

# 火星的岁差和章动

夏一飞 张承志

(南京大学天文系 南京 210093)

## 摘 要

火星是类地行星,火星动力学的研究不仅具有科学意义,而且还具有实际应用价值。火星的空间探测获得了许多有关火星极运动的重要资料,它与理论值的比较是检验火星内部结构的重要手段,也是为改进火星岁差章动理论提供依据的有效途径。介绍了当前国际上有关火星的岁差和章动研究的进展,分别对刚体火星的章动序列、火星内部结构参数化模型的建立和火星自转的简正模作了描述,并进行了简单的讨论。

**关键词** 火星; 岁差 — 章动; 空间探测

**分类号** P126.5, P185.3

## 1 引 言

火星是地球的近邻,由于它发出特殊的红光而令人瞩目。对于火星的空间探测始于 20 世纪 60 年代。最早获得成功的是美国 1964 年发射的“水手 4 号”(Mariner 4)飞船,它于 1965 年 7 月在火星附近发回了许多珍贵的火星照片。此后美国和前苏联分别对火星实施了多次空间探测,其中最成功的是美国于 1975 年发射的两艘“海盗号”(Viking)飞船。

火星的会合周期为 780 d (2.14 yr),每隔两年多就会发生一次冲日,而火星大冲前后距地球最近,是对火星进行观测和空间探测的最佳时机。

20 世纪 90 年代火星空间探测的热潮再一次被掀起。美国于 1992 年 9 月发射了“火星观测者”(Mars Observer)飞船,但在进入火星轨道时丢失了;此后于 1996 年 11 月和 12 月分别发射了“火星环球勘探者”(Mars Global Surveyor)和“火星探路者”(Mars Pathfinder)飞船。“火星环球勘探者”于 1997 年 9 月中旬进入环绕火星的轨道,随后飞船上的摄像机对火星表面进行拍摄并将照片发回地面。2000 年 6 月 Malin 和 Edgett<sup>[1]</sup>宣布,照片显示火星上的液态水贮存于火星表面底下 100~300 m 深处。2001 年 7 月 Mustard 等人<sup>[2]</sup>分析了“火星环球勘探者”发回的 8000 多张高清晰度照片,发现火星上有一种较为光滑的地形,可能是液

国家自然科学基金重点项目(19833010、10133010)资助课题

特约稿 2002-03-21 收到

态水渗进多孔的土壤后凝固结冰而形成的, 其厚度可达 1~10 m; 据估算以这种形式存在的冰融化后可在整个火星表面复盖一层厚度为 10~40 cm 的水圈。1999 年 4 月火星冲日。美国在 1998 年 12 月和 1999 年 1 月分别发射了“火星气候轨道器”(Mars Climate Orbiter)和“火星极地着陆者”(Mars Polar Lander)飞船, 遗憾地是前者在进入火星大气时烧毁, 而后者在火星南极峡谷着陆时坠毁。2001 年 6 月火星大冲。美国于 2001 年 4 月 7 日发射了“火星奥德赛”(Mars Odyssey)飞船, 并于 2001 年 10 月 24 日进入火星轨道。它将对火星进行为期 29 个月的科学考查。检测火星表面矿物质的化学成分, 绘制火星地矿图, 以及寻找火星冰冻水的踪迹等。

上述探测计划取得了许多令人振奋的成果, 使火星动力学的研究取得了重要的进展。火星动力学的研究不仅对行星物理、太阳系起源和演化等基本理论的完善具有科学意义, 而且还对航天事业的发展具有实际应用价值。

火星是类地行星, 因此有许多方面与地球的性质类似。表 1 给出了火星与地球的某些物理参数的比较。对火星极的运动及其内部结构的研究, 实际上是将地球自转运动的研究从地球拓展到火星。火星极的空间运动直接依赖于火星的岁差和章动。火星的岁差和章动一方面可用理论去模拟, 另一方面则需要由空间探测获得的观测资料来约束; 对火星极运动的观测值与理论值进行比较是检验火星模型的重要手段, 也是为改进火星的岁差和章动理论提供依据的有效途径。

表 1 火星与地球的物理参数

参 数	火 星	参考文献	地 球	参考文献
赤道半径 $R/\text{km}$	3389.92	[4]	6378.13649	[5]
自转角速度 $\Omega/10^{-5}\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$	7.088218	[4]	7.292115	[5]
$GM/\text{km}^3\cdot\text{s}^{-2}$	42828.370	[6]	398600.4418	[5]
平均密度 $\rho/\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	3.933497	[7]	5.515314	[7]
极惯量矩系数 $C/MR^2$	0.3452~0.3654	[8]	0.3307	[5]
赤道与轨道的交角 $\epsilon$	$25^\circ.19$	[4]	$23^\circ.439$	[5]
几何扁率 $f$	0.0052	[8]	0.0034	[5]

火星的岁差类似于地球, 由“日月”岁差和行星岁差两部分组成<sup>[3]</sup>。所谓“日月”岁差是由太阳、火星的卫星对火星椭球的引力作用引起的, 可通过基于地面或空间探测器的观测求得; 而行星岁差则是由太阳系行星对火星公转运动的摄动引起的。火星的行星岁差要比“日月”岁差小得多。

有关火星章动的研究工作大致可以分为三个互相关联的方面: 刚体火星的章动序列; 由空间探测求得的物理参数建立的火星模型; 火星简正模以及从刚体火星到非刚体火星的转换函数。

## 2 火星的岁差

第一个计算火星岁差的人是 Struve (1898 年)<sup>[9]</sup>。1964 年 de Vaucouleurs<sup>[10]</sup> 给出的岁差

速率与 Struve 相同。1979 年 Reasenber 和 King<sup>[11]</sup> 给出的岁差速率仅考虑太阳对火星的直接力矩。Hilton<sup>[8]</sup> 在计算火星的岁差速率时考虑了各种改正。至今, 火星岁差速率理论值仍不确定的最大原因是极惯量矩系数的不确定性。表 2 列出了火星“日月”岁差速率的理论值和观测值。其中, Yoder 和 Standish<sup>[6]</sup> 的观测值是根据“海盗号”飞船的观测数据得到的; Folkner 等人<sup>[4]</sup> 的观测值是根据“火星探路者”的观测数据得到的; Sinclair<sup>[12]</sup> 和 Jacobson 等人<sup>[13]</sup> 的观测值是基于地球和空间探测的观测数据以及分析火卫一、火卫二的轨道运动得到的。表 3 给出了 Hilton 在计算火星的“日月”岁差速率时考虑的各种改正, 其中包括太阳、行星和火星卫星的直接贡献, 以及行星对火星轨道的摄动引起的火星轨道形状和定向随时间的变化, 这两种变化涉及火星轨道偏心率和火星赤道相对轨道的交角。火星的两颗卫星——火卫一和火卫二的轨道面基本上和火星的赤道面一致, 因而不产生岁差项。行星的直接影响比太阳的贡献几乎小三个量级, 因此可以忽略。

表 2 火星岁差的理论值和观测值

	作 者	岁差速率 / (″) · yr <sup>-1</sup>
理论值	Struve (1898)	-7.07
	de Vaucouleurs (1964)	-7.07
	Reasenber 和 King (1979)	-7.575
	Hilton (1991)	-7.296 ± 0.021
观测值	Yoder 和 Standish (1997)	-7.83 ± 0.30
	Folkner 等人 (1997)	-7.576 ± 0.053
	Sinclair (1989)	-9.97 ± 1.8
	Jacobson 等人 (1989) 火卫一	-7.080 ± 1.37
	火卫二	-10.6 ± 2.7

表 3 计算火星岁差时的各种改正<sup>[8]</sup> (″)

	改 正 项	改正值
太阳的贡献	圆轨道	-7.488 ± 0.021
	轨道偏心率的改正	-0.099
	轨道偏心率变化的改正	-0.001
	赤道相对轨道交角变化的改正	+0.2924
火星卫星的贡献	火卫一	0
	火卫二	0
行星的贡献	地球	0.000363
	木星	0.000198
	其余行星	0.00063
“日月”岁差 $\psi$		-7.296 ± 0.021

Bouquillon 和 Souchay<sup>[3]</sup> 求得火星的行星岁差为  $\chi = 1''.74571/\text{yr}$ 。火星的测地岁差可

按下式求得<sup>[14]</sup>:

$$p_g = \frac{3}{2} \left( \frac{na}{c} \right)^2 \left( \frac{n}{1-e^2} \right). \quad (1)$$

将火星的轨道半长轴  $a = 2.279392 \times 10^8$  km、轨道偏心率  $e = 0.0934$ 、轨道运动速度  $n = 24.1309$  km/s 和光速  $c = 299792.458$  km/s 代入 (1) 式, 得  $p_g = 0''.0067547/\text{yr}$  .

### 3 刚体火星的章动序列

刚体火星章动理论是建立非刚体火星章动理论和研究火星章动的基础。与刚体地球章动理论相比, 刚体火星章动理论在某些方面是较简单的。火星的卫星质量很小, 其轨道面非常接近于火星的赤道面 (对火卫一为  $1^\circ.03$ , 对火卫二为  $1^\circ.83$ ), 因此卫星产生的潮汐力矩的赤道分量很小, 它们轨道的长周期摄动效应在足够精度下可被忽略。这样, 刚体火星章动理论可以用简单的分析方法来建立。目前推算刚体火星章动序列的方法和刚体地球的方法相同, 有三种: 力矩法、Hamiltonian 方法和潮汐势谱方法, 其中力矩法又分为频率域和时间域两种。Reasenber 和 King<sup>[11]</sup> 以及 Hilton<sup>[8]</sup> 等人采用力矩法在时间域内、Roosbeek<sup>[15]</sup> 等人采用力矩法在频率域内、Bouquillon 和 Souchay<sup>[3]</sup> 以及 Borderies<sup>[16]</sup> 等人采用 Hamiltonian 方法、Groten 等人<sup>[17]</sup> 采用潮汐势谱方法分别推导出刚体火星的章动序列。

Roosbeek 的刚体火星章动理论是基于太阳、火卫一、火卫二对刚体火星产生的力矩进行分析计算的, 他不仅考虑了它们的直接力矩, 还考虑了这些天体和太阳系行星产生的非直接效应。太阳和行星历表使用 VSOP87<sup>[18]</sup>, 火卫一和火卫二历表采用 ESADE/ESAPHO<sup>[19]</sup> .

由角动量守恒方程出发, 可得到“黄经”章动和交角章动变化的表达式:

$$\frac{d(\Delta\psi)}{dt} = \frac{1}{C\Omega} \frac{1}{\sin \varepsilon} L_1, \quad \frac{d(\Delta\varepsilon)}{dt} = \frac{1}{C\Omega} L_2, \quad (2)$$

其中  $C$  为极主惯量矩,  $\Omega$  为火星的自转角速度,  $\varepsilon$  为火星赤道与轨道的交角,  $L_1$  和  $L_2$  为外力矩的赤道分量。

外力矩可由摄动体和火星间的引力势推算出。二阶引力势可写为

$$W_2 = -\frac{GM M_p}{d} \left( \frac{R}{d} \right)^2 J_2 P_2(\sin \delta), \quad (3)$$

其中  $M$  为火星的质量,  $M_p$  为摄动体的质量,  $d$  为火星和摄动体间的距离,  $R$  为火星的赤道半径,  $J_2$  为二阶带谐项系数,  $P_2(\sin \delta)$  为二阶勒让德多项式,  $\delta$  为摄动体的赤纬。

由此可推得力矩为

$$\mathbf{L} = \frac{GM_p}{d^3} (C - A) \frac{3}{2} \sin 2\delta \begin{pmatrix} \sin \alpha \\ -\cos \alpha \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (4)$$

将 (4) 式代入 (2) 式, 得

$$\begin{aligned} \frac{d(\Delta\psi)}{dt} &= \frac{1}{C\Omega} \frac{1}{\sin\varepsilon} \frac{GM_p}{d^3} (C-A) \frac{3}{2} \sin 2\delta \sin \alpha, \\ \frac{d(\Delta\varepsilon)}{dt} &= -\frac{1}{C\Omega} \frac{GM_p}{d^3} (C-A) \frac{3}{2} \sin 2\delta \cos \alpha, \end{aligned} \quad (5)$$

其中  $A = B$  为赤道主惯量矩,  $\alpha$  为摄动体的赤经.

由 (5) 式可计算出刚体火星的角动量轴的章动序列, 其中火星的动力学扁率  $H$  取为 0.00536 (对应于 Folkner 等人的  $\psi = (-7''.576 \pm 0''.053)/\text{yr}$ ). 最后得到以土星的平黄经  $Sa$ 、木星的平黄经  $Ju$ 、火星的平黄经  $Ma$ 、地球的平黄经  $Te$ 、火卫一升交点的平“黄经”  $Np$ 、火卫二升交点的平“黄经”  $Nd$  等 6 个基本天文参数为自变量的章动序列, 其中“黄经”章动有 24 项, 交角章动有 10 项, 取舍及截断标准为 0.1 mas. 表 4 给出了刚体火星章动的振幅.

表 4 刚体火星章动的振幅

(a) “黄经”章动

mas

	自 变 量						周期 /d	sin	cos
	$Sa$	$Ju$	$Ma$	$Te$	$Np$	$Nd$			
1	0	0	7	0	0	0	98.140	-0.10	0.00
2	0	0	6	0	0	0	114.497	-0.89	0.25
3	0	0	5	0	0	0	137.396	-6.26	-0.89
4	0	0	4	0	0	0	171.745	-34.82	-21.66
5	0	-2	4	0	0	0	186.533	0.00	-0.13
6	0	0	3	0	0	0	228.993	-137.00	-200.03
7	0	-1	3	0	0	0	241.772	0.00	0.16
8	0	-2	3	0	0	0	256.061	0.00	-0.16
9	0	-3	10	-4	0	0	343.309	0.31	0.00
10	0	0	2	0	0	0	343.490	-220.64	-1108.21
11	0	3	-6	4	0	0	343.671	0.28	-0.15
12	0	-2	2	0	0	0	408.217	0.00	-0.23
13	0	0	1	0	0	0	686.980	-282.42	-477.62
14	0	0	-1	1	0	0	779.936	0.00	-0.12
15	0	-1	1	0	0	0	816.435	0.00	0.44
16	0	0	0	0	-1	0	825.641	0.00	9.88
17	0	0	-3	2	0	0	901.985	0.00	-0.11
18	0	-2	1	0	0	0	1006.010	0.21	-0.40
19	0	1	0	0	0	0	4332.590	0.00	0.20
20	0	0	2	-1	0	0	5764.010	0.20	0.19
21	0	0	0	0	0	-1	19998.900	0.00	4.39
22	5	-2	0	0	0	0	322615.000	-0.30	-0.28
23	0	-3	8	-4	0	0	651393.000	0.00	0.73
24	-3	0	19	-10	0	0	2341002.000	2.57	0.00

(b) 交角章动							mas		
	自 变 量						周期 /d	sin	cos
	<i>Sa</i>	<i>Ju</i>	<i>Ma</i>	<i>Te</i>	<i>Np</i>	<i>Nd</i>			
1	0	0	6	0	0	0	114.497	-0.12	-0.42
2	0	0	5	0	0	0	137.396	0.43	-2.93
3	0	0	4	0	0	0	171.745	10.21	-16.19
4	0	0	3	0	0	0	228.993	93.51	-62.65
5	0	-3	10	-4	0	0	343.309	0.00	0.14
6	0	0	2	0	0	0	343.490	507.40	-88.41
7	0	3	-6	4	0	0	343.671	0.00	0.13
8	0	0	1	0	0	0	686.980	-47.68	-11.94
9	0	0	0	0	-1	0	825.641	4.20	0.00
10	0	0	0	0	0	-1	19998.900	1.86	0.00

Hilton<sup>[8]</sup>也采用力矩法,给出了在引力势作用下极的受迫运动方程。方程中包含已展开的太阳的引力势,将“黄经”、“黄纬”展开成时间的函数(包括长期项和周期项),并进行积分,另外还考虑作用在火星上的太阳力矩的变化、火星轨道的形状和定向随时间的变化、火卫一和火卫二的引力作用、太阳系行星的引力作用等。由于取舍及截断标准为1 mas,因而由太阳系行星(包括地球)引起的非直接效应无意义(仅木星引起的“黄经”章动项为mas量级)。最后得到以火星的平黄经、火星近日点的平黄经、火卫一升交点的平“黄经”、火卫二升交点的平“黄经”4个基本天文参数为自变量的章动序列,其中“黄经”章动有9项,交角章动有5项。

Reasenber和King<sup>[11]</sup>仅考虑太阳直接力矩和火星轨道长周期变化的结果,未考虑火星卫星的引力作用,给出“黄经”章动9项,交角章动7项。

Bouquillon和Souhay<sup>[3]</sup>采用Hamiltonian方法,利用一套正则共轭的Andoyer变量和李函数,考虑太阳、木星、地球、火卫一和火卫二的影响,另外还考虑火星的三轴性效应,计算了角动量轴、自转轴和形状轴间的奥波策(Oppolzer)项。给出“黄经”章动11项,交角章动6项,章动序列的精度为0.1 mas。在mas量级,它和Roosbeek、Hilton给出的章动序列非常一致。

由于火星的轨道具有很大的偏心率,轨道偏率对火星的影响要比对地球的影响更大些,小参数 $e$ 的幂的展开也不像地球情况那样方便,因而Groten等人<sup>[17]</sup>使用潮汐势的展开来给出章动序列。这种方法基于火星轨道运动方程的直接数值积分,其中考虑火星的三轴性效应和轨道偏心率的影响。但在理论上这种方法还不够完善,得到的刚体火星的章动序列的项数也较少。

## 4 火星内部结构模型

由空间探测的研究可获得火星的物理形状、平均密度和重力场结构等信息。根据火星的平均密度和极惯量矩系数等可建立火星的内部结构模型。火星物理参数精度的逐渐提高为探讨火星内部结构提供了依据;同时,随着地球物理学的进展,地球模型的日益精细也为建立火

星内部结构模型提供了借鉴。

类似于地球，火星模型的基本结构包括壳、弹性幔和核三部分。其中，弹性幔主要由镁(Mg)和铁(Fe)的氧化物构成；核可能是固体核(如 Binder 和 Davis 模型<sup>[20]</sup>)也可能是液核(如 Okal 和 Anderson 模型<sup>[21]</sup>)，它们多半包含铁和硫化铁成分。

目前尚未精确掌握火星流变学参数(如刚性系数 $\mu$ 、拉梅常数 $\lambda$ 、密度 $\rho$ 等)在其内部的分布规律，也未有准确的 $C/MR^2$ 值，因此不得不对火星做出若干简化假设。例如假设火星内部处于流体静力学平衡状态；体积模量和压力满足一定的关系；核中刚性系数服从某种分布规律；不考虑内部温度效应等。

若选定火星的中心密度、中心的刚性系数、核的刚性系数、核的半径等初值，通过求解 Emden 方程，并考虑边界条件，可先解算出 $\rho$ ，然后再计算出重力加速度 $g$ 、压力 $p$ 和体积模量 $K$ ，最后得到 $\mu$ 和 $\lambda$ 。这样就给出火星的参数化模型<sup>[7,22]</sup>。

极惯量矩系数表征行星中心凝聚的程度，可由下式计算<sup>[23]</sup>：

$$\frac{C}{MR^2} = \frac{2}{3} \left[ 1 - \frac{2}{5} \left( \frac{4 - k_s}{1 + k_s} \right)^{1/2} \right], \quad (6)$$

其中 $k_s$ 为长期洛夫数，可表为

$$k_s = \frac{3J_2}{q} = \frac{2f}{q} - 1, \quad (7)$$

这里 $f$ 为火星的扁率， $J_2$ 为二阶带谐项系数， $\Omega$ 为自转角速度， $R$ 为赤道半径， $q = \Omega^2 R^3 / GM$ 为形状参数。如果火星处于流体静力学平衡，则易于导出 $C/MR^2$ 的值。但对火星重力场的探测结果表明，火星并非处于流体静力学平衡状态。Reasenbergl<sup>[24]</sup>和 Kaula<sup>[25]</sup>考虑了非静力学分量的改正后认为， $C/MR^2$ 的取值应为 0.365。1989 年 Bill<sup>[26]</sup>重新分析了非静力学分量后认为， $C/MR^2$ 的值应改为 0.345。因此目前把 $C/MR^2$ 的取值定在 0.345~0.365 之间(参见表 1)。 $C/MR^2$ 的值与火星核的大小、火星幔的平均密度等有关，因此可把它作为建立火星内部结构模型的约束条件之一。采用不同的观测值和不同的处理方法就会得到不同的火星内部结构模型。表 5 列出 Zhang<sup>[27]</sup>给出的一个火星参数化模型的密度 $\rho(x)$ 、体积模量 $K(x)$ 和重力加速度 $g(x)$ (以表面重力 $g_a$ 为单位)，其中 $x = r/R$ ， $R$ 为火星的平均半径。

表 5 火星参数化模型<sup>[27]</sup>

	$r/\text{km}$	$\rho(x)/\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	$K(x)/\text{kbar}$	$g(x)/g_a$
核	0.0~1750.9	7.7600	3799.21	1.9728x
		-2.1103x <sup>2</sup>	+32.26x	-0.5365x <sup>3</sup>
			-4191.71x <sup>2</sup>	
			+847.99x <sup>3</sup>	
幔	1750.9~3209.9	3.7828	3597.87	0.1335x <sup>-2</sup>
		-0.4622x	-1340.80x	+0.9642x
		-0.0355x <sup>3</sup>	+32.72x <sup>2</sup>	-0.1175x <sup>2</sup>
				-0.0090x <sup>4</sup>
壳	3209.9~3329.9	3.320	1150	0.1614x <sup>-2</sup> + 0.8440x
	3329.9~3389.9	2.906	550	0.2612x <sup>-2</sup> + 0.7388x

## 5 火星自转的简正模和转换函数

简正模展开理论表明<sup>[28]</sup>, 处于流体静力学平衡状态、无压力、弹性旋转的具有固体幔和液核的行星存在三个振动模, 分别为倾斜模 (TOM)、Chandler 摆动 (CW) 和近“周日”自由摆动 (NDFW)。若火星的核为液核, 则火星也存在这三个模式。地球还存在一个与简正模理论无关的周年摆动, 这是由地球表面和大气层内发生的季节性气象过程造成的。火星不存在这些过程, 火星极处虽存在冰冠, 但它的质量与整个火星质量相比非常小, 因而火星极移的“周年”项可忽略。

TOM 为火星的瞬时自转轴与平均自转轴不重合所致。这个模式的周期等于火星的自转周期。TOM 是逆向自转的, 与火星的结构无关。若从惯性空间来看, 它是自由“周日”章动 (FDN)。

CW 是火星的自由摆动, 由火星的形状轴与瞬时自转轴不重合引起。CW 给出自转轴相对火星本体固定坐标系的运动。理论上刚体的自由摆动周期与实测到的周期存在大的差异, 其原因涉及幔的弹性、核的大小和形状、海洋的潮汐运动、幔内的非弹性弥散等因素。火星无海洋, 因此不受海洋潮汐运动的影响; 火星幔内的非弹性弥散比地球的小, 因而它对火星 CW 的影响也较小。CW 的周期值依赖于火星的动力学扁率和洛夫数, 也依赖于核半径和极主惯量矩。不久前, Gauchez 和 Souchay<sup>[29]</sup> 对已有的三个火星极移模型<sup>[6,22,30]</sup> 作了综合比较, 指出刚体火星的欧拉周期约为 178.7 d, 而弹性体火星的周期约在 191~225 d 之间。在估算真实火星的 CW 周期时, Gauchez 和 Souchay 将火星的二阶洛夫数取为  $0.15 < k_2 < 0.25$ 。但是, 如果根据火星内部结构模型来估算,  $k_2$  的取值范围是 0.078~0.117<sup>[30]</sup>, 亦即  $k_2 \leq 0.15$ 。当取 Gauchez 和 Souchay 的下限值时, CW 周期应在 191~204 d 之间, 这就是说真实火星的 CW 摆动周期有可能比刚体火星的欧拉周期延长 14%。而按照 Gauchez 和 Souchay 的估算, 最多可延长 26%。

NDFW 是椭球液核的结果, 由液核自转轴与幔自转轴不重合引起 (若核为固体核, 则这个模式不存在)。NDFW 是逆向运动的。若从惯性空间来看, 它就是自由地核章动 (FCN)。FCN 的周期为 -330 ~ -220 d, 约为火星年的 1/2 或 1/3<sup>[22]</sup>。FCN 的周期在确定火星核大小上是非常有用的, 若 FCN 周期的精度为 2 d, 则核半径的不确定性约为 6 km。

TOM、CW 和 NDFW 是火星的自然振动模, 而火星的受迫章动则是受迫振动。理论上的刚体火星的章动振幅与实际观测到的章动振幅之比应是受迫振动与自然振动模间的共振。由于火星自然振动模的频率依赖于其内部结构, 因此章动的振幅也依赖于其内部结构。非刚体火星的理论章动可由刚体火星的章动与转换函数进行卷积求得, 此外还需考虑某些扰动的影响, 如火星上 Tharsis 隆起区域的火山活动等。Hilton<sup>[22]</sup> 以刚体火星章动模型为基础, 采用简正模展开方法, 考虑幔的弹性和液核的效应, 改变核半径、极惯量矩系数等, 使其与观测到的物理参数相符合, 从而得到更符合实际情况的非刚体火星的章动序列。表 6 给出了火星液核模型的章动振幅, 其中液核半径取为 1700 km, 极惯量矩系数取为 0.3654, 刚体火星模型的章动振幅取自 Hilton<sup>[8]</sup>。

表 6 火星液核模型的章动振幅 (")

周期 /d	“黄经”章动		交角章动	
	刚体	非刚体	刚体	非刚体
686.72	-0.1407	-0.1252	-0.0493	-0.0439
343.41	1.0962	1.0251	0.5158	0.4824
228.96	0.2401	0.2324	0.1130	0.1094
171.72	0.0409	0.0406	0.0193	0.0191
137.38	0.0634	0.0642	0.0030	0.0030
114.48	0.0009	0.0010		
686.93	-0.6357	-0.5657	-0.0004	-0.0004
343.46	-0.0445	-0.0416		
228.98	-0.0041	-0.0039		
828.5	-0.23	-0.20	-0.0040	-0.0035
19850	-0.060	-0.049	-0.0028	-0.0023

## 6 结 束 语

从上述评述可以看出,在火星岁差和章动以及自由极移的研究中,有许多因素是不确定的,诸如极惯量矩系数  $C/MR^2$ 、流变学参数在火星内部的分布、火星核的大小和性质、火星二阶洛夫数的取值等等。目前不同的作者采用不同的方法得到的非刚体火星章动模型互有差异,尚无一套公认的火星岁差章动模型。进一步澄清这些不确定因素,空间探测无疑是最有效的手段。空间探测的结果既包含了太阳、火星卫星和其它天体对火星的作用,也反映了火星内部的物理活动,因而是各种客观存在的因素的综合反映。

在未来的火星空间探测计划中,火星空间定向的探测和确定应是重要目标之一。正在计划中的空间活动有:欧洲空间局的 Mars Express Orbiter (2003 年) 和 Netlander (2005 年) 计划;美国的 Mars Exploration Rovers (2003 年)、Mars Reconnaissance Orbiter (2005 年) 以及更长远 Mars Sample Return (2014 年) 计划等。可以预期,在未来十年内将有可能获得更多、更新的有关火星物理参数和内部结构的知识。

## 参 考 文 献

- 1 Malin M C, Edgett K S. *Science*, 2000, 288: 2330
- 2 Mustard J F, Cooper C D, Rifkin M K. *Nature*, 2001, 412: 411
- 3 Bouquillon S, Souchay J. *Astron. Astrophys.*, 1999, 345: 282
- 4 Folkner W M, Yoder C F, Yuan D N *et al.* *Science*, 1997, 278: 1749
- 5 McCarthy D D. *IERS Conventions (1996)*, IERS Technical Note 21, Paris: observatoire de Paris, 1996: 19
- 6 Yoder C F, Standish E M. *J. Geophys. Res.*, 1997, 102(2): 4065
- 7 Zhang C Z. *Earth, Moon and Planets*, 1992, 56: 193
- 8 Hilton J L. A. J., 1991, 102(4): 1510
- 9 Struve H. *Mem. Acad. Imp. Sci., St. Peterberg, Ser. VIII*, 1898, 3: 66

- 10 de Vaucouleurs G. *Icarus*, 1964, 3: 236
- 11 ReasenberG R D, King R W. *J. Geophys. Res.*, 1979, 84: 6231
- 12 Sinclair A T. *Astron. Astrophys.*, 1989, 220: 321
- 13 Jacobson R A, Synnott S P, Campbell J K. *Astron. Astrophys.*, 1989, 225: 548
- 14 de Sitter W. *Bull. Astron. Netherlands*, 1938, 8: 213
- 15 Roosbeek F. *Celest. Mech. Dyn. Astron.*, 1999, 75: 287
- 16 Borderies N. *Astron. Astrophys.*, 1980, 82: 129
- 17 Groten E, Molodenski S M, Zharkov V N. *A. J.*, 1996, 111(3): 1388
- 18 Bretagnon P, Francou G. *Astron. Astrophys.*, 1988, 202: 309
- 19 Chapront-Touze M. *Astron. Astrophys.*, 1990, 240: 159
- 20 Binder A B, Davis D R. *Phys. Earth Planet Inter.*, 1973, 7: 477
- 21 Okal E A, Anderson D L. *Icarus*, 1978, 33: 514
- 22 Hilton J L. *A. J.*, 1992, 103(2): 619
- 23 Zharkov V N, Koshlyahov E M, Marchenkov K I. *Astronomical Vestnik*, 1991, 25: 515
- 24 ReasenberG R D. *J. Geophys. Res.*, 1977, 82: 369
- 25 Kaula W M. *Geophys. Res. Lett.*, 1979, 6: 179
- 26 Bills B G. *J. Geophys. Res.*, 1990, 95: 14131
- 27 Zhang C Z. *Earth, Moon and Planets*, 1994, 64: 117
- 28 Smith M L. *Geophys. J. Roy. Astron. Soc.*, 1974, 37: 491
- 29 Gauchez D, Souchay J. *Earth, Moon and Planets*, 2000, 84: 33
- 30 Zhang C Z. *Earth, Moon and Planets*, 1998, 76: 127

## Martian Precession and Nutation

Xia Yifei    Zhang Chengzhi

(*Department of Astronomy, Nanjing University, Nanjing 210093*)

### Abstract

Mars is a terrestrial planet. Mars' dynamic research has not only scientific significance, but also practical, applicable value. The motion of Mars' pole in space depends directly on the precession and nutation of the planet. Martian precession and nutation, on the one hand, can be theoretically modeled; on the other hand, they are constrained by the observational data from the space exploration for Mars. The comparison between the observational data and the theoretical results on the motion of Mars' pole is an important means for checking the Martian internal structure. It also provides the basis for improving the theory of Martian precession and nutation. The recent progress on studies of Martian precession and nutation is reviewed. The rigid Mars nutation series, the construction of the parametric models of the internal structure for Mars and the normal mode of the Mars' rotation are discussed respectively.

**Key words** Mars: precession—nutation: space exploration