 架构的 32 位微控制器。

ST 公司是一家著名的芯片公司，根据 ARM 公司提供的芯片内核标准设计自己的芯片，既推出 STM32 芯片，又推出软件库：2007 年 10 月推出 STM32 标准库，实现基于标准库的 STM32 程序开发；2019 年 4 月推出 STM32CubeIDE，实现基于 HAL/LL 库的 STM32 程序开发，自动生成 STM32 程序初始化代码，减轻程序员的工作负担。

1. STM32 单片机系列

STM32 单片机主要包括以下系列。

(1) 主流产品：如 STM32F0、STM32F1、STM32F3，这些型号提供了广泛的功能和性能，适合多种应用场景。

(2) 超低功耗产品：如 STM32L0、STM32L1、STM32L4、STM32L4+，这些型号特别注重节能设计，适用于对电源管理有较高要求的场合。

(3) 高性能产品：如 STM32F2、STM32F4、STM32F7、STM32H7，这些型号提供强大的处理能力和丰富的外设接口，适用于高性能计算需求的应用。

2. STM32 单片机的命名规则

每种系列的 STM32 单片机又分为多个型号，如 STM32F1 系列又分为 STM32F103R6、STM32F103VCT6 等型号。单片机型号体现了单片机的封装形式、引脚数量、静态随机存储器（SRAM）、闪存（Flash）、工作温度范围等特性。下面以 STM32F103VCT6 为例介绍 STM32 型号中各部分的含义，如表 1-1 所示。



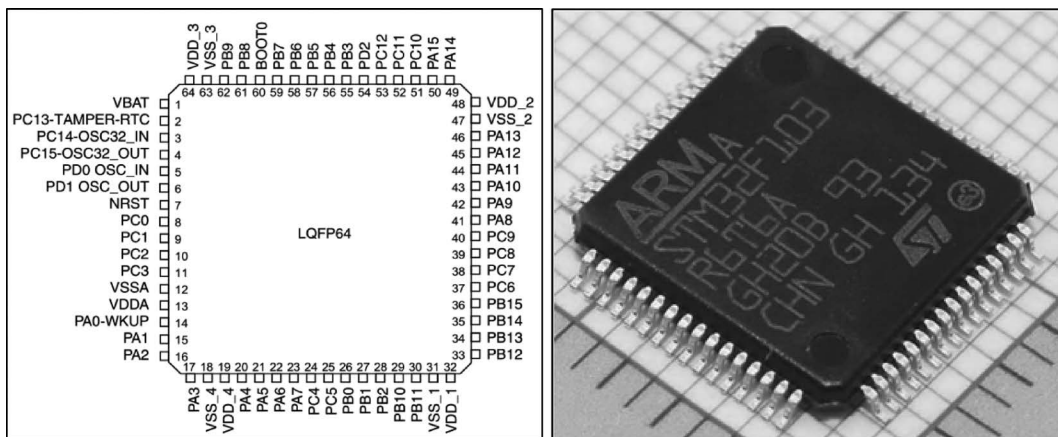
表 1-1 STM32 单片机型号中各部分的含义

序号	组成部分	具体含义
1	STM32	代表 ST 公司出品的基于 ARM Cortex-M 架构的 32 位微控制器
2	F	代表产品类别,如 F 代表基础型,L 代表超低功耗
3	103	代表产品系列,如 103 代表基础型,407 代表高性能
4	V	代表引脚数量,R 代表 64 脚,V 代表 100 脚,Z 代表 144 脚
5	C	代表 Flash 容量,如 6 代表 32KB,8 代表 64KB,B 代表 128KB,C 代表 256KB, E 代表 512KB,G 代表 1MB
6	T	代表 MCU 的封装,如 H 代表 BGA 封装,T 代表 LQFP 封装
7	6	代表 MCU 的温度范围,6 代表 $-40\sim 85^{\circ}\text{C}$,7 代表 $-40\sim 105^{\circ}\text{C}$

1.3 STM32 单片机的引脚和内部结构

1.3.1 引脚结构

本书选择的 STM32 的型号是 STM32F103R6,其引脚排布及外形如图 1-2 所示。



(a) 引脚排布

(b) 外形

图 1-2 STM32F103R6 单片机引脚排布及外形

STM32F103R6 单片机有以下 64 个引脚。

- (1) 电源引脚(11 个): VDD_1~VDD_4、VSS_1~VSS_4、VDDA、VSSA、VBAT。^①
- (2) 输入/输出引脚(51 个): PA0~PA15、PB0~PB15、PC0~PC15、PD0~PD2。
- (3) 复位引脚 NRST。
- (4) 启动引脚: BOOT0、BOOT1(与 PB2 共用)。
- (5) 时钟源输入/输出引脚: OSC_IN(与 PD0 共用)、OSC_OUT(与 PD1 共用)、OSC32_IN(与 PC14 共用)、OSC32_OUT(与 PC15 共用)。

^① 文中对引脚的描述保持与芯片上标注的一致,下同。



1.3.2 单片机最小系统

单片机最小系统是指单片机芯片及维持单片机运行至少需要的外部条件。在 STM32F103R6 单片机最小系统中,除 STM32F103R6 芯片外,还包含以下 4 个部分。

1. 电源

(1) VDD₁~VDD₄ 为数字量电源正极,内部连通;VSS₁~VSS₄ 为数字量电源负极,内部连通。

(2) VDDA、VSSA,模拟量电源正、负极,若不需要 A/D 转换或对模拟量精度要求不高时,可以直接与数字量电源正负极相连。

(3) VBAT 作为电池正极输入端,一般用于 RTC(实时时钟)供电。若不需要 RTC 供电,则直接与数字量电源正极相连。通常给定电源电压为 3.3V。

2. 复位电路

STM32 的复位方式有系统复位、上电复位、备份区域复位 3 种,其中系统复位又分为外部复位、WWDG(窗口看门狗)复位、IWDG(独立看门狗)复位、软件复位、低功耗管理复位 5 种,这里仅介绍其中的外部复位。

外部复位电路如图 1-3 所示,当系统上电或在运行过程中,按图 1-3 所示的 Reset(复位)键时,STM32 可按 BOOT 模式的设定进行复位。

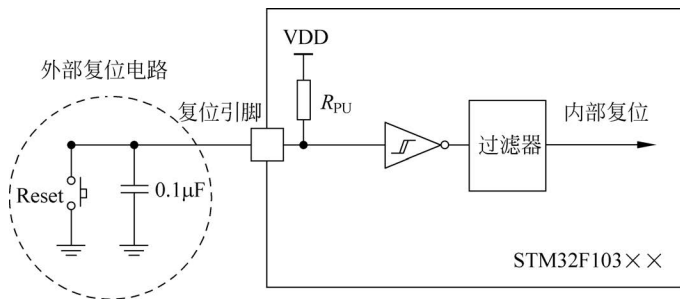


图 1-3 STM32 单片机的外部复位电路

3. 启动模式配置电路

STM32F103 系列单片机有 3 种启动模式,分别为主 Flash 存储器、系统存储器和内置 SRAM,如表 1-2 所示。

表 1-2 启动模式配置方法

启动模式选择引脚		启动模式	说明
BOOT1	BOOT0		
X	0	主 Flash 存储器	最常见的启动模式,用户程序首先下载到 Flash 中,按复位键立即启动
0	0	系统存储器	较常见的启动模式,进入 ST 公司预置的 BootLoader(启动加载程序),然后从串口下载用户程序
1	1	内置 SRAM	较少用,一般用于调试

STM32F103R6 单片机的 BOOT0 引脚号为 60,BOOT1 引脚号为 28。



4. 时钟电路

STM32 单片机的时钟源输入/输出引脚共有 4 个,可划分为以下 2 组。

(1) OSC_IN、OSC_OUT 引脚用于连接 HSE(high speed external clock,高速外部时钟,一般指高速外部晶振),HSE 可选频率为 4~16MHz,典型值 8MHz。

(2) OSC32_IN、OSC32_OUT 引脚用于连接 LSE(low speed external clock,低速外部时钟,一般指低速外部晶振),LSE 典型值 32.768kHz,用于向 RTC 提供震荡源,通常不接。

图 1-4 为 STM32 单片机外接晶振电路。

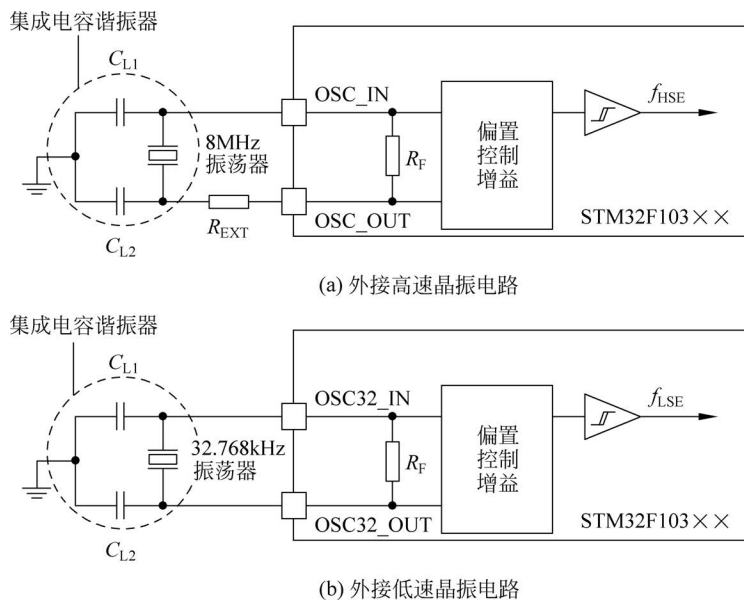


图 1-4 STM32 单片机外接晶振电路

无论是高速晶振还是低速晶振,当设计方案对时钟源精度要求不高时,可以用 STM32 单片机内部 RC 振荡器来代替外部晶振。HSI(high speed internal clock,高速内部时钟,一般指高速内部 RC 振荡器)的频率固定为 8MHz,LSI(low speed internal clock,低速内部时钟,一般指低速内部 RC 振荡器)的频率固定为 40kHz。

STM32 单片机最小系统典型电路如图 1-5 所示,在实际应用中,可根据需要对电路进行修改。

1.3.3 STM32 内部结构

STM32 内部集成了各种部件:内核(core)、系统时钟发生器、SysTick(system tick timer)、复位电路、Flash、SRAM、中断控制器、DIO(安全数字输入/输出)。

在高级外围总线 APB2(advanced peripheral bus)上挂接了高速外设(频率高达 72MHz): 3~5 组 GPIO(general purpose input/output,通用型输入/输出)、AFIO(alternate function input/output,复用功能输入/输出)、ADC(analog-to-digital converter,模拟数字转换器)、USART1(universal synchronous/asynchronous receiver/transmitter,通用同步/异步收发器)、定时器(TIM1、TIM8)。

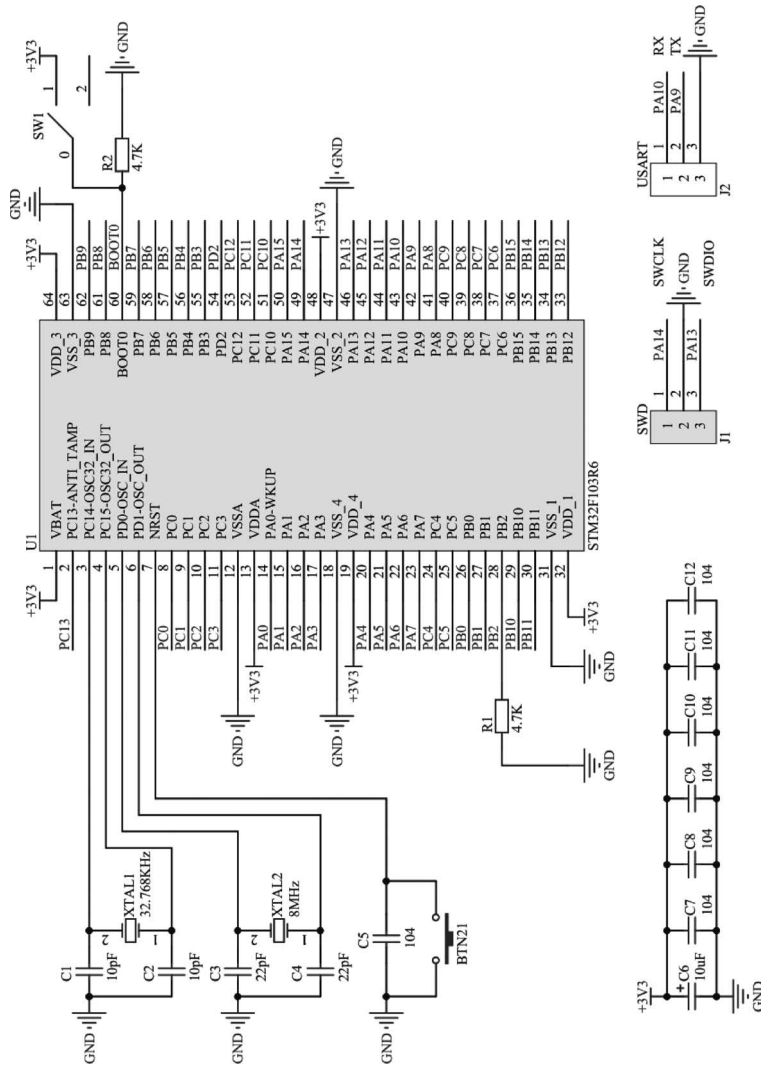


图 1-5 STM32 单片机最小系统典型电路①

① 仿真图中的电气符号和变量标注等保持与软件中一致，下同。



在高级外围总线 APB1 上挂接了低速外设(频率高达 36MHz): DAC(数模转换器)、IIC(内部集成电路)、SPI(串行外围接口)、USART2~5、定时器(TIM2~7)、CAN(控制器区域网络)。

挂接在 STM32 芯片外围总线上的高、低速外设,统称为内置外设,如 USART1、TIM1 等。内置外设引脚与 GPIO 引脚直接连接,是 STM32 芯片的组成部件。

STM32 内部结构如图 1-6 所示。

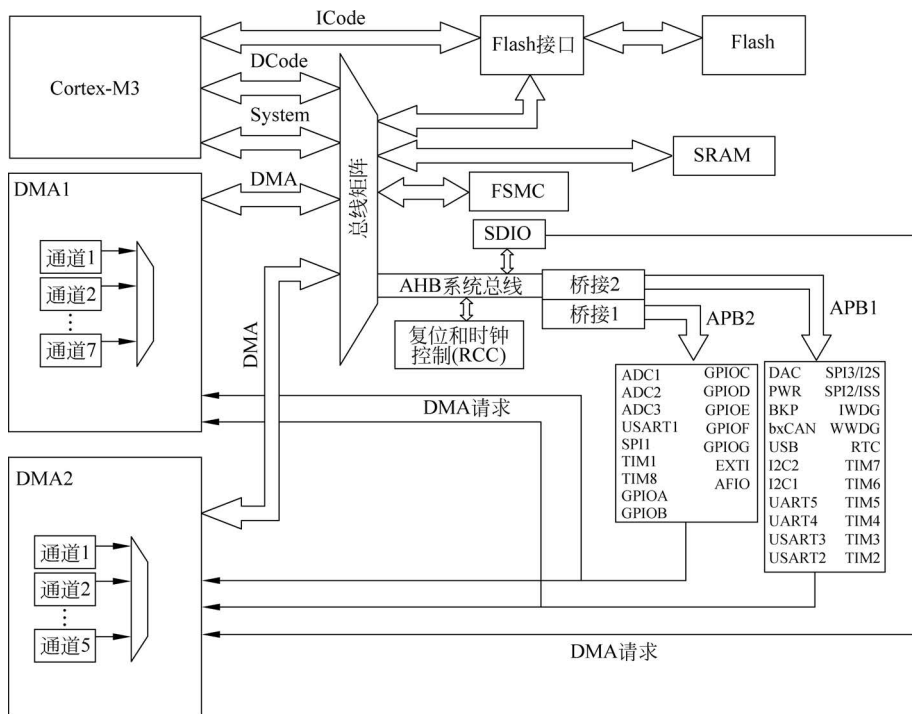


图 1-6 STM32 内部结构

1.4 STM32 程序的开发环境安装

STM32 程序有多种开发方法,这里仅介绍基于 STM32CubeIDE 的开发方法。首先使用 STM32CubeIDE 图形化配置工具生成工程框架与初始化代码,随后使用 Keil MDK 工具编写代码并生成 HEX 文件,然后结合 Proteus 虚拟仿真工具或实验板实物对程序进行调试,直至得到功能完善、运行稳定的 STM32 单片机程序。

1.4.1 图形化配置工具: STM32CubeIDE

STM32CubeIDE 是 ST 公司 2019 年 4 月推出的免费的图形化配置工具。STM32CubeIDE 由 2 个工具软件整合而成:一个是 STM32CubeMX,主要用于自动生成 STM32 程序初始化代码,减轻程序员的工作负担;另一个是 ARM 编程工具 TrueSTUDIO,主要用于编写 STM32 程序代码。

STM32CubeMX 内置 HAL/LL 驱动库,除了支持 TrueSTUDIO 外,还支持 Keil MDK、IAR 等主流 IDE。



安装 STM32CubeMX 的过程：首先下载 SetupSTM32CubeMX-6.7.0-Win.exe 安装包,随后在上网的环境下,双击 SetupSTM32CubeMX-6.7.0-Win.exe,按默认安装即可。

1.4.2 Keil MDK 开发环境

Keil 是一款嵌入式开发软件,以 μ Vision 作为集成开发环境,C/C++ 作为编译工具。Keil 针对不同类型单片机,推出了 4 款常用版本:Keil MDK、KEIL C51、KEIL C166、KEIL C251。

2005 年 Keil 公司被 ARM 公司收购,成为 ARM 的一个子公司。因此,Keil MDK 又称 MDK-ARM、Realview MDK。

搭建 Keil MDK 开发环境的步骤如下。

(1) 下载 MDK_5 开发环境,包括①Keil 编译器:MDK-523.exe;②标准库安装包:Keil.STM32F1xx_DFP.1.1.0.pack、Keil.STM32F4xx_DFP.1.0.8.pack;③Keil 注册机:keygen.exe;④J-Link 烧写软件:Setup_JLinkARM_V478j.exe。

(2) 安装 Keil MDK 编译器:双击 MDK-523.exe。

(3) 分别双击标准库安装包:Keil.STM32F4xx_DFP.1.0.8.pack、Keil.STM32F1xx_DFP.1.1.0.pack。

(4) 取出软件许可证:双击 keygen.exe,并对 Keil5 进行注册。

① 以管理员身份运行 Keil,选择 File→Licence Management 菜单命令,复制 CID(许可证唯一标识)。

② 以管理员身份打开 keygen.exe,粘贴 CID,选择 ARM,单击 Generate 按钮,得到注册号并复制。

③ 在 Licence Management 对话框中粘贴注册号,单击“添加”按钮进行注册。

(5) 双击“J-Link 烧写软件\Setup_JLinkARM_V478j.exe”,安装 J-Link 仿真器驱动程序。

(6) 使用 ARM 仿真器将 PC 的 USB 口和嵌入式试验箱中 STM32F103 核心版的 SWD 口连接起来。右击“此电脑”,选择“属性”→“设备管理器”→“通用串行总线控制器”,直到看见 J-Link driver 字样,如图 1-7 所示。



图 1-7 显示 J-Link driver

1.4.3 虚拟仿真工具: Proteus

Proteus 软件是英国 Lab Center Electronics 公司推出的 EDA (electronic design automation,电子设计自动化)工具软件。它不仅具有其他 EDA 工具软件的仿真功能,还能仿真单片机及外围器件。Proteus 支持电路原理图设计、电路仿真及 PCB(printed circuit board,印刷电路板)设计等“三合一”设计。Proteus 建立了完备的电子设计开发环境,功能十分强大,不仅可以仿真 51 系列、AVR、PIC、ARM 等主流单片机,还可以直接在基于原理图的虚拟原型上编程,再配合显示及输出,能看到运行后输入/输出的效果。

安装、汉化 Proteus 的过程:首先下载 Proteus 8.13 SP0 Pro.exe 安装包和 proteus 汉化包;然后双击 Proteus 8.13 SP0 Pro.exe,按默认安装,完成后生成 Proteus 8 Professional 文件夹;最后将“proteus 汉化包\Translations”代替“Proteus 8 Professional\Translations”。



1.4.4 STM32F103 嵌入式实验箱

生产嵌入式实验箱的厂商不少,本书采用百科荣创(北京)科技发展有限公司生产的“嵌入式创新实训系统”,内含 1 块 STM32F103 核心板和 20 多块功能模板,其中 STM32F103 核心板的核心部件是 STM32F103VCT6。

1.5 Proteus 仿真工具的使用

1.5.1 任务目标

使用 Proteus 软件绘制如图 1-8 所示的 LED 控制电路,存入“E:\DL.Pdsprj”中,其中的虚拟元器件如表 1-3 所示。

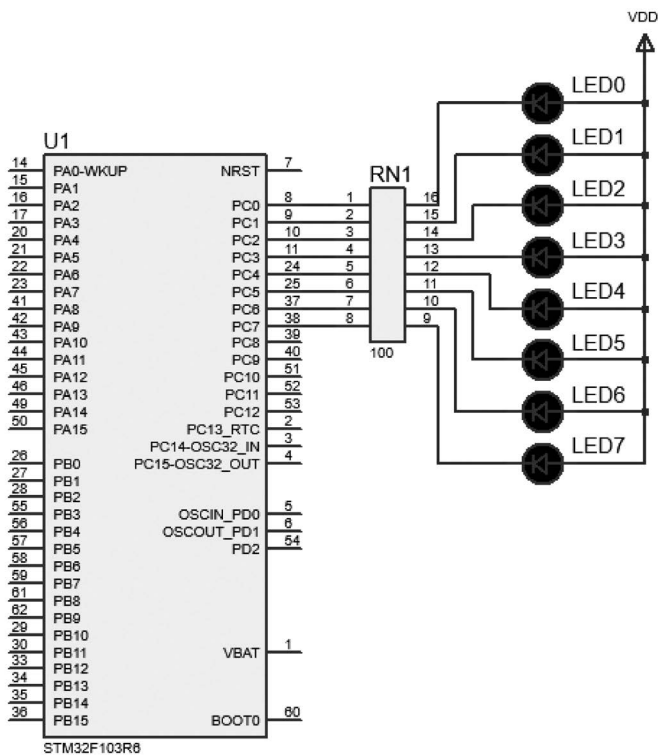


图 1-8 LED 控制电路

表 1-3 LED 控制电路中的虚拟元器件

名称	说明	模式
STM32F103R6	单片机	元件模式
RX8	排阻	元件模式
LED-GREEN	绿色发光二极管	元件模式
VDD	电源	终端模式