

# 惯 性 技 术

张春华 何传五 编著

## 内 容 简 介

惯性技术是一门多学科、综合性强的尖端技术。科学技术的发展，使得惯性技术不仅用于航海、航空、航天器的控制和导航，而且日益深入到许多其他技术领域。

本书分别介绍了惯性器件的工作原理和主要技术问题；由惯性器件组成的惯性系统；框架式常规陀螺和几种最有发展前途的新型陀螺。同时，还介绍了一些典型的惯性导航系统和某些惯性器件和最新应用。

本书在写法上做到深入浅出，可供具有中等文化程度以上的学生、教师，以及从事惯性技术工作的人员和其他工程技术人员阅读、参考。

## 惯 性 技 术

张春华 何传五 编著

责任编辑 曾美玉

科学出版社出版

北京朝阳门内大街137号

北京景山学校印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

1987年7月第一版 开本：787×1092 1/32

1987年7月第一次印刷 印张：6<sup>5</sup>/<sub>8</sub>

印数：0001—2,500 字数：145,000

统一书号：15031·828

本社书号：5277·15-10

**定价：1.30元**

## 前 言

许多少年都会玩陀螺(见图0-1),都会使陀螺在光滑的地面上高速旋转,并保持直立。然而却不能在陀螺不转的情况下,使其不倒。



图 0-1 玩具陀螺

很多人都会骑自行车(见图0-2),都会在车轮高速旋转中控制车身直立前进,但很少有人会“定车”——在车轮不转的情况下保持平衡。

读者一定看过杂技演员的精彩表演:在一根长长的弹性细杆的顶端支着一个高速旋转的瓷碟,当演员作各种复杂惊险的动作时,瓷碟始终保持平稳而不掉(见图0-3)。但任何高明的杂技演员也不能在碟子不转的情况下完成上述动作。

众所周知,地球在以每昼夜一转的速度绕地轴自转,同时



图 0-2 前进中的自行车

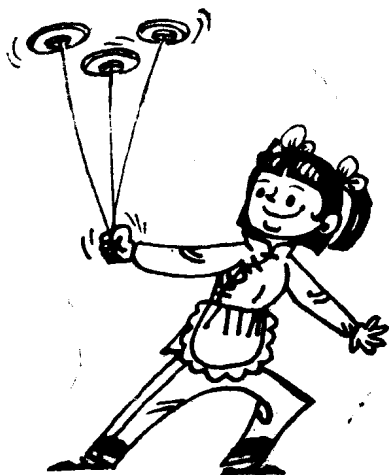


图 0 3 杂技表演

又以一年一圈的速度绕太阳公转(如图0-4所示)。地轴和公转平面在宇宙中的方向是基本不变的。正是由于地球的这种

均匀而有规律的运动，才形成了四季分明的气候。

我们还可以举出许多类似的现象，不少还与人类生活密切相关。但是你是否想过：高速旋转的玩具陀螺为什么不倒？人为什么能骑车前进？高速旋转的瓷碟为什么能待在长杆的顶端？地轴的方向为什么能保持不变？本书所

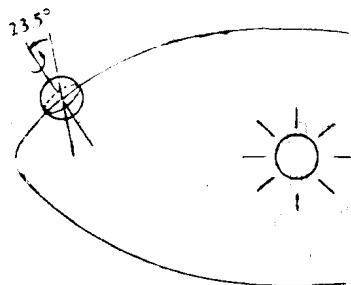


图 0-4 地球的自转和公转

介绍的基本原理将回答这些问题。

还有，你是否想过，高速喷气式飞机是怎样进行全天候飞行的？远洋舰队是怎样按预定航线航行的？潜水艇怎样在水下测定自己的方位？洲际导弹为什么能自动命中目标？人造地球卫星又是怎样准确入轨的？人为什么能成功地登上月球，又能安全地返回地面？总之，人类是怎样完成这些复杂的导航任务的呢？这就是本书所要回答的中心问题。书中将向读者介绍一种最重要的现代导航技术——惯性导航。

本书把飞机、舰艇、导弹、航天飞行器等运动物体统称为载体，其中一部分是有人驾驶的（飞机、舰艇、飞船等），另一部分是无人驾驶的（导弹、卫星等）。概括地说，导航就是要测定载体的位置、速度、转角等运动参数，并根据测量结果来操纵或控制载体的运动以达到预定的目的。

人类在进行正常的生产活动时，哪怕是最原始的狩猎和采集也必须保证不迷失方向。人有完成这一任务的器官。比如，人的平衡器官能不断觉察身体相对于重力方向的偏差，而眼睛既可以通过观察日月星辰确定方向，也可以用一些垂直物体（比如摆锤、树木、墙壁等）为基准来估计倾斜角度，

还能以一些物体为参考，测量运动物体的速度和位置。人的这种本领，可以看作是最原始最简单的定向功能。

人的导航功能是以外界参考(比如地球引力方向、星座位置等)为基准的，如果得不到可靠的参考基准就会出毛病。比如，在阴沉沉的黑夜，既看不到星辰又找不到已知方向的物体，这时就可能迷失方向。为了解决这些问题，人们发明了指南针。指南针的发明是一个巨大的进步，它是以前地球磁场为参考基准、不受人的器官直接感觉影响的磁针来测量当地磁场的方向的，它也不受气候和时间的影响。

人类的活动范围不断扩大——从陆地到海洋，从地面到天空，从地球附近直到外层空间。运动的速度在不断增加——由每小时几公里的步行，直到每秒几公里至十几公里的宇宙飞行。所有这一切都使得导航技术日趋复杂。在飞机、舰艇等运动物体上，不但人的感觉器官无能为力，就是一些简单仪表也不能胜此重任。

为了保证飞机正常飞行，必须使其保持给定的航向和姿态。如果飞行员能很好地看到地面目标，那么即使没有专门仪表也能相当准确地飞行。但实际上飞机常常要在看不见任何地面目标的情况下飞行。在这种条件下，必须有专门仪表以保证飞行员在任何时刻均能确定水平面(或垂线方向)及子午面(南北方向)的位置。因此，飞机上应装有指示当地垂线和真北方向的仪表。看起来这个问题似乎很好解决，只要在飞机上装上摆和磁针就够了。因为在重力作用下摆会自动与当地垂线重合，因而可以作为简单的垂线指示器。我们用摆就可以确定飞机的倾斜角，如图0-5所示。在地球磁场的作用下，磁针会自动停在磁子午面内，由于磁子午面与地理子午面大致重合，因此磁针可以作为南北方向的指示器。我们用磁针就可以确定飞机的航向角，如图0-6所示。但实际上，飞

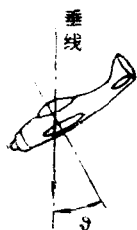


图 0-5 用摆测飞机的倾斜角

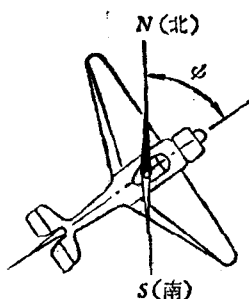
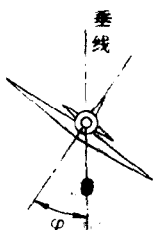


图 0-6 用磁针测飞机的航向角

机在飞行中,由于加速度的干扰,摆不能指示垂线。由于飞机的倾斜、转弯以及飞机上磁性物体的影响,磁针也不能指示北方。此外,磁针指示的是磁北方而不是地理北方,两者之差(称为磁偏角)随飞机位置不同而不同,要准确修正这一误差是很困难的。对于舰艇、导弹等运动物体,摆和磁针也不能正确指示垂线和北方。至于宇宙飞行器,由于它们长期远离地球并处于失重状态,上述简单仪表就更不能工作了。陀螺的出现才使上述问题得到解决。它不仅可以用来指示垂线,也可以用来指示航向。由陀螺及加速度表的有机结合而形成的惯性导航系统,则不但能确定运动物体的姿态,还能确定速度和位置。

有不少以外界参考物体为基准的导航方法,比如无线电导航、天文导航等等。有的也达到了相当高的精度,而且至今仍在应用。但是,它们有一个共同弱点,就是容易受外界环境的影响。比如,无线电导航在辐射和接收电磁波时是暴露性的,因而易受干扰。天文导航虽然精度很高,但由于要用光学仪器观测天体,因而容易受到气候的影响。如果我们不以外界参考为基准,而在运动物体内部建立起导航基准,那将是非

常理想的。这就是所谓自主式导航。

惯性导航就是一种自主式导航。它的基础是陀螺、加速度计等惯性器件：用陀螺测量载体的转动，用加速度计测量载体的移动。

惯性导航的理论基础是牛顿在三百年前提出的力学基本定律。而最重要的惯性元件——陀螺，则是在本世纪初随着电机和滚珠轴承的出现发展起来的。1910年制成了第一个适用于航海的陀螺罗盘，接着陀螺被广泛用于航海和航空作为指示仪表。通常把这种只能指示载体转角而不能测定载体位置的系统，称为第一代惯导系统。1930年德国首先将加速度计与陀螺联系在一起，用两个二自由度陀螺作为惯性基准，研制成功了V-2火箭的制导系统。在第二次世界大战末期发射成功。三十多年来，惯性器件和惯性导航获得了飞速发展。通常将分辨力约为0.152公里，漂移率约为每小时零点几公里的惯导系统称为第二代惯导系统。第三代惯导系统正在试验和使用中，它的精度比第二代提高两到三个数量级。而希望第四代惯导系统的精度能达到大约0.304米的分辨力。

惯性导航在现代尖端技术中占有非常重要的地位。对当代三大战略武器——洲际导弹、远程轰炸机和核潜艇来说，虽然原子弹、氢弹、中子弹的杀伤威力是很重要的，但是如果没有准确可靠的惯导系统，不能准确地命中目标，那也就失去了它的战略价值。

陀螺不但可以作为测量元件组成惯性导航系统，而且可以作为执行元件产生控制力矩，这就是所谓控制力矩陀螺。当陀螺刚问世的时候，首先就被用来产生控制力矩，直接稳定船舶的摇摆。当时称这种陀螺为动力陀螺。但是，由于海浪施加在船舶上的力矩是如此之大，以致于要取得满意的效果所需要的陀螺大得惊人，于是陀螺的这种应用就越来越



少。到了六十年代,随着航天事业的发展,控制力矩陀螺才又在卫星和飞船的控制系统中找到了新的用武之地。

近年来,出版了一些介绍惯性技术(惯性器件和惯性导航)的著作,但大都涉及相当复杂的数学、力学分析。不但一些未受过高等教育的工人、战士、管理人员读起来颇感吃力,就是一些受过良好教育的工程技术人员,要想通过这些著作在较短时间内了解惯性技术的原理和概貌也决非易事。本书的主要写作目的,就是想进一步普及惯性器件与惯性导航的知识。本书不用复杂的数学、力学分析,只以物理、数学的基本知识为基础、从基本物理概念出发,深入浅出地介绍了惯性技术的基本原理和主要技术成就。读者只要具有高中文化水平,再仔细阅读本书第一章的预备知识,即可看懂本书的其它内容。

本书用较短的篇幅,概括地介绍了惯性技术的各个领域和最新技术成就。主要有惯性器件的工作原理和主要技术问题;由惯性器件组成的惯性系统;框架式常规陀螺及若干种最有发展前途的新型陀螺;一些典型的惯性导航系统和惯性器件的某些最新应用(如控制力矩陀螺、捷联式系统等)。因此本书可以在惯性技术各领域的工程技术人员之间起到沟通作用。对从事运动物体控制系统总体工作的同志也有参考价值。

科学技术的发展使得惯性技术不仅用于航海、航空、航天器的控制和导航,而且日益深入到许多其它技术领域,比如雷达天线的稳定、遥感技术、铁路的测量、大地测绘、地质勘探、石油钻井、深井测斜、陀螺秤等等。这就使得这些专业的技术人员必须了解一点惯性器件及惯性系统的基本知识。本书将为这些读者提供一条捷径,使他们能在最短的时间内了解惯性技术的基本原理和主要技术问题。

本书在写作过程中，北京控制工程研究所段振宇同志做了大量工作；北京航空学院范跃祖副教授审阅了初稿并提出了许多宝贵意见；李书华同志也提出了许多有益的建议，在此表示衷心感谢。

由于我们的水平有限，书中难免有疏漏和不妥之处，热忱地欢迎广大读者批评指正。

张春华 何传五

# 目 录

前 言 .....	iii
第一章 预备知识 .....	1
1.1 参考坐标系 .....	1
1.2 力学基本定律 .....	8
1.3 反馈控制原理 .....	13
1.4 力矩平衡系统与力平衡系统 .....	22
第二章 陀螺 .....	31
2.1 陀螺效应与陀螺仪 .....	31
2.2 垂直陀螺 .....	38
2.3 航向陀螺 .....	41
第三章 单自由度陀螺 .....	46
3.1 单自由度陀螺的工作原理 .....	46
3.2 液浮陀螺 .....	49
3.3 液浮陀螺的主要元件 .....	54
3.4 液浮陀螺的设计 .....	63
3.5 力矩平衡系统 .....	70
3.6 单轴平台系统 .....	74
3.7 干扰力矩与陀螺漂移 .....	78
3.8 陀螺试验 .....	84
第四章 新型陀螺 .....	94
4.1 动力调谐陀螺 .....	95
4.2 激光陀螺 .....	108
4.3 静电陀螺 .....	113
4.4 动压陀螺 .....	118
4.5 核子陀螺 .....	121

<b>第五章</b>	<b>加速度计</b> .....	123
5.1	加速度计的基本原理 .....	123
5.2	液浮摆式加速度计 .....	126
5.3	陀螺摆式加速度计 .....	129
<b>第六章</b>	<b>稳定平台</b> .....	138
6.1	平台原理 .....	138
6.2	平台元件 .....	144
6.3	平台的对准 .....	148
6.4	平台的体拉调谐 .....	152
6.5	陀螺稳定系统 .....	157
<b>第七章</b>	<b>惯性导航系统</b> .....	161
7.1	惯性导航的基本原理 .....	162
7.2	解析式惯导系统 .....	164
7.3	半解析式惯导系统 .....	167
7.4	捷联式惯导系统 .....	170
7.5	空间惯性系统 .....	175
<b>第八章</b>	<b>控制力矩陀螺</b> .....	181
8.1	工作原理 .....	181
8.2	支承系统 .....	186
8.3	控制系统 .....	192
8.4	控制力矩陀螺的应用 .....	196

# 第一章 预备知识

## 1.1 参考坐标系

一只昆虫在房中飞舞，我们怎样表示它相对于房间的位置呢？我们可以过墙脚的 $O$ 点作三条直线 $ox$ 、 $oy$ 、 $oz$ ，使其分别与相邻两面墙与地板的交线及这两面墙相互之间的交线重合(图1-1)。过昆虫身上的一点 $A$ 作直线 $AB$ 垂直于平面 $xoy$ ，垂足为 $B$ 。作 $Az_1$ 垂直于 $oz$ ，垂足为 $z_1$ 。显然 $\overline{oz_1} = \overline{AB}$ 。过 $B$ 作直线 $Bx_1$ 垂直于 $ox$ ，垂足是 $x_1$ 。作 $By_1$ 垂直于 $oy$ ，垂足是 $y_1$ 。如果测定了 $x_1 = \overline{ox_1}$ 、 $y_1 = \overline{oy_1}$ 和 $z_1 = \overline{oz_1}$ 的长度，那么我们就完全确定了点 $A$ 在房间中的位置。当昆虫飞舞时，一般地说这些参数(或其中的几个)要随时间改变。这三个参数缺一不可。若只有一个参数(比如 $x_1$ )，显然不能唯一地确定 $A$ 点的位置。因为过 $x_1$ 而垂直 $ox$ 的平面( $ADx_1B$ )中的任何一点都有相同的 $x_1$ 值。

严格地说，这三个参数还不能完全确定昆虫的运动，因为它还可能绕 $A$ 点转动，它的身体各部分

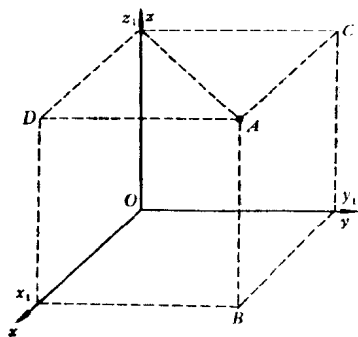


图 1-1 参考坐标系

之间还可能有相对运动(比如飞行时翅膀的扇动等)。只是把昆虫简化为一点的情况下我们才可以说参数 $x_1, y_1, z_1$ 决定

了昆虫相对于房间的位置。如果这三个参数不变,我们就认为昆虫相对于房间是静止的。这里必须强调“相对于房间”这几个字。因为房子在地球上,地球相对于太阳在运动。虽然昆虫相对于房间是静止的,但相对于太阳却不是静止的,而是随地球一起以很高的速度在运动着。

综上所述,为了决定一点相对于房间的位置,我们过一点 $o$ 作了三条互相垂直的直线 $ox$ 、 $oy$ 、 $oz$ 与该房间相固连,通常就说我们建立了一个参考坐标系。这种由三根互相垂直的直线组成的坐标系称为直角坐标系。直线 $ox$ 、 $oy$ 、 $oz$ 称为坐标轴,参数 $x_1, y_1, z_1$ 则称为点 $A$ 的坐标。坐标轴的方向可用右手螺旋法则决定,即当用右手四指伸直指向 $ox$ 方向再折回到 $oy$ 方向时,大拇指应指向 $oz$ 方向,如图1-2所示。遵从右手螺旋法则的直角坐标系称为右手直角坐标系。

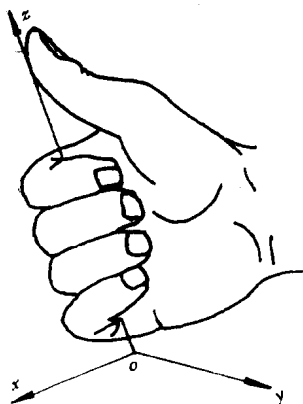


图 1-2 右手螺旋法则

在一般情况下,我们可以这样概括:一个物体在空间的位置只能相对于另一个参考物体来确定。为了精确地表示一个物体相对于参考物体的位置,通常把一个参考坐标系固定在参考物体上,该物体相对于参考物体的位置就可用几个参数来表示,这些参数称为该物体的坐标。如果一个物体的坐标有了变化,就表示该物体相对于参考坐标系的位置发生

了变化,我们就说该物体相对于参考物体或参考坐标系在运动。运动是相对的,都是指一个物体相对于另一物体而言的。当我们要分析一个物体的运动时,必须正确选择参考物

体或参考坐标系，否则就要犯错误。在生活中常遇到这种情况：我们乘坐的列车甲停在车站上，如果有另一列车乙停在附近，它挡住了我们的视线，使我们看不到车站上的景物。在这种情况下，列车乙的开动会使我们误认为列车甲向相反方向运动。只有当列车乙开过去，我们又看到车站上的固定景物（房屋、树木、电杆等）时，这一错觉才会消除。之所以会产生这一错觉，其根源就在于选错了参考物体。我们要判断列车甲相对于地球是否运动，我们就应当以地球（或固连在地球上的物体）为参考，而不应当以相对于地球有运动的列车乙为参考。

在力学上，称绝对不变形的物体为刚体。真正的刚体是不存在的，但是只要一个物体变形很小就可以作为刚体处理。任何刚体都可以用与其固连的直角坐标系表示。两个刚体的相对运动可以抽象为这两个坐标系的相对运动。比如，为了研究物体 $B$ 相对于参考坐标系 $OXYZ$ 的运动，可以取与 $B$ 固连的动坐标系 $o'xyz$ （见图1-3）。原点 $o'$ 在 $OXYZ$ 中的坐标 $x_0$ 、 $y_0$ 、 $z_0$ 和 $o'xyz$ 相对于 $OXYZ$ 的三个转角 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 就是表示该刚体运动的六个参数，它们完全决定了刚体 $B$ 相对于参考坐标系的运动状态。图1-3也表示出了转角 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 的定义。为了进一步说明它们的物理意义，让我们分析一下图1-4所示的框架系统。框架①通过轴承被支承在基座④上，它可以相对于基座绕转轴 $a-a$ 转动；框架②通过轴承被支承在框架①上，它相对于框架①可以绕转轴 $b-b$ 转动；框架③通过轴承被支承在框架②上，它可以相对于框架②绕转轴 $c-c$ 转动。绕转轴 $a-a$ 、 $b-b$ 、 $c-c$ 的三个转角就分别是上述的 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 。当这三个转角均为零时，三个转轴互相垂直。图1-4所示的框架系统有一个很重要的性质，这就是它可以使框架③相对于基座在一定范围内绕任何一个轴转动，所以通常把这种框架系统称为万向框架。

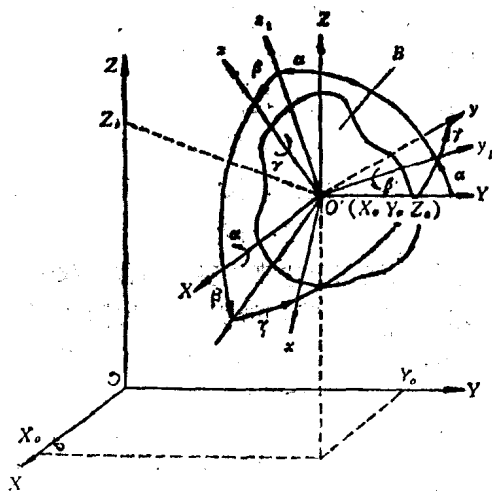


图 1-3 动坐标系

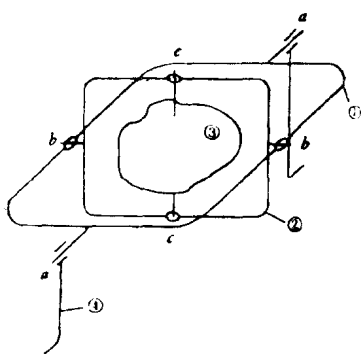


图 1-4 万向框架

它在惯性元件和惯性系统中获得了广泛应用。

要决定一个刚体在空间的运动状态，必需并且只需六个参数（三个移动参数  $X_0, Y_0, Z_0$ ，三个转动参数  $\alpha, \beta, \gamma$ ）。这就是平常所说的一个刚体具有六个自由度。如果刚体作平面运动，比如在图1-3中

令

$$Z_0 = \text{常数}, \quad \alpha = \beta = 0$$

那么刚体的运动只要三个参数 ( $X_0, Y_0, \gamma$ ) 即可完全决定。所以说，一个作平面运动的刚体有三个自由度。

在直角坐标系中，一个向量  $\mathbf{Q}$  可用其在三个坐标轴 ( $OX,$



$OY$ 、 $OZ$ )上的投影( $Q_x, Q_y, Q_z$ )表示

$$\mathbf{Q} = Q_x \mathbf{i} + Q_y \mathbf{j} + Q_z \mathbf{k} \quad (1-1)$$

其中 $\mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k}$ 分别沿 $OX, OY, OZ$ 方向,其长度等于1,称为单位向量。而 $Q_x, Q_y, Q_z$ 称为向量 $\mathbf{Q}$ 沿 $OX, OY, OZ$ 轴的分量。已知一个向量在一个坐标系的分量而求在另一个坐标系中的分量称为坐标变换。比如,已知 $\mathbf{Q}$ 在平面坐标系 $OX_1Y_1$ 中的分量为 $Q_{x1}, Q_{y1}$ 。坐标系 $OX_2Y_2$ 相对于 $OX_1Y_1$ 的位置可用转角 $\alpha$ 表示(见图1-5)。那么不难求出 $\mathbf{Q}$ 在 $OX_2Y_2$ 中的分量 $Q_{x2}, Q_{y2}$ 、与 $Q_{x1}, Q_{y1}$ 有如下关系

$$\left. \begin{aligned} Q_{x2} &= Q_{x1} \cos \alpha + Q_{y1} \sin \alpha \\ Q_{y2} &= -Q_{x1} \sin \alpha + Q_{y1} \cos \alpha \end{aligned} \right\} \quad (1-2)$$

惯性坐标系是经常会用到的坐标系。如果某一坐标系在空间是固定不动的,则称该坐标系为惯性坐标系。相对于惯性坐标系作等速直线平移运动的坐标系(既无线加速度也无角速度)仍是惯性坐标系。有时也把惯性坐标系称为惯性空间。

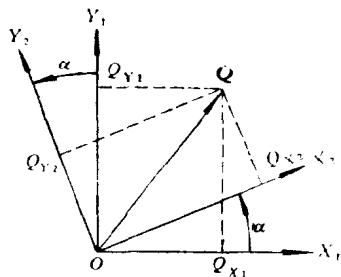


图 1-5 坐标变换

在分析惯导系统时,常用的坐标系有下列几种:

①地心惯性坐标系( $EX_1Y_1Z_1$ ): 在本书中将把地球看作是以恒定角速度 $\Omega$ 自转的球体,球心称为地心,转轴称为地轴。实际上地球不是理想的球体,而是旋转椭球体,两极距离要比赤道上相对两点距离短约42公里。在实际惯导系统中必须仔细考虑地球的精确形状。

地心惯性坐标系以地心 $E$ 为原点(见图1-6),以地轴方向为 $Z_1$ 轴(指北为正), $X_1, Y_1$ 轴在赤道平面中指向相对于惯性