

含源二端口网络等效电路及其传输参数研究*

齐超¹ 孙天¹ 孙立山¹, Zesong Wang²

(1. 哈尔滨工业大学 哈尔滨 150006; 2. University of Strasbourg, Strasbourg 67000, France)

摘要: 二端口网络的传输、变换和控制能力在复杂的通信系统、精密的计算机网络、大型电力设备以及高级智能制造等领域得到了广泛应用。从 4 种含源二端口网络的等效电路入手,通过分析相应参数说明了对参数的计算方法同时适用于互易与非互易二端口网络;推导了含源二端口网络的传输参数矩阵,对比分析了含源与无源二端口网络各参数的异同。将理论计算与仿真实验进行对比,验证了该含源二端口网络的等效电路及其参数计算的正确性。

关键词: 含源二端口网络; 等效电路; 传输参数

DOI: 10.19753/j.issn1001-4390.2020.001.004

中图分类号: TM13

文献标识码: A

文章编号: 1001-4390(2020)01-0036-06

Research on equivalent circuits and transmission parameters for source-containing two-port network

Qi Chao¹, Sun Tian¹, Sun Lishan¹, Zesong Wang²

(1. School of Electrical Engineering & Automation, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China.

2. University of Strasbourg, Strasbourg 67000, France)

Abstract: The transmission, conversion and control capability of the two-port network have been widely applied in complex communication system, precise computer network, large-scale power equipment, and advanced intelligent manufacturing. In this paper, four equivalent circuits of source-containing two-port network are raised. The calculating result of corresponding parameters shows that the research method is applicable to both reciprocal and non-reciprocal two-port network. Then, transmission matrix of source-containing two-port network is derived. The similarities and differences between transmission parameters of source-containing two-port network and passive two-port network are compared and analyzed. Finally, by comparing the results of theoretical calculation and simulation experiment, and the correctness of the equivalent circuits of source-containing two-port network and the calculation of transmission parameters, is verified.

Keywords: source-containing two-port network, equivalent circuits, transmission parameters

0 引 言

在电气工程和电工电子技术应用中,为了便于分析、设计与调试,常将整个网络划分成若干个具有简单功能的子网络,每个子网络对信号进行不同的传输、变换或控制。关于一端口网络和无源二端口网络的研究已颇多^[1-3],但对含源二端口网络自身的等效电路和参数计算方面的研究还鲜见报道。随着网络通信技术的兴起与微波的广泛应用,多端口网络电路

成为了人们研究的热门课题^[4-7]。简单而常用的多端口网络是二端口网络,二端口理论在通信、控制系统、电力系统和电子学等技术领域得到广泛应用,它是构成阻抗匹配器、阻抗衰减器、相移器和滤波器的基本网络^[8-9]。在复频域分析动态电路的暂态过程中,会因储能元件的初始状态引入附加电源,在研究一个系统的共模信号时也会面临含源二端口网络的计算问题^[10]。为了便于网络的分析 and 计算,建立含源二端口网络等效电路模型并正确地计算出相应参数就显得尤为重要。

* 基金项目: 哈尔滨工业大学教育教学改革项目(XHG2018B003/XSZ2018003)

早年有一些研究多端口电路等效的文章没有明确地将二端电路与二端口网络区分开来,难免造成一些歧义^[11]。特此说明二端口网络指的是四端电路。本着由简入深的原则,基于文献[12-13],对戴维南定理和诺顿定理加以扩展,建立含源二端口网络的等效电路模型,并对其传输参数进行分析计算。

1 含源二端口网络的等效

1.1 等效电路

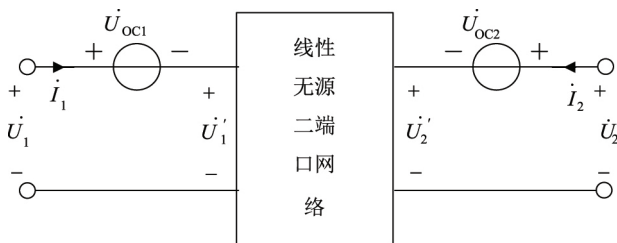
根据电路原理,任何线性含源一端口对外都可以等效为一个戴维南电路或诺顿电路。那么对于图1所示的线性含源二端口网络,将进行怎样地对外等效呢?



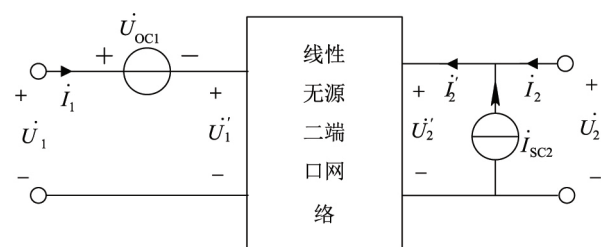
图1 线性含源二端口网络

Fig. 1 Linear source-containing two-port network

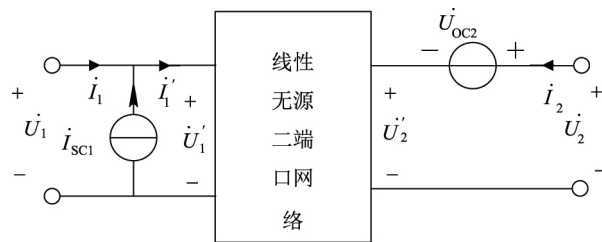
文献[12]将含源一端口的电源等效定理进行推广。将二端口网络进行拆分,可以看成对外两个独立的含源一端口。将每个一端口都进行戴维南或诺顿等效,可以得到如图2所示的四种含源二端口网络等效电路。



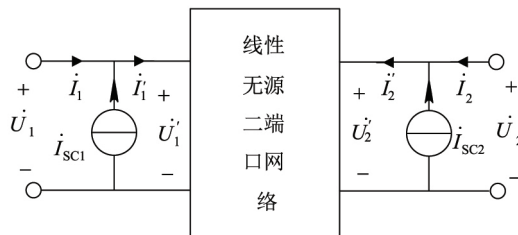
(a) 戴维南-戴维南等效电路



(b) 戴维南-诺顿等效电路



(c) 诺顿-戴维南等效电路



(d) 诺顿-诺顿等效电路

图2 含源二端口网络的四种等效电路

Fig. 2 Four equivalent circuits of the corresponding source-containing two-port networks

图2中,线性无源二端口为含源二端口网络中独立电源置零后的等效T型或者Π型电路,在此输入端口也称为端口1,输出端口也称为端口2。根据端口电气特性对外等效原则可知,图2(a)中 \dot{U}_{oc1} 、 \dot{U}_{oc2} 为端口2、端口1分别开路时对应端口的开路电压;图2(b)中 \dot{U}_{oc1} 为端口2短路时端口1的开路电压, \dot{I}_{sc2} 为端口1开路时端口2的短路电流;图2(c)中 \dot{I}_{sc1} 为端口2开路时端口1的短路电流, \dot{U}_{oc2} 为端口1短路时端口2的开路电压;图2(d)中 \dot{I}_{sc1} 、 \dot{I}_{sc2} 为端口2、端口1分别短路时对应端口的短路电流。

1.2 含源二端口网络互易与非互易参数关系的讨论

选取图2(a)所示戴维南-戴维南等效形式为研究电路的拓扑结构,对互易含源二端口网络进行T型等效,如图3所示。

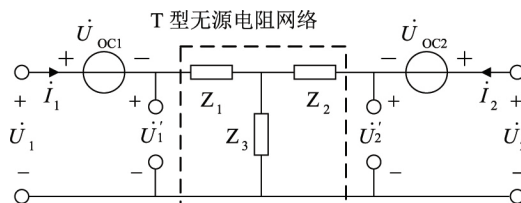


图3 互易二端口网络基于T型网络的戴维南等效电路

Fig. 3 Thevenin equivalent circuit based on T-type network of reciprocal two-port network

根据端口电气特性容易得到该含源二端口网络的端口电压与电流关系:

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{U}_2 \end{bmatrix} = \mathbf{Z} \begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{U}_{oc1} \\ \dot{U}_{oc2} \end{bmatrix} \quad (1)$$

或:

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix} = \mathbf{Y} \begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{U}_2 \end{bmatrix} - \mathbf{Y} \begin{bmatrix} \dot{U}_{oc1} \\ \dot{U}_{oc2} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中矩阵 \mathbf{Z} 和 \mathbf{Y} 分别为线性无源二端口网络的阻抗参数矩阵和导纳参数矩阵。

根据文献[1]可知,非互易无源二端口网络相比于互易网络,仅仅是在无源端口部分增加了一个受控电源。那么对于已知 \mathbf{Z} 参数的非互易含源二端口网络戴维南等效电路如图4所示。

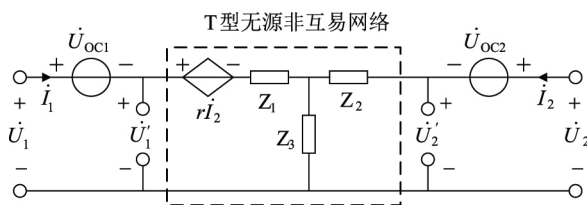


图4 非互易二端口网络T型网络的戴维南等效电路
Fig. 4 Thevenin equivalent circuit based on T-type network of non-reciprocal two-port network

根据基尔霍夫电压或基尔霍夫电流定律,可以很容易的得到该二端口网络的端口电压-电流关系式:

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{U}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{U}_1' + \dot{U}_{oc1} \\ \dot{U}_2' + \dot{U}_{oc2} \end{bmatrix} = \mathbf{Z} \begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{U}_{oc1} \\ \dot{U}_{oc2} \end{bmatrix} \quad (3)$$

或:

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix} = \mathbf{Y} \begin{bmatrix} \dot{U}_1' \\ \dot{U}_2' \end{bmatrix} = \mathbf{Y} \begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{U}_2 \end{bmatrix} - \mathbf{Y} \begin{bmatrix} \dot{U}_{oc1} \\ \dot{U}_{oc2} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_1' \\ \dot{I}_1' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & Z_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{Z_3} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & Z_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_2' \\ -\dot{I}_2' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 + \frac{Z_1}{Z_3} & Z_1 + Z_2 + \frac{Z_1 Z_2}{Z_3} \\ \frac{1}{Z_3} & 1 + \frac{Z_2}{Z_3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_2' \\ -\dot{I}_2' \end{bmatrix} \quad (5)$$

对含源端口列回路电流方程,整理得:

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{I}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 + \frac{Z_1}{Z_3} & Z_1 + Z_2 + \frac{Z_1 Z_2}{Z_3} \\ \frac{1}{Z_3} & 1 + \frac{Z_2}{Z_3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_2 \\ -\dot{I}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & -(1 + \frac{Z_1}{Z_3}) \\ 0 & -\frac{1}{Z_3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_{oc1} \\ \dot{U}_{oc2} \end{bmatrix} \quad (6)$$

将其与式(1)和式(2)进行对比可知,非互易二端口网络与互易二端口网络的电压电流之间计算关系式的形式相同。二端口网络是否互易,所不同的仅仅是参数矩阵 \mathbf{Z} 和 \mathbf{Y} 中的各元素,而矩阵之间的运算关系并不会因此而不同。也就是说,四种含源等效电路所对应的阻抗参数方程和导纳参数方程的形式均不会发生变化。

所研究的是含源二端口网络等效电路的构建及其参数的计算问题,主要对比含源与否、电路参数的异同以及研究各参数之间的计算关系问题。因此采用的等效电路模型和下文对其参数进行计算,分析得出的结论同时适用于互易和非互易的二端口网络。

2 传输参数研究

二端口网络传输参数方程是用输出端口的电压 \dot{U}_2 和电流 \dot{I}_2 来表示输入端口的电压 \dot{U}_1 和电流 \dot{I}_1 的表达式。两个端口级联后所得网络的传输参数矩阵,可以由原先两个网络传输参数矩阵按连接先后顺序依次相乘得到。在无源二端口网络中基本单元对应的传输参数如表1所示。

表1 无源二端口网络基本单元对应的传输矩阵参数表
Tab. 1 Transmission parameter matrixes corresponding to the basic units of passive two-port network

二端口网络基本单元	传输矩阵参数A
	$A = \begin{bmatrix} 1 & Z(\Omega) \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$
	$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ Y(S) & 1 \end{bmatrix}$

下面以图3所示电路为例进行计算分析。令线性无源阻抗网络为互易的T型阻抗网络,输入端口电压设为 \dot{U}_1 , 输出端口电压设为 \dot{U}_2 。由二端口网络的级联特性,对T型无源网络部分有:

对比式(5)和式(6)可见,加入独立源前后传输矩阵 A 不发生变化。

令传输参数矩阵 $A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix}$, 等效电源列向

量前面的系数矩阵为 $X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} \\ x_{21} & x_{22} \end{bmatrix}$ 。即含源二端口

网络的传输参数方程可以写成如下形式:

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{I}_1 \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} \dot{U}_2 \\ -\dot{I}_2 \end{bmatrix} + X V$$

式中 V 为等效后端口独立源列向量。

图 2 四种等效电路应用基尔霍夫电压电流定律后,可以得到有源端口与无源端口电压电流的关系分别为:

$$\begin{cases} \dot{U}_1' + \dot{U}_{OC1} = \dot{U}_1 \\ \dot{U}_2' + \dot{U}_{OC2} = \dot{U}_2 \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} \dot{U}_1' + \dot{U}_{OC1} = \dot{U}_1 \\ \dot{I}_2' - \dot{I}_{SC2} = \dot{I}_2 \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} \dot{I}_1' - \dot{I}_{SC1} = \dot{I}_1 \\ \dot{U}_2' + \dot{U}_{OC2} = \dot{U}_2 \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} \dot{I}_1' - \dot{I}_{SC1} = \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2' - \dot{I}_{SC2} = \dot{I}_2 \end{cases} \quad (10)$$

下面分别对这四种等效电路的独立源系数矩阵 X 进行计算推导。

(1) 戴维南 - 戴维南等效电路。

根据图 2(a) 列出传输关系方程:

$$\begin{cases} \dot{U}_1' = a_{11}\dot{U}_2' - a_{12}\dot{I}_2' \\ \dot{I}_1' = a_{21}\dot{U}_2' - a_{22}\dot{I}_2' \end{cases} \quad (11)$$

再根据含源、不含源端口的电压、电流关系,将式

(7) 带入式(11)整理得:

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{I}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11}\dot{U}_2 - a_{12}\dot{I}_2 + \dot{U}_{OC1} - a_{11}\dot{U}_{OC2} \\ a_{21}\dot{U}_2 - a_{22}\dot{I}_2 - a_{21}\dot{U}_{OC2} \end{bmatrix} =$$

$$A \begin{bmatrix} \dot{U}_2 \\ -\dot{I}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & -a_{11} \\ 0 & -a_{21} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_{OC1} \\ \dot{U}_{OC2} \end{bmatrix}$$

即: $X_a = \begin{bmatrix} 1 & -a_{11} \\ 0 & -a_{21} \end{bmatrix}$ 。

(2) 戴维南 - 诺顿等效电路。

根据图 2(b) 列出传输关系方程:

$$\begin{cases} \dot{U}_1' = a_{11}\dot{U}_2' - a_{12}\dot{I}_2' \\ \dot{I}_1' = a_{21}\dot{U}_2' - a_{22}\dot{I}_2' \end{cases} \quad (12)$$

再根据含源、不含源端口的电压、电流关系,将式

(8) 带入式(12)整理得:

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{I}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11}\dot{U}_2 - a_{12}\dot{I}_2 + \dot{U}_{OC1} - a_{12}\dot{I}_{SC2} \\ a_{21}\dot{U}_2 - a_{22}\dot{I}_2 - a_{22}\dot{I}_{SC2} \end{bmatrix} =$$

$$A \begin{bmatrix} \dot{U}_2 \\ -\dot{I}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & -a_{12} \\ 0 & -a_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_{OC1} \\ \dot{I}_{SC2} \end{bmatrix}$$

即: $X_b = \begin{bmatrix} 1 & -a_{12} \\ 0 & -a_{22} \end{bmatrix}$ 。

(3) 诺顿 - 戴维南等效电路。

根据图 2(c) 列出传输关系方程:

$$\begin{cases} \dot{U}_1' = a_{11}\dot{U}_2' - a_{12}\dot{I}_2' \\ \dot{I}_1' = a_{21}\dot{U}_2' - a_{22}\dot{I}_2' \end{cases} \quad (13)$$

再根据含源、不含源端口的电压、电流关系,将式

(9) 带入式(13)整理得:

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{I}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11}\dot{U}_2 - a_{12}\dot{I}_2 - a_{11}\dot{U}_{OC2} \\ a_{21}\dot{U}_2 - a_{22}\dot{I}_2 - a_{21}\dot{U}_{OC2} - \dot{I}_{SC1} \end{bmatrix} =$$

$$A \begin{bmatrix} \dot{U}_2 \\ -\dot{I}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -a_{11} \\ -1 & -a_{21} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_{SC1} \\ \dot{U}_{OC2} \end{bmatrix}$$

即: $X_c = \begin{bmatrix} 0 & -a_{11} \\ -1 & -a_{21} \end{bmatrix}$ 。

(4) 诺顿 - 诺顿等效电路。

根据图 2(d) 列出传输关系方程:

$$\begin{cases} \dot{U}_1' = a_{11}\dot{U}_2' - a_{12}\dot{I}_2' \\ \dot{I}_1' = a_{21}\dot{U}_2' - a_{22}\dot{I}_2' \end{cases} \quad (14)$$

再根据含源、不含源端口的电压、电流关系,将式

(10) 带入式(14)整理得:

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{I}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11}\dot{U}_2 - a_{12}\dot{I}_2 - a_{12}\dot{I}_{SC2} \\ a_{21}\dot{U}_2 - a_{22}\dot{I}_2 - \dot{I}_{SC1} - a_{22}\dot{I}_{SC2} \end{bmatrix} =$$

$$A \begin{bmatrix} \dot{U}_2 \\ -\dot{I}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -a_{12} \\ -1 & -a_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_{SC1} \\ \dot{I}_{SC2} \end{bmatrix}$$

即: $X_d = \begin{bmatrix} 0 & -a_{12} \\ -1 & -a_{22} \end{bmatrix}$ 。

通过以上计算,可以求得四种电路对应独立源列向量的系数矩阵如下:

$$\begin{aligned} X_a &= \begin{bmatrix} 1 & -a_{11} \\ 0 & -a_{21} \end{bmatrix}, \quad X_b = \begin{bmatrix} 1 & -a_{12} \\ 0 & -a_{22} \end{bmatrix}, \\ X_c &= \begin{bmatrix} 0 & -a_{11} \\ -1 & -a_{21} \end{bmatrix}, \quad X_d = \begin{bmatrix} 0 & -a_{12} \\ -1 & -a_{22} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

独立源向量列写顺序:角标小的在上,角标大的在下。

3 算例验证

图 5 所示为含有理想运放的非互易含源二端口网络,已知 $u_s = 2\sqrt{2}\cos(\omega t)$ V, $\omega = 10^6$ rad/s, $R_1 = 1$ k Ω , $R_2 = 2$ k Ω , $C = 2$ nF, $\beta = 0.5$ 。求解当输入端口接入交流电压源 $u_{s1} = 3\sqrt{2}\cos(\omega t)$ V 时,输出端口接纯电阻负载 $R_L = 1$ k Ω 所消耗的功率 P_L 。

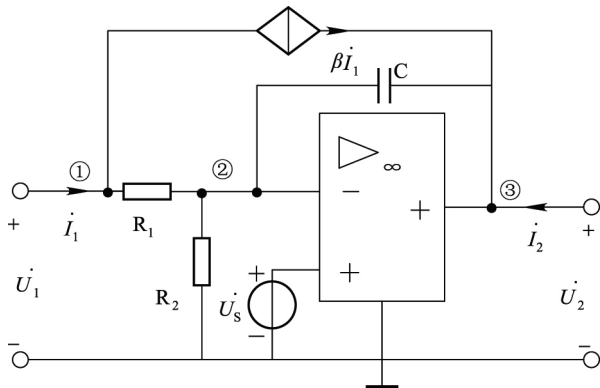


图 5 示例二端口网络

Fig. 5 Exemplified two-port network

理论计算,对节点①,节点②列 KCL 方程:

$$\begin{cases} \dot{I}_1 = \beta \dot{I}_1 + \frac{\dot{U}_{n1} - \dot{U}_{n2}}{R_1} \\ j\omega C \cdot (\dot{U}_{n2} - \dot{U}_{n3}) + \frac{\dot{U}_{n2}}{R_2} = (1 - \beta) \dot{I}_1 \end{cases}$$

由端口命名规则与理想运算放大器的电气特性可

知 $\dot{U}_{n1} = \dot{U}_1, \dot{U}_{n2} = \dot{U}_s, \dot{U}_{n3} = \dot{U}_2$ 。

整理可得:

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = (1 - \beta) R_1 \dot{I}_1 + \dot{U}_s \\ \dot{U}_2 = -\frac{(1 - \beta) \dot{I}_1}{j\omega C} + \left(1 + \frac{1}{j\omega C R_2}\right) \dot{U}_s \end{cases} \quad (15)$$

根据式 (15) 得到传输参数矩阵 $A =$

$$\begin{bmatrix} -j\omega C R_1 & 0 \\ -\frac{j\omega C}{(1 - \beta)} & 0 \end{bmatrix}。$$

当端口 1 开路时,即 $\dot{I}_1 = 0$,由式 (15) 可以得到输出端口开路电压 $\dot{U}_{oc2} = \left(1 + \frac{1}{j\omega C R_2}\right) \dot{U}_s$;当端口 2 开路时,根据输入端基尔霍夫电压电流定律和理想运放的电气特性,可以得到输入端口的开路电压 $\dot{U}_{oc1} = \dot{U}_s$ 。

$$\begin{aligned} X V &= X_a \begin{bmatrix} \dot{U}_{oc1} \\ \dot{U}_{oc2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & j\omega C R_1 \\ 0 & \frac{j\omega C}{(1 - \beta)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 + \frac{1}{j\omega C R_2} \end{bmatrix} [\dot{U}_s] = \\ & \begin{bmatrix} 3 + 4j \\ 10^{-3}(2 + 8j) \end{bmatrix} \end{aligned}$$

分析电路可知 $\dot{U}_1 = \dot{U}_{s1}, \dot{U}_2 = -R_L \dot{I}_2$ 。将数据代入:

$$\begin{bmatrix} 3 \\ \dot{I}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -2j & 0 \\ -4j \times 10^{-3} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -10^{-3} \dot{I}_2 \\ -\dot{I}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 3 + 4j \\ 10^{-3}(2 + 8j) \end{bmatrix}$$

$$\text{解得: } \begin{cases} \dot{I}_1 = 2 \text{ mA} \\ \dot{I}_2 = -2 \text{ mA} \end{cases}, \text{ 负载消耗的功率 } P_L =$$

$$|\dot{I}_2|^2 R_L = 4 \text{ mW}。$$

仿真电路和实验结果如图 6 所示,可以验证上述理论分析和参数矩阵计算的正确性。

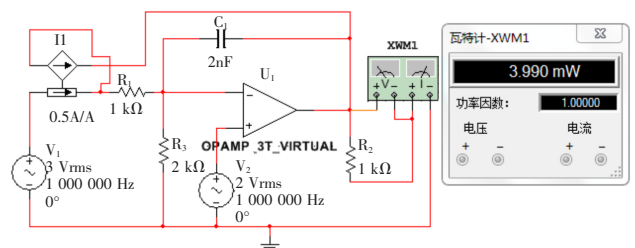


图 6 仿真实验结果

Fig. 6 Simulation experiment result

4 结束语

基于线性含源一端口的戴维南-诺顿定理和线性无源二端口网络等效,根据基尔霍夫电压电流定律推导了线性含源二端口网络四种等效电路的端口特性方程。借助数学推导出线性含源二端口网络传输参数方程,并分别研究了四种等效电路的独立源系数矩阵。讨论了含源二端口互易与非互易网络参数关系。最后通过算例的理论计算和仿真对比表明,该含源二端口

网络等效及其参数计算的正确性。所述方法是基于电路的物理意义建立的线性含源二端口网络的等效电路模型,借用数学推导得到了网络参数,为电路化简提供了一种新思路,也进一步完善了电路理论基础的知识体系。

参 考 文 献

- [1] 齐超,刘洪臣. 工程电路分析基础[M]. 高等教育出版社,2016. 12.
- [2] 周庭阳,张红岩. 电网络理论[M]. 机械工业出版社,2008. 6.
- [3] 陈希有. 电路理论教程[M]. 高等教育出版社,2013.
- [4] 王辉,陈耀,张文博. 一种三端口高增益DC/DC变换器[J]. 电力科学与工程,2018,34(8): 50-55.
Wang Hui, Chen Yao, Zhang Wenbo. A three-port DC/DC converter with high step-up voltage gain[J]. Electric Power Science and Engineering, 2018, 34(8): 50-55.
- [5] 曾三妹. 一种用电子开关实现多端口输出的方法[J]. 中国自动识别技术,2018,(4): 63-65.
- [6] 冯兴田,陶媛媛,孙添添. 基于储能的多端口电源系统能量管理与控制策略[J]. 电气自动化,2018,40(4): 66-69.
Feng Xingtian, Tao Yuanyuan, Sun Tiantian. Energy Management and Control Strategy for Multiport Power Supply Systems Based on Energy Storage[J]. Electrical Automation, 2018, 40(4): 66-69.
- [7] 王盼. 多端口级联多电平变换器及其在电机驱动中的应用研究[D]. 武汉: 武汉大学,2018.
- [8] 郭洒. 基于传输线变压器四路功率分配器的设计[J]. 物联网技术,2018,(8): 83-84.
- [9] 何戎根,陈建荣. Ku波段反射型模拟移相器仿真设计[J]. 电子设计工程,2018,26(23): 38-41.
He Ronggen, Chen Jianrong. Simulation design of a Ku-band analog phase shifter[J]. Electronic Design Engineering, 2018, 26(23): 38-41.
- [10] 王鹏,汪涛,丁坤,等. 一种高增益三级运算放大器[J]. 微电子学,2018,48(5): 579-584.
Wang Peng, Wang Tao, Ding Kun, et al. A High Gain Three Stage Operational Amplifier[J]. Microelectronics, 2018, 48(5): 579-584.
- [11] 虞宏杰,白雪,张万峰. 含源线性二端口网络的一种简化处理方法[J]. 电工技术,1996,(11): 53.
- [12] 梁永清,韦冬梅,韦忠海. 戴维南-诺顿定理的推广应用[J]. 电气电子教学学报,2015,37(2): 2-3.
- [13] 泰利国,孙立山. 复合多端口网络的参数矩阵计算[J]. 电气电子教学学报,2010,32(7): 3-4.
Tai Liguang, Sun Linshan. The Calculations for the Parameters Matrix of Complex Multi-port Networks[J]. Journal of Electrical & Electronic Education, 2010, 32(7): 3-4.
- [14] 王毅,孙洪亮,等. 基于迭代合并的多端口网络低压电力线信道建模研究[J]. 电测与仪表,2015,52(24): 46-51.
Wang Yi, Sun Hongliang, et al. Research on iterative channel combination modeling in multiple port of low voltage power line network[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2015, 52(24): 46-51.

作者简介:



齐超(1970—)女,教授,博士,从事光电测试技术及电路理论教学研究。Email: qichao@hit.edu.cn

孙天(1995—)男,硕士研究生,从事无线电能传输特性研究及电路分析设计。Email: 18S006008@stu.hit.edu.cn

孙立山(1964—)男,教授,博士,从事电路理论教学和电网络图论应用研究。

Zesong Wang(1996—)男,本科生,从事数学与应用数学研究。

收稿日期:2019-03-20; 修回日期:2019-05-29

(田春雨 编发)