

LIZHI JILIANG
JI JILIANG BIDUI SHILI

力值计量及 计量比对实例

李庆忠 李春燕 ©著
李万升 孙云海



 中国质检出版社

力值计量及计量比对实例

李庆忠 李春燕 李万升 孙云海 著

中国质检出版社

北 京

图书在版编目(CIP)数据

力值计量及计量比对实例/李庆忠等著. —北京:中国质检出版社,2012
ISBN 978-7-5026-3571-8

I. ①力… II. ①李… III. ①力学—计量 IV. ①TB93

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 035949 号

内 容 提 要

本书通过统计、分析、总结、提高,给出了力值计量及计量比对的实例,对有关力值标准机、标准测力仪的计量学特性给出了若干规律性论述。

本书适合于从事力学计量工作人员阅读参考。

中国质检出版社出版发行

北京市朝阳区和平里西街甲 2 号(100013)

北京市西城区三里河北街 16 号(100045)

网址 www.spc.net.cn

总编室:(010)64275323 发行中心:(010)51780235

读者服务部:(010)68523946

中国标准出版社秦皇岛印刷厂印刷

各地新华书店经销

*

开本 787×960 1/16 印张 7.75 字数 136 千字

2012 年 3 月第一版 2012 年 3 月第一次印刷

*

定价 26.00 元

如有印装差错 由本社发行中心调换

版权专有 侵权必究

举报电话:(010)68510107

前 言

本书作者在多年力值计量理论与实验研究基础上,通过统计、分析、总结、提高,对有关力标准机、标准测力仪的计量学特性给出若干规律性论述。“中国基准力值等效度”根据作为主导实验室中国测试技术研究院组织完成的我国力基准的量值比对结果写成,文中给出传感器输出和比对结果的不确定度评估方法,力值比对的 E_n 值(normalised error——归一化误差)及等效性,首次给出普遍适用的计算出的 20℃输出值的相对扩展不确定度计算公式。“国家计量院 1 MN 杠杆式力标准机昨天与今天”给出其由力值示值误差过渡到力值扩展不确定度的过程。作者在已取得的有关叠加式力标准机研究成果基础上,根据相关单位的实验数据,给出“叠加式力标准机不确定度的理论评估结果”、“10 MN 叠加式力标准机的研制”、“30 MN 叠加式力标准机不确定度评估”及“广东计量院 3 MN 叠加式力标准机不确定度评估”等 4 篇文章。

用于传递力值或作为参考标准的标准测力仪,为了减少力值测量不确定度,力值工作者十分关心其温度修正系数、长期稳定度,为了连续甚至外推使用标准测力仪,还关心其内插与外推。鉴于此,“标准测力仪温度修正系数”中指出传感器的输出均随温度作线性变化,进一步确认温度系数随负荷作线性变化。“应变式标准测力仪长期稳定度统计分析”给出了德国 HBM 公司制造的高准确度应变式传感器的长期稳定度的研究成果,确认标准测力仪的重复性不会影响其级别的确定,并且有不随时间变化的特性;有 4 台传感器在 10~15 年间测得的相邻两次检定的输出长期稳定度——“相邻长期稳定度”不超过 $\pm 0.01\%$;传感器输出随时间推移有程度不同的变大倾向,也有个别例外;由于测量输出的仪器相对分辨力的影响,力值偏小时(如小于 $50\%f_s^*$)测得的“相邻长期稳定度”有变大倾向。“传感器长期稳定度、内插与外推”根据中国测试技术研究院(NIMTT)已有 9 台德国 HBM 公司测力传感器(1MN, 3MN 和 10MN 量程各 3 台)在 2 年期间 3 次校准结果,对 9 台传感器长期稳定度、内插误差与外推误差进行了研究。在国内首次得出与传感器上

* f_s 为满量程

述三个重要技术指标有关的规律性。

重力值在力学、热工和电学等计量中应用十分广泛,本书给出三篇文章介绍作者在该领域的研究成果。“重力加速度值的计算及实际应用”介绍了根据纬度和海拔高度计算重力加速度值的方法和结果。通过对其计算值和实测值的偏差分析,评估了重力计算值的极限误差一般不大于 $\pm 5 \times 10^{-5}$ 。作者于2001年4月在“计量技术”上发表了该结论。此后一年半,即2002年9月德国PTB计量学家R. Schwatz, A. Lindau也得出完全相同的结果。“获得实验室重力值”给出根据在“Google. /the earth”查出与我国34个省会(或直辖市、或自治区首府)有关地点的纬度与海拔高度(ϕ, h),计算出其相应重力值,方便用户使用。“关于我国衡器重力区划分的建议”提出了划分我国衡器重力区的建议。以地理纬度和海拔高度为基础,利用标准的重力计算公式算出其参考重力值,并根据衡器的准确度等级及同一重力区内重力值的最大相对允许误差,对我国的重力区进行了划分。重力区的划分为Ⅲ级秤的调修,以及用户对衡器的选购及使用提供了便利。

在固定式电子衡器的检定校准中,国内外普遍采用砝码或砝码的替代物方法一直存在工作量大、劳动强度高,运输砝码成本高、耗时长、安全性差等问题,严重影响检定规程的适用性。为了解决这些问题,福建省计量院于2009—2011年间自主研发固定式电子衡器新检定校准系统,实现其无砝码检定校准。“固定式电子衡器新检定校准系统建立”详细介绍了该系统原理、结构、溯源方法及技术性能。“固定式电子衡器新检定校准系统不确定度评估”对其4个主要计量溯源部分的质量测量不确定度进行了评估,其中包括 M_1 砝码、150t质量比较仪(MC-mass comparator)、“可移动叠加式力标准机组(MBM-a set of moveable build-up force standard machines)及被检定校准的固定式电子衡器(MS-mobile scale)。

随着我国高层建筑、大型桥梁、高速公路与铁路、核电与水电等的快速蓬勃发展,作为桩基实验的重要计量工具液压千斤顶应用愈来愈广泛,力值量程从数百千牛扩展到数十兆牛。计量部门的液压千斤顶检定校准的数量急剧增加。为此作者完成“液压千斤顶技术特性”一文。该文在有关计量部门对液压千斤顶的大量检定校准基础上,对其技术指标的检定计算方法与影响因素进行了系统全面分析,其中包括活塞上升高度、加力方法、读数仪器、油泵更换及校准方程等,同时对千斤顶示值不确定度作了评估。

计量比对是作者近30余年实践与理论研究的主要项目之一。在国家质检总局的安排下,作者于2009—2010年参与了全国法制计量管理计量技术委员会负责、浙江省计量院为报告试验室的全国机动车检测专用轴(轮)重仪比对与滚筒反力式制动检验台比对。“机动车检测专用轴(轮)重仪比对的不确定度评估与 E_n 值

计算”与“滚筒反力式制动检验台比对的不确定度评估与 E_n 值计算”两篇文章分别介绍了对应比对的目的、方法,及比对结果,并首次给出该 2 项检定/校准结果的不确定度评估方法;比对的 E_n 值计算方法,包括对应的参考值及其不确定度评估方法。

本书对有关行业的计量工作者,包括管理者、工程技术人员、研究人员以及大学师生,进行力学计量,检定、校准与传递过程中,校准试验室认可、在标准与规程制修订、计量理论与实践的研究等方面,均有一定的参考价值。

本书各篇的合作者如下:第一篇为黄大伦研究员(中国计量科学研究院);第四篇为唐纯谦研究员、唐韵高级工程师、徐尹杰高级工程师(中国计量测试科学研究院);第七篇为姚进辉高级工程师(福建计量科学研究院),李海根总经理(绍兴市肯特机械电子有限公司);第八、十二篇为唐纯谦研究员(中国计量测试科学研究院);第五、十、十一篇为中国计量科学研究院中、小力值实验室各位同事;第九篇为谭洪辉高级工程师(广东计量科学研究院);第十三、十四篇为姚进辉高级工程师(福建计量科学研究院);第十五篇为黄世源工程师(深圳市计量院),彭丹阳工程师(广东省计量科学研究院),范永轩高级工程师、曲卓高级工程师(吉林省计量科学研究院)及姚进辉高级工程师(福建计量科学研究院)。在此,谨向上述合作者表示谢意。

作 者

2012. 2

目 录

第 1 篇	重力加速度值的计算及实际应用	1
第 2 篇	获得实验室重力值	5
第 3 篇	关于我国衡器重力区划分的建议	9
第 4 篇	中国基准力值等效度	16
第 5 篇	国家计量院 1MN 杠杆式力标准机昨天与今天	24
第 6 篇	叠加式力标准机不确定度理论评估结果	30
第 7 篇	10MN 叠加式力标准机的研制	35
第 8 篇	30MN 叠加式力标准机不确定度评估	39
第 9 篇	广东计量院 3MN 叠加式力标准机不确定度评估	44
第 10 篇	标准测力仪温度修正系数	48
第 11 篇	应变式标准测力仪长期稳定度统计分析	54
第 12 篇	传感器长期稳定度、内插与外推	62
第 13 篇	固定式电子衡器新检定校准系统建立	69
第 14 篇	固定式电子衡器新检定校准系统不确定度评估	80
第 15 篇	液压千斤顶技术特性	88
第 16 篇	机动车检测专用轴(轮)重仪比对的不确定度评估与 E_n 值计算	97
第 17 篇	滚筒反力式制动检验台比对的不确定度评估与 E_n 值计算	105
参考文献		113

第 1 篇 重力加速度值的计算 及实际应用

1 引 子

地球上单位质点所受的地球引力和惯性离心力的矢量和称为地球在该点产生的重力矢量,重力矢量的模简称地球在该点的重力。地面上各点的重力不只是该点位置(纬度,经度和高度)的函数,同时随时间变化。变化的原因除了来自月亮、太阳等临近地球的外部天体作用外,还与物质迁移有关的地球内部动力学过程有关。

在不考虑外部天体对地球作用时,地球上任一点 P 的重力矢量 $\vec{g}(r)$ 定义为:地球作用在位于该点单位质量上的引力 $\vec{f}(r)$ 和该点单位质点由于地球自转所承受的惯性离心力 $\vec{q}(r)$ 的矢量和。即

$$\vec{g}(r) = \vec{f}(r) + \vec{q}(r) \quad (1.1)$$

矢量场 $\vec{g}(r)$ 称为地球重力场。

地球的引力场 $\vec{f}(r)$ 决定于地球内部的密度分布,由于该密度分布不均,因而地球的引力矢量 $\vec{f}(r)$ 不指向地心,大小随地面点位置变化。惯性离心力矢量 $\vec{q}(r)$ 又称离心力矢量,取决于地球自转角速度及地面点在地球上位置。

$$\vec{q}(r) = -\vec{\omega} \times (\vec{\omega} \times \vec{r}) \quad (1.2)$$

通常把地球自转角速度 ω 看成一个常矢量。因此地球重力场是一个决定于地球内部的密度分布及其绕轴自转角速度的力场,是位置的不规则函数。重力矢量的模 $g(r)$ 简称为重力

$$g(r) = |\vec{g}(r)| \quad (1.3)$$

重力的量纲与加速度的量纲相同,因此在实际中将重力又称为重力加速度。在 SI 单位中,重力加速度的计量单位是 m/s^2 。

2 正常重力加速度计算公式

重力测量结果表明,地球在其表面上的重力分布有一定规律。总体说来,它由

赤道向两极逐渐增加,由赤道上的 9.78m/s^2 逐渐增加到 9.83m/s^2 。在大地测量中,选择参数合适的旋转椭球作为地面点坐标的参考架。这时大地水准面(海平面)相对参考椭球面的起伏不超过 100m ,起伏只占参考椭球赤道半径的 2×10^{-6} 。通常用质量等于地球总质量,以地球自转角速度绕其极半径旋转的旋转椭球模拟真实地球,用这种地球模型(正常场地球模型)在其表面上和外部空间产生的重力场称为地球的正常重力场。这时,地球重力场可以分解成两部分,其一为正常重力场,其二重力异常场——真实地球与正常场地球模型的密度分部不同在某点产生的重力场。重力测量结果表明,在正常场地球模型选择合适后,大地水准面上的重力异常场不超过 $1.50 \times 10^{-3}\text{m/s}^2$,约占地球正常重力场的 $1 \times 10^{-4} \sim 2 \times 10^{-4}$ 。自 1901 年到 1980 年,国际上先后采用三个正常重力公式计算重力值。

① 赫尔默(Helmert)正常重力公式

德国人赫尔默(Helmert)于 1901 年根据当时波斯坦系统的几千个重力测量结果,计算出赤道上正常重力 g_0 及有关常数,由此得到 1901 年的正常重力计算公式,

$$g_{\phi,1901} = 9.78030(1 + 0.005302\sin^2\phi - 0.000007\sin^2 2\phi)(\text{m/s}^2) \quad (1.4)$$

式中: ϕ ——计算点纬度,rad。

这是我国、原苏联及东欧国家以前采用计算重力的公式。

② 1930 年国际正常重力公式

美国人海福特(Hayford)于 1909 年根据美国当时大地测量结果给出一个参考椭球,它的赤道半径 a 和偏率 α 分别为

$$a = 6378388\text{m}$$

$$\alpha = 1/297.0$$

国际大地测量和地球物理联合会于 1924 年将上述参考椭球定为国际参考椭球。芬兰人海斯卡宁(Heiskanen)于 1928 年根据当时的重力测量结果算出正常重力场地球模型赤道上的重力值 g_0 及有关常数,由此得到相应的 1930 年正常重力公式:

$$g_{\phi,1930} = 9.78049(1 + 0.0052884\sin^2\phi - 0.0000059\sin^2 2\phi)(\text{m/s}^2) \quad (1.5)$$

③ 1980 年正常重力公式

随着空间技术的发展,可以根据卫星轨道根数及其变化确定出地心引力常数 κM 及地球的动力因子 J_2 这两个常数,因而近代正常场地球模型多用地心引力常数 κM ,动力因子 J_2 ,地球赤道半径 a 和旋转角速度 ω 四个独立参数给出(前面两个由 a, α, g_0 及 ω 给出)。由此得到国际大地测量和地球物理联合会于 1979 年通过的 1980 年大地参考系,及相应的正常场地球模型,正常重力公式

$$g_{\phi,1980} = 9.780327(1 + 0.00530244\sin^2\phi - 0.00000585\sin^2 2\phi)(\text{m/s}^2) \quad (1.6)$$

由此算出,全球正常重力值的最大值为 9.832186m/s^2 ,纬度 $\phi = 90^\circ$ (两极)。

最小值为 9.780327m/s^2 , 纬度 $\phi=0^\circ$ (赤道)。两者的相对偏差为 0.53% 。

3 重力随高度的变化

大地测量学家推导出了与 1980 年正常重力公式相对应的重力随高度的变化计算公式(重力垂直梯度)。通常不考虑重力随经度的变化。

$$\text{dg}/\text{dh} = -3.08769 \times 10^{-6} (1 - 0.0014437 \sin^2 \phi) [(\text{m/s}^2)/\text{m}] \quad (1.7)$$

实际上重力垂直梯度在各地得到的实测值与计算值相差较大。计量院重力室在全国 19 个重力点测量结果是, 重力垂直梯度实测值的范围为 $-(2.03 \sim 3.48) \times 10^{-6} [(\text{m/s}^2)/\text{m}]$, 其平均值为 $-2.77 \times 10^{-6} [(\text{m/s}^2)/\text{m}]$, 平均值标准偏差为 $0.38 \times 10^{-6} [(\text{m/s}^2)/\text{m}]$ 。计算值为 $-3.09 \times 10^{-6} [(\text{m/s}^2)/\text{m}]$ 。即高度每增加 1m , 重力值减少 $3.09 \times 10^{-6} \text{m/s}^2$ 。

4 重力计算值与实测值偏差

为了求某点的重力值, 可以根据该地纬度(rad)用(1.6)式计算出对应纬度下, 海拔高度为零的重力值 g_{ϕ_0} , 而后再根据该地海拔高度用(1.7)式进行高度修正, 得到该纬度和海拔高度下的重力值 $g_{\phi h}$ 。

根据计量院重力室用绝对法对 36 个重力点进行测量的结果, 得到重力计算值与实测值偏差如下:

没有进行高度修正重力值 g_{ϕ_0} 与实测值偏差在 $\pm 0.03\%$ 以内的占 80% ; 其余 20% 的偏差不超过 $\pm 0.08\%$ 。

用重力垂直梯度 $-3.09 \times 10^{-6} [(\text{m/s}^2)/\text{m}]$ 对 g_{ϕ_0} 进行高度修正后, 得到重力计算值 $g_{\phi h}$ 与实测值偏差明显减小, 90% 以上的偏差不超过 $\pm 0.005\%$, 其余 10% 的偏差不超过 $\pm 0.014\%$ 。详见图 1.1。因此, 对于在力学计量、热工计量和电学计量中需要准确(优于 5×10^{-5})知道所在地点重力值的单位, 可请计量院或大地测量部门用绝对法或相对法进行测量。

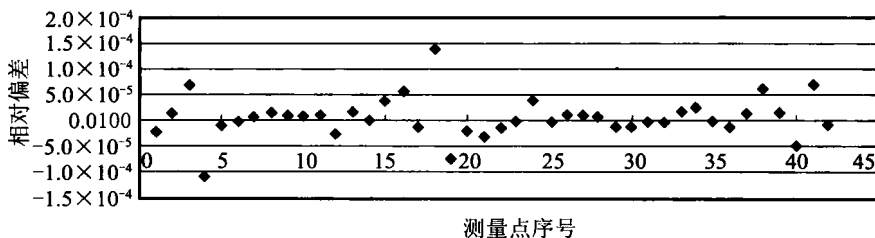


图 1.1 重力计算值与测量值偏差

对于重力值准确度要求低于 5×10^{-5} 的地方,可以根据该地纬度(rad)和海拔高度,用(1.6)和(1.7)两式计算所需重力值,对应的极限误差可取 $\pm 0.005\%$ 。

5 重力随时间变化

计量院重力室到 1999 年,用长达 12 年的时间考察北京某地重力值随时间的变化,结果见图 1.2。

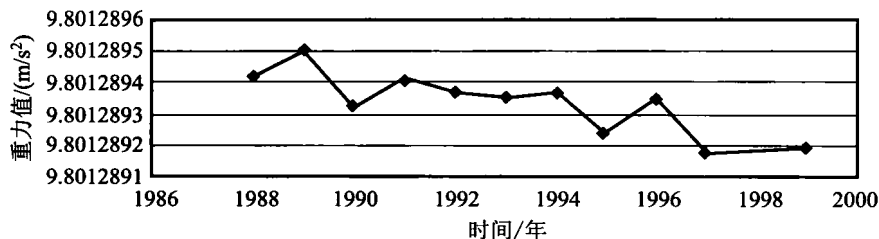


图 1.2 重力值随时间变化

结果表明,该地重力值随时间有稍许下降趋势,12 年下降 $30 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ 。略去该变化,可以认为该地 12 年的平均重力值为 $(9.80128934 \pm 0.00000038) \text{ m/s}^2$,即扩展不确定度 0.00000038 m/s^2 , $k=2$,相对扩展不确定度 3.9×10^{-8} , $k=2$ 。

6 结 论

对于重力值准确度要求低于 5×10^{-5} 的地方,可以根据该地纬度和海拔高度,用(1.6)和(1.7)两式计算所需重力值,对应的极限误差可取 $\pm 0.005\%$ 。对于在力学计量,热工计量和电学计量中需要准确(优于 5×10^{-5})知道所在地点重力值的单位,可请计量院或大地测量部门用绝对法或相对法进行测量。重力值随时间变化可以略去。

第 2 篇 获得实验室重力值

1 前 言

地球表面各点的重力值 g (又称重力加速度值) 在力学计量 (如测力、质量、硬度、密度、振动等)、热工计量 (如流量、压力等), 以及电学计量中均十分重要。重力值的大小及其不确定度对很多计量结果有极大影响。为此, 从 16 世纪开始以伟大的意大利物理学家伽利略 (Galileo Galilei, 1564—1642) 为代表的科学家不断深入研究重力的机理、重力值的测量与计算方法。从 20 世纪中叶开始直到如今, 由于军事、地球科学、航天航空、石油矿业及计量等迫切需求, 美 (NIST)、意 (INRIM)、中 (NIM)、日 (NMIJ)、法 (LNE)、德 (PTB)、英 (NPL) 等国计量工作者利用激光干涉原理研制出固定式和移动式绝对重力仪, 其重力值测量的合成不确定度达几微伽 (10^{-8} m/s^2)。对要求重力值 g 的相对极限偏差小于 5×10^{-5} 的实验室可请相关单位用绝对法或相对法在其重力基点上测量重力值, 这无疑需花费较多的经费与时间。

通过对大量的用绝对法得到的重力测量值与用经典的计算公式得到的重力计算值比较, 本文作者于 2001 年 4 月在“计量技术第 4 期”上发表的“重力加速度值的计算及实际应用”中得出结论: “对于重力值准确度要求低于 $\pm 5 \times 10^{-5}$ 的地方, 可以根据该地纬度和海拔高度, 用经典的重力计算公式计算所需重力值, 对应的极限误差可取 $\pm 0.005\%$ ”。在该结论发表后一年半, 即 2002 年 9 月德国 PTB 计量学家也得出完全相同的结果[4]: 实例证明, 重力的计算值和实测值的相对偏差小于 $\pm 5 \times 10^{-5}$ 。

基于上述事实, 当实验室对重力值相对准确度要求不大于 $\pm 5 \times 10^{-5}$ 时, 只要知道实验室所在地点的纬度和海拔高度 (ϕ, h) 即可计算出所需重力值。

2 获得重力值

纬度和海拔高度 (ϕ, h) 已知的地点对应的重力值可用式 (2.1) 计算[1][2][3]:

$$g_{\phi h} = 9.780327(1 + 0.00530244 \sin^2 \phi - 0.00000585 \sin^2 2\phi) - 0.000003085h (\text{m/s}^2) \quad (2.1)$$

式中, 纬度 ϕ 以弧度为单位, 代入公式时应先将以 $\times^\circ \times'$ 表示的纬度单位换算成弧度单位; 海拔高度 h 以 m 为单位。用该公式计算出的重力值和实测值的相对偏差在绝大多数情况下小于 $\pm 5 \times 10^{-5}$, 其余极少数也小于 $\pm 1.5 \times 10^{-4}$ 。

根据该公式算出的全球正常重力值的最大值为 9.8322m/s^2 , 纬度 $\phi = 90^\circ$ (两极)。最小值为 9.7803m/s^2 , 纬度 $\phi = 0^\circ$ (赤道)。两者的相对偏差为 0.53% 。

纬度 ϕ 偏差小于 $1'$, 对应产生的 g 最大相对偏差 1.6×10^{-6} ; 海拔高度 h 偏差小于 10m , 对应产生的 g 最大相对偏差 3×10^{-6} 。

在表 2.1 中给出中国 34 个直辖市与省会或自治区首府的有关地点的 (ϕ, h, g)。图 2.1 给出上述各 g 值与 9.80000m/s^2 的相对差值。在表 2.1 中没有给出的地点的 (ϕ, h, g) 可通过上网 (或手机等) 查找 (ϕ, h), 计算所需 g 值。

表 2.1 直辖市与省会重力值

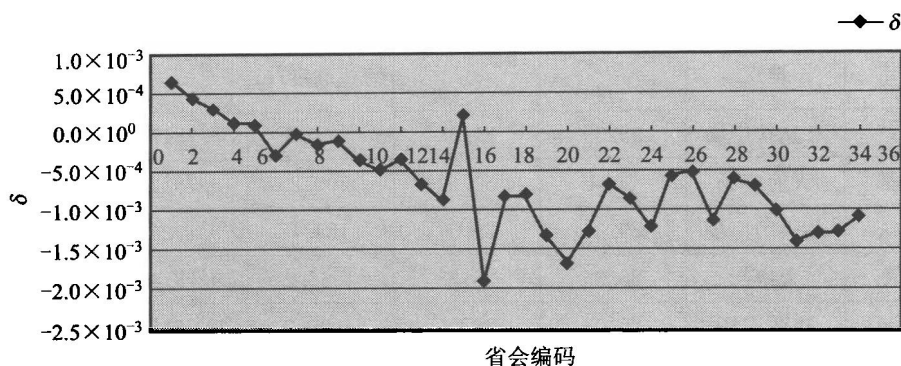
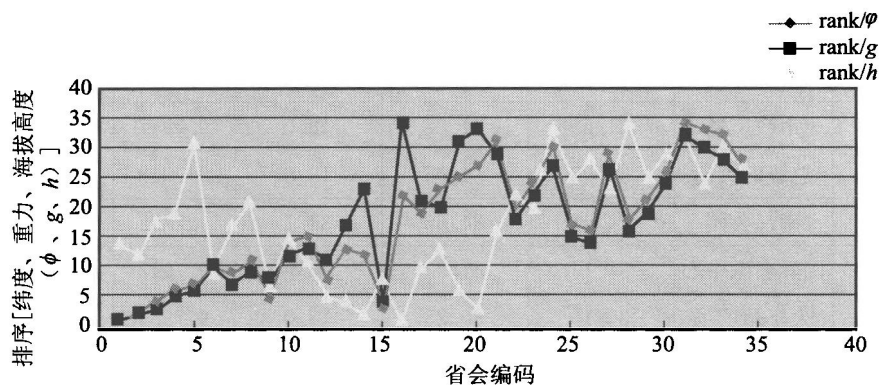
城市	地点	纬度 $\phi \times^\circ \times' (\text{度、分})$	纬度 $\phi \times^\circ \times' (\text{度})$	海拔高度/ m	重力值 $g/(\text{m/s}^2)$	δ
哈尔滨	市政广场	45.48	45.80	116.1	9.8066	6.7×10^{-4}
长春	文化广场	43.53	43.88	232.0	9.8045	4.6×10^{-4}
沈阳	市政广场	41.48	41.80	51.8	9.8032	3.2×10^{-4}
北京	天安门广场	39.54	39.90	46.6	9.8015	1.5×10^{-4}
天津	火车站广场	39.08	39.13	6.7	9.8009	9.3×10^{-5}
太原	五一广场	37.52	37.87	802.5	9.7973	-2.7×10^{-4}
石家庄	市政广场	38.03	38.05	78.0	9.7997	-2.7×10^{-5}
济南	泉城广场	36.4	36.67	39.3	9.7986	-1.4×10^{-4}
呼和浩特	新华广场	40.49	40.82	1057.0	9.7992	-8.6×10^{-5}
郑州	二七广场	34.45	34.75	106.7	9.7968	-3.3×10^{-4}
西安	大雁塔广场	34.13	34.22	426.7	9.7954	-4.7×10^{-4}
银川	光明广场	38.28	38.47	1113.7	9.7969	-3.2×10^{-4}
兰州	东方红广场	36.03	36.05	1525.5	9.7935	-6.6×10^{-4}
西宁	中心广场	36.37	36.62	2250.0	9.7918	-8.4×10^{-4}
乌鲁木齐	人民广场	43.48	43.80	894.3	9.8024	2.4×10^{-4}

续表

城市	地点	纬度 $\phi \times \times^\circ$ $\times \times'(\text{度、分})$	纬度 $\phi \times \times.$ $\times \times^\circ(\text{度})$	海拔高度/m	重力值 $g/(\text{m/s}^2)$	δ
拉萨	布达拉广场	29.39	29.65	3650.6	9.7817	-1.9×10^{-3}
成都	天府广场	30.4	30.67	500.2	9.7922	-7.9×10^{-4}
重庆	朝天门广场	29.34	29.57	184.1	9.7923	-7.8×10^{-4}
贵阳	大南门	26.35	26.58	1066.2	9.7874	-1.3×10^{-3}
昆明	市政广场	25.03	25.05	1895.2	9.7837	-1.7×10^{-3}
南宁	南湖广场	22.49	22.82	78.3	9.7879	-1.2×10^{-3}
武汉	洪山广场	30.33	30.55	37.5	9.7936	-6.6×10^{-4}
长沙	火车站广场	28.12	28.20	43.6	9.7917	-8.4×10^{-4}
广州	海珠广场	23.07	23.12	4.3	9.7883	-1.2×10^{-3}
合肥	市政广场	31.52	31.87	18.0	9.7947	-5.4×10^{-4}
南京	总统府大门	32.03	32.05	12.8	9.7948	-5.3×10^{-4}
南昌	南昌公园	24.41	24.68	34.7	9.7892	-1.1×10^{-3}
上海	国际金融中心	31.14	31.23	3.0	9.7942	-5.9×10^{-4}
杭州	火车站广场	30.15	30.25	18.0	9.7934	-6.7×10^{-4}
福州	五一广场	26.05	26.08	12.2	9.7903	-9.9×10^{-4}
海口	钟楼广场	20.03	20.05	6.4	9.7864	-1.4×10^{-3}
澳门	行政区前广场	22.11	22.18	32.6	9.7876	-1.3×10^{-3}
香港	香港会议中心	22.17	22.28	9.4	9.7877	-1.3×10^{-3}
台北	市政广场(101楼)	25.02	25.03	16.8	9.7895	-1.1×10^{-3}

偏差 $\delta = (g - 9.80) / 9.80$

由表 2.1 可见,计算点的纬度最高与最低的省会分别为哈尔滨($45^\circ 48'$)与海口($20^\circ 03'$);计算点的重力值最大与最小的省会分别为哈尔滨(市政广场) $g = 9.8066 \text{ms}^{-2}$ ($45^\circ 48'$, 116m)与拉萨(布达拉广场) $g = 9.7817 \text{m/s}^2$ ($29^\circ 39'$, 3650m)。图 2.2 给出省会计算点的纬度由高到低,重力值由大到小,海拔由高到低的排序,排序为 1 的数值在同类中最大。由图可见,重力值的大小主要取决于纬度高低。

图 2.1 $\delta = (g - 9.8000) / 9.8000$ vs 省会图 2.2 排序[纬度、重力、海拔高度(ϕ, g, h)] vs 省会

3 结 论

计算与实测结果表明,利用已考虑纬度与海拔高度影响的式(2.1)计算出的重力值与实测值的相对极限误差不大于 $\pm 5 \times 10^{-5}$ 。

根据网址查出中国 34 个直辖市与省会或自治区首府的有关地点的纬度与海拔高度(ϕ, h),计算出的重力值 g 可广泛用于力学计量、热工计量和电学等计量中。在表 2.1 中没有给出的地点,通过上网或手机查找(ϕ, h),计算所需重力值 g 。

第 3 篇 关于我国衡器 重力区划分的建议

引 言

随着电子技术的发展,在国内外贸易中,使用由称重传感器特别是应变式传感器作为承载元件的电子衡器越来越多。这些称重传感器大多数在使用前用产生力值的仪器或机器进行校准,主要是各种力标准机:静重式、杠杆式、叠加式或液压式。当把称重传感器组装到衡器上后,虽然制造厂已经用标准砝码进行检定或校准过,但仍应根据具体使用地点对相应的衡器进行调整,以消除由于重力值的不同所带来的附加误差。这些对于已使用电磁补偿称重传感器,并且用内置的调整砝码或外部的已校精密砝码进行调整的高精度衡器不成问题。但从商业观点看使用内装调整砝码太贵,从法制计量观点看衡器使用地一般不允许用户用外带砝码进行调整,只能由授权的计量人员调整。因此,当衡器的制造地点和使用地点的地理纬度 ϕ 和海拔高度 h 相差较大时,制造厂应根据二者差值引起的重力值之差对衡器进行相应调整——称作重力值调整。如果能够在全国范围内进行适当的重力区划分,衡器制造厂能据此对所制造的全部衡器进行预先调整,并在衡器铭牌上标出与预定使用地点的重力值范围相对应的纬度 ϕ 和海拔高度 h 的范围。这样不仅有利于制造厂对衡器的重力调整,也有利于使用者购买满足自己要求的衡器。同时使用者可以自由地在标出的纬度和海拔高度对应的地理区域内移动衡器,不必考虑其位置变化给称重值带来的附加误差。

1 基本原理

设衡器制造地点 A 的重力值为 g_A ,其纬度和海拔高度分别为 ϕ_A, h_A ;使用地点 B 的重力值为 g_B ,其纬度和海拔高度分别为 ϕ_B, h_B 。质量为 m 的物体在 A, B 两点产生的力值:

$$f_A = mg_A(1 - \rho_{al}/\rho) \quad (3.1)$$

$$f_B = mg_B(1 - \rho_{a2}/\rho) \quad (3.2)$$

式中: ρ_{a1}, ρ_{a2} ——分别为衡器制造地点和使用地点的空气密度;

ρ ——物体 m 的材料密度。

所谓重力值调整是指当该衡器在 B 点得到 f_A 的显示值时, 对应的所加砝码质量为 m' , 令

$$f_A = m'g_B(1 - \rho_{a2}/\rho) \quad (3.3)$$

假设二地空气密度相同, 即 $\rho_{a1} = \rho_{a2}$, 由式(3.1)、式(3.3)得

$$\begin{aligned} mg_A &= m'g_B \\ \frac{m' - m}{m} &= \frac{g_A - g_B}{g_B} \end{aligned}$$

即

$$\frac{\Delta m}{m} = \frac{g_A - g_B}{g_B} \quad (3.4)$$

对应的调整质量为 $-\Delta m$, 式(3.4)为在衡器制造地点对其按使用地点重力值进行调整时, 质量调整的计算公式。由此看到, 当衡器使用地点的重力值与其制造地点的重力值相差较大时, 制造厂应对该衡器进行重力值调整。调整前提是在一定准确度范围内知道二个地点的重力值。

2 一些国家的重力区划分情况

意大利、德国分别于 1994 年和 1995 年在国家的计量法规中规定了重力区, 这些法规使衡器生产厂能够直接使用该法规定的一个、二个或几个重力区的平均重力值对衡器进行正确调整。与此同时, 奥地利也作了相应的重力区划分。

由于全球重力相对变化较小, 因此能够确定足够大的重力区。在高度 h 相同时, 重力值的最大变化 $\Delta g_{\max}$ (即两极与赤道的重力差值) 约为 0.05m/s^2 或 0.5% 。在地理纬度 ϕ 相同时, 重力值随高度 h 的增加而变小, 每 1000m 减少 0.003m/s^2 。因此重力区主要是针对那些南北距离大或者地势高低不平的国家或地区。欧洲法制计量合作组织于 2000 年建立了统一的重力区。

重力区的大小和数目取决于衡器在重力区域内移动时对其允许的最大误差, 即重力区的重力值最大变化范围。德国和意大利利用式(3.5)确定重力区的重力值范围:

$$\Delta g/g \leq e_{\text{mp}}/(n \cdot e) \quad (3.5)$$

式中: $\Delta g/g$ ——重力区内重力值的相对允许变化量;

e_{mp} ——所关心的衡器的最大允许误差;