



“十三五”国家重点出版规划项目

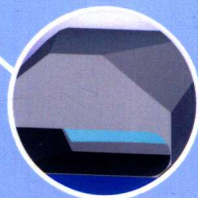
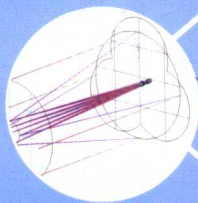
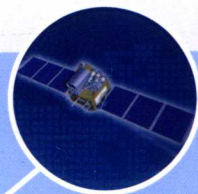
空间飞行器工程丛书

航天光学

遥感系统总体设计

Design of Space Optical Remote Sensing System

陶家生 著



国防工业出版社
National Defense Industry Press

“十三五”国家重点出版规划项目
空间飞行器工程丛书

航天光学遥感系统总体设计

Design of Space Optical Remote Sensing System

■ 陶家生 著

国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

全书共10章,介绍了作者几十年光学遥感研究工作中提出的新概念、新方法,如空间像元分辨率及其与传统胶片成像分辨率的区别,以目标特征辨识为基础的CCD侦察图像的分辨力。在CCD采样离散化的空间移变情况下,用基于空间不变的卷积方法研究CCD成像的MTF问题存在局限性,采用了数值模拟方法求取各种条件下CCD图像的MTF。全面系统地介绍了成像相机、多谱段相机、测绘相机、红外相机、成像光谱仪的基本概念、理论、参数的设计计算、各自的系统组成,航天光学遥感系统的性能评价。论述了航天光学遥感总体设计的光源、天气系统、目标特性、谱段选择、能量计算,轨道参数、光学传感器参数、航天器参数的协调择优、综合分析以及大系统的性能评价方法,形成了实现大系统设计目标的完整思路。

本书适合航天光学遥感相关专业的工程技术人员、研究生阅读。

图书在版编目(CIP)数据

航天光学遥感系统总体设计/陶家生著. —北京:国防工业出版社, 2019.3

(空间飞行器工程丛书)

ISBN 978-7-118-11763-9

I. ①航… II. ①陶… III. ①航天器—光学遥感—系统设计 IV. ①V423

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第015006号

航天光学遥感系统总体设计

著 者 陶家生

丛书策划 管明林

责任编辑 胡翠敏

出版发行 国防工业出版社(010-88540717 010-88540777)

地址邮编 北京市海淀区紫竹院南路23号, 100048

经 售 新华书店

印 刷 三河市腾飞印务有限公司

开 本 710×1000 1/16

印 张 24³/₄

印 数 1—2000册

字 数 459千字

版 印 次 2019年3月第1版第1次印刷

定 价 128.00元 (本书如有印装错误, 我社负责调换)

“空间飞行器工程丛书” 编审委员会

顾 问 吴宏鑫 叶培建

主任委员 李 明

副主任委员 刘瑞生

委 员 王 翔 王永富 朱北园 刘天雄

(按姓氏笔画排序) 刘战捷 向树红 李 杰 李劲东

邱家稳 张 明 张柏楠 周志成

赵和平 徐 鹏 曹桂兴

秘 书 蒋耀光 管明林

前 言

光学是一个既古老传统又在日新月异地发展着的学科,以其为基础的航天光学遥感又以航天技术的快速发展而不断推陈出新。从1960年美国发射太阳同步气象卫星起,开始了真正从航天器上对地球进行长期观测的航天光学遥感。航天光学遥感研究从成像发展为高光谱成像、立体测绘等多种光学遥感形式,从20t重的大型综合卫星到不足10kg的微小卫星,从低轨光学遥感到同步轨道光学遥感,从地球轨道至飞出太阳系,航天光学遥感器功能各异、姿态纷呈。

航天光学遥感使人们站得更高看得更远,打破了国界疆域,可以实现全球成像。其高效大面积的成像,使得地图的快速更新成为现实,为高精度的汽车导航提供了基础,极大地方便了现代人的生活。航天光学遥感已成为天气预报、防灾减灾、资源普查、地质调查、城市规划、港口铁路等大型工程建设的重要信息源。

航天光学遥感系统是涉及轨道、航天平台、光学遥感器的大系统,是以空间系统、时间系统、空间光学、大气光学、光源、辐射度量、光度量、光电探测器等学科和概念为基础构建起来的一个总体性学科。本书的编写力求基本概念清晰、内容配套完整、理论技术兼收,通过本书的学习能够从参数设计的层面掌握航天光学遥感系统的总体设计问题。

第1章从航天光学遥感发展的历程角度介绍了航天光学遥感的作用、推动发展的动力、航天光学遥感的优势和技术的精密性复杂性。第2章介绍了航天光学遥感系统的主要概念。航天活动的特点是广域性和协同性,为此从太阳系

天体运动的角度介绍了空间系统、时间系统及两者之间的联系。介绍了平台、有效载荷、光学遥感的主要基本概念,为后续章节的学习准备预备知识。第3章介绍轨道知识,重点是太阳同步轨道和地球同步轨道,说明了从航天器上如何确定地球上的遥感点和如何进行星座的建立,阐明了航天光学遥感卫星是如何实现全球探测的。第4章介绍了航天光学遥感的光源及光能量的传输与度量问题、大气层的基本构造和大气窗口,说明了大气对航天光学遥感的能量影响、定位精度影响。第5章介绍了各种类型、各种谱段的光电探测器及其性能参数,温度的适应性及噪声。重点介绍了 CCD、CMOS、红外器件、光子探测器。第6章介绍了光学系统基本概念,六大像差,折射系统、反射系统、折反混合系统的特点,以及如何对航天光学遥感的光学系统进行选择。第7章是航天光学遥感的核心章节,介绍了成像相机、测绘相机、红外相机、成像光谱仪基本概念、理论、参数的设计计算、各自的系统组成。第8章介绍了与光学遥感密切相关的低轨平台、高轨平台的性能参数和成像方式,评述了光学遥感卫星的发展趋势。第9章在前面章节的基础上,论述了航天光学遥感的应用、谱段选择、能量计算,轨道参数、光学遥感器参数、平台参数的协调择优和系统的综合分析以及性能评价,以便对大系统总体的参数设计形成系统和完整的认识。第10章从信息光学的基础理论出发,从实用的角度深入阐述了光学遥感器的性能设计,并结合光电探测器的采样离散化问题深入论述了光电式光学遥感器的性能特点,图像的分辨力和像移的补偿问题。这一章注重了光学遥感的理论分析和深化。

中国空间技术研究院轨道设计资深专家杨维廉研究员审阅了第2章、第3章,国家卫星气象中心资深专家张志清研究员审阅了第4章,中国科学院自动化研究所王欣刚研究员审阅了第5章,北京理工大学资深教授李林审阅了第6章、第7章,中国空间技术研究院资源卫星资深专家张庆君研究员审阅了第8章、第9章,对各位专家的审阅和建议深表感谢。

本书是在为中国空间技术研究院神舟学院编写的“航天光学遥感系统总体设计”讲义的基础上完善形成的,全书由陶家生研究员编写完成。感谢中国空

间技术研究院神舟学院的领导、教学老师和通信卫星事业部领导的热情支持和帮助。

本书涉及学科较多,加之作者水平有限,疏漏之处恳请读者批评指正。

邮件地址:jiasengtao@163.com

陶家生

2017年3月 北京航天城

主要参数

$r_a = 6371.23\text{km}$, 地球平均半径

$r_e = 6378.145\text{km}$, 地球赤道半径

$r_p = 6356.76\text{km}$, 地球的极半径

$f = 1 / 298.257$, 地球扁率

$e = 0.08182$, 地球偏心率

$J_2 = 1.08263 \times 10^{-3}$, 地球引力势的二阶带谐项系数

$J_{22} = 1.81222 \times 10^{-6}$, 地球引力势的二阶带谐项系数

$\mu = 398600.44\text{km}^3/\text{s}^2$, 地心引力常数

$\omega_e = 7.2921158 \times 10^{-5}\text{rad/s}$, 地球自转角速度

$J_3 = -2.5356 \times 10^{-6}$, 地球引力势的三阶带谐项系数

$m_e = 5.977 \times 10^{24}\text{kg}$, 地球质量

$r_s = 42164.17\text{km}$, 地球静止轨道半径

$h = 6.6260693 \times 10^{-34}\text{J} \cdot \text{s}$, 普朗克常数

$k = 1.380658 \times 10^{-23}\text{J/K}$, 玻耳兹曼常数

$\sigma = 5.6704 \times 10^{-8}\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$, 斯忒藩-玻耳兹曼常数

$c_0 = 299792458\text{m/s}$, 真空中的光速

$\text{AU} = 1.49597870 \times 10^8\text{km}$, 一个天文单位(日地平均距离)

$E_0 = 1367\text{W/m}^2$, 太阳常数

$R_0 = 6.9599 \times 10^8\text{km}$, 太阳半径

$e^- = 1.602 \times 10^{-19}\text{C}$, 电子电荷量

$T = -273.15^\circ\text{C}$, 绝对零度

$n_0 = 1$, 真空中光的折射率

$n = 1.00028$, 标准压力 760mm 汞柱 20°C 空气中光的折射率

$\varepsilon = 23^\circ 26'$, 黄赤交角

$G = 6.670 \times 10^{-11}\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$, 万有引力常数

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 光学遥感简史	1
1.2 航天光学遥感技术的优势	7
1.3 民用领域对航天光学遥感的需求	8
1.4 军事应用对航天光学遥感的牵引	8
1.5 光学遥感技术的进步	11
1.6 光学遥感技术的蓬勃发展	12
第 2 章 航天光学遥感系统基础	13
2.1 概述	13
2.2 航天器轨道基本概念	14
2.2.1 航天器轨道空间概念	14
2.2.2 时间系统	20
2.3 航天器平台基本概念	24
2.4 航天器有效载荷基本概念	25
2.5 航天光学遥感基本概念	26
第 3 章 星地时空参数设计	29
3.1 二体轨道特性	29
3.1.1 卫星二体轨道的平面特性	29
3.1.2 卫星二体轨道的圆锥曲线特性	32
3.1.3 卫星轨道六根数	37
3.1.4 轨道射入参数	39
3.1.5 卫星轨道空间坐标及其变换	41
3.2 星地几何位置关系	44

3.2.1	星下点轨迹	44
3.2.2	地面站对卫星可观测区	46
3.2.3	GEO 轨道通信波束服务区	47
3.2.4	遥感图像的几何定位	48
3.3	发射窗口	52
3.3.1	轨道平面及平面窗口	52
3.3.2	阳光窗口	57
3.4	太阳同步轨道	62
3.5	临界和冻结轨道	65
3.6	回归轨道	66
3.7	地球同步轨道	76
3.7.1	地球静止轨道	76
3.7.2	几种典型地球同步轨道	77
3.8	星座轨道	84
3.8.1	全球连续覆盖卫星群	84
3.8.2	地球同步卫星群	87
第 4 章	辐射源与光波大气传输	90
4.1	辐射及单位	91
4.1.1	辐射度量与单位	91
4.1.2	光度量与单位	96
4.1.3	黑体辐射	100
4.1.4	辐射的计算	104
4.1.5	实际物体的辐射	110
4.1.6	辐射的电磁波谱	113
4.2	太阳辐射	115
4.2.1	太阳概况	115
4.2.2	太阳辐射波谱	118
4.3	地球的辐射	125
4.3.1	地球的短波辐射	126
4.3.2	地球的长波辐射	130
4.4	大气对辐射的影响	136
4.4.1	大气构成	136
4.4.2	大气吸收与大气窗口	141
4.4.3	大气散射与辐射	144

4.4.4	大气的湍流	147
4.4.5	大气折射及对信号的影响	148
4.5	月球和行星辐射	152
第5章	光电探测器	154
5.1	概述	154
5.2	光电探测器的性能参量	156
5.3	固体摄像器件	158
5.3.1	CCD 成像器件	159
5.3.2	CMOS 成像器件	166
5.4	红外成像器件	169
5.4.1	红外探测器原理	170
5.4.2	红外探测器特性参数	173
5.5	微光像增强器	177
5.5.1	像增强器的原理和功能	177
5.5.2	像增强器的主要特性参数	179
5.6	微光图像光子计数器	180
5.6.1	光子计数器工作原理	182
5.6.2	微光图像光子计数器的特性参数	184
5.7	电视摄像管	184
5.7.1	电视摄像管的工作原理	184
5.7.2	电视摄像管的性能参数	185
5.8	X 射线成像器件	186
5.8.1	X 射线荧光转换器件成像原理	186
5.8.2	X 射线成像器件的性能	189
5.9	其它光电探测器	191
第6章	遥感器光学系统选择	192
6.1	概述	192
6.2	光学系统基本概念	192
6.2.1	基本定律	192
6.2.2	成像光学系统概念	193
6.3	光学系统像差概念	199
6.3.1	光学系统的几何像差	199
6.3.2	光学系统的波像差	201

6.4	主要光学系统简介	202
6.4.1	透射式光学系统	203
6.4.2	折反混合式光学系统	203
6.4.3	反射式光学系统	204
6.5	典型光学系统的分析比较	210
第7章	主要光学遥感器类型	212
7.1	概述	212
7.2	成像光学相机	212
7.2.1	成像相机的主要参数	213
7.2.2	成像相机的航天应用	214
7.3	多谱段光学相机	217
7.3.1	谱段配置	218
7.3.2	多谱段相机的应用	219
7.4	测绘光学相机	220
7.4.1	测绘相机的理论基础	220
7.4.2	卫星摆动立体测绘	222
7.4.3	单镜头多线阵立体测绘	222
7.4.4	多个单线阵镜头组合方式	224
7.4.5	测绘相机的测试	226
7.4.6	测绘相机的航天应用	227
7.5	红外光学相机	228
7.5.1	红外相机的系统组成	229
7.5.2	红外相机的基本参数	230
7.5.3	扫描方式	231
7.5.4	常用扫描机构	233
7.5.5	光机扫描方案	243
7.5.6	摄像方式	246
7.5.7	制冷方式	251
7.5.8	性能的综合评价	255
7.5.9	对红外图像的判读	266
7.5.10	红外相机的典型应用	267
7.6	成像光谱仪	268
7.6.1	色散棱镜分光	270
7.6.2	衍射分光	271

7.6.3	二元光学分光	272
7.6.4	干涉分光	273
第8章	光学遥感平台	280
8.1	主要类型遥感卫星	280
8.1.1	成像遥感卫星	280
8.1.2	光学立体测绘卫星	281
8.1.3	宽覆盖光学遥感卫星	288
8.2	低轨(LEO)光学遥感平台	291
8.2.1	CBERS 平台的设计指标	292
8.2.2	CBERS 遥感平台的在轨性能	294
8.3	地球同步轨道(GEO)光学遥感平台的性能	295
8.3.1	GEO/LEO 轨道光学遥感的特点	296
8.3.2	GEO 光学遥感平台的指标	299
8.4	光学遥感平台的发展	305
第9章	系统总体参数设计	313
9.1	概述	313
9.2	遥感方式	314
9.3	光学遥感系统中的能量	317
9.3.1	目标辐亮度	318
9.3.2	探测谱段	321
9.3.3	光学系统参数	332
9.4	系统设计目标的选择	333
9.5	系统主要参数综合分析与性能评价	337
第10章	CCD 采样成像的分辨力	349
10.1	光学调制度传递函数 MTF 的基础理论	349
10.2	各种遮拦比下 MTF 计算实例	352
10.3	CCD 探测器像元大小遮拦比与 MTF 关系	355
10.4	探测器静态影像分辨力的计算机仿真分析	361
参考文献	372

第 1 章

绪 论

1.1 光学遥感简史

光学遥感的发展可划分为启蒙阶段、航空遥感阶段与航天遥感阶段,进入航天光学遥感阶段后则得到了蓬勃发展,这一阶段对地低轨光学遥感、高轨光学遥感、深空观测得到了发展。

1. 光学遥感的启蒙阶段(1839—1909年)

1839年法国人达格雷(Daguerre)发表了第一张空中摄影照片。1858年,陶纳乔(G. F. Tournachon)用系留气球拍摄了法国巴黎的城市图片。1860年,布莱克(J. W. Black)与S. 金(S. King)乘气球升空至630m,成功拍摄了美国波士顿(Boston)市的图片。1903年,纽布朗纳(J. Nenbronner)设计了一种捆绑在飞鸽上的微型相机。1906年,劳伦斯(G. R. Laurence)用风筝拍摄空中照片,成功记录了著名的旧金山大地震后的情景。1909年,莱特(W. Wright)在意大利的森托塞尔上空用飞机进行了空中摄影。这些探索性的空间摄影,形成了光学遥感的启蒙阶段,为后来的实用化航空摄影遥感打下了基础。

2. 航空摄影遥感阶段(1910—1956年)

1913年,利比亚班加西(Bangashi)油田测量就应用了航空摄影,塔迪沃(C. Tardivo)在维也纳国际摄影测量学会会议上发表论文,描绘了飞机摄影测绘地图的问题。

1924年,彩色胶片的出现,使得航空摄影纪录的地面目标信息更为丰富。

3. 航天遥感阶段(1957年至今)

1957年10月4日,苏联发射了历史上的第一颗人造卫星,震惊了整个世界,如图1-1为苏联第一颗人造卫星和内部结构示意图,标志着人类从空间观测地球进入了新纪元。1958年美国发射的“先驱者”2号探测器拍摄了地球云图,图1-2为美国发射的先驱者2号探测器,重38kg。同年10月苏联的“月球

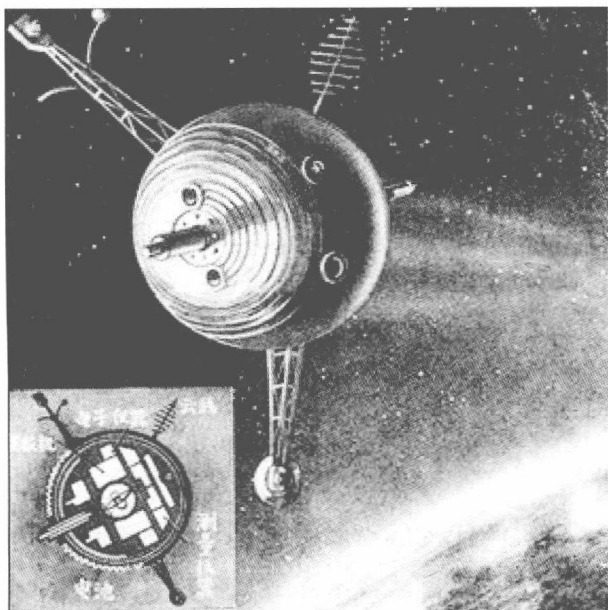


图 1-1 苏联第一颗人造卫星和内部结构示意图

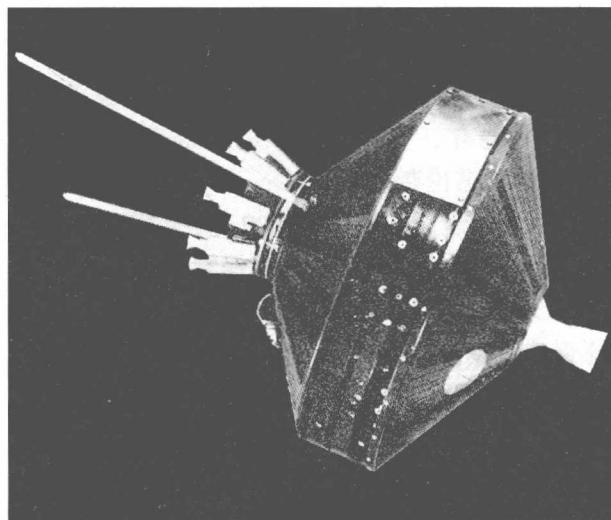


图 1-2 美国发射的“先驱者 2 号”探测器

3 号”航天器拍摄了月球背面的照片。从 1960 年美国发射的 TIROS-1 和 NOAA-1 太阳同步气象卫星开始了真正从航天器上对地球进行长期观测。从此,航天遥感取得了重大进展。1972 年 3 月 2 日“先驱者 10 号”升空,1983 年 6 月 13 日越过了冥王星轨道飞向了太阳系的边界。地球收到它的最后一个信号是

2003年1月22日,其中已无任何遥测数据。2008年美国发射的DeoEye-1商业卫星全色分辨率已达0.41m,它使得航天光学遥感和航空光学遥感的图片质量几近相同。

在空间有地球同步卫星、太阳同步卫星,还有一些低轨和高轨卫星,卫星的种类不断增加,执行着光学成像、立体测绘、微波遥感、通信、导航等不同功能。

4. 光学遥感的应用研究

在第一次世界大战期间,航空摄影成了军事侦察的重要手段,并形成了一定规模。与此同时,相片的判读水平也得到一定的提高。第二次世界大战期间,德、英等国就充分认识到空中侦察和航空摄影的重要军事价值,并在侦察敌方军事态势、部署军事行动等方面收到了实际效果。第二次世界大战后期,美国的航空摄影范围覆盖了欧亚大陆和太平洋沿岸岛屿,包括日本在内的广阔地区,被制成地图,并标会了军事目标,成为美国在太平洋战争中的重要情报来源。在苏联的斯大林格勒保卫战等重大战役中,航空摄影对军事行动的决策起到了重要作用。

第二次世界大战以后出版了一些著作,如1941年厄德莱(A. J. Eardey)的《航空相片:应用与判读》讨论了航空相片的地质学应用及某些地物及植被的特征。巴格莱(J. W. Bagley)的《航空摄影与航空测量》侧重于航空测量的方法讨论。1930年起,美国的农、林、牧业等政府部门都把航空摄影应用于制订规划。

人才培养与专业学术刊物的出版也是这一时期的特点,美国在大学中开设了航空摄影与相片判读的课程;国际地理学会于1949年设立了航空相片应用专业委员会。1945年美国创刊了《摄影测量工程》杂志(1975年改为《摄影测量工程与遥感》,现已成为国际著名的遥感专业刊物之一)。这些均为遥感发展成为独立的学科在理论方法上做出了充分的准备,奠定了基础。

探测技术的发展,使探测的谱段范围不断延伸,从软X射线到热红外;谱段的分割也越来越精细,从单一谱段向多谱段发展,光谱分辨率已达纳米量级。成像光谱技术的出现把谱段从数百个推向上千个,更全面地反映出目标的性质,它使本来在宽谱段遥感中不可探测的物质被探测出来。各种遥感技术日趋成熟,激光雷达、多光谱成像、高光谱成像、立体测绘都进入了实用阶段。

信息处理方面,经过半个多世纪的发展,光学遥感技术已渗透到国民经济的各个领域,对于推动经济建设、社会进步、环境改善和国防建设起到了重大作用。空间遥感对地观测得到的全球变化信息已被证明有不可替代性。并且随着光电遥感技术的发展,航天遥感均采用近实时的数传技术,遥感的结果均是数字化文件,这使得数值图像融合更加方便易行。

航天光学遥感使得快速地图更新成为现实,基于此的电子地图导航、个人

终端导航已成为现代社会生活不可或缺的部分。随着光学遥感应用向广度和深度发展,光学遥感探测已经进入实用化、商业化和国际化,成为新的产业发展领域。

5. 中国遥感事业的发展

航空遥感 我国在 20 世纪 30 年代,在个别城市进行了航空摄影,但系统的航空摄影是从 20 世纪 50 年代开始的,主要应用于地图的制图、更新,在铁路、地质、林业等领域的调查、勘测、制图等方面起到了重要的作用。

遥感应用 在 20 世纪 70 年代中后期开始取得了巨大的成就。我国政府极为重视遥感技术的发展和在国家建设中的应用,完成了一批具有世界先进水平的成果,并具有我国自己的特色,主要成果表现在以下方面。

在遥感应用领域进行了广泛探索和应用试验研究:如云南腾冲遥感综合试验研究、长春净月潭试验研究、山西太原盆地农业遥感试验研究、东海渔业遥感试验研究、长江下游地物光谱试验研究等,这些试验研究都紧密地结合遥感技术的发展和应用,为大规模、多领域的应用研究打下了基础并起到了示范作用。图 1-3 是这一时期长春净月潭遥感航拍图。

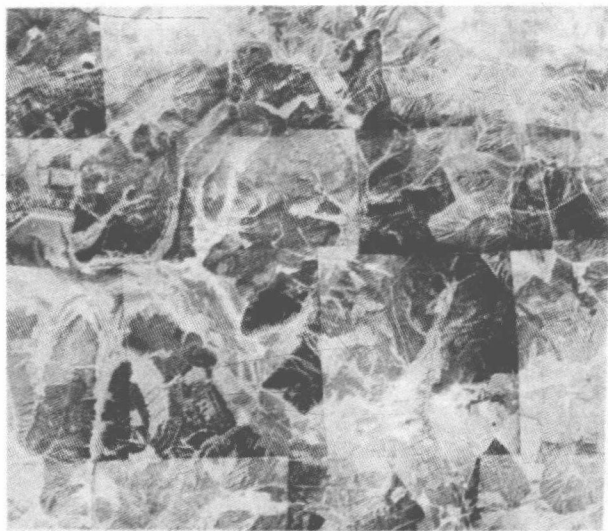


图 1-3 长春净月潭地区绿谱段航片镶嵌图^[2]

这些遥感试验广泛而深入,包含了遥感技术、地质、地表、水体、林业、环境、大气等各个方面。

(1) 遥感技术方面,如多光谱彩色合成,多光谱遥感图像处理的色度学方法,彩色反转航空片在长春试验中的应用,多光谱彩色合成图像的改善与增强,地面多光谱摄影,多光谱遥感试验有效性的鉴别方法。