



一种 m 序列信号产生实验设计

刘 恒, 黄晓钰, 孙 晋, 刘建成

(南京信息工程大学 电子与信息学院, 南京 210044)

摘要: 该文针对电子设计自动化课程授课中存在的软件平台使用讲授枯燥, 缺乏综合性系统教学项目案例, 电子辅助设计(EDA)和虚拟仿真与硬件实现有一定脱节等问题, 以 m 序列信号发生器设计为综合案例, 分析和推导了多阶 m 序列信号的特性, 并通过 555 定时器、双 D 触发器、逻辑门电路、运算放大器电路构成了序列信号发生器电路。以 6 阶 m 序列为实例, 通过 Multisim 软件仿真确定了中间每个环节的输出波形, 并利用 Altium Designer 软件辅助设计了 PCB, 实验测试结果和仿真完全一致, 印证了设计的正确性, 并针对调试中存在的问题作了相关说明。通过综合性教学实验, 学生能更好地掌握 EDA 软件使用和硬件装配、调试及测试, 提高电子技术综合技能。

关键词: 电子设计自动化; 仿真; 实验; m 序列

中图分类号: TN911.71

文献标志码: A

DOI: [10.12179/1672-4550.20180224](https://doi.org/10.12179/1672-4550.20180224)

An Experimental Design of m Sequence Signal Generation

LIU Heng, HUANG Xiaoyu, SUN Jin, LIU Jiancheng

(College of Electronic & Information Engineering, Nanjing University of Information & Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: The following problems exist in the course of electronic design automation courses, for example, the use of software platform is boring, lack of comprehensive system teaching project cases, electronically aided design (EDA) and virtual simulation and hardware implementation have some disconnected issues. Taking the design of M-sequence signal generator as a comprehensive case, this paper analyzes and deduces the characteristics of multi-order m-sequence signals, and forms a sequence signal generator circuit through 555 timer, double-D flip-flop, logic gate circuit and operational amplifier circuit. Taking the 6th order m sequence as an example, the output waveform of each link is determined by Multisim software simulation, and the PCB is designed assisted by the software Altium Designer. The experimental test results are completely consistent with the simulation, which confirms the correctness of the design and gives relative explanation aiming at problems during debugging. Through comprehensive teaching experiments, students can better master the use of EDA software and hardware assembly, debugging and testing, and improve the comprehensive skills of electronic technology.

Key words: electronic design automation; simulation; experiment; m-sequence

电子设计自动化课程是电子信息类专业的重要必修课程, 也是培养电子实践人才的核心课程^[1-2], 课程更侧重于计算机辅助设计和硬件实践^[3-4]。在调研了多所重点高校的课程大纲后发现, 在授课中, 侧重于讲授 EDA 软件使用, 包括主流的 Multisim、Protel、Pspice、Altium Designer、Quartus II、Cadence 等电子设计软件。由于课时量一般偏少, 很多大纲侧重点在讲授 1~2 个 EDA 软件使用, 少数穿插简单实例电路的仿真设计^[5]。

很多教师在授课中, 过多强调仿真软件使用。尽管仿真软件能在场地紧缺和经费短缺条件下, 让学生在电脑软件上模拟硬件实验, 了解实验过程和实验现象, 但仿真是基于理想化元器件模型, 简化了电源接线和线路布置等实操, 过多依赖于软件仿真而脱离硬件实验, 很多学生在实验中常发生电源短接, 电源浮接, 元器件引脚序号不清, 信号接线错误, 实验故障常难以发现和排除。本文以一种 m 序列信号发生器设计为例,

收稿日期: 2018-05-28; 修回日期: 2018-08-15

基金项目: 江苏高校品牌专业建设工程资助项目(PPZY2015B134); 教育部产学研合作协同育人项目(201701056050, 201702109020, 201702018120)。

作者简介: 刘恒(1980-), 男, 博士, 副教授, 主要从事嵌入式仪器仪表设计及数字信号处理方面的研究。

介绍了电路设计的原理、虚拟仿真及硬件电路的装配、调试,目的是通过软件仿真和实践练习,让学生掌握工程电路设计、仿真、PCB 制造、电路装配、调试等综合电子技能^[6]。

1 m 序列信号产生原理

m 序列信号广泛应用于系统模型和参数辨识、通信系统扩频和加密^[7]、音频数字水印^[8]、激光测距^[9]等领域。m 序列信号可通过可编程器件来实现,包括 CPLD^[10]、FPGA^[11]、DSP^[12]等平台,带存储器的处理器都需综合性难度大的前期基础课程支撑,考虑到专业培养计划的课程体系,本文采用移位寄存器来构成序列信号发生器^[13],系统原理图如图 1 所示。

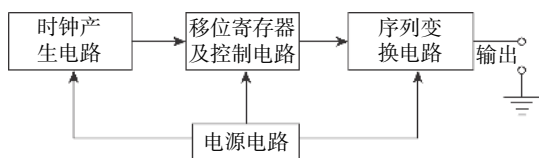


图 1 m 序列信号发生器电路原理

信号发生器包括时钟产生电路、移位寄存器及控制电路、序列电平变换电路、电源电路。时钟产生电路由 555 定时器电路构成,通过调节 NE555 芯片外围电阻和电容改变输出方波的周期及占空比;移位寄存器及控制电路由双 D 触发器及逻辑门电路组成;序列变换电路由分压电路及加法电路实现。电源电路用于给上述三个电路模块供电。

1.1 时钟产生电路

时钟产生电路包括固定电阻 R_1 、 R_3 , 电容 C_1 、 C_2 , 二极管 D_1 、 D_2 , 可变电阻 R_2 及 NE555 芯片,电源为 +5 V, 电路如图 2 所示。

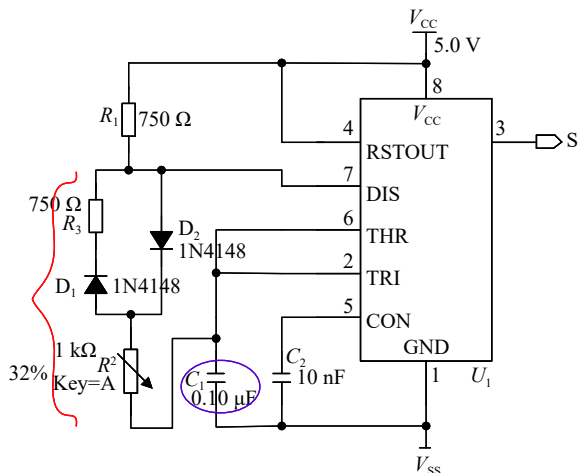


图 2 555 定时器构成的时钟产生电路

电阻 R_3 、二极管 D_1 、 D_2 及 R_2 构成等效电阻 R_{22} 。调节可变电阻 R_2 和电容 C_1 可改变输出方波的频率和占空比,其中输出方波的高、低电平时间为 T_1 和 T_2 , 周期为 T , 对应的占空比为 α , 有:

$$T_1 = 0.7(R_1 + R_{22})C_1 \quad (1)$$

$$T_2 = 0.7R_{22}C_1 \quad (2)$$

$$T = T_1 + T_2 \quad (3)$$

$$\alpha = T_1/T = (R_1 + R_{22})/(R_1 + 2R_{22}) \quad (4)$$

二极管正向导通和反向截止等效电阻受通过的电流影响,所以调节 R_2 就可以改变输出方波的频率及占空比,方波高电平为 +5 V, 低电平为 0, 方波作为时钟信号从 S 端输出。

1.2 移位寄存器及控制电路

m 序列具有接近白噪声的特性,而线性移位寄存器则可模拟工业设备动态运行中的输入激励,所以移位寄存器实现 m 序列信号的输出很适合工程应用。m 序列发生器是一种反馈移位型结构电路,它由 n 级移位寄存器和异或门反馈网络组成,其长度 $p=2^n-1$,且只有 1 个冗余状态即全 0 状态。由于带有反馈,因此在移位时钟作用下,移位寄存器各级的状态将不断变化,一般寄存器的最后一级输出,寄存器框图如图 3 所示。其中 a_k^i 为第 i 个寄存器的第 k 个时刻输出, i 的取值范围为 1, 2, $\dots$, n , 表示系统共有 n 个寄存器, k 的取值范围为 1, 2, $\dots$, p 。 C_i 为第 i 个寄存器的反馈系数,可为 0 或 1,所有的寄存器输出反馈给第一寄存器的输入,图 3 中“ $\oplus$ ”为异或门。

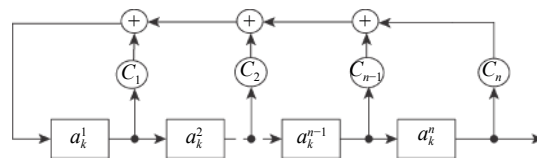


图 3 线性反馈移位寄存器框图

如表 1 所示,给出了 3~6 级(阶)m 序列信号的周期长度及反馈系数,以 6 阶 m 序列为例,包括 6 个移位寄存器,信号长度为 63,对应的一种反馈系数为 1000011,即本原多项式为 x^6+x^5 ,对应的线性反馈移位寄存器结构如图 4 所示,需要一个二输入异或门来构成反馈系数,反馈表达式为:

表1 线性反馈移位寄存器反馈系数与级数、周期

级数	周期	系数(8进制)	系数(2进制)
3	7	13	1101
4	15	23	10111
5	31	45, 67, 75	100101, 110111, 111101
6	63	103, 147, 155	1000011, 1100111, 1101101

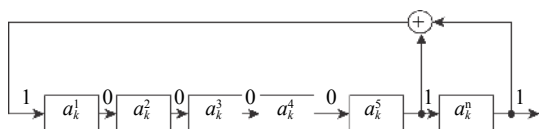


图4 6阶m序列信号发生器寄存器

$$x^1(k+1) = x^5(k) \oplus x^6(k) \quad (5)$$

式中, $x^5(k)$ 、 $x^6(k)$ 分别表示第 k 个时钟信号作用下第5和第6个移位寄存器的输出, $x^1(k+1)$ 表示在第 $k+1$ 个时钟信号作用下第1个移位寄存器的输出。

1.3 序列变换电路

移位寄存器产生m序列信号幅值取决于寄存器供电电压, 高电平幅度小于或等于电源电压 V_m , 低电平为0, m序列信号幅值不关于0对称, 实际理论分析中, 总将m序列信号归一化, 高电平幅值为1, 低电平为0, 常把移位寄存器的逻辑0和1转换为 a 和 $-a$ 的序列(a 为新的幅值)。转换关系表示为:

$$M(i) = a(1 - 2x_i) \quad (6)$$

式中, x_i 是取0或1的m序列的第 i 时刻取值, $M(i)$ 是变换后取值为 a 或 $-a$ 的序列, 具体电路如图5所示, V_{CC} 为+5V, V_{DD} 为+12V, V_{EE} 为-12V。当寄存器输出高电平电压为 V_m , 调节 R_4 和 R_5 的比值, 使运算放大器LM324输出引脚1的电压为 $V_m/2$ 。电路中配置: $R_7/(R_6+R_7)=R_9/(R_8+R_9)=\alpha$, $R_{11}/R_{10}=\beta$ 。要求寄存器输出高电平 V_m , 对应SSS端输出为 $-a$; 寄存器输出低电平0, 对应SSS端输出为 a 。根据要求SSS输出端电压为:

$$V_2 = -\frac{V_i - V_m/2}{1 - \alpha} \alpha \beta \quad (7)$$

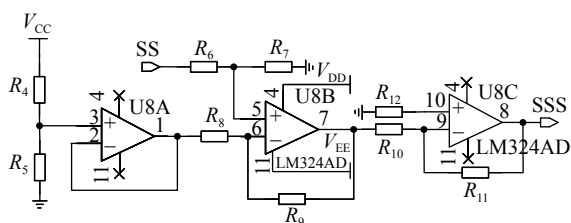


图5 序列变换电路

式中, V_i 为寄存器输出电平, 大小为 V_m 或0, 调节电阻比值改变 α 和 β , 可实现变化的幅值 a 。

2 m序列信号产生电路仿真

对于由线性移位寄存器构成的m序列信号发生器, 均采用555定时器产生时钟信号, 利用序列变换电路实现逻辑电平变换。不同阶m序列需寄存器个数不一样, 反馈系数也不同。以6阶m序列信号发生器设计为例, 采用双D触发器来构成移位寄存器组, 一个74LS74芯片包括2个D触发器, 有14引脚, 除电源和地引脚外, 每个D触发器有6个引脚(4个输入2个输出), 根据表2, 芯片PR和CLR置高电平, 在时钟上升沿时, D触发器的输出跟输入一致。

表2 74LS74 芯片功能表

输入				输出	
PR	CLR	CLK	D	Q	$\bar{Q}$
L	H	X	X	H	L
H	L	X	X	L	H
L	L	X	X	H*	H*
H	H	$\uparrow$	H	H	L
H	H	$\uparrow$	L	L	H
H	H	L	X	Q_0	$\bar{Q}_0$

据式(5), 反馈系数由第5和第6个D触发器Q引脚输入到双输入异或门(74LS86)中。由于D触发器Q引脚在初始状态为0, 6个D触发器Q引脚全为0, 异或门两输入均为0, 输出也为0, 此条件下序号为1的D触发器的输入为0, 对应移位寄存器组输出均为0, 这样0输入0输出, 电路无法自启。实验采用手动启动, 如图6所示, 74LS32是两输入或门, 在启动时, 按下K键, 或门的一个输入由低电平变化为高电平, 或门输出也由低转换为高电平; 松开按键后, 或门连接按键的输入为低电平, 或门的输出取决于异或门的输出。引入或门, 在按键作用下, 电路能自启。

图2所示电路, 结合式(1)~式(4), 在电阻和二极管不变时, 调节 C_1 值, 时钟产生电路输出方波周期发生变化, 但占空比不变; 改变电阻 R_1 、 R_2 、 R_3 , 电路电流发生变化, 等效电阻 R_{22} 跟着变化, 方波频率和占空比亦发生变化。仿真输出方波如图7所示, 由于D触发器在上升沿时输出才变化, m序列信号周期受方波周期影响, 但不受占空比影响。

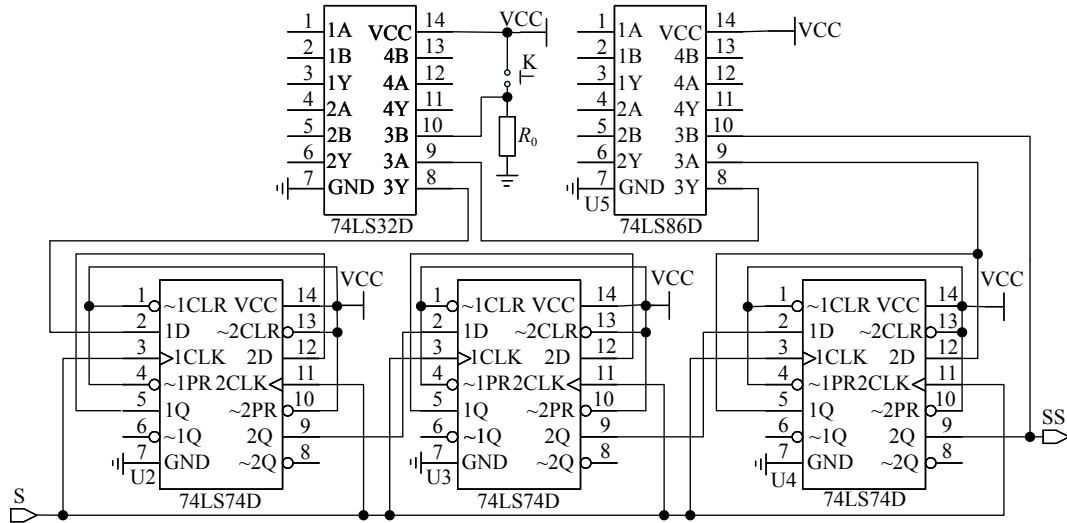


图 6 6 阶 m 序列信号发生器寄存器电路

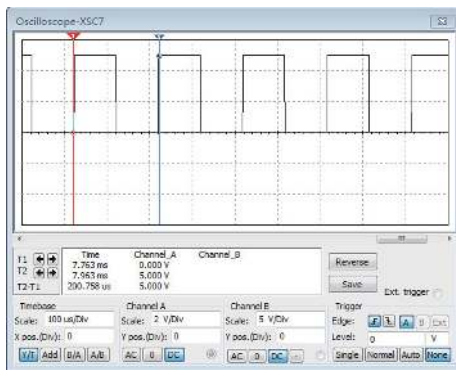


图 7 时钟信号(滑动变阻器接入点电阻比值 29%)

在没有按下 K 键之前,所有 D 触发器输出为低电平,电路无法自启。按下 K 键后松开,电路开始启动,产生的 6 阶 m 序列波形如图 8 所示,启动后才输出高电平。6 阶 m 序列信号归一化后具有以下 3 个特征。

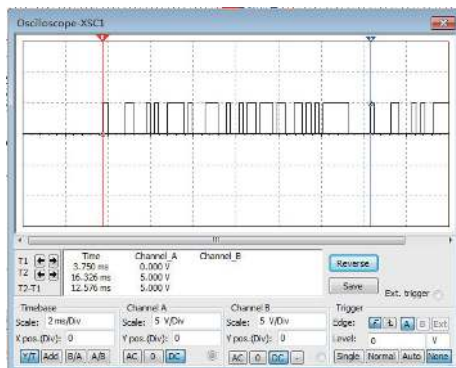


图 8 仿真得到 6 阶 m 序列波形(未变换)

1) 序列周期长度为 $p=2^n-1$, 即 63 个时钟长度, 分别为: 1, 0, 0, 0, 0, 1, 1, 0, 0, 0, 1, 0, 1, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 0, 1, 0, 0, 0,

1, 1, 1, 0, 0, 1, 0, 0, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 0, 1, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 0。

2) 一个周期内, 高电平有 2^{n-1} 个, 即 32 个; 低电平有 $2^{n-1}-1$ 个, 即 31 个。

3) 状态连续出现段称为“游程”, 6 阶 m 序列, 高电平和低电平游程各 8 个。长度为 2~6 个位的“游程”分别有 8 个, 4 个, 2 个, 1 个, 1 个。

对于序列变换电路, 以变换幅度 V_2 为 1 V 为例, 式(7)中, V_m 为 5 V, 根据变换要求, 有:

$$-1 = -\frac{5-5/2}{1-\alpha} \alpha \beta \quad (8)$$

式中, 有 2 个未知参数, 为便于电路调节, β 设为 1, 后续根据 α 来调取值, 可求解到 α 为 2/7。仿真中, 选择 R_4 和 R_5 均为 5.1 k Ω , R_6 和 R_8 均为 10 k Ω , R_7 和 R_9 均为 4.1 k Ω , R_{10} 和 R_{11} 均为 10 k Ω , 对应 α 为 0.291。变换后的 m 序列如图 9 所示, 与原始 m 序列相位相反, 幅度为 1.025 V, 满足设计要求, 幅度差异来源于 α 的电阻配置误差。

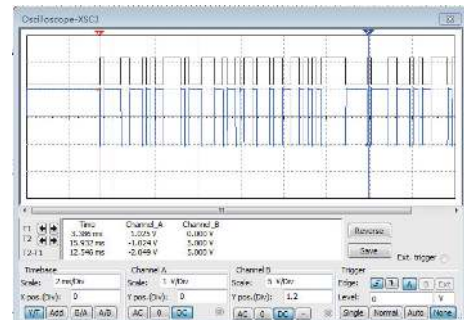


图 9 仿真得到的变换 6 阶 m 序列波形

3 硬件电路测试

3.1 序列变换电路测试

根据前述仿真,6阶m序列信号发生器包括1个NE555芯片,3个74LS74芯片,1个74LS86和74LS32芯片,1个LM324芯片,12个电阻,6个电容(4个电源滤波电容),2个二极管1N4148,1个滑动变阻器,元器件均采用直插封装。用浙江天煌科技实业有限公司的THETDA-4实验平台的集成插座和功能拓展模块(如图10所示)搭建实验电路,集成插座模块和功能拓展板分别完成芯片和直插元件的电气连接,采用稳压电源给芯片提供+12 V、+5 V、-12 V电压。



图10 实验模块

时钟电路元器件参数选择见图2,改变电阻 R_2 的值可得到不同的输出方波,测试得到的时钟信号如图11所示,改变电容 C_1 ,波形的周期发生变化,但占空比基本不变;改变电阻 R_2 ,改变等效的 R_{22} ,波形的周期和占空比均发生变化。

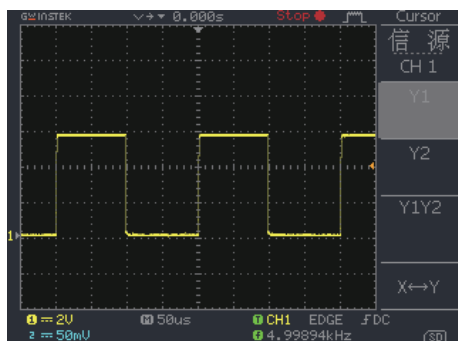


图11 时钟信号

将时钟信号频率调整为5 kHz,6阶m序列信号的长度为63,周期为12.6 ms,示波器选择2.5 ms/div,在示波器面板上可显示一个完整的周期信号,如图12所示,高低电平的序列与仿真完全一致。同样,按键作用下电路能自启,不按键序列信号无法产生。

如图13所示,m序列变换电路的电阻参数选取与仿真一致,变换后的序列信号幅度为 ± 1 V;

反相后输出波形如图14所示,验证了变换电路设计的正确性。

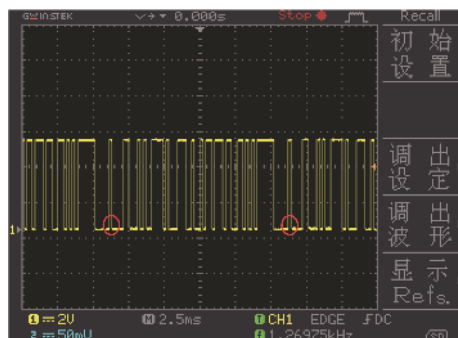


图12 未变换的m序列信号

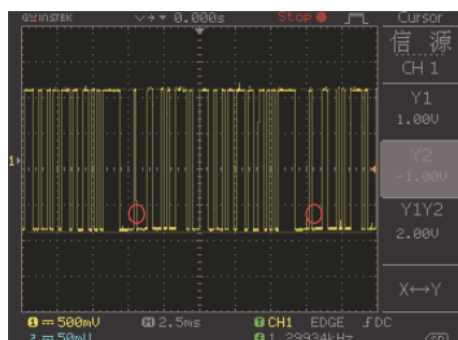


图13 变换后未反相的m序列信号

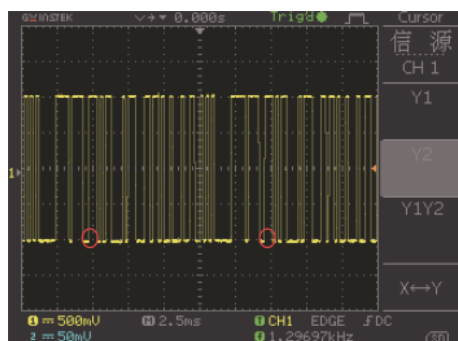


图14 变换后反相的m序列信号

调试中应注意以下3个问题。

- 1) 外接+5 V和 ± 12 V电源有噪声,需后续PCB设计中给电源端添加滤波电容,电源需共地。
- 2) 在利用示波器测试m序列信号时,需在测试点添加阻容负载,测试的m序列信号不失真。
- 3) 在调试中,可根据信号流出方向,逐一调试,特别是6个D触发器,先调试前面的再调试后面,可用信号发生器也可用时钟信号作为D触发器输入,D触发器PR和CLR控制引脚需置高电平。

3.2 PCB设计及实验

软件仿真和硬件调试验证方案的正确性,课

程目的是让学生掌握 PCB 设计及调试、装配技能。在 Altium Designer 等 PCB 设计软件下, 建立 PCB 设计工程, 完成原理图设计, 并根据元器件手册给元器件对应的封装模型。由于工作频率低, 考虑到实验成本, 教学中采用双面板, 设计的 PCB 版图如图 15 所示, 对应原理图的封装及电气连接, 实物装配后如图 16 所示, 调试的波形与实验箱测试结果一致。

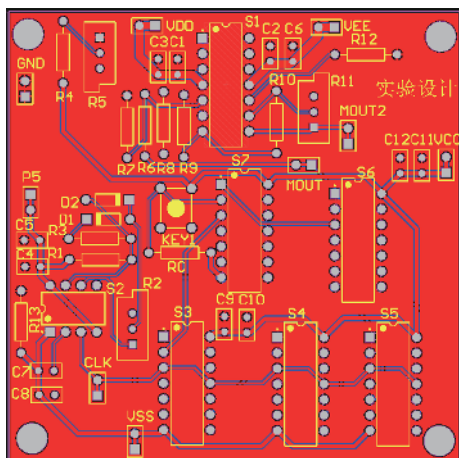


图 15 实验 PCB 版图



图 16 实验焊接的电路板

但 PCB 设计中, 采用了以下 4 个措施。

1) 为便于故障芯片更换, 采用标准插座来固定芯片, 没直接把芯片焊接在 PCB 上。

2) 为测试需要, PCB 上需留测试点, 便于示波器探头与待测点连接。

3) 电源和 SSS 端接插件连接和引出, 电源和 SSS 端布置在 PCB 的左右两边边缘, 便于接线和减少电源对输出信号的耦合干扰。

4) 增加电源滤波电容, 减少噪声干扰。

学生通过典型教学实验案例就可拓展利用 EDA 软件完成 6 阶以外其他阶 m 序列信号的设计任务。

4 结束语

在电子设计自动化课程中通过综合性 m 序列产生的工程项目案例让学生掌握 EDA 仿真软件应用、PCB 设计及制造、元器件焊接及装配、调试等技能, 巩固《电路分析基础》《模拟电子技术》《数字电子技术》《信号与系统》《电子工艺实践》等课程知识。通过 5 年的教学改革实践, 教学效果明显, 2013—2017 年连续 5 年学生获得江苏省大学生电子设计竞赛一等奖多项, 近 5 年连续三届获得大学生电子设计竞赛全国一等奖。

参考文献

- [1] 韩鹏, 李岩, 刘志刚, 等. 《电子设计自动化》课程实验改革与创新[J]. 教育教学论坛, 2017(3): 82-83.
- [2] 何家梅, 周成虎, 查蔓莉. 浅谈电子类专业学生的技能培养[J]. 实验室研究与探索, 2014, 33(5): 217-219.
- [3] 梁洪卫, 高丙坤, 邸晓宇, 等. “EDA 技术与应用”实验与实践教学改革[J]. 实验技术与管理, 2011, 28(1): 147-149.
- [4] 杨春玲, 朱敏, 杨荣峰. EDA 技术实践课程建设及实践基地建设[J]. 电气电子教学学报, 2012, 34(4): 52-54.
- [5] 张妍, 马占军, 张华. 多波形函数发生器设计教学研究[J]. 实验室科学, 2014, 17(3): 168-172.
- [6] 谷善茂, 杜德, 刘云龙, 等. EDA 课程创新实践教学方法探索[J]. 实验技术与管理, 2015, 32(3): 40-43.
- [7] 林智慧, 陈绥阳, 王元一. m 序列及其在通信中的应用[J]. 现代电子技术, 2009, 32(9): 49-51.
- [8] 赵春晖, 李福昌. 一种基于 m 序列调制的量化音频数字水印算法[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2003, 24(1): 97-100.
- [9] 王誉鹏, 赵梁博, 余开国. 基于 m 序列的半导体激光测距技术研究及仿真[J]. 激光与红外, 2016, 46(2): 159-165.
- [10] 汤井田, 公劲喆, 罗维斌. 基于 CPLD 的逆重复 m 序列伪随机信号发生器[J]. 工程地球物理学报, 2008, 5(2): 141-147.
- [11] 蒋权, 姚振东, 李建. 基于 FPGA 的 m 序列信号发生器设计[J]. 电子设计工程, 2014, 22(13): 155-157.
- [12] 李鹏. M 序列码的 DSP 产生及压缩技术研究[J]. 电子元器件应用, 2010, 12(5): 36-38.
- [13] 吴海涛, 梁迎春, 陈英俊. 基于 74LS194 的 m 序列发生器设计[J]. 肇庆学院学报, 2010, 31(5): 11-15.

编辑 钟晓