第 49 卷 第 2 期：636-643　　高电压技术　　Vol.49, No.2: 636-643
2023 年 2 月 28 日　　High Voltage Engineering　　February 28, 2023
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20221794

免液氦量子电压标准热传导特性

王曾敏[1]，李红晖[1]，段梅梅[2]，王致君[1]，王思云[2]，王　磊[1]
（1. 中国计量科学研究院，北京 100029；2. 国网江苏省电力有限公司营销服务中心，南京 210019）

摘　要：基于小型 Gifford-McMahon (G–M)制冷机的低温系统是免液氦量子电压标准的关键组件之一，然而由于量子效应的电学表征与结阵表面温度密切相关，结阵芯片对环境温度高度敏感。特别是当结阵表面辐照较大功率的微波时，大量热负荷加剧了无液氦环境下超导量子态的不稳定性。针对上述问题，深入分析和研究了免液氦量子电压标准的低温固体热传导特性，建立低温恒温系统两级辐射漏热及结阵接触热传导模型，应用该模型设计了低温恒温器，并开展了结阵温度稳定性和超导电流–电压(*I*–*U*)特性实验。实验结果表明：2 伏可编程约瑟夫森结阵所有子阵列的量子电压台阶宽度均大于 1.3 mA，验证了所提模型的准确性和可行性。该研究的相关理论和方法可为免液氦量子电压标准低温系统设计和完善提供重要依据。
关键词：电磁计量；免液氦量子电压标准；接触热传导；闭环制冷系统；约瑟夫森效应

Thermal Characteristics of Liquid Helium Free Josephson Voltage Standards

WANG Zengmin[1], LI Honghui[1], DUAN Meimei[2], WANG Zhijun[1]，WANG Siyun[2]，WANG Lei[1]
(1. National Institute of Metrology, Beijing 100029, China;
2. Marketing Service Center, State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210019, China)

Abstract: The Gifford-McMahon (G–M) cryocooler system is one of the key components of liquid helium free Josephson voltage standard. However, the electrical characterization of quantum effect is closely related to the surface temperature of the Josephson junction array, and the Josephson junction array chip is highly sensitive to the environmental temperature. Especially, when the surface of the junction array is irradiated with high power microwave, a large number of heat loads aggravate the instability in the liquid helium free environment. In view of the above problems, this paper deeply analyzes and researches the heat conduction characteristics of liquid helium free quantum voltage standard, and proposes a two-stage radiation heat leakage and heat conduction model. By using this model, a cryostat is designed, and the temperature stability and the current-voltage (*I*–*U*) characteristics experiments are carried out. For the 2 volt programmable Josephson array chip, the experimental results show the minimum quantum voltage step of each subarray is greater than 1.3 mA, which verifies the accuracy and feasibility of the proposed model. The relevant theories and methods are important basis for the design and improvement of liquid helium free quantum voltage standard system.
Key words: electromagnetic metrology; cryocooled Josephson voltage standard; thermal contact conduction; closed cycle cooling system; Josephson effect

0　引言

传统量子电压基/标准中约瑟夫森阵列芯片产生超导状态，是通过将芯片浸入液氦实现的。氦的低沸点(4.2 K)使得其必须在封闭物理条件下储存，通常大量液氦储存在不适合移动和运输的杜瓦瓶中，为保持杜瓦瓶中的液氦存量，须定期向杜瓦瓶中补充液氦。由于我国氦资源稀缺，氦气(液氦)完全依赖进口，使得量子电压基/标准的运行成本非常高。另一方面，量子电压基/标准对液氦的完全依赖，将其使用范围限制在液氦供应充足的地方。

2018 年，新国际(SI)单位制变革加速了扁平化新型测量方式的应用，即通过采用基于量子效应的测量方式，提供直接溯源至 SI 的校准和测量能力，实现对测量仪器的现场和在线校准，大幅提高测量精度和稳定性。2015 年，美国国家标准与技术研究院(NIST)成功研制了 10 伏免液氦量子电压标准[1]，其恒温器均温模块采用了在铜结构周围浇铸铅的方式增加热容[2]，使低温恒温器进一步小型化，并推广应用。日本国家计量研究院(NMIJ) 免液氦量子电压系统基于 10 K 高温约瑟夫森结阵，其均温模块采

基金资助项目：国家电网公司科技项目 (5700-202218217A-1-1-ZN)。
Project supported by Science and Technology Project of SGCC (5700-202218217A-1-1-ZN).

用将铅圆柱块夹在 3 mm 厚的铜板之间并进行焊接的方式[3]，较好地抑制了结阵的温度波动。

中国计量科学研究院自 1993 年起采用约瑟夫森电压基准进行直流电压的复现与量值传递，至今已有 20 多年历史[4-5]，自主研制的液氦型量子电压基准装置在国际计量局组织的两次关键国际比对中均取得了优异成绩[6-8]。受大规模量子器件制备工艺限制，我国在免液氦量子电压研究领域起步较晚。自 2016 年起，中国计量科学研究院量子电压基准研究团队(以下简称“团队”)逐步开展免液氦量子电压标准关键技术研究，目标是顺应单位制变革需求，形成基于制冷机的免液氦、易维护、小型化量子电压标准。北京无线电计量测试研究所的焦玉民等学者研制的用于免液氦量子电压装置的 4.2 K 制冷系统，制冷功率 1 W 以上，温度波动达到±20 mK[9]。

2018 年，在国家质量基础设施(national quality infrastructure，NQI)专项的支持下，团队完成了第一代免液氦量子电压标准低温恒温器的设计和研制，与 NIST 和 NMIJ 方案不同，均温模块的设计采用镀金无氧铜与镀铝聚对苯二甲酸乙二酯(polyethylene terephthalate，PET)薄膜相结合的方式，有效抑制了温度波动。在约瑟夫森结阵芯片未注入微波的情况下，当结阵所在样品台控温在 4.2 K 时，温度波动达到±2 mK [10]。2019 年底，团队完成了第二代低温恒温器、量子电压激励系统、直流电压精密测量系统等的设计和研究，自主研制的免液氦量子电压标准装置测量固态电压标准 1.018 V 直流电压的标准偏差达到 3.5×10^{-9} [11]，取得了重要突破。

尽管与液氦系统相比，两级 Gifford-McMahon (G–M)制冷机以其稳定可靠、易维护和运行成本低而闻名，且在冷却样品和温度控制方面有诸多优点。然而，将其应用在基于量子效应的约瑟夫森量子电压标准系统中时，却有着显著的缺点：一方面，G–M 制冷机很难将结阵温度降低至 10 K 以下；另一方面，G–M 制冷机自身温度波动过大，而约瑟夫森结阵对温度非常敏感，为使结阵正常超导，低温恒温系统必须经过仔细研究和设计。

本文着重研究了免液氦量子电压低温热传导特性，深入分析了低温恒温系统的两级辐射漏热模型及结阵芯片接触热传导理论，并进行了温度稳定性和结阵超导特性验证实验，相关研究内容可为免液氦量子电压标准低温系统的设计和完善提供重要依据。除低温热传导特性的影响外，G–M 制冷机固有振动和制冷系统电磁噪声也会对约瑟夫森结阵超导特性产生影响，本文着重研究低温热传导特性，制冷机振动和电磁噪声的影响将另文阐述。

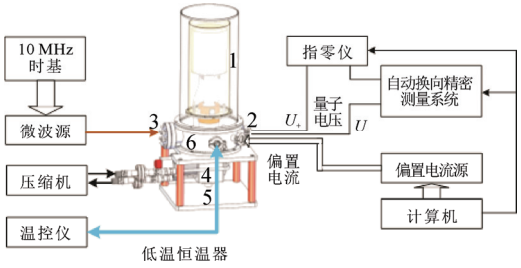
1 免液氦量子电压标准

本文研究了免液氦约瑟夫森压标准装置，利用两级 G–M 制冷机及低温恒温系统，为超导约瑟夫森结阵提供 4 K 左右低温环境。该装置主要包括低温制冷机、配套压缩机、低温恒温器、温度控制模块、约瑟夫森结阵及阵偏置电流源、微波射频模块、真空分子泵、电压精密测量系统等。图 1 为免液氦量子电压标准的结构示意图。

1.1 免液氦低温环境下的结阵超导特性分析

在构建基于约瑟夫森效应原理的免液氦量子电压标准系统时，低温系统是最关键的组件之一[12]。基于小型制冷机的低温恒温系统设计目标是为约瑟夫森结阵列芯片提供 4 K 左右稳定的工作温度，以确保结阵产生稳定可靠的超导量子电压台阶。

在液氦型量子电压系统中，核心量子器件，即约瑟夫森结阵芯片始终浸没在液氦中，芯片的所有表面都与液氦直接接触，热传导是通过热对流的方式产生的，即使在向结阵注入大功率微波的交流激励时，微波功率耗散引起的发热效应对结阵的温度并无显著影响，结阵始终工作于液氦沸点温度，芯片将保持 4.2 K 的温度。然而，在基于 G–M 制冷机的低温系统中，超导结阵芯片保持在真空状态下，没有热对流，因此结阵芯片的冷却完全通过芯片底座与低温样品台之间的热传导来实现。这种直接冷却技术的应用，将以往的超导结阵芯片(固体)与液氦(液体)直接接触的导热方式，转变为超导结阵芯片(固体)和制冷机冷台(固体)的导热方式，不可避免地带来低温固体热传导领域面临的诸多问题[13-16]。



1—真空罩；2—电压输出连接器；3—Sub-Miniature-A(SMA)接头；4—制冷机；5—支撑座；6—连接总成

图 1 免液氦量子电压标准系统结构图

Fig.1 Diagram of cryocooled Josephson voltage standard system

另一方面，制冷过程中，G–M 制冷机气缸活塞经历周期性运动，结阵芯片的吸热周期等于 G–M 制冷机气缸活塞运动的周期。气缸活塞的周期性运动在低温下产生温度波动，通常 G–M 制冷机二级冷头在 4.2 K 下的温度波动约为±100 mK[17]。由于超导约瑟夫森结阵量子效应的电学表征与结阵表面温度密切相关，当免液氦量子电压标准系统采用 G–M 制冷机控制超导约瑟夫森结阵温度时，制冷机冷头近±100 mK 的温度波动会产生非常严重的问题。

为尽可能减小温度波动，通常的做法是：在制冷机冷头与被冷却样品(例如结阵芯片)间，加装比被冷却样品热容量高得多的固体材料(例如铜)。然而，大热容材料增加了温度稳定时间，使得快速降低被冷却样品的温度很难，因此该方式降低了制冷机的有效制冷能力，提高了可实现的最低温度。采用上述方法，很难在 4 K 下将被冷却样品的温度精确控制在±5 mK 以内。

1.2 低温恒温系统的设计

为确保约瑟夫森结阵获得稳定的工作温度，低温恒温器的设计难点之一是减少热辐射[2]。与通过传导或对流进行的热传递不同，辐射传热不需要任何介质或物质。在免液氦量子电压系统中，由于低温系统外部腔室暴露在室温下，所以外部腔室内的所有部件都持续暴露在接近 295 K 的辐射热源下，这会给低温系统增加大量热负荷，并阻止制冷机冷头达到 4 K 左右的温度。另一方面，约瑟夫森结阵的工作温度接近 4 K，比室温低了近 290 K，由于热辐射是温差的四次方函数，因此需仔细研究和分析系统热负荷的重要来源，以有效降低热辐射和温度波动。

为减少热辐射漏热的影响，必须创建辐射屏蔽(冷屏)来包围被冷却物体，且辐射屏蔽必须热固定到冷头，以进行逐级冷却。因此，本文采用了两级冷屏设计，用于减少结阵表面的热辐射。借助螺栓和法兰，将一级和二级冷屏安全地固定在制冷机的一级和二级冷头。通过一级冷屏降低辐射漏热后，在二级冷屏表面获得了仅 40 K 左右的工作温度，从而将约瑟夫森结阵芯片的暴露温度从室温(295 K)降低到 40 K 左右，热负荷降低 1800 倍以上。图 2 为本文设计和研制的低温恒温器结构示意图，图 3 为二级冷屏内部结构示意图。

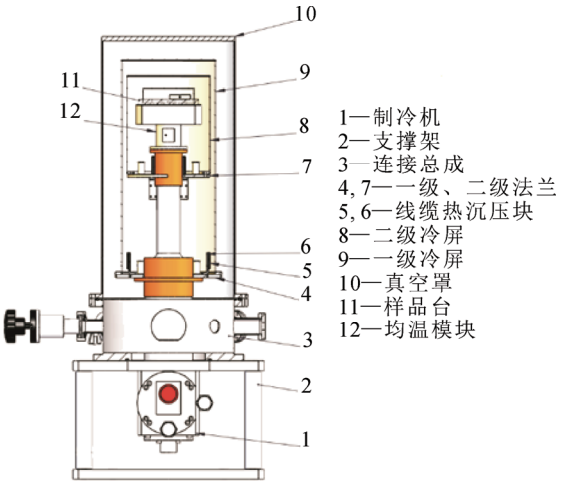


图 2 低温恒温器结构示意图

Fig.2 Structure diagram of cryostat

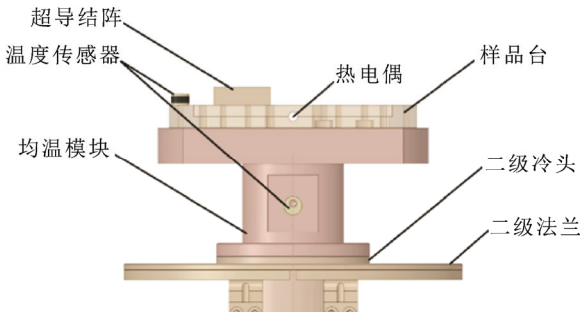


图 3 二级冷屏内部结构图

Fig.3 Internal structure diagram of 2nd stage thermal shield

2 低温辐射漏热与接触热传导模型

约瑟夫森结阵产生超导量子电压的必要条件之一是较大功率微波的注入[18-19]，微波在结阵芯片表面产生大量热负荷，会加剧低温系统的不稳定。温度传感器、热电偶和超导结阵芯片通过一级、二级冷屏及真空室，与低温恒温器外部的控制器和电子测量装置连接，这些连接导线的一端处于接近 4 K 的温度，另一端处于室温(295 K)，从而构成了室温环境到冷头的直接传热路径，所引起的热负荷足以破坏超导结阵芯片安装处的温度平衡。此外，这些传输引线暴露在接近 290 K 的温差下会给系统带来电噪声。为更好地分析和降低低温系统热辐射和结阵温度波动，本文提出了一级、二级冷头辐射漏热模型和超导结阵接触热导模型。

2.1 二级冷头辐射漏热模型

二级冷头辐射漏热主要包括：二级冷屏与一级冷屏的辐射漏热、真空夹层残余气体分子导热以及同轴线缆等传输引线漏热。

2.1.1 二级冷屏与一级冷屏间辐射漏热 Q_{s1}

基于传热学理论，依据斯蒂芬–波尔兹曼定律计算两个同心圆柱间的辐射漏热[20]，二级冷屏与一

级冷屏的辐射漏热计算模型可表示为

$$Q_{s1}=\frac{A_s\sigma(T_2^4-T_1^4)}{\frac{1}{\varepsilon_1}+\frac{A_s}{A_f}\left(\frac{1}{\varepsilon_2}-1\right)} \tag{1}$$

式中：ε_1、ε_2 分别为二级、一级冷屏表面发射率；A_s 为二级冷屏的表面积；A_f 为一级冷屏的表面积；σ 为黑体辐射系数；T_2 为一级冷屏的表面温度；T_1 为二级冷屏的表面温度。

2.1.2 一二级冷屏间真空夹层残余气体分子导热 Q_{s2}

依据高真空绝热夹层中残余气体传热理论[21]，一二级冷屏真空夹层残余气体导热 Q_{s2} 分析模型为

$$Q_{s2}=k_s\alpha_s p_s(T_2-T_1)A_s \tag{2}$$

式中：k_s 为二级冷屏和一级冷屏之间残余气体导热系数；α_s 为热适应系数；p_s 为空间内夹层真空度。

2.1.3 传输引线辐射漏热 Q_{s3}

恒温器内部二级冷屏与一级冷屏之间的传输引线共 5 种，分别为：①微波同轴传输线；②温度传感器引线；③热电偶引线；④约瑟夫森结阵偏置电流传输引线；⑤结阵电压输出引线。上述测量及传输引线辐射漏热 Q_{s3} 的计算模型[20]为

$$Q_{s3}=\sum_{i=1}^{5}\frac{m_iS_i\gamma_i(T_2-T_1)}{\eta_i} \tag{3}$$

式中：m_i 为第 i 种传输引线的数量；S_i 为一级冷屏和二级冷屏间第 i 种引线的截面积；γ_i 为第 i 种引线在 T_1~T_2 温度范围内的平均热导率；η_i 为一级冷屏和二级冷屏间第 i 种传输引线的长度。

因此恒温器内部二级冷头的总漏热为

$$Q_s=Q_{s1}+Q_{s2}+Q_{s3} \tag{4}$$

2.2 一级冷头辐射漏热模型

一级冷头辐射漏热主要包括：一级冷屏与常温筒体(真空罩)的辐射漏热真空夹层残余气体分子导热以及同轴线缆等传输引线漏热。

2.2.1 一级冷屏与真空罩间辐射漏热 Q_{f1}

基于传热学理论，一级冷屏与真空罩间辐射漏热计算模型与表示为

$$Q_{f1}=\frac{A_f\sigma(T_3^4-T_2^4)}{\frac{1}{\varepsilon_1}+\frac{A_f}{A_v}\left(\frac{1}{\varepsilon_2}-1\right)} \tag{5}$$

式中：ε_3 为真空罩表面发射率；A_v 为真空罩的表面积；T_3 为真空罩的表面温度。

2.2.2 二级冷屏与真空罩间真空夹层残余气体分子导热计算模型 Q_{f2}

该真空夹层残余气体导热 Q_{f2} 分析模型为

$$Q_{f2}=k_f\alpha_f p_f(T_3-T_2)A_f \tag{6}$$

式中：k_f 为一级冷屏和真空罩之间残余气体导热系数；α_f 为热适应系数；p_f 为空间内夹层真空度。

2.2.3 传输引线辐射漏热 Q_{f3}

恒温器内部二级冷屏与一级冷屏之间的传输引线共 5 种，同 2.1.3 节所述，测量及传输引线辐射漏热 Q_{f3} 的计算模型为

$$Q_{f3}=\sum_{i=1}^{5}\frac{n_iA_i\lambda_i(T_3-T_2)}{\delta_i} \tag{7}$$

式中：n_i 为第 i 种传输引线的数量；A_i 为真空罩和一级冷屏间第 i 种引线的截面积；λ_i 为第 i 种引线在 T_2 到 T_3 温度范围内的平均热导率；δ_i 为真空罩与一级冷屏间第 i 种传输引线的长度。

因此恒温器内部二级冷头的总漏热为

$$Q_f=Q_{f1}+Q_{f2}+Q_{f3} \tag{8}$$

2.3 超导结阵接触热导模型

在基于制冷机的免液氦量子电压标准低温系统中，低温固体热传导是超导结阵芯片唯一的散热方式，尤其在注入大功率微波后，结阵表面温度急剧上升，因此有必要最大化超导结阵芯片和样品台、均温模块等安装件接合处的接触热导。在宏观上，超导结阵芯片和样品台铜表面之间存在良好的热接触，但在微观上，两固体接触热导的大小取决于两者的热性质、接触压力、界面材料、表面几何形状等参数。特别是接触表面粗糙度、平坦度、波纹度等因素，使得两固体表面之间缺乏良好的接触，图 4 为两固体接触面表面特征及传热示意图。因此，建立接触力学模型来预测和仔细研究超导结阵接触热导非常重要。

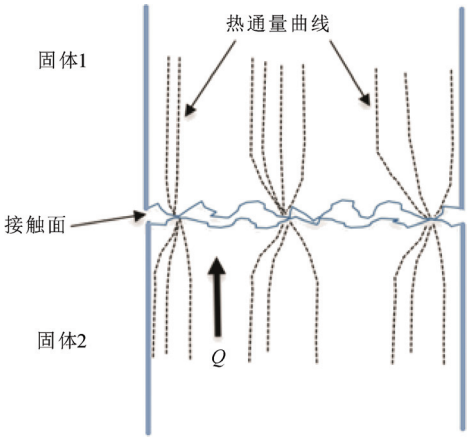


图 4 两固体接触面表面特征及传热示意图

Fig.4 Characteristics and heat transfer diagram of two solid interfacing surfaces

根据界面导热[21]和接触热阻[22]理论，两个名义上互相接触的固体表面，实际上接触仅发生在一些离散的面积元上，在未接触的界面之间的间隙常常充满了气隙层，热量将以导热的方式穿过这种气隙层，这种情况与固体表面完全接触相比，增加了附加的传递阻力，称为接触热阻。接触热导 h_c 与接触热阻互为倒数，其定义[21]为

$$h_c = \frac{\phi}{\Delta T} \tag{9}$$

式中：ϕ 为热通量，即单位时间通过单位面积的热能；ΔT 为两接触的界面温度差。

热通量 ϕ 的定义[22]为

$$\phi = \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}S}\left(\frac{\mathrm{d}Q}{\mathrm{d}t}\right) \tag{10}$$

式中：Q 为通过接触界面的热流速率；S 为实际接触面积。

接触热导 h_c 的值随几个特性参数变化，例如温度、表面几何形状的宏观和微观参数、接触材料、接触表面的压力、界面材料等[23]。本文模型详细考虑了上述几个重要参数，重点研究超导结阵芯片底面和样品台底座顶面之间，以及样品台底面与均温模块之间的接触热导。由于超导结阵芯片是在硅衬底上制造的，结阵芯片的底座是无氧铜材质，结阵芯片与样品台之间为高纯铟片，均温模块除使用无氧铜块外，还采用高纯铟片、低温脂及镀铝 PET 薄膜。因此，该研究中考虑的几种材料是已知的，并将模型参数范围缩小到铜、硅、铟以及 PET 膜之间的热导。

接触表面上的热通量 ϕ 取决于固体表面特性，并结合了固体接触面热导的经验公式[24-26]，即

$$h_c = C\left(\frac{k_m}{\xi}\right)^{m_1} T^{m_2}\left(\frac{p}{H_v}\right)^n \tag{11}$$

式中：ξ 为表面粗糙度；H_v 为接触材料中较软材料的硬度；P 为接触面压力；k_m 为接触材料的平均热导率；C、n、m_1 和 m_2 均为常数，可根据实验数据进行拟合得到。

将式(11)代入式(9)和式(10)，推导得到约瑟夫森结阵热流量方程为

$$Q = h_c S\Delta T = C\left(\frac{k_m}{\xi}\right)^{m_1} T^{m_2}\left(\frac{p}{H_v}\right)^n S\Delta T \tag{12}$$

通过数学计算表明，对于超导结阵芯片与芯片底座的接触表面积，芯片能够获得不超过 4.2 K 的温度。结阵芯片的正常超导高度依赖于芯片上超导结获得的温度。一旦超导材料铌被冷却到临界温度以下，少量的库珀电子对开始发生遂穿，这种从电阻相向超导相的转变，可通过超导结阵的显性特征 *I*–*U* 曲线来观察。

2.4 模型计算

为降低辐射漏热，二级冷屏和一级冷屏均为无氧铜镀金，查找数据得知二级冷屏表面发射率 ε_1 和一级冷屏表面发射率 ε_2 均为 0.05。夹层真空度 p_s 和 p_f 取值 1.0×10^{-2} Pa，系数 k_s 和 k_f 取值 1.2，热适应系数 α_s 和 α_f 取值 1，黑体辐射系数 σ=5.67×10^{-8} W/(m^2·K^4)。表 1 和表 2 分别为依据低温恒温器结构设计和材料选取，给出的二级冷头辐射漏热模型和一级冷头辐射漏热模型的参数。为简便计算，表 2 中不同引线平均热导率的取值与表 1 一致。

将表 1 中的参数代入式(1)—式(3)，计算得到二级冷屏与一级冷屏间的辐射漏热 Q_{s1}≈0.001 W，一、二级冷屏间真空夹层残余气体分子导热 Q_{s2} ≈0.052 W，传输引线辐射漏热 Q_{s3}≈0.387 W。代入式(4)计算得到恒温器内部二级冷头的总漏热 Q_s≈0.439 W。

表 1 二级冷头辐射漏热模型参数

Table 1 Radiation heat leakage model of 2nd cooling stage

序号	类型	参数	数值
1	二级冷屏	表面积 A_s/m^2	0.12
		表面温度 T_1/K	4.20
		表面发射率 ε_1	0.05
2	一级冷屏	表面积 A_f /m^2	0.26
		表面温度 T_2/K	40.00
		表面发射率 ε_2	0.05
3	微波引线	数量 m_1	1
		截面积 S_1/m^2	7.85×10^{-5}
		长度 η_1/m	0.50
		平均热导率 γ_1 /(W·(m·K)$^{-1}$)	33.70
4	温度传感器引线	数量 m_2	2
		截面积 S_2/m^2	7.07×10^{-6}
		长度 η_2/m	0.60
		平均导热率 γ_2 /(W·(m·K)$^{-1}$)	47.00
5	热电偶引线	数量 m_3	2
		截面积 S_3/m^2	7.07×10^{-6}
		长度 η_3/m	0.60
		平均导热率 γ_3 /(W·(m·K)$^{-1}$)	47.00
6	电流引线	数量 m_4	24
		截面积 S_4/m^2	3.14×10^{-6}
		长度 η_4/m	1.00
		平均热导率 γ_4 /(W·(m·K)$^{-1}$)	35.00
7	电压引线	数量 m_5	2
		截面积 S_5/m^2	7.07×10^{-6}
		长度 η_5/m	1.00
		平均热导率 γ_5 /(W·(m·K)$^{-1}$)	47.00

将表 2 中的参数代入式(5)—式(7)，计算得到一级冷屏与真空罩间的辐射漏热 Q_{f1}≈3.953 W，一级冷屏和真空罩间真空夹层残余气体分子导热 Q_{f2}≈0.796 W，传输引线辐射漏热 Q_{f3}≈7.310 W。代入式(4)计算得到恒温器内部一级冷头的总漏热 Q_f≈12.059 W。

2 伏约瑟夫森结阵产生量子电压台阶所需的微波功率及偏置电流功率耗散约为 0.25 W，10 伏约瑟夫森结阵产生量子电压台阶所需的微波功率及偏置电流功率耗散约为 0.7 W，为同时兼容 2 伏和 10 伏结阵芯片，结合两级辐射漏热及接触热导模型，选用 RDK-415D 型 G–M 制冷机，一级冷头制冷功率为 35 W，二级冷头制冷功率为 1.5 W。

3 实验验证

在常温下，对免液氦量子电压系统的低温恒温器抽真空后，开启制冷机，在不向超导结阵芯片注入微波的情况下进行降温实验和温度稳定性实验。

3.1 开机降温实验

图 5 为开机后对恒温容器超导结阵芯片样品台温度的测量结果。从图 5 可以看出，开机 4.5 h 内样品台温度可从室温降至 4 K 以下。RDK–415D 型制冷机为紧凑型两级 G–M 制冷机，其通过周期性西蒙膨胀进行绝热放气而实现降温。在降温过程前期，样品台冷量主要来自一级冷头。随着降温时间增加，样品台温度逐步下降，当制冷机二级冷头(样品台附近)的温度低于一级冷头温度(约 50 K)时，在一级冷头持续制冷的作用下，二级冷头的漏热逐渐减少，因此，样品台温度的下降速率逐渐增大，当样品台温度降低到 20 K 以下时，制冷机二级气缸回热器温度进一步下降，气缸处压缩膨胀的气体含量进一步增加，氦气膨胀节流降温效果明显，因此温度下降速率显著增大。

3.2 温度稳定性实验

实验用控温仪带有两路温度传感器输入通道和两路独立的 PID 控制回路，其中控温仪的通道 A 连接均温模块上的温度传感器，本文选用单独标定后的 Lakeshore Cernox 型温度传感器，温度为 4.2 K 时，其温度稳定性指标优于±2 mK。

将超导结阵芯片样品台处控温至 4.0 K，向 2 伏约瑟夫森结阵注入频率 18 GHz，功率 199.5 mW 的微波，待温度稳定后，对样品台温度长期稳定性进行了测量，结果见图 6，图中，采样时间间隔为 1 s。

表 2 一级冷头辐射漏热模型参数

Table 2 Radiation heat leakage model of 1st cooling stage

序号	类型	参数	数值
1	一级冷屏	表面积 A_f/m^2	0.26
		表面温度 T_2/K	40.00
		表面发射率 ε_2	0.05
2	真空罩	表面积 A_v/m^2	0.60
		表面温度 T_3/K	295.00
		表面发射率 ε_3	0.10
3	微波引线	数量 n_1	1
		截面积 A_1/m^2	7.85×10^{-5}
		长度 δ_1/m	0.20
		平均热导率 λ_1/(W·(m·K)$^{-1}$)	33.70
4	温度传感器引线	数量 n_2	2
		截面积 A_2/m^2	7.07×10^{-6}
		长度 δ_2/m	0.30
		平均导热率 λ_2/(W·(m·K)$^{-1}$)	47.00
5	热电偶引线	数量 n_3	2
		截面积 A_3/m^2	7.07×10^{-6}
		长度 δ_3/m	0.30
		平均导热率 λ_3/(W·(m·K)$^{-1}$)	47.00
6	电流引线	数量 n_4	24
		截面积 A_4/m^2	3.14×10^{-6}
		长度 δ_4/m	0.30
		平均热导率 λ_4/(W·(m·K)$^{-1}$)	35.00
7	电压引线	数量 n_5	2
		截面积 A_5/m^2	7.07×10^{-6}
		长度 δ_5/m	0.30
		平均热导率 λ_5/(W·(m·K)$^{-1}$)	47.00

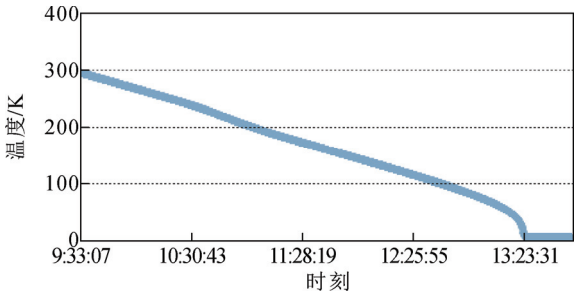


图 5 低温系统降温时间测量结果

Fig.5 Cooling time form room temperature to 4 K

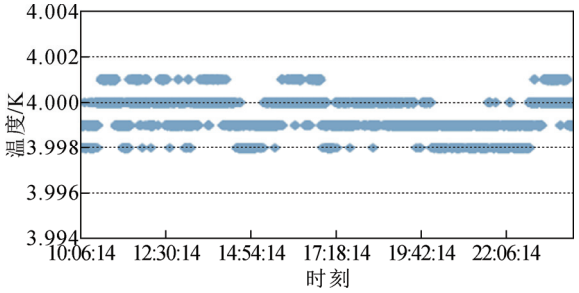


图 6 结阵芯片所在样品台处长期温度稳定性(14 h)

Fig.6 Measurement results of long-term temperature stability (14 hours)

从 14 h 内温度稳定性测量结果可以看出，结阵芯片所在样品台处温度波动在±2 mK 以内。

3.3 结阵超导特性实验

I–*U* 曲线可用于评估超导结阵芯片与温度相关的特性。如果结阵表面温度接近其工作所需温度的阈值，但波动较大时，结阵超导特性变得不稳定，尽管能观测到直流特性的临界电流大小，但临界电流与该结阵在液氦下的结阵临界电流特征不一致，且无法产生准确量子电压台阶；如果结阵温度高于使结阵超导的临界温度阈值，则结阵 *I*–*U* 曲线不显示超导特性(显示为电阻特性)。采用团队研制的 2 伏免液氦量子电压标准系统，对美国国家标准与技术研究院(NIST)制备的 2 伏可编程超导结阵进行了性能测试，测试过程中，结阵芯片所在样品台的控温点设定在 4.0 K。

在不注入微波的情况下，对 2 伏可编程结阵的直流超导特性(临界电流)进行了测试，该结阵共包含 12 个子阵列，每个子阵列超导临界电流的测量结果见表 3 最后一列，第一列为每个子阵列包含约瑟夫森结的个数(n_{jj})，从测量结果可以看出，12 个子阵列超导临界电流 I_c 均大于 9 mA，与液氦表现出了良好的直流超导特性。

对 2 伏可编程结阵芯片注入频率 18.05 GHz、功率 200 mW 的微波，测试其交流超导特性。结阵共包含约 5 万个超导−普通导体−超导(superconductor-normal metal-superconductor, SNS)结构的串联结，分为 12 个子阵列，表 3 中 I_p、I_n 为正向、负向量子电压台阶中心点电流值，β_p、β_0 和 β_n 分别为正向量子电压台阶宽度、0 台阶宽度、和负向量子电压台阶宽度。通常进行直流电压测量时，可编程约瑟夫森结阵的正、负量子台阶宽度大于 0.8 mA 视为可靠。

超导特性的测量结果直接反映了量子电压稳定性，正向量子电压台阶宽度(β_p)和负向量子电压台阶宽度(β_n)基本一致，且其量值越大，代表结阵量子态可承受的扰动电流越大，则结阵产生的量子电压台阶越稳定可靠。

从测试结果可以看出，在团队研制的免液氦量子电压系统(图 7)中，2 伏结阵芯片 12 个子阵列的 Shapiro 台阶宽度均大于 1.3 mA，结阵在无液氦环境下产生了良好的超导特性，验证了本文所述模型的准确性及低温恒温系统设计的可行性。

表 3 2 伏结阵交流流特性(量子电压台阶)测量结果

Table 3 Measurement results of AC superconductive characters

子阵列	结个数 n_{jj}	正向台阶中心电流 I_p/mA	正向台阶宽度 β_p /mA	负向台阶中心电流 I_n /mA	负向台阶宽度 β_n /mA	零台阶宽度 β_0 /mA	临界电流 I_c/mA
1	8800	13.20	1.84	−13.30	1.80	11.82	9.71
2	8800	13.10	1.35	−13.20	1.38	11.44	9.13
3	8798	13.30	2.06	−13.30	2.00	10.68	9.22
4	8800	12.90	1.52	−12.80	1.58	10.94	9.11
5	8796	12.80	1.73	−12.80	1.77	10.50	10.12
6	8792	13.00	1.89	−13.10	1.93	9.30	9.38
7	3888	12.60	2.20	−12.40	2.20	9.70	9.19
8	1296	12.80	2.75	−12.70	2.79	9.76	9.68
9	16	11.80	2.35	−11.90	2.31	10.31	9.72
10	48	12.20	2.62	−12.30	2.56	12.73	10.31
11	144	12.10	3.12	−11.90	3.13	11.02	9.98
12	432	12.30	2.54	−12.10	2.54	12.33	9.84



图 7 2 伏免液氦量子电压标准装置

Fig.7 2 volt cryocooled Josephson voltage standard system

4 结论

1）针对超导约瑟夫森结阵的极高温度敏感性这一特点，分析了低温恒温系统的辐射漏热路径，深入研究了结阵与冷头间的低温固体热传导特性，建立了两级辐射漏热及结阵接触热传导模型，给出了免液氦量子电压标准低温系统热负荷及达到温度平衡所需的最小制冷功率评估方法。

2）根据所提出的模型，设计了具有两级冷屏结构的低温恒温系统，可为约瑟夫森结阵列芯片提供了 4 K 左右的稳定工作温度。在向结阵注入 18 GHz、20 dB 微波至温度平衡后，结阵所在样品台处的温度波动小于±2 mK，验证了模型的有效性。

3）在设计的低温恒温系统中进行了 2 伏可编程结阵的超导特性测试实验，所有子阵列的量子电压台阶宽度测量结果均大于 1.3 mA，且临界电流、量子电压台阶宽度及中心电流位置与液氦环境下的测量结果具有良好的一致性，表明该结阵在无液氦环境下产生的量子电压台阶稳定可靠。

参考文献 References

[1] RÜFENACHT A, HOWE L A, FOX A E, et al. Cryocooled 10 V programmable Josephson voltage standard[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2015, 64(6): 1477-1482.

[2] HOWE L A, BURROUGHS C J, DRESSELHAUS P D, et al. Cryogen-free operation of 10 V programmable Josephson voltage standards[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2013, 23(3): 1300605.

[3] MARUYAMA M, TAKAHASHI H, KATAYAMA K, et al. Evaluation of linearity characteristics in digital voltmeters using a PJVS system with a 10-K cooler[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2015, 64(6): 1613-1619.

[4] 高 原，李红晖，沈雪槎，等. 10 V 约瑟夫森结阵电压基准[J]. 现代计量测试，2000(3)：12-16.
GAO Yuan, LI Honghui, SHEN Xuecha, et al. 10 V Josephson junction array voltage primary standard[J]. Modern Measurement and Test, 2000(3): 12-16.

[5] 高 原，李红晖，沈雪槎. 我国的 1 V 及 10 V 约瑟夫森量子电压基准装置[J]. 现代测量与实验室管理，2005，13(3)：3-6.
GAO Yuan, LI Honghui, SHEN Xuecha. 1 V and 10 V Josephson voltage standard in NIM[J]. Modern Measurement and Test, 2005, 13(3): 3-6.

[6] REYMANN D, XUE S Q, LIU R M, et al. Comparison of the Josephson voltage standards of the NIM (China) and the BIPM[J]. Metrologia, 1996, 33(5): 475-478.

[7] 薛寿清，刘瑞珉，李红晖，等. 中国计量科学研究院与国际计量局约瑟夫森电压基准之间的直接和间接比对[J]. 现代计量测试，1996(5)：24-28.
XUE Shouqing, LIU Ruimin, LI Honghui, et al. Direct and indirect comparisons of Josephson junction array voltage standards between BIPM and NIM[J]. Modern Measurement and Test, 1996(5): 24-28.

[8] SOLVE S, CHAYRAMY R, STOCK M, et al. Comparison of the Josephson voltage standards of the NIM and the BIPM (part of the ongoing BIPM key comparison BIPM. EM-K10. b)[J]. Metrologia, 2014, 51(4): 01009.

[9] 焦玉民，康 焱，朱 珠. 用于免液氦量子电压装置的制冷系统研制[J]. 宇航测试技术，2021，41(5)：32-35.
JIAO Yumin, KANG Yan, ZHU Zhu. Research on the cryocool system for liquid helium free quantum voltage device[J]. Journal of Astronautic Metrology and Measurement, 2021, 41(5): 32-35.

[10] WANG Z M, LI H H, HE Q, et al. Operation of compact cryocooled 2V programmable Josephson voltage standard at NIM[C]// 14th IEEE International Conference on Electronic Measurement & Instruments. Changsha, China: IEEE, 2019: 361-368.

[11] WANG Z M, LI H H, LIAO F J, et al. Research on cryocooled programmable Josephson voltage standard at NIM[C]// 2020 Conference on Precision Electromagnetic Measurements. Denver, USA: IEEE, 2020: 1-2.

[12] BURROUGHS C J, BENZ S P, DRESSELHAUS P D, et al. Flexible cryo-packages for Josephson devices[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2005, 15(2): 465-468.

[13] YÜNCÜ H. Thermal contact conductance of nominaly flat surfaces[J]. Heat and Mass Transfer, 2006, 43: 1-5.

[14] KUMAR S S, RAMAMURTHI K. Influence of flatness and waviness of rough surfaces on surface contact conductance[J]. Journal of Heat Transfer, 2003, 125(3): 394-402.

[15] KUMAR S S, RAMAMURTHI K. Thermal contact conductance of pressed contacts at low temperatures[J]. Cryogenics, 2004, 44(10): 727-734.

[16] WILLIAMSON M, MAJUMDAR A. Effect of surface deformations on contact conductance[J]. Journal of Heat Transfer, 1992, 114(4): 802-810.

[17] BURROUGHS C J, WEBBER R J, DRESSELHAUS P D, et al. 4 K cryocooler implementation of a DC programmable voltage standard[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2003, 13(2): 922-925.

[18] ANDERSON P W, DAYEM A H. Radio-frequency effects in superconducting thin film bridges[J]. Physical Review Letters, 1964, 13(6): 195-197.

[19] SHAPIRO S, JANUS A R, HOLLY S. Effect of microwaves on Josephson currents in superconducting tunneling[J]. Reviews of Modern Physics, 1964, 36(1): 223-225.

[20] 杨世铭，陶文铨. 传热学[M]. 3 版. 北京：高等教育出版社，1998.
YANG Shiming, TAO Wenquan. Heat transfer[M]. 3rd ed. Beijing, China: Higher Education Press, 1998.

[21] 陶文铨. 数值传热学[M]. 2 版. 西安：西安交通大学出版社，2001.
TAO Wenquan. Numerical heat transfer[M]. 2nd ed. Xi'an, China: Xi'an Jiaotong University Press, 2001.

[22] FLETCHER L S. Recent developments in contact conductance heat transfer[J]. Journal of Heat Transfer, 1988, 110(4b): 1059-1070.

[23] PRASHER R A, SHIPLEY J, PRSTIC S, et al. Thermal resistance of particle laden polymeric thermal interface materials[J]. Journal of Heat Transfer, 2003, 125(6): 1170-1177.

[24] ROSOCHOWSKA M, BALENDRA R, CHODNIKIEWICZ K. Measurements of thermal contact conductance[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 135(2/3): 204-210.

[25] VELÁSQUEZ J E, CHEJNE F, HILL A F J. Mathematical model and simulation of a thermal diffusion column[J]. Journal of Heat Transfer, 2003, 125(2): 266-273.

[26] MAITI A, MAHAN G D, PANTELIDES S T. Dynamical simulations of nonequilibrium processes-heat flow and the Kapitza resistance across grain boundaries[J]. Solid State Communications, 1997, 102(7): 517-521.



王曾敏(通信作者)
1981—，女，博士，副研究员
主要从事约瑟夫森量子电压基标准及其应用研究
E-mail: wangzm@nim.ac.cn

WANG Zengmin
Ph.D.
Associate professor
Corresponding author



李红晖
1967—，女，研究员
主要从事量子电压基标准相关研究
E-mail: hh.li@nim.ac.cn

LI Honghui
Professor



段梅梅
1986—，女，硕士，高工
主要从事电能计量技术、数字化电能量值传递技术研究
E-mail: cbadmm@163.com

DUAN Meimei
Senior engineer



王致君
1993—，女，硕士，实习研究员
主要从事约瑟夫森电压及其应用研究
E-mail: wangzhijun@nim.ac.cn

WANG Zhijun

收稿日期 2022-10-30 修回日期 2023-01-29 编辑 卫李静