



# 中华人民共和国国家标准

GB/T XXXXX—XXXX

## 超导量子计算专用极低温极低噪声系统

Ultra-low temperature and Ultra-low noise platform for superconducting quantum computing

(征求意见稿)

(本草案完成时间：2025 年 7 月 11 日)

在提交反馈意见时，请将您知道的相关专利连同支持性文件一并附上。

XXXX - XX - XX 发布

XXXX - XX - XX 实施

国家市场监督管理总局  
国家标准化管理委员会 发布

## 目 次

前言 .....	II
引言 .....	III
1 范围 .....	1
2 规范性引用文件 .....	1
3 术语和定义 .....	1
4 系统构成 .....	2
5 技术要求 .....	2
5.1 概述 .....	2
5.2 空间 .....	3
5.3 运行温度 .....	3
5.4 制冷功率 .....	3
5.5 振动 .....	3
5.6 剩余磁场 .....	3
5.7 低温测控线路 .....	3
5.8 绝缘性能 .....	3
5.9 运行可靠性 .....	3
5.10 环境稳定性 .....	3
6 测试方法 .....	3
6.1 测试环境 .....	3
6.2 测试设备要求 .....	3
6.3 测试内容 .....	4
附录 A（资料性） 50 比特超导量子计算专用极低温极低噪声系统典型配置 .....	6
参考文献 .....	7

## 前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由全国量子计算与测量标准化技术委员会（SAC/TC 578）提出并归口。

本文件起草单位：

本文件主要起草人：

# 引 言

极低温极低噪声系统是超导量子计算的关键设备。该系统包括稀释制冷机、低温测控线路、减振装置和磁屏蔽装置。稀释制冷机提供超导量子芯片所需要的极低温环境，同时对低温测控线路进行冷却；低温测控线路用来传输超导量子芯片的测控信号；减振装置为整个系统提供低振动环境；磁屏蔽装置用来降低磁场对超导量子芯片的影响。一方面，系统提供超导量子芯片运行所必须的极低温极低噪声环境；另一方面，系统的空间、低温测控线路以及可拓展性也成为可容纳超导量子芯片比特数目的重要指标。

超导量子计算领域发展趋势是由数十比特展示的“量子优越性”，到百万比特量级的“通用量子计算”。在这一发展过程中，量子处理器的极低温极低噪声环境和测控需求是不变的。目前，超导量子计算已经可以制备出比特数大于50的完全可编程原型机，在特定算法上演示了超过经典超级计算机的计算能力，即实现了量子优越性。这也是未来超导量子计算领域发展的出发点。

因此，本文件主要针对支持50比特及以上的超导量子处理器的测控需求，给出搭建极低温极低噪声系统的通用规范。50比特阈值依据超导量子计算实现量子优越性的典型规模。从这样一个关键技术节点出发，根据超导量子计算的具体需求，制定超导量子计算专用极低温极低噪声系统的标准是十分必要的。本文件的制定，也将为超导量子计算测控领域的发展趋势指明方向，为下一阶段行业应用奠定基础。

# 超导量子计算专用极低温极低噪声系统

## 1 范围

本文件界定了超导量子计算专用极低温极低噪声系统（以下简称极低温极低噪声系统）的术语和定义，描述了该系统的结构构成，规定了该系统的技术指标和检验方法。

本文件适用于运行50比特以上超导量子计算处理器的极低温极低噪声系统的性能测试。选取50比特阈值依据超导量子计算实现量子优越性的典型规模。本文件也可用于其他超导量子计算系统的设计、制造和测试提供参考。

## 2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 2900.5-2013 电工术语 绝缘固体、液体和气体

GB/T 29716.2-2018 机械振动与冲击 信号处理 第2部分：傅里叶变换分析的时域窗

GB/T 29716.4-2018 机械振动与冲击 信号处理 第4部分：冲击响应谱分析

GB/T 40661-2021 工频磁场测量仪校准规范

GBT 42125.14-2023 测量、控制和实验室用电气设备的安全要求

GB/T 42565-2023 量子计算 术语和定义

## 3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

### 3.1

**超导量子计算专用极低温极低噪声系统** Ultra-low temperature and Ultra-low noise platform for superconducting quantum computing

由稀释制冷机、低温测控线路、减振装置和磁屏蔽装置组成，提供超导量子处理器所需要的极低温极低噪声环境，同时集成操控超导量子处理器运行和计算结果读取的低温测控线路，是超导量子处理器运行的基础。

### 3.2

**稀释制冷机** dilution refrigerator

利用 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 混合液体物理特性产生的制冷效应，获得极低温的一种制冷机。

### 3.3

**噪声** noise

极低温极低噪声系统中超导量子处理器运行位置的噪声包括振动噪声、电磁噪声和热噪声，该位置的噪声水平直接影响到超导量子处理器的性能。

### 3.4

**最低温度** base temperature

极低温极低声系统正常运行能够达到的最低温度。

#### 4 系统构成

超导量子计算专用极低温极低声系统包含以下四个部分：

a) 稀释制冷机：为超导量子处理器提供温度低于 20 mK 的低温环境，结构图见图 1。

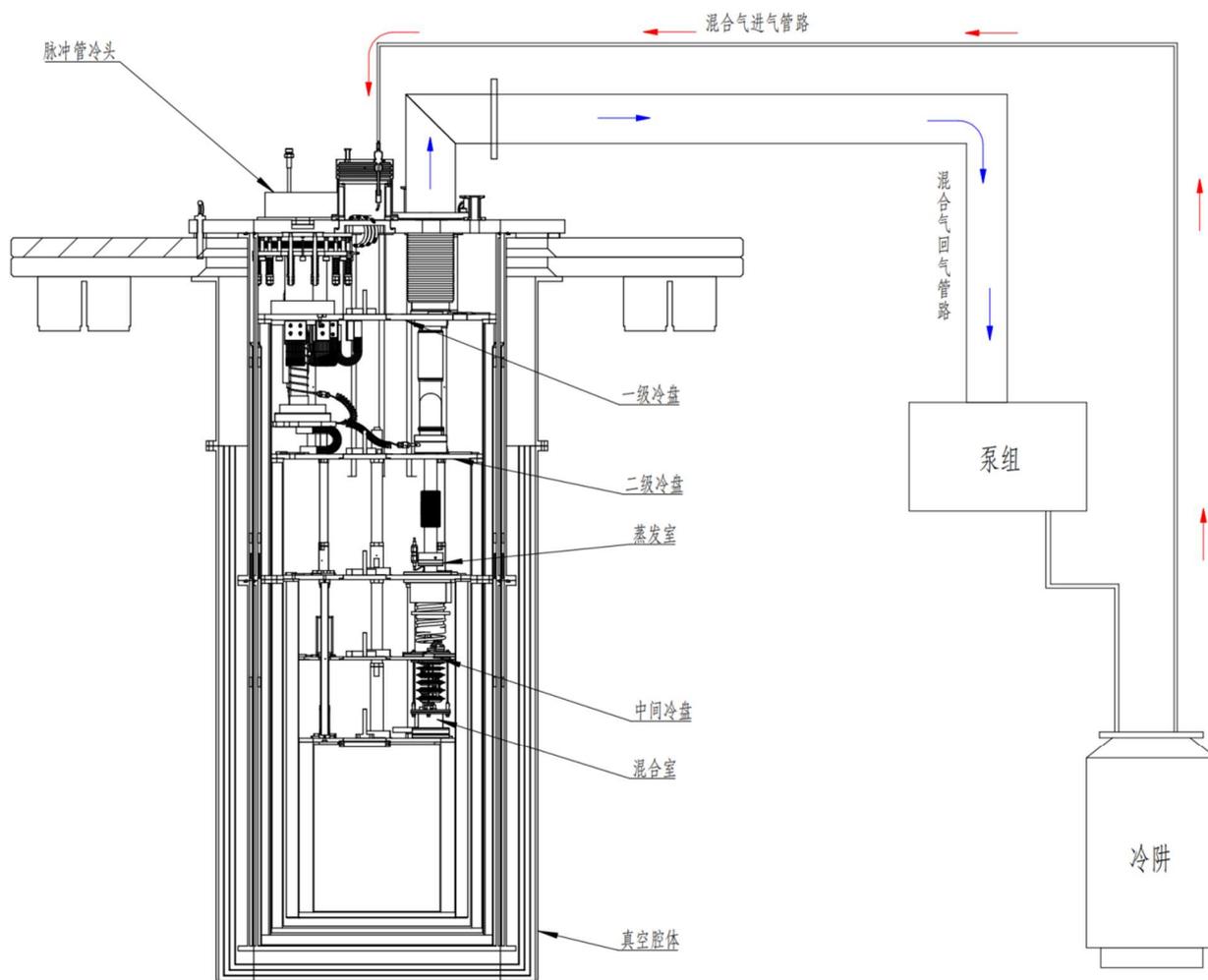


图1 稀释制冷机结构图

- b) 低温测控线路：连接室温测控设备与低温量子芯片的信号传输通道，由低温电缆和低温电子器件组成，负责传递量子比特的读取、驱动与控制三类微波信号，并需在极低温环境下保持低插损和高保真特性。
- c) 减振装置：利用主动减振和被动减振的方式，降低超导量子处理器运行位置的振动幅度。
- d) 磁屏蔽装置：利用磁屏蔽系统和采用无磁或弱磁材料搭建系统，屏蔽磁场对超导量子处理器的性能影响。

#### 5 技术要求

##### 5.1 概述

50比特超导量子计算专用极低温极低噪声系统典型配置见附录A，对于运行50比特以上超导量子计算处理器的极低温极低噪声系统，技术要求见5.2~5.10。

## 5.2 空间

空间应满足不少于200路低温测控线路、超导量子处理器和磁屏蔽装置的安装需求。

## 5.3 运行温度

极低温极低噪声系统正常运行状态下，二级冷盘的温度应低于4.2K，混合室盘的温度应低于20mK。

## 5.4 制冷功率

稀释制冷机空载条件下，二级冷盘 4.2K 制冷功率 $\geq 2$  W，混合室盘 20mK 制冷功率 $\geq 20$   $\mu$ W。

## 5.5 振动

安装超导量子处理器后，常温运行极低温极低噪声系统，超导量子处理器位置三轴振动应小于1  $\mu$  m。

## 5.6 剩余磁场

安装超导量子处理器后，处理器位置剩余磁场应小于20nT。

## 5.7 低温测控线路

应满足大于50比特超导量子处理器完整的调控和信号读取要求。支持的低温测控线路数量不少于200路，频率覆盖DC至8GHz，衰减应不低于40dB。

## 5.8 绝缘性能

稀释制冷机的混合室盘应与市电隔离，恒温器与市电部分之间的电阻应大于10M $\Omega$ 。

## 5.9 运行可靠性

极低温极低噪声系统可以长时间保持低温运行，平均无故障工作时间不小于12个月，极低温运行期间混合室盘温度始终保持在20mK以下。

## 5.10 环境稳定性

系统的工作环境温度 $22^{\circ}\text{C} \pm 1.5^{\circ}\text{C}$ ，湿度控制在40%~70%。

# 6 测试方法

## 6.1 测试环境

在下列条件下进行所有试验：

- a) 环境温度  $22^{\circ}\text{C} \pm 1.5^{\circ}\text{C}$ ；
- b) 湿度 40%~70%。

## 6.2 测试设备要求

测试设备应符合国家标准和行业标准的规定，按国家计量局下发的有关检验规程检验合格，并在有效期内使用。设备的量程和精度应满足检测要求。

注：mK级温度计暂无相关标准。

### 6.3 测试内容

根据本文件使用范围，适用于运行50比特以上超导量子计算的极低温极低噪声系统的性能测试。

#### 6.3.1 空间测试

采用游标卡尺和直尺直接测量低温测控线路、磁屏蔽和样品安装位置的空间。

#### 6.3.2 运行温度测试

极低温极低噪声系统搭建完成后，根据稀释制冷机厂商提供的测试方法和参数进行测试，记录稳定运行状态下，稀释制冷机软件显示的二级冷盘和混合室盘温度。

#### 6.3.3 制冷功率测试

稀释制冷机空载条件下，根据稀释制冷机厂商提供的测试方法和参数进行测试，混合室盘加热到温度20mK的加热功率，即为20mK制冷功率。

稀释制冷机空载且正常循环的条件下，二级冷盘加热到温度4.2K的加热功率，即为二级冷盘制冷功率。

#### 6.3.4 振动测试

在常温下，分别固定已标定的振动传感器在稀释制冷机混合室盘的位置的垂直方向和水平两个互相垂直的方向，运行极低温极低噪声和主动减振系统。在三种固定方式下，采样时间3min，测试该位置的振动。

#### 6.3.5 剩余磁场测试

分别固定磁通门在极低温极低噪声系统中超导量子处理器的位置，采用垂直方向和水平的两个互相垂直的方向，完成极低温极低噪声系统的安装。测试三种固定方式室温下超导量子处理器位置的剩余磁场。

#### 6.3.6 低温测控线路测试

室温下用矢量网络分析仪连接每根低温测控线路的两端，测量每根电缆的通断和频谱特性；

将所有低温测控线路在超导量子处理器位置两两短接，运行系统降至最低温度，矢量网络分析仪连接每组低温测控线路的室温接头，测量每两根电缆的通断和频谱特性。

#### 6.3.7 绝缘性能测试

稀释制冷机搭建完成后，测量混合室盘和外部供电地线之间的电阻，电阻大于10M $\Omega$ 。采用1级万用表进行测量。

极低温极低噪声系统搭建完成后，超导量子处理器通过支架连接到稀释制冷机的混合室盘，该支架和系统供电地线之间的电阻大于10M $\Omega$ 。采用1级万用表进行测量。

#### 6.3.8 运行可靠性测试

利用稀释制冷机软件监视系统整体运行状态，在保证供电、供水和液氮补充的条件下，查阅稀释制冷机软件记录的运行日志，计算最低温连续运行时间和累计无故障运行时间。

#### 6.3.9 环境稳定性测试

通过工业级温湿度计监视系统所处空间的环境。

## 附录 A

(资料性)

## 50 比特超导量子计算专用极低温极低噪声系统典型配置

## A.1 概述

50比特超导量子计算专用极低温极低噪声系统的典型配置如表A.1所示。

图A.1 50 比特超导量子计算专用极低温极低噪声系统典型配置

项目	典型需求
稀释制冷机	4.2K 制冷功率 $\geq 2\text{ W}$ ，20mK 制冷功率 $\geq 20\ \mu\text{W}$ ；最低温度小于 20mK；4K 温区承重大于 27kg；20mK 温区承重大于 19kg。
热负载	极低温极低噪声系统二级冷盘的净制冷功率大于 $0.1\text{ W}@4\text{K}$ ，混合室盘的净制冷功率大于 $1.3\ \mu\text{ W}@20\text{mK}$ 。
空间	层间空间可以满足不少于 200 路的低温测控线路安装，可以根据低温测控线路的不同设计类型调整低温测控线路安装排布，典型尺寸为 $88.5\text{mm}\times 88.5\text{mm}$ 方形直通；最低温度位置可以容纳 50 比特超导量子处理器，满足超导量子处理器接线和磁屏蔽组件安装的空间需求，可以根据处理器设计、接线情况和磁屏蔽需求进行调整。典型尺寸为直径 400mm，高度 400mm 的圆柱空间。
低温测控线路	不少于 200 路低热导同轴线。
磁屏蔽	多层坡莫合金结构，芯片位置残余磁场 $<20\text{nT}$ 。
测温	碳陶瓷温度计（0.1-320K）、标定后的氧化钨电阻温度计（0.01-0.5K）、钴-60 温度计（0-50mK）。

## 参 考 文 献

- [1] Betts, D.S., An introduction to millikelvin technology. 1989: Cambridge University Press.
  - [2] Ekin, J., Experimental techniques for low-temperature measurements: cryostat design, material properties and superconductor critical-current testing. 2006: Oxford university press.
  - [3] MATTER, C., EXPERIMENTAL TECHNIQUES IN CONDENSED MATTER PHYSICS AT Low TEMPERATURES.
  - [4] White, G.K. and P.J. Meeson, Experimental techniques in low-temperature physics. 2002: Oxford University Press.
  - [5] Enss, C. and S. Hunklinger, Low-temperature physics. 2005: Springer Science & Business Media.
  - [6] McClintock, P.V.E., D.J. Meredith and J.K. Wigmore, Low-Temperature Physics: an introduction for scientists and engineers: An introduction for scientists and engineers. 2012: Springer Science & Business Media.
  - [7] Pobell, F., Matter and methods at low temperatures. Vol. 2. 2007: Springer.
  - [8] Frossati, G., Obtaining ultralow temperatures by dilution of  $^3\text{He}$  into  $^4\text{He}$ . *Le Journal de Physique Colloques*, 1978. 39(C6): p. C6-1578-C6-1589.
  - [9] Arute, F., et al., Quantum supremacy using a programmable superconducting processor. *Nature*, 2019. 574(7779): p. 505-510.
  - [10] Ventura, G. and L. Risegari, The art of cryogenics: low-temperature experimental techniques. 2010: Elsevier.
  - [11] 阎守胜与陆果, 低温物理实验的原理与方法. 1985: 科学出版社.
-