

文氏桥式振荡电路特性及数值仿真分析

田社平,蔡萍,陈洪亮,张峰

(上海交通大学 电子信息学院,上海 200030)^①

摘要:正弦波振荡电路是模拟电路课程的基本教学内容,几乎所有的教材都采用反馈的概念来分析正弦振荡电路的特性。本文通过列写文氏桥式振荡电路的电路方程,分析了该电路的振荡特性,并采用数值仿真的方法模拟起振条件,得到了与现有教材对该电路分析一致的结果。上述分析结果可供讲授电路理论及模拟电路课程的教师参考。

关键词:文氏桥式振荡电路;电路分析;数值仿真

中图分类号:TM13

文献标识码:A

文章编号:1008-0686(2007)03-0038-03

Analysis and Numerical Simulation of Wen's Bridge Oscillating Circuit

TIAN She-ping, CAI Ping, CHEN Hong-liang, ZHANG Feng

(School of Electrical and Electronic Eng., Shanghai Jiao Tong Univ., Shanghai 200030, China)

Abstract: Sinusoidal oscillating circuits are the fundamental parts in the course of Analog Circuits. Almost all the textbooks analyze the oscillating circuits using the concept of feedback. Fundamental circuit analysis is applied on Wen's bridge oscillating circuit and circuit equation is deduced to analyze the circuit's oscillating characteristics and its starting condition for oscillation which concurs with the textbooks. Numerical results are given through computer simulation. The analysis results are helpful for the teaching of circuit theory and analog circuits.

Key words: Wen's bridge oscillating circuit; circuit analysis; numerical simulation

0 引言

振荡电路是一种能将直流能源转换成具有一定频率和幅度以及一定波形的交流能量输出的电路。按振荡波形可分为正弦波振荡电路和非正弦波振荡电路。正弦波振荡电路是电子技术中的一种基本电路,它在测量、通信、无线电技术、自动控制 and 热加工等许多领域有着广泛的应用。

在模拟电路课程的教学中,正弦波振荡电路是基本的教学内容。几乎所有的教材都采用反馈的概念来分析正弦振荡电路的特性,即将正弦波振荡电路分成放大电路、形成正反馈并满足相位平衡条件

的反馈网络、具有频率选择特性的选频网络以及能够稳定输出波形的稳幅环节等几个部分。然后再分析电路的起振条件,即振荡电路中必须引入正反馈,且要有外加的选频网络^[1]。这种分析方法由于具有简便性,被证明是工程中非常实用的分析方法。但是由于模拟电路课程的先修课为电路分析或电路理论,学生所熟悉的是电路分析的一般方法,在学习正弦波振荡电路的基本原理时往往提出能否用所学的电路分析方法来分析正弦波振荡电路这样的问题。本文针对文氏桥式振荡电路,通过建立电路方程来分析该电路的特性,并采用数值仿真的方法来模拟起振条件。

① 收稿日期:2006-12-25;修回日期:2007-05-08

作者简介:田社平(1967-),男,湖北仙桃人,博士,副教授,主要从事电路理论和动态检测技术的教学和科研工作;

蔡萍(1963-),女,海南琼海人,教授,博士生导师,主要从事模拟电路技术和微弱信号检测等方面的教学和科研工作。

1 电路方程的建立及分析

图 1 为文氏桥式振荡电路。首先建立其电路方程并分析其基本特性。由理想运算放大器的“虚断”特性。

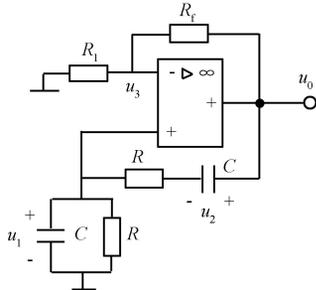


图 1 文氏电桥振荡电路(不含非线性稳幅环节)
对反向输入端,有

$$u_3 = \frac{R_1}{R_1 + R_f} u_0 = u_0 / k \tag{1}$$

式中 $k = 1 + \frac{R_f}{R_1}$, 为振荡电路的开环放大倍数。对

同向输入端,由 KVL 有

$$u_1 + u_2 + RC \frac{du_2}{dt} = u_0 \tag{2}$$

由 KCL, 并利用理想运算放大器的“虚断”特性,有

$$C \frac{du_2}{dt} = C \frac{du_1}{dt} + \frac{u_1}{R} \tag{3}$$

由理想运算放大器的“虚短”特性可知, $u_1 = u_3$, 由式(2)和式(3)可得图 1 所示文氏电桥振荡电路状态方程为

$$\begin{cases} \frac{du_1}{dt} = \frac{1}{RC} [(k - 2) u_1 - u_2] \\ \frac{du_2}{dt} = \frac{1}{RC} [(k - 1) u_1 - u_2] \end{cases} \tag{4}$$

由式(1)可得输出方程为

$$u_0 = k u_1 \tag{5}$$

由式(4)和式(5)消去 u_1, u_2 , 得到以输出电压 u_0 为变量的电路方程为

$$\frac{RC}{k} \frac{d^2 u_0}{dt^2} + \left[\frac{3}{k} - 1 \right] \frac{du_0}{dt} + \frac{1}{kRC} u_0 = 0 \tag{6}$$

分析式(6), 可以看出电路的响应 u_0 为正弦波的条件是 $k = 3$, 相应的振荡频率为

$$\omega = \frac{1}{RC} \tag{7}$$

必须注意, 当 $k = 3$ 时输出的正弦波不是稳定的, 由于外界干扰常常使得元件参数发生变化。如果由于 R_1, R_f 发生变化使得 $k < 3$, 式(6)的特征根

位于复数平面的左半平面, 电路输出衰减的振荡波形; 同样, 如果 $k > 3$, 式(6)的特征根位于复数平面的右半平面, 电路输出发散的振荡波形。此时电路还须采取稳定措施使输出的正弦波幅值得到稳定。

2 数值仿真分析

为了稳定输出电压的幅值, 一般应在电路中加入非线性环节^[1]。非线性环节的作用必须保证开环放大倍数稳定在 $k = 3$, 即当 $k < 3$ 时, 应加大 R_f 或减小 R_1 , 而当 $k > 3$ 时, 应减小 R_f 或加大 R_1 。在实际中一般 R_f 选用负温度系数的热敏电阻或 R_1 选用正温度系数的热敏电阻, 如图 2 所示 (R_f 为负温度系数的热敏电阻)。

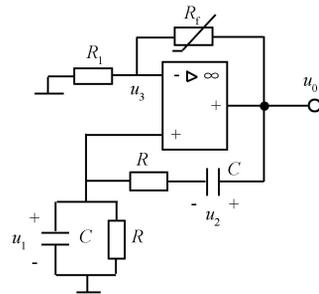


图 2 文氏电桥振荡电路(包含非线性稳幅环节)

为便于数值仿真分析, 本文取非线性电阻 R_f 具有如下函数形式

$$R_f = k_1 R_1 - k_2 / (u_0 - u_1) \tag{8}$$

式中 k_1, k_2 为调节参数, 均大于 0, 其中 k_2 的大小决定了电阻 R_f 的非线性程度。从式(8)可以看出, 当电路输出衰减的正弦振荡波形时 ($k < 3$), 此时流经 R_f 的电流减小, $|u_1 - u_0|$ 减小, 从而 R_f 增大, k 也随之增大; 当电路输出发散的振荡波形时 ($k > 3$), 此时流经 R_f 的电流增大, $|u_1 - u_0|$ 增大, 从而 R_f 减小, k 也随之减小。可见, 如果选取合适的参数 k_1, k_2, R_f 可保证电路输出稳定的振荡波形。 k 与 k_1, k_2, R_f 之间的关系为

$$k = 1 + k_1 - \frac{k_2 / (u_0 - u_1)}{R_1} \tag{9}$$

由式(4)、式(5)及式(9)可得出图 2 所示电路的状态方程为

$$\begin{cases} \frac{du_1}{dt} = 0 \left[\left[k_1 - \frac{k_2 / (u_0 - u_1)}{R_1} - 1 \right] u_1 - u_2 \right] \\ \frac{du_2}{dt} = 0 \left[\left[k_1 - \frac{k_2 / (u_0 - u_1)}{R_1} \right] u_1 - u_2 \right] \end{cases} \tag{10}$$

输出方程为

$$u_o = \left[k_1 - \frac{k_2 / u_o - u_i /}{R_1} + 1 \right] u_i \quad (11)$$

可以利用数值计算方法如龙格 - 库塔法^[3]求解上述状态方程和输出方程,本文采用 Matlab 编程进行计算。图 3 分别给出了取不同参数值时的计算结果。有关参数取值见表 1,其中电容的初始电压由电路接通电源时随机获得。

表 1 参数取值

| 显示 | 0 | R_1 | k_1 | k_2 | $u_1(0)$ | $u_2(0)$ |
|------|-----------|-------|-------|-------|----------|----------|
| 图(a) | 62.8rad/s | 1k | 3 | 20 | 0V | 0.1V |
| 图(b) | 62.8rad/s | 1k | 2.1 | 2 | 0.1V | 0.1V |
| 图(c) | 62.8rad/s | 1k | 2 | 0 | 0V | 2V |
| 图(d) | 62.8rad/s | 1k | 2 | 20 | 0V | 1V |

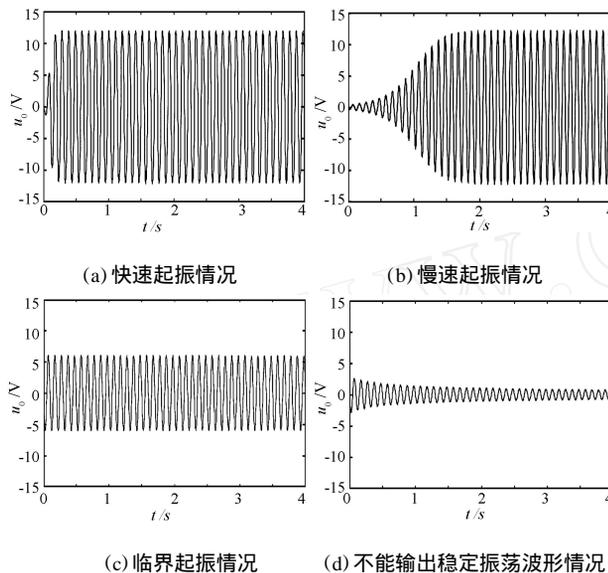


图 3 数值仿真结果

从计算结果可知,当 k_1 较大时,开环放大倍数较大,电路易于起振,如图 3(a)所示。当 k_1 较小时,开环放大倍数较小,电路要经过一定时间后才进入稳定振荡,如图 3(b)所示。当 $k_1 = 2, k_2 = 0$ 时, $k = 3$,属于临界起振情况,也可以输出稳定的振荡波形,其幅值取决于初始条件,即 $u_1(0)、u_2(0)$ 的大小,如图 3(c)所示。图(d)中 $k_1 = 2, k_2 = 20$,由于 R_f 的非线性,使得开环放大倍数小于 3,电路在电容初始电压的作用下输出衰减的振荡波形。

3 结语

本文通过列写文氏桥式振荡电路的电路方程,分析了该电路的振荡特性,得到了与现有教材对该电路分析一致的结果。笔者在讲授的电路理论课上进行了介绍,加深了学生对二阶动态电路响应特性的理解,效果较好。上述分析结果也可供讲授模拟电路课程的教师在介绍正弦振荡电路的内容时参考。

参考文献:

- [1] 童诗白,华成英. 模拟电子技术基础[M]. 北京:高等教育出版社,2001
- [2] 李瀚荪. 简明电路分析基础[M]. 北京:高等教育出版社,2002
- [3] 李庆扬,王能超,易大义. 数值分析[M]. 武汉:华中理工大学出版社,1986
- [4] 周金萍. Matlab 6 实践与提高. 北京:中国电力出版社,2002

(上接第 37 页张媛媛等文)

参考文献:

- [1] 胡寿松. 自动控制原理[M]. 北京:科学出版社,2001:170 - 201
- [2] 胡寿松. 自动控制原理习题集[M]. 北京:科学出版社,2006:136 - 173
- [3] 陈晓东. 自动控制原理同步辅导及习题全解[M]. 北京:中国矿业大学出版社
- [4] 方斌. 自动控制原理学习指导与题解[M]. 西安:西安电子科

技大学出版社,2003:89 - 128

- [5] 余成波等. 自动控制原理[M]. 北京:清华大学出版社,2003:230 - 270
- [6] 冯巧玲等. 自动控制原理[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2003:112 - 156
- [7] 胡应占等. 开环幅相频率特性曲线和对数相频特性曲线的完整画法[J]. 上海:上海电机技术高等专科学校学报,2001,12(1)