

Notes On QEDA

Ke-hui Yu^{1,2}, Bo-yan Yu^{1,3}, and Zi-xiao Wang^{1,4}

¹Institute for Quantum Computing, Baidu Research, Beijing 100193, China

²Institute of Theoretical Physics, School of Physics, Xi'an Jiaotong University,
Xi'an 710049, China

³Department of Applied Mathematics and Theoretical Physics, University of
Cambridge, Cambridge CB3 0WA, UK

⁴International Center for Quantum Materials, School of Physics, Peking University,
Beijing 100871, China

August 2021

Abstract

"Quantum phenomena do *not* occur in a Hilbert space, they occur in a laboratory."
—Asher Peres

Contents

I 超导量子比特基础	5
1 LC 电路的量子化	5
1.1 电路基础	5
1.2 二次量子化	6
1.3 超导体系的量子化	7
2 约瑟夫森结	7
2.1 约瑟夫森方程	8
2.2 约瑟夫森耦合能	9
2.3 约瑟夫森电感	9
2.4 非线性	9
3 概述	10
3.1 物理耦合	10
3.2 耦合的形式	11
II 电子设计自动化、量子设计自动化、Qiskit Metal	13
4 电子设计自动化的历史	13
5 设计与仿真	13
5.1 硬件设计语言	14
5.2 网表	14
5.3 GDSII	14
5.4 芯片信息的传递、转换和检验	14
6 流片	14
6.1 在流片之前的测试	14
6.2 流片-以 Xmon 超导量子比特为例	15
6.3 基片选择与镀膜	16
6.4 超导电路的制备	16
6.5 跨线工艺	19
6.6 样品检测	22
6.7 切片封装	22
7 以 Qiskit-Metal 为例的量子设计自动化	22
7.1 为什么发展 QEDA	22

8 Qiskit Metal 概览	24
8.1 工作流	24
8.2 设计细节和类库	25
8.2.1 创建空白设计图纸的类 QDesings	25
8.2.2 QComponents	25
8.2.3 Renderer Base	25
8.2.4 Analyses	25
8.2.5 图形可视化类 MetalGUI	25
8.3 展望	26
III 能量配分比	28
9 背景	28
9.1 输入与输出	28
9.2 EPR	28
10 有限元方法	31
11 Theory behind	32
11.1 Background	32
11.2 EPR	33
11.3 求解 EPR	34
12 利用 EPR 求解哈密顿量的非线性效应	37
13 EPR 使用示例	38
14 pyEPR 库	38
IV 总结	41
15 summary	41
16 blueprint	41
A Hamitonian Parameters	42
B EPR vs ZPF	45
C 公司信息	48

D 产品服务	51
D.1 量子计算模拟云平台	51
D.2 量子经典混合云平台	51
D.3 量子芯片设计服务云平台	51
D.4 Gds	53
E Netlist	56

Part I

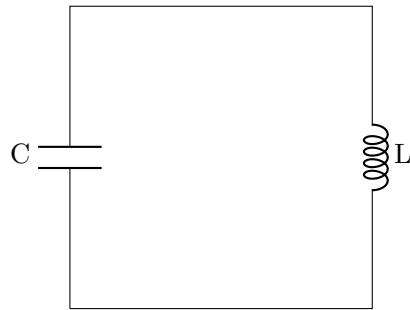
超导量子比特基础

在这一章我们主要介绍超导量子电路的一些基础知识。我们在此引入包含约瑟夫森系的超导量子比特的哈密顿量的几种表达形式

1 LC 电路的量子化

1.1 电路基础

考虑如下电路图:



依据定义，对电容 C 有：

$$I = C \frac{dV}{dt} = \frac{dQ}{dt} \quad (1)$$

$$Q = CV \quad (2)$$

电容的能量：

$$E_C = \frac{1}{2} CV^2 = \frac{1}{2C} Q^2 = \frac{1}{2} CV \quad (3)$$

依据定义，对电感 L 有：

$$V = L \frac{dI}{dt} = \frac{d\Phi}{dt} \quad (4)$$

$$\Phi = LI \quad (5)$$

电感的能量：

$$E_L = \frac{1}{2} LI^2 = \frac{1}{2L} \Phi^2 = \frac{1}{2} I\Phi \quad (6)$$

在超导体系中，我们常常研究磁通量。这是因为，电子在超导体中表现出统一的行为，因

此可以使用统一的波函数来进行描述；从而体现某些量子化的特征。重写能量：

$$E_C = \frac{1}{2}C\dot{\Phi}^2$$

$$E_J = \frac{1}{2L}\Phi^2$$

拉格朗日量：

$$L = E_C - E_J = \frac{1}{2}C\dot{\Phi}^2 - \frac{1}{2L}\Phi^2$$

广义动量：

$$\dot{q} := \frac{\partial L}{\partial \dot{\Phi}} = C\dot{\Phi} = Q$$

因此，易得哈密顿量（总能量）：

$$H = \frac{Q^2}{2C} + \frac{\Psi^2}{2L} = \frac{1}{2}CV^2 + \frac{1}{2}LI^2 \quad (7)$$

$$H = \frac{1}{2C}\dot{q}^2 + \frac{1}{2L}\dot{\phi}^2 = \frac{1}{2}C\dot{\phi}^2 + \frac{1}{2L}\dot{\phi}^2 \quad (8)$$

1.2 二次量子化

类比于简单谐振子的的二次量子化，对约瑟夫森振荡电路做二次量子化。

简谐振子 简单谐振子的哈密顿量为：

$$H = \frac{1}{2m}p^2 + \frac{1}{2}m\omega^2x^2 \quad (9)$$

测不准原理：

$$[x, p] = i\hbar \quad (10)$$

定义产生湮灭算符：

$$a^\dagger = \sqrt{\frac{m\omega}{2\hbar}} \left(x - \frac{i}{m\omega}p \right)$$

$$a = \sqrt{\frac{m\omega}{2\hbar}} \left(x + \frac{i}{m\omega}p \right) \quad (11)$$

同时有

$$x = \sqrt{\frac{\hbar}{2m\omega}} (a^\dagger + a)$$

$$p = i\sqrt{\frac{m\omega\hbar}{2}} (a^\dagger - a) \quad (12)$$

1.3 超导体系的量子化

考虑到⁹和⁸形式相近，如果我们考虑电路体系中的动量： \hat{Q} 和位置： $\hat{\Phi}$ ，比较系数，我们有如下对应关系：

$$\begin{aligned}
 \Phi &\rightarrow p \\
 Q &\rightarrow x \\
 \frac{1}{C} &\rightarrow k \\
 L &\rightarrow m \\
 \sqrt{\frac{1}{LC}} &\rightarrow \omega \\
 \sqrt{\frac{L\Omega}{2\hbar}}(\hat{Q} + \frac{i}{L\Omega}\hat{\Phi}) &\rightarrow \hat{a} \\
 \sqrt{\frac{L\Omega}{2\hbar}}(\hat{Q} - \frac{i}{L\Omega}\hat{\Phi}) &\rightarrow \hat{a}^\dagger
 \end{aligned} \tag{13}$$

而且，我们还有

$$[\hat{\Phi}, \hat{Q}] = i\hbar \tag{14}$$

因此，我们可以定义相似的算符；其中取 $Z = \sqrt{\frac{L}{C}}$ 是特征阻抗。

$$\begin{aligned}
 \hat{a}^\dagger &= \sqrt{\frac{1}{2\hbar Z}}\hat{\Phi} + i\sqrt{\frac{Z}{2\hbar}}\hat{Q} \\
 \hat{a} &= \sqrt{\frac{1}{2\hbar Z}}\hat{\Phi} - i\sqrt{\frac{Z}{2\hbar}}\hat{Q}
 \end{aligned} \tag{15}$$

a 和 a^\dagger 满足如下的关系： $[a, a^\dagger] = 1$ ；于是立刻有

$$\hat{H} = \hbar\omega(a a^\dagger + \frac{1}{2}) \tag{16}$$

在谐振子模型中，我们发现任何两个相邻的能级之间的能量差是相等的。这启发我们寻求非线性的器件，来让从 $|0\rangle$ 到 $|1\rangle$ 的操作不会使 $|1\rangle$ 变化到 $|2\rangle$

2 约瑟夫森结

约瑟夫森结（Josephson Junctions）就是一种非线性元件。它由两层超导材料和一层夹在中间的绝缘材料构成。

2.1 约瑟夫森方程

绝越层两侧超导体 S_1 和 S_2 之间存在耦合，用耦合系数 K 来刻画：

$$\begin{aligned}\mathrm{i}\hbar \frac{\partial \psi_1}{\partial t} &= E_1 \psi_1 + K \psi_2 \\ \mathrm{i}\hbar \frac{\partial \psi_2}{\partial t} &= E_2 \psi_2 + K \psi_1\end{aligned}\quad (17)$$

假定隧道结两侧电压为 V ，则 $E_1 - E_2 = 2eV$ ，不妨假定 $E_1 = 1eV$ ，则 $E_2 = -1eV$ 。上式变为：

$$\begin{aligned}\mathrm{i}\hbar \frac{\partial \psi_1}{\partial t} &= eV \psi_1 + K \psi_2 \\ \mathrm{i}\hbar \frac{\partial \psi_2}{\partial t} &= -eV \psi_2 + K \psi_1\end{aligned}\quad (18)$$

代入两侧超导体波函数 $\psi_1 = \sqrt{n_{s1}} e^{\mathrm{i}\theta_1}$ 和 $\psi_2 = \sqrt{n_{s2}} e^{\mathrm{i}\theta_2}$ ，并取相位差 $\phi = \theta_1 - \theta_2$ （我们在这里默认相位差和约化磁通量子数相等， $\phi = \frac{\Phi}{2e}$ ）：其实虚部等式分别给出：

$$\begin{aligned}\frac{\partial n_{s1}}{\partial t} &= \frac{2}{\hbar} K \sqrt{n_{s1} n_{s2}} \sin \phi \\ \frac{\partial n_{s2}}{\partial t} &= -\frac{2}{\hbar} K \sqrt{n_{s1} n_{s2}} \sin \phi\end{aligned}\quad (19)$$

和

$$\begin{aligned}\frac{\partial \theta_1}{\partial t} &= \frac{K}{\hbar} \sqrt{\frac{n_{s2}}{n_{s1}}} + \frac{eV}{\hbar} \\ \frac{\partial \theta_2}{\partial t} &= \frac{K}{\hbar} \sqrt{\frac{n_{s1}}{n_{s2}}} - \frac{eV}{\hbar}\end{aligned}\quad (20)$$

方程 (19) 给出约瑟夫森电流为：

$$I = 2e \frac{\partial n}{\partial t} = \frac{4}{\hbar} K \sqrt{n_{s1} n_{s2}} \sin \phi = I_c \sin \phi \quad (21)$$

其中，约瑟夫森临界电流为 $I_c = \frac{4}{\hbar} K \sqrt{n_{s1} n_{s2}}$ 。

当两侧超导材料相同时，其超流电子数相等，即 $n_{s1} = n_{s2}$ 。方程 (20) 给出：

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = \frac{2e}{\hbar} V \quad (22)$$

2.2 约瑟夫森耦合能

约瑟夫森耦合能来源于两个弱耦合超导体宏观波函数的重叠。估计其大小的方法，与普通电感十分类似。考虑约瑟夫森结两端的电流从 0 缓缓增加到 I ，假定当电流为 0 时，相位差 $\Phi = 0$ 。联立方程 (19)(20)，代入 $E = \int I \cdot V dt$ 得到：

$$\begin{aligned} E &= \int_0^{t_0} IV dt = \int_0^{t_0} (I_c \sin \phi) \left(\frac{\hbar}{2e} \frac{d\phi}{dt} \right) dt \\ &= \frac{\hbar I_c}{2e} \int_0^{\phi_0} \sin \phi d\phi = \frac{\hbar I_c}{2e} (1 - \cos \phi_0) = E_J (1 - \cos \phi_0) \end{aligned} \quad (23)$$

2.3 约瑟夫森电感

对方程 (21) 取时间导数，再带入方程 (22) 可得：

$$\frac{dI}{dt} = I_c \cos \phi \frac{d\phi}{dt} = \frac{2eI_c \cos \phi}{\hbar} V \quad (24)$$

类比电磁学中电感的表达式：

$$V = L \frac{dI}{dt}$$

得到约瑟夫森电感：

$$L_s = \frac{\hbar}{2eI_c \cos \phi} = \frac{L_c}{\cos \phi} \quad (25)$$

2.4 非线性

在算出约瑟夫森结的能量之后，我们用约瑟夫森结取代电路中的电感器。重写哈密顿量：

$$\begin{aligned} H &= \frac{Q^2}{2C} + E_J (1 - \cos \phi_0) \\ &= \frac{Q^2}{2C} + E_J \cos \phi^2 \\ &\approx \frac{Q^2}{2C} + E_J \left(\frac{1}{2} \phi^2 - \frac{1}{24} \phi^4 \right)' \end{aligned}$$

类似上文，定义阶梯算符并代入，略去常数项：

$$H = (\hbar) (\omega_q a^\dagger a + \frac{\alpha}{2} a^\dagger a^\dagger a a) \quad (26)$$

其中，第一项和经典的谐振子没有区别，第二项是约瑟夫森结的 \cos 函数做四阶近似后得到的结果， α 是非谐性强度。如果我们认为，一方面，引入的非谐性项足够大，或者我们有足够的控制系统，可以保证计算过程不发生泄漏；另一方面，引入的非谐性项又远远小于第一项，

在哈密顿量中可以忽略:

$$H = \omega_q \frac{\sigma_z}{2} \quad (27)$$

因此, 最后可以得到这样的哈密顿量。

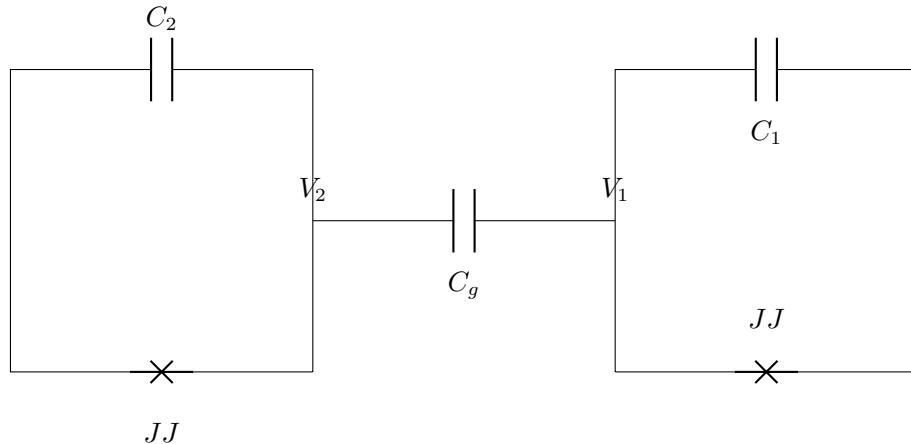
然而, 尽管我们非常努力地减少计算过程中的泄漏, 更高的能级仍然是存在的。保留可以寻址的更高能级对实现一部分操作是有益的。

3 耦合

在同一个芯片上的量子比特们并非一个又一个的孤立系统。相反, 它们之间会通过某些方式相互作用, 为模块或者整个电路的哈密顿量带来一些耦合项。

3.1 物理耦合

电容耦合 考虑如下的设计:



这种设计会带来相互作用能量:

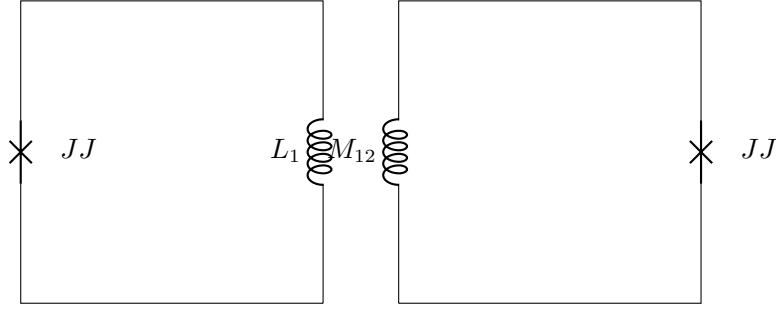
$$\begin{aligned} E_g &= C_g V_1 V_2 \\ &= C_g \frac{Q_1 Q_2}{C_1 C_2} \end{aligned} \quad (28)$$

因此, 我们得到总哈密顿量:

$$H = \sum_{j=1,2} \left(\frac{Q_j^2}{2C_j} + E_j \left(\frac{1}{2} \phi_j^2 - \frac{1}{24} \phi_j^4 \right) \right) + C_g \frac{Q_1 Q_2}{C_1 C_2} \quad (29)$$

我们看到, 哈密顿量不再是简单的两个能量的求和, 而是加入了一项 coupling。电容耦合是两比特耦合的一种形式。在现实世界中, 这很容易达到: 只要把两个电容器 (\$C_1\$ 和 \$C_2\$) 的极板距离调整得很近即可。

电感耦合 考虑如下的设计:



两个电感器即使放得很近，而别的什么都不做，也会带来互感 M_{12} 。如果两侧电路的电流记作 I_1, I_2 ，那么互感的能量：

$$\begin{aligned} E_g &= M_{12}I_1I_2 \\ &= M_{12}I_{c1}\sin\phi_1I_{c2}\sin\phi_2 \end{aligned} \tag{30}$$

其中我们使用了约瑟夫森电流的表达式： $I = I_c \sin \phi$

在包含电容器的电路中，我们有哈密顿量：

$$H = \sum_{i=1,2} \left(\frac{Q_i^2}{2C_i} + \frac{1}{2}E_{L,i}\phi^2 - E_{j,i}\cos\phi_i \right) + M_{12}I_{c1}\sin\phi_1I_{c2}\sin\phi_2 \tag{31}$$

3.2 耦合的形式

考虑电容耦合的形式：代入26：

$$\begin{aligned} \frac{H}{\hbar} &= \sum_{i=1,2} \left(\omega_i a_i^\dagger a_i + \frac{\alpha}{2} a_i^\dagger a_i^\dagger a_i a_i \right) - g(a_1 - a_1^\dagger)(a_2 - a_2^\dagger) \\ &= \sum_{i=1,2} \left(\omega_i a_i^\dagger a_i + \frac{\alpha}{2} a_i^\dagger a_i^\dagger a_i a_i \right) - g(a_1 a_2 + a_1^\dagger a_2 + a_1 a_2^\dagger + a_1^\dagger a_2^\dagger) \end{aligned} \tag{32}$$

最后一项来自二次量子化：参照15

注意到

$$\begin{aligned} a &\rightarrow \sigma^- \\ a^\dagger &\rightarrow \sigma^+ \\ a + a^\dagger &\rightarrow \sigma_x \\ -i(a - a^\dagger) &\rightarrow \sigma_y \\ 1 - 2a^\dagger a &\rightarrow \sigma_z \end{aligned} \tag{33}$$

$$\frac{H}{\hbar} = \sum_{i=1,2} \frac{1}{2} \omega_i \sigma_{z,i} + g \sigma_{y,1} \sigma_{y,2} \tag{34}$$

其中，如果我们把 σ_y 换成 σ_x ，情形不会有任何改变。这种 yy 或者 xx 的耦合形式我们称

为 Transverse coupling，因为在 Block Sphere 上对应的是水平的两条轴。

当我们考虑谐振腔和量子比特的耦合时：

$$\begin{aligned} \frac{H}{\hbar} &= \underbrace{\frac{1}{2}\omega_q\sigma_z}_{qubit} + \underbrace{\omega_r a^\dagger a}_{oscillator} + \underbrace{g(\sigma_+\sigma_-)(a + a^\dagger)}_{coupling} \\ &= \underbrace{\frac{1}{2}\omega_q\sigma_z + \omega_r a^\dagger a}_{JC Model} + \underbrace{g(\sigma_+a + \sigma_-a^\dagger + \sigma_+a^\dagger + \sigma_-a)}_{Fast Oscillating} \end{aligned} \quad (35)$$

如果我们舍去后面高速振动的两项，就会得到 Jaynes-Cummings 哈密顿量：

$$\frac{H}{\hbar} = \frac{1}{2}\omega_q\sigma_z + \omega_r a^\dagger a + g(\sigma_+a + \sigma_-a^\dagger) \quad (36)$$

一般而言，Coupling 的用途主要是用于读取与谐振腔耦合的量子比特，和实现量子比特的纠缠：在两个系统有耦合之后，可以从一个系统中获得另一个系统的部分信息，也可以通过操纵其中一个系统来间接操纵另一个；后者是实现二比特门的关键。

Part II

电子设计自动化、量子设计自动化、Qiskit Metal

4 电子设计自动化的历史

直到上世纪 60 年代，集成电路的设计依旧主要依赖人工。在 1972 年，UC Berkeley 设计出第一款计算机仿真电路模拟器，集成电路设计进入计算机协助设计（CAD）时代。在 80 年代，设计出了以 Verilog 为代表的硬件设计语言，用来在计算机上做更直接的模拟，大大提高了集成电路的设计效率。在 90 年代，IEEE 接受了 Verilog 作为设计标准，同时出现了其他的软件来模拟测试芯片，集成电路进入电子设计自动化（EDA）时代。

5 设计与仿真

在送去生产之前，芯片的设计是从上到下分工明确的，如下图所示：

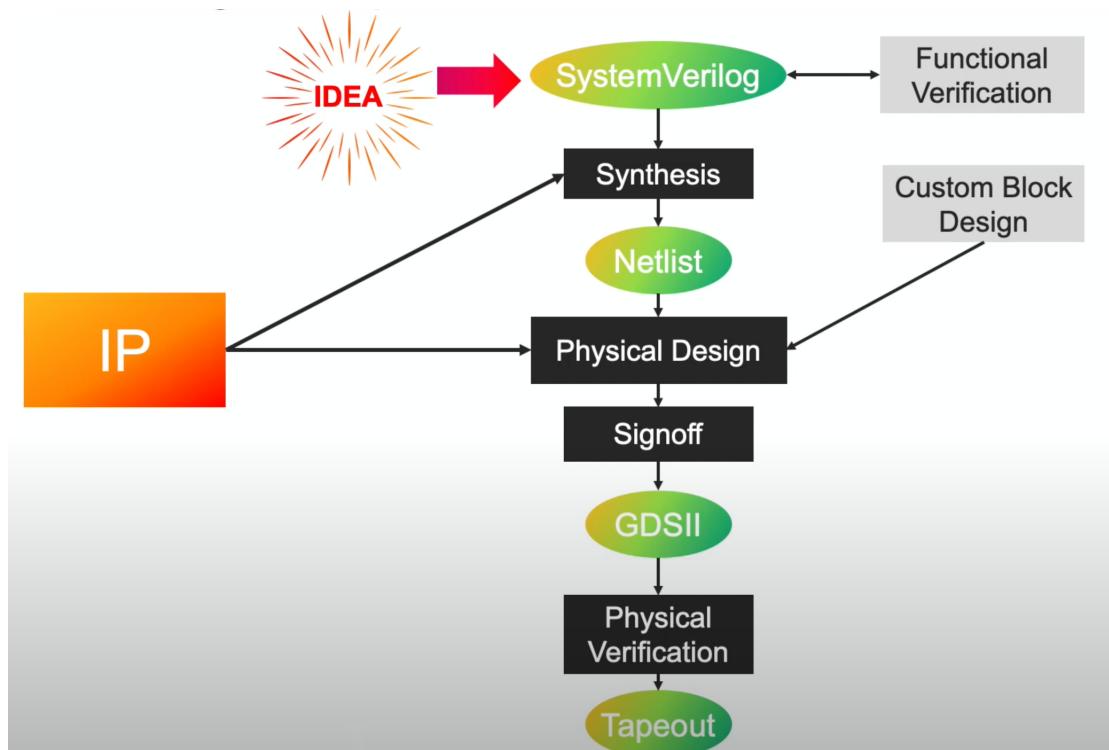


图 1：自顶向下的设计结构。

从高级语言向下，先后经历了硬件描述级，寄存器级，比特门级，电路级。类似于软件语言的编译过程，硬件语言中的过程被称为综合 Synthesis。集成芯片设计过程中的所有层次都有

模拟测试环节，哪一层发现问题都会返回到上一层。总而言之，现代集成电路的不同层次清晰分明，设计工程师和检验工程师已经完全分工。

5.1 硬件设计语言

使用硬件设计语言（Hardware Designing Language, HDL）设计芯片是最上层的一步。在这一步，工程师通过 verilog，一种高级 HDL，把对芯片的高层要求、行为、功能，用高度类似自然语言的方式表达出来。所有能做到这一点的语言统称为硬件设计语言，HDL。

5.2 网表

比起 HDL 所描绘的图景，Netlist，网表，是一种抽象程度更低的描述硬件的方案：用基础的逻辑门来描述数字电路连接情况。由于逻辑门阵列有着连线表一样的排列外观，因此称之为“网表”。

网表通常传递了电路连接方面的信息，例如模块的实例、线网以及相关属性。目前，软件已经可以直接把 HDL 翻译成网表，同时还可以自动优化，选择复杂度较低的电路。

5.3 GDSII

GDS 是一种在集成电路设计中规范的通用二进制文件格式。GDS 包含几何形状、文本、标签等信息，既等价于一个掩膜版设计图纸，也等价于一个实际的集成电路。GDS 是集成电路设计工程师、检验工程师、半导体工艺师传递集成电路信息统一的媒介。GDS 的抽象程度比起网图更低，与实际的芯片生产流程更加接近，可以直接用于生产掩膜版。GDS 需要专门的程序从网图中抽取必要的信息然后在电路板上具体实现它们。

5.4 芯片信息的传递、转换和检验

在以上的设计流程中，我们看到 HDL 文本、网图、GDSII 都包含芯片的信息，但是它们所包括的信息抽象化成都逐级降低，同时每次转换都需要考虑具体实现。这些信息的转换和传递是由自动化软件所实现的。在每两层之间，都会有自动化软件首先对传来的设计进行检验，主要是测试芯片是否能实现最初的设计目标，和芯片在各种条件下的性能等等。如果不符要求，信息将被传回上一层修改。如果符合要求，那么自动化软件开始将抽象上级设计转化为更加具体的设计，同时自动考虑在实现中是否可以优化、简化。最后，自动生成下一级所需要的设计。值得注意的是，直到流片之前，并没有任何芯片被生产出来：所有的检验、翻译都发生在软件之中。

6 流片

6.1 在流片之前的测试

在确定了芯片的设计和参数之后，使用软件画图并仿真。

画图工具：L-edit 或者基于 python 的 GdsPy 工具包

绘图流程 (以 GdsPy 为例):

1. 编程定义一些芯片常用结构的 Cell 文件;
2. 使用时直接调用编写好的 Cell 文件并按照需要修改参数加入设计图中;
3. 根据手绘稿图的样例, 用 python 代码定义出每个元件所处的位置, 而后使用 GdsPy 生成 gds 文件;
4. 将生成的文件在仿真软件 (Sonnet) 中打开, 并为版图中的每一部分元件赋予物理描述 (金属、电介质的分布情况, 材料属性等), 之后进行电磁仿真;
5. 仿真过程包括所有的寄生耦合、交叉耦合、外壳和封装的谐振腔效应。

仿真的结果将用于研究芯片是否达到了设计时的期望标准。

6.2 流片-以 Xmon 超导量子比特为例

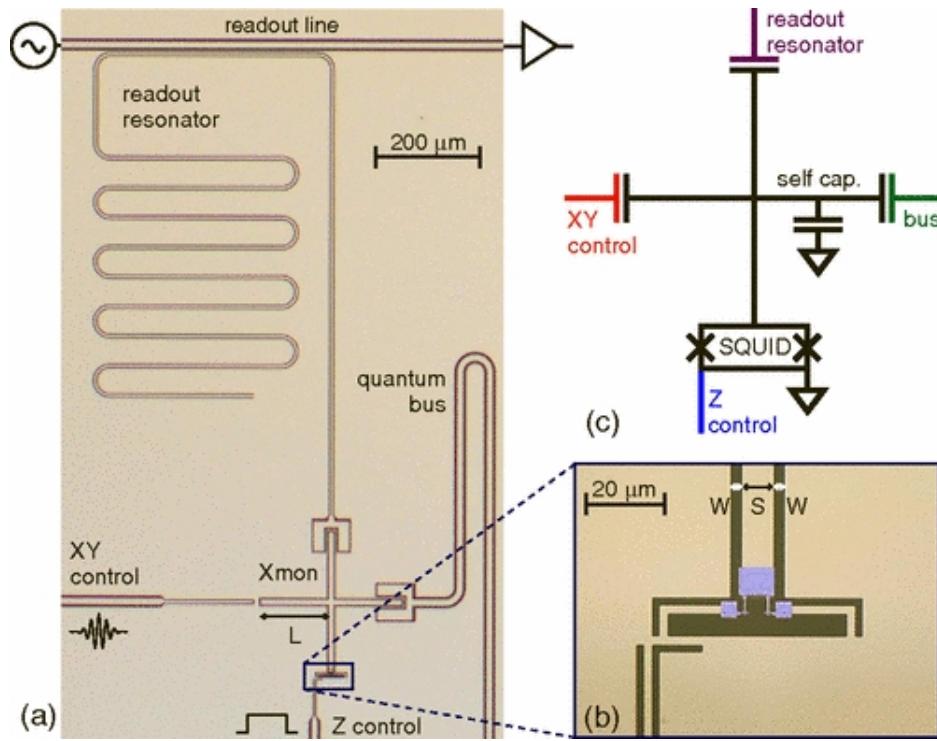


图 2: Xmon 量子比特示意图, a 为全局图, b 为电路简图, c 为约瑟夫森结部分的细节

Xmon 构型是由 John M. Martines 组在 2013 年提出的, 这种结构是将原有的 Transmon 结构中约瑟夫森结形成非谐性的电容一端接地, 另一端改为十字结构, 十字结构的下端是一个 SQUID , SQUID 可以直接接收 z 通道的磁通控制, 十字的另外三个端分别与微波控制 (XY 通道)、读出谐振腔以及比特间的耦合电容相耦合。

结构优点: 每个耦合的电容值可以独立设计、拟合以及测试, 互相不影响。利用这种优势, 可以很快地找到最优的参数, 在单比特快速操作、多比特耦合以及退相干时间这三者之间得到一个最佳的平衡点。

流片过程:

基底选择以及预处理 → 蒸镀金属膜 → 刻蚀微波以及控制线路 → 刻蚀约瑟夫森结

6.3 基片选择与镀膜

如何选择基片：保证尽量小的损耗角正切，保证衬底中能量损失最小。

常用基片：高阻硅（大于 $10000 \Omega \cdot m$ ）和蓝宝石。

镀膜前基片处理：

- (1) 高阻硅：用氢氟酸出去硅表面的自然氧化层，并迅速放入真空腔中避免二次氧化；
- (2) 蓝宝石：只需要普通清洗即可，清洗完成后尽快放入真空腔中。

经过上述初步处理后，为了使得镀膜材料和衬底之间有更小的能量损耗，还需要进行进一步处理，常用的方式有：

- (1) 氖原子轰击：容易损伤衬底，在衬底表面产生缺陷，增加界面损耗；
- (2) 退火：可以相对更好的提升界面的质量。

镀膜：蒸镀金属层，这层金属层就是用来刻蚀量子线路的薄膜，常用的蒸镀金属有铝、铌、铼、钽等。

镀铝膜常用的方式：磁控溅射、热蒸发、电子束蒸发



图 3: 电子束蒸发镀膜机

6.4 超导电路的制备

超导电路的基本线路：微波传输线与控制线路，主要包括谐振腔、信号传输线、控制线和比特耦合的共面电容。

这些线路尺度在 $1 \mu\text{m}$, 分布在大约 $6\text{mm} \times 6\text{mm}$ 的范围内, 远大于约瑟夫森结的尺度, 工艺要求不同, 所以不在一起制备。

约瑟夫森结一般使用电子束曝光制备, 而基本线路的尺寸较大, 对精度要求不是特别高, 采用光学曝光方法制备。

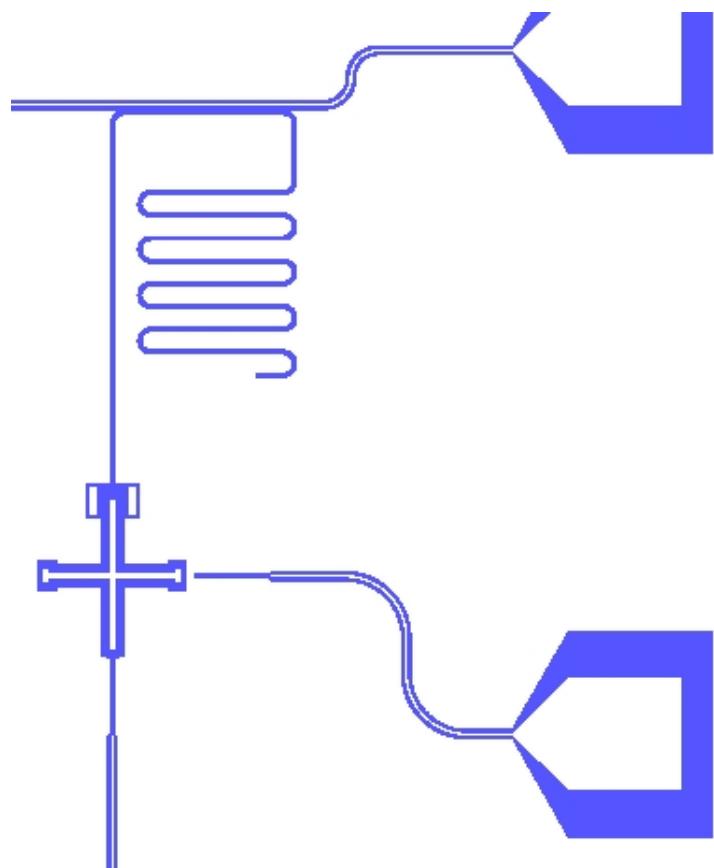


图 4: 微波传输线和控制线路

微波传输线 微波以及控制线路的刻蚀常使用标准刻蚀工艺:

涂胶 → 曝光 → 显影 → 刻蚀 → 去胶

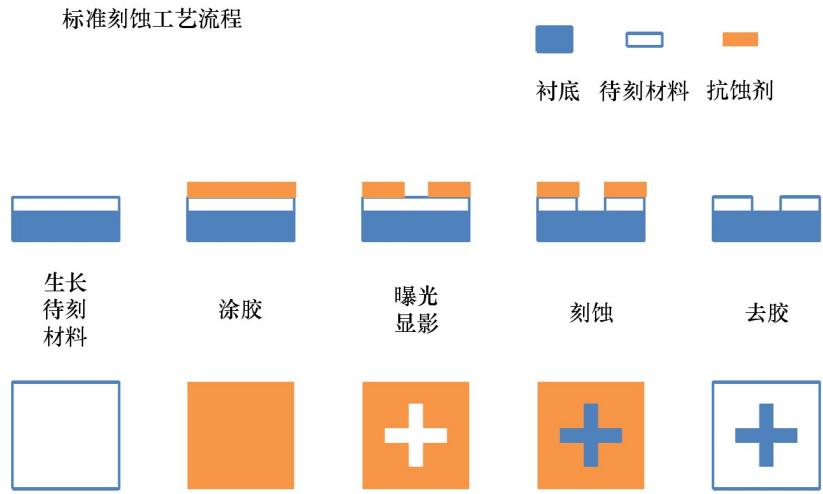


图 5: 标准刻蚀工艺

判断制备工艺是否达标，需要在制备线路时同时刻蚀标记，通过标记判断本次制备的精度。



图 6: 刻蚀标记

如图 4 所示为常用的刻蚀标记，它与线路一起曝光、显影和刻蚀，如果该标记质量满足要求，则表明制备工艺良好。

该标记左右两排的矩形从下到上依次交叠不同宽度，最下面的一对矩形交叠为零，向上依次增加 $0.2\mu m$ ，理想情况下，制备工艺完成后，矩形所示的交叠情况与设计完全一致。

约瑟夫森结 约瑟夫森结的制备分为两大部分：

1. 约瑟夫森结的曝光
2. Al/AlOx/Al 结构的生长

曝光工艺：

(1) 激光直写曝光：适用于结面积不需要太小，精度要求不高的样品，光学曝光相对于电子束曝光更快、成本更低；

(2) 电子束曝光：电子有着比光更短的波长，拥有着更高的精度。

量子比特的制备常采用**电子束曝光**的方式。

电子束曝光制备约瑟夫森结的基本流程为：

- 旋涂 MAA EL9，转速为 1600 rpm，时间 60s
- 在 160 °C 的热板上烘烤 10min
- 旋涂 950k PMMA，转速为 4800 rpm，时间 60s
- 在 160 °C 的热板上烘烤 10min
- 旋涂导电胶 AR-P 5090.02，转速为 2000 rpm，时间 60s
- 在 160 °C 的热板上烘烤 2min
- 电子束曝光约瑟夫森结区域
- 样品在去离子水中浸泡 60s，去掉表面的导电胶
- 使用 MIBK: ipa=1:3 的显影溶液显影 45s，使用 ipa 定影 20s，氮气吹干

约瑟夫森结的制备工艺有两种：

1. 三明治结构工艺 2. Dolan-Bridge 工艺

本次调研的资料采用了 Dolan-Bridge 工艺制备，具体流程如下图

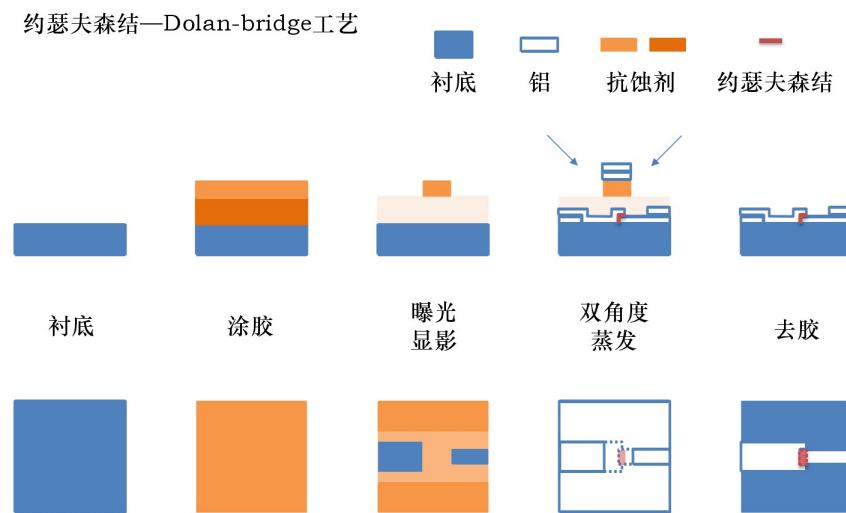


图 7: 约瑟夫森结制备的 Dolan-Bridge 工艺

6.5 跨线工艺

定义：使用三维的金属导线，将二维结构上被分割的传输线连接起来。

为什么要发展跨线工艺：

二维结构有很多局限性，三维跨线结构的实现为器件的制备提供更多的可能性。

跨线工艺主要分为两类：

1. 介质层工艺
2. Airbridge 工艺

介质层工艺

介质层工艺在半导体工业中较为常用，通过交替堆叠绝缘层和导电层来实现三维结构。通过介质层工艺制备跨线，就是在之前的二维平面上叠加一层绝缘层与一层导电层，通过在绝缘层上刻蚀来使得上下两层选定区域的金属接触实现跨线连接。

下图为介质层工艺制备跨线常见的流程图

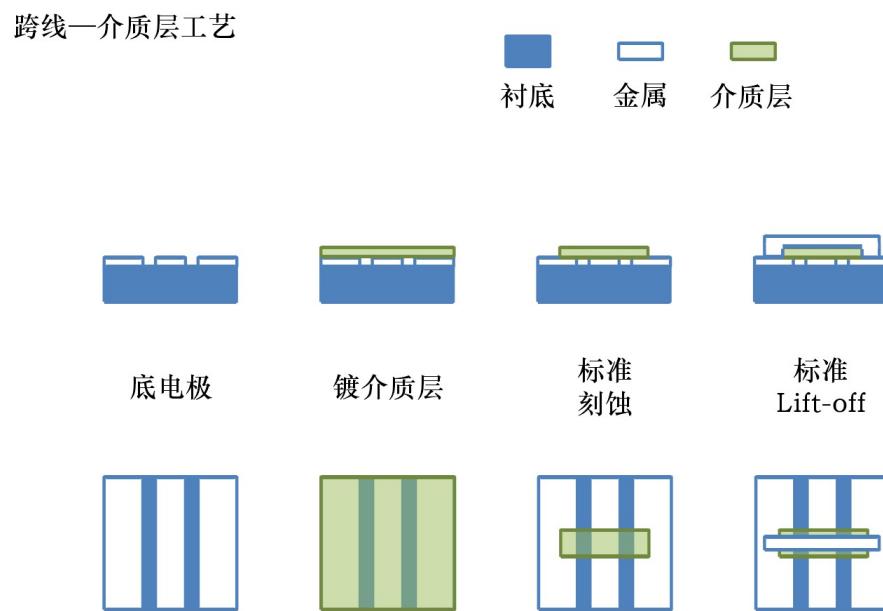


图 8: 介质层工艺制备跨线流程图

通过介质层工艺制备出来的跨线如下所示

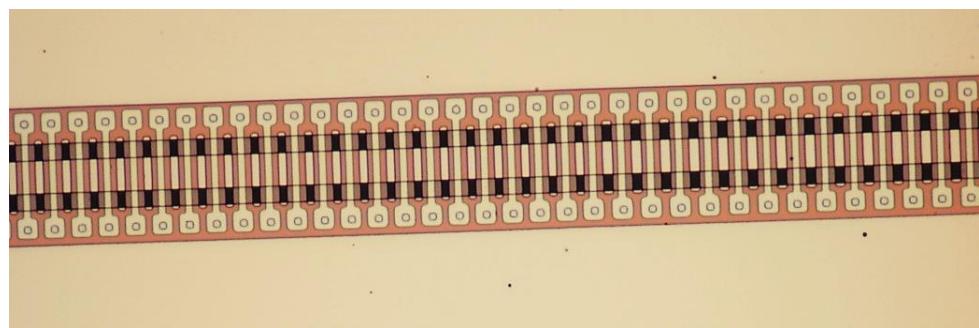


图 9: 介质层工艺制备的跨线

Airbridge 工艺 Airbridge 类似于介质层工艺，不过其采用光刻胶取代了介质层工艺中的绝缘

层，制备出的铝桥是悬空的。

优点：避免了绝缘层带来的介电损耗。

不足：牺牲了一定的稳定性，不能制作太长的跨线，不能使用大功率超声波清洗。

下图为 Airbridge 工艺的流程图

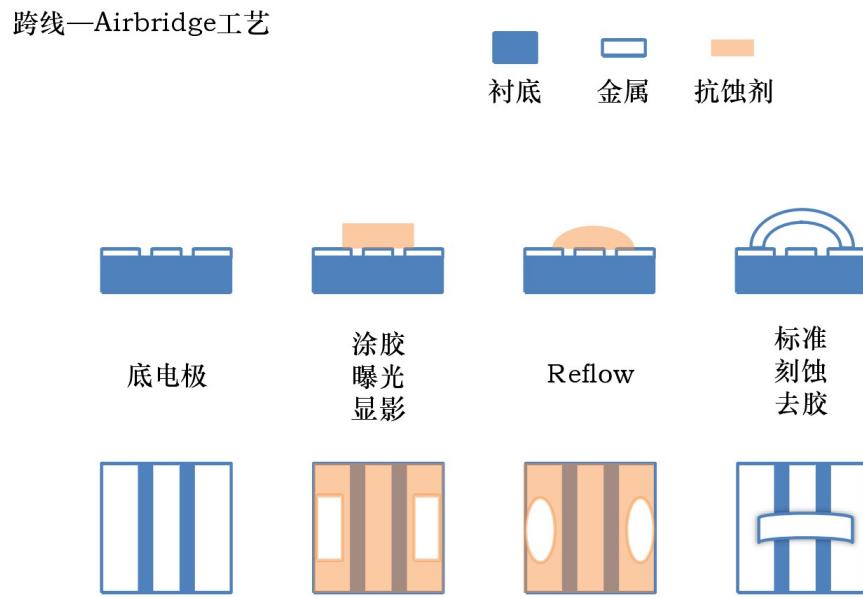


图 10: Airbridge 工艺流程图

下图为制备好的 Airbridge 跨线电镜照片，可以看出跨线悬空，为了增强稳定性，其形状为拱形

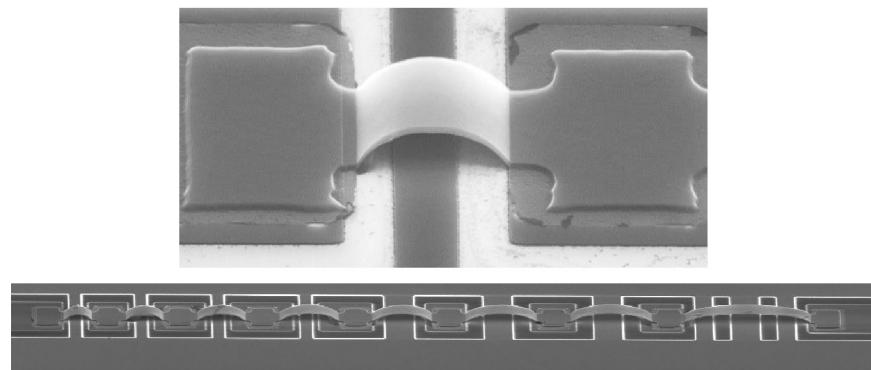


图 11: Airbridge 工艺制备的跨线

6.6 样品检测

样品制备完成后需要检测参数是否满足设计要求。

主要检测项目：约瑟夫森结的电阻，电阻直接决定约瑟夫森结的临界电流，决定量子比特的最大工作频率。

测试要点：约瑟夫森结的电阻一般较大，为千欧姆的量级，精度的要求不需要太高，偏差控制在百欧姆的量级都是可以的。需要注意的是测试时，避免太高的电压或者静电将约瑟夫森结击穿，损坏样品。

6.7 切片封装

切片：将检测合格的样品切成与封装盒匹配的尺寸，样品需要使用切片机切割，在切割时要注意需要使用大量的冷却水冲洗带走切割产生的热量，为了保护样品不被污染，需要在表面涂上一层光刻胶保护。

封装：将切好的样品放入转接盒中，并用超声引线将样品表面的传输线与转接盒的微波传输线路接头连接起来。

引线参数：对于以金属铝作为超导材料的样品，引线选择为 1mil 的硅铝丝。常用功率为 220mW，时间为 30ms。

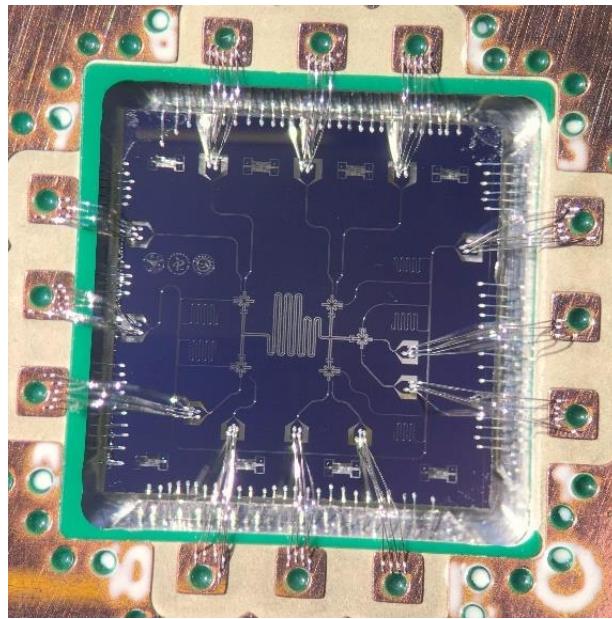


图 12: 样品引线示意图

7 以 Qiskit-Metal 为例的量子设计自动化

7.1 为什么发展 QEDA

与 EDA 自顶而下非常规范化的集成电路设计检验流程相比，现阶段对超导量子芯片加工，非常类似于 EDA 早期 CAD 阶段：设计和分析过程混乱而随意。

现在被大家习惯使用的层次有：概念层次，哈密顿量层次，（量子逻辑门层次，等效电路层次），线路布局层次，实际电路层次。

然而，现阶段的主要矛盾不是层次之间的综合，而是底层，即电路层次的模拟分析。与传统芯片非常不同的是，超导量子芯片成本太高，实际测试性能需要稀释制冷机。一个模拟实际电路的工具可以节省人力物力、降低门槛，让更多量子芯片成为可能。

Qiskit Metal 就是 IBM 试图模拟实际电路的尝试。

- ①：设计量子器件是整个量子生态的基石。以 Qiskit Metal 的 QEDA 软件可以简化、流水线化流程、降低成本。
- ②：在不远的未来，芯片的 Qubits 数目会越来越多，设计必然要借助自动化软件。在未来技术成熟后，掌握 QEDA 的公司将成为整个流程的标准制定者。
- ③：降低技术壁垒，让更多的人参与到量子产业中来，发展量子技术社区，群策群力，推进产业发展。用户获得更高效的研发工具和更好的研发体验，工具开发者获得用户参与使用反馈，实现双赢。

8 Qiskit Metal 概览

8.1 工作流

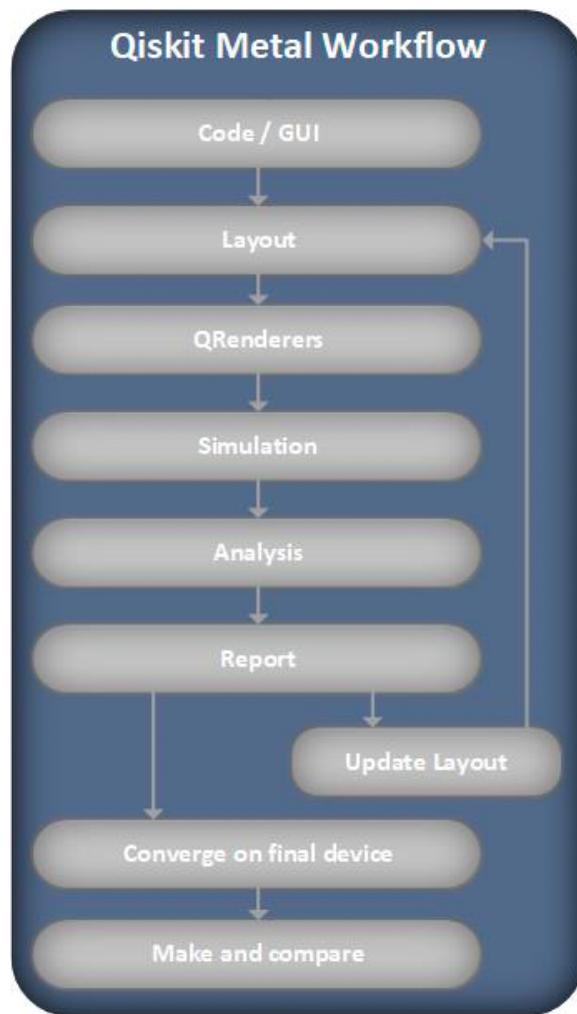


图 13: Qiskit-metal 流程

1. **Code/GUI** 利用 Code 或 GUI 绘制实际电路图
2. **Layout** 用 Layout 模块绘制实际电路
3. **QRenders** 用 Render 功能生成其对应的 gds 文件
4. **Simulation** 用第三方软件 Ansys 进行有限元分析，得到其经典电磁场（哈密顿量线性部分）。用 pyEPR 库，得到哈密顿量非线性部分
5. **Analysis** 分析哈密顿量的势场
6. **Report** 生成报告与设计预期对照，如果符合，输出流片。如果不符返回 **Layout** 环节

8.2 设计细节和类库

8.2.1 创建空白设计图纸的类 QDesings

qiskit_metal.designs

QDesign 是电路设计的模版，可以将它类比为一张用于创造电路设计的空白图纸：所有的超导电路设计对象都是 QDesign 的实例。但是，QDesign 并不能被直接实例化：只能创建一个具体的设计对象，例如我们经常实例化一个二维设计 DesignPlanar，(Qdesign 的子类)

8.2.2 QComponents

QComponents 包含了所有的模块，比如 transmon，CPW 传输线等，QComponents 不能直接实例化，是通过向一个 QDesign 对象中添加模块而创建一个 QComponents，可以调用它添加和组合我们想要的组件。

8.2.3 Renderer Base

Renderer Base 是将一个已经添加好组件的 QDesign 渲染成一个可以被 Ansys 等有限元分析软件的文件，之后导入到第三方软件中进行仿真模拟。

8.2.4 Analyses

(1) Hamiltonian

①HO_wavefunctions: 计算线性谐振子对应 LC 电路的波函数

②transmon_analytics: 计算 transmon 的本征能量

(2) 参量分析

①cpw_calculations: 计算 CPW 的参量

②kappa_calculation: 计算 CPW 与传输线电容耦合的光子损失

(3) 其他分析工具正在开发中

8.2.5 图形可视化类 MetalGUI

qiskit_metal._gui

用户可以通过鼠标和键盘或 API 对 GUI 进行控制。只有在找到正确的 python qt 模块（例如 pyside 或 PyQt）时，才会加载 gui 模块。是 QEDA 的最终产品形态。类 MetalGUI，主要是基于模块 PySide2，一种基于 C++ 的 GUI 开发工具 Qt 的 Python 图形开发工具，替代默认的 Tinker。

8.3 展望

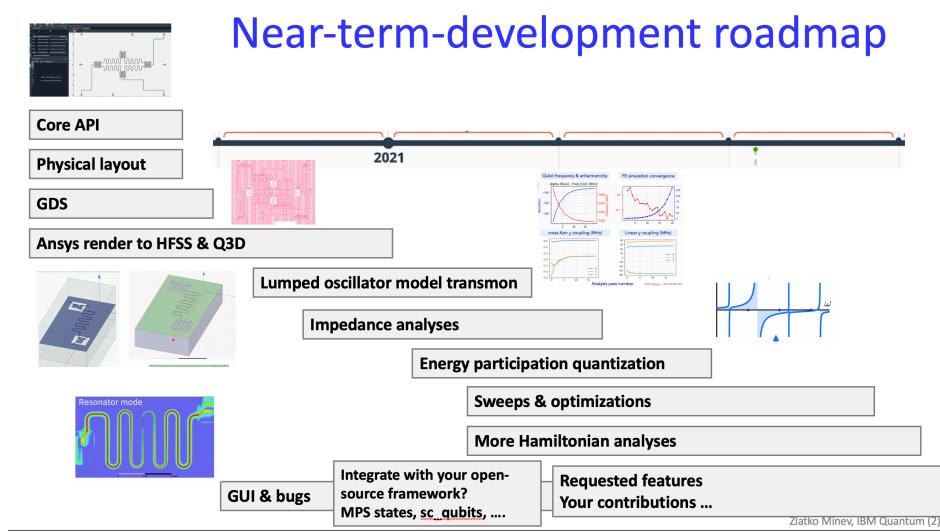


图 14: Roadmap

①: 更多量子组件

- Tunable couplers (community-driven)
- Fluxonium (community-driven)
- Flux lines, control, etc.
- Wirbonds, etc.
- Grow library of quantum devices
- ...

②: 量子分析开发中

- Sweeping parameters, optimetrics
- Impedance quantization
- Fully integrated pyEPR
- Updated lumped analysis code to more general circuits and couplers
- Better interfaces and abstractions
- ...

③: 重构以及改善接口、数据处理

④: 开发方便实用的一键求解

- ⑤: 更丰富的 GUI 功能
- ⑥: 可以从 GDS(集成电路设计文件) 中导入
- ⑦: 集成更多的量子分析工具包: qiskit pulse, qutip, scQubits, pyEPR 等

Part III

能量配分比

9 背景

9.1 输入与输出

在刚刚对 Qiskit Metal 的讨论中，我们已经了解到 Qiskit Metal 如何为已经成竹在胸的设计师们绘制掩膜版。然而，QEDA 工具需要做的远不止于此。它们最重要的功能之一是对已有的设计进行评估：我们的芯片是否真正达到了要求？保真度如何？退相干时间是多久？会不会有意外的串扰影响性能？

这些问题在等效电路层次看上去很平凡，然而真正落到实际的芯片却困难重重：它们的本质是“我们的芯片和等效电路到底有多吻合”。要回答这个问题，我们意识到实际量子器件形状非常不规则，定量分析并量子化一个实际量子电路中的电磁场几乎不可能。

在经典的 EDA 中，定量分析电磁场主要依靠对小单位的有限元分析和大规模电路的模块化处理。用有限元方法对整个器件的区域进行分解，每个子区域都成为简单的部分，并求解微观麦克斯韦偏微分方程边值问题近似解。然后，软件存储每一个小部分的解，用到构造相同的大规模集成电路中去。

要在量子芯片的环境下回答这个问题，我们应当知道芯片的情况：掩膜版和材料分布。然后，我们需要知道等效电路的几个关键参数：量子比特的频率、退相干时间等等。这些都是在我们回答之前应当知道的。

假设我们有一块 oracle 能回答这个问题，上面的信息，尤其是掩膜版和材料分布就是我们的输入。oracle 的回答应当是我们所关心的一系列参数，然后由我们决定芯片是否达到要求。

9.2 EPR

从等效电路到实际电路的诸多 oracle 中，形状因素被越来越多的考虑，可以提供更多的信息，更准确，但是速度也会变慢，如图15所示。

Design & Analysis: Quantization methods landscape

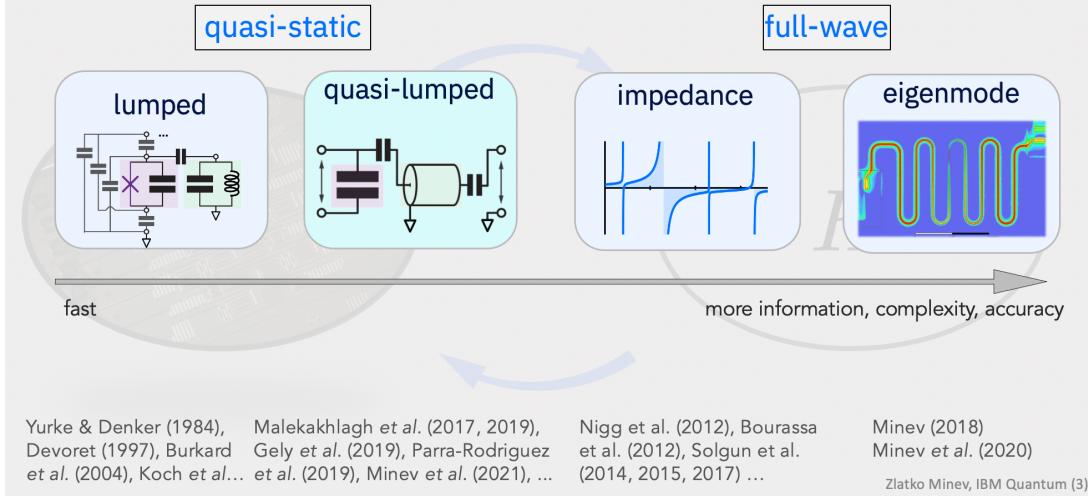


图 15: EPR 的位置

既然我们已经明确了对 oracle 的要求，下面来介绍 EPR，oracle 的一种实现方式。EPR 方法是 Zlatko K. Minev 在耶鲁大学博士期间的工作时开发的，[2, 3] 主要用于处理 Josephson 电路的 EPR 量子化，在参考文献中有详细的介绍 [4]。

EPR 包括两个环节：第一个环节是把掩膜版和材料信息在 HFSS 等软件中进行模拟流片，给所有量子器件等效的电容电感等参数，然后求解出芯片作为一个经典器件的本征频率、能量分布等等。第二个环节是数据的后处理：在非线性器件上用本征模计算零点涨落，然后通过能量分布比求解量子效应，用来修正原本的哈密顿量。

第一环节中的有限元分析只能给出线性响应，而完全没有考虑约瑟夫森效应引入的非线性响应。处理数据和连接经典与量子物理主要在于第二环节。

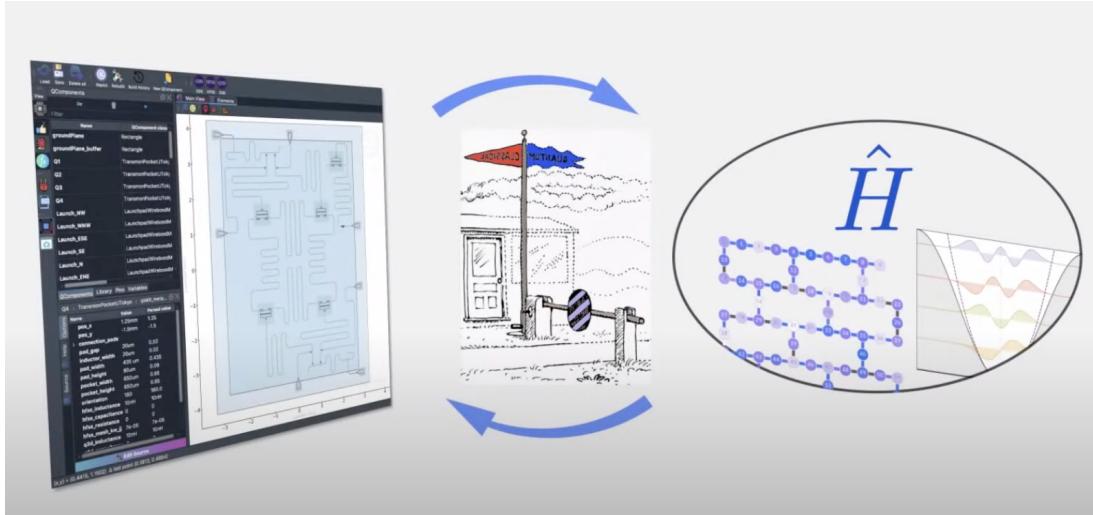


图 16: EPR 连接量子与经典的桥梁

EPR 的框架具有普适性，可以处理各种维度的情况：planar (2D), quasi-planar (2.5D), three-dimensional (3D)。除了结之外，还适用于由 Transmon 和读取腔组成实际电路芯片，其哈密顿量依赖于器件的几何形状和材料的具体特性。由于实际几何形状的复杂性，我们不可能给出其哈密顿量的解析形式，只有借助有限元 (FE) 分析的数值模拟手段处理其能量函数，从而描述系统并找到本征模。但是其具有一定的局限性：需要对 Transmon 引起的非线性项进行泰勒展开，这要求非线性项目必须远小于线性项。

10 有限元方法

读者应当意识到 EPR 本身并不具有量子化一个约瑟夫森结的能力。EPR 需要有限元分析之后的结果：本征频率、电磁场分布、数值积分的结果等等作为输入，然后才能给出一系列的（非线性）参数用来修正哈密顿量。有限元分析是目前实现 QEDA 不可或缺的一部分。

对有限元分析感兴趣的读者可以参考：

[有限元分析](#)

[电磁场的有限元分析](#)

11 Theory behind

11.1 Background

对经典谐振腔，我们知道哈密顿量：

$$\begin{aligned} H &= H_{cap} + H_{ind} \\ &= \frac{C\dot{\Phi}^2}{2} + \frac{\Phi^2}{2L} \end{aligned} \quad (37)$$

对 transmon，我们知道其约瑟夫森耦合能的表达式（定义 $\phi = \frac{\Phi}{\Phi_0}$ ）：

$$\begin{aligned} H &= E_J(1 - \cos \phi) \\ &= E_J\left(\frac{\phi^2}{2} - \frac{\phi^4}{24}\right) \\ &= H_{lin} + H_{nl} \end{aligned} \quad (38)$$

可以看到，约瑟夫森结在只保留平方项的时候能量正比于通量（相位差）的平方，因此在忽略高（4）阶项的时候和一个电感器非常类似：

$$H = E_J\left(\frac{\phi^2}{2} - \frac{\phi^4}{24}\right) = \frac{1}{2}L_J^{-1}\Phi^2 - E_J\frac{\phi^4}{24}$$

其中第一项是线性项， $L_J^{-1} = \frac{E_J}{\Phi_0^2}$ 。

讨论完了单个节点的情况，下面我们考虑所有的节点：把所有节点的通量和电荷统一表达在两个矢量之中： Φ_t 和 Q_t ，下标 t 表示这些节点在某棵生成树上。因此，我们写出总哈密顿量：

$$\begin{aligned} H &= \underbrace{\sum_t \left(\frac{C_t \dot{\Phi}_t^2}{2} + \frac{1}{2}L_t^{-1}\Phi_t^2 \right)}_{Nodes} + \underbrace{\sum_j \left(\frac{1}{2}L_j^{-1}\Phi_j^2 - E_J \frac{\phi_j^4}{24} \right)}_{Josephson} + \underbrace{\sum_{a,b} \left(\frac{C_{a,b} \dot{\Phi}_a \dot{\Phi}_b}{2} + \frac{1}{2}L_{a,b}^{-1}\Phi_a \Phi_b \right)}_{coupling} \\ &= \frac{1}{2}\dot{\Phi}_t^T C \dot{\Phi}_t + \frac{1}{2}\Phi_t^T L^{-1}\Phi_t + \sum_j \left(\frac{1}{2}L_j^{-1}\Phi_j^2 - E_J \frac{\phi_j^4}{24} \right) \end{aligned} \quad (39)$$

其中，coupling 的项被我们划入 C 和 L^{-1} 矩阵的非对角部分。

我们把整个电路的哈密顿量也分为线性和非线性两部分：

$$H = H_{lin} + H_{nl} \quad (40)$$

线性部分：

$$H_{lin} = \frac{1}{2}\dot{\Phi}_t^T C \dot{\Phi}_t + \frac{1}{2}\Phi_t^T L^{-1}\Phi_t + \sum_j E_J\left(\frac{\Phi_j^2}{2}\right) \quad (41)$$

非线性部分，其中 c_{jp} :

$$H_{\text{nl}} = \sum_{\text{non-linear } j} \sum_{p=3}^{\infty} E_j c_{jp} \left(\frac{\Phi_j}{\phi_0} \right)^p \quad (42)$$

考虑线性部分

$$H_{\text{lin}} = \frac{1}{2} \dot{\Phi}_t^T C \dot{\Phi}_t + \frac{1}{2} \Phi_t^T L^{-1} \Phi_t + \sum_j E_j \left(\frac{\phi_j^2}{2} \right) \quad (43)$$

如果我们把最后一项求和看做对第二项感性元件能量的修正，我们可以最后得出

$$H_{\text{lin}} = \frac{1}{2} \dot{\Phi}_t^T C \dot{\Phi}_t + \frac{1}{2} \Phi_t^T L_{\text{eff}}^{-1} \Phi_t \quad (44)$$

其中 $L_{\text{eff}}^{-1} = L^{-1} + L_J^{-1}$

观察上式的形式，可以对 Φ 做变换：

$$\begin{aligned} \Phi_t &\implies \Phi_m := E \Phi_t \\ H &= \sum_m \frac{1_L}{2} \omega_m Q_m^2 + \frac{1_L^{-1}}{2} \Phi_m^2 \end{aligned} \quad (45)$$

在这种（伪）对角变换之后，可以立刻得出本征频率：上式中的 ω_m 。一般用有限元分析得到本征值 ω_m 以及其电场磁场分布。

对线性部分，可以利用产生湮灭算符将其二次量子化。例如，对于三个电路元件，Dark, Bright Transmon 和谐振读取腔 Cavity 的模式 $m \in M = \{\text{D,B,C}\}$ ，其哈密顿量的二次量子化形式为：

$$\hat{H}_{\text{lin}} = \sum_{m \in M = \{\text{D,B,C}\}} \hbar \omega_m \hat{a}_m^\dagger \hat{a}_m \quad (46)$$

我们在这里提醒读者，线性结论仅仅对线性器件适用：约瑟夫森结的本征频率仍然需要四阶的修正。

11.2 EPR

考虑到刚刚的变换是实变换，我们认为约化磁通 φ_j 也遵循同样的变化：

$$\begin{aligned} \varphi_j &:= \frac{\Phi_j}{\phi_0} \\ \varphi_j &= \sum_m \varphi_{mj} (a_m + a_m^\dagger) \end{aligned} \quad (47)$$

其中 φ_{mj} 是模式 m 在节点 j 处的零点涨落。

通过上式，就把求解哈密顿量非线性部分转化为求解展开系数 ϕ_{mj} 。我们将很快回到这个问题。

下面引入能量分配系数 Energy participation ration EPR, 取值范围在 0 和 1 之间, 定义如下, 衡量在各模式 $m \in \{M = D, B, C\}$ 被激发时, 节点 $j \in \{J = V, H\}$, 的 (非线性) 能量在全部电感能量中所占的比率:

$$\begin{aligned} p_{mj} &= \frac{\text{Inductive energy stored in junction } j}{\text{Total inductive energy stored in mode } m} \\ &= \frac{\langle n_m | \frac{1}{2} E_j \hat{\phi}_j^2 | n_m \rangle}{\langle n_m | \frac{1}{2} \hat{H}_{\text{lin}} | n_m \rangle} \end{aligned} \quad (48)$$

刚才讨论的展开系数 ϕ_{mj}^2 与 EPR 成正比, (推导见附录) 有以下关系:

$$\phi_{mj}^2 = p_{mj} \frac{\hbar \omega_m}{2E_j} \quad (49)$$

因为我们知道 $E_J \omega_m$, 只需要再求出 p_{mj} 即可。在下两节我们将介绍如何求解。

11.3 求解 EPR

EPR 矩阵可以通过有限元分析的方法来求解。首先, 我们考虑能量均分定理: 总能量被均分成电容和电感能量:

$$E_{\text{elec}} = E_{\text{cap}} = E_{\text{ind}} = E_{\text{mag}} + E_{\text{kin}}$$

, 而其中电容的能量等价于电场的能量。在最后一个等号的位置, 我们发现 E_{mag} , 对应经典电感; E_{kin} , 对应所有约瑟夫森结的能量。因此, 我们希望的 p_m 可以计算:

$$p_m = \frac{E_{\text{elec}} - E_{\text{mag}}}{E_{\text{elec}}}$$

考虑单一的二维矩形薄板上的约瑟夫森结, 如图17所示

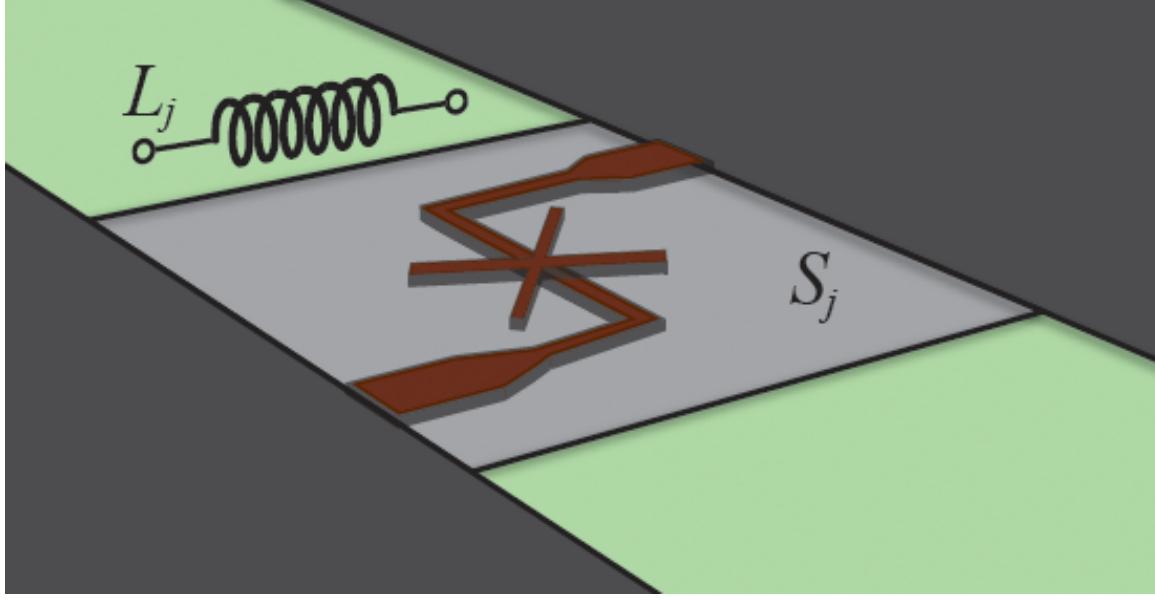


图 17: 有限元分析一个约瑟夫森结。导线棕色，两边深灰色矩形是金属垫。浅灰色矩形区域是有限元模拟的区域。

用等效电感, L_j 来代替约瑟夫森结, 然后用有限元分析整个浅灰色区域: 其边界条件为切向电场 \vec{E}_{\parallel} , 切向方向磁场 \vec{H}_{\parallel} , 表面阻抗满足 $\vec{E}_{\parallel} = Z_S(\vec{n} \times \vec{H}_{\parallel})$ 。利用有限元分析, 可以给出每个有限元内部的频率 ω_m , 电场 $\vec{E}_{\max}(\vec{r})$, 磁场 $\vec{H}_{\max}(\vec{r})$ 。含时电场是正弦振荡的形式:

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = \text{Re} \vec{E}_{\max}(x, y, z) e^{j\omega_m t} \quad (50)$$

有能量均分定理可知: $E_{\text{elec}} = E_{\text{cap}} = E_{\text{ind}} = E_{\text{mag}} + E_{\text{kin}}$

总电场能和磁场能为:

$$\begin{aligned} E_{\text{elec}} &= \frac{1}{4} \text{Re} \int_V dv \vec{E}_{\max}^* \overleftrightarrow{\epsilon} \vec{E}_{\max} \\ E_{\text{mag}} &= \frac{1}{4} \text{Re} \int_V dv \vec{H}_{\max}^* \overleftrightarrow{\mu} \vec{H}_{\max} \end{aligned} \quad (51)$$

电场能储存在电容能中, 有 $E_{\text{elec}} = E_{\text{cap}}$, 磁场能储存在电感能和约瑟夫森结中的超流电子的动能中, 有 $E_{\text{kin}} = E_{\text{elec}} - E_{\text{mag}}$ 。给出总 EPR:

$$p_m = \frac{E_{\text{elec}} - E_{\text{mag}}}{E_{\text{elec}}} \quad (52)$$

然而, 我们需要每一个约瑟夫森结的能量, 因此直接使用 E_{kin} 不能满足要求。对于一个约瑟夫森结, 如果我们使用等效电感来模拟, 那么能量:

$$E = \frac{1}{2} L_j I_{m_j}^2 \quad (53)$$

如果我们在有限元软件中把约瑟夫森结当做平面，那么电流 I_{mj} 就是表面电流密度的积分：

$$I_{mj} = l_j^{-1} \int_{s_j} |\overleftrightarrow{J}_{s,m}| ds$$

注意，因为表面电流密度并不和表面垂直，我们要取积分结果和长度的比值。求出能量之后，我们有

$$p_{mj} = \frac{\frac{1}{2} L_j I_{mj}^2}{E_{ind}}$$

其中， l_j 和 S_j 是几何尺寸，如下图所示：

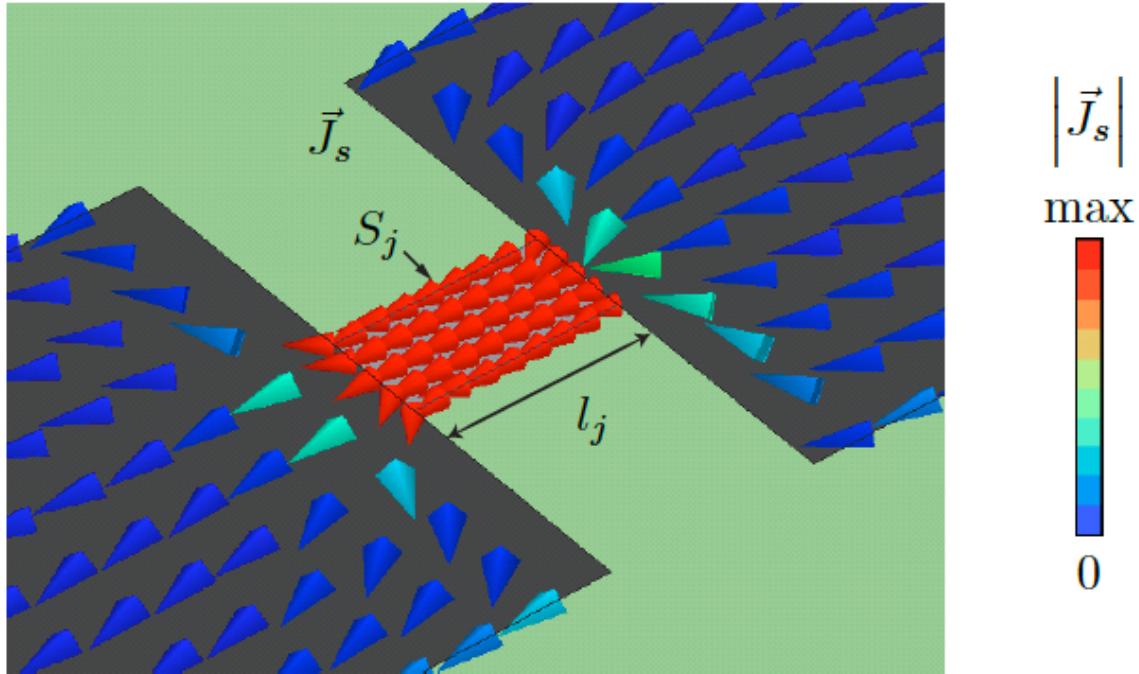


图 18: 有限元分析一个 Transmon。

实际上，pyEPR 提出了一套更精准的更准确的求解电流的方法，先通过电场计算约瑟夫森结两侧的电势差 V ，利用约瑟夫森电感计算其等效阻抗 Z ，计算得到电流 I ：

$$\begin{aligned} V_{\text{Re}} &= \int_{\text{JJLine}} \vec{E}_{\text{Re}} \cdot d\vec{l} \\ V_{\text{Im}} &= \int_{\text{JJLine}} \vec{E}_{\text{Im}} \cdot d\vec{l} \end{aligned} \quad (54)$$

总电势差为

$$V = \sqrt{V_{\text{Re}}^2 + V_{\text{Im}}^2}$$

圆频率：

$$\omega = 2\pi f$$

由约瑟夫森等效电感给出阻抗：

$$Z = \omega J_L$$

得到电流为：

$$I_{\text{peak}} = \frac{V}{Z}$$

对于单约瑟夫森结和 CPW 耦合的简单电路，三种方法给出的 p_{mj} 比较：

$$\begin{aligned} p_m &= 99.350\% \\ p_{mj}^{old} &= 96.817\% \\ p_{mj}^{new} &= 99.277\% \end{aligned}$$

新的方法更准确。

12 利用 EPR 求解哈密顿量的非线性效应

上面已经提到，哈密顿量的非线性部分写作：

$$H_{\text{nl}} = \sum_j \sum_p E_j c_{jp} \hat{\phi}_j^p \quad (55)$$

其中非线性项的首项为 $p = 4$ 项，以一个谐振腔 c 与量子比特 quibit 耦合的系统为例，该项为：

$$\hat{H}_{nl} = -\frac{E_j}{24} (\varphi_c \hat{a}_c + \varphi_q \hat{a}_q + \varphi_c \hat{a}_c^\dagger + \varphi_q \hat{a}_q^\dagger)^4 + O(\hat{\varphi}_J^6) \quad (56)$$

由 wick 定理可知，其展开项虽然项数很多，但是求对 Fock 态求期望时，大多数项都为 0，可以存活下的只有下面这些项： $\hat{a}_m^\dagger \hat{a}_m$, $\hat{a}_m^\dagger \hat{a}_m^2$, $\hat{a}_m^\dagger \hat{a}_m \hat{a}_n^\dagger \hat{a}_n$ 。在旋光近似下，三阶非线性光学过程由三部分组成，兰姆位移，失谐项，克尔效应项（推导过程见附录）：

$$\hat{H}_{p=4} = \sum_m -\hbar \Delta_m \hat{a}_m^\dagger \hat{a}_m - \frac{1}{2} \hbar \alpha_m \hat{a}_m^{\dagger 2} \hat{a}_m^2 - \sum_{n \neq m} \frac{1}{2} \hbar \chi_{mn} \hat{a}_m^\dagger \hat{a}_m \hat{a}_n^\dagger \hat{a}_n \quad (57)$$

其中 $m \in q, c$, Δ_m 是等效兰姆位移， α_m 是失谐系数， χ_{mn} 是克尔效应系数。展开上式可

得：

$$\begin{aligned}\chi_{mn} &= \sum_{j=1}^J \hbar^{-1} E_j \varphi_{mj}^2 \varphi_{nj}^2 = \sum_{j=1}^J \frac{\hbar \omega_m \omega_n}{4E_j} p_{mj} p_{nj} \\ \Delta_m &= \frac{1}{2} \sum_{n=1}^M \chi_{mn} \\ \alpha_m &= \frac{1}{2} \chi_{mm}\end{aligned}\tag{58}$$

在得到这些项之后，我们回到经典的哈密顿量：

$$H_{old} = \frac{1}{2} \dot{\Phi}_t^T C \dot{\Phi}_t + \frac{1}{2} \Phi_t^T L^{-1} \Phi_t + E_J(1 - \cos\phi)\tag{59}$$

EPR 算出的 χ_{mj} ，四阶项，主要对它修正。

13 EPR 使用示例

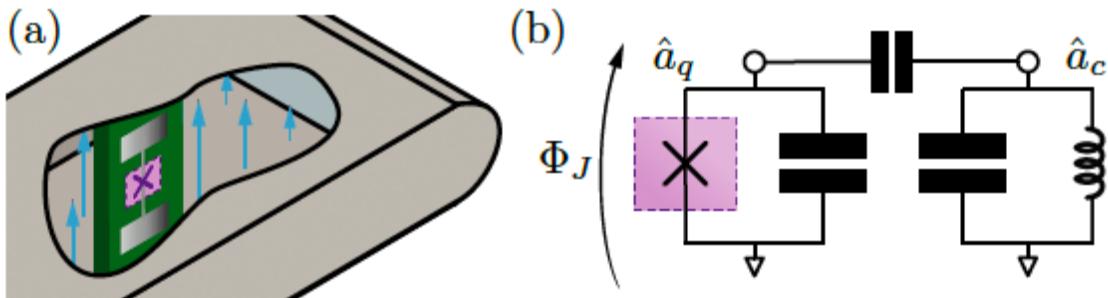


图 19: 3 维 Transmon 的实际电路和等效电路。

14 pyEPR 库

在 Qiskit-metal 中，有限元分析软件 ANSYS EM 输出数据是存放在 pinfo 中的，这是我们从有限元结果 (Input) 得到哈密顿量 (Output) 的关键数据：

```
#Non-linear (Josephson) junction
pinfo = hfss.pinfo # Project info
pinfo.junctions['jj'] = {'Lj_variable': 'Lj', 'rect': 'JJ_rect_Lj_Q1_rect_jj',
                         'line': 'JJ_Lj_Q1_rect_jj_', 'Cj_variable': 'Cj'}
pinfo.validate_junction_info() # Check that valid names of variables and objects have been
                               supplied
pinfo.dissipative['dielectrics_bulk'] = ['main'] # Dissipative elements: specify
# Handles microwave analysis on eigenmode solutions
eprd = epr.DistributedAnalysis(pinfo)
```

pinfo 的从属关系：

- pinfo (ProjectInfo)
- hfss (QHFSSRenderer)
- renders (ansys_render.py)
- design (DesignPlannar)
- designs
- qiskit_metal

在 ansys_render.py 中:

```
@property
def pinfo(self) -> epr.ProjectInfo:
    """Project info for Ansys renderer (class: pyEPR.ProjectInfo)."""
    return self._pinfo
```

这里使用了函数参数 Python 解释器: 提示我们参考 EPR 方法中的 ProjectInfo。

几个比较重要的方法:

存储数据 save:

```
def save(self):
    """
    Return all the data in a dectionary form that can be used to be saved
    """
    return dict(
        pinfo=pd.Series(get_instance_vars(self, self._Forbidden)),
        dissip=pd.Series(self.dissipative.data()),
        options=pd.Series(get_instance_vars(self.options)),
        juncctions=pd.DataFrame(self.juncctions),
        ports=pd.DataFrame(self.ports),
    )
```

```
def __init__(self,
             project_path: str = None,
             project_name: str = None,
             design_name: str = None,
             setup_name: str = None,
             do_connect: bool = True):
    """
    Keyword Arguments:

    project_path (str) : Directory path to the hfss project file.
        Should be the directory, not the file.
        Defaults to ``None``; i.e., assumes the project is open, and thus gets the
        project based
        on `project_name`.

    project_name (str) : Name of the project within the project_path.
        Defaults to ``None``, which will get the current active one.

    design_name (str) : Name of the design within the project.
        Defaults to ``None``, which will get the current active one.

    setup_name (str) : Name of the setup within the design.
```

```

    Defaults to ``None``, which will get the current active one.

do_connect (bool) [additional]: Do create connection to Ansys or not? Defaults to
                                ``True``.

"""

# Path: format path correctly to system convention
self.project_path = str(Path(project_path)) \
    if not (project_path is None) else None
self.project_name = project_name
self.design_name = design_name
self.setup_name = setup_name

# HFSS desgin: describe junction parameters
# TODO: introduce modal labels
self.junctions = Dict() # See above for help
self.ports = Dict()

# Dissipative HFSS volumes and surfaces
self.dissipative = self._Dissipative()
self.options = config.ansys

# Conected to HFSS variable
self.app = None
self.desktop = None
self.project = None
self.design = None
self.setup = None

```

[4]

Part IV

总结

展望 Bo-yan Yu, Ke-hui Yu, Zi-xiao Wang July 2021

15 summary

在以上的笔记中，我们简要介绍了超导量子比特的必要理论基础、电子设计自动化和量子设计自动化、Qiskit-Metal、EPR 算法等。这篇笔记的完成离不开量钢团队的每一个人，子潇
轲辉的前期工作在笔记中占了很大一部分。

16 blueprint

在展望未来的环节中，我们主要希望找出目前 QEDA 的痛点、为接下来量钢团队的发展绘制蓝图：

- 有限元软件的运行速度太过缓慢，占据了 QEDA 的 90% 以上的时间，是否有方案可以优化或者用更高效的方案替代有限元？
- EPR 方案并非真正的第一性原理，相反，它在关键的约瑟夫森结的处理上依赖经验参数 L_j 。这会带来额外的误差。是否有更加白盒、更加准确的方案？
- 目前量子器件的设计千差万别，没有一个统一标准。在不远的将来，随着量子比特数量的增多，标准化、模块化的扩展似乎是量子芯片的必由之路。一旦量钢上线并取得成功，百度有望成为行业标准的制定者
- 量钢目前并不能实现动力学模拟，但是业界也关心门的性能，希望下一步实现门的仿真。
- EPR 依赖弱非谐性，下一步是否可以开发强非谐性下的模拟软件？

[2]

A Hamiltonian Parameters

在这里我们推导约瑟夫森结的四阶项如何扰动原本的哈密顿量。我们试图验证如下等式：

$$\begin{aligned}\chi_{mn} &= \sum_{j=1}^J \hbar^{-1} E_j \varphi_{mj}^2 \varphi_{nj}^2 = \sum_{j=1}^J \frac{\hbar \omega_m \omega_n}{4E_j} p_{mj} p_{nj} \\ \Delta_m &= \frac{1}{2} \sum_{n=1}^m \chi_{mn} \\ \alpha_m &= \frac{1}{2} \chi_{mm}\end{aligned}\tag{60}$$

注意到 m 指标在左右两侧都有，因此我们只考虑对单个 m 的情况。考虑四阶哈密顿量的最初形式：

$$H_4 = -\frac{E_J}{24} (\varphi_c a_c + \varphi_q a_q + \varphi_c a_c^\dagger + \varphi_q a_q^\dagger)^4\tag{61}$$

如果我们从一开始就知道 RWA 近似，那么运算可以极大简化。我们只需要相等数量的产生湮灭算符，其他项都不考虑，那么剩余的应该是这些： $a_c^\dagger a_c^\dagger a_c a_c$, $a_q^\dagger a_q^\dagger a_q a_q$, $a_c^\dagger a_c a_q^\dagger a_q$

让我们重新标识它们，去掉算符标记，进一步简化运算：

$$\begin{aligned}\varphi_c a_c &\longrightarrow c \\ \varphi_c a_c^\dagger &\longrightarrow d \\ \varphi_q &\longrightarrow q \\ \varphi_q^\dagger &\longrightarrow p\end{aligned}\tag{62}$$

因此，立刻有

$$\begin{aligned}[c, d] &= \varphi_c^2 := 1_c \\ [q, p] &= \varphi_q^2 := 1_q\end{aligned}\tag{63}$$

重写哈密顿量：

$$\begin{aligned}\frac{h_4}{-\frac{E_J}{24}} &= (c + d + q + p)^4 \\ &= ((c + d)^2 + (q + p)^2 + 2(c + d)(q + p))^2 \\ &= (c + d)^4 + (q + p)^4 + 2(c + d)^2(q + p)^2 + 4((c + d)(q + p))^2 + \overbrace{2(c + d)^3(q + p) + 2(c + d)(q + p)^3}^{RWA} \\ &= (c + d)^4 + (q + p)^4 + 6(c + d)^2(q + p)^2\end{aligned}\tag{64}$$

考虑 $(c + d)^4$ 项我们只从它的展开式中选取 c 和 d 数目相等的项，因此选取两个 c 和两个

d ; 总共选出 6 项, 它们是:

$$\begin{aligned}(c+d)^4 &= (c+d)(c+d)(c+d)(c+d) \\ &= ccdd + cdcd + cddc + ddcc + dcdd + dcde\end{aligned}\tag{65}$$

用之前的对易关系:

$$\begin{aligned}ccdd &= c(dc+1_c)d = cdcd + cd = (dc+1_c)(dc+1_c) + (dc+1_c) = dcde + 3_cdc + 1_c^2 \\ &= d(dc+1_c)c + 3_cdc + 1_c^2 = ddcc + 4_cdc + 1_c^2 \\ cdcd &= (dc+1_c)(dc+1_c) = dcde + 2_cdc = d(dc+1_c)c + 2_cdc = ddcc + 3_cdc \\ cddc &= (dc+1_c)dc = dcde + 1_cdc = d(dc+1_c)c + 1_cdc = ddcc + 2_cdc \\ dcde &= dc(dc+1_c) = dcde + 1_cdc = ddcc + 2_cdc \\ dcde &= d(dc+1_c)c = ddcc + 1_cdc\end{aligned}\tag{66}$$

求和:

$$H_c = 6(ddcc + 2_cdc)\tag{67}$$

我们对 $(q+p)^4$ 也做相同的事情; 然后对于交叉项, 我们也意识到保留的项只能包含 $c d p$ 各一个。我们可以通过先一步处理平方项来简化运算:

$$\begin{aligned}H_{cross} &= 6(c+d)^2(q+p)^2 \\ &= 6(cd+dc)(qp+pq) \\ &= 6(2dc+1_c^2)(2pq+1_q^2) \\ &= 6(4dcqp+4_cpq+4_qdc+1_c^2 \times 1_q^2)\end{aligned}\tag{68}$$

最后求和:

$$\begin{aligned}H_4 &= -\frac{E_j}{24}(6(ddcc+2_cdc)+6(ppqq+2_qpq)+6(4dcqp+2_cpq+2_qdc+1_c^2 \times 1_q^2)) \\ &= -\frac{E_j}{4}(ddcc+ppqq)-\frac{E_j}{2}(1_c+1_q)(dc+pq)-E_j(dcqp) \\ &= -\frac{E_j}{4}((\varphi_c^4 a_c^\dagger a_c^\dagger a_c a_c) + (\varphi_q^4 a_q^\dagger a_q^\dagger a_q a_q)) - \frac{E_j}{2}(\varphi_c^2 + \varphi_q^2)(\varphi_c^2 a_c^\dagger a_c + \varphi_q^2 a_q^\dagger a_q) - E_j \varphi_c^2 \varphi_q^2 (a_c^\dagger a_c a_q^\dagger a_q)\end{aligned}\tag{69}$$

比较系数：

$$\begin{aligned}
 -\frac{1}{2}\hbar(\chi_{cq} + \chi_{qc}) &= -E_j\varphi_c^2\varphi_q^2 \\
 -\hbar\Delta &= -\frac{E_j}{2}(\varphi_c^2 + \varphi_q^2)(\varphi_c^2) \\
 -\frac{1}{2}\hbar\alpha &= -\frac{E_j}{4}\varphi^4
 \end{aligned} \tag{70}$$

请注意：对于 $m \neq n$, $[a_m^\dagger, a_n] = 0$: 因此, χ_{mn} 和 χ_{nm} 可以取同样的值, 那么对它们求和实际上是其中一项的两倍。因此：

$$\begin{aligned}
 \chi_{cq} = \chi_{qc} &= \frac{E_j}{\hbar}\varphi_c^2\varphi_q^2 \\
 \Delta_c &= \frac{E_j}{2\hbar}(\varphi_c^2 + \varphi_q^2)(\varphi_c^2) = \frac{1}{2}(\chi_{cq} + \chi_{cc}) \\
 \alpha_c &= \frac{E_j}{2\hbar}\varphi_c^4 = \frac{\chi_{cc}}{2}
 \end{aligned} \tag{71}$$

B EPR vs ZPF

在这里我们推导 EPR p_{mj} 和零点涨落 φ 的关系，希望能让读者迅速理解 EPR 的物理背景。

在经典电磁学中，能量在电场和磁场中平均分布已被证明：

$$\begin{aligned} E_{elec} &= E_{mag} \\ \frac{1}{2}\epsilon E^2 &= \frac{1}{2}\frac{B^2}{\mu} \end{aligned} \quad (72)$$

然而，我们在试图用黑盒模型模拟约瑟夫森结的时候，我们发现非电场的能量并不只分布在磁场中：电流流经感性的器件，能量也分布在电流上 ($E = \frac{1}{2}LI^2$)。之前的磁场能量被拆分成两部分，新的磁场能量 (E_{mag}) 和电流 (E_J^{lin}) 的能量加起来等同于电场 (E_{elec}) 的能量，占据总能量的一半。我们对电流的能量记为 E_J^{lin} ，因为我们把约瑟夫森结作为线性电感进行模拟。因此，有

$$\begin{aligned} E_{elec} &= E_{ind} \\ E_{ind} &= E_{mag} + E_J^{lin} \\ E_J^{lin} &= \frac{1}{2}E_{total} \end{aligned} \quad (73)$$

EPR p_{mj} 的定义是：在本征模式 m 下，在第 j 个约瑟夫森结上的电感能量 E_j^{lin} 的时间平均值和总电感能量 E_{ind} 的时间平均值的比。

$$p_{mj} = \frac{\langle E_j^{lin} \rangle'_{m'}}{\langle E_{ind} \rangle'_{m'}} \quad (74)$$

其中， $\langle \rangle_{m'}$ 指在本征模式 m 下对算符取时间均值。同时，我们把本征模式 m 简记作 $|m\rangle$ ：

$$|m'\rangle = |000\dots 1_{m'th}\dots 000\rangle$$

简单的例子：

$$\langle a_m^\dagger a_m | m' \rangle_{m'} \langle m' | a_m^\dagger a_m | m' \rangle = \delta_{mm'}$$

考虑 EPR p_{mj} 的分子：

$$\begin{aligned} \langle E_j \rangle_{m'} &= \langle \frac{1}{2}E_j(\varphi^2 - \langle \varphi^2 \rangle_0) \rangle_{m'} \\ &= \langle \frac{1}{2}E_j\phi_j^2 \rangle_{m'} - \langle \langle \frac{1}{2}E_j\varphi_j^2 \rangle_0 \rangle_{m'} \\ &= \frac{1}{2}E_j\langle \varphi^2 - \langle \varphi^2 \rangle_0 \rangle_{m'} \end{aligned} \quad (75)$$

考慮被減數 φ^2

$$\begin{aligned}
\varphi^2 &= \left(\sum_m \varphi_{mj} (a_m + a_m^\dagger) \right)^2 \\
&= \sum_m \varphi_{mj}^2 (a_m^2 + a_m^{\dagger 2} + a_m a_m^\dagger + a_m^\dagger a_m) \\
&\quad + \sum_{n \neq m} \varphi_{mj} \varphi_{nj} (a_m a_n + a_m a_n^\dagger + a_m^\dagger a_n + a_m^\dagger a_n^\dagger) \\
&= \sum_m \varphi_{mj}^2 (a_m^2 + a_m^{\dagger 2} + 2a_m^\dagger a_m + 1) \\
&\quad + \sum_{n \neq m} \varphi_{mj} \varphi_{nj} (a_m a_n + a_m a_n^\dagger + a_m^\dagger a_n + a_m^\dagger a_n^\dagger) \\
\langle \varphi^2 \rangle_{m'} &= \langle m' | \varphi_j^2 | m' \rangle \\
&= \langle m' | \left(\sum_m \varphi_{mj}^2 (a_m^2 + a_m^{\dagger 2} + a_m a_m^\dagger + a_m^\dagger a_m) \right) | m' \rangle \\
&\quad + \langle m' | \left(\sum_{n \neq m} \varphi_{mj} \varphi_{nj} (a_m a_n + a_m a_n^\dagger + a_m^\dagger a_n + a_m^\dagger a_n^\dagger) \right) | m' \rangle \\
&= \langle m' | \left(\sum_m \varphi_{mj}^2 (a_m^2 + a_m^{\dagger 2} + 1 + 2a_m^\dagger a_m) \right) | m' \rangle \\
&\quad + \langle m' | \left(\sum_{n \neq m} \varphi_{mj} \varphi_{nj} (a_m a_n + a_m a_n^\dagger + a_m^\dagger a_n + a_m^\dagger a_n^\dagger) \right) | m' \rangle \\
&= \sum_m \varphi_{mj}^2 (\langle m' | a_m^2 | m' \rangle + \langle m' | a_m^{\dagger 2} | m' \rangle + \langle m' | 1 | m' \rangle + \langle m' | 2a_m^\dagger a_m | m' \rangle) \\
&\quad + \left(\sum_{n \neq m} \varphi_{mj} \varphi_{nj} (\langle m' | a_m a_n | m' \rangle + \langle m' | a_m a_n^\dagger | m' \rangle + \langle m' | a_m^\dagger a_n | m' \rangle + \langle m' | a_m^\dagger a_n^\dagger | m' \rangle) \right) | m' \rangle
\end{aligned}$$

cross and square terms cancelled

$$\begin{aligned}
&= \sum_m \varphi_{mj}^2 (\langle m' | 1 | m' \rangle + \langle m' | 2a_m^\dagger a_m | m' \rangle) \\
&= \sum_m \varphi_{mj}^2 (\langle m' | 1 | m' \rangle + \sum_m \varphi_{mj}^2 \langle m' | 2a_m^\dagger a_m | m' \rangle)
\end{aligned} \tag{76}$$

考慮減數， $\langle 0 | \varphi^2 | 0 \rangle$ 的展开式：交叉项（形如 $a_m a_n$ ）和单个算符的二次项都不能保留，因

此我们有：

$$\begin{aligned}
\langle \varphi_j^2 \rangle_0 &= \langle 0 | \phi_j^2 | 0 \rangle \\
&= \langle 0 | \left(\sum_m \varphi_{mj}^2 (a_m^2 + a_m^{\dagger 2} + 1 + 2a_m^{\dagger} a_m) \right) | 0 \rangle \\
&\quad + \langle 0 | \left(\sum_{n \neq m} \varphi_{mj} \varphi_{nj} (a_m a_n + a_m a_n^{\dagger} + a_m^{\dagger} a_n + a_m^{\dagger} a_n^{\dagger}) \right) | 0 \rangle \\
&= \sum_m \varphi_{mj}^2 (\langle 0 | a_m^2 | 0 \rangle + \langle 0 | a_m^{\dagger 2} | 0 \rangle + \langle 0 | 1 | 0 \rangle + \langle 0 | 2a_m^{\dagger} a_m | 0 \rangle) \\
&\quad + \sum_{n \neq m} \varphi_{mj} \varphi_{nj} (\langle 0 | a_m a_n | 0 \rangle + \langle 0 | a_m a_n^{\dagger} | 0 \rangle + \langle 0 | a_m^{\dagger} a_n | 0 \rangle + \langle 0 | a_m^{\dagger} a_n^{\dagger} | 0 \rangle) \\
&= \sum_m \varphi_{mj}^2 \langle 0 | 1 | 0 \rangle
\end{aligned} \tag{77}$$

注意，我们取得的已经是一个期望值——一个常量。因此，在任何模式或者态下面取期望值和时间均值都只会返还同样的常量。我们有： $\langle \langle \varphi_j^2 \rangle_0 \rangle_{m'} = \langle \varphi_j^2 \rangle_0$.

求两项差：

$$\begin{aligned}
\langle \varphi^2 - \langle \varphi \rangle_0^2 \rangle_{m'} &= \sum_m \varphi_{mj}^2 (\langle m' | 1 | m' \rangle + \sum_m \varphi_{mj}^2 \langle m' | 2a_m^{\dagger} a_m | m' \rangle - \sum_m \varphi_{mj}^2 \langle 0 | 1 | 0 \rangle) \\
&= \sum_m \varphi_{mj}^2 (\langle m' | 1 | m' \rangle - \varphi_{mj}^2 \langle 0 | 1 | 0 \rangle) + \sum_m \varphi_{mj}^2 \langle m' | 2a_m^{\dagger} a_m | m' \rangle \\
&= \sum_m \varphi_{mj}^2 \langle m' | 2a_m^{\dagger} a_m | m' \rangle \\
&= 2\varphi_{mj}^2
\end{aligned} \tag{78}$$

分母：

$$\langle E_{ind} \rangle = \frac{1}{2} \sum_m \hbar \omega_m \langle a_m^{\dagger} a_m \rangle_{m'} = \frac{1}{2} \hbar \omega_m \tag{79}$$

因此：

$$\begin{aligned}
p_{mj} &= \frac{\frac{1}{2} E_j (\varphi^2 - \langle \varphi \rangle_0^2)}{\frac{1}{2} \sum_m \hbar \omega_m \langle a_m^{\dagger} a_m \rangle_{m'}} \\
&= \frac{\frac{1}{2} E_j 2\varphi_{mj}^2}{\frac{1}{2} \hbar \omega_m} \\
&= \frac{2E_j \varphi_{mj}^2}{\hbar \omega_m}
\end{aligned} \tag{80}$$

我们得到了笔记中的 p_{mj} 的表达式。

C 公司信息

公司网站

主页: <https://kfquantum.com/>

招聘网站: <https://www.ustcif.org.cn/default.php/content/4559/>

公司地址

上海张江高新区

浦东新区郭守敬路 498 号 (浦东软件园) 15 号楼 205 室

公司介绍

致力于量子科技研发与应用的高科技创业企业。是中科大校友创办的一家创业公司，核心创始团队包括多位科大校友。公司愿景：助力实现量子技术的应用 (Enable application of Quantum Technology)

技术研发

1. 基于高性能经典计算助力量子计算的应用研发，如量子算法加速、量子系统模拟、量子机器学习等方向，探索量子计算在不同行业的实际应用；
2. 基于丰富的量子器件研发经验，支持量子计算芯片、量子传感器等各类量子器件的设计与制备优化以及研发的全流程支持；
3. 基于多年大型复杂软硬件系统的研发经验，支持量子计算原型机、量子传感器系统等复杂软硬件系统研发，包括咨询、设计、架构以及工程集成开发。

员工构成

创始人兼 CEO 徐华博士，39岁（1982），中科大97级少年班，美国 University of Maryland College Park 博士，之后留校任 Research Assistant，后由在 National Institute of Standards and Technology 担任 Researcher Associate，2010年加入 Brion 公司。2015年，徐华入职阿里达摩院，量子科学家。2018年，成立昆峰量子。

从半导体行业跳到了互联网公司，徐华最开始做的是如何结合算法和业务。比如通过 push 算法，手机淘宝打开率一个月上涨了 60%。其中最有成就的一件事是，在 2015 年的双十一，开发了电商平台史上第一套“全场购物券”，徐华所在的团队因此获得了 CEO 特别贡献奖。

量子研发工程师 Quantum R&D Engineer: 基于超导约瑟夫森结量子处理器系统相关产品研发。量子处理器从设计到制备环节相关产品的研发。团队的目标任务是利用量子物理与半导体制造技术打造多比特可容错的广义量子计算系统，实现真正的量子超越。

算法工程师 Algorithm Engineer: 基于海量数据，利用传统机器学习结合量子计算，设计实现算法和建模技术，解决金融、物流、精密探测等实际场景的业务需求和问题。



图 20: 昆峰量子框架.

高级软件工程师 Senior Software Engineer: 使用经典计算机技术对量子计算的探索与研发。高性能量子计算模拟器、先进量子计算云平台的研发。团队的目标任务是赋能与加速量子计算的普及与应用。

高级前端开发工程师 Senior Front End Developer: 先进量子计算云平台的前端研发。团队的目标任务是赋能与加速量子计算的普及与应用。

论文成果

2021 年 5 月，arXiv 文章：Performance of Superconducting Quantum Computing Chips under Different Architecture Design [1].

作者及机构：

Wei Hu, Yang Yang, Weiye Xia, and Hua Xu

Kunfeng Quantum Technology Co., Ltd, Shanghai, China.

email 地址：

wei.hu@kfquantum.com

hua.xu@kfquantum.com

合作者及机构：

Jiawei Pi, Enyi Huang, and Xin-Ding Zhang

Guangdong Provincial Key Laboratory of Quantum Engineering and Quantum Materials,

算法	algorithms
量子傅立叶变换	quantum fourier transform
量子相位估计	quantum phase estimation
量子纠错码 (Steaneenlargement)	quantum error-correcting codes by Steaneenlargement
量子纠错 (Surface code)	quantum error correction with the surface code
一维伊辛模型	ising one dimensional Ising model

表 1: 标准算法.

School of Physics and Telecommunication Engineering,
South China Normal University, Guangzhou 510006, China

论文概述:

不同结构设计下超导量子计算芯片的性能探究。研究量子比特连通性和拓扑性的量子处理器性能。利用 IBM 公司的 Qiskit，从量子架构设计空间中选择了 10 个具有不同连接性和拓扑结构的设计模型。用几个标准算法对性能进行评估，见表1。发现大型连通性的设计有利于提升架构性能，而拓扑性对性能影响很小。不同量子算法对量子芯片的连通性和拓扑性结构依赖程度不同。

基金支持:

The National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFA0301803)
the Special Project for Research and Development in Key areas of Guangdong Province
(No.2019B030330001)
the Natural Science Foundation of Guangdong Province (No.2018A030313342)
the National Natural Science Foundation of China (NSFC) (No. 61875060) .

图 21: 软件著作详情

图 22: 量子计算模拟云平台

D 产品服务

量子计算模拟云平台，量子经典混合云平台

“昆升”量子芯片设计服务云平台（Quantum-chip Design Automation Platform QDAP）：设计服务平台 Netlist，设计服务平台 Load Gds。

D.1 量子计算模拟云平台

量子计算模拟云平台没有开源的 github。没有教程文档。

该云平台为软件著作，如图21所示。利用该平台可执行 Grover 和 QFT 算法。量子线路示意图，代码，及运算结果如图22所示。支持图形化与代码同步编程。声称最高支持 40-qubits 运算，平台上实际支持 28-qubits。

应用实例 昆峰量子实现量子人工智能和工业故障检测相结合：和上海工程技术大学的研究人员共同合作，积极探索将量子人工智能技术引入工业自动化的故障检测领域，通过量子支持向量机、量子神经网络等量子分类算法，对滚动轴承数据进行了成功的故障检测试验，为量子计算和智能制造的结合提供了一个可行的研究方向。利用量子状态的叠加和量子计算的并行性来提升加速传统故障检测算法。

D.2 量子经典混合云平台

没有开源的 github。没有教程文件。新建程序如图23所示，需要提供一个 git 仓库地址。尝试运行后，是一个 JSON(JavaScript Object Notation) 界面，如图24，具体使用方法不明。

D.3 量子芯片设计服务云平台

昆升是一站式面向量子芯片设计工具，全世界第一家“云原生”面向量子芯片设计自动化（QDA）的平台。为量子计算和量子器件领域的从业人员提供，即开即用、基于云端的量子芯片



图 23: 量子经典混合云平台.

```

{
  "version": "0.2.0",
  "configurations": []
}

```

图 24: json 界面



图 25: 量子芯片设计服务云平台模拟四量子比特设计版图.

设计服务，可满足相关科研与工程研发需求。

提供多种量子芯片的设计流程。设计人员可以选择从量子芯片的光学掩膜版图开始，通过电磁模拟获得版图设计的等效电路图，继而对该等效电路图进行量子化以及模拟分析，从而获得该芯片设计图所对应的主要物理参数。设计人员也可以选择从抽象的物理电路图出发，模拟所输入物理电路图所对应的量子系统，分析计算出相应的量子芯片、特别是所包含量子比特信息在内的关键物理参数。完善的自动化流程，支持用户对量子芯片、量子比特设计的关键参数进行扫描、分析来寻找最优化的设计参数。

包括：**设计服务平台 Netlist**，**设计服务平台 Load Gds**。没有开源的 github。没有教程文件。

设计服务平台 Netlist 网址：<https://kfquantum.com/#/netlistlist>。

在我使用过程中，刚平台仍然在持续更新。2021 年 7 月 1 号中午 12:00 之前完全不能使用。

之后网址更新为：<https://kfquantum.com/#/circuit>。其中 Nedelist 主要用于设计等效电路图，如图26，左下角所示。Gds 主要用于量子芯片的光学掩膜版设计如图25和图26上图所示。

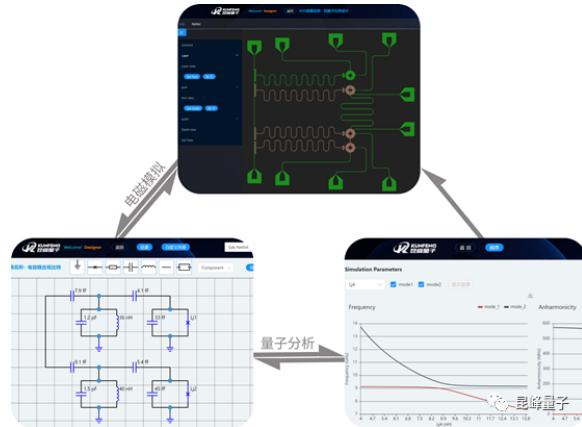


图 26: 量子芯片设计服务云平台设计流程示意图.



图 27: Gds 参数示意图.

D.4 Gds

GdS 主要用于量子芯片的光学掩膜版设计，设计出如图25的效果。需要给定 Layer 和 port 的参数，如图27。

SetLayer

Layer 参数包括：层序，启用，name，材质，导电率 (S/m)，相对介电常数，介电消耗，厚度 (μm)，高度 (μm)，如图28所示。未找到可以输入数据的方法。

SetPort

Port 参数包括：#，名称，Supply X，Supply Y，Supply Z，Return X，Return Y，Return Z，Direction，operation，如图29所示。未找到可以输入数据的方法。



图 28: Gds 中 SetLayer 示意图.

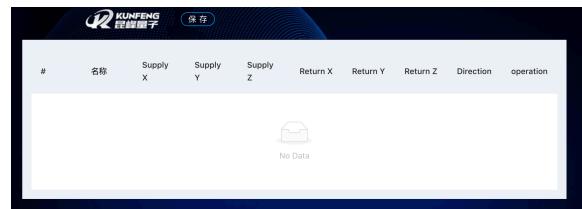


图 29: Gds 中 SetPort 示意图.



图 30: Gds 中 SetPort 示意图.

SetData

SetData 进行电磁模拟参数设定：模拟范围，频率单位，初始频率，结束频率，频率数量，频率分布，如图30所示。

Layer 和 Port 参数无法直接设置，可能需要通过上传文件的方式设置，等待该平台进一步更新。

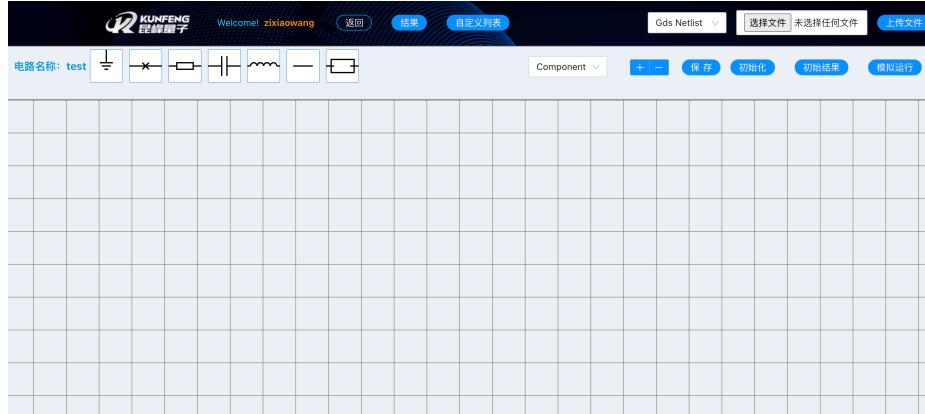


图 31: 等效电路设计界面示意图.



图 32: 电路元件参数示意图.

E Netlist

Netlist 用于设计等效电路图, 如图26左下角所示。等效电路设计界面如图31所示。通过拖动方式添加电路元件, 单击元件可以修改参数名称旋转或者删除元件如图32。程序测试通过图31右上角的保存, 初始化, 初始结果完成, 并返回错误信息。该平台导线的连接方式缺乏智能性, 连接导线非常麻烦, 易出现导线未连接的报错: There are two subcircuits which are not connected. 在导线连接成功后出现参数设定报错报错: should be specified with the keyword argument Q1=... 按照该提示重新设置参数为 Q1=1 后, 有报错: non-default argument follows default argument。该平台由于教程的缺乏, 对初次使用者非常不友好。

2021 年 7 月 2 号上午 9:00 发现该平台已经不再开放, 提示 “谢谢您的关注, 很抱歉目前只对邀请使用。”