

# QJ

## 中华人民共和国航天行业标准

FL 1610

QJ 20124—2012

### 航天地球重力场模型应用指南

Guideline to application of space Earth gravity field model

2013—01—04 发布

2013—05—01 实施

国家国防科技工业局 发布



## 前 言

本标准的附录A、附录B和附录C为资料性附录。

本标准由中国航天科技集团公司提出。

本标准由中国航天标准化研究所归口。

本标准起草单位：中国航天标准化研究所、中国航天科技集团公司第五研究院总体部、中国航天科技集团公司第五研究院总装与环境工程部。

本标准主要起草人：杨晓明、张小达、朱文明、童靖宇、冯铁慧。

## 引 言

重力场是航天器考虑的基本空间环境之一。对于航天器，正确地分析地球重力环境和使用重力场模型是飞行任务计划和设计的必要部分。地球重力场影响航天器轨道和轨迹；影响制导、导航、控制方面的稳定性和控制、重力扭矩；影响推进方面的燃料消耗率；影响结构方面的推进剂预算；影响遥测、跟踪与通信方面可能引起的跟踪误差。

自从出现人造地球卫星，人们开始考虑更为精确的地球重力场，编制重力场模型。到目前为止，国际上大约有 19 个系列的 100 多个主要的重力场模型。不同机构编制的模型形成了不同系列，每个系列的模型是根据某一组卫星数据或组合不同来源的数据发展而成，模型的特点各不相同。面对众多背景和特点各不相同的模型，型号研制人员不可能一一了解掌握，往往只选用熟悉的模型，或者不提出附加要求地使用设计工具自带的模型。

重力场模型的数据来源有三类：卫星数据（卫星测高数据和卫星跟踪卫星数据）、大地测量地面数据（陆地、航空和气球等）和组合数据（组合模型和组合数据）。重力场模型的阶次从 8 到提高到 2160，并且阶次还在不断地提高。360 阶的模型系数超过 130000 个，精度优于 1cm。

欧洲空间标准化合作组织标准 ECSS-E-ST-10-04C（2008 年）《空间工程 空间环境》中，第四章“重力”的内容是重力场模型使用指南是本标准内容的主要来源。美国军用标准 MIL-STD-1809（1991 年）《航天器空间环境》5.8“重力场”选用了《世界大地坐标系 1984》（WGS 84）。NASA 使用《地球重力模型 96》（EGM96），它是美国宇航局哥达德空间飞行中心（GSFC）、国家制图局（NIMA）、俄亥俄大学联合制定的，目前地球重力模型(EGM)已经发展到 EGM2008。

# 航天地球重力场模型应用指南

## 1 范围

本标准规定了重力场模型公式、第三体引力、潮汐效应、重力场模型一般使用要求、重力场模型的选择和应用、重力场模型的背景信息等。

本标准适用于航天器、运载火箭、导弹等的轨道设计、分析、计算，制导、导航与控制分系统的稳定性设计，燃料估算，遥测、跟踪与通信分系统的跟踪估算等。

## 2 缩略语

下列缩略语适用于本标准：

IERS——International Earth Rotation Service，国际地球自转服务局。

## 3 概述

### 3.1 牛顿万有引力定律

任意两个物体的相互吸引力与两个物体质量的乘积成正比，与两个物体之间距离的平方成反比，计算见公式（1）。

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2} \dots\dots\dots(1)$$

式中：

$F$  —— 引力，单位为千克米每秒每秒（ $\text{kg}\cdot\text{m}/\text{s}^2$ ）；

$G$  ——  $(6.6726\pm 0.0009)\times 10^{-11}\text{m}^3\text{kg}^{-1}\text{s}^{-2}$ 万有引力常数，单位为立方米每千克每秒每秒（ $\text{m}^3\text{kg}^{-1}\text{s}^{-2}$ ）；

$m_1$ 、 $m_2$  —— 两个物体的点质量，单位为千克（ $\text{kg}$ ）；

$r$  —— 两个物体之间的距离，单位为米（ $\text{m}$ ）。

当两个物体被认为是点质量时，是引力的最简单情况。两个物体的相对距离 $r$ 与物体的尺寸相比足够大时，物体的形状可以忽略不计。两个球体质量分布均匀时，对于物体之外的所有位置，牛顿定律也是正确的。

当需要精确地分析两个物体的相互引力时，应考虑第三体（如月球、太阳）的摄动和潮汐影响。

### 3.2 重力场模型公式

作用在点质量上的重力加速度等于物体势函数 $U$ 的梯度。相对于等位势面满足拉普拉斯方程式，见公式（2）：

$$\nabla^2 U = 0 \dots\dots\dots(2)$$

根据公式（3）通过递归算法有效地计算相应的摄动加速度：

$$\ddot{\vec{r}} = \nabla U \dots\dots\dots(3)$$

式中：

$\ddot{\vec{r}}$  —— 位置矢量的2次时间导数，单位为米每秒每秒（ $\text{m}/\text{s}^2$ ）。

求解偏微分方程 $U$ 的典型方法是用次数展开形式，根据球谐函数，一个位置的 $U$ 用球坐标 $r$ 、 $\lambda$ 、 $\varphi$ 定义，见公式（4）：

$$U = \frac{GM}{r} \left\{ 1 + \sum_{l=2}^N \left( \frac{a_e}{r} \right)^l \sum_{m=0}^l [C_{lm} \cos(m\lambda) + S_{lm} \sin(m\lambda)] P_{lm}(\sin \varphi) \right\} \dots\dots\dots(4)$$

式中：

$GM = \mu$  —— 地球引力常数 ( $M$ 是地球质量)，对于EIGEN-GL04C模型， $\mu = 3,98604415 \times 10^{14}$ ，单位为立方米每秒每秒 ( $\text{m}^3 \text{s}^{-2}$ )；

$r$  —— 地心到卫星的半径距离，单位为米 (m)；

$N$  —— 最大开展阶次；

$l$  —— 某个谐函数的阶数；

$a_e$  —— 平均地球半径，对于EIGEN-GL04C模型， $a_e = 6378136460\text{m}$ ，单位为米 (m)；

$m$  —— 某个谐函数的次数；

$C_{lm}$ 、 $S_{lm}$  —— 用于确定某个谐函数幅值和相位的系数；

$P_{lm}$  ——  $l$  阶、 $m$  次的第一类综合勒让德函数；参考文献1中这些函数的循环关系是可以利用的；

$\lambda$  —— 卫星下方点的大地经度；

$\varphi$  —— 卫星下方点的大地纬度。

重力场模型公式主要采用了  $GM$ 、 $a_e$  和一组模型系数  $C_{lm}$ 、 $S_{lm}$  等数值。使用重力场模型，可以由公式 (4) 势函数  $U$  得到重力加速度，例如可以得到航天器轨道的数值积分值。地球固定坐标系使用笛卡尔坐标系  $x$ 、 $y$ 、 $z$ ，对公式 (4) 的三个相应方向求偏导数可以进行回归计算 (见参考文献1)。

为了限制高阶次的数值范围，一般根据公式 (5) 得到归一化的模型系数  $C_{lm}$ 、 $S_{lm}$ 。

$$\begin{cases} \overline{C_{lm}} \\ \overline{S_{lm}} \end{cases} = \sqrt{\frac{(l+m)!}{k(2l+1)(l-m)!}} \begin{cases} C_{lm} \\ S_{lm} \end{cases} \quad k = \begin{cases} 1 & \text{当 } m = 0 \text{ 时} \\ 2 & \text{当 } m \neq 0 \text{ 时} \end{cases} \dots\dots\dots(5)$$

将勒让德函数  $P_{lm}(\sin \varphi)$  归一化，即取公式 (5) 平方根的倒数。

### 3.3 第三体重力

当第三体摄动作用时，其被太阳及其行星的引力吸引可以认为是点质量吸引。需要知道物体质量和位置对其的影响。通常对于地球卫星的轨道计算，考虑金星、火星、木星和土星的行星重力就足够了。其他行星太远，对于地球轨道卫星来说没有任何意义。

### 3.4 潮汐效应

卫星的重力势只用作用在卫星上重力加速度的静态部分表示。但是，对于精确的用户，还需要考虑与潮汐相关的附加重力。不同潮汐效应的区别 (见参考文献1) 如下：

- a) 固体地球潮汐：在太阳和月亮引力作用下引起地球的变形，导致重力势系数的复杂变化；
- b) 海洋潮汐：在太阳和月亮潮汐作用下引起海水的位移。海水的位移以复杂变化形式不断改变重力势；
- c) 永久性潮汐：固体地球潮汐和海洋潮汐非零常数的部分。但是，对于静态重力势不考虑永久性潮汐；
- d) 轴潮汐：地球绕地轴旋转运动产生的离心效应引起瞬态的旋转轴运动。

## 4 模型选择和应用要求

### 4.1 重力模型的一般要求

重力模型的一般要求如下：

- a) 航天器轨道的预示和确定应考虑重力场的影响；
- b) 不同重力来源及其误差应符合航天器轨道和（或）姿态精度的要求。至少考虑非重力效应引起的摄动加速度同量级的重力摄动；
- c) 重力模型的精度量级应符合位置精度和航天器中心体的方向精度。

注：当某阶或某次接近地面跟踪往复周期的整数倍时，球谐系数可能引起共振效应。对于已知往复性的轨道，推荐使用离散共振阶次，该阶次通常落在被截断的展开次数之外。

## 4.2 重力场模型的选择与应用要求

### 4.2.1 重力场模型的选择要求

重力场模型的选择要求如下：

- a) 选用已经过证明是合理可用的模型；
- b) 当不符合 a) 的要求时，推荐使用的地球轨道重力场模型是 EIGEN-GLO4C（见参考文献 1），也可参考附录 A、附录 B 和附录 C 的信息选择合适的模型。

注：EIGEN-GLO4C模型的空间经纬度分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$ （对应阶 $\times$ 次=360 $\times$ 360）。

### 4.2.2 重力场模型参数的应用要求

重力场模型参数的应用要求如下：

- c) 重力场潮汐效应数据和地球方位参数在 IERS 中给出（见参考文献 2）；
- d) 建议使用参考文献 3 中给出的第三体重力摄动行星历数据 DE-405 和月球历数据 LE-405；
- e) 建议使用 IERS 技术注解 32 中描述的 2003 标准行星质量数值（见参考文献 2）。

附录 A

(资料性附录)

重力场信息

A.1 重力场模型背景

根据重力场球谐函数幅值 $J_{lm}$ 和相位角 $\lambda_{lm}$ 公式(4)重写为公式(A.1)：

$$U = \frac{GM}{r} \left\{ 1 - \sum_{l=2}^N \left( \frac{a_e}{r} \right)^l \sum_{m=0}^l J_{lm} \cos(m[\lambda - \lambda_{lm}]) P_{lm}(\sin \phi) \right\} \dots\dots\dots (A.1)$$

式中 $J_{lm}$ ,  $\lambda_{lm}$ 和 $C_{lm}$ ,  $S_{lm}$ 由公式(A.2)、公式(A.3)、公式(A.4)和公式(A.5)给出：

$$C_{lm} = -J_{lm} \cos(m \lambda_{lm}) \dots\dots\dots (A.2)$$

$$S_{lm} = -J_{lm} \sin(m \lambda_{lm}) \dots\dots\dots (A.3)$$

$$J_{lm} = \sqrt{C_{lm}^2 + S_{lm}^2} \dots\dots\dots (A.4)$$

$$\lambda_{lm} = \frac{2}{m} \arctan \left( \frac{S_{lm}}{J_{lm} + C_{lm}} \right) \dots\dots\dots (A.5)$$

当 $m \neq l$ 时,  $C_{lm}$ ,  $S_{lm}$ 称为田谐系数。他们将地球表面分成山丘和峡谷形状的格子, 幅值和相位由相关系数 $J_{lm}$ ,  $\lambda_{lm}$ 确定。

当 $l = m$ 时, 函数 $P_{lm} = 1, 0$ 。这些项称为扇谐系数。他们将球面按经线分成扇形, 就像篮球的花瓣。

当 $m = 0$ 时, 仅仅保留了 $C_{l0} = -J_{l0}$ 项(此时,  $J_{l0}$ 是最简单的 $J_l$ ), 称为带谐系数。他们将球面分成纯依赖纬度的山丘和峡谷环形带, 地球的扁圆( $J_2$ )是主要的贡献。 $J_2$ 反映了在地球离心力与引力的影响下, 地球旋转与弹性平衡的响应。对于EIGEN-GL04C模型, 地球椭圆的结果是赤道半径为 $a_e = 6378136 \text{ m}$ (对于选择重力势模型可能变化很微小), 两极半径为 $b_e = 6356752 \text{ m}$ (对于选择重力势模型可能变化很微小), 扁率为 $f_e = (a_e - b_e) / a_e = 1 / 298,257$ 。

按照习惯, 球体的中心引力项与质量分布是一致的, 即 $C_{00} = -J_{00} = 1$ 。如果质量中心与物体中心中心坐标一致, 那么,  $C_{10} = C_{11} = S_{11} = 0$ 。如果物体固定的坐标轴也与惯性主轴一致, 那么,  $C_{21} = S_{21} = S_{22} = 0$ 。

为了发展重力势模型, 需要直接或间接测量重力加速度, 评估模型的一系列系数( $GM$ 、 $a_e$ 、 $C_{lm}$ ,  $S_{lm}$ ), 至少在一个区域内应认为是以充分的、大量测量数据为基础。直接测量重力势是困难的, 典型的直接测量包括用高敏感重力梯度仪测量加速度梯度。间接测量重力势可以从地球轨道卫星的跟踪数据精确的获得。由于从陆地或海面收集全球重力测量是很困难的, 在出现人造卫星之前, 没有相关的全球重力模型, 而仅有很少几阶次项的, 精度不高的模型。

由于三颗重力场专用卫星(CHAMP、GRACE和GOCE)任务, 重力场模型在2000年出现了革命性的发展。这三颗卫星使用了精确的GPS全球跟踪, 进行了连续的、高质量的轨道测定, 并直接测量了重力加速度。这些重力场专用任务基本上使人们放弃了早期的重力场模型。360×360阶次分辨率(在地球表面每块大约1°×1°, 分辨率在0~100 km), 只有GRACE模型被证明好于任何早期组合模型, 即使这些模型积累了以前30年的所有卫星数据。GRACE模型足以研究重力场随时间的变化性, 例如由于季节变化引起水质量的流动。

A.2 使用指南

每一颗卫星重要位置全阶次360 × 360重力场模型评价时不需要进行实际的计算。扩展系数截断程度，可以根据选择所需的卫星轨道根据两个基本方面的观察进行适当的局部解释。

第一个基本方面的观察是公式 (A.1) 中  $(a_e/r)^l$  项和公式 (4) 导出的重力场轨道随半径  $r$  增加而迅速衰减。所以，重力势的细节，随高度的增加越来越不重要，或者说，地球迅速转到点质量。

第二个基本方面的观察是解释展开次数总可以安全地截断阶  $l$ ，被截去部分的贡献的数量级低于模型自身的固有噪声。

考虑到这些方面的观察，适当截断阶可以确定基本的科拉定律。为了说明，举一个选择适当截断阶  $l$  的例子。GNSS星座的轨道高度大约是地球赤道半径  $a_e$  的4倍（例如高度  $H \approx 25000$  km）。

理论上，展开  $N$  阶在模型中随重力势表面精确变化是无限的。实践上，最大阶是有限的。这导致了展开次数的截断误差和重力加速度的量化误差。为了获得截断效应的影响，科拉采用经验方法用公式 (A.6) 表达了归一化展开系数的量级，阶  $l$  函数如下：

$$\bar{C}_{lm}, \bar{S}_{lm} = \frac{10^{-5}}{l^2} \dots\dots\dots (A.6)$$

使用本方法进行评估，得出非常精确的360阶次或更高的展开阶次。

在25000 km高度，随着阶  $l$  的增加，根据科拉定律，在该阶谐分量中的信号强度按照该阶谐的衰减因子  $(a_e/r)^l$  以及两者的乘积表示在相关轨道高度上剩余信号的强度。25000 km高度轨道的阶指数衰减见表A.1。

表 A.1 25000 km 高度轨道的阶指数衰减

阶 $l$ (公式符号表示)	本阶科拉信号的权重	$H=25000$ km 的衰减因子	$H=25000$ km 的残余信号权重
2	$2,500 \times 10^{-6}$	$6,250 \times 10^{-2}$	$1,563 \times 10^{-7}$
3	$1,111 \times 10^{-6}$	$1,563 \times 10^{-2}$	$1,736 \times 10^{-8}$
4	$6,250 \times 10^{-7}$	$3,906 \times 10^{-3}$	$2,441 \times 10^{-9}$
5	$4,000 \times 10^{-7}$	$9,766 \times 10^{-4}$	$3,906 \times 10^{-10}$
6	$2,778 \times 10^{-7}$	$2,441 \times 10^{-4}$	$6,782 \times 10^{-11}$
7	$2,041 \times 10^{-7}$	$6,104 \times 10^{-5}$	$1,246 \times 10^{-11}$
8	$1,563 \times 10^{-7}$	$1,526 \times 10^{-5}$	$2,384 \times 10^{-12}$
9	$1,235 \times 10^{-7}$	$3,815 \times 10^{-6}$	$4,710 \times 10^{-13}$
10	$1,000 \times 10^{-7}$	$9,537 \times 10^{-7}$	$9,537 \times 10^{-14}$
12	$6,944 \times 10^{-8}$	$5,960 \times 10^{-8}$	$4,139 \times 10^{-15}$
15	$4,444 \times 10^{-8}$	$9,313 \times 10^{-10}$	$4,139 \times 10^{-17}$
20	$2,500 \times 10^{-8}$	$9,095 \times 10^{-13}$	$2,274 \times 10^{-20}$
50	$4,000 \times 10^{-9}$	$7,889 \times 10^{-31}$	$3,155 \times 10^{-39}$
100	$1,000 \times 10^{-9}$	$6,223 \times 10^{-61}$	$6,223 \times 10^{-70}$
360	$7,716 \times 10^{-11}$	$1,813 \times 10^{-217}$	$1,399 \times 10^{-227}$

360 × 360阶固有噪声量级可以用  $l = 360$ , 即  $7.7 \times 10^{-11}$  的信号强度近似。

表A.1的最后一列，在25000 km 轨道高度上已经减少了低于模型噪声量级的模型幅值的阶数阶8

的项，出现了衰减效应。

科拉定律是合理的近似值，也是精确值。而不是使用的估计的 $8 \times 8$ 分辨率。可以选择使用GPS轨道 $12 \times 12$ 分辨率，由于评估 $12 \times 12$ 比起 $360 \times 360$ 模型价值不高。

上述选择过程适用于截断阶，而不计算卫星轨道运动的位置情况，加上绕地球旋转分量，导致在某个谐分量上卫星连续产生共振情况。

对于地球卫星轨道的卫星，潮汐的产生仅与太阳和月球相关，得到以下主要结论：

- a) 月球潮汐效应比太阳明显，由于距离的影响比质量的影响更大；
- b) 主要重力场谐摄动是带谐系数 $J_2$ ，量级为 $10^{-3}$ ，次要重力场的量级为 $10^{-6}$ 或更小。因此，当重力场略去阶2（地球仅考虑为扁圆）或阶1（地球仅考虑为中心体）时，潮汐效应最好可以忽略。因此，当重力场模型谐摄动等于或大于阶3时，由日月引力引起潮汐效应是不能忽略的。

阶次到 $8 \times 8$ 的EIGEN-GLO4C模型系数见表A.2。

EIGEN-GLO4C放大的大地水准面的图形表示见图A.1。

表 A.2 阶次到  $8 \times 8$  的 EIGEN-GLO4C 模型系数

—	$m = 0$	1	2	3	4	5	6	7	8
$l = 0$	1,00 0,00								
1	0,00 0,00	0,00 0,00							
2	$-4,84 \times 10^{-4}$ 0,00	$-2,55 \times 10^{-10}$ $1,44 \times 10^{-9}$	$2,44 \times 10^{-6}$ $-1,40 \times 10^{-6}$				C-系数 S-系数		
3	$9,57 \times 10^{-7}$ 0,00	$2,03 \times 10^{-6}$ $2,48 \times 10^{-7}$	$9,05 \times 10^{-7}$ $-6,19 \times 10^{-7}$	$7,21 \times 10^{-7}$ $1,41 \times 10^{-6}$					
4	$5,40 \times 10^{-7}$ 0,00	$-5,36 \times 10^{-7}$ $-4,74 \times 10^{-7}$	$3,51 \times 10^{-7}$ $6,62 \times 10^{-7}$	$9,91 \times 10^{-7}$ $-2,01 \times 10^{-7}$	$-1,88 \times 10^{-7}$ $3,09 \times 10^{-7}$				
5	$6,87 \times 10^{-8}$ 0,00	$-6,29 \times 10^{-8}$ $-9,44 \times 10^{-8}$	$6,52 \times 10^{-7}$ $-3,23 \times 10^{-7}$	$-4,52 \times 10^{-7}$ $-2,15 \times 10^{-7}$	$-2,95 \times 10^{-7}$ $4,98 \times 10^{-8}$	$1,75 \times 10^{-7}$ $-6,69 \times 10^{-7}$			
6	$-1,50 \times 10^{-7}$ 0,00	$-7,59 \times 10^{-8}$ $2,65 \times 10^{-8}$	$4,87 \times 10^{-8}$ $-3,74 \times 10^{-7}$	$5,72 \times 10^{-8}$ $8,94 \times 10^{-9}$	$-8,60 \times 10^{-8}$ $-4,71 \times 10^{-7}$	$-2,67 \times 10^{-7}$ $-5,37 \times 10^{-7}$	$9,46 \times 10^{-9}$ $-2,37 \times 10^{-7}$		
7	$9,05 \times 10^{-8}$ 0,00	$2,81 \times 10^{-7}$ $9,51 \times 10^{-8}$	$3,30 \times 10^{-7}$ $9,30 \times 10^{-8}$	$2,50 \times 10^{-7}$ $-2,17 \times 10^{-7}$	$-2,75 \times 10^{-7}$ $-1,24 \times 10^{-7}$	$1,65 \times 10^{-9}$ $1,79 \times 10^{-8}$	$-3,59 \times 10^{-7}$ $1,52 \times 10^{-7}$	$1,52 \times 10^{-9}$ $2,41 \times 10^{-8}$	
8	$4,95 \times 10^{-8}$ 0,00	$2,32 \times 10^{-8}$ $5,89 \times 10^{-8}$	$8,00 \times 10^{-8}$ $6,53 \times 10^{-8}$	$-1,94 \times 10^{-8}$ $-8,60 \times 10^{-8}$	$-2,44 \times 10^{-7}$ $6,98 \times 10^{-8}$	$-2,57 \times 10^{-8}$ $8,92 \times 10^{-8}$	$-6,60 \times 10^{-8}$ $3,09 \times 10^{-7}$	$6,73 \times 10^{-8}$ $7,49 \times 10^{-8}$	$-1,24 \times 10^{-7}$ $1,21 \times 10^{-7}$

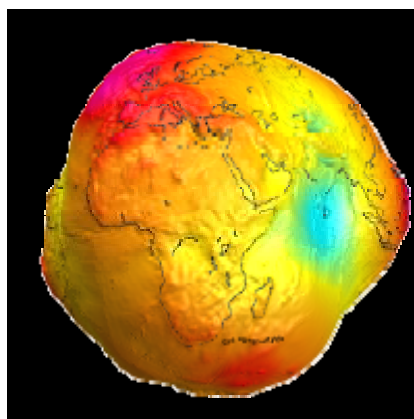


图 A.1 放大 10000 倍的 EIGEN-GLO4C 大地水准面高度示意图

### A.3 模型信息参考网站

EIGEN-GLO4C 模型数据和相关详细信息可从全球地球模型国际中心下载。网址是 <http://icgem.gfz-potsdam.de/ICGEM/ICGEM.html>。

IERS报告32可以从<http://www.iers.org/>下载。

DE-405/LE-405星历数据和相关详细信息可从<ftp://ssd.jpl.nasa.gov/pub/eph/export/>下载。

## 附录 B

(资料性附录)

### 美国和欧洲重力场模型标准概况

#### B.1 美军、欧空局、美国宇航局使用的重力场模型

##### B.1.1 美国军用标准

MIL-STD-1809 (1991年2月15日)《航天器空间环境》中规定使用WGS-84模型《世界大地测量系统 1984》。

##### B.1.2 欧洲空间合作标准组织标准

ECSS-E-10-04A (2000年1月21日)《空间环境》中推荐使用JGM-2模型《联合引力模型》。

ECSS-E-ST-10-04C (2008年11月15日)《空间环境》中推荐使用EIGEN-GLO4C模型《联合重力场模型》。

##### B.1.3 美国宇航局技术报告

NASA TP-1998-206861中推荐使用NASA/GSFC与NIMA联合制订地球重力场模型EGM-96《地球重力场模型 1996》。

#### B.2 模型的表达

##### B.2.1 模型

###### B.2.1.1 WGS-84

WGS-84《世界大地坐标系 1984》，由美国国防部地图局编制，被MIL-STD-1809作为制定的重力场模型。

WGS-84给出了180阶次球谐系数，模型的数据来源为近地卫星多普勒跟踪数据，LAGEOS和STARLETTE卫星的激光测距数据、海洋上空卫星高度数据和地面观测得到的引力异常数据。

给出了地球引力模型，WGS-84提供了球谐系数阶次为180。模型的给出是基于近地卫星LAGEOS和STARLETTE多普勒跟踪数据、激光测距数据，以及卫星测高数据和地面测量导出的平均引力异常。

###### B.2.1.2 JGM-2 (联合引力模型)

JGM-2是ECSS-E-10-04A (见参考文献[6])首选的模型。标准中介绍到：JGM-2是根据卫星跟踪数据、地面引力测量和卫星高度测量数据组合而成的。它的球谐最大阶数和次数均为70。

JGM-2中假设模型参数为：

引力常数， $G = 6.67259 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$ ；

地球赤道半径， $R_{\oplus} = 6378136.3 \text{ m}$ ；

地球质量， $M_{\oplus} = 5.97370 \times 10^{24} \text{ kg}$ ；

地球引力常数， $GM_{\oplus} = 398600.4415 \text{ km}^3 \text{ s}^{-2}$ 。

标准中给出了模型使用指南。标准中说JGM-2模型一族有三个模型，但标准中提到了JGM-2S，JGM-2S仅使用了卫星跟踪数据，它的最高阶数为70。标准中说未来一版模型为JGM-2G，但至今未见到。JGM-2模型主要的不确定因素是卫星跟踪数据稀少，卫星的轨道非常低，处于不同的倾斜带，并缺乏精确数据。

关于模型的参考数据，给出了JGM-29阶归一的球谐系数值。

标准中给出了典型任务的结果。用表的形式给出了典型任务使用JGM-2引力模型预期的径向、横向跟踪方向和沿跟踪方向的轨道误差。

### B.2.1.3 EGM-96

EGM-96 地球引力模型在NASA TP-1998-206861《NASA/GSFC和美国图象与地图局（NIMA）联合制定的引力场模型》中给出。EGM-96由NASA/GSFC、NIMA和俄亥俄州立大学（注：NIMA的前身是美国国防部地图局）联合制定。EGM-96为360阶球谐模型，统计了TOPEX/POSEIDON卫星、ERS-1卫星和GEOSAT卫星的30年卫星跟踪数据和海面测高数据。EGM-96提供了精确的地形参考地表，改进的海洋环流模型，改进了低轨道卫星的轨道测定以及给出了全球和区域的大地构造和地球动力的信息。EGM-96的具体模型见表B.1。

表B.1 EGM-96系列模型

模型	系数的最高阶次	模型数据来源	指南制定年代
EGM96 <sup>a</sup>	360	S, G, A	1996
EGM96S	70	S	1996
注：表中模型数据来源栏中的S、G和A，S表示卫星数据、G表示地面数据、A表示组合数据。			
<sup>a</sup> ECSS 中提到的模型。			

## 附录 C

(资料性附录)

## 国际重力场主要模型信息

## C.1 全球主要重力场模型表

根据<http://icgem.gfz-potsdam.de/ICGEM/Main.html>和MIL-STD-1809,全球主要重力场模型见表C.1。

表 C.1 全球主要重力场模型表

模型系列	模型名称	编制年代	最高阶次	模型数据来源
AIUB 系列	AIUB-CHAMP03S	2010	100	S(Champ)
	AIUB-GRACE02S	2009	150	S(Grace)
	AIUB-GRACE01S	2008	120	S(Grace)
	AIUB-CHAMP01S	2007	90	S(Champ)
ITG 系列	ITG-Grace2010s	2010	180	S(Grace)
	ITG-Grace03	2007	180	S(Grace)
	ITG-Grace02s	2006	170	S(Grace)
	ITG_Champ01E	2003	75	S(Champ)
	ITG_Champ01K	2003	70	S(Champ)
	ITG_Champ01S	2003	70	S(Champ)
GGM 系列	GGM03C	2009	360	S(Grace),G,A
	GGM03S	2008	180	S(Grace)
	GGM02C	2004	200	S(Grace),G,A
	GGM02S	2004	160	S(Grace)
	GGM01C	2003	200	TEG4,S(Grace)
	GGM01S	2003	120	S(Grace)
EIGEN 系列	EIGEN-5C	2008	360	S(Grace,Lageos),G,A
	EIGEN-5S	2008	150	S(Grace,Lageos)
	EIGEN-GL04C	2006	360	S(Grace,Lageos),G,A
	EIGEN-GL04S1	2006	150	S(Grace,Lageos)
	EIGEN-CG03C	2005	360	S(Champ,Grace),G,A
	EIGEN-CHAMP03S	2004	140	S(Champ)
	EIGEN-CHAMP03Sp	2003	140	S(Champ)
	EIGEN-GRACE02S	2004	150	S(Grace)
	EIGEN-2	2003	140	S(Champ)
	EIGEN-CG01C	2004	360	S(Champ,Grace),G,A
	EIGEN-GRACE01S	2003	140	S(Grace)
	EIGEN-1S	2002	119	GRIM5,S
EIGEN-1	2002	119	S(Champ)	
EGM 系列	EGM2008	2008	2190	S(Grace),G,A
	EGM96	1996	360	EGM96S,G,A
	EGM96S	1996	70	S
TUM 系列	TUM-2S	2004	70	S(Champ)
	TUM-2Sp	2003	60	S(Champ)
	TUM-1S	2003	60	S(Champ)
PGM	PGM2000A	2000	360	S,G,A

表 C.1 (续)

模型系列	模型名称	编制年代	最高阶次	模型数据来源
TEG 系列	TEG4	2000	180	S,G,A
	TEG3	1996	70	S,G,A
	TEG2B	1991	54	S,G,A
	TEG2	1990	54	S,G,A
	TEG1	1988	50	S,G
GRIM 系列	GRIM5C1	1999	120	S,G,A
	GRIM4S4G	1999	100	GRIM4S4,S(GFZ-1)
	GRIM5S1	1999	99	S
	GRIM4C4	1995	72	S,G,A
	GRIM4S4	1995	70	S
	GRIM4C3	1992	60	S,G,A
	GRIM4S3	1992	60	S
	GRIM4C2	1991	50	S,G,A
	GRIM4S2	1991	50	S
	GRIM4C1	1990	50	S,G,A
	GRIM4S1	1990	50	S
	GRIM3L1	1984	36	S,G,A
	GRIM3B	1983	36	S,G,A
	GRIM3	1981	36	S,G,A
	GRIM2	1976	23	S,G
GRIM1	1975	10	S	
GFZ 系列	GFZ97	1997	359	PGM062w,G,A
	GFZ96	1996	359	PGM055,G,A
	GFZ95A	1995	360	GRIM4C4,G,A
	GFZ93B	1993	360	GRIM4C3,G,A
	GFZ93A	1993	360	GRIM4C3,G,A
JGM 系列	JGM2	1994	70	S,G,A
	JGM2S	1994	60	S
	JGM3	1994	70	S,G,A
	JGM1	1993	70	S,G,A
	JGM1S	1993	60	S
OSU 系列	OSU91A	1991	360	GEMT2,G,A
	OSU89A	1989	360	GEMT2,G,A
	OSU89B	1989	360	GEMT2,G,A
	OSU86C	1986	250	GEML2,G,A
	OSU86D	1986	250	GEML2,G,A
	OSU86E	1986	360	GEML2,G,A
	OSU86F	1986	360	GEML2,G,A
	OSU81	1981	180	GEM9,G,A
	OSU78	1978	180	GEM9,G,A
	OSU73	1973	20	GEM3,G
OSU68	1968	14	S,G	
GEMT 系列	GEMT3	1991	50	S,G,A
	GEMT3S	1991	50	S
	GEMT2	1989	50	S,G,A
	GEMT2S	1989	50	S
	GEMT1	1987	36	S
WGS	WGS-84	1984	180	S,G,A

表 C.1 (续)

模型系列	模型名称	编制年代	最高阶次	模型数据来源
GEM 系列	GEM10B	1978	36	GEM10,A
	GEM10A	1978	30	GEM10,A
	GEM10	1977	22	S,G
	GEM10C	1981	180	GEM10B,G,A
	GEM9	1977	20	S
	GEM8	1976	25	S,G
	GEM7	1976	16	S
	GEM6	1974	16	S,G
	GEM5	1974	12	S
	GEM4	1972	16	S,G
	GEM3	1972	12	S
	GEM2	1972	16	S,G
	GEM1	1972	12	S

注：表中模型数据来源栏中的S、G和A，S表示卫星数据、G表示地面数据、A表示组合数据。

## 参考文献

- [1] C. Förste, F. Flechtner, R. Schmidt, R. König, U. Meyer, R. Stubenvoll, M. Rothacher, F. Barthelmes, H. Neumayer, R. Biancale, S. Bruinsma, J.-M. Lemoine, and S. Loyer, A Mean Global Gravity Field Model from the Combination of Satellite Mission and Altimetry/Gravimetry Surface Data – EIGEN-GL04C, Geophysical Research Abstracts, Vol.8, 03462, 2006
  - [2] D.D. McCarthy and Gerard Petit (editors), IERS Conventions (2003), IERS Technical Note 32, Verlag des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie, Frankfurt am Main, 2004
  - [3] E.M. Standish, JPL Planetary and Lunar Ephemerides DE405/LE405, JPL Inter-Office Memorandum IOM 312F-98-048, Aug.25, 1998
  - [4] MIL-STD-1809 航天器空间环境
  - [5] ECSS-E-10-04A 空间环境
  - [6] ECSS-E-ST-10-04C 空间环境
  - [7] NASA TP-1998-206861 NASA/GSFC 与 NIMA 联合制订地球重力场模型 EGM-96
-

中华人民共和国航天行业标准

## 航天地球重力场模型应用指南

QJ 20124—2012

\*

中国航天标准化研究所出版

北京市丰台区小屯路 89 号

邮政编码：100071

中国航天标准化研究所

印务发行部印刷、发行

**版权专有 不得翻印**

\*

2013 年 5 月出版

定价：15 元