

高斯法测量地磁场水平分量的改进

李涛* 陈骏逸 陆申龙
(复旦大学物理系, 上海 200433)
(收稿日期: 2005-07-27)

摘要 本文对高斯法测量微弱磁场的不足之处进行了分析和实验改进, 提高了实验准确度, 并与磁阻传感器法测地磁场水平分量进行比较.

关键词 地磁场水平分量; 高斯法测地磁场; 实验改进

IMPROVEMENT OF MEASURING HORIZONTAL COMPONENT WITH GAUSSIAN PROCESSES

Li Tao Chen Junyi Lu Shenlong
(Department of Physics, Fudan University, Shanghai, 200433)

Abstract The deficiency of measuring weak magnetic field by Gaussian processes is analyzed and improved. The accuracy of experimental measuring horizontal component of earth magnetic field is compared with the method of magnetic resistance sensor.

Key Words horizontal component of earth magnetic field; measuring earth magnetic field by Gaussian process; improvement of experiment

1 前言

高斯法测地磁场水平分量是在 1832 年首先由高斯提出的, 并在物理实验中应用它测地磁场. 虽然它的原理很简单, 但得到的结果却意义深刻. 很多国外大学也将此物理实验列入必选内容中. 笔者用高斯法进行实际测定, 觉得实验误差较大, 由此提出对它的一些改进, 避免测量合成磁场中磁针偏转角, 而是仅通过测量磁条振动周期及线圈电流得到地磁场水平分量, 由于这两个量可以准确测量, 从而获得较准确结果.

2 实验原理

高斯法原理如下: 细线上悬挂永久磁铁棒, 静止时磁铁棒与地磁子午线方向一致, 如图 1 所

示. 若磁体转动至与地磁子午线成 θ 角, 则磁铁棒受力矩 $L = MB \sin \theta$ (式中 M 为磁铁棒磁矩; B 为地磁磁感强度的水平分量), 忽略细线作用, 振动微分方程可写为

$$J \frac{d^2 \theta}{dt^2} + MB \sin \theta = 0 \quad (1)$$



图 1

式中 J 为磁体对转动轴的转动惯量. 它的解为

* 复旦大学 02 级物理系本科生.

$$T = 2 \sqrt{\frac{J}{MB} \left\{ 1 + \frac{1}{6} \theta^2 + \frac{9}{1024} \theta^4 + \dots \right\}} \quad (2)$$

其中 θ 是磁体的最大偏角.

由式(2)得振动周期关系为

$$T = 2 \sqrt{\frac{J}{MB}} \quad (3)$$

设 $X = MB = \frac{4}{T^2} J$, 实验中磁铁绕轴线转动的转动惯量为

$$J = m \left[\frac{l^2}{3} + \frac{a^2}{12} \right] \quad (4)$$

式中 l 为磁棒长度; a 为正方形截面磁棒的边长; m 为磁棒的质量.

又磁铁棒沿其径向方向产生的磁场 $B = \frac{\mu_0 M}{2d^3}$ (磁铁棒须满足磁偶极子的假设, 即距离 $d \gg l$), 当 B 的方向与地磁场水平分量垂直时磁针将指向 B 和 B 合成的磁场方向, 如图 2 所示. 即有

$$\tan \theta = \frac{B}{B'}$$

为合成磁场与地磁场 B' 之间的夹角.

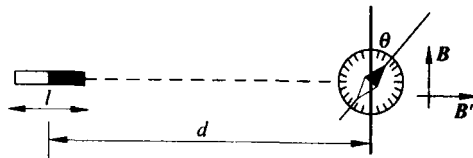


图 2

令 $Y = \frac{M}{B} = \frac{2d^3 \tan \theta}{\mu_0}$, 再根据 $X = MB = \frac{4}{T^2} J$, 可得

$$M = \sqrt{XY}, \quad B = \sqrt{X/Y}$$

用高斯法测地磁场水平分量必须测量 θ , 但是 θ 的测量一般误差比较大. 改进的方法是: 采用外加已知大小的稳恒磁场 (可通过载流线圈实现) 而不借助小磁针偏转, 由 B 和 T 周期平方的反比关系, 通过不同大小的磁场与其对应的周期, 直接消除 M 的影响, 得到 B 值.

改进法装置示意图如图 3 所示.

将磁铁棒悬挂在载流圆线圈中央, 磁棒与线圈轴线重合, 使通电线圈产生的磁场方向与地磁场水平方向一致.

线圈未通电流时, 磁铁棒的振动周期为 $T = 2 \sqrt{\frac{J}{MB}}$. 线圈通入直流电流后, 在线圈的轴线方

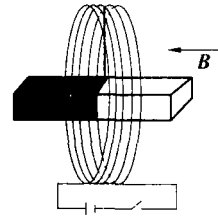


图 3

向所产生的磁场大小 $B_{\text{附加}} = N \frac{\mu_0 I}{2R}$, 此式中 I 是线圈电流大小; N 是线圈匝数; R 是线圈半径.

相应的磁棒振动周期 $T = 2 \sqrt{\frac{J}{M(B + B_{\text{附加}})}}$, 将此式与未通电流的周期公式(3)相比, 可得

$$B = B_{\text{附加}} \frac{1}{(T/T')^2 - 1} = \frac{\mu_0 IN}{2R} \frac{1}{(T/T')^2 - 1}$$

即

$$\left(\frac{1}{T} \right)^2 = \frac{\mu_0 NI}{2RB T^2} + \frac{1}{T'^2} \quad (5)$$

式(5)中 T' 是不加电流时的周期; T 为加电流 I 时的周期大小. 通过计算函数 $\left(\frac{1}{T} \right)^2$ 与 I 关系的斜率可以得到磁感应强度 B .

3 实验内容

(1) 用磁阻传感器测量地磁场水平分量 $B^{(3)}$.

(2) 用高斯法测地磁场水平分量 B 、磁棒的转动惯量 J 和磁矩 M .

用游标卡尺测量磁棒的截面边长 a 、长度 l ; 用天平称磁棒质量 (要防止磁性吸引力对称值的影响), 计算其转动惯量 J .

用秒表计时, 测得振动周期 T , 计算 $X = MB = \frac{4}{T^2} J$ 的值.

用毫米刻度尺测量距离 d ; 用量角器测量小磁针角度 θ , 计算 $Y = \frac{M}{B}$ 的值.

用 X 和 Y 值求得地磁场的磁感应强度水平分量 B 与磁棒磁矩 M .

(3) 用改进的方法进行测量, 比较上述三种方法的测量结果.

4 实验数据和结果

(1) 用 FD-HNC-1 型“磁阻传感器与地磁场

实验仪”在室外空地上测量地磁场水平分量结果见表1.

表1 用磁阻传感器与地磁场实验仪测量数据

地点	灵敏度 $K/V \cdot T^{-1}$	地磁感应水平分量 $B/10^{-5} T$
大楼外室外空地	49.47	3.25

根据相关资料,上海地区地磁水平分量的平均值为 $3.33 \times 10^{-5} T$,考虑到实验环境如周围大楼远近等对空间磁场的影响,该磁阻传感器与地磁场实验仪测量地磁水平分量还是具有很高准确度的.当然在大楼内,由于建筑结构中的铁料具有屏蔽作用,所以地磁场的水平分量比楼外要小得多.笔者将该实验仪用于室内测量地磁场水平分量,其测量值作为相对标准,和高斯法的测量结果进行比较.

(2) 高斯法测量结果(复旦大学物理楼三楼测量)见表2.

表2

	周期 T/s	角度 $/^\circ$	距离 d/cm	磁矩 $M/A \cdot m^2$	地磁水平分量 $B/10^{-5} T$
室外地点	4.228	17.0	33.132	1.665	3.00
室内地点	4.884	35.5	24.642	1.412	2.65

(3) 改进后测量结果(复旦大学物理楼三楼测量)见表3.

表3

I/mA	5.0	10.0	15.0	20.0	25.0	30.0	35.0	40.0
T/s	3.917	3.370	2.990	2.746	2.532	2.377	2.237	2.130
$(1/T)^2 / s^{-2}$	0.065177	0.088052	0.111856	0.132617	0.155981	0.176987	0.199833	0.220415

将 $(1/T)^2$ 与 I 关系用最小二乘法进行直线拟合,得到拟合相关系数 $r=0.9999$,斜率 $\frac{\mu_0 N}{2RB T^2} = 4.44 \times 10^{-3} (mA^{-1} \cdot s^{-2})$,由 $N=500$ 匝, $R=10.0cm$,得 $B=2.97 \times 10^{-5} T$.

(4) 各方法测量结果对比(复旦大学物理楼三楼测量)(表4):

表4 地磁场水平分量结果对比

高斯法结果	改进方法结果(平均值)	磁阻传感器地磁场仪所测结果
$2.65 \times 10^{-5} T$	$2.97 \times 10^{-5} T$	$2.87 \times 10^{-5} T$

5 分析与讨论

经过多次尝试,发现对应于实验用的磁铁棒, d 在 25cm 到 30cm 之间是比较理想的距离.

由 $d \gg l$ 所导出的磁偶极子在沿轴向方向某点的磁感强度公式 $B = \frac{\mu_0 M}{2d^3}$ 本身就有一定近似,同时磁极也有可能不在磁棒的两端,即真正的磁偶极子应略小于真实的磁偶极子的大小,因此相对更为精确的公式应该为

$$B = \frac{\mu_0 M d}{2(d^2 - l^2/4)^2}$$

其中 l 为修正后的磁棒长度,根据有关资料 $l = l \times 5/6$, l 为磁棒原长度.

而采用改进方法,不但避免了磁偶极子假设不成立所带来的较大误差,而且也不存在角测量引起的较大误差,所以实验的准确度大大提高,同时可重复性也比原高斯法有明显提高.可见,在提高实验准确度方面,笔者所做的改进实验是成功的.当然,从另一方面来看,改进方法却又失去了原来高斯法无需电源的优点.

6 结束语

高斯法的实用性很强,无需外界提供电能且实验装置简单,可以相对准确测得地磁场大小.同时,还可利用高斯法来测定较大块的规则形状材料的磁矩.而笔者对高斯法的改进虽然测量准确度有所提高,但还是加入了外界的电源.如何在保证无需电源的情况下,进一步提高高斯法的准确度,是我们以后的一个研究目标.

从现在的实验角度来看,高斯法测量地磁场水平分量可以说是一个非常经典而实用的实验方法了,但是其中的实验思想却非常发人深省,至今仍有很大教学价值.运用最简单的方法获得较难得到的实验数据,无论在一般实验中,还是其他的科技设计中都会发挥出令人惊讶的作用,这一点非常值得我们学习与借鉴.

参考文献

- [1] 伊藤芳朗等. 教养物理学实验. 新评论株式会社, 1981. 204~211
- [2] 林璇英等. 电动力学题解. 北京: 科学出版社, 1999
- [3] 沈元华, 陆申龙. 基础物理实验. 北京: 高等教育出版社, 2003. 204~207