

陈明. 微重力测量观测精度提高方法探讨[J]. 华南地震, 2020, 40 (3): 76-83. [CHEN Ming. Discussion on Improving the Observation Precision of Microgravimetry [J]. South China journal of seismology, 2020, 40 (3): 76-83]

# 微重力测量观测精度提高方法探讨

陈 明

(广东省地球物理探矿大队, 广州 510800)

**摘要:** 随着城市地下空间探测的开展, 微重力测量在该领域引入, 研究 CG-5 重力仪重力测量精度提高成为保证微重力测量总精度的关键。通过野外资料整理, 结合 CG-5 重力仪的仪器性能特点, 研究其在不同振动环境下读数规律, 并提出相关实际操作方法以保证测量精度, 为城市地下空间探查方法研究中微重力测量提供可操作的一系列重力观测方法。通过该系列研究, 总结了 CG-5 重力仪提高测量精度的方法, 特别利用线性回归取数法满足了城市特别环境重力测量要求, 确保了微重力测量在城市地下空间探测中顺利开展。

**关键词:** 大微重力测量; 重力观测; 线性回归; 重力仪

**中图分类号:** P631.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-8662 (2020) 03-0076-08

**DOI:** 10.13512/j.hndz.2020.03.011

## Discussion on Improving the Observation Precision of Microgravimetry

CHEN Ming

(Geophysical Exploration Brigade of Guangdong Province, Guangzhou 510800, China)

**Abstract:** With the development of urban underground space exploration, microgravimetry is introduced in this field. The study of improvement of the measuring accuracy of CG-5 gravimeter gravimetry becomes the key to ensure the overall accuracy of microgravimetry. Based on the summary of field data and the performance characteristics of CG-5 gravimeter, this paper studies the reading law of the gravimeter under different vibration environments, and puts forward practical operation methods to ensure the measurement accuracy, which provides a series of microgravimetry operable methods for exploration of urban underground space. Through this series of studies, the methods to improve the measurement accuracy of CG-5 gravimeter are summarized. In particular, linear regression method of gravimeter reading is used to satisfy the requirements of urban special environment, which ensures development of gravity measurement smoothly in urban underground space exploration.

**Keywords:** Microgravimetry; Gravity observation; Linear regression; Gravimeter

### 0 前言

目前重力测量应用于矿产地质普查、勘查

项目减少, 而作为新一轮城市地下空间探查需要, 微重力测量有其独特优势, 但对其测量精度要求较高, 要求达微伽级。CG-5 高精度重力

收稿日期: 2020-05-15

基金项目: 广州市科技计划项目 (2019-03-01-14-1008-0001)

作者简介: 陈明 (1971-), 男, 高级工程师, 主要从事重力、磁法、电法、电磁法勘查研究工作。

E-mail: aming1-l@163.com

仪作为微伽级重力仪，研究其测量环境及成果应用解释，符合城市地下空间探查的需求。

微重力测量的总精度与重力野外测量方法一系列测量步骤有关，其较常规重力测量，从仪器的选择、调节、观测、记录、异常改正、异常分析及提取均要做细致处理。而重力观测是微重力测量整个过程中极其关键一步，有效分析不同的重力观测环境，有针对性的提出相应的重力观测方法，直接关系到微重力测量的生命力。

1 CG-5 高精度重力仪性能概况

CG-5 高精度重力仪标称为微伽级重力仪，其仪器性能较好，标准的  $1\times 10^{-8}\text{m/s}^2$  分辨率、误差  $<5\times 10^{-8}\text{m/s}^2$ ；数据重复性试验良好，厂家

称有记录证明：CG-5 的测量读数与基站值之间的标准差小于  $0.005\times 10^{-5}\text{m/s}^2$ 。这些厂家指标在生产试验中也得到证明，如：年静态试验结果<sup>[1]</sup>中，残余振幅基本都在  $15\times 10^{-8}\text{m/s}^2$  之内，平均漂移率为  $(0.7\sim 1.7)\times 10^{-5}\text{m/s}^2/\text{d}$ ，线性度良好。动态试验结果<sup>[2]</sup>中，动态精度小于  $7.93\times 10^{-8}\text{m/s}^2$ 。笔者收集 2013 年至 2019 年 CG-5 型 1#、2#、3# 三台重力仪动、静态试验结果表明，仪器静态零点位移呈线性分布，静态零点位移与线性回归直线的最大偏差为  $0.019\times 10^{-5}\text{m/s}^2$ 、最大偏差小于  $0.010\times 10^{-5}\text{m/s}^2$  试验台次占比为 85%，详见表 1；仪器动态零点位移呈线性分布，动态零点位移与线性回归直线的最大偏差为  $0.013\times 10^{-5}\text{m/s}^2$ 、最大偏差小于  $0.010\times 10^{-5}\text{m/s}^2$  试验台次占比为 87%，详见表 2。

表 1 CG-5 型重力仪静态试验结果统计表  
Table 1 Statistical table of static test results of CG-5 gravimeter

仪器编号	试验日期 / (年 - 月 - 日)	平均零点位移率 / ( $10^{-5}\text{m}\cdot\text{s}^{-2}/\text{h}$ )	静态曲线与线性回归直线的最大偏差 / ( $10^{-5}\text{m/s}^2$ )
1	2013-10-06	0.007	-0.008
	2013-11-10	-0.007	0.008
	2014-03-18	0	0.006
	2014-06-10	0.037	-0.013
	2014-07-20	0.019	-0.013
	2014-10-02	0.002	0.009
	2014-10-12	0.004	-0.006
	2016-11-22	0.007	-0.009
	2018-04-04	0.001	0.007
2	2013-05-02	0.002	0.006
	2013-05-02	0.009	0.008
	2013-11-10	0.003	0.003
	2014-03-18	-0.001	0.005
	2014-06-12	0.007	0.007
	2014-08-18	0.015	0.019
	2016-11-22	-0.001	0.003
	2018-04-04	0.002	0.008
3	2013-05-02	0.003	-0.007
	2013-05-02	0.007	-0.008
	2013-11-10	0	0.007
	2014-03-18	-0.002	0.006
	2014-06-11	0.015	0.007
	2014-07-30	0.021	0.006
	2014-09-24	0.016	-0.013
	2014-10-14	0.025	-0.008
	2016-11-22	-0.004	-0.008
	2018-04-04	0.003	-0.007

表 2 CG-5 型重力仪动态试验结果统计表  
Table 2 Statistical table of dynamic test results of CG-5 gravimeter

仪器 编号	试验日期 / (年 - 月 - 日)	动态平均零点位移率 / ( $10^{-5}\text{m}\cdot\text{s}^{-2}/\text{h}$ )	动态零点位移曲线与回归直线的 最大偏差 /( $10^{-5}\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ )	动态均方误差 / ( $10^{-5}\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ )
1	2013-10-06	0.002	-0.015	$\pm 0.007$
	2013-11-10	-0.002	0.008	$\pm 0.006$
	2014-03-19	-0.004	0.006	$\pm 0.004$
	2014-06-20	-0.004	0.006	$\pm 0.005$
	2014-09-17	-0.013	0.012	$\pm 0.006$
	2016-03-31	-0.004	0.004	$\pm 0.003$
	2018-04-09	0.004	0.009	$\pm 0.008$
2	2013-05-30	0.003	0.005	$\pm 0.003$
	2013-08-24	0.001	0.003	$\pm 0.002$
	2013-11-10	-0.003	0.005	$\pm 0.003$
	2014-03-19	-0.004	0.013	$\pm 0.004$
	2014-06-20	0.002	0.007	$\pm 0.004$
	2014-09-17	0.002	0.005	$\pm 0.002$
	2016-03-31	0.003	0.006	$\pm 0.004$
3	2013-05-30	0.004	-0.007	$\pm 0.002$
	2013-08-24	0.002	-0.004	$\pm 0.002$
	2013-11-10	-0.001	0.003	$\pm 0.002$
	2014-03-19	-0.004	0.005	$\pm 0.003$
	2014-06-20	0.007	0.005	$\pm 0.005$
	2014-09-17	0.014	-0.007	$\pm 0.006$
	2016-03-31	0.005	0.008	$\pm 0.006$
3	2018-04-09	0.016	-0.005	$\pm 0.003$

通过前人成果及笔者收集三台重力仪的多次动、静态试验结果<sup>[3-4]</sup>分析可见,CG-5 型重力仪动、静态曲线线性较好,动态试验均方误差均小于  $0.010\times 10^{-5}\text{m/s}^2$ 。特别是表 2 动态试验均方误差均小于等于  $0.005\times 10^{-5}\text{m/s}^2$  占 70%, 这些结果说明 CG-5 重力仪在重力观测上经过一系列的控制足可满足  $0.005\times 10^{-5}\text{m/s}^2$  的观测精度, 满足微重力测量的最终精度要求。

2 操作员的影响

CG-5 重力仪使用过程中, 操作员或附近走动人员会对重力仪读数有一定影响<sup>[5-6]</sup>, 为了测试该影响, 选择了一地基稳定的场所进行测试, 记录距离 1~5m, 每个距离记录读数 10 个。工作方式是: 待重力仪进入测量稳定状态后, 用遥控的方式打开重力仪, 记录不同距离人员走动时重力仪读数, 结果表明: 人员在 1m 处走动对重力仪的读数影响较大, 各读数与 10 个

读数的均值差最大值为  $0.006\times 10^{-5}\text{m/s}^2$ , 小于  $0.003\times 10^{-5}\text{m/s}^2$  的也只有 4 个, 至于大于 2m 距离后, 人员走动对重力仪观测的影响不大。详见图 1。

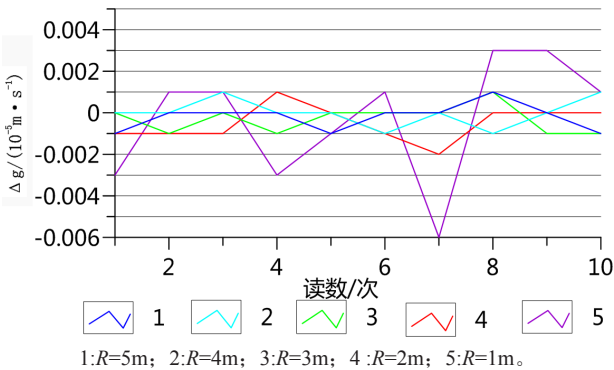


图 1 1-5 m 行人干扰源对重力仪读数影响  
Fig.1 Influence of 1-5 m pedestrian interference source on gravimeter reading

从该试验结果分析可知, 重力仪在进行高精度操作时, 操作员或不相关人员应在重力仪

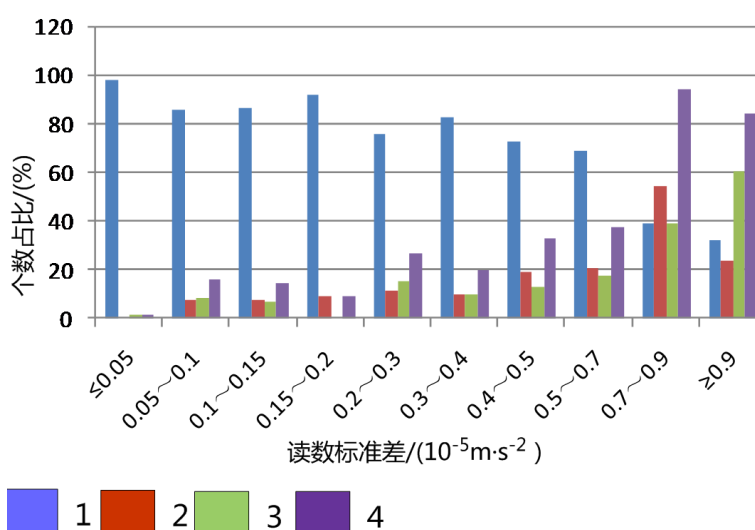
采集数据时离开 1m 以上，如果场地为软土等易引起震动的场地，还应视不同性质的场地作出更大的调整，具体应按不同精度要求结合该结果作相应的测试后规定。经过该方法的控制，足可控制操作员或其它人为情况对重力观测的影响。

### 3 振动环境的影响

CG-5 重力仪测量时的振动干扰由不同读数标准差反映，研究 CG-5 重力仪测量时读数可靠性问题，可通过研究不同读数标准差时读数回归值来分析。

为了说明 CG-5 重力仪一般工作条件下的读数可靠性问题，对某地区重力水准加密点测量项目数据进行数据处理。该项目沿国道或街道施工，其设计规定，采集数据时，对于读数时标准差小于  $0.2 \times 10^{-5} \text{m/s}^2$  的读数设置读数时间为 60 s，大于该标准差的读数时间为 30 s，连

续 3 个读数相互差值小于  $0.005 \times 10^{-5} \text{m/s}^2$  的视作满足读数要求。为了研究读数受振动环境干扰影响问题，对该项目数据作以下处理：连续 3 个读数相互差值小于  $0.005 \times 10^{-5} \text{m/s}^2$  的直接进行统计，不满足连续 3 个读数相互差值小于  $0.005 \times 10^{-5} \text{m/s}^2$  的，每一测点上剔除跳点，选择相互差值小于  $0.005 \times 10^{-5} \text{m/s}^2$  的 3 个读数计算均值，再计算该均值与该测点其它值的差值，该差值小于  $0.005 \times 10^{-5} \text{m/s}^2$  的视同是满足读数精度，否则视为不满足读数精度，然后统计不同读数标准差环境下偏离视同满足读数精度的偏离率。共对 467 个测点共 1918 个数据进行整理，其规律显示读数标准差小于  $0.2 \times 10^{-5} \text{m/s}^2$  时，读数时偏离  $0.005 \times 10^{-5} \text{m/s}^2$  的数据占比小于 15.7%，分析认为该种现象主要由偶然因素引起，工作中注意就可。标准差约大于  $0.2 \times 10^{-5} \text{m/s}^2$  时，偏离  $0.005 \times 10^{-5} \text{m/s}^2$  的数据占比大于 30%，该环境下读数明显存在背景干扰因素，读数应引入数组处理方可能读取有效数据。相关统计结果见表 3、图 2。



(1) 某读数标准差段各测点读数与测点均值读数差  $\leq 0.005 \times 10^{-5} \text{m/s}^2$  的数据在该读数标准差段的数据占比；(2) 某读数标准差段各测点读数与测点均值读数差在  $0.005 \sim 0.01 \times 10^{-5} \text{m/s}^2$  间的数据在该读数标准差段的数据占比；(3) 某读数标准差段各测点读数与测点均值读数差  $\geq 0.01 \times 10^{-5} \text{m/s}^2$  数据在该读数标准差段的数据占比；(4) 某读数标准差段各测点读数与测点均值读数差  $> 0.005 \times 10^{-5} \text{m/s}^2$  数据在该读数标准差段的数据占比。

图 2 某地区重力水准加密点测量项目不同标准差背景读数精度规律统计图

Fig.2 Statistical chart of background reading accuracy with different standard deviations of gravity leveling encryption point measurement items in a certain area

同样，为了研究 CG-5 重力仪读数问题，选择某汽车站及某城市大街附近找场地进行 25~60 s 不同采样时长读数测试试验。经分析发现：

某汽车站旁仪器的读数标准差在  $0.080 \sim 0.110 \times 10^{-5} \text{m/s}^2$  间，对比其读数经做直线

拟合后的剩余值的离差，发现 30 s、35 s 两个读数间隔的曲线离差在  $0.005 \times 10^{-5} \text{m/s}^2$  以内，而 25 s 读数间隔的曲线总体线性与 30 s、35 s 两个读数间隔的曲线相近，并多见局部跳动。某大街旁仪器的读数标准差在  $0.060 \sim 0.085 \times 10^{-5} \text{m/s}^2$  间，

其读数经做直线拟合后的剩余值的离差均在  $0.005 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$  以内。详见表 4、5 及图 3~7。

实验证明：在轻微震动的地方，只要读数标准差不大，则重力仪的读数精度是可靠的。

重力仪在低背景干扰的情况下，读数稳定，干扰背景越高，读取到真值就越困难，并不以重复时间长短成正比。

表 3 某地区重力水准加密点测量项目不同标准差背景读数精度规律统计表

Table 3 Statistical table of background reading accuracy with different standard deviations of gravity level encryption point measurement items in a certain area

标准差 / ( $10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ )	数据量	差值 $\leq 0.005$ 数据量	差值 $0.005 \sim 0.01$ 数据量	差值 $\geq 0.01$ 数据量	差值 $\leq 0.005$ 数据占比	差值 $0.005 \sim 0.01$ 数据占比	差值 $\geq 0.01$ 数据占比	差值 $> 0.005$ 数据占比
$\leq 0.05$	106	104	0	2	98.1	0	1.9	1.9
$0.05 \sim 0.1$	171	146	11	14	85.4	7.5	8.2	15.7
$0.1 \sim 0.15$	276	238	19	19	86.2	8	6.9	14.9
$0.15 \sim 0.2$	390	358	32	0	91.8	8.9	0	8.9
$0.2 \sim 0.3$	459	348	40	71	75.8	11.5	15.5	27
$0.3 \sim 0.4$	208	171	17	20	82.2	9.9	9.6	19.5
$0.4 \sim 0.5$	128	93	18	17	72.7	19.4	13.3	32.7
$0.5 \sim 0.7$	99	68	14	17	68.7	20.6	17.2	37.8
$0.7 \sim 0.9$	28	11	6	11	39.3	54.5	39.3	93.8
$\geq 0.9$	53	17	4	32	32.1	23.5	60.4	83.9

注：总数据量为 1918

表 4 某汽车站 25~60 s 读数标准差与离差统计表

Table 4 Statistics table of standard deviation and deviation of readings from 25 to 60 seconds at a bus station

读数时长 /s	sd 最大值	读数标准离差 / ( $10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ )
25	0.11	0.008
30	0.084	0.004
35	0.107	0.003
40	0.084	0.006
50	0.085	0.005
60	0.089	0.006

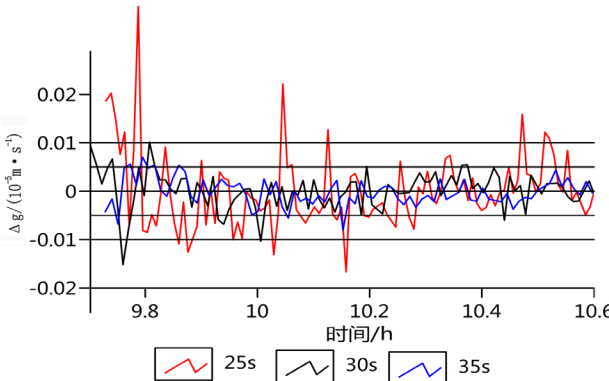


图 3 某汽车站旁读数间隔 25~35 s 读数偏差曲线图  
Fig.3 Curve of reading deviation at a reading interval of 25~35 seconds at a bus station

表 5 某大道 25~60 s 读数标准差与离差统计表

Table 5 Statistics table of standard deviation and deviation of readings from 25 to 60 seconds for a certain avenue

读数时长 /s	sd 最大值	读数标准离差 / ( $10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ )
25	0.081	0.002
30	0.076	0.002
35	0.064	0.002
40	0.077	0.002
45	0.074	0.001
50	0.062	0.002
55	0.077	0.002
60	0.063	0.001

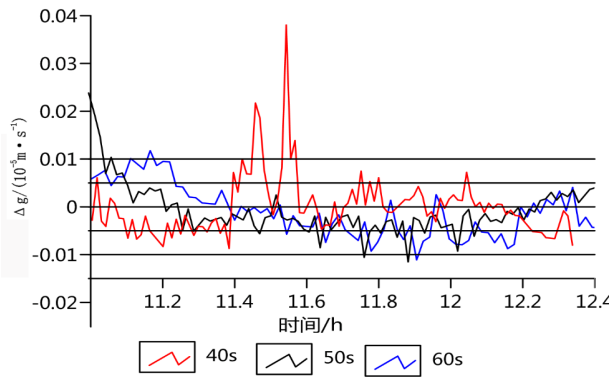


图 4 某汽车站读数间隔 40~60 s 读数偏差曲线图  
Fig.4 Curve of reading deviation at a reading interval of 40~60 seconds at a bus station



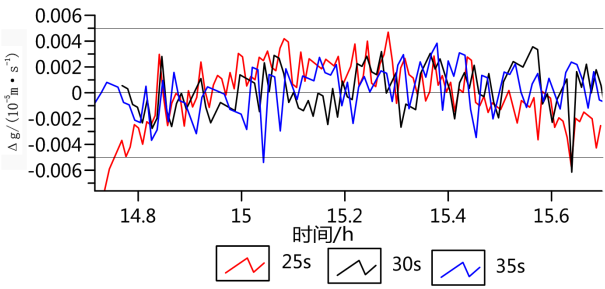


图 5 某大道读数间隔 25~35 s 读数偏差曲线图

Fig.5 Curve of reading deviation at a reading interval of 25~35 seconds for a certain avenue

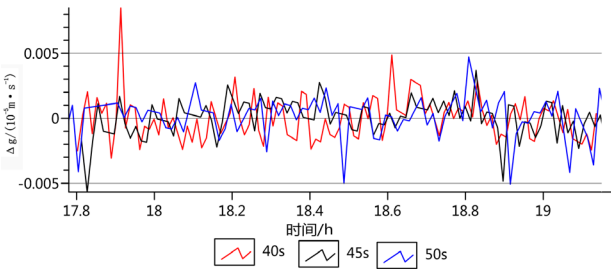


图 6 某大道读数间隔 40~50 s 读数偏差曲线图

Fig.6 Curve of reading deviation at a reading interval of 40~50 seconds for a certain avenue

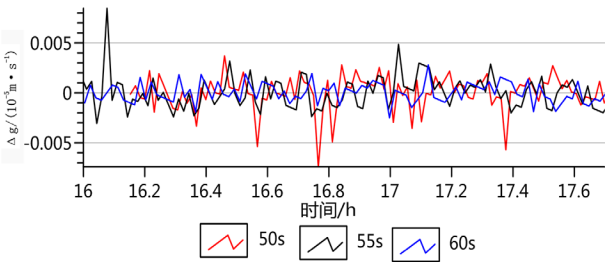


图 7 某大道读数间隔 50~60 s 读数偏差曲线图

Fig.7 Curve of reading deviation at a reading interval of 50~60 seconds for a certain avenue

为了更好的说明振动干扰环境下的读数取值问题，在某高速公路的出口处进行了 2 h 的读数间隔 30 s 及 60 s 连续静态观测，结果详见图 8。该数据表明，经 CG-5 重力仪取值后，读数间隔 30 s 和 60 s 的两条曲线，其曲线响应的干扰不存在简单的时点对应关系。对该数据进行零点位移改正后，再对其偏离进行统计，结果发现，60 s 间隔进行读数时，其偏离  $0.005 \times 10^{-5} \text{m/s}^2$  的数据量比例比 30 s 间隔进行取数的比例大（见表 6~7）。在此基础上，进行标准差按  $0.05 \times 10^{-5} \text{m/s}^2$  间隔分类，大于  $0.3 \times 10^{-5} \text{m/s}^2$  的直接归一类，并分类统计生成表 8~9，其结果发现，运用 30 秒间隔进行取数时，其不同标准差区段的平均数与线性回归值接近的出现率更高，取数时标准差的标准离差也相对较小。

由此说明，在高干扰背景下，较短的取数间隔多次取数，更有利于重力值的取值。

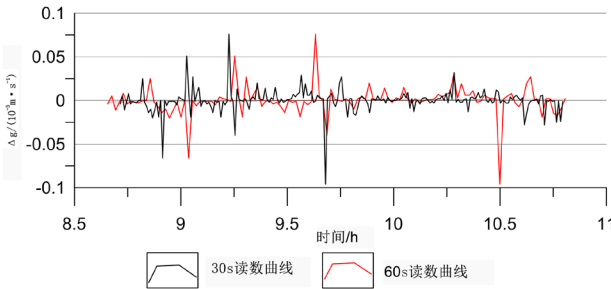


图 8 某高速出口干扰环境不同观测时长重力读数曲线图

Fig.8 Gravity reading curve of a highway exit with different observation duration

表 6 某高速路口 60 s 读数不同标准差段统计表

Table 6 Statistical table of different standard deviation of 60 seconds readings at a highway exit

标准差范围 / ( $10^{-8} \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ )	个数	偏离 > $0.005 \times 10^{-5} \text{m/s}^2$ 个数	不合格占比 (%)	几何平均 / ( $10^{-8} \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ )	标准离差 / ( $10^{-8} \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ )	算术平均 / ( $10^{-8} \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ )
0 ~ 0.05	10	5	50	5001.702	0.004 138	5001.702
0.051 ~ 0.1	45	17	37.8	5001.705	0.008 361	5001.705
0.101 ~ 0.150	22	8	36.4	5001.703	0.007 415	5001.703
0.151 ~ 0.2	16	9	56.3	5001.693	0.015 655	5001.694
0.201 ~ 0.3	15	9	60	5001.701	0.016 83	5001.701
0.301 ~ 0.9	12	9	75	5001.688	0.0262 75	5001.688
总点数	120	线性均值 ( $10^{-8} \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ )		5001.701		

表 7 某高速路口 30 s 读数不同标准差段统计表

Table 7 Statistical table with different standard deviation of 30 seconds readings at a highway exit

标准差范围 / (10 <sup>-8</sup> m·s <sup>-2</sup> )	个数	偏离> 0.005×10 <sup>-5</sup> m/s <sup>2</sup> 个数	不合格占比 / (%)	几何平均 / (10 <sup>-8</sup> m·s <sup>-2</sup> )	标准离差 / (10 <sup>-8</sup> m·s <sup>-2</sup> )	算术平均 / (10 <sup>-8</sup> m·s <sup>-2</sup> )
0 ~ 0.05	22	5	22.7	5068.244	0.004 57	5068.244
0.051 ~ 0.1	76	23	30.3	5068.241	0.006 176	5068.241
0.101 ~ 0.150	41	20	48.8	5068.241	0.007 571	5068.241
0.151 ~ 0.2	23	9	39.1	5068.238	0.008 702	5068.238
0.201 ~ 0.3	37	26	70.3	5068.241	0.013 443	5068.241
0.301 ~ 0.9	22	15	68.2	5068.236	0.034 131	5068.237
总点数	221	线性均值 (10 <sup>-8</sup> m·s <sup>-2</sup> )			5068.241	

工作中，由于重力仪在一个测点的读数用时相对较短，其零点位移可以不予考虑<sup>[7]</sup>，基于该设想，用某高速出口零改后的数据，用时距作横坐标，就可以研究不同标准差背景下，重力仪读取数值的最终取值问题。该研究曲线可以发现，该本已零点位移改正的重力静态曲线，其不同标准差段的趋势线是不一的，但经统计表 8~9 发现，其  $Y$  值是全部回到原零点位移后的趋势值附近，其偏差均小于  $5 \times (10^{-8} \text{m/s}^2)$ 。并且 30 秒间隔读数的  $Y$  值偏差均好于 60 秒间隔读数。

通过以上研究说明，重力仪读数是基于背

景弹性干扰下求取，当干扰背景的标准差小于  $0.150 \times 10^{-5} \text{m/s}^2$  时，读数时窗长度与最终的读数真值无多大关系，但在有不定期振动干扰的情况下，较短的读数时窗长度更有利于读数的求取，并且该值有附合趋势回归的特征，在振动干扰背景下，不应简单利用相邻读数不超过  $5 \times 10^{-8} \text{m/s}^2$  求取，应增加读数量，利用回归分析求取。

当然，该结果是在有限的有限的数据下分析的结果，至于在干扰背景下，应读取多少读数方可求取，与不同干扰背景有否关系还有待进一步研究。

表 8 某高速路口 30 s 读数不同标准差段对距曲线统计表

Table 8 Statistical table of distance curves with different standard deviations of 30-second readings at a highway exit

标准差 / (10 <sup>-8</sup> m·s <sup>-2</sup> )	斜率	截距	数据量	$X$ 的平均值	$Y$ 的平均值	判定系数, $R$ 平方	残差均方
0~0.05	0.000 246	5068.244	22	9.796 92	5068.244	0.000 007 84	0.000 021 9
0.051~0.1	0.002 954	5068.213	76	9.700 85	5068.241	0.075 696	0.000 035 7
0.101~0.150	0.002 315	5068.219	41	9.788 18	5068.241	0.036 695	0.000 056 6
0.151~0.2	-0.001 33	5068.251	23	9.616 9	5068.238	0.009 516	0.000 078 6
0.201~0.3	-0.006 24	5068.303	37	9.994 2	5068.241	0.080 385	0.000 171
0.301~0.9	-0.005 21	5068.286	22	9.583 13	5068.237	0.009 082	0.001 212

表 9 某高速路口 60 s 读数不同标准差段对距曲线统计表

Table 9 Statistical table of distance curves with different standard deviations of 60-second readings at a highway exit

标准差 / (10 <sup>-8</sup> m·s <sup>-2</sup> )	斜率	截距	数据量	$X$ 的平均值	$Y$ 的平均值	判定系数, $R$ 平方	残差均方
0 ~ 0.05	-0.007 75	5001.779	10	10.01 17	5001.702	0.691 455	0.000 594
0.051 ~ 0.1	-0.004 56	5001.749	45	9.669 41	5001.705	0.096 617	0.006 46
0.101 ~ 0.150	-0.002 91	5001.731	22	9.736 73	5001.703	0.077 387	0.005 33
0.151 ~ 0.2	0.008 765	5001.607	16	9.910 02	5001.694	0.157 406	0.000 221
0.201 ~ 0.3	-0.002 04	5001.72	15	9.766 13	5001.701	0.006 096	0.000 303
0.301 ~ 0.9	0.010 102	5001.594	12	9.442 92	5001.689	0.063 993	0.000 678

## 4 结论

CG-5 重力仪观测精度经过有效控制完全可以满足城市地下空间探测微重力测量的需要。振动干扰环境下重力测量精度控制方法有以下几点：

(1) 结合场地稳定性控制重力仪与周边流动人员的距离，可确保该项影响小于  $5 \times 10^{-8} \text{m/s}^2$ 。

(2) 在重力仪读数标准差相对较小时，可沿用连续 2 至 3 个读数相互差值小于  $5 \times 10^{-8} \text{m/s}^2$  时则视同该测点读数合格。

(3) 在重力仪读数标准差相对较大时，连续 2 至 3 个读数相互差值大于  $5 \times 10^{-8} \text{m/s}^2$  并多次测量均不满足时，应引入尽量用小的读数间隔多次重复测量，并应用数据回归分析方法提取测点的读数。

## 参考文献

- [1] 沈博, 袁尚武, 马玄龙, 等. CG-5 重力仪的漂移与寿命 [J]. 物探与化探, 2015, 39(2): 383-386.
- [2] 肖凡, 何志堂, 张宏伟, 等. CG-5 型相对重力仪测量精度分析 [J]. 测绘技术装备, 2011, 13 (2): 155-160.
- [3] 汪健, 孙少安, 邢乐林, 等. CG-5 重力仪的漂移特征 [J]. 大地测量与地球动力学, 2016, 36(6): 556-560.
- [4] 邢乐林, 李辉, 夏正超, 等. CG-5 重力仪零漂特性研究 [J]. 地震学报, 2010, 32(3): 369-373.
- [5] 尚立志, 张宝松, 黄宁. LCR-G、CG-5 型重力仪仪器性能试验比较 [J]. 绿色科技, 2017, (4): 137-139.
- [6] 刘代芹, 李杰, 朱自国, 等. 利用观测资料对 CG-5 型与 LCR-G 型相对重力仪精度初步评定 [J]. 内陆地震, 2012, 26(1): 45-50.
- [7] 于红娟, 郭金运, 刘扬, 等. CG-5 相对重力仪野外实验精度分析, 测绘科学, 2017, 42(3): 155-160.