

# 磁阻传感器与地磁场实验仪

## 一、概 述

地磁场作为一种天然磁源，在军事、工业、医学、等等中有着重要用途。地磁场的数值比较小，约 $10^{-5}T$ 量级，但在直流磁场测量，特别是弱磁场测量中，往往需要知道其数值，并设法消除其影响。本实验采用新型坡莫合金磁阻传感器测定地磁场磁感应强度及地磁场磁感应强度的水平分量和垂直分量；测量地磁场的磁倾角，从而掌握磁阻传感器的特性及测量地磁场的一种重要方法。由于磁阻传感器体积小，灵敏度高、易安装，因而在弱磁场测量方面有广泛应用前景。

## 二、实验仪器及主要技术参数



图 1 磁阻传感器与地磁场实验仪

### 主要技术参数：

- (1) 磁阻传感器      工作电压最大值 12V，典型值 5V；灵敏度 50V/T；量程— $6.0\sim 6.0Gs$ 。
- (2) 数字式可调恒流源      4 位半 LED 显示，电流范围 0—300.0mA；稳定度 $\geq 0.1\%$ ，连续可调。
- (3) 亥姆霍兹线圈      线圈有效半径 100mm；单个线圈匝数 500 匝；二线圈中心

间距 100mm；温升不大于 10℃的最大负荷电流不小于 0.5A。

(4) 角度盘 传感器转盘 0—360 度旋转，配有游标尺，精度为 0.1 度。

(5) 直流电压表：4 位半 LED 显示，量程 200.00mV，分辨率 0.001mV。

(6) 配有水平调节仪，便于水平位置调节。

### 三、实验原理

#### 1、磁电阻传感器原理

物质在磁场中电阻率发生变化的现象称为磁阻效应。对于铁、钴、镍及其合金等磁性金属，当外加磁场平行于磁体内部磁化方向时，电阻几乎不随外加磁场变化；当外加磁场偏离金属的内部磁化方向时，此类金属的电阻减小，这就是强磁金属的各向异性磁阻效应。

HMC1021Z 型 磁阻传感器是由长而薄的坡莫合金(铁镍合金)制成一维磁阻微电路集成芯片(二维和三维磁阻传感器可以测量二维或三维磁场)。它利用通常的半导体工艺，将铁镍合金薄膜附着在硅片上，如图 2 所示。薄膜的电阻率  $\rho(\theta)$  依赖于磁化强度  $M$  和电流  $I$  方向间的夹角  $\theta$ ，具有以下关系式

$$\rho(\theta) = \rho_{\perp} + (\rho_{\parallel} - \rho_{\perp}) \cos^2 \theta \quad (1)$$

其中  $\rho_{\parallel}$ 、 $\rho_{\perp}$  分别是电流  $I$  平行于  $M$  和垂直于  $M$  时的电阻率。当沿着铁镍合金带的长度方向通以一定的直流电流，而垂直于电流方向施加一个外界磁场时，合金带自身的阻值会生较大的变化，利用合金带阻值这一变化，可以测量磁场大小和方向。同时制作时还在硅片上设计了两条铝制电流带，一条是置位与复位带，该传感器遇到强磁场感应时，将产生磁畴饱和现象，也可以用来置位或复位极性；另一条是偏置磁场带，用于产生一个偏置磁场，补偿环境磁场中的弱磁场部分(当外加磁场较弱时，磁阻相对变化值与磁感应强度成平方关系)，使磁阻传感器输出显示线性关系。

磁阻传感器是一种单边封装的磁场传感器，它能测量与管脚平行方向的磁场。传感器由四条铁镍合金磁电阻组成一个非平衡电桥，而非平衡电桥输出后

接到一集成运算放大器上，将信号放大输出。传感器内部结构如图 3 所示。图中由于适当配置的四个磁电阻电流方向不相同，当存在外界磁场时，引起电阻值变化有增有减。因而输出电压  $U_{out}$  可以用下式表示

$$U_{out} = \left( \frac{\Delta R}{R} \right) \times U_b \quad (2)$$

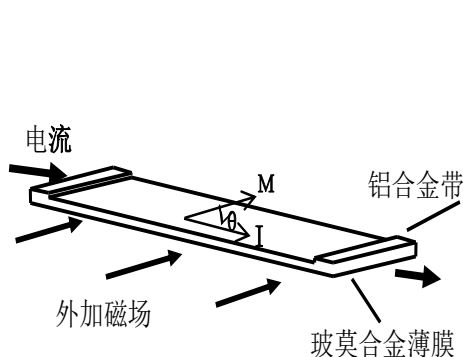


图 2 磁阻传感器的构造示意图

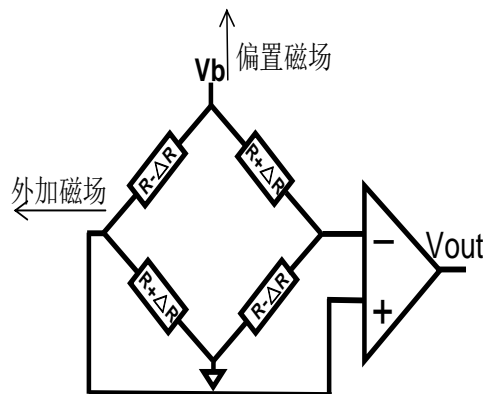


图 3 磁阻传感器内的惠斯通电桥

对于一定的工作电压，如  $U_b = 5.00V$ ，HMC1021Z 磁阻传感器输出电压  $U_{out}$  与外界磁场的磁感应强度成正比关系，

$$U_{out} = U_0 + KB \quad (3)$$

(3) 式中， $K$  为传感器的灵敏度， $B$  为待测磁感应强度。 $U_0$  为外加磁场为零时传感器的输出量。

由于亥姆霍兹线圈的特点是在其轴线中心点附近产生较宽范围的均匀磁场区，所以常用作弱磁场的标准磁场。亥姆霍兹线圈公共轴线中心点位置的磁感应强度为

$$B = \frac{\mu_0 NI}{R} \frac{8}{5^{3/2}} \quad (4)$$

(4) 式中  $N$  为线圈匝数， $I$  为线圈流过的电流强度， $R$  为亥姆霍兹线圈的平

均半径， $\mu_0$ 为真空磁导率。

## 2、亥姆霍兹线圈的磁场

### (1) 载流圆线圈磁场

根据毕奥—萨伐尔定律，载流线圈在轴线（通过圆心并与线圈平面垂直的直线上某点的磁应强度为：

$$B = \frac{\mu_0 R^2}{2(R^2 + x^2)^{3/2}} NI \quad (5)$$

式中  $I$  为通过线圈的励磁电流强度， $N$  为线圈的匝数， $R$  为线圈平均半径， $x$  为圆心到该点的距离， $\mu_0$  为真空磁导率。因此，圆心处的磁感应强度  $B_0$  为：

$$B_0 = \frac{\mu_0}{2R} NI \quad (6)$$

轴线外的磁场分布计算公式较复杂，这里简略。

亥姆霍兹线圈是一对匝数和半径相同的共轴平行放置的圆线圈，两线圈间的距离  $d$  正好等于圆形线圈的半径  $R$ 。这种线圈的特点是能在其公共轴线中点附近产生较广的均匀磁场区，故在生产和科研中有较大的实用价值，其磁场合成示意图如图 3 所示。

根据霍尔效应：探测头置于磁场中，运动的电荷受洛伦兹力，运动方向发生偏转。在偏向的一侧会有电荷积累，这样两侧就形成电势差。通过测电势差就可知道其磁场的大小。

当两通电线圈的通电电流方向一样时，线圈内部形成的磁场方向也一致，这样两线圈之间的部分就形成均匀磁场。当探头在磁场内运动时其测量的数值几乎不变。当两通电线圈电流方向不同时在两线圈中心的磁场应为 0。

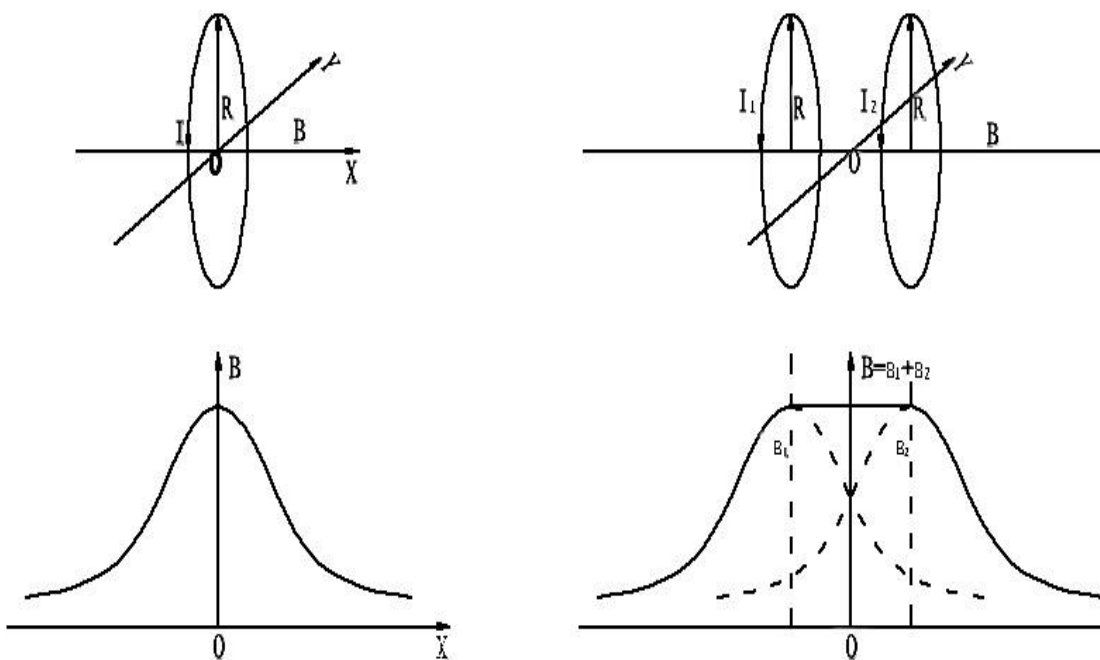


图4 亥姆霍兹线圈磁场分布图

设  $Z$  为亥姆霍兹线圈中轴线上某点离中心点  $O$  处的距离, 则亥姆霍兹线圈轴线上任点的磁感应强度为:

$$B' = \frac{1}{2} \mu_0 N I R^2 \left\{ \left[ R^2 + \left( \frac{R}{2} + Z \right)^2 \right]^{-3/2} + \left[ R^2 + \left( \frac{R}{2} - Z \right)^2 \right]^{-3/2} \right\} \quad (7)$$

而在亥姆霍兹线圈轴线上中心  $O$  处磁感应强度  $B_0$  为:

$$B_0' = \frac{\mu_0 N I}{R} \times \frac{8}{5^{3/2}} \quad (8)$$

在  $I=0.50\text{A}$ 、 $N=500$ 、 $R=0.100\text{m}$  的实验条件下, 单个线圈圆心处的磁场强度为:

$$B_0 = \frac{\mu_0}{2R} N I = 4\pi \times 10^{-7} \times 500 \times 0.5 / (2 \times 0.100) = 1.57 \text{mT}$$

当两圆线圈间的距离  $d$  正好等于圆形线圈的半径  $R$ , 组成亥姆霍兹线圈时,

轴线上中心 O 处磁感应强度  $B_0$  为：

$$B_0 = \frac{\mu_0 NI}{R} \times \frac{8}{5^{3/2}} = \frac{4\pi \times 10^{-7} \times 500 \times 0.5}{0.100} \times \frac{8}{5^{3/2}} = 2.25 \text{ mT}$$

当两圆线圈间的距离  $d$  不等于圆形线圈的半径  $R$  时，轴线上中心 O 处磁感应强度  $B_0$  按本实验所述的公式（1-3）计算。在  $d=1/2R$ 、 $R$ 、 $2R$  时，相应的曲线见图 4。

一半径为  $R$ ，通以电流  $I$  的圆线圈，轴线上磁场的公式（5）

$$B = \frac{\mu_0 N_0 I R^2}{2(R^2 + X^2)^{3/2}}$$

式中  $N_0$  为圆线圈的匝数， $X$  为轴上某一点到圆心 O 的距离。

$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$ ，本实验取  $N_0=500$  匝， $I=500\text{mA}$ ， $R=100\text{mm}$ ，圆心 O 处  $x=0$ ，可算得圆电流线圈磁感应强度  $B=1.57\text{mT}$ 。（注： $1\text{mT}=10\text{Gs}$ ）。

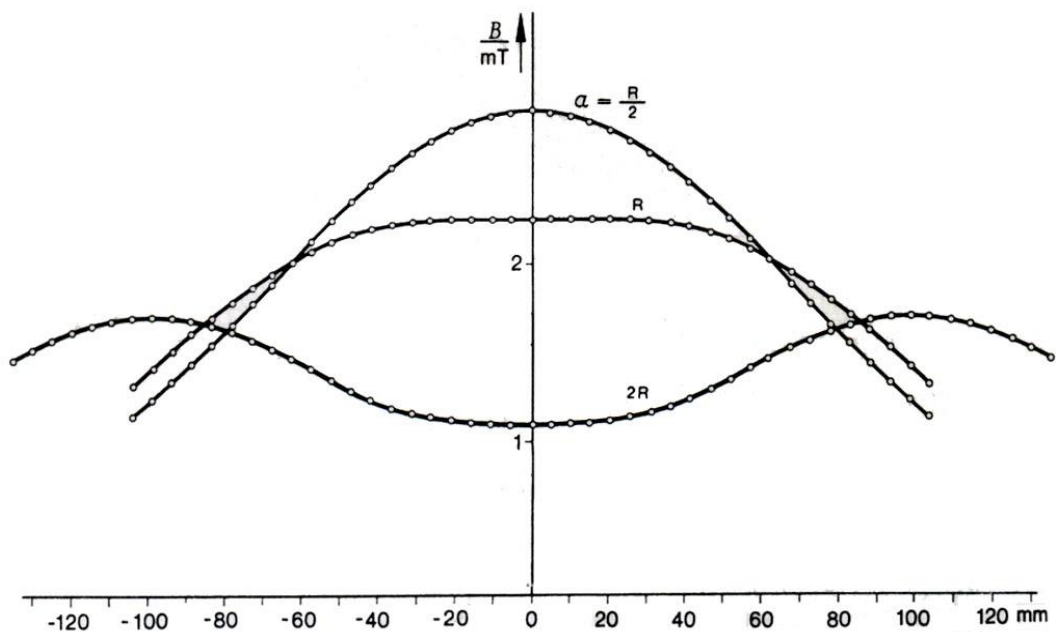


图 5 圆线圈间不同距离时轴线上的磁场分布图

## (2) 亥姆霍兹线圈

所谓亥姆霍兹线圈为两个相同线圈彼此平行且共轴，使线圈上通以同方向电流  $I$ ，如图 3 所示。理论计算证明：线圈间距  $a$  等于线圈半径  $R$  时，两线圈合磁场在轴上（两线圈圆心连线） $-a/2 \sim a/2$  范围内是比较均匀的，这时的亥姆霍兹线圈磁感应强度计算公式为

$$B = \frac{\mu_0 N_0 I}{R} \times \frac{8}{5^{3/2}}$$

实验取  $N_0=500$  匝， $I=500\text{mA}$ ， $R=100\text{mm}$ ，圆心  $O$  处  $x=0$ ，可算得圆电流线圈磁感应强度  $2.25\text{mT}$ 。（注： $1\text{mT}=10\text{Gs}$ ）。

我们实验仪器的亥姆霍兹线圈红色接线柱是接的内铜导线，黑色接线柱是外铜导线，可用右手法则判别磁场方向。

## 四、实验内容及步骤

### 1、实验内容：

- (1) 了解磁阻传感器测量磁场的基本原理。
- (2) 学会用磁阻传感器测定地磁场的方法。
- (3) 了解地磁场的方向与强度。

### 2、实验步骤：

- (1) 测量磁阻传感器的灵敏度  $K$ （用亥姆霍兹线圈产生的磁场作为已知量）
  - 1) 将亥姆霍兹线圈与直流电源连接好。如图 6 所示。

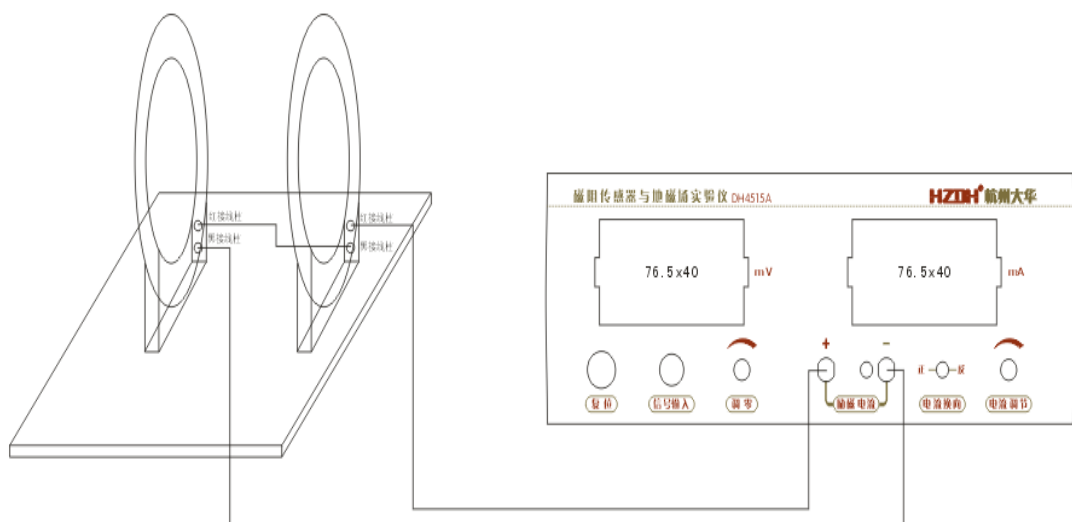


图 6 接线示意图

2) 使磁阻传感器的管脚和磁感应强度的方向平行，即转盘刻度调节到角度  $\theta = 0^\circ$ 。首先将转盘调至水平，再辅助调节底板上螺丝使转盘至水平（用水准仪指示）。

3) 重复按下复位键 5 次以上，调节电流到零，电压调零。

4) 依次调节励磁电流到  $10\text{mA}$ ， $20\text{mA}$  ……  $300\text{mA}$ ，将电流换向开关分别拨到正向和反相，记录下正向电压读数  $U_{\text{正}}$  和反向电压读数  $U_{\text{反}}$ ，在读数前，至少重复按下复位键 5 次以上，待读数稳定不变之后读取。

表格 1

励磁电流	磁感应强度 B	测量电压值		平均 U/mA
		$U_{\text{正}}/\text{mV}$	$U_{\text{反}}/\text{mV}$	
10mA				
20mA				
30mA				
40mA				
50mA				



5) 平均电压  $\bar{U} = |U_{\text{正}} - U_{\text{反}}|/2$ ，利用逐差法计算出灵敏度  $K = \Delta\bar{U}/\Delta B$ 。

(2) 测量地磁场的水平分量  $B_{//}$ ，地磁场的磁感应强度  $B_{\text{总}}$ ，地磁场的垂直分量  $B_{\perp}$  和磁倾角  $\beta$

1) 将亥姆霍兹线圈与直流电源的连线拆去。

2) 首先将转盘调至水平，再辅助调节底板上螺丝使转盘至水平（用水准仪指示）。旋转转盘，分别记下传感器输出的最大电压  $U_1$  和最小电压  $U_2$ ，计算出当地地磁场的水平分量  $B_{//} \equiv \bar{U}_{//} / K = |U_1 - U_2| / 2K$ 。

3) 把转盘刻度调节到角度  $\theta = 0^\circ$ ，调节底板使磁阻传感器输出最大电压或最小电压，（即就是将磁阻传感器敏感轴方向与当地地磁场的水平分量  $B_{//}$  方向一直，无夹角），同时调节底板上螺丝使转盘保持水平。

4) 将转盘垂直，并保持装置沿着当地地磁场的水平分量  $B_{//}$  方向放置（即仅仅是转盘的方向在竖直方向转了  $90^\circ$ ），此时转盘面为地磁子午面方向，转动转盘角度，分别记下传感器输出最大电压和最小电压时转盘指示值  $\beta_1$  和  $\beta_2$ ，同时记录此最大读数  $U'_1$  和最小读数  $U'_2$ ，并计算出当地地磁场的磁感应强度  $B_{\text{总}} \equiv \bar{U}_{\text{总}} / K = |U'_1 - U'_2| / 2K$ 。

5) 磁倾角  $\beta = (\beta_1 + \beta_2) / 2$  或由  $\cos \beta = B_{//} / B_{\text{总}}$  得出。

6) 地磁场的垂直分量  $B_{\perp} = B_{\text{总}} \sin \beta$ 。

选作实验内容

用 HMC1021Z 型磁阻传感器测量通电单线圈产生磁场分布，并与理论值进行比较。

## 五、实验注意事项

使用磁性传感器时，应尽量避免铁质材料和可以产生磁性的材料在传感器附近出现，注意我们的实验是自己产生磁场并进行测量，注意相互间距离，即仪器之间的磁串扰。

## 六、思考题

- 1、磁阻传感器的基本工作原理是怎样的？
- 2、实验的线圈装置中心区域，即与磁阻传感器相连的转动盘，其方位如何调整？
- 3、该实验中附带的水平仪起什么作用？如何调整？
- 4、该实验所用的电源面板上分别有一调零旋钮和输出旋钮各起什么作用？如何调节？
- 5、在测量地磁场时，如有一枚铁钉处于磁阻传感器周围，则对测量结果将产生什么影响？
- 6、为何坡莫合金磁阻传感器遇到较强磁场时，其灵敏度会降低？用什么方法来恢复其原来的灵敏度？
- 7、实验中，如何测出地磁场的倾角？

## 七. 参考资料

1. 贾玉润、王公治、凌佩玲主编。大学物理实验，上海复旦大学，1987：492-493
2. 黄一菲、郑神、吴亮、陆申龙，坡莫合金磁阻传感器的特性研究和应用、物理实验。第 22 卷第 4 期，2002，4：45-48
3. Honeywell 公司，固态传感器(磁阻传感器部分)说明书，2001
4. 沈元华、陆申龙主编，基础物理实验，北京：高等教育出版社，2003
5. 黄德星。磁敏感器件及其应用[M]。北京：科学出版社，1987

## 附录 1:地磁场

地球本身具有磁性，所以地球和近地空间之间存在着磁场，叫做地磁场。地磁场的强度和方向随地点(甚至随时间)而异。地磁场的北极、南极分别在地理南极、北极附近，彼此并不重合，如图 5 所示，而且两者间的偏差随时间不断地在缓慢变化。地磁轴与地球自转轴并不重合，有  $11^\circ$  交角。

在一个不太大的范围内，地磁场基本上是均匀的，可用三个参量来表示地磁场的方向和大小(如图 6 所示)：

(1) 磁偏角  $\alpha$ ，地球表面任一点的地磁场矢量所在垂直平面(图 6 中  $B_{//}$  与  $Z$  构成的平面，称地磁子午面)，与地理子午面(图 6 中  $X$ 、 $Z$  构成的平面)之间的夹角。

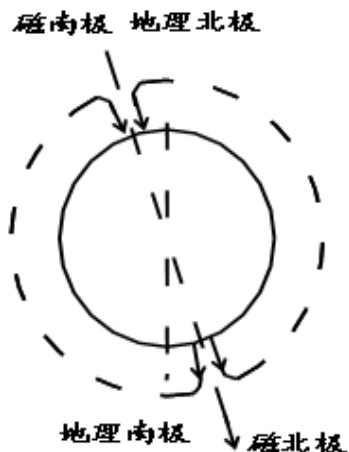


图 6 地球磁场示意图

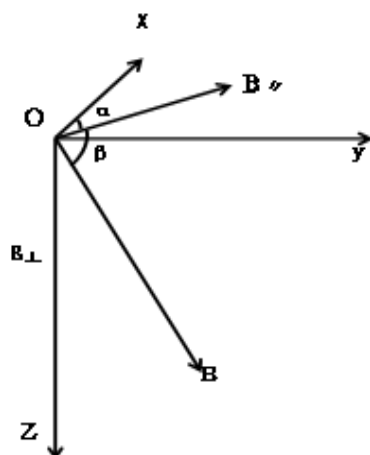


图 7 地球磁场矢量图

(2) 磁倾角  $\beta$ ，磁场强度矢量  $\vec{B}$  与水平面(即图 6 的矢量  $\vec{B}$  和  $OX$  与  $OY$  构成平面的夹角)之间的夹角。

(3) 水平分量  $B_{//}$ ，地磁场矢量  $\vec{B}$  在水平面上的投影。

测量地磁场的这三个参量，就可确定某一地点地磁场  $\vec{B}$  矢量的方向和大小。当然这三个参量的数值随时间不断地在改变，但这一变化极其缓慢，极为微弱。

## 附录 2:我国一些城市的地磁参量(地磁要素)

	地理位置		磁倾角 D(偏西)	磁倾角 I	水平强 $B_H$ ( $10^{-4}$ T)	测定 年份
	北纬	东经				
齐齐哈尔	47° 22'	123° 59'	7° 34'	64° 27'	0. 242	1916
长春	43° 51'	126° 36'	7° 30'	60° 20'	0. 266	1916
沈阳	41° 50'	123° 28'	6° 49'	58° 43'	0. 277	
北京	39° 56'	116° 20'	4° 48'	57° 23'	0. 289	1936
天津	39° 05' . 9	117° 11'	4° 04'	56° 21'	0. 293	1916
太原	37° 51' . 9	112° 33'	3° 18'	55° 11'	0. 301	1932
济南	36° 39' . 5	117° 01'	3° 36'	53° 06'	0. 308	1915
兰州	36° 03' . 4	103° 48'	1° 15'	53° 24'	0. 312	
郑州	34° 45'	113° 43'	0° 18'	50° 43'	0. 320	1932
西安	34° 16'	108° 57'	3° 02'	50° 29'	0. 323	1932
南京	32° 03' . 8	118° 48'	1° 42'	46° 43'	0. 331	1922
上海	31° 11' . 5	121° 26'	3° 13'	45° 25'	0. 333	
成都	30° 38'	104° 03'	0° 58'	45° 06'	0. 346	
武汉	30° 37'	114° 20'	2° 23'	44° 34'	0. 343	
安庆	30° 32'	117° 02'		44° 27'	0. 341	1911
杭州	30° 16'	120° 08'	2° 59'	44° 05'	0. 337	1917
南昌	28° 42' . 4	115° 51'	1° 51'	41° 49'	0. 349	1917
长沙	28° 12' . 8	112° 53'	0° 50'	41° 11'	0. 352	1907
福州	26° 02' . 2	119° 11'	1° 43'	27° 28'	0. 355	1917
桂林	25° 17' . 7	110° 12'	0° 05'	36° 13'	0. 366	1907
昆明	25° 04' . 2	102° 42'	0° 04'	35° 19'	0. 372	1911
广州	23° 06' . 1	113° 28'	0° 47'	31° 41'	0. 375	