引文格式：秦红磊,李嘉桐,杜岩松,等. 全球导航卫星系统课程涉及学科体系分析[J]. 地理空间信息, 2026, 24(1): 131-135. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2026.01.029

全球导航卫星系统课程涉及学科体系分析

秦红磊，李嘉桐，杜岩松，丛　丽
（北京航空航天大学 电子信息工程学院，北京 100191）

摘　要：定位、导航与授时（PNT）是描述时间和空间的关键技术，全球导航卫星系统（GNSS）是PNT技术体系中重要的支撑系统之一。GNSS课程是培养我国该领域专业人才的必修课程。系统梳理了GNSS课程的知识体系，并分析了其与我国学科分类的对应关系。GNSS课程具有高度综合性，涵盖理学、工学下多个一级、二级学科，因此培养卫星导航专业人才，高校应结合理学、工学多学科教学，注重通识教育与跨学科培养。同时，建议在相关工学专业中增设GNSS原理课程作为基础必修课。

关键词：PNT；GNSS；学科门类；技术体系
中图分类号：G642　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2026）01-0131-05

Analysis of the Subject Categories System Involved in Global Navigation Satellite System

QIN Honglei, LI Jiatong, DU Yansong, CONG Li
(Institute of Electronic Information Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: Positioning, navigation, and timing (PNT) is a critical technology for describing time and space, with global navigation satellite system (GNSS) being one of the essential support systems within the PNT technology framework. The GNSS course is a compulsory subject for cultivating professionals of this field in China. We systematically organized the knowledge framework of the GNSS course, and analyzed its correspondence with the subject categories in China. Through this systematic analysis, it is evident that the GNSS course is highly interdisciplinary, encompassing multiple primary and secondary disciplines within the fields of science and engineering. Therefore, to effectively educate satellite navigation professionals, universities should integrate multi-disciplinary teaching in science and engineering, focusing on general education and interdisciplinary development. Additionally, it is recommended to introduce the principles course of GNSS as a fundamental compulsory subject in related engineering disciplines.

Key words: PNT, GNSS, subject category, technical system

定位、导航与授时（PNT）是描述时间和空间的关键技术，也是国家综合实力的重要象征[1]。建立国家综合PNT体系，不仅能为国民经济、国防建设、基础科研提供稳定可靠的时空基准，还将推动PNT技术与通信产业、互联网产业的深度融合，有效渗透到国民经济众多领域，成为高科技产业和全球电子信息产业发展的新引擎。我国国家规划中明确提出：未来中国将加快推进国家综合PNT体系建设，争取到2030年前后，构建基准统一、覆盖无缝、安全可信、高效便捷的国家综合PNT体系，显著提升国家时空信息服务能力，为全球用户提供更优质的服务。全球导航卫星系统（GNSS）因其具有全天候、全天时、全球覆盖，实时性强和精度高等优势[2]，已成为当前PNT体系中重要的导航定位系统之一。

1957年10月4日前苏联成功发射第一颗人造卫星，开启了卫星导航系统时代。美国第一个卫星导航系统Transit以及后续621B系统和Timation系统的设计与实现为现代卫星导航系统的发展奠定了技术基础。20世纪70年代以来，以美国全球定位系统（GPS）为代表的GNSS的发展，已成为获取位置和时间信息的重要手段。GNSS在国民经济建设、军事国防等领域发挥了不可或缺的作用。当前的GNSS系统主要包括中国的BDS、美国的GPS、俄罗斯的GLONASS和欧洲的Galileo，此外日本、印度等国家也建设了相应的区域和增强卫星导航系统[3]。自2020年BDS-3宣布建成以来，我国已具备全球覆盖的导航、定位、授时和短报文通信服务能力，并在测绘、电信、水利、渔业、交通运输、森林防火、减灾救灾和公共安全等领域产生了显著的经济社会效益。因此，学习并了解GNSS的工作原理、现状与发展趋势、应用技术等内容对于培养我国卫星导航领域专业人才，充分应用我国BDS系统具有重要意义。

第一作者简介：秦红磊（1975—），博士，教授，博士生导师，主要从事无线电导航定位领域教学和研究工作，E-mail：ateqhl@buaa.edu.cn。

GNSS系列课程具有综合性、专业性较强，对学生基础、综合素养要求高的特点[4]。学习课程前，要求学生以理学中数学、物理学乃至天文学，工学中信息与通信工程、控制科学与工程等学科下设专业课程为前置基础知识，才能较好地理解掌握该课程，学以致用。因此，本文系统梳理了GNSS课程的技术体系，并全面归纳总结了与其技术体系密切相关的理学、工学下多个一级和二级学科，为我国高校培养GNSS领域专业人才提供相关指导。

1 GNSS在导航定位领域中的地位和作用

导航定位技术体系可分为3类：①无线电信号导航系统，包括GNSS天基无线电导航系统，VOR/DME、TACAN、LORAN-C和JTIDS等陆基无线电导航系统，低轨（LEO、Low Earth Orbit）通信卫星的天基机会信号导航，4G、5G、WiFi和FM的路基机会信号导航等；②环境地图匹配导航系统，包括天文导航、视觉导航等；③惯性导航系统（INS）。在无线电信号导航系统中，陆基无线电导航系统作用范围小，不易实现全球覆盖的PNT服务，可作为补充区域PNT服务[5]；而低轨通信卫星机会信号导航和路基机会信号导航技术正处于起步阶段[6-8]，目前低轨通信卫星常被作为GNSS的补充与增强[9-10]。在环境地图匹配导航系统中，天文导航虽不受电磁干扰，但系统在大气层内工作时受天候影响大，适用于航天器的自主导航[11]；视觉导航系统虽然自主性强，但受光线条件等外部环境影响大，且对计算资源要求高[12]。INS虽不向外辐射信号、也不依赖外部信号便可独立定位，数据输出率高且可提供位置、速度和姿态导航参数；但解算需要提供积分初值，且不能提供准确时间信息，误差随时间积累逐渐发散，因此通常利用GNSS或其他导航系统与INS的组合抑制INS误差的积累[13-14]。综上所述，GNSS虽无法应用于室内、水下等遮蔽环境且易受有意或无意的干扰，但具有全球覆盖，全天候、全天时运行，定位精度高等优势，在PNT技术体系中起主导作用，在导航领域具有不可或缺的地位。

2 GNSS涉及的学科体系分析

GNSS课程具有多学科交叉、理论性强、实践性强的特点[15]。GNSS研究领域是融合数学、物理学、天文学、地理学、测绘科学与技术、信息与通信工程、电子科学与技术、计算机科学与技术、控制科学与工程等理学、工学学科于一体的交叉性较强的专业，是服务国家地理信息战略新兴产业、新一代信息技术产业、数字经济建设、航天强国建设的工科类学科。GNSS课程涉及天球坐标系、地心地固坐标系、站心坐标系、地理坐标系、卫星轨道坐标系等的建立和相互转换；GNSS定位原理，状态方程、伪距观测方程、载波相位观测方程的建立与线性化，最小二乘算法与卡尔曼滤波算法等；差分定位技术中单差、双差和三差观测模型等。其实践性强体现在：学生在具备理论知识的基础上，必须亲自操作设备接收实际信号、编写代码、实现算法才能真正掌握GNSS定位的相关理论，要求学生具备软硬件系统开发的基本素质。

2.1 GNSS课程设计

GNSS课程设计通常包括4大部分[16]：①导航定位技术概论，主要介绍导航定位的发展历史、各种导航定位系统及其发展趋势等；②GNSS工作原理，主要介绍GNSS系统组成、工作基本原理、误差来源和接收机处理技术等；③GNSS系统发展现状与未来趋势，介绍世界主要GNSS系统的现状与发展趋势；④GNSS应用技术，主要介绍精密单点定位、多天线定姿、差分定位、组合定位等技术。

2.2 GNSS课程知识体系相关的理学与工学一级学科分析与汇总

对GNSS课程知识体系及其各章节主要授课内容与理学、工学下设一级学科的对应关系进行汇总（表1），可以看出，GNSS领域知识体系主要包括7个部分，涉及的必修内容主要涵盖了理学中物理学、天文学、数学、地理学、地球物理学、大气科学等一级学科，工学中信息与通信工程、控制科学与工程、电子科学与技术、测绘科学与技术、计算机科学与技术、航空宇航科学与工程等一级学科。

2.3 GNSS课程知识内容相关的理学与工学二级学科分析与汇总

1）时间系统。该部分主要要求学生掌握晶体钟、原子时和GNSS时间系统3个部分内容。以原子时为例，理解利用原子定时原理的前提是掌握原子结构、能级跃迁和光电效应相关基础知识，理论知识主要对应于物理学专业下设的粒子物理与原子核物理、原子与分子物理二级学科；对于原子钟设计与实现要求掌握的射频技术、微波技术和电子电路相关基础知识，则对应于电子科学与技术专业下设的电路与系统、微电子学与固体电子学、电磁场与微波技术二级学科（图1）。

表1　全球卫星导航授课内容与一级学科对应关系

章节	授课内容	理学一级学科	工学一级学科
时间系统	晶体钟、原子时、恒星时与太阳时、世界协调时、卫星导航系统时	物理学、天文学	电子科学与技术
空间系统	地心惯性坐标系、地心地固坐标系、大地椭球坐标系、地理坐标系、载体坐标系、坐标系转换	数学、天文学、地理学	测绘科学与技术
卫星轨道	卫星运动机理、无摄轨道、摄动轨道、轨道计算	天文学、地球物理学	航空宇航科学与工程、控制科学与工程
卫星导航系统工作原理	卫星导航系统组成、卫星导航系统误差源、卫星导航系统定位原理	大气科学	控制科学与工程、信息与通信工程、电子科学与技术、航空宇航科学与工程
卫星导航信号体制设计	信号发射及传播、无线电信号的调制、无线电信号的编码	数学	信息与通信工程、电子科学与技术
卫星导航接收机设计	接收机系统结构及指标、信号链路计算、射频信号接收技术、中频信号处理技术、信息处理技术	数学	信息与通信工程、电子科学与技术、计算机科学与技术
卫星导航系统应用	高精度、高动态、高灵敏、抗多径、抗干扰接收机，车载型、航海型、航空型、星载型、手持型接收机；融合定位（GNSS/INS组合定位、GNSS/INS/天文导航组合定位等）；差分定位技术、低轨增强技术、精密单点定位技术、多天线定姿技术	–	控制科学与工程、航空宇航科学与工程、船舶与海洋工程、交通与运输工程、兵器科学与技术

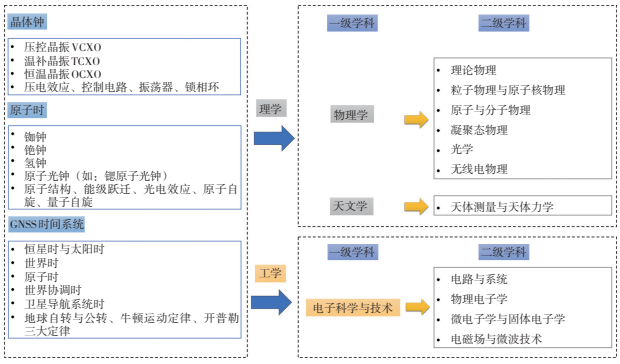


图1　时间系统知识结构与相关的一级、二级学科汇总

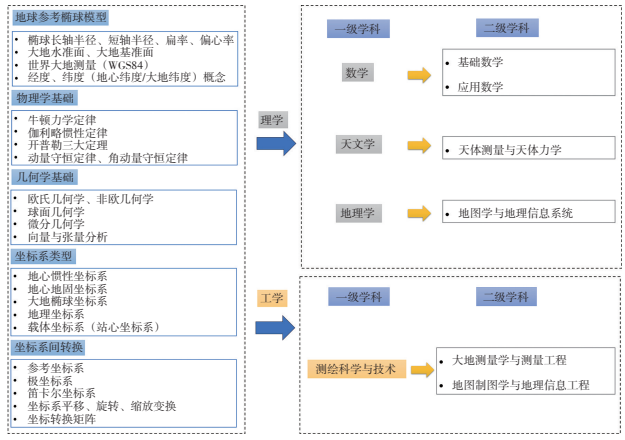


图2　空间系统知识结构与相关的一级、二级学科汇总

2）空间系统。学生需要掌握多种坐标系的基本概念与相互转换，以支持测绘与导航应用领域的实际需求。例如，在学习地心惯性坐标系与地心地固坐标系时，学生需要理解天体运动、章动与岁差的影响以及地球自转与极移的关系，这涉及到天体测量与天体力学等学科的相关内容；而经度、纬度概念以及地心纬度与大地纬度的区别则要求学生具备大地测量学与测量工程专业的基础知识。此外，坐标系转换的实现依赖于数学中的向量和矩阵运算，特别是几何学中的欧氏几何、向量分析等知识，这些基本理论与数学中的基础数学和计算数学密切相关。同时，测绘科学与技术、天文学、地理学等学科也是应用坐标系统的重要领域，涉及天球坐标系、地理坐标系的建立与应用，推动了精准空间定位与地理信息分析的技术进步（图2）。

3）卫星轨道。学生需要掌握卫星的运动机理、无摄轨道、摄动轨道和轨道计算等内容，需具备天体测量与天体力学专业的基础知识，了解如何应用物理学定律来描述卫星的轨道运动，并掌握卫星在轨道上的位置、速度和加速度的计算方法。卫星轨道的精确计算涉及各种摄动因素的影响，如地球非中心引力、日月引力、大气阻力、太阳光压等，这与地球物理学下设的二级学科空间物理学专业密切相关。与此同时，导航制导与控制学科也在卫星轨道保持与修正中发挥重要作用，通过对摄动影响的建模与精确控制，确保卫星在预定轨道和姿态下稳定运行。掌握该部分的计算原理还依赖于一些数学方法，如利用泰勒展开式和数值积分算法等根据卫星导航电文中星历参数进行轨道计算，涉及数学中的数值分析和微积分等内容（图3）。

4）卫星导航系统工作原理。学生需要深入理解卫星导航系统的组成、定位原理和误差源。卫星导航系统由空间星座、地面监控和用户设备组成，三者协同工作，实现精确定位。该部分内容涵盖控制科学与工程、信息与通信工程、大气科学等一级学科。卫星

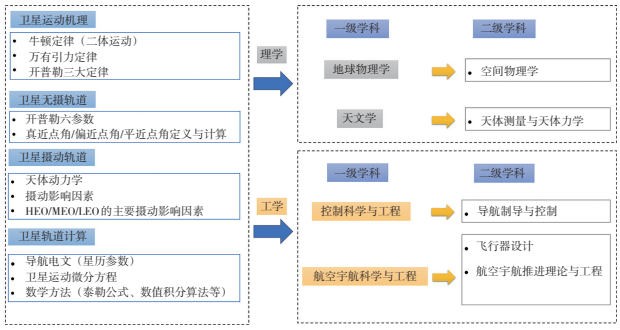


图3　卫星轨道知识结构与相关的一级、二级学科汇总

导航中的误差源，如电离层和对流层折射误差，要求学生具备大气物理和电磁波传播的基础知识，涉及大气科学下设的大气物理学与大气环境二级学科。同时，卫星导航系统定位原理，如伪距球和多普勒圆锥的交互定位，以及对于导航参数解的最优估计理论，如最小二乘法、卡尔曼滤波等，涉及信号与信息处理、控制理论与控制工程等二级学科。学生还需理解导航系统各项性能指标的含义与计算方法，包括精度、可用性、完好性和连续性等，以评估系统的实际应用能力（图4）。

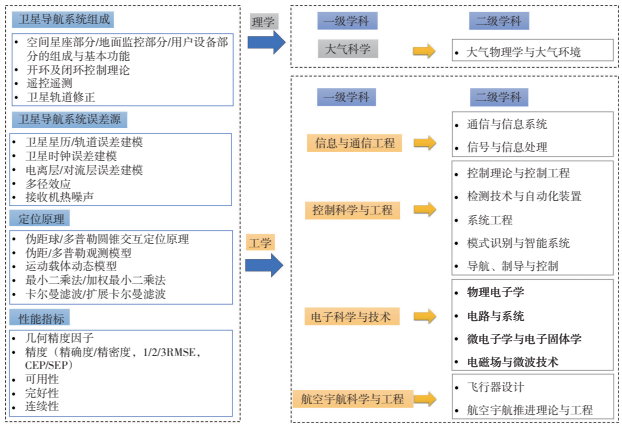


图4　卫星导航系统工作原理知识结构与相关的一级、二级学科汇总

5）卫星导航信号体制设计。学生不仅需掌握信号的发射、传播、调制和编码，还需掌握伪随机码的设计与应用。m序列、Gold序列和Weil序列等伪随机码在导航信号中用于扩频调制（CDMA码分复用技术），它们的生成和优化高度依赖数学学科的理论支持，尤其是数论、代数和组合数学，涉及应用数学的相关内容。伪随机码的设计需要较复杂的数学算法以确保它们具备良好的相关性和低互扰性，从而提高信号在复杂环境中的传播质量和抗干扰性能。因此，伪随机码的研究将导航与数学领域紧密结合，特别是在数学模型和算法设计方面。另外，奇偶校验编码、汉明编码、循环冗余校验编码等无线电信号的编码理论涉及通信与信息系统、信号与信息处理二级学科下要求掌握的相关知识内容（图5）。

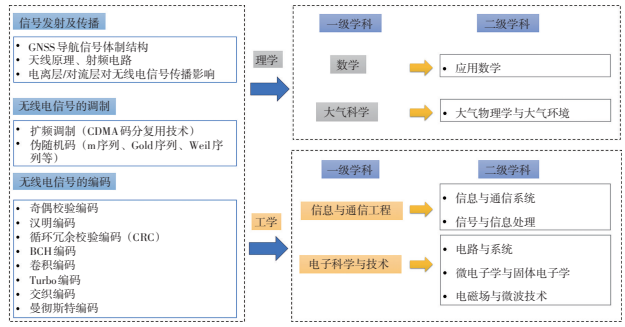


图5　卫星导航信号体制设计知识结构与相关的一级、二级学科汇总

6）卫星导航接收机设计。学生将学习接收机的系统结构与工作原理，涵盖从射频信号接收、基带信号处理到导航信号处理的全过程。卫星导航接收机设计涉及多学科的交叉应用，尤其是在信息与通信工程和电子科学与技术领域中，信号的接收、处理和信息解算是关键部分。通过接收天线、低噪声放大器、滤波器、变频器和模数转换器等结构，对导航信号进行计算和处理，包括捕获与跟踪，根据导航电文解算卫星轨道、观测量，并最终实现接收机位置与速度等的解算。该部分要求学生综合掌握信号与信息处理二级学科下数字信号处理技术中滤波、变换、检测估计理论等原理以及现代信号处理技术中小波分析、时频分析、噪声抑制、干扰消除和信号增强等技术，以提高信号处理的效率和准确性；电路与系统二级学科下模拟电路和数字电路的基本原理与设计方法，射频电路的设计与调试，如低噪声放大器、滤波器、变频器等关键组件的选型与实现，以及嵌入式系统设计，包括微处理器、微控制器、FPGA等硬件平台的选型与应用，相关的接口技术和总线标准；计算机系统结构二级

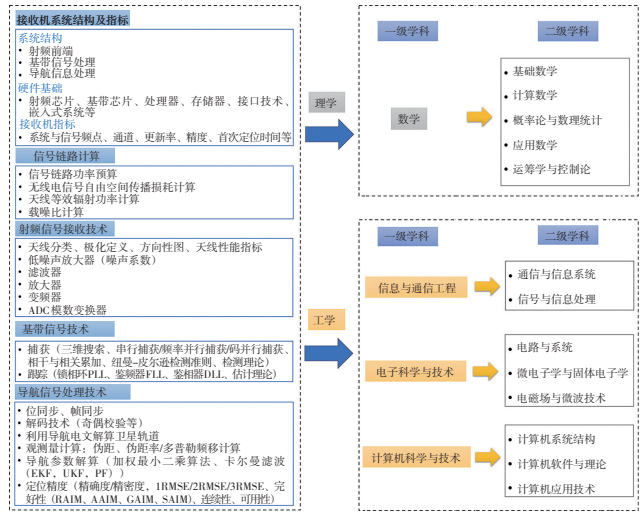


图6　卫星导航接收机设计知识结构与相关的一级、二级学科汇总

学科下处理器架构、存储系统、输入输出系统等计算机系统结构的基本原理，并行与分布式计算技术、实时操作系统，以实现高性能的导航信号处理；计算机软件与理论二级学科下编程语言与软件开发工具（C/C++等）、相关集成开发环境与调试工具的使用，以及相关算法设计与优化技术，以提高导航信号处理的效率和精度等。此外，数学中概率论与数理统计学科在接收机设计中也起到重要作用，尤其是在加权最小二乘算法、卡尔曼滤波（扩展卡尔曼滤波、无迹卡尔曼滤波、粒子滤波）等导航参数解算方法中，确保接收机能高精度、连续完好地提供可靠的定位导航与授时服务。

7）卫星导航系统应用。学生将全面了解导航接收机的设计与应用、多源融合定位技术以及GNSS在多领域的创新应用。该部分重点介绍高精度、高动态、高灵敏、抗多径、抗干扰接收机设计，并且适用于车载、航海、航空、星载等多种环境，同时涵盖差分定位、低轨增强与精密单点定位等技术。学生将学习如何在复杂环境下实现高动态、高灵敏度的导航定位，尤其是在无人车、无人机、智能交通等自动化系统中的应用。此外，该部分强调了GNSS与INS等导航系统的组合定位原理，以及多系统融合时所必需的故障检测与容错技术等，这与控制科学与工程专业下设的控制理论与工程专业二级学科紧密相关。通过结合机器人系统、自动驾驶、飞行器轨迹规划、水面/近水体导航等实际应用，学生将掌握GNSS在交通、航空、航海、兵器等多个工程学科中的应用场景以及如何通过导航算法设计来优化各类动态载体的定位与控制。该部分知识综合性强、应用范围广，将应用于检测技术与自动化装置、模式识别与智能系统、飞行器设计、水声工程、交通信息工程及控制、武器系统与运用工程等诸多二级学科领域（图7）。

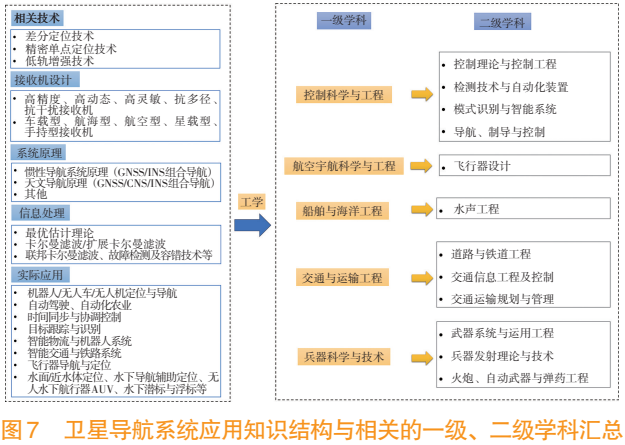


图7　卫星导航系统应用知识结构与相关的一级、二级学科汇总

总而言之，GNSS课程的教学目的是使学生充分了解GNSS的工作原理、现状和发展趋势、应用技术；进而对培养我国相关技术人才、充分发挥BDS系统的应用效能起到促进作用。从课程设计来看，GNSS授课内容涉及学科领域广泛，综合性极强，学生需要广泛了解数学、物理学、信息与通信工程、电子科学与技术、控制科学与工程、测绘科学与技术等多个学科的基础知识。数学作为基础学科，为GNSS提供了计算方法和数学模型；物理学则在卫星轨道、信号传播等方面提供了原理支持；信息与通信工程确保了卫星信号的传输、接收和处理，使导航信息能够准确无误地传递给用户；电子科学与技术为卫星导航设备的研发和制造提供了技术支撑，包括芯片设计、传感器技术等；控制科学与工程在卫星的轨道控制、姿态调整等方面发挥着关键作用；测绘科学与技术则将卫星导航技术应用于地理信息获取和处理，为工程和科学研究提供准确的位置信息。2023年4月第十三届中国卫星导航年会“北斗教育论坛”中，导航领域专家形成共识，积极倡导建设新国家一级学科——导航定位授时工程（PNT–Engineering），鼓励高校设置导航工程本科专业和学位点，以整合上述多学科交叉知识体系，进而加快高层次复合型专业人才建设。设立专门的学科和专业可以更好地融合不同学科的知识，为学生提供系统的学习和科研平台。

3　结　语

通过分析GNSS课程涉及的学科体系发现，卫星导航研究领域涵盖知识范围广泛，涉及理学、工学等学科领域，因此我国高校培养卫星导航领域专业人才有必要综合理学、工学等多学科教学，重视通识教育与多学科交叉、跨学科教育综合培养。与此同时，诸多工学专业均需应用卫星导航系统辅助其研究，因此有必要在该类相关专业中开设GNSS原理相关课程作为专业必修基础课。

参考文献

[1]　黄才，赵思浩. 国家定位导航授时基础设施现状及能力展望[J]. 导航定位与授时，2017，4(5):19-26

[2]　Fernandez-Prades C，Presti L L，Falletti E. Satellite Radiolocalization from GPS to GNSS and Beyond: Novel Technologies and Applications for Civil Mass Market[J]. Proceedings of the IEEE，2011，99(11):1 882-1 904

[3]　宁津生，姚宜斌，张小红. 全球导航卫星系统发展综述[J]. 导航定位学报，2013，1(1):3-8

（下转第140页）