

遥感中的高光谱技术及应用

王先华 王乐意 乔延利

(中国科学院安徽光学精密机械研究所 合肥 230031)

摘 要 简要介绍了高光谱的概念、高光谱成像光谱技术及其相关的定标技术,并介绍了有关领域中高光谱的应用,据此反映高光谱技术在遥感中的重要作用。

关键词 遥感, 高光谱

1 前 言

遥感应用可以基于黑白、彩色或彩红外航片(或卫片),但单纯依靠此类图像对目标的研究往往只能局限于几何特征上。在努力

提高图像空间分辨力的同时,人们注意到利用物质光谱特性的巨大作用。20 世纪 70 年代美国的 Landsat 卫星发回的地球表面 7 个波段的多光谱扫描仪(MSS)图像,开始了光谱遥感技术应用时代。

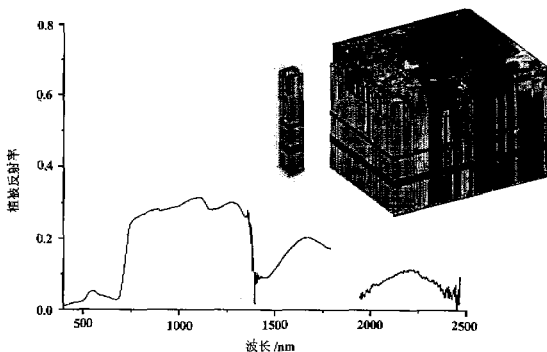


图 1 高光谱成像遥感数据“立方体”及其对应光谱曲线示意图

在最近 20 多年遥感发展过程中,光谱遥感技术不断获得发展。20 世纪 70 年代末,美国 JPL 提出成像光谱的概念并很快得以实现,其技术发展及应用立即成为遥感界的热门课题。成像光谱是将成像技术与光

谱技术结合起来,能够在连续光谱段上对同一地物同时成像,在探测物体空间特征的同时,又将每个空间像元色散形成几十个到几百个波段,带宽为 10 nm 左右的连续光谱覆盖带。用数十甚至数百个波段来成像,构成

收稿日期: 2001-09-15

一个由图像按光谱顺序排列,类似于扑克牌一样的图像数据“立方体”(立方体图像来源于 JPL 相关网站)。人们可以在任何一个波长位置上得到这个波段的图像,并从“立方体”的任一子像元中可以取出数百个光谱读数,以形成一条近似于用实验室光谱仪获得的光谱曲线。图 1 所示的“立方体”是一种经典的成像光谱数据表述形式(见上页)。

通常认为成像光谱技术是以较高的光谱分辨率并在一定波段内连续的分光成像探测技术,当光谱分辨率进一步提高后便产生了高光谱的概念,一种共识是光谱分辨率在 $10^{-1}\lambda$ 数量级范围内的称之为多光谱遥感,如 MSS, TM 和 HRV 等传感器;光谱分辨率在 $10^{-2}\lambda$ 数量级范围内的称之为高光谱遥感^[1]。

遥感在光谱分辨率的提高源自应用的需求,通常地面物质特征光谱半高度的全宽度(即光谱线宽)在 20~40 nm 之间^[2],传统的多光谱遥感信息(尽管仍在继续广泛使用)只是取自几个离散的宽波段(100 nm 以上),在很大程度上平滑了不同物质可能表现的光谱吸收和发射的特征。1982 年, Collins 等曾利用 500 通道的航空光谱辐射计对植被进行遥感测量,首次从遥感探测角度揭示了植被因受一些金属矿物的侵袭,与原始植被光谱相比,其 0.68 μm 吸收峰的红边向短波方向发生 5~10 nm 的位移^[3]。Collins 等的研究结果从另一个侧面促使了高光谱技术的发展和应用。

2 高光谱成像光谱仪

目前形形色色的航空高光谱传感器已发展到了三、四十种之多,如美国 JPL 的 AVIRIS、加拿大的 CASI、中科院上海技物所的 OMIS 等。综合目前已有的机载成像光谱仪特点,从基本原理上可分为面阵探测器加空间推帚型,线列探测器加光机扫描型,

光谱、空间交叉扫描型和光谱扫描型等 4 种类型。

2.1 面阵探测器加空间推帚型

在这类光谱仪中,前光学系统把一行地物目标成像在狭缝上,与狭缝对应的探测器阵列固体自扫描完成一维空间扫描,另一维由运载平台的运动完成。另外狭缝也是光谱仪的入射狭缝,光谱仪把入射狭缝上的地物像均匀地色散到焦平面探测器上,面阵探测器的另一维完成光谱扫描,其工作原理如图 2 所示。这类成像光谱仪的特点是:空间扫

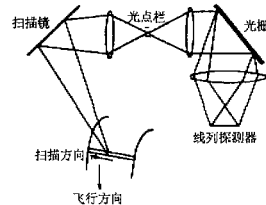


图 2 面阵探测器工作原理图

描由器件的固体自扫描完成,像元的凝视时间较长,这样可以提高系统的灵敏度,或者提高系统的空间分辨率;在可见光波段,由于目前器件很成熟,集成程度也很高,光谱维的分辨力可以提高到 1~2 nm 的水平;由于没有光机扫描机构,仪器的体积能设计得比较小。目前在可见光、近红外波段,此类成像光谱仪很多,有的已经达到商品化的水平。其主要不足之处是,红外波段由于器件的限制,短波红外灵敏度还不理想,热红外暂时不可能;由于光学设计的困难,总视场一般只能达到 30° 左右。但随着焦平面器件的进一步发展和成熟,这类成像光谱仪所占的比例将会越来越多。为了克服线列阵型成像光谱仪对像元凝视时间少,而面阵推帚型成像光谱仪的总视场又不够大的缺点,有时则采用小面阵并扫型成像光谱仪。面阵推帚型机载成像光谱仪在国际上最有影响的是加

拿大的 CASI 系统, 目前投入商业化运行已有 5 年。

2.2 线阵探测器加光机扫描型

面阵推帚式成像光谱仪的前置光学系统, 在红外波段, 对大视场、高像质光学系统的设计方面非常困难, 因此, 单镜头的面阵推帚式成像光谱仪的总视场不可能很大。而线阵探测器加光机扫描型成像光谱仪可以很好地解决这方面的问题。这类光谱仪由光机扫描和飞行平台向前运动完成二维空间扫描, 其光谱维的扫描由线列探测器完成, 色散器件一般是由光栅和棱镜完成, 其工作原理如图 3 所示。这类成像光谱仪的特点是: 空间扫描在物方完成, 可以得到大的总视场角 (可达 90°), 像元配准好, 不同波段任何时候都凝视同一像元; 光谱波段覆盖范围较

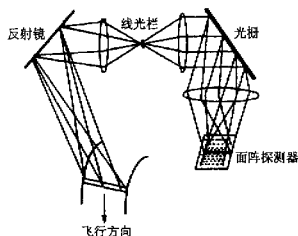


图 3 线列探测器工作原理

全, 可以从可见光一直到热红外; 从 $10\sim 120$ nm 的光谱分辨率的情况下, 其辐射灵敏度也基本能满足要求。目前波段全、实用性强的成像光谱仪多属此类。其不足之处是, 由于光机扫描, 每个像元的凝视时间相对较短, 要进一步同时提高光谱分辨率和辐射灵敏度就比较困难。线阵探测器光机扫描型成像光谱仪的典型系统是由美国 JPL 实验室完成的 AVIRIS 系统, 另外如美国 GER 公司 Deadalus 公司和我国上海技术物理研究所研制的实用型机载成像光谱仪均属此类。

2.3 光谱、空间交叉扫描型

光谱维的扫描由旋转滤光片轮的转动或用渐变滤光片完成的成像光谱仪被称为光谱、空间交叉扫描型成像光谱仪。如美国 Hughes Santa Barbara 研究中心进行的劈式滤光片成像光谱仪 (WIS), 这类系统的特点是设计简单, 实现也相对容易。如渐变滤光片型成像光谱仪是利用 CCD 摄像机的场扫描功能与渐变滤光片的组合获得分时逐行分谱图像, 即一景图像的每一行分别对应不同的地面目标和不同的光谱波段。其工作原理如图 4 所示。由于地面上的每一光谱不是同时记录的, 因而给图像配准的数据后处理带来许多困难。

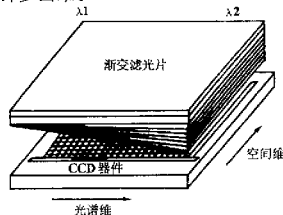


图 4 渐变滤光片式工作原理

2.4 光谱扫描型

这类成像光谱仪的各光谱波段不是同时得到, 而是分时获得, 其光谱维的扫描由傅里叶光谱仪或声光调制器完成。特别是用傅

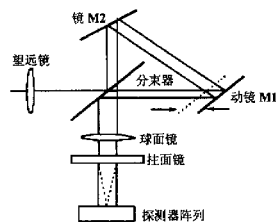


图 5 傅里叶变换原理

里叶光谱仪的方法, 从理论上说, 系统的集

光能力比色散型的成像光谱仪要高一个数量级以上,且具有高信噪比。高光谱分辨率的特点,其基本原理如图5所示(见上页),这类系统的核心是傅里叶干涉光谱仪的设计,极高精度的光学设计和装校是系统的主要难点。目前,已有一些这样的成像光谱仪问世,但性能基本处于实验阶段,离理论值有很大的距离。如由美国国防部和几所大学合作发展的傅里叶变换可见光光谱成像仪(FTVHS)系统,用 1024×1024 的硅CCD探测器,在可见、近红外波段光谱分辨率高达 0.6 nm ,达

到了高光谱的水平,空间分辨率也高达 0.6 mrad ,高分辨率的特征使得该系统的发展前景十分诱人。

由于高光谱成像技术上存在较大难度,因此目前成像光谱仪仅限于航空光谱仪,而星载的高光谱传感器HSI正在计划之中。现在在空间运行的仅有中分辨率成像光谱仪(MODIS),含36个波段。表1简要罗列了部分航空航天高光谱传感器及其主要技术参数。

表1 主要航空航天高光谱成像传感器一览表

简写	英文名称	制造	波段数	光谱范围(μm)
AHS	Airborne Hyperspectral Scanner	Daedalus Enterprise Inc.	48	433~12700
AIS-1	Airborne Imaging Spectrometer	NASA, JPL	128	900~2400
AVIRIS	Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer	NASA, JPL	224	400~2450
CASI	Compact Airborne Spectrographic Imager	Itres Research	288	430~870
FTVHSI	Fourier-Transform Visible Hyperspectral Imager	Keatrel Corp., FIT	256	440~1150
HIRIS	High Resolution Imaging Spectrometer	NASA	192	400~2500
HYDICE	Hyperspectral Digital Imagery Collection Experiment	Naval Research Laboratory	210	413~2504
MAIS	Modular Airborne Imaging Spectrometer	Shanghai Institute of Technical Physics	71	440~11800
MIVIS	Multispectral Infrared and Visible Imaging Spectrometer	Daedalus Enterprise Inc.	102	433~12700
MODIS	Moderate Resolution Imaging Spectrometer	NASA	36	415~14240
OMIS	Operation Modular Imaging Spectrometer	Shanghai Institute of Technical Physics	128	400~12500
SSTI HSI	Small Satellite Technology Initiative Hyperspectral Imager	TRW Inc.	384	400~2500
VIMS-V	Visible Infrared Mapping Spectrometer	ASI	512	300~1050

3 高光谱成像光谱仪定标技术及数据处理

高光谱成像光谱数据的应用,必须解决从定性的解释走向定量计算的问题,只有这样才能发挥其优越性。定标是量化关键的一步,成像光谱数据的可靠性及应用的深度

和广度在很大程度上取决于定标的精度。从定标方法上讲,可分为三大类:飞行前的实验室定标,飞行中的系统内定标和飞行中场地外定标。这三种方法都可以对传感器进行绝对定标,只不过从传感器研制到投入运行整个过程中,它们分别在不同阶段发挥着不同的作用。

飞行前的实验室定标：包括光谱定标和辐射定标两方面。光谱定标用于确定系统各个波段的光谱响应函数，辐射定标用于确定系统各个波段对辐射量的响应能力。光谱定标在可见光波段常用汞灯的特征谱线，在红外波段则可用钠灯或用单色仪加卤素灯进行波长扫描的方法得到；辐射定标方面通常利用标准灯或积分球定标源来完成。具体成像光谱仪的定标内容应与其工作方式有关，常用的定标参数包括光谱通道宽度参数、通道绝对辐射响应度参数、动态范围、扫描响应、系统 MTF、系统稳定性等。

飞行中系统内定标：飞行中的系统内定标是由与成像光谱仪系统一起工作的定标系统来完成，即在获取实验数据的同时记录定标源参照数据。机上实时定标也包括光谱定标和辐射定标两方面。机上实时光谱定标，用以确定使用过程中波段的漂移，实时的辐射量定标，则用于确定系统辐射响应度的变化。

飞行中场地外定标：这种方式是指在选好遥感辐射定标场地的基础上，在遥感器处于正常运行条件下，通过地面同步测量来对遥感器定标。场地外定标可以是针对传感器，也可以针对每次飞行所获得的数据。这种定标的作用是对飞行前定标参数变化的检测和校正、飞行中定标器部分功能不足的补充和替代（有些系统不附带定标器）。目前用于场地外定标的方法主要有“反射比基方法”、“辐亮度基方法”、“辐照度基方法”和“交叉定标方法”等。

辐射定标的精度主要取决于高标准、高稳定度的标准源和标准传递的建立。近年来，国内在低温绝对辐射计标准建立和高精度标准传递应用研究方面有长足发展。中国科学院安徽光机所研制的硅光二极管阱探测器 (Trap) 的绝对精度为 0.04%，达到了国际先进水平。在漫反射参考板和积分球方

面，安徽光机所研制成具有优越理化性能和朗伯性的“烧结型”聚四氟乙烯参考板、积分球和掺杂稀土漫反射波长校正参考板。我国的航空成像光谱仪 MAIS、OMIS 和资源卫星传感器的内定标系统均采用了这类小积分球辐射源。

成像光谱仪数据在使用前需进行数据处理，其中反射率反演是一项基本工作。反射率反演转换过程是成像光谱仪数据应用，与其它途径获得的数据结果相比较和动态监测应用等工作的前提。通常应用的反射率反演方法主要有“经验线性法”和“辐射传输模型法”等。20 世纪 80 年代后期，法国 Lille 大学的 Tanre 等人结合辐射传输模型编写了太阳光谱区卫星遥感信息过程处理软件 (5S Code)，可方便用于传感器入瞳处的光谱辐亮度，经 Teillet 修改后可用于反射率反演，即称之为辐射传输模型反演方法。辐射传输模型的反演方法中应用大气模式 (如 MODTRAN 等) 计算去除大气影响，虽然精度满足要求，但对成像光谱数据逐像元处理非常耗时。为此，“查找表”技术在反射率快速反演中得以应用，如加拿大遥感中心的成像光谱数据分析系统中就有“查找表”的生成内容。所谓的“查找表”是根据一些输入参数，应用模式运算出相关的参数表，在处理成像光谱数据时就可以简单地运算获得与逐像元计算精度相当的反演结果来。如，应用于 AVIRIS 数据的反射率反演时就建立一个 6 维“查找表”，与用 MODTRAN2 计算结果相对误差仅在 1% 左右，但处理时间上却大大缩短。国内在反射率反演方面也做过不少工作，主要是基于经验线性法和辐射传输模型法。1999 年，中国科学院安徽光机所利用“高分辨率成像光谱仪 (星载原理样机)”的实验数据对地面多种目标进行反射率的反演达到了较高的精度。

4 高光谱在遥感中的应用

高光谱成像光谱仪获取的光谱比现在普遍使用的多光谱在光谱分辨率上要高得多,因而在对地物的识别和分类上也表现出多光谱所不可能达到的能力。在高光谱技术发展的同时,围绕着岩矿、植被生态、环境和大气等方面也开展了大量的实验和应用研究。

(1) 在地质学中的应用

高光谱在地质学上的应用是其应用的重要方面,被用于确定矿物的位置和地区分布。这方面的应用主要是基于大量矿物在太阳反射光谱中具有独特的光谱吸收特征。

有一类具有强烈吸收特征的矿物与热液蚀变有关,在此方面出现了大量的利用高光谱进行地质调查的事例。Kruse在美国加州和内华达的 Grapevine 北部山区利用绢云母在 $2.21\ \mu\text{m}$ 、 $2.25\ \mu\text{m}$ 和 $2.35\ \mu\text{m}$ 的特征吸收,对石英~绢云母~黄铁矿蚀变带进行地质填图。利用蒙脱石在 $2.21\ \mu\text{m}$ 的特征吸收确定包含蒙脱石的泥质蚀变带^[4]。

在西班牙南部 Ronda 橄榄岩地区,岩石的变化主要表现在辉石和橄榄石组合的不同比例上。Chabrilat 等利用辉石很容易通过在 $1\ \mu\text{m}$ 和 $2\ \mu\text{m}$ 附近的两个特征 Fe^{2+} 电子跃迁吸收,橄榄石由 Fe^{2+} 在 $1\sim 1.05\ \mu\text{m}$ 吸收带和 $0.85\sim 0.90\ \mu\text{m}$ 左右的 Fe^{3+} 吸收带的特征确定,利用航空高光谱数据进行地质填图和岩石鉴别^[5]。

(2) 在生态和植被中的应用

在植被和生态中的应用是高光谱的另一个重要的应用。植物叶子中的水、叶绿素、辅助色素、纤维素、木质素和其他组成部分与冠层结构相结合构成植被的反射率。遥感通过确定冠层的化学成份来监测大气和环境变化引起的植物功能的变化,有很多科学家从事这方面高光谱研究^[6~8]。植被中非光合作用组分以前用宽带光谱无法测量,现在

用高光谱对植被组分中非光合作用组分进行测量和分离则较易实现。Bo-Cai 利用木质素-纤维素在 $1.72\ \mu\text{m}$ 的特征吸收作为其判断,并根据吸收强度作为这类化合物冠层丰度的一个指数^[9]。

(3) 在大气和环境遥感中的应用

大气中的分子和粒子成份在太阳反射光谱中有强烈反映,这些成份包括水汽、二氧化碳、氧气、臭氧、云和气溶胶等。其中水汽是主要的吸收成份。有大量的方法用于分析水汽。这些方法通常都是估算 $940\ \text{nm}$ 水汽吸收强度与大气中总水柱丰度的关系^[10]。

卷云在地球能量平衡中发挥着重要的作用,但在宽带光谱遥感中是一个无法探测的因子。在高空谱中,可利用水汽在 $1380\ \text{nm}$ 和 $1850\ \text{nm}$ 处的强烈吸收确定卷云分布^[11]。

对于冬季覆盖北半球 30% 面积以上的冰雪,通过成像光谱的模拟试验,特别是在 $1.0\sim 1.3\ \mu\text{m}$ 光谱范围的波段,可以获得对冰雪粒径大小的识别。冰雪粒径生长的速度与雪冰的温度成指数关系,所以粒径的变化是雪堆热力学过程的有效指示器,同时把握冰雪粒径的变化有助于确定冰层的表面特征。Anne 等利用航空成像光谱仪 (AVIRIS) 中心在 $1.03\ \mu\text{m}$ 的波段与冰雪颗粒关系进行冰雪颗粒填图,所以要选择该波段是因为:(a) 此波长冰雪反射率对颗粒尺寸非常敏感;(b) 仍然有很强的反射率;(c) 大气透过率较高^[12]。并在此工作基础上深入研究,提出波段面积标尺法,解决了信号建立在单波段上易受到传感器噪声影响的缺点^[13]。

随着人们对环境问题的重视,这方面的研究也不断地向纵深发展。如在沿海和陆地水体方面,用于探测叶绿素、浮游生物类、溶解的有机物、本地或远处搬运来的悬浮物等等。在环境监测方面,可以探测直接或间接危害环境的地表成分,如酸水和重金属,同时可以用来监测有害矿物的迁移。

(4) 在遥感分析技术方面的应用

高光谱除了利用光谱特征在地物识别中发挥作用外, 在一些分析技术中, 也有其独到之处。如在植被研究中, 有效的方法是根据绿色植被红光与红外光差异而设计的归一化差植被指数 (NDVI), 虽然它可以有效地克服地形的影响且无需地表的先期知识, 但这一指数受土壤背景的影响较大, 一般在实际应用中常采用光谱“去混”技术^[14], 通过光谱去混获得的植被端元对土壤背景是不敏感的^[15]。由于宽光谱带内的各个波长间的辐射差异被探测器一律平滑成一个能量读数, 因此用它作为光谱“去混”是不可能的。

通过以上事例可以看出, 高光谱在对地球表面物质特征的识别上具有多光谱不可比拟的能力。可以预见随着高光谱传感器搭载于卫星、高光谱传感器空间分辨率的提高和对高光谱应用研究的进一步深入, 高光谱将在更多领域得到更加广泛的应用, 发挥更大的作用。

参 考 文 献

- 1 陈述彭等. 遥感信息机理研究. 北京: 科学出版社, 1998
- 2 Hunt G R. Electromagnetic radiation: the communication link in remote sensing. In: Siegel B, Gillespie A ed. *Remote Sensing in Geology*, New York: Wiley, 1980, 702
- 3 薛永祺等. 机载成像光谱仪的发展. 见: 中国科学院上海技术物理研究所编. 成像光谱技术. 上海: 中国科学院上海技术物理所, 1991
- 4 Kruse F A. Use of airborne imaging spectrometer data to map minerals associated with hydrothermally altered rocks in the Northern Grapevine Mountains, Nevada and California. *Remote Sens Environ*, 1988, 24: 31~51
- 5 Chabrillat S, Pinet P C, Ceulener G et al. Ronda peridotite massif methodology for its Geological mapping and lithological discrimination from airborne hyperspectral data. *INT J Remote Sensing*, 2000, 21(12): 2363~2388
- 6 Martin M E, Aber J D. Measurements of canopy chemistry with 1992 Aviris data at Blackhawk Island and Harvard forest. In: *Summaries of the Fourth Annual JPL Airborne Geoscience Workshop*. CA: Jet Propulsion Laboratory, 1993, 113~116
- 7 Gastellu-Etchegorry J P, Zagolski F, Marly G et al. An assessment of canopy chemistry with AVIRIS: A case study in the Landes Forest, South West France. *Int J Remote Sens*, 1995, 16(3): 487~501
- 8 Curran P J, Kupiec J A, Smith G M. Remote sensing the biochemical composition of a slash pine canopy. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 1997, 35(2): 415~420
- 9 Gao B C, Goetz A F H. Retrieval of equivalent water thickness and information related to biochemical components of vegetation canopies from AVIRIS data. *Remote Sens Environ*, 1995, 52: 155~162
- 10 Frouin R, Deschamps P Y, Lecomte P. Determination from space of atmospheric total water vapor amounts by differential absorption near 940 nm: theory and airborne verification. *Journal of Applied Meteorology*, 1990, 29: 448~460
- 11 Gao B C, Goetz A F H. Separation of cirrus clouds from clear surface from AVIRIS data using the 1.38 μm water vapor band. In: *Summaries of the Third Annual JPL Airborne Geoscience Workshop*, JPL Publ 92-14. CA: Jet Propulsion Laboratory, 1992, 98~100
- 12 Nolin A W, Dozier J. Estimating snow grain size using AVIRIS data. *Remote Sens Environ*, 1993, 44: 231~238
- 13 Nolin A W, Dozier J. A hyperspectral method for remotely sensing the grain size of snow. *Remote Sens Environ*, 2000, 74: 207~216
- 14 McGwire K, Minor T, Fenstermaker L. Hyperspectral mixture modeling for quantifying sparse vegetation cover in arid environments. *Remote Sens Environ*, 2000, 72: 360~374
- 15 Garcia-Haro F J, Gilbert M A, Melia J. Linear spectral mixture modelling to estimate vegetation amount from optical spectral data. *Int J Remote Sensing*, 1996, 17(17): 3373~3400

研究与实验

CCD 动态检测轨道不平顺的研究及数据分析

谢小玲 王 黎 高晓蓉

(西南交通大学应用物理系 成都 610031)

摘 要 介绍基于 CCD 的动态检测轨道不平顺的方法,给出了系统检测的原理、总体结构和软件处理流程。装置经过实际线路的试验证明是准确和可靠的,文章对试验做了数据分析。

关键词 CCD; 轨道不平顺; 动态检测

1 背 景

在机车车辆的不稳定重复荷载作用下,轨道会出现垂向、横向的动态弹性形变和残余积累变形,统称轨道不平顺。轨道不平顺不仅影响列车的平稳运行,而且当这种变形累积到一定程度时,将大大削弱线路的强度和结构稳定性,增大轮轨相互作用力、降低车辆及轨道部件的使用寿命,如果轨道的平顺状态严重不良,还将威胁行车安全。

目前,我国轨道几何尺寸的测量主要采

用人工测量和轨检车测量相结合的方法^[1]。对于水平不平顺、三角坑和轨距,人工采用万能道尺每隔 6.25 m 设测点定期检测轨距、水平及其变化率。对于高低不平顺则采用先目测,再用十米悬线和板尺进行测量,测量效率低,工作环境恶劣。采用轨检车可以对轨道几何尺寸进行动态检测,自动化程度较高,检测的项目也比较全,但轨检车由于很多技术由国外引进,造价和各种消耗都很大,因此使用轨检车检查轨道不平顺的周期很长,

Hyperspectral Technology in Remote Sensing Application

Wang Xianhua Wang Leyi Qiao Yanli

(Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, the Chinese Academy of Sciences Hefei 230031)

Abstract The hyperspectral principle, hyperspectral technology and some correlate calibration technologies are briefly expounded. The importance of hyperspectral technology can be found by some introduced hyperspectral applications in remote sensing.

Key words remote sensing, hyperspectrum

· 收稿日期: 2001-06-06