

我国航天测控系统的现状与发展

于志坚

(北京跟踪与通信技术研究所, 北京 100094)

[摘要] 随着我国航天任务的日益复杂化、多样化, 对测控的需求也向“高、精、尖”方向发展, 航天测控系统再一次面临新的机遇与挑战。在综合分析国内外航天测控发展历程与现状的基础上, 总结了航天测控的发展特点与发展趋势, 提出了符合我国国情的“优化地基测控网、建设和发展天基测控网、构建深空探测网, 循序渐进构建天地空一体化测控通信系统”的整体发展思路, 并对我国地基、天基、深空探测测控通信系统发展及重点技术进行了分析探讨。

[关键词] 航天; 测控系统; 总体设计; 发展

[中图分类号] V448.2 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2006)10-0042-05

1 我国航天测控系统发展历程与现状

20世纪随着科学技术水平的发展, 人类逐步具备了通过航天活动探索地球以及地球以外天体的能力。根据探测目标和任务的不同, 人类航天活动主要分为地球卫星、载人航天和深空探测三大领域。而各空间活动在具体实施中由不同系统按照各自的分工, 遵照既定的规则, 分工合作, 协同完成。航天测控系统是整个空间活动中不可缺少的一个重要组成部分, 负责对直接承载空间活动的飞行状态的运载器及航天器进行跟踪、测量、监视、控制。不论是无人航天系统, 还是载人航天系统, 它们在执行航天任务时都必须借助航天测控系统进行任务规划, 实施空间操作, 使地面人员随时掌握飞行情况, 达到运行使用的目的。

最初的航天测控系统是在60年代中期卫星观测网的基础上发展起来的, 当时的卫星观测网包括测控中心和南宁等7个测量站, 是我国航天测控系统实现从无到有的跨越。1965年4月, 该网圆满完成了我国第一颗人造地球卫星——“东方红一号”的跟踪测轨任务。到70年代初, 在航天测控

领域首次提出了测控网的概念, 并按测控网进行了规划设计, 根据当时我国的国情提出了测控设备布局适应多场区、多射向、多弹道飞行试验特点和不同发射倾角、不同运行轨道卫星测控要求的发展思路, 确定在已有的测控、通信能力的基础上, 远近结合、全面规划、箭星兼顾、综合利用, 逐步建成一个布局合理、工作协调、适应性强的航天测控网。遵从上述原则, 于70年代末80年代初, 初步形成了我国的近地轨道卫星测控网和地球同步通信卫星测控系统。1988年近地轨道卫星测控网完成了我国第一颗太阳同步轨道卫星——“风云一号”的测控任务, 1984年1月地球同步卫星测控系统完成了我国首次地球同步试验通信卫星——“东方红二号甲”的发射测控任务。

90年代初, 为适应载人航天任务的特殊需求, 我国开始建设新一代航天测控网, 逐步建立了陆、海基统一S频段(USB)测控网及S频段测控网网管中心; 新建了东风发射指控中心和北京航天指挥控制中心, 改造了西安卫星测控中心; 进行了测量船、各测控站测控通信设施的适应性改造; 建立了以数字程控交换为核心, 以卫星通信、光纤通信为

主干信道的集语音、数据、图像传输于一体的大型科研试验通信专用网。新航天测控网可靠性更高、适应性更强，对中、低轨航天器的覆盖率达 15% 以上，天地数据传输速率达 2 Mb/s，满足了载人航天的测控通信要求。同时其技术性能也使我国航天测控网跻身国际先进行列。1999 年 11 月 S 频段测控网成功完成了我国第一艘无人飞船——“神舟”一号的测控通信任务，至此我国航天测控系统实现了由弱到强的转变。

在过去 50 多年的时间内，我国航天测控系统经历了从无到有、从弱到强的发展历程，逐步形成了符合我国国情的航天测控系统，具备了对载人飞船和各类不同轨道的应用卫星的发射及在轨运行以及返回式卫星提供测控支持的能力^[1]。我国航天测控系统立足国内，坚持独立自主、自力更生、自主创新之路，一代代航天测控人发扬艰苦奋斗、无私奉献的航天精神，走出了具有中国特色的发展之路，搭起了我国航天测控的平台和通向太空的天梯，在世界航天测控领域拥有了发言权。

目前我国在用的航天测控网主要包括统一 C 频段航天测控网、统一 S 频段航天测控网；正在积极建设天基测控通信网和深空测控通信网。

1) C 频段航天测控网 统一 C 频段航天测控网由西安卫星测控中心和 2 套全功能固定站、1 套船载站、若干限动站和遥测单收站组成，主要完成 C 频段地球静止轨道卫星转移轨道段和定点后长期管理的测控任务。全功能站主要完成卫星发射转移轨道段测控支持；限动站和遥测单收站主要完成卫星定点后长期管理的测控任务。在地球同步卫星长期管理段已形成了“1 套限动站、3 套单收站共同支持 3~4 颗定点卫星”的多星测控管理模式。C 频段航天测控网为我国 C 频段地球静止轨道卫星的发射和定点管理提供了有效的测控操作。

2) S 频段航天测控网 统一 S 频段航天测控网包括 2 个航天指挥控制中心（北京航天指挥控制中心和西安卫星测控中心）、国内 6 个固定站、2 个活动站和 4 艘远望号测量船，此外还进行了国外建站（卡拉奇站和纳米比亚站）和国际联网（HBK 站和马尔迪站）。这些测控中心、测控站（船）通过两种数据传输手段（地面传输网和卫星通信网）有机结合、协调工作，共同完成对载人航天、中低轨卫星和部分地球同步卫星的测控通信任务。同时，由于其主要技术性能与国际渐趋兼容，因此具

备与国际联网，进行国际测控合作的能力。

3) 测控网络管理 网管中心设在西安卫星测控中心，具备对测控设备的远程监视能力和一定的控制功能，负责整个测控网的日常管理。测控资源的自动化调度水平逐渐提高，能够实现中心对航天器的透明操作。

2 我国未来的航天测控需求

根据我国航天活动中长期发展规划，在卫星应用与科学探测领域，将继续发展环境与灾害监测、地球资源探测、气象探测、海洋探测、卫星通信等系列卫星，辅以各类科学试验和空间科学探测卫星；在载人航天领域，将进行航天员出舱活动、无人交会对接和载人交会对接试验，陆续建设我国的空间实验室和空间站等；在月球与深空探测领域，将逐步实施绕月探测、月面软着陆与月面巡视勘察、自动采样返回以及火星、小行星等深空探测计划。航天活动的持续发展给航天测控系统带来了新的挑战和发展机遇。新的测控需求突出表现在：

1) 高的轨道覆盖率 在载人飞船工程第二步任务中，航天员出舱活动和空间交会对接要求高轨道覆盖率；为提高传输型卫星的利用率和探测信息的时效性，要求高轨道覆盖率；亚轨道飞行器，其轨道机动具有变轨时间突发性和变轨位置的随意性，要求高轨道覆盖率；在月球探测的转移轨道段，要求全程几乎连续的轨道覆盖。

2) 更高的轨道精度 在对地观测卫星和海洋卫星等近地轨道卫星、导航卫星、绕月探测卫星等提出高精度的航天器轨道测量和定位精度的同时，空间交会对接、卫星星座、月球着陆探测还提出了航天器间相对位置精度的更高要求。

3) 更高的数据传输速率 随着对地观察类卫星的大量应用，测控网需要高速率的数据传输能力，测控通信业务传输速率将突破 300 Mb/s。

4) 更多的测控目标和更复杂的测控任务 随着航天技术的发展，卫星应用领域不断扩展，未来一段时间内将有大量军事卫星和民用卫星发射入轨，由多颗卫星组成的卫星星座的应用使得卫星在轨数量激增。同时，在传统单颗卫星的测控任务外，对多星的同时测控支持、多星及星座在轨运行管理等增加了航天测控网的负担和操作复杂性。

5) 远的测控距离 我国确定开展以月球探测为主的深空探测任务，使得航天测控的距离拓展至

40×10^4 km 的月球。遥远的距离带来了巨大的时延,使信号微弱,并限制了深空数据传输速率,这些困难使得测控系统必须尽可能地采用最先进的技术,不断提高通信链路和测控精度。

6) 更低的测控成本 随着航天测控网规模的日益庞大,长期使用后维护费用占的比例很大,航天器在轨寿命的延长使得运行控制费用不断累积,这些都使降低航天测控任务的总费用成为国际航天界的重要课题。

3 我国航天测控技术的发展

航天测控技术是对航天器进行跟踪、测量、控制的综合专用技术,涉及跟踪、遥测、遥控、轨道动力学、计算机、数据处理、监控显示和通信等诸多专业技术领域。我国在这些专业技术的创新成果为未来航天测控系统的发展奠定了技术基础。近年来我国在天基测控技术、深空测控技术、小卫星测控技术和卫星星座测控技术等方面都开展了大量研究工作^[2-4],突破了多项关键技术,并逐步解决了这些新技术在工程实践上的应用问题。

3.1 载人航天测控通信技术

我国载人航天工程测控通信系统在测控通信体制、测控网工作模式、高速数据传输技术、数字仿真技术等多个方面实现了重大技术突破。

载人航天测控通信系统布站设计利用我国有限的国土跨度和航天测控资源实现优化,确保了航天器各关键飞行段的测控通信支持,既满足了载人航天基本的测控通信要求,又兼顾了今后测控通信系统的发展,规模适当、布局合理、技术先进,以较少的投入获得了较大的效益,从而实现了测控通信系统整体效能的优化。

以 S 频段测控系统为骨干的载人航天测控通信系统,充分利用我国现有的测控通信资源,挖潜改造,形成了规模适中、功能齐全的陆海基测控通信系统,既可支持我国载人飞船、所有的中低轨卫星测控,也可支持 S 频段同步卫星和火箭的测控任务,功能强、体系结构合理,是我国今后航天测控主要使用的具有国际同类先进水平的骨干系统。

系统设计符合 CCSDS 建议书等国际标准和规范,通过突破 USB 宽频带测距转发等技术首次实现了我国航天测控网与国外航天测控网的联网。通过联网与国外建站相结合,提高了测控通信覆盖率,减少了航天测量船的数量,节省经费数亿元。

利用对设备的远程监控技术、网络技术及双路由热备份技术等,载人航天测控通信系统在国内首次设计并实现了测控网的透明工作方式,对航天器的数据处理、状态监视、控制决策和实施由航天器的任务中心统一完成,改变了我国航天测控沿用了 20 多年的测控中心、测控站共同负责航天器测量数据处理、航天器控制决策的模式。

载人航天测控通信首次在我国大型国防科研试验任务中采用数字数据网技术,实现了全系统端到端传输的数字化,彻底改变了跨场区数据传输采用话带调制器加卫通话音通道组成点到点专用数据电路的模式,数据传输质量提高了一个量级,使试验任务的数据传输技术水平上了一个新的台阶。

3.2 深空跟踪测量技术

在深空跟踪测量技术方面,除了传统的测距、测速和测角技术外,还跟踪研究了激光测距技术、甚长基线干涉测量技术、实连站干涉仪技术、单向测距测速技术、同波束干涉技术、探测器对探测器的跟踪技术等新的深空跟踪测量技术;针对各种测量资料类型,研究了深空探测器不同轨道段的导航技术;深空通信技术则包括 Ka 频段的大口径天线技术、天线组阵技术、新的编码技术(如 Turbo 码)等。深空测控设备相关的地面 X 和 Ka 频段大口径高效率天线技术,地面高效大功率发射技术,高增益信道编解码技术,低噪声放大器件及高灵敏度接收系统优化设计技术,高精度、高稳定度时间和频率标准技术的研究工作也正在开展中。不少新技术将在我国未来深空测控网中得到应用。

3.3 地球卫星跟踪测量技术

在近地轨道航天器的跟踪测量技术方面,为适应新的任务需求,除了传统的测距、测速和测角技术外,目前正跟踪研究并致力于星地与星间宽带毫米波及光通信技术,多目标测控管理技术,星地与星间链路技术,航天器自主测控技术,测控管理自动化技术,多信源高精度精密测定轨技术,星地与星间一体化测控通信技术,测控资源综合利用与优化配置技术,多星共位技术和天基测控信息路由交换技术等多方面的新技术研究工作。不少新技术都是不断适应新时期航天器的测控需求提出的,随着研究进程的加深,获得的研究成果将逐渐渗透并进入工程实践一线。

4 我国航天测控系统的发展

我国航天测控网的主要发展趋势是优化地基测

控通信网^[5]，建设和发展天基测控通信网，构建深空探测测控通信网，构建天地空一体化测控通信系统，逐步形成各种航天测控资源综合利用、优化配置、整体性能最优的高可靠性的航天测控系统。

4.1 地基测控通信网

从我国航天测控系统的发展情况看，地基测控通信网仍是航天测控系统的基础，将在较长的时间内作为主要的测控手段而存在。完善和加强测控中心的功能，提高地面测控站的集成度和小型化、自动化水平，优化地基测控通信网布局结构，提高测控效率，是今后一段时间的建设重点。

目前我国航天测控网承担包括近地轨道卫星、载人飞船、返回式卫星以及地球同步轨道卫星在内的所有航天任务的测控管理工作。我国地基测控通信网的发展趋势是：

1) 测控网布局逐步优化 随着我国航天事业的发展，航天应用领域日趋多样化，对航天测控系统的需求日益提高。充分考虑各种综合因素，我国的地基航天测控系统亟需优化提高。

2) 测控管理信息化程度逐步增强 通过“透明传输，远程监控”技术，提高测控设备的集成度和小型化程度，测站使用“有人值守、无人操作”，增强设备的集中监控能力。同时，逐步提高网管中心对任务计划调度的自动化水平和对测控设备的远程监控能力，提高测控网综合利用整体效率。

3) 系统的测定轨精度不断提高 根据航天任务发展需要，有计划地开展“航天测控精度工程”，不断满足地球同步轨道卫星多星共位管理和应用卫星的高精度轨道要求。

4) 任务中心操作的自动化程度不断提高 随着我国航天事业的快速发展，需要通过技术进步，逐步提升空间操作的自动化程度，将技术人员从繁重的重复性劳动中解脱出来，最大限度地避免人为操作失误，提高操作控制的可靠性。

5) 测控合作向国际化发展 通过广泛的、有计划的合作，不但能够促进我国航天测控技术的进步，增进相互之间的了解，而且也有利于不断提升我国航天测控在国际航天领域的知名度和影响力。因此，应综合利用全球地面测控资源，在独立自主、平等互利的前提下大力开展国际测控合作。

6) 信息网络传输能力逐步提高 根据航天测控发展需求和通信技术发展要求，采用通信新技术进一步拓展网络规模、带宽、功能、业务等，全面

提升网络的一体化、智能化和信息化水平，实现地面信息传输系统的“网络宽带化，业务综合化，管理集中化，信息安全化，指挥可视化”。

4.2 天基测控通信网

建设和发展天基测控通信网，可从根本上解决测控、通信的高覆盖率问题，同时解决高精度测定轨和大容量信息传输问题，缓解多星测控的压力，是实现航天器高覆盖率的根本出路，是世界航天测控系统的发展趋势，也是我国航天测控系统的建设目标。目前天基测控网主要包括数据中继卫星系统和导航卫星系统。数据卫星中继系统具有轨道覆盖率高、实时性强、数传能力大、系统效费比高等特点，还可缓解多目标测控压力；导航卫星系统具备为中低轨航天器提供性能优良且简单易行的自主导航、实时定位、姿态测定和高精度时间同步能力等。我国天基测控通信网的发展趋势主要表现在：

1) 天基测控通信系统的支持能力逐步增强 更多目标的服务、更大容量的数据传输是航天器对天基测控通信系统，特别是数据中继卫星系统的不断要求。要满足这种不断增长的要求，必须通过技术进步以实现数据中继卫星系统综合能力的提高。

2) 天基资源的用途不断拓展 利用效益逐步提高 随着各类技术的进步，各种天基资源在航天领域的应用将会向更广、更深的层次发展。各种天基资源的有效应用不但能够减少地面站和测量船的使用数量，而且能够弥补地面覆盖盲区，降低地面任务费用，提高测控和通信能力。

3) 天基测控通信系统从地球空间向星际空间扩展 随着深空探测活动的不断推进，行星际探测器对数据中继和飞行导航的要求日益迫切，特别是月球基地、火星基地的设计规划，需要在月球轨道和火星轨道建立相应的数据中继和定位导航网（月球网或火星网），以保证任务的顺利实施。因此，天基测控通信系统将会从地球空间扩展到星际空间，最终形成行星际测控通信系统。

4.3 深空测控通信网

实施和发展深空探测，和平利用和开发太空资源，展现我国航天大国地位，是未来空间活动的重要发展方向之一。以地基测控为基础，构建我国深空测控通信网，是保证我国深空探测计划顺利实施的必备条件。为适应月球探测工程和未来深空探测工程的需求，顺应国际深空测控网发展趋势^[6]，我国正规划建设深空测控通信网。基本发展趋势为：

1) 星地测控通信综合集成 一体化发展 深空测控通信系统建设综合集成, 一网多能, 可以降低系统建设成本, 提高系统效费比, 形成融测控与数据传输于一体的统一的深空测控通信网, 体现深空探测任务“大测控”的概念, 不仅符合我国国情, 也是国际深空测控通信系统的发展趋势。

2) 国际联网 交互支持 我国深空测控通信系统采用国际通用的 S, X 和 Ka 频段, 覆盖 NASA 和 ESA 深空站的频率范围, 数据格式、参数选取、调制体制、编码方式等最大限度地执行国际标准和国际通用作法, 可以方便国际联网, 实现国内外交互提供深空测控通信支持。

3) 测量与导航能力不断提高 由于精度、可用度、通用性等方面的原因, 多普勒和双向距离测量仍是一种重要的测量体制。要积极探索和试验具有更大吸引力的单向多普勒测量、全频谱记录等技术, 提高系统测量精度和多目标测量能力。

4) 操作控制星地结合 航天器自主工作能力不断提高 由于距离遥远, 信号的往返往往需要十几分钟或更长时间, 这使得对航天器的运行控制不可能仅仅由地面即时反馈控制完成。因此, 在深空探测任务中, 要求航天器具有较强的自主控制能力和故障诊断处理能力, 地面具备长周期飞行控制规划和航天器故障趋势的发现与诊断能力, 通过航

天器自主控制与地面操作相结合的方式实现对深空航天器的运行控制。

5 结语

我国航天测控系统正面临新的挑战 and 机遇, 在现有测控网的基础上, 以中长期规划测控需求为牵引, 在国内外测控技术的推动下, 不断适应国际航天测控系统发展趋势, 未来的航天测控系统必将成为天地空一体化协调发展、系统高效可靠运行、可按需提供各种天地测控通信能力的“大测控”系统。

参考文献

- [1] 夏南银主编. 航天测控系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002
- [2] 沈自成. 天基测控网与天基综合信息网相关技术述评[J]. 电讯技术, 2002, (1)
- [3] 石书济. 深空探测与测控通信技术[J]. 电讯技术, 2001, (2)
- [4] 李秉常, 罗续成. 近地小卫星星座测控系统[J]. 遥测遥控, 2001, 22(6)
- [5] 沈荣骏, 赵军. 我国航天测控技术的发展趋势与策略[J]. 宇航学报, 2001, (3)
- [6] 李平, 张纪生. NASA 深空网(DSN)的现状与发展趋势[J]. 飞行器测控学报, 2003, 22(4)

Status Quo and Development of Spaceflight TT&C Systems

Yu Zhijian

(Beijing Institute of Tracking and Telecommunication Technology, Beijing 100094, China)

[Abstract] China's spaceflight missions are more and more complex and diversified and their requirements on TT&C systems are taking on more and more high level, precision and sophisticated features. As such, China's spaceflight TT&C systems are again facing new opportunities and challenges. Based on a comprehensive analysis of the road of development and status quo of spaceflight TT&C systems at home and abroad, this paper summarizes the features and trend of development of spaceflight TT&C systems, and proposes an integrated ground, air and space development strategy for TT&C and communication system including optimization of the ground-based TT&C network, development of a space-based TT&C network and development of a deep space network taking into consideration the specific conditions of China in the field. The paper also explores key technologies for development of China's ground-based, space-based and deep space exploration TT&C and communication networks.

[Key words] spaceflight; TT&C system; system-level design; development