



武汉大学

Wuhan University



# 《摄影测量原理与应用》

(含当代摄影测量)

主讲：王树根

武汉大学遥感信息工程学院



# 摄影测量研究范畴

\* 摄影（成像）→ 记录（胶片、数字）→ 处理、加工

→ { 定量的（几何的）→ 解决是多少？

→ { 定性的（解译的）→ 解决是什么？ →

→ 表达（产品）→ 存贮、管理、更新 → 发布、应用

→ 新的应用需求、认识水平提高

→ 促成新的成像/非成像方式的研究、集成 → 回到 \*

# 摄影测量研究范畴

## q 大测绘的研究范畴

3W:

ü When

ü Where

ü What

空间信息科学

## q 小测绘的概念是测地图

## 第2章 (Part2)

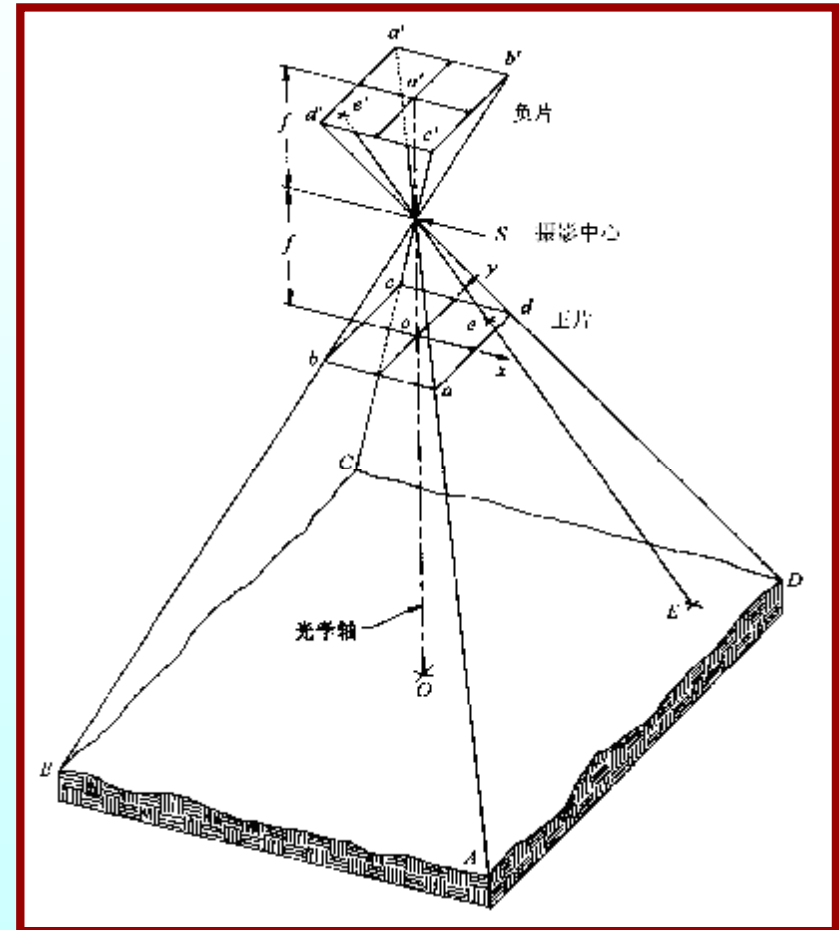
# 摄影测量解析基础 及坐标转换



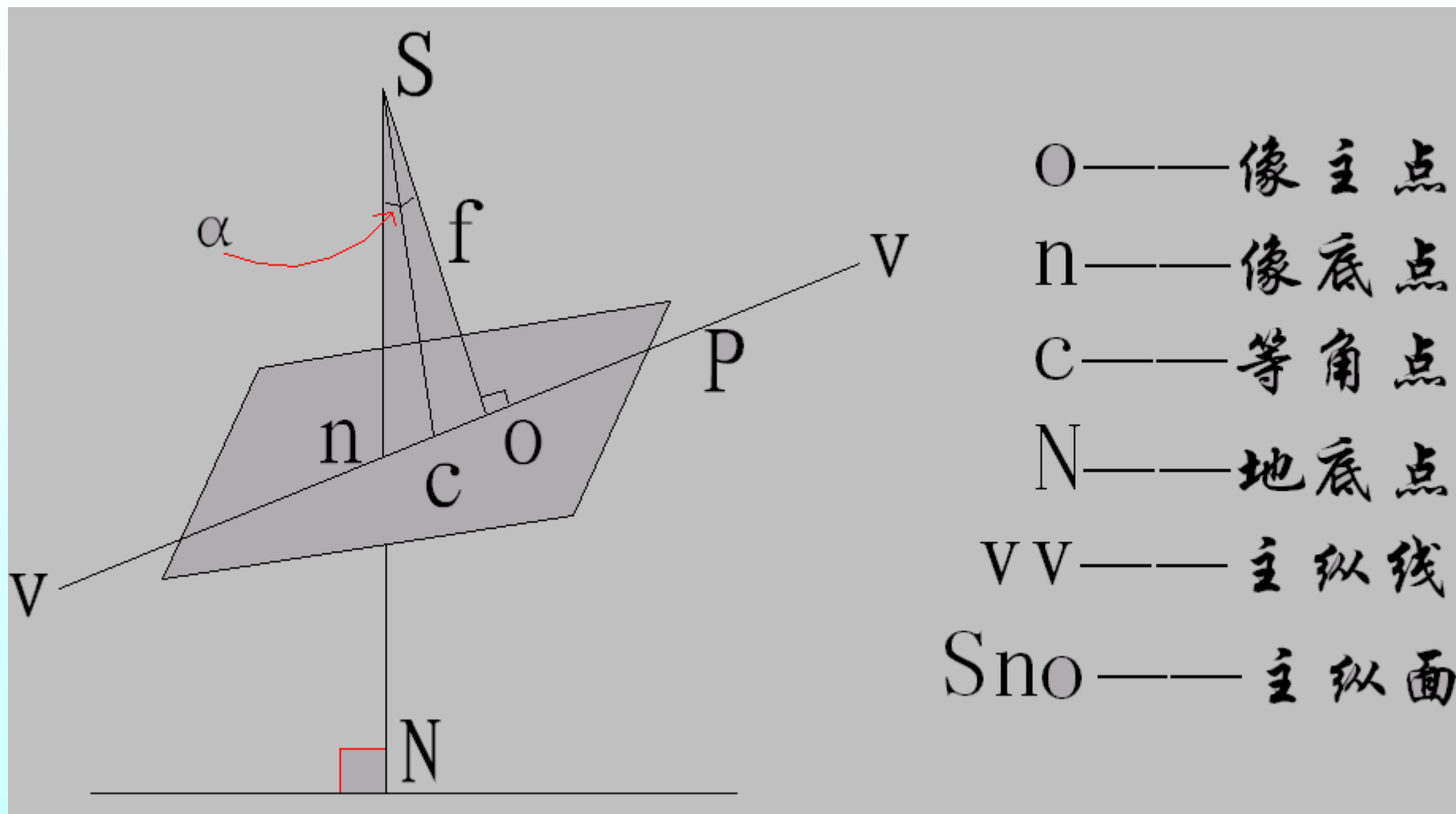
# 单张航摄像片解析

## 主要内容包括：

- q 倾斜像片、水平像片、正片位置、负片位置；
- q 摄影中心、主距、像片倾角；
- q 像主点、像（地）底点、等角点、灭点；
- q 主纵线、主垂面……

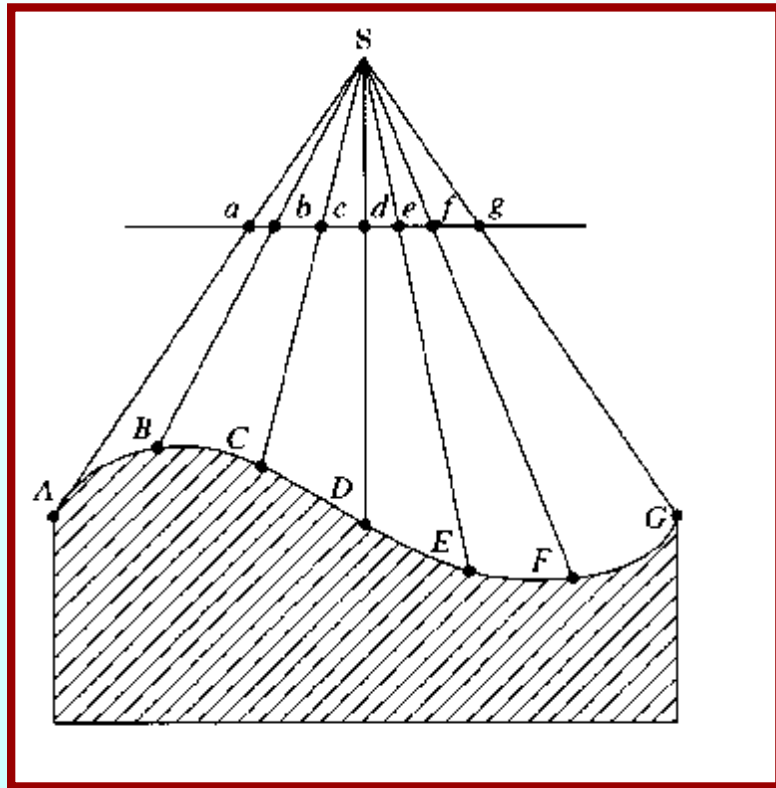


# 航摄像片上的特殊点、线、面

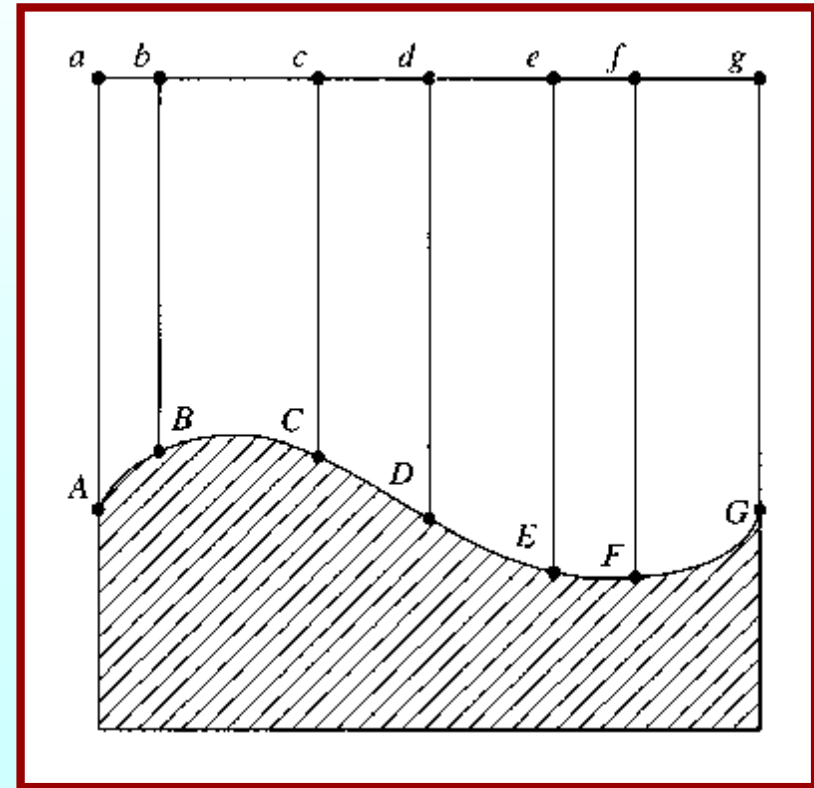


# 航摄像片上的投影差

## Q 两种不同性质的投影



中心投影



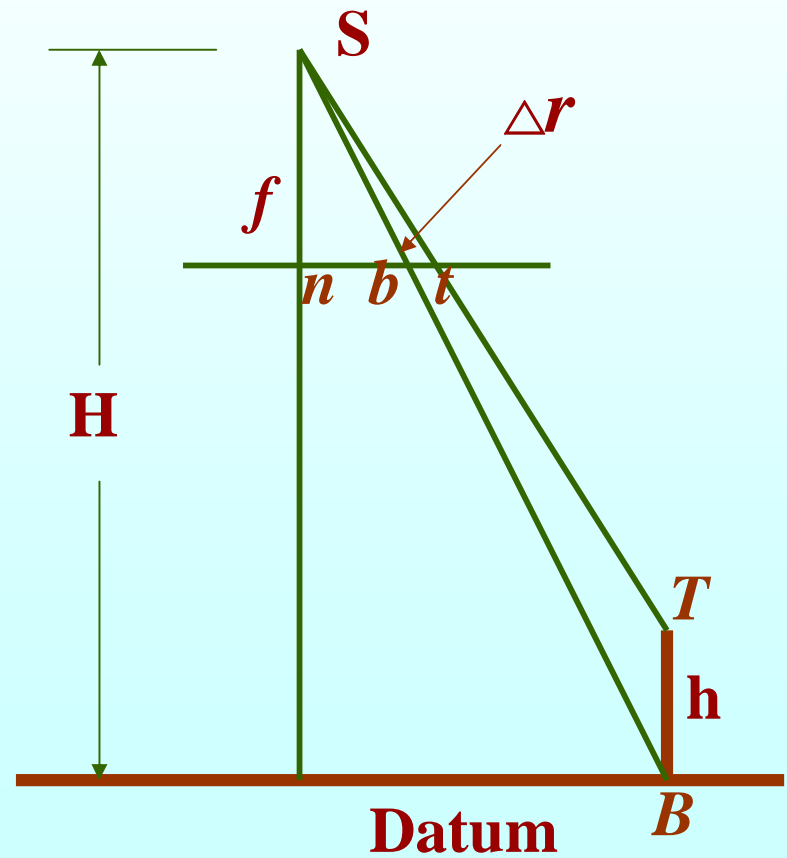
正射投影

# 航摄像片上的投影差

## Q 因地形起伏引起的像点位移

- ü 像底点上无投影差
- ü 因地形起伏引起的像点位移在以像底点为中心的辐射线上
- ü 通过像片纠正可以限制投影差的大小

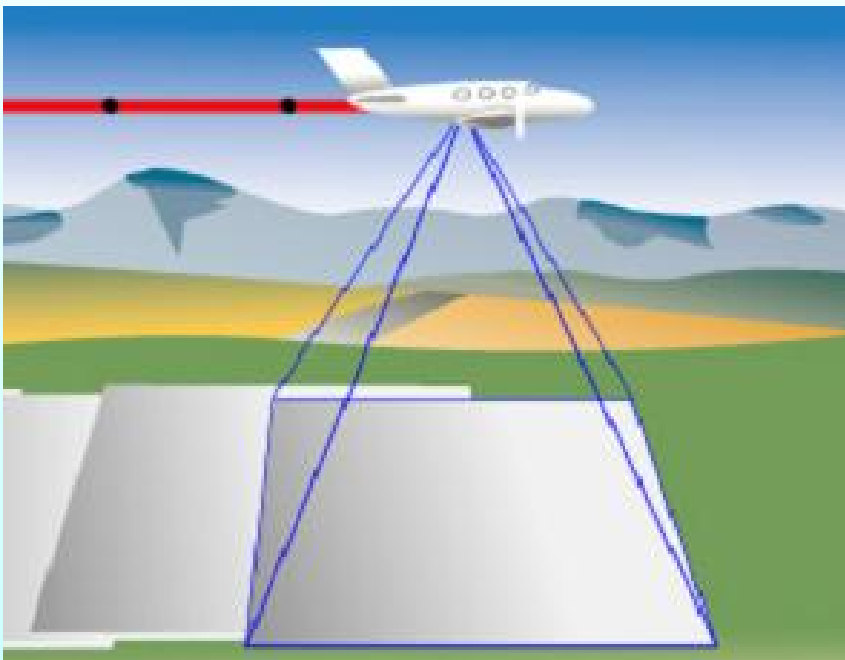
$$\Delta r = \frac{rh}{H} = \frac{rh}{mf}$$



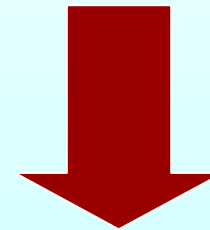


# 航摄像片的坐标系

摄影测量研究的重要内容之一



$(x, y)$



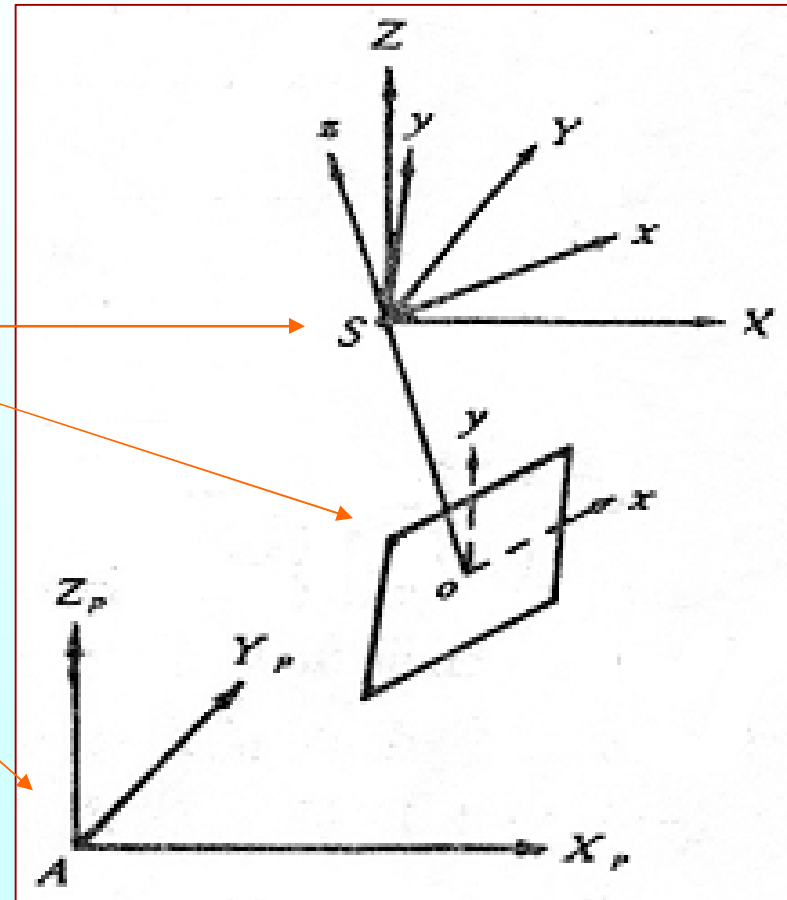
$(X, Y, Z)$

# 摄影测量常用坐标系回顾

两大类：

Q 像方坐标系

Q 物方坐标系



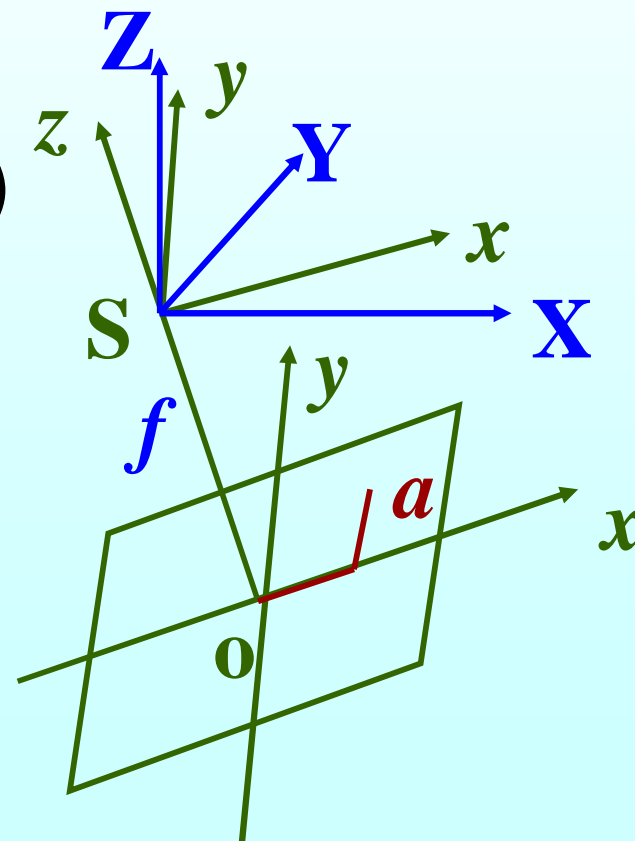
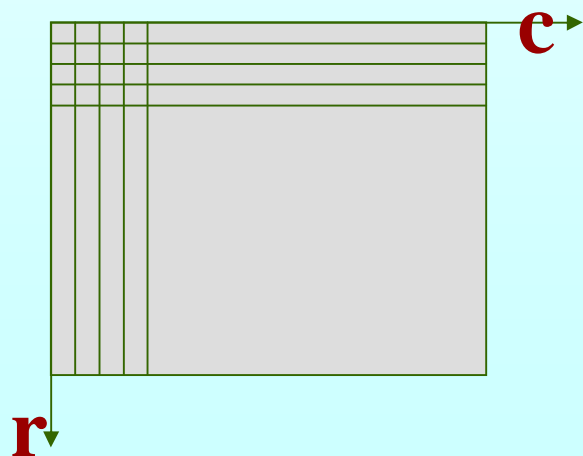
# 像方坐标系

q 像方坐标系：

ü 像平面坐标系 (o-xy)

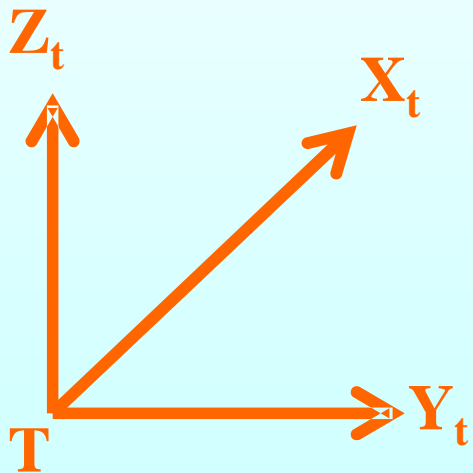
ü 像空间坐标系 (S-xyz)

ü 像空间辅助坐标系 (S-XYZ)

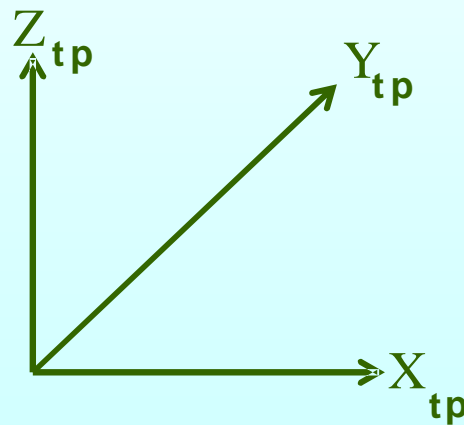


# 物方坐标系

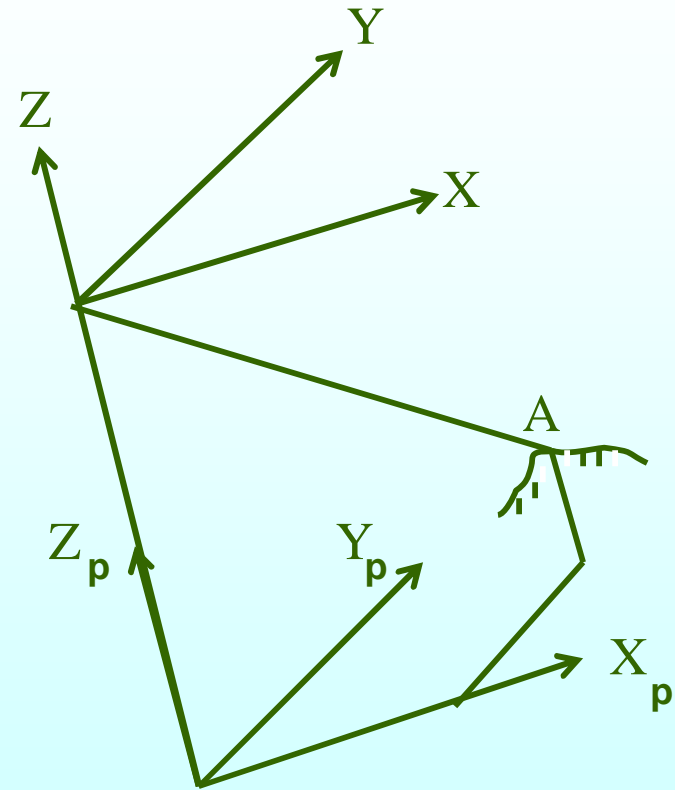
## Q 物方空间坐标系



大地坐标系  
(T - Xt Yt Zt)

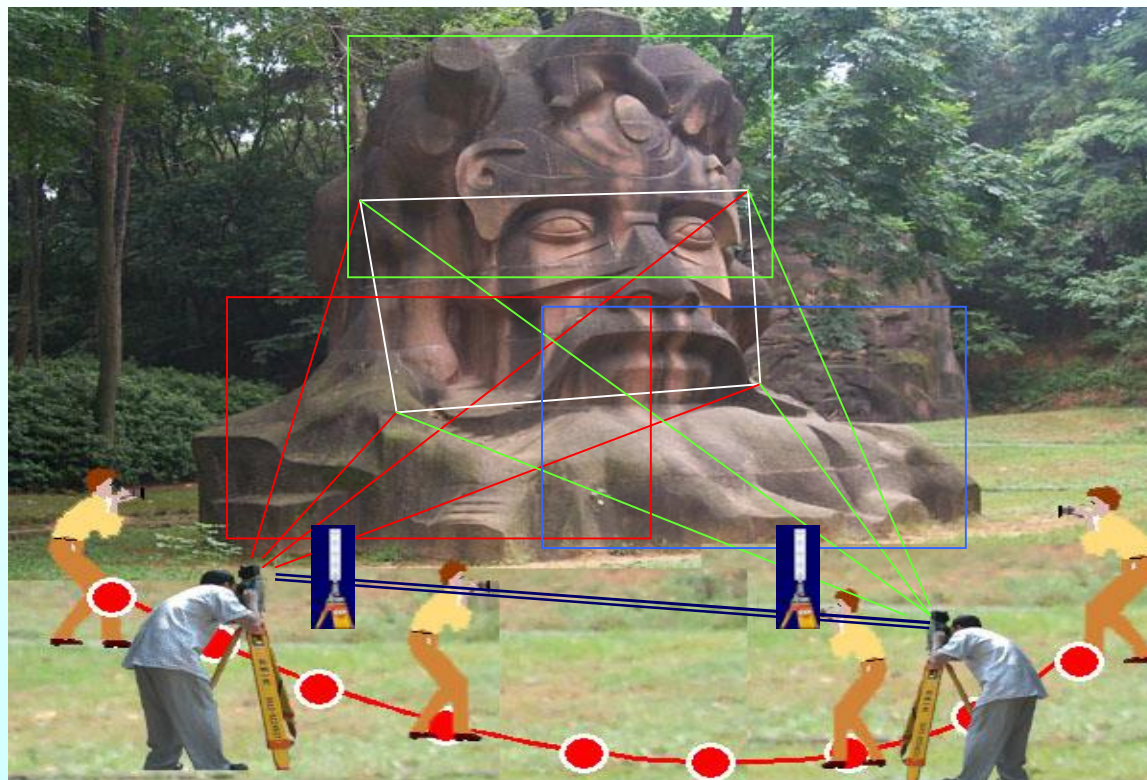


地面摄影测量坐标系  
(P - Xtp Ytp Ztp)



摄影测量坐标系  
(P - Xp Yp Zp)

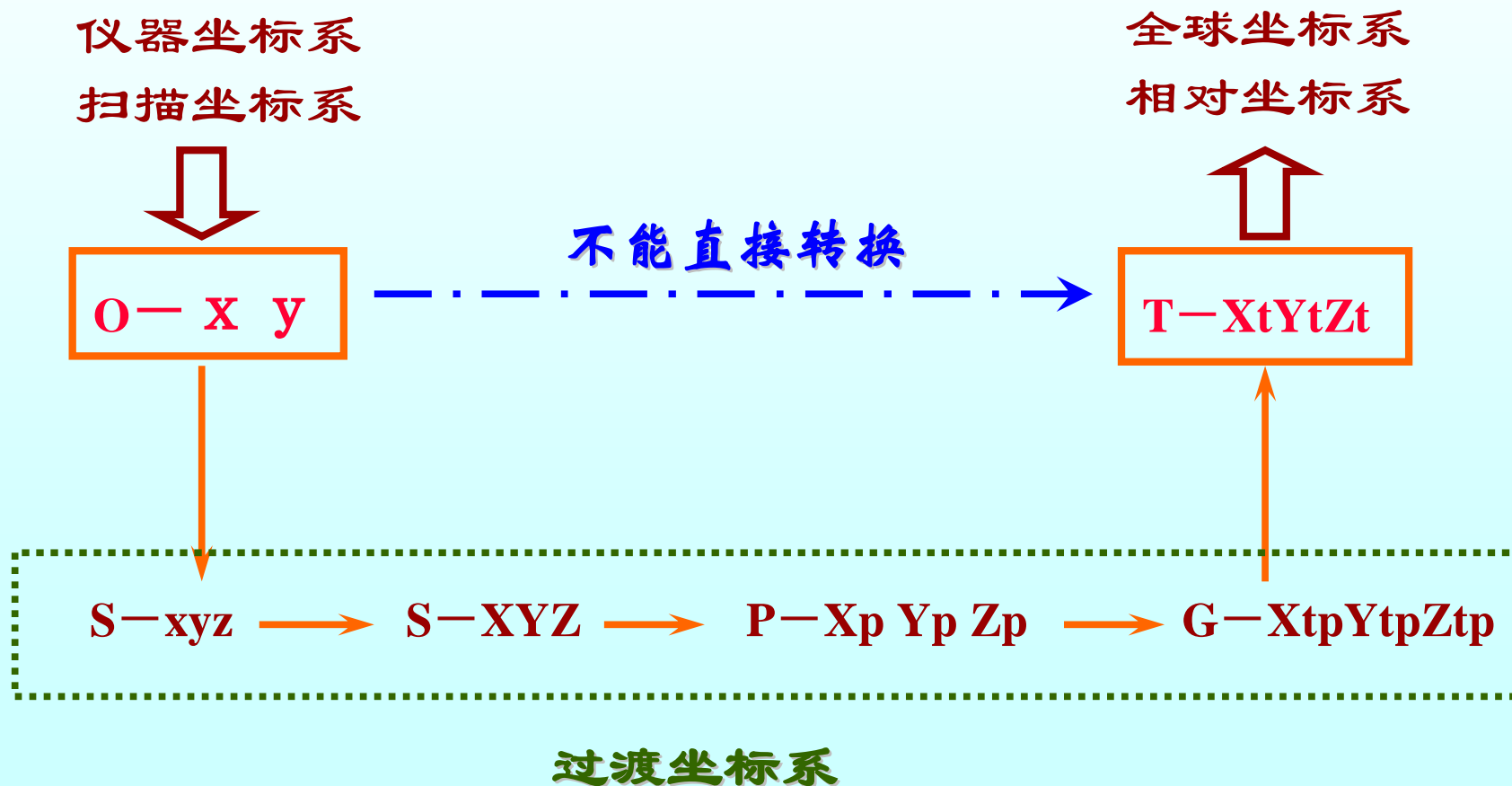
# 物方坐标系



局部物方空间坐标系

# 摄影测量常用坐标系

## 航空摄影测量研究:



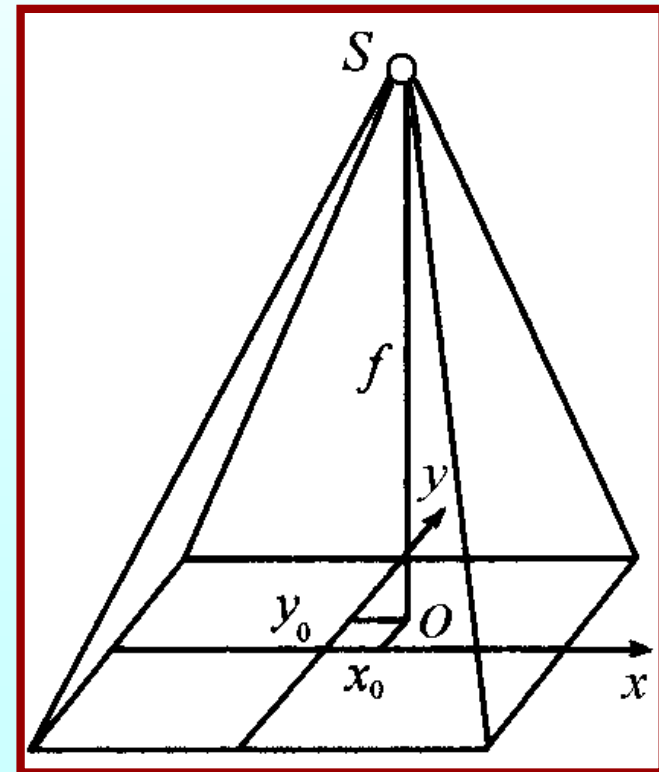
# 航摄像片的内、外方位元素

两种元素： { 内方位元素  
外方位元素

q 内方位元素：

即描述摄影中心与像片之间相互位置关系的参数

$$(x_0 \approx 0, y_0 \approx 0, f)$$

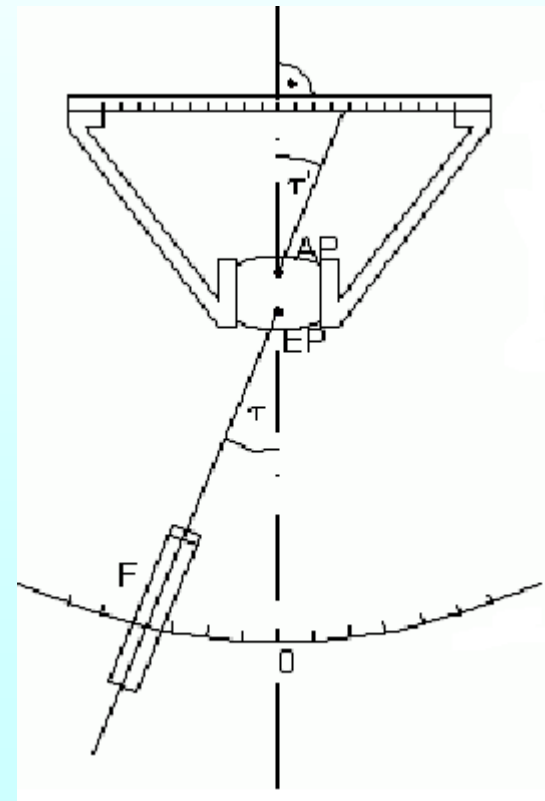


# 关于内方位元素

**确定方法：摄影机检校（Camera Calibration）**

**主要方法包括：**

- q 实验室检校；**
- q 控制场检校；**
- q 光束法自检校**



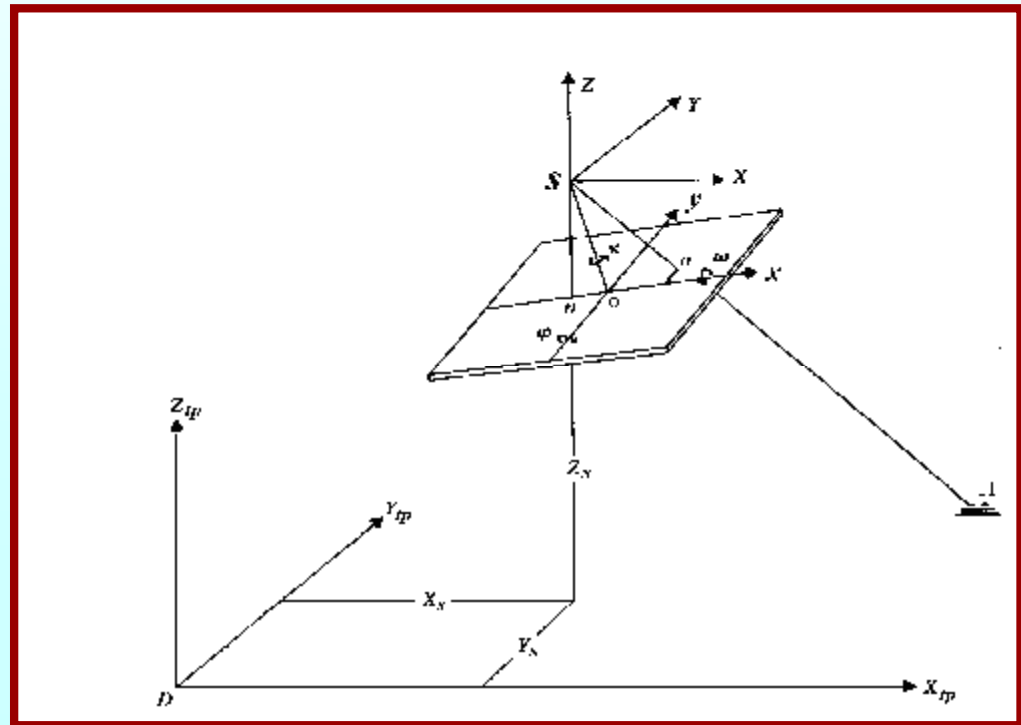


# 航摄像片的外方位元素

**外方位元素：**描述摄影瞬间摄影光束在空间的位置和姿态的参数，共有6个

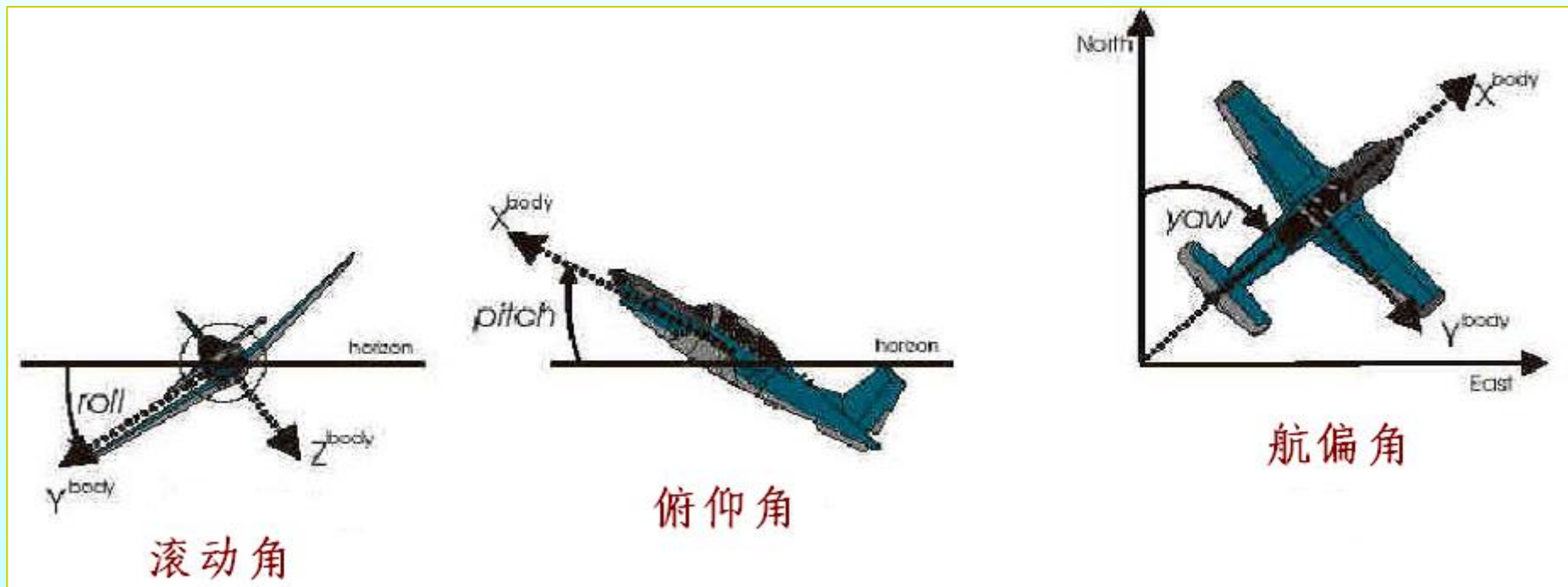
**Q**外方位线元素  $(X_s, Y_s, Z_s)$

**Q**外方位角元素  
 $(\phi, \omega, \kappa)$



# 航摄像片的外方位元素

三个角元素可理解为是航空摄影时飞机的：  
俯仰角、滚动角和航偏角



# 关于外方位元素

## 外方位元素的确定方法：

- q 利用控制点空间后方交（地→空型）
- q 利用GPS/IMU（POS）（空→地型）
- q 光束法平差

GPS：全球定位系统

IMU：惯性测量装置

POS：定位与定向系统

# 空间直角坐标系的转换

**S-xyz 与 S-XYZ之间的变换:**

**正算式:**

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} x \\ y \\ -f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \\ c_1 & c_2 & c_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ -f \end{bmatrix}$$

**反算式:**

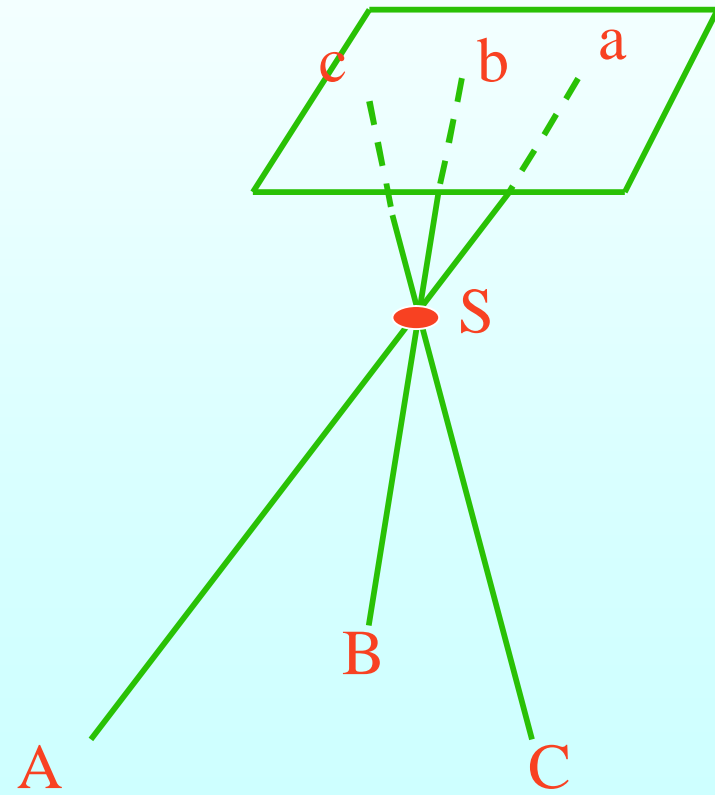
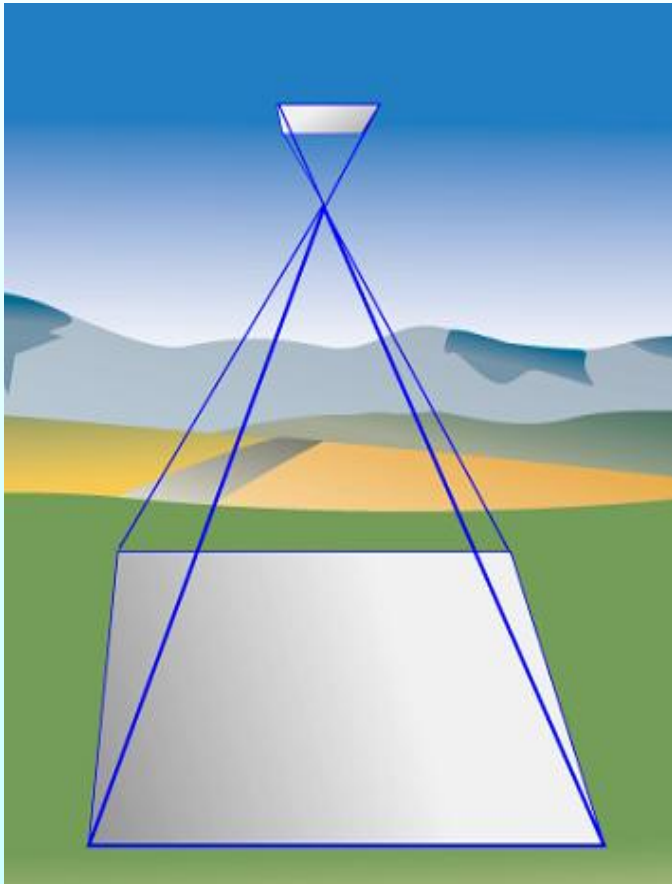
$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ -f \end{bmatrix} = R^T \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}$$

(其中旋转矩阵R为一个3×3阶的正交矩阵:

$R^T = R^{-1}$  , 它由九个方向余弦所组成)

# 中心投影的概念

## q 透视投影

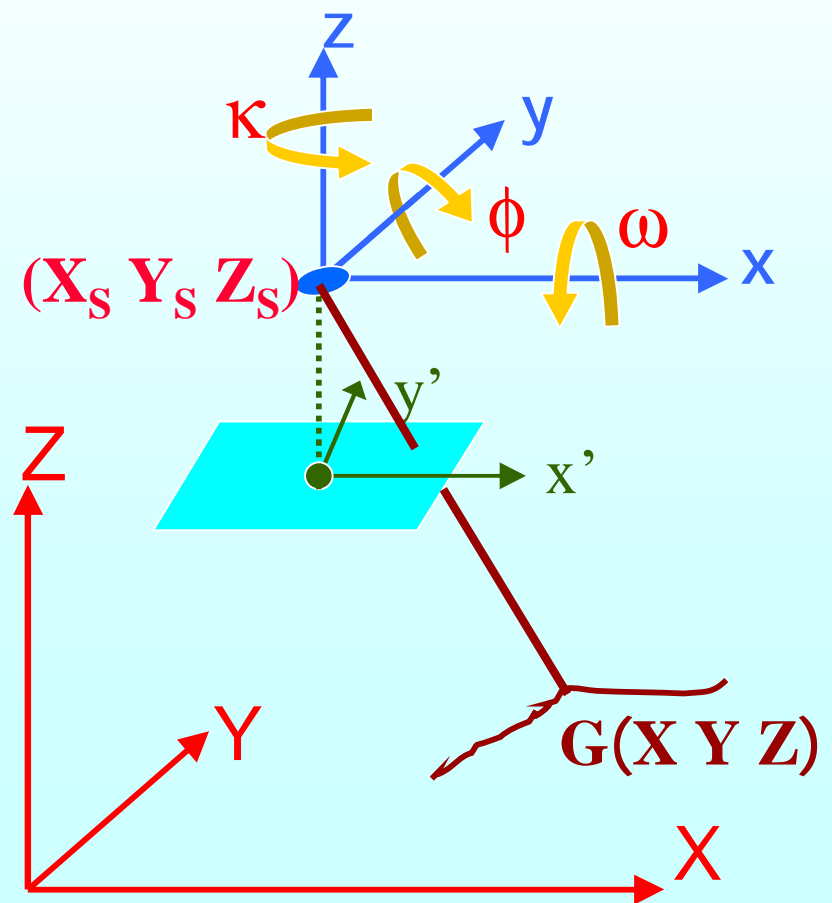


# 中心投影的构像方程

## q 共线方程

$$\left. \begin{aligned} x-x_0+\Delta x &= -f \frac{a_1(X-X_s)+b_1(Y-Y_s)+c_1(Z-Z_s)}{a_3(X-X_s)+b_3(Y-Y_s)+c_3(Z-Z_s)} \\ y-y_0+\Delta y &= -f \frac{a_2(X-X_s)+b_2(Y-Y_s)+c_2(Z-Z_s)}{a_3(X-X_s)+b_3(Y-Y_s)+c_3(Z-Z_s)} \end{aligned} \right\}$$

**共线方程的含义：即摄影中心、像点及对应地面点三点共线**



# 中心投影的构像方程

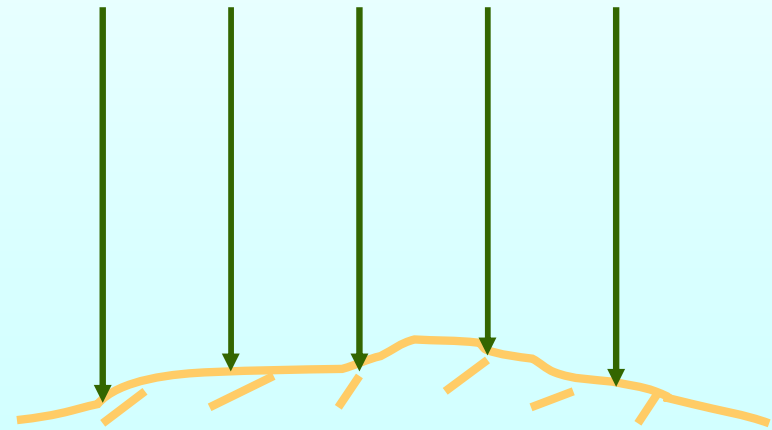
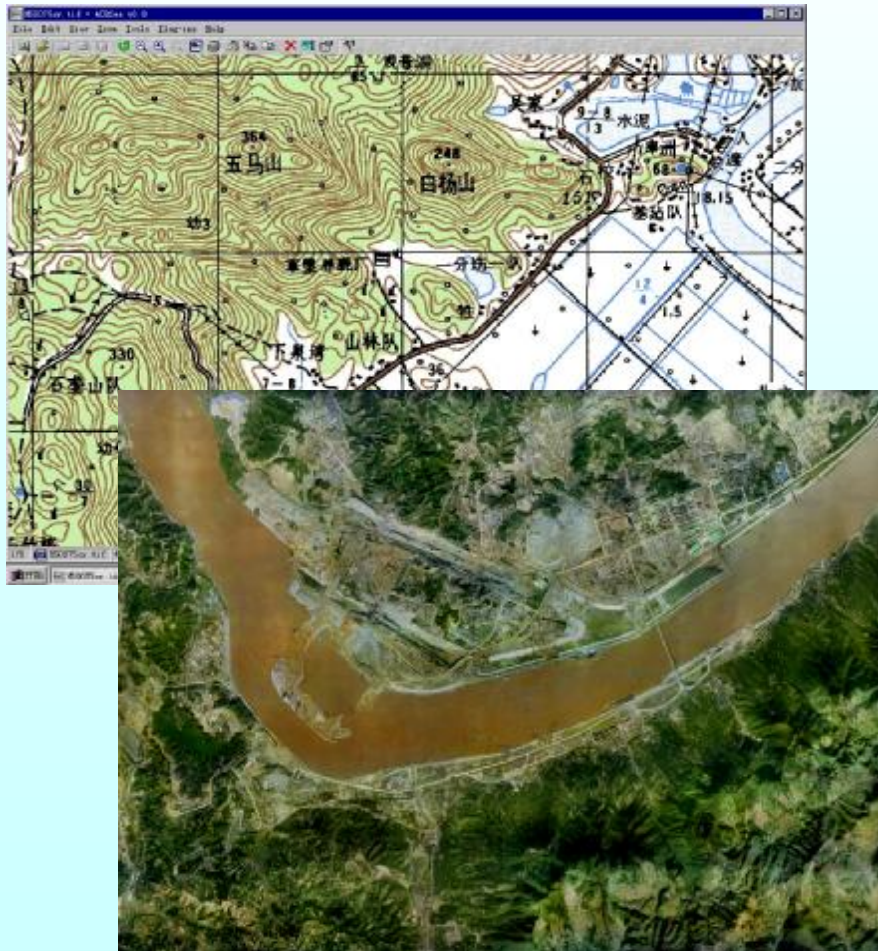
中心投影的构像方程是摄影测量与遥感学科中最为重要的公式之一。

共线方程的主要应用：

- q 单片空间后方交会和多片空间前方交会
- q 光束法空中三角测量的基础方程
- q 数字投影基础（数字导杆）
- q 计算模拟像片数据（已知内、外方位元素及物点坐标）
- q 利用DEM与共线方程制作正射影像
- q 利用DEM进行单片测图 etc

# 正射投影

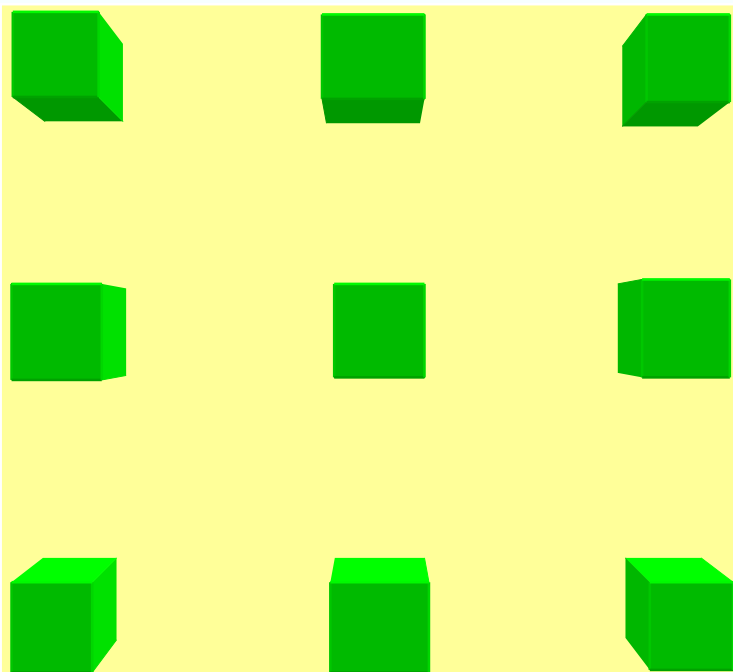
q 地图（正射影像）是正射投影（平行投影）



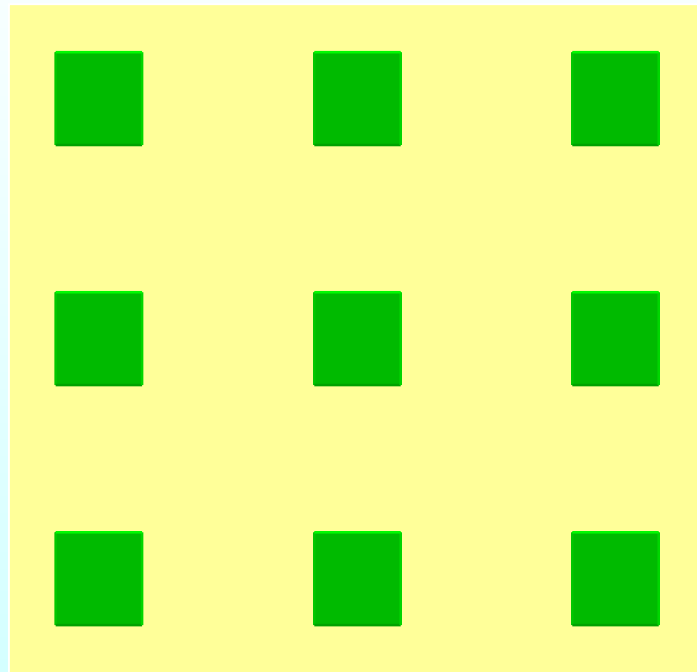
正射投影



# 中心投影与正射投影的比较



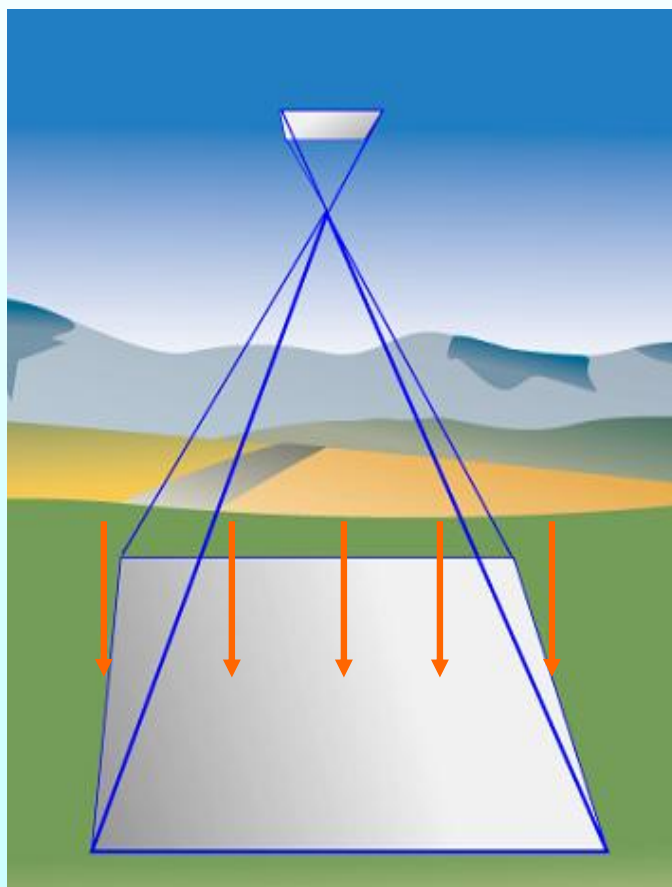
有投影差



无投影差

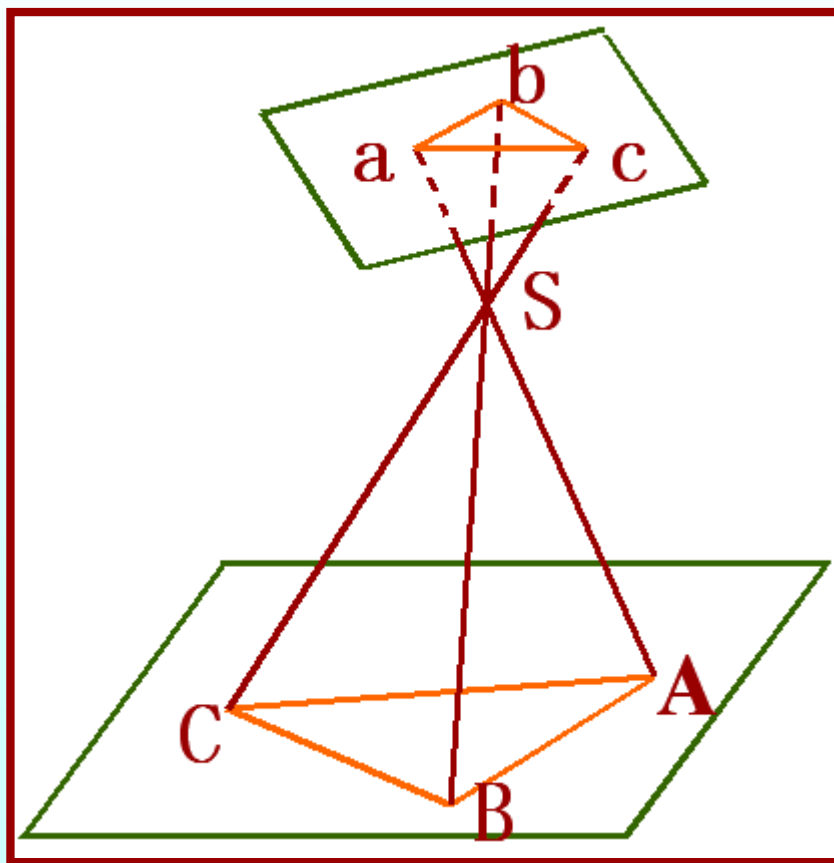
# 中心投影与正射投影的差别

问：何时中心投影与正射投影等效？



# 中心投影像片的正射变换

q 实质就是平面与平面之间的中心投影变换

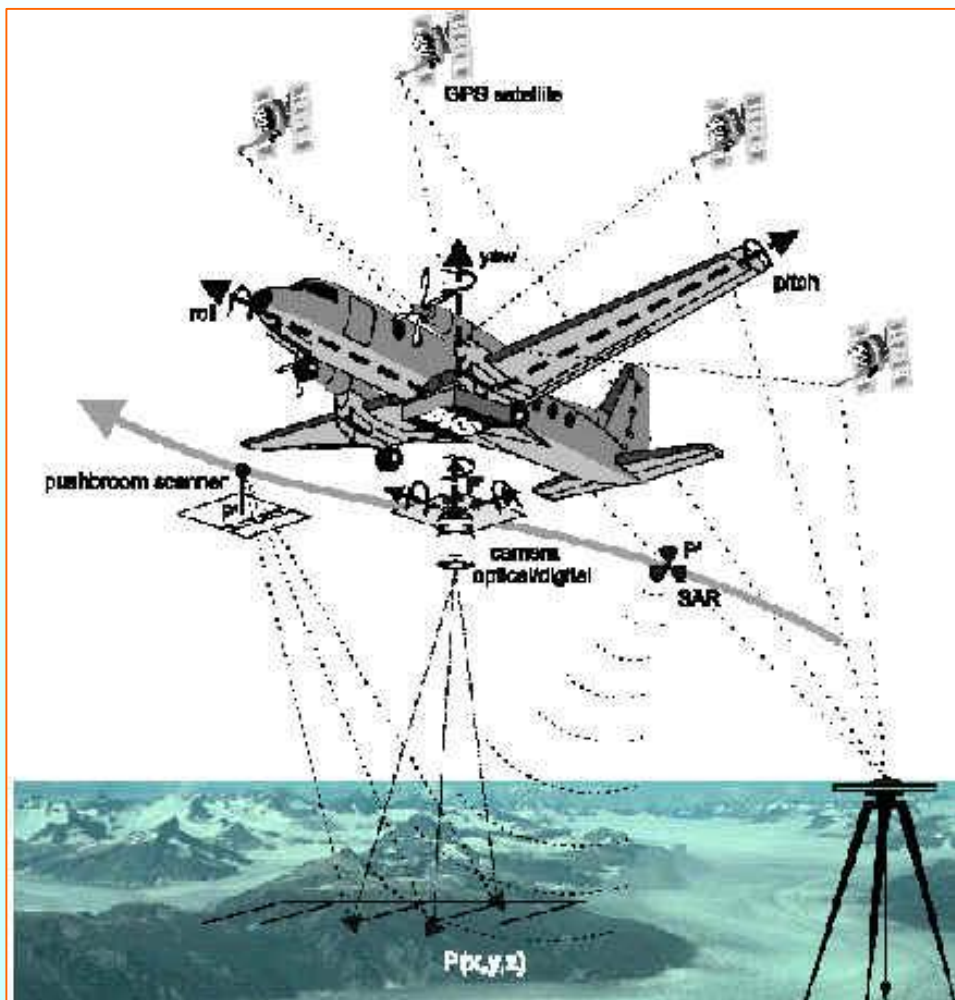


透视变换数学模型：

$$\left. \begin{aligned} x &= \frac{a_1 X + a_2 Y + a_3}{c_1 X + c_2 Y + 1} \\ y &= \frac{b_1 X + b_2 Y + b_3}{c_1 X + c_2 Y + 1} \end{aligned} \right\}$$

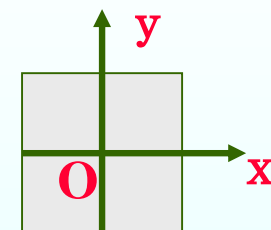
# 天地一体化的坐标系

发展趋势：天地一体化

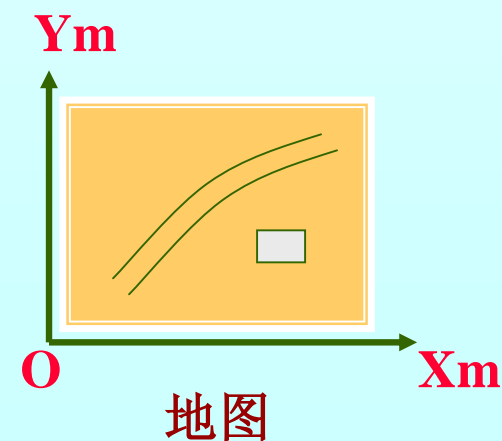
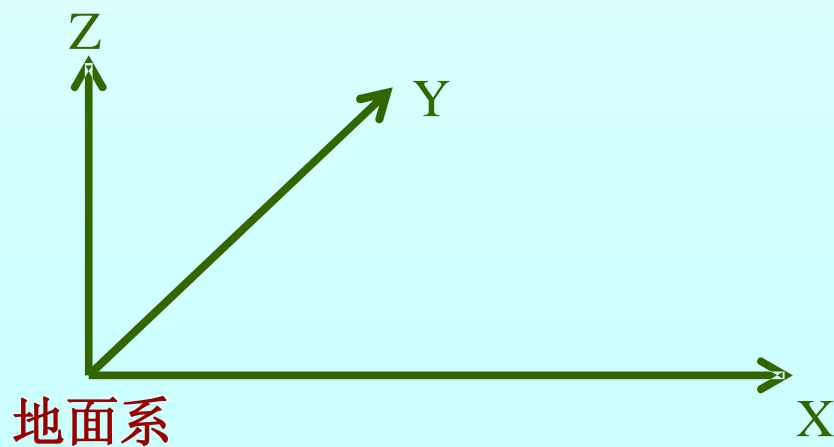
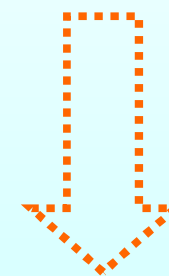


涉及多少坐标系？

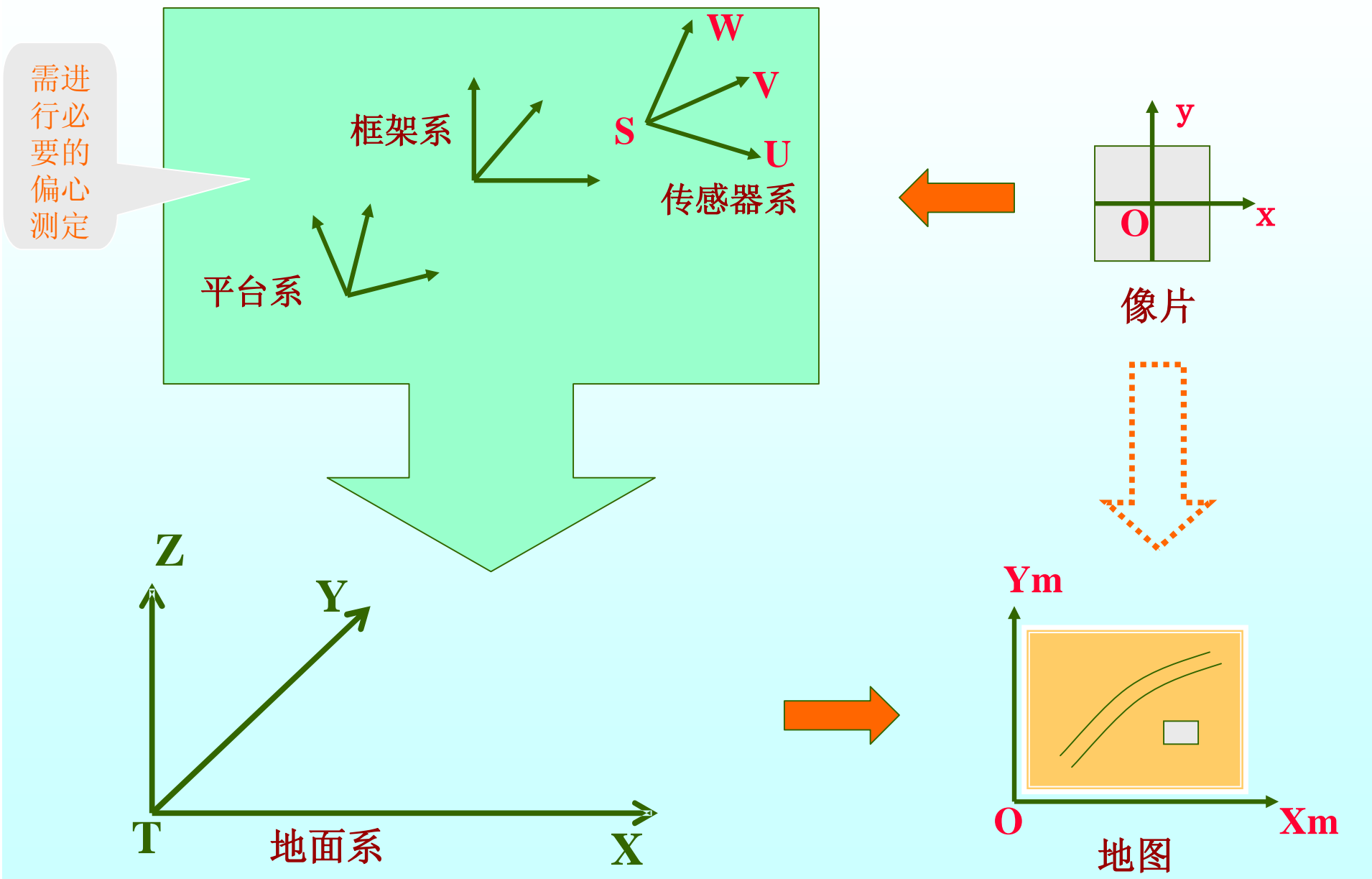
# 传感器及平台常用坐标系回顾



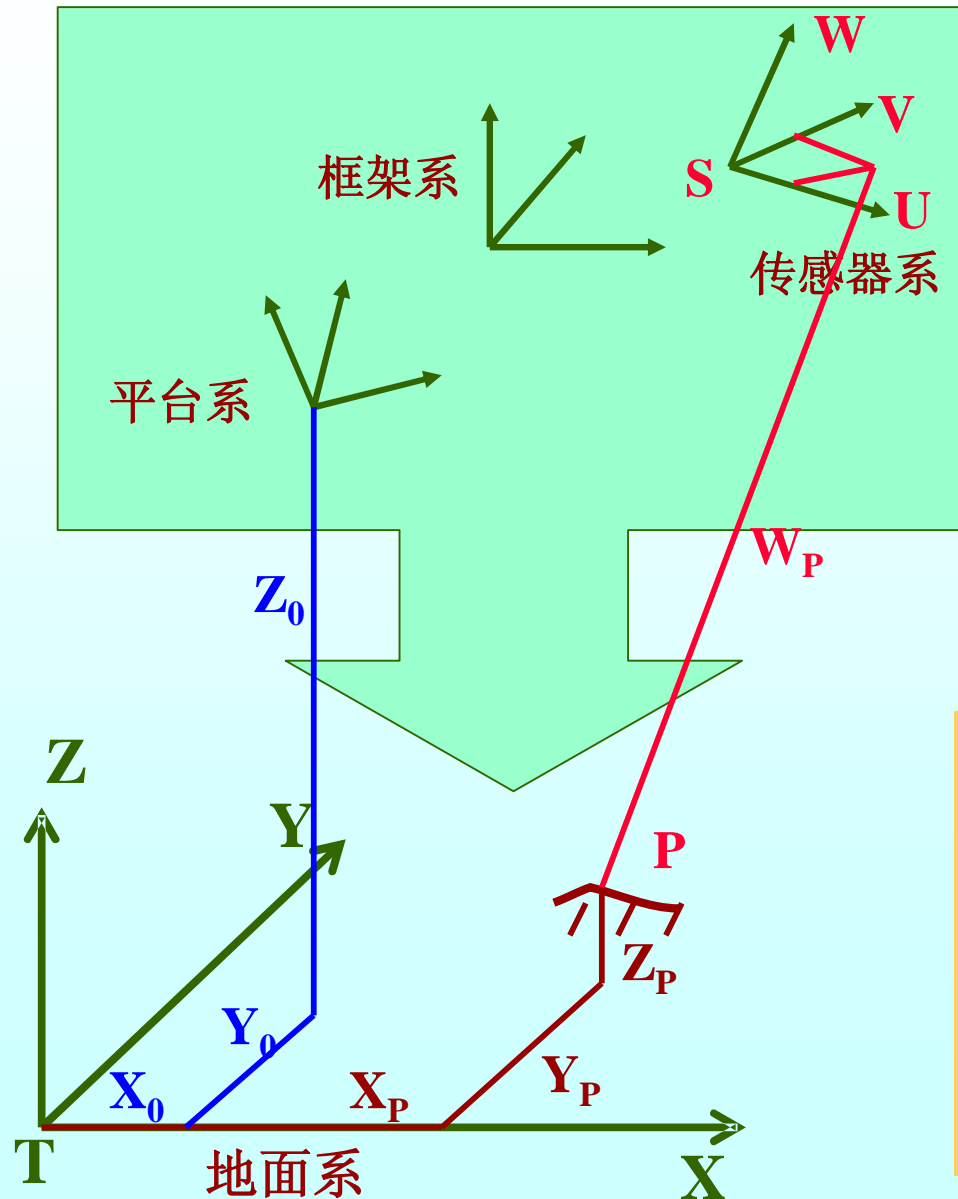
像片



# 传感器及平台常用坐标系回顾



# 传感器及平台常用坐标系回顾



# 坐标系转换过程

则通用构像方程为：

$$\begin{bmatrix} X_p \\ Y_p \\ Z_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} + A \left\{ B \cdot C \begin{bmatrix} U_p \\ V_p \\ W_p \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta X' \\ \Delta Y' \\ \Delta Z' \end{bmatrix} \right\}$$

若令：

$$B \cdot C \begin{bmatrix} U_p \\ V_p \\ W_p \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta X' \\ \Delta Y' \\ \Delta Z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X'_p \\ Y'_p \\ Z'_p \end{bmatrix}$$



# 坐标系转换过程

则有：

$$\begin{bmatrix} X_p \\ Y_p \\ Z_p \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} X'_p \\ Y'_p \\ Z'_p \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix}$$

与共线方程比较：

$$\begin{bmatrix} X_P \\ Y_P \\ Z_P \end{bmatrix} = l R \begin{bmatrix} x \\ y \\ -f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_S \\ Y_S \\ Z_S \end{bmatrix}$$

# 传感器及平台常用坐标系

q 在上述坐标系中最重要的坐标系为：

传感器坐标系  $S-UVW$  和  
地面坐标系  $T-XYZ$

q 而最基本的坐标系为：

像平面坐标系  $O-xy$  和  
地图坐标系  $O-X_mY_mZ_m$

参考文献：孙家柄. 遥感原理、方法与应用. 测绘出版社

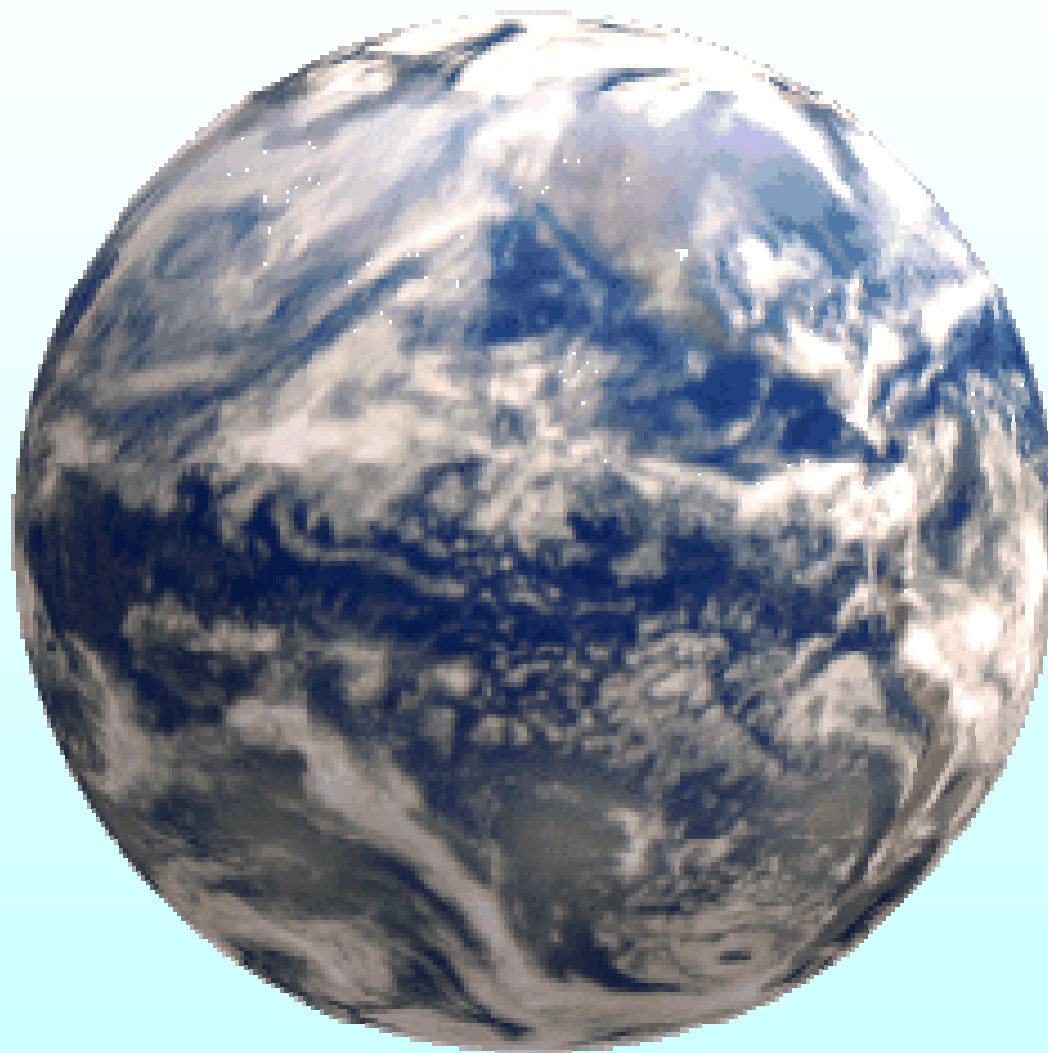
# 对坐标系重要性的再认识

- q 为什么在空中三角测量中经常遇到高程精度难以满足要求？
- q 为什么在大范围测图时地图拼接发生困难？为什么不同部门所测的图在地图拼接时发生困难？  
对坐标系保密（不统一）所带来的问题
- q 为什么基于GPS和电子地图的导航不准？
- q 为什么...

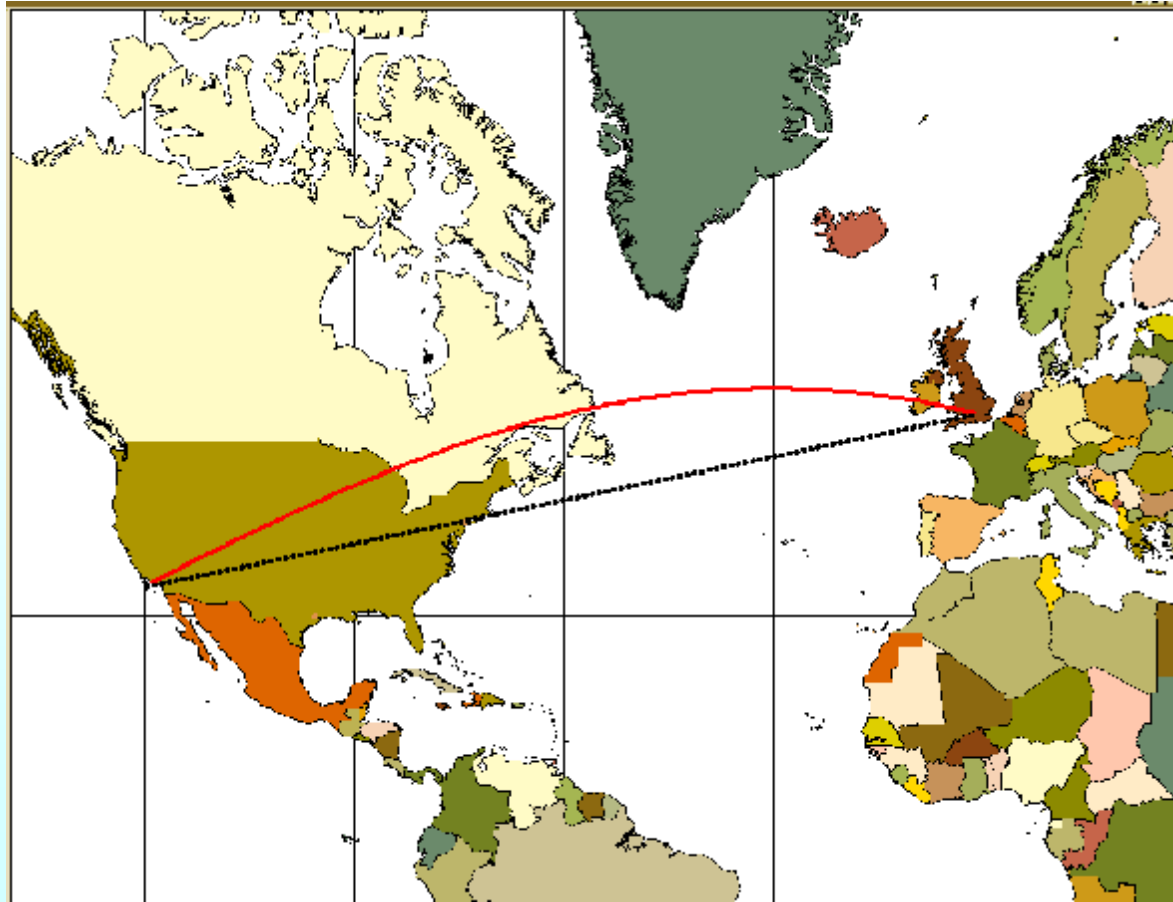


# 对地球的认识

---



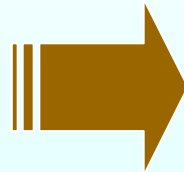
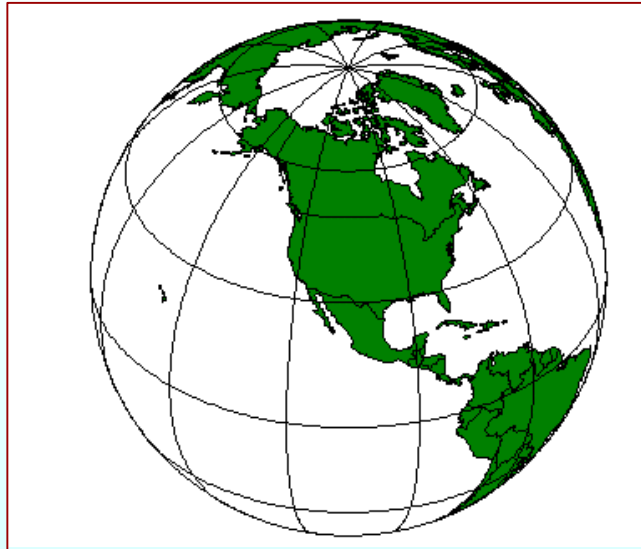
# 对地球的认识



1、 Where are we ?

2、 Shortest distance between two points ?

# 面临的问题之一：地图投影



*Curved Earth*

Geographic coordinates:  $f, l$   
(Latitude & Longitude)

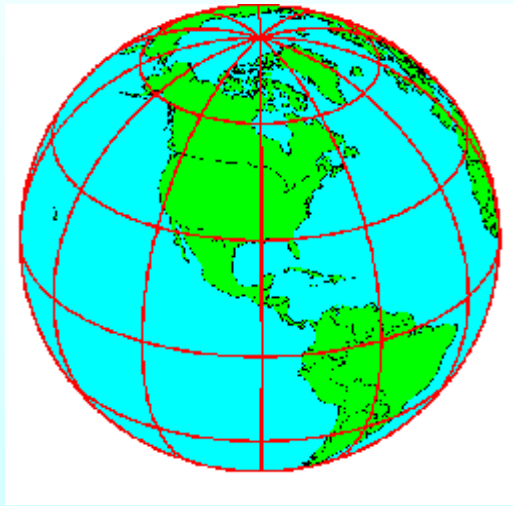
*Flat Map*

Cartesian coordinates:  $x, y$   
(Easting & Northing)

地图投影是地图制图学的重要研究内容

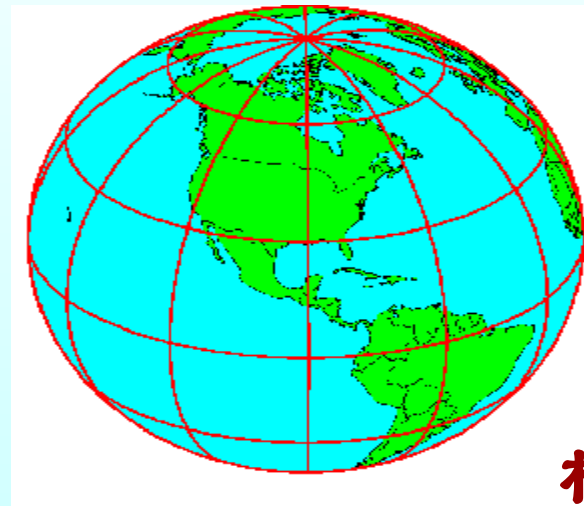
# 面临的问题之二： 地球的形状

We think of the earth as a **sphere**



圆球

It is actually a **spheroid** slightly larger in radius at the equator than at the poles

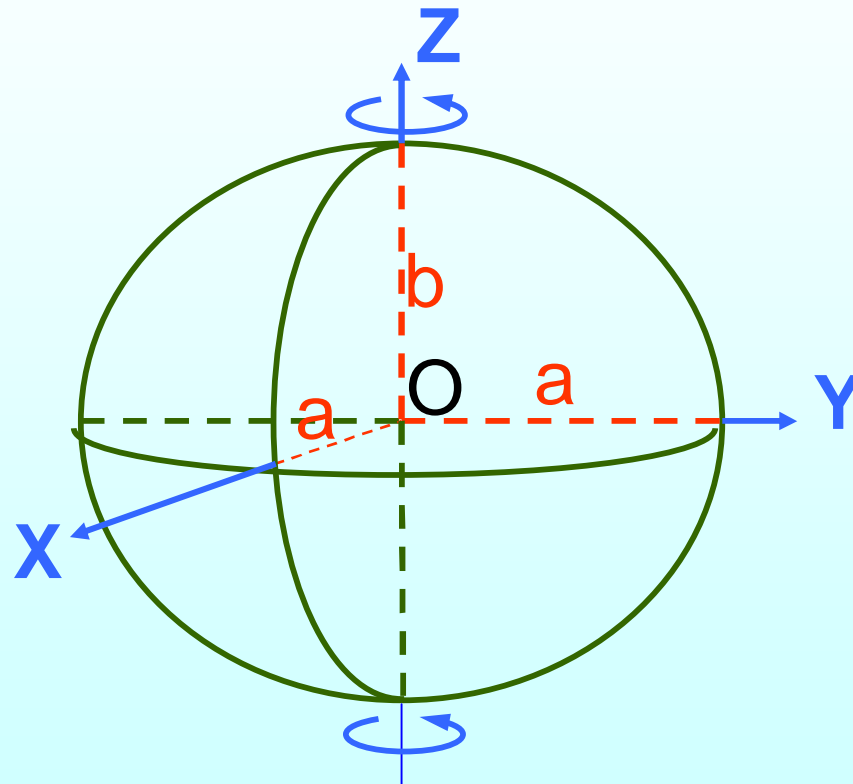
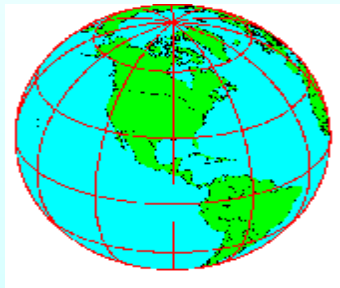


椭球

地球的形状是大地测量学的重要研究内容

# 旋转椭球

Rotate an ellipse around an axis



Rotational axis

椭球参数?



# 面临的问题之三：不同类型的坐标系统

## Q 三类坐标系统：

### 1) 全球笛卡尔坐标系统 (X,Y,Z)

A system for the whole earth (地心坐标系)

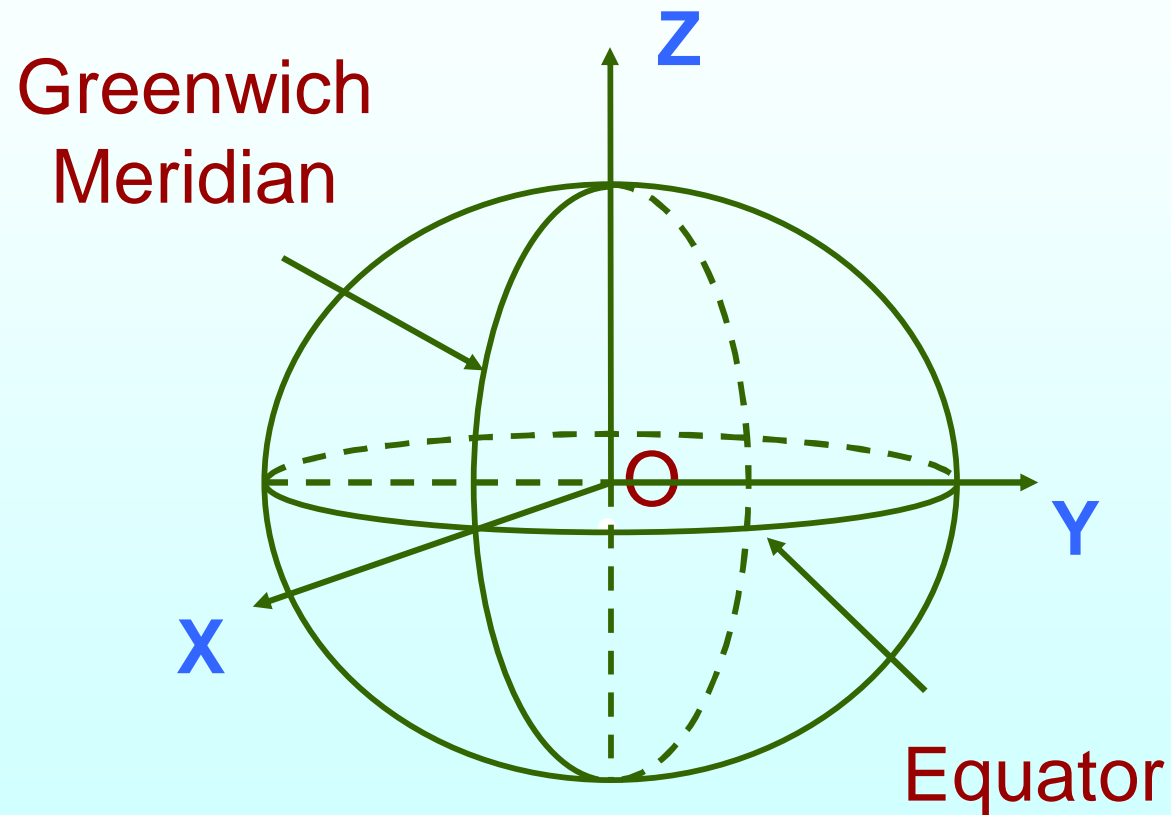
### 2) 地理坐标系统 (f, l, Z)

A system for the whole earth (全球坐标系)

### 3) 局部投影坐标系统 (X,Y,Z)

A system on a local area of the earth's surface  
(局部坐标系)

# 全球笛卡尔坐标系 (X,Y,Z)

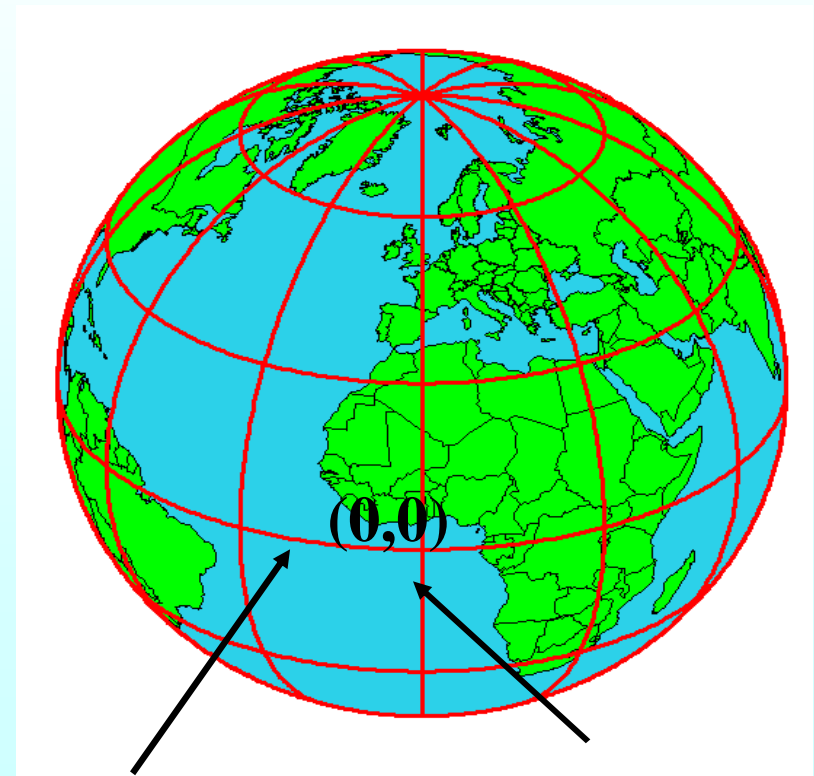


**坐标原点可以是地心、参心**

# 地理坐标 (f, l, Z)

- | Latitude (f) and Longitude (l) defined using an **ellipsoid**, an ellipse rotated about an axis
- | Elevation (z) defined using **geoid**, a surface of constant gravitational potential
- | Earth **datums** define standard baseline values of the ellipsoid and geoid (more on this later....)

## 地理坐标的原点



Equator

Prime Meridian

# 不同类型的坐标系统之高程基准面问题

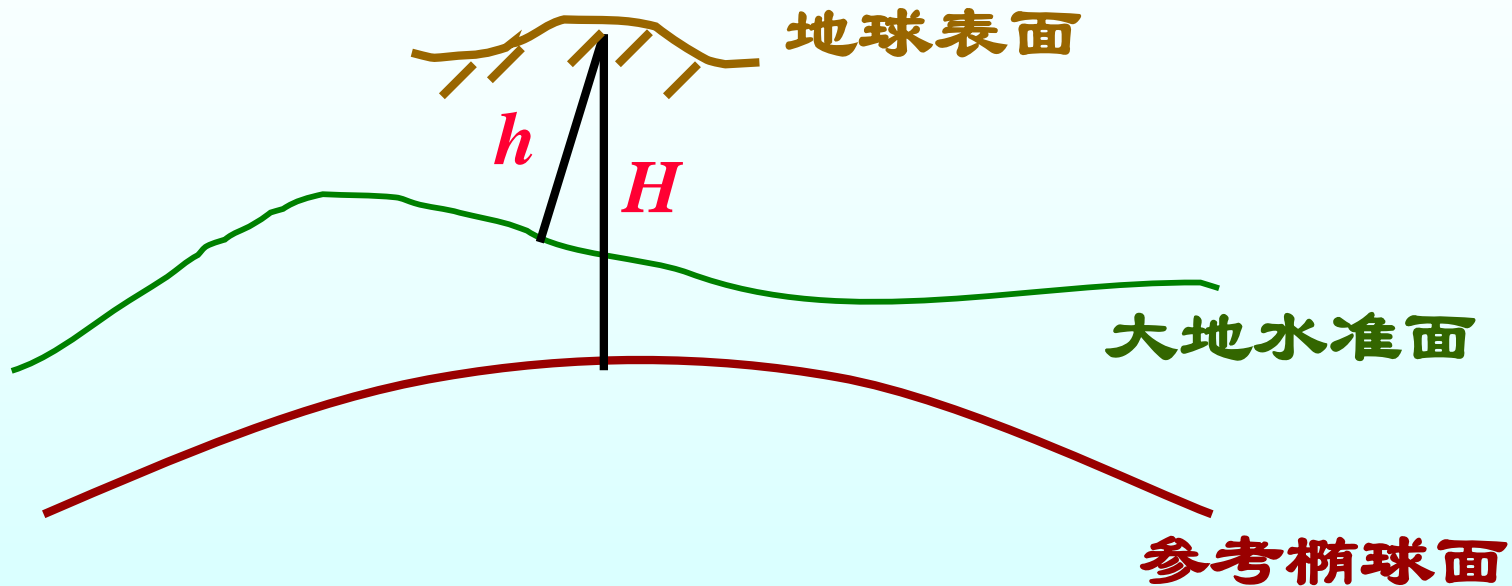
- 1) 全球笛卡尔坐标系统 (X,Y,Z)
- 2) 地理坐标系统 (f, l, Z)
- 3) 局部投影坐标系统 (X,Y,Z)

The z-coordinate in (1) and (3) is defined **geometrically**;  
in (2) the z-coordinate is defined **gravitationally**

大地高  $H$

正常高  $h$

# 高程的不同定义

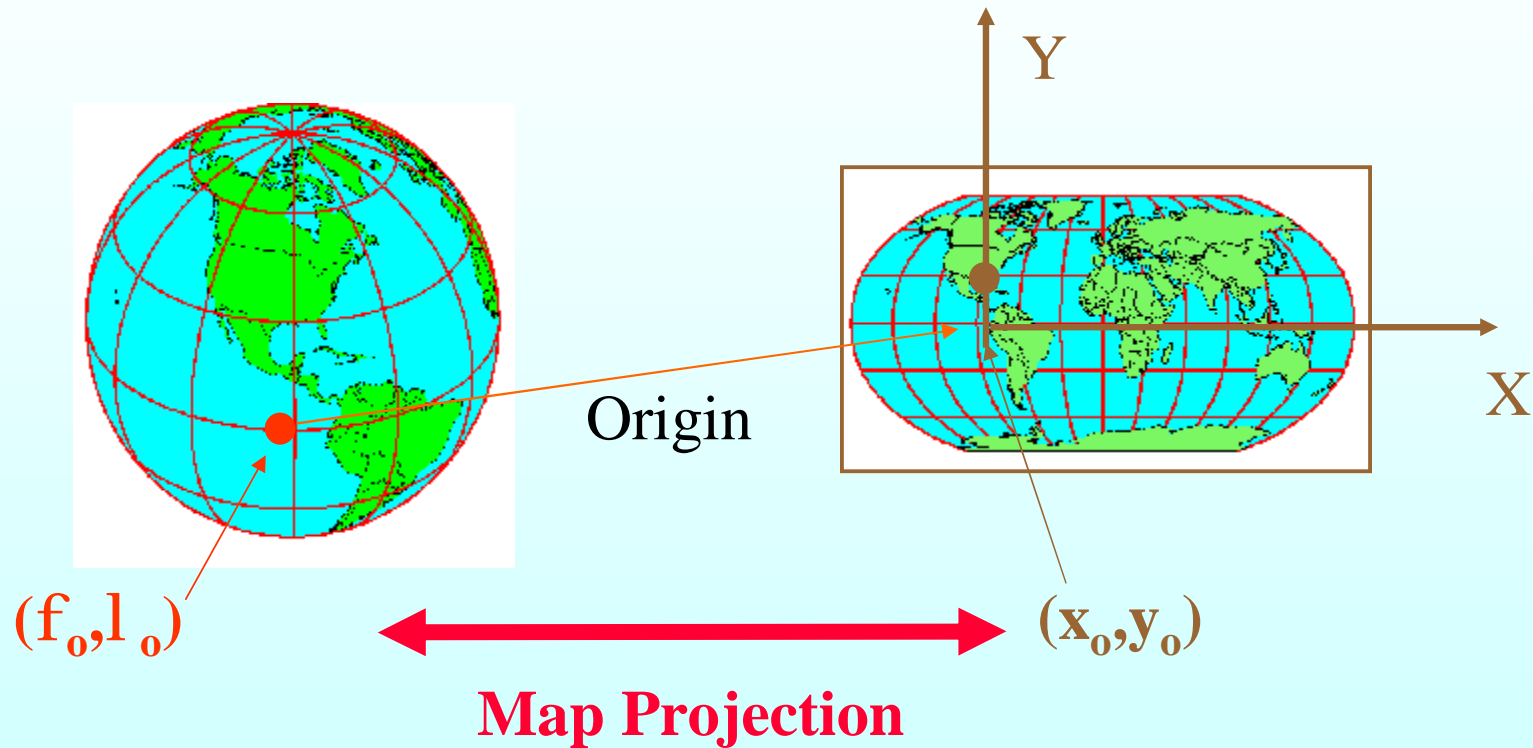


大地高 $H$ ：沿法线方向到参考椭球面的高程

正常高 $h$ ：沿垂线方向到大地水准面的高程

# 面临的问题之四：坐标的转换

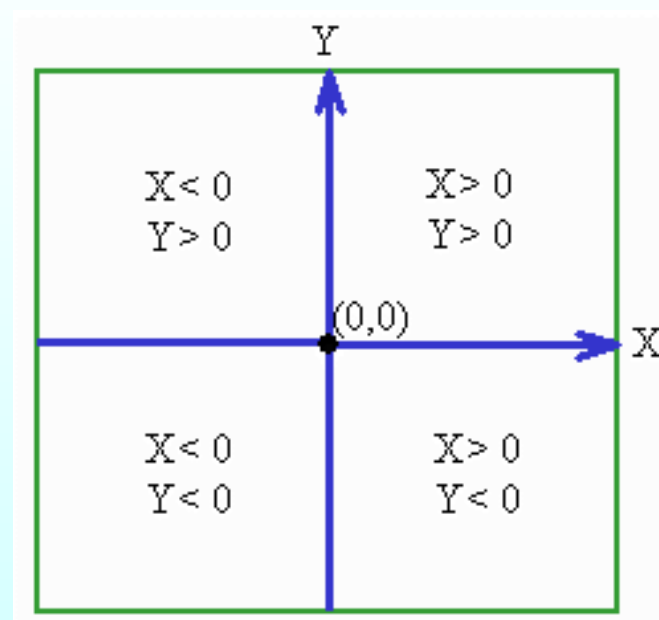
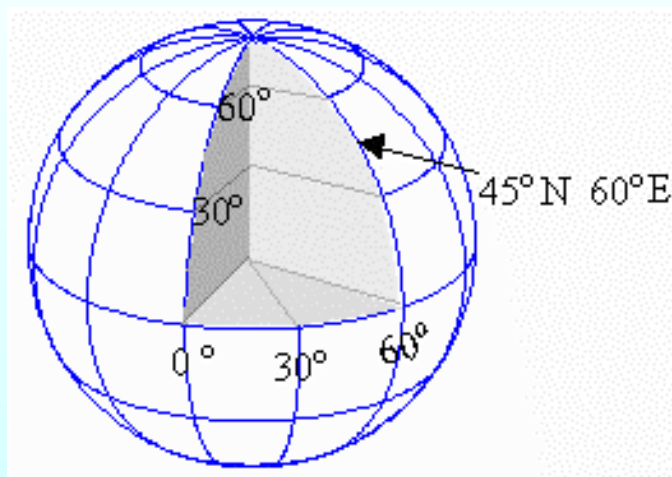
## 地理坐标与投影坐标之间的转换



投影坐标系的坐标原点和坐标轴该如何取？

# 坐标的转换

## 地理坐标与投影坐标之间的转换



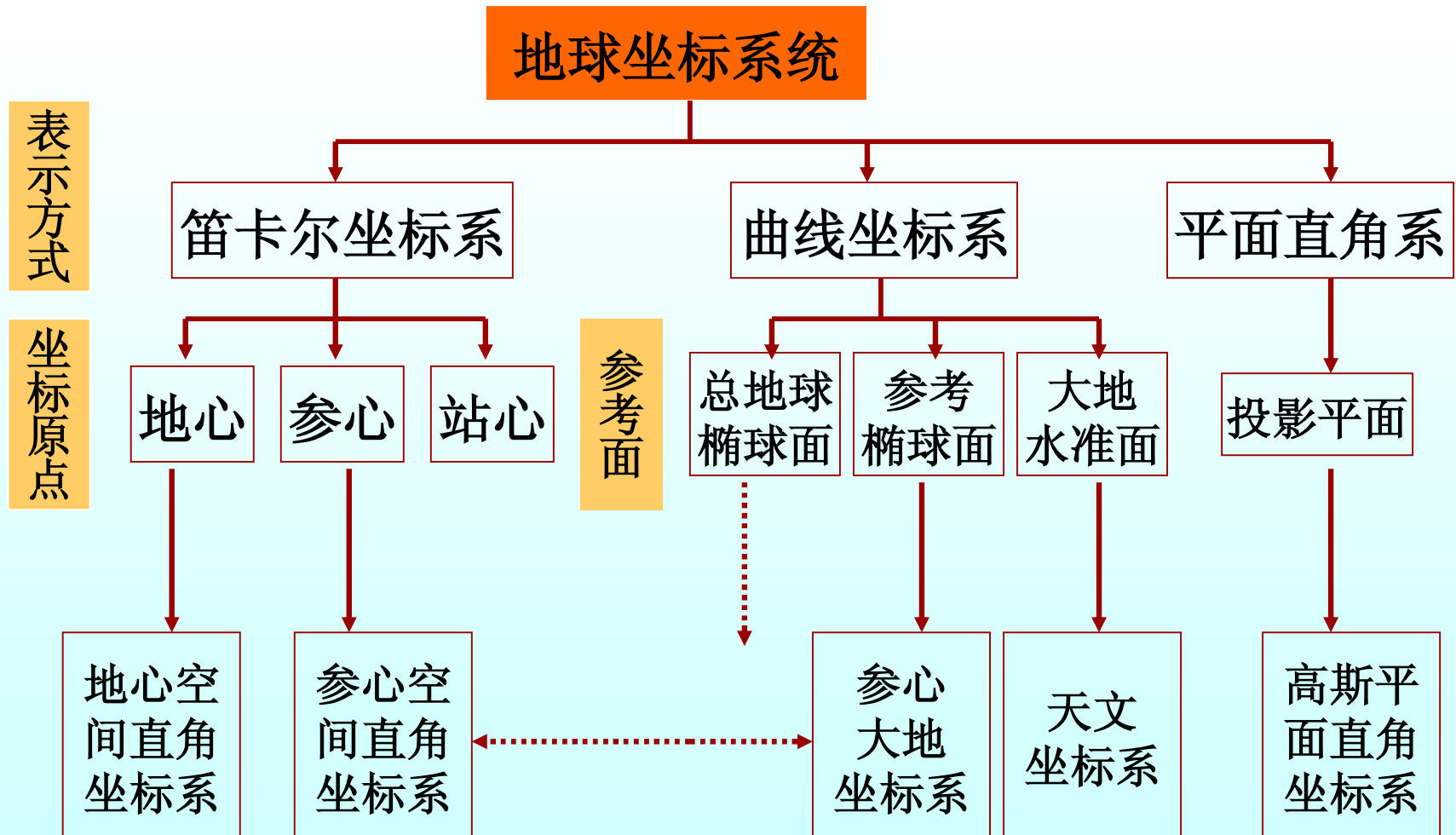
$(f, l)$   $\xleftrightarrow{\text{Map Projection}}$   $(X, Y)$

坐标之间的转换该如何进行？

**围绕上述各方面问题，人们定义了一系列坐标系统来描述地面点的表达方式？**



# 对地球坐标系统的认识



地面点的坐标表达

# 大地测量坐标系的建立

- q 传统测绘地形图首先必须在各自国家或地区建立测图的基准框架，又称“大地测量控制网”
- q 建立大地测量控制网的主要内容包括：
  - ü 测定最接近各自国家或地区的地球表面自然形状的“参考椭球体”
  - ü 确定与“参考椭球体”相应的地图投影方法
  - ü 在大地测量控制网内布设三、四等测图控制网（供测绘各种比例尺地形图）

# 大地测量坐标系的建立

## q 建立大地测量控制网的过程

测绘工作者要在数万个大地测量控制点上进行精密的天文、水准、重力、水平角和距离等观测，先用数学方法将在地球自然表面实测的数据归算到参考椭球面上，再用数学方法将参考椭球面上的数据归算到平面上，最后，还要对整个大地测量控制网数据进行处理（整体大地测量平差），以消除各种测量误差，提高整个大地测量控制网的精度。

# 地球的表达（描述）

受潮汐影响，海平面在不断变化

实际  
海平面

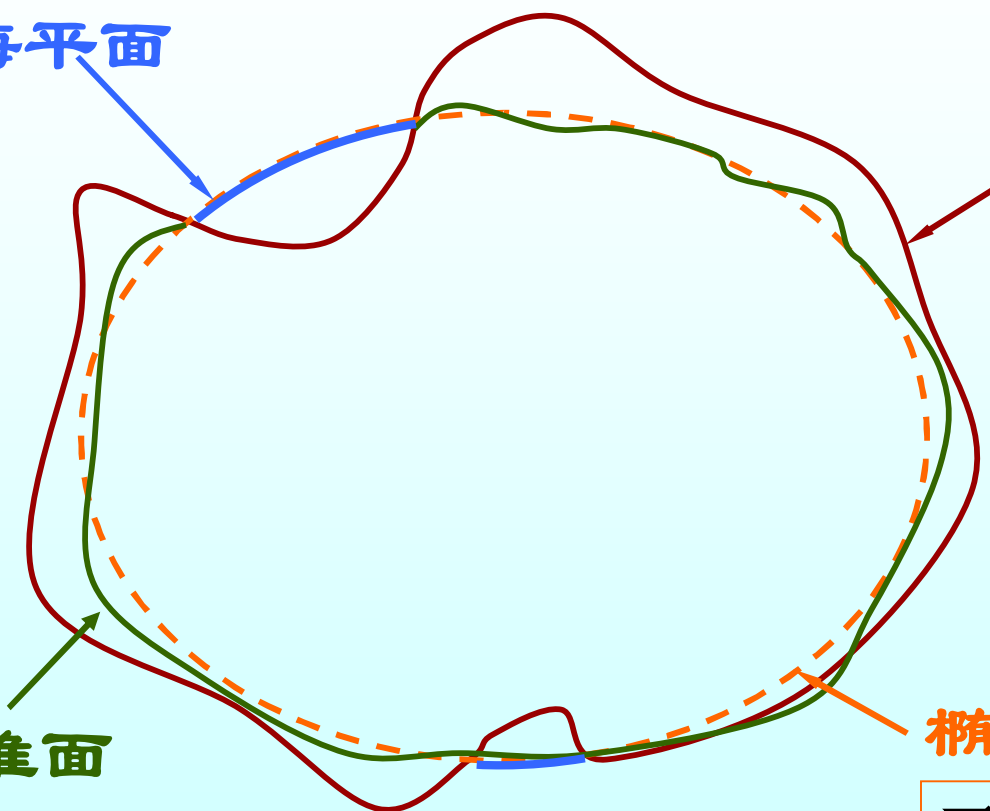
地球自然表面

大地水准面

以平均海水面为基础，受各地重力不同影响，无法用函数描述

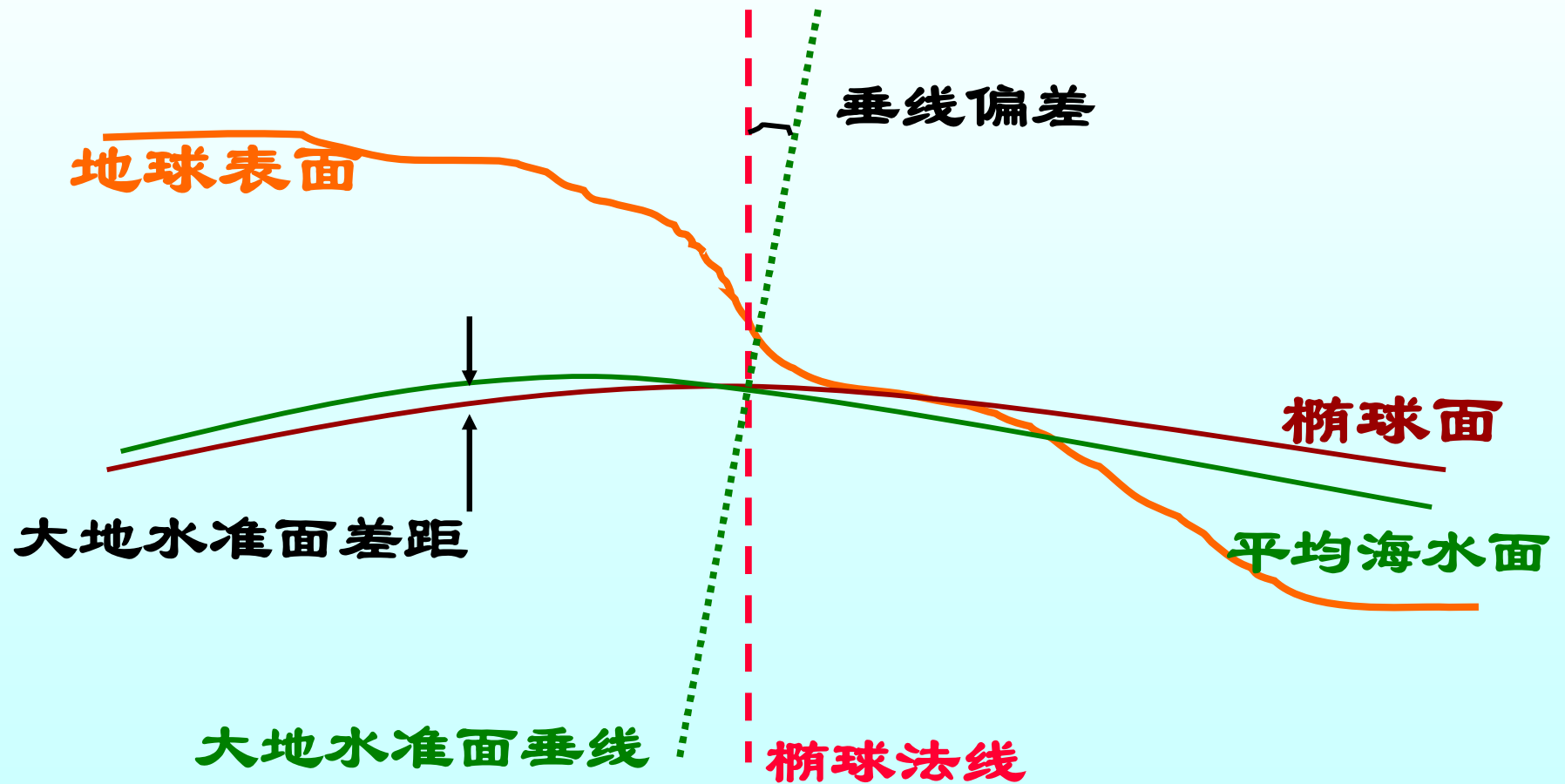
椭球面

可以用严格的几何参数描述  
( $a b e$ )



# 大地测量坐标系

## q 几个基本概念：



# 大地测量坐标系的建立

## q 我国大地测量坐标系简介

### ü 1954年北京坐标系，简称“北京54系”

坐标原点在北京，采用克拉索夫斯基椭球

椭球长半轴  $a = 6378.245 \text{ km}$

椭球扁率  $e = 1 / 298.3$

### ü 1980年国家大地坐标系，简称“国家80系”

坐标原点在陕西，采用IGA推荐椭球参数

椭球长半轴  $a = 6378.140 \text{ km}$

椭球扁率  $e = 1 / 298.257$

### ü 由“国家80系”衍生出的“北京新54系”

**魏子卿. 我国大地坐标系的换代问题.  
武大学学报信息版, 2003 (2)**

- ü 大地坐标系分为局部坐标系和地心坐标系**
- ü 我国目前采用的大地坐标系为局部坐标系，对于测图目的是可以的**
- ü 局部坐标系在使用上受限制较多，建立地心坐标系很迫切**
- ü 很多国家已开始采用地心坐标系**

# 坐标转换必要性的认识

- ü 航天摄影测量与遥感（地球曲率影响）
- ü 承接国外测图任务（不同的地图投影）
- ü 带GPS观测值的情况（参考椭球因素）
- ü 其他多传感器集成情况...



# 摄影测量坐标系与大地坐标系转换

## q 问题的提出

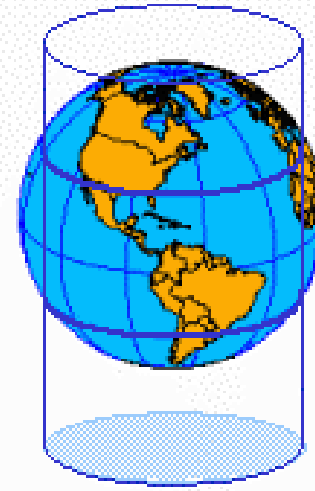
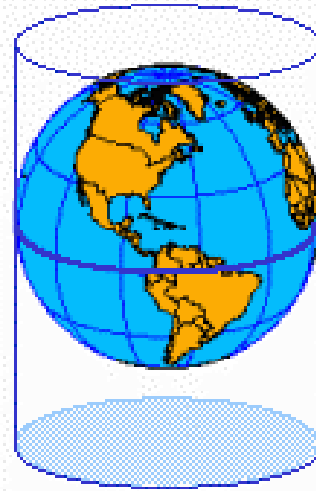
地球是一个椭球体，地球上任一点的大地坐标是用大地经、纬度  $(L, B)$  和大地高  $(H)$  表示的。而地（形）图是用平面坐标表示的。为了测图的方便，需要运用一定的数学法则将大地坐标系变换到平面直角坐标系。

怎么转换？

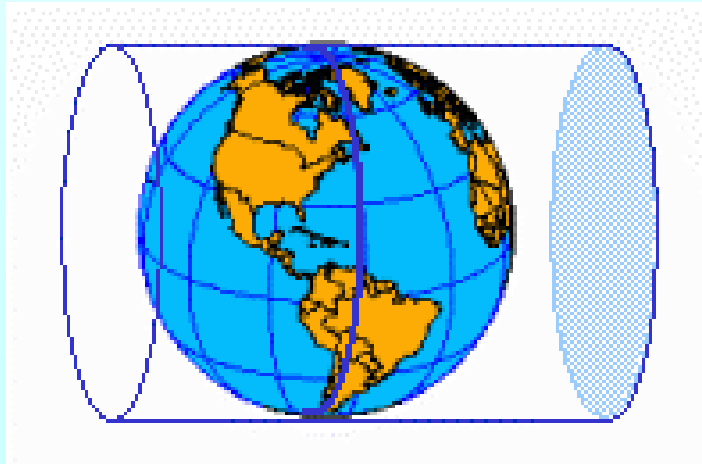
# 地图投影: Cylindrical Projections

(Mercator 墨卡托)

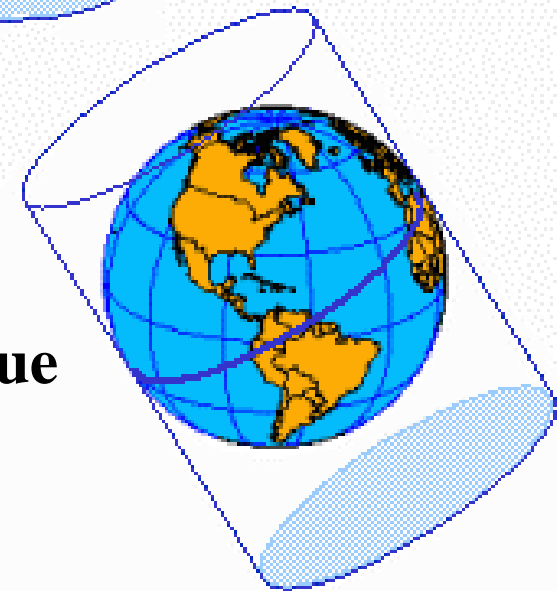
q 多种投影方式



Transverse



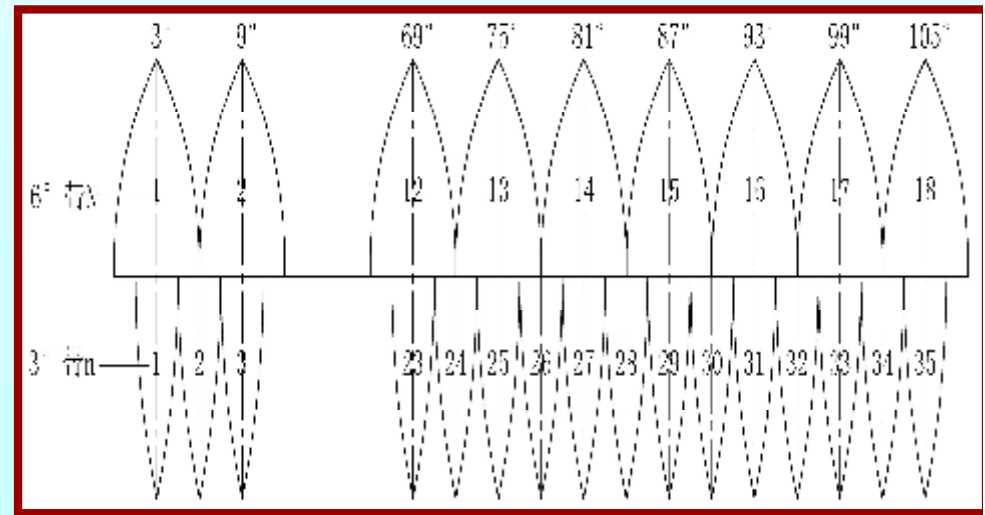
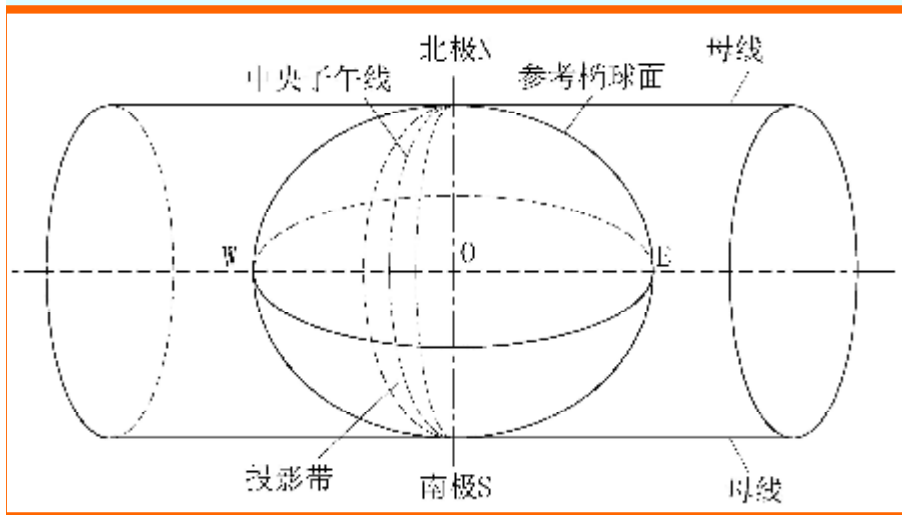
Oblique



# 我国的地图投影方式

## q 高斯-克吕格地图投影

所谓高斯-克吕格地图投影是一种等角横切圆柱投影，它保证在一定经差范围内的投影带（如 $3^\circ$ 带或 $6^\circ$ 带）中，其中心子午线投影后为直线，且长度不变。

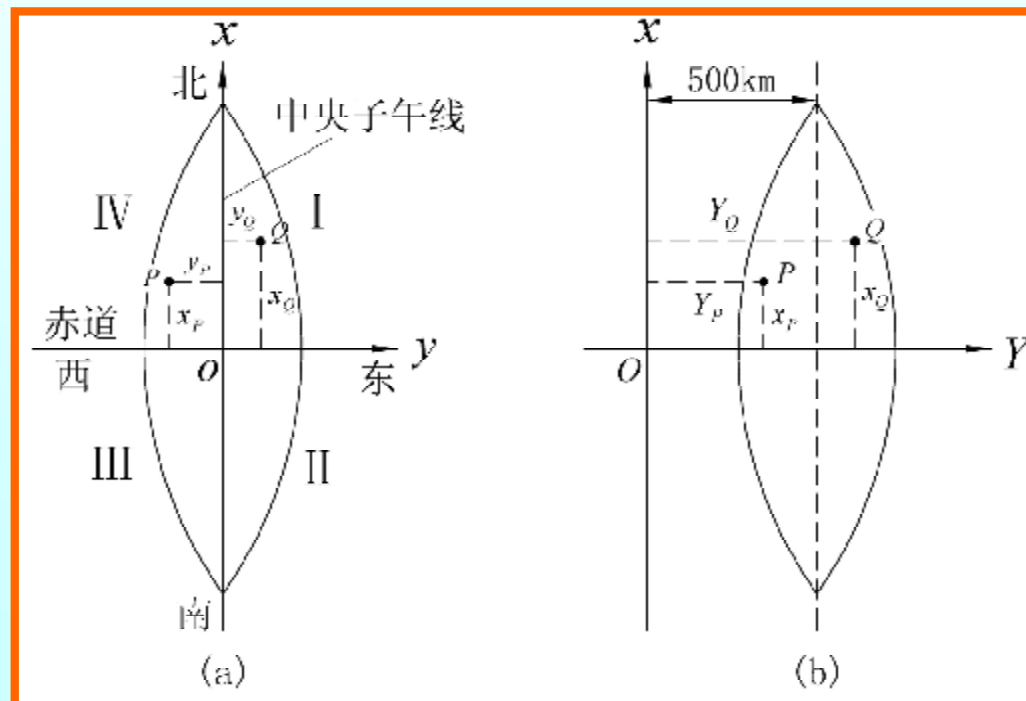


# 我国的地图投影方式

q 高斯-克吕格平面直角坐标系：

$X$ : 指向北、 $Y$ : 指向东、

高程  $h$  为正常高(垂直于大地水准面)



# 摄影测量坐标系与大地坐标系转换

## Q 分析

大地测量提供给摄影测量人员的平面控制点坐标  $(X_t, Y_t)$  是**高斯-克吕格地图投影坐标**， $h$ 或 $Z_t$ 是沿垂线到大地水准面的高度。而摄影测量的几何处理往往是在对摄影测量平差处理自身有利的**某个空间右手直角坐标系**中进行（一般 $XY$ 平面为地球表面某点的切面， $X$ 方向大致与航摄飞行方向一致， $Z$ 方向垂直于该切面）

# 摄影测量坐标系与大地坐标系转换

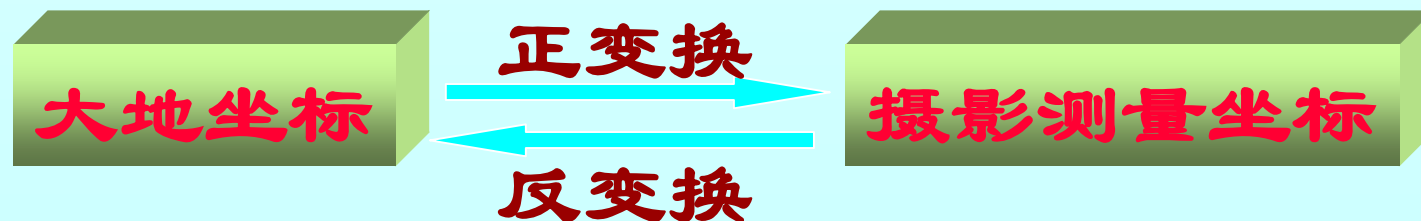
q 对于以测图为目的的摄影测量处理而言：

ü 平差计算前（正变换）

需将控制点的大地坐标  $(X_t, Y_t, h)$  转换到摄影测量坐标系  $(X_p, Y_p, Z_p)$

ü 平差计算后（反变换）

需将摄影测量坐标  $(X_p, Y_p, Z_p)$  转换到大地坐标系  $(X_t, Y_t, h)$



# 摄影测量坐标系与大地坐标系转换

Q 具体转换方法

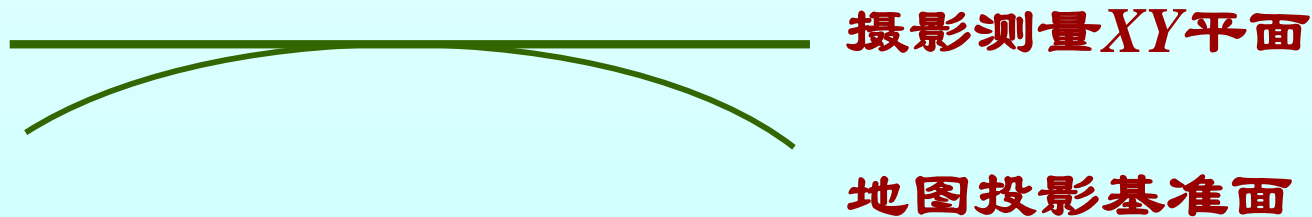
ü 近似处理方法

ü 严格处理方法

# 摄影测量坐标系与大地坐标系转换

## q 近似处理方法思路

直接在  $(X_t, Y_t, h)$  和  $(X_p, Y_p, Z_p)$  之间进行转换。前提是对于局部小范围内，把摄影测量坐标与高斯-克吕格投影坐标的基准面都当成是水平的。

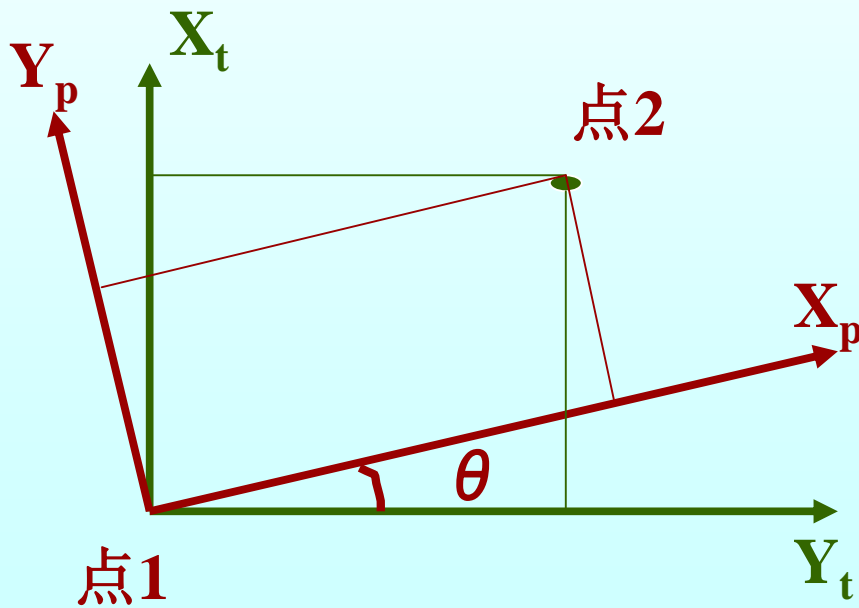


q 近似性主要表现在高斯-克吕格投影坐标不是严格的空问直角坐标



# 摄影测量坐标系与大地坐标系转换

## q 近似处理方法



采用平面相似变换：

$$\begin{bmatrix} X_p \\ Y_p \end{bmatrix} = l \begin{bmatrix} \sin q & \cos q \\ \cos q & -\sin q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_t \\ Y_t \end{bmatrix} \\ = \begin{bmatrix} b & a \\ a & -b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_t \\ Y_t \end{bmatrix}$$

$$Z_p = l Z_t$$

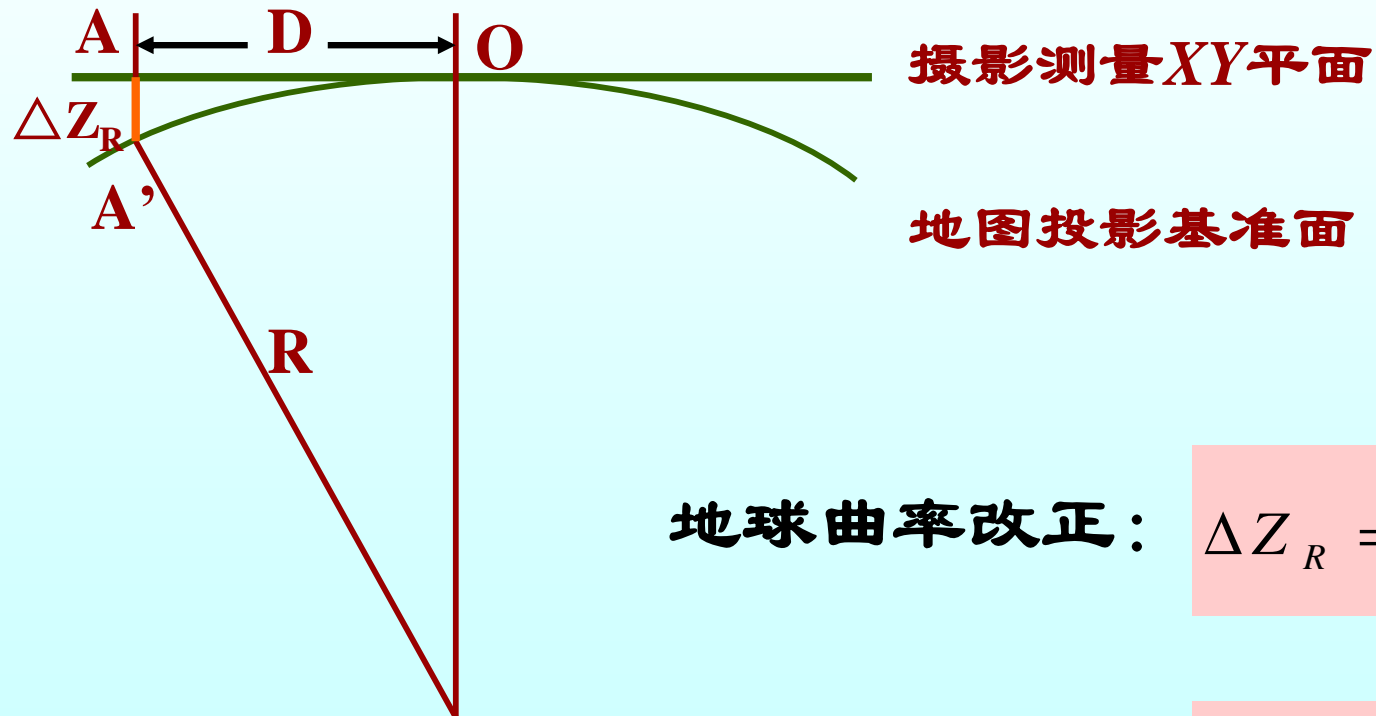
其中：

$$l = \sqrt{a^2 + b^2}$$

# 摄影测量坐标系与大地坐标系转换

## q 近似处理方法

必要时对高程引入地球曲率改正



地球曲率改正：

$$\Delta Z_R = \frac{D^2}{2R}$$

而：

$$Z_P = Z_t - \Delta Z_R$$

# 摄影测量坐标系与大地坐标系转换

## q 严格变换方法思路

严格的变换涉及下列坐标系：

ü 高斯-克吕格坐标系  $(X_t, Y_t, h)$

ü 地理（大地）坐标系  $(L, B, H)$

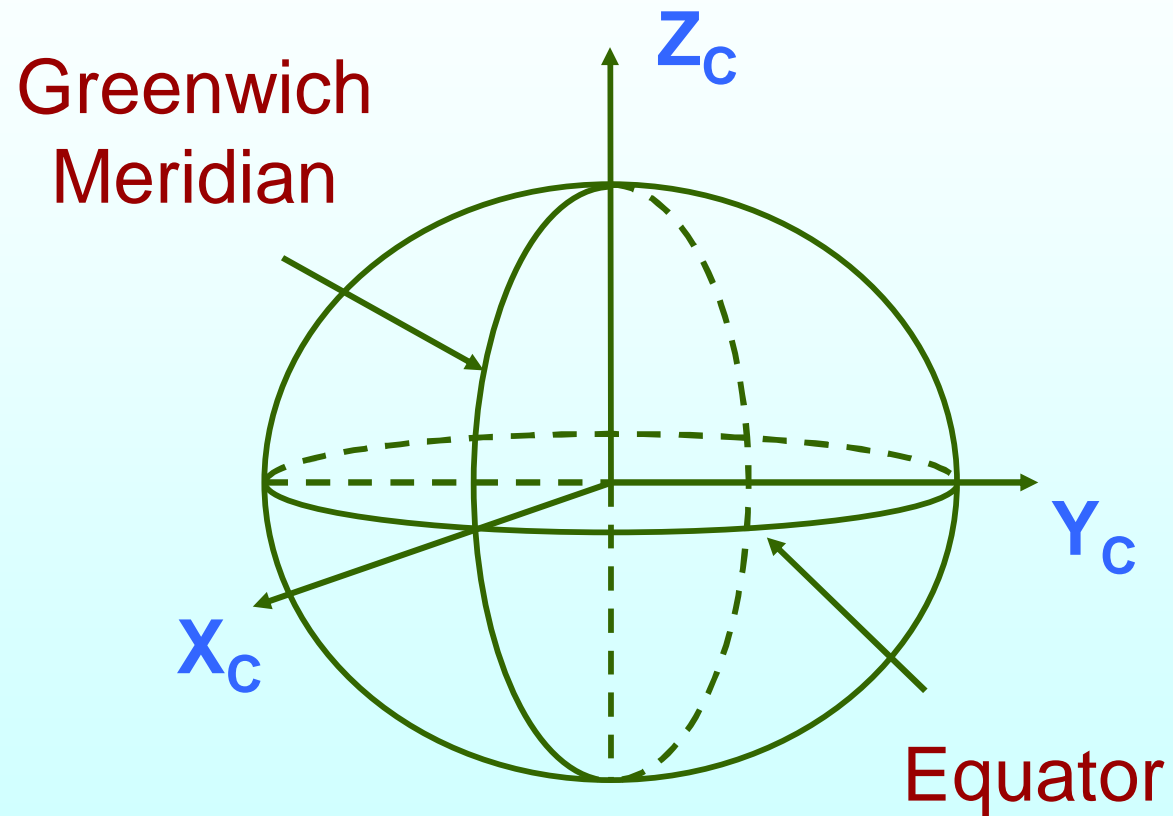
ü 地心直角坐标系  $(X_c, Y_c, Z_c)$

ü 局部切面坐标系  $(X_T, Y_T, Z_T)$

ü 摄影测量坐标系  $(X_p, Y_p, Z_p)$

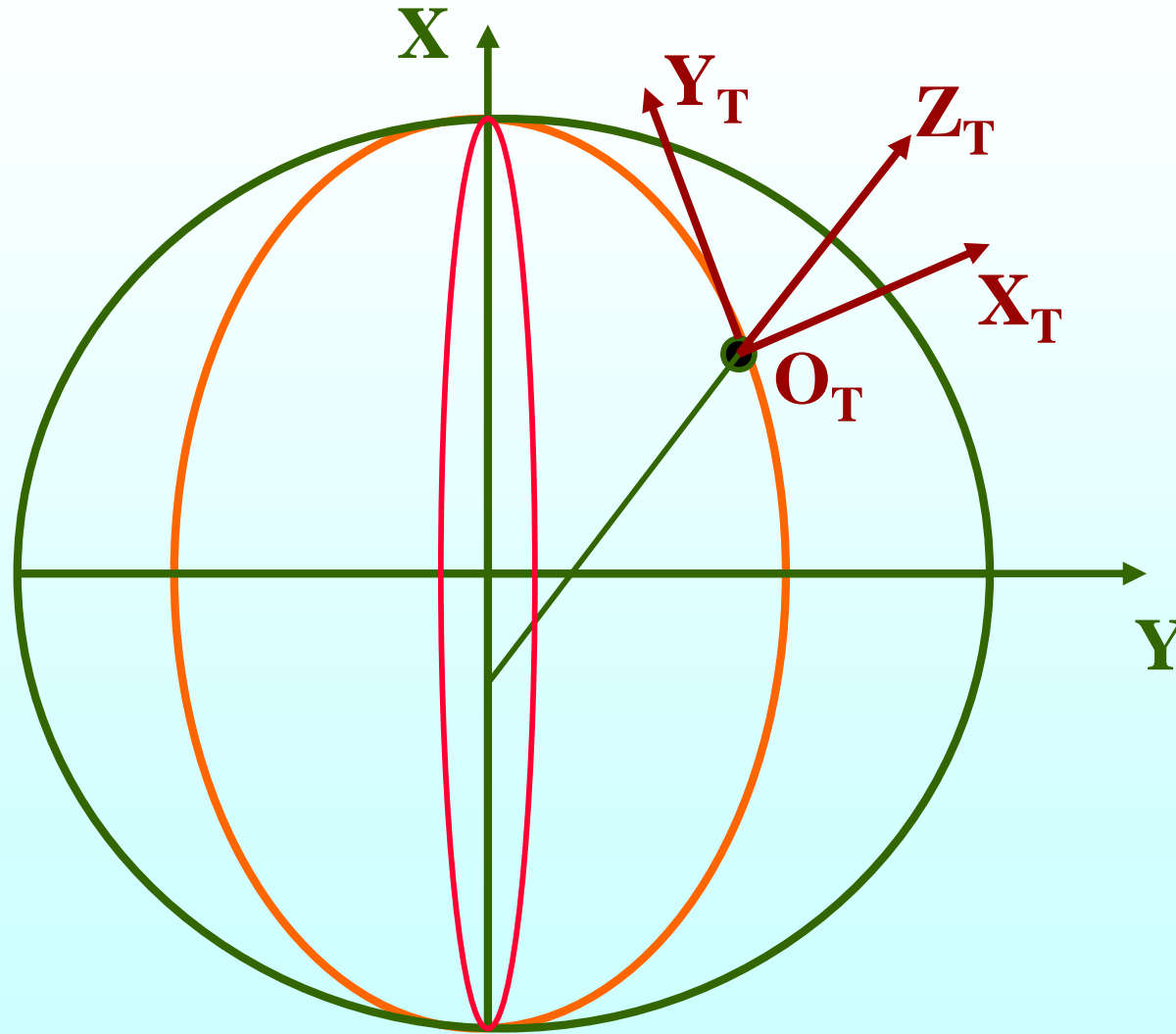
参考文献：李德仁等. 解析摄影测量学. 测绘出版社

# 摄影测量坐标系与大地坐标系转换



地心直角坐标系

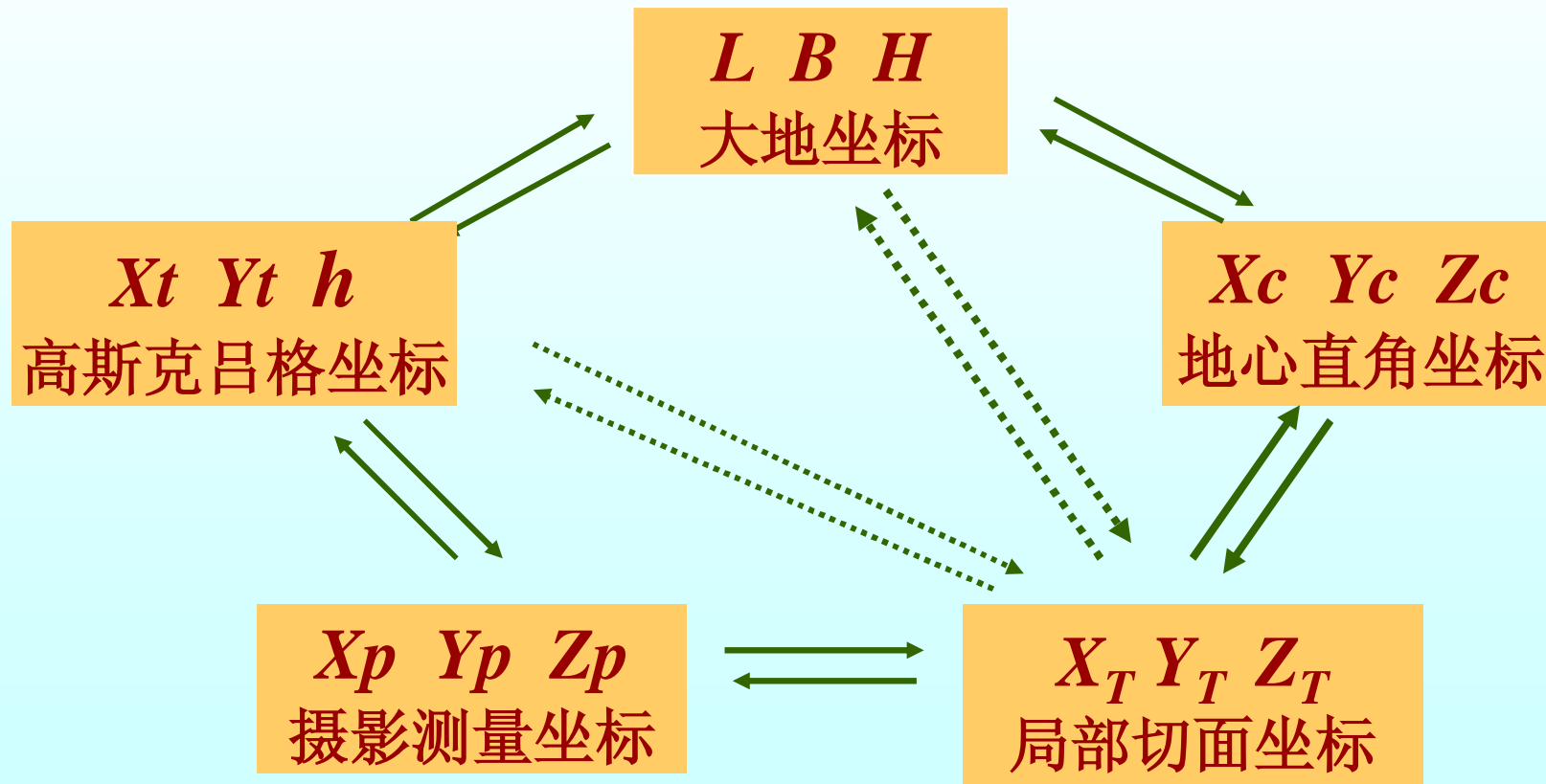
# 摄影测量坐标系与大地坐标系转换



局部切面坐标系

# 摄影测量坐标系与大地坐标系转换

## Q 各种变换方法



# 摄影测量坐标系与大地坐标系转换

## q 各种变换方法的主要应用

ü 近似变换  $(X_t, Y_t, h) \longleftrightarrow (X_p, Y_p, Z_p)$

适用于小范围测区；

ü 严格变换适用场合：卫星/遥感摄影测量，高精度点位加密及与大地测量有关的处理；

ü 有时为了克服投影或地球曲率的影响，平差处理可以直接选择在地心直角坐标系中进行。

问：如何在地心直角坐标系中表示共线方程？

# WGS84坐标系与大地坐标系转换

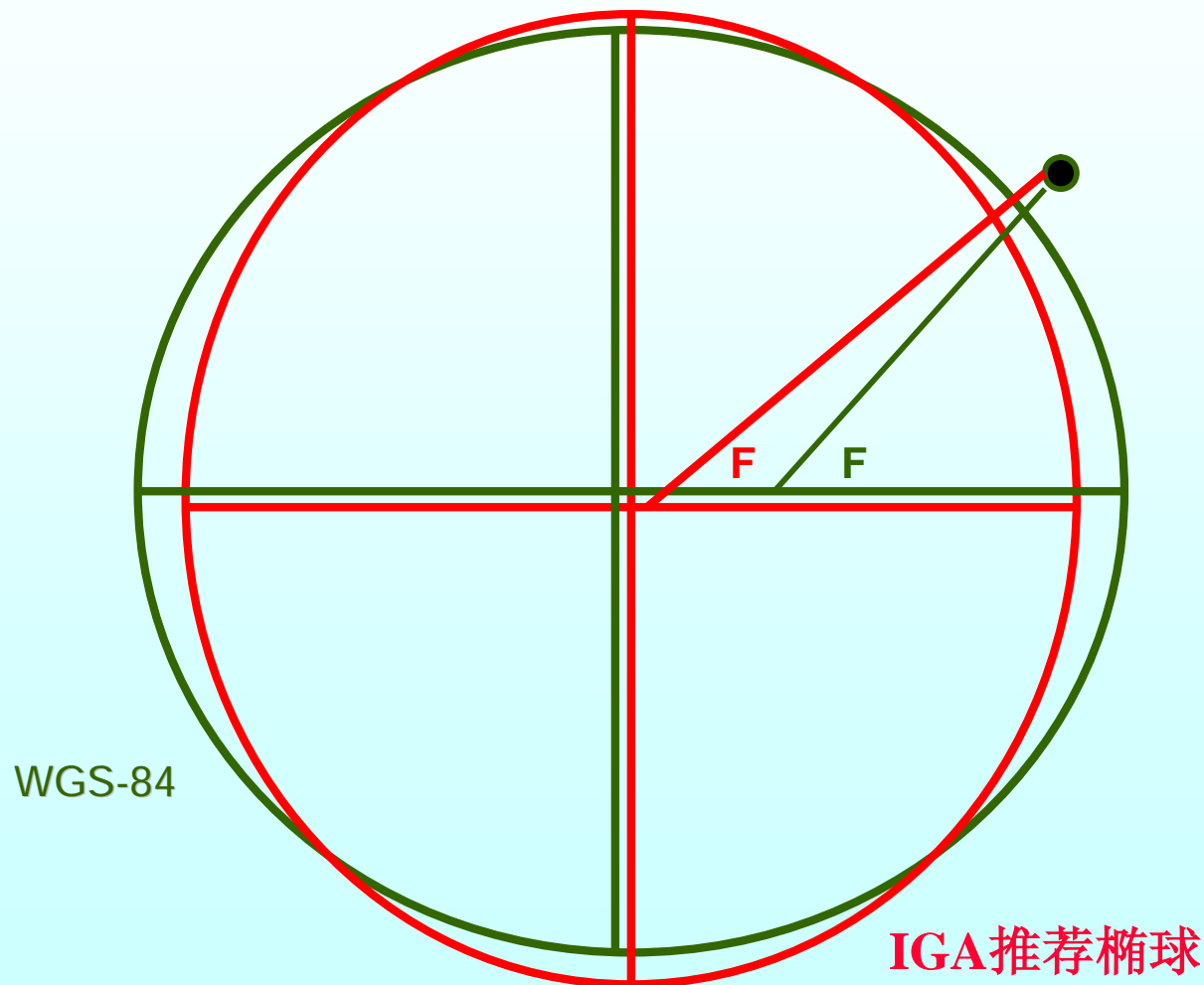
## q 问题的提出

**传统测绘地形图所依据的天文大地测量坐标系是把空间的恒星作为固定参考体，地球作为运动体；而现代GPS测量则是把地球作为固定参考体，卫星作为运动体的测量结果。**



# 基准的转换

Converting your position from one datum (WGS-84) to a local datum.



Your latitude, longitude and height above ellipsoid will depend on the datum being used.

The process of going from one datum (WGS-84) to another datum is called a “Datum Transformation”

# WGS-84坐标系与大地坐标系转换

q **WGS** (World Geodetic System — 世界大地坐标系)

GPS 信号接收机所测得的点位坐标是 WGS84 世界大地测量坐标系的地心空间直角坐标  $(X_{GPS}, Y_{GPS}, Z_{GPS})$ ，它与大地坐标系的经纬度  $(L, B)$  和大地高  $H$  的关系如下：

# WGS-84坐标系与大地坐标系转换

$$X_{GPS} = (N + H) \cos B \cos L$$

$$Y_{GPS} = (N + H) \cos B \sin L$$

$$Z_{GPS} = [N + (1 - e^2)H] \sin B$$

其中：

$N$ 为卯酉圈曲率半径：

$$N = \frac{a}{\sqrt{1 - (e \sin B)^2}}$$

$e$ 为椭球偏心率：

$$e^2 = \frac{a^2 - b^2}{a^2}$$

问：如何进行大地似大地水准面精化？

# 其它地图投影坐标系之间的转换

## q 进一步的问题

由于各个国家或地区作为大地坐标系的参考椭球面不同，因此，地球表面任一点的坐标在不同的坐标系中就有不同的坐标值，其空间信息数据不能直接交换使用，必须进行坐标转换。

问：如何进行高斯-克吕格投影和横轴墨卡托投影坐标之间的转换？

很多情况下的转换是利用地理坐标做桥梁

## **参考文献：**

- 1. 刘基余. GPS卫星导航定位原理与方法. 测绘出版社, 2003**
- 2. ....**

THE END

---

Question ?