

# 可逆计算原理与实验进展

陈炜<sup>①②\*</sup>, 李浩<sup>①②</sup>, 刘建设<sup>①②</sup>, 张颖珊<sup>①②</sup>, 李铁夫<sup>①②</sup><sup>①</sup> 清华信息科学与技术国家实验室, 北京 100084<sup>②</sup> 清华大学微电子与纳电子学系/微电子学研究所, 北京 100084

\* 通信作者. E-mail: weichen@tsinghua.edu.cn

收稿日期: 2015-03-17; 接受日期: 2015-06-15; 网络出版日期: 2016-04-13

国家重点基础研究发展计划 (批准号: 2011CBA00304) 和清华大学自主科研计划 (批准号: 20131089314) 资助项目

**摘要** 计算能耗高和散热问题使传统计算芯片的集成度和运算能力的提升遇到瓶颈. 大规模量子计算探索的关键是比特的相干叠加性和可逆性. 因此, 可逆计算既作为一种可能从根本上解决计算能耗高和散热问题的方案, 又作为一种兼容量子计算的方案, 近年来在理论上和实验上得到了深入的研究. 本文介绍了可逆计算的基本原理, 总结了目前基于微机械、传统微电子和超导领域的可逆计算实验研究进展, 分析了超导器件实现可逆计算的独特优势, 并着重对其中两种器件的工作原理进行了论述.

**关键词** 可逆计算 计算能耗 可逆逻辑门 超导可逆计算

## 1 引言

计算芯片的集成度和超级计算机运算能力是当今信息技术发展的关键指标. 过去的 50 多年里, 微处理器的集成度遵循着 Moore 定律每 18 个月翻番<sup>[1]</sup>; 过去的 15 年里, 超级计算机的运算能力每 3 年零 4 个月提高一个数量级<sup>[2]</sup>. 但是这两种指数规律的趋势都将难以继续, 因为单比特信息操作能耗  $E_{\text{bit}}$  过高, 约  $10^6 kT \ln 2$ ,  $k$  为 Boltzman 常数,  $T$  为环境温度, 带来了计算芯片耗电和散热困难的问题<sup>[3~5]</sup>. 其中最主要的工程问题是散热<sup>[6]</sup>, 如今当电路集成度增加一倍, 电路的能耗密度会平方甚至立方倍增加, 而热沉材料的散热功率存在极限, 继续提高集成度将导致热量无法及时散发, 反过来引起芯片因温度升高而无法正常工作.

近十年来, 发展迅猛的超导量子计算的基本特点即是相干叠加性和可逆性<sup>[7,8]</sup>. 由于退相干时间从 ns 量级提高到百  $\mu\text{s}$  量级<sup>[9~13]</sup>, 人们开展了多位量子比特的耦合和受控门操作的研究<sup>[14~16]</sup>. 更高层次的超导量子计算机也引起了人们的兴趣<sup>[17]</sup>, 但是它的架构与经典不可逆计算芯片不兼容. 为了解决这个问题, 人们试图从信息可逆的角度研究和建立与之兼容的计算方式, 以便更清晰地理解信息计算的物理本质.

可逆计算 (reversible computing) 作为一种可能从根本上解决芯片能耗高和散热的方案, 在理论上得到了深入的研究<sup>[18~21]</sup>, 而且可逆计算的研究可为量子计算的高层次架构提供广阔的思路<sup>[22]</sup>. 可

引用格式: 陈炜, 李浩, 刘建设, 等. 可逆计算原理与实验进展. 中国科学: 信息科学, 2016, 46: 417-430, doi: 10.1360/N112015-00048

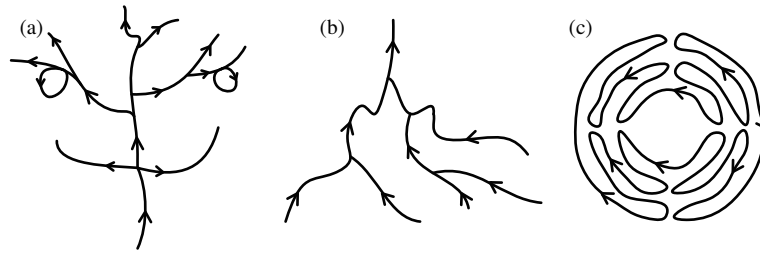


图 1 3 种计算方式, 图中的曲线代表计算过程的轨迹, 组成它的每个点则是计算机可能处于的状态

**Figure 1** Three categories of computation. The evolution of a computation process can be represented as a curve. Every point in the curve corresponds to some possible state of the machine. (a) Nondeterministic trajectory; (b) irreversible trajectory; (c) reversible trajectory

逆计算的实验工作在近几年取得了里程碑式的进展, 信息熵与能量的关系得到实验阐述<sup>[23,24]</sup>, Landauer 原理首次被实验验证<sup>[25]</sup>, 每比特计算能耗低于  $kT\ln 2$  的实验在不断地被设计和开展<sup>[26~29]</sup>. 国内也开展了在可逆逻辑综合<sup>[30,31]</sup> 和低功耗实验方面<sup>[32]</sup> 的研究. 本文将从可逆计算基本原理出发, 介绍目前基于微机械、传统微电子和超导器件的可逆计算实验研究进展. 文章的组织如下: 第 1 节主要说明可逆计算的研究意义; 第 2 节将从物理学的角度阐述可逆计算的基本原理; 第 3 节将介绍可逆计算在非超导器件中的实验进展; 第 4 节将重点介绍可逆计算在超导器件中的最新实验进展; 第 5 节是对可逆计算的总结和展望.

## 2 可逆计算的基本原理

可逆计算是利用可逆操作进行的运算, 可逆操作是指输入和输出集合映射关系是双射的操作<sup>[33]</sup>, 即输出结果可以一对一地还原输入值的操作. 在可逆的运算过程中没有信息的丢失或者擦除. 根据输入和输出集合的映射关系, 计算可以分成 3 种, 如图 1 所示, 即非决定性计算、不可逆计算和可逆计算. 目前, 我们通用的计算方式基本都是不可逆的, 如“与非门”和“异或门”, 它们都是 2 比特信息输入只有 1 比特信息的输出.

可逆计算的核心理论之一是 Landauer 原理<sup>[34]</sup>: 如果计算机丢失或擦除 1 比特信息, 计算机散发到环境中的能量至少是  $kT\ln 2$ .  $kT\ln 2$  被称为不可逆计算能耗的最小值, 有时候也称作为 SNL 能限<sup>[6]</sup>, 以纪念为这个概念作出贡献的 3 位科学家 Shannon、von Neumann 和 Landauer. 这个原理是 1961 年由 IBM 的研究员 Landauer 提出, 直到 2012 年才有第一个实验验证<sup>[25]</sup>. 当可逆计算物理实现时, 与信息丢失或擦除相关的能耗就可以避免. 从目前物理学规律来看, 计算过程中除了丢失或擦除信息有必须的能耗限制, 再没有其他方面的能耗限制. 因此在理想情况下, 采用可逆的计算将没有能耗的下限, 尽管实际系统中为了抑制错误和噪声还是需要消耗能量的<sup>[35]</sup>.

虽然可逆计算的能耗低, 但它是否与目前的不可逆计算等价呢? 是否可以实现通用的逻辑计算, 如“与”“或”“非”呢? Bennett 发现可逆计算是普适的<sup>[33]</sup>. 所有的不可逆逻辑都可以用可逆逻辑替换, 代价是可能耗费多一倍的硬件资源. Bennett 提出可逆计算的基本模型如图 2 所示, 它分 3 部分: 正向计算、复制输出、逆向计算. 逆向计算是为了将正向计算过程中产生的中间结果还原成空态, 而保留中间结果的目的是为了保证逻辑可逆, 不丢失信息.

不久之后, Toffoli 提出一种可逆逻辑门, 即“Toffoli 门”<sup>[36]</sup>, 如图 3(a) 所示, 它也被 Feynman 称作“受控 - 受控非门”<sup>[37]</sup>. 这个逻辑门的运算规则是, 只有前两个输入信号都是“1”的时候, 第 3 个信

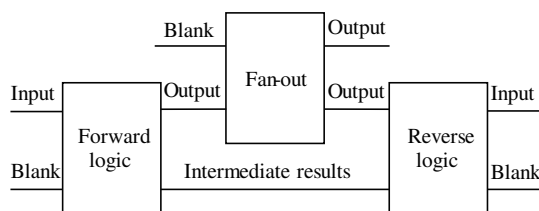


图 2 Bennett/Fredkin 可逆计算架构：正向计算得到结果和中间态，然后复制一份结果并输出，逆向计算还原中间结果

Figure 2 General structure of reversible computing proposed by Bennett and Frekdin. The computation proceeds in three stages: forward logic, output fan-out, and reverse logic

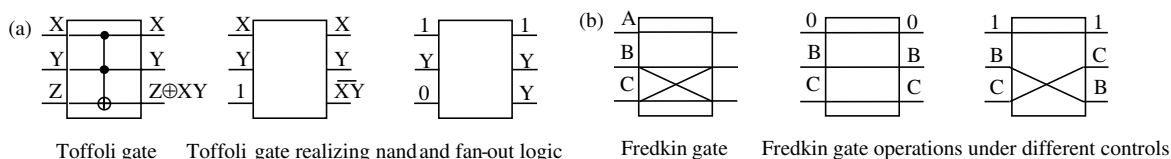


图 3 通用可逆逻辑门

Figure 3 General reversible logic gate: (a) Toffoli gate, also called Controlled Controlled NOT gate; (b) Fredkin gate, also called Controlled Swap gate

号翻转，否则都保持原样输出。Toffoli 不仅说明了 Toffoli 门的通用性，而且从数学上证明了任何经典的有限自动机都可以嵌入到更大的可逆有限自动机中来实现。此外，Fredkin 也独立提出了与 Bennett 相类似的“可逆计算”架构<sup>[38]</sup>，这个架构是基于“守恒逻辑门”，即“Fredkin 逻辑门”，如图 3(b) 所示，“守恒”是指这个逻辑门的输出和输入中“1”的数量是不变的。它的运算规则是，当第一个输入信号是“1”时，后两位信号交换，否则都保持原样输出，因此它也被称作为受控交换门。

Toffoli 门和 Fredkin 门都是通用的可逆逻辑门，它们具备实现“与”“或”“非”运算的能力，并且它们的逆逻辑门是自身，即串联 2 级 Toffoli 门或 Fredkin 门得到的输出结果与输入相同。

一个不擦除和丢失信息的逻辑操作被认为是逻辑上可逆的 (logically reversible)，但是要实现可逆计算，还需要物理上可逆 (physically reversible)。物理可逆是指，逻辑操作基于的器件在“0”和“1”状态转换过程中不与外界交换热量，系统的熵保持不变。Keyes 等<sup>[39]</sup>指出在受控单双势阱绝热转换系统中可以实现能耗任意小的复制，Bennett 也曾利用铁磁材料的性质举例说明信息复制过程能耗可以任意地小<sup>[40]</sup>。在这里我们利用 Bennett 提出的一个更直观的模式<sup>[41]</sup>来说明：信息的测量、复制和传输可以是可逆的，能量耗散是可以任意小的。如图 4 所示，这里利用了 Fredkin 提出的“碰球模型”，图中的白色球和固定反射镜组成信号源，灰色球代表测量系统。在测量过程中，将灰色球按 Y 方向射入信号源，然后灰色球会与信号源发生相互作用——弹性碰撞，然后测量系统可以根据灰色球的出射方向 N 和 M 来获得信号源“0”和“1”的信息，即若灰色球从 N 方向出射，说明信号源中没有白色球，此时系统处于“0”状态，若灰色球从 M 方向出射，信号源中有白色球，此时系统处于“1”状态。在理想弹性碰撞的情况下，整个测试过程中没有能量损耗，并且信号源的状态能自发地恢复到初始态，这种测量就是可逆测量。换个角度来看，测量也是获得了一份和信息源状态相对应的信息，那么这个过程也可以看成是一个信息复制的过程。如果测量系统的信息被下一个“测量系统”测试时，这个过程就实现了信息的传递。既然测量可以是可逆的，能量消耗可以任意小，那么信息的复制和传递也可以是可逆的，原则上也可以没有消耗能量下限。

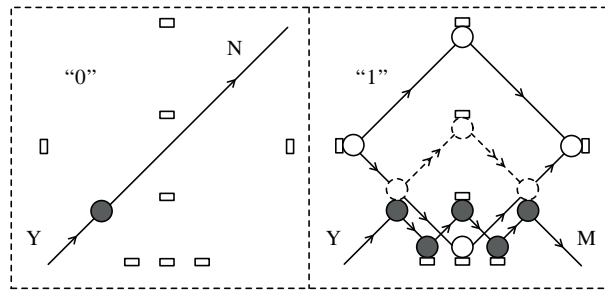


图 4 可逆测量: 白色球为信号源, 灰色球为测试系统. 测试后系统能自发回到初始态

**Figure 4** An example of reversible measurement: signal system is represented as gray balls, and measure system as black balls. All the balls can spontaneously return to initial state after the measurement

Frank<sup>[42]</sup> 给出了实现可逆计算的一些基本条件: (1) 不丢失信息, 在纳米器件级别, 能够有足够的精度追踪信息的存储、传输和逻辑转换的物理过程, 保证输出态集合相对于输入态集合的不确定度的增加在能量效率约束的范围之内; (2) 信息操作完成后, 避免携带信息的能量变成热量, 因此能量要循环利用; (3) 逻辑态之间的转换是经过绝热或弹道方式的物理过程完成; (4) 单元设计需要增加反向运算操作, 这会带来电路复杂度的开销, 但开销会随着可逆计算的能量效率提高而变得次要.

### 3 可逆计算在非超导器件中的研究进展

Maxwell demon 佯谬在 Szilard 提出“信息熵”之后, 在理论上得到了自洽的解释<sup>[40]</sup>, 因为信息也具有热力学熵, Maxwell demon 获取分子运动的信息时, 自身存储空间的熵会增加. 它和气体分子作为一个整体封闭的系统, 热力学第二定律仍然成立.

近年来, 一些实验小组巧妙地利用“信息熵”得到了不同寻常的实验结果. Raizen 研究小组在 *Physical Review Letters*<sup>[43]</sup>、*Science*<sup>[23]</sup> 上报道他们利用“Maxwell demon”的原理将原子从 10 mK 冷却到 15  $\mu$ K 的低温的实验技术.

他们将气体原子囚禁在磁陷阱中, 被选择的原子具有两种不同的低能量稳定状态 (不同的原子核外电子排布方式), 以红色和蓝色小球代表. 由于红色态原子与激光单向门不发生作用, 可以自由地运动, 而蓝色态原子遇见激光单向门会发生反弹而无法通过. 在冷却过程中, 开始原子都处于红色态, 当由于热运动一些红色态原子穿过激光单向门后, 与另外一束激光束发生散射, 原子转换到蓝色态, 蓝色态原子由于无法通过激光单向门从而无法回到原来的空间, 这样气体原子自由运动的空间被限制, 熵减小. 扫描激光束, 最后使得所有原子都变成蓝色态, 然后让气体原子膨胀到原来的体积, 气体原子对外做功, 温度降低. 从整个过程来看, 导致气体原子降温的原因是气体原子与单光子散射后, 光子获得了原子状态的信息, 从而带走了原子的一部分熵, 导致气体原子体积减小, 而有序的激光束被散射后沿随机方向出射, 光子束的熵增加了. 这种由于信息的交换导致熵的变化现象, 验证了 Szilard 的信息具有热力学熵假设.

Toyabe 等在 *Nature Physics*<sup>[24]</sup> 发表文章, 报道他们利用有机分子的角度信息使环境的热能转化为分子的电势能, 从而实现了“Maxwell demon”. 有机分子是聚苯乙烯构成的二聚物小球, 以点固定的形式悬浮在缓冲液中做 Brown 运动. 椭圆极化的交变电场在有机分子角度方向上形成阶梯状势垒, 有机分子由于热运动有一定几率跃迁到更高势能的角度位置. 利用快速摄像技术获得有机分子的角度位置信息, 如果发现有机分子跃迁到高势能角度位置, 就通过改变交变电场的相位来改变阶梯状势垒,

目的是阻止有机分子重新跃迁回原来低势能的角度位置, 这样便使分子的电势能逐渐升高. 有机分子电势能升高过程中, 外界没有直接对有机分子做功, 而是通过获得分子角度位置信息, 通过反馈机制, 将环境的热能转化为电势能, 从而实现了纳米机械电学系统中的 Maxwell demon. 如果没有信息的参与, 这个过程将违背热力学第二定律而不能发生的, 因为热能的品质比电能的品质低.

在“信息熵”得到实验验证不久后, 可逆计算中最重要的 Landauer 原理也被实验验证了. 法国和德国的合作小组, 2012 年在 *Nature* 上报道他们在介观机械系统中实验验证了 Landauer 原理—— $kT\ln 2$  是不可逆操作能耗的低限<sup>[25]</sup>. 实验中利用激光束的聚焦以 10 kHz 频率在两个间距为 1.45  $\mu\text{m}$  点之间快速切换, 从而形成一个双势阱. 势阱间的势垒高度通过调节激光功率来完成. 势能整体的倾斜通过一个微机电马达在溶液中产生速率可控的微流, 对乳胶离子产生粘滞力来完成. 将乳胶颗粒在左右势阱中的位置定义为“0”和“1”, 在实验中位置通过快速照相来获得. 在获取位置信息后, 调节激光功率和溶液流速完成“0”和“1”的信息转换. 外界做功是通过将状态转变过程中粘滞力对位移积分得到. 实验结果的每个数据点都是通过近 600 次平均而得到的. 结果表明在保证擦除操作以高功率完成的条件下, 外界做功的大小, 随着擦除过程时间增长, 以指数的方式渐近  $kT\ln 2$  而达到饱和. 实验结果直接验证了不可逆擦除的能耗低限, 第一次定量证实了 1 比特信息具有  $k\ln 2$  的热力学熵的假设.

由于可逆计算在计算能耗上不可替代的优势, 早在 Landauer 原理被验证之前, 它就已经在传统 CMOS (complementary metal oxide semiconductor) 电路中被广泛研究和应用. 1994 年, Younis<sup>[44]</sup> 在传统 CMOS 可逆电路实验上取得重要进展. 他们提出中值电压分离电能回收逻辑 (split-level charge recovery logic), 实现了在理论上随着频率降低而渐近零的运算功耗, 完成了 Fredkin/Bennett 理论架构中“正向计算 – 输出 – 逆向计算”的计算模式. 最终实现了逻辑功能正确的 8 位逻辑可逆的乘法器. 这一工作引起了 CMOS 可逆计算研究的一个热潮.

Athas 等<sup>[45]</sup> 提出利用“绝热计算”的方案对充电电能进行循环利用, 这是一种能量和速度折中的方案. 理论分析结果表明, 将绝热计算的方案应用到数据总线、全局信号等电路中可以显著降低电路功耗. Athas 等<sup>[46]</sup> 进一步设计出包含 13000 个晶体管的 CMOS 微处理器. 它利用正弦电压驱动模式, 对时钟信号电能的 85% 进行了有效地回收, 从而明显地降低了芯片总功耗, 绝热计算电路的功耗比充分优化后的传统电路的功耗还少了一半.

1999 年, Lim 等<sup>[47]</sup> 采用能量回收可逆逻辑 (reversible energy recovery logic, RERL) 实现了 16 位超前进位加法器, 在实验测试的工作频率中, 可逆加法器比传统 CMOS 加法器能耗有明显的改善.

1999 年, De Vos 采用 CMOS 传输门逻辑并利用绝热开关的技术, 实现了 3 比特输入/输出的通用的可逆逻辑门<sup>[48]</sup>. 2002 年, Desoete 等利用这个基本模块, 在实验中成功实现了可逆的 4 位超前进位全加器逻辑<sup>[49]</sup>. SPICE 仿真结果显示, 在工作频率范围内, 它比传统 CMOS 电路的能耗约小  $(V_{\text{th}}/V_{\text{dd}})^2$  倍, 其中  $V_{\text{th}}$  是晶体管的阈值电压,  $V_{\text{dd}}$  是电源电压, 它一般是  $V_{\text{th}}$  的 2 倍以上.

2005 年, Kim 等<sup>[50]</sup> 采用双轨逻辑和正弦波形电源, 实现了能够回收电荷的绝热电路. HSPICE 功耗仿真结果表明在工作频率中, 与相同功能 CMOS 电路相比, 源耦合绝热电路 (SCAL-D) 的功耗在 200 MHz 附近最高有 4 倍左右的降低.

#### 4 可逆计算在超导器件中的研究进展

随着对可逆计算研究的深入, 人们认识到传统 CMOS 器件并不适合做大规模可逆计算. 因为传统半导体器件能量时间常数  $c_E$  (或者能耗 – 延时积) 大, 能量效率  $\eta$  低<sup>[51]</sup>. 根据 Bennett/Fredkin 可逆计算架构, 为了保证电路可逆, 需要额外的硬件开销, 而 CMOS 可逆电路中这部分的弊大于能耗减小

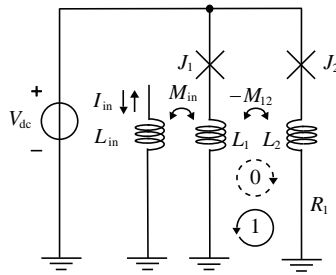


图 5 nSQUID 等效电路图

Figure 5 Equivalent circuit of the nSQUID

带来的利. 能量时间常数  $c_E = E_{\text{bit}} \cdot \tau_{\text{tr}}$ , 其中  $\tau_{\text{tr}}$  是传输延时.  $c_E$  是每比特操作器件能耗和开关速度的综合指标,  $c_E$  越小, 每比特运算消耗的能量越少, 开关速度越快. 能量效率  $\eta = (E_{\text{sig}} - E_{\text{bit}}) / E_{\text{sig}}$ , 其中  $E_{\text{sig}}$  是信号携带的能量,  $\eta$  代表着完成每比特操作消耗的能量占信号本身能量的比重,  $\eta$  越大, 消耗能量的比重越小. 传统 CMOS 不可逆器件的能量效率  $\eta$  为 0, 信号的能量完全被消耗掉, 没有循环利用.

超导器件因具有非常小的能量时间常数, 可以实现磁通传输逻辑 (flux transfer logic), 使得它在高速和低功耗的计算方面有着独特的优势 [52]. 过去的几十年里, 计算能耗和计算速度相比, 人们更关心逻辑器件的计算速度. 因此长期以来, 人们致力于研究速度超快的器件. 1999 年, Chen 等 [53] 研制出能工作在 770 GHz 的 RSFQ (rapid single flux quantum) 时序逻辑电路, 这是迄今为止信息计算领域报道的最快的运算速度. 近十年来, 严重的计算能耗问题使得人们重新看待速度和能耗的相对重要性. 现在越来越多的工作都集中在减小能耗上. 人们重新到基于 Josephson junction 的超导逻辑器件中, 寻找能耗小的器件进行研究. 磁通传输器件由于可以根据参数调节实现单双势阱绝热转化, 被认为可以用来实现可逆电路 [54].

目前, 有两种超导器件被用于可逆电路研究, 它们是负电感超导量子干涉仪 (nSQUID, negative inductance superconducting quantum interference device) [22, 27, 55~57] 和绝热量子磁通参数子 (AQFP, adiabatic quantum flux Parametron) [29, 58~65].

#### 4.1 基于 nSQUID 的可逆计算

nSQUID 由两个 Josephson junction 和一个超导环构成, 如图 5 所示. 它的结构类似于 dc-SQUID, 不同的是它的超导环两臂之间的互感  $-M_{12}$  是负的, 且互感系数接近于 1. 这样便使得 nSQUID 总电流感受到的等效电感较小, 而 nSQUID 环电流感受到的等效电感较大, 环电流的方向代表信息的“0”和“1”, 它由  $V_{\text{dc}}$  的大小和  $I_{\text{in}}$  的方向来决定.

对于含有 Josephson junction 的超导电路的动力学演化过程, 我们可以通过将其类比成小球在势阱中的运动来分析. nSQUID 的势能分为 Josephson 能和电感能两部分,

$$U = U_{J1} + U_{J2} + U_L = -E_{J1} \cos \varphi_1 - E_{J2} \cos \varphi_2 + \frac{1}{2} L_1 I_1^2 + \frac{1}{2} L_2 I_2^2 - M_{12} I_1 I_2, \quad (1)$$

其中  $E_{J_i}$  为第  $i$  个结的 Josephson 能  $I_{c_i} \Phi_0 / 2\pi$ ,  $I_{c_i}$  为第  $i$  个结的临界电流,  $\varphi_i$  为第  $i$  个结的相位差,  $I_i$  为流过第  $i$  个结的电流,  $L_i$  是超导臂自感,  $-M_{12}$  为互感. 考虑设计和工艺参数的对称性有  $L_1 = L_2 = L$ ,  $I_{c1} = I_{c2} = L_c$ , 则 (1) 式可以简化为

$$U = -2E_J \cos \varphi_+ \cos \varphi_- + \frac{1}{4} \left[ (L - M_{12}) (I_1 + I_2)^2 + (L + M_{12}) (I_1 - I_2)^2 \right], \quad (2)$$

其中  $\varphi_{\pm} = (\varphi_1 \pm \varphi_2)/2$ .

根据 Josephson 电压相位关系, 可将输入电压表示为

$$V_{\text{dc}} = \frac{\hbar}{2e} \frac{d\varphi_c}{dt}, \quad (3)$$

其中  $\varphi_c$  是定义的时钟相位.

利用 Kirchhoff 电压定律有

$$V_{\text{dc}} = \frac{\hbar}{2e} \frac{d\varphi_1}{dt} + L_1 \frac{dI_1}{dt} - M_{12} \frac{dI_2}{dt} = \frac{\hbar}{2e} \frac{d\varphi_2}{dt} + L_2 \frac{dI_2}{dt} - M_{12} \frac{dI_1}{dt}, \quad (4)$$

整理得

$$2V_{\text{dc}} = \frac{\hbar}{2e} \frac{d(2\varphi_c)}{dt} = \frac{\hbar}{2e} \frac{d(\varphi_1 + \varphi_2)}{dt} + (L - M_{12}) \frac{d(I_1 + I_2)}{dt}, \quad (5)$$

等式两边对时间作不定积分有

$$\frac{\Phi_0}{\pi} (\varphi_c - \varphi_+) = (L - M_{12}) (I_1 + I_2) + C, \quad (6)$$

其中  $C$  为积分常数, (6) 式得到了  $I_1 + I_2$  与相位差之间的关系.

另一方面, 考虑超导环磁通量子化<sup>[66]</sup> 有

$$2n\pi - \varphi_1 + \varphi_2 = \frac{2\pi}{\Phi_0} \Phi, \quad (7)$$

其中  $n$  为整数,  $\Phi$  为总磁通:

$$\Phi = \Phi_{\text{loop}} - \Phi_e, \quad (8)$$

其中  $\Phi_e = M_{\text{in}} I_{\text{in}}$  为外加磁通, 负号是为了使最后的势能表达式具有对称性而选取相反的参考方向;  $\Phi_{\text{loop}}$  为超导环自身电流产生的磁通:

$$\Phi_{\text{loop}} = (L + M_{12}) (I_1 - I_2). \quad (9)$$

定义

$$\varphi_e = \frac{\pi}{\Phi_0} \Phi_e, \quad (10)$$

其中  $\varphi_e$  代表外加磁通产生约化相位的一半, 这也是为了势能表达式的对称性而选取的. 将式 (8)~(10) 代入式 (7) 中有

$$n\pi - (\varphi_- - \varphi_e) = \frac{\pi}{\Phi_0} (L + M_{12}) (I_1 - I_2), \quad (11)$$

因此得到了  $I_1 - I_2$  与相位差之间的关系.

最后将式 (6) 和 (11), 代入式 (2) 中, 得到势能表达式

$$U = \frac{\Phi_0^2}{4\pi^2} \left[ \frac{(\varphi_+ - \varphi_c - c)^2}{L - M_{12}} + \frac{(\varphi_- - \varphi_e - n\pi)^2}{L + M_{12}} \right] - \frac{\Phi_0 I_c}{\pi} \cos\varphi_+ \cos\varphi_-, \quad (12)$$

其中  $c$  和  $n$  是待定常数, 当外场为零时, 即  $\varphi_c = \varphi_e = \varphi_- = \varphi_+ = 0$ , 系统的势能仅为两个结的 Josephson 能  $-\Phi_0 I_c / \pi$ , 代入条件得到  $c = n = 0$ .

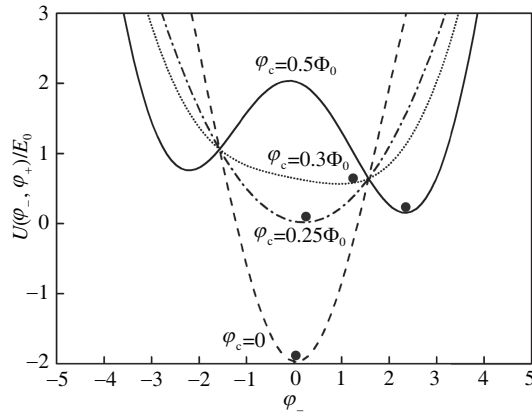


图 6 nSQUID 势能演化仿真图, 其中参数取  $2\pi LI_c/\Phi_0 = 1.79$ ,  $M_{12}/L = 0.66$ , 图中不同的曲线对应不同的时钟相位

Figure 6 Schematic diagram of the potential energy dynamics of the nSQUID, in which  $2\pi LI_c/\Phi_0 = 1.79$ ,  $M_{12}/L = 0.66$ , and different curves correspond to different clock phase

此时, 势能可以表示成  $\varphi_+$  和  $\varphi_-$  的函数:

$$\frac{U(\varphi_+, \varphi_-)}{\Phi_0 I_c / 2\pi} = \frac{\Phi_0}{2\pi I_c} \left[ \frac{(\varphi_+ - \varphi_c)^2}{L - M_{12}} + \frac{(\varphi_- - \varphi_e)^2}{L + M_{12}} \right] - 2\cos\varphi_+ \cos\varphi_-, \quad (13)$$

它是一个受外界参数  $\varphi_c$  和  $\varphi_e$  调制的关于  $\varphi_+$  和  $\varphi_-$  的二元函数, 可以通过求解二元函数的极值得到不同时钟和外磁场输入条件下 nSQUID 的工作状态. 实际上, 由于  $L - M_{12}$  很小, 势能  $U$  取最小值时,  $\varphi_+$  一直跟随  $\varphi_c$  变化, 因而器件实际上只有  $\varphi_-$  一个自由度. 仿真得到不同时钟相位  $\varphi_c$  和外磁场输入  $\varphi_e$  条件下 nSQUID 的工作状态, 如图 6 所示. 图中显示了势能曲线随着时钟相位  $\varphi_c$  的增加从单势阱演化到双势阱的过程, 而输入相位  $\varphi_e$  使得势能曲线向右倾斜. 双势阱意味着电路有两种稳定状态, 分别对应顺时针和逆时针环电流, 倾斜代表着输入的方向影响着电路最终的稳定状态. 因此, 当选择合适的  $I_c$ 、 $L$  和  $M_{12}$  组合时, nSQUID 可以在绝热模式下实现“0”和“1”的状态转换, 从而实现可逆计算.

2003 年, Semenov 等<sup>[22]</sup> 提出 nSQUID 器件结构, 发现通过选择合适的器件参数, 可以实现单双势阱的绝热转换, 适合于可逆计算. 他们设计了一个由 8 个 nSQUID 构成的环形移位寄存器来验证理论结果. 接着 Semenov 等<sup>[55]</sup> 测试了这个环形移位寄存器的基本性能, 根据实验结果推算, 在 4.2 K 温度中器件的  $E_{\text{bit}}$  约为  $20kT\ln 2$ .

2009 年, Ren 等<sup>[56]</sup> 进一步改进 nSQUID 电路, 将两个正反方向的环形移位寄存器通过电感连接, 使得时钟磁涡流得到循环, 减少能量损耗. 实验电路在 4.2 K 温区从低频至 5 GHz 可以正确地工作. 2011 年, Ren 等<sup>[27]</sup> 改进 09 年的电路, 增加电磁屏蔽等措施, 使环形移位寄存器工作频率上限提高至 7 GHz, 它实现了单比特的可逆非门操作. 根据实验数据估算在低频区  $E_{\text{bit}}$  约  $1/3kT\ln 2$ , 这个值小于 SNL 能限. 作者认为这是首个演示可逆计算的能耗小于 SNL 能限的实验, 但由于缺乏直接的证据, 这种结论存在争议.

#### 4.2 基于 AQFP 的可逆计算

AQFP 器件结构如图 7 所示, 它可以看成由两个 rf-SQUID 共用一段电感而构成, 最早是由 Leo 等提出的<sup>[67]</sup>. AQFP 一般采用电流源供电的模式, 激发电流  $I_x$  通过电感与 AQFP 发生耦合, 从而驱



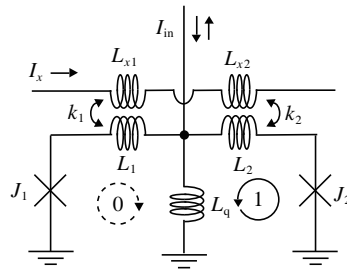


图 7 AQFP 等效电路图

Figure 7 Equivalent circuit of the AQFP

动 AQFP 从单势阱向双势阱绝热转化, 实现可逆计算.

类比 nSQUID, AQFP 的势能也是由 Josephson 能和电感能构成,

$$U = U_{J1} + U_{J2} + U_L = -E_{J1}\cos\varphi_1 - E_{J2}\cos\varphi_2 + \frac{1}{2}L_1I_1^2 + \frac{1}{2}L_2I_2^2 - \frac{1}{2}L_q(I_1 + I_2)^2, \quad (14)$$

其中  $L_q$  是负载电感,  $k_i$  为耦合系数, 考虑对称参数  $L_{x1} = L_{x2} = L_x$ ,  $L_1 = L_2 = L$ ,  $I_{c1} = I_{c2} = I_c$ ,  $k_1 = k_2 = k$ , 上式可简化为

$$U = -2E_J\cos\varphi_+\cos\varphi_- + \frac{1}{4}\left[(L + 2L_q)(I_1 + I_2)^2 + L(I_1 - I_2)^2\right]. \quad (15)$$

利用 Josephson 电压相位关系和超导环磁通量子化可以导出时钟相位和外磁通相位与电流之间的关系, 重复类似 nSQUID 那部分的推导过程, 可以得到势能表达式

$$\frac{U_{ufp}}{\Phi_0 I_c / 2\pi} = \frac{\Phi_0}{2\pi I_c} \left[ \frac{(\varphi_x - \varphi_-)^2}{L} + \frac{(\varphi_{in} - \varphi_+)^2}{L + 2L_q} \right] - 2\cos\varphi_+\cos\varphi_-, \quad (16)$$

其中  $\varphi_x = 2\pi M I_x / \Phi_0$ ,  $\varphi_{in} = 2\pi L_q I_{in} / \Phi_0$  分别为激励电流和输入电流产生磁通的约化相位.

通过仔细比较和分析式 (13) 和 (16) 可以发现 AQFP 与 nSQUID 是同一类器件的两种不同拓扑. 如果把 nSQUID 的电压源 (时钟驱动信号) 与磁场偏置 (输入信号) 功能互换, 则式 (13) 中的  $\varphi_c$  变成了  $\varphi_{in}$ ,  $\varphi_e$  变成了  $\varphi_x$ , 再把 nSQUID 两个电感臂在空间上分开, 使互感可以忽略, nSQUID 就变成了 AQFP. 将这些对应关系代入式 (13) 中, 即可得到 AQFP 的势能表达式 (16). 两者是同一类器件, 它们都是依靠受控的单双势阱绝热状态转换来实现物理可逆的.

2013 年, 日本的 Takeuchi 等<sup>[58]</sup> 采用 AQFP 进行可逆电路研究. 仿真发现能耗和偏置噪声容限随电感参数变化明显, 能耗随着耦合电感和输出电感的减小而减小, 但偏置噪声容限随着耦合电感的减小和输出电感的增大而减小. 考虑两方面因素, 得到优化的设计参数, 可以使得  $E_{bit}$  为  $12\% I_c \Phi_0$ , 偏置噪声容限  $\pm 26\%$ . Takeuchi 等<sup>[59]</sup> 还设计了由级联 AQFP 构成的串联反相器, 并验证了反相器的逻辑操作的正确性. 2013 年, Inoue 等<sup>[60]</sup> 利用 AQFP 多级电感耦合, 设计了基于 AQFP 的可逆通用逻辑门组合: 多数决定门和非门, 并利用三个多数门和非门实现了 1 比特加法器, 验证了门操作的逻辑正确性.

2013 年, Takeuchi 等<sup>[61]</sup> 将 AQFP 与步阶式阻抗谐振器耦合, 通过测量谐振器传输特性  $S_{21}$  在 AQFP “0” 和 “1” 转换时的变化, 来测试 AQFP 的  $E_{bit}$ . 实验测得 AQFP 在 5 GHz 下工作功耗为 50 pW, 对应的比特能耗  $E_{bit}$  为 10 zJ, 约  $250kT\ln 2$ ,  $T = 4.2$  K, 这是迄今已报道文献中实验直接测试  $E_{bit}$  的最小值.

2013年, Takeuchi 等<sup>[29]</sup>通过仿真发现, 将文献 [58] 中采用的临界阻尼 Josephson junction 换成欠阻尼结, 随着本征回滞系数  $\beta_c$  的增大,  $E_{\text{bit}}$  还有显著的降低. 当激发电流上升/下降时间大于等于 2000 ps 时,  $E_{\text{bit}}$  甚至可以小于 SNL 能限. 这个结果促使人们利用超导器件设计更多的实验, 开展可逆计算的实验研究, 从而挑战 SNL 能限.

2014年, Takeuchi 等<sup>[62]</sup>在可逆器件的研究基础上, 提出了高层次的可逆逻辑门 RQFP (reversible-QFP), 它由 AQFP 组成, 前半部分是“分束门”, 它的作用是将输入分成 3 组, 然后利用耦合电感的正负将输入信号复制或者取反输出, 后半部分是“多数决定门”, 它的输出信号由 3 个输入信号“投票”来决定. 作者根据真值表验证了 RQFP 的逻辑功能, 并通过 3 组对比实验, 证明了 RQFP 的逆运算是它本身. RQFP 逻辑门输入和输出信息数量一致, 没有信息的丢失, 逆运算是它本身, 这就证明了 RQFP 逻辑门与 Toffoli 门和 Fredkin 门一样, 在逻辑上是可逆的, 是普适的 3 比特可逆的逻辑门. 作者还利用 JSIM 软件计算了 RQFP 逻辑门的能耗, 在开关上升/下降时间大于等于 10 ns 时, RQFP 中每个 AQFP 的  $E_{\text{bit}}$  是  $kT\ln 2$  量级的, 这也说明了在 RQFP 物理上也是可逆的. 这项工作把可逆计算从器件级的研究推向了逻辑门级, 将使基于超导器件的低能耗大规模计算在可预见的未来成为可能.

### 4.3 超导器件在可逆计算中的研究热点和挑战

基于超导器件的可逆计算已取得一些阶段性的成果, 包括非门、多数决定门、寄存器和 RQFP 逻辑门等的实验验证, 逼近 SNL 能限的实验也在不断地被设计和开展, 这使得基于超导器件的可逆计算充满挑战和希望. 进一步的研究热点和挑战可能主要会集中在以下几个方面.

(1) 新型结构器件及其性能研究. 超导器件具有超低的  $c_E$ , 已报道 nSQUID 和 AQFP 的实验值约  $10^{-30} \text{ J} \cdot \text{s}$ <sup>[27, 61]</sup>, 这一数值比传统 CMOS 器件的实验数值低 4~5 个数量级<sup>[5]</sup>. 为了满足不同的应用需求, 可以提出更多类型和结构的超导器件, 但是由量子力学 Heisenberg 不确定性原理的约束  $\Delta E \cdot \Delta t \geq \hbar/2 = 5.27 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ , 新的器件  $c_E$  不可能无限制地降低.

(2) 通用可逆逻辑门的构造. 要实现电路的物理可逆 (physical reversibility) 和逻辑可逆 (logical reversibility), 最重要的是构造出通用可逆逻辑门, Takeuchi 等提出的 RQFP 逻辑门是重要的一步, 这样原则上便可以实现可逆计算.

(3) 稳定的时钟系统. 可逆电路数据的传输是双向的, 因此后级逻辑门的状态对前级有反向干扰, 从而影响信号的可靠性. 为了避免反向干扰, 电路可能需要采用异步时钟信号, 并且前后级之间插入缓冲级来隔离前后级. 目前, nSQUID 和 AQFP 都需要异步时钟信号驱动, 但是对于如何保证时钟信号之间相位差的调控和消除时间抖动等, 还没有很好的解决方案. 当电路的逻辑门数目增加功能复杂之后, 时钟系统问题便会更加突出, 处理不好将会影响芯片的正常工作.

(4) 比特能耗的实验测试. 可逆电路最主要目的是降低  $E_{\text{bit}}$ , 当电路设计和制造出来, 不仅需要验证逻辑功能正确性, 还需要对电路的  $E_{\text{bit}}$  进行直接实验测试. 由于可逆电路的本身能耗非常低, 通常的测试方法无法测得如此小信号来分析能耗, 测试系统的损耗和环境噪声可能就会把能耗信号淹没. 这个问题曾长期困扰着 nSQUID 器件的研究者, 因为没能拿出让人信服的实验数据证明  $E_{\text{bit}}$  低于 SNL 能限. 现在主要的方法是利用软件仿真计算, 以及利用谐振腔传输特性对单个器件的  $E_{\text{bit}}$  进行实验测试.

(5) 可逆规范的硬件描述语言、逻辑综合、实用算法的开发和研究. 因为 Bennett/Fredkin 提出的可逆逻辑架构与现有的不可逆逻辑架构不同, 因此语言设计方法学、逻辑架构和算法等方面都需要考虑逻辑和物理可逆而作相应的改变.

## 5 结论

本文简要地介绍了可逆计算的发展, 阐述了可逆计算的基本原理, 总结了实现可逆计算所需要满足的条件, 分析了可逆计算的可行性和重要性. 文章重点介绍了可逆计算最近几年在超导器件领域的实验进展, 并对进一步研究的热点问题和挑战进行了归纳.

可逆计算原理经过近 50 年的丰富和发展逐渐成为了信息学中重要的理论. 近年来, 可逆计算的基本原理在微纳机电系统实验中得到验证, 并且由于它在能量耗散方面有显著的优势, 在传统 CMOS 器件和超导器件中也得到了深入的研究.

从计算操作角度, 可逆计算研究是在探索每比特操作的能耗极限. 从信息角度, 可逆计算是一个不产生垃圾信息的可持续计算系统. 从散热角度, 可逆计算是一种从根本上解决目前散热工程问题的方案. 从能量角度, 可逆计算是一种高能量效率的计算方式. 从物理学角度, 可逆计算研究是在寻找填补理论可逆性和现有计算工程不可逆性之间鸿沟的方案, 为探索高层次架构的量子计算机提供新思路. 因此, 可逆计算作为一门具有创新原动力的学科, 将会为人类能源和信息计算的发展带来新的机遇和希望.

## 参考文献

- 1 Moore G E. Cramming more components onto integrated circuits. *Proc IEEE*, 1998, 86: 82–85
- 2 Geist A. Paving the roadmap to exascale. *SciDAC Rev*, 2010, 16: 52–59
- 3 Ball P. Computer engineering: feeling the heat. *Nature*, 2012, 492: 174–176
- 4 Service R F. Computer science. What it'll take to go exascale. *Science*, 2012, 335: 394–396
- 5 Mukhanov O A. Energy-efficient single flux quantum technology. *IEEE Trans Appl Supercond*, 2011, 21: 760–769
- 6 Zhirnov V V, Cavin R K, Hutchby J A, et al. Limits to binary logic switch scaling—a gedanken model. *Proc IEEE*, 2003, 91: 1934–1939
- 7 Nielsen M A, Chuang I L. *Quantum Computation and Quantum Information*. Cambridge: Cambridge University Press, 2002
- 8 Fedorov A, Steffen L, Baur M, et al. Implementation of a Toffoli gate with superconducting circuits. *Nature*, 2012, 481: 170–172
- 9 Nakamura Y, Pashkin Y A, Tsai J S. Coherent control of macroscopic quantum states in a single-Cooper-pair box. *Nature*, 1999, 398: 786–788
- 10 Friedman J R, Patel V, Chen W, et al. Quantum superposition of distinct macroscopic states. *Nature*, 2000, 406: 43–46
- 11 Martinis J M, Nam S, Aumentado J, et al. Rabi oscillations in a large Josephson-junction qubit. *Phys Rev Lett*, 2002, 89: 117901
- 12 Yu Y, Han S, Chu X, et al. Coherent temporal oscillations of macroscopic quantum states in a Josephson junction. *Science*, 2002, 296: 889–892
- 13 Rigetti C, Gambetta J M, Poletto S, et al. Superconducting qubit in a waveguide cavity with a coherence time approaching 0.1 ms. *Phys Rev B*, 2012, 86: 100506
- 14 DiCarlo L, Reed M, Sun L, et al. Preparation and measurement of three-qubit entanglement in a superconducting circuit. *Nature*, 2010, 467: 574–578
- 15 Neeley M, Bialczak R C, Lenander M, et al. Generation of three-qubit entangled states using superconducting phase qubits. *Nature*, 2010, 467: 570–573
- 16 Lucero E, Barends R, Chen Y, et al. Computing prime factors with a Josephson phase qubit quantum processor. *Nature Phys*, 2012, 8: 719–723
- 17 Devoret M, Schoelkopf R. Superconducting circuits for quantum information: an outlook. *Science*, 2013, 339: 1169–1174
- 18 Landauer R. Dissipation and noise immunity in computation and communication. *Nature*, 1988, 335: 779–784

- 19 Lloyd S. Ultimate physical limits to computation. *Nature*, 2000, 406: 1047–1054
- 20 Maruyama K, Nori F, Vedral V. Colloquium: the physics of Maxwell’s demon and information. *Rev Mod Phys*, 2009, 81: 1–23
- 21 Norton J D. Waiting for Landauer. *Stud Hist Phil Sci Part B*, 2011, 42: 184–198
- 22 Semenov V K, Danilov G V, Averin D V. Negative-inductance SQUID as the basic element of reversible Josephson-junction circuits. *IEEE Trans Appl Supercond*, 2003, 13: 938–943
- 23 Raizen M G. Comprehensive control of atomic motion. *Science*, 2009, 324: 1403–1406
- 24 Toyabe S, Sagawa T, Ueda M, et al. Experimental demonstration of information-to-energy conversion and validation of the generalized Jarzynski equality. *Nature Phys*, 2010, 6: 988–992
- 25 Bérut A, Arakelyan A, Petrosyan A, et al. Experimental verification of Landauer’s principle linking information and thermodynamics. *Nature*, 2012, 483: 187–189
- 26 Boechler G P, Whitney J M, Lent C S, et al. Fundamental limits of energy dissipation in charge-based computing. *Appl Phys Lett*, 2010, 97: 103502
- 27 Ren J, Semenov V K. Progress with physically and logically reversible superconducting digital circuits. *IEEE Trans Appl Supercond*, 2011, 21: 780–786
- 28 Orlov A O, Lent C S, Thorpe C C, et al. Experimental test of Landauer’s principle at the sub-kBT level. *Jpn J Appl Phys*, 2012, 51: 06FE10
- 29 Takeuchi N, Yamanashi Y, Yoshikawa N. Simulation of sub-kBT bit-energy operation of adiabatic quantum-flux-parametron logic with low bit-error-rate. *Appl Phys Lett*, 2013, 103: 062602
- 30 Guan Z, Qin X, Cui X. Reversible network iterative construct method based on the cascade operation. In: *Proceedings of IEEE International Conference on Information Technology, New Generations, Las Vegas, 2008*. 1202–1205
- 31 Chen H W, Li W Q, Ruan Y, et al. A synthesis algorithm of reversible logic circuit based on the decreasing transform of Hamming distance. *Chin J Comput*, 2014, 37: 1839–1845 [陈汉武, 李文骞, 阮越, 等. 基于汉明距离递减变换的可逆逻辑综合算法. *计算机学报*, 2014, 37: 1839–1845]
- 32 Li H, Li G, Liu J, et al. Parametric characterization and macroscopic quantum tunneling of Nb/AlO<sub>x</sub>/Nb Josephson junctions. *IEEE Trans Appl Supercond*, 2014, 24: 1100205
- 33 Bennett C H. Logical reversibility of computation. *IBM J Res Dev*, 1973, 17: 525–532
- 34 Landauer R. Irreversibility and heat generation in the computing process. *IBM J Res Dev*, 1961, 5: 183–191
- 35 Levitin L B, Toffoli T. Thermodynamic cost of reversible computing. *Phys Rev Lett*, 2007, 99: 110502
- 36 Toffoli T. *Reversible Computing*. Berlin-Heidelberg: Springer, 1980. 632–644
- 37 Feynman R P. Quantum mechanical computers. *Found Phys*, 1986, 16: 507–531
- 38 Fredkin E, Toffoli T. Conservative logic. *Int J Theor Phys*, 1982, 21: 219–253
- 39 Keyes R W, Landauer R. Minimal energy dissipation in logic. *IBM J Res Dev*, 1970, 14: 152–157
- 40 Bennett C H. The thermodynamics of computation—a review. *Int J Theor Phys*, 1982, 21: 905–940
- 41 Bennett C H. Notes on the history of reversible computation. *IBM J Res Dev*, 1988, 32: 16–23
- 42 Frank M P. Approaching the physical limits of computing. In: *Proceedings of IEEE International Symposium on Multiple-Valued Logic, Calgary, 2005*. 168–185
- 43 Price G N, Bannerman S T, Viering K, et al. Single-photon atomic cooling. *Phys Rev Lett*, 2008, 100: 093004
- 44 Younis S G. Asymptotically zero energy computing using split-level charge recovery logic. Dissertation for Ph.D. Degree. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 1994
- 45 Athas W C, Svensson L J, Koller J G, et al. Low-power digital systems based on adiabatic-switching principles. *IEEE Trans Very Large Scale Integr Syst*, 1994, 2: 398–407
- 46 Athas W C, Tzartzanis N, Svensson L J, et al. A low-power microprocessor based on resonant energy. *IEEE J Solid-State Circuits*, 1997, 32: 1693–1701
- 47 Lim J, Kim D-G, Chae S-I. A 16-bit carry-lookahead adder using reversible energy recovery logic for ultra-low-energy systems. *IEEE J Solid-State Circ*, 1999, 34: 898–903
- 48 De Vos A. Reversible computing. *Prog Quant Electron*, 1999, 23: 1–49
- 49 Desoete B, De Vos A. A reversible carry-look-ahead adder using control gates. *VLSI J Integr*, 2002, 33: 89–104
- 50 Kim S, Ziesler C H, Papaefthymiou M C. Charge-recovery computing on silicon. *IEEE Trans Comput*, 2005, 54: 651–659

- 51 Frank M P. Introduction to reversible computing: motivation, progress, and challenges. In: ACM Proceedings of the 2nd Conference on Computing Frontiers, Ischia, 2005. 385–390
- 52 Harada Y, Hioe W, Goto E. Flux transfer devices. *Proc IEEE*, 1989, 77: 1280–1286
- 53 Chen W, Rylyakov A, Patel V, et al. Rapid single flux quantum T-flip flop operating up to 770 GHz. *IEEE Tran Appl Supercond*, 1999, 9: 3212–3215
- 54 Landauer R. Information is physical. *Phys Today*, 1991, 44: 23–29
- 55 Semenov V K, Danilov G V, Averin D V. Classical and quantum operation modes of the reversible Josephson-junction logic circuits. *IEEE Trans Appl Supercond*, 2007, 17: 455–461
- 56 Ren J, Semenov V K, Polyakov Y A, et al. Progress towards reversible computing with nSQUID arrays. *IEEE Trans Appl Supercond*, 2009, 19: 961–967
- 57 Ren J. Physically and logically reversible superconducting circuit. Dissertation for Ph.D. Degree. New York: Stony Brook University, 2011
- 58 Takeuchi N, Ehara K, Inoue K, et al. Margin and energy dissipation of adiabatic quantum-flux-parametron logic at finite temperature. *IEEE Trans Appl Supercond*, 2013, 23: 1700304
- 59 Takeuchi N, Ozawa D, Yamanashi Y, et al. An adiabatic quantum flux parametron as an ultra-low-power logic device. *Supercond Sci Technol*, 2013, 26: 035010
- 60 Inoue K, Takeuchi N, Ehara K, et al. Simulation and experimental demonstration of logic circuits using an ultra-low-power adiabatic quantum-flux-parametron. *IEEE Trans Appl Supercond*, 2013, 23: 1301105
- 61 Takeuchi N, Yamanashi Y, Yoshikawa N. Measurement of 10 zJ energy dissipation of adiabatic quantum-flux-parametron logic using a superconducting resonator. *Appl Phys Lett*, 2013, 102: 052602
- 62 Takeuchi N, Yamanashi Y, Yoshikawa N. Reversible logic gate using adiabatic superconducting devices. *Sci Rep*, 2014, 4: 6354
- 63 Mukaiyama T, Takeuchi N, Yamanashi Y, et al. Design and demonstration of an on-chip AC power source for adiabatic quantum-flux-parametron logic. *Supercond Sci Technol*, 2013, 26: 035018
- 64 Mukaiyama T, Takeuchi N, Ehara K, et al. Operation of an adiabatic quantum-flux-parametron gate using an on-chip ac power source. *IEEE Trans Appl Supercond*, 2013, 23: 1301605
- 65 Takeuchi N. Extremely energy-efficient integrated circuits using adiabatic superconductor logic. Dissertation for Ph.D. Degree. Yokohama: Yokohama National University, 2014
- 66 Zhang L Y. *Superconducting Physics*. Beijing: Electronic Industry Press, 1995. 297–301 [章立源. 超导物理学. 北京: 电子工业出版社, 1995. 297–301]
- 67 Loe K F, Goto E. Analysis of flux input and output Josephson pair device. *IEEE Trans Magn*, 1985, 21: 884–887

## Principle and progress of reversible computing

Wei CHEN<sup>1,2\*</sup>, Hao LI<sup>1,2</sup>, Jianshe LIU<sup>1,2</sup>, Yingshan ZHANG<sup>1,2</sup> & Tiefu LI<sup>1,2</sup>

1 *Tsinghua National Laboratory for Information Science and Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China;*

2 *Department of Microelectronics and Nanoelectronics/Institute of Microelectronics, Tsinghua University, Beijing 100084, China*

\*E-mail: weichen@tsinghua.edu.cn

**Abstract** The problems of heat removal and high electrical energy consumption cause significant bottlenecks in the development of the integration density of IC chips and the processing capability of supercomputers. The reversibility of single quantum bits and the coherence between them are persistent subjects for implementing large-scale quantum computation. Therefore, reversible computing has been widely developed in theory and experiments because of its ultra-low power dissipation and compatibility with quantum computing. In this review paper, we introduce the principle of reversible computing, summarize its experimental progress in micro-mechanics, CMOS and superconducting fields, analyze the advantages of superconducting devices, and discuss two promising

superconducting devices for realizing large-scale reversible computing circuits.

**Keywords** reversible computing, energy consumption, reversible logic gate, superconducting reversible computing



**Wei CHEN** was born in 1963. He graduated from Zhejiang University with a bachelor's degree in 1982, obtained a master's degree from the Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences in 1986 and a Ph.D. degree from Cambridge University, UK in 1995. He has been working in Tsinghua University as a professor since 2007 and as a Changjiang Scholar of the Chinese Ministry of Education from 2008. His research interests include nanofabrication, superconducting electronics and

quantum devices.



**Hao LI** was born in 1988. He is a graduate student pursuing a Ph.D. degree. He graduated from Jilin University with a bachelor's degree in 2010. His research interests are superconducting low-power electronics and quantum computation.