

ICS 49.020
V 70



中华人民共和国国家标准

GB/T 32296—2015

航天飞行器常用坐标系

General coordinates for space vehicle

2015-12-31 发布

2016-07-01 实施

中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局
中国国家标准化管理委员会 发布

前 言

本标准按照 GB/T 1.1—2009 给出的规则起草。

本标准由中国航天科技集团公司提出。

本标准由全国宇航技术及其应用标准化技术委员会(SAC/TC 425)归口。

本标准起草单位:北京宇航系统工程研究所。

本标准主要起草人:李平岐、何巍、耿光有、王建明、常武权、马英、谢萱、何兆伟、田继超、刘兴隆、李重远。

航天飞行器常用坐标系

1 范围

本标准规定了航天飞行器的常用坐标系、定义、一般要求及变换公式。
本标准适用于运载火箭和航天器等航天飞行器的总体设计及系统间的接口协调。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件,仅注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件,其最新版本(包括所有的修改单)适用于本文件。

GB/T 32455 运载火箭术语

3 术语和定义

GB/T 32455 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。为了便于使用,以下重复列出了 GB/T 32455 中的某些术语和定义。

3.1

航天飞行器 **space vehicle**

执行探索、开发或利用太空等特定任务的飞行器。

注:航天飞行器按用途分为运输类飞行器(如运载火箭)和应用类飞行器(又称航天器)。

3.2

运载火箭 **launch vehicle; LV**

从地球表面、空中将有效载荷送入空间轨道的火箭。

注:一般按规模大小可分为小型、中型、大型和重型运载火箭,近地轨道运载能力 2 t 及以下的运载火箭为小型运载火箭,近地轨道运载能力 2 t~20 t 的运载火箭为中型运载火箭,近地轨道运载能力 20 t~50 t 的运载火箭为大型运载火箭,近地轨道运载能力 50 t 级及以上的运载火箭为重型运载火箭。

[GB/T 32455, 定义 2.1.2]

3.3

航天器 **spacecraft**

在大气层以外的宇宙空间,执行探索、开发或利用太空等特定任务的飞行器。如人造地球卫星、载人航天器、空间探测器等。

3.4

逃逸飞行器 **escape vehicle**

出现致命性故障时,与火箭分离并逃离险区的飞行器。

3.5

天球 **celestial sphere**

为了确定天体的视位置而引进的一个假想圆球。

注 1: 根据所选取的天球中心不同,有日心天球、地心天球等。

注 2: 天球的半径是任意选定的,可以当作数学上的无穷大。



3.6

黄道 ecliptic

地球绕太阳系质心公转的轨道平面与天球相交的大圆。

3.7

天赤道 celestial equator

地球赤道平面与天球相交的大圆。

3.8

春分点 vernal equinox

太阳沿黄道从天赤道以南向北通过天赤道的那一点。

3.9

黄经 celestial longitude

以黄道面为基本平面的天球坐标系中,过黄极的大圆称“黄经圈”,过春分点的黄经圈为主圈。天体所在的黄经圈与主圈之间的夹角为黄经。由主圈起逆时针方向量度。

3.10

黄纬 celestial latitude

天体与黄道之间的黄经圈的弧长。从黄道起算,向北黄极方向为正。

3.11

赤经 right ascension

过春分点的赤经圈为始圈,逆时针方向度量到天体赤经圈的天赤道弧长。

3.12

赤纬 declination

天体到天赤道之间的赤经圈弧长。由天赤道起算,向北天极方向为正。

3.13

大地经度 geodetic longitude

格林尼治平子午面与过该点的子午面的夹角。由格林尼治向东量度。



3.14

大地纬度 geodetic latitude

过某点的参考椭球面的法线与赤道面的夹角。向北为正。

3.15

地心纬度 geocentric latitude

空间某点与地心的连线与赤道面的夹角。向北为正。

3.16

方位角 azimuth angle

从某点的指北方向线起,顺时针方向至目标方向线的水平夹角。

3.17

仰角 elevation angle

从一点到目标的方向线与水平面之间的夹角。

注:目标在水平面以上的称为“仰角”,目标在水平面以下的称为“俯角”。

3.18

俯仰角 angle of pitch

火箭纵轴 ox_1 在发射坐标系 xoy 平面上的投影与 ox 轴的夹角,当投影在 ox 轴上为正,反之为负。

3.19

偏航角 angle of yaw

火箭纵轴 ox_1 与发射坐标系 xoy 平面的夹角。从尾部朝箭体头部方向看,纵轴在射面之左为正,反之为负。

3.20

滚动角 angle of roll

箭体的横轴 oz_1 与通过箭体纵轴 ox_1 轴和发射坐标系 oz 轴的平面之间的夹角。

3.21

攻角 attack angle

速度矢量在火箭主对称面内的投影与箭体的纵轴(ox_1 轴)之间的夹角,当速度在 ox_1 轴之下为正,反之为负。

3.22

侧滑角 sideslip angle

速度矢量与火箭主对称面的夹角顺 ox_1 轴方向看速度矢量,在主对称面之右为正,反之为负。

4 坐标系的基本要素

坐标系的基本要素见表 1。

表 1 坐标系的基本定义

序号	名称	含义	符号	备注
1	坐标	为了确定空间一点在一定的参考系中的位置,按规定方法选取的有次序的一组数	—	—
2	坐标系	一一对应的确定空间点与其坐标(或向量与其分量)之间关系的参考系	—	—
3	坐标原点	在坐标系中所有坐标值均等于零的点	o	—
4	空间点的直角坐标	有顺序的三个数,它们分别等于从该点到所选取的三个相互垂直的平面的距离	x, y, z (ξ, η, ζ) (X, Y, Z)	数 x, y, z 是从所选的相互垂直的平面交点(坐标原点)引出的向径 \vec{r} 在这些平面交线上的投影
5	空间点的曲线坐标	有顺序的三个数 (ρ_1, ρ_2, ρ_3) , 单值地确定空间点的位置	ρ_1, ρ_2, ρ_3	数 ρ_1, ρ_2, ρ_3 是直角坐标 x, y, z 的函数 $\rho_1 = \rho_1(x, y, z)$ $\rho_2 = \rho_2(x, y, z)$ $\rho_3 = \rho_3(x, y, z)$
6	坐标面	某一坐标值为常数的点的集合	$(x), (y), (z)$ $(\xi), (\eta), (\zeta)$ $(X), (Y), (Z)$ $(\rho_1), (\rho_2), (\rho_3)$	—
7	坐标线	两个坐标值保持常数的点的轨迹	$[x], [y], [z]$ $[\xi], [\eta], [\zeta]$ $[X], [Y], [Z]$ $[\rho_1], [\rho_2], [\rho_3]$	例如: $[\rho_i]$ 表示 $\rho_j = \text{常数}$ $i, j = 1, 2, 3, j \neq i$

表 1 (续)

序号	名称	含义	符号	备注
8	坐标轴	由坐标线上某点引出的坐标线的切线,其方向与相应坐标增大的方向一致(数值为0)	—	空间中每一点可作三个坐标轴
9	主面 (主平面)	两个坐标轴组成的坐标面(平面)	—	每个坐标系只能选取一个主面
10	坐标单位向量	沿坐标轴方向的单位向量	—	—
11	参考线	在主面上并通过坐标原点的线	—	—
12	正交坐标系	空间每一点的三个坐标轴相互垂直的坐标系	—	—
13	右手坐标系	正交坐标系坐标轴顺序按右手法则确定的坐标系	—	—
14	惯性坐标系	坐标轴的指向在惯性空间中保持不变的坐标系	—	—
15	相对坐标系	坐标轴的指向在惯性空间中是变化的坐标系	—	—
注：“—”不做规定。				

5 一般要求

5.1 直角坐标系的表示

直角坐标系以四个字符表示,依次代表坐标原点、第一、第二、第三坐标轴。本标准规定的坐标系中,第一、第二、第三坐标轴应满足右手法则。

5.2 坐标系序数词的使用

本标准明确了坐标系的名称,对于其中带有序数词的坐标系,如地心(第一)轨道坐标系、地心(第二)轨道坐标系等,在使用中只出现其中之一时,可以略去序数词。在出现两个及两个以上时,则应加上相应的序数词,便于区别。

5.3 坐标轴字母及其下标的选用

本标准在定义坐标轴时选用的字母及其下标,作为优选的范围,使用者可以根据具体情况灵活选用。

5.4 春分点、赤道、黄道的使用

在本标准定义的坐标系中,春分点、赤道的含义使用者可以自行选择某历元时刻的平春分点、真春分点、平赤道、真赤道等,但在使用时应作注明。

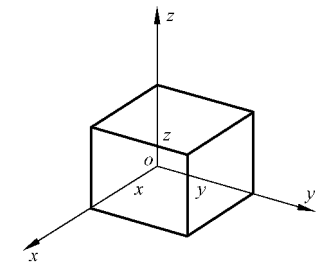
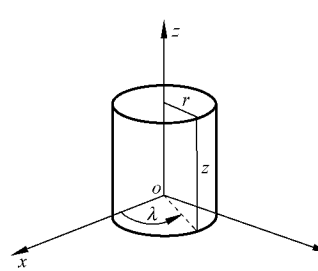
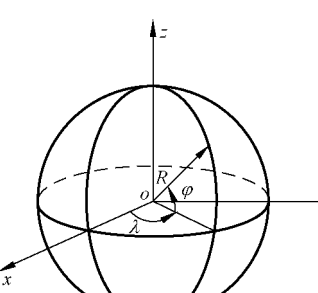
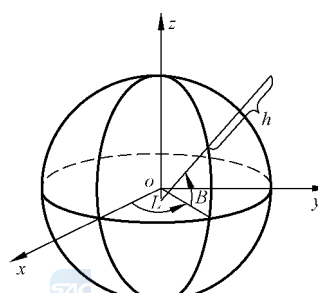
未作特殊说明,本标准中平赤道、平春分点均对应历元 2000.0 时刻的平赤道、平春分点,并且平赤

道指地球平赤道,如果是其他天体的平赤道,应明确指出。

5.5 坐标系的形式

坐标系的形式见表 2。

表 2 坐标系的形式

序号	坐标系	坐标符号	坐标面	坐标域	略图
1	直角坐标系	x, y, z	三个相互垂直的平面 $x = \text{常数}$; $y = \text{常数}$; $z = \text{常数}$	$-\infty < x < +\infty$ $-\infty < y < +\infty$ $-\infty < z < +\infty$	
2	圆柱坐标系	r, λ, z	$r = \text{常数}$ ——以 oz 为轴的圆柱面; $\lambda = \text{常数}$ ——通过 oz 轴的半平面; $z = \text{常数}$ ——垂直 oz 轴的平面	$0 \leq r < +\infty$ $0^\circ \leq \lambda < 360^\circ$ 或 $-180^\circ < \lambda \leq 180^\circ$ $-\infty < z < +\infty$	
3	球面坐标系	R, λ, φ	$R = \text{常数}$ ——球心在坐标原点的球面; $\lambda = \text{常数}$ ——通过 oz 轴的半平面; $\varphi = \text{常数}$ ——顶点在坐标原点, oz 轴为轴的圆锥面	$0 \leq R < +\infty$ $0^\circ \leq \lambda < 360^\circ$ 或 $-180^\circ < \lambda \leq 180^\circ$ $-90^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ$	
4	大地坐标系	h, L, B	$h = \text{常数}$ ——与参考椭球面等距离的面; $L = \text{常数}$ ——通过参考椭球短轴的半平面,经度; $B = \text{常数}$ ——是一个锥面,其轴与参考椭球面的短轴相重合,且其轴垂直于椭球面,纬度	$-N \leq h < +\infty$ 式中: N ——卯酉圈曲率半径 $-90^\circ \leq B \leq 90^\circ$ $0^\circ \leq L < 360^\circ$ 或 $-180^\circ < L \leq 180^\circ$	

直角坐标系、圆柱坐标系、球面坐标系和大地坐标系之间的关系见表 3。

表 3 直角坐标系、圆柱坐标系和球面坐标系之间的关系

项目	直角坐标系 (x, y, z)	圆柱坐标系 (r, λ, z)	球面坐标系 (R, λ, φ)	大地坐标系 (h, L, B)
直角坐标系 (x, y, z)	$x = x$ $y = y$ $z = z$	$x = r \cos \lambda$ $y = r \sin \lambda$ $z = z$	$x = R \cos \lambda \cos \varphi$ $y = R \sin \lambda \cos \varphi$ $z = R \sin \varphi$	$x = (h + h_e) \cos L \cos \varphi$ $y = r \sin L$ $z = z$ $\varphi = \arctan[\tan B \cdot (1 - e)^2]$
圆柱坐标系 (r, λ, z)	$r = \sqrt{x^2 + y^2}$ $\lambda = \arctan \frac{y}{x}$ (按坐标域取值) $z = z$	$r = r$ $\lambda = \lambda$ $z = z$	$r = R \cos \varphi$ $\lambda = \lambda$ $z = R \sin \varphi$	$r = (h + h_e) \cos \varphi$ $\lambda = L$ $z = (h + h_e) \sin \varphi$ $\varphi = \arctan[\tan B \cdot (1 - e)^2]$
球面坐标系 (R, λ, φ)	$R = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$ $\lambda = \arctan \frac{y}{x}$ (按坐标域取值) $\varphi = \arctan \frac{z}{\sqrt{x^2 + y^2}}$	$R = \sqrt{r^2 + z^2}$ $\lambda = \lambda$ $\varphi = \arctan \frac{z}{r}$	$R = R$ $\lambda = \lambda$ $\varphi = \varphi$	$R = h + h_e$ $\lambda = L$ $\varphi = \arctan[\tan B \cdot (1 - e)^2]$
大地坐标系 (h, L, B)	$h = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} - h_e$ $L = \arctan \frac{y}{x}$ (按坐标域取值) $B = \arctan \frac{z}{(1 - e)^2 \sqrt{x^2 + y^2}}$	$h = \sqrt{r^2 + z^2} - h_e$ $L = \lambda$ $B = \arctan \frac{z}{(1 - e)^2 r}$	$h = R - h_e$ $L = \lambda$ $B = \arctan \frac{\tan \varphi}{(1 - e)^2}$	$h = h$ $L = L$ $B = B$
注: $h_e = \frac{a_e(1 - e)}{\sqrt{\sin^2 \varphi + (1 - e)^2 \cos^2 \varphi}}$, e 为地球扁率, a_e 为赤道半径。				

5.6 坐标之间的变换形式

5.6.1 直角坐标系之间的变换

5.6.1.1 总则

两个直角坐标系之间的变换由平移(坐标原点的移动)和转动(坐标轴绕原点的转动)组成。

5.6.1.2 坐标系的平移

平移公式见式(1):

$$\begin{cases} x' = x - x_0 \\ y' = y - y_0 \\ z' = z - z_0 \end{cases} \dots\dots\dots (1)$$

式中:

- x, y, z —— 旧坐标;
- x', y', z' —— 新坐标;
- x_0, y_0, z_0 —— 新坐标原点 o' 在旧坐标系中坐标。

5.6.1.3 坐标系的转动

转动公式见式(2):

$$\begin{cases} x' = l_1x + m_1y + n_1z \\ y' = l_2x + m_2y + n_2z \\ z' = l_3x + m_3y + n_3z \end{cases} \dots\dots\dots(2)$$

式中:

$l_i, m_i, n_i (i=1, 2, 3)$ ——新坐标轴 $o'x', o'y', o'z'$ 相对旧坐标系的方向余弦。

设方向余弦组成的系数矩阵 M 称为转动矩阵, 见式(3):

$$M = \begin{bmatrix} l_1 & m_1 & n_1 \\ l_2 & m_2 & n_2 \\ l_3 & m_3 & n_3 \end{bmatrix} \dots\dots\dots(3)$$

则旧坐标向新坐标的转换公式见式(4):

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \dots\dots\dots(4)$$

绕坐标系第 i 个坐标轴 ($i=1, 2, 3$) 按右手法则转动 α 角的转动矩阵可表示为 $M_i(\alpha)$, 见式(5)~式(7):

$$M_1(\alpha) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha & \sin\alpha \\ 0 & -\sin\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix} \dots\dots\dots(5)$$

$$M_2(\alpha) = \begin{bmatrix} \cos\alpha & 0 & -\sin\alpha \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\alpha & 0 & \cos\alpha \end{bmatrix} \dots\dots\dots(6)$$

$$M_3(\alpha) = \begin{bmatrix} \cos\alpha & \sin\alpha & 0 \\ -\sin\alpha & \cos\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \dots\dots\dots(7)$$

一般坐标系的转动, 可以用三个欧拉角的顺序旋转来表示, 多次旋转时, 采用矩阵左乘法则得到最终的转动矩阵。

5.6.1.4 绕过坐标原点固定轴转动时, 两个直角坐标系之间的变换关系

固定轴方向的单位矢量为 OE , OE 在旧坐标系的分量为 E_x, E_y, E_z , 转动后产生的新坐标系为 x', y', z' , 转动角为 φ , 则转动矩阵见式(8):

$$M = \begin{bmatrix} E_x^2 + (1 - E_x^2)\cos\varphi & (1 - \cos\varphi)E_xE_y + E_z\sin\varphi & (1 - \cos\varphi)E_xE_z - E_y\sin\varphi \\ (1 - \cos\varphi)E_xE_y - E_z\sin\varphi & E_y^2 + (1 - E_y^2)\cos\varphi & (1 - \cos\varphi)E_yE_z + E_x\sin\varphi \\ (1 - \cos\varphi)E_xE_z + E_y\sin\varphi & (1 - \cos\varphi)E_yE_z - E_x\sin\varphi & E_z^2 + (1 - E_z^2)\cos\varphi \end{bmatrix} \dots\dots(8)$$

以上转动矩阵也可按四元数形式写出, 见式(9):

$$M = \begin{bmatrix} q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2 & 2(q_1q_2 + q_0q_3) & 2(q_1q_3 - q_0q_2) \\ 2(q_1q_2 - q_0q_3) & q_0^2 - q_1^2 + q_2^2 - q_3^2 & 2(q_2q_3 + q_0q_1) \\ 2(q_1q_3 + q_0q_2) & 2(q_2q_3 - q_0q_1) & q_0^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_3^2 \end{bmatrix} \dots\dots\dots(9)$$

其中, $q_0 = \cos \frac{\varphi}{2}, q_1 = E_x \sin \frac{\varphi}{2}, q_2 = E_y \sin \frac{\varphi}{2}, q_3 = E_z \sin \frac{\varphi}{2}$ 。

6 航天飞行器常用坐标系

6.1 基本坐标系统

在经典牛顿力学体系下,忽略相对论效应的微量影响,基本坐标系统可在太阳系任意天体间平移。基本坐标系统如下:

- a) 历元平赤道坐标系统:原点定义在太阳系任意天体中心,以历元地球平赤道面作为主面, X 轴在主面内指向历元平春分点。当原点为地心,历元选择 2000.0 时刻时,即为 J2000.0 地心平赤道坐标系。
- b) 历元黄道坐标系统:原点定义在太阳系任意天体中心,以历元黄道面作为主面, X 轴在主面内指向历元平春分点。当原点为日心,历元选择 2000.0 时刻时,即为日心黄道坐标系。
- c) 球面平赤道坐标系统:原点定义在太阳系任意天体中心,以历元地球平赤道面作为主面, X 轴在主面内指向历元平春分点,坐标变量采用球心距、赤经和赤纬。
- d) 球面黄道坐标系统:原点定义在太阳系任意天体中心,以历元黄道面作为主面, X 轴在主面内指向历元平春分点,坐标变量采用球心距、黄径和黄纬。
- e) 天体固联坐标系:原点定义在太阳系任意天体中心,以天体自身真赤道面作为主面, X 轴在主面内指向天体本初子午线。

6.2 常用坐标系类型

6.2.1 原点在地心的坐标系

原点在地心的坐标系见表 4,主要内容如下:

- a) 历元地心平赤道坐标系 $O_e X_1 Y_1 Z_1$;
- b) 地球固连坐标系 $O_e X_2 Y_2 Z_2$;
- c) 历元地心真赤道惯性坐标系 $O_e X_3 Y_3 Z_3$;
- d) 地心黄道坐标系 $O_e XYZ$;
- e) 地心球面平赤道坐标系 (r, α, δ) ;
- f) 地心球面黄道坐标系 (r, β, θ) ;
- g) 地心球面固连坐标系 (r, λ, φ) ;
- h) 地心(第一)轨道坐标系 $o_e x_1 y_1 z_1$;
- i) 地心(第二)轨道坐标系 $o_e x_2 y_2 z_2$;
- j) 地心(第三)轨道坐标系 $o_e x_3 y_3 z_3$;
- k) 2000 国家大地坐标系(缩写 CGCS2000) $O_e X_e Y_e Z_e$ 。

6.2.2 原点在日心的坐标系

原点在日心的坐标系见表 5,主要内容如下:

- a) 日心黄道坐标系 $O_s XYZ$;
- b) J2000.0 日心坐标系 $O_s X_1 Y_1 Z_1$;
- c) 日心球面黄道坐标系 (M, β, θ) ;
- d) 日心球面平赤道坐标系 (M, α, δ) 。

6.2.3 原点在月心的坐标系

原点在月心的坐标系见表 6,主要内容如下:

- a) 月心黄道坐标系 O_mXYZ ;
- b) J2000.0 月心坐标系 $O_mX_1Y_1Z_1$;
- c) 月心赤道坐标系 $O_mX_2Y_2Z_2$;
- d) 月固平地球/极轴坐标系(IAU/IAG2000) $O_mX_3Y_3Z_3$ 。

6.2.4 原点在行星中心的坐标系

原点在行星(水星、金星、火星、木星、土星、天王星和海王星)中心的坐标系见表 7,主要内容如下:

- a) 行星黄道坐标系 O_pXYZ ;
- b) J2000.0 行星坐标系 $O_pX_1Y_1Z_1$;
- c) 行星固连坐标系 $O_pX_2Y_2Z_2$ 。

6.2.5 原点在地球表面的坐标系

原点在地球表面的坐标系见表 8,主要内容如下:

- a) 发射坐标系 $oxyz$;
- b) 发射惯性坐标系 $ox_gy_gz_g$;
- c) 水平定向坐标系 $ox_sy_sz_s$;
- d) 球面水平定向坐标系 (S, A, E) ;
- e) 航天器(返回)坐标系 $ox_{d2}y_{d2}z_{d2}$;
- f) 大地坐标系 (h, L, B) ;
- g) 逃逸飞行器发射坐标系 $OXYZ$ 。

6.2.6 原点在航天飞行器上的坐标系



原点在航天飞行器上的坐标系见表 9,主要内容如下:

- a) 半速度坐标系 $ox_{hv}y_{hv}z_{hv}$;
- b) 目标固连坐标系 $ox_t y_t z_t$;
- c) 运载火箭箭体坐标系 $ox_1 y_1 z_1$;
- d) 速度坐标系 $ox_v y_v z_v$;
- e) 直角伴随自然坐标系(自然坐标系) $o\xi_1 \eta_1 \zeta_1$;
- f) 惯性平台坐标系 $ox_p y_p z_p$;
- g) 运载火箭箭体球面坐标系 (R, α_1, β_1) ;
- h) 航天器轨道坐标系 $ox_o y_o z_o$;
- i) 航天器直角坐标系 $ox_{s0} y_{s0} z_{s0}$;
- j) 逃逸飞行器体坐标系 $OX_b Y_b Z_b$;
- k) 逃逸飞行器质心坐标系 $OX_c Y_c Z_c$;
- l) 逃逸飞行器速度坐标系 $OX_v Y_v Z_v$;
- m) 船箭对接坐标系 $ox_d y_d z_d$;
- n) 卫星本体坐标系 $ox_b y_b z_b$ 。

6.3 坐标系的符号

在使用常用坐标系时,坐标系的符号按本标准给出的符号取用。在处理某一具体问题时,下标可省略,但应加以说明。原则上应采用变换公式中的参数符号。

6.4 坐标系之间的变换公式

坐标系之间的变换公式见表 10。

表 4 原点在地心的坐标系

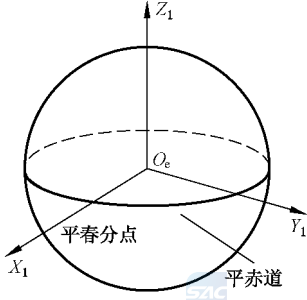
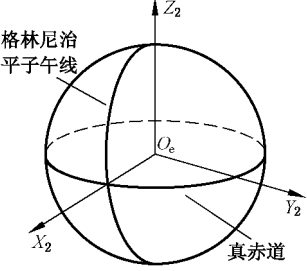
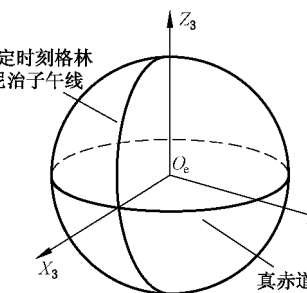
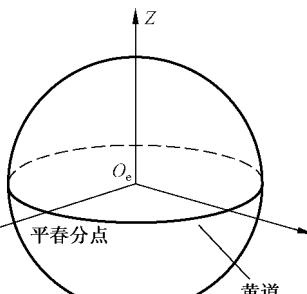
序号	名称	原点	坐标轴或坐标	略图
1	历元地心平赤道坐标系 $O_e X_1 Y_1 Z_1$	地心	<p>$O_e X_1$——在历元平赤道平面内,指向历元平春分点;</p> <p>$O_e Z_1$——垂直于历元平赤道平面,与地球自转角速度矢量方向一致;</p> <p>$O_e X_1 Y_1 Z_1$ 为右手直角坐标系。</p> <p>选用历元 2000.0 时刻平赤道面和历元 2000.0 时刻平春分点时,称 J2000.0 地心平赤道坐标系</p>	
2	地球固连坐标系 $O_e X_2 Y_2 Z_2$	地心	<p>$O_e X_2$——在真赤道平面内,指向格林尼治子午线;</p> <p>$O_e Z_2$——垂直于真赤道平面,与地球自转角速度矢量方向一致;</p> <p>$O_e X_2 Y_2 Z_2$ 为右手直角坐标系</p>	
3	历元地心真赤道惯性坐标系 $O_e X_3 Y_3 Z_3$	地心	<p>$O_e X_3$——在真赤道平面内,指向特定时刻的格林尼治子午线;</p> <p>$O_e Z_3$——垂直于真赤道平面,与地球自转角速度矢量方向一致;</p> <p>$O_e X_3 Y_3 Z_3$ 为右手直角坐标系</p>	
4	地心黄道坐标系 $O_e XYZ$	地心	<p>$O_e X$——在黄道平面内,指向平春分点;</p> <p>$O_e Z$——垂直于黄道平面,与地球公转的角速度矢量方向一致;</p> <p>$O_e XYZ$ 为右手直角坐标系</p>	

表 4 (续)

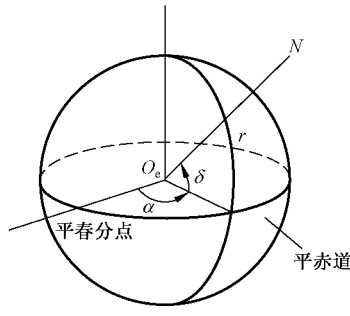
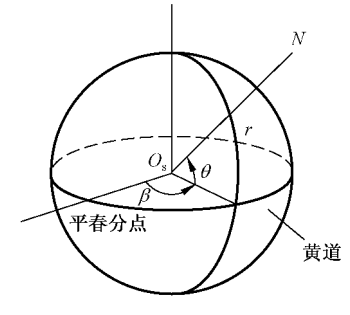
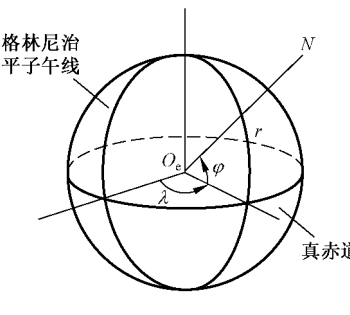
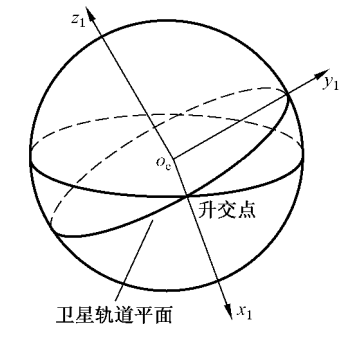
序号	名称	原点	坐标轴或坐标	略图
5	地心球面平赤道坐标系 (r, α, δ)	地心	r ——地心到空间点 N 的距离; α ——赤经; δ ——赤纬	
6	地心球面黄道坐标系 (r, β, θ)	地心	r ——地心到空间点 N 的距离; β ——黄经; θ ——黄纬	
7	地心球面固连坐标系 (r, λ, φ)	地心	r ——地心到空间点 N 的距离; λ ——地心经度; φ ——地心纬度	
8	地心(第一)轨道坐标系 $o_e x_1 y_1 z_1$	地心	$o_e x_1$ ——在航天器轨道平面内,指向升交点方向; $o_e z_1$ ——指向航天器轨道平面正法向方向; $o_e x_1 y_1 z_1$ 为右手直角坐标系	

表 4 (续)

序号	名称	原点	坐标轴或坐标	略图
9	地心(第二)轨道坐标系 $O_e x_2 y_2 z_2$	地心	$O_e x_2$ ——在航天器轨道平面内,指向近地点方向; $O_e z_2$ ——指向航天器轨道平面正法向方向; $O_e x_2 y_2 z_2$ 为右手直角坐标系	
10	地心(第三)轨道坐标系 $O_e x_3 y_3 z_3$	地心	$O_e x_3$ ——在航天器轨道平面内,指向航天器; $O_e z_3$ ——指向航天器轨道平面正法向方向; $O_e x_3 y_3 z_3$ 为右手直角坐标系	
11	2000 国家大地坐标系 $O_e X_e Y_e Z_e$	地心	$O_e Z_e$ ——指向 IERS 参考极方向,定向在 1984.0 时,与 BIH 的定向一致; $O_e X_e$ ——IERS 参考子午面与通过原点且同 Z 轴正交的赤道面的交线; $O_e X_e Y_e Z_e$ 为右手直角坐标系	

表 5 原点在日心的坐标系

序号	名称	原点	坐标轴或坐标	略图
1	日心黄道坐标系 $O_s XYZ$	日心	$O_s X$ ——在黄道平面内,指向平春分点; $O_s Z$ ——垂直于黄道平面,方向与地球公转的角速度方向一致; $O_s XYZ$ 为右手直角坐标系	
2	J2000.0 日心坐标系 $O_s X_1 Y_1 Z_1$	日心	各轴指向同 J2000.0 地心平赤道坐标系	略

表 5 (续)

序号	名称	原点	坐标轴或坐标	略图
3	日心球面黄道坐标系 (M, β, θ)	日心	M —— 日心到空间点 N 的距离; β —— 黄经; θ —— 黄纬	
4	日心球面平赤道坐标系 (M, α, δ)	日心	M —— 日心到空间点 N 的距离; α —— 赤经; δ —— 赤纬	

表 6 原点在月心的坐标系

序号	名称	原点	坐标轴或坐标	略图
1	月心黄道坐标系 O_mXYZ	月心	各轴指向同日心黄道坐标系 O_sXYZ	略
2	J2000.0 月心坐标系 $O_mX_1Y_1Z_1$	月心	各轴指向同 J2000.0 地心平赤道坐标系	略
3	月心赤道坐标系 $O_mX_2Y_2Z_2$	月心	O_mZ_2 轴 —— 与月球自转轴平行, 指向北方; O_mX_2 轴 —— 在月球赤道面内, 平行于月球赤道平面与地球 J2000.0 平赤道平面交线, 指向月球轨道升交点方向; O_mY_2 轴 —— 与 O_mZ_2 轴和 O_mX_2 轴共同构成右手直角坐标系	

表 6 (续)

序号	名称	原点	坐标轴或坐标	略图
4	月固平地球/极轴坐标系 (IAU/IAG2000) $O_m X_3 Y_3 Z_3$	月心	$O_m Z_3$ 轴——与月球自转轴平行,指向北方; $O_m X_3$ 轴——在月球真赤道面内,指向平均地球方向; $O_m Y_3$ 轴——与 $O_m Z_3$ 轴和 $O_m X_3$ 轴共同构成右手直角坐标系	
注: IAU:国际天文联合会;IAG:国际大地测量学会。				

表 7 原点在行星中心的坐标系

序号	名称	原点	坐标轴或坐标	略图
1	行星黄道坐标系 $O_p XYZ$	行星中心	各轴指向同日心黄道坐标系 $O_s XYZ$	略
2	J2000.0 行星坐标系 $O_p X_1 Y_1 Z_1$	行星中心	各轴指向同 J2000.0 地心平赤道坐标系	略
3	行星固连坐标系 $O_p X_2 Y_2 Z_2$	行星中心	$O_p X_2$ ——在行星真赤道平面内,指向格林尼治子午线; $O_p Z_2$ ——垂直于行星真赤道平面,与行星自转角速度矢量方向一致; $O_p X_2 Y_2 Z_2$ 为右手直角坐标系	

表 8 原点在地球表面的坐标系

序号	名称	原点	坐标轴或坐标	略图
1	发射坐标系 $oxyz$	发射点	ox ——在发射点水平面内,指向发射方向; oy ——沿发射点的铅垂线向上; $oxyz$ 为右手直角坐标系	

表 8 (续)

序号	名称	原点	坐标轴或坐标	略图
2	发射惯性坐标系 $ox_g y_g z_g$	与发射瞬时的发射点重合	与发射瞬时的发射坐标系 oxy_z 重合	略
3	水平定向坐标系 $ox_s y_s z_s$	地球表面	ox_s ——在过坐标原点的水平面内,指向正东; oy_s ——在过坐标原点的水平面内,沿子午线的切线方向,指向正北; $ox_s y_s z_s$ 为右手直角坐标系。 又称测站坐标系	
4	球面水平定向坐标系 (S, A, E)	地球表面	S ——坐标原点到空间点 N 的距离; A ——方位角; E ——仰角。 又称为测站球面坐标系、地面球面坐标系、地平球面坐标系	
5	航天器(返回)坐标系 $ox_{d2} y_{d2} z_{d2}$	航天器返回时所在位置的铅垂线与地面的交点	oy_{d2} ——沿铅垂线,指向上; ox_{d2} ——在轨道平面内,垂直 oy_{d2} 轴,指向理论落地点; $ox_{d2} y_{d2} z_{d2}$ 为右手直角坐标系	
6	大地坐标系 (h, L, B)	格林尼治子午线与地球赤道的交点	h ——从参考椭球表面量起的法向距离(高度); L ——大地经度; B ——大地纬度	
7	逃逸飞行器发射坐标系 $OXYZ$	发射点	OX ——定义同发射坐标系 ox ; OY ——定义同发射坐标系 oy ; $OXYZ$ 为右手直角坐标系。 由于逃逸飞行器飞行时间较短,将发射坐标系视为惯性坐标系	略

表 9 原点在飞行器上的坐标系

序号	名称	原点	坐标轴或坐标	略图
1	半速度坐标系 $ox_{hv}y_{hv}z_{hv}$	质心	ox_{hv} ——沿火箭的速度方向； oy_{hv} ——在过 ox_{hv} 轴的铅垂平面内，垂直于 ox_{hv} 轴，其指向按水平发射状态时，指向上为正； $ox_{hv}y_{hv}z_{hv}$ 为右手直角坐标系	
2	目标固连坐标系 $ox_t y_t z_t$	目标上某特征点	ox_t ——在坐标原点的水平面内，其方向可按研究问题的需要来定； oy_t ——沿过坐标原点的铅垂线，指向上； $ox_t y_t z_t$ 为右手直角坐标系	略
3	运载火箭箭体坐标系 $ox_1 y_1 z_1$	质心	ox_1 ——沿飞行器纵轴，指向头部； oy_1 ——在飞行器的纵对称面内，垂直 ox_1 轴，指向上（即第Ⅲ象限线）； $ox_1 y_1 z_1$ 为右手直角坐标系	
4	速度坐标系 $ox_v y_v z_v$	质心	ox_v ——沿飞行器的速度方向； oy_v ——在飞行器的纵对称面内，垂直 ox_v 轴，当速度矢量为水平时，指向上； $ox_v y_v z_v$ 为右手直角坐标系	
5	直角伴随自然坐标系 (自然坐标系) $o\xi_1 \eta_1 \zeta_1$	质心	$o\xi_1$ ——在弹道的密切平面内，沿速度方向； $o\eta_1$ ——在弹道的密切平面内，沿主法线方向； $o\zeta_1$ ——沿弹道的次法线方向	略
6	惯性平台坐标系 $ox_p y_p z_p$	平台中心	各坐标轴与发射惯性坐标系的对应坐标轴平行	略
7	运载火箭箭体球面坐标系 (R, α_1, β_1)	质心	R ——坐标原点到空间点 N 的距离； α_1 ——坐标原点到空间点 N 的向径在垂直纵轴平面上的投影与运载火箭箭体坐标系 oy_1 轴的夹角，逆时针为正； β_1 ——坐标原点到空间点 N 的向径与 ox_1 轴的夹角	

表 9 (续)

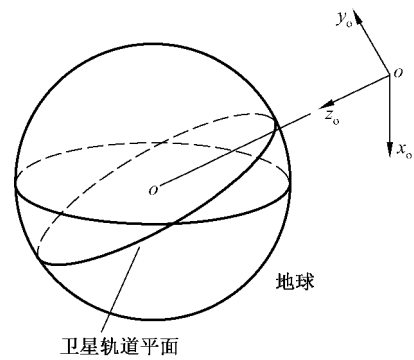
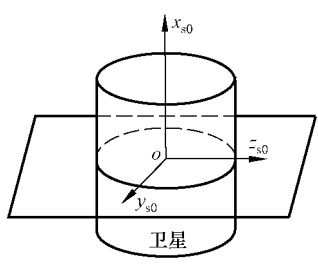
序号	名称	原点	坐标轴或坐标	略图
8	航天器轨道坐标系 ox_o, y_o, z_o	质心	oz_o ——在航天器轨道平面内, 指向航天器到地心的方向; ox_o ——在航天器轨道平面内, 垂直 oz_o 轴, 指向航天器运动方向; ox_o, y_o, z_o 为右手直角坐标系	
9	航天器直角坐标系 ox_{s0}, y_{s0}, z_{s0}	质心	ox_{s0} ——沿航天器的纵轴, 在发射瞬时指向上; oz_{s0} ——在垂直纵轴的平面内, 在发射瞬时指向射向; ox_{s0}, y_{s0}, z_{s0} 为右手直角坐标系	
10	逃逸飞行器体坐标系 OX_b, Y_b, Z_b	逃逸飞行器初始逃逸时质心 逃逸飞行器纵轴的交点	OX_b ——沿逃逸飞行器纵轴, 指向头部; OY_b ——在逃逸飞行器纵向对称面内, 垂直 OX_b 轴, 指向运载火箭 III 象限线; OX_b, Y_b, Z_b 为右手直角坐标系, 与逃逸飞行器固连	略
11	逃逸飞行器质心坐标系 OX_c, Y_c, Z_c	逃逸飞行器质心	各坐标轴与逃逸飞行器体坐标系的对应坐标轴平行	略
12	逃逸飞行器速度坐标系 OX_v, Y_v, Z_v	逃逸飞行器质心	OX_v ——沿逃逸飞行器的速度方向(空速); OY_v ——平行于逃逸飞行器纵向对称面, 垂直 OX_v 轴, 当逃逸飞行器速度矢量为水平时, 指向上; OX_v, Y_v, Z_v 为右手直角坐标系	略
13	飞船对接坐标系 ox_d, y_d, z_d	飞船与运载火箭对接框几何中心	ox_d ——垂直于运载火箭与飞船对接面, 指向飞船; oy_d ——在对接面内, 指向运载火箭的 III 象限线; ox_d, y_d, z_d 为右手直角坐标系	略

表 9 (续)

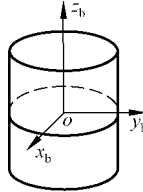
序号	名称	原点	坐标轴或坐标	略图
14	卫星本体坐标系 ox_b, y_b, z_b	星体内某特征点	oz_b ——沿卫星某一特征轴方向; ox_b ——也为卫星某特性轴方向; ox_b, y_b, z_b 为右手直角坐标系	

表 10 坐标系之间的变换公式

原坐标系	变换坐标系	从原坐标系到变换坐标系的变换公式
日心黄道坐标系 O_sXYZ	日心球面黄道坐标系 (M, β, θ)	$M = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}$ $\beta = \arctan \frac{Y}{X}$ (按坐标域取值) $\theta = \arctan \frac{Z}{\sqrt{X^2 + Y^2}}$
	地心黄道坐标系 O_eXYZ	$X_e = X_s - X_{\oplus}$ $Y_e = Y_s - Y_{\oplus}$ $Z_e = Z_s - Z_{\oplus}$ 式中: X_s, Y_s, Z_s ——日心黄道坐标系坐标; X_e, Y_e, Z_e ——地心黄道坐标系坐标; $X_{\oplus}, Y_{\oplus}, Z_{\oplus}$ ——地心在日心黄道坐标系中的坐标
历元地心平赤道坐标系 $O_e X_1 Y_1 Z_1$	地心黄道坐标系 $O_e XYZ$	$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \mathbf{M}_1(\epsilon) \cdot \begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \epsilon & \sin \epsilon \\ 0 & -\sin \epsilon & \cos \epsilon \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{bmatrix}$ 式中: ϵ ——黄道与平赤道的夹角
历元地心平赤道坐标系 $O_e X_1 Y_1 Z_1$	地球固连坐标系 $O_e X_2 Y_2 Z_2$	$\begin{bmatrix} X_2 \\ Y_2 \\ Z_2 \end{bmatrix} = [A] \cdot [B] \cdot [C] \cdot [D] \cdot \begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{bmatrix}$ 其中, $[A]$ 、 $[B]$ 、 $[C]$ 、 $[D]$ 分别称为当前时刻极移、自转、章动和岁差矩阵。 极移: $[A] = \mathbf{M}_2 [-x_p(t)] \mathbf{M}_1 [-y_p(t)]$ 自转: $[B] = \mathbf{M}_3 [\theta_G(t)]$ 章动: $[C] = \mathbf{M}_1 [-\epsilon_M(t) - \Delta\epsilon(t)] \mathbf{M}_3 [-\Delta\phi(t)] \mathbf{M}_1 [\epsilon_M(t)]$ 岁差: $[D] = \mathbf{M}_3 [-Z_p(t)] \mathbf{M}_2 [\theta_p(t)] \mathbf{M}_3 [-\xi_p(t)]$ 式中: x_p, y_p ——地极坐标; θ_G ——格林尼治恒星时; ϵ_M ——平黄赤交角; $\Delta\epsilon$ ——交角章动; $\Delta\phi$ ——黄经章动; Z_p, θ_p, ξ_p ——岁差常数

表 10 (续)

原坐标系	变换坐标系	从原坐标系到变换坐标系的变换公式
历元地心平赤道坐标系 $O_e X_1 Y_1 Z_1$	历元地心真赤道惯性坐标系 $O_e X_3 Y_3 Z_3$	$\begin{bmatrix} X_3 \\ Y_3 \\ Z_3 \end{bmatrix} = [A] \cdot [B] \cdot [C] \cdot [D] \cdot \begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{bmatrix}$ <p>其中, [A]、[B]、[C]、[D]分别称为起飞历元时刻极移、自转、章动和岁差矩阵。</p> <p>极移: $[A] = M_2 [-x_p(t_0)] M_1 [-y_p(t_0)]$</p> <p>自转: $[B] = M_3 [\theta_G(t_0)]$</p> <p>章动: $[C] = M_1 [-\epsilon_M(t_0) - \Delta\epsilon(t_0)] M_3 [-\Delta\phi(t_0)] M_1 [\epsilon_M(t_0)]$</p> <p>岁差: $[D] = M_3 [-Z_p(t_0)] M_2 [\theta_p(t_0)] M_3 [-\xi_p(t_0)]$</p> <p>式中:</p> <p>$x_p, y_p$ —— 为地极坐标;</p> <p>θ_G —— 格林尼治恒星时;</p> <p>ϵ_M —— 平黄赤交角;</p> <p>$\Delta\epsilon$ —— 交角章动;</p> <p>$\Delta\phi$ —— 黄经章动;</p> <p>Z_p, θ_p, ξ_p —— 岁差常数</p>
历元地心平赤道坐标系 $O_e X_1 Y_1 Z_1$	历元地心真赤道惯性坐标系 $O_e X_3 Y_3 Z_3$	$\begin{bmatrix} X_3 \\ Y_3 \\ Z_3 \end{bmatrix} = [A] \cdot [B] \cdot [C] \cdot [D] \cdot \begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{bmatrix}$ <p>其中, [A]、[B]、[C]、[D]分别称为起飞历元时刻极移、自转、章动和岁差矩阵。</p> <p>极移: $[A] = M_2 [-x_p(t_0)] M_1 [-y_p(t_0)]$</p> <p>自转: $[B] = M_3 [\theta_G(t_0)]$</p> <p>章动: $[C] = M_1 [-\epsilon_M(t_0) - \Delta\epsilon(t_0)] M_3 [-\Delta\phi(t_0)] M_1 [\epsilon_M(t_0)]$</p> <p>岁差: $[D] = M_3 [-Z_p(t_0)] M_2 [\theta_p(t_0)] M_3 [-\xi_p(t_0)]$</p> <p>式中:</p> <p>$x_p, y_p$ —— 为地极坐标;</p> <p>θ_G —— 格林尼治恒星时;</p> <p>ϵ_M —— 平黄赤交角;</p> <p>$\Delta\epsilon$ —— 交角章动;</p> <p>$\Delta\phi$ —— 黄经章动;</p> <p>Z_p, θ_p 和 ξ_p —— 岁差常数</p>
	地心球面赤道坐标系 (r, α, δ)	$r = \sqrt{X_1^2 + Y_1^2 + Z_1^2}$ $\alpha = \arctan \frac{Y_1}{X_1} \text{ (按坐标域取值)}$ $\delta = \arctan \frac{Z_1}{\sqrt{X_1^2 + Y_1^2}} \text{ (按坐标域取值)}$

表 10 (续)

原坐标系	变换坐标系	从原坐标系到变换坐标系的变换公式
历元地心平赤道坐标系 $O_e X_1 Y_1 Z_1$	地心(第二)轨道坐标系 $O_e x_2 y_2 z_2$	$\begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{bmatrix} = \mathbf{M}_3(\omega) \mathbf{M}_1(i) \mathbf{M}_3(\Omega) \cdot \begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{bmatrix}$ $= \begin{bmatrix} \cos\omega \cos\Omega - \sin\omega \cos i \sin\Omega & \cos\omega \sin\Omega + \sin\omega \cos i \cos\Omega & \sin\omega \sin i \\ -\sin\omega \cos\Omega - \cos\omega \cos i \sin\Omega & -\sin\omega \sin\Omega + \cos\omega \cos i \cos\Omega & \cos\omega \sin i \\ \sin i \sin\Omega & -\sin i \cos\Omega & \cos i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{bmatrix}$ 式中： ω —— 飞行器轨道近地点幅角； Ω —— 飞行器轨道升交点赤经； i —— 飞行器轨道倾角
历元地心真赤道惯性坐标系 $O_e X_3 Y_3 Z_3$	地球固连坐标系 $O_e X_2 Y_2 Z_2$	$\begin{bmatrix} X_2 \\ Y_2 \\ Z_2 \end{bmatrix} = \mathbf{M}_3(\omega_e t) \cdot \begin{bmatrix} X_3 \\ Y_3 \\ Z_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\omega_e t & \sin\omega_e t & 0 \\ -\sin\omega_e t & \cos\omega_e t & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_3 \\ Y_3 \\ Z_3 \end{bmatrix}$ 式中： ω_e —— 地球自转角速度； t —— 从起飞瞬时起算的时间
地球固连坐标系 $O_e X_2 Y_2 Z_2$	地心球面固连坐标系 (r, λ, φ)	$r = \sqrt{X_2^2 + Y_2^2 + Z_2^2}$ $\lambda = \arctan \frac{Y_2}{X_2} \text{ (按坐标域取值)}$ $\varphi = \arctan \frac{Z_2}{\sqrt{X_2^2 + Y_2^2}} \text{ (按坐标域取值)}$
地球固连坐标系 $O_e X_2 Y_2 Z_2$	水平定向坐标系 $o_0 x_s y_s z_s$	$\begin{bmatrix} x_s \\ y_s \\ z_s \end{bmatrix} = \mathbf{M}_1(90^\circ - B) \mathbf{M}_3(90^\circ + \lambda) \cdot \begin{bmatrix} X_2 - (N+h) \cos\lambda \cos B \\ Y_2 - (N+h) \sin\lambda \cos B \\ Z_2 - [N(1-e^2) + h] \sin B \end{bmatrix}$ $= \begin{bmatrix} -\sin\lambda & \cos\lambda & 0 \\ -\cos\lambda \sin B & -\sin\lambda \sin B & \cos B \\ \cos\lambda \cos B & \sin\lambda \cos B & \sin B \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_2 - (N+h) \cos\lambda \cos B \\ Y_2 - (N+h) \sin\lambda \cos B \\ Z_2 - [N(1-e^2) + h] \sin B \end{bmatrix}$ $N = \frac{a_e}{\sqrt{1-e^2} \sin^2 B}$ $e^2 = \frac{a_e^2 - b_e^2}{a_e^2}$ 式中： N —— 卯酉圈(过某点在参考椭球面上的投影又垂直于此点子午线的平面与参考椭球的交线)曲率半径； a_e —— 地球赤道半径； b_e —— 地球极半径； e —— 地球扁率； λ —— 水平定向坐标系原点的大地经度； B —— 水平定向坐标系原点的大地纬度； h —— 水平定向坐标系原点的大地高

表 10 (续)

原坐标系	变换坐标系	从原坐标系到变换坐标系的变换公式
地心(第一)轨道坐标系 $o_e x_1 y_1 z_1$	地心(第二)轨道坐标系 $o_e x_2 y_2 z_2$	$\begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{bmatrix} = \mathbf{M}_3(\omega) \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\omega & \sin\omega & 0 \\ -\sin\omega & \cos\omega & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix}$ <p>式中: ω——飞行器轨道的近地点幅角</p>
地心(第一)轨道坐标系 $o_e x_1 y_1 z_1$	地心(第三)轨道坐标系 $o_e x_3 y_3 z_3$	$\begin{bmatrix} x_3 \\ y_3 \\ z_3 \end{bmatrix} = \mathbf{M}_3(u) \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos u & \sin u & 0 \\ -\sin u & \cos u & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix}$ <p>$u = \omega + f$ 式中: f——飞行器的真近点角; ω——飞行器轨道的近地点幅角</p>
地心(第二)轨道坐标系 $o_e x_2 y_2 z_2$	航天器轨道坐标系 $o x_0 y_0 z_0$	$\begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} = \mathbf{M}_2[-(90^\circ + f)] \mathbf{M}_1(-90^\circ) \cdot \begin{bmatrix} x_2 - r_0 \cos f \\ y_2 - r_0 \sin f \\ z_2 \end{bmatrix}$ $= \begin{bmatrix} -\sin f & \cos f & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ -\cos f & -\sin f & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_2 - r_0 \cos f \\ y_2 - r_0 \sin f \\ z_2 \end{bmatrix}$ <p>式中: r_0——飞行器到地心的距离; f——飞行器的真近点角</p>
水平定向坐标系 $o_0 x_s y_s z_s$	球面水平定向坐标系 (S, A, E)	$S = \sqrt{x_s^2 + y_s^2 + z_s^2}$ $A = \arctan \frac{x_s}{y_s} \text{ (按坐标域取值)}$ $E = \arctan \frac{z_s}{\sqrt{x_s^2 + y_s^2}}$
航天器轨道坐标系 $o x_0 y_0 z_0$	航天器直角坐标系 $o x_{s0} y_{s0} z_{s0}$	$\begin{bmatrix} x_{s0} \\ y_{s0} \\ z_{s0} \end{bmatrix} = \mathbf{M}_1(\gamma_1) \mathbf{M}_3(\psi_1) \mathbf{M}_2(\varphi_1) \cdot \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix}$ $= \begin{bmatrix} \cos\psi_1 \cos\varphi_1 & \sin\psi_1 & -\cos\psi_1 \sin\varphi_1 \\ -\cos\gamma_1 \sin\psi_1 \cos\varphi_1 + \sin\gamma_1 \sin\varphi_1 & \cos\psi_1 \cos\gamma_1 & \cos\gamma_1 \sin\psi_1 \sin\varphi_1 + \sin\gamma_1 \cos\varphi_1 \\ \sin\gamma_1 \sin\psi_1 \cos\varphi_1 + \cos\gamma_1 \sin\varphi_1 & -\cos\psi_1 \sin\gamma_1 & -\sin\gamma_1 \sin\psi_1 \sin\varphi_1 + \cos\gamma_1 \cos\varphi_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix}$ <p>式中: φ_1——航天器的俯仰角; ψ_1——航天器的偏航角; γ_1——航天器的滚动角</p>

表 10 (续)

原坐标系	变换坐标系	从原坐标系到变换坐标系的变换公式
大地坐标系 (h, L, B)	地球固连坐标系 $O_e X_2 Y_2 Z_2$	$X_2 = (N+h) \cos B \cos L$ $Y_2 = (N+h) \cos B \sin L$ $Z_2 = [N(1-e^2) + h] \sin B$ 式中： N —— 卯酉圈曲率半径； e —— 地球扁率
	地心球面固连坐标系 (r, λ, φ)	$r = \sqrt{(N+h)^2 \cos^2 B + [N(1-e^2) + h]^2 \sin^2 B}$ $\lambda = L$ $\varphi = \arctan\left(\frac{N(1-e^2) + h}{N+h} \tan B\right)$ 式中： N —— 卯酉圈曲率半径； e —— 地球扁率
发射坐标系 $ox_1 y_1 z_1$	地球固连坐标系 $O_e X_2 Y_2 Z_2$	$\begin{bmatrix} X_2 \\ Y_2 \\ Z_2 \end{bmatrix} = \mathbf{A} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + \mathbf{B}$ $\mathbf{A} = M_3(90^\circ - \lambda_0) M_1(-B_0) M_2(90^\circ + A_0)$ $= \begin{bmatrix} -\cos\lambda_0 \sin B_0 \cos A_0 - \sin\lambda_0 \sin A_0 & \cos\lambda_0 \cos B_0 & \cos\lambda_0 \sin B_0 \sin A_0 - \sin\lambda_0 \cos A_0 \\ -\sin\lambda_0 \sin B_0 \cos A_0 + \cos\lambda_0 \sin A_0 & \sin\lambda_0 \cos B_0 & \sin\lambda_0 \sin B_0 \sin A_0 + \cos\lambda_0 \cos A_0 \\ \cos B_0 \cos A_0 & \sin B_0 & -\cos B_0 \sin A_0 \end{bmatrix}$ $\mathbf{B} = \mathbf{A} \begin{bmatrix} R_{0x} \\ R_{0y} \\ R_{0z} \end{bmatrix}$ $R_{0x} = -R_0 \sin\mu \cos A_0$ $R_{0y} = R_0 \cos\mu$ $R_{0z} = R_0 \sin\mu \sin A_0$ $\mu = B_0 - \varphi_0$ 式中： 矩阵 \mathbf{A} —— 坐标轴的转动矩阵； 矩阵 \mathbf{B} —— 原点变换后的坐标值 (均不考虑垂线偏差)； A_0 —— 发射瞄准方向的大地方位角； λ_0 —— 发射点大地经度； B_0 —— 发射点大地纬度； φ_0 —— 发射点地心纬度； R_0 —— 发射点到地心的距离
速度坐标系 $ox_v y_v z_v$	运载火箭箭体坐标系 $ox_1 y_1 z_1$	$\begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix} = \mathbf{M}_3(\alpha) \mathbf{M}_2(\beta) \cdot \begin{bmatrix} x_v \\ y_v \\ z_v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\alpha \cos\beta & \sin\alpha & -\cos\alpha \sin\beta \\ -\sin\alpha \cos\beta & \cos\alpha & \sin\alpha \sin\beta \\ \sin\beta & 0 & \cos\beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_v \\ y_v \\ z_v \end{bmatrix}$ 式中： α —— 攻角, 运载火箭速度在火箭纵对称面上的投影与 ox_1 轴之间的夹角； β —— 侧滑角, 运载火箭速度与火箭纵对称面的夹角

表 10 (续)

原坐标系	变换坐标系	从原坐标系到变换坐标系的变换公式
速度坐标系 $ox_v y_v z_v$	发射坐标系 $oxyz$	$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \mathbf{M}_3(-\theta)\mathbf{M}_2(-\sigma)\mathbf{M}_1(-\nu) \cdot \begin{bmatrix} x_v \\ y_v \\ z_v \end{bmatrix}$ $= \begin{bmatrix} \cos\theta\cos\sigma & \cos\theta\sin\sigma\sin\nu - \sin\theta\cos\nu & \cos\theta\sin\sigma\cos\nu + \sin\theta\sin\nu \\ \sin\theta\cos\sigma & \sin\theta\sin\sigma\sin\nu + \cos\theta\cos\nu & \sin\theta\sin\sigma\cos\nu - \cos\theta\sin\nu \\ -\sin\sigma & \cos\sigma\sin\nu & \cos\sigma\cos\nu \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_v \\ y_v \\ z_v \end{bmatrix}$ 式中： θ ——弹道倾角，速度矢量在 oxy 平面上投影与 ox 轴之间的夹角； σ ——弹道偏角，速度矢量与 oxy 平面之间的夹角； ν ——倾侧角， oy_v 轴绕 ox_v 轴从 oxy 平面转过的角度 (为第二组欧拉角)
运载火箭箭体坐标系 $ox_1 y_1 z_1$	发射坐标系 $oxyz$	$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \mathbf{M}_3(-\varphi)\mathbf{M}_2(-\psi)\mathbf{M}_1(-\gamma) \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix}$ $= \begin{bmatrix} \cos\varphi\cos\psi & -\sin\varphi\cos\gamma + \cos\varphi\sin\psi\sin\gamma & \sin\varphi\sin\gamma + \cos\varphi\sin\psi\cos\gamma \\ \sin\varphi\cos\psi & \cos\varphi\cos\gamma + \sin\varphi\sin\psi\sin\gamma & -\cos\varphi\sin\gamma + \sin\varphi\sin\psi\cos\gamma \\ -\sin\psi & \cos\psi\sin\gamma & \cos\psi\cos\gamma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix}$ 式中： φ ——俯仰角； ψ ——偏航角； γ ——滚动角 (为第二组欧拉角)
逃逸飞行器发射坐标系 $OXYZ$	逃逸飞行器质心坐标系 $OX_c Y_c Z_c$	$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix} = \mathbf{T}_{e0} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_{e0} \\ Y_{e0} \\ Z_{e0} \end{bmatrix}$ $\mathbf{T}_{e0} = \mathbf{M}_1(\gamma)\mathbf{M}_3(\varphi)\mathbf{M}_2(\psi)$ $= \begin{bmatrix} \cos\varphi\cos\psi & \sin\varphi & -\cos\varphi\sin\psi \\ -\sin\varphi\cos\psi\cos\gamma + \sin\psi\sin\gamma & \cos\varphi\cos\gamma & \sin\varphi\sin\psi\cos\gamma + \cos\psi\sin\gamma \\ \sin\varphi\cos\psi\sin\gamma + \sin\psi\cos\gamma & -\cos\varphi\sin\gamma & -\sin\varphi\sin\psi\sin\gamma + \cos\psi\cos\gamma \end{bmatrix}$ 式中： X_{e0} 、 Y_{e0} 、 Z_{e0} ——发射点在逃逸飞行器质心坐标系中的坐标； φ ——俯仰角； ψ ——偏航角； γ ——滚动角 (为第一组欧拉角)
逃逸飞行器速度坐标系 $OX_v Y_v Z_v$	逃逸飞行器质心坐标系 $OX_c Y_c Z_c$	$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix} = \mathbf{T}_{cv} \begin{bmatrix} X_v \\ Y_v \\ Z_v \end{bmatrix}$ $\mathbf{T}_{cv} = \mathbf{M}_3(\alpha)\mathbf{M}_2(\beta) = \begin{bmatrix} \cos\alpha\cos\beta & \sin\alpha & -\cos\alpha\sin\beta \\ -\sin\alpha\cos\beta & \cos\alpha & \sin\alpha\sin\beta \\ \sin\beta & 0 & \cos\beta \end{bmatrix}$ 式中： α ——攻角； β ——侧滑角

表 10 (续)

原坐标系	变换坐标系	从原坐标系到变换坐标系的变换公式
逃逸飞行器质心坐标系 $Ox_c Y_c Z_c$	逃逸飞行器体坐标系 $Ox_b Y_b Z_b$	$\begin{bmatrix} X_b \\ Y_b \\ Z_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_{cb} \\ Y_{cb} \\ Z_{cb} \end{bmatrix}$ 式中： X_{cb} 、 Y_{cb} 、 Z_{cb} ——逃逸飞行器质心在逃逸飞行器体坐标系中的坐标
逃逸飞行器体坐标系 $Ox_b Y_b Z_b$	火箭对接坐标系 $ox_d y_d z_d$	$\begin{bmatrix} x_d \\ y_d \\ z_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_b \\ Y_b \\ Z_b \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_{bd} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$ 式中： X_{bd} ——逃逸飞行器体坐标系原点与火箭对接坐标系原点沿运载火箭纵轴方向的距离
J2000.0 地心平赤道坐标系 $O_c X_1 Y_1 Z_1$	J2000.0 月心坐标系 $O_m X_1 Y_1 Z_1$	$\begin{aligned} X_1^m &= X_1 - X_m \\ Y_1^m &= Y_1 - Y_m \\ Z_1^m &= Z_1 - Z_m \end{aligned}$ 式中： X_m 、 Y_m 、 Z_m ——月心在 J2000.0 地心平赤道坐标系中的坐标
J2000.0 月心坐标系 $O_m X_1 Y_1 Z_1$	月心赤道坐标系 $O_m X_2 Y_2 Z_2$	$\begin{bmatrix} X_2 \\ Y_2 \\ Z_2 \end{bmatrix} = \mathbf{M}_1 [90^\circ - (\delta + \Delta\delta)] \mathbf{M}_3 [90^\circ + (\alpha + \Delta\alpha)] \cdot \begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{bmatrix}$ $= \begin{bmatrix} -\sin(\alpha + \Delta\alpha) & \cos(\alpha + \Delta\alpha) & 0 \\ -\cos(\alpha + \Delta\alpha) \sin(\delta + \Delta\delta) & -\sin(\alpha + \Delta\alpha) \sin(\delta + \Delta\delta) & \cos(\delta + \Delta\delta) \\ \cos(\alpha + \Delta\alpha) \cos(\delta + \Delta\delta) & \sin(\alpha + \Delta\alpha) \cos(\delta + \Delta\delta) & \sin(\delta + \Delta\delta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{bmatrix}$ 式中： α —— 历元时刻月球北天极的赤经； $\Delta\alpha$ —— 月球天极的赤经变化量； δ —— 历元时刻月球北天极的赤纬； $\Delta\delta$ —— 月球北天极的赤纬变化量
	月固平地球/极轴坐标系 (IAU/IAG2000) $O_m X_3 Y_3 Z_3$	$\begin{bmatrix} X_3 \\ Y_3 \\ Z_3 \end{bmatrix} = \mathbf{M}_3(\omega + \Delta\omega) \mathbf{M}_1 [90^\circ - (\delta + \Delta\delta)] \mathbf{M}_3 [90^\circ + (\alpha + \Delta\alpha)] \cdot \begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{bmatrix}$ 式中： α —— 历元时刻月球北天极的赤经； $\Delta\alpha$ —— 月球天极的赤经变化量； δ —— 历元时刻月球北天极的赤纬； $\Delta\delta$ —— 月球北天极的赤纬变化量； $\omega + \Delta\omega$ —— 历元地球平赤道与月球真赤道交线(指向升交点方向)与地月连线在月球真赤道平面内投影(指向地球方向)的夹角

表 10 (续)

原坐标系	变换坐标系	从原坐标系到变换坐标系的变换公式
J2000.0 地心平赤道坐标系 $O_c X_1 Y_1 Z_1$	J2000.0 行星坐标系 $O_p X_1 Y_1 Z_1$	$X_1^p = X_1 - X_p$ $Y_1^p = Y_1 - Y_p$ $Z_1^p = Z_1 - Z_p$ 式中： X_1, Y_1, Z_1 ——J2000.0 地心平赤道坐标系坐标； X_1^p, Y_1^p, Z_1^p ——J2000.0 行星坐标系坐标； X_p, Y_p, Z_p ——行星中心在 J2000.0 地心平赤道坐标系中的坐标
日心黄道坐标系 $O_s XYZ$	行星黄道坐标系 $O_p XYZ$	$X_p = X_s - X_{\oplus}$ $Y_p = Y_s - Y_{\oplus}$ $Z_p = Z_s - Z_{\oplus}$ 式中： X_s, Y_s, Z_s ——日心黄道坐标系坐标； X_p, Y_p, Z_p ——行星黄道坐标系坐标； $X_{\oplus}, Y_{\oplus}, Z_{\oplus}$ ——行星中心在日心黄道坐标系中的坐标
J2000.0 行星坐标系 $O_p X_1 Y_1 Z_1$	行星固连坐标系 $O_p X_2 Y_2 Z_2$	$\begin{bmatrix} X_2 \\ Y_2 \\ Z_2 \end{bmatrix} = \mathbf{M}_3(W) \cdot \mathbf{M}_1(90^\circ - \delta) \cdot \mathbf{M}_3(90^\circ + \alpha) \begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{bmatrix}$ 式中： α ——行星北天极赤经； δ ——行星北天极赤纬； W ——行星本初子午线相对历元时刻的自转角度