

总 序

党的二十大胜利召开，吹响了以中国式现代化全面推进中华民族伟大复兴的前进号角。习近平总书记强调“教育、科技、人才是全面建设社会主义现代化国家的基础性、战略性支撑”^①，明确要求到2035年要建成教育强国、科技强国、人才强国。新时代新征程对科技界提出了更高的要求。当前，世界科学技术发展日新月异，不断开辟新的认知疆域，并成为带动经济社会发展的核心变量，新一轮科技革命和产业变革正处于蓄势跃迁、快速迭代的关键阶段。开展面向2035年的中国学科及前沿领域发展战略研究，紧扣国家战略需求，研判科技发展大势，擘画战略、锚定方向，找准学科发展路径与方向，找准科技创新的主攻方向和突破口，对于实现全面建成社会主义现代化“两步走”战略目标具有重要意义。

当前，应对全球性重大挑战和转变科学研究范式是当代科学的时代特征之一。为此，各国政府不断调整和完善科技创新战略与政策，强化战略科技力量部署，支持科技前沿态势研判，加强重点领域研发投入，并积极培育战略新兴产业，从而保证国际竞争实力。

擘画战略、锚定方向是抢抓科技革命先机的必然之策。当前，新一轮科技革命蓬勃兴起，科学发展呈现相互渗透和重新会聚的趋

^① 习近平：高举中国特色社会主义伟大旗帜 为全面建设社会主义现代化国家而团结奋斗——在中国共产党第二十次全国代表大会上的报告。北京：人民出版社，2022：33。

势，在科学逐渐分化与系统持续整合的反复过程中，新的学科增长点不断产生，并且衍生出一系列新兴交叉学科和前沿领域。随着知识生产的不断积累和新兴交叉学科的相继涌现，学科体系和布局也在动态调整，构建符合知识体系逻辑结构并促进知识与应用融通的协调可持续发展的学科体系尤为重要。

擘画战略、锚定方向是我国科技事业不断取得历史性成就的成功经验。科技创新一直是党和国家治国理政的核心内容。特别是党的十八大以来，以习近平同志为核心的党中央明确了我国建成世界科技强国的“三步走”路线图，实施了《国家创新驱动发展战略纲要》，持续加强原始创新，并将着力点放在解决关键核心技术背后的科学问题上。习近平总书记深刻指出：“基础研究是整个科学体系的源头。要瞄准世界科技前沿，抓住大趋势，下好‘先手棋’，打好基础、储备长远，甘于坐冷板凳，勇于做栽树人、挖井人，实现前瞻性基础研究、引领性原创成果重大突破，夯实世界科技强国建设的根基。”^①

作为国家在科学技术方面最高咨询机构的中国科学院（简称中科院）和国家支持基础研究主渠道的国家自然科学基金委员会（简称自然科学基金委），在夯实学科基础、加强学科建设、引领科学研究发展方面担负着重要的责任。早在新中国成立初期，中科院学部即组织全国有关专家研究编制了《1956—1967年科学技术发展远景规划》。该规划的实施，实现了“两弹一星”研制等一系列重大突破，为新中国逐步形成科学技术研究体系奠定了基础。自然科学基金委自成立以来，通过学科发展战略研究，服务于科学基金的资助与管理，不断夯实国家知识基础，增进基础研究面向国家需求的能力。2009年，自然科学基金委和中科院联合启动了“2011—2020年中国学科发展

^① 习近平. 努力成为世界主要科学中心和创新高地 [EB/OL]. (2021-03-15). http://www.qstheory.cn/dukan/qs/2021-03/15/c_1127209130.htm[2022-03-22].

战略研究”。2012年，双方形成联合开展学科发展战略研究的常态化机制，持续研判科技发展态势，为我国科技创新领域的方向选择提供科学思想、路径选择和跨越的蓝图。

联合开展“中国学科及前沿领域发展战略研究(2021—2035)”，是中科院和自然科学基金委落实新时代“两步走”战略的具体实践。我们面向2035年国家发展目标，结合科技发展新特征，进行了系统设计，从三个方面组织研究工作：一是总论研究，对面向2035年的中国学科及前沿领域发展进行了概括和论述，内容包括学科的历史演进及其发展的驱动力、前沿领域的发展特征及其与社会的关联、学科与前沿领域的区别和联系、世界科学发展的整体态势，并汇总了各个学科及前沿领域的发展趋势、关键科学问题和重点方向；二是自然科学基础学科研究，主要针对科学基金资助体系中的重点学科开展战略研究，内容包括学科的科学意义与战略价值、发展规律与研究特点、发展现状与发展态势、发展思路与发展方向、资助机制与政策建议等；三是前沿领域研究，针对尚未形成学科规模、不具备明确学科属性的前沿交叉、新兴和关键核心技术领域开展战略研究，内容包括相关领域的战略价值、关键科学问题与核心技术问题、我国在相关领域的研究基础与条件、我国在相关领域的发展思路与政策建议等。

三年多来，400多位院士、3000多位专家，围绕总论、数学等18个学科和量子物质与应用等19个前沿领域问题，坚持突出前瞻布局、补齐发展短板、坚定创新自信、统筹分工协作的原则，开展了深入全面的战略研究工作，取得了一批重要成果，也形成了共识性结论。一是国家战略需求和技术要素成为当前学科及前沿领域发展的主要驱动力之一。有组织的科学研究及源于技术的广泛带动效应，实质化地推动了学科前沿的演进，夯实了科技发展的基础，促进了人才的培养，并衍生出更多新的学科生长点。二是学科及前沿

领域的发展促进深层次交叉融通。学科及前沿领域的发展越来越呈现出多学科相互渗透的发展态势。某一类学科领域采用的研究策略和技术体系所产生的基础理论与方法论成果，可以作为共同的知识基础适用于不同学科领域的多个研究方向。三是科研范式正在经历深刻变革。解决系统性复杂问题成为当前科学发展的主要目标，导致相应的研究内容、方法和范畴等的改变，形成科学研究的多层次、多尺度、动态化的基本特征。数据驱动的科研模式有力地推动了新时代科研范式的变革。四是科学与社会的互动更加密切。发展学科及前沿领域愈加重要，与此同时，“互联网+”正在改变科学交流生态，并且重塑了科学的边界，开放获取、开放科学、公众科学等都使得越来越多的非专业人士有机会参与到科学活动中来。

“中国学科及前沿领域发展战略研究(2021—2035)”系列成果以“中国学科及前沿领域2035发展战略丛书”的形式出版，纳入“国家科学思想库-学术引领系列”陆续出版。希望本丛书的出版，能够为科技界、产业界的专家学者和技术人员提供研究指引，为科研管理部门提供决策参考，为科学基金深化改革、“十四五”发展规划实施、国家科学政策制定提供有力支撑。

在本丛书即将付梓之际，我们衷心感谢为学科及前沿领域发展战略研究付出心血的院士专家，感谢在咨询、审读和管理支撑服务方面付出辛劳的同志，感谢参与项目组织和管理工作的中科院学部的丁仲礼、秦大河、王恩哥、朱道本、陈宜瑜、傅伯杰、李树深、李婷、苏荣辉、石兵、李鹏飞、钱莹洁、薛淮、冯霞，自然科学基金委的王长锐、韩智勇、邹立尧、冯雪莲、黎明、张兆田、杨列勋、高阵雨。学科及前沿领域发展战略研究是一项长期、系统的工作，对学科及前沿领域发展趋势的研判，对关键科学问题的凝练，对发展思路及方向的把握，对战略布局的谋划等，都需要一个不断深化、积累、完善的过程。我们由衷地希望更多院士专家参与到未来的学

总 序

科及前沿领域发展战略研究中来，汇聚专家智慧，不断提升凝练科学问题的能力，为推动科研范式变革，促进基础研究高质量发展，把科技的命脉牢牢掌握在自己手中，服务支撑我国高水平科技自立自强和建设世界科技强国夯实根基做出更大贡献。

“中国学科及前沿领域发展战略研究（2021—2035）”

联合领导小组

2023年3月

前 言

定位、导航与定时 (positioning, navigation and timing, PNT) 是关系国家安全和维持社会各行各业有序运转的重要基础, 是推动国家信息产业发展、国民经济建设、国防现代化的重要驱动力。2018 年, 中国科学院与国家自然科学基金委员会联合设立了“定位、导航和授时发展战略研究(2021—2035)”项目。2018 ~ 2021 年, 项目组通过召开专家咨询会、开展调研和学术交流等方式, 完成了“定位、导航和授时发展战略研究(2021—2035)”学科发展战略研究报告的编写。2021 ~ 2022 年, 项目组对我国“十三五”期间“导航时频新技术”研究成果进行了系统梳理, 总结了 PNT 技术的发展历程与发展规律, 提出了 2021 ~ 2035 年我国 PNT 学科及技术发展方向。2022 年 3 月, 研究报告通过了中国科学院地学部第十七届常委会第 5 次会议审定以及国家自然科学基金委员会的结题审核, 交科学出版社出版。

本书从定位、导航技术和时间频率技术两个方面, 总结了 PNT 技术的科学意义、战略价值与技术发展历程; 根据物理原理, 分类梳理了目前主要应用的 PNT 技术, 并对各种 PNT 技术的原理、特点及涉及的关键科学技术问题进行了分析和梳理; 结合 PNT 学科及技术发展现状, 绘制了国家 PNT 体系架构, 对未来特别是“十四五”时期我国 PNT 体系发展方向、技术路线进行了深入的研究, 并提出

相关政策建议。

本书的部分内容已为国家综合 PNT 体系建设论证提供了理论支撑；部分研究成果和建议被科学技术部“地球观测与导航”重点专项管理办公室采纳，为重点研发计划项目“国家 PNT 体系弹性化架构设计与关键技术示范验证”提供支持；部分成果为国防领域微型 PNT 终端研制提供了支撑。

感谢中国科学院学部学科发展战略研究项目(编号: XK2019DXC004)以及国家自然科学基金专项项目(编号: L1924033)的支持。在本书的撰写过程中,贾小林作为主笔撰写了国家综合 PNT 体系设计相关内容和卫星导航相关章节;毛悦、宋小勇、秦显平、冯来平、任红飞参与撰写了天文导航、无线电导航和其他导航技术相关章节;蒋庆仙参与撰写了惯性导航技术相关章节;乌萌、杨秀策、宗文鹏、马越原、欧阳明达参与撰写了匹配导航技术相关章节;蔺玉亭、张慧君参与撰写了时间频率技术章节;孙碧娇、徐天河、卢晓春参与了国内外 PNT 相关政策的技术素材准备,任夏、赵润、邹德才对本书文稿进行了校对。

感谢所有为本书编制付出智慧及劳动的同事和朋友。

杨元喜

《中国定位、导航与定时 2035 发展战略》项目组组长

2022 年 11 月

摘 要

1. 定位、导航与定时重大需求

PNT 信息是人类活动的基础支撑信息之一。从早期依靠测日观星的经验定时定位，到借助钟摆、经纬仪等机械仪器定时定位，到使用石英钟、全站仪等电子仪器定时定位，到如今依靠卫星系统定时定位，PNT 信息早已渗透科技、经济、民生、国防的各个方面，是国家建设、大众生活以及社会进步不可或缺的基础信息。

PNT 信息是国防安全的信息基石。武器精确打击、联合作战指挥、部队机动部署都离不开 PNT 信息的支持；高速武器、无人平台的运行控制都必须基于高精度、统一的时间和位置信息。

PNT 信息是国家“新基建”的重要基础。电力安全、并网发电需要高精度时间同步；高速公路建设、高速铁路建设与道路检测等需要高精度且基准统一的位置、导航和时间信息支持；通信、互联网等需要时间与位置信息；金融需要高精度的时间信息；“一带一路”建设中无论是实体航路建设还是网络空间的信息高速公路建设都需要精确的位置和时间基准。

PNT 信息是社会稳定运行的重要支撑。城市管理、河道管理、交通管理、安全出行、安全管控、抢险救灾等所有与人们生活密切相关的社会活动都需要时间和位置信息；环境监测、灾害监测与预警等都需要高精度和高分辨率的位置变化信息和时间信息的支持。

PNT 信息是产业及经济模式创新的重要支撑。PNT 信息和技术融入农业，可以促进精密农业甚至智慧农业的发展；PNT 信息和技术融入渔业，可以支撑数字渔业的发展；PNT 信息和技术与物联网和大数据等技术结合，可以促进数字经济的发展。

PNT 信息是社会智能化的基础。智慧城市、智慧海洋、智能驾驶、智能终端等的安全稳定运行无一不需要 PNT 信息的支持；所有无人操控的平台或动态载体的安全运行都需要 PNT 信息的支持。同时 PNT 信息还是深空、深地、深海和地球系统——“三深一系统”科学研究的重要支撑。

可以说，PNT 基础设施是国家其他重要基础设施的基础，为国家经济建设、国防建设、大众生活和科学研究提供了基础服务信息。

2. PNT 技术发展历程

完整的 PNT 信息包括时间信息和空间信息两部分，其理论与技术经历了朴素的时空观到现代时空观的发展。

时间是人类最早认识的物理概念，远古时期人类基于天体现象（如观测太阳和月亮的视位置）划分年、月、日，后来人类发明了日晷、圭表、漏壶等工具细化一日内的时间。然而，传统天文定时手段受天气等观测条件和地球自转不均匀性的影响，测量精度不高。17 世纪，以钟摆为代表的机械计时工具和石英晶体振荡器的出现，使计时技术在精度、稳定性和便捷性方面实现了跨越式发展。20 世纪，量子物理的发展进一步改变了计时科学与技术，利用原子在不同能级之间跃迁所发射或吸收的电磁波频率作为标准频率建立的量子频标的准确度已达 10^{-16} 数量级。近年来，随着科学技术的不断发展，新的物理技术和光学技术的进步，尤其是激光冷却囚禁原子技术、激光半导体技术和超稳激光技术的发展，极大地促进了原子钟技术的进步，形成了以冷原子喷泉钟、光钟等为代表的新型原子钟。相较于传统的原子钟，新型原子钟在准确性、稳定性等方面也有了

极大的提升。

空间位置信息与定位和导航相关，定位与导航技术既古老又年轻，两者密不可分。可以说，定位是导航的基础，有多少种定位手段，就有多少种导航手段。

古代，人类依靠地形、日月位置和自然标记物等确定空间位置并进行导航，并未形成明确的空间位置和导航概念，处于经验导航时期。进入文明社会后，人类开始借助天文、地磁等物理现象确定自己的空间位置，并发明了六分仪、指南针等辅助工具，形成了具有科学意义的定位与导航理论和技术。第一次世界大战前后，地基无线电导航技术诞生，并在第二次世界大战中得到了迅猛发展。至20世纪50年代，地基无线电导航已基本实现全球覆盖。同一时期，人造地球卫星的成功发射为星基无线电技术的发展奠定了基础，首个卫星导航系统——子午仪系统应运而生。20世纪70年代，美国国防部开始研制由美国空军控制的全球定位系统(global positioning system, GPS)。GPS具有全球覆盖、全天时、全天候、高精度PNT服务的优势，结合其在海湾战争中表现出的巨大军事潜能，在全球迅速得到推广和应用。然而，俄罗斯、中国和欧洲联盟(Europäische Union, EU)等重要经济体逐渐意识到，在国防建设及经济稳定运行方面仅依靠GPS是不安全的，于是开始建设自主可控的全球卫星导航系统，日本、印度则建设了区域卫星导航系统。

惯性导航是一种得到广泛应用的自主导航技术。惯性导航利用其惯性元件测量载体本身的加速度，经过积分计算得到载体的速度和位置差，进而实现对载体进行导航定位的目的。惯性导航既不依赖任何外部信息，也不向外部辐射能量，因此具有隐蔽、连续、稳定、自主等优势，在航空、航海等多个领域得到应用。

为了适应多行业需要，视觉、重力、磁力、地形等匹配导航技术也得到了快速发展。匹配导航属于非接触、低成本、便捷化的导

航手段，在无人平台以及武器制导方面得到应用。此外，量子、5G等新空间感知手段逐渐走入导航定位领域，成为新的可用 PNT 信息源。

基于不同原理的 PNT 信息源为用户提供了丰富、冗余的 PNT 信息，多技术优势互补、多源传感器深度优化集成、多源信息交叉融合成为 PNT 领域发展的重要方面。

3. PNT 学科发展规律与特点

伴随理论学科的发展，人类对时空概念的认识也在发生变化。时间和空间两个概念隶属于物理学范畴，在物理学发展的不同阶段呈现出不同的关系。在伽利略和牛顿构建的物理学框架下，空间和时间是相互独立的；爱因斯坦创立的相对论更新了牛顿力学时空观，时间、空间成为相互依存的物理量。在无线电测量技术出现后，度量空间关系的距离测量转化为精密时间测量，时间、空间之间的关系变得更加紧密。

PNT 领域呈现出多学科交叉融合的趋势。早期的 PNT 技术大多涉及单一学科。在时间测量技术方面，观星测日定时属于大地天文学，电子时间测量属于电磁学，原子钟技术涉及量子力学等。在空间测量技术方面，传统空间测量技术主要包括距离、弧度等几何测量学内容，以及光学天文测量、激光测月和测卫等大地天文学内容；重磁匹配导航涉及地磁测量、重力测量等物理大地测量学内容；惯性导航涉及力学和控制学内容。随着时空测量手段复杂度的提升，PNT 技术逐渐呈现出多学科融合的趋势，尤其是卫星导航这一巨型复杂系统的出现，使得 PNT 领域学科交叉的特色更为显著。

卫星导航学科是几何学、电磁学、力学、大地测量学等交叉形成的学科。导航学科本来属于空间大地测量学科范畴，但是卫星轨道测定与预报属于天体力学，导航信号涉及麦克斯韦电磁学，定位系统误差又涉及爱因斯坦相对论等。此外，随着应用领域的推广和

重要性的提升，卫星导航已逐渐成长为一门独立的学科。未来，基于新物理原理的感知手段的出现，将催生出新的学科。

4. PNT 技术发展现状及趋势

所有导航定位系统都有其自身的脆弱性。卫星导航系统无法覆盖深空、深海、室内、地下，并且信号本身存在落地信号弱、易被干扰和欺骗的弱点；惯性导航存在误差累积，无法满足长航时导航定位需求；地基无线电导航仅能覆盖部分区域，同样存在易被干扰和遮蔽的问题；重磁匹配导航精度有限，分辨率较低，技术尚不成熟。于是，依靠任意一种 PNT 技术都不能满足任意场景下任意用户的 PNT 需求，必须建设全域覆盖、多物理原理信息源的 PNT 基础设施网络，形成多源数据融合、多技术优势互补的 PNT 应用和服务体系，这不仅是国际 PNT 体系发展的必然趋势，也是推广 PNT 应用、提升 PNT 服务性能的必由之路。

从国际 PNT 体系发展现状来看，美国是 PNT 基础设施最完善、技术最先进的国家，对新原理感知手段的探索也常常处于领先地位，但缺乏对 PNT 体系的整体统筹规划。随着 GPS 脆弱性问题的暴露，美国总统先后签发了《美国国家天基定位、导航与定时政策》(2004)、《2018 年国家定时安全与弹性法案》(2018)、《通过负责任地使用定位、导航与定时服务来增强国家弹性》(2020)、《7 号太空政策指令 (SPD-7)》(2021) 等政策指令，在继续依靠 GPS 的同时，通过建设 GPS 备份系统来增强 PNT 系统弹性，确保 GPS 服务异常时军民用户仍可获得安全可靠的、抗干扰能力强的 PNT 服务。此外，美国国防部、运输部、国土安全部等也多次出台相关的指令、政策、规划等，梳理出特定领域的 PNT 能力建设和应用发展需求，并提供有针对性的指导和建议。

与美国类似，俄罗斯、欧盟的 PNT 体系也以卫星导航系统为主，并分别将地基无线电导航系统恰卡 (Chayka) 和罗兰 C 作为

GLONASS 和 Galileo 系统的备份与补充，以构建多手段融合的 PNT 服务体系。

我国在 PNT 技术方面的进步令人瞩目，但仍存在 PNT 体系发展不均衡的问题。北斗卫星导航系统建设取得了重大突破，服务性能达到国际先进水平，但惯性导航研究和应用存在很大差距，重力导航、磁力导航等地球物理场匹配导航技术离工程化、实用化还有一定差距，深空 PNT 技术和水下 PNT 技术亟待突破。此外，部分 PNT 核心传感器制造技术尚未突破，高端重、磁、震、声等装备大多依赖进口，存在“卡脖子”风险。国产 PNT 装备多属于中低端产品，与国际先进水平的差距是 5~10 年。

目前，我国已开展 PNT 体系论证工作，旨在建强北斗卫星导航系统 (BeiDou Navigation Satellite System, BDS) 的同时，依托地基无线电导航、惯性导航和匹配导航等多种技术手段形成对北斗的冗余备份，同时开展脉冲星导航技术和水下导航技术的探索研究，填补深空、深海 PNT 服务空白。笔者认为，我国 2021~2035 年 PNT 体系规划应当从 PNT 信息源、PNT 终端、PNT 信息融合理论和 PNT 应用服务等方面做好顶层设计，构建以北斗卫星导航系统为核心的国家综合 PNT 体系基础设施，建设以微 PNT 终端和弹性 PNT 应用为基本架构的 PNT 应用终端型谱，推进以智能 PNT 服务为目标的国家 PNT 体系架构。

国家综合 PNT 体系是指，基于多物理原理构建的从深空到深海、全域无缝覆盖的 PNT 信息源基础设施。在深空，可依托脉冲星构建深空基准，为深空航天器提供自主 PNT 服务；在地月系拉格朗日点上可构建导航星座，既可接收脉冲星信号，又可播发与全球卫星导航系统 (global navigation satellite system, GNSS) 同频的信号，形成深空导航与近地导航的中转；在近地空间以 GNSS 为主，依托低轨通信、遥感星座，形成对中高轨北斗导航星座的增强；在城市和室

内等应用场景，地基无线电、5G、Wi-Fi 和各类匹配导航技术可辅助卫星导航；水下可以布设类似于 GNSS 的声呐信标，实现水下潜器的安全导航。此外，基于量子测距、量子感知等新物理原理的导航技术手段也应同步开展关键技术攻关，构建从深空到深海、从室外到室内、从暴露空间到非暴露空间的泛在 PNT 信息源基础设施。

综合 PNT 解决的是 PNT 信息源问题，弹性 PNT 解决的是 PNT 信息源最优组合问题，微 PNT 解决的是 PNT 终端微型化和低功耗问题。但是对于广大的 PNT 用户，尤其是非 PNT 专业用户，有了 PNT 基础设施和弹性融合准则还不够，还必须解决智能化应用问题。未来 PNT 服务应该是智能化的，即提取大多数 PNT 专家的思想，形成共性化知识，再将该知识逻辑化、模型化形成专家系统，通过计算机分析、挖掘知识间的规律和联系，进一步将其转化为机器可识别的知识图谱，最后针对特定用户、特定场景和特定需求实现 PNT 智能保障和智能服务。

5. PNT 领域发展的相关政策建议

国家 PNT 相关政策法规决定了国家 PNT 体系建设规划、PNT 应用规则和 PNT 应用标准，直接影响 PNT 整个学科的发展。目前，美国、欧盟等都在强调 PNT 体系的弹性化建设，主动拥抱大数据、人工智能等先进技术，研究多技术手段融合发展模式，并积极探索基于新物理原理的 PNT 感知技术。2020 年 8 月，白宫科技政策办公室 (Office of Science and Technology Policy) 通过“联邦公报”网站发布《关于定位、导航与定时弹性信息》的征询书，向民众征集弹性 PNT 项目，欧盟也准备开展 PNT 弹性化研究。尽管我国北斗卫星导航系统建设取得了重要的阶段性成果，但是仍然面临复杂的 PNT 应用环境和复杂的市场竞争。为了在 PNT 体系研究、终端研制和应用环节都能适应复杂的国际竞争，必须加强 PNT 学科发展及创

新性探索研究，加大 PNT 感知和应用新原理研究的支持力度，加大 PNT 各类智能终端和重点仪器研发的支持强度。在项目的支持方面，可以采取“项目群”支持模式，以国家 PNT 体系建设重大项目为主线，带动一批围绕 PNT 关键技术攻关和典型示范应用的小项目群，充分发挥举国体制优势，短时间集智攻关，取得一些有影响的 PNT 理论创新成果和应用模式创新成果。

针对 PNT 技术学科交叉的特点，在遴选项目评审专家时，采用交叉学科评审机制，拓展评审专家研究领域至物理学、电子信息、空间物理、大地测量学、天文学、海洋学、环境科学、精密仪器制造、航空航天等学科，使得重大项目群的每个领域都有专家参评，保证评选工作的全面性与公平性。

国家 PNT 体系涉及的学科领域多、技术复杂，需要交叉融合理论知识体系，因此在人才培养和资助方面，可对交叉学科背景申请人设立单独指标，进行选拔。

在国际合作方面，应在卫星轨道和信号频率资源协调、深空探测和南北极导航、退役卫星处理、空间安全等多方面开展国际合作。在开展国际合作时，应优先加强与友好国家在系统兼容与互操作、系统安全、系统增强、监测评估及联合建设参考站等方面的合作。

Abstract

Positioning, navigation and timing (PNT) information provides essential support to human activities. From the solar/stellar observation in the early period to mechanical instruments represented by the pendulum and theodolite, electrical instruments like the quartz clock and total station, and the satellite system at present, technologies for acquiring PNT information have undergone tremendous development. PNT information has already penetrated into all aspects of science and technology, economy, people's livelihood and national defense, and become indispensable for national construction, public life and social progress.

Oriented to the requirements of national PNT strategy, this book discusses the history of PNT technology, discipline development rules and characteristics, technology development status and trends, related policies and recommendations. The scientific significance, strategic value, development status, key scientific and technological issues, development directions and related policies of different branches of the PNT technology are discussed as well, such as astronomical navigation, radio navigation, inertial navigation, matching navigation, bionic navigation, acoustic navigation, quantum navigation and time-frequency technology.

At present, China has launched the construction of PNT system, aiming to strengthen the BeiDou Navigation Satellite System and

establish the backup redundancy for the BDS by means of a variety of technologies such as ground-based radio navigation, inertial navigation and matching navigation. Meanwhile, explorations and researches on pulsar navigation and underwater navigation technologies are carried out to fill the gaps of PNT services in deep space and deep sea. The PNT system plan from 2021 to 2035 should create a top-level design from the aspects of PNT information source, PNT terminal, PNT information fusion theory and PNT application service. It is suggested that China should construct the national comprehensive PNT system infrastructure with the BDS as its core, develop a variety of PNT application terminals based on the micro-PNT and resilient PNT frame, and promote the development of the national PNT architecture aiming at providing intelligent PNT services.

The national comprehensive PNT system refers to the seamless coverage of PNT information source infrastructure from deep space to deep sea based on different physical principles. In the deep space, pulsars can be used to construct the deep space datum and provide autonomous PNT services for deep space spacecraft; a navigation constellation similar to the GNSS can be constructed at the Lagrange points of the Earth-Moon system, which will not only receive the pulsar signals, but also broadcast signals with the same frequency as the GNSS; in the near Earth space, the GNSS will be enhanced by the LEO communication and remote sensing constellations; in cities and indoors, the GNSS can be complemented by the ground-based radio, 5G, Wi-Fi and various matching navigation technologies; under the water, sonar beacons similar to the GNSS can be deployed to realize the safe navigation for underwater vehicles. In addition, researches on navigation technology based on new physical principles such as quantum ranging, quantum perception should be carried out simultaneously, and a ubiquitous PNT information source infrastructure from deep space to deep sea, from outdoor to indoor, and

from exposed space to unexposed space should be built.

Comprehensive PNT enriches the source of PNT information, resilient PNT realizes the optimal combination of PNT information sources, and micro-PNT achieves the miniaturization and low power consumption of PNT terminals. However, for mass PNT users, especially nonprofessional subscribers, it is not enough to just provide PNT infrastructure or resilient integration criteria, and the intelligent application must be realized. In the future, PNT services should be intelligent. Expert systems should be developed by processing and modelling the collection of common knowledge of PNT experts, and the internal links between the knowledge should be autonomously analyzed and mined, which will then be processed to knowledge maps that can be recognized by machine. Finally, intelligent PNT support and services oriented to specific users in specific scenarios and for specific requirements can be realized.

In order to adapt to the international competition in PNT system research, terminal development and application, it is necessary to strengthen the PNT discipline development and innovative exploration and research, provide more support for researches on new principles of PNT perception and application, and increase the investment in various PNT intelligent terminals and key instruments. Considering the interdisciplinary characteristics of the PNT technology, the selection of project review experts should adopt the interdisciplinary review mechanism, and experts from different fields should be invited to participate in reviewing major projects to ensure the comprehensiveness and fairness. In terms of talent funding, the autonomy in talent training and selection should be strengthened, and separate indicators can be set for applicants with interdisciplinary backgrounds if necessary. In terms of international cooperation, it is proposed that the coordination of satellite orbit and signal frequency resources, deep space exploration and North-South polar navigation, retired satellite processing and space security

should be emphasized, and priorities should be given to cooperation with friendly countries in system compatibility and interoperability, system security, system enhancement, monitoring and evaluation and joint construction of reference stations.

Yang Yuanxi, professor at Xi'an Research Institute of Surveying and Mapping, is an academician of Chinese Academy of Sciences and the deputy chief engineer of the Chinese BeiDou Navigation Satellite System. He has been elected as the IAG Fellow in 2007 and the ION Fellow in 2018, and won the Ho Leung Ho Lee Award in 2011. He serves as the chief editors of *Satellite Navigation* (since 2020) and *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica* (since 2014).

Prof. Yang has been dedicated to the research of geodesy and satellite navigation technology. As the creator of the theories of robust estimation for correlated observations and the adaptively robust navigation, he has built the bifactor equivalent weights model, and developed the robust covariance estimation algorithm and the adaptively robust estimation algorithm. As the deputy chief engineer of the BDS, he has made a lot of breakthroughs in key technologies such as the model of BDS contribution on global PNT users, the optimal combination model for BDS triple-frequency signals, and the adaptively autonomous orbit determination algorithm. Besides, he initiated the research on comprehensive PNT and resilient PNT supporting the construction of the national PNT system.

Prof. Yang has published more than 400 peer-reviewed papers, including 60 plus SCI papers, and many of them are highly cited, with the total citations of more than 14 000. He is among the world's top 2% scientists list named by Stanford University in 2021 and 2022 .

目 录

总序 / i

前言 / vii

摘要 / ix

Abstract / xvii

第一章 定位、导航与定时体系发展总论 / 1

第一节 科学意义与战略价值 / 1

- 一、PNT 体系是国家“新基建”的基础 / 2
- 二、国家 PNT 体系是国防安全的基石 / 3
- 三、国家 PNT 体系是产业及经济模式创新的重要支撑 / 3
- 四、国家 PNT 体系是智能社会发展的基础 / 4

第二节 技术发展历程 / 4

- 一、时间频率技术发展 / 5
- 二、导航定位技术发展 / 7

第三节 学科发展规律 / 9

- 一、需求是 PNT 技术发展的原动力 / 10
- 二、基础理论突破是 PNT 技术发展的推动力 / 10

三、学科交叉融合是 PNT 技术发展的加速器 / 11

第四节 国内外发展现状 / 12

一、导航定位技术发展现状 / 12

二、时间频率技术发展现状 / 31

三、国内外 PNT 体系发展现状 / 40

四、PNT 政策规划 / 43

五、国内外现状对比 / 53

第五节 关键科学技术问题 / 55

一、相对论框架下时空基准统一 / 55

二、多源传感器深度优化集成 / 56

三、弹性 PNT 体系构建 / 56

四、量子物理感知技术 / 56

第六节 发展方向 / 57

一、体系设计 / 57

二、发展思路 / 62

三、发展目标 / 63

四、发展路线 / 63

第七节 相关政策建议 / 67

一、PNT 项目资助策略建议 / 67

二、PNT 发展重大项目评审策略建议 / 68

三、PNT 人才资助策略建议 / 68

四、国际合作建议 / 69

本章参考文献 / 70

第二章 天文导航技术 / 76

第一节 星光导航技术 / 77

一、科学意义与战略价值 / 77

二、现状及其形成 / 77

三、关键科学技术问题 / 85

四、发展方向 / 86

第二节 脉冲星导航技术 / 86

一、科学意义与战略价值 / 86

二、现状及其形成 / 88

三、关键科学技术问题 / 93

四、发展方向 / 95

本章参考文献 / 95

第三章 无线电导航技术 / 98

第一节 远程地基无线电导航技术 / 98

一、科学意义与战略价值 / 98

二、现状及其形成 / 99

三、关键科学技术问题 / 105

四、发展方向 / 107

第二节 蜂窝无线电定位技术 / 107

一、科学意义与战略价值 / 107

二、现状及其形成 / 109

三、关键科学技术问题 / 116

四、发展方向 / 117

第三节 卫星导航定位技术 / 118

一、科学意义与战略价值 / 118

二、现状及其形成 / 118

三、关键科学技术问题 / 126

四、发展方向 / 128

第四节 导航星座自主导航技术 / 129

一、科学意义与战略价值 / 129

二、现状及其形成 / 130

三、关键科学技术问题 / 135

四、发展方向 / 137

第五节 低轨卫星增强导航技术 / 138

一、科学意义与战略价值 / 138

二、现状及其形成 / 140

三、关键科学技术问题 / 143

四、发展方向 / 145

第六节 拉格朗日点无线电导航技术 / 148

一、科学意义与战略价值 / 148

二、现状及其形成 / 148

三、关键科学技术问题 / 152

四、发展方向 / 154

本章参考文献 / 154

第四章 惯性导航技术 / 161

第一节 科学意义与战略价值 / 161

第二节 现状及其形成 / 162

一、陀螺仪的发展现状 / 165

二、加速度计的发展现状 / 176

第三节 关键科学技术问题 / 179

一、惯性器件及配套元器件技术 / 179

二、惯性系统技术 / 180

三、深空惯性导航理论和技术 / 180

第四节 发展方向 / 180

本章参考文献 / 182

第五章 匹配导航技术 / 185

第一节 视觉导航技术 / 186

一、科学意义与战略价值 / 186

二、现状及其形成 / 186

三、关键科学技术问题 / 198

四、发展方向 / 201

第二节 图像匹配导航技术 / 203

一、科学意义与战略价值 / 203

二、现状及其形成 / 204

三、关键科学技术问题 / 208

四、发展方向 / 209

第三节 重力场匹配导航技术 / 210

一、科学意义与战略价值 / 210

二、现状及其形成 / 211

三、关键科学技术问题 / 218

四、发展方向 / 219

第四节 地磁场匹配导航技术 / 220

一、科学意义与战略价值 / 220

二、现状及其形成 / 220

三、关键科学技术问题 / 227

四、发展方向 / 228

第五节 激光雷达匹配导航技术 / 229

一、科学意义与战略价值 / 229

二、现状及其形成 / 229

三、关键科学技术问题 / 236

四、发展方向 / 238

本章参考文献 / 239

第六章 其他导航技术 / 249

第一节 仿生导航技术 / 249

一、科学意义与战略价值 / 249

二、现状及其形成 / 250

三、关键科学技术问题 / 260

四、发展方向 / 261

第二节 声学导航技术 / 262

一、科学意义与战略价值 / 262

二、现状及其形成 / 263

三、关键科学技术问题 / 268

四、发展方向 / 269

第三节 量子导航技术 / 270

一、量子测距导航技术 / 270

二、量子惯性导航技术 / 277

本章参考文献 / 286

第七章 时间频率技术 / 290

第一节 守时技术 / 290

一、科学意义与战略价值 / 290

二、现状及其形成 / 291

三、关键科学技术问题 / 311

四、发展方向 / 312

第二节 授时技术 / 313

一、科学意义与战略价值 / 313

二、现状及其形成 / 314

三、关键科学技术问题 / 326

四、发展方向 / 327

第三节 定时技术 / 327

一、科学意义与战略价值 / 327

二、现状及其形成 / 328

三、关键科学技术问题 / 329

四、发展方向 / 330

本章参考文献 / 331

第八章 PNT 技术展望 / 333

第一节 综合 PNT / 333

一、科学意义与战略价值 / 333

二、现状及其形成 / 334

三、综合 PNT 信息源 / 336

四、关键科学技术问题 / 337

五、发展方向 / 339

第二节 微 PNT / 339

一、科学意义与战略价值 / 339

二、现状及其形成 / 340

三、关键科学技术问题 / 343

中国定位、导航与定时*2035*发展战略

四、发展方向 / 344

第三节 弹性 PNT / 345

一、科学意义与战略价值 / 345

二、现状及其形成 / 345

三、关键科学技术问题 / 346

第四节 智能 PNT / 351

一、科学意义与战略价值 / 351

二、现状及其形成 / 352

三、关键科学技术问题 / 355

本章参考文献 / 358

关键词索引 / 361

定位、导航与定时体系发展总论

第一节 科学意义与战略价值

定位、导航与定时是关系国家安全的战略性领域，是国家信息产业和国防科技工业的重要组成部分，是推动国民经济建设、军队现代化建设和武器装备升级换代的重要驱动力。

PNT 系统的主要任务是为用户提供精确、连续、可靠的实时位置、速度、时间和姿态等信息。在军用方面，PNT 信息已成为精确打击、联合作战指挥、协同作战、机动部署等军事任务中的重要基础信息，是一体化联合作战体系的核心信息之一，是陆、海、空、天各种作战单元协同的基础。在民用方面，PNT 在交通运输、测绘地理、地震监测、气象水文、国土资源调查、精细农业等方面得到了广泛应用。目前，以卫星导航为代表的天基导航系统在民用方面占据着主导地位。然而，单一的 GNSS 的信号非常脆弱，极易受到干扰和欺骗，从而影响到国防、电力、金融等领域的核心用户群。同时，GNSS 的 PNT 服务不能惠及地下、水下和室内，在高楼林立的大城市和森林密集的特殊地区，也无法保证 PNT 服务的可用性、连续性和可靠性。建立满足国家安

全、经济发展、国家基础设施高效稳定运行和民众日常生活需求的国家 PNT 体系成为当前必须面对的重大课题。

国家 PNT 体系是指在国家层面统一组织协调下，服务于国防和经济社会，承担国家时空基准建立与维持、时空信息播发与获取、PNT 服务与应用等任务的国家信息基础设施建设与应用管理，包括建设以卫星导航系统为主、多个协同工作的 PNT 系统以及各类 PNT 设备，构建支撑体系运行、服务的其他信息系统，建立组织管理体制和技术创新体系等。

一、PNT 体系是国家“新基建”的基础

2020 年 7 月 31 日，我国北斗全球卫星导航系统正式宣布建成，北斗卫星导航系统无论是在功能方面，还是在 PNT 服务精度方面都处于全球卫星导航系统的较高水平（Yang et al., 2021, 2020, 2019, 2018）。北斗卫星导航系统及其关联产业已经具备“新基建”的特征要素。为了满足科学发展和智能生活的新需求，统一的时空基准建设和智能化 PNT 应用将拉动我国电子产业的新发展，推动智能社会、智能交通等的发展，于是 PNT 体系将是新需求下“新基建”的重要引擎，将强有力地促进国家经济的发展。

首先，国家经济发展不仅需要公路、铁路、航路、水路，而且需要时空基准统一的信息高速公路。但是无论是什么“路”，都属于基础设施。目前，国家利益已经超出传统的领土、领海、领空的范畴，不断向远洋、两极、太空、电磁空间以及虚拟网络延伸（谭述森等，2018）。国家利益到哪里，时空基准保障和 PNT 保障就必须到哪里。国家经济发展既是时空信息基础设施建设引擎，也是时空基础设施的重要应用。

其次，国家重要基础设施（如电力、交通、互联网、移动通信等）安全稳定运行，不仅需要高精度时空基准作为保障，而且需要安全可信的 PNT 支持。进一步，要实现这些基础设施的弹性化时空信息维持与应用，需要建设重大基础设施的弹性时空服务体系，这属于“新基建”范畴。

二、国家 PNT 体系是国防安全的基石

随着现代战争的发展，PNT 信息已成为精确打击、联合作战指挥、协同作战、机动部署等军事任务中重要的基础信息。军队信息化中 80% 以上的信息量与 PNT 信息相关。

PNT 信息是指挥平台的基础信息。统一的时空信息是各兵种联合作战的基础，指挥的有效性必须基于：精确已知各战斗单元、武器平台的位置、运动方向、轨迹；必须确保各战斗单元时间同步；必须精确确定敌方的空间布局。随着时间变化，任何针对指挥平台的时空信息干扰、欺骗或阻断，都会造成指挥失灵或决策失误，要想在指挥决策中占优势，必须从系统体制上全方位提高 PNT 的稳健性和对抗能力。

PNT 信息是武器平台的引导信息。武器平台的精确打击必须有时间和空间信息的引导，远程武器、空天武器需要精度更高的的时间和空间信息，必须基于精准时间、距离和弹头运行速度反算精准发射时间；近远程、集中火力同步打击是不同方向、不同地点、不同距离、不同运行速度的武器对同一重要目标实施的高度协同和密集的、立体式的精确打击，要求各战斗单元、各武器平台发射的弹头同时击中规划目标，同时具备突破敌方防卫与导弹拦截功能。

PNT 信息是高动态载体运行的控制信息。高动态载体的运行与控制，以及所有无人作战平台的控制运行，都必须基于高精度、统一的时间和位置信息；高速武器拦截更需要精准的时间同步和精确的目标运行轨道测定。精确的时间测量和时间同步是现代导航、轨道测控和目标定位的前提。

三、国家 PNT 体系是产业及经济模式创新的重要支撑

北斗全球卫星导航系统的建成，以及向全球提供行业应用和大众消费应用，将对人们的生产和生活方式产生巨大且深远的影响。PNT 信息与技术融入农业，可以促进精密农业甚至智慧农业的发展；PNT 信息与技术融入渔业，可以支撑数字渔业的发展。此外，北斗与移动通信、移动互联网、物联网、大数据等技术的加速融合创新，将促进以电子商务、互联网和位置服务为代

表的电子产业的发展，形成“北斗+”的基础创新和“+北斗”的应用创新态势，进而带动电子产业新业态的发展，促进经济社会的发展。

四、国家 PNT 体系是智能社会发展的基础

随着智能社会发展需求的增长，智慧城市、智慧海洋、移动智能终端、智能网联汽车、智能驾驶、智能交通管理、智能无人飞机、智能无人舰艇、智能水下航行器等无一不需要时间信息和位置信息的支持。可以说，没有 PNT 信息，城市不会有智慧，海洋不会有智慧，地球不会有智慧，更不会成为适宜人类生存的美好家园。智能社会发展和智能生活，不仅需要 GNSS 提供的 PNT，而且需要在室内、地下、水下、井下等 GNSS 信号拒止情况下连续可靠的 PNT 服务。

时空是一切自然和人类活动的载体，时间信息和位置信息也是一切表征事物属性的物理空间状态和演化过程的标识（刘经南等，2019）。PNT 技术无论是在平板仪、经纬仪、水准仪时期，还是在电子经纬仪、全站仪阶段，还是在当今卫星导航、全源导航时代，都是国家发展、经济建设、军事应用不可或缺的基础信息，是带动各产业发展的不竭动力。在科学研究领域，PNT 是测绘工作、地壳应力变化监测等的主要手段；在交通运输领域，PNT 是建设智能运输系统、监控系统的核心；在救灾减灾领域，PNT 是构建紧急救援、报警系统的基础。特别是随着卫星导航技术的飞速发展，PNT 领域早已成为信息产业具有强劲发展势头的领域之一。

第二节 技术发展历程

人类活动总是在一定的时间和空间范围内进行，人类对事物变化特性的认识也是以时间和空间作为基本参考维度实现的。现代物理学源于伽利略和牛顿构建的基本物理学框架，该框架以时间和空间作为切入点，建立了精确

描述低速运动的严密理论体系。爱因斯坦创立的相对论更新了牛顿力学时空观，建立了描述宇宙大尺度和高速运动物体的严密理论，推动了自然科学的深度发展。可以说，时间和空间基本理论的突破与精确度量水平的提高，给社会生产力的发展带来了质的飞跃。

在牛顿力学框架下，空间和时间是相互独立的两个物理量，两者采用的测量方法和经历的技术发展阶段有较大差异。空间位置的测量通常采用距离测量和方位测量方式实现，而时间的测量则采用物体周期性变化的延续性表征。在相对论框架下，时间和空间变成相互依存的物理量，两者不可分离。在无线电测量技术出现之前，时间测量和空间测量在理论上交集不多。无线电测量技术的出现将度量空间关系的距离测量转化为精密时间测量，使得两者的联系更加密切。

人类对 PNT 技术的认识伴随着人类社会发展的全过程，经历了从粗略到精细、从被动发现到主动利用、从小范围应用到大尺度遥测等阶段。考虑到现阶段绝大多数物理现象可以用牛顿力学时空观进行描述，时间和空间测量技术在人类社会发展的绝大多数时期独立演进，因此本书对时间测量技术和空间测量技术的发展历程分别进行梳理。

一、时间频率技术发展

时间是人类最早认识的物理概念。远古时代，人类在日常生活和生产活动中，为了适应昼夜更替和季节变化，形成了以基本天文观测尤其是日月观测为基础的时间概念。公元前 3000 年，在中国、古埃及、古巴比伦、古印度等文明古国已经有了太阳、月球、行星等天象的记录，并基于肉眼观测形成了早期的天文年历。在《尚书·尧典》中，古人已经提出了依据天文现象进行授时的方法：“乃命羲和，钦若昊天，历象日月星辰，敬授民时。”丁龢孙先生所著《中国古代天文历法基础知识》对这段话进行了解读（丁龢孙，1987）：“历法是计量日、月、年的时间长度和它们之间的关系，制定时间序列的法则；主要是根据日月星辰的运行规律，制定年、月、日、时的法则，以预测天象的回复，节候的来临，使人类社会活动，如狩猎、渔牧、耕种、航行等民生的作息，都可纳入一定周期之中，凡事都可按计划进行，有所准

备，世界历法的本意，莫不如此，而中国历法对此更为典范。”可以说，在人类历史上，天文计时一直是主要的测时手段之一。公元前4世纪，中国天文学家石申编制了星表《石氏星经》，其中载有121颗恒星的位置，为利用星象确定时间提供了依据。为了更加准确地描述一天内的时间，中国人发明了日晷、圭表、漏壶等测时手段，能够利用日影变化准确测量白天时刻，利用漏刻、星象观测确定夜晚时刻。

然而，天文定时手段需要考虑天气、场地和观测等因素的影响，地球自转的不均匀性也制约着天文测时的精度，人们开始探索利用机械运动的周期性进行时间测量。其中，主要的计时工具包括漏刻、五轮沙漏、水运仪象台以及钟摆。以钟摆为代表的机械结构计时工具的出现，使时间计量技术取得了突破性的进展，计时的精度、稳定性和便捷性均得到了很大的发展。航海时代，荷兰科学家惠更斯于1656年发明了钟摆钟。钟摆钟的出现给钟族带来了前所未有的繁荣，但钟的精度仍然不高。

1927年，新一代的石英钟在美国贝尔实验室问世。石英钟的出现，消除了过于复杂的齿轮系统给钟摆钟带来的磨损和阻尼，其精度很快就超过了钟摆钟。石英钟的振动周期为几万秒甚至几千万秒，可以测量很小的时间间隔。1932年，科学家利用石英钟研究了地球自转，发现地球自转周期有非常小的短期变化。然而石英钟的精度仍然不高，即使是最好的石英钟，误差也有千年一秒。同时，石英钟的精度会随着石英晶体的老化而下降，使用时间越长，误差越大。20世纪，量子物理的发展进一步改变了计时科学与技术，利用原子在不同能级之间跃迁所发射或吸收的电磁波频率作为标准频率建立的量子频标准确度已达到 10^{-16} 数量级（王义遒，2012；韩春好，2017）。原子钟依赖微观世界中的周期现象计时，不损耗，不老化，振动周期比石英晶体短，因此原子钟的精度远高于以往任何一种钟，而且可以测量更精细的时间间隔。当前，传统的原子钟，如氢原子钟、铯原子钟、铷原子钟广泛应用于军事和经济社会的多个领域，但其品种不全，高端产品匮乏，成为时间频率系统建设的“卡脖子”难题。

近年来，新的物理技术和光学技术不断进步，其中激光冷却囚禁原子技术、激光半导体技术和超稳激光技术的发展极大地促进了原子钟技术的进步，形成了以冷原子喷泉钟、光钟等为代表的新型原子钟。相较于传统原子钟，

新型原子钟在频率稳定度、频率不确定度等方面有了极大的提升。新型原子钟主要包括新型微波钟和光钟，其中，新型微波钟包括喷泉钟、冷原子钟、激光抽运钟等。此外，随着深空探测技术的发展，基于脉冲星高稳定度自转频率构建的时间尺度，称为脉冲星时，部分毫秒脉冲星的长期稳定性能可与原子钟媲美或者更优（Kaspi et al., 1994）。时间频率测量技术的发展如图 1-1 所示。

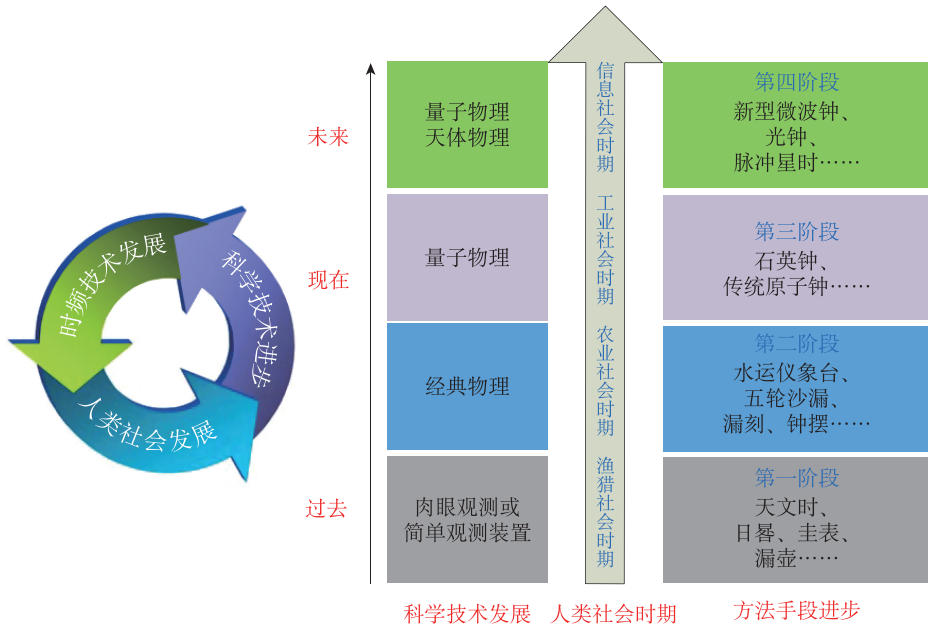


图 1-1 时间频率测量技术的发展

二、导航定位技术发展

导航就是确定当前位置和目标位置，并参照地理信息和环境信息修正航线、方向、速度，最终抵达目的地的手段。描述位置变化的前提是位置信息的获取，依照感知位置信息技术的不同，可区分出不同的导航技术。可以说，有多少种位置感知手段，就有多少种导航手段。

导航是一项既古老又年轻的技术。随着社会的发展，人类的活动空间得到扩展，导航技术也随之发展。早在远古时期，出于生存需要，人类为了发现狩猎场或采摘地，练就了一种依靠地形和日月位置信息的引导发现目标的能

力。鸟类为了适应大范围迁徙，也进化出利用地磁场或其他信息的引导迁徙的能力。早期的沿海导航，是利用山顶和树木等地面上的自然标记来确认船的位置，即沿岸导航方法。随着海上航行范围的不断扩大，人类产生了把陆地上的鸟带去航海的想法，根据鸟类觅食和栖息时直线朝陆地飞的特点，进行“飞鸟导航”。总体来说，早期的导航方式主要依靠经验和直觉，未能形成明确的空间位置和导航概念。进入文明社会后，随着对空间位置概念的明确，人类能够借助与空间点位坐标相关的多种物理现象和规律来确定自己的空间位置，现代意义的导航概念才真正出现。同时，随着计算机技术和人工智能技术的发展，以视觉导航为代表的新一代智能导航技术逐渐进入高速发展时期。

目前，导航技术的发展已经经历了四个阶段，如图 1-2 所示。第一阶段，在远古人类迁徙、狩猎、农耕时期，人们通过肉眼观测或简单观测装置来进行导航，导航手段是采用司南（指南针）人工标记等的第一代导航手段。西汉时期，我国《淮南子·齐俗训》中提到“夫乘舟而惑者，不知东西，见斗极则寤矣”，说明当时的航海已经开始依靠日月星辰来判明方位，牵星术也成

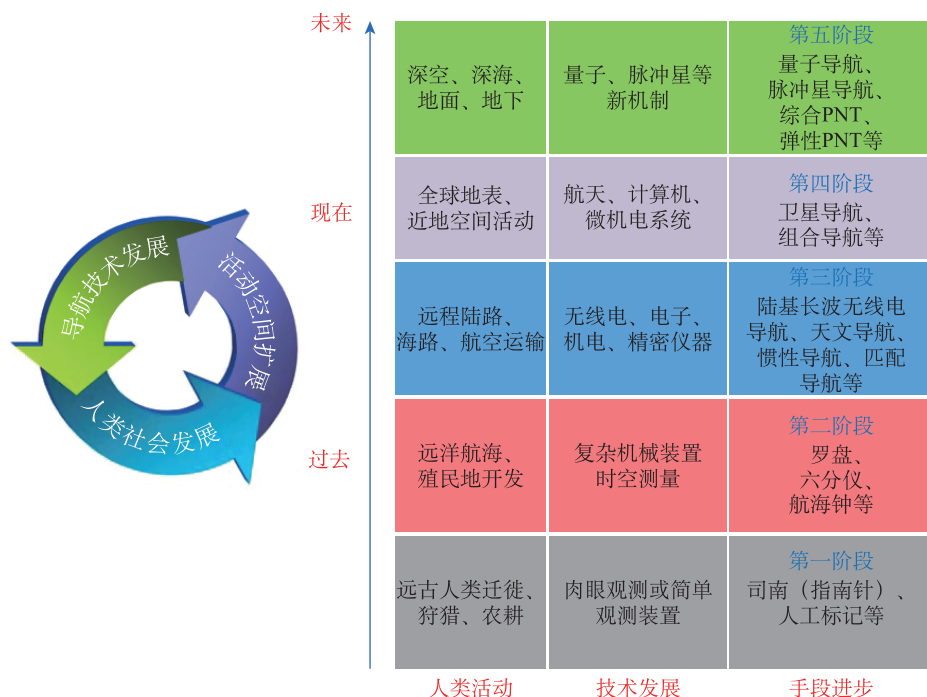


图 1-2 导航技术的发展

为该时期的代表性导航工具。三国时期，中国发明了利用地磁特性辨别方向的指南针，并在众多方面得到应用，由此衍生出了指南车、指南鱼等。第二阶段，在远洋航海、殖民地开发时期，人们通过机械仪表观测自然现象进行导航，导航手段是采用较为复杂的机械装置进行时空信息测量的第二代导航手段，如罗盘、六分仪、航海钟等。第三阶段，在远程陆路、海路、航空运输时期，人们通过无线电、电子进行导航，导航手段是采用无线电技术、电子技术、机电技术、精密仪器技术，面向各自特定服务对象开展的导航手段，如无线电指向信标、陆基长波无线电导航（罗兰/长河）、多普勒导航雷达、测速仪/测高仪/测探仪、电罗经、惯性导航、天文导航、匹配导航、石英钟/原子钟等。第四阶段，在全球地表、近地空间活动时期，人们通过卫星导航系统进行导航，导航手段是建立在航天技术、信号处理技术、计算机技术、微电子/微机电技术基础上的卫星导航手段。目前，导航手段正在从第四阶段的卫星导航向第五阶段的 PNT 体系过渡，其主要特征是：从第四阶段中卫星导航一家独大，向第五阶段以卫星导航为基础，多手段互补融合，体系化的模式发展；服务的覆盖范围明显扩大，从地表和近地空间向水下、地下、深空以及电磁干扰环境、物理遮蔽环境发展；脉冲星导航、量子导航等新的物理机制导航手段得到发展；导航的便捷性、连续性、可靠性、精确性指标得到明显改善。

第三节 学科发展规律

自从人类有了最原始的时间延续和空间相对关系的概念，对空间、时间精确测量伴随着人类社会发展的全过程，影响了人类生活的各个方面。人类对物体空间变化特性的认识需求推动了 PNT 技术的不断进步，基础理论的突破使得 PNT 技术经历了多次飞跃发展，学科交叉融合推动着 PNT 技术以前所未有的深度和广度融入人类生活。

一、需求是 PNT 技术发展的原动力

人类基本生存需求，催生了空间和时间测量技术。早期，人类为了实现居住点与狩猎场（采集场）移动，需要通过简单的地物观测、天文方向观测到达目的地，后期指南针的发明也是为了解决方位问题；为了适应四季变化和度量昼夜，人类需要简单的时间概念，为此发明了日晷、漏壶等误差在小时量级的时间测量设备。伴随人类活动范围的扩大，远距离航海需要更加精确的空间确定技术，为此发明了六分仪、天文钟和高精度星表。进入工业化社会后，机械化交通运输工具对运动速度的度量提出了更高要求，为此，人类发明了机械钟、历程计及更高精度的天文导航方法；进入 20 世纪，飞机的出现使得更高速度、更大范围的导航需求更加迫切，石英钟、无线电导航技术开始进入人们的生活。全球化时代需要导航定位范围覆盖全球，由此催生了卫星导航技术。卫星导航技术的出现使得导航定位技术以前所未有的普及程度渗透到人们生活的各个方面，衍生出更深层次的需求。总体来看，需求永远是促进 PNT 技术发展的原动力。

二、基础理论突破是 PNT 技术发展的推动力

与许多人类重大发明类似，PNT 基础理论的发展永远是技术发展的先导。天文导航技术是以人们对太阳、月球和其他星体基本运动规律的认识为依据的，天体测量学是其理论基础。惠更斯依据傅科摆的原理发明了摆钟，使得时间度量技术提高到秒量级以下。传统距离测量设备的精度在毫米量级，很难实现远距离无接触测量，电磁学基础理论的建立为无线电测距技术的发展奠定了基础，利用无线电测距技术可以实现大范围高精度无接触星际测量。激光测距技术是理论先导的最典型样例。早在 1916 年，爱因斯坦就通过理论分析预言了原子受激辐射的可能性，基于该理论，1958 年美国科学家肖洛和汤斯提出了激光原理，并于 1960 年由梅曼成功实现。1969 年，人们利用激光建立地月测量系统，使得地月间测距精度可达米量级。陀螺仪的发明也来源于基础理论的突破。牛顿力学和欧拉刚体运动理论的建立，为刚体绕定点运动规律的描述奠定了牢固基础，正是基于该理论，傅科设计了陀螺仪雏形。