

**编者按** 继我国成功实现载人航天和绕月科学探测任务之后,中俄两国航天机构正式启动了火星联合探测计划,将利用每两年一次的地—火探测器发射窗口,以一箭双星模式,同时发射俄罗斯的火星—着陆采样返回探测器和中国的“萤火 1 号”火星空间环境探测器.这标志着我国正式启动了飞出地月系统的深空探测历程.火星探测无论从科学研究方面还是从技术方面都对我国的科研和工程技术人员提出了前所未有的挑战.本次《物理》组织的系列文章,分两期介绍中国科学院的科技人员为我国首次火星探测所做的前瞻性的技术准备.这些技术在地球、月球和其他行星探测任务中都可以直接得到应用.在即将发稿之际,因俄方的技术原因发射计划推迟到了 2011 年,考虑到本专题的文章多以火星探测的基础技术为主,受发射推迟影响不大,所以照常刊登,以飨读者.

# 火星重力场研究现状及发展趋势<sup>\*</sup>

鄢建国<sup>1,2</sup> 平劲松<sup>2,†</sup>

(1 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室 武汉 430079)

(2 中国科学院上海天文台 上海 200030)

**摘要** 针对近年来月球与火星探测成为各航天大国的热点,以及中国首个火星探测计划“萤火 1 号”拟定的科学研究目标,文章对火星重力场模型的历史、现状及展望做了简要描述.文中首先探讨了火星探测的多重意义和火星重力场在火星探测中起到的重要作用;接着介绍了火星重力场模型发展的历史和现状;最后介绍了利用中国“萤火 1 号”轨道跟踪数据对火星重力场模型的可能贡献,在此基础上对中国未来火星重力场探测提出了设想.

**关键词** “萤火 1 号”火星探测器(YH-1),火星探测,火星重力场

## A gravity field model for Mars

YAN Jian-Guo<sup>1,2</sup> PING Jin-Song<sup>2,†</sup>

(1 State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

(2 Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China)

**Abstract** Exploration of the Moon and Mars has been a focal point for several countries. The development of China's first Mars mission Yinghuo-1, and the history, status and prospects of the Martian gravity field model are briefly reviewed. First, the multiple significance of exploring Mars and the role of the Martian gravity field model in this exploration are discussed, followed by a detailed description of the model. Finally, the potential contribution of the orbital tracking data of Yinghuo-1 to this model is discussed, based on which suggestions for China's future Martian gravity detection program are given.

**Keywords** YH-1 Satellite, Mars exploration, Martian gravity field

## 1 引言

火星探测起源于上世纪 60 年代,这一期间,前苏联和美国发射了大量的火星探测器.1964 年,美国发射的“水手 4 号”成为历史上第一个成功到达火星并传回探测数据的探测器.此后美国、前苏联及欧

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金(批准号:10973031)资助项目;中国科学院重要方向项目(批准号:KJ CX2-YW-T13-2);教育部青年教师基金(批准号:200804861059)、测绘遥感信息工程国家重点实验室开放基金(批准号:WKL070201)及自主基金资助项目  
2009-07-21 收到初稿,2009-09-07 收到修改稿

<sup>†</sup> 通讯联系人, Email: pjs@shao. ac. cn

洲空间局陆续发射了多颗火星探测器,积累的大量数据让科学家对火星表面环境、火星地质及火星演化有了更为深刻的认识.在美国和欧洲空间局近几十年的深空探测规划中,火星仍然为重点探测对象,最终目标是希望能在2037年发射载人火星探测.“萤火1号”(YH-1)是我国首个火星探测计划,作为中国和俄罗斯太空合作项目之一,计划于2011年10月和俄罗斯的Phobos-Grunt卫星一起搭载联盟号运载火箭从拜科努尔太空中心发射升空,大约经历10至11个半月的飞行后进入火星轨道.“萤火1号”倾角接近 $5^\circ$ ,近火点高度为800km,远火点高度为80000km左右.“萤火1号”主要科学目标包括:火星的电离层和周围空间环境,以及火星磁场探测,同时探测火星赤道重力场.在“萤火1号”的基础上,我国将大力加强相关技术研发,以发射我国自主建造的火星探测器.为了保证我国后续火星探测器成功实施,必须有高精度的火星重力场模型作为基础的技术支撑.本文以火星重力场为中心,首先简要介绍进行火星探测的主要科学目标以及火星重力场在其中起到的作用,接着对国际上火星重力场模型研究的历史和现状进行了说明,并简单分析了我国“萤火1号”轨道跟踪数据对改进现有火星重力场模型的潜在贡献,最后对全文进行了总结.

## 2 火星探测的意义及火星重力场模型的作用

火星是太阳系第四颗行星,属于类地行星,直径为地球的一半.与地球相比,火星地质活动不活跃,地表地貌大部分形成于远古时期.火星探测的主要科学意义首先体现在探索火星生命存在的证据,这是目前人类火星探测的重要课题之一.已有的探测结果表明,火星目前的环境不适合生命的存在,但火星上有干枯的河川和水流的痕迹,这说明远古时期,火星可能存在过生命.其次是对火星本底磁场长期演变的探测,这对研究地球磁场的长期演化具有重要的借鉴意义,而揭示火星磁场长期演变的规律,也有利于了解火星外部环境演变的机制.对火星大气和气候的演化过程的研究也是火星探测的主要目标之一,这一演变不仅关系到火星环境的变化,同时对研究火星上生命存在与消失问题也很关键.目前对火星大气的研究可以通过探测器与地球测站进行掩星测量,以及通过火星大气探测载荷进行直接测量.

最后一个重要的科学研究目标是,火星地貌和地质特征分析及其与地球的比较分析.火星表面有密集的陨石坑、火山和峡谷,包括太阳系最高的山:奥林帕斯山和最大的峡谷:水手号峡谷.火星另一个独特的地形特征是南北半球的明显差别:南方是古老、充满陨石坑的高地,北方则是较年轻的平原.火星两极有水冰与干冰组成的极冠,并随着季节消长.目前研究火星地貌的主要数据源是火星探测器传回的遥感影像及光谱数据.

火星是当前各航天大国进行深空探测的重点对象,为了保障探测任务的成功实施并顺利完成以上科学目标,火星重力场在其中扮演了重要角色.火星探测器进入绕火星的轨道后,受到的最大摄动力为火星非球形引力摄动,为了成功实施探测器的变轨以达到预期的轨道构型,同时也为了火星着陆器顺利登陆,都必须精确了解火星重力场;此外,火星是太阳系中与地球最为类似的行星,对火星内部结构和演化历史的深入了解可以进一步揭示太阳系的演化规律,而精确的火星重力场模型是研究火星内部构造最主要的手段.火星重力场与地球重力场类似,刻画了几十亿年以来火星内部结构和外部环境的演化,结合火星重力场和火星地形模型,可以用来研究火星对大的冲击物的反应、火星表面地质过程和火星内部动力学,这些研究是当今行星科学研究领域的重要内容.

对火星重力场的研究方法对地球和月球重力场的研究方法类似.由于测量手段的限制,对火星重力场的解算主要是基于大量的地面测站轨道跟踪数据,结合轨道动力学理论,在对火星探测器进行精密定轨的同时,解算火星重力场模型位系数,建立相应的火星重力场模型.

## 3 火星重力场模型发展及展望

从上世纪70年代开始,美国和前苏联已经发射了大量的火星探测器.在Mariner 9和Viking Orbit 1,Viking Orbit 2探测器发射之前,对火星重力场的了解主要局限于火星的万有引力常数和火星的扁率.这两个参数的求解主要是基于对火星自然卫星的光学观测数据和Mariner 4、Mariner 6以及Mariner 7飞越火星时的短弧段跟踪数据(见1967年Wilkins发表的工作<sup>[1]</sup>和Anderson 1970年发表的工作<sup>[2]</sup>).火星万有引力常数的解算也可以通过观测火星对其他天体的探测器引起的摄动间接获取.1967年,Ash

等<sup>[3]</sup>综合类地行星的射电跟踪与光学观测数据,确定了包括火星在内的行星的万有引力常数。

对火星全球重力场特征的真正意义上的了解开始于对 Mariner 9 跟踪数据的分析处理. Marine 9 由美国宇航局发射,自 1971 年 11 月开始围绕火星进行科学任务探测,运行期为 11 个月,它的轨道是周期为 12 小时,倾角为  $64^\circ$  的大偏心率轨道,近地点高度的变化范围为 1390—1650km. 基于 Mariner 9 的跟踪数据,研究人员进行了大量分析,这一时期给出的火星重力场模型主要为低阶次模型,解算方法主要是基于 Lagrange 行星运动方程的解析法. 1973 年, Lorell 等<sup>[4]</sup>根据 2 个 19 天长的弧段解算了  $10 \times 10$  阶次的重力场模型. 基于这一模型,发现了在火星的 Tharsis 区域,火星大地水准面扰动达 1km,这表明火星重力场模型要远比地球重力场模型“粗糙”. 1974 年, Born<sup>[5]</sup>利用 Marine 9 和火星自然卫星的光学跟踪数据,给出了  $6 \times 4$  阶次的重力场模型. 1975 年, Reasen-berg<sup>[6]</sup>基于 12 个 9 至 10 天的弧段数据,得出了一个  $6 \times 6$  阶次的重力场模型. 1978 年, Sjogren<sup>[7]</sup>采用点质量法处理了 28 个短弧段数据,弧段长度为 2 小时,解算的点质量个数为 92,在火星表面上的分布间隔为  $22^\circ$ ,根据点质量法得出的火星重力场与上述多个模型吻合较好. Viking Orbit 1 和 Viking Orbit 2 分别于 1976 年 7 月和 8 月进入火星轨道,两个探测器的轨道在运行期间进行了多次调整, Viking Orbit 1 在运行期间倾角维持在  $39^\circ$ ,但近火点高度从 1500km 调整为 300km, Viking Orbit 2 倾角从  $55^\circ$  调整为  $80^\circ$ ,近火点高度则由 1500km 调整为 300km. 这三个探测器在倾角和轨道高度上互为补充,有利于以更高的分辨率解算火星重力场模型. 1977 年, Gapeynski 等<sup>[8]</sup>利用有限的 Mariner 9 和 Viking Orbit 跟踪数据,解算了  $6 \times 6$  阶次的重力场模型. 1979 年, Christensen<sup>[9]</sup>和 Balmino 综合更长弧段的数据,将解算阶次提高到了  $12 \times 12$ . 1982 年, Balmino 等<sup>[10]</sup>综合更长弧段的跟踪数据,解算了  $18 \times 18$  阶次的重力场模型,与同时期得到的火星地形模型进行的相关性分析,表明两者在长波段具有很强的相关性,这为火星岩石圈应力状态和火星表面地形均衡状态的分析提供了依据。

进入上世纪 90 年代后,随着计算机技术和地面跟踪技术的发展以及大量新型火星探测器的发射,火星重力场模型得到了更大程度的发展. 1993 年, Smith 等<sup>[11]</sup>为了更大限度地提取 Mariner 9 和 Viking Orbit 跟踪数据中包含的重力场信息,将解算阶次提高到  $50 \times 50$ ,得到重力场模型 GMM-1. 为

了克服由于跟踪数据分布的不均匀性导致的高阶项求解的发散问题,在解算中引入了 Kaula 约束. 1995 年, Knonpliv<sup>[12]</sup>和 Sjogren 利用同样的数据,解算了  $50 \times 50$  阶次的重力场模型 Mars50c. 与 GMM-1 不同的是在这一模型的解算中引入了空间约束,与 Kaula 约束相比,空间约束在 Tharsis 火山、Olympus 山等大的质量体附近要弱,这更有利于提取这些特殊区域的重力场信息。

MGS(Mars Global Surveyor,火星环球勘测者)和 Mars Odyssey(火星奥得赛)两个火星探测器探测任务的成功实施,为火星重力场的解算提供了更丰富的数据. MGS 由美国宇航局于 1996 年 12 月发射,1997 年 9 月到达火星,整个任务于 2006 年结束. 其科学目标主要是研究火星大气、地质、地表—大气交互作用机制,获取火星表面地形图以及元素成分分布图,同时改进火星重力场与磁场模型. MGS 与上世纪 70 年代的探测器相比有显著改进, MGS 采用 X 波段进行跟踪,比 70 年代采用的 S 波段受到的地球电离层和太阳等离子体的影响要小, 10s 积分的观测数据精度优于 0.1mm/s. MGS 的轨道是倾角为  $92^\circ$  的近圆形轨道,轨道高度为 400km. Mars Odyssey 由美国宇航局于 2001 年 4 月发射,2001 年 10 月到达火星,轨道倾角为  $93.1^\circ$ ,在调整至  $390 \times 455$ km 的工作轨道之前,其近火点高度为 200km,这一高度的跟踪数据有利于改进重力场的高阶项. 基于 MGS 重力验证轨道段和固定高增益天线工作轨道段(至 1999 年 3 月)的跟踪数据和历史上的 Mariner 9 和 Viking Orbiter 的轨道跟踪数据,1999 年, Goddard 中心的 Smith 等<sup>[13]</sup>解算了  $75 \times 75$  阶次的重力场模型 MGS75B. 2001 年, Lemoine 等<sup>[14]</sup>根据部分 MGS 轨道跟踪数据以及激光测高数据,解算了  $80 \times 80$  阶次的重力场模型 GMM-2B. 基于更长弧段的 MGS 跟踪数据, Goddard 中心多次更新了模型,相继给出  $80 \times 80$  阶次的模型 GGM1025 和  $90 \times 90$  阶次的模型 GGM1041C. 同时,美国喷气推进实验室(JPL)根据相同的数据,给出了  $75 \times 75$  阶次的重力场模型 MGS75D、MGS75E,  $85 \times 85$  阶次的重力场模型 MGS85F、MGS85F2、MGS85H2. 2006 年, Knonpliv 等<sup>[15]</sup>综合已有的 MGS 和 Mars Odyssey 轨道跟踪数据,解算了最新的 95 阶次火星重力场模型 MGS95J. 两个中心给出的最新的火星重力场模型的结果大致吻合,只是 Goddard 的模型用到的数据主要为 MGS 和激光测高数据,并且采用的是国际天文联合会(IAU)给定的参考框架; JPL 则综合了 MGS 和 Mars Odyssey 的跟踪数据,同时利

用了更为精细的基于 Pathfinder 的参考框架模型。

为了更深入地了解火星重力场及其时变特征、火星内部结构及大气运行机理,并寻找火星水冰的存在证据,美国和欧空局相继开展了更多的火星探测项目.美国宇航局于 2005 年发射 MRO (Mars Reconnaissance Orbit, 火星探索者),经过变轨后成为轨道高度为 250km 左右近圆极轨道卫星,这一高度的数据有利于解算更高精度的、高阶次火星重力场模型.鉴于 GRACE (重力反演与气候实验)计划的成功实施,美国宇航局计划在火星实施类似的计划 MarsGRACE,设计两个高度为 250km 的卫星,进行星间的微波测距、测速,这一技术势必会大大改善当前对火星重力场及其时变特征的了解程度.欧洲空间局于 2003 年实施的火星探测计划 Mars Express 为一极轨大偏心率轨道,近火点为 250km,远火点为 11500km.这一特征的轨道不利于解算高精度的全球重力场模型,但有利于提高近火点附近局部区域重力场模型的精度,同时改进火星引力质量、火卫一和火卫二的质量以及星历的解算精度(见 2007 年 Lainey 发表的工作<sup>[16]</sup>和 2008 年 Rosenblatt 发表的工作<sup>[17]</sup>).这些量的测算精度的改进,则可以反过来改进火星重力场模型解算精度。

欧洲空间局计划于 2013 年实施的火星探测计划 ExoMars 与以往不同,这一探测计划将在火星表面放置一着陆器,在着陆器上安装有 X 波段信号转发机.通过这一设备,可以实现地面测站和着陆器的 Doppler 测量,进而更高精度地获取火星岁差、章动与极移等定向参数及其变化(见 2008 年 Dehant 发表的工作<sup>[18]</sup>).这些参数的确定有利于改进火星惯性矩的精度,为火星内核成分及半径的确定提供更精确的约束.导致火星自转变化的主要因素在于火星大气和冰盖质量变迁,这一计划的成功实施,可以进一步了解火星大气的运行机制和火星冰盖的消融过程.这一探测计划的另一设想是实现探测器和着陆器之间的链路测量,着陆器的位置可以通过地面测站的 Doppler 测量精确确定.以它作为跟踪站,进行火星探测器的跟踪测量,可以提供对火星重力场更为敏感的观测量,对火星重力场精度的改进具有重要意义。

#### 4 “萤火 1 号”在火星重力场探测中的贡献

“萤火 1 号”将以小倾角大偏心率高轨道运行,

主要科学目标是进行火星的电离层掩星观测,分析研究火星电离层特征及其与太阳风的交互作用,同时也用于研究火星重力场及其时变特征.“萤火 1 号”轨道特征有利于研究赤道区域重力场以及火星低阶带谐项系数.目前用于火星重力场模型的卫星跟踪数据主要来自于低轨、极轨、圆轨道卫星,这一特征的轨道主要有利于解算中高阶位系数,结合 MEX 和“萤火 1 号”两颗大偏心率卫星轨道的跟踪数据,则可以改进低阶项求解精度.“萤火 1 号”运行过程中主要受到的摄动力是火星的非球形摄动,这一轨道高度受到的大气阻力可以忽略不计.已有的火星探测器的轨道跟踪数据主要局限在极轨和高倾角轨道.“萤火 1 号”的轨道是首个轨道面接近火星赤道面的低倾角轨道,其轨道跟踪数据可以在轨道倾角方面对已有的跟踪数据进行补充,有利于降低低阶带谐项系数的相关性,并且由于其运行过程中姿态调整频率较低,飞行器主要处于自由飞行状态,适合长弧段定轨,这有助于改进当前对火星重力场低阶位系数的了解,同时考虑到已在轨运行的 MGS、Mars Odyssey 以及 MRO、MarsGRACE 等探测器,将可以获得时段长度达十多年的轨道跟踪数据.这些丰富的数据可以用于探测火星重力场低阶项的时变规律,相比于已有的时变分析(见 2006 年 Konopliv 等发表的工作<sup>[9]</sup>),这些数据可以分辨出低阶项更长周期的变化规律,这一分析将有利于进一步揭示火星表面季节性质量变迁、火星大气运行以及两者交互作用的机理。

#### 5 结束语

根据我国 2006 年公布的《航天白皮书》以及国家“十一五”规划精神,深空探测将会是我国近二十年来航天事业发展的主要内容.继“嫦娥 1 号”绕月成功后,火星探测将会是我国进一步拓展深空探测的重头戏。

我国将于 2011 年与俄罗斯合作发射火星探测器“萤火 1 号”,该探测器将以小倾角、大偏心率、高轨道运行,可以补充已有的火星探测器轨道,更完备地进行火星重力场模型的解算,提高现有火星重力场模型低阶带谐项系数解算精度.对“萤火 1 号”的测控主要采用开环测量模式,包括单程 Doppler 和 VLBI 测量,与传统的双程/三程测距、测速模式有所区别,这为研究新型数据类型对火星重力场敏感性探测提供了研究条件。

在“萤火 1 号”成功运行的基础上,可以考虑在

我国后续的火星探测任务中进一步改变倾角及轨道高度. 将轨道倾角设计在火星冻结轨道附近, 可以保证探测器长时间的自由飞行, 降低轨道调整的能量需求. 同时将轨道降低至 500km 左右, 有利于解算更高阶次的火星重力场模型, 可以对现有火星重力场模型进行较大程度的改进.

总之, “萤火 1 号”的成功实施, 除了能对现有火星重力场模型作出独特贡献之外, 同时也可以为我国后期火星探测器的设计及后续轨道跟踪数据的充分利用和处理打下良好的基础.

### 参考文献

[1] Wilkins G A. A new determination of the elements of the orbits of the satellites of Mars. In: edited by G. Contopoulos. Theory of Orbits in the Solar System and in Stellar Systems. Academic, San Deigo, Calif. , 1967, 271—273

[2] Anderson J D, Efron L, Wong S K. Science, 1970, 167: 277

[3] Ash M E, Shapiro I I, Smith W B. Astron. J. , 1967, 72: 338

[4] Lorell J *et al.* Icarus, 1973, 18: 304

[5] Born G H. J. Geophys. Res. , 1974, 79(32): 4837

[6] Reasenberg R D, Shapiro I I, White R D. Geophys. Res. Lett. , 1975, 2(3): 89

[7] Sjogren W L, Wimberly R N, Cain D L *et al.* Mars gravity:

Additional resolution from Viking Orbiter 1. In: Proceedings of the Lunar and Planetary Science Conference, 3561—3573, New York: Pergamon, 1978

[8] Gapecynski J P, Tolson R H, Michael W H. J Geophys. Res. , 1977, 82(28): 4325

[9] Christensen G J, Balmino G. J. Geophys. Res. , 1979, 84 (B14): 7943

[10] Balmino G, Moynot B, Vales N. J. Geophys. Res. , 1982, 87: 9735

[11] Smith D E, Lerch F J *et al.* J. Geophys. Res. , 1993, 98 (E11): 20871

[12] Konopliv A S, Sjogren W L. JPL Publ. 95—5, Jet Propul. Lab. , Pasadena, Calif. , Feb. 1995

[13] Smith D E, Zuber M T *et al.* J. Geophys. Res. , 1999, 104: 1885

[14] Lemoine F G, Smith D E, Rowlands D D *et al.* J. Geophys. Res. , 2001, 106: 23359

[15] Konopliv A S, Yoder C F, Standish E M *et al.* Icarus, 2006, 182: 23

[16] Lainey V, Dehant V, Patzold M. Astronomy & Astrophysics, 2007, 465: 1075

[17] Rosenblatt P, Lainey V, Maistre S *et al.* Planetary and Space Science, 2008, 56: 1043

[18] Dehant V, Folkner W, Renotte E *et al.* Planetary and Space Science, 2008, 57(8): 1050

## 中国物理学会通讯

### 第四十届国际物理奥林匹克竞赛在墨西哥举行

第四十届国际物理奥林匹克竞赛(以下简称国奥赛)于 2009 年 7 月 11—19 日在墨西哥尤卡坦州梅里达市举行. 参加这次竞赛的 317 名选手来自 76 个国家/地区. 中国队由 5 名高三年级的学生组成, 他们分别是史寒朵(女, 浙江镇海中学)、林倩(女, 华南师大附中)、雷进(湖北荆州中学)、熊照熙(深圳中学)和管紫轩(北京人大附中).

本次竞赛分理论和实验两部分. 获得金牌的选手共 41 名, 银牌 70 名, 铜牌 79 名, 表扬奖 45 名, 总计获奖选手 235 名. 此外, 还设立了总成绩第一名、理论成绩第一名、实验成绩第一名、女生第一名等单项奖. 我国 5 名选手凭借优秀的学科素质, 发挥出色, 全部获得金牌. 史寒朵一人荣获了总成绩第一、实验成绩第一和女生第一等 3 个单项奖. 林倩和雷进分别取得了总分第四和第五名的好成绩. 国际物理奥委会主席约登博士(Dr. Hans Jordens)在接受采访时表示, 这是国奥赛 40 年来首次由女生获得总分第一名. 竞赛会刊最后一期的封面刊登了史寒朵同学领奖时的照片, 并在会刊上刊登了对她的采访. 会刊上写到: “当来自中国的史寒朵领取总

分第一名奖牌时, 全场起立热烈鼓掌达数分钟之久. 回荡的掌声为这座剧院(注: 闭幕式在剧院里举行)增添了光彩.”

美国普林斯顿大学教授、诺贝尔物理奖得主约瑟夫·泰勒(Joseph Hooton Taylor)教授参加了本次竞赛活动, 他所做的题为“双脉冲星和相对论性引力”的报告, 受到参赛学生及领队的热烈欢迎, 并在闭幕式上为获奖学生颁奖.

墨西哥政府、尤卡坦州政府及墨西哥有关机构对这次竞赛很重视. 卡尔德龙总统(C. Felipe Calderón)、公共教育部伊拉扎巴尔部长(M. Alonso Lujambio Irazábal)、尤卡坦州帕且库州长(L. Ivonne Aracely Ortega Pacheco)等都担任了本次竞赛委员会名誉委员. 竞赛的闭幕式热烈而隆重, 约登主席、委员会秘书长阿提教授(Maija Ahtee)以及帕且库州长的代表等也出席了闭幕式.

由于委员会阿提秘书长任期已到, 在委员会全体会议上, 中国台北队领队林明瑞教授以 58 对 56 票的微弱优势当选为国际物理奥林匹克委员会的秘书长.

(北京大学物理学院 陈晓林 供稿)