

应用天文学研究进展

黄 城

(中国科学院上海天文台 上海 200030)

(中国科学院国家天文台 北京 100012)

摘 要

对应用天文学涉及的领域以及国际上应用天文学发展的特点作了介绍, 分析了我国应用天文学的研究现状, 展示了我国在应用天文所依托的基础科学研究领域和应用天文学领域取得的成绩与进展, 其涉及范围比较广泛; 但也指出了与国际先进国家相比我国应用天文学的水平尚有差距。最后对我国应用天文发展提出了初步的构想。

关键词 应用天文学 — 领域 — 进展 — 今后发展构想

分类号 P12, P13

1 引 言

应用科学同“理论科学”相对, 指直接服务于生产或其他社会实践的科学。它包括应用理论和应用技术, 如应用法学, 应用数学等。它以基础科学成果为理论基础, 同时也为基础科学提供新的研究课题和研究手段。应用科学的发展直接关系到国家建设的发展速度^[1]。

作为应用科学之一的应用天文学其依托的基础科学是天体测量学与天体力学。长期以来天体测量学主要涉及的基本天体测量是确定天体的位置、自行和视差(星表), 此外天体测量学还涉及天文常数的定义或确定、天球参考系的定义与实现、时间的定义与实现以及地球自转变化的测量、地球自转理论。而天体力学是研究天体的运动和形状的学科, 它涉及的主要内容是多体问题、摄动理论、定性理论、天文动力学(包括人造卫星运动理论)以及数值方法、天体形状和自转理论、天文历书编算等^[2~4]。

像其它基础科学一样, 天体测量学与天体力学在生产或其它社会实践(包括国防建设)中、在地球和空间环境监测中、在与其它学科交叉的前沿领域中正发挥着其应有的作用, 它们在这些应用领域中的研究内容构成了应用天文学。

2 应用天文学涉及的领域

传统的应用天文学,又称为实用天文学,主要用于航海和航空导航以及地面点位的天文测量。随着20世纪50年代后星际航行事业的发展和现代高速电子计算机的广泛使用,特别是现代空间技术的发展,已在太阳系的全局系统和地球附近的局部系统都取得了高精度的观测水平。前者如行星雷达测距、激光测月及毫秒脉冲星计时的精度都分别达到了米级、厘米级和微秒的水平。后者如卫星(LAGEOS卫星)激光测距精度已达1cm,甚长基线干涉测量测定基线与极移精度为厘米级、测角精度达0.5mas, GPS系统原子钟比对精度达100ns,而最好的原子钟频率的相对稳定性可达 3×10^{-15} 。这些使应用天文学出现了蓬勃发展的新局面。

与应用天文有关的地面观测设备有:光电等高仪、子午环、光学和射电望远镜、原子钟以及CCD技术等。与应用天文有关的空间观测技术包括空间天体测量卫星(依巴谷卫星)^[5,6]、卫星激光测距(SLR)^[7,8]、激光测月(LLR)^[8]、甚长基线干涉(VLBI)^[8,9]、全球定位系统(GPS)^[10]、卫星测高技术(SAT)^[11]、星载精密测距测速系统(PRARE)^[12]、星载多普勒定轨定位系统(DORIS)^[13,14]、以及合成孔径雷达干涉技术(InSAR)等^[15]。

应用天文涉及的领域有:

(1) 与国民经济和国防建设有关的领域:这包括航空、航海以及空间飞行器(导弹、卫星)导航、城市交通管理(例如GPS城市交通管理系统)、高精度时频系统建立以及空间飞行器(如海洋卫星、登月探测器)轨道设计、测轨和定轨。

(2) 地球环境监测:这涉及用空间技术(如GPS技术)监测与无线电通讯状况有关的电离层电子密度的变化、用空间技术对与地球气候以及区域天气变化有关的大气参数(温度、压强、湿度)变化的监测、用卫星测高技术监测海洋和海平面变化、用空间技术监测板块运动、地壳形变以及地震孕育等。

(3) 空间环境监测:近地小行星和空间碎片的监测、日地空间环境(如地磁场)的监测以及天文现象(彗星、流星雨等)的预报。

(4) 对地球科学的应用(天文地球动力学):地球整体运动(自转和极移)和局部(大气、海洋、地壳和地球内部)运动的监测;地球参考系的建立与维持,地球引力场的建立,地球自转与地球各圈层运动相互作用与机理以及自然灾害预测的天文学方法的研究。

(5) 为基础科学提出的新研究领域:相对论天体力学和天体测量学(包括在广义相对论框架下参考系理论、天体的平动与转动、电磁波讯号的传播、时间尺度以及天文常数)、在最优估计理论基础上建立的统计定轨理论、更接近真实地球的新的地球自转理论。

3 国际应用天文学发展特点

(1) 观测手段从地面推向空间

空间天体测量卫星(依巴谷卫星)以及空间VLBI卫星(如VSOP)是地面基本天体测量与地面VLBI观测向空间发展的典范^[16,17],它们的精度与分辨率都比地面的观测有量

级上的提高。

(2) 观测精度有了质的飞跃

空间技术观测精度比传统的地面天体测量设备的观测精度有了量级上的提高。例如: VLBI 测角精度已达亚毫米量级, 测地面位置以及几千公里距离的精度可达毫米量级。

SLR 测距精度已达亚厘米量级, 正向第四代激光测距仪的毫米量级发展。

GPS 测地面站坐标精度可达毫米量级。

DORIS 测速率精度达 0.3mm/s。

PRARE 测距与测速精度也可达厘米和亚毫米 / 秒量级。

(3) 观测波段从单波段向多波段或全波段扩充

例如卫星雷达测高技术 (SAT) 主要应用于海洋学的研究, 但由于雷达波波束较宽 (约 1° 左右) 而无法应用于地球大陆和冰冻层地形形变的监测。当观测波段推向激光波段, 产生的星载激光测高技术 (SLA), 使波束宽缩小到原来的 $1/10 \sim 1/40$, 从而特别适用 SAT 无法很好工作的云层探测、陆地地形、冰山地形、地面点的精密定位、植被情况跟踪等^[18]。又如单色激光测距, 其观测结果由于单色光尚需通过测距站测距时刻的气压、温度等大气参数进行测距的大气修正。现正在研制的双色 / 多色激光测距是单色激光测距向多波段的扩充, 它的测距大气改正只需通过本身的观测即可修正, 且精度更高^[8]。

(4) 观测的全球性

随着空间技术的发展, 观测的全球性越来越重要与明显了。一方面, 为了精密确定卫星位置以及监测地面测站位置进而研究地壳运动要求布设全球跟踪观测网; 另一方面, 空间对地观测本身就具有全球性, 例如卫星测高技术可全景式地给出全球海洋的变化图, 而星载 GPS 掩星技术给出的是全球分布的各掩星点的大气参数剖面^[19]。已建立的各种全球观测网主要有:

美国宇航局的全球 SLR 网 (9 台仪器)、欧洲 SLR 网 (Eurolas)(18 个站)、西太平洋 SLR 网 (15 个台站)。全球已有 SLR 站 50 余个。VLBI 主要有欧洲 VLBI 网 (EVN)、亚太射电望远镜 (APT)VLBI 网, 国际 VLBI 服务观测网 (30 个站)。GPS 地球动力学服务 (IGS) 的全球观测网由 150 个 GPS 固定站组成。此外还有 DORIS 全球网 (50 个台站) 和 PRARE 全球网 (31 个台站)^[20] 等。

(5) 国际合作性

为适应应用天文观测以及研究内容的全球性, 一系列国际合作计划相继出台, 主要有: 国际地球自转服务 (IERS)、国际 GPS 地球动力学服务 (IGS)、国际激光测距服务 (ILRS)、国际 VLBI 服务 (IVS)、美国宇航局主持的固体地球和自然灾害研究 (SENH) 计划以及亚太空间地球动力学 (APSG) 计划^[21]。APSG 计划是一项由我国倡导并主持的多学科的国际合作计划, 该计划主要目的是联合亚太地区有关科研机构力量, 利用空间对地观测技术, 合作研究该地区的地球动力学现象: 板块运动、地壳形变、海平面变化等。该计划已有包括美国、日本、澳大利亚、俄罗斯等十几个国家和地区参加, 已进行过联测两次, 2001 年 5 月在上海将召开第四届 APSG 国际研讨会议。

(6) 太阳系空间探测成为热点

为了探测生命起源,最近对月球、火星、木卫和土卫六的探测又成了热点,例如对土卫 6,用空间探测器于 1998 年首次在其上空 15km 处发现其表面 6.9% 覆盖着甲烷构成的云层,而 1999 年虽然再次证明了这个发现,但发生了变化,其表面只覆盖 1% 的云层。此外,彗木相撞事件促进了人们对近地小天体(小行星、彗星)的搜索与轨道演化研究的关注。2000 年 9 月 29 日由 Tholen 和 Whiteley 用夏威夷的口径 3.6m 望远镜发现的 2000 SG344 小行星(大小为 30~70m)被预测在 2030 年离地球只有 11 个地月距离^[22],已属对地球构成威胁的近地小天体。此外太阳系空间探测的另一个特点是新的空间技术不断充实新的探测计划。例如用激光测高技术(SLA)在火星环球探测器(MGS)计划中被用于测绘火星全球地形,用 VLBI 技术对 MGS 探测器进行测轨研究,此外 VLBI 技术也被用于火星和金星的自转测量之中。

(7) 新的空间探测计划不断涌现

随着空间技术的发展,应用天文各领域的新的空间探测计划不断涌现。例如为了满足地球物理模型、冰后回弹、海洋洋流和海面地形以及统一全球高程基准等科学研究需要,地球重力场模型必须将中、低频分量的精度提高到厘米级,于是三颗专用的地球重力场探测卫星计划 CHAMP、GRACE 和 GOCE 相继出台^[23,24]。它们是卫星跟踪卫星测量(SST)和卫星重力梯度测量(SGG)的近期计划,这些计划的实施将标志人类探测地球重力场及其变化的新纪元的开始。德国的 CHAMP 卫星是地球科学研究与应用小卫星,已于 2000 年 7 月 15 日发射升空。该卫星高度 418~470km,倾角 87°.275,用 GPS 与 SLR 技术精密定轨,用星载加速度仪测定非保守力摄动加速度。能求解 90 阶次位系数,空间分辨率达到 500km,精度比现有的重力场模型提高 10 倍,这意味着 1000km 波长以上的中长波大地水准面的测定精度可达 1cm。欧美 GRACE 卫星是重力场探测与气象试验卫星,预定 2001 年发射。GRACE 计划由两颗 CHAMP 卫星组成,两卫星在 480~300km 高度,相距 220±50km,其间的距离变化率将以微米级的精度实时测量。GRACE 计划将使 500km 波长以上的中长波大地水准面的测定精度达到 0.1mm,这将是 CHAMP 计划精度的 100 倍。欧空局 GOCE 卫星是重力场和稳态海洋环流试验卫星,是一颗重力梯度测量卫星,预期重力场可求解到 250 阶次,其空间分辨率提高到 100km 波长。计划在 2005 年发射,轨道高度约 260km,倾角 96°.5。预计测得的重力异常精度优于 2mgal,大地水准面精度优于 5cm。此外,由于地面光学测量受大气干扰及仪器引力弯曲影响已无法达到亚毫角秒精度,新的高精度空间天体测量计划纷纷被提出,例如欧空局提出的预定 2009 年发射的 GAIA(用于天体物理的环球天体测量干涉计划)卫星,可观测到亮度达到 20mag 的 10 亿颗星,且预定对亮度为 15mag 的测角精度在 10 μ as。美国 NASA 提出的 SIM(空间光干涉计划)卫星预期 2007 年发射,对亮度为 20mag 的星的测角精度可达 4 μ as。美国海军天文台提出的 FAME 计划的卫星预期 2004 年发射,对亮度为 9mag 的星其测角精度可达 50 μ as^[25]。

星载 GPS 气象学由于反演大气参数剖面的精度与空间垂直分辨率高等优点而得到国际气象界的重视。欧洲的 ACE 计划、我国台湾地区与美国联合提出的 COSMIC 计划都是最新提出来的星载 GPS 气象学计划^[26,27]。前者预期在 2003 年发射卫星,包含 6 颗极轨卫星星座;后者也包含 6 颗但倾角为 72°、高度为 400km 的卫星星座,预期 2005 年发

射。其每天可测到全球分布的高质量的 4000 个掩星点的大气参数剖面, 垂直分辨率可达 200m~1km, 将大大改进人们对全球和区域性大气温度、水汽含量的三维分布的了解, 从而对全球气候变化以及天气预报作出贡献。

4 国内应用天文学研究现状

我国从事应用天文学研究的主要集中在: 中国科学院的上海天文台、紫金山天文台和测量与地球物理所; 南京大学天文系主要从事应用天文的理论研究工作, 中国科学院内陕西天文台从事时间频率工作, 北京天文台、云南天文台、长春人卫站和乌鲁木齐天文台也参加了应用天文的部分研究或观测。

应用天文所依托的基础科学在我国开展得比较早, 取得的成果也较多, 主要有^[4]:

(1) 太阳系稳定性: 主要用数值模拟方法对太阳系各大天体开展了动力学演化研究, 结果表明演化呈混沌状态。

(2) 太阳系天体轨道演化: 研究了小行星带的空隙与聚集分布特征、轨道共振关系, 探讨了行星环的形成、大行星卫星的形状, 计算了它们的精密星历。

(3) 地球和月球自转运动: 基于实测资料和自转流体动力学开展了地球自转运动和月球天平动的研究, 此外也初步开展了比较行星学的研究。

(4) 非线性天体力学: 开展了映射方法在天体力学中的应用研究, 研究了奇次维保测度映射下的 KAM 定理以及天体运动中的扩散现象。

(5) 相对论天体力学和天体测量学的研究: 这包括相对论框架下在地心坐标系以及太阳系质心坐标系中人造卫星精密定轨问题的研究, 1 阶后牛顿黄道概念的提出, 1 阶后牛顿框架下天体引力场多极矩展开方法的研究。

(6) 天体轨道数值方法: 提出了使用能量关系稳定轨道数值积分的方法, 开展了各种数值积分方法的研究。

国内所开展的应用天文学研究几乎涉及应用天文学范畴的各个方面, 主要成绩有:

(1) 天文地球动力学

在叶叔华先生领导下我国早在 20 世纪 70 年代末就在天文地球动力学这一新兴的交叉学科领域开始了开拓性的工作, 先后建立了中国 SLR 网(上海、长春、武汉、北京和昆明)、VLBI 网(上海、乌鲁木齐)、GPS 网(上海、乌鲁木齐、长春、武汉、昆明、北京、西安、拉萨), 启动了叶叔华为首席科学家的国家攀登项目“现代地壳运动和地球动力学研究”和由中国倡导并主持的“亚太空间地球动力学”(APSG)国际合作计划。取得了一系列可喜的成果, 主要成果如:

(I) 建立了空间对地观测软件系统, 我国的 SLR、VLBI、GPS 和 PRARE 等空间技术资料处理能力正接近国际先进水平, 部分资料处理结果已常规提供国际用户使用。

(II) 利用空间对地观测资料较全面地监测和研究了中国大陆地壳运动, 得到了完整的运动图像与基本特征: 中国地壳运动呈现明显的非均匀性、西强东弱; 中国青藏地区地壳运动呈南北向缩短、东西向伸展, 有明显块体特色等重要结论, 这些结论已得到我国地质学家的确认, 并为国内外地质学家多次引用。此外, 对长期以来认为中国大陆受

太平洋板块向西挤压的观点提出了质疑^[28]。

(III) 在国际上首先提出用通约轨道方法解决 GPS/LEO 卫星掩星技术中的掩星位置的控制问题^[29]。对于监测区域性大气变化、数值天气预报、预防台风和洪涝灾害具有重要的现实意义。

(IV) 对历年来一直没有解决的 Chandler 摆动激发问题提出了一个随机激发的模型, 并从理论上给出了激发水平与 Chandler 摆动振幅间的简单关系式。

(V) 在二阶地球动力学扁率精度下, 建立了包含固体内核、流体外核、粘滞地幔、海洋和大气的微椭非刚体地球章动理论, 由于该理论在国际上首次将地球大气效应直接收入动力学方程的边界条件中, 并将边界条件展开到二阶地球动力学扁率而被列为 IAU 2000 章动模型的四个参考模型之一^[30,31]。

(VI) 首次用天文方法通过年际日长变化规律成功地预测了 El Nino 事件^[32]。

(2) 空间目标监测

紫金山天文台和中国科学院人造卫星观测系统长期从事这方面的工作, 先后完成“863”项目中“近地目标的识别研究和卫星编目试验”研究, 对 86 颗原苏联的 ELINT-3 卫星全部进行了搜寻和识别, 搜寻到美国军用卫星 KH-11、LACROSSE 等, 并于 1999 年起搜寻了近 30 颗 NOSS 卫星。紫台还是我国空间碎片观测研究的负责单位, 多次参加了国际空间碎片协调委员会 (IADC) 第 1 工作组的工作。此外小行星的观测定轨工作早期主要集中在紫台与上海天文台, 近来除紫台的小行星工作继续外, 北京天文台发现小行星的工作取得了质的进步。

(3) 飞行器轨道设计、测轨和定轨

上海天文台为航天部在国内首次设计了满足一定约束条件的登月探测器轨道, 对各种空间对地观测卫星进行了实际测轨和定轨工作, 并结合我国气象部门需要开展了 GPS/MET 的 LEO 小卫星的轨道设计工作。

(4) 时间频率工作

我国在 70 年代成功地开展了铷原子钟和氢原子钟的研究, 目前原子钟研究向工程化、小型化和更高精度发展。上海天文台的工程原子钟 (准确度 5×10^{-13} , 稳定度 3×10^{-15}) 已用于 VLBI 的观测和空间研究工作中。采用新型原子氢脉泽机理的小型化氢标准样机也已在上海天文台研制成功, 这为研究空间导航原子钟打下了基础。

1979 年 10 月正式建立的我国原子时系统以及以后的综合原子时系统在国民经济、国防需求和社会发展中发挥了重要作用, 原子时准确度为 10^{-13} , 稳定度为 10^{-14} 量级。我国的长、短波授时服务主要由陕西天文台承担, 陕台结合长波传播修正问题进行了天、地波传播理论研究和实验, 其结论已被国际无线电咨委会 (CCIR) 采用。陕西天文台 1991 年成功地加入 GPS 国际共视比对网, 其 UTC 和国际时间的同步精度已优于 $1 \mu\text{s}$ 。

5 应用天文发展构想

我国应用天文与国际水平比较, 差距还是较大的, 许多领域尚处于初级研究阶段或

空白。主要差距在仪器设备上。考虑到财力与人力的有限,我国应用天文应有所为有所不为,立足于发展已有一定基础的,对国民经济、国防建设发展有重要意义、对基础科学发展有促进作用的应用天文研究和服务领域。建议应用天文重点或优先发展的方向和目标是:

(1) 天文地球动力学: 一阶后牛顿框架下天文参考系和毫米级精度地球参考架的建立和维持; 用空间技术高精度、高分辨率地监测地球整体和各圈层的运动; 开展地球自转与地球圈层运动的相互作用和机理研究, 为人类认识地球环境变化、提高防灾和减灾能力作贡献。

(2) 空间目标监测与卫星动力学: 建立空间目标的实时高精度的天文定位观测系统, 开展近地小行星探索与轨道演化研究, 尽早建成我国的空间预警中心。开展我国应用卫星(包括载人飞船)的精密定轨研究, 研究高层大气模式的动态测定。

(3) 暗天体参考系的建立与研究: 结合大科学工程 LAMOST 需求开展 LAMOST 光纤位置的计量系统的天文校准以及建立供 LAMOST 使用的暗星星表以及暗天体参考系。

为了提高已有应用天文或空间技术(SLR、VLBI、GPS等)观测设备、数据资料、处理软件系统的使用效率与管理水平, 为了避免研究课题的简单重复, 集中精干人员开展研究, 也为了有利于国际合作, 特别是对我国倡导和主持的 APSG 国际合作计划的有力支撑, 建议成立应用天文研究基地, 以有利于我国应用天文的健康发展, 更好地为国民经济与国防建设服务。

参 考 文 献

- 1 辞海编辑委员会, 辞海, 上海: 上海辞书出版社, 1989. 2414
- 2 易照华, 天体力学基础, 南京: 南京大学出版社, 1993
- 3 张承志, 夏一飞. 天体测量学. 北京: 高等教育出版社, 1986
- 4 国家自然科学基金委员会. 天文学, 北京: 科学出版社, 1997
- 5 Perryman M A C et al. *Astron. Astrophys.*, 1997, 323: L49
- 6 Kovalevsky J, Turon C. *Adv. Space Rev.*, 1994, 11(2): 5
- 7 Degnan J. *IEEE Trans. on Geosciene and Remote Sensing*, 1985, GE-23(4): 398
- 8 Smk̄: D, Turcotte D eds. *Contributions of Space Geodynamics: Technology*, AGU Geodynamics Series, 1993, 25:133
- 9 Sovers O J, Fanselow J L, Jacobs C S. *Review on Modern Physics*, 1998, 70 (4)
- 10 King R et al. *Surveying with GPS*, Bonn: DUMLER. 1985
- 11 McGoogan J T. *IEEE Trans. on Wave Theory and Techniques*, 1975, MTT-23 (12)
- 12 张飞鹏, 黄城, 张忠萍. *天文学进展*, 1999, 17(1): 33
- 13 Boucher C et al. *DORIS Days*, 1998, 27-29 April
- 14 Cazenave A, Valette J J, Boucher C. *J. Geophys. Res.* 1992, 97(B5): 7109
- 15 Carlander J C. *Synthetic Aperture Radar System and Signal Processing*, New York: Wiley & Sons. Inc., 1991, 13-49
- 16 Levy G S. *Science*, 1986, 234: 187
- 17 Liekse J. *Astron. Astrophys.*, 1977, 58: 1
- 18 Luthcke S B. *Spaceborne Laser Altimeter Geolocation*, Space Geodesy Branch, GSFC, USA, 1998
- 19 Melbourne W G et al. *The Application of Spaceborne GPS to Atmospheric Limb Sounding and Global Change Monitoring*, Los Angeles: JPL Publication, 1994, 94-18
- 20 叶叔华, 黄城等, *天文地球动力学*, 济南: 山东科技出版社, 2001

- 21 Ye Shuhua, Huang Cheng. In: Cheng K S, Chan K L eds. Proceeding of the 21st Century Chinese Astronomy Conference, Hong Kong, 1996, Singapore: World Scientific 1997, 200
- 22 IAU, Near Earth Objects, IAU Technical Review Team Assessment on Asteroid 2000 SG344, Nov.3, 2000
- 23 Reigber C *et al.* CHAMP-Phase B, Executive Summary, Scientific Technical Report STR96/13, GFZ, Potsdam, 1996
- 24 ESA: European Views on Dedicated Gravity Field Mission: GRACE and GOCE, ESA, ESD- MAG-REP-CON-001, May 1998
- 25 Johnston K J. In: Johnston K J *et al.* eds. Proceedings of IAU Colloquium 180, 2000, 392
- 26 Rocken C *et al.* The Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences, 2000, 11(1): 21
- 27 Anthes R A *et al.* The Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences, 2000, 11(1): 115
- 28 Zhu W Y *et al.* Science in China, 2000, 43(4): 394
- 29 Yan H J, Huang D, Huang C. Geophys. Res. Lett., 1999, 26(4): 451
- 30 Huang C L, Jin W J, Liao X H. Geophys. J. Int., 2001, to be published
- 31 Huang C L. Earth, Moon and Planets, 2001, 84: 125
- 32 Zheng D W, Song G X, Luo S F. Nature, 1990, 348: 119

The Progress in Studies on Applied Astronomy

Huang Cheng

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

(National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100012)

Abstract

The realm of Applied Astronomy and the characteristics of development all over the world are introduced. The present situation of its studies is analyzed and the progress in studies on both Applied Astronomy and basic sciences associated with it in our country is exhibited. Finally, a preliminary consideration for Applied Astronomy development in our country is presented on the basis of the comparison of research achievements between China and other countries.

Key words applied astronomy—realm—progress—consideration for applied astronomy development