

文章编号:1005-4642(2018)08-0033-06

简易特雷门琴的制作

冯 通,高 铤,袁海明,张泽远,杨天舒,赵 伟,浦其荣,张增明,孙腊珍

(中国科学技术大学 物理学院,安徽 合肥 230026)

摘 要:通过改进部分电路完善了特雷门琴的现代设计,其输出声音的音调和音量可通过演奏者的双手无接触控制. 通过模块化设计和 SPICE 模拟后成功制作了低成本的特雷门琴装置,实现了电子乐器的功能. 设计制作过程中多处应用了 LC 振荡电路,加深了学生对模拟电路原理的理解,并提高了学生动手解决实际问题的能力.

关键词:特雷门琴;LC 振荡电路;SPICE 模拟;电子乐器

中图分类号: TN7

文献标识码: A

DOI:10.19655/j.cnki.1005-4642.2018.08.008

特雷门琴是前苏联科学家莱昂·特雷门在 1919 年发明的电子乐器,其基本原理如图 1 所示,当演奏者的手与天线距离变化时,带静电的人手与具有微弱电磁场的天线之间形成的虚拟电容大小发生变化,进而改变与天线相连的 LC 振荡电路中电容的大小而改变电路振荡频率. 该 LC 振荡电路与另一振荡频率固定的振荡电路一同输入混频器后即可实现随演奏者手与天线距离变化而改变输出音调的基本乐器属性^[1].

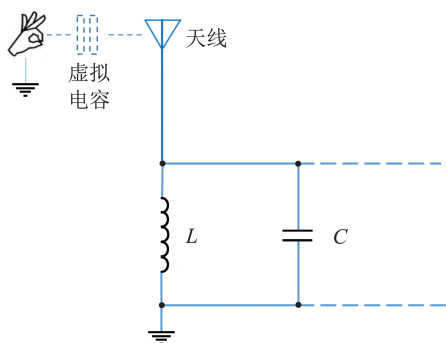


图 1 特雷门琴虚拟电容基本原理图

随着电子技术的发展,出现了一些基于现代电子元件的电路设计,在目前能找到的资料中,各模块的原理和一些技术细节往往描述得不够清晰,很多现有资料存在一些错误和不足,导致在实际制作中如果直接照搬资料电路制作会出现各种

问题. LC 交流谐振电路实验是大学物理实验中的基础实验,特雷门琴的原理和制作过程对于 LC 振荡电路物理原理的理解和展示效果非常有益,基于此查找资料并改进后制定了特雷门琴的设计和制作方案^[2-3].

1 特雷门琴的设计方案

1.1 模块化设计方案

为了便于团队分工和进行后期调试,采用模块化设计方法,整个系统由音调参考振荡器、音调可变振荡器、混频器、信号放大器、音量可变振荡器、带通滤波器和压控放大器、功率放大器、扬声器 8 个模块组成,如图 2 所示,各功能模块进行独立制作和调试.

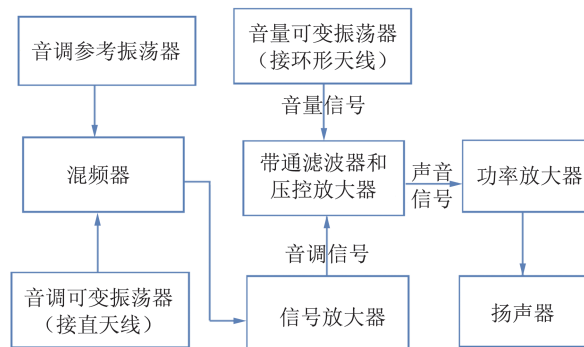


图 2 特雷门琴各功能模块组成

“第 10 届全国高等学校物理实验教学研讨会”论文

收稿日期: 2018-05-01

作者简介: 冯 通(1997—),男,云南昆明人,中国科学技术大学物理学院 2015 级本科生.

指导教师: 赵 伟(1981—),男,吉林长春人,中国科学技术大物理学院讲师,博士,从事物理实验教学

工作.



音调参考振荡器和音调可变振荡器提供 2 个频率接近的正弦信号,其中音调可变振荡器包含 1 根直天线,控制演奏手与直天线的距离可以控制可变振荡器频率.将 2 个振荡信号输入混频器并滤波后得到差频信号,通过调节电路的参量可使该信号频率取值为几百到几千 Hz,在人耳能听到的频率范围,混频器输出信号经放大器放大后,输入带通滤波器和压控放大器.

音量可变振荡器包含 1 根环形天线,该振荡电路提供另一个正弦信号,演奏者可以通过另一只手改变与环形天线的距离进行频率控制,这一信号的振荡频率刚好位于带通滤波器通频带的边缘,带通滤波器输出信号的幅度与频率相关,此信号经整流滤波后可得直流信号(音量信号),其大小与音量可变振荡器的频率有关,作为压控信号输入压控放大器决定其增益大小.

压控放大器输出的信号为频率和幅度分别受演奏者 2 只手控制的信号(声音信号),该信号经过功率放大器后驱动扬声器,最终输出音调和音量分别受演奏者 2 只手控制的声音.

为保证音量和音调的控制互不干扰,直天线和环形天线应相互垂直并尽可能相互远离,考虑

到演奏者的方便,直天线竖直置于装置一端,环形天线水平置于装置另一端,选择大小合适的装置外箱,以使得演奏者的双手能舒适地演奏.

1.2 各模块电路和工作原理

1.2.1 音调参考振荡器、音调可变振荡器和音量可变振荡器

3 个振荡器模块都属于 LC 正弦振荡器电路.正弦振荡器的作用是产生特定频率的正弦信号,它由基本放大电路和反馈网络构成,可以视为没有输入信号的带选频网络的正反馈放大电路^[1].

音调参考振荡器电路图如图 3 所示.电路产生正弦振荡要满足振幅平衡和相位平衡 2 个条件,振幅平衡指信号在基本放大电路和反馈网络中经过 1 个循环后振幅不变,相位平衡指信号在基本放大电路和反馈网络中经过 1 个循环后相位不变或变化的整数倍,要产生振荡,需要开始时信号在基本放大电路和反馈网络中经过 1 个循环后略微放大,后面可以通过非线性元件使信号稳定.如果不满足振幅平衡条件,信号经过几次循环后会逐渐衰减,如果不满足相位平衡条件,信号经过几次循环后会相互抵消,因此只有特定频率的信号能保留下来,这样就产生了正弦信号^[2].

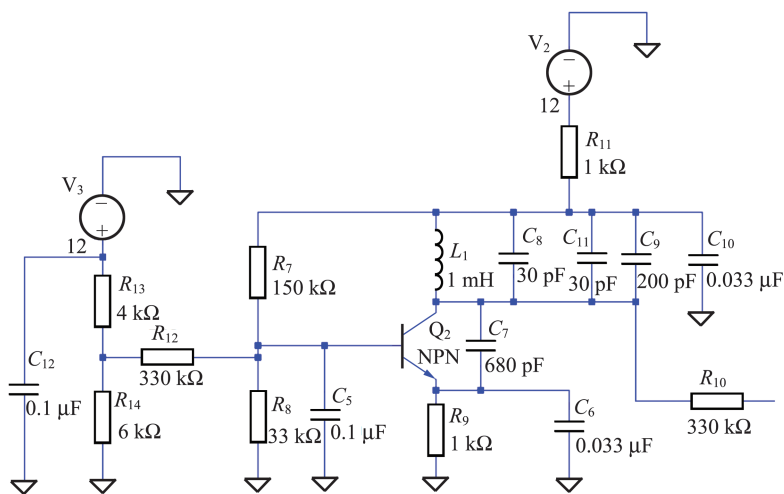


图 3 音调参考振荡器电路图

音调可变振荡器电路图如图 4 所示.音调可变振荡器包含 1 根直天线,此天线在电路中的作用相当于受演奏者控制的电容,此电容会改变电路输出正弦信号的频率,可通过演奏者手与直天线的距离进行控制,但通常能改变的频率范围相

对于绝对的工作频率而言不大,因而调节参量使它工作在较高的频段(168 kHz 附近),之后将其信号和频率恒定的参考信号输入混频器,滤波后输出的差频信号频率在数百到数千 Hz,亦即人耳能听到的范围内受控变化.

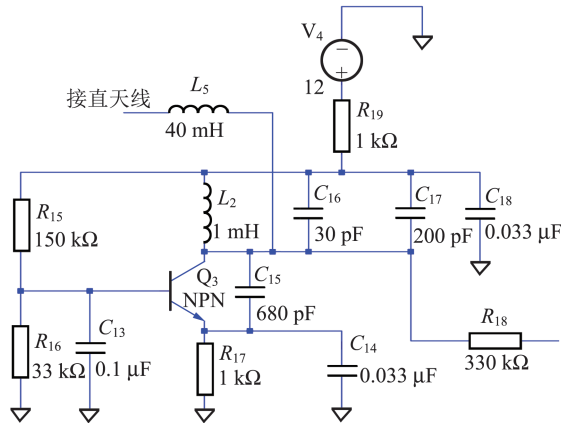


图 4 音调可变振荡器电路图

音调参考振荡器在工作时频率恒定,没有外接天线,不受演奏者的控制,其参量调试后固定下来,该模块的作用是为混频器提供恒定的参考频率,其工作频率较高(约 168 kHz)且与音调可变振荡器接近。

音量可变振荡器电路图如图 5 所示。音量可变振荡器包含 1 根环形天线,与音调参考振荡器类似,振荡频率可通过演奏者 1 只手与环形天线的距离进行调控。该模块工作频率在 130 kHz 附近,信号经过带通滤波器和压控放大器后会将频率的变化转化为压控放大器增益的变化,进而控制音量。

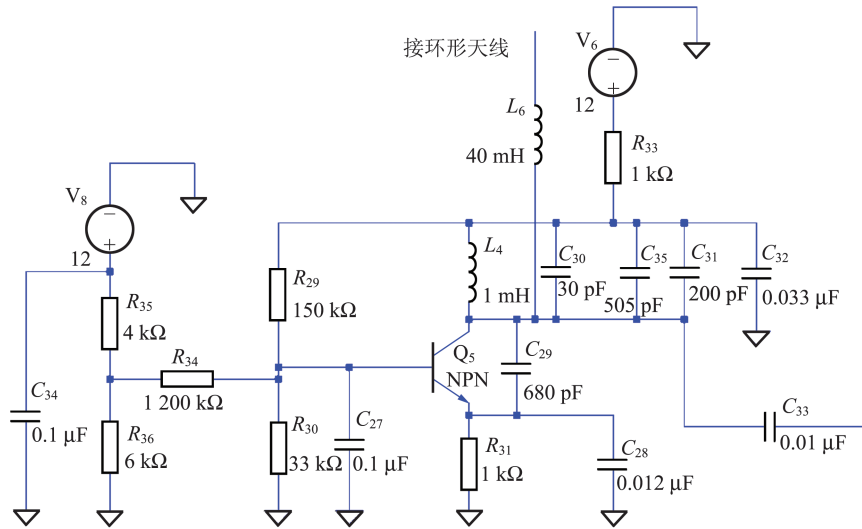


图 5 音量可变振荡器电路图

1.2.2 混频器

图 6 是混频器的设计电路,混频器的功能是对输入信号进行混频,输出频率与 2 个输入信号的频率有特定关系的振荡信号,在特雷门琴电路中,需要 2 个频率的差,这一功能可通过非线性元件和低通滤波器的组合来实现。

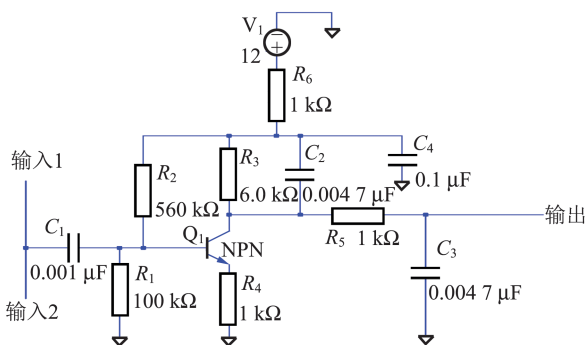


图 6 混频器电路图

设两输入信号分别为

$$u_1 = A \sin(\omega t), u_2 = A \sin[(\omega + \omega_0)t + \varphi], \quad (1)$$

假定两信号振幅都为 A , u_1 的频率为 ω , u_2 的频率为 $\omega + \omega_0$, 其中 $\omega_0 \ll \omega$, φ 是初始状态下 2 个振荡器的相位差。首先把 2 个输入信号相互混合, 得到:

$$u_{in} = u_1 + u_2 = A \sin(\omega t) + A \sin[(\omega + \omega_0)t + \varphi]. \quad (2)$$

当这一信号通过非线性元件时,非线性元件的响应可以写成 Taylor 级数的形式,在电路中充当非线性元件的是三极管 Q_1 :

$$u_{out} = au_{in} + bu_{in}^2 + cu_{in}^3 + \dots \quad (3)$$

式(3)中 a, b, c 是展开系数,其中占主要是第一项和第二项,后面项的贡献可以近似忽略,第二项的贡献可以写为

$$\begin{aligned}
 bu_{in}^2 &= b\{A\sin(\omega t) + A\sin[(\omega + \omega_0)t + \varphi]\}^2 = \\
 &= \frac{b}{2}\{A\cos(2\omega t) + A\cos[2(\omega + \omega_0)t + 2\varphi] + \\
 &+ A\} + \frac{bA^2}{2}\{\cos[(2\omega + \omega_0)t + \varphi] + \\
 &\cos(\omega_0 t + \varphi)\}. \quad (4)
 \end{aligned}$$

如果把高频(与 ω 同量级或更高的频率)信号都过滤掉,输出信号的主导项的频率为 ω_0 ,也就是两输入频率的差。

1.2.3 放大器

混频器输出信号需要经过放大器放大,增大带负载能力。如图 7 所示,本设计方案中使用了 TELESKY 公司的 LM358 运算放大器为核心的放大电路。

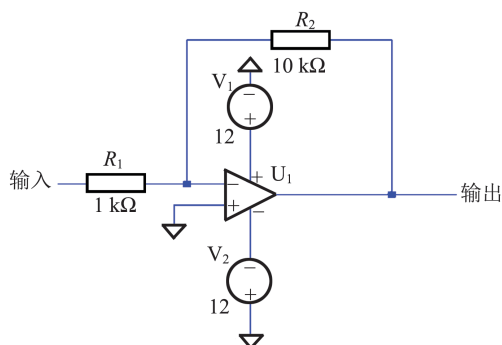


图 7 放大器电路图

1.2.4 带通滤波器和压控放大器

图 8 是设计方案图 1 中带通滤波器和压控放大器的电路图。

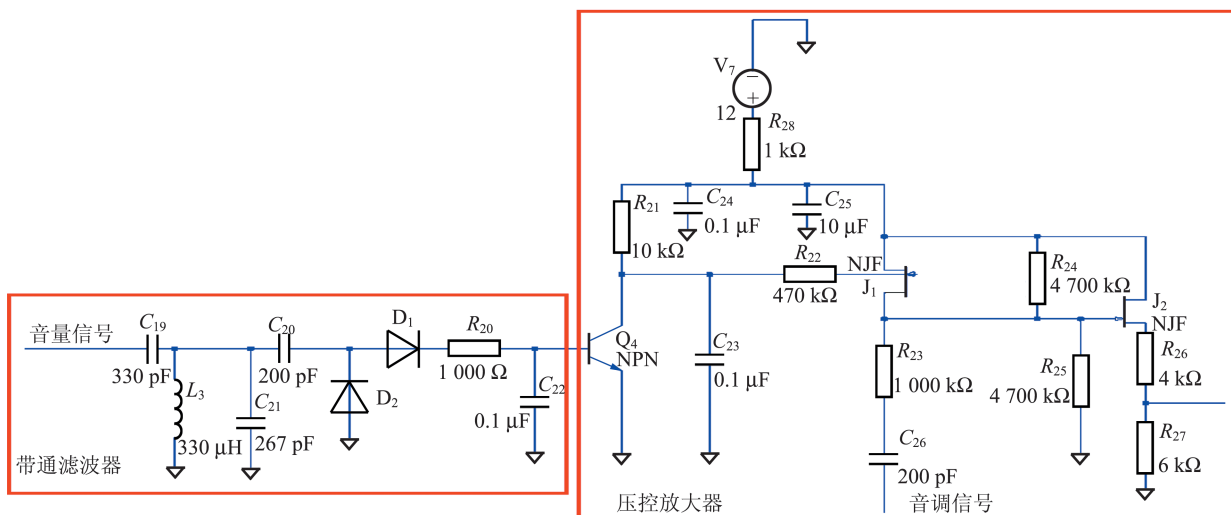


图 8 带通滤波器和压控放大器电路图

带通滤波器是可以让频率处于一定范围内的电压信号通过并阻挡高频和低频信号的电路。带通滤波器可由 LC 谐振电路构成,电路阶数越高,通频带边缘越陡,在本设计方案中使用了三阶滤波器。

带通滤波器输出的信号为交流信号,为实现压控放大,要把交流信号转化为直流信号,这个过程可以通过整流和滤波来实现。为了提高输入阻抗,可以在滤波后的直流信号和压控放大器之间用三极管隔开。压控放大器是用一个电压作为压控信号来控制另一个电压的放大倍数的电路,常用的方法是用压控电压控制场效应管某 2 个极之间的电阻,形成压控电阻,再用压控电阻实现压控放大。

图 8 中压控放大器的增益 Q 可表示为

$$Q = \frac{(R_{26} + R_{27}) // r_{ds}}{g_m^{-1} + (R_{26} + R_{27}) // r_{ds}} \cdot \frac{r_{ds} // R_{24} // R_{25}}{R_{23} + r_{ds} // R_{24} // R_{25}} \cdot \frac{R_{27}}{R_{26} + R_{27}}, \quad (5)$$

其中 r_{ds} 为场效应管输出电阻, g_m 是场效应管的低频互导。

2 特雷门琴的制作

在确定特雷门琴的设计方案后,通过 SPICE 进行了模拟调试,在各个模块基本功能确定达到设计目标后,进行分模块搭建和调试工作,各个模块制作完成并调试功能正常后再进行整体组装及调试和验证工作。

2.1 SPICE 模拟

用 SPICE 软件对图 1 各设计模块模拟得到

模拟输出波形,可以作为对设计的检验和调试的参考,图 9 是其中音调参考振荡器的模拟情况。

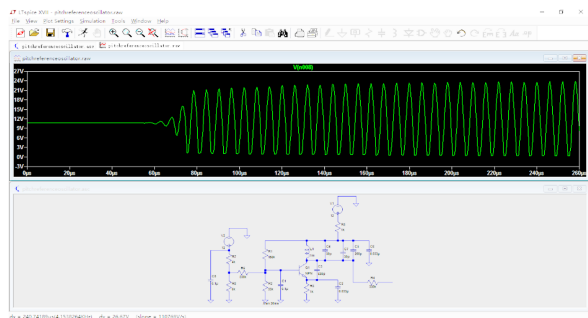


图 9 音调参考振荡器的 SPICE 模拟

2.2 系统搭建

为了简单和方便操作,采用面包板搭建电路,导线使用飞线和杜邦线,按模块分别搭建,分别对各模块进行调试,比照 SPICE 模拟的结果和示波器的输出波形调节电路中的参量可变元件,使得各模块的输出频率和幅度满足设计要求,各模块测试合格后再组装为系统进行综合调试。

功率放大器有比较成熟的通用模块,本方案使用了 LM386 模块。直天线为 1 根长 75 cm、直径 1 cm 的硬铜管,环形天线由 1 根长 1 m、直径 1 cm 的软铜管加工而成,天线与主体电路间使用鳄鱼夹导线连接。机箱采用便宜且易加工的泡沫箱,图 10 所示为最终制作特雷门琴整体图。



图 10 制作的特雷门琴整体图

2.3 分模块调试过程

1) 2 个音调振荡器:接通电源后,输出接示波器。调节两振荡器的可变电容使它们都可以输出 170 kHz 左右的正弦波,且 2 个音调振荡器的频率在人远离直天线时尽可能接近,这样在演奏时,随着手靠近特雷门琴,听到的频率会逐渐升高。

2) 音量振荡器:接通电源后,输出接示波器。调整音量振荡器的可变电容,使得在人远离环形天线时,振荡频率刚好位于带通滤波器的左边缘的较低处,这样在演奏时随着手接近环形天线,声音会逐渐变小。

3) 混频器:用信号源产生 2 个频率相近的正弦波,输入混频器,输出接示波器,要求输出信号的频率为 2 个输入信号的频率差。

4) 带通滤波器和压控放大器:用信号源产生频率和音量振荡器的输出频率相同且峰峰值为 24 V 的信号,模拟音量输入。另外产生频率为几百 Hz 且峰峰值为 4 V 的正弦信号,模拟音调输入。接入带通滤波器和压控放大器的对应位置,输出接示波器,要求在音量信号的频率变化 1~2 kHz 时,输出信号的幅度有明显变化^[3-4]。

3 性能测试

为了定量评价自制的特雷门琴工作情况,用示波器分别测试了声音信号的频率和手与直天线的距离的关系如图 11 所示,声音信号的幅度和手与环形天线距离的关系如图 12 所示。

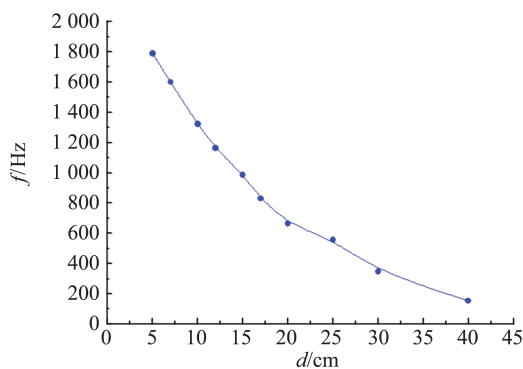


图 11 声音信号的频率和手与直天线的距离的关系

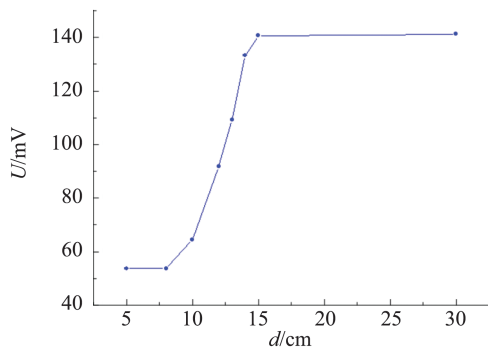


图 12 声音信号的幅度和手与环形天线的距离的关系

可以看到当手与天线的距离从 5 cm 逐渐增大到 40 cm 时,声音信号的频率从 1 788 Hz 降到了 154 Hz,在演奏者手臂可移动的合理范围内,声音频率的变化也在音乐演奏所需的合理范围内,符合作为乐器的设计要求。

对于音量的控制,由于实际演奏中可以根据需求换用不同的扬声器,用声音信号的幅度来衡量更合适。可以看到当手与天线的距离从 8 cm 增大到 15 cm 时,信号幅度从 53.75 mV 增大到 141 mV,此范围内可实现演奏者对音量的控制,满足设计目的。53.75 mV 为电路噪声本底,而当手与天线的距离大于 15 cm 时,带通滤波器已经不再工作于通频带的边缘,而是工作于通频带内,增益已达到最大,不再随频率发生变化,不能实现频率变化转化为幅度变化,因而声音信号的幅度是不变的,这限制了演奏者调制音量的范围,但对于抗干扰是有利的^[5]。

4 结束语

通过改进完善了特雷门琴的现代设计,其输出声音的音调和音量可通过演奏者的双手无接触控制。通过模块化设计和 SPICE 模拟后成功制作了低成本的特雷门琴装置,实现了电子乐器的功能,成品演示效果较好。设计制作过程中多处

应用了物理实验中 LC 振荡电路,在制作过程中,加深了学生对模拟电路原理的理解,并提高了学生动手解决实际问题的能力。应用特雷门琴的原理亦有可能发展一些无接触控制装置,比如无接触游戏手柄等。就其作为乐器本身的功能而言,还可以在带通滤波器中换用不同的非线性元件实现不同的音质。

参考文献:

- [1] Glinsky A. Theremin: Ether music and espionage [M]. Urbana: University of Illinois Press, 2000: 26.
- [2] 康华光,陈大钦,张林. 电子技术基础-模拟部分 [M]. 6 版. 高等教育出版社,2013:101-182.
- [3] Moog R. Build the EM Theremin [EB/OL]. <https://www.cs.nmsu.edu/~rth/EMTheremin.pdf>.
- [4] Resources for Theremin builders [EB/OL]. <http://www.thereminworld.com/Resources-for-Theremin-Builders>.
- [5] Martin C B, Martínez J S, Ricchiuti A L, et al. Study of the interference affecting the performance of the Theremin [J]. International Journal of Antennas and Propagation, 2012(1687-5869):1-9.

Simple version of Theremin

FENG Tong, GAO Ting, YUAN Hai-ming, ZHANG Ze-yuan, YANG Tian-shu,
ZHAO Wei, PU Qi-rong, ZHANG Zeng-ming, SUN La-zhen

(School of Physical Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: The modern design of the Theremin was perfected by modifying the circuits partly. The tone and volume of the voice output could be controlled untouched by the palyers' hands. The lower-cost Theremin was made by modular design and SPICE simulation. And the function of the electronic musical instrument was implemented. The LC oscillators were applied in the design, which could deepen the understanding of the principle of analog circuitry and foster the students' ability to operate practically.

Key words: Theremin; LC oscillator; SPICE simulation; electronic acoustic instrument

[责任编辑:任德香]