引文格式：赵双明,万一,姚永祥. 《卫星摄影测量》教材建设与教学实践[J]. 地理空间信息, 2024, 22(11): 126-130. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2024.11.026

《卫星摄影测量》教材建设与教学实践

赵双明[1]，万　一[1]，姚永祥[1*]
（1. 武汉大学 遥感信息工程学院，湖北 武汉 430079）

摘　要：针对国内缺少面向摄影测量与几何遥感方向本科生《卫星摄影测量》教材的实际情况，制定了教学大纲，以课程理论为基础、工程应用为导向，根据课程内容之间的逻辑关系，组织、策划、设计了系统完整的《卫星摄影测量》教材内容体系，出版了国内首部《卫星摄影测量》教材。教材力求全面反映卫星摄影测量的新理论、新技术、新方法和新发展。结合长期的《卫星摄影测量》课程教学实践，对课堂教学、课堂思政、课外作业和课程考核方式进行了有益探索，取得了积极的效果。

关键词：教学大纲；教材内容体系；课堂教学；课堂思政；课程考核
中图分类号：G642　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2024）11-0126-05

Textbook Construction and Teaching Practice of *Satellite Photogrammetry*

ZHAO Shuangming[1], WAN Yi[1], YAO Yongxiang[1]
(1. School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

Abstract: In response to the actual situation of lack of undergraduate textbooks on *Satellite Photogrammetry* for photogrammetry and geometric remote sensing in China, we developed a teaching syllabus at first. And then, based on the course theory and guided by engineering application, according to the logical relationship between the course contents, we organized, planned and designed a systematic and complete textbook content system for *Satellite Photogrammetry*, and published the first domestic textbook on *Satellite Photogrammetry*. The textbook strives to comprehensively reflect the new theories, technologies, methods and developments in satellite photogrammetry. In the long-term teaching practice of *Satellite Photogrammetry* course, we made beneficial explorations on classroom teaching, classroom ideological and political education, extracurricular assignment and course assessment method, and achieved positive results.

Key words: teaching syllabus, textbook content system, classroom teaching, classroom ideological and political education, course assessment

利用航天飞行器从宇宙空间获取地球（或月球、火星等行星）环境成像信息，再结合卫星姿轨辅助数据、传感器定标数据，实现成像时刻卫星影像对地观测几何定位、影像分析与解译是卫星摄影测量的主要任务。随着航天技术、传感器技术的发展，光学卫星的测绘体制发生了重大变化。光学传感器从早期的框幅式相机发展为现在的单线阵、双线阵和三线阵相机，进一步向结合敏捷卫星平台的侦测一体式高分辨率单线阵相机发展[1]。高空间分辨率的精细化观测能力、高敏捷机动的快速影像获取能力以及高精度的立体空间定位能力都将成为卫星摄影测量的重要发展方向[2]，全球测图以及月球与行星测绘[3-5]、民用与国防建设等国家重大应用需求对卫星摄影测量的人才培养提出了更高的要求。

《卫星摄影测量》在整个摄影测量课程体系中具有重要地位。摄影测量学科体系应包括航空、航天、地面、低空和深空5个部分，其中航空摄影测量是基础，卫星摄影测量主要解决航天对地观测以及深空探测领域月球与行星的摄影测量问题。2015年武汉大学首次面向摄影测量方向本科生开设《卫星摄影测量》专业核心课程，由于缺少一部适合本科生专业课程教学的教材，对教学工作特别是学校“双一流”建设[6]产生了非常不利的影响。因此，开展《卫星摄影测量》教材建设和教学方法研究不仅十分必要而且很有意义。笔者根据多年的《卫星摄影测量》教学实践探索，思考并结合自身的科研工作，将科研成果和学科

收稿日期：2024-08-25。
项目来源：国家高分辨率对地观测系统重大专项（民用部分）资助项目（06-Y30F04-9001-20/22）；武汉大学本科教育质量建设综合改革资助项目（一流本科专业建设项目）；武汉大学遥感学院“三全育人”教育教学改革资助项目（YGJY202412）。
第一作者简介：赵双明（1966—），博士，教授，研究方向为摄影测量与遥感、月球与行星遥感测绘理论与方法，E-mail：smzhao@whu.edu.cn。
通信作者：姚永祥（1992—），博士，实验师，研究方向为摄影测量与遥感、多模态遥感数据处理，E-mail：yaoyongxiang@whu.edu.cn。

最新发展作为教材的素材，在武汉大学本科教育质量建设综合改革项目（一流本科专业规划教材建设项目）的支持下，制定了教学大纲，并组织了《卫星摄影测量》的教材建设，边撰写边试用。在当前强化通识教育的背景下，专业课程的授课时间减少，而该领域新技术、新方法、新理论不断涌现，笔者通过持续优化课程教学内容、不断创新教学方法、改革课程的考试考核方式，取得了很好的教学效果。

1　教学大纲制定

《卫星摄影测量》课程是面向摄影测量方向本科生的专业必修课，旨在使学生全面学习卫星摄影测量的基本概念、理论、方法，了解卫星摄影测量的工程应用。前导课程主要包括高等数学、线性代数、误差处理理论、解析摄影测量和数字摄影测量。在解析摄影测量课程学习框幅式相机的成像几何及其摄影测量的几何处理理论方法的基础上，本课程将针对光学遥感卫星运行轨道、影像数据获取以及线阵推扫式光学卫星成像传感器的特点，研究其成像几何及其摄影测量的几何处理方法。课程的主要内容涵盖[7]：①线阵推扫式传感器严密几何模型和通用传感器模型的构建及其对应的平差计算方法；②线阵影像核线几何模型；③光学线阵推扫式影像匹配；④光学卫星成像传感器在轨几何定标；⑤光学卫星产品分级与制作等方面的内容。

通过课程学习，学生应了解卫星摄影测量的相关基本概念，掌握光学卫星遥感影像的几何处理方法，并能运用所学知识解决生产和科学实验中的卫星数据几何处理问题。具体课程目标包括[7]：①能够使用高等数学、工程数学知识学习理解卫星摄影测量的基本原理；②掌握卫星摄影测量的基本概念、原理、方法，解决卫星摄影测量实际生产、科学实验中的相关数据处理问题；③在课程学习的基础上，能自主学习最新卫星摄影测量的理论与方法；④在教学过程中，培养和锻炼学生的研究能力、团队合作能力以及解决实际生产和科学实验中的卫星数据几何处理问题的能力。

2　教材内容体系规划

《卫星摄影测量》是一门理论性、工程应用性较强的课程，涉及一系列概念、方法、原理等。以课程理论为基础、工程应用为导向，根据课程内容之间的逻辑关系，将其物化为可定性描述的知识模块，是课程教学内容组织与设计的关键。本文将相应的教材内容体系设计为传感器严格几何模型、光学卫星有理函数模型（RFM模型）、线阵推扫影像核线几何模型、卫星影像立体匹配、光学卫星在轨几何标定、光学卫星产品分级与制作6个模块。

2.1　传感器严格几何模型

线阵列光学传感器沿卫星轨道方向推扫成像，可获取连续无缝的条带影像，被广泛应用于卫星摄影测量，是对地观测十分有效的光学传感器。SPOT卫星、IKONOS卫星、QuickBird卫星、资源三号、高分一号、高分二号和高分七号光学卫星均采用线阵列推扫式传感器成像。其严格几何模型与传感器物理、几何特性紧密相关，考虑影像变形的物理因素，反映真实的物理成像关系，定向参数有严格的物理意义，是光学卫星长条带影像摄影测量处理、光学卫星定位误差分析以及在轨几何定标的基础。传感器严格几何模型是卫星摄影测量的核心，涉及的相关知识点较多，主要包括卫星摄影测量常用的坐标系与坐标变换、线阵传感器成像原理、传感器严格成像模型、传感器仿射变换模型等内容。其中，坐标系与坐标变换包括图像坐标系、像平面坐标系、传感器坐标系、轨道坐标系、本体坐标系、地心直角坐标系、大地坐标系、局部切面坐标系、制图坐标系和天球坐标系（J2000惯性坐标系）；线阵传感器成像原理包括单线阵传感器成像原理、三线阵传感器成像原理、多片TDI CCD成像原理和线阵立体影像获取方式；传感器严格成像模型包括传感器内外方位元素、欧拉角构造旋转矩阵、四元数构造旋转矩阵、轴角法构造旋转矩阵、卫星轨道数据模型、卫星姿态数据模型、光学卫星平台震颤检测与补偿、严格传感器成像模型和严格传感器影像平差模型；传感器仿射变换模型包括中心投影与平行投影几何、线性2D仿射变换模型和非线性平行投影成像模型。

2.2　光学卫星有理函数模型

通用传感器模型不考虑传感器成像的物理意义，直接采用有理多项式等一般数学函数描述地面点与相应像点之间的几何关系。采用通用传感器模型的理由包括：①传感器的成像几何不同，不同传感器其严格成像模型不同，软件开发和实际应用时较繁琐；②高分辨率CCD传感器具有高轨道、长焦距、窄视场角的特点，严格传感器模型将导致解算时模型参数的强相关；③高分辨率商业遥感卫星的传感器成像参数、轨道参数等信息保密、不公开，而通用传感器模型与具体传感器物理成像几何无关，能满足传感器成像方式

多样性的需求。

1999年Space Imaging公司成功发射了国际上首颗分辨率优于1 m的商业遥感卫星IKONOS-2，并最早将RFM模型应用于IKONOS卫星取代了IKONOS传感器物理模型，推动了有理函数模型的广泛研究与应用[8]。该模块的主要内容包括有理函数模型、单片RFM解算、RFM控制方案、RFM立体交会算法、RPC模型区域网平差和RFM模型更新与应用[9]等。其中，有理函数模型包括有理函数模型定义和通用传感器模型；RFM控制方案包括地形无关的解算方案和地形相关的解算方案；RFM立体交会算法包括RFM正解立体交会算法、RFM反解立体交会算法和RFM单片定位算法；RPC模型区域网平差包括物方补偿方案、像方补偿方案、RPC区域网平差算法和大规模区域网平差算法；RFM模型更新与应用包括RFM模型更新和RFM应用。

2.3 线阵推扫影像核线几何模型

核线是摄影测量中十分重要的概念。核线重采样被广泛应用于影像匹配、数字高程模型制作等方面。线阵推扫影像与面阵影像成像原理不同，核线几何也不同。框幅式影像属于面中心投影成像，每幅影像6个外方位元素，成像原理简单、具有严格的核线定义且核线为直线；线阵推扫式影像采用线中心投影的弱成像方式，影像条带中每个扫描行影像的外方位元素随时间变化，核线的定义比框幅式影像复杂[10]。研究表明，CCD推扫影像核线模型是类双曲线，核线的形状与卫星运行的轨道、姿态密切相关。该模块在介绍框幅式影像核线的定义、核线几何模型以及相应算法的基础上，首先介绍了线阵影像核线的定义与性质；再介绍了线阵影像核线几何模型；最后介绍了核线重采样的原理与方法。其中，框幅式影像核线几何包括核线的定义（核面与影像平面交线、投影轨迹法）、核线几何模型和核线影像重采样；线阵影像核线几何包括线阵影像核线的定义和线阵影像核线的几何模型；线阵影像核线重采样包括平行投影模型核线重采样、基于RPC和平行投影模型的核线重采样、基于RPC的分段核线重采样和基于投影参考平面的核线重采样。

2.4 卫星影像立体匹配

影像匹配是数字摄影测量实现自动化的核心，在影像相对定向、影像区域网平差特别是影像密集匹配生产DSM中具有重要作用，也被广泛应用于多光谱卫星影像之间的配准、卫星影像控制点影像库建设等工作。高分辨率卫星成像传感器具有长焦距、窄视场角的特点，影像投影差较大，易产生地形遮挡和地物遮挡，特别是城市高层建筑物的遮挡；且低纹理和重复纹理问题也将引起匹配的歧义性。该模块的主要内容包括卫星影像匹配基础、影像稀疏匹配和影像密集匹配。其中，卫星影像匹配基础包括相似性测度（归一化互相关、非参数化局部变换、互信息）、影像增强（自适应平滑滤波器、Wallis滤波器）和影像金字塔建立（窗口多像元平均、高斯金字塔）；影像稀疏匹配包括特征提取（影像分析和影像匹配的基础）、相关窗口“warping”（匹配预测、窗口畸变改正）和稀疏点匹配；影像密集匹配包括核线影像密集匹配（半全局匹配SGM）和多视影像密集匹配（物方几何条件约束）。

2.5 光学卫星在轨几何标定

影响光学卫星几何定位精度的因素很多，误差源可为4个类别：①传感器自身的误差，主要包括内方位元素误差、光学系统成像几何畸变以及CCD线阵排列、旋转、弯曲、像元尺寸误差等；②有效载荷安装误差，包括卫星定轨接收天线、星敏感器、惯性测量单元以及光学相机在卫星本体坐标系中的安装测量参数等误差；③卫星轨道、姿态测量误差；④时间同步误差。虽然传感器内方位元素等参数以及有效载荷安装参数，在卫星发射前已进行实验室精确的检校测量，但由于卫星在轨运行时的微重力环境、卫星发射时产生的机械震动、空间环境的温度变化等因素，将影响相机的光学特性，导致载荷安装参数变化，因此利用地面控制点或几何约束等条件，对光学卫星进行在轨几何定标，对提高光学卫星影像几何定位精度具有重要意义。该模块的主要内容包括在轨定标几何模型（考虑载荷安置参数的严格成像模型）、几何定位误差分析[11]、在轨几何定标以及恒星相机定标。其中，几何定位误差分析包括内方位元素误差模型（主点、主距、光学畸变等）、轨道误差模型（沿轨向、叉轨向和地心指向）、姿态误差模型（侧滚、俯仰、偏航）以及安装误差与时间同步误差模型；在轨几何定标包括几何外定标（偏置矩阵）、几何内定标（畸变模型、指向角模型）、几何定标策略（外定标+内定标）和几何定标控制数据（控制点、DOM+DEM）。

2.6 光学卫星产品分级与制作

高分辨率遥感卫星被广泛应用于民用与军事应用领域。1999年9月24日IKONOS光学卫星的成功发射，标志着高分辨率遥感卫星进入商业化运行时代。此后，国内外发射了大量高分辨率光学卫星，国外典

型的高分光学卫星包括QuickBird、SPOT 5、IRS-P5、ALOS、WorldView等；我国也已成功发射了高分一号、高分二号等高分专项系列卫星以及资源三号、高分七号等高分专项立体测绘卫星。高分辨率光学卫星数据的广泛应用进一步推动了高分卫星的商业化进程。在光学卫星数据产品方面，要求商业卫星运营商根据用户需求定制不同级别的数据产品[12]。由于不同的光学卫星运行轨道、传感器设计、影像获取方式和成像特点不同，因此不同卫星的影像产品分级体系和分级标准也不尽相同。该模块介绍了高分辨率光学卫星的产品分级形式以及各分级产品的制作和相应算法模型。其中，高分辨率光学卫星产品分级包括原始数据产品、传感器校正产品、系统几何校正产品、几何精纠正产品、正射纠正产品和数字正射影像图产品；光学卫星几何模型正反变换包括几何模型正变换和几何模型反变换；光学卫星分级产品制作包括传感器校正产品制作、系统几何纠正产品制作、几何精纠正产品制作、正射纠正产品制作和核线影像产品制作。

3　教学组织实施

《卫星摄影测量》是工程应用性较强的一门课程，教学的根本目标是培养学生创新应用能力，能运用所学知识解决卫星摄影测量工程应用问题。课堂教学首先要告诉学生学习该课程的目的，其次需结合卫星摄影测量的工程应用帮助学生梳理课程中各部分的逻辑关系，以工程应用为导向教学，学生的学习目标十分明确。

3.1　课堂教学

课堂教学是教学活动的重要组成部分。课堂教学应重点讲授基本概念、基本原理和基本方法，理论与实际相结合，启发培养学生独立思考的能力。例如，关于核线的概念，框幅式影像中核线是直线，且立体影像对中有同名核线对的概念；而对于线阵推扫式影像，影像条带中各扫描行影像有各自的投影中心，且外方位元素是随时间变化的，因此不同的成像时刻扫描行影像的投影中心位置和姿态不同，场景获取期间扫描行外方位元素的变化直接影响核线的形状，在整个场景内核线不再是直线，且左右立体影像上不存在核线对的概念，线阵推扫影像的核线几何将变得十分复杂，但在弄清基本概念后，核线几何模型的建立以及核线的重采样将变得较简单。

3.2　思政要素

卫星摄影测量是对地观测、深空探测获取空间信息的重要手段。“一带一路”倡议催生全球测图的需求；从嫦娥一号到嫦娥六号，探月工程“绕、落、回”三步走的规划圆满收官，天问一号探测器成功着陆火星，我国首次火星探测任务取得圆满成功。习近平总书记称深空探测为“科技竞争的制高点”，特别指出“要接续实施好深空探测等航天重大工程。”将这些思政要素通过“春风化雨、润物无声”的方式融入教材、带进课堂、扎根头脑[13-16]，提高学生的思想认识、产生强烈的自豪感和荣誉感，增强社会责任感和使命感，引领学生树立正确的人生观、价值观、世界观。

3.3　课外习题

针对每一章内容布置课后作业，学生通过完成作业加强对基础知识的理解与知识点的掌握。教师对作业完成情况中存在的主要问题进行讲解，答疑解惑。

3.4　综合大作业

要求团队协作共同完成综合大作业。本文以“地形无关的控制方案建立RPC模型”为例，介绍综合大作业的执行情况。给定的数据包括仿真影像、离散轨道数据（WGS84）、离散姿态数据（J2000坐标系、四元数）、相机指向角查找表和扫描行成像时刻文件。作业要求包括：①5人为一组，自由组合组建大作业小组，推选一人为组长；②分工协作共同完成RPC模型解算和精度评定工作；③提交大作业综合实习报告（算法设计、解算结果、精度分析评定）、答辩PPT等，作为成绩评定的依据。综合大作业的主要工作可分为5个部分：①J2000坐标系转换地心地固坐标系；②建立姿态、轨道内插模型；③严格成像模型构建（正反投影变换）；④物方控制格网构建；⑤RPC模型参数解算、精度评定。5个部分工作内容分别由5个学生承担，既有分工又有协同、且成果互为验证，最后完成任务。通过大作业的综合训练，加深对课程内容的理解、强化工程化应用实践、构筑一体化的知识体系，培养团队意识、激发学习兴趣、提升解决本专业复杂工程问题的能力。

3.5　课程考核与成绩评定

课程考核与成绩评定是检验课程目标、评价学生学习成果的手段。课程考核环节包括平时作业（A）、综合大作业（B）和期末考试（C）3个部分，成绩分别以百分计；最终成绩以各考核环节所占分值比例计算评定：A×20%+B×30%+C×50%。由评定过程可知，综合大作业、平时作业占比为50%，目的是弱化应试、强化实际应用能力。

3.6 教学组织实施效果

以武汉大学为例，自2015年开设《卫星摄影测量》课程以来，课程教学在课堂教学、课程思政、综合大作业训练和课程考核方式等方面得到了同学的积极评价。2021B3班摄影测量方向G同学对课程教学给出以下评价："《卫星摄影测量》课堂教学内容系统、丰富，有深度和难度，注重反映学科发展新动态，教师教学有条理、讲解详细透彻，课堂学习氛围浓厚；课程综合大作业与课程内容同步、联系紧密，通过完成大作业，可更加透彻地理解知识点；课程考核全面，能充分考察学生对知识的掌握情况。总的来说，通过该门课程的学习，我掌握了扎实的卫星摄影测量理论知识，具备了卫星摄影测量数据处理与分析的能力，充分提升了科研能力。"2021B4班摄影测量方向L同学认为："综合大作业将课程内容串联在一起，可以增强学生对知识的理解，培养学生对知识融会贯通的能力，有助于提升学生科研能力；课程考核方式采用期末考试、平时作业与综合大作业相结合的形式，是对学生理论学习、动手能力的全面考核。"2020B班同学A认为课程思政使他深刻认识到："卫星摄影测量的重要性，在深空探测、高分专项等国家重大工程领域的应用广泛，进一步激发了学习热情和兴趣"。2020B4班Y同学目前在科罗拉多州立大学攻读博士学位，认为"通过综合大作业的训练，对课程的理论知识有了更加系统、深入的理解，代码编写、自主学习、团队合作和领导能力等4个能力得到提升，为以后科研、继续深造奠定了基础"。2018B4班F同学目前在武汉大学攻读博士学位，认为"《卫星摄影测量》课程专业性强、涉及的知识面广，大作业将理论与实践相结合，突出工程应用性，涵盖了数据获取、处理到结果分析的全过程，是系统学习卫星摄影测量基础知识的重要环节；课程中学到的RPC解算、推扫式影像的核线纠正等内容为研究生阶段的学习和科研工作提供了有力的理论支持"。学生对课程的评价也体现在一些量化指标上，从目前查到的评教情况来看，评教分数总体在95分以上，学生对课程教学的评价非常好，说明该课程深受学生欢迎，取得了很好的教学成效。

4 结 语

从2015年开始，历经近10年的教学与科研实践，2024年1月《卫星摄影测量》作为高等学校遥感科学与技术系列教材、武汉大学规划教材由武汉大学出版社正式出版发行。该教材书稿正文页码231页，共计30余万字，编辑各类数学公式约450个，手工绘制插图150余个。《卫星摄影测量》是国内面向摄影测量和几何遥感方向本科生的首部教材，重点阐述了卫星摄影测量的基本概念、基本原理、基本方法，尽可能系统全面地反映卫星摄影测量的新技术、新理论、新方法、新发展，力求形成较完整的卫星摄影测量课程教学理论体系。该书的出版改变了长期以来卫星摄影测量课程缺乏专业教材的状况，必将对遥感科学与技术学科等相关学科的教学工作起到积极推动作用。此外，在教学过程中，积极探索课堂教学与课程考核评价方式，取得了良好的教学效果，受到学生的广泛好评。下一步将考虑继续补充、更新、优化课程教材内容，持续创新教学方式方法，打造精品课程。

参考文献

[1] 刘韬. 国外光学测绘卫星发展研究[J]. 国际太空,2016(1):67-74

[2] 中国地理信息产业协会. 地理信息产业蓝皮书·中国地理信息产业发展报告(2023)[M]. 北京:测绘出版社,2023

[3] 张永生,巩丹超,刘军. 高分辨率遥感卫星应用[M]. 北京:科学出版社,2014

[4] 邸凯昌,刘斌,辛鑫,等. 月球轨道器影像摄影测量制图进展及应用[J]. 测绘学报,2019,48(12):1 562-1 574

[5] 徐青,耿迅. 地外天体形貌测绘研究现状与展望[J]. 深空探测学报(中英文),2022,9(3):300-310

[6] 武汉大学. 武汉大学一流大学建设高校建设方案[Z].

[7] 武汉大学.《卫星摄影测量》课程教学大纲(专业认证版)[Z].

[8] Dial G, Grodecki J. RPC Replacement Camera Models[C]. American Society for Photogrammetry and Remote Sensing Annual Conference,2005

[9] 杨博,王密,皮英冬. 仅用虚拟控制点的超大区域无控制区域网平差[J]. 测绘学报,2017,46(7):874-881

[10] Morgan M F. Epipolar Resampling of Linear Array Scanner Scenes[D]. University of Calgary, Canada, 2004

[11] 张过. 线阵推扫式光学卫星几何高精度处理[M]. 北京:科学出版社,2016

[12] 张过,秦绪文,潘红播,等. 高分辨率光学卫星标准产品分级体系研究[M]. 北京:测绘出版社,2013

[13] 汤苗苗,董美娟. 高校课程思政建设存在的问题及对策[J]. 学校党建与思想教育,2020(22):54-55

[14] 毛卫华,汤晓建. 价值塑造导向的高校课程思政建设研究[J]. 江苏高教,2023(12):126-130

[15] 杨春梅,孙程程,王佳佳. 树立三位一体的世界一流大学教育观[J]. 中国高等教育,2023(23):45-48

[16] 朱秀芳.《资源环境遥感》课程思政建设探索[J]. 地理空间信息,2024,22(6):118-122