

基准声学温度计的研究进展

段宇宁¹, 林 鸿¹, 张金涛¹, 段远源²

(1. 中国计量科学研究院 热工计量科学与材料特性测量技术研究所, 北京 100013;

2. 清华大学热能工程系, 清华大学热科学与热能动力工程教育部重点实验室, 北京 100084)

摘要: 热力学温度是一切温度测量(包括国际实用温标)的基准,是国际上公认的最基本的温度。声学温度计是测量中低温区热力学温度精度最高的方法之一,也是定容理想气体温度计最有效的替代方法之一。综述了声学温度计测量热力学温度的研究进展,分析了目前建立声学温度计的最主要方法—球共鸣声学法的测量原理及其进展,并对声学温度计的未来发展进行了展望。

关键词: 计量学; 声学温度计; 热力学温度; 球共鸣声学法

中图分类号: TB942

文献标识码: A

文章编号: 1000-1158(2007)3A-0001-06

Review on the Primary Acoustic Gas Thermometry

DUAN Yu-ning¹, LIN Hong¹, ZHANG Jin-tao¹, DUAN Yuan-yuan²

(1. Division of Thermometry and Materials Evaluation, National Institute of Metrology, Beijing 100013, China;

2. Key Laboratory for Thermal Science and Power Engineering of Ministry of Education, Department of Thermal Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Thermodynamic temperature is the base of the temperature and its measurement. Primary acoustic gas thermometry is one of the best ways to measure the thermodynamic temperature of medium – low temperature range, and also is the alternatives for the gas thermometry. The development and progress of the primary acoustic gas thermometry, especially on the thermometry using a spherical acoustic resonator is described.

Key words: Metrology; Primary acoustic gas thermometry; Thermodynamic temperature; Spherical acoustic resonator

1 引 言

开尔文勋爵于1848年首先提出把温度数值与可逆理想热机的效率相联系,根据热力学第二定律来定义温度的数值,得到温度定义与物质性质无关,即为热力学温度。它是国际上公认的最基本的温度,也是制定国际实用温标的基础。

准确测量热力学温度是十分精细而且复杂的工作,目前全世界只有少数几个国家的计量科学院和实验室具备这样的条件。测量热力学温度的温度计

主要有定容理想气体温度计、声学温度计、噪声温度计、全辐射温度计等,其中声学温度计是当前最准确的热力学温度计,不仅能做相对法测量热力学温度,也能利用绝对法工作方式来准确测量定义国际计量单位开尔文所需的玻耳兹曼常数。

鉴于热力学温度测量对制定国际温标和玻耳兹曼常数测量对定义温度单位开尔文的重要性,国际计量局(BIPM)要求有能力开展热力学温度方面研究的实验室,要开展测量玻耳兹曼常数和热力学温度的研究,为下一步定义温度单位开尔文和制定新的国际温标提供数据支持。中国计量科学研究院拟

收稿日期: 2007-05-30

基金项目: 国家科技支撑计划课题(2006BAF06B00)

作者简介: 段宇宁(1963-),男,北京市人,中国计量科学研究院研究员,博士,主要从事热工计量和材料热物性的研究。

开展建立声学温度计来测量玻耳兹曼常数和热力学温度方面的研究,本文也由此回顾和分析了声学温度计的测量原理、研究进展和发展趋势。

2 基本原理

声学温度计主要是通过精确测量在封闭腔体内声波的传递性质来测量热力学温度的方法。在某种气体介质中,由于声波速度较快,热量来不及向外界传递,因而可视为绝热过程,声波的速度可以由下式表示:

$$c^2 = \left[\frac{\partial p}{\partial \rho} \right]_s = -v^2 \left[\frac{\partial p}{\partial v} \right]_s \quad (1)$$

式中: c 为声速, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; p 为压力, Pa ; ρ 为密度, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$; v 为比容, $\text{m}^3\cdot\text{kg}^{-1}$; s 为熵, $\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ 。

对于实际气体的状态,可用维里方程表示成如下的形式:

$$p = R_m T (\rho + B\rho^2 + C\rho^3 + \dots) \quad (2)$$

式中: B 为第二维里系数, $\text{m}^3\cdot\text{mol}^{-1}$; C 为第三维里系数, $\text{m}^6\cdot\text{mol}^{-2}$,它们都是温度 T 的函数。 R_m 为通用气体常数, $\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ 。

结合式(1)和(2)可得到实际气体声速表达式如下:

$$c^2 = \frac{\gamma^0 R_m T}{M} \left[1 + \frac{A_1(T)}{RT} p + \frac{A_2(T)}{RT} p^2 + \dots \right] \quad (3)$$

式中: $A_1(T)$ 和 $A_2(T)$ 分别为第二和第三声学维里系数,单位分别为 $\text{m}^3\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $\text{m}^3\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{Pa}^{-1}$,它们都与维里系数有着密切的关系, γ^0 为理想气体的绝热指数, M 为分子量, $\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$ 。

在实验中,如果能够测量物质在同一温度不同压力下的声速,然后就每条等温线按多项式的形式进行拟合:

$$c^2 = c_0 + c_1 p + c_2 p^2 + \dots \quad (4)$$

式中: c_0 、 c_1 和 c_2 为拟合系数。

比较式(3)和(4)等式右边的系数可得:

$$\frac{\gamma^0 R_m T}{M} = c_0 \quad (5)$$

$$R_m = \frac{M}{\gamma^0} \frac{1}{T} c_0 \quad (6)$$

由分子运动论可知,单原子分子气体的绝热指数的精确值为 $\gamma^0 = 5/3$,只要能精确地知道 M 、 T 和 c_0 就能确定通用气体常数 R_m ,从而进一步确定玻耳兹曼常数 k_B 。利用式(5)还可以绝对地确定热力学

温度。这种方法也是目前国际上测量通用气体常数最为常用的方法,测量精度也最高。如果同时测量两个温度下单原子气体的声速,则由式(6)可以得到:

$$\frac{c_{0,1}}{c_{0,2}} = \frac{T_1}{T_2} \quad (7)$$

如果我们选择水三相点做参考点,则可由上式用相对法来测量热力学温度。

3 研究进展

3.1 测量方法

声学温度计因为测量声速的不同而有所区分,主要分为变程和定程两种。在早期主要以圆柱形变程干涉法为主,这种方法在封闭腔体内安装两块平行板,在平板上分别安装发射和接收声波信号的换能器,发射端固定,接收端可以移动来接收信号,但是这种方法测量精度比较低,需要修正位移带来的偏差。

定程法是通过测量固定腔体内稳定的干涉波信号从而得到声速的一种测量方法,避免了变程干涉法中位移的测量偏差。这也是目前建立声学温度计最为常用的方法。

1894年,Rayleigh^[1]就得到了理想状态下不同形状内的波动方程的精确解,但是要在实际中应用还需要一定的非理想因素修正。

1973年,Colclough^[2]证明球共鸣声学法比圆柱形的测量声速的精度更高,这也为后来建立定程的球共鸣法奠定了基础。1978年,Mehl^[3]对共振驻波的测量进行了详细分析,并提出了一些用于表述驻波频率信号的线性和非线性数值算法,其算法能够很精确地再现测量的背景信号、声波频率和宽度。

1979年,Moldover^[4]详细阐述了球共鸣声学法研究材料热物性的相关理论和相应测量系统的误差理论,使球共鸣声学法建立声学温度计越来越接近实际。1982年,Moldover^[5]进一步建立了球共鸣器,在测量的准确度上有很大的提高,这就使得利用球共鸣声学法建立声学温度计成为了可能。Mehl^[6,7]对球体加工时的非理想性对测量径向和非径向频率的影响进行了深入的探讨,并给出了相应的计算公式。如果球体半径加工能到 $20\ \mu\text{m}$,则对频率的影响非常小。对(0, 2)相位的频率影响只有 0.7×10^{-6} ,对(0, 3)到(0, 6)相位的影响都小于 0.1×10^{-6} 。

1986年,Moldover^[8]进一步总结了8种非理想因

素对测量结果的影响和修正方程,包括热边界层影响、粘度边界层影响、主体能量耗散、壳体和气体振动的耦合、球壳上的开孔、非理想球形、上下半球的结合缝和内部表面的粗糙度,进一步完善了球共鸣声学法的测量理论,奠定了后来声学温度计测量的理论模型。Ewing^[9]对热边界层的影响进行了详细的探讨,并由此修正了氩气在 273.16 K 下的不同压力下的声速,取得了不错的效果。

Mehl 和 Moldover^[10]提出用声波和微波在球形腔体的共振频率来测量声速和光速比,从而可以提高测量声速、热力学温度的精度,并从理论上分析了用微波替代水银测量球体特性尺寸的可能性。

1988年, Moldover^[11]在 *Phys Rev Lett* 杂志上报道了他用建成的声学温度计测量通用气体常数 $R = 8.314\,471 \pm 0.000\,014 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ (1.7×10^{-6})、玻耳兹曼常数 $k_B = (1.380\,651\,3 \pm 0.000\,002\,5) \times 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$ (1.8×10^{-6})和斯蒂芬-玻耳兹曼常数 $\sigma = (5.670\,399 \pm 0.000\,038) \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ (6.8×10^{-6})的结果,这也是到目前为止最为精确的测量结果^[12]。随后 Moldover^[13]又详细给出了其测量基本物理常数的完整过程,其球共鸣腔如图 1 所示。

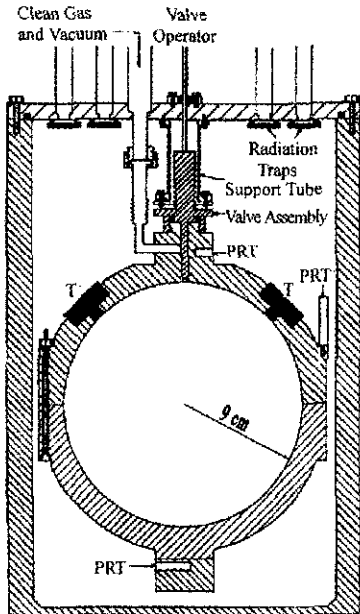


图1 球形共鸣腔示意图^[15]

他还进一步由此测量了镓三相点的热力学温度^[14],取得了非常精确的结果。他在确定球体半径时,是用水银测球体体积的方法确定的,测量体积的不确定度要小于 0.8×10^{-6} 。Ewing^[15]和 Moldover^[16]也提出利用微波技术来测量球体的半径和体积,为万方数据

声学温度计向更高精度方面发展给出了方向, Ewing^[15]还用微波在球腔中的共振来实际测量了在不同温度下球体体积的热膨胀,其结果与水银测量的结果取得了一致,并指出用微波测量球体体积的不确定度为 30×10^{-6} ,还有进一步提高的可能。在 2000年, Ewing^[17]在英国也建立了一套声学温度计装置,测量半径利用的就是微波。但是对于球体而言,微波在某几个相位是重叠的,这也给微波测量球体特性方面的应用带来的障碍。

NIST 的 Ripple^[18]等人进一步设计的新的传声器,扩展了其声学温度计的测量范围。Moldover^[19]进一步提出了一种准球形的方法,用一个近似椭球的共鸣器来替代原有的球体,这样不仅可以很容易地分开所需相位的微波,而且对声波的测量也有很大的改进。2006年, Pitre 和 Moldover^[20]利用这个思想建立了相应的声学温度计装置,图 2 给出了他们设计的准球形的形状,也是由上下两部分组成,但是在赤道和中间部分多了两个圆柱带,圆柱带分别与球壳相切。在形状上来说就是 4 个四分之一的球壳分别嵌入到两个圆柱环中。这样的设计可以很容易分开不同相位的微波,而且可以避免测量球体特性尺寸的麻烦,在测量热力学温度时只需要确定声波和微波频率的比率就可以得到。

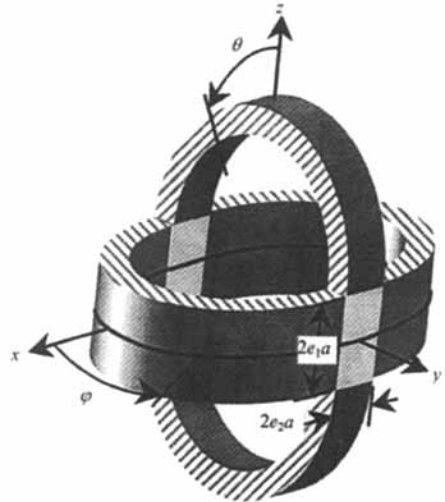


图2 准球形共鸣腔示意图^[19]

3.2 测量的数据

精确的热力学温度的数据是人们认识物质客观世界的基础,也是建立新国际温标的基础。毕竟测量热力学温度是一项非常繁琐和十分精细的工作,到目前为止,也只有为数不多的几个发达国家的计量标准实验室能够实现。

Plumb^[21]首先提出了用圆柱形共鸣腔建立声学温度计的想法,由声波的波长来确定声速。Colclough^[22]利用圆柱形共鸣腔建立了一套声学温度计装置,并测量了 4.2~20 K 的热力学温度,其不确定度为 1~4 mK。Colclough 也利用这套装置测量水三相点下的声速,并由此测得通用气体常数 R 。利用球共鸣声学法建立声学温度计来测量热力学温度首先是从美国 NIST 开始的, Moldover^[13, 14]在 1988 年用一个 3 L 的不锈钢共鸣器重新测量了通用气体常数 R 和玻耳兹曼常数 k_B ,其测量不确定度达到 1.7×10^{-6} ,所用的工质为氦,共鸣器的内径大约为 178 mm,外径大约为 216 mm。他还进一步测量了汞三相点热力学温度。

1999 年, Moldover^[23]测量了在 217, 234, 253, 293 和 303 K 附近的热力学温度,他用微波技术测量了球共鸣腔的体积膨胀,在测量时用微波的发生和接收口替换声波的发生和接收口,单独测量其体积膨胀的变化。

英国的 Ewing 和 Trusler^[17]建立的声学温度计的共鸣腔所用的材料是铝,球壳内径约为 80 mm,厚度为 10 mm,他们测量了 $T = 90 \sim 300$ K 之间的热力学温度,所用的恒温槽在 30 min 内稳定性为 ± 0.2 mK,在 24 小时内为 ± 2 mK,所用的声学换能器为自行设计的电容式传声器。

2003 年, Strouse^[24]对 NIST 原有的声学温度计的球共鸣腔进行了改进,重新设计了声学换能器,提高了其工作的温度范围,并把声波和微波的发生器和接收器同时装于球共鸣腔上,能同时测量声波和微波的共振,球体体积约为 3 L,他由此测量了 273 K 到 505 K 的热力学温度,最大的不确定度为 3 mK。

2004 年,意大利计量院(IMGC)的 Benedetto^[25]等建立了一个不锈钢的球共鸣腔,体积大概在 3 L 左右,测量了从汞三相点到 380 K 间的热力学温度。他的球共鸣腔的声波和微波的发生器及接收器都在一起,与 Moldover 在 1988 年的设计一样。实验前先独立测量球体的体积膨胀特性,然后再测量声波的速度以获得热力学温度值。IMGC 所用的恒温槽能在室温到 200℃ 范围内使稳定性达到 ± 0.5 mK。

2006 年, NIST 的 Pitre 等人^[26]建立了一个铜的准球形共鸣器,内径约为 100 mm,外径为 120 mm。球共鸣腔上有 6 个开孔,两个用于声波的测量,两个用于微波的测量,一个用于充入气体,一个用于放气。并测量了低温下的 7 K 到 273 K 的热力学温度,取得了令人满意的结果。

表 1 总结了近年来不同机构用球共鸣声学法测量热力学温度结果,其中 δ_{\max} 为测量热力学温度的最大偏差,图 3 给出了热力学温度和 ITS-90 温标间的差别,其中 T_{pw} 为水三相点温度。

表 1 不同机构测量热力学温度总结

第一作者	机构	年份	共鸣器	材料	测量温区 / K	测量点数	$\delta_{\max} / \text{mK}$
Moldover	NIST	1988	球形	不锈钢	303	1	0.5
Moldover	NIST	1999	球形	不锈钢	217~303	6	0.66
Ewing	UCL	2000	球形	铝	90~300	8	1.3
Strouse	NIST	2003	球形	铝	273~505	3	3
Benedetto	IMGC	2004	球形	不锈钢	230~380	10	1.88
Pitre	NIST	2006	准球形	无氧铜	7~234	14	0.81

3.3 最新研究方向

声学温度计测量玻耳兹曼常数和热力学温度具有最高的精度^[26],表 2 总结了不同基准温度的温度计测量玻耳兹曼常数的现有精度和到 2011 年的预期精度。但是定义温度单位开尔文需要玻耳兹曼常数测量精度达到 0.1×10^{-6} (目前是 1.7×10^{-6} ^[13]),因此日前在国际计量局(BIPM)已经正式建立了讨论小组定期讨论声学温度计以及测量玻耳兹曼常数

的研究进展,各个国家都致力于在 2011 年以前把声学温度计测量玻耳兹曼常数的精度提高到 1×10^{-6} 。Moldover^[27]总结了他在 1988 年测量的玻耳兹曼常数的结果,并提出了在体积测量、温度测量、氦气纯度和理想气体声速方面进行改进,在 2008 年前可以把测量精度提高到 0.97×10^{-6} ,他还进一步讨论了用准球形测量玻耳兹曼常数的可能性^[28]。意大利计量院的 Marcarino^[29]也总结了在恒温槽的温

度控制和铂电阻测温方面的研究进展, Gavioso 等^[30-32]报道了其测量玻耳兹曼常数的进展和讨论了球体定位对测量精度的影响。法国的 Pitre^[33]对测量球体体积的 3 种方法(微波、坐标测量仪和正十三烷)进行了讨论。对于一个 0.5 L 的准球形,微波测量体积最高可达 3×10^{-6} , 用正十三烷测量最高可达到 2×10^{-6} 。要把玻耳兹曼常数的测量精度提高一个数量级,最主要在于对于温度测量、恒温控制和体积测量这几个方面,这也是目前各个国家计量院研究的重点方向。

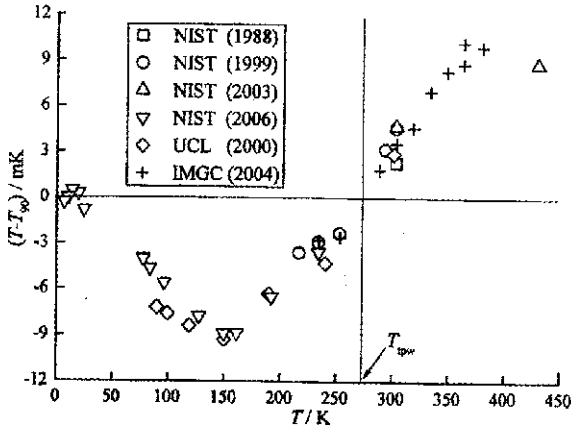


图 3 热力学温度与 ITS-90 间差别

表 2 不同测量玻耳兹曼常数的不确定度总结 $\times 10^{-6}$

基准温度计	现有精度	2011 年预期精度
声学温度计	2	1
介电常数气体温度计	15	2
全辐射温度计	2	5
光谱辐射温度计	-	50
噪声温度计	-	10
准球形共振方法	40	10
折射率气体温度计	300	30
多普勒增宽温度计	800	10

4 结论和展望

声学温度计是测量玻耳兹曼常数和热力学温度的最为精确的方法之一,随着对热力学温度测量水平要求的提高,利用准球形的共鸣腔来测量热力学温度,尤其是测量玻耳兹曼常数已经成为计量学的研究热点和难点。利用准球形共鸣腔来建立声学温万方数据

度计来测量基本物理常数和热力学温度也是中国计量科学研究院下一步的研究方向之一。

[参 考 文 献]

- [1] Rayleigh J W S. Theory of Sound [M]. New York: Dover, 1894.
- [2] Coleclough A R. Systematic errors in primary acoustic thermometry in the range 2 K - 20 K [J]. *Metrologia*, 1973, 9: 75 - 98.
- [3] Mehl J B. Analysis of resonance standing - wave measurements [J]. *J Acoust Soc Am*, 1978, 64(5): 1523 - 1525.
- [4] Moldover M R, Waxman M, Greenspan M. Spherical acoustic resonators for temperature and thermophysical property measurements [J]. *High Temp - High Press*, 1979, 11: 75 - 85.
- [5] Miquieu C, Mendiboure B, Graciaa C, Lachaise J. Modelling of the surface tension of binary and ternary mixtures with the gradient theory of fluid interfaces [J]. *Fluid Phase Equilibria*, 2004, 218: 189 - 203.
- [6] Mehl J B. Acoustic resonance frequencies of deformed spherical resonators [J]. *J Acoust Soc Am*, 1982, 71(5): 1109 - 1113.
- [7] Mehl J B. Acoustic resonance frequencies of deformed spherical resonators. II [J]. *J Acoust Soc Am*, 1986, 79(2): 278 - 285.
- [8] Moldover M R, Mehl J B, Greenspan M. Gas - filled spherical resonators: Theory and experiment [J]. *J Acoust Soc Am*, 1986, 79(2): 253 - 272.
- [9] Ewing M B, McGlashan M L, Trusler J P M. The temperature - jump effect and the theory of the thermal boundary layer for a spherical resonator. Speed of sound in argon at 273.16 K [J]. *Metrologia*, 1986, 22: 93 - 102.
- [10] Mehl J B, Moldover M R. Measurement of the ratio of the speed of sound to the speed of light [J]. *Phys Rev A*, 1986, 34(4): 3341 - 3344.
- [11] Moldover M R, Trusler J P M, Edwards T J, Mehl J B, Davis R S. Measurement of the universal gas constant R using a spherical acoustic resonator [J]. *Phys Rev Lett*, 1988, 60 (4): 249 - 252.
- [12] Mohr P J, Taylor B N. CODATA recommend values of the fundamental physical constants: 2002 [J]. *Rev Mod Phys*, 2005, 77(1): 101 - 107.
- [13] Moldover M R, Trusler J P M, Edwards T J, Mehl J B, Davis R S. Measurement of the universal gas constant R using a spherical acoustic resonator [J]. *J Res Natl Bur Stand*, 1988, 93(2): 85 - 144.
- [14] Moldover M R, Trusler J P M. Accurate acoustic thermometry I: the triple point of gallium [J]. *Metrologia*, 1988, 25:

- 165 ~ 187.
- [15] Ewing M B, Mehl J B, Moldover M R, Trusler J P M. Microwave measurements of the thermal expansion of a spherical cavity [J]. *Metrologia*, 1988, 25: 211 ~ 219.
- [16] Moldover M R. Acoustic and microwave resonances applied to measuring the gas constant and the thermodynamic temperature [J]. *IEEE Trans Instrum Meas*, 1989, 38(2): 217 ~ 224.
- [17] Ewing M B, Trusler J P M. Primary acoustic thermometry between $T = 90$ K and $T = 300$ K [J]. *J Chem Thermodyn*, 2000, 32: 1229 ~ 1255.
- [18] Ripple D C, Defibaugh D R, Moldover M R, Strouse G F. Techniques for primary acoustic thermometry to 800 K [A]. Ripple D C, Temperature: Its Measurement and Control in Science and Industry, 8th International Temperature Symposium [C], Chicago: AIP, 2002, 25 ~ 30.
- [19] Mehl J B, Moldover M R, Pitre L. Designing quasi-spherical resonators for acoustic thermometry [J]. *Metrologia*, 2004, 41: 295 ~ 304.
- [20] Pitre L, Moldover M R, Tew W L. Acoustic thermometry: new results from 273 K to 77 K and progress towards 4 K [J]. *Metrologia*, 2006, 43: 142 ~ 162.
- [21] Plumb H H, Cataland G. Acoustical thermometer and the national bureau of standards provisional temperature scale 2 - 20 (1965)[J]. *Metrologia*, 1966, 2: 127 ~ 139.
- [22] Colclough A R. Low frequency acoustic thermometry in the range 4.2 K - 20 K with implications for the value of the gas constant [J]. *Proc Roy Soc London*, 1979, A365: 349 ~ 370.
- [23] Moldover M R, Boyes S J, Meyer C W, Goodwin A R H. Thermodynamic temperatures of the triple points of mercury and gallium and in the interval 217 K to 303 K [J]. *J Res Natl Inst Stand Technol*, 1999, 104(1): 11 ~ 45.
- [24] Strouse G F, Defibaugh D R, Moldover M R, Ripple D C. Progress in primary acoustic thermometry at NIST: 273 K to 505 K [A]. Ripple D C, Temperature: Its measurement and control in science and technology [C], New York: AIP, 2003.
- [25] Benedetto G, Gavioso R M, Spagnolo R, Marcarino P, Merlone A. Acoustic measurements of the thermodynamic temperature between the triple point of mercury and 380 K [J]. *Metrologia*, 2004, 41: 74 ~ 98.
- [26] Fellmuth B, Gaiser C, Fisher J. Determination of the Boltzmann constant - status and prospects [J]. *Meas Sci Technol*, 2006, 17: R145 ~ R159.
- [27] Moldover M R. Acoustic determination of the Boltzmann constant at NIST in 1988 [A]. Workshop on methods for new determinations of the Boltzmann constant [C]. Berlin: PTB, 2005.
- [28] Moldover M R. Can we measure the Boltzmann constant using cross capacitors and/or quasi-spheres? [A]. Workshop on progress in determining the Boltzmann constant [C]. Berlin: PTB, 2006.
- [29] Marcarino P. Acoustic/microwave determination of the universal gas constant R at IEN/IMCC (INRIM). Part 1: Progress in temperature control and measurements [A]. Workshop on progress in determining the Boltzmann constant [C]. Berlin: PTB, 2005.
- [30] Gavioso R M. Acoustic/microwave determination of the universal gas constant R at IEN/IMCC (INRIM). Part 2: Progress in acoustic and microwave measurements [A]. Workshop on progress in determining the Boltzmann constant [C]. Berlin: PTB, 2005.
- [31] Gavioso R M. Current progress of an experiment for the determination of the gas constant R at INRIM [A]. Workshop on progress in determining the Boltzmann constant [C]. Berlin: PTB, 2006.
- [32] Merlone A. Experiment for the determination of the gas constant R at INRIM [A]. Workshop on progress in determining the Boltzmann constant [C]. Berlin: PTB, 2006.
- [33] Pitre L, Sparasci F, Richard A, Guianvarch C. New determination of the Boltzmann constant with an improved acoustic method: toward a re-definition of the Kelvin [A]. Workshop on progress in determining the Boltzmann constant [C]. Berlin: PTB, 2006.