

基于等效变换的回转器设计与实现

方胜伟¹ 张洛瑜¹ 杨森¹ 林康¹ 田社平²

(1. 上海交通大学机械与动力工程学院, 上海 200240)
(2. 上海交通大学电子信息与电气工程学院, 上海 200240)

摘要:基于电路的等效变换,从简单的T形电路出发,设计出回转器的实现电路,设计过程中尽量减少运放与负电阻的运用,设计过程简单明了。所设计的回转器仅包含2个运放和7个电阻,具有一定的应用价值。Multisim仿真结果验证了设计电路的正确性和有效性。所述回转器设计与实现方法对电路理论的教学具有一定的启发与助益。

关键词:回转器;二端口电路;等效变换;运算放大器

中图分类号:TM13

文献标识码:A

文章编号:1008-0686(2022)04-0093-03

Design and Realization of Gyrator Based on Equivalent Transformation

FANG Shengwei¹ ZHANG Luoyu¹ YANG Miao¹ LIN Kang¹ TIAN Sheping²

(1. School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

(2. School of Electronic, Information and Electrical engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: This paper proposes a design method of gyrator based on the equivalent transformation of circuit. Starting from the simple T-shaped circuit, the realization circuit of the gyrator is given. The use of operational amplifier and negative resistance is minimized, and the design process is simple and clear. The gyrator only contains two operational amplifiers and seven resistors. This design has a certain application value. The correctness of the method is verified by Multisim simulation. The design and implementation method of gyrator discussed is helpful for the teaching of circuit theory.

Key words: gyrator; two-port circuit; equivalent transformation; operational amplifier

回转器是一种线性无源的二端口电路元件,自1948年特勒根提出以来,在滤波器设计等领域得到了广泛应用。回转器也被认为基本电路元件之一^[1]。讨论回转器的设计方法与具体实现,并尽可能简化电路设计,有着重要的理论意义与应用价值。

文献已经报道多种回转器的实现方案,如采用电压控制电流源(VCCS)设计法、NIV-NIC(负阻抗变换器-负阻抗逆变器)设计法^[1];金新宇、刘卓伟、田社平等提出的一系列设计方法^[2-5];基于Π形电路的设计法^[6]等等。可以看出,回转器的设计与实现可以利用电路理论从多方位、多角度来完成。这也为电路理论的教与学提供了十分丰富的研究素材。基于作者的教学实践,提出基于电路等效变换的设计方法。采用运放所构成的回转器实现电路仅包含两个运放,是一种较为简单的实现电路。利用Multisim仿真验证了该设计的正确性。

1 电路设计

回转器具有如下的端口特性

$$\begin{cases} u_1 = -ri_2 \\ u_2 = ri_1 \end{cases} \quad (1)$$

端口开路电阻矩阵为

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 0 & -r \\ r & 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

要实现回转器就需实现其开路电阻矩阵 \mathbf{R} 。设计思路是:从与 \mathbf{R} 相近的开路电阻矩阵 $\mathbf{R}_T = \begin{bmatrix} 0 & r \\ r & 0 \end{bmatrix}$ 出发,通过设计、修改电路,并通过等效变化化简电路,最后得到回转器的实现电路。

实现 $\mathbf{R}_T = \begin{bmatrix} 0 & r \\ r & 0 \end{bmatrix}$ 的最简电路就是T形电阻电路,如图1所示。图1电路尽管包含负电阻,但它是互易的。而回转器并非互易电路,因此,还需

修改图 1 电路,在其中加入受控源,以使其端口特性满足回转器特性。

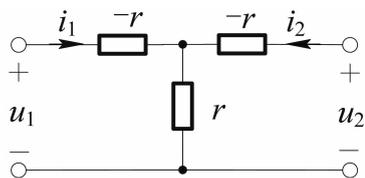


图 1 实现 R_T 的电路

观察图 1 电路的端口方程

$$\begin{cases} u_1 = ri_2 \\ u_2 = ri_1 \end{cases} \quad (3)$$

如果在上式中的第 1 式右端加上 $-2ri_2$,那么,所得表达式就是回转器的端口特性。这样,回转器就可设计为如图 2 所示的电路。显然,如果在式(3)中的第 2 式右端加上 $-2ri_1$,那么,所得表达式同样表达了回转器的端口特性。对于这种情况,本文不再赘述。

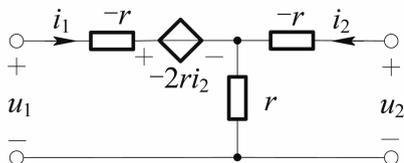


图 2 回转器设计电路 1

图 2 电路中的受控源为电流控制电压源,为便于采用运放实现受控源,应将受控源等效为电压控制电压源。一种等效方法是,可取输出端口 $-r$ 电阻支路两端的电压为控制电压,将图 2 电路等效为如图 3 所示电路。

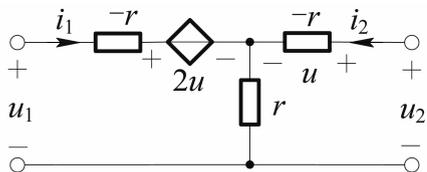


图 3 回转器设计电路 2

图 3 电路还需作进一步化简。利用受控源转移等效变换,图 3 电路可等效为如图 4 所示电路。

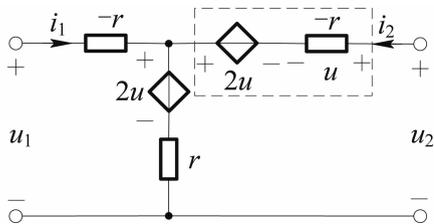


图 4 回转器设计电路 3

观察图 4 电路,其中虚框中的支路可等效为电阻为 r 的支路,此时受控源的控制电压可取自 r 电阻支路,但参考方向要反向,如图 5 所示。

观察图 5 电路, $-r$ 电阻支路和受控源支路具

有公共节点,以此节点作为接地点,得到最终的回转器设计电路,如图 6 所示。

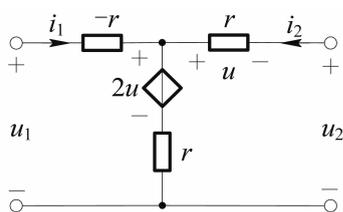


图 5 回转器设计电路 4

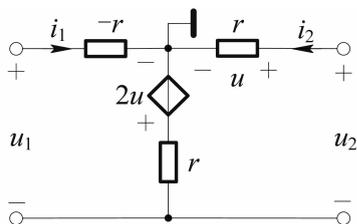


图 6 最终的回转器设计电路

不难验证,图 6 电路的开路电阻矩阵满足

$R = \begin{bmatrix} 0 & -r \\ r & 0 \end{bmatrix}$ 。由图 6 可知,该回转器是端口浮地的,即没有一个端子是接地的。

2 电路实现

回转器设计的理论推导已经在上文给出,但电路中的受控源和负电阻是理想化的模型,无法用现成的器件直接得到。因此,要用电路实现回转器,必须先用电路实现负电阻和受控源。这里仅讨论采用运放的实现方式。

2.1 负电阻实现电路

负电阻的实现电路如图 7 所示^[7]。其端口等效电阻为

$$R_{eq} = \frac{u}{i} = -\frac{R_3 R_1}{R_2} \quad (4)$$

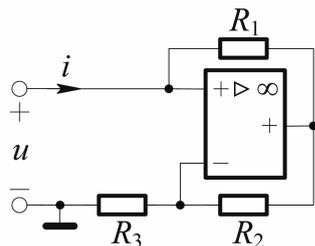


图 7 负电阻实现电路

为实现 $-r$ 电阻,可取 $R_1 = R_2 = R_3 = r$ 。必须注意,图 7 电路所实现的负电阻其一端必须接地,这说明该负电阻不是双向的。因此,此负电阻在接入电路时必须注意按方向正确接入。

2.2 受控源实现电路

受控源实现电路如图 8 所示,该电路实际上就是由运放构成的同相放大电路。由图 6 可知,同相

放大电路的电压放大倍数等于受控源的转移电压比,亦即2。

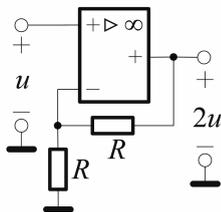


图8 受控源实现电路

2.3 回转器实现电路

综合图6~图8电路,得到负电阻实现电路如图9所示。

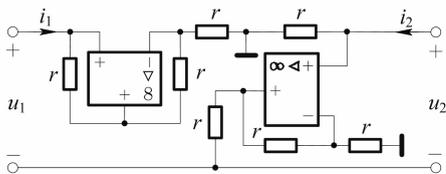


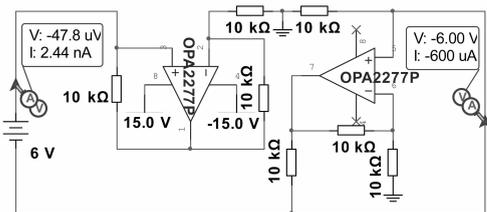
图9 回转器实现电路

图9电路由2个运放和7个电阻组成,所有电阻取相同的参数值,也就是所实现回转器的回转电阻值。该电路形式是较为简单的回转器电路实现形式。

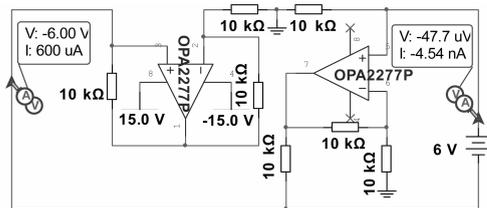
3 电路仿真验证

为验证回转器实现电路的正确性和可靠性,采用Multisim电路仿真软件对图9电路进行测试,其中回转电阻取 $r = 20\text{ k}\Omega$,运放采用精密型双运放OP2277。测量方式可有多种方式,这里按照短路电导矩阵的定义设计实验测量。

首先将端口2短路,端口1接入6V电压源,如图10(a)所示,由图可得 $i_1 = 2.44 \times 10^9\text{ A}$, $i_2 = 6.00 \times 10^4\text{ A}$ 。再将端口1短路,端口2接入6V电压源,如图10(b)所示,由图可得 $i_1 = 6.00 \times 10^4\text{ A}$, $i_2 = 4.54 \times 10^9\text{ A}$ 。



(a) 端口1加电压激励,端口2短路



(b) 端口2加电压激励,端口1短路

图10 回转器实现电路仿真

由测量结果可得回转器的短路电导矩阵为

$$G = \begin{bmatrix} \frac{i_1}{u_1} |_{u_2=0} & \frac{i_1}{u_2} |_{u_1=0} \\ \frac{i_2}{u_1} |_{u_2=0} & \frac{i_2}{u_2} |_{u_1=0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 4.07 \times 10^{-10} & 1.00 \times 10^{-4} \\ -1.00 \times 10^{-4} & -7.57 \times 10^{-10} \end{bmatrix} \text{S} \quad (5)$$

由开路电阻矩阵和短路电导矩阵之间的关系,得到开路电阻矩阵为

$$R = G^{-1} = \begin{bmatrix} 0.0000 & -1.0000 \\ 1.0000 & 0.0000 \end{bmatrix} \times 10^4 \Omega \quad (6)$$

可见,所得回转器开路电阻矩阵具有相当高的准确度。

4 结语

基于电路的等效变换,通过联想、对比、推理,从简单的T形电路出发,设计出回转器的实现电路,设计过程中尽量减少运放与负电阻的运用,设计过程简单明了。所设计回转器仅包含2个运放和7个电阻,具有一定的应用价值。

上述讨论是电路理论课程教学研究成果,可供从事电路教学的教师参考。

参考文献

- [1] Kulesz J. J. A Study of Gyration Circuits [D]. NAVAL POSTGRADUATE SCHOOL, 1969.
- [2] 刘卓纯,金新宇,付裕,等. 一种回转器实现电路的解释性设计方法[J]. 电气电子教学报. 2019, 41(2): 36-38.
- [3] 刘卓纯,金新宇,田社平,等. 再论回转器实现电路的解释性设计方法[J]. 电气电子教学报. 2019, 41(5): 63-35.
- [4] 金新宇,刘卓纯,田社平,等. 基于复合受控源的二端口电路实现方法及其应用[J]. 电气电子教学报. 2019, 41(5): 74-77.
- [5] 田社平,金新宇,刘卓纯,等. 基于运放的二端口电路一般实现方法研究[J]. 电气电子教学报. 2019, 41(4): 86-89.
- [6] 刘晟荣,田社平,张峰. 一种基于II形电路的回转器设计方法[J]. 电气电子教学报. 2020, 42(1): 91-93.
- [7] 田社平,何迪,张峰. 电路理论专题研究[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2017:101.