

# 欧美坐标系和苏联坐标系对比分析

李继广<sup>1,2</sup>, 董彦非<sup>1</sup>, 屈高敏<sup>1</sup>

(1. 西安航空学院 飞行器学院, 陕西 西安 710077;

2. 南京航空航天大学 自动化学院, 江苏 南京 210016)

**摘要:**介绍了飞行器设计相关学科中欧美坐标系和苏联坐标系之间的异同, 分析了两种坐标系体系建立的依据、牛顿力学体系下的一致性以及对飞行器运动参数、稳定性判断的影响, 给出了两种坐标体系之间的变换公式。最后, 对教学和科研中采用何种坐标系提出了建议, 以此帮助广大科研人员了解两种坐标系的来源, 熟练掌握科研工作中各坐标间的关系和变换方式。

**关键词:**欧美坐标系; 苏联坐标系; 统一性; 稳定性

中图分类号: V212.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-0853(2018)06-0001-06

DOI: 10.13645/j.cnki.f.d.20180912.014

## Comparative analysis of European-American coordinate system and Soviet Union coordinate system

LI Ji-guang<sup>1,2</sup>, DONG Yan-fei<sup>1</sup>, QU Gao-min<sup>1</sup>

(1. School of Aircraft, Xi'an Aeronautical University, Xi'an 710077, China;

2. School of Automation, NUA, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** This paper introduces the similarities and differences between the European-American coordinate system and the Soviet Union coordinate system in the aircraft design, analyze the basis of the establishment of the two coordinate systems, the consistency of the Newton mechanics system and the influence on the aerodynamic parameters and stability judgment of the aircraft, and the transformation formula between two coordinate systems is given. Finally, some suggestions are given for studying the coordinate system and scientific research. This paper could help the majority of researchers understand the source of the two coordinate systems, understand the relationship and transformation mode between the coordinates in scientific research.

**Key words:** European-American coordinate system; Soviet Union coordinate system; consistency; stability

## 0 引言

在飞行器设计相关学科领域, 有着两套被广泛应用的坐标系定义方式: 前苏联及其引进苏联航空技术建立航空工业体系的相关国家所广泛采用的坐标系定义方式(简称苏联坐标系或者苏联系)<sup>[1-4]</sup>和美国、欧洲广泛采用的坐标系定义方式(简称欧美坐标系或者欧美系)<sup>[5-8]</sup>。这两套被广泛使用但定义方式不同的坐标系体系为教学和科研工作带来了一系列的麻烦。为了方便广大科研人员深入理解这两种坐标系建立的依据、统一性以及实际应用中的

差异性, 本文将深入分析这两种坐标系之间的异同。

## 1 坐标系及舵面定义

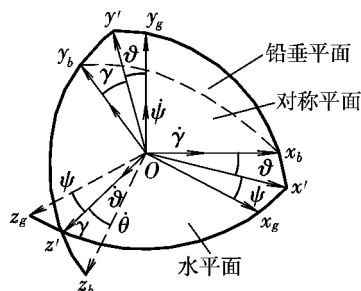
### 1.1 坐标系定义

苏联坐标系中地面坐标系定义方式为: 原点  $O$  固定于地面上某点,  $Oy_g$  轴铅垂向上,  $Ox_g$  和  $Oz_g$  轴在水平面内和  $Oy_g$  轴构成右手直角坐标系。机体坐标系、速度坐标系、航迹坐标系的定义方式与地面坐标系相似, 但是以飞行器质心为原点。它们和地轴系之间的关系如图1所示。

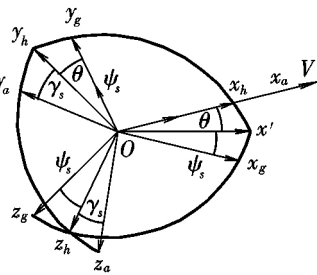
收稿日期: 2018-04-15; 修订日期: 2018-07-25; 网络出版时间: 2018-09-18 10:08

基金项目: 航空科学基金资助(20160152001); 通用航空技术中心基金资助(XHY-2016084); 陕西省自然科学基金资助(2016JM1014)

作者简介: 李继广(1987-) 男, 河南开封人, 讲师, 博士, 研究方向为无人机气动优化、控制系统设计。



(a) 地轴系与体轴系



(b) 地轴系、速度坐标系与航迹坐标系

图 1 各坐标系之间的关系

Fig.1 Relationship between the coordinate systems

欧美坐标系定义方式和苏联坐标系最大的不同是  $Oy_g$  轴的方向。在欧美坐标系下,  $Oy_g$  轴铅垂向下为正。由于  $Oy_g$  轴正方向定义不同, 则带来了一系列飞行参数和姿态参数正方向定义不同。为了明确飞行器各参数在不同坐标系下定义的异同, 各参数在两种坐标系下的对比如表 1 所示。

表 1 各参数在两种坐标系下的对比

Table 1 Comparison of the parameters in two coordinate systems

参数	苏联系	欧美系
俯仰角	抬头为正	抬头为正
偏航角	机头左偏航为正	机头右偏航为正
滚转角	向右倾斜为正	向右倾斜为正
航迹俯仰角	向上飞行时为正	向上飞行时为正
航迹方位角	速度在地面的投影在 $Ox$ 轴左侧为正	速度在地面的投影在 $Ox$ 轴右侧为正
航迹滚转角	右倾斜为正	右倾斜为正
迎角	速度的投影在 $Ox$ 轴之上为正 ( $Oy$ 轴定义指向地心为负)	速度的投影在 $Ox$ 轴之下为正 ( $Oy$ 轴定义指向地心为正)
侧滑角	速度矢量处于对称面的右方为正	速度矢量处于对称面的右方为正

## 1.2 舵面极性定义

为了对飞行器的稳定性加以分析, 还需要明确飞行器气动控制舵面极性的定义。飞行器飞行操纵最基本的气动舵面是升降舵、副翼和方向舵。近年来, 可动鸭翼、可动边条翼、阻力式方向舵等多翼面布局飞行器不断出现, 飞行器的控制舵面种类不断

增多。为了工程应用方便, 在飞控系统设计中, 一种常见的处理方式是把其他种类的气动舵面向这 3 种基本舵面进行等效转化。

例如, 飞翼无人机阻力式方向舵和翼尖方向舵一般等效为方向舵; 增升襟翼一般等效为升降舵; 联动鸭翼等效为升降舵; 联动-差动鸭翼等效为升降副翼; 机翼后缘具有多片气动舵面, 且既可以联动又可以差动时, 一般根据控制需求分别定义为一级升降副翼、二级升降副翼等多级舵面。通过以上等效转化, 不同气动布局的飞行器可以按照统一的气动构型进行控制系统设计、半物理仿真等设计和验证工作, 降低了设计时建模的工作量。

根据工程经验, 一般需要明确定义升降舵、副翼和方向舵这 3 种气动舵面及其极性。气动舵面的定义主要依据物理意义。一种常见的定义方式如下:

升降舵——定义升降舵后缘下偏为正。对于静稳定性飞机而言, 正的升降舵产生低头力矩。

副翼——定义右副翼后缘下偏 (左副翼后缘上偏) 为正。正副翼使得飞行器左偏航和左滚转。

方向舵——定义方向舵后缘左偏为正。正方向舵产生左偏航力矩, 消除右侧滑。

## 2 坐标系的统一性和建立依据

### 2.1 欧美系和苏联系在牛顿力学体系下的统一

从欧美坐标系和苏联坐标系的定义可知, 这两种坐标系定义最大的不同是  $Oy$  轴的正方向不同。虽然两种坐标系的  $Oy$  轴正方向完全相反, 但  $Ox$  轴的定义则相同。除此之外, 欧美坐标系和苏联坐标系另一个相同之处是都采用右手坐标系进行定义。这样的定义方式体现出这两种坐标定义方式在牛顿力学体系下的统一性。

在飞行器设计领域, 无论是六自由度运动方程的建立, 还是风洞试验中气动数据的获得, 所依据的都是牛顿动力学理论, 以及在牛顿力学基础上延伸出来的分析力学 (拉格朗日力学) 和欧拉力学<sup>[9-11]</sup>。牛顿力学又被称为矢量力学。后来, 笛卡尔建立的坐标系与牛顿力学结合起来, 成为研究飞行器运动的重要工具<sup>[12-13]</sup>。

物体运动矢量不仅要描述运动速度的大小, 还要描述物体运动速度方向的改变。在牛顿矢量力学中, 描述物体运动的自然坐标系从根本上奠定了笛卡尔坐标系和牛顿力学相结合的方法, 以及牛顿力学体系运动矢量 (如速度、角速度、加速度等) 方向的定义方法。在自然坐标系中, 轨迹的切线矢量表示运动速度和方向, 方向变化率则通过轨迹的曲率

变化表示。自然坐标系是按照物体运动轨迹曲线的弯绕自然趋势而建立的一种表示方式,贴切、自然地反映了物体运动所有的特性。

自然坐标系的建立过程如下:运动曲线上的一点 $P$ ,在该点处的切线为 $PT$ 。同时,和 $P$ 相邻的点 $P'$ 的切线为 $P'T'$ 。一般而言,这两条切线不在同一平面内。过 $P$ 点做平行于切线 $P'T'$ 的直线 $PT_1$ ,则切线 $PT$ 和直线 $PT_1$ 确定了一个平面 $\alpha_1$ 。当点 $P'$ 无限接近 $P$ 点时,平面 $\alpha_1$ 则趋近于某一极限平面 $\alpha$ 。平面 $\alpha$ 为曲线点 $P$ 的密切面。

在密切面内,过点 $P$ 做切线 $PT$ 指向曲线曲率中心的垂线 $PN$ ,则 $PN$ 为该点处的主法线。过点 $P$ 做切线 $PT$ 和主法线 $PN$ 的垂直 $PB$ ,则 $PB$ 为该点处的副法线。矢量 $PB$ 的方向由切线矢量 $PT$ 和主法线矢量 $PN$ 叉乘后的矢量方向确定。因此,以切线、主法线、副法线为三维坐标就组成了自然坐标系。从自然坐标系建立过程可知,在自然坐标系中的切线、主法线、副法线天然地形成了右手坐标系。

一般认为,笛卡尔坐标系思想成熟于1634~1644年。坐标系作为数学工具并没有左手坐标系和右手坐标系的分别,甚至坐标轴也并非一定要相互垂直。有时候,在非垂直坐标系中可以更方便地描述数学问题。牛顿力学的建立标志是1687年出版的《自然哲学的数学原理》。这部具有划时代意义的力学著作的论述和证明方法主要是几何学以及微积分思想。坐标系力学的结合还在该著作发表之后。因此,从时间上而论,笛卡尔坐标系建立的时间要早于牛顿力学。但是,由于牛顿力学所描述的物体运动具有天然的自然坐标系属性,人们在将坐标系作为一种工具描述牛顿力学运动时,很自然地继承了自然坐标系的思想建立了右手坐标系。此后,力矩、旋转运动等力学运动量矢量方向的定义以及欧拉旋转力学的定义等,都是在右手坐标系下进行的。此时,右手坐标系成为了描述物体运动最常用的坐标系。由于物体旋转矢量的定义是在右手坐标系下根据右手螺旋法则定义的。在描述物体的旋转运动时,右手坐标系成为了最简单、方便的形式。

飞行器的运动是具有6个自由度的平移加旋转运动,描述其运动的方程比较复杂。因此,坐标系的定义就显得尤为重要。比较常见的两种坐标体系即苏联坐标系和欧美坐标系。二者虽然在垂直平面内的正方向定义不同,但是都遵循了牛顿体系的基本规律,建立了右手坐标系。

正是因为苏联坐标系和欧美坐标系这种在牛顿力学体系下的统一性,两种坐标系下描述飞行器飞

行运动的六自由度运动方程才具有相同的表现形式。也正是这种统一性,两种坐标体系下飞行器的各种参数才具有直观可比性。

## 2.2 欧美坐标系和苏联坐标系建立的依据

在上一节中,论述了欧美坐标系和苏联坐标系在牛顿力学体系下的统一性。既然两种坐标系是统一的,那么为什么还要建立两种不同的坐标系,并且都得到了广泛的认同和应用。为了回答这个问题,先介绍力学中应用坐标系描述物体运动的基本原则:

### (1) 符合人们的日常观念

该原则要求建立的坐标系应当尽可能地符合人们的日常观念。例如,飞行器坐标系中 $Ox$ 轴的建立,主要依据就是人们的观念。

### (2) 运动方程的形式尽可能简单

物体运动在不同坐标系下具有不同的动力学方程表现形式。这些不同坐标系下的方程在建立难易程度和复杂程度上差别很大。因此,在建立坐标系时,应当尽可能地使得运动方程形式简单。

### (3) 沿某一固定受力方向建立坐标轴

该原则本质是和原则(2)相似的。一般情况下,沿着固定力方向建立坐标轴可以使方程形式更加简单。

下面根据以上原则来分析苏联坐标系和欧美坐标系建立的依据。两种坐标系 $Ox$ 轴的建立主要是根据人们的日常观念和认识习惯。其中,两种坐标系中最大的不同是垂直方向上 $Oy$ 轴的方向。

苏联坐标系定义 $Oy$ 轴的方向向上。这主要是因为飞行器的飞行是从地面的原点开始向上飞行的。这种将 $Oy$ 轴的方向定义为向上的方式符合人们日常的认识,人们也比较容易接受。因此,苏联坐标系是依据原则(1)建立的。

欧美坐标系定义 $Oy$ 轴的方向指向地心。这种定义方式的主要依据是在飞行器受到的各种作用力中,只有重力的大小(忽略燃油的消耗)和方向是固定不变的,沿着该固定受力方向建立坐标轴可以使运动方程形式更加简单。因此,欧美坐标系建立的依据是原则(2)和原则(3)。

综上所述,苏联坐标系更加符合人们的认知习惯,而欧美坐标系则使得运动方程更简单。可以说,这两种坐标体系各有千秋。

## 3 坐标系的影响

### 3.1 对运动方程的影响

牛顿第一定律指出,力是物体运动的原因。因

此,建立物体运动模型的基础是受力分析。在分析力学中,受力分析之后则是物体自由度分析。物体运动的自由度决定了该物体运动方程中独立方程的个数。在各种参考书和论文中,常常可以见到关于飞行器的运动是六自由度的以及 12 个微分方程的具体形式。这些具体形式似乎和自由度决定独立方程个数的论断相冲突。接下来介绍这对看似矛盾背后的原因。

飞行器运动的 6 个自由度分别是三维空间的自由平移和绕 3 个坐标轴的自由旋转。根据分析力学可知,描述飞行器运动的独立方程个数应该为 6 个。结合牛顿力学和欧拉力学可知,这 6 个独立的方程应分别为 3 个轴向上的加速度方程和角加速度方程。

然而,常见到飞行器运动方程为 12 个,这 12 个方程分别是:3 个轴向上的位置、速度、旋转角度和旋转角速度方程。不过,这 12 个方程之间并不是相互独立的。其中,3 个轴向上的位置方程和速度方程是由三维空间的 3 个平移自由度决定的,分别是 3 个轴向上的加速度方程的二重积分和积分形式。3 个轴向上的旋转角度方程和旋转角速度方程是由三维空间的 3 个旋转自由度决定的,分别是 3 个轴向上的角加速度方程的二重积分和积分形式。因此,这 12 个方程依然是 6 个自由度。

飞行器的位置和速度方程一般是在惯性坐标系下建立的,这是人们通常认识的结果。而旋转角度和角速度方程的描述常用的有体轴系和速度轴系两种方式。这两种不同的描述方式则是对应不同的飞行性能和控制器设计不同的需求。

### 3.2 对气动参数的影响

苏联坐标系和欧美坐标系定义方式存在不同,在欧拉动力学里,这种坐标系的不同被描述为坐标系的旋转。与此相对应的,两种坐标系之间存在一个对应的旋转变换矩阵。通过该旋转矩阵,可以实现两种坐标体系的变换。这种通过旋转矩阵实现欧美坐标系和苏联坐标系变换的方式优点是数学上比较严谨,缺点是理解起来比较困难。

其实,从牛顿矢量力学的角度出发也可以实现两种坐标系的统一和满足工程应用。这种方法需要有明确的物理概念和对飞行器受力情况清晰的认识,从受力和运动的角度分析运动形式。

飞行器的运动是力和力矩作用的结果,因此,对飞行器的受力大小和方向都应有清晰的认识。飞行器受到的各种力和力矩中,重力和发动机的推力方向是不变的。空气动力产生的气动力和力矩则是变

化的。并且由于欧美坐标系和苏联坐标系定义方式的不同,这些力和力矩的正负形式也不同。

下面以常规静稳定型飞机为例,在 2.2 节舵面偏转的定义方式、各气动参数以增量的形式表示的前提下,来分析单一舵面正向时在苏联坐标系和欧美坐标系下各气动系数的增(+)减(-)情况对比,如表 2 所示。

表 2 两种坐标系下的极性

Table 2 Polarities of two coordinate systems

坐标系与气动系数	无舵偏	升降舵	副翼	方向舵
苏 升力系数	+	+	不确定	不确定
联 俯仰力矩系数	-	-	不确定	不确定
坐 偏航力矩系数	0	0	+	+
标 滚转力矩系数	0	0	-	不确定
系				
欧 升力系数	-	-	不确定	不确定
美 俯仰力矩系数	-	-	不确定	不确定
坐 偏航力矩系数	0	0	-	-
标 滚转力矩系数	0	0	-	不确定
系				

注:气动数据库有很多种不同的形式,必须按照气动数据库配套的数据库使用方法进行使用。

### 3.3 对稳定性判据的影响

在飞行动力学和飞行控制领域中,常把飞行器的稳定性定性地分为静稳定性和动稳定性两大类。需要说明的是,该稳定性判据是在气动参数极性和坐标系定义方式匹配的前提下进行的。因此,在判断飞行器的稳定性之前,要首先确认气动参数的极性是否和飞行器所采用的坐标系相匹配。

静稳定性是指飞行器在配平状态下受到扰动后,扰动消失的瞬间飞行器恢复原平衡状态的趋势。动稳定性是指飞机在配平状态下受到扰动,扰动消失后,飞机自动恢复原平衡状态的能力。运动状态的改变和恢复都受到力或者力矩的作用。飞行器具有稳定性的根本原因是扰动使得飞行器状态改变之后,产生了使得飞行器状态改变的反作用效果。在明确了坐标系对气动参数极性的影响之后,接下来讨论不同坐标系下对飞行器稳定性判定条件的影响。

飞行器纵向受到扰动最先引起的状态改变是俯仰角,因此纵向静稳定性一般用俯仰角稳定性来评价。

受到扰动后飞行器的俯仰角改变速度是空速矢量方向改变速度的 10 倍以上。根据时标分离原理,工程上一般认为俯仰角和空速矢量方向的改变是在

不同时间维度上进行的。因此,在扰动发生的瞬间,可认为飞行器的俯仰角和迎角是等值改变的。

俯仰角恢复的根本原因是产生反作用的俯仰力矩,而俯仰力矩的产生是由迎角的变化引起的。因此,判断飞行器纵向是否静稳定就要判断俯仰力矩系数和迎角的变化关系。从上节可知,在两种坐标系下,飞行器的俯仰力矩系数具有相同的极性。因此,两种坐标体系下对纵向静稳定的判定标准相同。

当俯仰力矩系数随迎角的变化率  $m_{z\alpha} < 0$  时,飞行器具有迎角静稳定性;  $m_{z\alpha} > 0$  时,飞行器为静不稳定;  $m_{z\alpha} = 0$  时,飞行器为中立静稳定。

飞行器的横侧向静稳定性可分为方向静稳定性和横向静稳定性。

方向静稳定性是指飞行器受到扰动偏离原方向平衡状态产生侧滑角  $\Delta\beta$ ,在扰动消失瞬间飞机自动恢复原平衡状态的趋势。飞行器是否具有方向静稳定性,取决于它的偏航力矩特性。由于侧滑角定义的极性在两种坐标系下不同,因此其方向静稳定性的判定标准也不同。

在苏联坐标系下的判定准则为:  $m_y^\beta < 0$ , 飞行器具有方向静稳定性,或称方向静稳定;  $m_y^\beta > 0$ , 飞行器不具有方向静稳定性,或称方向静不稳定;  $m_y^\beta = 0$ , 飞行器方向中立静稳定。

在欧美坐标系下的判定准则为:  $m_y^\beta > 0$ , 飞行器具有方向静稳定性,或称方向静稳定;  $m_y^\beta < 0$ , 飞行器不具有方向静稳定性,或称方向静不稳定;  $m_y^\beta = 0$ , 飞行器方向中立静稳定。

横向静稳定性是指飞行器受到扰动偏离原横向平衡状态产生坡度,在扰动消失瞬间飞机自动恢复原横向平衡的趋势。飞行器是否具有横向静稳定性,取决于滚转力矩系数随侧滑角的变化特性。由于侧滑角定义的极性在两种坐标系下不同,因此其方向静稳定性的判定标准也不同。

在苏联坐标系下的判定准则为:  $m_x^\beta < 0$ , 飞机横向静稳定,或者称飞机具有横向静稳定性;  $m_x^\beta > 0$ , 飞机横向静不稳定,或者称飞机不具有横向静稳定性;  $m_x^\beta = 0$ , 飞机横向中立静稳定。

在欧美坐标系下的判定准则为:  $m_x^\beta > 0$ , 飞机横向静稳定,或者称飞机具有横向静稳定性;  $m_x^\beta < 0$ , 飞机横向静不稳定,或者称飞机不具有横向静稳定性;  $m_x^\beta = 0$ , 飞机横向中立静稳定。

## 4 两种坐标系之间的转换

根据欧拉力学的基本原理,首先定义坐标系旋

转的方向:在右手坐标系中,坐标系旋转的正方向由右手螺旋定则决定,即从该轴正半轴向坐标原点看,逆时针方向旋转为旋转正方向。

在该定义的正方向和苏联坐标系的定义方式下,坐标系变换绕三轴旋转的先后顺序为:  $x, z, y$ 。按照此旋转顺序,3个基本坐标旋转的转换矩阵分别如下:

$$T_1(x, \eta_x) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \eta_x & -\sin \eta_x \\ 0 & \sin \eta_x & \cos \eta_x \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$T_2(y, \eta_y) = \begin{bmatrix} \cos \eta_y & 0 & \sin \eta_y \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \eta_y & 0 & \cos \eta_y \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$T_3(z, \eta_z) = \begin{bmatrix} \cos \eta_z & \sin \eta_z & 0 \\ \sin \eta_z & \cos \eta_z & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

则最终的变换矩阵可表示为:

$$T = T_1 T_2 T_3 \quad (4)$$

根据苏联坐标系和欧美坐标系的定义可知,苏联坐标系通过旋转变换到欧美坐标系有两种方式:绕  $x$  轴旋转  $180^\circ$  和绕  $z$  轴旋转  $180^\circ$ ;这两种旋转方式在三轴的旋转角度分别为:  $(\pi, 0, 0)$  和  $(0, \pi, 0)$ 。分别将这两组旋转角度带入式(1)~式(3),并根据式(4)可得:

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

由计算结果可知,两种不同的旋转方式得到的旋转变换式(5)相同。由于旋转角度为  $180^\circ$ ,欧美坐标系变换到苏联坐标系的两种旋转方式的三轴旋转角度和得到的转换矩阵都与苏联坐标系到欧美坐标系的两种旋转方式相同。在应用时,有以下几点需要注意:

(1) 根据本文坐标轴的定义标准,两坐标系变换的向量坐标为  $[x, z, y]^T$ 。

(2) 在建立运动模型时,应当采用同一坐标系定义方法。即如果选用苏联坐标系,则地面惯性系、体轴系、机体系、速度系、航迹系都应是苏联坐标系定义。避免苏联坐标系和欧美坐标系混用的情况。

(3) 现实的物理空间都是三维的。因此,需要变换的物理量也应以三维列向量的形式出现。也就是以三维位置向量、三维速度向量、三维姿态角、三维角速度的形式进行变换。

(4) 坐标系的旋转变换和同一体系下不同坐标

系间的变换在物理意义和变换矩阵形式上存在很大的不同,不可混为一谈。在很多教材中,都可以看到运动方程从体轴系向速度系、速度系向体轴系的变换矩阵。虽然这种变换中绕  $x, y, z$  3 个基本坐标旋转的转换矩阵与式(1)~式(3)相同。但是,其最终的变换矩阵却与式(5)不同,物理意义更是相差巨大,详细论述可参考理论力学中欧拉力学的相关内容。

## 5 结束语

在航空相关领域,苏联坐标系和欧美坐标系是两种经过长时间验证、非常方便实用的坐标系定义方式,其定义和表现形式满足了运动学的相关准则,并有效地满足了工程实践的要求。通过前文分析可知,这两种坐标系有很多相似之处,在科研和工程应用方面都可以使用。

但是,工程设计中常用的 Matlab 提供的航空应用工具包是以欧美坐标系为标准编写的,是航空设计领域应用最为广泛的一款软件。为了方便工程应用,建议选用欧美坐标系。

另外,从科研角度出发,也建议选用欧美坐标系。目前,学术界最具影响力的期刊都被美国《科学引文索引》(Science Citation Index,简称 SCI)和美国《工程索引》(The Engineering Index,简称 EI)收录。这两大索引所收录的期刊和论文大多是以英文作为写作语言。为了方便学术交流和世界接轨,也建议采用欧美坐标系。

但是,由于欧美坐标的定义方式有悖于人们日常观察飞行器向上飞行的直观感觉,这就造成了与相关学科结合时坐标系不匹配的问题。例如,飞行力学和飞行控制学科中常用到的气动数据库。气动数据的建立其实也暗含了坐标系的定义问题。由于建立气动数据库时没有明确地规定坐标系的方式,因此在建立三维 CFD 模型或者风洞试验过程中,研究人员根据日常观念,很自然地采用了苏联坐标系。

飞行系运动模型的欧美坐标系和气动数据库苏联坐标系的匹配,则会带来一系列的问题。比如,稳定性判定问题、运动模型建立时的受力分析等。这些问题的解决一方面要求气动数据库的建立者出具详细的数据库各力(或力矩)的方向定义和该数据库的使用方法;另一方面,也要求气动数据库的使用者认真阅读气动数据库的相关说明,必要时需要作出调整,以适应自己建立运动模型时所选择的坐标体系。

## 参考文献:

- [1] 陈廷楠. 飞机飞行性能品质与控制[M]. 北京:国防工业出版社,2007:17-26.
- [2] 李洪儒. 导弹制导与控制原理[M]. 北京:科学出版社,2016:23.
- [3] 雷虎民. 导弹制导与控制原理[M]. 北京:国防工业出版社,2006:19-23.
- [4] 曾庆华. 无人飞行控制技术与工程[M]. 北京:国防工业出版社,2011:28-30.
- [5] 张明廉. 飞行控制系统[M]. 北京:国防工业出版社,1984:22-26.
- [6] 迪卡德. 容错飞行控制与导航系统[M]. 陈自力,谢志刚,译. 北京:国防工业出版社,2012:26-28.
- [7] 章卫国. 现代飞行控制系统设计[M]. 西安:西北工业大学出版社,2009:15-27.
- [8] 朱宝鑫. 无人飞机空气动力学[M]. 北京:航空工业出版社,2006:22-24.
- [9] 梁昆森. 力学:理论力学[M]. 北京:高等教育出版社,2009:77-84.
- [10] 范钦珊,陈建平. 理论力学[M]. 第2版. 北京:高等教育出版社,2010:117-126.
- [11] 朱照宣. 理论力学(上、下册)[M]. 北京:北京大学出版社,1982:121-128.
- [12] 艾萨克·牛顿. 自然哲学的数学原理[M]. 曾琼瑶,王莹,王美霞,译. 南京:江苏人民出版社,2011:217-225.
- [13] 笛卡尔. 笛卡尔几何[M]. 北京:北京大学出版社,2008:113-143.

(编辑:方春玲)