

Multisim 在超导器件研究中的应用

樊 彬,周铁戈,阎少林,岳宏卫,王 争,宋凤斌

(南开大学电子系,天津 300071)

摘 要: 为了对约瑟夫森结及其相关电路进行仿真研究,首次在 Multisim 中建立了约瑟夫森结的模型.利用 Multisim 对直流约瑟夫森效应,交流约瑟夫森效应进行了仿真验证.随后利用在 Multisim 中建立的模型对电阻电容电感并联约瑟夫森结(Resistively-Capacitively-Inductively Shunted Junction, RCLSJ)模型中的混沌行为,微波感应台阶,热噪声对台阶的影响以及 RSFQ (Rapid Single Flux Quantum) 电路进行了仿真研究.仿真结果证明了在 Multisim 中建立的模型对超导器件进行仿真研究是合理可行的,这对超导器件的分析和设计具有重要意义.

关键词: Multisim; 约瑟夫森结; 混沌行为; 微波感应台阶; RSFQ (Rapid Single Flux Quantum) 电路

中图分类号: TM26; TN103 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2010) 08-1886-06

The Application of Multisim in Superconductive Electronics

FAN Bin, ZHOU Tie-ge, YAN Shao-lin, YUE Hong-wei, WANG Zheng, SONG Feng-bin

(Department of Electronics, Nankai University, Tianjin 300071, China)

Abstract: To investigate the properties of the Josephson junction and its related circuits, a model of Josephson junction in Multisim has been created. Both the DC (Direct Current) Josephson effect and AC (Active Current) Josephson effect are testified using the model in Multisim. Subsequently, we observe a quasi-periodic motion in the Josephson junction by studying chaotic behaviors of the resistively-capacitively-inductively shunted junction. Besides, we investigate the characteristics of Shapiro steps in chaos and its special effect under thermal noises. Finally, rapid single flux quantum circuit is constructed to convert DC pulse to SFQ (Single Flux Quantum). The simulation results show that the model is powerful so that it can produce valuable predictions in the research of the Josephson junction, which plays an important role in analyzing and designing a superconductive device.

Key words: multisim; josephson junction; chaotic behavior; shapiro steps; RSFQ (Rapid Single Flux Quantum) circuit

1 引言

以约瑟夫森结为基础的超导器件具有重要的研究和应用价值,比如超导量子干涉器件、超导数字电路、太赫兹 (THz) 信号源等^[1,2].但是超导器件具有高度的非线性,理论分析十分困难,可能存在的混沌行为会对结果的正确性造成影响.采用数值计算的方法又较为复杂,需要写出动力学方程,然后编写程序求解^[3-5].如果能够采用现有的电路仿真软件进行研究就可以大大提高工作效率.我们首次在 Multisim 中建立了约瑟夫森结的模型,利用这一模型对约瑟夫森结的混沌行为、微波感应台阶、热噪声对微波感应台阶的影响以及含有约瑟夫森结的 RSFQ 电路进行了较为系统的研究,得出了具有重要意义.本文将报道我们的模型和仿真结果.

2 约瑟夫森结在 Multisim 中的模型

2.1 理想约瑟夫森结等效电路

对于单个约瑟夫森结而言,其结两端的电压与流过结的电流的关系如式(1)所示^[6]

$$I = I_c \sin\left(\frac{4\pi e}{h} \int V dt + \phi_0\right) \quad (1)$$

其中, I 是流过约瑟夫森结的电流, V 是约瑟夫森结两端的电压.不失一般性,取常数 ϕ_0 等于 0, 可以建立图 1 (a) 所示的理想约瑟夫森结的 Multisim 电路模型.图中 A_2 是电压积分器,它用来采集约瑟夫森结两端的电压并进行积分,其系数为 $4\pi e/h = 3038535207019174$; U_1 是正弦函数,即其输出是输入的正弦函数; I_1 是电压控制电流源,我们取约瑟夫森结的临界电流为 0.1mA,故取 I_1 的系数为 0.0001.可以看出这个电路两端电压与流过

约瑟夫森结的电流的关系满足式(1),所以这个模型可以看作是理想的约瑟夫森结.对于RSJ(resistively shunted junction)模型,可以在电路上并联一个电阻;对于RC-SJ(resistively-capacitively shunted junction)模型,在电路上再并联一个电容即可.在以后的电路图中,为了方便起见,用图1(b)来代替在Multisim中建立的理想约瑟夫森结.

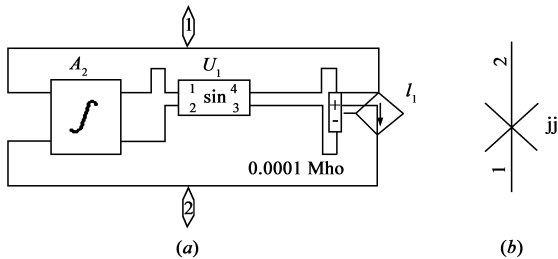


图1 理想约瑟夫森结等效电路以及在Multisim中的元件符号

2.2 直流约瑟夫森效应的仿真验证

在这里我们采用电阻并联约瑟夫森结模型,约瑟夫森结的临界电流为0.1mA,并联电阻为1Ω,负载电阻为500mΩ,对直流电源进行参数扫描,就得到如图2(a)中虚线所示的电阻并联模型的约瑟夫森结的*I-V*特性曲线.

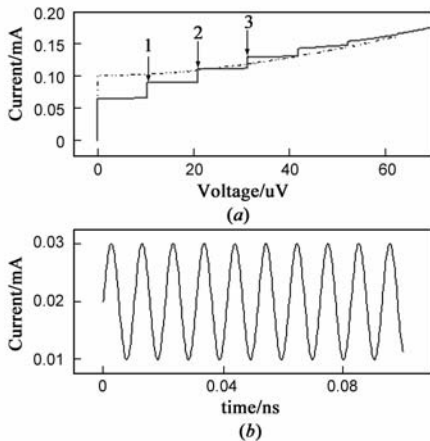


图2 仿真得到的电阻并联约瑟夫森结的直流和交流*I-V*特性

从图2(a)虚线中可以明显看出,当流过约瑟夫森结的电流小于其临界电流时,约瑟夫森结两端的电压为0,也就是说通过约瑟夫森结的电流为超导电流;当电流超过临界电流时,约瑟夫森结两端会出现电压.这与直流约瑟夫森效应相一致.

2.3 交流约瑟夫森效应的仿真验证

我们利用一个0.2mV的理想直流电压源驱动一个约瑟夫森结,就可以仿真得到流过约瑟夫森结两端的电流如图2(b)所示.从图中可以大致看出流过约瑟夫森结的电流周期约为10ps,频率约为100GHz,符合交流约瑟夫森电流-频率的关系.对直流源进行参数扫描,并加上微波辐照就可以得到如图2(a)实线所示的在微

波辐照下的带有Shapiro台阶的*I-V*曲线了,其中微波辐照幅度0.05mA,频率5GHz.由于Shapiro台阶出现在*I-V*曲线的 V_n 处,而这个 V_n 根据式(2)可以方便得出^[7].

$$V_n = n \left(\frac{h}{2e} f \right), \text{ 其中 } n = \dots -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3 \dots \quad (2)$$

由此我们可以计算得出 $V_1 = 10.36\mu\text{V}$, $V_2 = 20.72\mu\text{V}$, $V_3 = 31.08\mu\text{V}$,分别对应图中的1,2,3三个位置.与此同时,我们可以从Origin中,将这三个位置的电压值从图2(b)实线中读出,分别为 $10.47\mu\text{V}$, $0.93\mu\text{V}$ 和 $31.38\mu\text{V}$.从中我们可以看出,仿真得到的值与理论计算得到的值基本上是吻合的,这说明了我们在Multisim中建立的模型的合理性和可行性.

3 RCLSJ 模型中的混沌行为

在约瑟夫森结的高频应用中,比如THz信号的产生,电阻-电容-电感并联约瑟夫森结模型(RCLSJ模型)能够给出实际约瑟夫森结更准确的近似结果^[8],从而也成为了近期有关约瑟夫森结中的混沌行为的一个研究热点.作为一个研究混沌行为的载体,已经有很多的研究小组对约瑟夫森结中的混沌行为进行过研究^[9-11],但是目前对于混沌行为的研究大多采用编写程序后进行数值分析的方法.这种方法相对而言比较繁琐,而且灵活性稍差,对于不同的模型往往要重新编写程序.我们利用在Multisim中搭建的约瑟夫森结就可以很好的克服这些缺点,使仿真过程更加简便、快捷.在我们的仿真中利用Multisim发现了RCLSJ模型中除了周期态与混沌态之外,还存在准周期态.准周期态是系统产生混沌的先兆,深入的研究将有助于判断系统所处的状态,这样可以消除电路中有害的混沌行为以实现约瑟夫森结阵列的同步从而产生THz信号^[12]或者利用系统中的混沌行为进行保密通信^[13-17].

我们在图1(a)所示的理想约瑟夫森结的两端并联上100Ω的电阻,1pF的电容,9pH的电感,这样就组成了RCLSJ模型.判断一个非线性系统是否发生混沌,观察系统的二维相空间的轨迹是一个很简单有效的方法,它通过绘制在直角平面坐标上的表征变量及其变化速率间关系的轨迹来研究二阶自治系统.此外,观察系统的Poincare截面也是一个很好的方法,在相空间中适当选取一截面,在此截面上某一对共轭变量如 x_1 和 x_2 取固定值,此截面为Poincare截面,相空间的连续轨迹与Poincare截面的交点称为截点.通过观察Poincare截面上截点的情况可以判断系统是否处于混沌态^[18].在这里我们以一个处于准周期态的约瑟夫森结为例进行分析.图3给出偏置电流为0.15mA的系统的二维相

空间的轨迹和 Poincare 截面。

图 3(a) 是系统的二维相空间, 其轨迹从一点出发, 在有限的时间内都不能回到初始点而是在环面上无限地环绕下去, 填充整个环面, 这是系统处于准周期态的特征. 图 3(b) 是系统的 Poincare 截面, 从图中可以看出其相空间与 Poincare 截面的截点是一条封闭椭圆线, 这也进一步说明了系统处于准周期运动的状态.

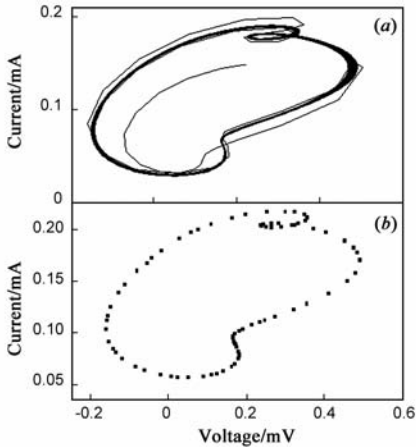


图3 约瑟夫森结的Poincare截面以及二维相空间的行为

4 微波感应台阶

对射频辐照下约瑟夫森结的微波感应台阶的研究具有十分重要的意义, 它是射频信号检测和电压标准^[19,20]等应用的基础. 除此以外, 通过微波感应台阶这个纽带, 可以把实验和仿真结合起来, 通过改变仿真模型中的参数来去拟合实验中的曲线, 从而可以近似确定其电路的参数, 以方便我们进行数值上的仿真计算^[21], 比如我们可以通过拟合好的约瑟夫森结的参数来判断系统是否处于混沌状态. 本节的仿真是基于这样一个背景. 下面我们将利用 Multisim 对微波感应台阶中的混沌行为以及热噪声对于微波感应台阶的影响进行仿真研究.

4.1 微波感应台阶中的混沌行为

在仿真中我们应用 RCSJ 模型, 临界电流为 0.1mA, 正常态电阻 $R_n = 1\Omega$, 电容 $C = 20\text{pF}$, 外加微波辐照源的幅度为 0.105mA, 频率为 10GHz. 通过扫描直流源得出微波感应台阶. 图 4(a) 为我们仿真得到的微波感应台阶.

从图 4(a) 中我们可以看到微波感应台阶中, 有的位置的主台阶较为完整(比如位置 1 处), 但是有的位置的主台阶看起来很粗糙, 甚至是缺失的(比如位置 2 处). 通过 Origin 软件我们可以读出位置 1 处的台阶的直流扫描电流为 $I = 0.012\text{mA}$, 位置 2 处的台阶的直流扫描电流为 $I = 0.02\text{mA}$. 下面分别我们将对这两个台阶进行分析和仿真.

我们对于图 4(a) 中位置 1 处的微波感应台阶进行仿真分析, 其结果如下. 在图 4(b) 的频谱图中, 我们可以看出其频谱是趋于分立谱的, 只是在频率很低的时候, 有连续谱呈现; 在图 4(c) 的系统的二维相空间中我们可以观察到, 其相轨迹是一条不含平衡点的封闭轨道; 而且图 4(d) 的 Poincaré 截面上的截点也只有极少数的几个截点. 这些都说明在直流偏置 $I = 0.02\text{mA}$ 下系统处于周期解, 并没有激发混沌行为.

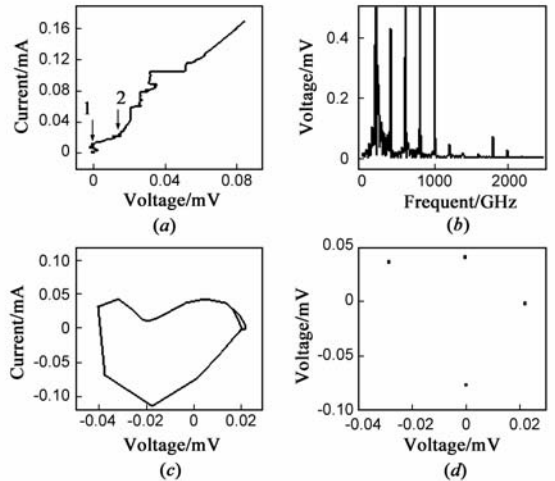


图4 微波感应台阶以及直流扫描电流 $I=0.012\text{mA}$ 时的频谱、二维相空间轨迹以及Poincare截面

而对于图 4(a) 中位置 2 处的微波感应台阶则完全不同. 在图 5(a) 的频谱图中, 我们可以看到其频谱为连续谱带尖峰, 类似随机噪声; 图 5(b) 的约瑟夫森结二维相空间中, 其轨迹具有自相似性, 并且在一定的区域内无限填充; 图 5(c) Poincaré 截面上分散有密集而没有规律的离散截点; 在图 5(d) 中显示出了在该参数下的约瑟夫森结对于初值变化的敏感性, 其中实线为式(1)中令初相位为 $\Phi = 0$, 虚线为初相位 $\Phi = 1e-10$, 从图中可以看出从 $t = 1.1\text{ns}$ 开始电压分离开来. 这些现象都表明系统在直流偏置 $I = 0.02\text{mA}$ 下处于混沌状态. 所以,

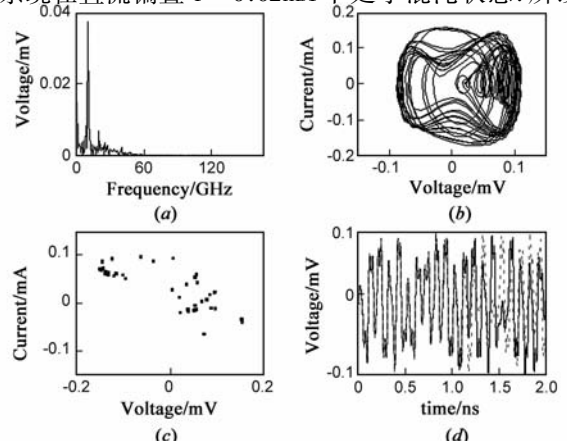


图5 直流扫描电流 $I=0.02\text{mA}$ 时的频谱、二维相空间轨迹、Poincare截面以及系统对于初值敏感性的分析

通过对比位置 1 和位置 2 处的台阶所处的状态,我们可以得出主台阶出现粗糙甚至缺失的现象是由于系统激发了混沌行为造成的.而这种混沌行为对于我们实验中产生相位同步的 THz 信号是极为不利的,所以在实际制作器件时,我们应该控制约瑟夫森结的参数,尽量避免出现这种状况.

4.2 热噪声对微波感应台阶的影响规律

热噪声对约瑟夫森结的特性有着重要的影响,世界上有很多的研究小组都有相关的报道^[22,23].由于 Multisim 软件中带有热噪声源 THERMAL_NOISE,它能够产生符合高斯分布的白噪声.通过调节噪声系数(ratio)我们可以改变引入约瑟夫森结中的热噪声的强弱,这为研究热噪声对于约瑟夫森结的影响提供了极大的方便,而且在仿真中加入热噪声可以更加准确的去拟合实际中的约瑟夫森结.下面,我们将利用 Multisim 中的热噪声源来研究约瑟夫森结的 $I-V$ 特性以及微波感应台阶.我们对负载电阻为 $500\text{m}\Omega$,临界电流为 0.1mA 的 RSJ 模型进行仿真,其结果如图 6(a)所示.

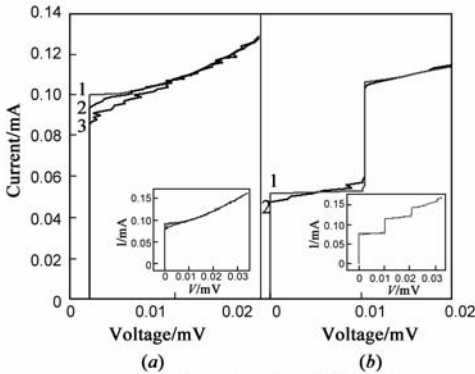


图6 热噪声影响下的 $I-V$ 特性曲线

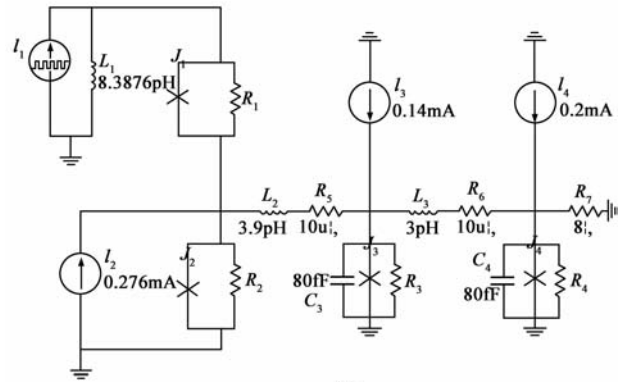
在图 6(a)中,1、2、3 这三条 $I-V$ 曲线所对应的噪声系数分别为 $\text{ratio} = 0, \text{ratio} = 1, \text{ratio} = 2$,可以明显地看到台阶出现“圆拱化”现象,即约瑟夫森结的临界电流会因为热噪声的影响而变小,并且噪声系数越高,台阶的“圆拱化”程度越大,这与 Ambegaokar 和 Halperin 关于热涨落对系统 $I-V$ 曲线的影响的分析是一致的^[24].

我们在仿真电路中加入幅度为 0.05mA ,频率为 10GHz 的微波辐照,就可以得到如图 6(b)所示的在热噪声影响下的带有 Shapiro 台阶的 $I-V$ 特性曲线.图 6(b)中的曲线 1 代表没有热噪声(即 $\text{ratio} = 0$)情况下的带有微波感应台阶的 $I-V$ 曲线,曲线 2 代表在噪声系数为 0.5 的热噪声影响下的带有微波感应台阶的 $I-V$ 曲线.通过对比两条曲线,可以看出,在热噪声的影响下,台阶高度有所降低,即出现“圆拱化”现象.

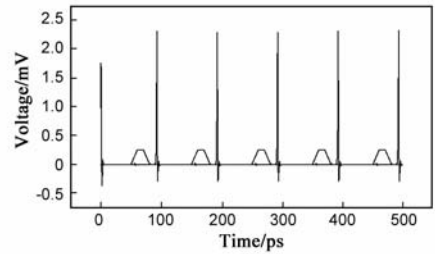
5 RSFQ 电路的仿真

快速单磁通量子(RSFQ)电路^[25]是一种新型的基于

约瑟夫森结的超导数字电路,它具有高速和低功耗的特点,目前 RSFQ 逻辑电路已成为超导数字技术中最成功最有前景的技术.利用我们提出的模型同样可以在 Multisim 中对 RSFQ 电路进行仿真.图 7(a)所示是一个典型的 RSFQ DC/SFQ 变换器,它的功能是将一个普通的直流脉冲信号变换为单磁通量子信号.



(a)



(b)

图7 RSFQ DC/SFQ变换器仿真电路以及仿真结果

图 7(a)中 I_1, I_2, I_3, I_4 是理想电流源,为约瑟夫森结提供正常工作所需的偏置电流.值得说明的是图中的 R_5 和 R_6 ,RSFQ 电路本身并不需要这两个电阻,它们是为了使约瑟夫森结能够得到正确的偏置电流而添加的,否则 I_3 的电流有可能流过 J_4 而得到错误的仿真结果. R_5 和 R_6 取很小的值即可,这里我们取 $1 \times 10^{-5}\Omega$. J_1, J_2, J_3, J_4 的临界电流分别为 $0.147\text{mA}, 0.2276\text{mA}, 0.2\text{mA}, 0.3\text{mA}$.图 7(b)是我们仿真得到的结果,其中脉冲电流幅度为 0.25mA ,脉冲上升时间、脉冲下降时间、脉冲宽度都为 10.36ps ,脉冲周期为 100ps .从图中我们可以明显看出电路确实产生了单磁通量子信号.我们对单个单磁通量子信号做积分得到的结果为:

$$\int V(t)dt \approx 2.07\text{mV} \cdot \text{ps} \approx \Phi_0 \quad (3)$$

这说明得到的信号确实是单磁通量子信号,而且每个对应的直流脉冲信号都产生一个单磁通量子信号,说明了仿真结果的正确性.

6 结论

我们首次在 Multisim 中建立了约瑟夫森结的模型,并利用这一模型对约瑟夫森结进行了仿真研究.通过

分析系统的频谱,二维相空间的轨迹和 Poincare 截面上的截点,对系统所处的状态进行定性的判定,并发现了约瑟夫森结中存在准周期态的现象,系统处于准周期态是系统产生混沌的先兆,深入的研究将有助于消除电路中有用的混沌行为或者利用系统中的混沌行为进行保密通信.此外,通过利用 Multisim 软件中的热噪声源,对约瑟夫森结在热噪声影响下的 $I-V$ 特性曲线和带有微波感应台阶的 $I-V$ 曲线进行了仿真分析,验证了在热噪声影响下会出现“圆拱化”的现象.由于 Multisim 中的热噪声源使用很方便,这样就为我们后续对于约瑟夫森结阵列在热噪声影响下的相位锁定研究奠定了基础.最后,利用我们在 Multisim 中建立的模型搭建了 RS-FQ 电路,实现将一个普通的直流脉冲信号转换为单磁通量子信号.本文的仿真结果说明了我们在 Multisim 中建立的模型是可以用来对约瑟夫森结及相关电路进行仿真的,并且能够得到正确的仿真结果.这种仿真的方法相对于传统的编写程序进行仿真的方法具有更加灵活、简便和直观的特点,对于深入研究约瑟夫森结的各种特性以及设计和分析含有约瑟夫森结的器件具有重要意义.

参考文献:

- [1] 胡雅婷,周铁戈,等. Dc SQUID 的 PSpice 仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(12): 3323 - 3326.
Hu Ya-ting, Zhou Tie-ge, et al. Simulation research of dc SQUID with PSpice[J]. Journal of System Simulation, 2008, 20(12): 3323 - 3326. (in Chinese)
- [2] 林良真,张金龙,李传义,等. 超导电性及其应用[M]. 北京:北京工业大学出版社, 1998. 410 - 480.
- [3] 张军琴,杨银堂,贺庆丽,娄利飞,桂智彬. 超导 Josephson 结直流 $I-V$ 特性的数值计算[J]. 计算物理, 2006, 23(1): 98 - 102.
Zhang Jun-qin, Yang Yin-tang, He Qing-li, et al. Numerical simulations for the DC $I-V$ curve of superconducting Josephson junctions[J]. Chinese Journal of Computational Physics, 2006, 23(1): 98 - 102. (in Chinese)
- [4] 王震宇,廖红印,周世平. RF-偏置约瑟夫森结的混沌控制以及热噪声的影响的研究[J]. 低温物理学报, 2001, 23(4): 286 - 290.
Wang Zhen-yu, Liao Hong-yin, Zhou Shi-Ping. Study on controlling chaos in the RF-biased Josephson junction and influence of the thermal noise[J]. Chinese Journal of Low Temperature Physics, 2001, 23(4): 286 - 290. (in Chinese)
- [5] 王震宇,廖红印,周世平. 直流偏置的与 RLC 谐振器耦合的约瑟夫森结动力学行为的数值模拟[J]. 物理学报, 2001, 50(10): 1996 - 2000.
Wang Zhen-yu, Liao Hong-yin, Zhou Shi-Ping. Studies of the

- DC biased Josephson junction coupled to a resonant tank[J]. Acta Physica Sinica, 2001, 50(10): 1996 - 2000. (in Chinese)
- [6] 周铁戈,宋凤斌,左涛,等. 本征约瑟夫森结阵列的 PSpice 模型及混沌行为研究[J]. 物理学报, 2007, 56(11): 6307 - 6314.
Zhou Tie-ge, Song Feng-bin, Zuo Tao, et al. The model of capacitively coupled intrinsic Josephson junction array and its chaotic behavior[J]. Acta Physica Sinica, 2007, 56(11): 6307 - 6314. (in Chinese)
- [7] Shapiro S. Josephson currents in superconducting tunneling: The effect of microwaves and other observations[J]. Phys Rev Lett, 1963, 11(2): 80 - 85.
- [8] B A. Huberman, J P Crutchfield, N. H Packard. Noise phenomena in Josephson junctions[J]. Appl Phys Lett, 1980, 37(8): 750 - 752.
- [9] Kurt, Erol Canturk, Mehmet. Chaotic dynamics of resistively coupled DC-driven distinct Josephson junctions and the effects of circuit parameters[J]. Physica D, 2009, 238(22): 2229 - 2237.
- [10] Hu Ya-ting, Zhou Tie-Ge, et al. Subharmonic steps and chaotic behavior in rf-biased Josephson junctions[J]. Physica C, 2008, 468(3): 214 - 217.
- [11] Syamal Kumar Dana, Dipendra Chandra Sengupta, Kossi D. Edoh. Chaotic Dynamics in Josephson Junction[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems-I: Fundamental Theory and Applications, 2001, 48(8): 990 - 996.
- [12] Takahiro Yoshimura, Toshihiko Kiwa, et al. Terahertz emission from YBaCuO Josephson junctions excited by femtosecond laser[J]. Physica C, 2001, 362: 329 - 332.
- [13] 赵耿,郑德玲. 保密通信中数字流混沌产生器的同步[J]. 电子学报, 2002, 30(4): 536 - 539.
Zhao Geng, Zheng De-ling. Synchronization of digital-flow chaos generators in secure communication[J]. Acta Electronica Sinica, 2002, 30(4): 536 - 539. (in Chinese)
- [14] 卢元元,胡庆彬,丘水生. 一种新的混沌调制和线性解调方法[J]. 电子学报, 2002, 30(10): 1508 - 1510.
Lu Yuan-yuan, Hu Qing-bin, Qiu Shui-sheng. A new approach to chaotic modulation and linear demodulation[J]. Acta Electronica Sinica, 2002, 30(10): 1508 - 1510. (in Chinese)
- [15] 金晨辉,高海英. 对两个基于混沌的序列密码算法的分析[J]. 电子学报, 2004, 32(7): 1066 - 1070.
Jin Chen-hui, Gao Hai-ying. Analysis of two stream ciphers based on chaos[J]. Acta Electronica Sinica, 2004, 32(7): 1066 - 1070. (in Chinese)
- [16] 周红,俞军,凌燮亭. 混沌前馈型流密码的设计[J]. 电子学报, 1998, 26(1): 98 - 101.
Zhou Hong, Yu Jun, Ling Xie-ting. Design of chaotic feed forward stream cipher[J]. Acta Electronica Sinica, 1998, 26(1): 98 - 101. (in Chinese)

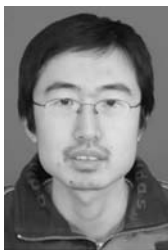
- [17] Harb A M, Harb B A. Controlling chaos in Josephson junction using nonlinear backstepping controller[J]. IEEE Trans Appl Supercond, 2006, 16(4): 1988 – 1998.
- [18] 高金峰. 非线性电路与混沌[M]. 北京: 科学出版社, 2006. 25 – 28, 130 – 131.
- [19] Clark A. Hamilton. Josephson voltage standards[J]. Review of Scientific Instruments, 2000, 71(10): 3611 – 3623.
- [20] S P Benz. Superconductor-normal-superconductor junctions for programmable voltage standards[J]. Appl Phys Lett, 1995, 67(18): 2714 – 2716.
- [21] 王争, 岳宏卫, 周铁戈, 赵新杰, 何明, 谢清连, 方兰, 阎少林. SrTiO₃ 基片上 Tl-2212 双晶约瑟夫森结的动态特性及噪声影响研究[J]. 物理学报, 2009, 58(10): 7216 – 7221.
Wang Zheng, Yue Hong-wei, Zhou Tie-ge, et al. Dynamic characteristics of Tl-2212 bicrystal Josephson junctions on Sr-TiO₃ substrates and the effect of noise on it[J]. Acta Physica Sinica, 2009, 58(10): 7216 – 7221. (in Chinese)
- [22] S J Berkowitz, W J Skocpol, P M Mankiewich, et al. Thermal noise in high temperature superconducting normal superconducting step-edge Josephson junctions[J]. J Appl Phys, 1994, 76(2): 1337 – 1339.
- [23] Giovanni Filatrella, Boris A. Malomed, Sergio Pagano. Noise-induced dephasing of an ac-driven Josephson junction[J]. Physical Review E, 65, 051116.
- [24] Ambegaokar V, Baratoff A. Voltage due to thermal noise in the dc Josephson effect[J]. Phys Rev Lett, 1969, 22(25): 1364 – 1366.
- [25] K K Likharev, V K Semenov. RSFQ logic/memory family: A new Josephson-junction technology for sub-Terahertz-clock-frequency digital system[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 1991, 7(2): 3176 – 3180.

作者简介:



樊 彬 男, 1985 年 7 月生于天津, 硕士, 研究方向为超导电子学。

E-mail: nankaifanbin@hotmail.com



周铁戈 男, 1980 年 2 月生于内蒙古, 博士, 副教授, 研究方向为超导电子技术、非线性电路和混沌保密通信等。

E-mail: zhoutg@nankai.edu.cn

(上接第 1885 页)

- CAI Xiao-yan, DAI Guan-zhong, YANG Li-bin. Survey on Spectral Clustering Algorithms[J]. Computer Science, 2008, 35(7): 14 – 18.
- [10] M Filipponea, F Camastrab, F Masullia, S Rovetta. A survey of kernel and spectral methods for clustering[J]. Pattern Recognition, 2008, 41(1): 176 – 190.
- [11] U Luxburg. A tutorial on spectral clustering[J]. Statistics and Computing, 2007, 17(4): 395 – 416.
- [12] C Ding, X F He, H Y Zha, et al. A min-max cut algorithm for graph partitioning and data clustering[A]. The 2001 IEEE International Conference on Data mining[C]. San Jose, USA, 2001: 107 – 114.
- [13] M Meila, J Shi. Learning segmentation by random walks[C]. In: NIPS, Cambridge, MIT Press, 2000: 873 – 879.
- [14] 王玲, 薄列峰, 焦李成. 密度敏感的谱聚类[J]. 电子学报, 2007, 35(8): 1577 – 1581.
- Wang Ling, Bo Lie-feng, Jiao Li-cheng. Density sensitive spectral clustering[J]. Acta Electronica Sinica, 2007, 35(8): 1577 – 1581. (in Chinese)
- [15] 王娜, 李霞. 基于监督信息特性的主动半监督谱聚类算法[J]. 电子学报, 2010, 38(1): 172 – 176.
Wang Na, Li Xia. Active semi-supervised spectral clustering based on pairwise constraint[J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(1): 172 – 176. (in Chinese)
- [16] 田铮, 李小斌, 句彦伟. 谱聚类的扰动分析[J]. 中国科学, 2007, 37(4): 527 – 543.
Tian Zheng, Li Xiao-bin, Ju Yan-wei. Spectral clustering based on matrix perturbation theory[J]. Science in China. 2007, 37(4): 527 – 543. (in Chinese)
- [17] 孙继广. 矩阵扰动分析[M]. 北京: 科学出版社, 2001. 146 – 160.
Sun Ju-guang. Matrix Perturbation Analysis[M]. Beijing: Science Press, 2001. 146 – 160. (in Chinese)