



清华大学  
Tsinghua University

# 基于梯度张量测量仪的磁法探测实验

郑小平 教授

田翊辰 助教



# CONTENTS

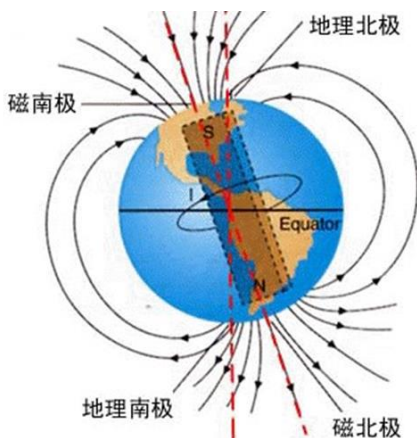
## 目录

- 1/ 埋地目标探测方法
- 2/ 磁法探测原理
- 3/ 仪器结构与使用
- 4/ 实验要求
- 5/ 参考资料

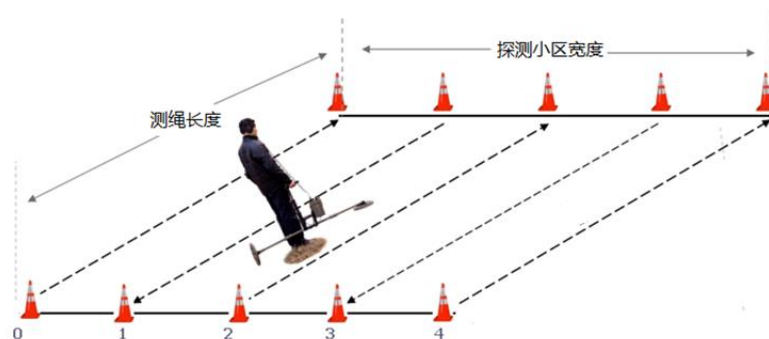
# 埋地目标探测方法

## 磁法探测

- **原理：**利用铁磁性异常体在地磁场中产生的局部磁异常进行探测，是一种被动探测方法。适用于磁性目标体。
- **优点：**效率高、成本低、数据解释简单以及探测深度大。
- **缺点：**空间分辨率低，且作为一种被动探测方法，磁法探测极易受到各种干扰影响，因此探测虚警率高。



地磁场示意图

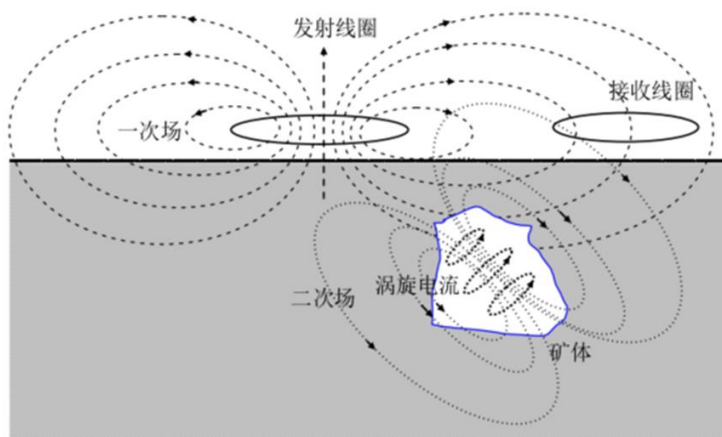


磁法探测作业示意图

# 埋地目标探测方法

## 电磁探测

- **原理：**通过发射线圈产生一次场在异常体中感应出涡旋电流进而产生二次场，利用接收线圈接收二次场。适用于任意导电、导磁性目标体。
- **优点：**抗干扰能力强，信噪比高，空间分辨率高，虚警率低。
- **缺点：**探测距离浅。对数据处理和解释算法的要求高。



电磁探测原理图

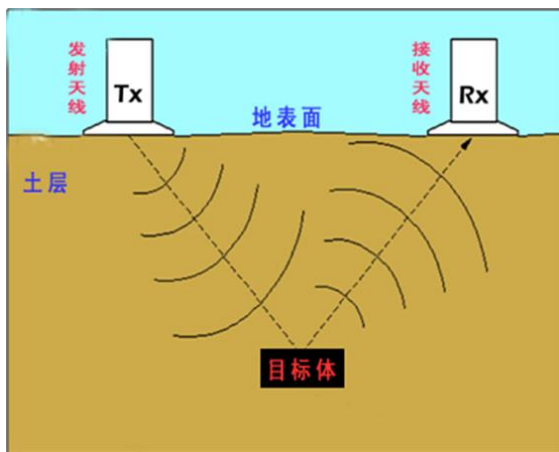


电磁探测常用装备

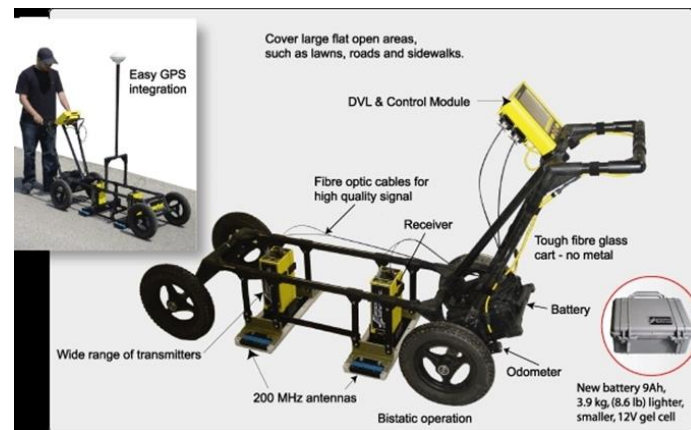
# 埋地目标探测方法

## ■ 探地雷达探测

- **原理：**探地雷达利用高频电磁波在异常体与周围环境分界面上的反射特性，向地下发射高频电磁波，接收异常体产生的回波信号。
- **优点：**定位精度与分辨率均较高，探测虚警率较低。
- **缺点：**探测成功率严重受到地质条件的影响。不能用于水分高的区域或者有植被覆盖的区域。数据解释复杂。



探地雷达原理图



某型号探地雷达



# CONTENTS

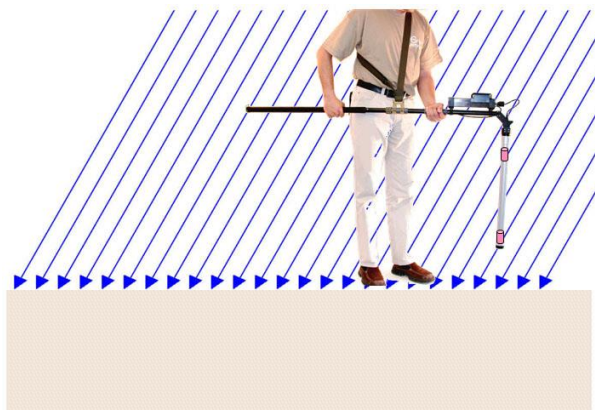
## 目录

- 1/ 埋地目标探测方法
- 2/ 磁法探测原理
- 3/ 仪器结构与使用
- 4/ 实验要求
- 5/ 参考资料

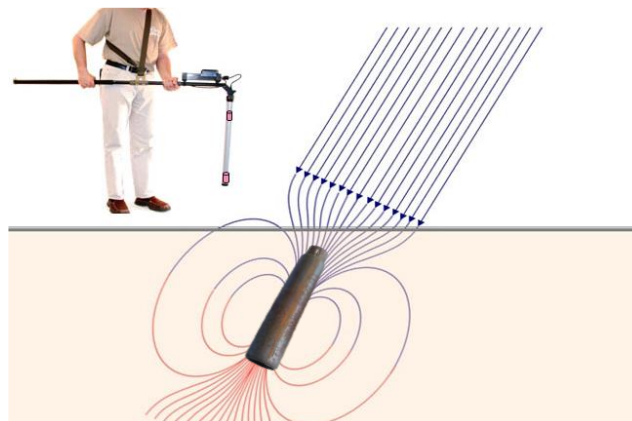
# 磁法探测原理

## 异常场和正常场

**正常场：**在地球表面一个相对很小的局部区域，在没有磁异常的情况下，用磁力仪测量得出的磁力线是平行分布的。



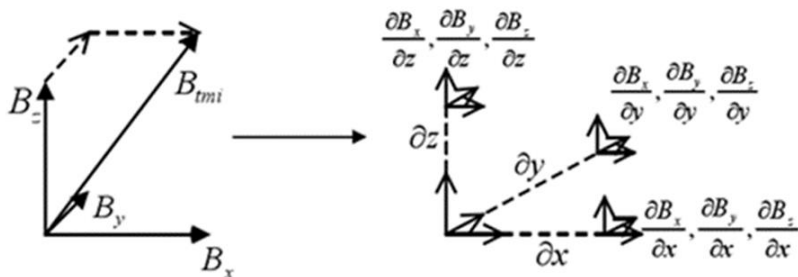
**异常场：**地下有铁磁性目标埋藏，由于铁磁性目标被磁化，用磁力仪进行观测，就能发现磁异常的范围和强度情况。



# 磁法探测原理

## ■ 磁场标量、磁场矢量与磁梯度张量

- **磁场矢量**：即磁场强度在x、y、z三个方向的分量，分别用  $B_x$ 、 $B_y$ 、 $B_z$  来表示。
- **磁场标量**：磁场的模长。
- **磁梯度张量**：对  $B_x$ 、 $B_y$ 、 $B_z$  分别在x、y、z三个方向求导数



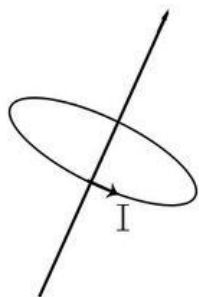
$$\begin{aligned}
 G &= \begin{bmatrix} B_{xx} & B_{xy} & B_{xz} \\ B_{yx} & B_{yy} & B_{yz} \\ B_{zx} & B_{zy} & B_{zz} \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} \frac{\partial B_x}{\partial x} & \frac{\partial B_x}{\partial y} & \frac{\partial B_x}{\partial z} \\ \frac{\partial B_y}{\partial x} & \frac{\partial B_y}{\partial y} & \frac{\partial B_y}{\partial z} \\ \frac{\partial B_z}{\partial x} & \frac{\partial B_z}{\partial y} & \frac{\partial B_z}{\partial z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} & \frac{\partial^2 U}{\partial x \partial y} & \frac{\partial^2 U}{\partial x \partial z} \\ \frac{\partial^2 U}{\partial y \partial x} & \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} & \frac{\partial^2 U}{\partial y \partial z} \\ \frac{\partial^2 U}{\partial z \partial x} & \frac{\partial^2 U}{\partial z \partial y} & \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} U_{xx} & U_{xy} & U_{xz} \\ U_{yx} & U_{yy} & U_{yz} \\ U_{zx} & U_{zy} & U_{zz} \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$



# 磁法探测原理

## 磁偶极子场

- 磁偶极子具有6个参数：mx, my, mz是磁偶极子的磁矩，rx, ry, rz是磁偶极子指向传感器位置的矢量。
- 当目标埋藏深度深远远大于其几何尺寸时，可以将其近似为磁偶极子。



磁偶极子示意图

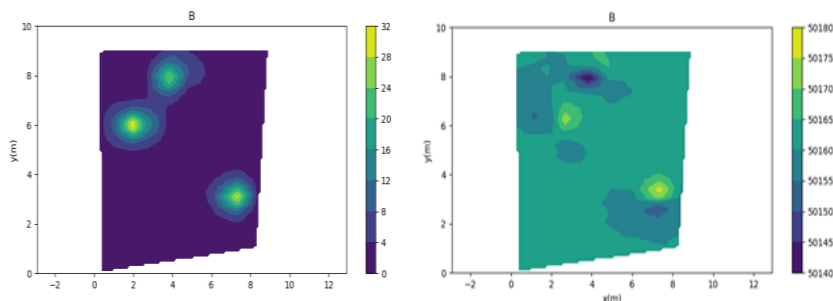
$$\mathbf{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \left[ \frac{3(\mathbf{m} \cdot \mathbf{r})\mathbf{r}}{r^5} - \frac{\mathbf{m}}{r^3} \right]$$

$$G_{ij} = \frac{\mu_0}{4\pi} \left[ -\frac{15(\mathbf{m} \cdot \mathbf{r})r_i r_j}{r^7} + \frac{3(\mathbf{m} \cdot \mathbf{r})\sigma_{ij} + 3m_i r_j + 3m_j r_i}{r^5} \right]$$

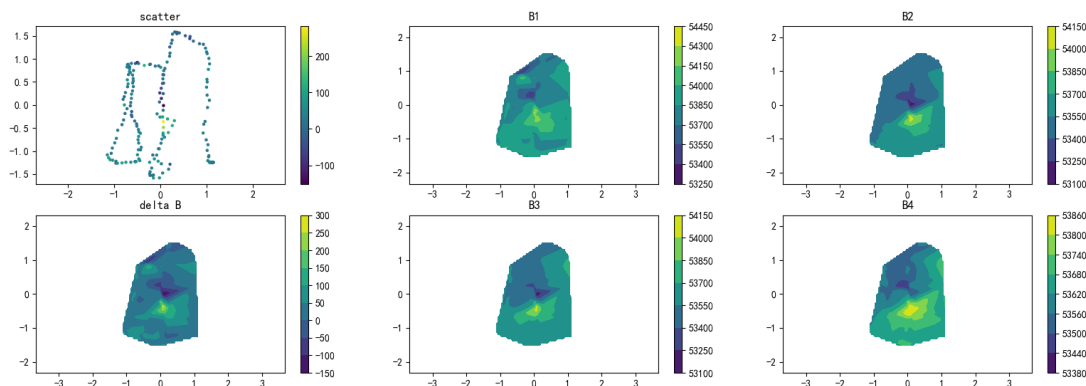
# 磁法探测原理

## 磁偶极子定位方法

- 定性定位方法1：观察极大极小值的连线（**实践中最实用**）。



1. 仿真磁偶极子磁场
2. 仿真磁偶极子场+地磁场：极大极小值连线可以反映目标位置。



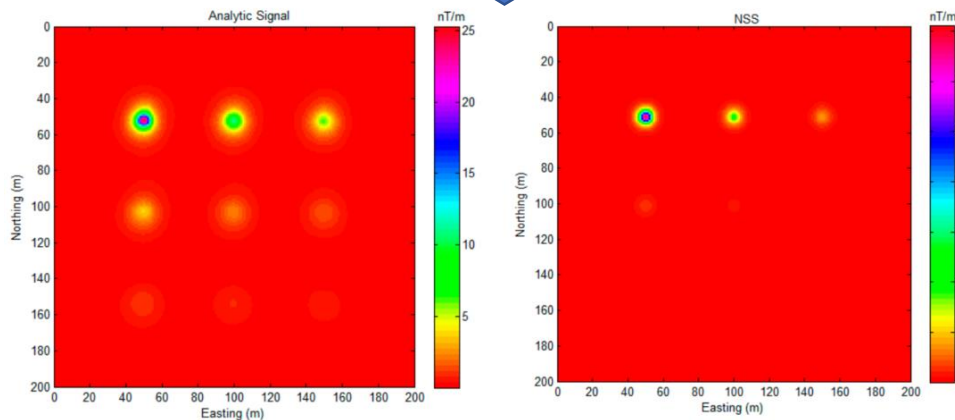
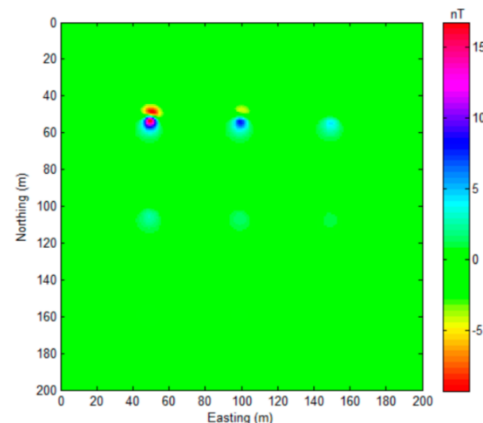
**实测磁场：**极大极小值连线可以反映目标位置。

# 磁法探测原理

## 磁偶极子定位方法

- 定性定位方法2：边界提取滤波方法。
  - NSS
  - 解析信号
  - ○ ○ ○

$$NSS = \sqrt{-\lambda_2^2 - \lambda_1 \lambda_3}$$
 式中 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 是磁梯度张量的3个特征值，其中 $\lambda_2$ 是中间的特征值，也是绝对值最小的特征值。



# 磁法探测原理

## 磁偶极子定位方法

- 定量定位方法：解析求解/优化求解

$$\mathbf{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \left[ \frac{3(\mathbf{m} \cdot \mathbf{r})\mathbf{r}}{r^5} - \frac{\mathbf{m}}{r^3} \right]$$

$$G_{ij} = \frac{\mu_0}{4\pi} \left[ -\frac{15(\mathbf{m} \cdot \mathbf{r})r_i r_j}{r^7} + \frac{3(\mathbf{m} \cdot \mathbf{r})\sigma_{ij} + 3m_i r_j + 3m_j r_i}{r^5} \right]$$



$$\begin{bmatrix} G_{xx} & G_{xy} & G_{xz} \\ G_{yx} & G_{yy} & G_{yz} \\ G_{zx} & G_{zy} & G_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_x - r_{x0} \\ r_y - r_{y0} \\ r_z - r_{z0} \end{bmatrix} = -3 \begin{bmatrix} B_x - B_{x0} \\ B_y - B_{y0} \\ B_z - B_{z0} \end{bmatrix}$$



# CONTENTS

## 目录

- 1/ 埋地目标探测方法
- 2/ 磁法探测原理
- 3/ 仪器结构与使用
- 4/ 实验要求
- 5/ 参考资料

# 仪器结构与使用

## 仪器简介

### 技术特性参数

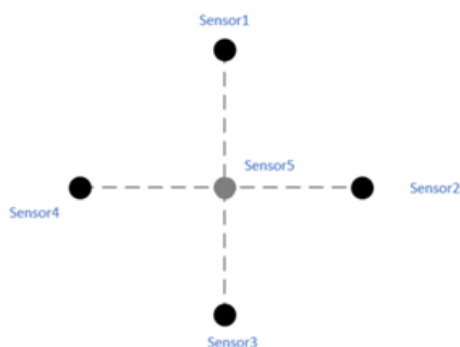
- 1) 磁场测量分辨力 $0.1\text{nT}$ ;
- 2) 磁场探测噪声 $0.1\text{nT}/\sqrt{\text{Hz}}$ @ $1\text{Hz}$ 。

藏匿环境为钢混墙体、地面（埋深 $>2\text{m}$ ），水箱、水池（埋深 $>2\text{m}$ ），磁矩 $>1\text{A}\times\text{m}^2$ 的藏匿物（大约 $100$ 立方厘米的铁块），探测概率 $>99\%$ ，虚警率 $<1\%$ 。

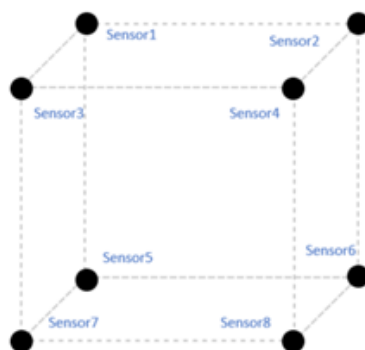


# 仪器结构与使用

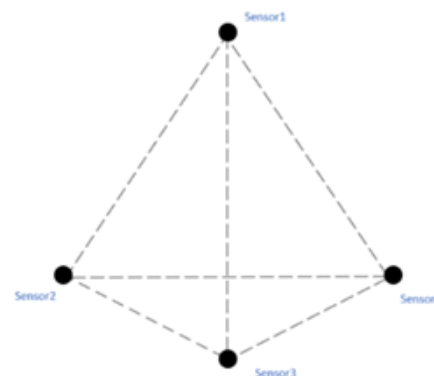
## 传感器结构



平面十字型



立方体型



正四面体型 (棱长15cm)

仪器结构	三轴磁通门数量
平面十字型	4或5
立方体型	8
正四面体型	4

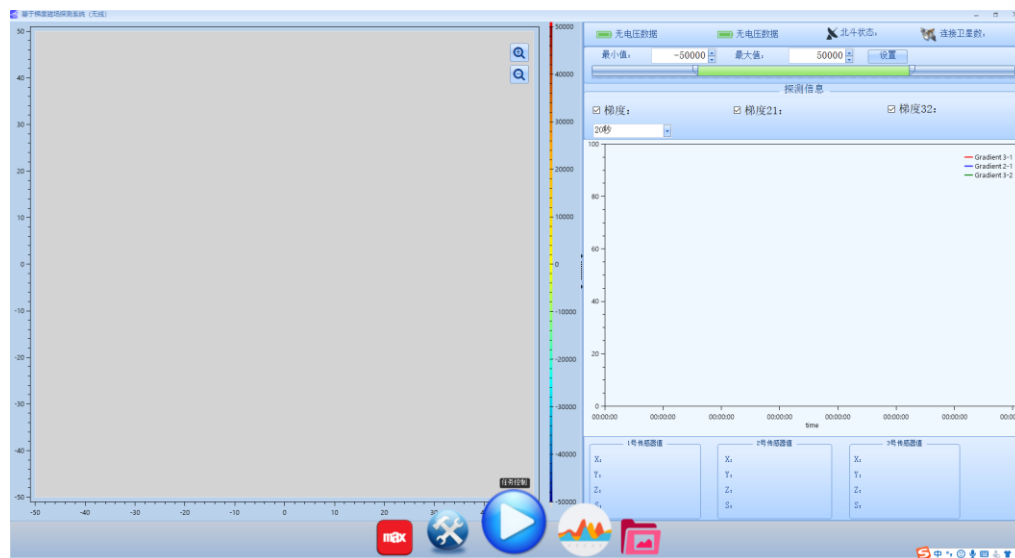
$$\mathbf{B} = \left[ \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 B_{xi}, \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 B_{yi}, \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 B_{zi} \right]^T$$

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} B_{x2} - B_{x1} & B_{x3} - B_{x1} & B_{x4} - B_{x1} \\ B_{y2} - B_{y1} & B_{y3} - B_{y1} & B_{y4} - B_{y1} \\ B_{z2} - B_{z1} & B_{z3} - B_{z1} & B_{z4} - B_{z1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_{21} & \Delta x_{31} & \Delta x_{41} \\ \Delta y_{21} & \Delta y_{31} & \Delta y_{41} \\ \Delta z_{21} & \Delta z_{31} & \Delta z_{41} \end{bmatrix}^{-1}$$

# 仪器结构与使用

## 仪器使用

- 1.依次将背包总电源、数据处理板电源和数据采集器电源打开， 特别注意打开顺序，必须先打开总电源；
- 2.打开平板电脑电源和无线传输模块电源， 在电脑桌面找到探测软件并打开， 使其处于运行界面。





# 仪器结构与使用

## 数据说明

数据储存在文本文件中，每行有45个数字，a[0]-a[45]

a[0]: 时间

a[15]: 北纬

A[17]: 东经

a[29-32]: bx1,by1,bz1

a[32-35]: bx2,by2,bz2

a[35-38]: bx3,by3,bz3

a[38-41]: bx4,by4,bz4



# CONTENTS

## 目录

- 1/ 埋地目标探测方法
- 2/ 磁法探测原理
- 3/ 仪器结构与使用
- 4/ 实验要求
- 5/ 参考资料

# 实验要求

## ■ 实验要求1：熟悉信号特征

- 1.在无埋藏目标的情况下，扫描目标区域
- 2.在地面上放置单个铁磁性目标（钥匙，铁钉等），扫描目标区域
- 3.放置另外一种铁磁性目标，扫描目标区域（选做）
- 4.放置多个铁磁性目标，扫描目标区域（选做）
- 5.改变仪器的高度，扫描目标区域（选做）

# 实验要求

## 实验要求2：目标探测与挖掘

1. 一组同学选择一个铁磁性目标，并将其埋入地下。
2. 另一组同学使用仪器扫描目标区域，尝试将目标探测出来。
3. 一组同学放置第二种铁磁性目标，另外一组同学进行探测并挖掘（选做）
4. 一组同学放置多个铁磁性目标，另外一组同学进行探测并挖掘（选做）

# 实验要求

## 实验要求3：数据处理与解释

1. 将本组的测量数据导出到u盘。
2. 使用matlab或者其它方式绘制实验要求1中的数据的数据的散点图与等高线图。
3. 对比无目标和有目标的数据图像，指出加入目标之后，数据发生了哪些变化。
4. 在有目标的数据图像中指出目标的大致位置。
5. 尝试对目标体进行定量反演（选做）



# CONTENTS

## 目录

- 1/ 埋地目标探测方法
- 2/ 磁法探测原理
- 3/ 仪器结构与使用
- 4/ 实验要求
- 5/ 参考资料

# 参考资料

代码示例：清华云：<https://cloud.tsinghua.edu.cn/d/714db5f5776844c7b0a8/>



清华大学  
Tsinghua University

# 谢谢!

---