



基于晶体管的运算放大器实验项目设计

侯长波, 张宗昱, 余文鑫, 张朝柱, 司伟建, 洪 艳

(哈尔滨工程大学 信息与通信工程学院, 黑龙江 150001)

摘要: 晶体管放大电路是电子电路综合实验课程的重难点, 具有极强的实践意义, 对提高学生的电子系统设计和实践能力起着重要作用。该文提出了一个利用晶体管制作运算放大器的选题, 将模拟电子技术中典型的晶体管放大电路基本囊括, 包括恒流源差放电路、恒流源电路、共射放大电路、互补输出电路等; 然后通过理论计算与 Multisim 仿真设计了系统方案和电路参数; 最后实测和分析了各项技术指标。实验结果表明, 设计方案清晰, 展现了晶体管放大电路的原理以及工作过程, 教学效果良好, 可为其他高校开设相关课程提供一定借鉴和帮助。

关键词: 电子电路综合实验; 运算放大器; 晶体管; Multisim

中图分类号: TN722

文献标志码: A

DOI: 10.12179/1672-4550.20180445

Experimental Project Design of Transistor-based Operational Amplifier

HOU Changbo, ZHANG Zongyu, YU Wenxin, ZHANG Chaozhu, SI Weijian, HONG Yan

(College of Information and Communication Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: Transistor amplifier circuit is the most important and difficult point in the comprehensive experimental course of electronic circuits. It has strong practical significance and plays an important role in improving students' electronic system design and practice. This article proposes a topic of using transistors to make operational amplifiers, which basically includes typical transistor amplifier circuits in analog electronics, such as constant current source differential amplifier circuits, constant current source circuits, common-emitter amplifier circuits, and complementary output circuits. Then the system scheme and circuit parameters are designed through theoretical calculation and Multisim simulation. Finally, various technical indicators were measured and analyzed. The experimental results show that the design scheme is clear and shows the principle and working process of the transistor amplifier circuit, and the teaching effect is good, which can provide some reference and help for other universities to set up related courses.

Key words: electric circuit comprehensive experiment; operational amplifier; transistor; multisim

电子电路综合实验是电子信息类和自动化类专业实践教学环节的重要组成部分, 在学生在学习、掌握和应用电子技术的过程中是不可或缺的重要环节^[1-4]。在传统的实验教学中, 实验只是用于理论验证, 内容局限, 无法激发学生探索的兴趣和真正提高学生动手能力^[5]。开设综合设计性实验, 让学生进行独立自主的实验设计和实施, 可以加深学生对理论知识的理解, 激发学习兴趣, 掌握研究方法, 提高实践能力, 符合现代社会对学生科技创新能力的需求^[6-7]。

1 选题设计

随着现代科技的发展, 模拟电子技术的重要性日益明显。运算放大器是在模拟电子技术的核心器件, 对模拟信号处理的重要性不言而喻。因此, 深入了解运算放大器构成具有显著实际意义, 故本文提出了一个基于晶体管的运算放大器设计电子电路综合实验。

1) 任务

利用晶体管设计制作一个运算放大器电路,

收稿日期: 2018-10-09; 修回日期: 2018-12-07

基金项目: 教育部产学合作协同育人项目(201701008019, 2017008028); 哈尔滨工程大学 2016 本科教学改革研究重点项目(JG2016BZD19); 黑龙江省学位与研究生教育教学改革研究项目(JGXM-HLJ-2016057); 哈尔滨工程大学 2016 研究生教改项目。

作者简介: 侯长波(1986-), 男, 硕士, 讲师, 主要从事电路与电子系统方面的研究和教学工作。

并测试出运算放大器的性能指标^[8-9]。系统框图如图 1 所示。

2) 技术指标要求

- ① 开环差模增益 $A_{VOL} > 20\,000$;
- ② 输入失调电压 $V_{off} < 1\text{ mV}$;
- ③ $K_{CMRR} > 5\,000$;
- ④ 压摆率 $SR > 30\text{ V}/\mu\text{s}$;
- ⑤ 增益带宽积 $GDW > 5\text{ MHz}$ 。

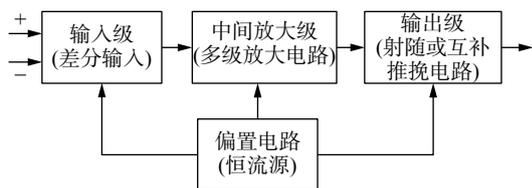


图 1 系统框图

2 理论分析与设计

2.1 输入级设计

运算放大器输入级常选用双端输入的高性能差分放大电路，该电路输入电阻高，差模放大倍数大，抑制共模信号的能力强。当共模输入时，由于电路的理想对称性及双端输出方式，使两个输出端的共模输出电压大小相等，极性相同。故共模输出电压 $U_1=0$ ，共模电压放大倍数为 0(理想值)，差放对零点漂移现象解决具有显著优势。典型的差分放大电路如图 2 所示。

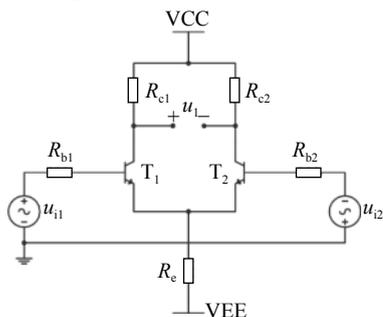


图 2 典型的差分放大电路

在图 2 电路中，增大发射极电阻 R_e 的阻值，能提高共模抑制比，但是 R_e 过大不利于大规模集成电路实现。由于恒流源的交流阻抗无穷大，采用有源负载电路来代替 R_e 可以有效地解决这个矛盾^[10]。采用恒流源作为负载的差分放大电路如图 3 所示。

差动放大器的静态工作点主要恒流源决定。通常为了保证恒流源的稳定性，设置恒流源电流 I_0 的值不宜过大。这里设 $I_0=1\text{ mA}$ 。

$$I_{c01} = I_{c02} = \frac{I_0}{2} = 0.5\text{ mA} \quad (1)$$

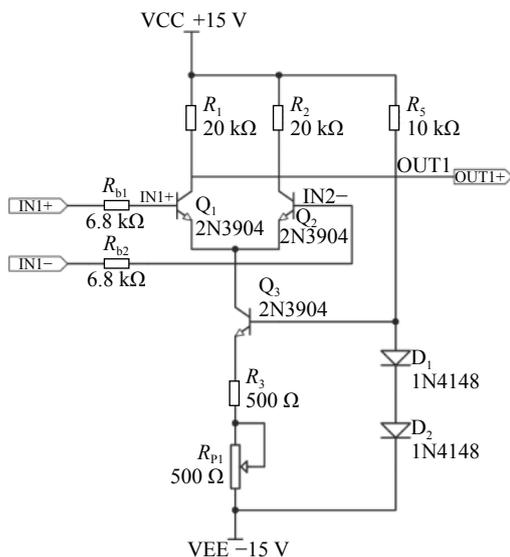


图 3 带恒流源的差分放大电路

取 $\beta=60$ 可得， $r_{be}=3.47\text{ k}\Omega$ ，设计运放输入级时，要求差分输入阻抗大于 $20\text{ k}\Omega$ ，有：

$$R_{id} = 2(R_{b1} + r_{be}) > 20\text{ k}\Omega, R_{b1} > 6.53\text{ k}\Omega \quad (2)$$

取 $R_{b1}=R_{b2}=6.8\text{ k}\Omega$ 。

输入级差模放大倍数：

$$A_d = \frac{-\beta R'_L / (R_{b1} + r_{be})}{2a} = 30 \quad (3)$$

负载电阻 $R_L=21\text{ k}\Omega$ 可得：

$$R'_L = R_L // R_{c2} = 10.27\text{ k}\Omega \quad (4)$$

故取 $R_{c1} = R_{c2} = 20\text{ k}\Omega$ 。

恒流源电路的稳定电压等于 D_1 与 D_2 的导通压降，由二极管的伏安特性曲线可近似认为常数且认为硅管的导通压降为 0.7 V 。通过调节滑动变阻器 R_{P1} 使得 $R_3+R_{P1}=700\ \Omega$ 。因此：

$$I_0 = (2 \times 0.7 - 0.7) / 700 = 1\text{ mA} \quad (5)$$

2.2 中间级设计

运算放大器中间级常多采用共射(共源)放大电路，是整个放大电路的主放大器。晶体管的放大倍数有限，为了实现更高的开环增益，以恒流源为集电极负载。在电路实现中，恒流源由二极管 D_1D_2 和三极管 Q_3 组成的镜流源电路构成。整体电路连接时，为了简化电路，将其与输出级共用恒流源电路。在互补输出级电路中，三极管 Q_6 的集电极电流和发射极电流近似相等，因此，恒流源电路的输出近似可以看作直接接入中间级电路的三极管集电极中，等效电路如图 4 所示。

2.3 输出级设计

运算放大器输入级常选用互补输出电路，该

电路具有输出电压线性范围宽、输出电阻小(即带负载能力强)、非线性失真小等特点。互补输出电路如图 5 所示。

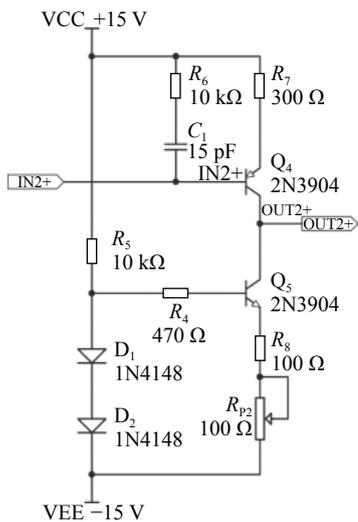


图 4 中间级简化原理图

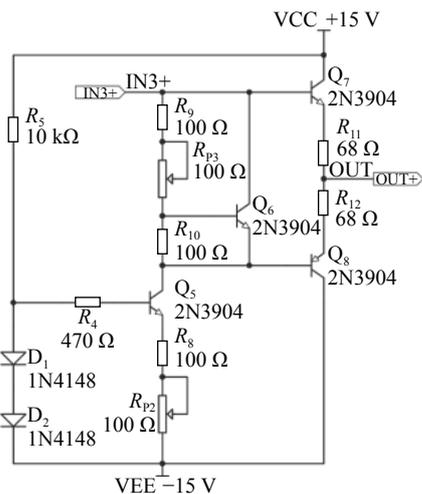


图 5 互补输出电路

为消除交越失真, 需要为输出管 Q_7 和 Q_8 设置合适的静态工作点, 使输出级可近似认为乙类功率放大电路(即当输入信号作用时, 仅一个晶体管导通^[11])。这里采用的方案是采用 U_{BE} 扩大电路作偏置的 OCL 电路。

$$U_{b7b8} = (1 + (R_9 + R_{P3})/R_{10}) U_{BE3} \quad (6)$$

式中, U_{BE3} 约为 0.7V, 设置 $R_9=R_{10}=100\Omega$, R_{P3} 的调节范围最大为 100Ω, U_{b7b8} 的调节范围为 1.4~2.1V。

2.4 偏置电路设计

偏置电路用于设置集成运放各级放大电路的静态工作点。与分立元件不同, 集成运放采用电流源为各级提供合适的静态工作电流, 从而确定合适的静态工作点。常用的恒流源电路如图 6 所示。

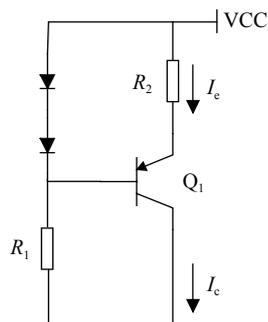


图 6 恒流源电路

2.5 总体电路设计

将各级级联, 设计的总体电路图如图 7 所示^[12]。

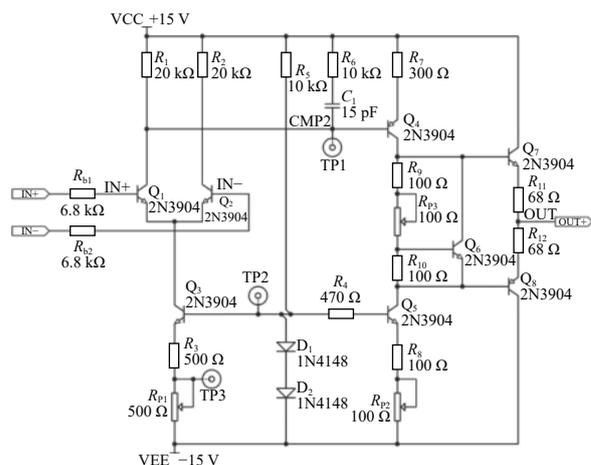


图 7 总体电路图

图中, Q_1 、 Q_2 组成了运放的差分输入级电路; D_1 、 D_2 和 Q_3 、 Q_5 分别构成了两个恒流源电路; Q_5 为共射放大电路构成的中间级电路; Q_6 、 R_9 、 R_{10} 构成了 U_{BE} 扩大电路消除由 Q_7 和 Q_8 构成的互补输出级产生的交越失真。

图示高频宽带放大器的频率特性, 即放大器的高频开环增益为:

$$|A| = \frac{g'_m}{2\pi fC} \quad (7)$$

式中, g'_m 是考虑了初级 Q_1 的局部电流反馈后的有效互导。如图 7 所示, $R_3/2=250\Omega$ 作为 R_E , 则:

$$g'_m = \frac{g_m}{1 + g_m R_E} = \frac{0.0105}{1 + 0.0105 R_E} \quad (8)$$

其值为 0.0029S, 式(7)中 C 为 Q_4 ~ Q_8 的 C_{ob} 的合计值。

$$C_{ob} = C_{ob4} + C_{ob5} + C_{ob6} + C_{ob7} + C_{ob8} = 15\text{ pF} \quad (9)$$

由式(9)可以算出 $f=1\text{ Hz}$ 时的开环差模增益为 30770 倍, 即 89.7 dB。

2.6 仿真测试

对运放参数进行仿真测试，测试电路为单位增益的电压跟随器，使用波特分析仪测量电路的幅频特性曲线，如图 8 所示。

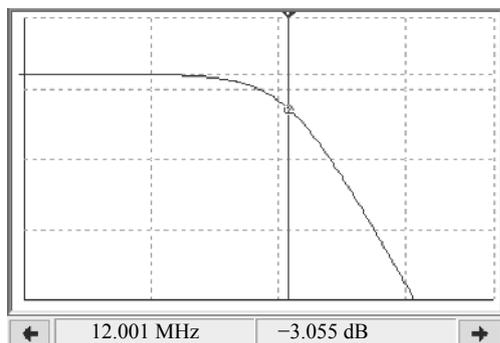


图 8 增益带宽积仿真结果

运放增益带宽积仿真结果为 12 MHz，满足设计要求的 5 MHz。

输入峰峰值为 8 V_{pp} 的方波对运放的压摆率进行测试，仿真结果如图 9 所示。上升电压为 7.15 V，上升时间为 165 ns，可以求得压摆率大小为 43.3 V/μs，满足设计要求。

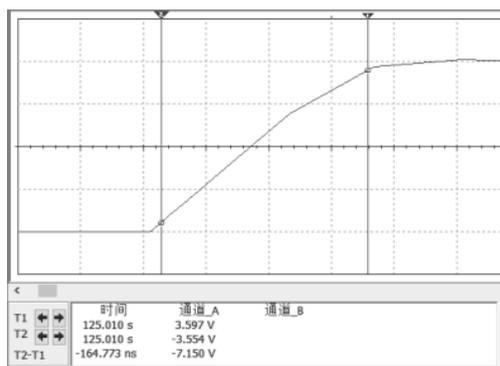


图 9 压摆率仿真结果

3 电路测试与分析

3.1 指标测试

1) 开环差模增益 A_{VOL}

测试方案如图 10 所示，输入信号为峰值 20 V_{pp}、频率 100 MHz 的锯齿波。

$$V_Y = \left[1 + \frac{R_G}{10} \right] V_{OS} \quad A_{VOL} = \frac{\Delta V_X}{\Delta V_{OS}} = \left[1 + \frac{R_G}{10} \right] \left[\frac{\Delta V_X}{\Delta V_Y} \right] = 100\,001 \left[\frac{\Delta V_X}{\Delta V_Y} \right] \quad (10)$$

测试结果如图 11 所示，计算可得开环差模增益 A_{VOL} = 100 001 $\left(\frac{2.09}{8.80} \right)$ = 23 750。

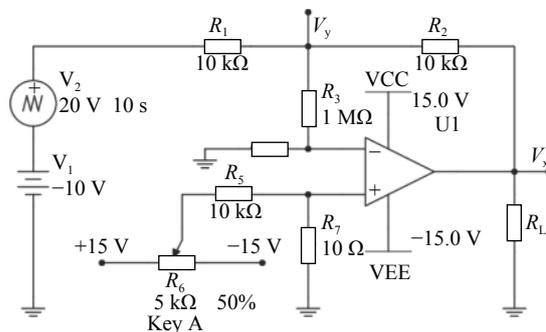


图 10 开环差模增益测试电路图

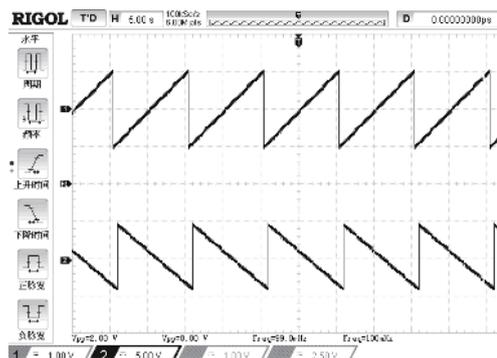


图 11 开环差模增益测试波形

2) 输入偏移电压

将运放连接成同向放大，增益为 11，输入端接地，用万用表测试输出直流电压为 10.532 71 mV，因此输入失调电压为 0.957 5 mV。

3) 共模抑制比

测试方案如图 12 所示。共模抑制比计算公式为：

$$K_{CMRR} = \frac{\Delta V_{IN}}{\Delta V_{OUT}} \times \frac{R_3}{R_1} \quad (11)$$

式中，R₃=100 kΩ，R₁=1 kΩ，得：

$$K_{CMRR} = \frac{10.1}{0.12} \times 100 = 8\,417$$

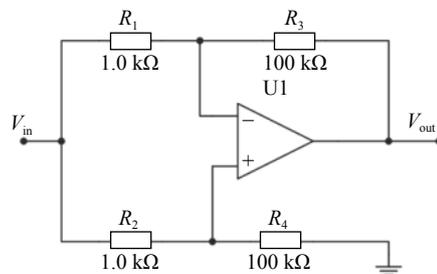


图 12 共模抑制比测试方案

测试波形如图 13 所示。

4) 压摆率

压摆率表示大阶跃变化输出电压的最大变化

率, 测试方案如图 14 所示, 输入方波信号, 峰峰值为 8 V, 频率为 100 Hz, 用示波器观察输出从 10% 至 90% 的上升时间。

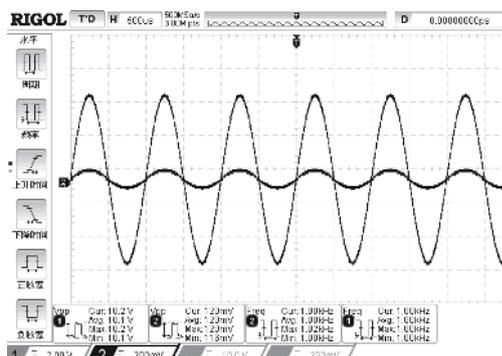


图 13 共模抑制比测试波形

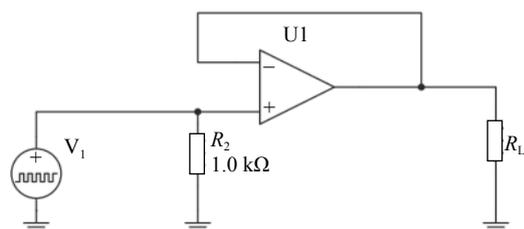


图 14 压摆率测试方案

测试结果如图 15 所示, 电压从最大输出电压的 10% 至 90% 的上升时间为 144.4 ns, 上升幅度为 6.48 V, 计算得压摆率为 44.9 V/μs。

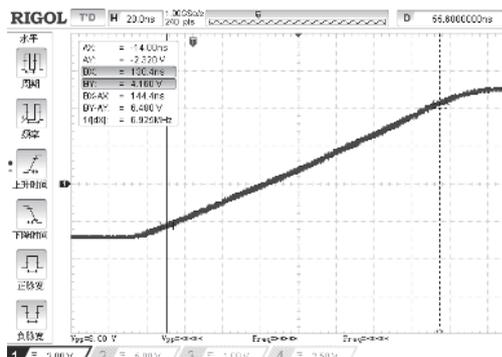


图 15 压摆率测试波形

5) 增益带宽积

电路连接如图 14 所示, 输入信号幅度为 0.2 V, 改变输入信号频率, 当输出降为 0.2 V 的 0.707 倍时, 即 0.141 4 V 时所对应的带宽(电路增益为 1)即为该运放的增益带宽积。

测试波形如图 16~图 18 所示, 可知运放的增益带宽积为 9.6 MHz。

3.2 结果分析

本实验中所使用的三极管型号为 NPN 型三极

管 2N3904 和 PNP 型三极管 2N3906。实际测试指标如下:

- 1) 开环差模增益 $A_{VOL}=23\ 750>20\ 000$;
- 2) 输入失调电压 $V_{off}=0.957\ 5\ \text{mV}<1\ \text{mV}$;
- 3) $K_{CMRR}=8\ 417>5\ 000$;
- 4) 压摆率 $SR\ 44.9\ \text{V}/\mu\text{s}>30\ \text{V}/\mu\text{s}$;
- 5) 增益带宽积 $GDW>5\ \text{MHz}$ 。

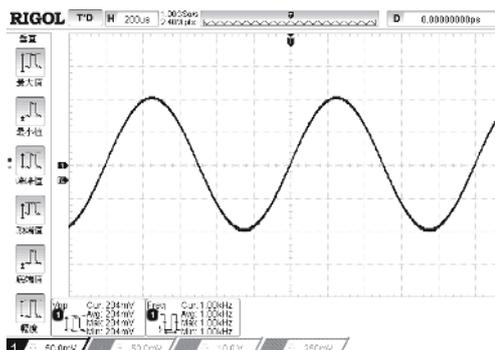


图 16 频率为 1 kHz 时的输出波形

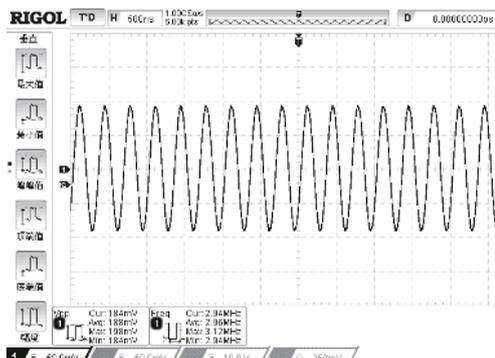


图 17 频率为 3 MHz 时的输出波形

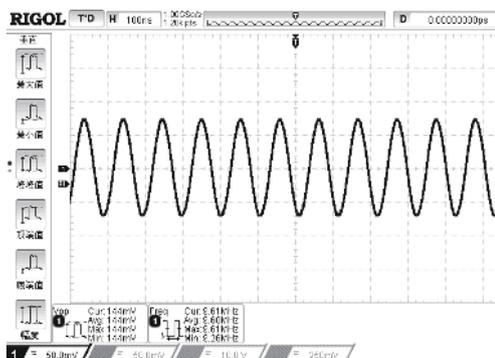


图 18 频率为 9.6 MHz 时的输出波形

实际测试指标均能满足设计要求, 其中部分指标与仿真结果有一定误差, 是由于实际电路中存在一定的分布参数且元件特性非理想, 但误差在实验允许范围内, 实际测试结果很好地验证了理论。

4 结束语

本文通过设计一个基于晶体管的电子线路综合实验,囊括了模拟电子技术的各种典型基本单元电路,考查学生对于模拟电子技术的综合应用能力。本实验可以加深学生对模拟电子技术的理解,提高学生的实际动手能力、电路调试能力、分析问题和解决问题的能力,为其他高校电子电路综合实验的命题提供一定参考。

参考文献

- [1] 田运生,刘维华,王景春.综合性设计性实验项目建设的探索与实践[J].*实验技术与管理*,2012,29(2):126-129.
- [2] 崔健.电子电路设计性实验开设的必要性[J].*内蒙古民族大学学报(自然科学版)*,2013,28(1):14-15.
- [3] 丁守成,杨世洲,袁桂慈,等.开放式电工电子综合实验教学模式的探讨[J].*实验科学与技术*,2005,2(2):54-55.
- [4] 万玲,卢海霞,夏嫣蓉.实验教学改革与创新[J].*实验科学与技术*,2010,8(5):73-75.
- [5] 杨兴瑶.电子线路应用手册[M].北京:北京化学工业出版社,2012.
- [6] 黄启俊,常胜,戴峰,等.电路设计综合实验教学探索[J].*高等理科教育*,2008(4):92-94.
- [7] 高吉祥,主编.模拟电子线路设计(全国大学生电子设计竞赛培训系列教材)[M].北京:电子工业出版社,2007:264-266.
- [8] (美)Walt Jung编著.运算放大器应用技术手册[M].张乐峰,张鼎,译.北京:人民邮电出版社,2009:263-266.
- [9] (美)Bruce Carter, Ron Mancini著.运算放大器权威指南[M].姚剑清,译.北京:人民邮电出版社,2010:266-281.
- [10] 童诗白,华成英.模拟电子技术基础[M].4版.北京:高等教育出版社,2006:330-331.
- [11] 谢红.模拟电子技术[M].哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,2008.
- [12] 聂典,丁伟,主编.Multisim10计算机仿真在电子电路设计中的应用[M].北京:电子工业出版社,2009:123-126.
- [3] 陈竹.电动自行车充电器原理与维修要点[J].*电动自行车*,2011,12:46-48.
- [4] 傅联云.电动车用48 V(20 Ah)蓄电池充电器的研究[J].*机电工程*,2005(9):36-39.
- [5] 陈洁.电动自行车充电器的原理与制作[J].*电子世界*,2011(14):30-34.
- [6] ITOH J I, NOGUCHI K, ORIKAWA K. System design of electric assisted bicycle using EDLCs and wireless charger[C]//Power Electronics Conference. [S.1.]: IEEE, 2014.
- [7] 佟刚.智能手机电量估算方法——库仑计法[J].*现代物业(上旬刊)*,2014,13(6):139-140.
- [8] TANBOONJIT B, FUENGWARODSAKUL N H. Implementation of charger and battery management system for fast charging technique of Li-FePO₄ battery in electric bicycles[C]// Ninth International Conference on Ecological Vehicles & Renewable Energies. [S.1.]: IEEE, 2014.
- [9] 范腾飞,陈奕梅.基于2~4串锂电池组的库仑计法电量计设计[J].*电子科技*,2013,26(2):7-10.
- [10] MORCOS M M, DILLMAN N G, MERSMAN C R. Battery chargers for electric vehicles[J]. *Browse Journals & Magazines*, 2000(s): 8-11.
- [11] 程红丽,吴军营,贾龙飞,等.基于STM32的锂电池组并行充电系统的设计[J].*自动化仪表*,2016,37(5):39-43.
- [12] 余善恩,李真.气浮球控制实验系统的设计与应用[J].*实验室研究与探索*,2017,36(6):84-87.
- [13] 李真,彭辉丽,孙伟华.太阳跟踪器模拟实验系统[J].*实验室研究与探索*,2018(1):66-70.

编辑 张俊

编辑 张俊