

2018年国家科技进步奖提名项目公示

一、项目名称

温度单位重大变革关键技术研究

二、提名者及提名意见

提名者：国家质量监督检验检疫总局

提名意见：本项目是全球唯一使用两种独立物理原理的方法实现玻尔兹曼常数精确测定的研究成果，突破长期困扰温度单位重新定义要求独立物理原理测定的技术瓶颈，为国际单位制基本单位温度的重新定义做出了关键性的贡献。测定结果双双被国际科技数据委员会(CODATA) 2014 年和 2017 年基本物理常数调整值收录，是继张钟华院士和罗俊院士的贡献之后，第三个来自中国对 CODATA 的基本物理常数调整值有贡献的成果。本项目的研究从国内的零基础起步，取得了国际领先的成果。在国际科技常数委员会（CODATA）2017 年收录的全球 19 项对国际单位制（SI）重新定义有贡献的成果中，中国的两项贡献全部来自于本项目，为我国在国际基本单位重新定义这个国际计量界的历史性事件中赢得了话语权。

本项目研究的创新方法和技术“无感应误差磁通量子调控和全匹配量子电压噪声源技术”和“虚拟定程圆柱声学共鸣法”的应用，使得项目的研究成果成为相应方法的全球最好结果，并且为我国在温度单位新定义的实施中持续地取得话语权、温度量值准确传递奠定了坚实的技术基础。本项目的定程圆柱声学共鸣法和量子电压标定的噪声法作为原级方法，列入了国际温度咨询委员会新温度单位实现指南。本项目的研究成果，为依照将要发布的国际单位制(SI)第9版手册，实现温度单位的定义奠定了坚实的基础、积累了丰富的经验。

经审查，本项目推荐材料真实有效。原级法测定物理基本常数的研究技术难度很大，本项目在测量方法和技术上有重大创新，解决了玻尔兹曼常数测定的关键技术问题，为玻尔兹曼常数的最终定值和温度单位的重新定义做出了关键性的贡献；测定结果双双被国际科技数据委员会 2014 年和 2017 年基本物理常数调整

值收录,为我国在国际基本单位重新定义这个国际计量界的历史事件中赢得了话语权,为我国实现温度单位的新定义、温度量值的准确传递奠定了坚实的技术基础,研究成果达到了国际领先水平,具有重大的社会效益。

鉴于以上所述,提名该项目参评国家科技进步奖一等奖。

三、项目简介

国际单位制(SI)是构成统一的全球计量单位体系的基石,国际单位制的核心是七个基本单位,它们构成了人类认识自然的基本标尺。米制公约最高权力机构国际计量大会(CGPM)2011年24届决议正式接纳基于基本物理常数全面重新定义SI基本单位的建议,从而拉开国际单位制量子化重大变革的大幕。七个基本物理量之一的温度是科学研究和尖端技术发展、工业生产和人类社会生活不可或缺的关键物理参数,其单位将被基于玻尔兹曼常数重新定义。

国际温度咨询委员会(CCT)规定温度单位重新定义的必要条件为:基于至少两种独立物理原理,分别实现不确定度小于 3×10^{-6} 的玻尔兹曼常数测定;国际科技数据委员会(CODATA)依据全球最高准确度玻尔兹曼常数测定结果给出的调整值不确定度小于 1×10^{-6} 。本项目在美、英、法、意等国均致力于单一的球形声学共鸣法测定玻尔兹曼常数研究的背景下,研制了独创的定程圆柱声学共鸣热力学温度计和量子电压标定的噪声热力学温度计,实现两种独立方法测定玻尔兹曼常数的不确定度分别达到 2.0×10^{-6} 和 2.7×10^{-6} ,为相应方法的全球最好结果。测定结果双双被国际科技数据委员会(CODATA)2014年和2017年基本常数调整值收录,且满足温度单位重新定义的必要条件,从而对玻尔兹曼常数的最终定值和温度单位重新定义做出关键性贡献。

项目的主要科技创新包括:1)全球唯一使用两种独立方法实现玻尔兹曼常数精确测定,突破长期困扰温度单位重新定义要求独立物理原理测定的瓶颈;2)提出了反极性补偿脉冲驱动约瑟夫森结阵调控磁通量子的方法、实现了直流至1MHz范围内量子准确度任意电压波形的合成技术,将量子电压噪声源感应电压误差降低2~3个量级,提出并采用超细铍铜同轴传输网络,解决了不同温度、不同频率下传输函数失配难题,实现了量子电压噪声源和热噪声源的全匹配;3)

首次提出并实现了虚拟定程圆柱声学共鸣原级测温法，自主设计和研制了高能量品质因子和高测量信噪比的圆柱声学微波谐振系统，将圆柱声学法测定玻尔兹曼常数的不确定度降低了 4 倍，在国际上首次基于测量轴向声学共鸣频率测定单原子气体摩尔质量，解决了国际上玻尔兹曼常数测量结果的分歧。

项目共发表学术论文 70 篇，SCI 收录 33 篇（第一作者和通讯作者 23 篇），被引用 388 次、他引 207 次，5 篇第一作者论文被计量学国际顶级期刊《Metrologia》评为年度亮点（Highlights），2 篇第一作者论文获评 IOP 出版公司高引用论文。授权专利 2 项。项目研究成果 4 次被邀请在国际温度大会等会议做主旨和特邀报告。项目组成员于 2012 年当选国际温度咨询委员会主席，1 人获亚太青年计量科学家(IIZUKA)奖，1 人受邀加入 CODATA 基本物理常数任务组。

国际计量局局长及欧美国国家计量院（前）院长等组成的国际计量咨询委员会评价本项目成果为世界级的。CODATA 2017 收录的全球 19 项对 SI 重新定义有贡献成果中，中国的两项全部来自本项目。对 SI 重新定义的关键性贡献为我国赢得了话语权。本项目的两种原级方法均被 CCT 列入 SI 重新定义后的温度单位实现指南，使中国计量科学研究院成为全球少数、亚洲唯一可按新定义实现温度单位量值的研究机构，奠定了我国在温度计量领域全球顶级的地位。项目的创新性技术为实现温度的免校准测量、尤其是极端环境的热力学温度测量提供了技术路线。

四、客观评价

1. 国际计量咨询委员会对本项目的评价

由国际计量委员会秘书长 James McLaren 博士、国际计量局局长 Martin Milton 博士、国际计量局荣誉局长兼英国皇家学会院士 Terry Quinn 博士，国际单位制咨询委员会主席兼德国联邦物理研究院院长 Joachim Ullrich 博士，美国国家标准技术研究院前院长 Willie May 博士，英国国家物理实验室前院长 Brian Bowsher 博士，欧洲计量组织前主席 Michael Kuehne 博士等专家联合组成的国际计量咨询委员会（IAB）评价本项目为“world-class work on the Boltzmann constant (在玻尔兹曼常数测量方面世界级的工作)”。

2. 国家科技支撑计划项目课题《玻尔兹曼常数测量及热力学温度基准研究》专家验收意见

验收专家组一致认为课题“首次建立了定程圆柱声学法的玻尔兹曼常数测量装置，测量玻尔兹曼常数的相对标准不确定度达到 4.1×10^{-6} ，是目前国际计量界已获得的少数几个最高准确度的测量结果之一；采用压电陶瓷传感器取代麦克风作为声激发传感器，将频率测量准确度提高了一个数量级；对扰动非缔合圆柱声学共鸣模式的各种非理想因素的形成机理进行了理论分析和实验研究，形成了完整的圆柱声学共鸣腔非理想因素扰动的量化修正体系。”

3. 质检公益性行业科研专项项目《量子电压标定的基准噪声温度计研制及应用》专家验收意见

以张广军院士为组长的验收专家组一致认为项目“研制了国内首套量子电压标定的噪声温度计装置...，性能优于国际上仅有的美国 NIST 和日本 NMIJ 的同类型装置。...测量得到的玻尔兹曼常数...是目前国际上噪声法测量玻尔兹曼常数的最好结果。...取得的主要创新成果有：在国际上首次提出一种新的量子电压波形合成方法，...显著降低了量子电压参考噪声信号中的感应电压误差，...研制出四通道交叉关联电路，实现了对参考噪声源和待测噪声源的同时测量，...使量子电压源与待测噪声源功率及传输线传输函数失配成都小于 0.1%，增加了测量带宽。”

4. 国际温度咨询委员会新国际单位制任务组主席 Joachim Fischer 博士对中国计量科学研究员(NIM)声学法和噪声法测定玻尔兹曼常数研究的评价

“NIM 使用圆柱共鸣腔建立了特殊、独立的声学气体温度计。平坦的热噪声与量子电压噪声谱比值表明其系统不确定度达到全球最低水平。因为其创新的设计思想，NIM 获得了顶级的测量结果并对 CODATA2017 基本物理常数平差作出显著贡献。CODATA2017 基本物理常数平差是 2018 年即将采用的新 SI 的基础。NIM 噪声温度计研究结果满足了 CCT 提出的两种独立物理方法测量玻尔兹曼常数不确定度小于 3×10^{-6} 的要求，使温度单位新定义得以采用。NIM 在温度单位新定义中的贡献不可或缺。”

玻尔兹曼常数测量的国际权威、美国国家标准技术研究院(NIST)的 Moldover 博士、英国国家物理实验室(NPL)的 de Podesta 博士、意大利国家计量院(INRIM)的 Gavioso 博士等指出“NIM 从无开始，到当前世界的前沿位置，发展了独特的

圆柱气体声学共鸣温度计,在这个国际竞争中的一些特别的领域占据领导地位”。NIST 的量子电压项目负责人 Benz 博士指出“中国计量科学研究院研究者建立了一套性能卓越的量子电压标定的噪声温度计系统,证明了世界纪录级的低频率响应。发展了一种新型的零补偿量子电压波形合成方法,能够大幅降低合成量子电压波形中的感应电压误差。是迄今为止电学方法测量玻尔兹曼常数最低不确定度的结果”。

5. IEEE Trans. Appl. Supercond. 期刊论文审稿意见

“作者提出了一种用于脉冲驱动约瑟夫森任意波形合成系统的新的波形编码方法。该方法能够使得合成的波形具有更高的幅度准确度。这是推动约瑟夫森任意波形合成系统在计量领域应用的一大进步”。

6. Metrologia 期刊论文审稿意见

“该结果是新的 CODATA 基本物理常数调整值的一个重要输入值, ..., 该新的玻尔兹曼常数测量结果基于完全不同于已有气体测温法的独立方法导出, 且不确定度小于 3ppm, 因此满足 CCT 设定的温度单位新定义的第二个条件”。

7. Nature Physics 评论性论文评价 NIM 噪声法测定玻尔兹曼常数研究

“德国 PTB 的介电常数测温法和中国 NIM 的噪声测温法测量玻尔兹曼常数得到约 4×10^{-6} 的不确定度, 这两个实验是满足 CCT 重新定义温度单位第二条要求的最佳候选”

8. 科技日报 2011 年 1 月 7 日报道 (我国进入国际计量届玻尔兹曼常数“第一梯队”。

五、推广应用情况

5.1 推广应用情况

- 1) 本项目团队研制了独创的原级定程圆柱腔声学共鸣热力学温度计和原级量子电压标定的噪声热力学温度计, 测定玻尔兹曼常数不确定度分别达到 2.0×10^{-6} 和 2.7×10^{-6} , 全球唯一用两种独立方法满足温度单位重新定义的必要条件的研究, 对玻尔兹曼常数的最终定值和温度单位重新定义做出了关键性的贡献; 测定结果双双被国际科技数据委员会(CODATA) 2014 年和 2017 年基本物理常数调整值收录, 是继张钟华院士和罗俊院士的贡献之后, 第三个

来自中国对 CODATA 的基本物理常数调整值有贡献的成果。

- 2) 项目研究所产生的成果,用于与清华大学的合作研究,研制第四代核反应堆(高温气冷堆)堆芯热力学温度测量的原级声学气体热力学温度计,原级性的工作原理和创新的技术设计,可使得温度计在高温高辐射环境中长期定地测量,无需校准。合作研究开展了采用内长为 120 mm 的石墨圆柱声学共鸣腔结合两个长度为 1 m 声波导管测量氦气共振频率的研究,获得了信噪比优于 0.01%的氦气共振峰,为在线校准高温气冷堆的普通温度计奠定了技术基础。
- 3) 德国国家物理技术研究院(PTB)温度和同步辐射处负责人 Gerhard Ulm 博士访问中国计量科学研究院,量子电压标定的噪声法测温的研究给他留下深刻影响,指出 PTB 决定结束介电常数法测定玻尔兹曼常数的研究后,将进入到量子电压标定的噪声法测温研究中,目标是研制水三相点以上温度范围的原级量子电压标定的噪声热力学温度计。派出 Alexander Kirste 博士赴本项目组学习量子电压标定的热力学温度计的相关技术,邀请本项目成员赴 PTB 访问,做技术帮助。
- 4) 改善标准套管铂电阻温度计长期稳定性的技术成果,已被应用于中国运载火箭技术研究院北京航天计量测试技术研究所、中国科学院理化技术研究所标准套管铂电阻温度计的校准和量值传递。国内《标准套管铂电阻温度计》检定规程的技术条件是,标准套管铂电阻温度计相邻两次在水三相点的检定结果的偏差小于 5 mK 为合格。采用本项目的技术,标套管温度计的年稳定性达到(0.02~0.03) mK。

5.2 社会效益

本项目是全球唯一采用两种独立工作原理测定玻尔兹曼常数的研究,取得了国际领先的成果,对国际单位制重大变革的玻尔兹曼常数定值和温度单位重新定义做出了关键性的贡献,CODATA 2017 收录的全球 19 项对 SI 重新定义有贡献成果中,中国的两项贡献全部来自本项目,为我国在国际基本单位重新定义这个国际计量界的历史性事件中赢得了话语权。

本项目研究的创新方法和技术、积累的热物理参数尖端测量技术和知识、研制的原级热力学温度计,为我国在温度单位新定义的实施中持续地取得话语权、温度量值准确传递奠定了坚实的技术基础。

六、主要知识产权证明目录

[1]中国发明专利，一种交流量子电压波形合成方法，ZL201410820318.4，2017.09.01，中国计量科学研究院（屈继峰，周琨荔），有效；

[2]中国发明专利，一种以量子电压为参考的四通道噪声温度计，ZL201310745962.5，2017.01.25，中国计量科学研究院（屈继峰，周琨荔），有效。

七、主要完成人情况

张金涛，排名 1，研究员，中国计量科学研究院。

对本项目贡献：项目第一负责人，提出定程圆柱声学共鸣法测定玻尔兹曼常数的总体设想，负责制定了总体实验方案；设计了第一代定程圆柱声学共鸣腔、双波长现场实时测量圆柱腔内长的技术方案；发现了国际上声学共鸣法测定玻尔兹曼常数的结果存在重大分歧的原因，提出了解决方案并参加了问题的解决；负责声学共鸣法测定数据的总体分析和结果发表，所有测定结果的发表论文的通讯作者和第一责任人；对项目创新点 1、3 有主要贡献。在该项目中投入工作量达 80 %。

屈继峰，排名 2，副所长/研究员，中国计量科学研究院。

对本项目贡献：项目第二负责人，总体负责量子电压标定的噪声温度计研制及噪声法测量玻尔兹曼常数研究，负责噪声法实验系统的设计、技术问题的分析和解决、实验和结果分析及处理、测量的不确定评定，提出并和课题组实现噪声法研究中相关方法和技术创新。对项目创新点 1、2 有主要贡献。在该项目中投入工作量达 80 %。

林鸿，排名 3，研究员，中国计量科学研究院。

对本项目贡献：项目骨干，负责建立了完整的声学共鸣实验系统、自动控制系统和数据采集分析系统；设计了压电陶瓷声学信号激励和接收传感器，研究了压电陶瓷传感器对声学共鸣频率的修正模型；设计了双波长测长系统的现场测量部件；负责开展了圆柱声学共鸣法测定玻尔兹曼常数的首次实验和实验结果的分析。对项目创新点 1、3 有主要贡献。在该项目中投入工作量达 80 %。

冯晓娟，排名 4，副研究员，中国计量科学研究院。

对本项目贡献：项目骨干，负责圆柱腔声学共鸣实验非理想因素效应的分析和实验数据的分析处理；设计了微波谐振和声学共鸣组合共鸣腔体，开展了微波谐振法测定圆柱内长的研究；采用声学法测定了氩气的摩尔质量；负责声学共鸣法测定玻尔兹曼常数的实验数据总体分析。对项目创新点 1、3 有主要贡献。在该项目中投入工作量达 80 %。

周琨荔，排名 5，博士后，中国计量科学研究院。

对本项目贡献：主要负责研制量子电压标定的噪声热力学温度计的数据采集电路，实现了无感交流量子电压合成方法，分析了放大器非线性失真的影响，解决了继电器切换电路的串扰问题，负责噪声热力学温度计的实验。对项目创新点 2 有主要贡献。在该项目中投入工作量 80 %。

段宇宁，排名 6，中国计量科学研究院，院党委书记/副院长，研究员。

对本项目贡献：提出使用两种独立方法测定玻尔兹曼常数，项目建议和论证的主要参加人，参与两种方法实验方案的总体设计和实验结果的不确定度评定。对项目创新点 1 有主要贡献。在该项目中投入工作量 10 %。

段远源，排名 7，教授，清华大学。

对本项目贡献：项目声学共鸣法测定玻尔兹曼常数研究课题的建议书和论证书的主要参加人；作为课题研究内容的一部分，开展了测温气体热物性精密测量的研究。在该项目中投入工作量达 20 %。

孙建平，排名 8，副研究员，中国计量科学研究院。

对本项目贡献：项目声学共鸣法的主要参加人，设计建立了双波长激光干涉法测定圆柱腔内长的装置，编制了数据处理软件。在该项目投入工作量达 30 %。

张凯，排名 9，博士后，清华大学。

对本项目贡献：参与双波长测长系统、现场测量部件的改进；负责圆柱声学共鸣实验系统的圆柱腔体、压力舱的图纸设计，部件安装调试；参与实验系统的数据采集和自动控制软件的编制和调试；设计了圆柱共鸣腔主动控温系统；设计

了圆柱微波谐振腔，主要参与了微波谐振测量腔体内长的实验研究和实验数据分析；负责声学共鸣法测定玻尔兹曼常数的实验。对项目创新点 3 有贡献。在该项目投入工作量达 50 %。

闫小克，排名 10，研究员，中国计量科学研究院。

对本项目贡献：为项目研制具备氢氧同位素分析指标的高准确度水三相点容器，并与德国联邦物理技术研究院（PTB）、意大利国家计量院（INRiM）开展水三相点容器国际比对，保证了水三相点量值的国际等效，为项目研究提供了高准确度的水三相点参考。在该项目投入工作量达 20 %。

八、完成人合作关系说明

项目第一、二、三、八、十完成人是中国计量科学研究院玻尔兹曼常数测量研究创新团队的成员，第一完成人是该团队的负责人。

第二完成人是第五完成人在中国计量科学研究院博士论文研究的副指导教师。第五完成人博士毕业后进入中国计量科学研究院，继续该项目的博士后研究，第二完成人是其博士后研究的导师。

第六完成人是第九完成人的博士生导师，第一完成人是第九完成人硕士研究论文的副指导教师。第六完成人长期指导创新团队的研究。

第七完成人是该项目的子课题负责人，与中国计量科学研究院的团队有长期的合作研究关系，是第三、四完成人的博士生导师，第九完成人博士后研究的导师。

项目骨干在同一个创新团队，长期从事该项目的研究。

上述情况属实，如有虚假愿意承担相应责任。