

文章编号: 1672-8785(2007)04-0012-06

行星地形激光测高可视化仿真系统的设计

王建宇^{1,2}, 陈 伟², 李永亮², 李文杰²

(1. 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083;

2. 中国科学技术大学电子科学与技术系, 安徽合肥 230026)

摘 要: 建立行星地形激光测高的可视化仿真系统对于卫星探测中行星地形信息的处理具有重要的意义。采用分形技术仿真了行星数字地形, 计算了卫星轨道数据和测量点信息。对测量的高程信息通过插值算法得到了规则的 DEM, 动态地三维展示了整个探测过程的卫星轨道和测量点分布情况, 并通过基于 LOD 的地形生成算法显示了原始的行星地形和测得的地形对比。

关键词: 行星地形; 激光测高; 可视化仿真

中图分类号: TP391.9 **文献标识码:** A

Design of Visual Simulation System for Planet Terrain Laser Ranging

WANG Jian-yu^{1,2}, CHEN Wei², LI Yong-liang², LI Wen-jie²

(1. Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China

2. University of Science and Technology of China, Hefei, 230026)

Abstract: The development of a visual simulation system for planet terrain laser ranging is very important to the processing of planet terrain information. The digital planet terrain is simulated by using a fractal method and the satellite orbit data and the survey point distribution are calculated. The regular DEM is obtained for the surveyed terrain information and the 3D scene of satellite orbit and survey point distribution in the survey are demonstrated dynamically. The difference between the original terrain and the surveyed terrain is displayed through a terrain render algorithm based on LOD.

Key words: planet terrain; laser range; visual simulation

1 引言

随着人类对宇宙的探索的不断延伸, 对地外行星的初步探测必然包括行星的地表地形信息, 而获取地形信息的基本手段就是星载激光高度计。行星地形激光测量系统是指利用围绕行星的探测卫星的激光测距仪对行星表面地形进行测量并利用一定的数据处理技术得到行星地形数字模型的系统。目前, 美国、俄国、欧洲

等已经开展了多项行星地形激光测量计划, 如对地球、月球、火星等的地形测量等, 而我国也即将发射绕月探测卫星, 其中用来测量地形信息的激光测高系统将是该卫星的主要载荷之一, 因此建立行星地形激光测高可视化仿真系统对开展该类探测活动具有重要意义。

2 系统总体设计

2.1 系统功能

收稿日期: 2007-01-18

基金项目: 上海市科委计划项目 (045115018)

作者简介: 王建宇 (1959 —), 男, 研究员、博士, 专业: 红外光学系统、小卫星技术与遥感数据处理技术。

根据行星地形激光测高可视化仿真应用的具体需要, 整个系统的主要功能如下:

① 输入一定的卫星姿态参数、轨道参数和星载测高计参数, 对探测卫星的轨道进行数值仿真, 得到设定时间内探测卫星的轨道坐标和其在行星上对应测量点 (即星下点) 的高程信息;

② 根据探测到的测量点高程信息, 按照一定的插值算法得到规则的数字高程矩阵 DEM;

③ 动态三维显示数值仿真得到的行星轨道数据和测量点数据, 并显示经过一定仿真时间后行星赤道局部地形的测量点分布情况; 运用基于分层细节 LOD 的地形生成算法生成该局部地形经过测量和插值得到的 DEM 矩阵对应的地形;

④ 友好的操作界面, 用户可自行设定数值仿真时间和卫星的相关参数等, 也可以以漫游多视角的方式观察相应的三维场景。

2.2 系统框架设计

行星地形激光测高可视化仿真系统是一个既有数值仿真功能, 又需要可视化的系统, 所以其框架的设计需要兼顾两者的自身需要和相互联系, 具体设计如图 1 所示。

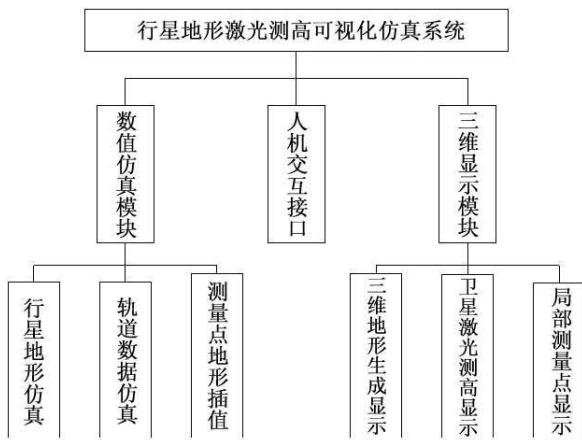


图 1 系统整体框架的设计图

其中, 人机交互接口是供用户对数值仿真相关参数的设定和对三维显示场景进行交互操作的; 在数值仿真模块中, 行星地形仿真子模块根据分形技术仿真生成行星地形高度矩阵 DEM, 轨道数据仿真子模块用于计算卫星的轨道数据和测量点高程信息, 这些不规则分布的测量点

通过测量点地形插值算法可得到规则的 DEM; 在三维显示模块中, 三维地形生成显示子模块用于对数值仿真模块输出的测量点插值得到的 DEM 生成三维地形, 卫星激光测高显示子模块用于显示卫星绕行星运动过程的轨迹和对应测量点的轨迹, 局部测量点显示子模块用于显示局部地形的测量点分布情况。整个系统的仿真流程很好地表现了这些模块之间的关系, 如图 2 所示。

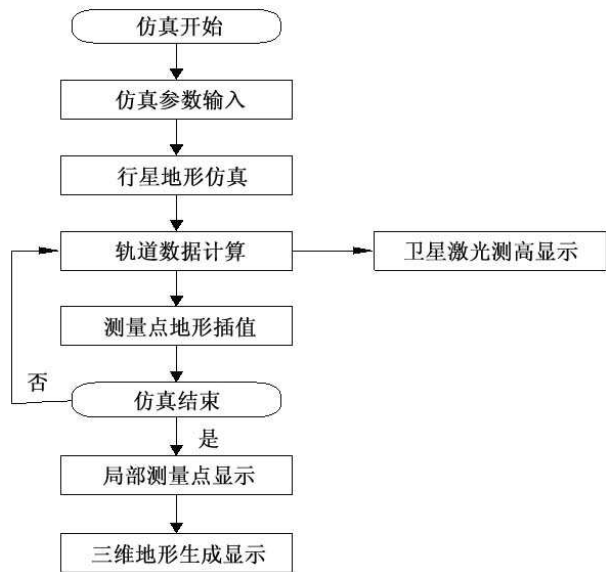


图 2 系统的仿真流程图

3 数值仿真模块关键技术介绍

数值仿真模块的主要功能就是通过计算卫星的轨道数据, 得到在行星上对应测量点的高程数据。由于测量点是不规则的, 所以经过一定时间后, 在某个局部区域会得到一个不规则测量点集, 形成一个不规则的数字高程矩阵。通过地形插值算法, 把这个不规则的高程矩阵转换为规则的 DEM 矩阵, 三维地形生成显示算法的表现就变得容易了, 然后通过对比原始局部地形和插值后生成的局部地形, 就可以得到相关信息了。然而, 行星的数字高程数据目前很匮乏, 需要通过地形仿真的方法得到 DEM 并将其作为原始的行星地形数据。

所以, 数值仿真模块的关键技术就是地形仿真、卫星探测地形数据模拟和地形插值算法。

3.1 地形仿真

由于缺乏其他行星的 DEM 数据, 本仿真系统采用了美国克莱门汀任务所得到的月球表面地形数据, 并用经过分形手段细化得到的 DEM 数据作为被探测行星的地形数据。

已知月球的 DEM 数据的分辨率较低, 要得到分辨率较高的 DEM 数据, 而且当要求得到的地形数据与原始数据在大尺度上相符时, 就需要对原始数据进行细化。为了保证地形的真实感, 在细化中需要采用分形地形建模方法。分形地形模拟方法有多种, 本文采用的是应用得最广泛的中点位移法^[1]。

中点位移法是一种由分形布朗运动衍生而来的分形几何法。在细分过程中, 它是利用在两个点或多个点之间进行线性插值并加上一随机位移量的方法来进行地形建模的。其实现可以用 Diamond-Square 算法^[2] 描述。

原始 DEM 数据存储在一个二维数组中, 根据所要达到的精度动态分配一个数组, 将原始 DEM 数据存放在动态数组的骨架点处, 如图 3 中黑色圆点所示。

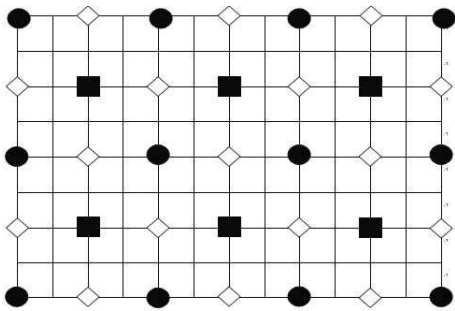


图 3 用中点位移法细化原始的 DEM 数据

经过 Diamond-Square 算法的处理, 二维数组的每个结点处都填上了有意义的高程值, 这时的二维矩阵就是所要求的 DEM 矩阵。

3.2 卫星探测地形数据的模拟

通过卫星轨道的仿真, 确定激光脚印点的位置, 结合已有的行星表面 DEM 数据, 模拟出卫星所探测到的行星表面 DEM 数据。

对于行星表面地形激光测高, 为了得到覆盖范围广、分布密集的激光脚印点, 一般采用极轨卫星。在确定卫星的起始位置 (x_0, y_0, z_0) 、行星半径 R_m 、卫星轨道高度 h 、卫星轨道圆周数

据 v_0 和行星自转角速度 ω_0 的情况下, 可用下式计算 t 时刻卫星在行星坐标系中的位置:

$$x = (R_m + h) \cos \left[\sin^{-1} \left(\frac{z_0}{R_m + h} \right) + \frac{v_c}{R_m + h} t \right] \times \cos \left[\cos^{-1} \left(\frac{x_0}{\sqrt{x_0^2 + y_0^2}} \right) + \omega t \right] \quad (1)$$

$$y = (R_m + h) \cos \left[\sin^{-1} \left(\frac{z_0}{R_m + h} \right) + \frac{v_c}{R_m + h} t \right] \times \sin \left[\cos^{-1} \left(\frac{x_0}{\sqrt{x_0^2 + y_0^2}} \right) + \omega t \right] \quad (2)$$

$$z = (R_m + h) \sin \left[\sin^{-1} \left(\frac{z_0}{R_m + h} \right) + \frac{v_c}{R_m + h} t \right] \quad (3)$$

当卫星的位置确定后, 若激光出射角也已确定, 则可确定激光脚印点的位置。由几何关系可得:

$$x_p = S \sqrt{(\sin \alpha)^2 - (\sin \beta)^2} \quad (4)$$

$$y_p = S \sin \beta \quad (5)$$

$$z_p = S \cos \alpha \quad (6)$$

给定俯仰角 φ_p , 侧滚角 φ_R , 偏航角 φ_T , 将激光脚印点的坐标转换为月球坐标系的坐标后为

$$\begin{pmatrix} X_p \\ Y_p \\ Z_p \end{pmatrix} = S \begin{pmatrix} -\sin b \cos l & -\sin l & -\cos b \cos l \\ -\sin b \sin l & \cos l & -\cos b \sin l \\ \cos b & 0 & -\sin b \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi_R & \sin \varphi_R \\ 0 & -\sin \varphi_R & \cos \varphi_R \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \varphi_p & 0 & -\sin \varphi_p \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \varphi_p & 0 & \cos \varphi_p \end{pmatrix} \quad (7)$$

$$\begin{pmatrix} \cos \varphi_T & \sin \varphi_T & 0 \\ -\sin \varphi_T & \cos \varphi_T & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sqrt{(\sin \alpha)^2 - (\sin \beta)^2} \\ \sin \beta \\ \cos \alpha \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}$$

由于对于整个行星而言, DEM 和轨道数据的数据量是十分庞大的。为了有效地展示仿真结果, 应该用多种手段合理地展示数据。根据系统的具体要求, 在仿真过程中应得到的数据有:

① 在指定时刻, 激光脚印点在轨道附近小块区域和极点周围地区的经纬度坐标值;

② 激光脚印点所处位置的高程值。

3.3 地形插值算法

对卫星探测到的行星 DEM 数据进行插值处理, 可得到能够用地形生成算法显示的规则 DEM。

DEM 的内插算法有很多。考虑到本系统的 DEM 数据量较大和实时性要求较高的情况, 选用逐点内插法。而逐点内插法往往需要求解复杂的误差方程组, 在实际应用中, 常用的是其特例: 加权平均法^[3]。加权平均法在解算待定点 P 的高程时, 是使用加权平均值代替误差方程的。待定点的高程值可表示为

$$Z_p = \frac{\sum_{i=1}^n p_i Z_i}{\sum_{i=1}^n p_i} \quad (8)$$

式中, Z_p 是待定点 p 的高程, Z_i 是第 i 个参考点的高程值, n 为参考点的个数, p_i 是第 i 个参考点的权重。 p_i 的计算公式如下:

$$p_i = \frac{1}{r^2} \quad (9)$$

式中, r 为待插点到第 i 个参考点的距离。

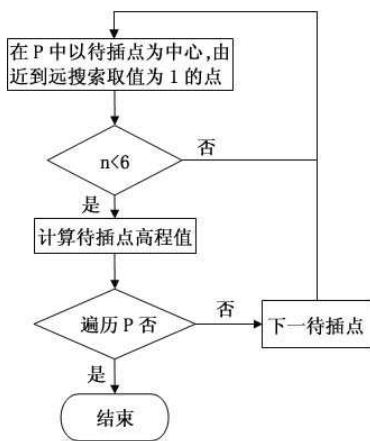


图 4 插值算法的流程图

插值算法的流程图如图 4 所示, 其思想为: 以一个二维数组 P 存放所研究区域的测量点分布情况, 取值为 1 的点为测量点所在位置, 其余点取值为 0, P 从轨道仿真中得到。二维数组 D 为同一区域的 DEM, 其分辨率与 P 是相等的, D 从先前用分形技术产生的行星数据中得到。在 P 中逐一检查每一点, 若该点取值为 1, 检查下一点, 若该点取值为 0, 说明该点为待插点。

在 P 中以待插点为中心, 由近到远向其周围搜索取值为 1 的点即参考点, 直到找到足够的参考点。在本算法中, 参考点个数 n 取 8。最后计算待定点的高程值, 其中计算所需的参考点高程值由 D 中取得, 待插点和参考点距离由两点坐标计算而得。

4 三维场景的实现

三维显示模块基于 OpenGL。OpenGL 是一个开放的三维图形软件包, 独立于窗口系统和操作系统, 以它为基础开发的应用程序可以非常方便地在各种平台间移植。

在该仿真系统中有两个主要的三维场景, 包括三维地形的显示和漫游以及行星轨道运动的模拟。三维地形的场景用来表现行星上的地形和地貌特征, 根据生成的地形数据通过一定的 LOD 算法来实现三维地形的显示和漫游功能。行星轨道运动的场景根据运算得到的轨道数据及测量点数据, 动态地显示探测卫星绕行星运动测高的过程。

4.1 三维地形场景

对于生成的庞大地形数据来说, 如何合理地处理和显示是一个麻烦的问题。该系统的地形显示部分是利用层次细节 (LOD) 算法来解决这个问题的^[4]。

LOD 算法最基本的思想就是在满足误差容限的条件下, 试图用一定数量的顶点和多边形来近似各种几何形状的表面。根据构成表面的多边形和顶点的不同, 可分为两种不同的方法: 规则格网和不规则三角网 (TIN)。现在主要有四种不同的 LOD 框架, 其中视点相关 LOD 相对其它框架有较多优点, 是现在常用的算法。

该系统中用到的视点相关 LOD 算法可以从以下四个方面来实现。

①地形数据组织: 这里使用四叉树的数据结构并用广度优先的原则遍历, 而且使用两个队列存储处理节点。对那些不需要继续分割的节点和已经到达最大分辨率的节点, 就对它们进行渲染。对不可见的节点, 则直接将它们丢弃。

②节点评价系统: 这里的评价标准有以下几个方面: 物体越近越清楚, 越远越模糊; 物体表面越粗糙细节越多, 越光滑细节越少; 相邻不

同细节层次间有约束条件。根据这些标准,就可以推导出节点评价公式。

③ 视见体裁减: 在从顶点进行节点评价之前,要先用裁剪系统对节点进行判定,剔除视锥体以外的节点。这样就可以大大减少节点评价的次数,提高渲染效率。

④ 三维网格生成: 这里采用三角形扇 (Triangle Fan) 的方式来绘制节点。

4.2 行星轨道运动场景

行星轨道运动场景主要用于模拟探测卫星的运动过程,展示卫星轨道和测量点的轨迹。对于该场景,可分为两个方面来具体实现。

一是三维模型的绘制和运动。利用其它功能强大的三维建模软件如 3D MAX 建立的模型,通过一定的算法将它们的数据读入,并利用 OpenGL 重新构建出来,这是三维模型的绘制方法。另外,OpenGL 提供了各种变换操作,如平移变换和旋转变换等。利用这些变换并结合行星和卫星的运动规律和数据,可以方便地模拟它们的运动过程。

二是卫星轨道和星下点轨迹的模拟。对于这些轨迹,系统中用点的集合来表示。用以描述卫星轨道的参数组定义为:

< 轨道点坐标数组, 计时参数, 点的属性, 轨道显示属性 >

同样,对用以描述星下点集合的参数组也可以进行相似的定义。这样,就能够根据需要模拟卫星轨道和星下点轨迹的运动过程了。

另外,为了更好地观察卫星轨道和星下点的轨迹,仿真系统要求能够有视点变换和多视角观察的功能,比如对赤道和极地的轨迹的观察。这些功能可以在 OpenGL 提供的各种变换操作的基础上实现。

5 总结

根据建立的可视化仿真系统,得到的结果如图 5 至图 10 所示。

其中,图 5 和图 6 是卫星激光测高场景不同视角的显示,绿点表示卫星轨道,红点表示对应的测量点;图 7 显示了行星局部地形的测量

点分布情况;图 8 为通过分形技术仿真得到的行星局部地形,可以看到,其细节很丰富。图 8 和图 9 分别为仿真卫星运行半年和一年所得到的该局部地形的测量结果,可以看到原地形变化频率大于激光脉冲频率一半的细节丢失了,其经过插值处理变得更光滑,但是由于仿真时间一年比半年得到的测量点多,所以仿真时间为一年对应的地形更接近于原始地形。

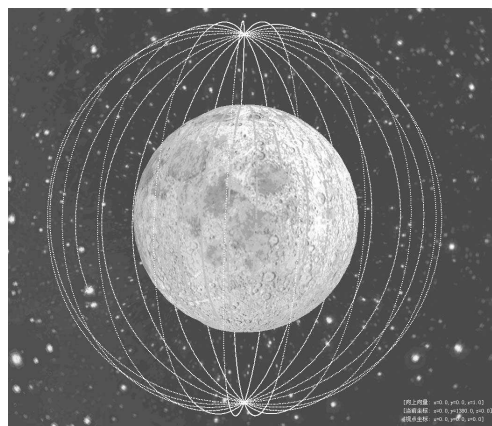


图 5 行星地形激光测高正视图

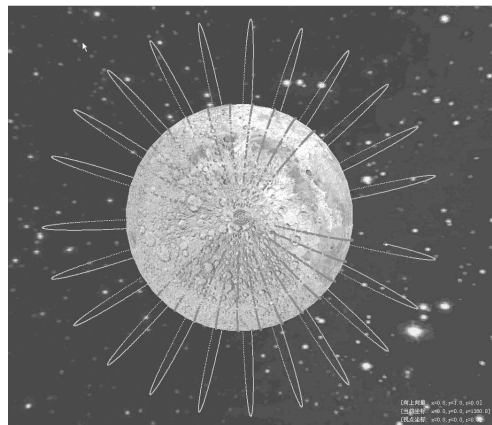


图 6 行星地形激光测高俯视图

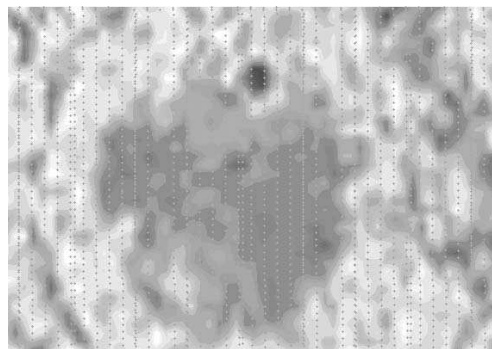


图 7 测量点的分布情况

建立的可视化仿真系统能够很好地仿真行星地形激光测高的过程, 通用性好, 可扩展性强, 在后期得到行星地形真实数据后, 能更好地对测高信息进行处理并做出一定的验证。

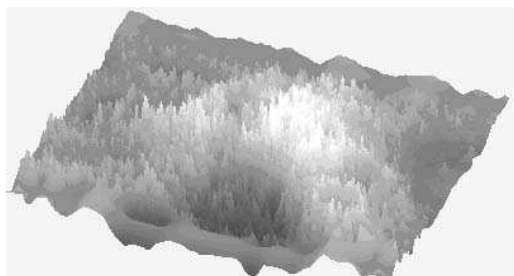


图 8 原始局部地形

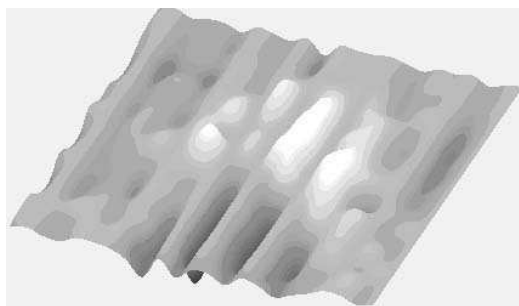


图 9 测量插值生成地形 (半年)

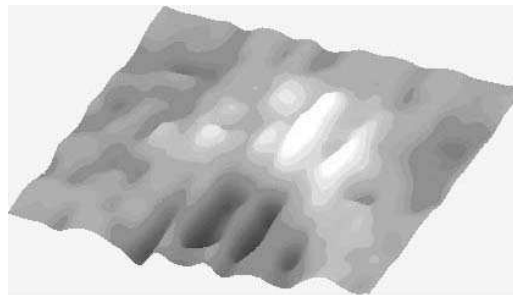


图 10 测量插值生成地形 (一年)

参考文献

- [1] 张继贤, 柳健. 地形生成技术与方法的研究 [J]. 中国图像图形学报, 1997, 2(8,9): 639.
- [2] 曹晓光. 随机中点位移算法的改进 [J]. 中国图像图形学报, 1997, 2(4): 235.
- [3] 李志林, 朱庆. 数字高程模型 [M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2003.
- [4] Stefan Rottger, Wolfgang Heidrich, Philipp Slusallek. Real-time generation of continuous levels of detail for height fields [C]. Proceedings of the 6th International Conference in Central Europe on Computer Graphics and Visualization, 1998, 315-322.
- [5] (美) Richard S Wright, Jr Michael Sweet, 潇湘工作室. OpenGL 超级宝典 (第二版) [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2001.

国外专利介绍

具有电流箝位计功能的非接触式红外测温仪

美国专利 US7163336

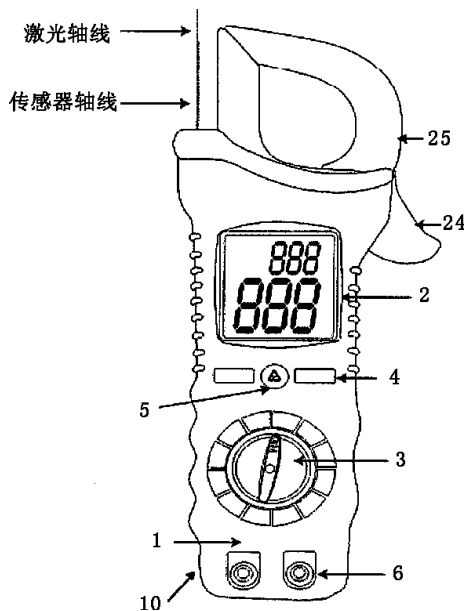
(2007 年 1 月 16 日授权)

有许多应用项目既要求有温度测量值, 又要求有电参数测量值。要满足这些要求, 就需要使用两种不同的测量仪器。这不但会增加费用开支, 而且还会给用户带来不便。

本发明提供一种既能够进行红外温度测量又能够进行非接触电流测量的手持式仪器。该仪器由外壳、电流传感器以及红外探测器等组成。电流传感器与外壳相连, 工作时可将其放在导体的周围, 它可以根据流过该导体的电流产生输出信号; 红外探测器能够探测沿传感轴线发射过来的红外能量并产生红外输出信号。探测到的红外能量被转换成温度值, 而电流传感器的输出信号则被转换成电流值。该仪器的外壳上有一个用以显示测量

值的显示器。

本专利说明书共 12 页, 其中有 8 张插图。



高编译