基于 Simscape 的传感器仿真实验教学探索

张 宁 许 庆 余学飞

(南方医科大学 生物医学工程学院, 广州 510515)

摘要:为了促进虚拟仿真技术与传感器实验教学的深度融合。以典型传感器实验项目为例,探索在 Simscape 环境下搭建传感器仿真实验教学的过程与方法。通过教学实践证明,基于 Simscape 的传感器仿真实验具有良好的直观性、实时性与可交互性,能够加深学生对于实验原理的理解,激发学生研究实验现象的兴趣,提高学生完成实验项目的效率,对传统实验教学是一个有益的补充,是实现传感器仿真实验教学行之有效的途径。

关键词:传感器;仿真实验;Simscape

中图分类号:G642.0 **文献标识码**:A **文章编号**:1008-0686(2022)05-0124-05

Exploration of Simulation Experiment for Sensor Based on Simscape

ZHANG Ning XU Qing YU Xuefei

(*School of Biomedical Engineering, Southern Medical University, Guangzhou* 510515, *China*)

Abstract: In order to facilitate the deep integration of virtual simulation technology and sensor experiment teaching, taking the typical sensor experiment as an example, the process and method of establishing sensor simulation experiment teaching under Simscape environment are explored. Teaching practices prove that the simulation experiment of sensor based on Simscape has good intuitiveness, real-time and interactivity, which can deepen students′ understanding of experimental principles, stimulate students′ interest in studying experimental phenomena, and improve the efficiency of students in experimental projects. The simulation experiment of sensor based on Simscape is a useful supplement to traditional experimental teaching and becomes an effective way to realize simulation experimental teaching of sensor.

Key words: sensor; simulation experiment; Simscape

随着智能医疗仪器仪表技术的发展,传感技术的重要性日益凸显。为了紧跟科技发展的步伐,国内许多高校均将“医学传感器”列为生物医学工程专业的核心课程。该课程循序渐进地介绍了各种物理、化学和生物传感器的工作原理、医学应用和最新进展,系统地展现了现代传感技术与生物医学信号检测技术的紧密联系。然而,“医学传感器”的教学多年以来一直以理论教学为主,虽然在教学过程中可以引入图片、动画与视频以增强直观性,但由于缺乏反映传感器工作过程的动态演示,学生很难理解传感器系统各组成部分的作用以及整个系统的工作过程。“医学传感器”的实验教学则多以验证性实验为主。学生被动地根据老师的演示或按照讲义上的实验步骤一步一步完成实验,难以深入理解实验现象,分析实验数据更是无从谈起。长此以往,学生的学习积极性、能动性和创造性都会受到抑制,动手能力也无法得到锻炼。

鉴于验证性实验存在诸多弊端,许多高等院校纷纷开展各种形式的设计性实验,例如,使用面包板或万能板制作传感器信号调理电路的实验形式[1-3]。这种教学形式简单方便,易于实施,且具有很好的锻炼效果,但仍存在不足之处。首先,制作实际电路必然带来元器件的损耗与损坏,增加教学成本。其次,传感器信号调理电路种类繁多,在实验教学过程中无法全部覆盖,只能对实验内容进行筛选,挑选出具有代表性的电路进行实验。再次,实际电路的装配、焊接与调试需要借助专用仪器设备,只能在实验室中进行。为避免课程冲突,实验室必须根据各课程实验教学安排向学生开放,留给设计性实验的教学时间十分有限。最后,设计性实验往往综合性较强,要求学生不仅能够熟练使用各种仪器设备,还要熟悉电路分析、设计、制作、

收稿日期:2021-03-18;修回日期:2021-08-26

基金项目:南方医科大学教育教学改革项目一般类教改项目(20173071)

第一作者:张宁(1978—),男,博士,讲师,主要从事医学传感器与医学电子仪器理论和实验的教学工作,E-mail: znsword@ smu. edu. cn

焊接、装配与调试等多方面的知识,否则,在有限的教学时间内完成实验的难度很大。

近年来,随着计算机技术的快速发展,虚拟仿真技术也取得了长足的进步。目前,仿真度高、智能化程度高和直观性好的虚拟仿真实验逐渐获得广大师生的青睐[3]。许多高校纷纷对虚拟仿真技术与传统实验教学的结合进行探索,提出了许多优秀的方案。例如,基于 Proteus 的传感器仿真实验、基于 LabVIEW 和 Multisim 的传感器虚拟仿真实验教学平台建设、基于 Unity3D 平台的传感器虚拟仿真实验教学系统开发以及综合 Matlab、Multisim 和 Proteus 的传感器仿真实验教学设计等等[4-9]。以基于应变片的悬臂梁振动测量实验为例,介绍在 Matlab 的 Simulink/Simscape 平台上搭建传感器仿真实验的过程与方法,希望能起到抛砖引玉的作用,为传感器仿真实验教学提供一条有益的思路。

1　悬臂梁振动测量实验

悬臂梁振动测量实验主要内容是利用应变片测量悬臂梁振动参数,图 1 为实验系统框图。整个实验系统由交流全桥电路、差动放大器、振荡器、移相器、相敏检波器和滤波器等模块构成。当悬臂梁自由端振动时,其内部产生的应变会使得粘贴在悬臂梁上的应变片产生电阻值变化,形成应变信号。如果将悬臂梁上的四个应变片接成惠斯顿电桥,并以振荡器输出的 400 ~ 2000 Hz 交流信号作为电桥的激励,就得到交流电桥。交流电桥的输出是以应变信号作为调制信号,以电桥的激励信号作为载波信号的调幅信号。该信号经差动放大器放大,相敏检波器解调,再经低通滤波器滤除高频载波信号之后,就可以得到与悬臂梁振动频率一致的应变信号。图 1 中的滑动变阻器 W_1 和 W_2、固定电阻 r 以及电容 C 构成交流电桥平衡调节阻容网络,移相器则为相敏检波器提供同步检波信号。

实际教学过程中发现,实验讲义中对该实验原理的文字描述十分抽象,教师讲解时又缺乏直观的动态演示,从而导致学生难以理解实验原理,无法分析实验现象,不会根据实验中测得的信号波形特点来调节相关参数。因此,提出了基于 Simscape 的仿真实验模型。学生利用该仿真模型不仅可以了解系统各模块的输出信号波形,还可以调节各模块参数并实时观察其对输出信号的影响。通过教学实践发现,直观且动态的仿真实验模型可以加深学生对实验原理的理解,有效提高学生的上机实验的效率。接下来,将着重介绍在 Simscape 环境下构建仿真实验模型的过程和方法。

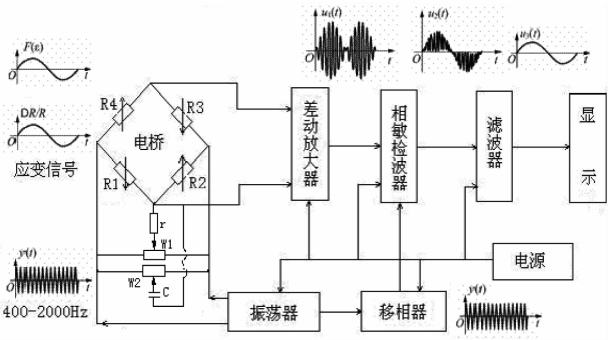


图 1　悬臂梁振动测量实验系统框图

2　基于 Simscape 的仿真实验模型

2.1　Simscape 简介

Simscape 是基于科学计算与仿真平台 Matlab/Simulink 的可视化物理系统仿真环境。Matlab2019b 中的 Simscape 主要包括 Driveline、Electrical、Fluids、Foundation Library、Multibody 和 Utilities 等六个组件库,各组件库的基本功能如表 1 所示。

利用 Simscape 提供的大量组件模型,用户能够搭建多物理域模型,并对其进行实时仿真、浏览仿真结果及优化仿真性能。另外,如图 2 所示,在 Simscape/Electrical 组件库中还包含了多种模拟或数字传感器与换能器,可用于搭建包括传感器和换能器在内的电子系统模型。

2.2　悬臂梁振动测量仿真实验

1)全桥电路仿真模型

图 3 为基于应变计组件的全桥电路仿真模型。应变计 SG1 ~ 4 的灵敏度均为 1,电阻值均为 350 Ω。In1 ~4 分别为四个应变计的信号输入端,Power +/ - 为电源输入端。Out +/ - 为信号输出端。电阻 R1、电容 C1、可调电阻 RW1 和 RW2 用于调节电桥的平衡状态。

2)差动放大电路仿真模型

图 4 为差动放大器仿真模型,该模型主要由 10 KΩ 固定电阻 R1 ~ R4、理想运算放大器 OP1、可调电阻 RW3 以及受控电压源构成。差动放大器增益为:

$$G = \frac{(R_2 + R_w)}{R_1} \tag{1}$$

R_w 为可调电阻 RW3 的电阻值。

外部输入 Ref 用于调节差动放大电路的零位输出。图 5 为差动放大器测试结果,其中,$R_0 = 10$ kΩ,$R_r = 1$ Ω,可调电阻 $R_w \approx 5$ kΩ,外部输入偏置电压为 -1.013 V,差动放大器增益约为 1.5。

表 1 Simscape 组件库

组件库	基本功能
Driveline	旋转和平移机械系统建模与仿真
Electrical	电子、机电和电力系统建模与仿真
Fluids	流体系统建模与仿真
Multibody	3D 机械系统建模与仿真
Foundation Library	基本物理组件库
Utilities	物理网络模型基本组件库

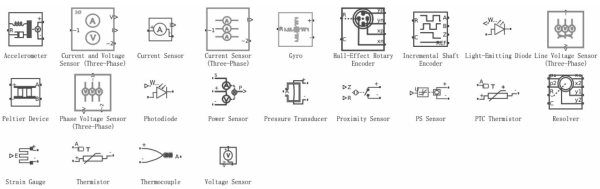


图 2 Simscape/Electrical 库中的传感器与换能器组件

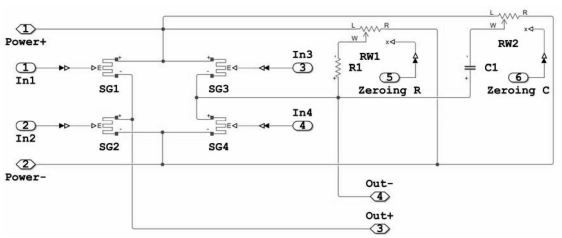


图 3 全桥电路仿真模型

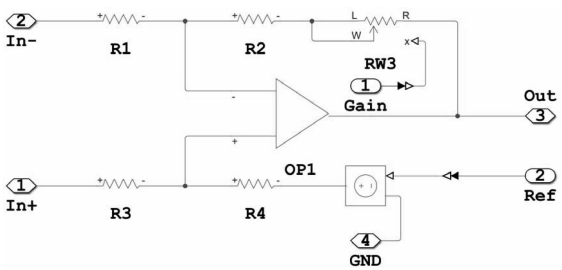


图 4 差动放大器仿真模型

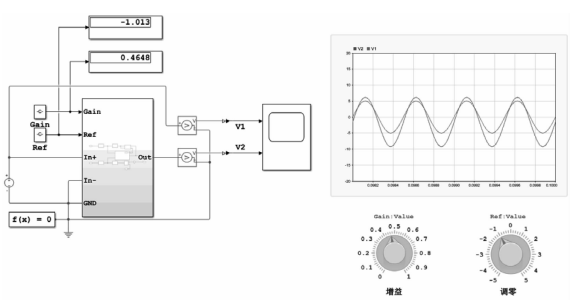


图 5 差动放大器仿真波形

3)移相器仿真模型

图 6 为移相器仿真模型,其中,R1 = R2 = R3 = R4 = R5 = R6 = 10 KΩ,C1 = 1 μF,C2 = 47 nF。Input +/ - 为移相器输入端,Phase Shift 为相移控制端,Output1 和 Output2 分别为第一、二级全通滤波器的输出端。

对于频率为 f 的正弦输入信号,第一级全通滤波器产生的相移为 $\pi - 2\arctan(2\pi f R_3 C_1)$。第二级全通滤波器产生的相移为 $-2\arctan(2\pi f R_w C_2)$。移相器的传递函数为:

$$H(s) = \frac{R_3 C_1 s - 11 - R_w C_2 s}{R_3 C_1 s + 11 + R_w C_2 s} = -\frac{R_3 R_w C_1 C_2 s^2 - R_3 C_1 - R_w C_2 + 1}{R_3 R_w C_1 C_2 s^2 + R_3 C_1 + R_w C_2 + 1} \quad (2)$$

图 7 为该移相器的频率响应曲线。从幅频响应曲线图 7(a)可知,该移相器对于输入的任意频率正弦信号的增益均为 1(0 dB)。从相频响应曲线图 7(b)可知,当输入正弦信号频率约为 2 KHz,电位器阻值在 1 Ω ~ 10 KΩ 之间变化时,输出信号与输入信号之间的相移近似在 0° ~ -180°范围内变化。由图 8 可知,当电位器阻值 $R_w \approx 1.651$ kΩ 时,移相器产生的相移为 $\pi - 2\arctan(2\pi f R_3 C_1) - 2\arctan(2\pi f R_w C_2) \approx -3.0063$ 弧度,即输出信号 V3 的相位滞后于输入信号 V1 约 172.25°。

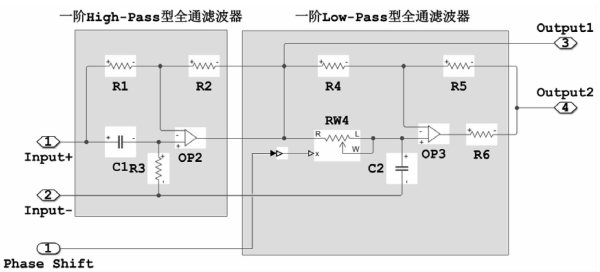
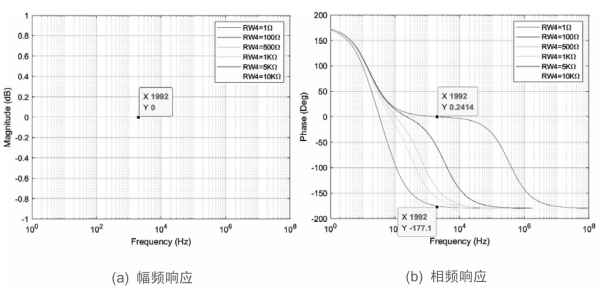


图 6 移相器仿真模型



(a) 幅频响应 (b) 相频响应

图 7 移相器频率响应

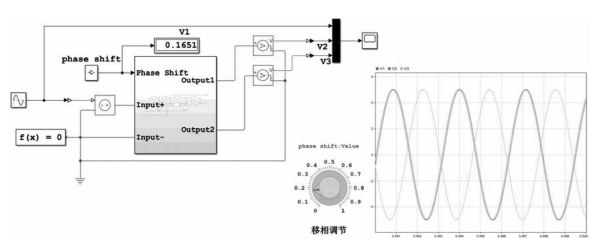


图 8 移相器仿真波形

4)相敏检波器仿真模型

图 9 为开关型相敏检波器仿真模型,Signal 为

测量信号输入端,Control 为控制信号输入端,Output为信号输出端,GND 为接地端,NP 端在仿真时接地。OP4 为运算放大器,电阻 R1 = R2 = R3 = 10 KΩ。Comparator 为比较器,当控制信号Control的电平大于 0 时,比较器输出低电平,反之,则输出高电平。SPDT Switch 为压控开关,当 vT 端电平低于 0.5 V 时,SPDT Switch 处于闭合状态,OP4、R1、R2 和 R3 构成了反相放大器。当 vT 端电平高于 0.5 V 时,SPDT Switch 处于断开状态, OP4、R1、R2 和 R3 构成了电压跟随器。

图 10 中的三个相敏检波器的参数设置相同,输入信号均为 2 KHz。三个控制信号与输入信号的相位差分别为 0°、90°和 180°。从波形图中可以看到,当控制信号 V2、V5 和 V6 的电平大于零时,相敏检波器相当于反相器。当控制信号的电平小于零时,相敏检波器相当于电压跟随器。

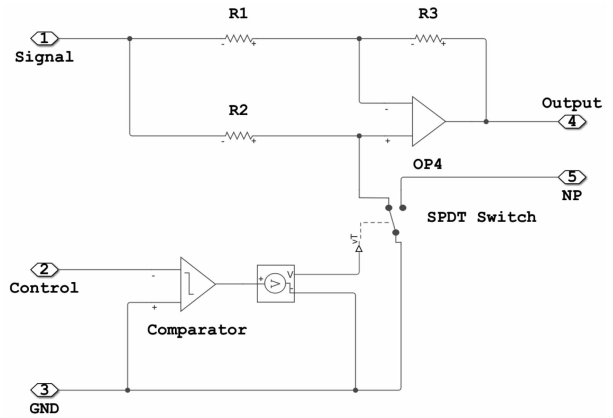


图 9　相敏检波器仿真模型

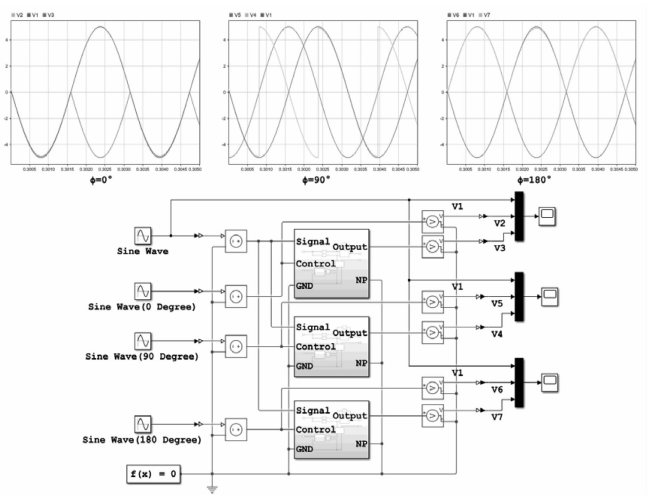


图 10　相敏检波器仿真波形

5)悬臂梁振动测量仿真实验

图 11 为完整的悬臂梁振动测量仿真实验模型,在仿真实验时,学生可以通过调节各旋钮来改变电路种的相关参数,并通过示波器实时观察波形变化。例如,图 12 给出调节差动放大器零位输出旋钮时,相敏检波器输出波形的变化。图 13 则给出了调节移相器输出相移时,相敏检波器输出波形的变化。图 14 给出了当差动放大器零位输出为零,移相器输出 180°相移时,差动放大器、相敏检波器、移相器及输入输出波形。由图中各波形可见,该仿真实验模型基本重现了原实验系统中的信号调制与解调的过程。

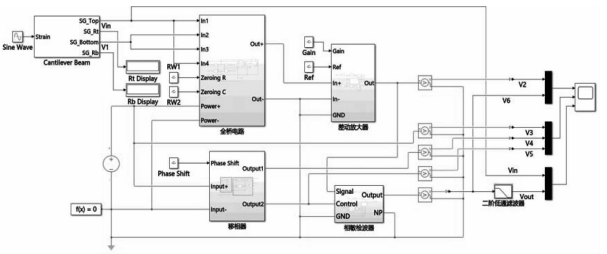
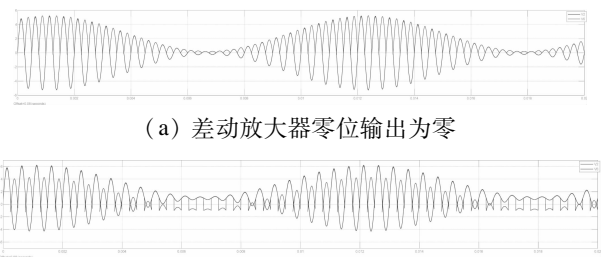


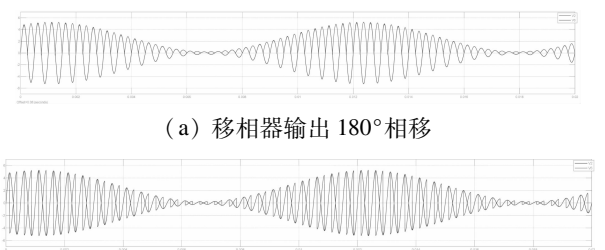
图 11　基于 Simscape 的悬臂梁振动测量仿真实验模型



(a) 差动放大器零位输出为零

(b) 差动放大器零位输出不为零

图 12　相敏检波器在差动放大器不同零位输出时的输出波形



(a) 移相器输出 180°相移

(b) 移相器输出 90°相移

图 13　相敏检波器在移相器输出不同相移时的输出波形

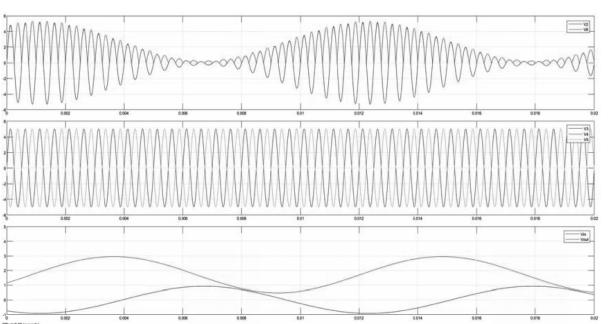


图 14　各仿真模块输出波形

3 结语

以传感器实验中的典型实验项目为例,对搭建基于 Simscape 仿真实验模型的过程和方法进行了探索。基于 Simscape 的仿真模型不仅具备良好的直观性、实时性与交互性,还可以将仿真波形数据导入 Matlab 环境,借助其强大的数据分析功能对实验数据做进一步的分析和研究。通过教学实践发现,利用这种仿真模型不仅可以加深学生对实验原理的理解,帮助学生更好地完成实验项目,还能够激发学生深入研究实验原理的学习兴趣。

参考文献

[1]郑来芳. 无线传感器网络实验教学方法研究[J]. 软件导刊(教育技术),2018,17(11):67 -68.

[2]吴根忠,李剑清. 综合性设计性实验在电子技术基础教学中的应用[J]. 实验室科学,2020,23(1):95 -97.

[3]刘琼,何洁凝,关冠恒,等. 虚拟仿真实验室对教学的作用研究[J]. 中国教育学刊,2015(S2):318 -319.

[4]李旭航. 基于 Proteus 仿真技术在传感器教学中的应用[J]. 科技视界,2020(5):11 -13.

[5]李娟,刘焕平. Proteus 仿真软件在传感器课程教学中的应用[J]. 石家庄职业技术学院学报,2013,25(6):65 -67,77.

[6]吴誉. 虚拟仿真技术在高职传感器课程教学中的应用[J]. 高等职业教育(天津职业大学学报),2016,25(1):52 -55.

[7]封居强,聂文艳. 虚拟仿真技术在“传感器技术及应用”教学中的应用[J]. 遵义师范学院学报,2019,21(5):138 -141,174.

[8]白帆,王大虎,刘浩,等. 基于虚拟现实的传感器实验仿真教学系统[J]. 软件,2020,41(2):149 -152,170.

[9]梁志勋,阮忠,易云飞. 仿真技术在传感器实验教学中的应用研究[J]. 中国教育信息化,2018(20):88 -90.