

DOI:10.15923/j.cnki.cn22-1382/t.2019.1.04

一种宽范围的移相电路

林志琦, 邵建波*, 李严军

(长春工业大学 电气与电子工程学院, 吉林 长春 130012)

摘要:首先分析了RC超前电路与RC滞后电路的工作原理。根据特性将这两种电路重新构造了一种新电路以实现输入信号的 $0\sim\pi$ 相移。两个RC电路的幅度特性互补保证输入和输出幅度相等。

关键词:RC移相电路; RC超前电路; RC滞后电路; 相互补偿

中图分类号: TM 4; TM 131.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-1374(2019)01-0020-06

A wide range of phase shifting circuit

LIN Zhiqi, SHAO Jianbo*, LI Yanjun

(School of Electrical & Electronic Engineering, Changchun University of Technology, Changchun 130012, China)

Abstract: Operating principle of RC lead and lag circuit is analyzed, and then the two parts are reconstructed to a new circuit based on the characteristics to realize a phase shift of $0\sim\pi$ for the input. The amplitude the two RC circuits is compensated each other to ensure that the input amplitude is equal to that of output.

Key words: RC phase shift circuit; RC lead circuit; RC lag circuit; compensate each other.

0 引言

移相器是一种对相位变化进行控制的元件,广泛应用于雷达、导弹控制、加速器以及通信等各个领域^[1]。同时,相同频率的两个信号之间的相移是模拟和分析电子工业中继电保护领域事故的重要手段^[2]。比如在相控天线中,需要使用移相器对天线阵列各单元信号的相位进行控制,以形成空间波束并控制其进行扫描^[3]。

移相器从元器件组成上主要包括数字移相器

和模拟移相器^[4]。虽然数字移相器近年来发展比较热门且有诸多优点,但相比于数字移相器,模拟移相器具有连续调相、结构简单、复杂度低等优点,仍具有一定的实际意义。

从原理上说,数字移相器的精度是有限的,而模拟移相器在这方面是连续的,且精度高。

文中将从两种最简单的一阶RC电路进行介绍与分析,并根据其特性设计出一种连续可调的 $0\sim\pi$ 等幅的移相电路。

收稿日期: 2018-10-23

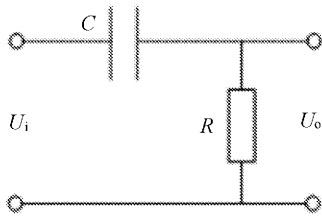
基金项目: 吉林省科技厅基金资助项目(KJT2016-2)

作者简介: 林志琦(1964—),男,汉族,吉林长春人,长春工业大学教授,博士,主要从事电气及自动控制方向研究,E-mail:linzhiqi@ccut.edu.cn. *通讯作者:邵建波(1994—),男,汉族,安徽亳州人,长春工业大学硕士研究生,主要从事电力电子与电力传动方向研究,E-mail:371951534@qq.com.

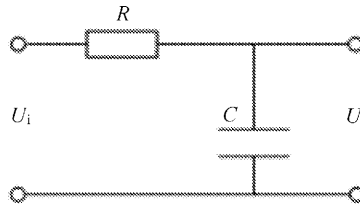
1 一阶 RC 的电路分析与对比

1.1 一阶 RC 移相电路组成

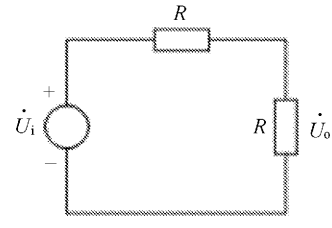
一阶 RC 电路在关于移相方面可分为 RC 超



(a) 超前电路



(b) 滞后电路



(c) 超前、滞后的等效电路

图 1 一阶 RC 超前、滞后电路连接上的对比

其工作原理如下:

1) RC 超前电路见图 1(a), 从电容器的两端电压落后于电流 90° 出发^[5]。电路从输入中顺时针看, 电容器 C 接在电阻器 R 的前面, 电容器 C 中的电流相位超前于电压相位, 根据串联电路的特点, 电容器 C 中的电流正是电阻器 R 中的电流, 这个电流在电阻器 R 上的电压降就是输出电压, 所以输出电压超前^[6]。

2) 如图 1(b) 中由于电容器 C 与输出并联, 根据并联电路电压相等的原理, 输出电压就是电容

$$U_o = \frac{Z}{R + Z} \dot{U}_i = \frac{\frac{1}{j\omega C}}{R + \frac{1}{j\omega C}} \dot{U}_i = \frac{U_i}{\sqrt{1 + (\omega RC)^2}} \angle -\arctan(\omega RC) \quad (1)$$

其中输出电压有效值为:

$$U_o = \frac{\dot{U}_i}{\sqrt{1 + (\omega RC)^2}} \quad (2)$$

输出电压相位为:

$$\varphi_2 = \angle -\arctan(\omega RC) \quad (3)$$

$$U_o = \frac{R}{R + Z} \dot{U}_i = \frac{R}{R + \frac{1}{j\omega C}} \dot{U}_i = \frac{1 - j\omega RC}{1 + j\omega RC} \dot{U}_i = \frac{U_i}{\sqrt{1 + \left(\frac{1}{\omega RC}\right)^2}} \angle -\arctan \frac{1}{\omega RC} \quad (4)$$

其中输出电压有效值为:

$$U_o = \frac{U_i}{\sqrt{1 + \left(\frac{1}{\omega RC}\right)^2}} \quad (5)$$

输出电压相位为:

$$\varphi_2 = \angle \arctan \frac{1}{\omega RC} \quad (6)$$

由式(4)可知, 在与上面相同的条件下, 则有

前电路与 RC 滞后电路。其电路结构可以仅有一个电阻和电容组成。

一阶 RC 超前、滞后电路连接上的对比如图 1 所示。

器两端的电压^[7]。因电容器两端的电压滞后于电流, 所以输出电压滞后。

从图 1(a) 和 (b) 中可以发现, 电路连接仅使用电阻器和电容器来形成分压电路, 因此, 它们等效于图 1(c) 所示电路。

1.2 一阶 RC 电路的数学分析及相位特性

在分析对比了两种电路的工作原理后, 进一步通过数学分析的方法得出精确的相位与幅度及频率的关系。

根据图 1(c) 和分压的原理对于图 1(b) 有:

从式(1)可以看出, 当信号的频率一定时, 输出电压的有效值与相位都随电路的时间常数变化而变化。设电容器 C 的容量为一定值, 如果电阻值 R 从 0 到 ∞ 变化, 则相位从 $\pi/2 \sim 0$ 变化。

同理, 对于图 1(a) 有:

当输入信号的角频率一定时, 输出电压的大小及相位随电路参数的变化而改变。设电容 C 的容量值不变, 如果电阻值 R 从 0 到 ∞ 变化, 则相位从 $0 \sim -\pi/2$ 变化。

根据式(2)、式(3)、式(5)和式(6)绘出一阶 RC 超前电路和一阶 RC 滞后电路, 电路的输出幅度随着移相角度的变化如图 2 所示。

在图 2 中对频率、时间常数值及幅度值进行了归一化处理。

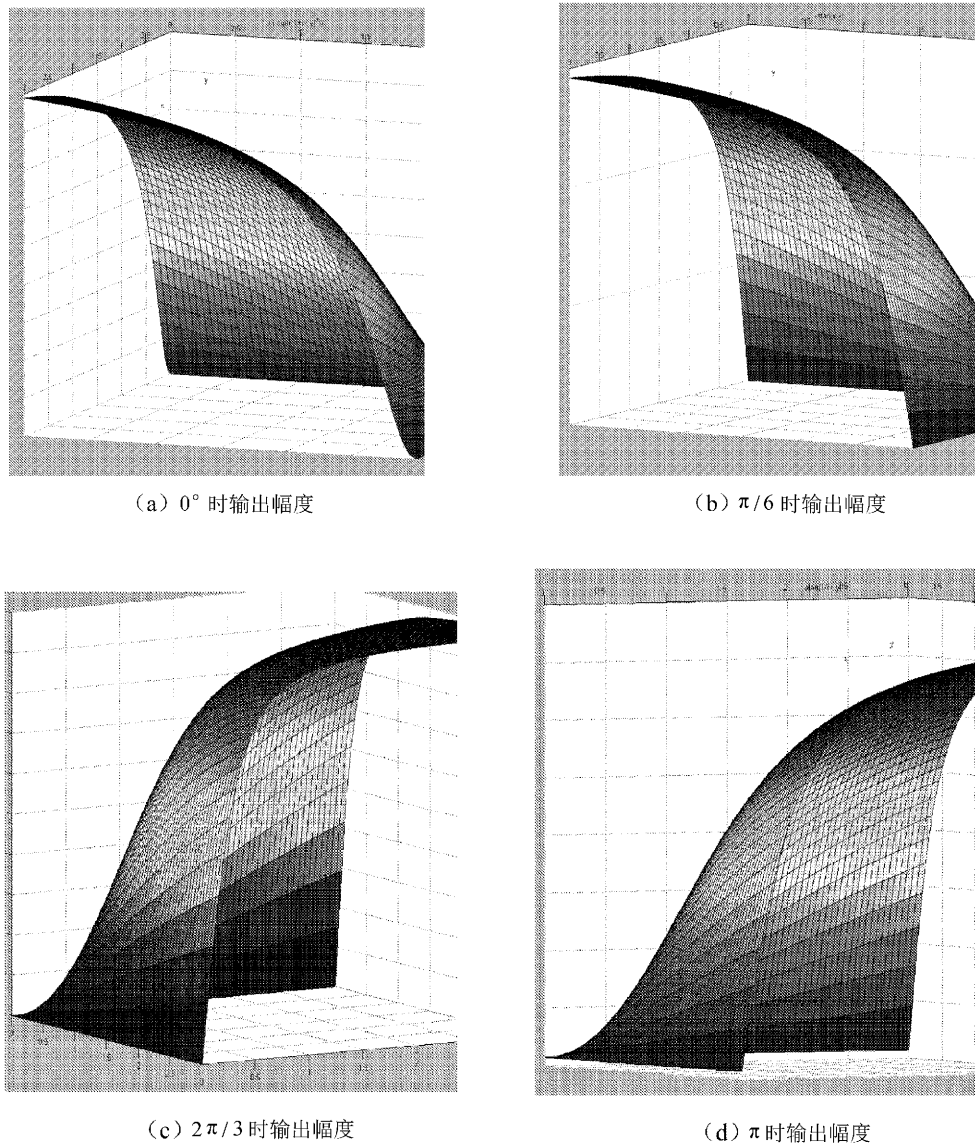


图 2 一阶 RC 超前电路和一阶 RC 滞后电路的输出幅度随着移相角度的变化

由图 2 可以看出,对于超前电路,当信号的周期远大于电路的时间常数时,电路的移相为 0° ,输入输出幅度相等。这时该电路已经变为耦合电路。对于滞后移相电路,当信号周期比时间常数小很多时,电路的移相为 0° ,输入输出幅度相等,此时该电路变为低通滤波电路。

通常情况下,移相大小与时间常数有关,与频率有关,输出信号幅度也与相位和频率有关。

2 高精度的 $0\sim\pi$ 模拟移相电路与数字移相器的对比

2.1 高精度的 $0\sim\pi$ 模拟移相原理设计

从图 2 可以看出,图 1(a)与(b)两种电路的移相角度不同时输出幅度也不同,而在实际应

用中,通常要求移相器电路的输出幅度与移相角度及工作频率无关。为了实现输出幅度与移相角度无关,仔细观察图 2(a)与(b),图 2(c)与(d)会发现这两对曲面的变化正好相反,可以利用这种特性进行补偿,实现输出幅度与移相角度和信号频率无关。

输出幅度与移相角度无关的电路如图 3 所示。

该电路可在 $0\sim\pi$ 之间移相,并保持输入与输出信号幅度相等。

图 3 中,输入信号 U_i 同时加到由 C_1 、 R_1 构成的超前移相电路和由 R_2 、 C_2 构成的滞后移相电路上, U_e 是超前移相电路的输出, U_a 是滞后移相电路的输出,两者的差为总输出:

$$\dot{U}_o = \dot{U}_{cc} - \dot{U}_{dc}$$

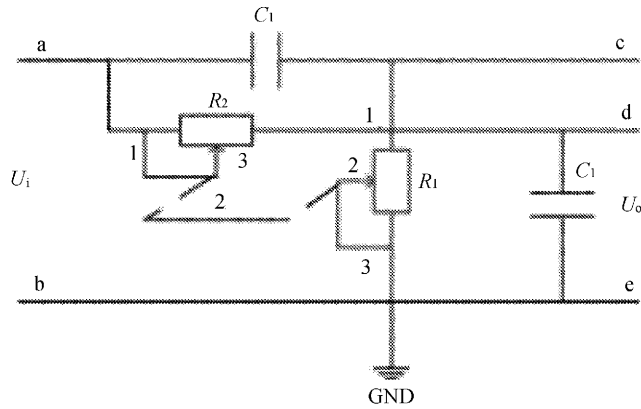


图 3 一阶 RC 超前电路和一阶 RC 滞后电路共同组成的 $0 \sim \pi$ 电路

当 $C_1 = C_2 = C; R_1 = R_2 = R$ 时

$$\dot{U}_o = \frac{1}{R + \frac{1}{j\omega C}} \dot{U}_i - \frac{R}{R + \frac{1}{j\omega C}} \dot{U}_i = \frac{1 - j\omega RC}{1 + j\omega RC} \dot{U}_i = \frac{\sqrt{1 + (\omega RC)^2}}{\sqrt{1 + (\omega RC)^2}} U_i \angle -2\arctan\omega RC \quad (7)$$

其中输出电压有效值为:

$$U_o = \frac{\sqrt{1 + (\omega RC)^2}}{\sqrt{1 + (\omega RC)^2}} U_i = U_i \quad (8)$$

输出电压相位为:

$$\varphi_2 = \angle -2\arctan\omega RC \quad (9)$$

式(8)说明这种移相电路的输出电压与输入电压幅度相等,保证了幅值不随频率及相位的变化而变化。输出电压的相位可通过改变电路的时间常数来调节。

设电容器 C 的容量值一定时,如果电阻器 R 的阻值从 0 到 ∞ 变化,则相位从 $0 \sim -\pi$ 变化;当 $R = 0$ 时,则 $\varphi_2 = 0^\circ$,输出电压 U_o 与输入电压 U_i 同相位。当 $R = \infty$ 时,则 $\varphi_2 = \pi$,输出电压 U_o 与输入电压 U_i 相反。当 $0 < R < \infty$ 时,则 φ_2 在 0 与 π 之间变化。

2.2 性能分析及模拟与数字移相电路的比较

关于模拟移相器的性能及精度问题,可以依据以下推导公式进行计算。

由式(9)可知,输出电压相位 φ_2 是关于 R 和 C 的函数。即可用 $\varphi_2 = f(R, C)$ 表示。根据式(9)可得出 φ_2 分别对 R, C 偏导公式如下:

$$\frac{\partial \varphi_2}{\partial R} = -\frac{2\omega C}{1 + (\omega CR)^2} \quad (10)$$

$$\frac{\partial \varphi_2}{\partial C} = -\frac{2\omega CR}{1 + (\omega CR)^2} \quad (11)$$

从式(10)、式(11)中可以知道,相位的变化与 R, C 成一定的关系。而在实际应用中,通常是以

电容 C 为不变量,而电阻 R 是连续可变的。

当 $\omega CR \gg 1$ 时,则式(10)可写成:

$$\partial \varphi_2 \approx -\frac{2}{\omega CR^2} \partial R \quad (12)$$

根据实际电路可以假设 $\omega = 300 \text{ Hz}, C = 1 \mu\text{F}, R = 10 \text{ k}\Omega$,根据式(12),当 $\partial R = 0.1 \Omega$ 时, $|\partial \varphi_2| = 1/1500$ 。由此可以看出,该模拟移相器的精度已高达 $6.67^\circ \times 10^{-5}$,这远比 6 位数字式移相器的精度要高。

文中提到数字式移相器精度有限,这是因为数字式移相器的精度主要是靠 A/D, D/A 转换器的位数决定的。而这里的位数是指能够将模拟信号与 N 位二进制数字信号相互转换的。比如说一个 6 位的 A/D 转换器,它能够将模拟输入信号转换成 6 位二进制数字输出信号,即将连续的模拟信号分成了 2^6 份,并将其数字化,显然这是存在一定误差的。而且随着要求的精度越高,对数字式的移相器中 A/D, D/A 的位数要求就越高,以现有的技术会提高成本而且不易实现^[8]。因此,在考虑成本时,数字移相器应用到精度要求不是很高的场合是相对合理的,而模拟移相器就很好地解决了这些问题。因为模拟移相器本身就是处理模拟信号的,没有对输入信号进行数字化,精度高,而且是连续可调的,根据现有的半导体技术将电阻制作成更高精度的比制作相应精度的 A/D, D/A 转换器容易得多,成本更低^[9]。

在实际应用中,模拟移相器与数字式移相器

相比结构简单实用,且易于实现。

3 移相器的实现与测试

3.1 实用的 $0 \sim \pi$ 等幅移相器的实现

图3中,电路的输出是两个信号的差值,将差动信号由运算放大器转为单端信号, $0 \sim \pi$ 移相电路原理如图4所示。

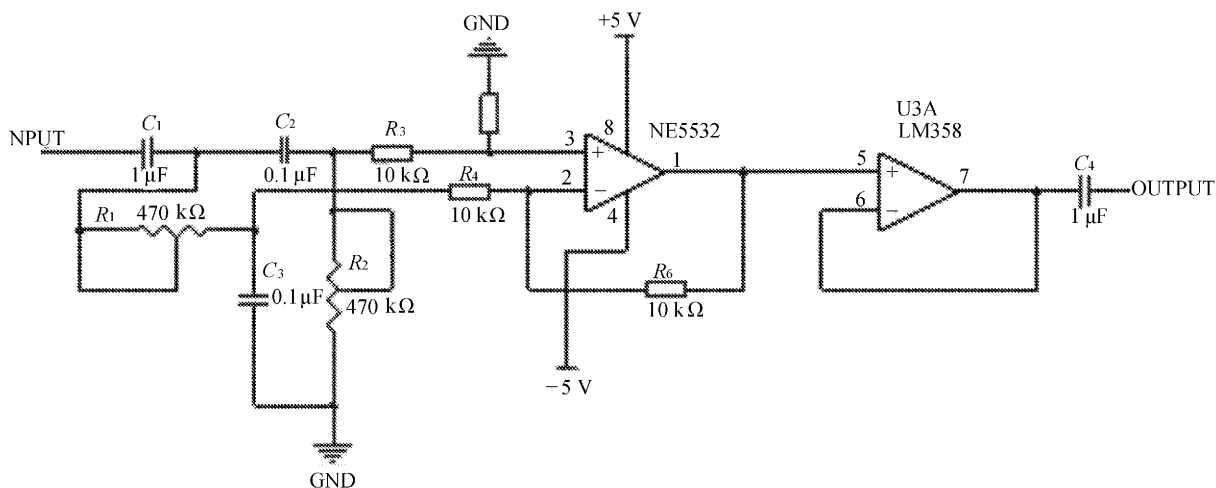


图4 $0 \sim \pi$ 移相电路原理

实验表明,图4中电路的参数可以在 $300 \sim 4\,000$ Hz 范围内,实现 $0 \sim \pi$ 的移相。实验电路的实物图如图5所示。

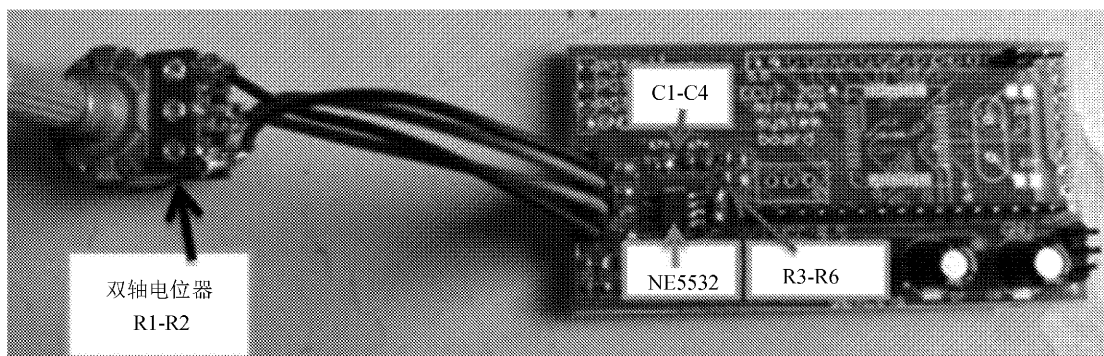
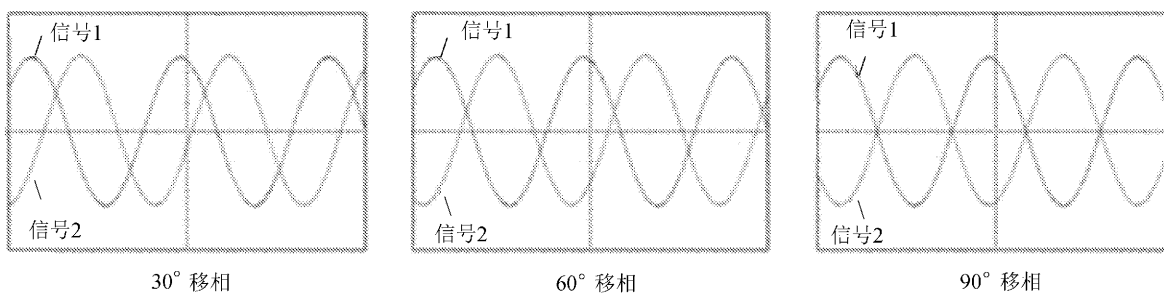


图5 实验电路的实物图

3.2 测试结果及应用

测试结果如图6所示。



30° 移相

60° 移相

90° 移相

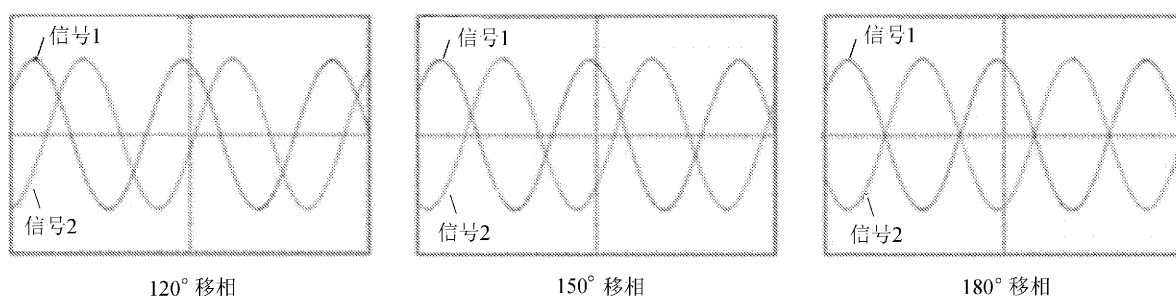


图6 实际测量的移相效果波形

该电路很好地实现了 $0 \sim \pi$ 的等幅移相。

该实验电路可以应用到一些领域,比如锁相放大器、调幅广播等。就调幅广播而言,它具有频带窄、容纳多个无线电台、传输距离远等优点^[10]。但是也存在一些问题,如混合站和串扰等,而传统的二极管检测电路也存在这些问题。同步检测是基于幅度调制的双边带。它选择接收较少的干扰或干扰自由边带,以减少甚至消除干扰。同步检测的优点还在于其音质比调频广播稍差,而同步检测电路的核心部件就可以使用该移相器电路。

4 结 语

经过上述理论推导及实验测试结果充分说明了本设计的合理性及可行性,并且本实验是使用简单的分立元件就很好地实现了高精度 $0 \sim \pi$ 等幅移相,结构简单易于实现、成本低廉、应用广泛。由于篇幅有限,文中没有对一些客观条件进行讨论。比如 R 、 C 等元件的老化,温度对电路的影响等。这些问题的解决,会进一步提高该电路的稳定性及精度,后续会继续研究并解决这些问题。

参考文献:

- [1] 杨婷婷.宽带波导移相器研究与应用[D].成都:电子科技大学,2015.
- [2] 钟军涛,史东湖.一种矢量调制移相器的反馈补偿设计方法[J].飞行器测控学报,2014,33(5):377-381.
- [3] 爱华,赵明镜,程宜凡.基于单片机的数字移相技术[J].科技广场,2004(8):61-62.
- [4] ALAN V. OPPENHEIM.信号与系统[M].西安:西安交通大学出版社,1997.
- [5] 元秋奇.数字图像处理学[M].北京:电子工业出版社,2000.
- [6] 吴运昌.模拟电子线路基础[M].广州:华南理工大学出版社,2004.
- [7] 阎石.数字电子技术基础[M].北京:高等教育出版社,1997.
- [8] 张晓丽.数据结构与算法[M].北京:机械工业出版社,2002.
- [9] 毛石磊,郭权锋,朱峰.非互易干涉仪移相器的结构优化设计[J].机械制造,2018(4):33-35.
- [10] 刘根平,侯云海.基于电感非线性阻抗变换的一种新型高效整流电路[J].长春工业大学学报,2017,38(1):104-108.