



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 113326944 B

(45) 授权公告日 2022. 03. 25

(21) 申请号 202110112980.4

(22) 申请日 2021.01.27

(65) 同一申请的已公布的文献号  
申请公布号 CN 113326944 A

(43) 申请公布日 2021.08.31

(73) 专利权人 腾讯科技(深圳)有限公司  
地址 518057 广东省深圳市南山区高新区  
科技中一路腾讯大厦35层

(72) 发明人 周宇 张贞兴 安硕明 尹泽龙  
淮赛男 顾秀 徐雄 张胜誉

(74) 专利代理机构 北京三高永信知识产权代理  
有限责任公司 11138  
代理人 祝亚男

(51) Int. Cl.

G06N 10/40 (2022.01)

(56) 对比文件

EP 0731560 A1, 1996.09.11

CN 104297704 A, 2015.01.21

WO 2020263255 A1, 2020.12.30

US 2017104493 A1, 2017.04.13

CN 205879109 U, 2017.01.11

审查员 任丽娜

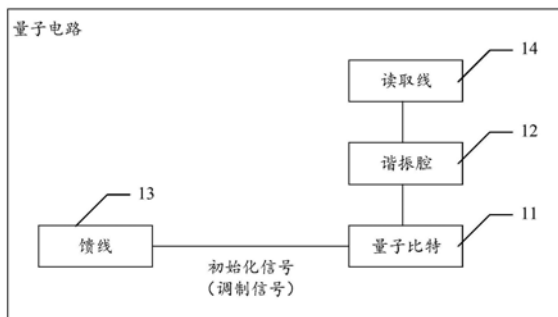
权利要求书1页 说明书8页 附图4页

(54) 发明名称

一种量子电路及量子处理器

(57) 摘要

本申请公开了一种量子电路及量子处理器,涉及量子技术领域。所述量子电路包括:量子比特、与该量子比特耦合的谐振腔和馈线;馈线用于向量子比特馈入初始化信号,该初始化信号是用于引起量子比特的频率产生振荡的调制信号;其中,上述振荡使量子比特与谐振腔发生等效的态交换,从而使得量子比特的激发态通过谐振腔初始化到基态。本申请提供了一种高效且高精度的量子比特初始化方案,通过给量子比特施加一个调制信号作为初始化信号,使得量子比特的激发态通过谐振腔快速衰减为基态,从而达到快速且高保真度地初始化的目的。并且,不需要引入反馈回路来测量读取量子比特的态,因此降低了对硬件的要求。



1. 一种量子电路,其特征在于,所述量子电路包括:量子比特、与所述量子比特耦合的谐振腔,以及与所述量子比特耦合的馈线;

所述馈线用于向所述量子比特馈入初始化信号,所述初始化信号是用于引起所述量子比特的频率产生振荡的调制信号;

其中,所述振荡使所述量子比特与所述谐振腔发生等效的态交换,从而使得所述量子比特的激发态通过所述谐振腔初始化到基态。

2. 根据权利要求1所述的量子电路,其特征在于,所述初始化信号 $\Phi$ 为:

$$\Phi = A \cos(\omega t + \phi)$$

其中,A表示调制振幅, $\omega$ 表示调制频率, $\phi$ 表示调制相位,t表示时间。

3. 根据权利要求1所述的量子电路,其特征在于,所述馈线为磁通偏置线。

4. 根据权利要求1所述的量子电路,其特征在于,在所述振荡产生的边带的能级与所述谐振腔的能级满足接近条件的情况下,所述量子比特与所述谐振腔发生等效的态交换;

其中,所述接近条件是指所述边带的能级与所述谐振腔的能级相等;

或者,

所述接近条件是指所述边带的能级与所述谐振腔的能级之间的差值小于阈值;

或者,

所述接近条件是指所述初始化信号的调制频率接近能级差的 $1/N$ ,所述能级差是指所述边带的能级与所述谐振腔的能级之间的差值,N为所述初始化信号的调制阶数。

5. 根据权利要求1至4任一项所述的量子电路,其特征在于,在所述量子比特的工作点靠近对称点的情况下,所述初始化信号的调制阶数为大于等于2的偶数。

6. 根据权利要求1至4任一项所述的量子电路,其特征在于,在所述量子比特的工作点远离对称点的情况下,所述初始化信号的调制阶数为大于等于1的整数。

7. 根据权利要求1至4任一项所述的量子电路,其特征在于,所述初始化信号的调制频率 $\omega$ 为:

$$\omega = \delta / N + \alpha$$

其中, $\delta$ 为所述量子比特与所述谐振腔的频率差,N为所述初始化信号的调制阶数, $\alpha$ 为允许的偏差范围。

8. 根据权利要求1至4任一项所述的量子电路,其特征在于,所述量子比特为频率可调的超导量子比特。

9. 一种量子处理器,其特征在于,所述量子处理器包括如权利要求1至8任一项所述的量子电路。

## 一种量子电路及量子处理器

### 技术领域

[0001] 本申请实施例涉及量子技术领域,特别涉及一种量子电路及量子处理器。

### 背景技术

[0002] 2000年DiVincenzo提出了5条实现通用量子计算的标准(即DiVincenzo criteria,迪文森佐准则),其中一条是能很好地将量子态初始化至基态。

[0003] 相关技术提供了一种初始化方案可以称之为反馈方案,具体操作方法是先测量量子比特的态,如果测量出量子比特是0态,不做任何操作,反过来如果测量出量子比特是1态,就给该量子比特施加 $\pi$ 脉冲,通过该 $\pi$ 脉冲使得量子比特从1态变为0态。

[0004] 这种初始化方案依赖于测量为非破坏性测量,且受读取保真度以及 $\pi$ 脉冲精度的制约,导致初始化的精度较低。

### 发明内容

[0005] 本申请实施例提供了一种量子电路及量子处理器,能够实现一种高效且高精度的量子比特初始化方案。所述技术方案如下:

[0006] 根据本申请实施例的一个方面,提供了一种量子电路,所述量子电路包括:量子比特、与所述量子比特耦合的谐振腔,以及与所述量子比特耦合的馈线;

[0007] 所述馈线用于向所述量子比特馈入初始化信号,所述初始化信号是用于引起所述量子比特的频率产生振荡的调制信号;

[0008] 其中,所述振荡使所述量子比特与所述谐振腔发生等效的态交换,从而使得所述量子比特的激发态通过所述谐振腔初始化到基态。

[0009] 根据本申请实施例的一个方面,提供了一种量子处理器,所述量子处理器包括上述量子电路。

[0010] 根据本申请实施例的一个方面,提供了一种量子计算机,所述量子计算机包括上述量子电路。

[0011] 本申请实施例提供的技术方案可以带来如下有益效果:

[0012] 本申请提供了一种高效且高精度的量子比特初始化方案,本申请技术方案通过给量子比特施加一个调制信号作为初始化信号,使得量子比特的激发态通过谐振腔快速衰减为基态,从而达到快速且高保真度地初始化的目的。并且,这种方案不需要引入反馈回路来测量读取量子比特的态,因此降低了对硬件的要求。

### 附图说明

[0013] 为了更清楚地说明本申请实施例中的技术方案,下面将对实施例描述中所需要使用的附图作简单地介绍,显而易见地,下面描述中的附图仅仅是本申请的一些实施例,对于本领域普通技术人员来讲,在不付出创造性劳动的前提下,还可以根据这些附图获得其他的附图。

- [0014] 图1是本申请一个实施例提供的量子电路的示意图；
- [0015] 图2是图1所示量子电路对应的等效电路的示意图；
- [0016] 图3示出了量子比特的频率随初始化信号的脉冲幅度的变化情况的示意图；
- [0017] 图4示出了磁通调制的实验结果和模拟结果所得到的1态概率的对比图；
- [0018] 图5示出了在给定调制频率和振幅下1态概率随时间演化的示意图；
- [0019] 图6示出了未初始化和初始化后对于读取保真度的比对图；
- [0020] 图7示出了未初始化和初始化后对于残余1态比例的比对图；
- [0021] 图8示出了在固定调制时间扫描调制频率的情况下得到的1态概率的示意图。

### 具体实施方式

[0022] 为使本申请的目的、技术方案和优点更加清楚，下面将结合附图对本申请实施方式作进一步地详细描述。

[0023] 量子计算机(quantum computer)是利用量子力学原理来进行计算的一种机器。基于量子力学的叠加原理和量子纠缠，量子计算机具有较强的并行处理能力，可以解决一些经典计算机难以计算的问题。超导量子比特的零电阻特性及与集成电路接近的制造工艺，使得利用超导量子比特构建的量子计算体系是目前最有希望实现实用量子计算的体系之一。

[0024] 量子处理器是指量子级计算机处理器，也就是量子计算机的处理器。量子处理器可以包括一个或者多个量子芯片。

[0025] 量子芯片(或称为量子电路)是量子计算机的中央处理器，是量子计算机的核心部件。量子芯片是将量子线路集成在基片上，进而承载量子信息处理的功能。借鉴于传统计算机的发展历程，量子计算机的研究在克服瓶颈技术之后，要想实现商品化和产业升级，需要走集成化的道路。超导系统、半导体量子点系统、微纳光子学系统、甚至是原子和离子系统，都想走芯片化的道路。从发展看，超导量子芯片系统从技术上走在了其它物理系统的前面；传统的半导体量子点系统也是人们努力探索的目标，因为毕竟传统的半导体工业发展已经很成熟，如半导体量子芯片在退相干时间和操控精度上一旦突破容错量子计算的阈值，有望集成传统半导体工业的现有成果，节省开发成本。

[0026] 鉴于量子计算机的优势，未来可以使用量子计算机来进行一些处理和计算，例如基于云技术构建的系统中可以使用量子计算机来进行一些处理和计算，以提供更好的服务。

[0027] 与传统的经典物理量低电平和高电平代表0和1不同的是，量子计算利用电子的自旋、光的偏振等物理量用作量子比特的0态和1态。量子计算的强大在于利用了量子态的叠加性配合量子算法进行并行计算或者模拟。超导量子计算是利用约瑟夫森结(超导体-绝缘体-超导体结构的具有约瑟夫森效应的器件，是构成超导量子比特的关键部分)构造等效的能级，所构造的能级当中的基态相当于0，第一激发态相当于1。在不做任何操作的情况下，理想量子系统100%处于0态，但是由于温度仍有几十mK量级，会造成少量的热激发，仍有部分残留的1态。这些残留的1态遵从麦克斯韦-玻尔兹曼分布：

[0028] 
$$P_{(i)} = g_i \frac{1}{Q} e^{-\frac{E_i}{k_B T}}$$

[0029] 其中,  $P_{\langle i \rangle}$  表示量子比特  $i$  处于 1 态的概率,  $i$  为不同量子比特的标号,

$$Q = \sum_i g_i e^{-\frac{E_i}{k_B T}},$$

$T$  为系统温度,  $k_B$  为玻尔兹曼常数,  $g_i$  为能级简并度,  $E_i$  为能级间隙,  $e$  为自然常数。以某一量子比特的频率在 5.8GHz, 等效温度在 80mK 为例, 可以计算出该量子比特处于 1 态的概率 (即剩余热激发) 为 2.8%。这部分的剩余热激发会直接影响到读取的保真度以及整个计算过程的保真度。保真度是量子系统中描述实际测量值与理想值近似程度的数值。因此, 如何快速地将剩余热激发的 1 态也初始到 0 态, 提高初始化的保真度, 使整个系统能够高效、高精度地初始化是一个非常重要的问题。

[0030] 相关技术提供的基于反馈的初始化方案, 一方面, 由于需要测量并读取出量子比特是处于 0 态还是 1 态, 在该测量读取过程中, 会影响到量子比特的态, 比如量子比特的态原本只是 0 态和 1 态的叠加, 受到测量读取的影响会造成态的混合, 如引入其他子空间的态, 产生态的泄露, 造成读取保真度较低, 而且给量子比特施加的  $\pi$  脉冲也会受到精度制约, 因此总体上会导致初始化的精度较低; 另一方面, 由于引入了反馈回路来测量读取量子比特的态, 因此对硬件要求也较高。

[0031] 本申请提供了一种高效且高精度的量子比特初始化方案, 所谓量子比特初始化, 是指将量子比特制备在一个已知的量子态上, 通常为量子比特的 0 态。本申请技术方案不需要测量读取量子比特的态, 通过给量子比特施加一个调制信号作为初始化信号, 调制该量子比特的磁通, 使得量子比特的激发态 (如 1 态) 通过谐振腔快速衰减为基态 (即 0 态), 从而达到快速且高保真度地初始化的目的。并且, 这种方案不需要引入反馈回路来测量读取量子比特的态, 因此降低了对硬件的要求。下面, 通过几个实施例对本申请技术方案进行详细介绍说明。

[0032] 请参考图 1, 其示出了本申请一个实施例提供的量子电路的示意图。该量子电路可以包括量子比特 11、谐振腔 12 和馈线 13。

[0033] 在本申请实施例中, 量子比特 11 是频率可调的量子比特, 也即该量子比特的频率是可调节的, 通过给该量子比特施加一定的信号, 可以调节该量子比特的频率。例如, 量子比特 11 可以是频率可调的超导量子比特。

[0034] 另外, 量子比特 11 的类型可以是任意一种频率可调的量子比特。如 Transmon 量子比特, Transmon 是一种超导量子比特的类型, 特点是并联大电容降低电荷噪声对量子比特的影响, 且频率可调节。在一些其他示例中, 该量子比特 11 还可以是诸如磁通量子比特 (flux qubit)、电荷量子比特 (charge qubit)、相位量子比特 (phase qubit) 等其他类型的频率可调节的量子比特, 本申请实施例对此不作限定。

[0035] 如图 1 所示, 谐振腔 12 通常和读取线 14 耦合, 且谐振腔 12 还与量子比特 11 耦合。例如, 谐振腔 12 与读取线 14 之间可以通过电感耦合, 谐振腔 12 与量子比特 11 之间可以通过电容耦合。可选地, 谐振腔 12 与量子比特 11 之间的耦合强度大约为 100MHz。读取线 14 和谐振腔 12 用于读取量子比特 11 的态。具体来讲, 在量子比特 11 处于不同态的情况下, 谐振腔 12 的频率会表现为不同的特性, 读取线 14 通过读取谐振腔 12 的频率, 能够据此获知量子比特 11 的态。需要说明的是, 这里所说的读取线 14 和谐振腔 12 的作用, 是在量子计算的过程中, 可以通过他们来测量读取量子比特 11 的态, 但是本申请在对量子比特 11 进行初始化的过程中, 不需要测量读取量子比特 11 的态, 不论量子比特 11 是处于何种状态, 直接给该量子比特 11

施加本申请中的初始化信号即可。

[0036] 如图1所示,本申请实施例提供的量子电路还包括与量子比特11耦合的馈线13,该馈线13用于向量子比特11馈入初始化信号,该初始化信号是用于引起量子比特11的频率产生振荡的调制信号,如一个调制脉冲信号(简称为“调制脉冲”)。进一步地,该振荡使量子比特11与谐振腔12发生等效的态交换,从而使得量子比特11的激发态通过谐振腔12初始化到基态。可选地,在振荡产生的边带的能级与谐振腔12的能级满足接近条件的情况下,量子比特11与谐振腔12发生等效的态交换。谐振腔12相当于冷库,由于谐振腔12的衰减系数大,因此谐振腔12能够将量子比特11的激发态迅速衰减掉,从而达到初始化到基态的目的,即将量子比特11迅速从1态初始化至0态。由于谐振腔12中的光子衰减速率快,衰减时间为30~80ns左右,因此其比较适合用来作为快速衰减量子比特11能量的通道,将量子比特11从激发态快速衰减为基态。

[0037] 可选地,上述接近条件是指边带的能级与谐振腔12的能级相等,或者边带的能级与谐振腔12的能级之间的差值小于阈值,该阈值可以是预先设定的数值,或者是初始化信号的调制频率接近能级差的 $1/N$ ,该能级差是指边带的能级与谐振腔12的能级之间的差值, $N$ 可以取2、3、4等数值,本申请实施例对此不作限定。

[0038] 图2是图1所示量子电路对应的等效电路的示意图。在图2所示的等效电路中,量子比特11的等效电路包括耦合电容111及两个约瑟夫森结组成的SQUID(Superconducting Quantum Interference Device,超导量子干涉器件)112。谐振腔12和量子比特11通过电容耦合,谐振腔12和读取线14通过电感耦合。馈线13可以是磁通偏置线,该磁通偏置线能够在SQUID 112的双结区域产生磁通,从而调节量子比特11的频率和能级。磁通偏置线也可称为 $z$ 线。在本申请实施例中,对馈线13(如磁通偏置线)与量子比特11之间的耦合方式不作限定,如可以采用电感耦合。

[0039] 如图3所示,线条31表示量子比特的频率随初始化信号的脉冲幅度的变化情况,如果给 $z$ 线施加如图3中线条32所示的调制脉冲,量子比特的频率会在对称点(sweet spot,最佳操作点)附近振荡,该振荡会导致产生频率为 $\omega_q + \omega$ 的边带(sideband),其中, $\omega_q$ 代表量子比特的频率, $\omega$ 代表初始化信号(即上述调制脉冲)的调制频率。当该边带的频率/能级与谐振腔的频率/能级接近时,量子比特的1态的布居数会转移至谐振腔上,而谐振腔相当于冷库,将量子比特的激发态迅速初始化到基态,即将量子比特从1态迅速初始化到0态。这里的原因是,当上述边带的能级与谐振腔的能级接近的时候,相当于量子比特与谐振腔发生了量子态的交换,但由于谐振腔衰减特别快,就会迅速将量子比特的1态泄漏走,也即是这个初始化过程。

[0040] 可选地,初始化信号 $\Phi$ 为:

$$\Phi = A \cos(\omega t + \phi)$$

[0042] 其中, $A$ 表示调制振幅, $\omega$ 表示调制频率, $\phi$ 表示调制相位, $t$ 表示时间。该初始化信号可以由任意波形发生器产生,仅需向该波形发生器提供 $A$ 、 $\omega$ 和 $\phi$ 这三个参数,即可通过该波形发生器产生一个满足上述参数要求的调制信号。

[0043] 本申请实施例提供的量子比特初始化方案,仅需添加一个波形发生器产生上述初始化信号即可,初始化过程中所用到的磁通偏置线和谐振腔均是量子电路原本就需要的器件,无需增加其他的谐振腔或者控制线,因此对硬件要求很低。

[0044] 在示例性实施例中,在量子比特的工作点靠近对称点(sweet spot)的情况下,初始化信号的调制阶数为大于等于2的偶数;在量子比特的工作点远离对称点(sweet spot)的情况下,初始化信号的调制阶数为大于等于1的整数。其中,量子比特的工作点是指该量子比特在初始化状态下的频率。量子比特的对称点也可称为中心点或最佳操作点等其他名称,其是指量子比特对噪声不敏感的频率位置,量子比特的相干性比较好。量子比特的工作点可以人为进行选择,例如可以将量子比特的工作点选在对称点附近,使其靠近对称点;也可以将量子比特的工作点选在远离对称点的位置。在本申请实施例中,上述“靠近”和“远离”可以通过门限值来区分,例如,当量子比特的工作点与其对称点之间的频率差值小于门限值的情况下,确定为工作点靠近对称点;当量子比特的工作点与其对称点之间的频率差值大于门限值的情况下,确定为工作点远离对称点。该门限值可以结合实际情况进行设定,本申请不作限定。

[0045] 另外,上述确定调制阶数的结论可以通过实际实验或者模拟实验得到,通过实验给量子比特施加初始化信号,并调整初始化信号的调制频率和调制阶数,然后测量该量子比特处于1态的概率,会发现在量子比特的工作点靠近对称点的情况下,采用2阶调制、4阶调制或者更高偶数阶数的调制所达到的初始化效果更佳(即量子比特处于1态的概率更低),在量子比特的工作点远离对称点的情况下,采用1阶调制、2阶调制或者更高阶数的调制,均可达到较好的初始化效果。另外,具体采用何种阶数的调制信号,也可以通过上述实验获得,其目的是使得量子比特处于1态的概率越低越好。

[0046] 可选地,初始化信号的调制频率约为量子比特的频率与谐振腔的频率之差的N分之一,N为初始化信号的调制阶数。也即,在确定出初始化信号的调制阶数N之后,可以进一步结合该调制阶数N和上述频率差,确定出初始化信号的调制频率。示例性地,初始化信号的调制频率 $\omega$ 为:

$$[0047] \quad \omega = \delta/N + \alpha$$

[0048] 其中, $\delta$ 为量子比特与谐振腔的频率差(即量子比特的频率与谐振腔的频率的差值),N为初始化信号的调制阶数, $\alpha$ 为允许的偏差范围,该允许的偏差范围可以结合实验或实际经验确定,本申请对此不作限定。

[0049] 本申请提供的初始化方案,利用的是谐振腔与量子比特的耦合相互作用实现的,系统哈密顿量 $\mathcal{H}_{total}$ 可以写成基础哈密顿量 $\mathcal{H}_0$ 与相互作用哈密顿量 $\mathcal{H}_{int}$ 之和,即:

$$[0050] \quad \mathcal{H}_0/\hbar = \omega_q a^\dagger a + \frac{\eta}{2} (a^\dagger a a^\dagger a - a^\dagger a) + \omega_r b^\dagger b$$

$$[0051] \quad \mathcal{H}_{int}/\hbar = -g(a - a^\dagger)(b - b^\dagger)$$

$$[0052] \quad \mathcal{H}_{total} = \mathcal{H}_0 + \mathcal{H}_{int}$$

[0053] 其中, $\omega_q$ 为量子比特的频率, $\eta$ 为量子比特的非谐性常数, $a^\dagger, a, b^\dagger, b$ 分别为量子比特与谐振腔的升降算符, $g$ 为量子比特与谐振腔的耦合强度(约为100MHz)。如图3中量子比特的 $\omega_q$ 与z线所加上的磁通可以简化为:

$$[0054] \quad \hbar\omega_q = \sqrt{8E_c E_J} \sqrt{1 + d^2 \tan^2\left(\frac{\pi\Phi}{\Phi_0}\right) \left|\cos\left(\frac{\pi\Phi}{\Phi_0}\right)\right|} - E_c$$

[0055] 其中,  $E_c$  是量子比特的静电能,  $E_J$  是SQUID的能量,  $d$  与两个结的对称性有关,  $\Phi_0$  为磁通量子, 这些参数在给定量子比特后均为定值。当初始化信号  $\Phi$  以  $\Phi = A \cos(\omega t + \phi)$  的形式振荡, 其中  $A$  为调制振幅,  $\omega$  为调制频率,  $\phi$  为调制相位,  $t$  为时间。将所引起的量子比特的频率  $\omega_q$  的变化代入系统的整体哈密顿量  $\mathcal{H}_{total}$ , 利用Lindblad主方程含时哈密顿量的模拟(量子比特与谐振腔均截取到三个能级), 同时利用  $\pi$  脉冲将量子比特制备在1态, 可得出图4右侧所示的模拟结果。与图4左侧所示的实际实验结果所得到的测量数据相类似, 图中的颜色深浅代表了1态的剩余量, 越接近黑色就代表初始化效果越好。

[0056] 具体推导过程如下, 系统整体哈密顿量为:

$$[0057] \quad H_{total} = \omega_q a^\dagger a + \frac{\eta}{2} a^\dagger a^\dagger a a + \omega_r b^\dagger b + g(b^\dagger a + b a^\dagger)$$

[0058] 以量子比特自身、谐振腔自身频率为参考系, 做旋转波近似后可得:

$$[0059] \quad H_{total} = \frac{\eta}{2} a^\dagger a^\dagger a a + g(e^{i\delta t} b^\dagger a + e^{-i\delta t} b a^\dagger)$$

[0060] 其中,  $\delta$  为量子比特和谐振腔的频率差, 我们将量子比特的频率简化为:

$$[0061] \quad \omega_q = \omega_{q0} + A \cos \Delta t$$

[0062] 其中,  $\omega_{q0}$  为振荡的中心点频率,  $\Delta$  为初始化信号的调制频率(相当于上述式子  $\Phi = A \cos(\omega t + \phi)$  中的  $\omega$ ),  $t$  为时间。

[0063] 那么:

$$[0064] \quad \begin{aligned} H_{total} &= \frac{\eta}{2} a^\dagger a^\dagger a a + g e^{i\omega_{q0} t - i\omega_r t + iA \int_0^t \cos \Delta x dx} b^\dagger a + h.c. \\ &= \frac{\eta}{2} a^\dagger a^\dagger a a + g e^{i\delta t + \frac{iA}{\Delta} \sin \Delta t} b^\dagger a + h.c. \end{aligned}$$

[0065] 按照贝塞尔级数展开:

$$[0066] \quad e^{i\delta t + \frac{iA}{\Delta} \sin \Delta t} = J_0\left(\frac{A}{\Delta}\right) e^{i\delta t} + \sum_{n=1}^{\infty} J_n\left(\frac{A}{\Delta}\right) e^{in\Delta t + i\delta t} + J_n\left(\frac{A}{\Delta}\right) e^{-in\Delta t + i\delta t + in\pi}$$

[0067] 因此, 当  $n\Delta + \delta = 0$  或  $n\Delta - \delta = 0$  时, 会发生等效共振的相互作用:

$$[0068] \quad \tilde{g}_n = J_n\left(\frac{A}{\Delta}\right) g$$

[0069] 其中,  $J_n$  就是贝塞尔的第  $n$  阶级系数,  $\tilde{g}_n$  相当于等效的耦合强度,  $n$  为调制阶数, 这就是图4出现不同条纹带状的原因。另外, 如果量子比特的工作点在对称点附近, 由于其调制是对称的, 没有直流分量, 因此上述公式中的调制阶数  $n$  只能取偶数, 调制阶数可以是2、4、6等; 如果量子比特的工作点不在对称点附近, 由于其调制是非对称的, 存在直流分量, 因此上述公式中的调制阶数  $n$  可以取任意正整数, 调制阶数可以是1、2、3、4等。

[0070] 从图4中可以看出, 实验结果与模拟结果基本一致。同时, 也能验证本申请的方案



从原理上是可行的。在频率的调制下,量子比特处于1态的布居数能够通过谐振腔进行快速衰减。

[0071] 综上所述,本申请提供了一种高效且高精度的量子比特初始化方案,本申请技术方案通过给量子比特施加一个调制信号作为初始化信号,使得量子比特的激发态通过谐振腔快速衰减为基态,从而达到快速且高保真度地初始化的目的。并且,这种方案不需要引入反馈回路来测量读取量子比特的态,因此降低了对硬件的要求。

[0072] 需要说明的是,在量子电路包括多个量子比特(即为多比特系统)的情况下,由于每一个量子比特都具有相应的馈线(如磁通偏置线),因此可以给每一个量子比特分别施加相应的初始化信号,从而达到多量子比特同时初始化的效果。并且,每个量子比特对应施加的初始化信号的调制频率、调制振幅和调制相位等参数,均可依据该量子比特的自身特性进行针对性地设置,即不同的量子比特可以施加具有不同参数的初始化信号,从而使每一个量子比特都可以达到较好的初始化效果。

[0073] 另外,不论是量子电路包括单个还是多个量子比特,本申请提供的初始化方案,不需要测量读取各个量子比特的状态,然后再基于该状态来决定是否给量子比特施加初始化信号。本申请提供的初始化方案,不论量子比特处于何种状态,均可直接施加相应的初始化信号,原本就处于基态的量子比特的状态将不会发生变化,原本处于激发态的量子比特将会与谐振腔发生等效的态交换,由该谐振腔将量子比特从激发态初始化至基态,从而实现将全部量子比特都初始化至基态的目的。

[0074] 图5示出了一组实验数据,在给定调制频率与调制振幅的情况下,量子比特处于1态的概率随初始化信号(即调制脉冲)的时间演化关系。脉冲时序如下,先在量子比特的xy线上加入 $\pi$ 脉冲,将量子比特激发到1态,然后在z线上加上本申请的初始化信号(如调制脉冲,该调制脉冲的幅度固定且长度变化),最后读取量子比特的状态。从图中可以看出,在经过约500ns的调制脉冲之后,量子比特在1态上的布居数基本为0,即量子比特基本处于0态。同时从图中可以看出,量子比特处于1态的概率随调制脉冲的长度呈现振荡减小的趋势。其振荡的来源是量子比特与谐振腔耦合较强的形成的欠阻尼现象,在第一个谷底(31ns左右)经过测量,残余的1态已经降到0.2%以下,完成了高质量的初始化。可以发现原本衰减耗时约10微秒的量子比特在百纳秒量级衰减到基态,初始化时间缩短了两个数量级。经过测量,如果系统在平衡状态时残余热激发1态占据4%左右,该方案能够实现将残余1态下降到0.2%以下。

[0075] 本申请所提供的初始化方案能够将原本由于热激发造成的1态初始化到0态,如图6左侧图示,原本属于0态的量子比特在1态区域内也有所分布,这个分布会影响量子比特的读取保真度。如图6右侧图示,应用了本申请的初始化信号之后,原本属于0态的量子比特在1态区域的分布有明显的减小。从保真度上看,0态的读取保真度从97.135%提升到99.155%,错误率降低了71%,1态的读取保真度从93.61%提升到96.02%,错误率降低了46%。

[0076] 对于剩余的1态的占比,可以利用引入2态来测量,这里的相关技术可以参考K.Geerlings等人发表的文献“演示超导量子比特的驱动重置协议(Demonstrating a Driven Reset Protocol for a Superconducting Qubit)”来实施,本申请对此不作赘述。如图7左侧图示,如果不做任何的初始化操作,由于热激发造成的剩余1态为2.8%。初始化

之后的剩余1态小于0.2%，如图7右侧图示。

[0077] 图8可以看出如果固定调制时间，扫描调制频率可以看出在较大的频率范围(395MHz~403MHz)都可以达到很好的初始化效果。说明本申请提供的初始化方案对于参数的选择有很大的富余，也说明该方案的鲁棒性高。

[0078] 因此，总体来说，本申请提供的初始化方案存在如下有益效果：

[0079] (1) 由于本申请提供的初始化方案，其本质上是利用对量子比特频率的调制产生靠近谐振腔的边带，利用谐振腔的快速衰减特性达到初始化的效果，谐振腔相当于一个冰山，任何和它作用的激发态(1态)被迅速冷却到基态(0态)。因此，该初始化方案使量子比特能够快速初始化，从而可以进行下一次计算，可以大幅缩短单次计算的时间，单位时间内完成计算的频率从2kHz提高到100kHz。

[0080] 本申请技术方案适用于任何频率可调量子比特的计算过程，我们把一次量子计算过程分为：计算开始、进行门操作(计算过程大概几个us)以及计算结束。从一次的计算结束的状态到下一次的计算开始的状态，需要等待量子系统恢复到初始时刻。如果依靠量子比特自身衰减的话，这个时间一般需要100us，也就是说大概要等100us才能进行下一次的计算。如果利用本申请提供的初始化方案，能够在百纳秒量级将量子比特初始化到可以进行下一次计算的状态，这样整个效率会大大提升，单位时间内完成的计算次数从原来的每秒2k次提高到每秒100k次。

[0081] (2) 本申请技术方案可以用作降低热激发造成的态错误，把由热激发引起的1态初始化到0态，从而提升读取保真度。进一步地，由于读取保真度提升的话能够将得到相同质量的读取所需要次数降低，从而减少了需要重复的次数，提升效率。

[0082] (3) 本申请技术方案与已有的频率可调芯片系统兼容，用z线加上调制脉冲，在百纳秒量级将量子比特高保真度地初始化，初始化速度以及质量均超过以往方案。

[0083] (4) 经过实验发现，本申请技术方案对相邻量子比特的频率和其他参数没有可见的影响，适用于多比特系统的同时初始化。

[0084] 综合以上技术要点，本申请技术方案提供了一种快速初始化超导量子比特的方案，该方案具有可操作性高，百纳秒级的初始化速度和低于0.2%的剩余1态效果，可以被应用于多比特系统的同时初始化，能够提升读取保真度，且大幅缩短单次计算所需要的时间，从而提升计算效率。

[0085] 本申请一示例性实施例还提供了一种量子处理器，该量子处理器包括上文实施例介绍的量子电路。

[0086] 本申请一示例性实施例还提供了一种量子计算机，该量子计算机包括上文实施例介绍的量子电路。

[0087] 应当理解的是，在本文中提及的“多个”是指两个或两个以上。

[0088] 以上所述仅为本申请的示例性实施例，并不用以限制本申请，凡在本申请的精神和原则之内，所作的任何修改、等同替换、改进等，均应包含在本申请的保护范围之内。

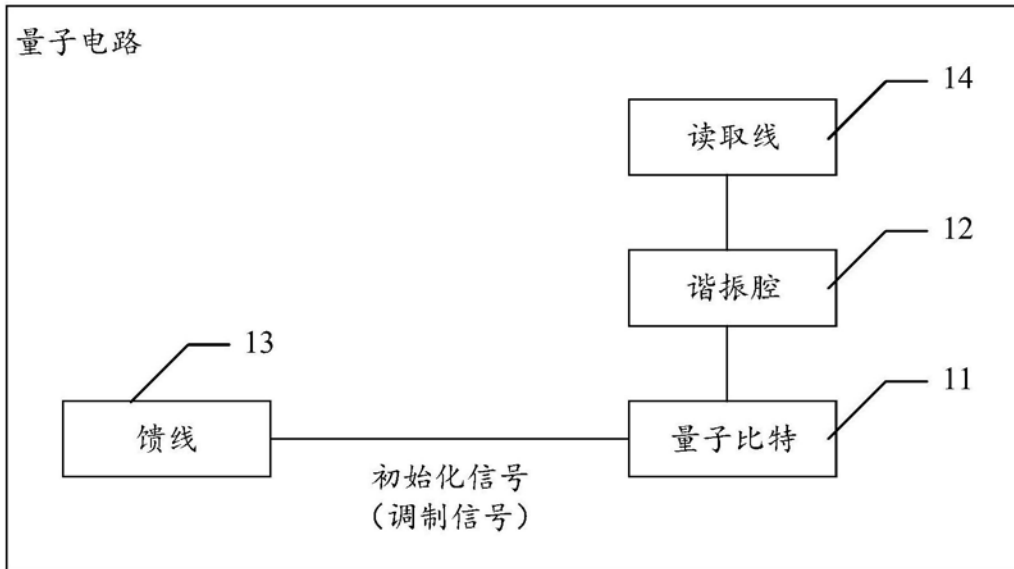


图1

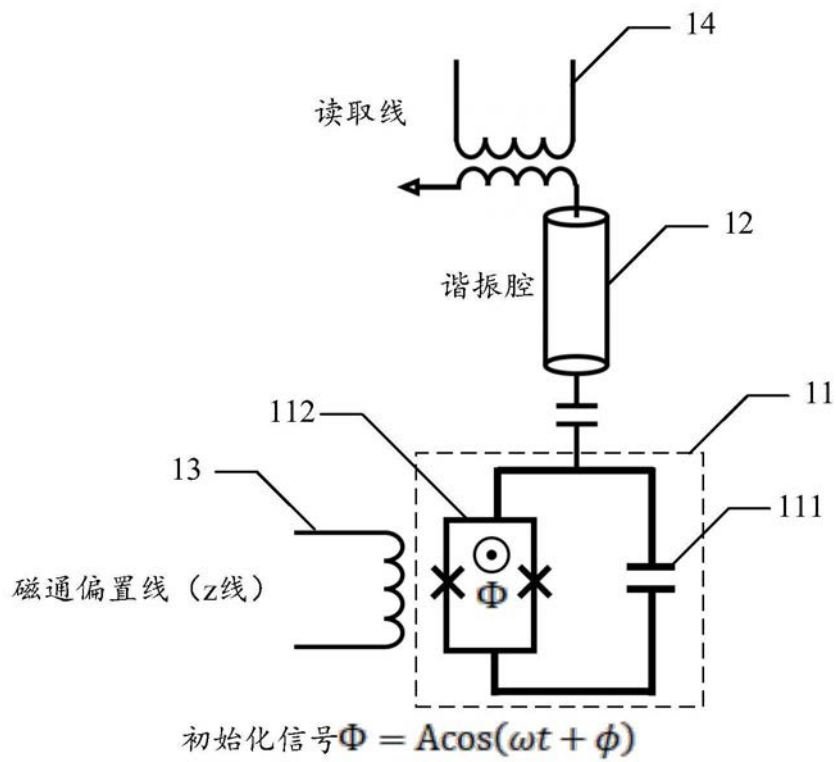


图2

量子比特的频率随初始化信号的脉冲幅度的变化情况

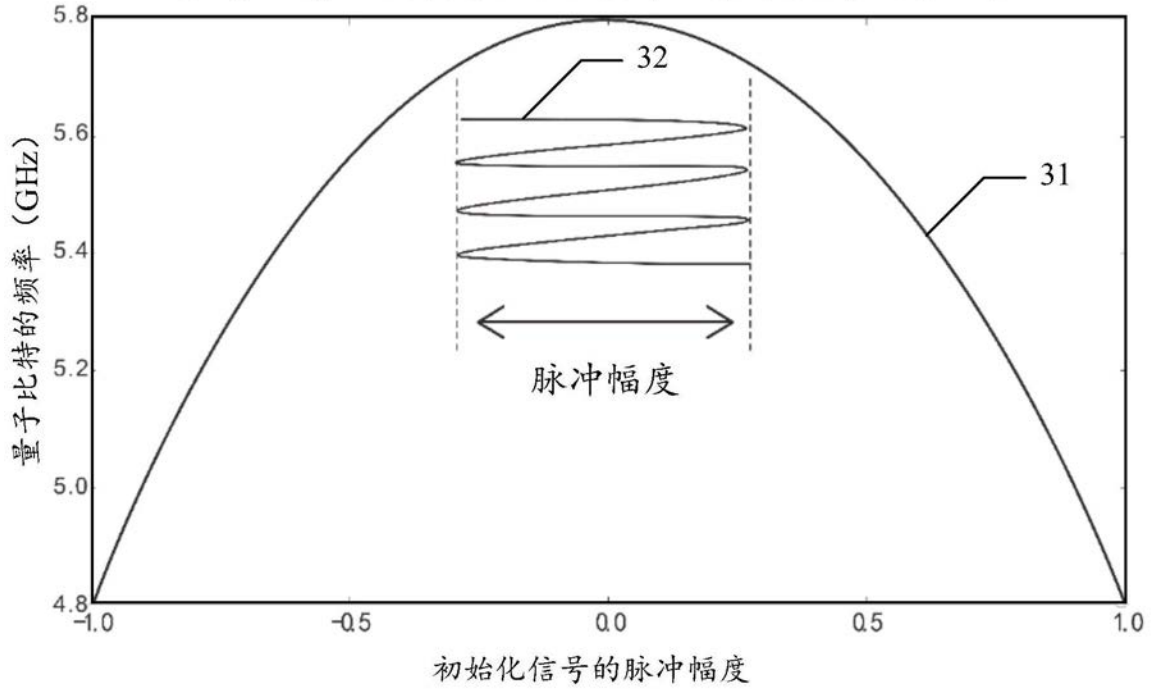


图3

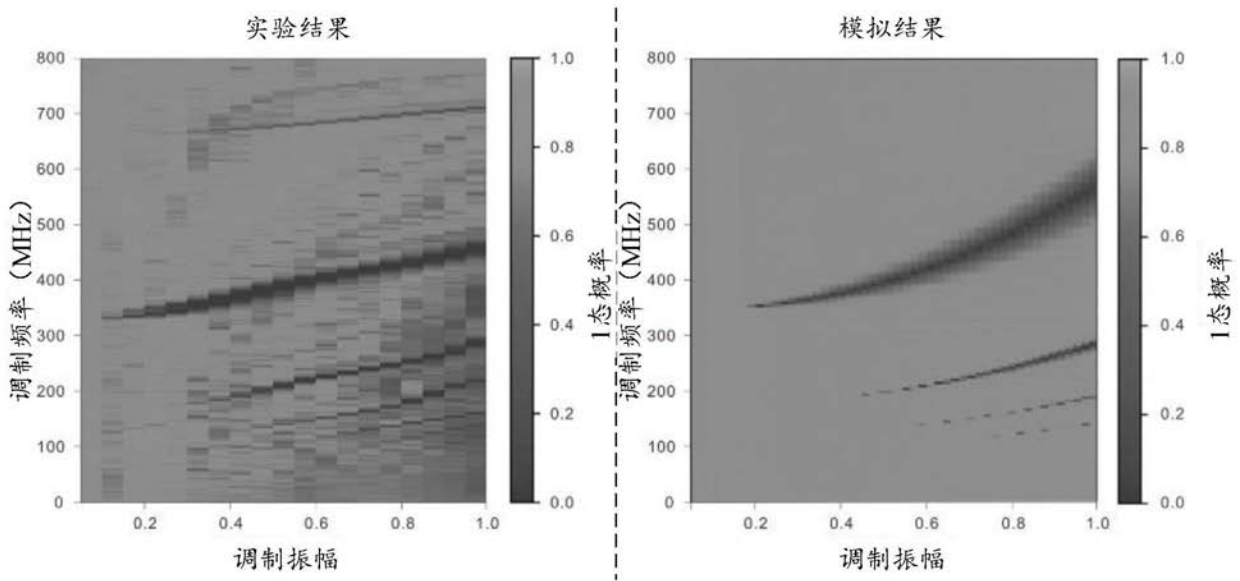


图4

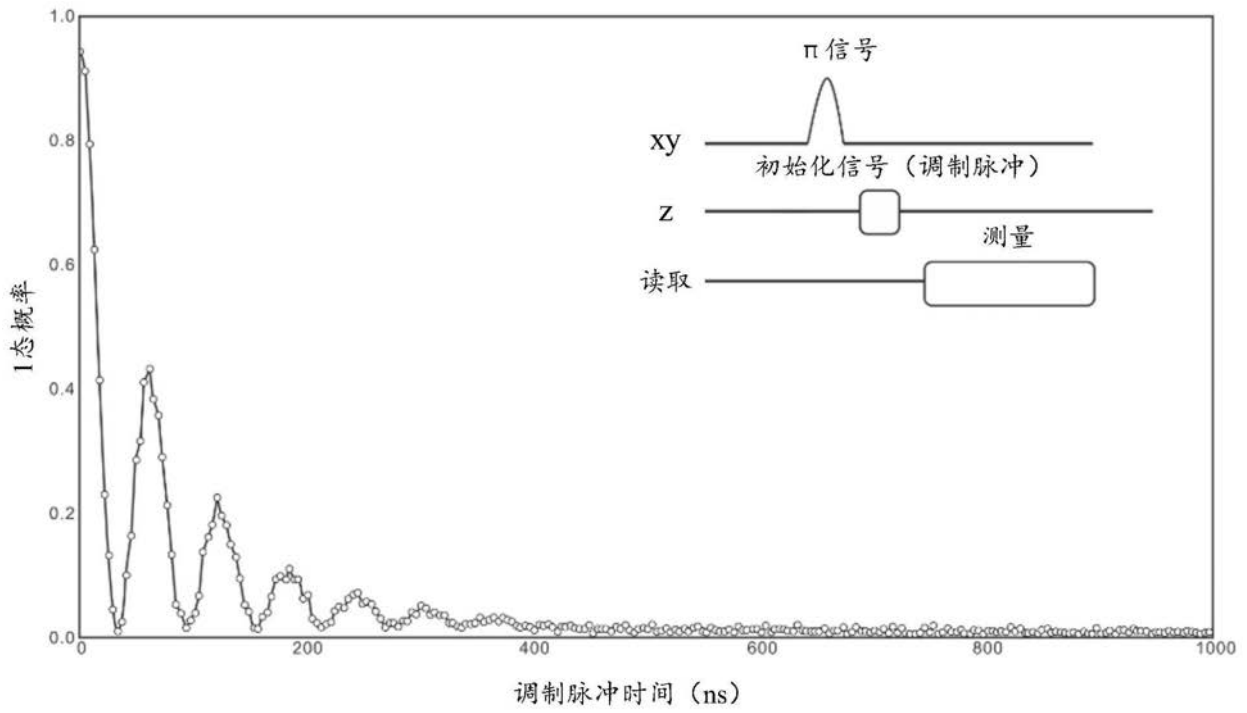


图5

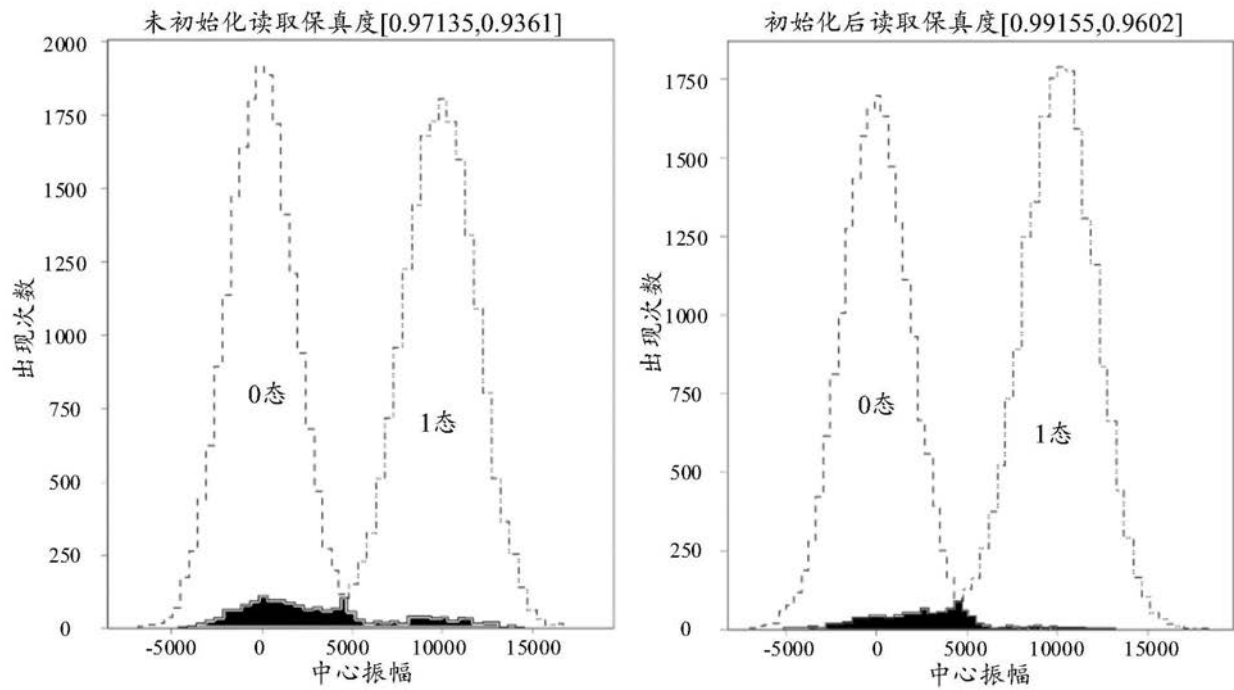


图6

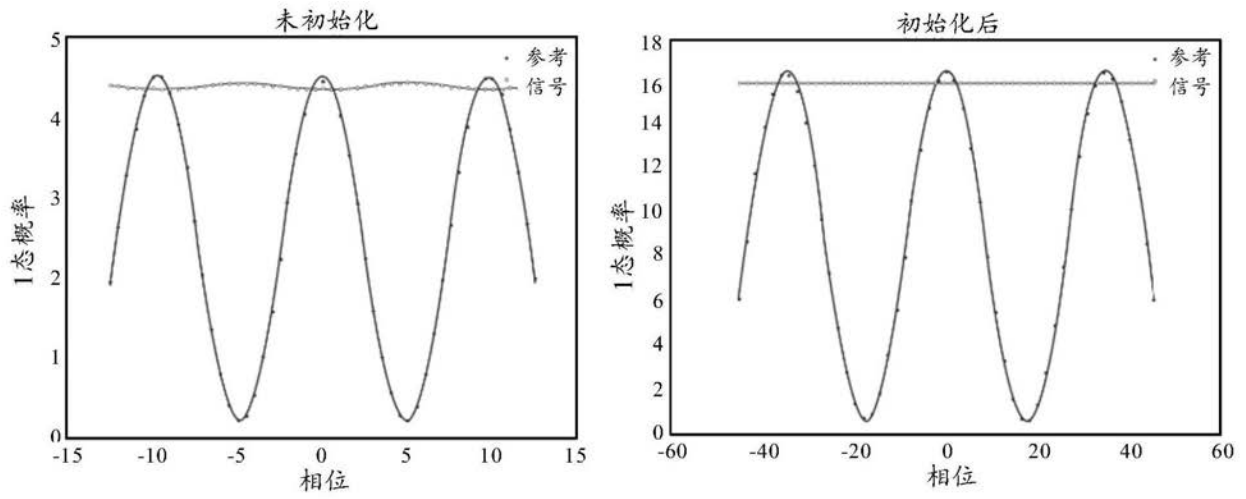


图7

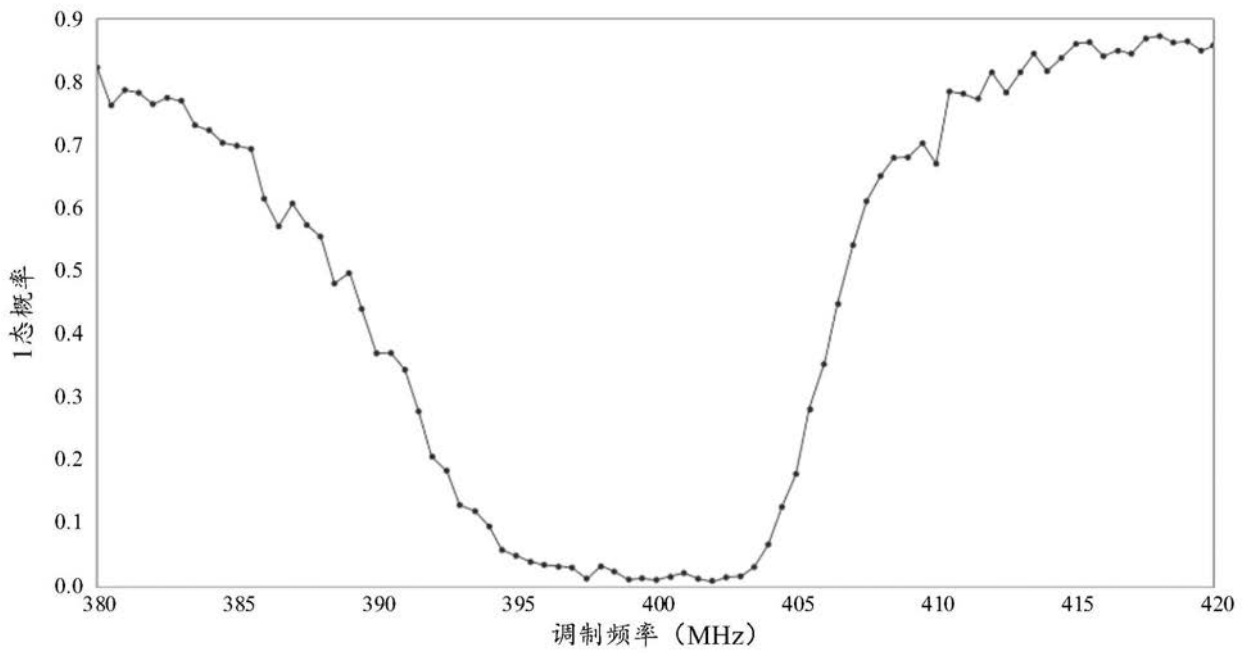


图8