

能量天平及千克单位重新定义研究进展

李正坤 张钟华 鲁云峰 白洋 许金鑫 胡鹏程 刘永猛 由强 王大伟 贺青 谭久彬

Progress of joule balance and redifination of Kilogram

Li Zheng-Kun Zhang Zhong-Hua Lu Yun-Feng Bai Yang Xu Jin-Xin Hu Peng-Cheng Liu Yong-Meng  
You Qiang Wang Da-Wei He Qing Tan Jiu-Bin

引用信息 Citation: [Acta Physica Sinica](#), 67, 160601 (2018) DOI: 10.7498/aps.67.20180581

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20180581>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2018/V67/I16>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[频差偏差对全视场外差测量精度的影响](#)

Effect of frequency difference deviation on full-field heterodyne measurement accuracy

物理学报.2018, 67(2): 020601 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20171837>

[利用金刚石氮-空位色心精确测量弱磁场的探索](#)

Measurement of weak static magnetic field with nitrogen-vacancy color center

物理学报.2017, 66(23): 230601 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.230601>

[相敏式激光啁啾色散光谱技术在高吸收度情况下的应用](#)

Phase sensitive chirped laser dispersion spectroscopy under high absorbance conditions

物理学报.2017, 66(12): 120601 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.120601>

[利用非锁定飞秒激光实现太赫兹频率的精密测量](#)

High-precision measurement of terahertz frequency using an unstabilized femtosecond laser

物理学报 2016, 65(15): 150601 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.150601>

[计算电容中 Fabry-Perot 干涉仪测量位移的相位修正方法](#)

Method of phase correction of displacement measurement using Fabry-Perot interferometer in calculable capacitor

物理学报.2016, 65(11): 110601 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.110601>

专题: 精密测量物理

## 能量天平及千克单位重新定义研究进展\*

李正坤<sup>1)†</sup> 张钟华<sup>1)‡</sup> 鲁云峰<sup>1)</sup> 白洋<sup>1)</sup> 许金鑫<sup>1)</sup> 胡鹏程<sup>2)</sup> 刘永猛<sup>2)</sup>  
由强<sup>3)</sup> 王大伟<sup>2)</sup> 贺青<sup>1)</sup> 谭久彬<sup>2)</sup>

1) (中国计量科学研究院电磁所, 国家质检总局电学量子重点实验室, 北京 100029)

2) (哈尔滨工业大学超精密光电仪器工程研究所, 哈尔滨 150001)

3) (清华大学电机系, 北京 100084)

(2018年3月31日收到; 2018年6月4日收到修改稿)

质量单位千克是国际单位制7个基本单位中惟一个仍以实物定义和复现的基本单位. 作为一种实物, 其量值必然会因为环境因素及使用时的磨损而发生变化. 但由于缺少更高一级的参考标准对其进行考察, 国际千克原器的真实变化情况无从得知. 国际计量委员会建议采用普朗克常数对千克重新定义, 号召各个国家开展普朗克常数的精密测量研究工作, 并要求至少有三种独立方案提供有效测量数据. 自20世纪70年代起, 英、美等国采用功率天平方案进行研究, 国际阿伏伽德罗常数合作组织则采用了X射线单晶硅密度的方案. 为了应对国际单位制的重大变革, 2006年中国计量科学研究院提出了用能量天平法测量普朗克常数的新方案, 其特点是可避免国外方案中困难的动态测量. 2013年原型实验装置研制成功, 证实了能量天平方案原理可行. 此后, 中国计量科学研究院开始了新一代能量天平装置的研制. 2017年5月, 中国计量科学研究院提交了普朗克常数的测量结果, 不确定度为 $2.4 \times 10^{-7}$  ( $k=1$ ), 该数据被国际科学数据委员会收入参考数据库. 但由于数据的不确定度尚未进入 $10^{-8}$ 量级, 未被用于普朗克常数的定值. 目前中国计量科学研究院正对几项主要的不确定度来源进行研究, 预计在未来的两年内可达 $10^{-8}$ 量级的不确定度.

关键词: 普朗克常数, 千克, 能量天平, 重新定义

PACS: 06.20.-f, 06.20.F-, 06.20.Jr, 07.05.Fb

DOI: 10.7498/aps.67.20180581

## 1 引言

## 1.1 对普朗克常数进行精密测量的需求和意义

基本物理常数是指真空中光速 $c$ 、普朗克常数 $h$ 等在物理学基本定律中出现的常数, 其准确值对精密物理实验极为重要. 基本物理常数的精密测量与国际单位制(International System of Units, SI)也有着密切关系<sup>[1]</sup>. 国际单位制是国际计量大会(General Conference of Weights and Measures, CGPM)于1960年采纳和推荐的一种单位制<sup>[2]</sup>, 应

用广泛. SI包含7个基本单位, 分别是长度单位米、时间单位秒、质量单位千克、电流单位安培、温度单位开尔文、发光强度单位坎德拉和物质的量单位摩尔, 这7个基本单位也是计量基准溯源的最终依据.

经典计量中所用的计量基准主要是实物基准, 在受到物理和化学过程的影响时, 实物基准所保存的量值会发生缓慢的变化, 已不能满足现代工业和科学研究的要求. 此外, 若实物基准由于战争、地震等灾难而被损毁, 该单位的量值也将中断而无法复现. 20世纪量子物理学的光辉成就为量子基准的建立提供了重要的理论基础, 量子基准是将基本单位溯源到物理常数或量子物理效应, 不受宏观因素

\* 国家自然科学基金重大研究计划重点项目(批准号: 91536224)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: lzk@nim.ac.cn

‡ 通信作者. E-mail: zzh@nim.ac.cn

的影响, 所保存的基本单位量值不会随时间发生漂移. 即使基准装置由于意外而被损毁, 采用相同的原理研制一套装置, 就可对该基本单位的量值进行重新复现. 而且与实物基准相比, 量子计量基准的稳定性和准确度可以大幅度提高. 因此, 量子基准取代实物基准是现代计量的趋势 [3].

在电学计量领域, 由于约瑟夫森效应 (Josephson effect, 1962年由 B. D. Josephson 从理论上预言, 1963年 P. W. Anderson 和 J. M. Rowell 从实验上证实) [4] 和量子化霍尔效应 (quantum Hall effect, 1980由德国的 V. Klitzing 发现) [5] 这两项荣获诺贝尔物理学奖的科学发现, 并分别应用于量子电压基准和量子电阻基准的建立, 使得直流电压和直流电阻基准的相对不确定度从  $10^{-6}$ — $10^{-7}$  提升至  $10^{-9}$ — $10^{-10}$  量级, 这充分说明了量子计量基准的巨大优越性 [6].

目前, 质量单位千克是惟一一个仍需要溯源到实物基准的 SI 基本单位, 其量值由目前存放于法国巴黎国际计量局的“国际千克原器 (International Prototype of Kilogram, IPK)”定义和复现. IPK 是一个高度和直径均为 39 mm 的圆柱体, 其材料是 90% 铂和 10% 铱的合金, 这样可以保证其性能稳定、不易磨损 [7]. 国际计量局根据 IPK 的材质、形状和要求, 加工复制了一些副原器 (彼此的偏差在几微克) 分发给米制公约的各成员国, 作为这些国家的原器或质量基准. 各国的千克原器、副原器与 IPK 每隔三、四十年才比对一次, 比对结果表明, 不同国家的铂铱合金砝码相对 IPK 的平均漂移率达到了  $50 \mu\text{g}$ , 如图 1 所示 [8].

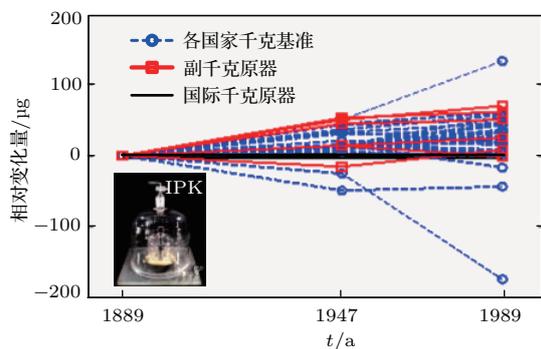


图 1 千克原器、副原器及各国质量基准的比对结果  
Fig. 1. The comparison of the official copies and national copies with IPK as the reference.

在每次比对时, 认为保存在国际计量局的 IPK 未变, 而各国的千克原器和作证基准在变化. 但

考虑到这些原器 (砝码) 的加工材料、工艺、年代与 IPK 均相差无几, 因此严格意义上说, 保存在国际计量局的 IPK 可能也已有  $10^{-8}$  量级的变化. 但由于缺少更高一级的参考, IPK 的变化情况无从得知.

此外, 由于 7 个基本单位之间互有关联, 如图 2 所示, 因此, 千克原器的变化还会对安培、坎德拉和摩尔造成影响.

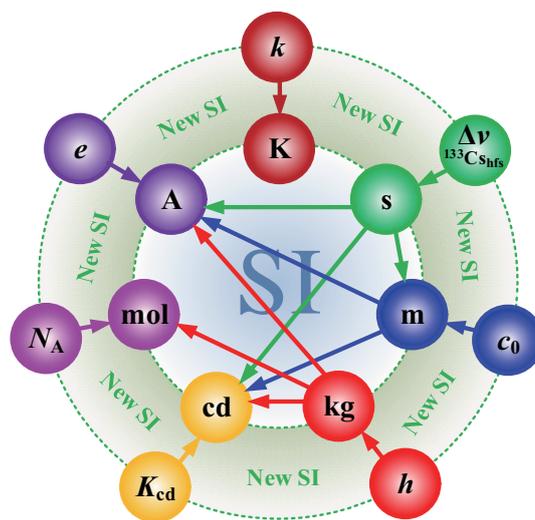


图 2 国际单位制 7 个基本单位之间的关系  
Fig. 2. The relationship between 7 SI base units.

为了实现千克单位的量子化, 国际上提出了多种方案进行探索. 但遗憾的是, 到目前为止还没有一种直接的量子物理效应可以用于复现质量单位千克, 而需要通过其他已经建立的量子基准实现千克单位的量子化. 由于电学领域已经建立了约瑟夫森量子电压基准和量子化霍尔电阻基准, 因此自 20 世纪 70 年代以来, 国际上陆续提出了超导磁悬浮、电压天平、金离子射线收集、功率天平 (国外称为 Watt Balance 或 Kibble Balance) 等多种电学方案 [9], 通过特定的装置, 建立电学量与质量之间的联系. 此外, 由于阿伏伽德罗常数  $N_A$  和普朗克常数  $h$  的乘积可以高精度地测定 (相对标准不确定度为  $10^{-10}$  量级), 因此 X 射线单晶硅密度法 (X-ray crystal density, XRCD, 也称硅球方案) 测量阿伏伽德罗常数  $N_A$  的方案也可以用来确定普朗克常数  $h$  的量值.

2005 年, 国际计量委员会 (International Committee for Weights and Measures, CIPM) 起草了关于采用基本物理常数定义部分 SI 基本单位的框架草案, 建议采用普朗克常数  $h$ 、基本电荷量  $e$ 、玻

尔兹曼常数  $k$ 、阿伏伽德罗常数  $N_A$  这 4 个基本物理常数分别定义质量单位 kg、电流单位 A、温度单位 K 和物质量单位 mol (如图 2 所示), 并鼓励有能力的国家级实验室开展相关科研工作, 为重新定义这四个基本单位积累实验数据. 采用 SI 基本单位的新定义后, 上述 4 个基本物理常数就成为无误差常数.

根据国际计量委员会单位制委员会 (Consultative Committee for Units, CCU) 的决议, 千克的新定义将采用如下方式表述: 千克, kg, 是质量的单位. 它被定义为: 当普朗克常数的数值准确等于  $6.62607015 \times 10^{-34}$  Js 时的数值, 其单位与  $\text{kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}$  等效, 此处的米和秒分别由光速和铯频率定义<sup>[10]</sup>.

根据国际计量委员会质量及相关量咨询委员会 (Consultative Committee for Mass and Related Quantities, CCM) 2013 年提出的建议, 质量单位千克的新定义应当满足以下四个条件<sup>[11]</sup>: 1) 一致性, 至少有三种独立方案提供相对标准不确定度小于  $5 \times 10^{-8}$ , 且相互一致的测量结果; 2) 不确定度, 至少有一种方案的测量结果的相对标准不确定度不大于  $2 \times 10^{-8}$ ; 3) 溯源性, 国际计量局保存的原器和工作基准、各个普朗克常数测量装置和硅球方案所用到的标准砝码要尽可能直接地与 IPK 进行比对, 即溯源至 IPK; 4) 有效性, 将来千克重新定义以后的复现和传递过程, 要符合国际计量委员会互认协议的要求.

功率天平方案和硅球方案将千克与普朗克常数  $h$  或者阿伏伽德罗常数  $N_A$  联系起来, 但就其原理而言, 均不是严格意义上的量子测量, 只是在其中的某个环节上应用了已有的量子基准. 与约瑟夫森量子电压标准和量子化霍尔电阻基准所基于的单纯的宏观量子效应相比较, 均存在着实验装置复杂、涉及的相关被测量繁多等问题, 这一方面增加了研究内容的复杂程度 (英国、美国、瑞士等采用功率天平方案进行了 20—30 年不等的时期即是证明), 另一方面给后期的运行维护也造成了一定的负担. 因此, 客观上说上述途径均不是理想的方案, 但目前的情况下, 在没有发现更优的方案之前, 各国也只能采用上述方案进行研究.

## 1.2 国内外研究进展及现状

关于普朗克常数  $h$  的精密测量, 目前占主导地位的是硅球方案和功率天平方案, 这两种方案的原

理简要介绍如下.

### 1.2.1 硅球方案

(1) 式是硅球法测量阿伏伽德罗常数  $N_A$  的原理公式<sup>[12]</sup>,

$$N_A = \frac{M_{\text{Si}} n_{\text{Si}}}{\rho_{\text{Si}} V_{\text{Si}}} = \frac{8M_{\text{Si}}}{\rho_{\text{Si}} a^3}, \quad (1)$$

式中  $M_{\text{Si}}$  为硅摩尔质量, 通过同位素稀释质谱法和多集电极耦合等离子体质谱法可准确测定;  $\rho_{\text{Si}}$  为硅球的密度,  $a$  为单个晶格的边长,  $^{28}\text{Si}$  球的单个晶格中有 8 个硅原子, 因此  $n_{\text{Si}} = 8$ . 硅球的同位素组成、质量、体积、密度及晶格参数, 可通过对硅球表面原子量级的化学和物理方法测量确定; 而杂质的浓度和梯度, 可以红外光谱法进行修正<sup>[12]</sup>.

由于硅球的制作工艺非常复杂、成本昂贵, 在 2015 年之前世界上可用于测量的硅球仅有两颗, 为 2007 年由德国和澳大利亚科学家共同制作. 测量时所涉及的测量技术也包含了物理学、化学等多个学科, 单独靠一个国家的能力无法完成, 因此德国联邦物理研究院 (Physikalisch-Technische Bundesanstalt, PTB) 联合了意大利、日本、澳大利亚等国组成国际阿伏伽德罗常数合作组织 (International Avogadro Cooperation, IAC) 进行联合攻关. 2011 年, IAC 发表的  $N_A$  的测量相对不确定度为  $3 \times 10^{-8}$  ( $k = 1$ )<sup>[12]</sup>. 此后, 由于测试所用的硅球受损, 无法进行测量. 2015 年, IAC 对硅球修复之后重新进行了测量, 发表的  $N_A$  的相对不确定度为  $2 \times 10^{-8}$  ( $k = 1$ )<sup>[13]</sup>. 2012 年, IAC 重新制作了一批硅球, 同位素丰度比旧硅球有所提高, 测量技术也有所更新. 2017 年, IAC 和日本国家计量院 (National Metrology Institute of Japan, NMIJ) 发表了分别采用新、旧硅球测得的  $N_A$  数据, 相对不确定度分别为  $1.2 \times 10^{-8}$  ( $k = 1$ )<sup>[14]</sup> 和  $2.4 \times 10^{-8}$  ( $k = 1$ )<sup>[15]</sup>, 但是两者之间的相对偏差为  $5.2 \times 10^{-8}$ .

### 1.2.2 功率天平方案

功率天平法由英国国家物理实验室 (National Physical Laboratory, NPL) 的 Kibble 博士于 1975 年提出<sup>[16]</sup>, 其原理是通过一套天平装置建立机械功率和电功率之间的联系. 而电功率可以溯源至约瑟夫森量子电压基准和量子化霍尔电阻基准. 功率天平方案的测量过程分为两个模式: 测力模式和测速度模式<sup>[17]</sup>, 如图 3 所示.

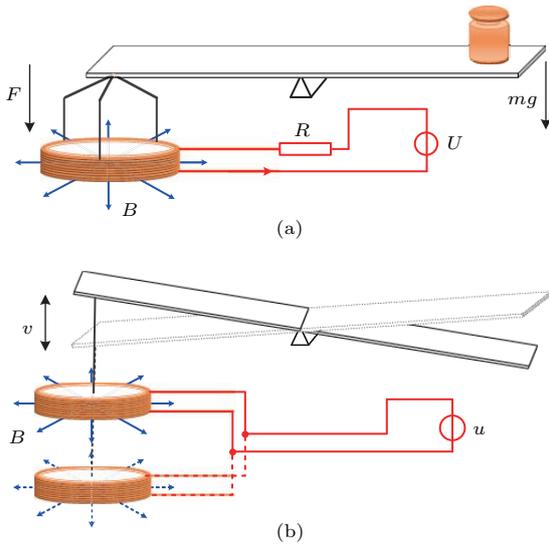


图3 功率天平方案原理 (a) 测力模式; (b) 速度模式  
 Fig. 3. The principle of watt balance. (a) Force phase; (b) the velocity phase.

在图3(a)所示的测力模式中,当天平平衡时,有

$$BLI = mg, \quad (2)$$

(2)式中的  $B$  为径向磁场,  $L$  为线圈的有效长度,这两个参数都无法高准确度的测量. 为了避免对它们直接进行测量, Kibble 博士增加了一个速度模式. 在此模式中, 使线圈在磁场中以速度  $v$  匀速运动切割磁力线, 进而产生感应电动势  $\varepsilon$ ,  $\varepsilon$  可用(3)式表示. 其中也有  $BL$ , 由(2)式和(3)式可得(4)式.

$$BLv = \varepsilon, \quad (3)$$

$$mgv = \varepsilon I = \frac{U}{R}, \quad (4)$$

(4)式中的  $I$  为测力模式中悬挂线圈通入的恒定电流值, 可以通过测量悬挂相串联的采样电阻  $R$  上的压降  $U$ , 进而通过  $I = U/R$  得到;  $\varepsilon$  和  $U$  可以溯源至约瑟夫森量子电压标准;  $R$  可以溯源至量子化霍尔电阻标准. 这两种量子标准的量值可以由(5)式、(6)式和(7)式表示<sup>[15,16]</sup>:

$$\varepsilon = \frac{nf_1}{K_J} = \frac{nf_1}{(2e/h)}, \quad (5)$$

$$U = \frac{nf_2}{K_J} = \frac{nf_2}{(2e/h)}, \quad (6)$$

$$R = R_H(i) = \frac{R_K}{i} = \frac{(h/e^2)}{i}. \quad (7)$$

由(5)—(7)式可得<sup>[18]</sup>

$$h = \frac{4gv}{in^2 f_1 f_2} \cdot m, \quad (8)$$

(8)式中的  $h$  为普朗克常数, 目前的相对不确定度为  $10^{-7}$  量级;  $i$  和  $n$  为正整数;  $m$  为质量, 溯源至

IPK 的相对不确定度为  $10^{-9}$  量级 (假定 IPK 不变);  $f_1, f_2$  为频率值, 相对不确定度在  $10^{-15}$  量级;  $g$  为重力加速度, 商用重力加速度仪的相对不确定度可以达到  $10^{-9}$  量级;  $v$  为速度, 可溯源至长度基准, 相对不确定度也可以达到  $10^{-9}$  量级. 此式表明, 理想情况下, 通过(8)式 (即功率天平装置), 可以在  $10^{-8}$  量级测得普朗克常数  $h$  的值.

(8)式建立了普朗克常数  $h$  与质量  $m$  之间的关系, 以目前 IPK 的值测量出普朗克常数的值, 然后把  $h$  定义成一个无误差即不确定度为 0 的常数. 把(8)式反过来, 即(9)式, 就可以用  $h$  重新定义质量  $m$ , 并用功率天平装置定期监测砝码的变化情况.

$$m = \frac{in^2 f_1 f_2}{4gv} \cdot h. \quad (9)$$

采用功率天平方案进行研究的有英国 NPL、美国标准技术研究院 (National Institute of Standards and Technology, NIST)、法国国家计量院 (Laboratoire national de Métrologie et d'essais, LNE)、国际计量局 (Bureau International des Poids et Mesures, BIPM)、加拿大国家研究委员会 (National Research Council of Canada, NRC)、瑞士计量院 (Swiss Federal Office of Metrology and Accreditation, METAS)、新西兰计量院 (Measurement Standards Laboratory of New Zealand, MSL)、韩国标准科学研究院 (Korea Research Institute of Standards and Science, KRISS)、土耳其计量院 (Ulusal Metroloji Enstitüsü, UME)、南非计量院 (National Metrology Institute of South Africa, NMISA) 和德国 PTB 等计量研究机构<sup>[9,19]</sup>. 中国计量科学研究院 (National Institute of Metrology, NIM) 提出的能量天平方案, 是在功率天平方案的基础上改进而来, 与功率天平方案既有类似之处, 也有不同之处, 后续内容中将详细对比介绍<sup>[20]</sup>.

各国的研究情况概述如下.

### 1) 英国 NPL

功率天平方案的原理最早是由英国的 Kibble 博士于 1975 年提出并开始研究的. 英国的第一套功率天平装置 MARK I 在 1990 年达到的相对不确定度为  $2 \times 10^{-7} (k = 1)$ <sup>[17]</sup>. 同年提出改进方案, 开始研制第二套功率天平装置 MARK II, 并采用钐钴 (SmCo) 永磁体材料作为磁场源. 2007 年 3 月发表的普朗克常数  $h$  的相对不确定度为  $6.6 \times 10^{-8} (k = 1)$ <sup>[21]</sup>. 此结果与 2007 年美国 NIST 发表的功率天平测量结果存在  $3 \times 10^{-7}$  的相对偏

差. 在寻找造成与NIST测量结果偏差的误差源未果的情况下, NPL管理层决定终止此项研究并将整套功率天平装置(包括约瑟夫森量子电压、量子化霍尔电阻和绝对重力仪等装置)卖给加拿大NRC. 2009年6月, 就在该套装置起运前夕, NPL的研究人员发现了可能导致这项误差及不确定度的来源, 但遗憾的是已经无法做实验进行验证. 普朗克常数数值变为 $6.62607123 \times 10^{-34} \text{ Js}$  ( $k = 1$ ), 相对不确定度降至 $1.7 \times 10^{-7}$  ( $k = 1$ ) [18].

2016年, NPL决定重新启动新一代功率天平装置的研究, 基于测振仪的原理, 主要的设计思路是单模式、小型化 [22], 目前正在进行原型机的研制工作.

## 2) 美国 NIST

继英国之后, 美国 NIST 于 1980 年开始进行功率天平方案的研究工作 [23], 截止目前已研制了四代功率天平实验装置, 相对不确定度达到 $10^{-8}$ 量级的有第三代 NIST-3 和第四代 NIST-4.

为避免传统的天平横梁引起悬挂线圈的侧摆问题, NIST 的研究人员采用了圆盘形滚轮代替传统的横梁结构, 这样悬挂线圈在上下运动的过程中, 等效臂长不变, 避免了侧向晃动引起的附加感应电动势. 在水平径向磁场的发生方面, NIST-3 最初采用通电的常温螺线管作为磁场发生源, 但是螺线管通电后的发热及场强不高的缺点引入了较大的不确定度. 后期研究中, NIST 研究人员采用了超导线圈组替代了常温螺线管 [24,25]. 2007 年, NIST 经过近三十年的摸索、提高, 发表了采用 NIST-3 测量普朗克常数的结果, 相对不确定度为 $3.6 \times 10^{-8}$  ( $k = 1$ ) [26].

2014 年, NIST 更换课题负责人和部分研究成员, 并对装置的一部分硬件进行了更新之后进行了重新测量, 所发表的新结果与 2007 年发表的数据相比变大了 $1.33 \times 10^{-7}$ , 相对不确定度为 $4.5 \times 10^{-8}$  ( $k = 1$ ) [27]. 2015 年 1 月, NIST 功率天平研究组将 2007 年和 2014 年的实验数据结果进行加权平均后, 发表了采用 NIST-3 对普朗克常数测量的最终数据结果,  $h = 6.62606979 \times 10^{-34} \text{ Js}$ , 相对不确定度为 $5.7 \times 10^{-8}$  ( $k = 1$ ) [28].

自 2013 年起, NIST 开始了第四代功率天平实验装置 NIST-4 的研制工作 [29], 主要的变化为采用永磁磁体替代了系统复杂、运行昂贵的超导线圈系统. 2017 年 NIST 发表了采用 NIST-4 测量普朗克常数的结果,  $h = 6.626069934 \times 10^{-34} \text{ Js}$ , 相对不

确定度为 $1.3 \times 10^{-8}$  ( $k = 1$ ) [30].

## 3) 瑞士 METAS

瑞士 METAS 自 1997 年开始功率天平项目的研究, 磁场采用 SmCo 永磁材料产生, 为了避免悬挂线圈的侧摆, 横梁采用了两端为圆弧形的跷跷板结构 [31]. 2011 年 METAS 发表了普朗克常数的测量结果, 相对不确定度为 $2.9 \times 10^{-7}$  ( $k = 1$ ) [32]. METAS 也成为继 NPL, NIST 后第三家可实际测量普朗克常数的功率天平装置.

由于第一代装置已经无法再进一步提高, 自 2011 年起, METAS 开始了第二代功率天平装置的研制. 主要的改进是采用一套 13 个铰链的柔性机构实现质量比较器和悬挂线圈的垂直运动, 用一套闭磁路磁体替换了原系统中的开放磁路磁体, 屏蔽性和抗干扰性得到提升 [33]. 原计划在 2017 年 7 月 1 日之前发表普朗克常数测量结果, 但未能如期发表, 目前仍处于调试阶段.

## 4) 法国 LNE

法国 LNE 于 2001 年开始功率天平方案的研究, 不同于以上三个国家的设计, LNE 采用特殊的弹性片梁来代替传统的天平刀口, 这样不但可以保证足够的灵敏度、平衡位置处良好的重复性, 还可以减弱由于刀口带来的滞后效应 [34]. 在磁体结构方面, LNE 采用了单边开口的磁路设计, 便于悬挂线圈的取出和放入, 简化了实验装置的调整过程.

2014 年 7 月 LNE 完成了功率天平实验装置的整体安装, 并进行了普朗克常数的测量, 相对不确定度为 $3.1 \times 10^{-7}$  ( $k = 1$ ) [35]. 经进一步改进后, 2017 年 6 月发表了其在空气中的测量数据, 相对不确定度为 $5.7 \times 10^{-8}$  ( $k = 1$ ) [36].

## 5) 国际计量局 BIPM

国际计量局 BIPM 于 2002 年启动功率天平项目 [37]. 与其他几家方案不同, 其最大创新之处在于将两个独立的测量过程(测力模式和速度模式)同时进行, 避免了磁场不稳定引入的不确定度. 但常温状态下, 线圈通过电流时产生的电压降与感应电压混杂在一起. 为消除其影响, BIPM 原计划使用超导线圈作为移动线圈来消除电阻的电压降和有关的焦耳热量, 但后期弃用此方案, 改为采用常温线圈. BIPM 最大的贡献是其提出的永磁磁体结构, 被瑞士 METAS、美国 NIST、韩国 KRIS 和我国借鉴采用 [38]. 2016 年 BIPM 测量普朗克常数的相对不确定度达到了 $3 \times 10^{-6}$  ( $k = 1$ ), 进一步的改进仍在进行中 [36].

## 6) 加拿大NRC

英国NPL在将其功率天平装置转卖给加拿大NRC之后并即将起运之时,找到了的 $2 \times 10^{-7}$ 不确定度的可能来源,但是遗憾的是此时已经无法再做实验验证.加拿大NRC于2009年接收NPL的功率天平装置之后,对NPL提到的误差来源进行了实验验证,并对配重加载机构、激光干涉仪系统的信噪比、外磁场补偿等几个方面进行了研究和优化.2012年,NRC发表了其获得功率天平实验装置后的第一次测量结果,相对不确定度为 $6.5 \times 10^{-8}$  [39].2014年,经进一步改进后,相对不确定度降至 $1.9 \times 10^{-8}(k=1)$  [40].2017年NRC测量普朗克常数的相对不确定度达到了 $9.1 \times 10^{-9}(k=1)$  [41].从1990年NPL开始研制这套实验装置起到2017年,历时近27年,经过NPL和NRC的科研人员前仆后继的努力,使这套装置成为目前国际上测量不确定度最小的一套装置.

## 6) 新西兰MSL

新西兰MSL在2009年提出了一种功率天平新方案 [42].该方案同样包括称重模式和动态模式,它的创新之处是采用压力天平代替传统的机械天平作为力的比较器.到目前为止,尚无测量结果发表.

## 7) 韩国KRISS

韩国KRISS自2012年启动功率天平项目的研究工作.其结构上借鉴了瑞士METAS的一些设计方案 [43],原计划在2017年7月1日之前发表相对不确定度小于 $5 \times 10^{-8}(k=1)$ 的数据,但由于进展不如预期,目前尚无数据发表.

## 8) 土耳其UME

土耳其UME于2014年启动功率天平项目的研究工作,部分方案借鉴了我国能量天平装置的设计思路,采用移动磁体而保持线圈静止的方式.UME原计划在2016年达到 $10^{-7}(k=1)$ 量级的相对不确定度,2017年达到 $< 5 \times 10^{-8}(k=1)$ 的相对不确定度 [44].但实际研究进展不如预期,其在2018年1月提交的论文中报告了初步的测量结果,普朗克常数 $h$ 的相对不确定度为 $6 \times 10^{-6}(k=1)$  [45].

上述国家的研究进展表明,普朗克常数的测量工作确实不是一项可以一蹴而就的工作,这也是千克单位的重新定义被称像寻找希格斯粒子一样艰难的世界六大科学难题之一的原因.

## 9) 德国PTB

2017年1月,德国PTB决定开展功率天平项目的研究工作.主要的思路是尽量采用商用化的成熟模块,快速地搭建成实验装置,而且装置整体要小型化,便于推广到商业领域.PTB的目标是在2018年中期达到 $2.7 \times 10^{-7}(k=1)$ 的相对不确定度(空气中),满足校准E2级砝码的需求;在2019年达到 $8.4 \times 10^{-8}(k=1)$ 的相对不确定度(真空中),满足校准E1级砝码的需求,目前尚无研究进展和数据发表.

## 10) 南非NMISA

南非NMISA计划于2017启动功率天平项目的研究工作,但目前尚处于构想阶段,只做了一些模型实验,还未制定具体的研究方案.

## 11) 中国NIM

为积极参与国际单位制的重大变革,并最终建立具有我国独立知识产权的量子质量基准,中国计量科学研究院张钟华院士于2006年提出了能量天平法测量普朗克常数的新方案 [20].2007年得到国家科技部支撑计划的支持开始进行研究,2011年研制成原理验证装置,2013年该装置的相对不确定度达到 $8.9 \times 10^{-6}(k=1)$  [46],后经进一步改进后达到 $2.6 \times 10^{-6}(k=1)$  [47],验证了能量天平方案可行.从2013年中期,张钟华院士团队在前期取得的经验的基础上,联合哈尔滨工业大学和清华大学,开始新一代能量天平装置的设计和研制.2016年研制成NIM-2型能量天平装置 [48],2017年5月采用NIM-2测量普朗克常数的相对不确定度为 $2.4 \times 10^{-7}(k=1)$  [49].再经过数年的努力,有望使相对不确定度降到 $10^{-8}$ 量级.能量天平方案与功率天平方案的主要区别在于采用积分法及静态测量,避免了功率天平法中在速度模式中需要测量瞬时速度和感应电势(微分方案)及动态测量这一重大困难.国际上也很重视我们的方法,因为用不同的方法可以互相比较,发现问题.如果不同方法所得的结果在不确定度范围内一致,则增强了测量结果的可靠性.因此,能量天平方案自提出之后,受到国际同行的关注.虽然从2007年开始能量天平方案的研究至今,已经近11年,但是与国际同行相比,我国的进度仍然是相对比较快的,表1为我国能量天平方案与国际同行的研究进度的对比情况.

表1 我国的能量天平与国际同行的研究进度对比情况  
Table 1. The years spent by the joule balance and the Kibble balance groups.

实验室	达到 $10^{-7}$ — $10^{-8}$ 量级起止年度	累计花费研究年数	普朗克常数 $h$ 相对不确定度
加拿大 NRC	2009—2014	5	从 $10^{-7}$ 到 $10^{-8}$
	2014—2017	3	从 $10^{-8}$ 到 $10^{-9}$
美国 NIST (NIST-4)	2011—2016	5	$U_r = 1.3 \times 10^{-8}$
法国 LNE	2001—2014	13	$U_r = 3.1 \times 10^{-7}$
	2014—2017	3	$U_r = 5.7 \times 10^{-8}$
瑞士 METAS	1997—2011	14	$U_r = 2.9 \times 10^{-7}$ (第1代装置)
	2008—今	10	尚未发表数据 (第2代装置)
国际计量局 BIPM	2003—今	15	尚未发表数据
—新西兰 MSL	2009—今	9	尚未发表数据
韩国 KRISS	2012—今	6	尚未发表数据
土耳其 UME	2014—今	4	$U_r = 6 \times 10^{-6}$
中国 NIM	2007.1—2013.5	6.5	$U_r = 2.6 \times 10^{-6}$ (NIM-1)
	2013.6—2017.5	4	$U_r = 2.4 \times 10^{-7}$ (NIM-2)
	2017.6—2019.12	2.5 (预期)	$U_r < 5 \times 10^{-8}$ (NIM-2)

鉴于千克单位的重新定义这项工作的难度极大, 2012年, 著名的学术期刊《Nature》把它列为世界六大科学难题之一 [50].

为了对普朗克常数  $h$  进行最终的定值并报送 CCU, 国际科学数据委员会 (Committee on Data for Science and Technology Task Group on Fundamental Constant, CODATA TGFC) 要求各国必须在 2017年7月1日之前向《Metrologia》提交发表数据, 文章必须通过同行的评阅并被接受才有效. 在截止期之前, 加拿大 NRC、美国 NIST、法国 LNE 和我国都提交了普朗克常数  $h$  的测量结果, IAC 和日本 NMIJ 分别提交了采用新、旧硅球测量  $N_A$  的结果. 国际计量局、瑞士、新西兰和韩国未提交文章及数据. 自 1990 年以来, 各国采用不同原理的装置对普朗克常数  $h$  进行测量的结果汇总如图 4 所示. 由于我国提交的数据的相对不确定度较大, 权重较小, 因此 CODATA 在最终的数据平差中, 只采用了自 2011 年以来相对不确定度小于  $6 \times 10^{-8}$  的  $h$  测量结果 [51,52], 如图 5 所示. 但是, 虽然被采用的数据的不确定达到了  $10^{-8}$  量级, 但各国之间的一致性存在问题. 为了消除这种不一致性, CODATA 将被采用的数据均乘了一个 1.7 的扩展因子, 表 2 为

最终的平差结果.

图 6 中给出了 CODATA 2017 最终采用的数据及平差结果. 为了消除各国数据之间的一致性, 表中所采用的数据均乘了一个 1.7 的扩展因子 (KB, 功率天平方案; XRCD, 硅球方案).

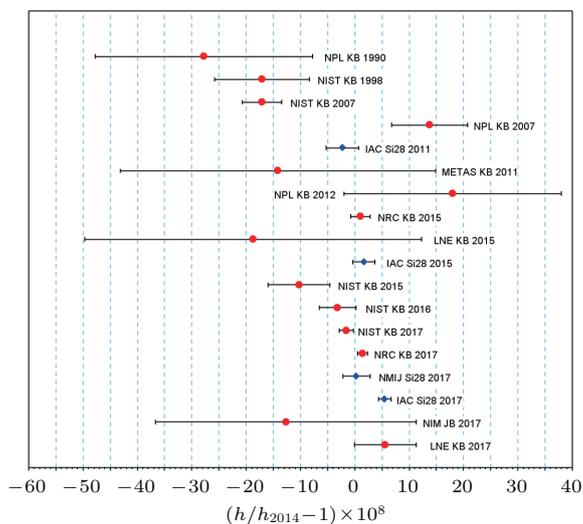


图4 自 1990 年以来的普朗克常数  $h$  的测量结果图 KB, Kibble Balance 功率天平; JB, Joule Balance 能量天平; Si28, 硅球方案  
Fig. 4. The measurement results of  $h$  obtained since 1990.

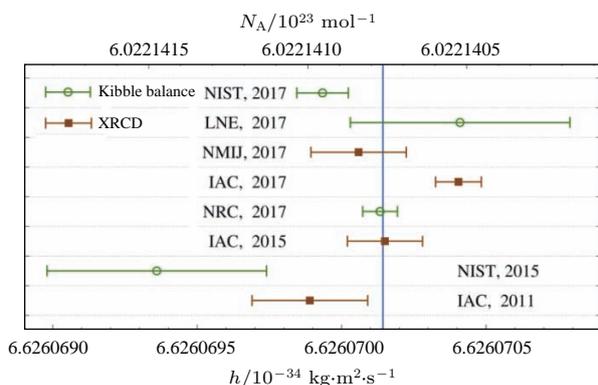


图5 自2011年以来相对不确定度小于  $6 \times 10^{-8}$  的  $h$  测量结果

Fig. 5. The measurement results of  $h$  with an uncertainty below  $6 \times 10^{-8}$ .

表2 CODATA 2017 对  $h$ ,  $e$ ,  $k$  和  $N_A$  的平差结果

Table 2. The final adjustment of the values of  $h$ ,  $e$ ,  $k$  and  $N_A$  by CODATA2017.

Quantity	Value	$u_r(k=1)$
$h$	$6.626\ 070\ 150(69) \times 10^{-34}$ Js	$1.0 \times 10^{-8}$
$e$	$1.602\ 176\ 6341(83) \times 10^{-19}$ C	$5.2 \times 10^{-9}$
$k$	$1.380\ 649\ 03(51) \times 10^{-23}$ J K $^{-1}$	$3.7 \times 10^{-7}$
$N_A$	$6.022\ 140\ 758(62) \times 10^{23}$ mol $^{-1}$	$1.0 \times 10^{-8}$

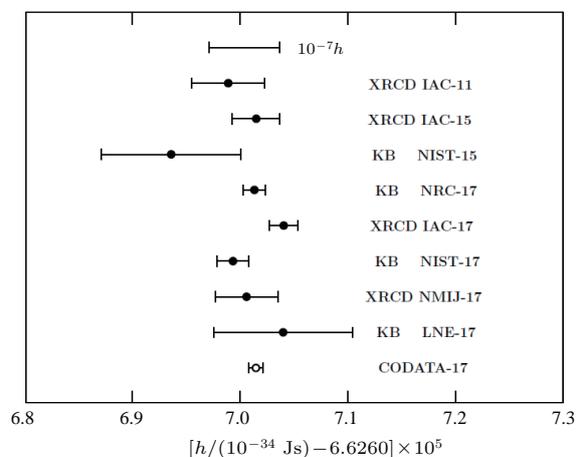


图6 CODATA 2017 最终采用的普朗克常数测量数据

Fig. 6. The data used for the final adjustment of  $h_{\text{CODATA-17}}$ .

### 1.3 进一步研究的必要性和意义

2017年9月4日, CODATA TGFC 召开会议讨论和确定了普朗克常数  $h$  的平差结果, 并报送 CCU. 2017年9月5—6日, 经 CCU 会议讨论, 决定向 CIPM 提交建议, 认为对千克等4个单位进行重新定义的条件已经成熟 [53]. 2017年11月, CIPM 召开会议, 批准了 CCU 的建议, 将在2018

年 CGPM 上正式讨论和启动千克单位重新定义的准备, 并计划于2019年5月20日国际计量日正式启用新定义 [54].

虽然 CCU 最终认为确认普朗克常数的数值并由此导出千克单位的条件已经具备, 决定向 CIPM 提交重新定义千克单位的建议, 但我国的能量天平项目仍有进一步研究的必要, 目前国际上其他国家也仍然在继续推进普朗克常数  $h$  测量的研究工作. 因为一旦实施千克单位的重新定义, 普朗克常数  $h$  将被确定为无误差常数, 而我国的能量天平装置如果也能达到  $5 \times 10^{-8}$  的相对不确定度, 该装置就可以反过来使用, 即用普朗克常数  $h$  对我国的千克原器进行定值并考察其长期稳定性.

我国应积极参与这一重大变革, 否则将来无法独立复现质量单位, 而需要到其他国家去溯源, 造成我国技术主权的不完整.

### 1.4 本项研究结果的意义

科学研究中最重视采用不同的方案对同一物理现象进行研究, 因此自能量天平方案首次于2006年在国际上提出之后, 就受到国际同行的关注. 虽然目前我国的测量不确定度与美国、加拿大的数据相比仍有一定的差距, 但与瑞士、国际计量局、韩国等相比, 我国的研究进度还是比较快的. 推进此项研究, 一方面可以为质量单位千克的重新定义做出贡献; 另一方面, 2019年千克单位的新定义重新实施之后, 如果我国的能量天平装置能达到  $10^{-8}$  量级, 将可用于自主复现质量单位千克的量值, 为维护我国质量基准的技术独立性打下坚实、可靠的基础.

## 2 能量天平法测量普朗克常数研究进展

### 2.1 能量天平方案原理

能量天平方案从功率天平方案发展而来, 也有两个测量模式. 与功率天平的主要区别在于能量天平采用互感测量模式代替了功率天平方案中的速度模式, 如图7所示.

在图7所示的测力模式中, 天平达到平衡状态时, 砝码的重力  $mg$  与电磁力相平衡, 即有

$$mg = \frac{\partial M}{\partial z} I_1 I_2 + \Delta f_z, \quad (10)$$

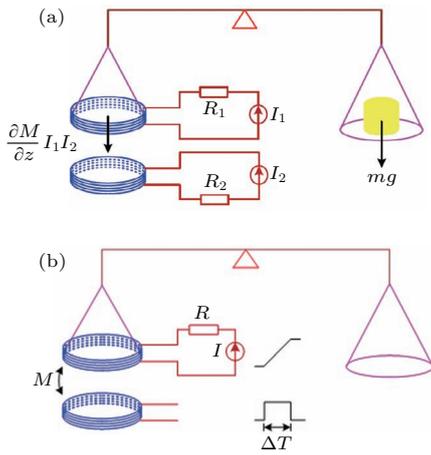


图7 能量天平原理 (a) 测力模式; (b) 互感测量模式  
Fig. 7. The principle of joule balance: (a) Force mode; (b) mutual inductance measurement.

其中,  $m$  为砝码的质量;  $g$  为重力加速度;  $M$  为图7中两套线圈之间的互感;  $z$  为悬挂线圈相对于激励线圈的位置;  $\Delta f_z$  为天平读数, 即砝码重力与电磁力平衡后的差值. (10) 式中的  $\partial M/\partial z$  难以直接准确测量. 但如果对该式等号两边同时积分, 可得到

$$mg(z_2 - z_1) = [M(z_2) - M(z_1)]I_1 I_2 + \int_{z_1}^{z_2} \Delta f_z(z) dz. \quad (11)$$

当磁场在垂直方向为一均匀场时, (11) 式等号右边最后一项的积分可被调整得很小. 同时可注意到, 当不考虑该积分项时, 其他各项仅与线圈的两个静态位置  $z_1$  和  $z_2$  有关, 于是线圈运动过程中产生的动态误差便被消除, 这很有利于提高测量准确度. (11) 式是一个能量平衡式, 所以基于此式进行的测量被称为能量天平法(也叫焦耳天平法, Joule Balance).

在互感测量模式中只需要测量悬挂线圈在垂直方向上两个不同位置时与激励线圈的互感, 测量互感时是在静态稳态位置进行测量. 因此, 在能量天平装置中, 两个模式均为静态模式, 避免了功率天平方案中动态测量引入的诸多问题. 当然, 事情都有两面性, 能量天平也有自己的难点. 互感测量技术是能量天平方案的基础和关键, 但在2007年之前, 互感测量的相对不确定度仅为  $10^{-6}$  量级, 功率天平的提出者 Kibble 博士就表示过类似方法他们尝试过, 但是受限于当时的技术水平而放弃. 在能量天平方案中, 所需的互感值为直流互感值. 一组实际的互感线圈组的耦合系数值(即互感系数)

与寄生参数有关. 耦合分量中不仅含有与激励电流正交的感性分量, 还存在与激励电流同相的阻性分量. 而且, 这些分量含有同寄生参数直接相关联的误差项. 该误差项会随着频率的改变而改变, 即在不同的频率下得到的互感系数是不同的. 而根据能量天平的要求, 需要得到直流互感值  $M$ . 因此, 如何准确地分离出所需的直流互感值是研究重点之一. 为了对互感测量技术进行新的突破和研究, 能量天平项目组先后提出了“低频补偿法测量互感”和“标准方波补偿法测量互感”, 相对不确定度分别达到  $4.3 \times 10^{-7}$  ( $k = 1$ ) [55] 和  $2.2 \times 10^{-7}$  ( $k = 1$ ) [56].

2007年, 能量天平项目组开始能量天平原理验证装置(NIM-1)的研制, 主体采用了一架传统的天平, 悬挂线圈挂在天平的一侧. 图8为悬挂线圈和激励线圈的示意图, 其利用了上、下两个线圈反极性串联后产生的磁场均匀区作为工作磁场区.

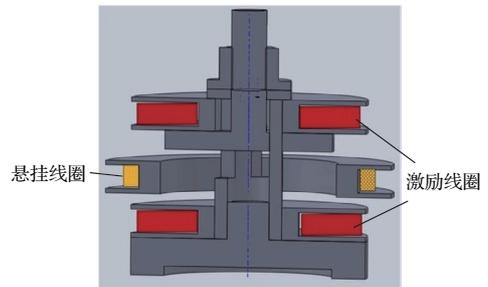


图8 能量天平实验装置NIM-1中的空心线圈子系统  
Fig. 8. The suspended coil and the exciting coils of NIM-1.

在进一步改进互感测量不确定度时, 遇到了线圈发热而导致线圈的电学参数和几何参数发生变化的问题, 限制了互感测量不确定度的进一步改进. 实测发现, 在悬挂线圈和激励线圈分别通以0.25 A直流电流条件下, 仅可产生2 N(牛顿)的电磁力(对应于200 g的质量), 而此条件下, 线圈的发热功率已达约40 W, 发热引起的线圈变形和热气流扰动等, 对测力模式造成较大的漂移和噪声. 2013年NIM-1型能量天平装置的不确定度达到了  $8.7 \times 10^{-6}$  ( $k = 1$ ), 后经进一步改进后达到了  $2.6 \times 10^{-6}$  ( $k = 1$ ) 的不确定度. 由于该装置的在空气环境中测量, 长度测量的不确定度受到空气折射率修正的影响, 且天平主题本身的分辨率和重复性均在  $10^{-6}$  量级, 因此这已经达到了该装置的极限. 此套装置研究过程中积累的经验为第二代装置的研制提供了重要的参考.

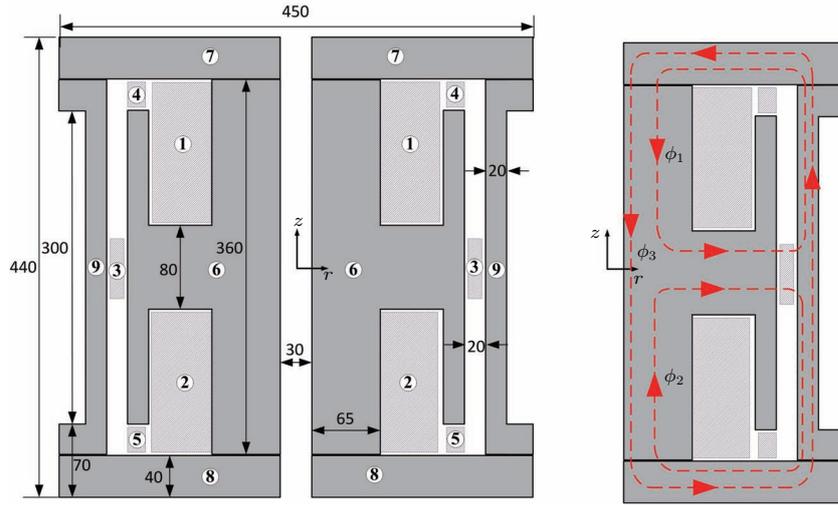


图9 电磁体剖面示意图及磁路图

Fig. 9. The cross section of the electromagnet and the magnetic path.

自2013年中期起, 能量天平项目组开始新一代能量天平装置(NIM-2)的研制, 针对原型验证装置中存在的主要的不确定度来源提出了有效的改进措施[57]. 为大幅降低线圈发热带来的负面效应, 为了降低线圈发热及提高磁场效率, 项目组提出采用闭磁路电磁体代替空心线圈系统, 结构如图9所示[58].

图9中, 标号①, ②的区域为激励线圈; ③为悬挂线圈; ④, ⑤为补偿线圈; ⑥, ⑦, ⑧和⑨为构成闭磁路的电工纯铁. 本设计方案通过改用电工纯铁来缩短磁路长度、形成闭磁路, 可使磁场的利用率大大提高. 产生测量所需的5 N电磁力时, 线圈整体的功耗只有7 W左右, 发热大大减小, 是原来方案发热功率的1/6, 而电磁力则增为原来的2.5倍(原来为2 N), 故与原有方案相比, 总体上可获得15倍的增益. 由于图9中构建磁路的铁磁材料具有非线性的特性, 故标准方波补偿法不能被采用. 为了克服带铁心的互感具有的非线性和磁滞的影响, 项目组提出了一种测量磁链差的新方案[58].

图10所示为改进后的能量天平方案的原理图, 第二个模式由互感测量改为磁链差测量.

在图10(a)所示的测力模式中, 最初挂在天平横梁上的悬挂线圈不通电流, 右侧也不加载砝码, 通过调节配重的方式, 可使天平达到平衡状态. 然后在右侧加载砝码, 同时给左侧的悬挂线圈通入电流. 仔细调节电流值, 使得天平重新达到平衡状态时, 砝码的重力  $mg$  与电磁力相平衡, 此时有,

$$mg = \frac{\partial \psi}{\partial z} I_1 + \Delta f_z, \quad (12)$$

式中  $m$  为砝码的质量,  $g$  为重力加速度,  $\psi$  为磁链,  $z$  为激励线圈(电磁体)或者永磁体所在的位置,  $I_1$  为悬挂线圈中的电流,  $\Delta f_z$  为砝码重力与电磁力的差值.

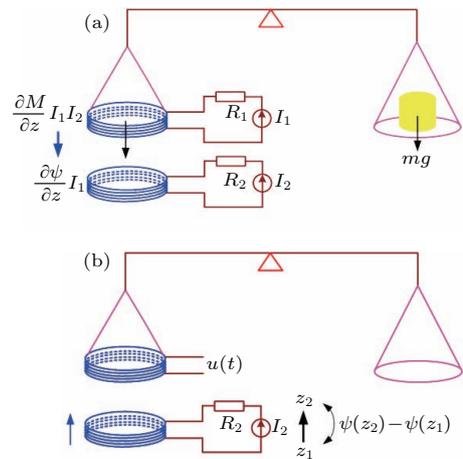


图10 能量天平方案改进后的原理示意图 (a) 测力模式; (b) 测磁链差模式  
Fig. 10. The principle of joule balance: (a) Force measurement phase; (b) the flux difference measurement phase.

在图10(b)所示的磁链差测量中, 为了避免天平侧摆的影响, 保持悬挂在天平横梁上的线圈位置不动, 而移动激励线圈(电磁体)或者永磁体. 悬挂线圈切割磁力线时, 产生感应电动势  $u$  ( $u = BLv$ ,  $B$  为线圈所在的磁场值,  $L$  为线圈中导线的总长度,  $v$  为线圈切割磁力线时的瞬时速度),

对  $u$  进行积分, 即可得磁链差, 如 (13) 式所示.

$$\int_{t_1}^{t_2} u dt = \psi(z_2) - \psi(z_1). \quad (13)$$

对 (12) 式两边进行积分, 并与 (13) 式联立后可得

$$\begin{aligned} & mg(z_2 - z_1) \\ &= I_1 \int_{t_1}^{t_2} u dt + \int_{z_1}^{z_2} \Delta f_z(z) dz, \end{aligned} \quad (14)$$

(14) 式仍然是一个能量平衡式.

虽然与功率天平方案相仿, 以能量天平法测量磁链差的过程中, 线圈也需要移动, 但值得注意的是, 由于悬挂线圈耦合的磁链差仅与悬挂线圈、闭磁路磁体之间的几何位置相对改变量有关, 而与改变的中间过程无关, 亦即积分式 (14) 是对于一个全微分函数的积分过程, 其结果仅与积分端点的静止位置有关, 而与变化过程中感应电压  $u$  的形状无关, 即与中间的运动过程包括运动速度和运动路径等均无关, 这就保留了能量天平法积分测量的最主要的优点.

### 3 实验系统及测量结果

#### 3.1 能量天平实验装置研制

图 11 所示为能量天平装置 NIM-2 的模型图, 实物照片如图 12 所示.

项目组在研究过程中提出的创新技术主要有: 1) 新型闭磁路电磁体设计技术 [58]; 2) 基于可编程约瑟夫森量子电压基准 (PJVS) 的磁链差测量技术 [59]; 3) 基于激光干涉仪的悬挂线圈锁定技术 [60,61]; 4) 基于电容传感器的准直技术 [62].

与国外现有功率天平方案相比, 能量天平法具有如下特色和 innovation.

1) 在国外普遍采用的功率天平方案中, 速度模式下需要在线圈移动过程中直接测量出线圈切割磁力线产生的瞬时感应电动势和瞬时速度, 这种动态测量会引入较大的附加噪声. 而我国独立提出的能量天平方案中的两种测量模式的测量准确性均基本为静态测量, 从原理上可避免动态过程中测量瞬时值引入的诸多困难. 而且本方案中悬挂线圈在工作过程中无需上下移动, 可保持非常稳定的位置, 可大大减小感应电动势测量结果的分散性.

2) 能量天平方案把测量过程从微分法变为积分法, 易于提高测量准确度, 且积分过程本身也可大幅度降低线圈感应电动势中的噪声.

3) 在磁链差测量过程中, 积分过程是对一个全微分函数积分的过程, 其结果只与积分端点的静止位置有关, 而与变化过程中感应电动势  $V(t)$  的形状无关.

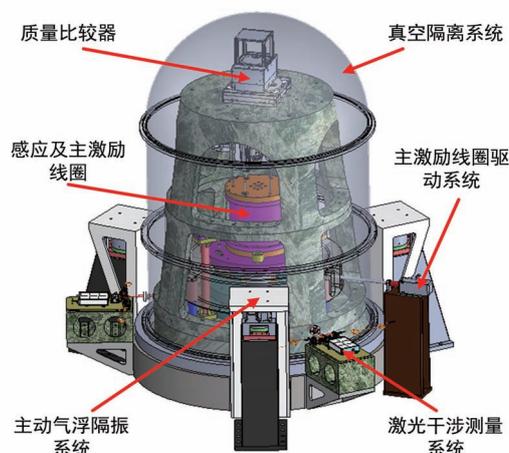


图 11 能量天平实验装置结构图 (NIM-2)

Fig. 11. The structure of the joule balance NIM-2.



图 12 能量天平实验装置实物

Fig. 12. The apparatus of the joule balance NIM-2.

#### 3.2 测量结果及不确定度评估

##### 3.2.1 重力加速度测量

从 (14) 式中可以看出, 能量天平的关系式中还涉及到砝码所在位置的重力加速度值  $g$ . 重力加速度值除了受到潮汐的影响而随时发生变化之外, 还与周围环境的质量分布变化相关. 在能量天平装置安装之前, 砝码所在位置的重力加速度的值可采用绝对重力仪测得, 但是能量天平装置一旦安装完毕之后, 砝码所在的位置将无法放置绝对重力仪. 另外, 由于能量天平装置的总质量约为 7 t, 将改变能量天平所在位置的重力场的分布. 因此必须采用绝

对重力仪和相对重力仪结合把能量天平所在实验室的重力分布网测量出来, 并通过数学建模分析计算得到能量天平装置安装后砝码所在位置的重力加速度. 加上潮汐影响的实时修正, 就可得到重力加速度的瞬时值.

### 3.2.2 普朗克常数测量

2017年初, 项目组采用能量天平装置在真空环境下对普朗克常数进行了测量, 普朗克常数测量结果为  $6.6260692 \times 10^{-34}$  Js, 相对不确定度  $2.4 \times 10^{-7}$  ( $k = 1$ )<sup>[54]</sup>, 不确定度评估情况见表 3. 2017年5月, 项目组将此结果发表在国际计量局主办的学术期刊《Metrologia》, 测量结果被 CODATA 参考数据库收录. 但 CODATA 最终只采用不确定度小于  $6 \times 10^{-8}$  的数据, 我国的测量数据未被用于 2017 年度的普朗克常数平差中.

表 3 能量天平法测量普朗克常数的不确定度合成表  
Table 3. The uncertainty budget of the Planck constant obtained by NIM-2.

No.	不确定度分量	$U(k = 1, \times 10^{-9})$
1	质量	55
2	电流测量	16
3	质量比较器	45
4	磁链差测量	25
5	长度测量	8.8
6	外磁场影响	170
7	重力加速度	10
8	准直	90
9	其他	60
10	统计	90
合成不确定度 $U_c$		234

## 4 展 望

虽然 CIPM 已经决定要在 2018 年进行千克单位的重新定义, 但仍然鼓励各个国家积极开展相关的工作, 以便于新定义实施之后, 可采用相对不确定度达到  $5 \times 10^{-8}$  或以内的装置进行各个国家的千克单位量值的复现和传递. 国际计量局、英国、德国、瑞士、韩国等仍在继续进行功率天平项目的研究工作. 这是因为千克单位重新定义之后, 功率天平装置或者我国的能量天平装置将被用于各个国家千克单位的复现及量值传递工作. 因此, 项目组将继续开展能量天平装置的改进和优化工作,

争取在未来的两年内达到  $10^{-8}$  量级的测量相对不确定度.

能量天平项目组对系统中几项主要的不确定度来源已经进行了深入的分析, 并提出了解决方案, 具体将在已有工作的基础上继续对以下科学技术问题进行进一步研究: 1) 改变目前使用激励线圈进行励磁的方法, 设计和研制永磁磁体进行励磁, 彻底消除由于激励线圈发热引入的一些问题<sup>[63]</sup>; 2) 采用双层磁屏蔽结构和补偿线圈, 降低外磁场干扰; 3) 进一步优化准直调整机构; 4) 采用可兼容球形和圆柱形砝码的加载和减载机构, 以应对将来国际上会采用圆柱型砝码和硅球进行国际比对的需求.

## 5 结 论

为了积极参与国际单位制的重大变革以及最终建立我国独立的千克单位复现装置, 中国计量科学研究院张钟华院士团队提出了能量天平法测量普朗克常数的方案. 2007年起开始研制原理验证装置, 2013年研制成功并在  $2.6 \times 10^{-6}$  的相对不确定度水平上验证了能量天平方案可行. 同时已经开始新一代能量天平测量装置的研制, 于 2016 年初步完成新装置的研制, 并实现了真空环境下的测量, 2017年5月达到了  $2.4 \times 10^{-7}$  的相对不确定度. 目前项目组已经拟定了下一步研究方案, 力争在未来的两年内达到  $10^{-8}$  量级的相对不确定度.

## 参考文献

- [1] Taylor B N, Mohr P J 2001 *IEEE Trans. Instrum. Meas.* **50** 563
- [2] The International System of Units 8th edition 2006 ([www.bipm.org/en/si/](http://www.bipm.org/en/si/))
- [3] Zhang Z H 2002 *China Metrology* **8** 5 (in Chinese) [张钟华 2002 中国计量 **8** 5]
- [4] Josephson B D 1962 *Phys. Lett.* **1** 251
- [5] von Klitzing K, Dorda G, Pepper M 1980 *Phys. Rev. Lett.* **45** 494
- [6] Zhang Z, He Q 2001 *Modern Measurement and Test* **3** 3 (in Chinese) [张钟华, 贺青 2001 现代计量测试 **3** 3]
- [7] Davis R 2003 *Metrologia* **40** 299
- [8] Girard G 1994 *Metrologia* **31** 317
- [9] Li S, Zhang Z, Zhao W, Li Z, Huang S 2015 *Chin. Phys. B* **24** 1
- [10] Draft 9th SI Brochure, <https://www.bipm.org/cc/CCU/Allowed/23/Draft-SI-Brochure-2018.pdf>
- [11] Recommendation G1 (2013), Report of the 14th meeting of the Consultative Committee for Mass

- and Related Quantities (CCM), <http://www.bipm.org/utills/common/pdf/CC/CCM/CCM15.pdf>
- [12] Andreas B, Azuma Y, Bartl G, Becker P, Bettin H, Borys M, Busch I, Gray M, Fuchs P, Fujii K 2011 *Phys. Rev. Lett.* **106** 030801
- [13] Azuma Y, Barat P, Bartl G, Bettin H, Borys M, Busch I, Cibik L, D'Agostino G, Fujii K, Fujimoto H 2015 *Metrologia* **52** 60
- [14] Bartl G, Becker P, Beckhoff B 2017 *Metrologia* **54** 693
- [15] Kuramoto N, Mizushima S, Zhang L, Fujita K, Azuma Y, Kurokawa A, Okubo S, Inaba H, Fujii K 2017 *Metrologia* **54** 716
- [16] Kibble B P 1976 *Atomic Masses & Fundamental Constants* (Vol.16) (New York: Plenum Press) pp545–551
- [17] Kibble B P, Robinson I A, Belliss J H 1990 *Metrologia* **27** 173
- [18] Robinson I A 2012 *Metrologia* **49** 113
- [19] Stock M 2013 *Metrologia* **50** R1
- [20] Zhang Z, He Q, Li Z 2006 *Proceedings of the Conference on Precision Electromagnetic Measurement* Torino, Italy, July 9–14, 2006 pp126–127
- [21] Robinson I A, Kibble B P 2007 *Metrologia* **44** 427
- [22] Kibble B P, Robinson I A 2014 *Metrologia* **51** S132
- [23] Olsen P T, Elmquist R E, Phillips W D, Williams E R, Jones G R, Bower V E 1989 *IEEE Trans. Instrum. Meas.* **38** 238
- [24] Olsen P T, Tew W L, Williams E R 1991 *IEEE Trans. Instrum. Meas.* **40** 115
- [25] Steiner R L, Gillespie A D, Fujii K 1997 *IEEE Trans. Instrum. Meas.* **46** 601
- [26] Steiner R L, Williams E R, Liu R 2007 *IEEE Trans. Instrum. Meas.* **56** 592
- [27] Schlamminger S, Haddad D, Seifert F, Chao L S, Newell D B, Liu R, Steiner R L, Pratt J R 2014 *Metrologia* **51** S15
- [28] Schlamminger S, Steiner R L, Haddad D, Newell D B, Seifert F, Chao L S, Liu R, Williams E R, Pratt J R 2015 *Metrologia* **52** L5
- [29] Schlamminger S 2013 *IEEE Trans. Instrum. Meas.* **62** 1524
- [30] Haddad D, Seifert F, Chao L S, Possolo A, Newell D B, Pratt J R, Williams C J, Schlamminger S 2017 *Metrologia* **54** 633
- [31] Beer W, Jeanneret B, Jeckelmann B, Richard P, Courteville A, Salvadé Y, Dandliker R 1999 *IEEE Trans. Instrum. Meas.* **48** 192
- [32] Eichenberger A, Baumann H, Jeanneret B, Jeckelmann B, Richard P, Beer W 2011 *Metrologia* **48** 133
- [33] Baumann H, Eichenberger A, Cosandier F, Jeckelmann B, Clavel R, Reber D, Tommasini D 2013 *Metrologia* **50** 235
- [34] Genevès G, Gournay P, Gosset A 2005 *IEEE Trans. Instrum. Meas.* **54** 850
- [35] Thomas M, Espel P, Ziane D 2015 *Metrologia* **52** 433
- [36] Thomas M, Ziane D, Pinot P 2017 *Metrologia* **54** 468
- [37] Picard A, Fang H, Kiss A, de Mirandés E, Stock M, Urano C 2009 *IEEE Trans. Instrum. Meas.* **58** 924
- [38] Fang H 2016 *Digest of Conf. on Precision Electromagnetic Measurements* (Ottawa, Canada)
- [39] Steele A G, Meija J, Sanchez C A, Yang L, Wood B M, Sturgeon R E, Mester Z, Inglis A D 2012 *Metrologia* **49** L8
- [40] Sanchez C A, Wood B M, Green R G, Liard J O, Inglis D 2014 *Metrologia* **51** S5
- [41] Wood B M, Sanchez C A, Green R G, Liard J O 2017 *Metrologia* **54** 399
- [42] Sutton C M 2009 *Metrologia* **46** 467
- [43] Kim D, Woo B C, Lee K C, Choi K B, Kim J A, Kim J W, Kim J H 2014 *Metrologia* **51** S96
- [44] Ahmedov H 2016 *Proceedings of the Conference on Precision Electromagnetic Measurement* Ottawa, Canada, Jul 10–15, 2016
- [45] Ahmedov H, BabayigitAskin N, Korutlu B, Orhan R 2018 *Metrologia* **55** 326
- [46] Zhang Z, He Q, Li Z, Han B, Lu Y, Lan J, Li C, Li S, Xu J, Wang N, Wang G, Gong H 2014 *Metrologia* **51** s25
- [47] Xu J, Zhang Z, Li Z 2016 *Metrologia* **53** 86
- [48] Zhang Z, Lu Y, Hu P, Liu Y, Xu J, Bai Y, Zeng T, Wang G, You Q, Li C, Li S, Wang K, He Q, Tan J 2017 *IEEE Trans. Instrum. Meas.* **66** 1329
- [49] Li Z, Zhang Z, Lu Y, Hu P, Liu Y, Xu J, Bai Y, Zeng T, Wang G, You Q, Wang D, Li S, He Q, Tan J 2017 *Metrologia* **54** 763
- [50] Jones N 2012 *Nature* **481** 14
- [51] Mohr P J, Newell D B, Taylor B N, Tiesinga E 2018 *Metrologia* **55** 125
- [52] Newell D B, Cabiati F, Fischer J, Fujii K, Karshenboim S G, Margolis H S, de Mirandés E, Mohr P J, Nez F, Pachucki K, Quinn T J, Taylor B N, Wang M, Wood B M, Zhang Z 2018 *Metrologia* **55** L13
- [53] CCU Recommendation U1 (2017) On the possible redefinition of the kilogram, ampere, kelvin and mole in 2018, [https://www.bipm.org/cc/CCU/Allowed/23/CCU\\_Final\\_Recommendation\\_U1\\_2017.pdf](https://www.bipm.org/cc/CCU/Allowed/23/CCU_Final_Recommendation_U1_2017.pdf) [2018-7-24]
- [54] Decision CIPM/106-10, <https://www.bipm.org/utills/en/pdf/CIPM/CIPM2017-Decisions-EN.pdf> [2018-7-24]
- [55] Li Z, Zhang Z, He Q, Fu Y, Zhao J, Han B, Li S, Lan J, Li C 2011 *IEEE Trans. Instrum. Meas.* **60** 2292
- [56] Lan J, Zhang Z, Li Z, He Q, Fu Y, Li S, Han B, Zhao J, Lu Y 2012 *IEEE Trans. Instrum. Meas.* **61** 2524
- [57] Li Z, Zhang Z, He Q, Han B, Lu Y, Xu J, Li S, Li C, Wang G, Zeng T, Bai Y 2015 *IEEE Trans. Instrum. Meas.* **64** 1676
- [58] Zhang Z, Li Z, Han B 2015 *IEEE Trans. Instrum. Meas.* **64** 1539
- [59] Wang G, Xu J, You Q 2017 *Meas. Sci. Technol.* **28** 015004
- [60] Yang H, Lu Y, Hu P, Li Z, Zeng T, He Q 2014 *Meas. Sci. Technol.* **25** 233
- [61] Bai Y, Hu P, Lu Y, Li Z, Zang Z, Tan J 2016 *IEEE Trans. Instrum. Meas.* **66** 1
- [62] Zeng T, Lu Y, Liu Y, Yang H, Bai Y, Hu P, Li Z, Zhang Z, Tan J 2016 *IEEE Trans. Instrum. Meas.* **65** 458
- [63] You Q, Xu J, Li Z, Li S 2017 *IEEE Trans. Instrum. Meas.* **66** 1289

## SPECIAL TOPIC — Physics in precise measurements

## Progress of joule balance and redefinition of Kilogram\*

Li Zheng-Kun<sup>1)†</sup> Zhang Zhong-Hua<sup>1)‡</sup> Lu Yun-Feng<sup>1)</sup> Bai Yang<sup>1)</sup> Xu Jin-Xin<sup>1)</sup>  
 Hu Peng-Cheng<sup>2)</sup> Liu Yong-Meng<sup>2)</sup> You Qiang<sup>3)</sup> Wang Da-Wei<sup>2)</sup>  
 He Qing<sup>1)</sup> Tan Jiu-Bin<sup>2)</sup>

1) (National Institute of Metrology, The Key Laboratory of AQSIC of China, Beijing 100029, China)

2) (Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

3) (Tsinghua University, Beijing 100084, China)

( Received 31 March 2018; revised manuscript received 4 June 2018 )

## Abstract

Kilogram, the unit of mass, is the last one of seven base units in International System of Units (SI) which is still defined and kept by a material artifact. 1 kg is defined as the mass of the International Prototype of the Kilogram (IPK) kept at the Bureau International des Poids et Mesures (BIPM) in Paris. One of the major disadvantages of this definition is the fact that the amount of material constituting the IPK changes with time. Because a more stable mass reference does not exist, the variation of IPK is completely unknown so far. The International Committee for Weights and Measures (CIPM) recommended redefining the kilogram by fixing the numerical value of the Planck constant  $h$  and called on every national metrology institute to study the measurement of the  $h$ . To avoid possible system errors from one method, more experiments especially based on different principles are expected and encouraged for the final determination of the Planck constant. The CCM required that at least three consistent results should be obtained before the redefinition. Since 1970 s, the Kibble balance (also known as the Kibble balance) experiment has been used by a number of national metrology institutes such as NPL, NIST, METAS, LNE and BIPM. The IAC including the PTB, NMIJ and NMIA used the XRCD method to measure the Avogadro constant. To make contribution to the redefinition of kilogram, the National Institute of Metrology of China (NIM) proposed a joule balance method in 2006, which is also an electrical way but different from the watt balance method in that the dynamic phase is replaced with a static phase to avoid the trouble in the dynamic measurement. The progress of these approaches and the current situation of the redefinition of the kilogram are presented in this paper. In 2013, a model apparatus was built to verify the principle of the joule balance. Then NIM started to build its new joule balance aiming to obtain an uncertainty of  $10^{-8}$  level since 2013. In Dec. 2016, the new apparatus was built and could be used to measure the Planck constant  $h$  in vacuum. In May 2017, the measurement result was submitted to the Metrologia and accepted by the CODATA TGFC as the input data. However, the measurement result has an uncertainty bigger than  $10^{-8}$  and was not used for the final determination of the  $h$  value. At present, the joule balance group of NIM, together with the Harbin Institute of Technology, Tsinghua University and China Jiliang University is still making great efforts to improve the joule balance apparatus. The uncertainty of  $10^{-8}$  level is expected to be achieved in the next two years.

**Keywords:** Planck constant, kilogram, redefinition, joule balance

**PACS:** 06.20.-f, 06.20.F-, 06.20.Jr, 07.05.Fb

**DOI:** 10.7498/aps.67.20180581

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 91536224).

† Corresponding author. E-mail: [lzk@nim.ac.cn](mailto:lzk@nim.ac.cn)

‡ Corresponding author. E-mail: [zzh@nim.ac.cn](mailto:zzh@nim.ac.cn)