

回路压降冲激法的研究

焦运良¹, 郑和芳², 杨凯文¹, 刘书萌¹, 刘智国¹

(1. 中电长城圣非凡信息系统有限公司, 北京 102209; 2. 中国电子信息产业集团有限公司第六研究所, 北京 102209)

摘要: 常见的电路分析方法有很多, 如叠加定理、戴维南定理和回路电流分析法等。为简化电路分析的复杂程度和减少求解电路方程的运算量, 在回路电流法和线性叠加定理的基础上, 提出一种简便的电路分析方法——回路压降冲激法。在分析线性网络的电路中, 通过实验对比分析得出该电路分析方法可以简化分析过程, 并且运算量明显减少。

关键词: 电路分析; 叠加定理; 回路电流分析法; 运算量; 回路压降冲激法

中图分类号: TN702

文献标识码: A

DOI: 10.16157/j.issn.0258-7998.211563

中文引用格式: 焦运良, 郑和芳, 杨凯文, 等. 回路压降冲激法的研究[J]. 电子技术应用, 2022, 48(3): 109-112, 117.

英文引用格式: Jiao Yunliang, Zheng Hefang, Yang Kaiwen, et al. Study on loop pressure drop impulse method[J]. Application of Electronic Technique, 2022, 48(3): 109-112, 117.

Study on loop pressure drop impulse method

Jiao Yunliang¹, Zheng Hefang², Yang Kaiwen¹, Liu Shumeng¹, Liu Zhiguo¹

(1. China Electric Great Wall Shengfeifan Information System Co., Ltd., Beijing 102209, China;

2. The Sixth Research Institute of China Electronic Information Industry Group Co., Ltd., Beijing 102209, China)

Abstract: There are many common circuit analysis methods, such as superposition theorem, Thevenin theorem and loop current analysis method. In order to simplify the complexity of circuit analysis and reduce the computation of solving circuit equations, a simple circuit analysis method, loop voltage drop impulse method, is presented in this paper on the basis of loop current method and linear superposition theorem. In the analysis of linear network circuit, the analysis method can simplify the analysis process and reduce the amount of computation obviously by comparing and analyzing the experiment.

Key words: circuit analysis; superposition theorem; loop current analysis; computation; method of loop pressure drop

0 引言

在电子电路应用场合, 针对电路进行科学合理分析, 才可以明确电路实现的功能。常见的电路基本分析方法有叠加定理、戴维南定理、支路电流法、节点电压法、网孔电流法、回路电流法等^[1-2]。叠加定理和戴维南定理适用于求解某一支路的电流或某段电路两端电压; 节点电压法适用于支路多、节点少的电路; 回路电流法适用于线性电路等。按不同的电路方法列方程、解方程是电路分析的基本方法, 同样的电路, 采用不同方法得到的方程不同, 求解的复杂程度也就不一样。为降低电路的分析复杂度和简化电路方程的运算过程, 本文在回路电流法和线性叠加定理的基础上, 提出回路压降冲激法, 适用于线性网络, 可大大减少电路的分析复杂度和简化运算过程。

1 叠加定理

在线性电路中, 所有独立源共同作用产生的响应(电压或电流), 等于各个电源单独产生的响应的叠加^[3]。在运用叠加定理时, 需注意以下几点^[4]:

(1) 在考虑单一电源单独作用时, 假设其他独立电源

为零值, 即电压源用短路替代, $V=0$; 电流源开路, $I=0$;

(2) 在考虑单一电源单独作用时, 其参考方向选择与原电路中对应响应的参考方向相同, 在叠加时用相应的数值代入, 分电压和分电流的参考方向与其一致时取正号, 不一致则取负号;

(3) 叠加定理只能用于计算线性电路的电压和电流, 而不能计算功率等和电压(或电流之间)非线性关系的参数。

以图 1 为例, 利用叠加定理求解电路中的电流 I 。首先根据图 1(a) 中的原电路, 画出其叠加定理的等效电路图如图 1(b) 和图 1(c) 所示, 两个独立电压源作用叠加之后计算得出 I 的电流值。

U_{s1} 电压源单独作用时:

$$I' = \frac{U_{s1}}{R_1 + R_2 + R_3}$$

U_{s2} 电压源单独作用时:

$$I'' = -\frac{U_{s2}}{R_1 + R_2 + R_3}$$

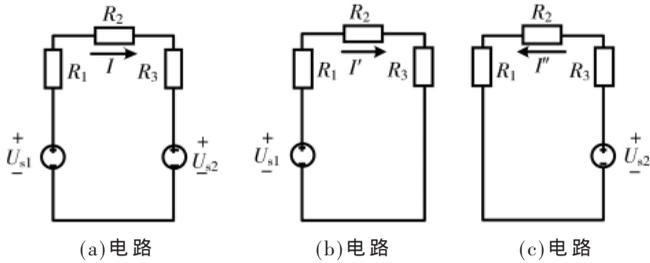


图1 叠加定理

则求解得出原电路图 1(a)中的电流 I :

$$I = I' + I'' = \frac{U_{s1} - U_{s2}}{R_1 + R_2 + R_3}$$

从上述的求解过程中可以看出, 叠加定理适合在一些简单的线性电路中使用, 求解过程也是较为简单的。

2 回路电流法

回路电流法是以一组独立的回路电流为电路变量, 再根据电路定理列电压方程的电路分析求解方法^[5]。其中, 在任意时刻, 电路中各回路压降之和为零。求解的步骤分为: 选择回路, 确定回路的绕行方向; 根据所选回路列写电压方程; 解方程, 求得所需的回路电流值^[6]。

以图 2 为例, 各电阻阻值及电源电压已知, 求电源 U_2 中流过的电流 I 。

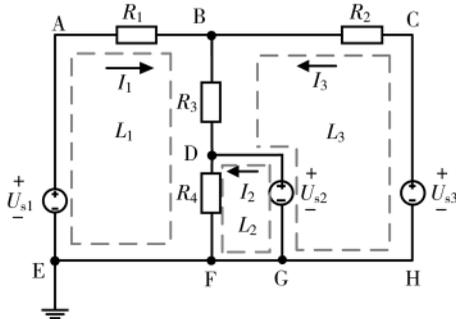


图2 回路电流法

该电路网络结构可选 BDF 为树, 则由它的 3 个连支将其分成 3 个回路^[7], 如图 2 所示, 依次为: $L_1(A \rightarrow B \rightarrow D \rightarrow F \rightarrow E \rightarrow A)$ 、 $L_2(D \rightarrow G \rightarrow F \rightarrow D)$ 、 $L_3(B \rightarrow C \rightarrow H \rightarrow G \rightarrow D \rightarrow B)$; 设各回路假想电流分别为 I_1, I_2, I_3 , 方向均为顺时针。根据回路电流法列方程组如下:

$$I_1 \times (R_1 + R_3 + R_4) - I_2 \times R_4 - I_3 \times R_3 = U_1 \quad (1)$$

$$I_1 \times (-R_4) + I_2 \times R_4 + I_3 \times 0 = -U_2 \quad (2)$$

$$I_1 \times (-R_3) + I_2 \times 0 + I_3 \times (R_2 + R_3) = -U_3 + U_2 \quad (3)$$

$$I = I_2 - I_3 \quad (4)$$

根据上面的方程组, 运用相关的数学方法便可以求解方程组, 得出 I 值。

从上述的求解过程可知, 回路电流法需要建立的方程个数与回路网格数一致, 方程个数较少, 运算量也不多, 但是并不适合很复杂、网格数多的电路。

3 回路压降冲激法

3.1 思想

根据上面对叠加定理和回路电流法的介绍与分析可知, 利用回路电流法求 I 时, 需要解 3 个独立的方程, 求解过程相对较为复杂^[8]。在回路电流法的分析中, 以独立电源(包括假想的)作为关键变量, 重点分析各独立电源(简称独立源)对回路产生的冲激压降^[9]。其核心思想也是根据基尔霍夫电压定律来列电路的电压方程, 即电路网络中任一回路压降之和为零^[10]。这也是本文介绍的回路压降冲激法依据的电路原理之一。

而在线性叠加定理的分析中, 回路的最终状态是各个独立源单独作用的叠加^[11]。如果把待求的未知量(如前例的电流 I)也看作一个独立源(假想的独立源), 根据各个独立源单独作用电路, 同样可以求出 I 的电流值。

综合考虑上面两者方法的特点, 结合两者的优势, 提出一种回路压降冲激法。在回路电流法电路分析中, 某一回路中所假想的电流相当于待求量, 则该回路的独立源相当于内独立源, 而对于其他回路电流相当于外独立源^[12]。再根据内外独立源和待求量分别对电路产生的冲激压降之和为零这一基本原则, 列和解方程。因此利用此文提到的方法, 只需求解各独立源产生的冲激压降, 便可以求解得到待求量的值。对比单独使用回路电流法, 此方法明显减少了回路网格数和运算的方程数, 简化了电路的复杂度。

3.2 用回路压降冲激法进行电路分析

回路压降冲激法的基本思想是根据电路中的独立源及待求量设为关键变量, 同时选定回路, 依据三部分冲激压降之和为零, 由单位待求量冲激压降求出待求量^[13]。

首先假设组成回路的三部分冲激压降: 内独立源压降、外独立源压降和待求量压降, 分别为 $U_{内}$ 、 $U_{外}$ 和 $U_{待}$, 如果待求量压降与回路方向相同时取正; 内独立源压降、外独立源压降与回路方向相同时取负, 则有 $\sum U_{待} = \sum U_{内} + \sum U_{外}$ 。设单位待求量的冲激压降为 $\sum U_I$, 则待求量 $X_{待} = (\sum U_{内} + \sum U_{外}) / \sum U_I$ 。

因此, 分析和求解过程如下(注: 各变量求取时, 除源后电路结构不改变, 各独立源仅能通过回路外器件对回路产生冲激压降。):

(1) 选定回路。选定的回路要含有待求量, 方向可自定。根据回路的方向确定各独立源的正负。

(2) 待求量及回路内独立源除源(电压源短路、电流源开路), 求外独立源对回路的总冲激压降 $\sum U_{外}$ 。

(3) 外独立源及待求量除源, 求内独立源对回路的总冲激压降 $\sum U_{内}$ 。

(4) 内、外独立源除源, 求单位待求量对回路的冲激压降 $\sum U_I$ 。

按照上述过程, 用回路压降冲激法分析图 2 电路。电压源 U_2 中的电流 I 为待求量, 可选取 L 回路, 如图 3 所

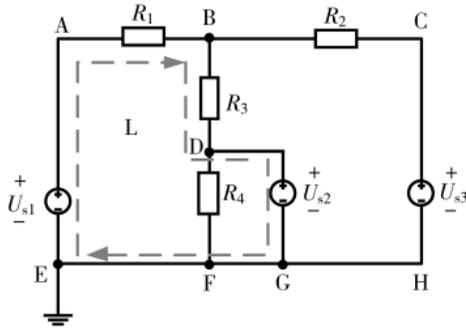


图3 回路压降冲激法

示,方向为顺时针。则内独立源为 U_1 、 U_2 ,外独立源为 U_3 。

内独立源冲激压降(待求量 I 、外独立源 U_3 除源):内独立源 U_1 、 U_2 ,不仅是回路的一部分压降,而且还通过回路外元件 R_2 、 R_4 对本回路内电阻 R_1 、 R_3 产生压降。

首先求解内独立源自身压降 U_{p1} 。内独立源 U_1 与回路方向相反,取正; U_2 方向相同,取负。所以 $U_{p1}=U_1-U_2$ 。

对于 U_1 ,因为两端没有直接并联任何回路外元件,所以对本回路内电阻不会产生额外压降;对于 U_2 ,两端连接 R_4 ,所以 R_4 中激励电流为 U_2/R_4 。对待求量 I 除源,即 U_2 中电流为零,故 R_3 中电流与 R_4 相同,其方向与回路 L 相同,取负,故 R_3 上压降为:

$$\sum U_{p2} = -(U_2/R_4) \times R_3 \quad (5)$$

BF 两点间电压为:

$$U_{BF} = (U_2/R_4) \times R_3 + U_2 \quad (6)$$

由于 U_3 除源,故在 R_2 中激励的电流为 U_{BF}/R_2 。 R_1 中电流为 R_2 、 R_3 两支路之和,方向与回路方向相同,取负,所以 R_1 压降为:

$$\sum U_{p3} = -\left(\frac{U_{BF}}{R_2} + \frac{U_2}{R_4}\right) \times R_1 \quad (7)$$

由 A、B 得内独立源冲激压降:

$$\begin{aligned} \sum U_{p3} &= \sum U_{p1} + \sum U_{p2} + \sum U_{p3} \\ &= U_1 - U_2 - \frac{U_2}{R_4} \times R_3 - \left(\frac{U_{BF}}{R_2} + \frac{U_2}{R_4}\right) \times R_1 \\ &= U_1 - U_2 \times \left[\left(\frac{R_3}{R_4} + 1\right) \times \left(\frac{R_1}{R_2} + 1\right) + \frac{R_1}{R_4}\right] \end{aligned} \quad (8)$$

其次求解外独立源冲激压降(待求量 I 及内独立源 U_1 、 U_2 除源)。 U_2 除源使得 R_4 中的电流为零,而待求量 I 又为零,所以 R_3 中的电流为零,进而 $U_{BF}=0$ 。 U_3 通过 R_2 对回路冲激的电流为 U_3/R_2 ,直接流向 R_1 ,与该回路方向相反,故取正, R_1 上得到的压降为 $(U_3/R_2) \times R_1$ 。则外独立源压降 $\sum U_{p4} = U_3 \times (R_1/R_2)$

最后求解待求量冲激压降(外独立源 U_3 及内独立源 U_1 、 U_2 除源)。 U_2 除源使得 R_4 中电流为零(R_4 两端电压为零),则 R_3 中的电流为 I ,故 $U_{BF}=I \times R_3$ 。 U_{BF} 在 R_2 中产生的电流为 U_{BF}/R_2 , R_1 的电流为 R_2 、 R_3 之和,故其压降为 $\left(\frac{U_{BF}}{R_2} + I\right) \times R_1$ 。方向与回路相同,取正。因此,待求量压降为:

$$\sum U_{待} = U_{BF} + \left(I + \frac{U_{BF}}{R_2}\right) \times R_1 = I \times \left[R_3 \times \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) + R_1\right] \quad (9)$$

单位待求量压降(I 为 1 时的压降)为:

$$\sum U_I = R_3 \times \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) + R_1 \quad (10)$$

代入公式得待求量 I 的值:

$$I = \frac{(\sum U_{内} + \sum U_{外})}{\sum U_I} = \frac{U_1 - U_2 \times \left[\left(\frac{R_3}{R_4} + 1\right) \times \left(\frac{R_1}{R_2} + 1\right) + \frac{R_1}{R_4}\right] + U_3 \times \frac{R_1}{R_2}}{R_3 \times \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) + R_1} \quad (11)$$

如上所述,利用回路压降冲激法分析电路,避免了解方程组的麻烦,只需分析各独立源分别对电路产生的冲击压降,再数学代入相应的变量之中,最后只需一个方程便可以求解;对应于回路电流分析方法,也减少了多个回路网格的列方程求解,简化了运算量,同时还加深了对电路的工作本质的理解。

3.3 电路分析方法对比

支路电流法是以基尔霍夫电流和电压定律为基础,各支路节点电流之和为零,各回路电压之和为零,列方程求解所求量的电路分析方法^[14]。求解步骤如下^[15]:

- (1) 标明电路的各支路的电流参考方向和电流;
- (2) 列出节点数 N ,支路数 b ;
- (3) 根据节点数列出 $N-1$ 个独立的电流(电压)方程;
- (4) 选取回路,规定绕行方向(尽量选取网孔回路),利用基尔霍夫电压定理列出 $[b-(N-1)]$ 个独立方程,每条支路上的电流参考方向与绕行方向一致为正,否则为负;
- (5) 联立组成方程组并求解,得出各支路的电流值。

以支路电流法和回路压降冲激法分别分析一个带有反馈的放大电路为例,说明本文提到方法的特点。

电路原理图如图 4 所示,已知各电阻的阻值及输入电压 U_s ,求输出电压 U_o 。

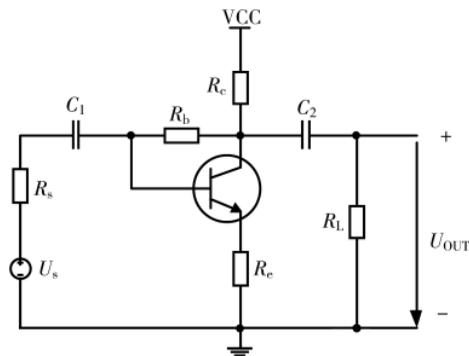


图4 电压并联反馈放大电路

利用支路电流求解时,其微变等效电路图如图 5 所示。

根据图中所选取的回路 L_1 、 L_2 和 L_3 ,以及 B、C、E、F 各个节点,列出回路的电压方程和节点的电流方程组如下。

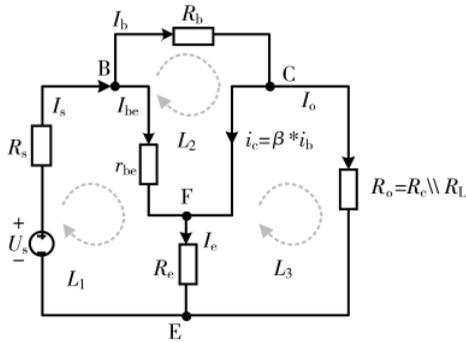


图5 微变等效电路 a

$$I_s - I_b - I_{be} = 0 \quad (12)$$

$$I_b - \beta \times I_b - I_o = 0 \quad (13)$$

$$I_e - \beta \times I_b - I_{be} = 0 \quad (14)$$

$$I_s - I_e - I_o = 0 \quad (15)$$

$$r_{be} \times I_{be} - R_e \times I_e - R_s \times I_s - U_s = 0 \quad (16)$$

$$R_e \times I_e - R_o \times I_o = 0 \quad (17)$$

$$R_b \times I_b - R_{be} \times I_{be} = 0 \quad (18)$$

联立上述的7个方程构成方程组,便可以求解出各支路的电流,同时计算出输出的电压值 $U_o = R_o \times I_o$ 。该过程相对复杂,方程的个数也是较多,计算起来并不简单。因此只适合一些简单的线性电路。

利用回路压降冲激法时,微变等效电路图如图6所示。选输出电压 U_o 为待求量,选定回路 $L_1(A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow E \rightarrow A)$,则内独立源为 U_s ,无外独立源,且方向与回路相反,故内独立源回路冲激压降 $\sum U_{内} = U_s$ 。待求量对回路的冲激压降由待求量在回路电阻 R_b 、 R_s 上产生的压降及待求量本身 U_o 组成。

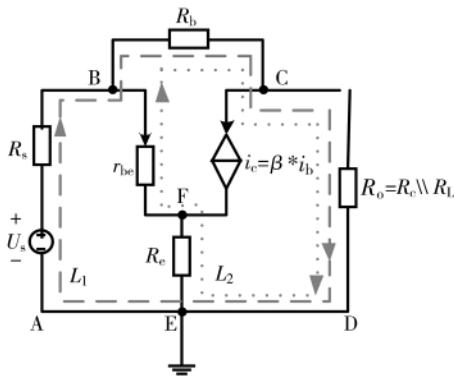


图6 微变等效电路 b

电阻 R_o 中电流 $I_o = U_o / R_o$ 。 R_b 中的电流由 I_o 、 i_c 两部分组成(节点C),所以 R_b 上的电压为 $R_b \times (I_o + i_c)$,即 $R_b \times (I_o + \beta \times i_b)$ 。 R_s 中的电流由 R_b 中的电流与 i_b 两部分组成(节点B),所以 R_s 上的电压为 $R_s \times [I_o + (\beta + 1) \times i_b]$ 。分别计算外独立源冲激压降: $\sum U_{外} = 0$;内独立源冲激压降: $\sum U_{内} = U_s$,最后求得待求量冲激压降为:

$$\sum U_{待} = R_b \times (I_o + \beta \times i_b) + R_s \times [I_o + (\beta + 1) \times i_b] + U_o \quad (19)$$

式中含有未知量 i_b ,求解 i_b 。选 $L_2(B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow E \rightarrow$

$F \rightarrow B)$ 回路, i_b 为 L_2 回路的待求量, U_o 为内独立源,而 U_s 为外独立源。

$$\sum U_{内} = -(U_o + I_o \times R_b) \quad (20)$$

待求量冲激压降: R_e 中的电流为 $(\beta + 1) \times i_b$,内独立源 U_o 除源使得 R_b 中的电流为 $\beta \times i_b$ (节点C),待求量与回路方向相反,取负,则:

$$\sum U_{待} = -[r_{be} \times i_b + R_e \times (\beta + 1) \times i_b - R_b \times \beta \times i_b] \quad (21)$$

$$i_b = \frac{U_o + I_o \times R_b}{r_{be} + R_e \times (\beta + 1) - \beta \times R_b} \quad (22)$$

将式(22)带入式(21)中,得到:

$$\sum U_{待} = U_o + (R_b + R_s) \times \frac{U_o}{R_o} + \frac{[(R_b + R_s) \times \beta + R_s] \times (U_o + I_o \times R_b)}{r_{be} + R_e \times (\beta + 1) - \beta \times R_b} \quad (23)$$

单位待求量($U_o = 1$)对回路 L_1 产生的冲激压降为:

$$\sum U_I = 1 + \frac{R_b + R_s}{R_o} + \frac{[(R_b + R_s) \times \beta + R_s] \times \left(1 + \frac{R_b}{R_o}\right)}{r_{be} + R_e \times (\beta + 1) - \beta \times R_b} \quad (24)$$

据此求出输出电压:

$$U_o = (\sum U_{外} + \sum U_{内}) / \sum U_I = \frac{U_s}{1 + \frac{R_b + R_s}{R_o} + \frac{[(R_b + R_s) \times \beta + R_s] \times \left(1 + \frac{R_b}{R_o}\right)}{r_{be} + R_e \times (\beta + 1) - \beta \times R_b}} \quad (25)$$

上述的求解过程相对容易,就是以内外独立源和待求量的压降冲激之和为零的基本原则为准,列出方程分别求解这三个电压值,进而得到输出电压值。因此,回路数更少,所列方程数相应减少,运算量也得到简化,适合于复杂的线性电路分析。经实验统计可知,运算量相比支路电流法减少20%。

4 结论

回路压降冲激法是在叠加定理和回路电流法的基础上,集合两者的优势,简化了电路的复杂程度,仅以各独立源的回路压降冲激为变量,就可以计算所求量。此方法的显著特点是回路少,方程数简化,使得运算量也相应减少,这在一些较为复杂的线性电路中可以得到很好的运用,并且对于深入理解各元件间的相互作用及设计电路有很好的指导意义。

参考文献

- [1] 胡薇薇,陈江.电路分析方法[M].北京:北京大学出版社,2009.
- [2] 胡斌,胡松.电子电路分析方法[M].北京:电子工业出版社,2013.
- [3] 魏英,李春云.叠加定理在电路分析中的应用[J].科技创新导报,2009(32):46-47.
- [4] 邵思飞,景向伟.在叠加定理中处理线性受控源的一种新方法[J].延安大学学报(自然科学版),2000,19(3):39-41.
- [5] 邱关源.电路(第四版)[M].北京:高等教育出版社,1999.
- [6] 夏非.回路电流法在电路分析中的应用[J].考试周刊,

(下转第117页)

参考文献

- [1] 张直中.合成孔径雷达遥感技术及其应用[J].火控雷达, 2000, 29(1): 1-7.
- [2] 郭华东.雷达对地观测理论与应用[M].北京:科学出版社, 2000.
- [3] 吴一戎,朱敏慧.合成孔径雷达技术的发展现状与趋势[J].遥感技术与应用, 2000, 15(2): 121-123.
- [4] RIUS J M, FERRANDO M, JOFRE L. High frequency RCS of complex radar targets in real time[J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 1993, 41(9): 1308-1319.
- [5] CUSANO M, LICHTENEGGER J, LOMBARDO P, et al. A real time operational scheme for ship traffic monitoring using quick look ERS SAR images[C]//IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2000: 2918-2920.
- [6] MARGARIT G, MALLORQUI J J, RIUS J M, et al. On the usage of GRECOSAR, an orbital polarimetric SAR simulator of complex targets, to vessel classification studies[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2006, 44(12): 3517-3526.
- [7] MARGARIT G, Tabasco A. Ship classification in single-pol SAR images based on fuzzy logic[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2011, 49(8): 3129-3138.
- [8] LECLERC M, THARMARASA R, FLOREA M C, et al. Ship classification using deep learning techniques for maritime target tracking[C]//21st International Conference on Information Fusion, 2018: 737-744.
- [9] WANG Y, WANG C, ZHANG H. Ship discrimination using deep convolution networks in SAR images[C]//IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2018: 8444-8447.
- [10] MA M, ZHANG H, SUN X, et al. Maritime targets classification based on CNN using Gaofen-3 SAR images[J]. The Journal of Engineering, 2019(21): 7843-7846.
- [11] XING X, JI K, ZOU H, et al. Ship classification in Terra-SAR-X images with feature space based sparse representation[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2013, 10(6): 1562-1566.
- [12] WANG C, PEI J, WANG R, et al. A new ship detection and classification method of spaceborne SAR images under complex scene[C]//6th Asia-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar, 2019: 1505-1508.
- [13] ZHANG H, TIAN X, WANG C, et al. Merchant vessel classification based on scattering component analysis for COSMO-SkyMed SAR images[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2013, 10(6): 1275-1279.
- [14] WANG C, WANG H, ZHANG F, et al. A novel hierarchical ship classifier for COSMO-SkyMed SAR data[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2014, 11(2): 484-488.
- [15] HAO C, HOU C. A two parameter CFAR detector in K-distribution clutter[J]. Journal of Electronic Information and Technology, 2007, 29(3): 756-759.
- [16] ZHANG X, ZHANG J, JI Y. The capability analysis of ship classification by structure feature using SAR images[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2010, 32(1): 146-152.
- (收稿日期: 2021-07-08)
- 作者简介:
 缪炜星(1988-), 男, 硕士研究生, 工程师, 主要研究方向: 无人机系统设计、无人机系统应用。
 王小龙(1977-), 通信作者, 男, 博士研究生, 副研究员, 主要研究方向: SAR 处理系统构建、目标检测识别, E-mail: xiaolong-wang@163.com。
 李志勇(1980-), 男, 硕士研究生, 助理研究员, 主要研究方向: GIS 应用系统设计、SAR 图像处理。
- 扫描下方二维码
- 扫描下方二维码
- (上接第 112 页)
- 2016(A0), 126: 143.
- [7] KARPACHEV A T. Dynamics of main and ring ionospheric troughs at the recovery phase of storms/substorms[J]. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 2021(1): 21-24.
- [8] 夏建矿. 关于电流互感器二次回路开路问题的探讨[J]. 科技信息, 2010(9): 789, 775.
- [9] 王俊波, 武利会, 李国伟, 等. 一种用于高压断路器回路电阻测试的放电系统设计[J]. 电子设计工程, 2020, 28(16): 150-153.
- [10] 赵春江. 开路电压为受控源控制量的回路电流法的分析与求解[J]. 商丘师范学院学报, 2020, 36(6): 26-28.
- [11] HEKMAT M, ROSTAMYAN F, SHAFIEKHANI A, et al. Barrier coating and plasmonic effect by using diamond-like carbon and silver nanoparticles on quantum dots sensitized solar cells[J]. Semiconductor Science and Technology, 2020, 35(4): 045019.1-045019.6.
- [12] 高大全, 唐大洪, 李波. 现场正确判定电流回路极性的方法及应用[J]. 冶金动力, 2019(9): 24-28.
- [13] 段俊东, 张晓芳, 张滨. 励磁调差单元对电力系统低频振荡的影响[J]. 电源学报, 2019, 17(3): 182-190.
- [14] 宗谨. 理想电流源在支路电流法中的处理方法[J]. 甘肃高师学报, 2012, 17(2): 82-83.
- [15] SEIGER H N. The confluence of Faraday's and Kirchoff's laws in bio-electrochemical systems[J]. The Scientific World Journal, 2012: 123-125.
- (收稿日期: 2021-03-26)
- 作者简介:
 焦运良(1985-), 男, 硕士, 主要研究方向: 计算机、信号检测、人工智能。
- 扫描下方二维码
- 扫描下方二维码

版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所