

摘要

光谱仪器是精密机械和光学仪器中一个重要组成部分，同时它也是光谱学和光谱技术中最基本的测试设备。

本文综述了光谱分析技术的历史和未来发展趋势。在现代光谱要求快速测量和功能集成的背景下，本课题研制了一种多功能的快速测量的光谱测量分析系统。整个系统实现了对光学器件进行透过率、反射率的在线测量，同时还可对光源进行光通量、色度等的自动检测工作。该系统的单次测量周期小于 0.3s，可测量的光谱范围为 380nm~1100nm，测量精度可达 0.5%，采样间隔实时可调。

文章第 3, 4 部分在前两部分理论研究的基础上，深入探讨了硬件系统以及软件系统的实现。硬件组成部分包括光源，光路系统，光谱探测仪器和计算机，与目前市面上的类似产品相比有独创性。以 VC++ 语言设计开发的光谱仪计算机软件程序采用模块化结构，拥有良好的用户界面，完善的菜单，功能齐全，操作简捷。实验结果也验证了这套测量系统的准确性和可靠性。

文章最后对全文进行总结，并就光谱实时测量系统仍然存在的一些不足提出改进方向。

关键词：光谱 实时测量 透过率、反射率测量 光通量 光辐射 色度 光学器件 光学特性

Abstract

As the most basic testing equipment of spectroscopy and spectrum technology, spectrometer plays important roles in the fields of remote sensing and so on.

This thesis demonstrates the present and the trend of skill of spectrum technology. Due to the request of high testing speed and multi-function, we developed an auto spectrum detection instrument for spectrum transmission and reflection test of plane optical devices. The whole measurement system can be used to not only test the transmission and reflection for plane optical devices, but also the light power and chromatic values for light source. The measuring period is less than 0.3 second, spectral range can be measured is between 200nm to 1100nm, measuring precision reaches 0.5%, and the sampling interval can be adjusted on line.

The third and four parts introduce the hardware constitution, software realization. The measurement system which includes light source, optical system, spectrometer and computer has its own advantage compared to other similar products. Adopted modular design method, new spectrometer software which is designed in language VC++ have four modules including data collection module, data processing module, data display module and data management module. The software have friendly interface, functionally complete menu, thus can be operated very easily. The experiment results show that this measurement technology have many merits such as high-precision, quick and convenience.

At the end of the thesis, a summary analysis of factors influencing precision is discussed, and what measures can be adopted to further the system precision are suggested.

Keywords: Spectrum, real-time measurement, spectrum transmission, spectrum reflection, radiometry, luminous flux, colorimetry, optical medium, optical characteristic

第1章 前言

光谱测量仪器是光学仪器的重要种类之一，它是一种利用光学光谱的色散原理、衍射原理或光学调制原理而设计，研究、测定光辐射的频率、强度特性及其变化规律，用于对物质的结构和成分等特性进行测量、分析和处理的基本光学仪器^[1]。

传统的光谱分析检测技术基于光的发射和吸收原理，传统光谱仪器是基于光学、精密机械和电子学的技术基础，近年来各个科技领域的飞速发展已推动了光谱分析检测技术和光谱仪器的突破性发展，而使之成为高科技知识密集化的典型^[2]。现代光谱测量仪器具有分析精度高、测量范围大、速度快等优点。光谱技术的应用几乎覆盖了所有的科学领域，怎样将光谱仪器更有效的运用到更多的领域中去，成为了新的研究课题。

§ 1.1 光谱测量仪器概述

§ 1.1.1 光谱测量仪器概念

光谱仪器是一种利用光学光谱的色散原理而设计的光学仪器。所谓光学光谱是指从远紫外或者真空紫外光谱区（波长极限为 10 埃）到远红外（波长极限为 1 毫米）的整个波段。它仅占电磁波区的一小部分（参看表 1-1）。

表 1-1 电磁波谱表

波谱段	γ 射线	X 射线	紫外光线	可见光线	红外光线	无线电波
波长(埃)	$10^{-4} \sim 0.3$	$10^{-1} \sim 3 \times 10^2$	$10 \sim 4 \times 10^3$	$4 \times 10^3 \sim 7.6 \times 10^3$	$7.6 \times 10^3 \sim 10^7$	$6 \times 10^6 \sim 10^{15}$
波数(1/厘米)	$10^{12} \sim 3 \times 10^8$	$10^9 \sim 3 \times 10^5$	$10^7 \sim 2.5 \times 10^4$	$2.5 \times 10^4 \sim 1.3 \times 10^4$	$1.3 \times 10^4 \sim 10$	$17 \sim 10^{-7}$
频率(1/秒)	$3 \times 10^{22} \sim 10^{19}$	$3 \times 10^{22} \sim 10^{16}$	$3 \times 10^{17} \sim 7.5 \times 10^{14}$	$7.5 \times 10^{14} \sim 4 \times 10^{14}$	$4 \times 10^{14} \sim 3 \times 10^{11}$	$5 \times 10^{11} \sim 3 \times 10^3$

光谱测量仪器是应用光的色散原理、衍射原理或光学调制原理，将不同频率的光辐

射按照一定的规律分解开、形成光谱，配合一系列光学、精密机械、电子和计算机系统，实现对光辐射的频率和强度的精密测定、研究的目的。此类仪器的基本结构框图如图 1-1 所示。

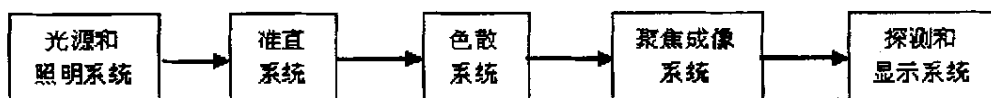


图 1-1 光谱仪器基本结构框图

1. 光源和照明系统

光源是用来被研究的对象，或者用来照射或激发被研究的物质的。照明系统用来尽可能多地会聚光源辐射的光能量，并传递给仪器的准直系统。

2. 准直系统

一般由入射狭缝和准直物镜组成。

3. 色散系统

色散系统是用来将入射的复合光分解为光谱。色散元件有棱镜，光栅等。

4. 聚焦成像系统

把在空间上色散开的各波长的光束会聚或成象在成像物镜的焦平面上，形成一系列按波长排列的单色狭缝象。

5. 探测和显示系统

这一部分的作用是接收各光谱元的信号，并测量其组成——波长、强度等，并记录和显示。

§ 1.1.2 发展历史与趋势

牛顿建立了光谱学的实验基础，在 1666 年的时候，他将太阳通过圆孔射到置于暗室中的三棱镜上，太阳通过玻璃三棱镜分解成红、橙、黄、绿、青、蓝、紫等 7 种彩色圆象，在另一个实验中，牛顿把分离的彩色圆象再通过同样的三棱镜，将它又重新组合成“白光”。1802 年，沃拉斯顿使用狭缝代替了牛顿分光装置中的圆孔，使光谱仪器的分辨率急剧提高。1814 年，夫朗和费设计制成了包含有色散棱镜、狭缝和观察镜的分光装置。随着光谱学研究的进展，这种分光装置不断得到改善。到 1859 年，克希霍夫和本生

设计和制造了一种完善的分光装置，这种装置完全具备了现在光谱仪器的主要特点，是世界上第一台实用的光谱仪器。

在 1859~1862 年之间，克希霍夫和本生利用自己的光谱仪器，细致地研究了夫朗和费谱线以及火焰、电火花中的各种金属谱线，使得人们看到了光谱仪器的巨大的应用价值。他们大量系统地开展了光谱实验研究工作，光谱仪器正式成为了实验室里强有力的研究工具。同时这也促进着光谱仪器的进一步发展，1882 年，罗兰发明了凹球面光栅，解决了当时棱镜光谱仪器所碰到的不可克服的困难。

随着光谱理论的进一步发展和成熟，光谱分析方法逐渐走出了实验室，在工业部门中开始被广泛应用了，光谱仪器得到了迅速的发展，它的改进是按两个方面进行的：改善光源和提高光谱仪器本身的性能。到 50 年代，已形成了完整的光谱仪器制造工业系统，世界各主要国家均有光谱仪器的生产工厂。

随着电子技术的发展，光谱仪器在第二次世界大战前后开始实现光电化。光电化不仅可以提高工作速度和分析精度，而且更重要的是便于实现自动化。光电化的实现表现在光电元件和热辐射元件的发展，光电倍增管，衍射光栅，示波器都纷纷被应用在光谱仪器中了^[3]。

电子计算机的发展有力地促进了光谱仪器的光电化和自动化。随着电子技术的发展，光电光谱仪器一定会成为工业自动化流程中直接测试和控制产品生产工艺过程的设备之一。激光技术的发展改变了光谱仪的面貌，扩大了它的应用范围，开拓了光学微区光谱分析的道路。由于新型光电、热电等材料的出现以及集成元、器件及探测技术的发展，发展了适用于广各波段的高探测极限灵敏度的真空光电子元、器件、半导体光电、热电元、器件，热释电器件和电荷耦合器件(CCD)，为光谱辐射测量提供了探测元、器件^[5]。把传统的色散型光谱仪和固体成像器件结合起来，是器件的光敏面和靶面上的每个象元同时接收到波长不同的光谱元，在用电子束扫描的方法将这些光谱元信息读取和显示出来，得到要求的光谱图。这种器件的灵敏度高，“曝光”时间极短，而电子束扫描速度快，可以用来研究微秒甚至纳秒量级的过程。

随着光谱测量技术应用的日益广泛，光谱测量仪器亦处于不断的发展中。它一方面随着光谱学和光谱技术及其他利用光谱学和光谱技术作为研究分析手段的科学技术领域的发展而发展。今后，为了满足更广泛的需求，光谱仪器的发展必然朝着以下几个方向发展^[2,4,5]：

1. 小型化、专门化、简化

这是光谱仪的新时代发展另一方向，它与大型、高、精、尖发展方向逆对的发展方向。光谱仪器中必需的光源、分析器件、探测器件、微电子器件、微处理器等等，如今都已有种种小型化、微型化、全固态的产品可供应用，加上近年来在光谱数据处理软件(如化学计量学软件)的发展，光谱仪器小型化、简化才得以迅速发展，可以预计，今后若干年不但对小型化、专门化、简化、家用化光谱仪器的需求会更加增加，而已开发这些仪器的硬件软件物质条件会更加齐备，因此光谱仪器发展这一端方向不可忽视，其科技发展意义和市场扩展前景是十分重大的。

应该强调，新时代光谱仪器小型化发展并不意味着低水平，其技术指标、功能水平都是符合新时代光谱分析检测技术发展要求的。

2. 光谱传感器微型化、生物化

现在已有不少仪器采用光纤与化学试剂或生物材料(如酶)的种种结合，构成微型光纤化学、光纤生化光谱传感器(微光谱探头)，这方面的研究和实用化今后肯定还会不断深化和推广。

目前，纳米技术和纳米材料科技的快速发展，也肯定会促进光谱传感器微型化进程。目前，已有采用纳米粒子进行荧光免疫和增强 Raman 检测的技术和仪器报导，用于病毒感染、心血疾病和癌症的分析、诊断。

芯片技术已从半导体集成电路技术移植到微型传感器技术，尤其在生物医学分析仪器和战场生物、化学毒物监测仪器中，应用前景无量。

3. 光谱仪器网络化

当今网络铺天盖地、无孔不入，光谱仪器中配置调制解调器连接 Internet 网络的想法顺理成章、并已在不少国外光谱仪器中实施。今后的问题是光谱仪器网络化的内涵、功能、实效究竟如何，会对光谱分析检测技术和光谱仪器的发展产生什么影响，有多大多深的程度，还需静观深思。

4. 光谱仪器虚拟化

建立在计算机硬件、软件发展基础上的虚拟化仪器设计目前正方兴未艾，这预示了今后仪器设计观念和应用模式的巨大变革。传统仪器单一、任务固定对象的设计和应用概念受到冲击甚至会被突破。可以预期，像光谱仪器这样广泛应用的仪器，集虚拟、模

模糊概念的设计思想、设计方法一定会影响下一代光谱仪器的设计、制造和使用，而且不仅只影响到光谱分析检测数据的处理和应用，是否会搅乱(或重组)传统光谱仪器谱系和型式惯例，现在还难以评说。

§ 1.1.3 光谱测量仪器的典型应用

光谱仪器的应用领域非常广泛，如农业、天文、汽车、生物、化学、镀膜、色度计量、环境检测、薄膜工业、食品、宝石检测、LED 检测、印刷、造纸、喇曼光谱、半导体工业等。下面介绍一些典型应用。还有很多应用不在这里赘述了。

1. 颜色测量

一般来说，物体和浓稠液体的颜色测量可以使用不同的实验布局，比如使用反射型光纤探头或积分球。在该测量中，可以使用波长范围在 380 到 780nm，分辨率 (FWHM) 为 5nm 的光谱仪；此外，还需要白光连续光源和白色反射瓦。对于测量纺织品、纸张、水果、葡萄酒、鸟类羽毛颜色等不同的应用可以使用不同的光纤探头。应用反射光谱的颜色测量的典型实验布局如图 1-2 所示。

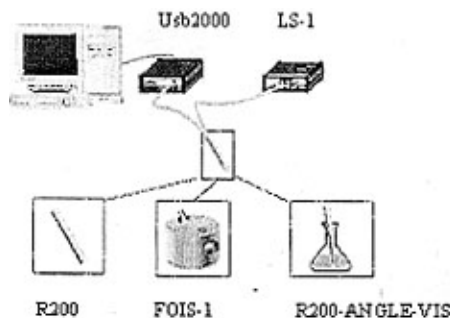


图 1-2 颜色测量典型实验配置

2. 紫外/可见光谱吸收测量

液体的吸收率测量可以用不同的实验布局和波长范围来实现，如使用浸入型光纤探头或流动样品池进行在线吸收率测量，或使用样品固定器进行样品的吸收率测量。对于测量紫外/可见波长范围的光谱仪，可以选择波长范围 200-1100nm、分辨率 1.4nm(FWHM)。此外还需要氙-卤素灯作为光源。不同的应用可以选择不同的光纤探头。吸收率测量的典型实验布局如图 1-3 所示。

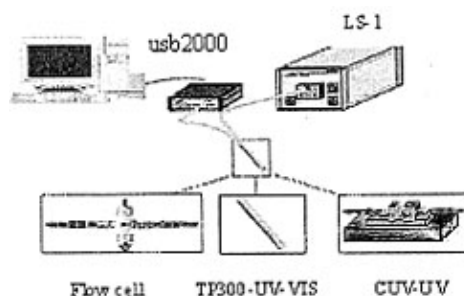


图 1-3 紫外/可见吸收光谱测量典型实验配置

3. 发射谱测量

发射光谱测量可以用不同的实验布局 and 波长范围来实现，还要用到余弦校正器或积分球。发射光谱测量可以在紫外/可见和可见/近红外波长范围内测量。

对于发射光谱的绝对测量，光谱仪可以配置成波长范围从 200-400nm 或 350-1100nm，或组合起来实现紫外/可见 200-1100nm。典型实验布局如图 1-4 所示。

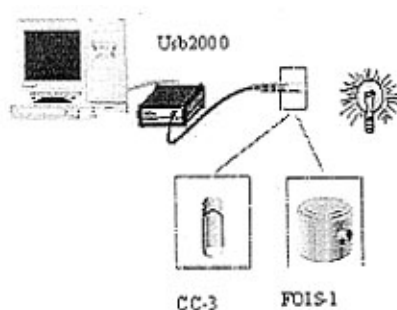


图 1-4 发射光谱测量典型实验配置

4. LED 的测量

最简单而且迅速地测量 LED 的整个光通量的方法就是使用一个积分球，并把它连接到光谱仪上。该系统可以用卤素灯进行定标，然后用测量到的光谱分布计算出相关参数，并实现辐射量的绝对测量。所测光源的光谱发光强度还可以用 $\mu\text{W}/\text{cm}^2/\text{nm}$ 来计算、显示并存储。另外还可以测得辐射量 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ ， $\mu\text{J}/\text{cm}^2$ ， μW 或 μJ ；光通量 lux 或 lumen，色轴 X, Y, Z, x, y, z, u, v 和色温。LED 测量的典型实验布局如图 1-5 所示。

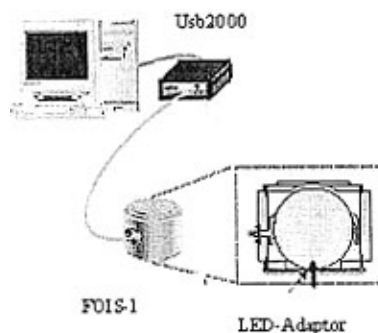


图 1-5 LED 测量典型实验配置

5. 氧浓度测量传感器

氧浓度传感器包括一个光纤荧光探头，探头表面镀有专利技术的膜层，并使用一个蓝光 LED 作为激发源，还有一台高灵敏度的微型光谱仪。该传感器应用荧光技术测量氧的绝对含量，样品产生的荧光反射回探测器上。当气态或液态样品中的氧扩散到探头的膜层上时，就会使荧光猝灭，猝灭的程度与样品中的氧的浓度是相关的。氧浓度测量的典型实验布局如图 1-6 所示。

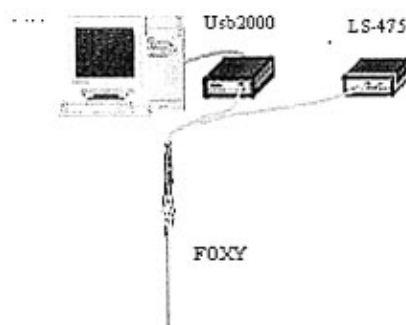


图 1-6 氧浓度测量典型实验配置

6. 宝石成分测量

颜色是判断钻石成色的决定因素之一，天然钻石和人造钻石可以用波长范围在 400-750nm 的光检测出来。在天然 Ia 类钻石的吸收谱中可以发现 415nm 和 478nm 的特征波长，而人造钻石在该波长处则没有吸收峰。人造钻石中可以探测到 592nm 和 741nm 的波长。而且天然钻石和人造钻石的吸收峰幅值相差近 10 倍。当然其它宝石也可以用这种方法检测，如红宝石、紫翠玉、蓝宝石等。宝石成分检测的典型实验布局如图 1-7 所

示。

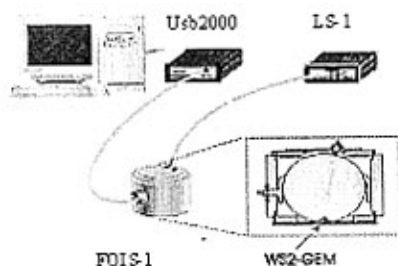


图 1-7 宝石成份检测典型实验配置

7. 真空镀膜过程监控

光纤光谱仪为真空室内镀膜过程的监控提供了一种灵活的测量手段，它可以方便地把光引入并引出真空室或洁净工作仓，同时选择镀膜过程分析所需要测量的参数。在实际的在线生产中，可以在工作仓中放置几个探头来检测整个生产过程。图示为真空室镀膜过程监控的典型实验布局。在这里一个反射型光纤探头用来在线监测镀膜过程。氙-卤素灯发出的光被导入真空室并传导到反射探头上，反射光由反射探头传导到光谱仪中；也可以再增加一个通道作为参考测量来补偿光源的波动。

8. 生物医学应用

血成分分析的非侵入式和侵入式的光谱学测量手段，测量了许多重要的医学指标，如组织和纹理中的氧浓度、血色素、细胞色素和水浓度等。非侵入式检测系统包括微型光纤光谱仪、LS-1 卤钨灯和反射型光纤探头，而侵入式检测系统则使用了一根植入于导管中的特殊的反射型光纤探头。

在需要连续测量氧浓度、血色素的氧化和去氧化过程的医学应用中，该系统得到了成功的应用。

9. 材料（金属/非金属）成分检测

LIBS（激光诱导荧光）技术是基于激光束聚焦到被测样品上所产生的物质电离过程，电子的再结合会发光，对该光谱进行分析研究可以得到被测物质的成分。

LIBS 技术最初是由美国 Los Alamos 国家实验室的 David Cremers 研究小组在二十多年前发明的。从此以后，LIBS 技术成功地被用于痕量元素的检测和恶劣环境下的在线成

分分析等应用中。

根据所分析的元素不同, LIBS 技术可以探测 ppm 到 ppt 级的含量。而且不需要对所测样品进行预加工(如抛光, 溶解等), 可以分析固态、液态、气态样品。

§ 1.2 课题研究的重要性

本课题主要旨在研究一套能实时、快速测量光源辐射度、色温、镀膜光学器件折射率、反射率等光学参数的有硬件装置和软件控制的完备的基于光谱测量技术的系统。课题的意义阐述如下。

§ 1.2.1 光学器件光学参数的测量

有些光学系统, 特别是光学零件, 需要测量它对每一种波长的单色光的光度性能(投射、反射、吸收等), 即分光光度性能。当使用光电管、光电倍增管、光敏电阻、光电二极管等这些探测器时, 在测量分光光度性能时, 必须使用单色光做光源。单色光源可以用以下几种方法获得^[6]。

一种方法是借助干涉滤光片获得单色光。让普通光源发出的光通过干涉滤光片能得到波长范围为几十埃到几百埃的单色光。这种方法比较简便, 但由于干涉滤光片的限制, 单色光波长范围不可能连续改变。

另一种方法是用光谱灯作为单色光源。实验室常用的光谱灯, 有汞灯, 钠灯, 氢灯, 氖灯, 镉灯等等。光谱灯发出的光仅限于元素本身特有的几种单色光。借助于简单的单色玻璃滤光片, 可以把元素发出的几种单色光分开, 得到所需的单色光。这种方法的优点是, 单色光的波长可以精确得知道, 缺点是不能连续改变单色光波长, 往往需要多种光谱灯, 才能达到测量的目的。

再一种方法是使用单色光计(单色仪)得到单色光。光源发出的光经单色光计分光后, 从单色计狭缝中射出单色光。转动波长选择器, 可以连续改变单色光波长。

在使用以上这些方法时, 或者需要多个光源, 且不能得到连续波长的光学参数, 或者需要额外的一些仪器, 因此使用以 CCD 作光电探测器的光谱测量系统有很大的优越性。

另外一种延伸的应用是测量薄膜的光学常数和厚度。人们已经提出了很多种测量薄

分分析等应用中。

根据所分析的元素不同, LIBS 技术可以探测 ppm 到 ppt 级的含量。而且不需要对所测样品进行预加工(如抛光, 溶解等), 可以分析固态、液态、气态样品。

§ 1.2 课题研究的重要性

本课题主要旨在研究一套能实时、快速测量光源辐射度、色温、镀膜光学器件折射率、反射率等光学参数的有硬件装置和软件控制的完备的基于光谱测量技术的系统。课题的意义阐述如下。

§ 1.2.1 光学器件光学参数的测量

有些光学系统, 特别是光学零件, 需要测量它对每一种波长的单色光的光度性能(投射、反射、吸收等), 即分光光度性能。当使用光电管、光电倍增管、光敏电阻、光电二极管等这些探测器时, 在测量分光光度性能时, 必须使用单色光做光源。单色光源可以用以下几种方法获得^[6]。

一种方法是借助干涉滤光片获得单色光。让普通光源发出的光通过干涉滤光片能得到波长范围为几十埃到几百埃的单色光。这种方法比较简便, 但由于干涉滤光片的限制, 单色光波长范围不可能连续改变。

另一种方法是用光谱灯作为单色光源。实验室常用的光谱灯, 有汞灯, 钠灯, 氢灯, 氖灯, 镉灯等等。光谱灯发出的光仅限于元素本身特有的几种单色光。借助于简单的单色玻璃滤光片, 可以把元素发出的几种单色光分开, 得到所需的单色光。这种方法的优点是, 单色光的波长可以精确得知道, 缺点是不能连续改变单色光波长, 往往需要多种光谱灯, 才能达到测量的目的。

再一种方法是使用单色光计(单色仪)得到单色光。光源发出的光经单色光计分光后, 从单色计狭缝中射出单色光。转动波长选择器, 可以连续改变单色光波长。

在使用以上这些方法时, 或者需要多个光源, 且不能得到连续波长的光学参数, 或者需要额外的一些仪器, 因此使用以 CCD 作光电探测器的光谱测量系统有很大的优越性。

另外一种延伸的应用是测量薄膜的光学常数和厚度。人们已经提出了很多种测量薄
另外一种延伸的应用是测量薄膜的光学常数和厚度。人们已经提出了很多种测量薄

分分析等应用中。

根据所分析的元素不同, LIBS 技术可以探测 ppm 到 ppt 级的含量。而且不需要对所测样品进行预加工(如抛光, 溶解等), 可以分析固态、液态、气态样品。

§ 1.2 课题研究的重要性

本课题主要旨在研究一套能实时、快速测量光源辐射度、色温、镀膜光学器件折射率、反射率等光学参数的有硬件装置和软件控制的完备的基于光谱测量技术的系统。课题的意义阐述如下。

§ 1.2.1 光学器件光学参数的测量

有些光学系统, 特别是光学零件, 需要测量它对每一种波长的单色光的光度性能(投射、反射、吸收等), 即分光光度性能。当使用光电管、光电倍增管、光敏电阻、光电二极管等这些探测器时, 在测量分光光度性能时, 必须使用单色光做光源。单色光源可以用以下几种方法获得^[6]。

一种方法是借助干涉滤光片获得单色光。让普通光源发出的光通过干涉滤光片能得到波长范围为几十埃到几百埃的单色光。这种方法比较简便, 但由于干涉滤光片的限制, 单色光波长范围不可能连续改变。

另一种方法是用光谱灯作为单色光源。实验室常用的光谱灯, 有汞灯, 钠灯, 氢灯, 氖灯, 镉灯等等。光谱灯发出的光仅限于元素本身特有的几种单色光。借助于简单的单色玻璃滤光片, 可以把元素发出的几种单色光分开, 得到所需的单色光。这种方法的优点是, 单色光的波长可以精确得知道, 缺点是不能连续改变单色光波长, 往往需要多种光谱灯, 才能达到测量的目的。

再一种方法是使用单色光计(单色仪)得到单色光。光源发出的光经单色光计分光后, 从单色计狭缝中射出单色光。转动波长选择器, 可以连续改变单色光波长。

在使用以上这些方法时, 或者需要多个光源, 且不能得到连续波长的光学参数, 或者需要额外的一些仪器, 因此使用以 CCD 作光电探测器的光谱测量系统有很大的优越性。

另外一种延伸的应用是测量薄膜的光学常数和厚度。人们已经提出了很多种测量薄

膜光学常数的方法。如椭偏法^[7], 外差干涉测量法^[8], 移相干涉法^[9], 光度测量法^[10]等等。这些方法各有千秋, 可以满足不同的需要, 但也有其局限性。椭偏法虽然精度高, 可当薄膜较厚时已经很难测准, 且数据处理起来也很复杂。外差干涉法虽然解决了诸如光源的稳定性、散射光、内部反射等因素对测量精度的影响, 可由于要满足全反射条件, 因而被测折射率的大小受限。移相法会遇到相位的不确定性等问题。光度法和反射光谱法中利用分光光度计测量反射率时稳定性不好, 实验数据不是很精确。这是因为反射率对薄膜表面条件的依赖性很强, 对入射角的变化也很敏感。然而在测量透射率时, 这些因素的影响要小得多, 因此, 透射率的测量值稳定, 测量数据精确。正是由于上述原因, 在过去 20 多年里, 更多的报道是采用透射光谱法^[11,12]。透射光谱再结合一些算法, 如退火模拟算法等, 我们就可以确定薄膜材料的折射率、消光系数及膜厚等光学参数^[13]。

但是当基板是高反射率时, 这时采用反射干涉光谱法来测量薄膜的光学常数比较有效^[14]。

而且我们的系统是快速实时的测量系统, 这时就可以被实现到镀膜在线过程监控等应用。

§ 1.2.2 光辐射测量和色度学性能测量的重要性

光辐射计量是整个光学计量最基本的组成部分。应用范围非常广泛, 涉及到光度、光谱光度、红外辐射、微光夜视、激光功率和能量等分专业。这些参数的计量在现代化的战争中发挥着巨大的作用。通过科索沃战争的启示证明:重视光辐射计量工作有着深远的战略意义。

从某种意义来说, 由于我们生活在一个辐射能的环境中, 我们被天然的电磁能源所包围, 就产生了许多测量和控制辐射能的要求。随着科学技术的发展, 辐射度量的测量对于航空、航天、核能、材料、能源卫生及冶金等高科技工业部门的发展显得越来越重要。例如:在空间技术中, 为了模拟太阳的辐射, 要求对模拟太阳的光谱能量分布及色温进行测量, 在该技术中要求对核爆炸的光谱分布和爆炸温度进行测量。所以辐射度量的测量在极其广阔的应用范围内具有重要意义。

所谓光源色温是指光源所发出的光的颜色与某个温度的黑体所发出的光的颜色相同或最接近的这个黑体的温度, 属于最基本的色度学性能之一。色温测量的基础是光源光谱功率分布的测量和研究色温测量对于灯泡工业和照明工程等具有很重要的意义。

由此可见测量光辐射的光谱辐照度、辐亮度及光源色温是非常必要的。

§ 1.3 本论文主要内容及创新点

在新世纪里光谱技术和光谱仪器领域出现了令人惊诧的复兴和大发展浪潮。光谱仪器的数字化, 智能化, 使其应用范围日益广泛, 需求越来越大。体积小、重量轻、使用方便、可集成、功能全面的光谱测量系统将更受欢迎, 同时要求其测量速度快, 实现实时测量或监测。

本课题研究了一套完备的硬件和软件系统。该系统可以测量色温, 物体颜色, 光通量、辐射度等, 还可以测量光学器件的透射率和各种角度的反射率, 目前市场上的类似产品或者只能测量透射率, 或者只能测量反射率, 所以该系统具有创新性和先进性。同时基于硬件特性研制的软件系统具有强大的功能, 人性化的界面和可扩展的接口。总而言之, 本课题研究的这种快速扫描的实时光谱测量系统, 硬件上具有性能稳定、测量精度高、结构简单紧凑, 易于操作等优点; 配套软件的功能强大、人性化、速度快, 并实现实时测量。创新点之一为硬件结构的设计将在第 3 章进行说明。创新点之二为开发软件的功能强大性, 将在第 4 章予以介绍。

在本章简要概述了光谱测量技术、光谱仪器的基本概念、发展历史和趋势, 并阐述了本课题的研究目的、重要性和创新性后, 本硕士论文将主要围绕一下几个部分展开深入讨论:

第二章简要介绍了折射率、反射率测量的原理, 色度测量和光辐射测量的一些基本的光度学和色度学理论知识;

第三章着重介绍本测量系统的硬件实现, 包括整体的系统结构以及测量系统中的各部分: 光源、光谱仪器, 光路介绍等;

第四章主要介绍了我们研制的配套软件的强大功能及其特点所在;

第五章在在我们搭建的系统上做一些实验来验证结果, 对镀膜光学元件的反射率、折射率的测量, 相对辐射的测量, 色温的测量;

第六章对我们已经做了的工作进行了总结, 并对尚需进一步开展的工作提出展望。

参考文献

1. 陈复生. 精密分析仪器及其应用. 四川科学技术出版社, 1988.
2. 范世福. 光谱技术和仪器的新发展. 光学仪器, 2000,22(4), 35-40.
3. 吴国安. 光谱仪器设计. 科学出版社, 1978.
4. 张开逊. 仪器仪表与现代社会. 仪器仪表学报, 1997,18(5).
5. 金钦汉. 从'99 匹兹堡会议看分析仪器的跨世发展动向. 现代科学仪器, 1999,No.5, No.8.
6. 机械工业部仪器仪表工业局统编. 光学测量. 机械工业出版社, 1985.
7. Jakopic G, Papousek W. Appl. Opt, 2000, 39(16):2727~2732.
8. Chiu M, Lee J, Su D. Appl. Opt, 1999, 38(9):4047~4052.
9. Cheng Y. Y, Wyant J.C. Appl. Opt, 1985, 24(6):804~807.
10. 张奇志. 单层 SiNx 衰减型相移掩膜研究. 四川大学博士论文,2001:93~113.
11. Cisneros J.I. Appl. Opt, 1998, 37(22):5262~5270.
12. Aqili A.K.S, Maqsood A. Appl. Opt, 2002,41(1):218~214.
13. 刘细成, 王植恒, 廖清君等. 用透射光谱和模拟退火算法确定薄膜光学常数. 激光技术, 2003,27(2).
14. 杨鹏, 静志凌, 徐雷. 反射干涉光谱法测量固体薄膜的光学常数和厚度. 光谱学与光谱分析, 2000,20(3):283-285.

第2章 相关原理和理论基础

由于本论文主要的研究内容是运用光谱测量技术，对光学零件的折射率，透射率以及光源的相对辐射和色温进行快速实时测量，本章将对相关的原理和理论基础作一些介绍。

§ 2.1 光学零件反射、透射测量原理

光照到光学零件上，一部分光能被元件表面反射，另一部份被零件本身吸收，剩下的部分透过光学零件。可以用以下两个量来描述光学零件反射、透过光能的情况。

如果照射到光学零件上的光通量为 Φ_0 ，反射光通量为 Φ_p ，透射光通量为 Φ_t ，则定义：

$\rho = \frac{\Phi_p}{\Phi_0}$ 为光学零件的反射系数，也称反射率；

$\tau = \frac{\Phi_t}{\Phi_0}$ 为光学零件的透射系数，也称透射率。

不同的光学零件，它们的反射系数的差别很悬殊。例如，一个玻璃表面对垂直入射光的系数约为 4% 左右，而镀增透膜的光学零件反射系数仅有百分之零点几。另外一些零件，如激光用全反射膜的反射系数可达 99.9% 以上。测量差别如此大的光学零件反射系数，其方法相应也有所差别。即使同一类的光学零件测量，也有多种方法。这里只介绍典型通用的方法^[1]。

如前所述，要测量反射系数，实际上是测量从零件镀膜表面上反射的光通量 Φ_p 和入射到零件镀膜表面上的光通量 Φ_0 之比值。测量入射、反射光光通量相对大小的装置如图 2-1 所示。光源通过聚光镜入射到平行光管，从平行光管射出一束平行光。整个光源和平行光管固定在一个圆平台上。整个接收系统可沿平台边缘绕垂直于平台的轴线在水平平面内旋转。平台上无待测样品时，则从平行光管射出的平行光束直接进入接受系统，接受到的光通量 Φ_0 ，当平台上放置样品后，接受器旋转到 B'，正好接收到从样品上反

射的光通量 Φ_p ，因此按照反射系数定义即可得到。

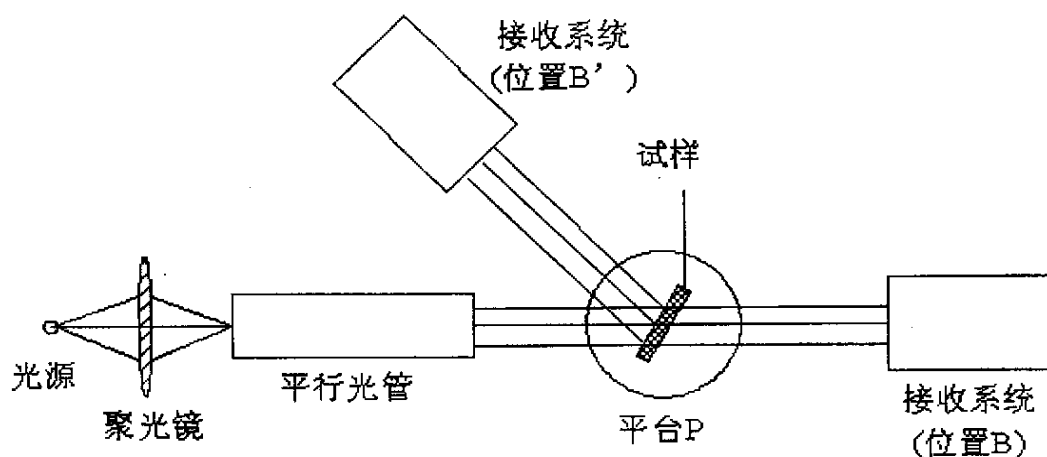


图 2-1 镀膜表面反射系数测量装置简图

上述测量装置，也可用于测量透射率。接受器的位置位于位置 B 时，就可以测得透射率。

对于反射率较低的样品表面，用上述方法测量时精度较低，例如测量玻璃表面反射系数时大约为 4%。这时可用一个标准反射系数的样品进行比较。标准样品一般可以用稳定性高的 K 玻璃制成，它一面抛光，另一面磨毛镀黑，只有一个反射面。

§ 2.2 光度学基本理论

我们知道物理辐射作用在观察者的视觉器官上便产生光的感觉，而人眼特殊的视觉特性，使得辐射源客观上发射出的辐射能的大小，并不等于人的视觉系统主观上感受到的那部分光辐射能的强度。光辐射能包括紫外辐射、可见光和红外辐射的全部辐射能量，而人眼不仅把看不见的紫外辐射和红外辐射都排除在外，而且在数量上，人眼感受到的光辐射能也并不等于看得见的那部分光辐射（可见光）的实际能量值。

因此，在光辐射测量中，与能量有关的量分为两类^[2]：一是物理的，即客观的，叫做辐射度学量，简称辐射量；另一类是生理的，即主观的，叫做光度学量。后者即是光度学的研究范围，它把辐射量与人眼的视觉特性（CIE 标准光度观察者）相联系而被评价。

本节将简单介绍光度学中的基本量及其常用测量方法。

§ 2.2.1 光度学中的基本量

1. 光量

光量，顾名思义，光的数量，它定义为光通量和照射时间的乘积，单位：流明秒，符号为 $\text{lm} \cdot \text{s}$ ，表达式如式 (2-1)：

$$Q_v = \int \phi_v(t) dt \quad (2-1)$$

下标 v 表示，它是一个光度学量，与辐射学量区别。

2. 光通量

光源在单位时间内发出的光量称为光通量，表示光源表面的客观辐射通量对人眼所引起的视觉强度，即，是能被人眼视觉系统所感受到的那部分辐射功率的大小的度量，光通量单位流明 (lumen)，符号为 lm ，表达式如下：

$$\phi_v = \frac{dQ_v}{dt} \quad (2-2)$$

光通量是检验电光源产品的重要指标，光效则是衡量电光源节能性能的关键参数。光通量通常是将被测灯与已知光通量的标准灯在积分球内做比较测量；或用分布光度计测空间各方向的光强分布，在计算光通量，

3. 光通量密度

某一点的光通量密度定义为包含该点的面元上的光通量除以该面元面积，即：

$$\frac{d\phi_v}{dS} \quad (2-3)$$

光通量密度有出射度 M_v 和光照度 E_v 之分：前者是描写面光源向外发出的光度特性，单位为流明每平方米 (lm/m^2)；后者则是描述光接收面的接收光度特性，单位为勒克斯 (lux)，符号为 lx 。

4. 发光强度

光源在指定方向上的一个很小的立体角元 $d\Omega$ 内所包含的光通量 $d\phi$ 值，除以这个立体角元，所得的商定义为光源在此方向上的发光强度：

$$I_v = \frac{d\phi_v}{d\Omega} \quad (2-4)$$

单位是坎德拉 (candela)，符号为 cd。发光强度用于描述光源在某一方向上的发光能力。

5. 光亮度

光亮度用于描述光源每一单位面积在某一方向上的发光能力，即单位面积上的发光强度：

$$L_v = \frac{dI_v}{dS} \quad (2-5)$$

单位为坎德拉每平方米 (cd/m^2)。且，表达式 (2-5) 中的发光强度 I_v 和面元 S 都具有方向性，因而， S 应理解为一个在观察方向上的投影，即与立体角 $d\Omega$ 给定的方向垂直。

以上就是光度学研究和测量中最基本的 5 个量。

§ 2.2.2 光度基本量测量

物体的光度特性是在入射光辐射作用下必然显现出来的特征，它决定了物体的亮度和色度。总的来说，对光度量的测量分为目视光度法和物理光度法两种。这里仅以光通量的测量为例，做简单说明。

光通量的测量通常有两种方法^[3,4]：一是在积分球内利用已知光通量的标准灯与被测灯作比较测量，从而定出被测灯的光通量^[5]；另一种方法是用分布式光度计^[6]测定被测光源在空间各个方向上的发光强度，计算后得到光通量。前一种方法比后者简单，但测量精度不如后者。

1. 积分球法

积分球是一个球形空腔，由两个内壁涂以白色漫反射层（硫酸钡或氧化镁）的半球壳组成，积分球涂层的好坏直接影响测光准确性。

球内放置光源，光源发射的光经过球比多次漫反射后，整个球壁内侧上的照度均匀分布，因此，在球壁上任意一个面元探测到的光通量应正比于光源所发射的总的光通量，

经推导可得如下表达式:

$$E = \frac{\phi}{4\pi r^2} \frac{\rho}{1-\rho} \quad (2-6)$$

其中 r 为积分球半径, ρ 为积分球内壁涂层得漫反射比, 均为常数。 E 为球壁上任意一点的光照度, ϕ 为待测光源的光通量。

测量时, 采用比较的方法, 除了待测灯外, 还需要一个光通量确定的光通量标准灯, 其光通量为 ϕ_s , 先后将其放入积分球, 在窗口处探测光照度, 比较得待测灯光通量。

2. 分布式光度计法

分布式光度计除了用来测量光通量, 还可用于测定光源光强度得空间分布。对于大功率的光源更适合于用分布式光度计测量其光通量。但是通常情况下, 分布式光度计法测量复杂, 限于篇幅, 这里不再赘述, 有兴趣的读者可以参阅相关文献。在满足要求的条件, 一般采取积分球法。

§ 2.3 色度学基本理论

色度学系统就是以人眼的视觉特性为基础, 把心理现象(颜色)和引起色感知的物理现象(光的强度, 波长等)联系起来, 定量描述颜色的。色度学研究的就是当辐射量与人眼的颜色视觉特性(CIE 标准色度观察者)相联系而被评价时。现代色度学采用 CIE (国际照明委员会)所规定的一套颜色测量原理, 数据和计算方法, 称为 CIE 标准色度学系统^[7]。

为了定量的描述颜色, 国际照明委员会先后制定了一系列定量描述颜色的色度空间, 如: CIE RGB、CIE XYZ、CIE LAB、CIE LUV 等色空间, 并确定了 CIE 1931 XYZ 颜色空间与其它颜色空间的转换关系。由于 CIE 1931 XYZ 色度系统中的 CIE 1931 色品图和 CIE 1931 标准观察者光谱三刺激值是色度学的实际应用中的常用工具, 几乎一切色度学的计算和延伸都是由此出发的, 也是实现颜色管理的基础^[8], 这里对 CIE 1931 XYZ 系统做一个简要说明。

§ 2.3.1 CIE 1931 XYZ 色度系统

CIE 1931 XYZ 颜色空间是由 RGB 颜色空间推导来的。XYZ 色度系统采用比光谱色更饱和的三个设想的原色 XYZ, 代替原来的 RGB 三原色, 以避免 RGB 系统中会出现负值颜色坐标的缺点, 同时可以简化一系列的色度计算。该系统是与设备无关的色度系统, 常用于色度系统转换。

1. 标准观察者光谱三刺激值

我们已经知道, 人眼的颜色视觉是由于辐射对人眼中视网膜上接收细胞的刺激, 同时三种锥体细胞对 380—780nm 范围的辐射可选择性吸收而产生的。这种可选择性的颜色刺激可用光谱功率分布 (Spectral Power Distribution, SPD) 函数来表示。

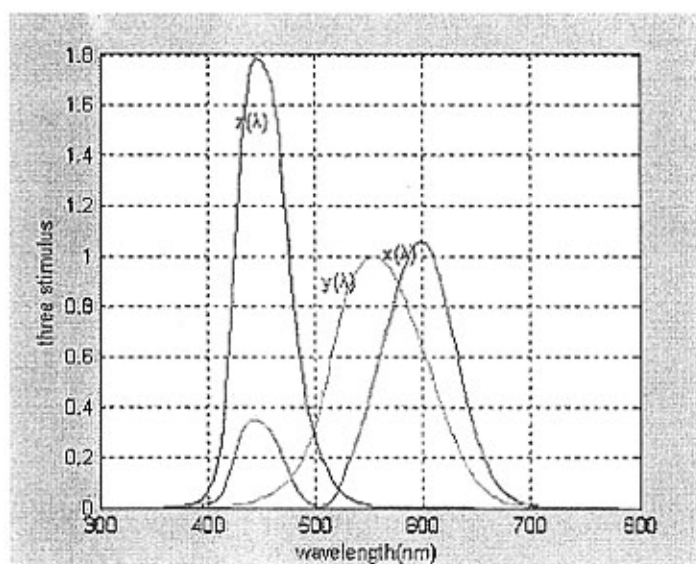


图 2-2 标准光谱三刺激值曲线

由于不同的人, 三种锥体细胞的光谱功率分布有所不同, 为了统一色度学中的评价标准, 1931 年, CIE 国际照明委员会对许多观察者进行颜色视觉实验, 按照统计平均的原则, 规定了“CIE 1931 标准色度观察者光谱三刺激值”, 如图 2-2 所示。以此代表人眼的平均颜色视觉特性, 用于色度计算, 从而标定颜色。它适用于 2° 视场的中央视觉观察条件 (视场范围 $1-4^\circ$)。1964 年, 为了适合 10° 大视场的色度测量, 又规定了一组“CIE 1964 补充标准色度观察者光谱三刺激值”, 如图 2-3 所示。它们的峰值波长分别为: 495nm, 555nm 和 595nm。

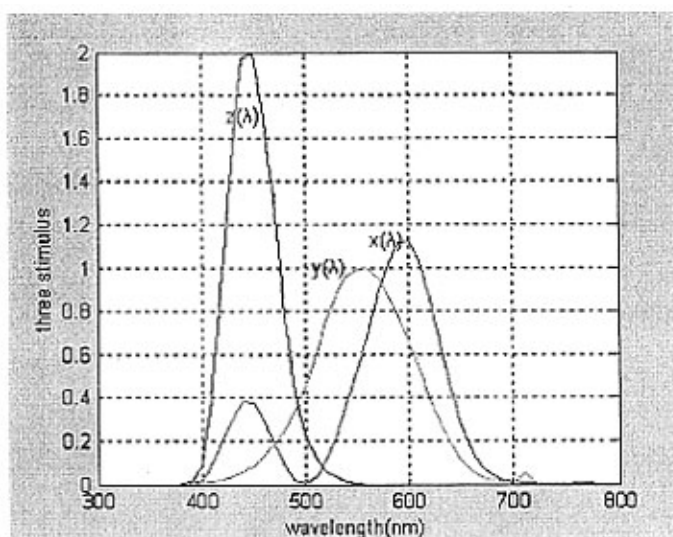


图 2-3 补充标准光谱三刺激值曲线

光谱三刺激值代表了匹配各波长等能光谱刺激所需要的红 (X)、绿 (Y)、蓝 (Z) 三原色的量。从理论上讲, 如果要得到与某一光谱相同的颜色, 只要从三刺激值曲线中对应光谱找到响应的 $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$, 它们的混色便是这一光谱的颜色。在实际的工程应用中, 可以使用三刺激值滤光片代替分光光度计来测量物体的三色坐标。

值得指出的是, 这里给出的光谱三刺激值曲线并不是锥体细胞实际的响应特性, 而是它们的线性变换。在三刺激值 $\bar{x}(\lambda)$ 、 $\bar{y}(\lambda)$ 、 $\bar{z}(\lambda)$ 中, $y(\lambda)$ 与明视觉视见函数 $V(\lambda)$ 一致, 因此, 用 $y(\lambda)$ 曲线可以计算一个颜色的亮度特性。

2. CIE 1931 色品图

CIE 1931 色品图是根据 CIE 1931 XYZ 系统绘制出来的。根据颜色混合原理, 它用匹配某一颜色的三原色比例来规定这一颜色, 图中 x 色度坐标相当于匹配该颜色所需的红原色的比例, y 坐标相当于匹配该颜色所需的绿原色的比例, 而匹配该颜色所需的蓝原色的比例 $z = 1 - x - y$, 所以图中没有 z 坐标。三个色度座标中有一个是不独立的, 因而可以用 (x, y) 直角坐标系来表示各种色度, 这样的平面图形就是 CIE 色度图, 如图 2-4 所示。CIE 1931 XYZ 的颜色空间如图 2-5 所示。

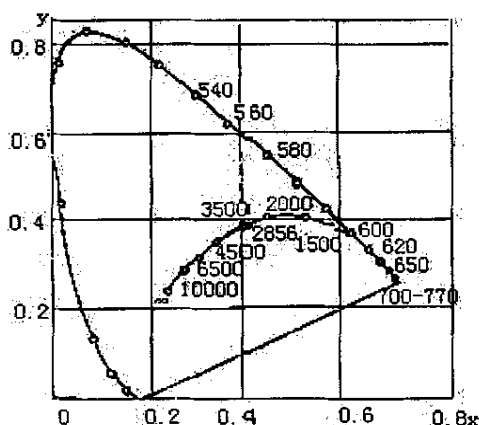


图 2-4 CIE 1931 色品图

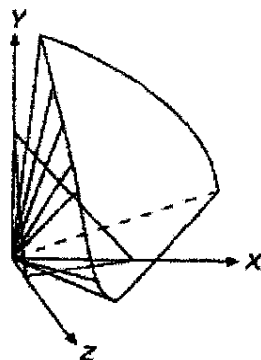


图 2-5 在 CIE 1931XYZ 颜色空间中表示可见的颜色

在色品图中弧形曲线是光谱颜色轨迹，凡是落在光谱轨迹和由红端到紫端直线范围外的颜色是不能由真实光线产生的颜色。由图可见，所有的色谱(可见光谱中包含的一系列单色)都位于马蹄形曲线上，曲线上加注了毫微米标记，以便能根据它们的波长而辨别其单色。在马蹄形内部包含了用物理方法能实现的所有彩色。马蹄形的底部没有给予标记，因为那里是非谱色(各种紫红色，这些彩色不能作为单色出现在光谱上)，对于这些非谱色，波长当然是没有意义的。马蹄形内部的曲线上各点表示相应也颜色光源的相关色温。

需要指出的是，CIE 1931 色品图不能正确反映颜色差别的视觉效果。麦克亚当(D.L.MacAdam)在 CIE 色品图上不同位置选择了 25 个点，确定起眼色辨别的恰可察觉差，实验结果如图 2-6。也就是说该图中距离相等的两对颜色，给人眼引起的视觉色差并不一样，那么如果用 xy 色品图上两个颜色色度点之间的距离作为色彩感觉差别量的度量，就会给人们造成错误的印象，影响到颜色的匹配和色彩复制的准确性，给色彩设计与复制技术增加困难。因此 CIE1931xy 色品图不是一个最理想的色度图。就此，CIE 国际照明委员会做了一系列改进，得到了几种不同的匀色空间，这里就不再赘述。

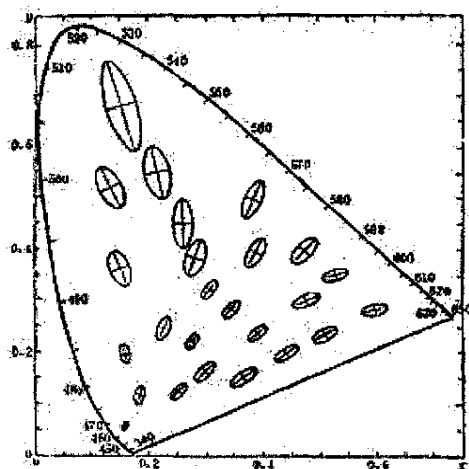


图 2-6 麦克亚当的颜色椭圆形宽容量范围

§ 2.3.2 光源颜色的计算

$$X = k \int_{380}^{780} \varphi(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda$$

$$Y = k \int_{380}^{780} \varphi(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda$$

(2-7)

$$Z = k \int_{380}^{780} \varphi(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda$$

$$X_{10} = k \int_{380}^{780} \varphi(\lambda) \bar{x}_{10}(\lambda) d\lambda$$

$$Y_{10} = k \int_{380}^{780} \varphi(\lambda) \bar{y}_{10}(\lambda) d\lambda$$

(2-8)

$$Z_{10} = k \int_{380}^{780} \varphi(\lambda) \bar{z}_{10}(\lambda) d\lambda$$

在实际计算中，用求和方式：

$$X = k \sum_{380}^{780} \varphi(\lambda) \bar{x}(\lambda) \Delta \lambda$$

$$Y = k \sum_{380}^{780} \varphi(\lambda) \bar{y}(\lambda) \Delta \lambda$$

(2-9)

$$Z = k \sum_{380}^{780} \varphi(\lambda) \bar{z}(\lambda) \Delta \lambda$$

$$\begin{aligned}
 X_{10} &= k_{10} \sum_{380}^{780} \varphi(\lambda) \bar{x}_{10}(\lambda) \Delta \lambda \\
 Y_{10} &= k_{10} \sum_{380}^{780} \varphi(\lambda) \bar{y}_{10}(\lambda) \Delta \lambda \\
 Z_{10} &= k_{10} \sum_{380}^{780} \varphi(\lambda) \bar{z}_{10}(\lambda) \Delta \lambda
 \end{aligned} \tag{2-10}$$

对光源来说, 式中 $\varphi(\lambda)=S(\lambda)$, 即为光源的相对光谱功率分布。

式中 X 、 Y 、 Z 为 1931CIE 系统中的三刺激值, X_{10} 、 Y_{10} 、 Z_{10} 是 CIE1964 补充色度系统中的三刺激值, \bar{x} , \bar{y} , \bar{z} 和 \bar{x}_{10} , \bar{y}_{10} , \bar{z}_{10} 是两个色度系统的光谱三刺激值, 这些值有表格可查。k 和 k_{10} 为调整因数, 由以下公式得到:

$$\begin{aligned}
 k &= \frac{100}{\sum_{\lambda} s(\lambda) y(\lambda) \Delta \lambda} \\
 k_{10} &= \frac{100}{\sum_{\lambda} s(\lambda) y_{10}(\lambda) \Delta \lambda}
 \end{aligned} \tag{2-11}$$

光源在 CIE1931 色度图上的色坐标为:

$$\begin{cases} x = X / (X + Y + Z) \\ y = Y / (X + Y + Z) \\ z = Z / (X + Y + Z) \end{cases} \tag{2-12}$$

在 CIE1960UCS 均匀色度坐标系中的色坐标 u, v 值:

$$\begin{cases} u = 4X / (X + 15Y + 3Z) \\ v = 6Y / (X + 15Y + 3Z) \end{cases} \tag{2-13}$$

§ 2.3.3 光源的色温和相关色温

一个光源发出的光是由许多不同波长的辐射组成, 各个波长的辐射功率也不相同, 光源的光谱功率分布按波长的分布称为光谱功率分布。一定的光谱功率分布表现为一定的光色。我们把光源的光与黑体的光相比较来描述它的光色。

黑体是指在辐射作用下既不反射也不透射, 而能把落在它上面的辐射完全吸收的物体。黑体被加热, 其表面按单位面积辐射的光谱功率的大小及分布完全取决于它的温度。因此, 用黑体加热到不同温度所发出的不同的光色来表达一个光源的颜色, 称为光源的色温。由于有的光源的光色并不能恰好等同于某个温度下的黑体的辐射, 只能用与黑体

具体计算时, 首先要计算出黑体等相关色温族与黑体色轨迹交点的 u 、 v 值。将相关色温线的色温值或色温值倒数, 及其与黑体色轨迹交点的 u 、 v 值做成一表格。根据光源的 u 、 v 值查表找到最近邻的两条等温线 T_1 和 T_2 。再由上述公式计算光源的色温值。

(2) 三角形垂足法

首先用与上述方法类似的步骤查表找到光源色坐标 $S(u,v)$ 最近邻的两条等温线 T_1 和 T_2 , 设两等温线与黑体色轨迹的垂足分别为 $D_1(ub_1,vb_1)$ 、 $D_2(ub_2,vb_2)$ 。从光源色温坐标点 $S(u,v)$ 向 D_1 、 D_2 做垂线, 设垂足为 $D(ub,vb)$, 如图 2-9 所示:

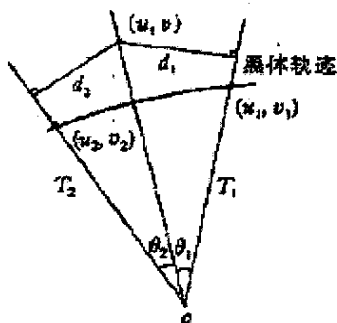


图 2-8 内插法求相关色温图示

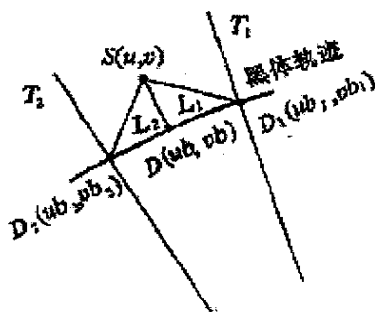


图 2-9 三角形垂足法求相关色温图示

(3) 色温逐次逼近法

色温逐次逼近法是根据实际情况, 凭经验预先设定一起始温度 T_1 。一方面 T_1 的设置不能太接近预期值, 需留有一定的余地, 另一方面为节省计算时间, 不应偏差太大。此外, 要预设增减步长 (例如 $STEP=40K$) 和最小阈值 $GATE$ (如 $GATE=0.0001$)。此阈值表示了光源色坐标点 (u,v) 与待求色温线的接近程度。阈值 $GATE$ 可根据精度要求适当调整。

从 T_1 开始, 计算光源色坐标与该色温线的接近程度 D_1 , 如不满足所设的最小阈值条件 (如 $D_1 > GATE$), 则 T 以步长 $STEP$ 增减 ($T_2 = T_1 + STEP$)。再计算光源色坐标与色温线 T_2 的接近程度, 依次循环运行, 直到满足设定的条件。计算期间, 步 $STEP$ 值应随时进行调整, T 的增减方式与它和光源色坐标 (u,v) 的位置有关。(图 2-10 为此算法的示意图)。

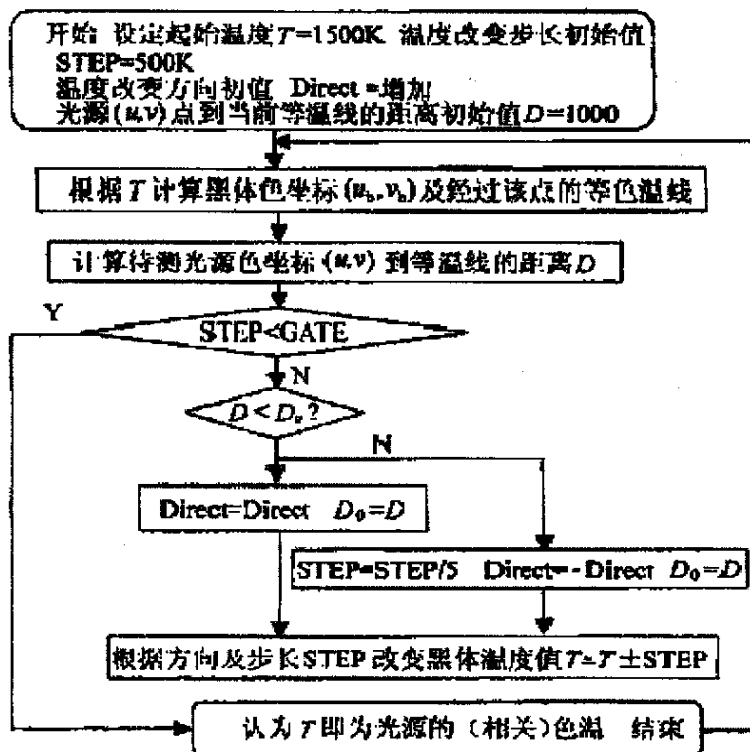


图 2-10 色逐次逼近法的流程

§ 2.3.5 用光电色度计测量色温

光电色度计备有三个接收器，它们的光谱灵敏度分别近似于 CIE 的 $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ 。三个接收器的输出信号经放大和灵敏度调整后可获得三刺激值 X、Y、Z，然后利用公式 2-12 或 2-13 即可求得坐标 x、y 或 u、v。

在具体计算过程中，可用以下近似简便方法。

若将 x,y 色度图上的各等色温线往下延伸，可发现 4000K~10000K 范围内的等色温线会聚在一点上。会聚点以 O 表示，其色坐标为 $x_0 = 0.329$, $y_0 = 0.187$ 。色温在 4000K 以下时，会聚点稍有偏离，但对于一般照明光源的色温范围 2500~8000K，此会聚点的平均色坐标是充分可靠的。

如果被测光源在 CIE 色度图上的色品坐标为 C(x,y), 那么 O 点和 C 点的连线 OC 交等色温线于 B 点，OC 上任意点的斜率倒数都相同，都属于同一色温，因此，由色温图等

色温线的斜率倒数可求得相应的色温 $T[K]$ 。

CIE x,y 色度图中等温线斜率倒数为 A , CIE u,v 均匀色度图中等温线斜率倒数为 A' 。

$$\begin{aligned} A &= \frac{x-0.329}{y-0.187} \\ A' &= \frac{u-0.286}{v-0.245} \end{aligned} \quad (2-16)$$

利用 A 和 A' ，可以推出色温计算的公式。对于 x,y 坐标：

$$T = 669A^4 - 779A^3 + 3660A^2 - 7047A + 5652 \quad (2-17)$$

对于 u,v 坐标：

$$T = 129A'^4 + 613A'^3 + 1975A'^2 - 1376A' + 2310 \quad (2-18)$$

上述公式中,主要的误差来源有两个。一个是由于等温线会聚点的近似值(色坐标), 即 $x_0 = 0.329, y_0 = 0.187$ (或 $u_0 = 0.286, v_0 = 0.245$)。而引起的误差, 即使对偏离完全辐射体轨迹最明显的透明高压汞灯来说, 该项误差也不超过 0.2%, 一般照明光源比透明高压汞灯更接近于完全辐射体轨迹, 因此误差更小。另一误差源是色温与斜率倒数之关系的 4 次方近似而带来的误差, 在 2500~8000K 色温范围内, 这种近似的计算误差不超过 0.1%。综合以上两种误差源, 利用此经验公式计算色温的误差将不超过 0.3%。

参考文献

1. 机械工业部仪器仪表工业局统编. 光学测量. 机械工业出版社, 1985.
2. 吴继宗, 叶关荣. 光辐射测量. 北京: 机械工业出版社, 1992.
3. 颜台永, 光通量测试技术讨论. 中国照明电器. 2001(7).
4. Grum F, Bartleson C J. Optical Radiation Measurements vol, Color Measurement. New York: Academic Press. 1980.
5. 赵田冬, 球形光度计及其测量误差分析. 浙江大学学报:自科版.1998,32(4).
6. 罗宗南, 陈松生. 光源光通量分光法测试. 标准与检测.
7. 荆其诚, 焦书兰. 色度学. 科学出版社, 1979.
8. Ilkka Vallinkoski. The Design and Implementation of a Color Management System. [MS Thesis], Laboratory of Media Technology, Helsinki University of Technology, Finland, 1998.

第3章 系统硬件介绍

整个光谱测量和分析系统由光源和待测对象、光路系统、光谱测量传感器和计算机四个部分组成，如图 3-1 所示。光源为测量提供所需的照明条件；光路系统提供我们测量的光学平台；光谱测量传感器通过光纤探头探测到测量所需的光谱数据；通过 USB 接口将光谱数据传输到计算机，对数据进行进一步的分析和处理。系统中所使用的光谱测量传感器的性能决定了我们这个测量分析系统能探测到的波长范围为 380nm~1100nm，波长分辨率可达 0.5nm，测量时间小于 300ms。能在毫秒量级的时间内完成光谱测量是本系统的一个突出的特点，在硬件上保证了对光谱进行实时监测的条件。

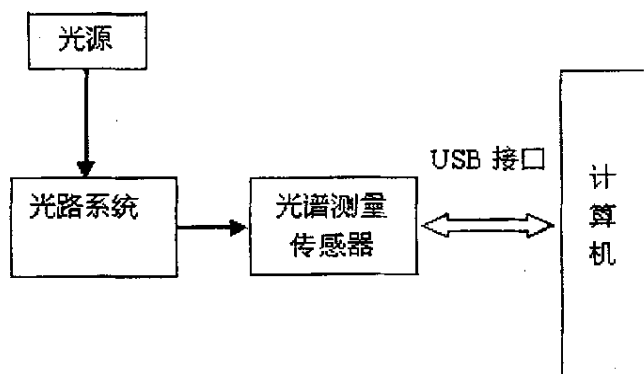


图 3-1 光谱实时测量系统硬件组成

下面将分别对测量系统的各个组成部分详细介绍。

§ 3.1 光路系统结构

我们根据自己的需要，设计了特殊的光路结构，原理图如图 2-1 所示。图 3-2 为我们做好的仪器实物图。

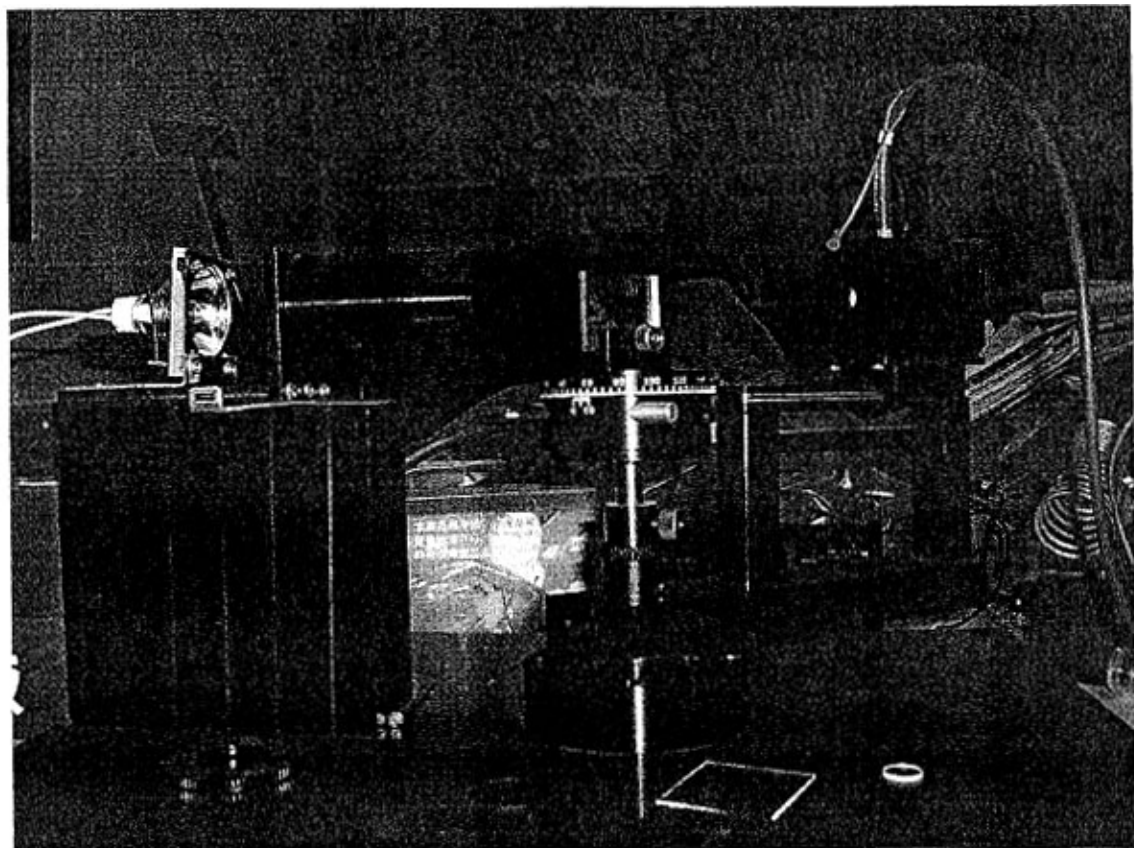


图 3-2 系统硬件实物图

光从光源发出，经过平行光管准直成为平行光入射到光学元件表面上，然后被光学元件折射和透射，光学元件所在的平台可以旋转、上升和下降，因此可以测量不同大小的光学零件，并可以使入射光和光学零件表面成任意的入射角。装有积分球的旋转臂可以绕同一个轴线旋转，使得被光学零件反射和折射的光线能透过积分球上的小孔进入到积分球中。积分球可以在滑行轨道上作一维直线运动，当被测的光学元件如果有聚焦能力的时候，使得积分球能移动到合适的位置，从而使光线全部进入到积分球中。

这套硬件装置的设计是本文的创新点之一，在前言中已经稍微提及到了。光学平台可以任意旋转角度，使得入射光线和所测光学零件平面成任意的入射角，因此能够测量任意角度的反射率，而不仅仅是垂直方向入射的透射率或者反射率。给我们的测量带来了很大的方便。

§ 3.2 光源

在科学研究和工业生产中，凡涉及辐射量和光度量的测试工作，如光源的发光强度、

光通量、光探测器的光谱灵敏度、物体的光度性质以及测光仪器的检测和标定等，一般都要使用标准光源作为测试依据。

标准光源包括两部分：标准灯和与之配套的专用电源。标准灯是经过精心制作和检验的优质灯，经国家计量部门标定并发给相应检定数据和测试证书的方能作为标准灯使用。而标准灯专用电源应确保标准灯的发光强度的稳定性和准确性，提供相应稳定和准确的电流和电压。只有两者极佳的配合，才能获得最佳的标准光源的效果。

§ 3.2.1 标准 A 光源

CIE 推荐的标准照明体 A 代表了绝对温度大约为 2856K 的完全辐射体。钨丝白炽灯的发射率与同一色温的完全辐射体的发射率差别较小，在可见光范围内它们之间的差别小于 1%，在红外部分的差别约为 2%。因此，CIE 规定以色温为 2856K 的钨丝白炽灯作为标准光源 A。通常，白炽灯的钨丝不能工作在较高的温度，近年来研制了一类新型的白炽灯——卤钨灯，它的外壳用石英材料制成，灯内充入一定量的卤化物，由于卤化物与蒸发的钨产生化学反应，并能使钨重新回到钨丝上去，使灯可以工作在较高的温度上，寿命较长，发光效率高，其相对光谱功率分布与完全辐射体更加接近，在紫外部分的辐射比常用的钨丝灯强。本系统所使用的标准 A 光源为德国 OSRAM 公司生产的卤钨灯，其工作参数及技术指标如下。

产品名称：标准灯(参考电压 24V)

标定电流：2.121A

标定色温：2856K

标定光通量：786.8lm

§ 3.2.2 标准灯稳流电源供电和稳压电源供电方案比较

标准灯发光强度的稳定性和准确性除了与其灯具本身质量有关外，还取决于供电电源的稳定性和准确性。电源的参数对于标准灯发光强度的影响可由下式体现：

1. 工作电压对发光强度的影响：

$$\frac{dI}{I} = 3.6 \frac{dU}{U} \quad (3-1)$$

式中 $\frac{dI}{I}$ 为发光强度的变化, $\frac{dU}{U}$ 为工作电压的变化, 若要求发光强度的变化 $\frac{dI}{I} \leq 0.005$, 则要求电压的变化 $\frac{dU}{U} \leq 0.0014$ 。

2. 工作电流对发光强度的影响:

$$\frac{dI}{I} = 6 \frac{di}{i} \quad (3-2)$$

式中 $\frac{di}{i}$ 为电流的变化。若要求发光强度的变化 $\frac{dI}{I} \leq 0.005$, 则要求电流的变化 $\frac{di}{i} \leq 0.00083$ 。

上述结果表明标准灯工作电流的变化对发光强度的影响更灵敏, 因此给标准灯供电时, 采用稳流电源供电比稳压电源供电更合理和优越。

上述结论在实践中得到很好的证明, 如用稳压源供电, 200W 钨丝灯每工作 40 小时出现 1% 光通量的衰减; 而用稳流源供电, 光通量变化仅为 $\pm 0.25\%$ 。图 3-3 示出了某一标准灯实验曲线, 从中清楚地看出稳流源供电方式优于稳压源供电方式。

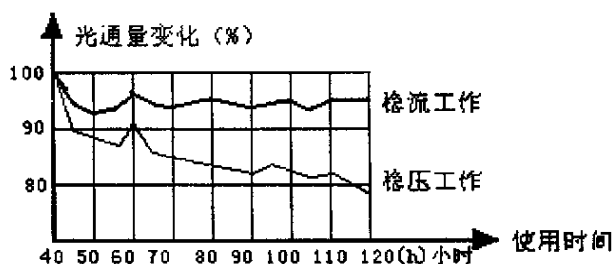


图 3-3 某一标准灯在稳压源

§ 3.2.3 电压冲击对灯丝的影响

电阻 $R = \rho \frac{L}{S}$ 式中的电阻率 ρ , 它与导体材料的性质有关, 当温度改变时, 导体的电阻率也要改变, 几乎所有的金属导体的电阻率 ρ 都与温度近似地有以下关系 $\rho = \rho_0(1 + \alpha t)$, ρ_0 是 0°C 时的电阻率, α 称为电阻温度系数, 而钨的 $\rho_0 = 5.18 \times 10^{-8} \Omega\text{m}$, $\alpha = 4.5 \times 10^{-3}$

K^{-1} , 以 220V、100W 的白炽灯为例, 在工作时的温度近 2500°C , 额定电流 $i_{2500^{\circ}\text{C}}=0.455\text{A}$, 电阻 $R_{2500^{\circ}\text{C}}=484\Omega$ 。 $\rho_t=\rho_0(1+\alpha t)$, $\rho_{2500^{\circ}\text{C}}=\rho_0(1+\alpha*2500)=12.25\rho_0$, $R_{2500^{\circ}\text{C}}=12.25R_{0^{\circ}\text{C}}$, 所以 $i_{0^{\circ}\text{C}}=12.25I_{2500^{\circ}\text{C}}$, 即在 0°C 时对白炽灯突然加上额定电压时的冲击电流是温度为 2500°C 时工作电流的 12.25 倍。

标准器件作为定标系统来讲, 是非常宝贵的。因此, 如何保持标准灯的稳定性和准确性和长寿命是定标系统设计和使用中首先考虑的问题。对标准光源来讲, 除应采用稳流源供电外, 在使用中还切忌电压(或电流)冲击。所谓电压(电流)冲击, 是指突然给灯丝施加不超过损坏程度的较高电压(电流)。因为灯丝在通电时产生热膨胀, 断电时产生热收缩, 如工作电压或电流突然施加给灯具, 灯丝受到冲击其机械结构发生变化, 这是影响灯的稳定性和寿命的重要因素之一。所以, 使用标准灯时应具有软启动特性, 即开始工作时应逐渐地从零电流或零电压增加, 关机时, 也应逐渐降低电流或电压, 然后再关。在实际应用时通常规定开机时间为 15 秒~25 秒钟, 电流(或电压)从零到达额定值。关机时也是一样。这样可避免过急的热胀冷缩给灯丝造成的损坏。这对延长灯的寿命有着重要的作用。

§ 3.2.4 电源总体设计

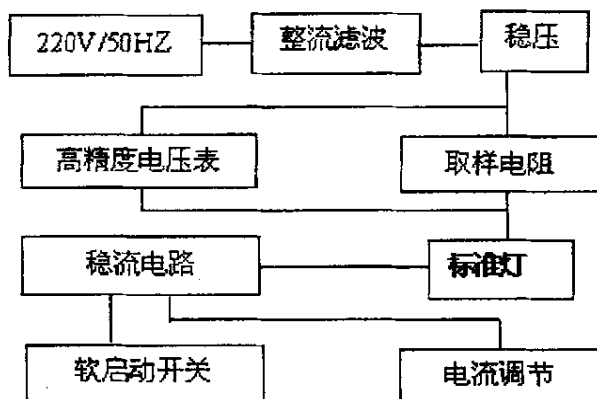


图 3-4 标准电源方框图

基于上述考虑设计了标准灯精密稳流电源, 采用稳流源供电和软启动工作方式。总体框图如图 3-4 所示。

交流电源通过整流、滤波变成直流电, 通过稳流电路实现电流的稳定。

软启动工作方式是指开机后只有在启动开关按钮压进时电流逐渐上升，按钮放松后电流逐渐下降。方框如图 3-5 所示。

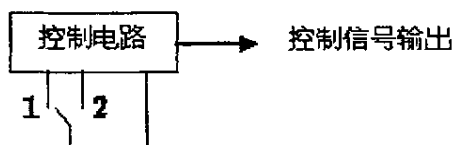


图 3-5 启动电路

过渡时间的长短由电路参数决定，多圈电位器实现电流的调节，用户第一次使用时通过多圈电位器由零慢慢地调至电流的额定值。以后每次开机时只有开关 K 在 1 处，则开机后输出电流能自动由零慢慢地上升到额定值，关机时只要开关 K 打到 2 处则输出电流能自动由额定值慢慢地下降到零。

§ 3.2.5 电源主要技术指标：

输入：220V \pm 5%

输出：工作电流范围：0~7.000A

工作电压范围：22V~26V

电流稳定度： 2×10^{-4}

具有软启动工作方式：

慢升：压入启动开关，开机后约 25 秒电流由 0 慢慢升高到设定值；

慢降：弹出启动开关，电流由设定值慢慢下降 0，然后关机，可提高了灯泡的寿命。

§ 3.2.6 电源使用方法

为使电源更稳定，建议输入的交流电压调至 220V，电源保险丝为 2A。

1) 稳流电源输出通过仪器后盖板上的电缆线接至标准灯。

注意：仪器输出绝对不能短路，否则电源功率管将烧坏。

压入启动开关，开电源开关，电流由 0 慢慢升高，约 25 秒到设定值。设定值可通过电流调节电位器设定。

- 2) 关机前，弹出启动开关，电流由设定值慢慢下降至0，然后关电源。
- 3) 面板上有两只电流调节电位器，左边是粗调，右边是微调。两个表头显示的分别是当前工作的工作电流(表头下显示的为Current)和工作电压(表头下显示的为Voltage)。
- 4) 当第一次工作电流调整好后，以后工作时一般不用再调，开机即可工作，最多进行微调即可。

§ 3.3 光谱测量传感器

在测量系统中采用了美国 Ocean Optics 公司的 USB2000 微型光纤光谱仪，它是一款 USB 接口的即插即用型光谱仪，如图 3-6 所示。

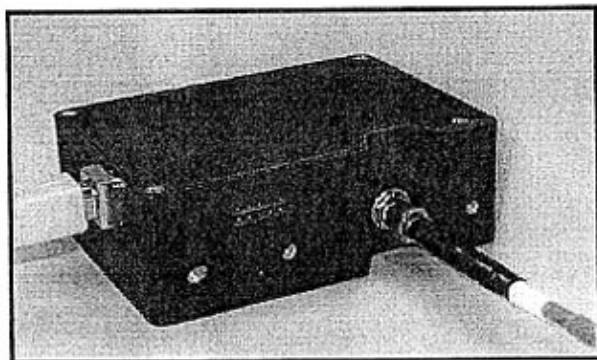


图 3-6 USB2000 微型光纤光谱仪

该光谱测量传感器以平场全息凹面光栅为核心、CCD 阵列接收元件，该还使用了光纤把样品产生的信号光传导到光谱仪的光学平台中。由于光纤的耦合非常容易，所以很方便地搭建起由光源、取样附件和光纤光谱仪组成的测量系统。该光谱仪器和计算机的连接采用 USB (Universal Serial Bus, 通用串行总线)，真正支持即插即用，对于一般用户来说 USB 接口是最好的选择，它所需要的电源可以直接从主板 USB 接口中得到，不再需要笨拙的独立电源转换器。

该光谱测量传感器的波长测量范围为 380nm~1100nm，波长分辨率可达 0.5nm，测量时间小于 300ms。能在毫秒量级的时间内完成光谱测量是 USB2000 型光谱仪的一个突出的特点，在硬件上保证了对光谱进行实时监测的条件。

该款光谱仪器的特点是：集准直、色散和汇聚于一体，仪器结构简单且小巧；实现

了多通道检测；没有机械扫描部分，使得仪器的可靠性、重复性、测量速度都大为提高；由计算机分析处理测量结果，提高了仪器的自动化程度，扩展了测量功能。

表 3-1 USB2000 微型光纤光谱仪主要性能参数

Integration Time	3 milliseconds to 65 seconds
Effective Range	200-1100UM
dynamic Range	2×10^8
Optical Resolution(FWHM)	0.3-10.0NM FWHM
Sensitivity	86 photons/count; 2.9×10^{-17} joule/count; 2.9×10^{-17} watts/count
Single-to-Noise	250:1-single acquisition at full signal
Readout Noise(Single dark spectrum)	3.5 counts RMS,20 counts peak-to-peak
Stray Light	<0.05% at 600nm; <0.10% at 435nm, <0.10% at 250nm
Detector	Sony ILX511 -2048-element,linear silicon CCD array
Input Fiber Connector	SMA 905

下面来对这款光谱仪器的结构以及一些使用时需要注意的地方做一些简单的介绍。

§ 3.3.1 光学平台

该公司的 USB2000 系列光谱仪采用对称式 Czerny-Turner 光学平台设计，焦距有 45mm 和 75mm 两种。信号光由一个标准的 SMA905 接口进入光学平台，经一个球面镜准直，然后由一块平面光栅分光，经由第二块球面镜聚焦到一块一维线性探测器阵列上，如图 3-7 所示。

光学平台内包括很多元件，可以根据不同的应用选择不同的配置。这些元件的选择对光谱仪的参数影响非常大，如衍射光栅、入射狭缝、消二级衍射效应滤光片和探测器

镀膜等。

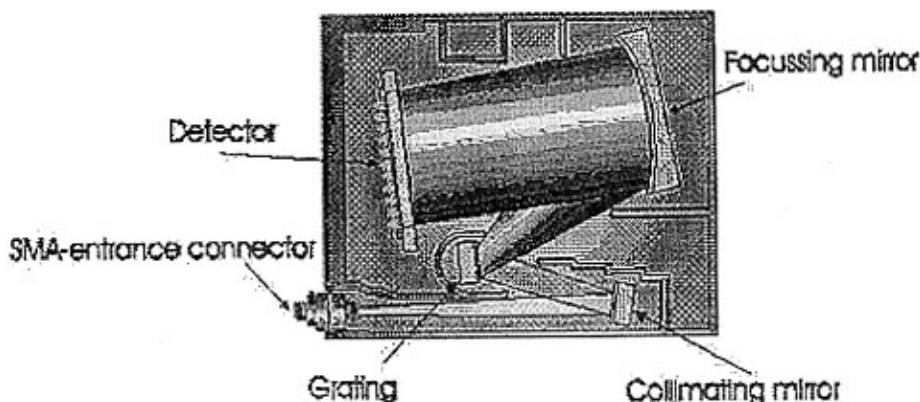


图 3-7 USB2000 光学平台设计图

§ 3.3.2 探测器

USB2000 光谱仪有多种探测器，目前在 200-1100nm 波长范围内主要提供 CCD、CMOS 和光电二极管阵列，在 NIR 范围则使用 InGaAs 阵列。我们选用的是具有 CCD 探测器的光谱仪。

CCD 探测器中储存着电荷，而当光子打到光敏面时电荷就会被释放。在积分时间的结尾，剩余的电荷就会传送到缓冲器中，然后这个信号被传送到 A/D 转换卡。

CCD 探测器的优点是象元数多（2048）、灵敏度高、响应速度快；缺点是信噪比低。

§ 3.3.3 灵敏度

探测器象元在特定波长处的灵敏度定义为照射到该象元上的单位辐射度所产生的电信号输出。对于一个给定的 A/D 转换卡来说可以理解为每毫焦耳入射光能量所产生的记数。而入射到光谱仪中的信号光能量与照射到单个探测器象元上的光能量之间的关系则主要取决于光谱仪光学平台的结构设计，主要影响因素有光栅的效率、入射光栅或狭缝的尺寸、光学镜片的性能、是否使用探测器集光透镜等。一个固定配置的光谱仪可以测量的动态范围可以高达六、七十倍。表 3-2 中的灵敏度是针对我们选择的 USB2000 光谱仪使用的探测器，单位是每毫秒积分时间内记数。

表 3-2 探测器参数表

探测器	SONY2048
类型	CCD 线性阵列
象元数, 间距	2048, 14 μm
象元宽度/高度	14 \times 56 μm
灵敏度 (AvaLight-H AL, 8 μm 光 纤, 每 ms 积分 时间内的记 数)	5000(USB2000-2048)
峰值波长	500nm
信噪比	250:1
暗噪声	10 个记数
波长范围	200-1100nm
频率	2MHz

§ 3.3.4 杂散光和二级衍射效应

杂散光是非信号波长的光辐射照射在探测器象元上产生的误差信号, 杂散光的来源是:

- 周围环境光辐射;
- 非完美光学元件所产生的散射光或非光学元件产生的反射光;
- 不同衍射级次间的重叠;

把光谱仪安装在光密封的外壳内可以有效地消除周围环境带来的杂散光。

当光谱仪工作在探测极限时(微弱光探测), 来自于光谱仪内部和光栅、聚焦镜的杂散光就决定了光谱仪的最终探测极限。USB2000 光谱仪典型的杂散光参数是 $<0.05\% @ 600\text{nm}$; $<0.1\% @ 435\text{nm}$; $<0.1\% @ 250\text{nm}$ 。

对于低线对数光栅(宽可测波长范围)来说, 往往会发生光栅的二级衍射光之间的重叠。消除的方法可以通过在光谱仪入射 SMA 接口处安装一个长带通滤光片或在 HAM1024 或 SONY2048 探测器上镀特殊膜来实现。

§ 3.3.5 光纤

本系统所使用的光纤外形如图 3-8 所示。



图 3-8 光纤外型图

光纤通过标准 SMA905 接头与光谱仪器连接。

§ 3.4 积分球

在探测相对辐射分布时，我们需要用到积分球。

积分球又称为光度球，是一个球形空腔，一般由两个内壁涂有白色漫反射层（硫酸钡）的半球壳组成。球内放置被测光源。光源发出的光经过球壁多次反射后，使整个球壁上的照度均匀分布。故通过球壁上的窗口射到光电探测器上的光能量应正比于光源发射的总光通量。

其外形如图 3-9 所示，由两个直径为 1.2 米的半球形铸铁组成，内部有两个电光源插座：一个用于接标准 A 光源，该插座的另一端接高精度标准 A 光源稳流电源的输出信号。其输出为直流信号，输出信号范围如下：

工作电流范围： 0~7.000A

工作电压范围： 22V~26V

电流稳定度： 2×10^{-4}

另一个插座用于接待测光源，该插座的另一端直接接 220V 交流信号。其输出为 220V 交流信号。



图 3-9 积分球外形图

可通过球体左侧的把手打开积分球，灯具安装好后，关闭积分球，即可进行光源参数的测量。测量时，要先把探测器插入到如图 3-10 所示的插孔里(为保证测量精度，探测器要尽量往里伸)。

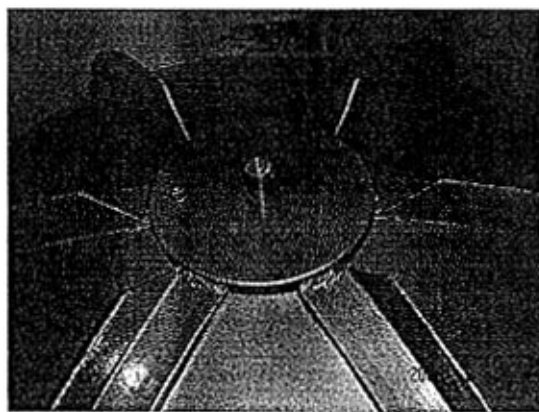


图 3-10 积分球体上探测器的插孔

§ 3.5 计算机配置要求

为适应新时代科技和产业的发展要求，计算机已成为光谱测量系统一个不可分割的组成部分，它充分扩展了光谱测量技术的应用领域，促使光谱仪器向高、精、尖的目标发展。

§ 3.5.1 硬件要求

基于光谱实时测量的色度、光度、光学介质特性测量系统的最低的硬件配置：

CPU：Pentium 166MHz

硬盘：10G

内存：64M

其它：光驱，USB 接口

§ 3.5.2 软件要求

Microsoft 公司的 Windows 系列操作系统（Win95，Win98，Win2000 或 WinXP），同时由于为了满足系统的数据管理功能，要求安装有 SQL Server 数据库管理软件。

参考文献

1. 吴国安. 光谱仪器设计. 科学出版社, 1978.
2. Ocean Optics, Operating Manual and User's Guide(USB2000 Miniature Fiber Optic Spectrometers and Accessories), 2000.

第4章 系统软件介绍

对于测试分析系统来说，系统配套分析软件是该系统的灵魂。系统的自动化程度、人机交互性能、分析精度优良等等都取决于系统分析软件，因此，分析软件的好坏直接影响了整个系统的性能好坏。为了充分展现本光谱实时测量系统的强大功能，我们开发了相应的系统配套软件。同时，该软件具有开放性，可用于其它光谱测量系统，作为分析软件使用，而且还具有可扩展性，能根据硬件的变化而不断增加新的功能。

这套软件的开发是本课题的创新点之二，根据我们测量的需要，在光谱测量的基础上，集成了各种功能，可进行光源的相对辐射强度分布、光通量、色温，色坐标等参数的测量，还可对样品进行透反射率的测量。因此功能非常强大，而且还可以不断扩展，根据日后的需要不断得增加新的功能。

本配套软件是在 Windows 2000 环境下应用 Microsoft 公司 Visual C++6.0 开发环境进行开发的，软件采用标准的 Windows 操作界面，所有操作都能通过下拉式菜单完成，可以在 Windows98，Windows2000 和 Window XP 操作系统下运行。下面就本分析软件的模块结构、主要功能、特点和使用等做详细介绍。

§ 4.1 软件模块结构

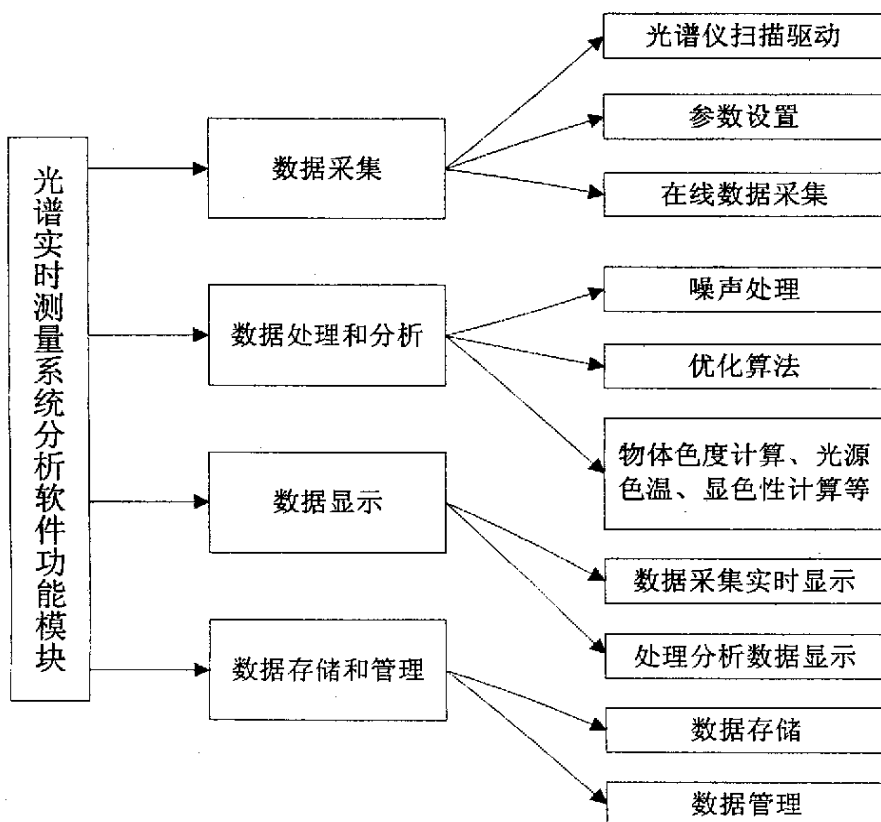


图 4-1 程序总体功能模块框图

对于本光谱测量及分析系统的配套软件，从功能上考虑，主要包括数据采集，数据处理和分析、数据显示、以及数据存储和管理等四大功能模块，在这些模块中，有分别有一些各自的模块来实现具体的功能，如图 4-1 所示。

这几大功能模块在本光谱分析系统中相辅相成，共同完成了这个分析软件的强大功能。下面分别具体介绍四大功能模块各自负责实现的功能。

§ 4.2 软件功能介绍

§ 4.2.1 参数设置

1. 光谱仪配置设置

具体参见本论文第 5 章§5.1.2。

2. 打开配置和保存配置

菜单： 设置 | 打开配置

工具栏： 无

点击该菜单项，系统打开“打开文件”对话框，选取与光谱仪器相应的配置文件，点击“打开”按钮读入光谱仪器配置文件。

菜单： 设置 | 保存配置

工具栏： 无

点击该菜单项，系统打开“保存文件”对话框，输入合适的文件名称，点击“保存”按钮，把当前的光谱仪器配置参数保存到文件。

3. 待测光源参数设置

菜单： 视图 | 光源参数设定

工具栏： 无

点击该菜单项，系统打开“设置光源编号”对话框，如图 4-2 所示。允许用户输入当前待测光源的编号，并选择相应的参数信息，如产品型号、生产厂家、工作电流、工作电压等参数。

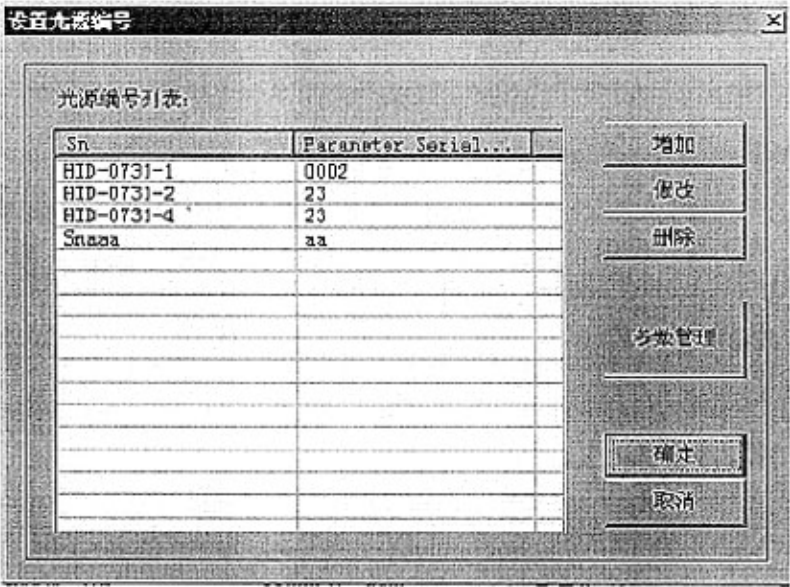


图 4-2 光源编号设置对话框

4. 标准灯参数设置

菜单： 捕获 | 标准灯参数

工具栏： 无

点击该菜单项，系统打开“标准灯参数”设置对话框，如图 4-3 所示：

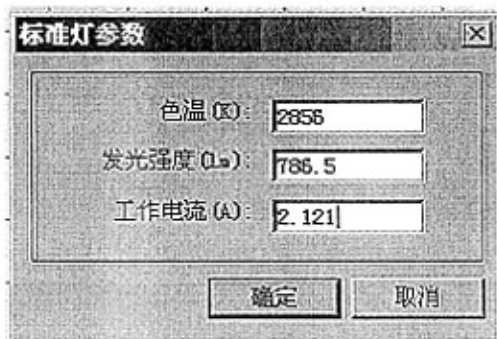



图 4-3 标准灯参数设置对话框

其中工作电流为在标准灯的额定工作电流；色温和光通量分别为标准光源的工作在额定工作电流下测得的色温值和光通量值。

5. 采样参数设置

菜单： 捕获 | 采样参数设置

工具栏： 

点击该菜单项，系统打开“采样参数”设置对话框，如图 4-4 所示。：

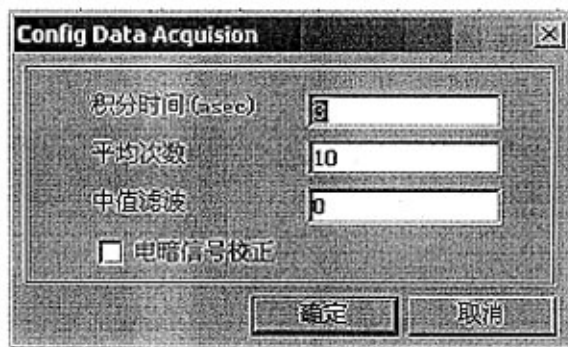



图 4-4 系统采样参数设置对话框

§ 4.2.2 在线数据采集

1. 捕获暗光谱


菜单： 捕获 | 捕获暗光谱

工具栏： 

在示波器模式下，点击该菜单项或相应的工具栏按键，捕获当前光谱数据作为当前测量的暗光谱。暗光谱的测量是在光源关闭或者完全挡住入射光的情形下测得的。在进行样品光谱数据测量时，必须先捕获暗光谱。若要永久保存暗光谱，可点击“保存暗光谱”菜单项保存当前捕获的暗光谱数据。注意：若采样参数发生改变，必须重新测量暗光谱。

2. 捕获参考光谱


菜单： 捕获 | 捕获参考光谱

工具栏： 

在示波器模式下，点击该菜单项或相应的工具栏按键，捕获当前光谱数据作为当前测量的参考光谱。参考光谱的测量是在参考光源打开的情况下测得的。在进行反射率测量、透过率测量及相对辐射分布测量时，必须先捕获参考光谱。若要永久保存参考光谱，可点击“保存参考光谱”菜单项保存当前捕获的参考光谱数据。若采样参数发生改变，必须重新测量参考光谱。

3. 捕获样品光谱

菜单： 捕获 | 捕获样品光谱

工具栏： 

点击该菜单项或相应的工具栏按键，捕获当前样品光谱数据。并可打开“Color View”分析界面，进行色度参数的计算及分析。若要永久保存该待测光谱，可点击“保存样品光谱”菜单项保存当前捕获的样品光谱数据。

4. 重新测量

菜单： 捕获 | 重新测量


工具栏： 无

点击该菜单项，在不改变采样参数的前提下，重新启动采样循环。

§ 4.2.3 噪声处理

1. 减去暗光谱模式

菜单： 捕获 | 减去暗光谱模式

工具栏： 

点击该菜单项或相应的工具栏按键，监视器窗口的显示模式切换为减去暗光谱模式，即监视器窗口中显示的数据为直接从光谱仪器 A/D 转换器中获得的数据减去暗光谱的数据。必须先捕获暗光谱数据或从数据库中加载已有的暗光谱数据，才能在该模式下工作。

2. 杂散光校正

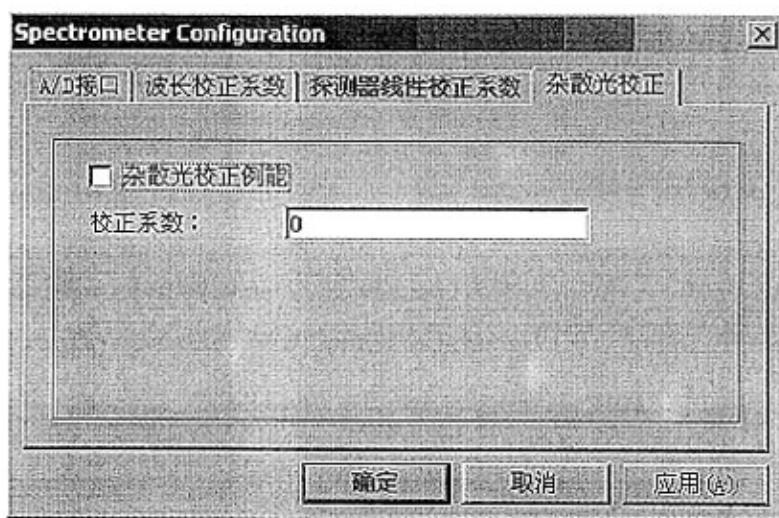



图 4-5 杂散光校正配置面

允许用户使能光谱仪器的杂散光校正并设置杂散光校正系数，或者取消光谱仪器的杂散光的校正。

§ 4.2.4 数据实时显示

菜单： 捕获 | 示波器模式

工具栏： 


点击该菜单项或相应的工具栏按键，监视器窗口的显示模式切换为示波器模式，即

监视器窗口中显示的数据为直接从光谱仪器的 A/D 转换器中获得的数据。可在示波器模式下调整采样参数，如积分时间等（使待测数据在探测器的合适的量程范围内，通常测得数据的最大值在 3500 点左右最合适），并进行暗光谱及参考光谱数据的捕获。

§ 4.2.5 处理分析数据显示

1. 监视器视图

菜单： 视图 | 监视器视图

工具栏： 

点击该菜单项或相应的工具栏按键，打开监视器窗口，如图 4-6 所示，实时观察探测器测得的数据。工作模式不同，监视器窗口中显示的数据类型也不同。当工作模式为“示波器模式”时，监视器窗口中显示的为从光谱仪器探测器中直接得到的未经处理的数据；当工作模式为“减去暗光谱模式”时，监视器窗口中显示的为从光谱仪器探测器中得到的数据减去暗光谱后的结果，仅当成功捕获暗光谱或加载暗光谱数据之后才能工作在此模式；当工作模式为“反射率模式”时，监视器窗口中显示的为待测样品的反射率数据，仅当成功捕获暗光谱、参考光谱数据或加载暗光谱、参考光谱数据之后，并且已加载标准反射镜的反射率数据后，才能工作在此模式；当工作模式为“透射率模式”时，监视器窗中显示的为待测样品透射率数据，仅当成功捕获暗光谱、参考光谱数据或加载暗光谱、参考光谱之后，才能工作在此模式。当工作模式为相对辐射分布测量模式时，监视器窗口中显示的为待测辐射源的相对辐射分布数据，仅当成功捕获暗光谱、参考光谱或加载暗光谱、参考光谱数据之后，并且正确设置了标准灯的参数，如色温、光通量的值，才能工作在此模式。

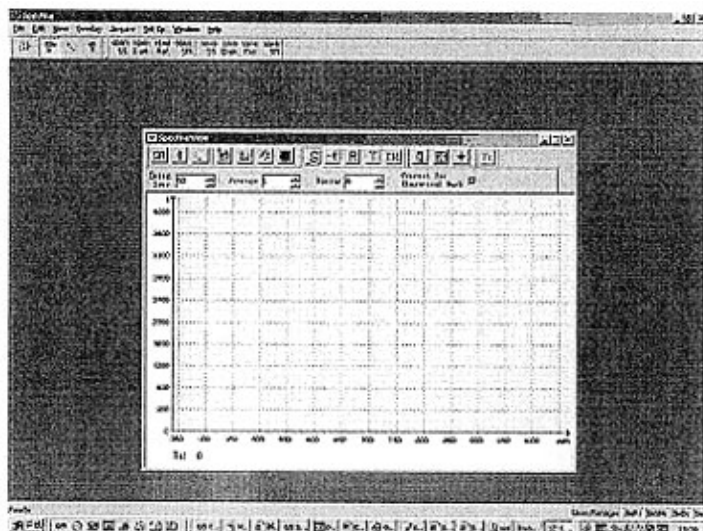


图 4-6 监视器视图用户界面

2. 颜色视图

菜单： 视图 | 颜色视图

工具栏：



点击该菜单项，打开颜色测量窗口，如图 4-7 所示，观察分析探测器测得的待测数据分布及相应的颜色参数，包括测量参数及色坐标值，光通量等。

其中，

“光谱分布”图：为探测器测得的数据分布。

积分时间、平均次数、中值滤波和电暗信号校正：为测量时设置的探测器的积分时间、平均次数、中值滤波和电暗信号校正的值。

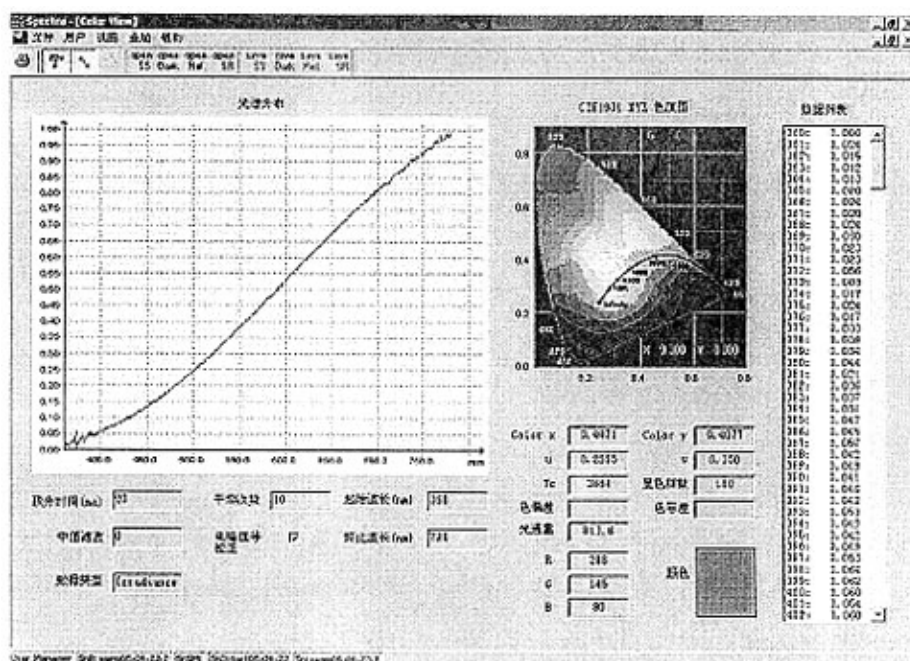


图 4-7 颜色视图用户界面

数据类型：显示在“光谱分布”图中的数据类型，分别为：Spectrum（直接从探测器测得的，未经定标的数据）、Reflectance（反射率）、Transmittance（透射率）及 Irradiance（定标后的光源的相对辐射强度）。

起始波长、终止波长：分别为进行色度参数计算时使用的起始波长及终止波长，单位为 nm。

x, y, u, v : 分别为 CIE1931XYZ 色度空间及 1960 均匀色度空间的色坐标的值。

T_c : 为待测光源的相关色温值。

显色指数：为待测光源的显色指数。

光通量：为待测光源的光通量的值，单位为流明。

R, G, B: 分别为待测光源或待测物体颜色对应的 R、G 和 B 的值。

数据列表：列出了在不同波长处对应的实际数据。

3. 光谱视图

菜单: 视图 | 光谱视图

工具栏:



点击该菜单项或相应的工具栏按键, 打开光谱视图窗口, 如图 4-8 所示, 观察探测器测得的整个量程范围内的光谱数据 (包括反射率数据、透过率数据及光源的相对辐射分布数据) 及相应的测量参数。

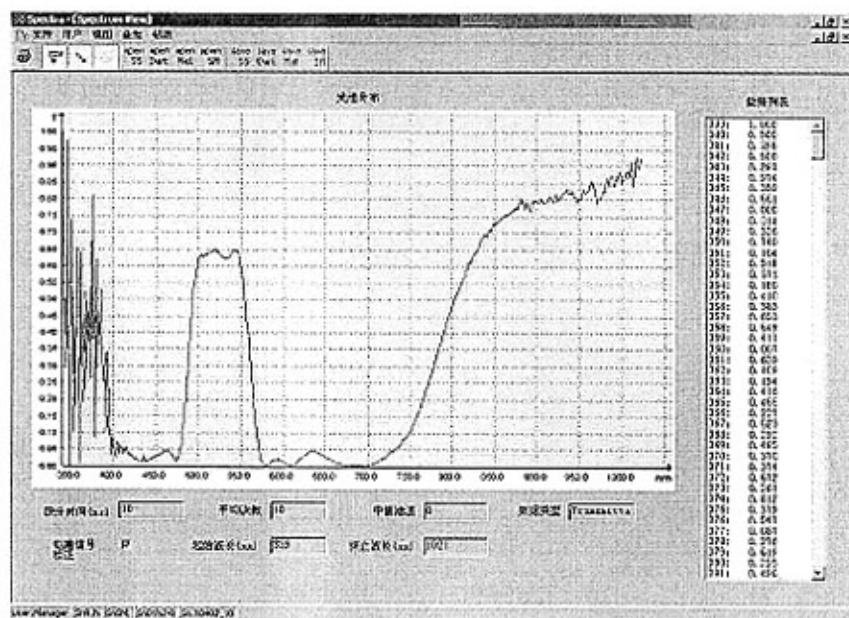


图 4-8 光谱视图用户界面

其中,

“光谱分布”图: 为探测器测得的数据分布。

积分时间、平均次数、中值滤波和电暗信号校正: 为测量时设置的探测器的积分时间、平均次数、中值滤波和电暗信号校正的值。


数据类型: 显示在“光谱分布”图中的数据类型, 分别为: Spectrum (直接从探测器测得的, 未经定标的)、Reflectance (反射率)、Transmittance (透射率) 及 Irradiance (定标后的光源的相对辐射分布)。

起始波长、终止波长: 分别为进行色度参数计算时使用的起始波长及终止波长, 单位为 nm。

数据列表: 列出了在不同波长处对应的实际数据。

4. 反射率模式


菜单： 捕获 | 反射率模式

工具栏： 

点击该菜单项或相应的工具栏按键，监视器窗口的显示模式切换为反射率测量模式。必须在暗光谱及参考光谱捕获之后并读入或打开标准反射镜的反射率数据，或者直接从数据库中读入已有的参考光谱数据，才能工作在该模式下。

5. 透射率模式


菜单： 捕获 | 透射率模式

工具栏： 

点击该菜单项或相应的工具栏按键，监视器窗口的显示模式切换为透射率测量模式。必须在暗光谱及参考光谱捕获之后或从数据库中直接装入已有的参考光谱数据，才能工作在此模式下。

6. 相对辐射分布测量模式

菜单： 捕获 | 相对辐射分布测量模式


工具栏： 

点击该菜单项或相应的工具栏按键，监视器窗口的显示模式切换为相对辐射分布测量模式。通过“捕获/标准灯参数”菜单项设置标准灯的色温值及光通量值，并在暗光谱及参考光谱捕获之后才能进行(也可直接从数据库中通过“文件/加载参考光谱”菜单项装入相应的参考光谱数据)。

§ 4.2.6 数据储存

1. 保存样品光谱

菜单： 文件 | 保存样品光谱


工具栏： 

该菜单项用于保存测得的光谱数据(包括光谱分布数据、反射率数据、透射率数据或辐射源的相对辐射分布数据)。当捕获被测数据后，点击该菜单项或相应的工具栏按键，

系统依次保存暗光谱数据、(若当前测量的为反射率数据,则还需保存标准反射镜的反射率数据)、参考光谱数据及被测的样品光谱数据,并弹出相应的对话框,要求用户输入各记录数据的序列号(即为各记录的编号,为便于查询和理解,编号中可加入测量日期等信息);若暗光谱数据、标准反射镜反射率数据或参考光谱数据已被保存过,则不重复保存。注意各序列号是唯一标识各记录的,因些不能重复。若输入的记录序列号与数据库中已有的记录序列号相同时,系统弹出警告对话框,要求重新输入记录的序列号。仅当暗光谱数据、标准反射镜反射率数据及参考光谱数据成功保存时,才能保存相应的待测的光谱(或透射率、反射率)分布数据。

2. 保存暗光谱


菜单: 文件 | 保存暗光谱

工具栏: 

该菜单项用于保存测得的暗光谱数据。当测得暗光谱数据后,若需要保存,点击该菜单项或相应的工具栏按键,系统弹出允许用户输入暗光谱序列号的对话框,用户输入暗光谱序列号后,即保存该暗光谱数据。若该暗光谱数据已被保存过,则不重复保存。注意序列号是唯一标识各记录的,因些不能重复。若输入的记录序列号与数据库中已有的记录序列号相同时,系统弹出警告对话框,要求重新输入记录的序列号。

3. 保存参考光谱


菜单: 文件 | 保存参考光谱

工具栏: 

该菜单项用于保存测得的参考光谱数据。当测得参考光谱数据后,点击该菜单项或相应的工具栏按键。系统将先保存暗光谱数据(若当前系统用于测量反射率数据,系统还将保存标准反射镜的反射率数据),然后再保存参考光谱数据。并弹出相应的对话框,要求用户输入各记录数据的序列号;若暗光谱数据、标准反射镜反射率数据已被保存过,则不重复保存。注意各序列号是唯一标识各记录的,因此不能重复,若输入的记录序列号与数据库中已有的记录序列号相同时,系统弹出警告对话框,要求重新输入记录的序列号。仅当暗光谱数据、标准反射镜反射率数据成功保存时,才能保存相应的参考光谱数据。

4. 保存标准反射镜反射率

菜单： 文件 | 保存标准反射镜反射率

工具栏：

当系统用于测量反射率时,该菜单项用于保存系统使用的标准反射镜的反射率数据。当成功装入标准反射镜的反射率数据后,点击该菜单项或相应的工具栏按键,系统弹出相应的对话框,要求用户输入该记录的序列号,并保存该标准反射镜的反射率数据。注意各序列号是唯一标识各记录的,因此不能重复。若输入的记录序列号与数据库中已有的记录序列号相同时,系统弹出警告对话框,要求重新输入记录的序列号。

§ 4.2.7 用户管理

1. 系统用户初始化

菜单： 用户 | 系统用户初始化

工具栏： 无

点击该菜单,设置初始系统用户,该菜单项仅在第一次运行该程序时执行一次即可,且仅系统管理员(其登录帐户为 sa 的)具有此项功能。

2. 用户管理

菜单： 用户 | 用户管理

工具栏： 无

点击该菜单,打开“用户管理”对话框,用于增加、修改或删除系统用户,仅系统管理员(其登录帐户为 sa)具有用户管理功能。

(1) “用户管理”对话框

“用户管理”对话框用于增加、修改或删除系统用户,并设置相应的用户权限。如图 4-9 所示。

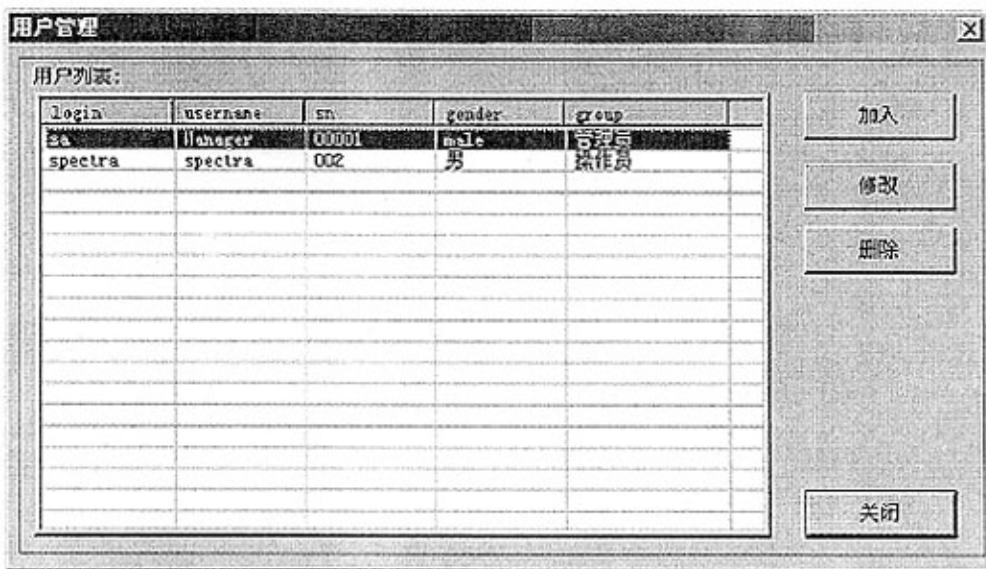


图 4-9 用户管理对话框

(2) “增加/修改系统用户”对话框

“增加/修改系统用户”对话框用于新增系统用户或修改已有用户信息，如图 4-10 所示。



图 4-10 增加/修改系统用户对话框

3. 修改密码

菜单： 用户 | 修改密码

工具栏： 无

允许用户修改自己的密码。点击该菜单，打开修改密码对话框。如图 4-11 所示。

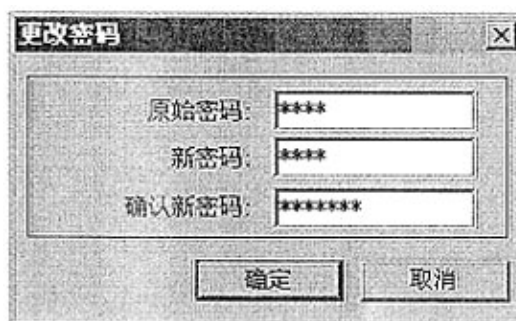


图 4-11 修改密码对话框

4. 锁定系统

菜单： 用户 | 锁定系统

工具栏： 无

当用户暂时离开时，点击该菜单，锁定系统，弹出“系统锁定”对话框，如图 4-12 所示。当该用户需继续使用该系统时，需在“系统锁定”对话框中重新输入正确密码时才可继续使用。

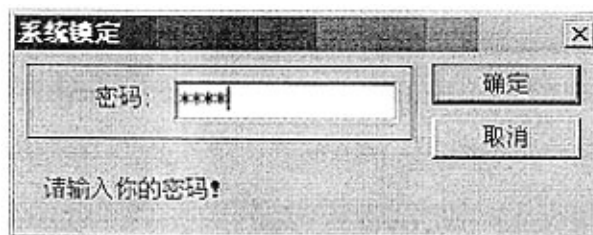


图 4-12 系统锁定对话框

§ 4.3 以计算色温为例的软件编程过程

§ 4.3.1 任务要求

- 画出 CIE1931 系统、CIE1960 系统、CIE1964 系统的色品图
- 能够选择不同的颜色系统，并显示其色品图。
- 能够进行 Gamma 校正。
- 能够选择不同的观察角（2 度和 10 度），并显示不同观察角下的色品图。

- 计算出光源及光学器件在 CIE1931 色度系统、CIE1960 色度系统、CIE1964 色度系统的色品坐标，即 xyz 、 uv 、 $u'v'$ 值。

- 计算出光源的色温值。

§ 4.3.2 系统功能模块设计

主要有两大模块：显示模块和计算模块。

显示模块主要有五个函数构成：

`dataprepere()`、`CIEFunction()`、`XyzFunction()`、`UvFunction()`、`Uv1976Function()`。

`dataprepere()` 函数输入原始数据，如 360—690 各波长的 xyz 值，各个色度系统标准红色、蓝色、绿色、白点的 xyz 值，光源 A、B、C、D、E 的 xyz 值等等。

`CIEFunction()` 函数根据要求选择绘图函数 `XyzFunction()`、`UvFunction()`、`Uv1964Function()`，并传递观察角、Gamma 值、色度系统等参数。

`XyzFunction()`、`UvFunction()`、`Uv1976Function()` 分别绘制 CIE1931 系统、CIE1960 系统、CIE1976 系统的色品图。

计算模块是个包含了有关色度学参数的计算的类，如下所示：

```
typedef struct {
    double L,a,b;
    double C,H;

}CIELab,*PCIELab;

typedef struct {
    double L,u,v;
    double u1,v1;
    double u01,v01;
    double C,S,H;

}CIELuv,*PCIELuv;
```

```
typedef struct {
    double X0,Y0,Z0;
    double u0,v0;
}Standard,*PStandard;
```

```
typedef struct{
    double W;
    double U;
    double V;
}CIEWUV;
```

```
class ColorMeasurement{
public:
    ColorMeasurement(){};
    ColorMeasurement(double&,double&,double&,
        double&,double& ,double&);
    ~ColorMeasurement(){};
    void GetValCIEuv();
    void GetValCIELuv();
    void GetValCIELab();
    void GetValxyz();
    void GetValCIEWUV();
    void GetValstduv();
```

```
public:
    CIELab Lab;
    CIELuv Luv;
    CIEWUV WUV;
    Standard std;
```

```
double X,Y,Z;
double x,y,z;
double u,v;
};
```

程序的界面如下:

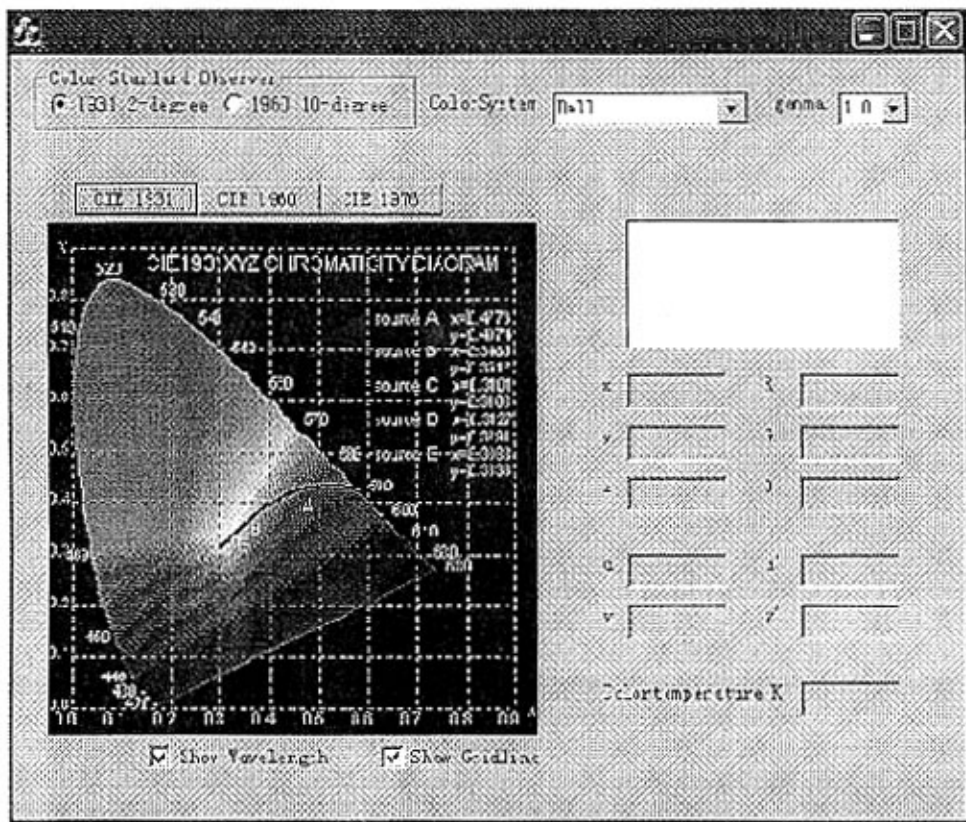


图 4-13 CIE1931 系统

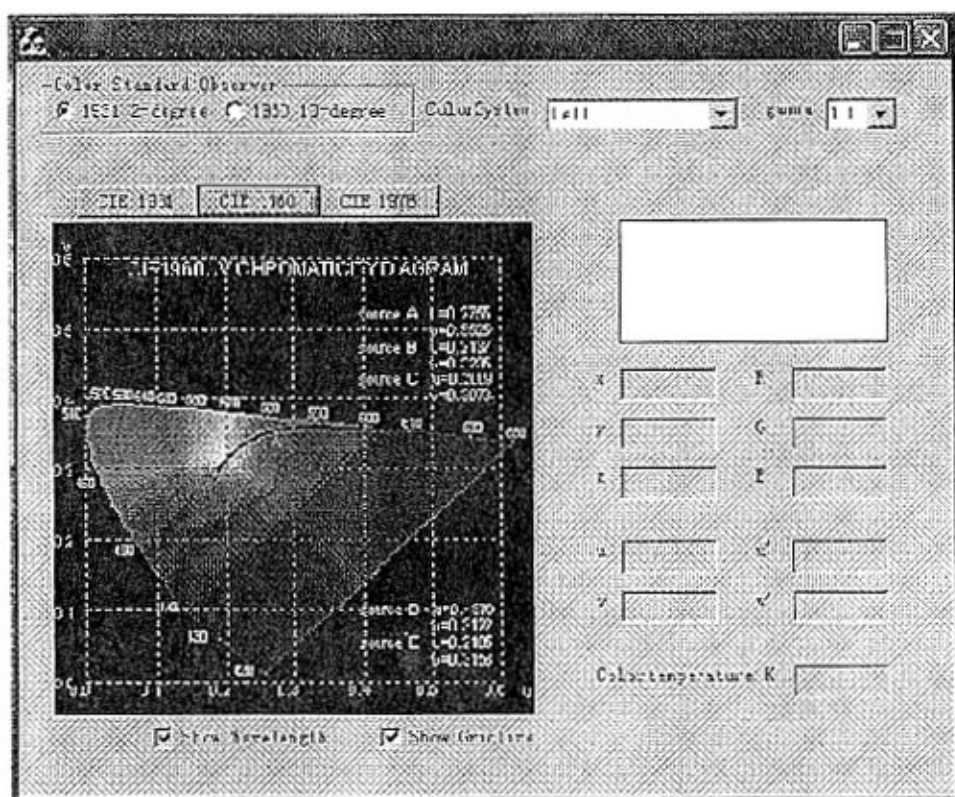


图 4-14 CIE1960 系统

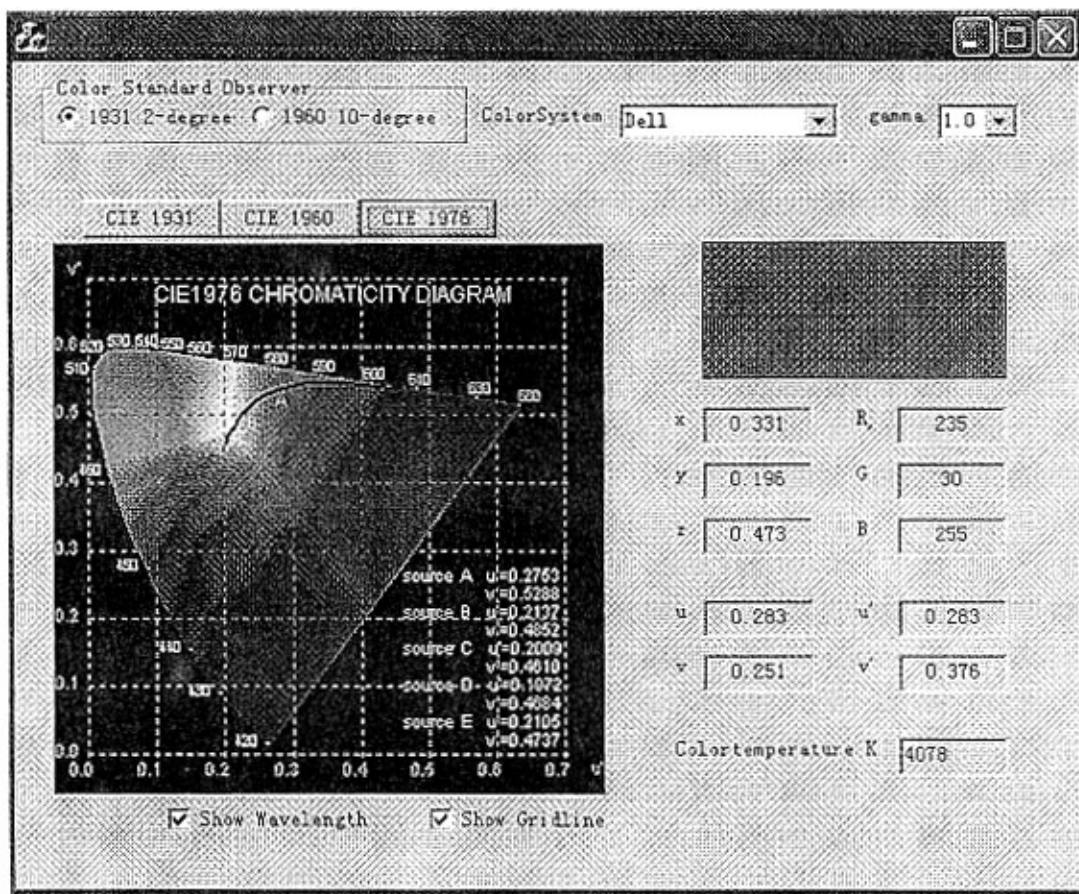


图 4-15 CIE1976 系统

§ 4.3.3 软件设计流程图

主要有两个过程，一个是绘图过程，一个是求各点的 xyz 、 RGB 、 uv 、 $u'v'$ 、色温的过程。绘图的流程图如下：

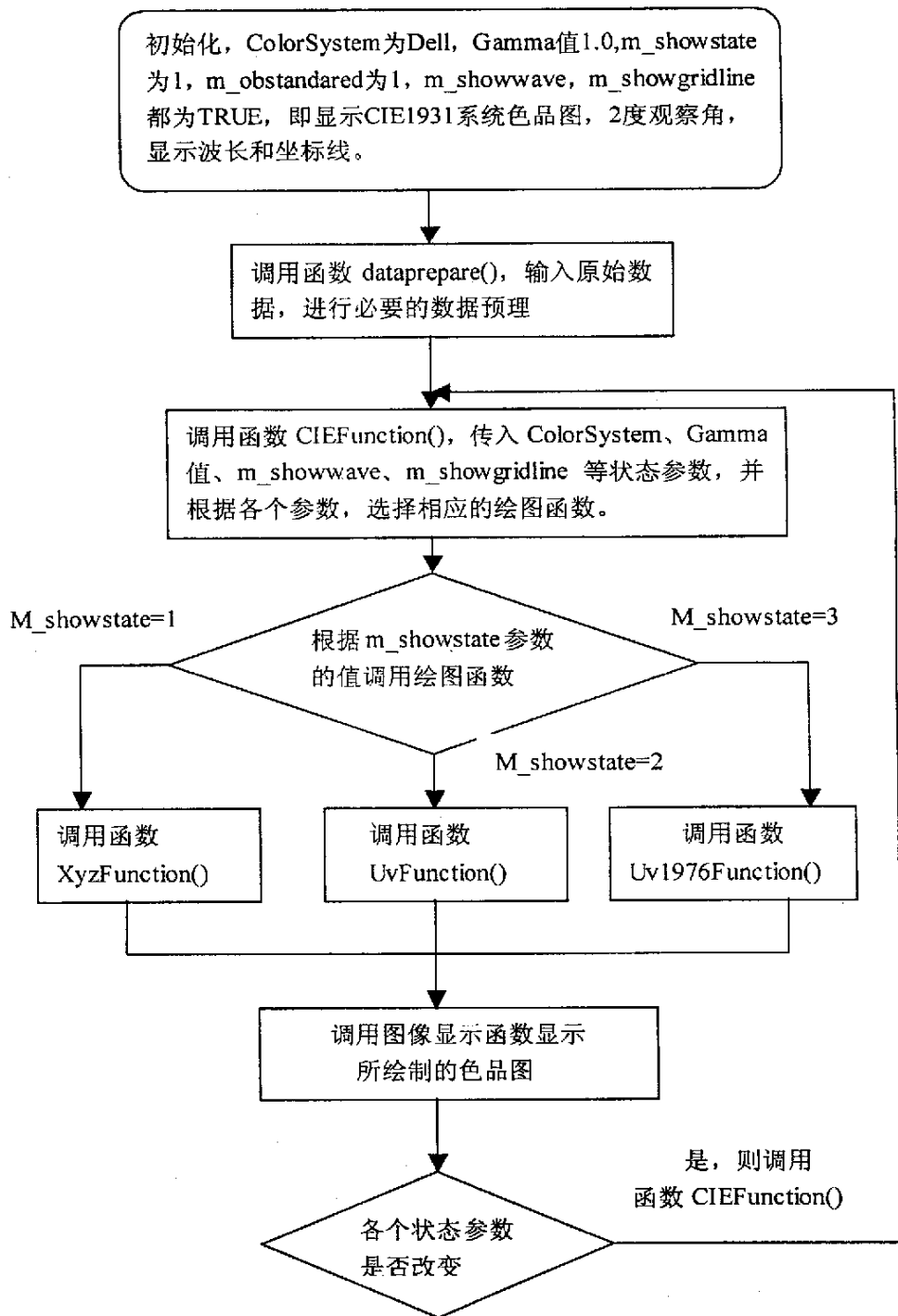


图 4-16 绘图流程图

计算 xyz、RGB、uv、u'v'、色温的流程图如下：

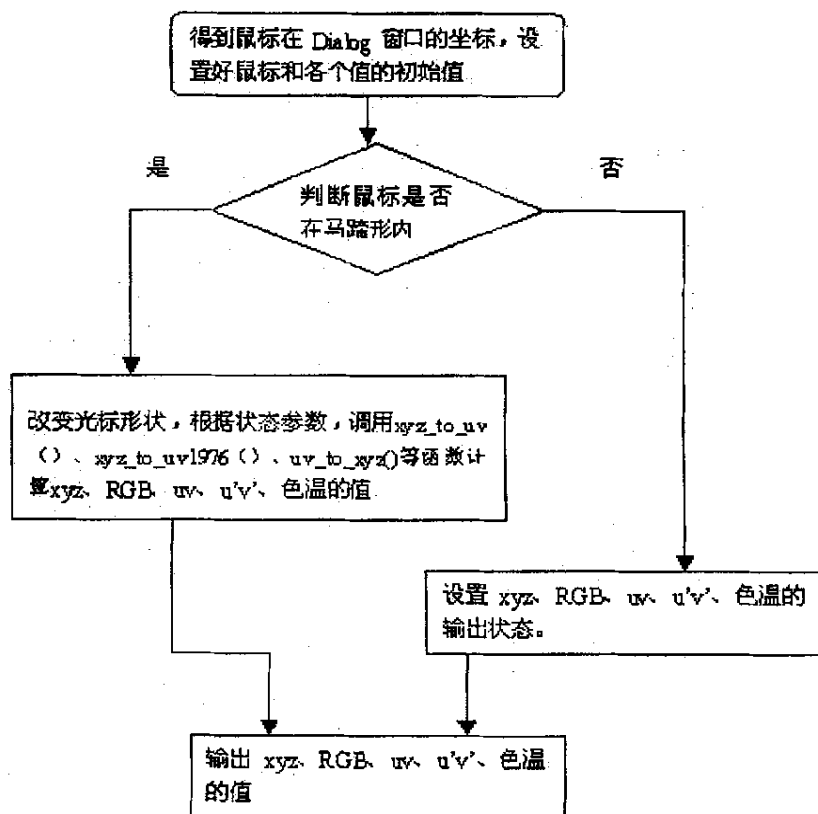


图 4-17 计算 xyz、RGB、uv、u'v'、色温的流程图

§ 4.4 数据库

由于该光谱测量系统是实时的, 目的是要实现在线测量和实时监控功能, 为了使得整个测量系统更全面、更具有智能性, 需要寻求一种合适的数据存储及提取方式, 以快速、方便地存储和处理在线测量的大量数据。数据量大, 数据的动态性是实时测量系统的重要特征, 这里我们采用了数据库管理系统对数据进行管理。

数据的高效和合理的管理是系统使用方便及功能强大的基础。由于物质的光谱特性不仅和被测样品本身物理特性有关, 还和环境特性有关。比如经校准后的标准光源光谱, 暗光谱, 标准镜参数以及光谱仪的参数设置 (如积分时间、平均次数以及 BoxCar 等) 等的不同, 对同一被测物质, 将得到不同的测量结果。因此要使一次测量结果能够重复

利用, 必须保存被测物质的光谱数据及其相应的环境参数。此外, 在通常的应用中, 通常在同一环境下, 测量多种同样被测物质的光谱数据, 此时并没有必要重复测量和保存环境参数。对于这种复杂的数据关系, 使用一般的文件方式进行数据管理, 容易导致数据冗余或数据之间的不一致, 给数据管理带来很大的混乱。采用数据库管理系统来进行数据管理, 建立合理的数据模型, 高效地实现各种数据的保存、查找及删除将大大提高数据的安全性及使用的方便性。

本系统利用 MICROSOFT 的 SQL SERVER2000 数据库管理系统来进行数据管理。主要实现光谱测量仪器参数、标准光源参数、07 暗光谱及被测样品光谱数据的管理。其主要优点在于, 保存某一组被测样品数据时, 系统自动判断该数据所对应的环境参数是否已被保存过, 若被保存过, 将不再保存, 而仅保存被测样品数据。若未被保存过, 则先保存环境参数, 然后再保存被测数据, 保证再次分析时被测数据及环境参数正确且不存在冗余性, 有利于提高存储效率。分析历史数据时, 只需打开待分析的被测样品数据, 系统首先判断该数据所对应的环境参数与现有环境参数是否一致, 不一致时, 系统将自动读入该数据所对应的环境参数, 而不用逐个去打开。反之, 系统将不再重复读入环境参数, 这样既提高了系统操作速度, 又保证了样品数据和环境参数之间的对应关系。

此外, 任何系统的存储设备的容量总是有限的, 不可能无限制存放, 因此对于已有数据的维护也是必要的。关键在于环境参数的删除, 仅在没有与之对应的被测样品数据时才能删除, 否则没有相应的环境参数, 样品数据也就失去了存在的意义。

这里我们简要地例出了我们所设计的光谱仪数据库设计思路以及设计结果供参考。

§ 4.4.1 数据表间关系

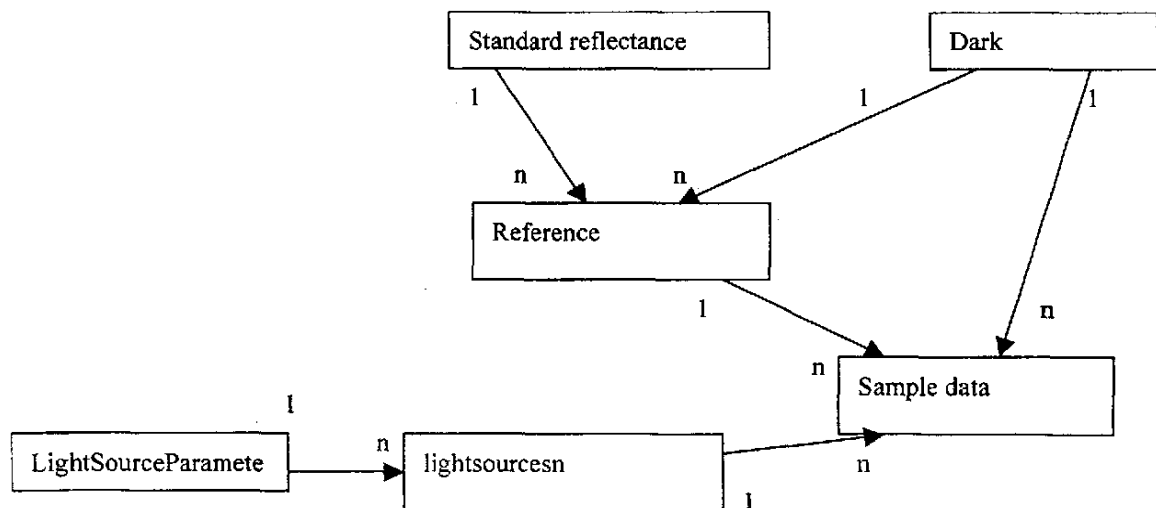


图 4-18 数据表间关系

§ 4.4.2 数据表结构

1. Spectrometer parameter

Field name	Data type
1). Sn(key)	int(identity)
2). SpectrometerType	varchar(30)
3). ADCType	varchar(30)
4). SerialNumber	varchar(30)
5). SpectrometerSubType	int
6). IRQ	int
7). BaseAddress	int
8). SerialPort	int
9). SerialPortResolution	int
10). ADC1000RotationEnabled	bit
11). ADC1000Rotation	varchar(30)
12). Initialized	int
13). DisplayLimitedRang	int
14). ADC1000ChannelRotation	int
15). PCICardID	int
16). S1024DWOOffset	real

17). SAD500Compression	int
18). SerialPortBaudRate0	int
19). USBSerialNumber	varchar(30)
20). WLFirst	real
21). WLSecond	real
22). WLThird	real
23). WLIntercept	real
24). NLEnabled	bit
25). SLEnabled	bit
26). SLConstant	real
27). NLCoef0	real
28). NLCoef1	real
29). NLCoef2	real
30). NLCoef3	real
31). NLCoef4	real
32). NLCoef5	real
33). NLCoef6	real
34). NLCoef7	real

2. Dark Spectrum Data

Table Name: Dark

Field name	Data type
1). SnD(key)	varchar(30)
2). SampleDate	varchar(30)
3). Users	varchar(20)
4). SpectrometerSerialNumber	varchar(30)
5). SpectrometerChannel	varchar(30)
6). IntegrationTime(msec)	int
7). SpectraAveraged	int
8). BoxCarSmoothing	int
9). CorrectForElectricalDark	bit

10). TimeNormalized	bit
11). DualBeamReference	bit
12). ReferenceChannel	varchar(30)
13). WaveLength	image
14). SpectrumData	image

3. Reference Spectrum Data

Table Name: Reference

Field name	Data type
1). SnR(key)	varchar(30)
2). SampleDate	varchar(30)
3). Users	varchar(30)
4). SpectrometerSerialNumber	varchar(30)
5). SpectrometerChannel	varchar(30)
6). IntegrationTime(msec)	int
7). SpectraAveraged	int
8). BoxCarSmoothing	int
9). CorrectForElectricalDark	bit
10). TimeNormalized	bit
11). DualBeamReference	bit
12). ReferenceChannel	varchar(30)
13). WaveLength	image
14). SpectrumData	image
15). SnSM	varchar(30)
16). SnD	varchar(30)

针对标准光源，用于给光谱仪器定标，通常需知道其色温、光通量及标称电流。

17). ColorTemperature	real (标准光源的色温 K)
18). LuminousFlux Lumen)	real (标准光源的标定光通量)
19). RatedCurrent	real (标准光源的标称电流 A)

其中 SnSM 为该 Reference 光谱测量时所使用的反射镜反射率数据在 SMReference

表中的记录号，在测量样品反射率时，仅在已知了反射镜数据时，该 Reference 才有意义。但在测量样品的透射率时，不需要反射镜的数据，因此，在测量反射率时，在保存 Reference 数据时，也必须同时保存反射镜的反射率数据，否则没有意义，SnD 为该参考光谱所对应的 dark 光谱序列号。

4. Sample Spectrum Data

Table Name: SpectraData

Field name	Data type
1). Sn(key)	varchar(30)
2). Data Kind	int (=1, spectrum, =2, reflectance)
3). SampleDate	varchar(30)
4). Users	varchar(20)
5). SpectrometerSerialNumber	varchar(30)
6). SpectrometerChannel	varchar(30)
7). IntegrationTime(msec)	int
8). SpectraAveraged	int
9). BoxCarSmoothing	int
10). CorrectForElectricalDark	bit
11). TimeNormalized	bit
12). DualBeamReference	bit
13). ReferenceChannel	varchar(30)
14). WaveLength	image
15). SpectrumData	image
16). SnD	varchar(30)
17). SnR	varchar(30)
18). SnLightSource	varchar(30)
19.) IrradianceVideoData	image

SnD 为测量该光谱时所对应的 dark 光谱在 Dark 表中的记录号，SnR 为测量该光谱时所对应的 Reference 光谱在 Reference 表中的记录号，SnLightSource 对应的是灯的编号，即表 lightsourcesn 表中的 sn。

IrradianceVideoData 为测量光源的光通量时, 存储待测光源的未定标前的数据, 此时 SpectrumData 中存放的为定标后的归一化的数据。

5. Standard Mirror Reflectance

1). SnSM(key)	varchar(30)
2). WaveLengthB(起始点波长)	real
3). WaveLengthE(终止点波长)	real
4). Interval(波长间隔)	real
5). DataCount(数据点数)	int
6). Reflectance(反射率数据)	image

6. user(用户管理)

1). login(key)	varchar(10)
2). Username	varchar(10)
3). Sn	varchar(10)
4). Sex	varchar(6)
5). Dutygroup	varbinary(20)

7. lightsourceparameter

1). Sn	varchar(30)	(key)
2). Name	varchar(60)	
3). Manufacturer	varchar(60)	//生产厂家
4). Voltage	real(V)	//灯电压
5). Currentvalue	real (A)	//灯电流
6). Power	real (Watt)	//灯功率
7). Powerfactor	real	//功率因素
8). Luminousefficiency	real	//光效率

对于电光源测试, 通常需要知道光源的电源, 电流, 光效率等参数。

8. lightsourcesn

1). Sn	varchar(30)	(key)
2). Lightsourceparametersn	varchar(30)	

考虑到一个厂家生产的同一系列灯泡具有相同的光源参数, 仅是灯泡的编号不同,

因此在 `lightsourcesn` 表中，`sn` 为灯的编号，而 `lightsourceparametersn` 为表 `lightsourceparameter` 表中的编号，该编号唯一标识该一系列灯参数的编号。

第5章 实验及结果分析

§ 5.1 实验准备工作

§ 5.1.1 软件安装

首先安装光谱测量传感器-Ocean Optics USB2000 的设备驱动程序 OOIBase32, 再把 USB2000 光谱仪器联接到计算机。若在设备驱动程序安装之前把 USB2000 连接到计算机, USB2000 将无法正常工作, 请参照 4 (校正不正确的安装) 重新进行驱动程序的安装及光谱仪器与计算机的连接。接下来再安装我们开发的系统分析软件, 我们将之命名为 Spectra.exe。

1. 安装 OOIBase32

- 运行\software\OOIBase32\setup.exe 安装设备驱动程序。在 Welcome 对话框中点击“Next”按钮。
- 在“Destination Location”对话框中, 接受缺省值或选取你需要的目标目录。然后点击“Next”按钮。
- 在“Backup Replaced Files”对话框中, 选择“Yes”或“No”。建议选择“Yes”。若选择“Yes”, 可点击“Browse”键选取需要的目标目录。点击“Next”按钮。
- 选择合适的程序项目组。在“Start Installation”对话框中点击“Next”按钮。
- 根据系统提示插入随带的配置软盘。
- 安装结束后, 在“Installation Complete”对话框中点击“Finish”按钮。按照提示重新启动计算机。

2. 连接 USB2000 到计算机

- 找到 USB 电缆, 把方的一端连接到 USB2000 光谱仪器, 把另一端连接到计算机的 USB 接口。

- 若你正确安装了 00IBase32 软件，系统将弹出“增加新硬件”消息框，提醒用户已正确地安装了 USB2000 光谱仪器。

3. 安装快速光谱分析测试软件 Spectra.exe

按照如下步骤安装光学常数综合测试软件 Spectra.exe。

- 运行“应用软件和用户手册光盘”中的\software\spectra\setup.exe 程序，在“Welcome”对话框中点击“Next”按钮。
- 在“许可协议”对话框中点击“是”，你必须同意，否则不能继续安装。
- 在“用户信息”对话框中填入你的用户信息，序列号可随便填写。然后点击“Next”按钮。
- 接受缺省的目标文件夹或点击“Browse”按钮选择你需要的目标文件夹，点击“Next”按钮。
- 安装完毕，点击“Finish”按钮。

4. 校正不正确的安装

- 若在设备驱动程序安装之前，把 USB2000 连接到计算机，USB2000 将无法正常工作，请参照以下步骤来校正不正确的安装。
- 对于 Win2000，选中“我的电脑”，点击右键，在弹出菜单中点击“属性”菜单项，在弹出的“系统属性”对话框中选中“硬件”页，点击“设备管理器”按钮。对于 Win98 操作系统，右击“我的电脑”图标，在弹出的菜单中选中“属性”菜单项，然后选中“设备管理器”面。
- 在“设备管理器”窗口中点击“其它设备”前的“+”号。你将发现有“Ocean Optics USB2000?”。
- 选中“Ocean Optics USB2000?”项，点击列表框下部的“删除”按钮，系统弹出对话框，询问是否确定要删除该设备，点击“确定”键。
- 断开 USB2000 和计算机的连接。按照步骤 1 重新安装设备的驱动程序，并把 USB2000 连接到计算机。

§ 5.1.2 光谱仪配置设置

1. “A/D 接口”配置

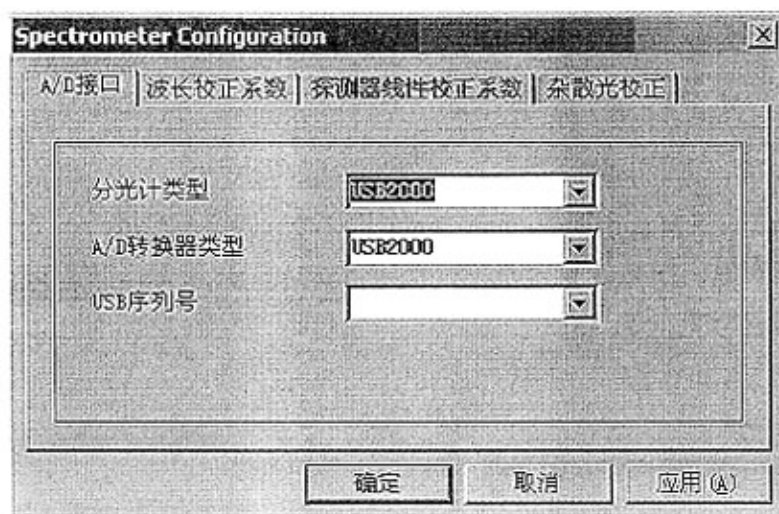


图 5-1 A/D 接口配置页面

分光计类型：设置分光光度计的类型。在本系统中为 USB2000。

A/D 转换器：设置 A/D 的类型。在本系统中为 USB2000。

USB 序列号：设置系统所使用的 USB2000 光谱仪的序列号。

2. “波长校正”页配置参数如下：

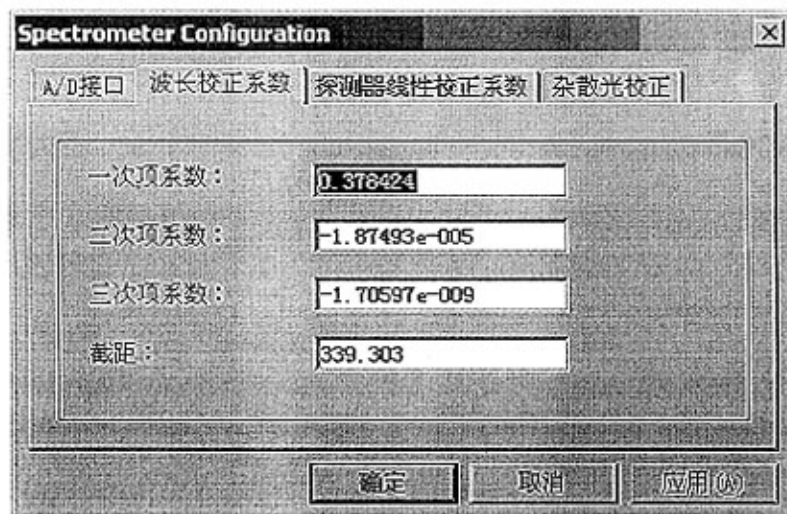




图 5-2 波长校正系数配置面

根据厂家提供的数据，输入的一次项系数为 0.382783593，二次项系数为 -2.19057e-5，三次项系数为 0，截距为 339.5893219。

§ 5.1.3 注意事项

在进行测量之前，再次检查是否正确安装了光谱仪器、光源、待测样品及相应的操作软件。

运行软件。点击“视图/监视器视图”菜单项或工具栏  打开监视器窗口。点击“设置/光谱仪配置”菜单项或工具栏  正确配置光谱仪器参数。此时，即使未打开光源，在监视器窗口中也能看到一条波动的曲线，并且其幅值随着入射光的加强而增大，这说明已正确地安装了光谱仪器及应用软件。

若探测器测量得到的值太小，可通过增加积分时间来增大探测器测得的信号。若探测器测量得到的值太大或已饱和，可通过降低积分时间来减小探测器的测得值。

为保证测量结果正确，若采样参数（积分时间、平均次数及中值滤波）改变，相应的暗光谱、参考光谱必须重新测量。

§ 5.2 透射率测量

§ 5.2.1 透射率计算公式

透射率为透过待测样品的光谱辐射能量与入射到样品表面的光谱辐射能量的比值。

透射率根据下述公式计算：

$$\%T = \frac{S_{\lambda} - D_{\lambda}}{R_{\lambda} - D_{\lambda}} \times 100\% \quad (5-1)$$


其中， S_{λ} 为在波长 λ 处测得的样品的强度


R_{λ} 为在波长 λ 处测得的参考强度


D_{λ} 为在波长 λ 处测得的暗强度


§ 5.2.2 实验步骤、实验结果和讨论




步骤如下：


1. 打开监视器视图(通过菜单项“视图/监视器视图”或工具栏  打开监视器视图)，

工作模式设置为示波器模式（可点击菜单项“捕获/示波器模式”或工具栏设置监视器的模式为示波器模式），打开参考光源（用于照明的光源），在光源工作稳定后，设置合适的积分时间（即工具栏上的 Integ. Time），使监视器中显示的最大值为 3500 左右为宜。并设置合适的平均次数（即工具栏上的 Average 项）及中值滤波（即工具栏上的 Boxcar 项）的值。其中积分时间最小值为 3ms，平均次数的最小值为 1 次，中值滤波的最小值为 0（即不做中滤波）。我们这里选择的积分时间为 200ms，平均次数设为 3 次。

2. 关闭光源或完全挡住入射光，点击“捕获/捕获暗光谱”菜单项或工具栏，捕获当前数据作为当前测量的暗光谱。

3. 打开参考光源，等光源稳定后，点击“捕获/捕获参考光谱”菜单项或工具栏，捕获当前数据作为当前测量的参考光谱。

4. 把待测样品放到载物台，设置工作模式为透射率模式（点击菜单项“捕获/透射率模式”或工具栏设置监视器的工作模式为透射率测量模式）。此时，在监视器窗口中看到的即为待测样品的透射率分布。对该样品进行色度参数分析，点击“捕获/捕获样品”菜单项或工具栏，捕获当前测得的透射率数据，并打开 Color View 视图，对其进行色度参数分析。若要查看在光谱仪的整个波长测量范围之内的光谱分布数据，可点击菜单项“视图/光谱视图”或工具栏打开 Spectrum View 视图，以便查看在整个波长测量范围之内待测样品的透射率分布。

5. 点击“文件/保存样品光谱”或工具栏，保存当前的测量值。若当前暗光谱、参考光谱未保存过，系统将先保存暗光谱和参考光谱，成功后再保存待测样品的透射率数据。否则，直接保存待测样品的透射率数据。

注：若采样参数（如积分时间、平均次数和中值滤波的值）发生变化，必须重新测量暗光谱和参考光谱的值，以保证测量结果正确。

实验结果与讨论如下所示：

1. 光源未标定的光谱分布及色度参数分布

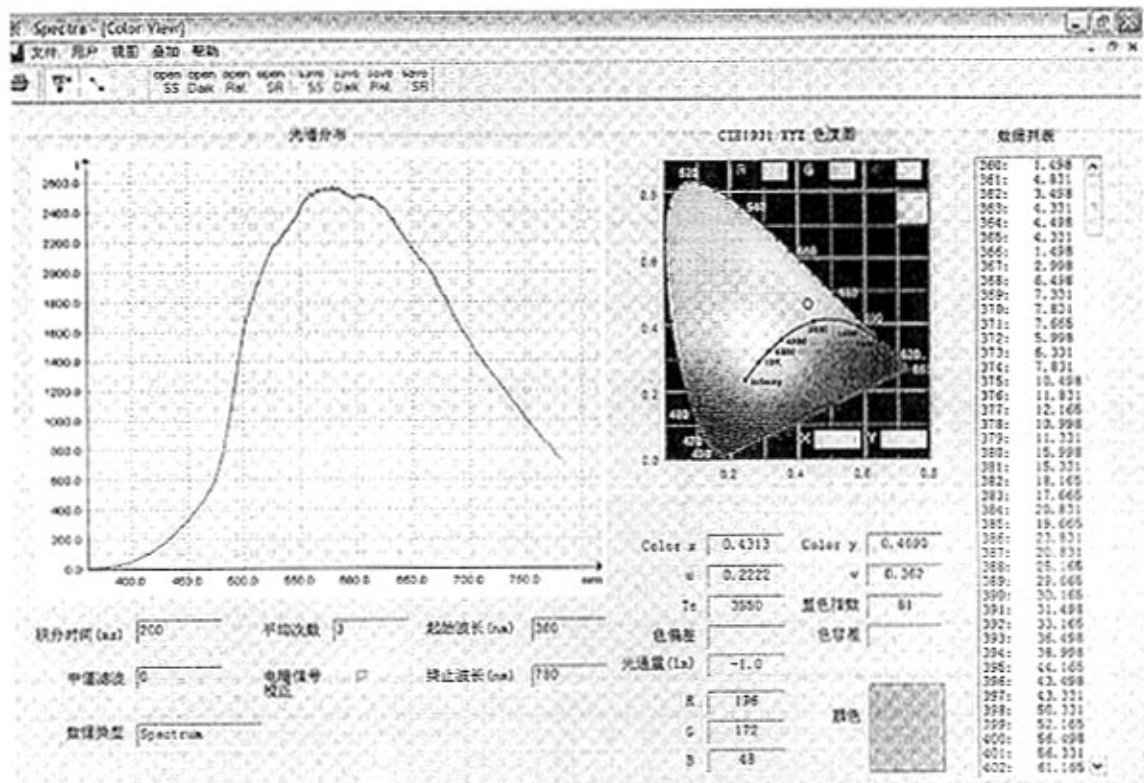


图 5-3 未标定光源的光谱分布

图 5-3 为未定标过的光源光谱分布图。界面中的“光谱分布”图为探测器测得的数据分布。积分时间、平均次数、中值滤波和电暗信号校正为测量时设置的探测器的积分时间、平均次数、中值滤波和电暗信号校正的值。可以看到我们这里选择的积分时间为 200ms，平均次数设为 3 次。数据类型表示显示在“光谱分布”图中的数据类型，为 Spectrum，表示直接从探测器测得的，未经定标的数据。数据类型还可以为 Reflectance（反射率）、Transmittance（透射率）及 Irradiance（定标后的光源的相对辐射分布）。起始波长、终止波长分别为进行色度参数计算时使用的起始波长及终止波长，单位为 nm。数据列表列出了在不同波长处对应的实际数据。

由图中光谱分布曲线可以看出，光谱探测器对 570nm 左右波段响应最灵敏。而对 400nm 接近紫外波段的响应已经很不灵敏了。从色度分析可以看出光源颜色是黄色，这也与实际相符。

2. 标定波长为 405nm 的滤波片的透过率分布曲线

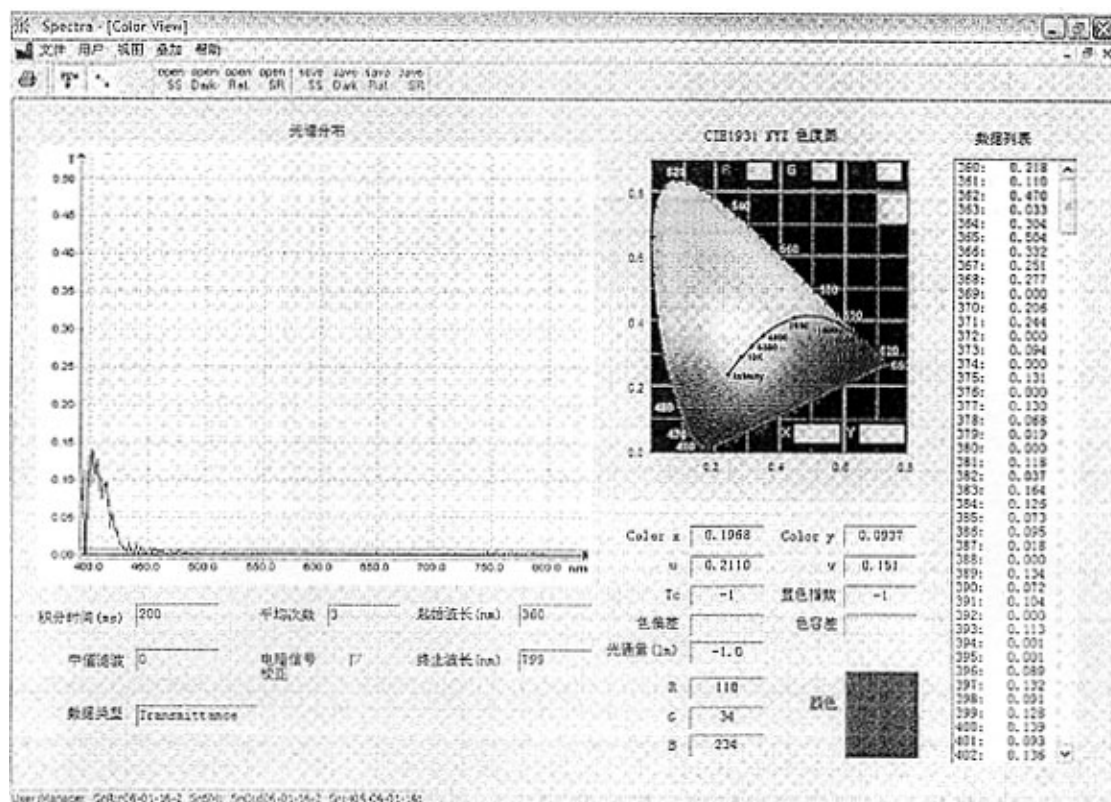


图 5-4 405 滤波片的透过率分布

由光谱分布图可以得到透过率峰值在 403.2nm，与标准值 405nm 比较接近，说明我们这套系统已经达到了比较高的精度，验证了系统的准确性。而且透过的 405nm 的光颜色的确为偏紫色，与色度分析中的颜色一致。

3. 标定波长为 509nm 的滤波片的透过率分布

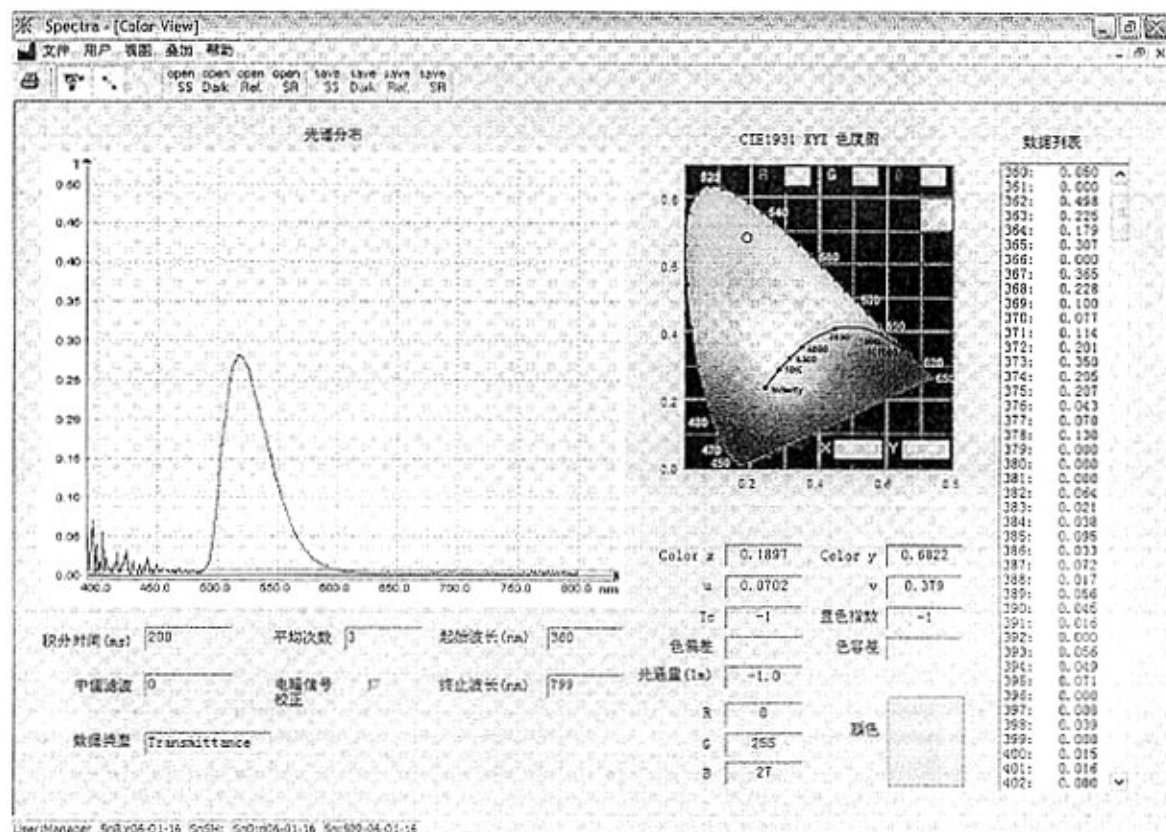


图 5-5 509 滤波片的透过率分布

由光谱分布图可以得到透过率峰值在 512nm，与标准值 509nm 比较接近，说明我们这套系统已经达到了比较高的精度，验证了系统的准确性。而且透过的 509nm 的光颜色为绿色，与色度分析中的颜色一致。

§ 5.3 反射率测量

§ 5.3.1 反射率测量公式

反射率为从待测样品表面反射的光谱辐射强度与入射于物体表面的光谱辐射强度的比值。

反射率根据下述公式计算：

$$\%R = \frac{S_{\lambda} - D_{\lambda}}{\frac{R_{\lambda}}{ref_{M\lambda}} - D_{\lambda}} \times 100\% \quad (5-2)$$

其中, S_λ 为在波长 λ 处测得的样品的强度。







R_λ 为在波长 λ 处测得的参考强度。




$ref_{M\lambda}$ 为在波长 λ 处标准反射镜的反射率值。


D_λ 为在波长 λ 处测得的暗强度。

§ 5.3.2 实验步骤、实验结果和讨论

测量步骤如下:

1. 打开监视器视图(通过菜单项“视图/监视器视图”或工具栏打开监视器视图), 工作模式设置为示波器模式(可点击菜单项“捕获/示波器模式”或工具栏设置监视器的模式为示波器模式), 打开参考光源(用于照明的光源), 在光源工作稳定后, 设置合适的积分时间(即工具栏上的 Integ. Time), 使监视器中显示的最大值为 3500 左右为宜。并设置合适的平均次数(即工具栏上的 Average 项)及中值滤波(即工具栏上的 Boxcar 项)的值。其中积分时间最小值为 3ms, 平均次数的最小值为 1 次, 中值滤波的最小值为 0(即不做中值滤波)。
2. 关闭光源或完全挡住入射光时, 点击“捕获/捕获暗光谱”菜单项或工具栏, 捕获当前数据作为当前测量的暗光谱。
3. 打开参考光源, 等光源稳定后, 点击“捕获/捕获参考光谱”菜单项或工具栏, 捕获当前数据作为当前测量的参考光谱。
4. 在载物台上放置已知反射率的标准反射镜。
5. 点击“捕获/读入标准反射镜反射率数据”或工具栏从标准反射镜反射率数据文件中读入该标准反射镜的反射率数据。若数据库中已存有该反射镜的反射率数据, 直接点击“文件/加载标准反射镜反射率”或工具栏从数据库中读入该标准反射镜的反射率数据。
6. 将待测样品放到载物台, 设置工作模式为反射率模式(可点击“捕获/反射率模

式”或工具栏设置监视器的工作模式为反射率模式)。此时，在监视器窗口中看到的即为待测样品的反射率的分布。对该样品进行色度参数分析，点击“捕获/捕获样品”菜单项或工具栏，捕获当前测得的反射率数据，并对其进行色度参数分析。若要查看在光谱仪的整个波长测量范围之内的反射率分布数据，可点击菜单项“视图/光谱视图”或工具栏打开 Spectrum View 视图，以便查看在整个波长测量范围之内的反射率分布。

7. 若要保持当前测量值，点击“文件/保存样品光谱”或  工具栏，保存当前的测量值。若当前暗光谱、参考光谱未保存过，系统将先保存暗光谱和参考光谱，成功后再保存待测样品的反射率数据。否则，直接保存待测样品的反射率数据。

注：若采样参数（如积分时间、平均次数和中值滤波的值）发生变化，必须重新测量暗光谱和参考光谱的值，以保证测量结果正确。我们测量反射率和测量透射率时在相同的光源下，所以使用的积分时间和平均次数等条件不变，所以不需要重新测量暗光谱和参考光谱的值。所以光源的光谱分布就不重复列出了。

测量 509 滤波片的反射率实验结果和讨论如下:

1. 入射角为 30 度时的反射率测量结果

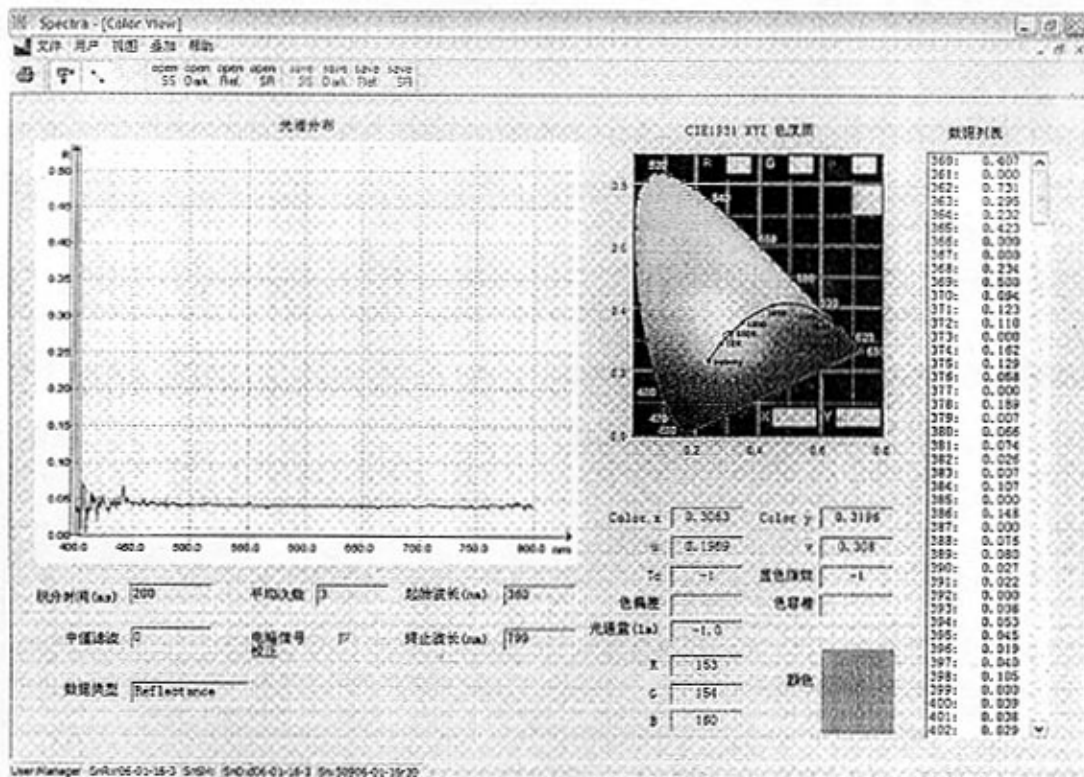


图 5-6 30 度入射时反射率分布

2. 入射角为 45 度时的反射率测量结果

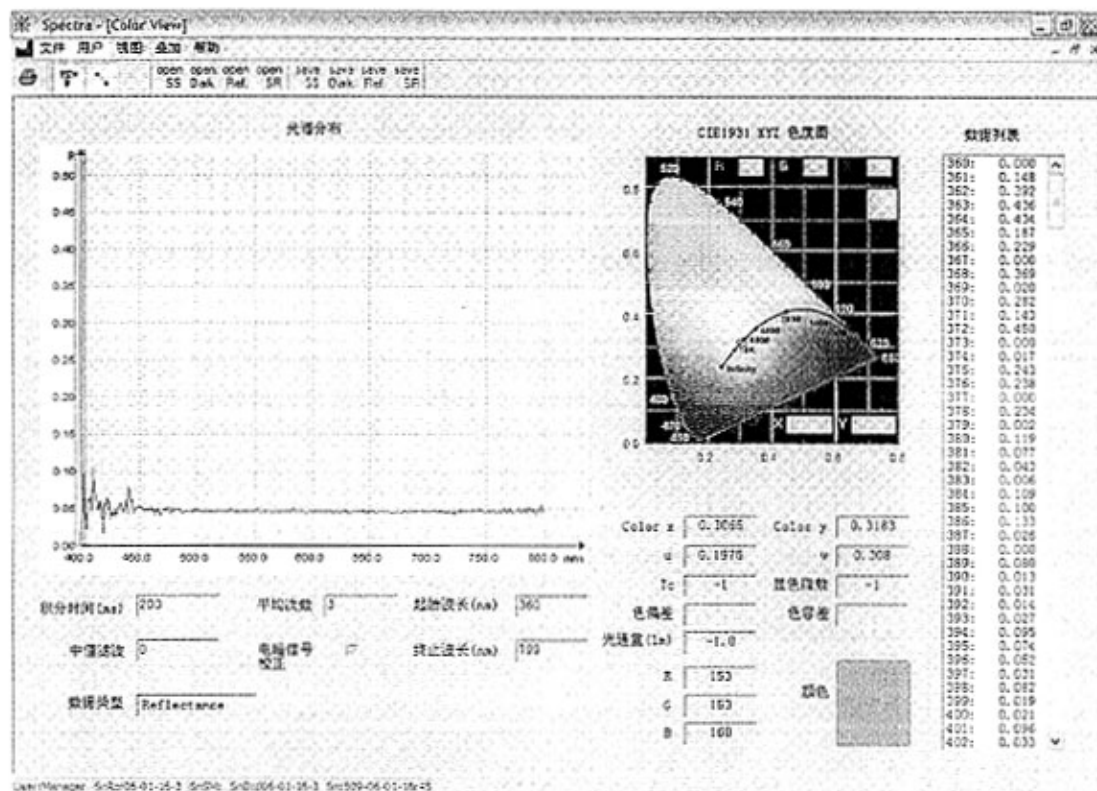


图 5-7 45 度入射时反射率分布

3. 入射角为 60 度时的反射率测量结果

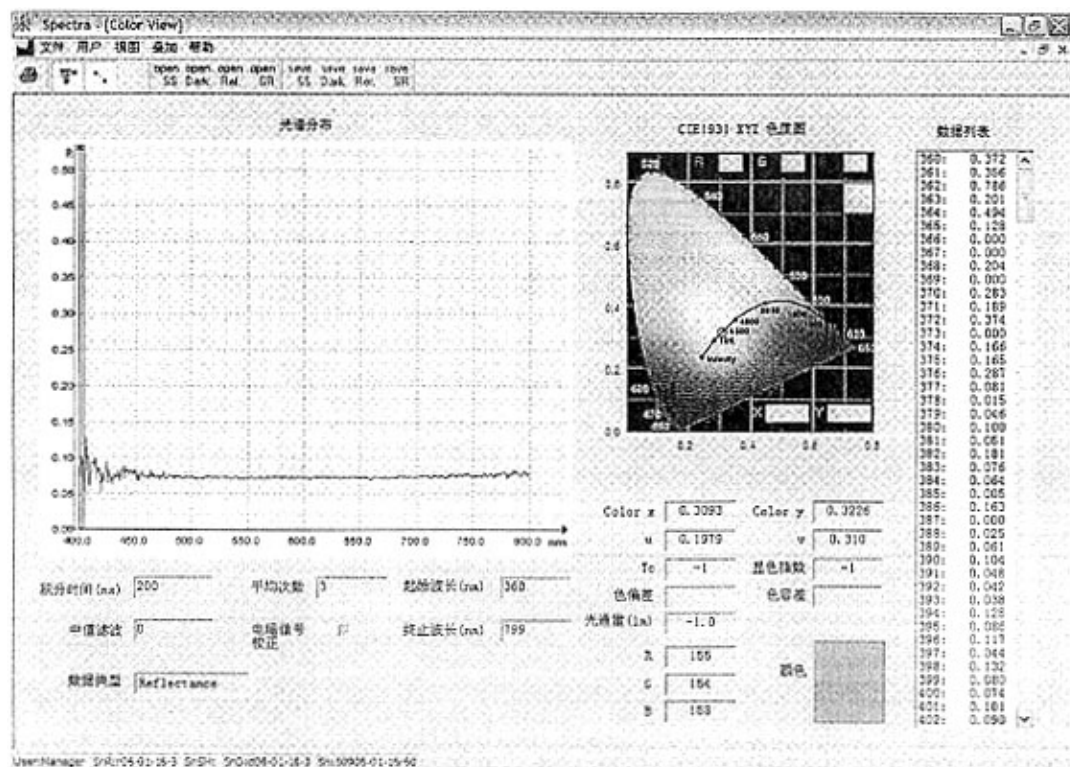


图 5-8 60 度入射时反射率分布

4. 入射角为 75 度时的反射率测量结果

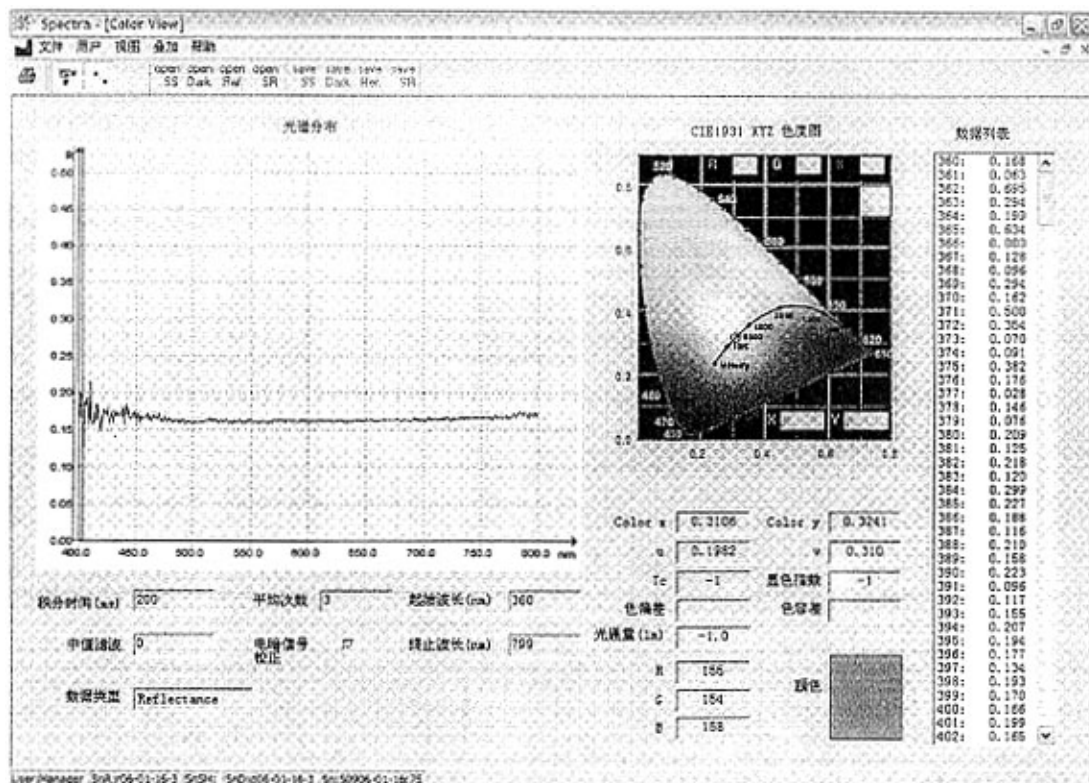


图 5-9 75 度入射时反射率分布

5. 四个不同角度的反射率分布叠加图

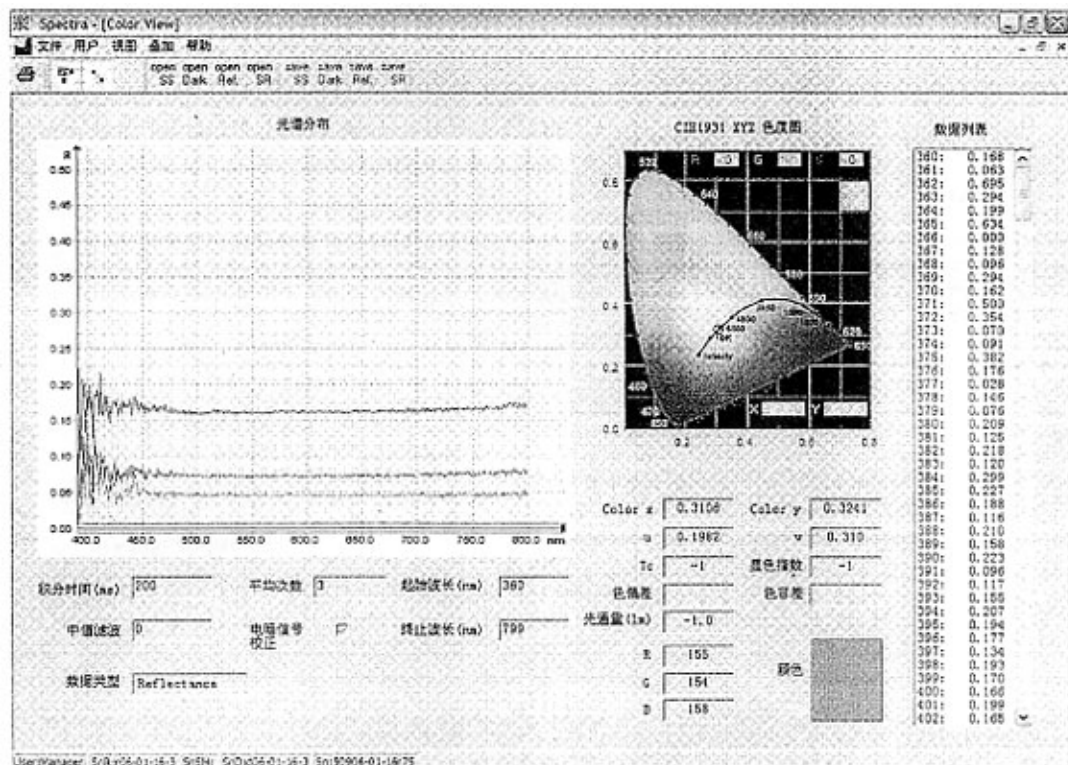


图 5-10 四条曲线的叠加图

其中黄色代表 30 度入射时的情况，灰色代表 45 度入射时的情况，红色代表 60 度入射时的情况，褐色代表 75 度入射时的情况。

由光学知识可知，当光在空气-玻璃界面反射时，在小于 45 度时，反射率几乎不变，而后在某一角度后(这个角度随着折射率的不同而不同，当 $n=1.52$ 时，为 56.3 度)，随着角度的变大，反射率相应变大。图 5-10 很好得符合了这个规律，因而验证了我们系统的准确性。

§ 5.4 相对辐射分布测量

使用积分球测量光通量的原理已在第 2 章阐述过了，这里就不再赘述了。

§ 5.4.1 相对辐射分布计算公式

辐射出射度为单位面积辐射源所发射的辐射通量。相对辐射分布为把辐射源的最大辐射出射度归一化为一时的结果。

辐射源的相对辐射分布根据下述公式计算：

$$I_{\lambda} = B_{\lambda} \frac{S_{\lambda} - D_{\lambda}}{R_{\lambda} - D_{\lambda}}$$

其中 B_{λ} 为标准灯在波长 λ 处的辐射出射度。

S_{λ} 为在波长 λ 处测得的样品的强度。

R_{λ} 为在波长 λ 处测得的参考强度。

D_{λ} 为在波长 λ 处测得的暗强度。

待测辐射源的相对辐射分布根据下述公式计算：

$$I_{\lambda r} = \frac{I_{\lambda}}{I_{\max}}$$

其中 I_{\max} 为波长测量范围内待测辐射源的最大辐射出射度。

$I_{\lambda r}$ 为待测辐射源在波长 λ 处的相对辐射出射度。

§ 5.4.2 实验步骤、实验结果与讨论

步骤如下：

1. 把探测器的探头放在积分球的出射小孔中，打开积分球。
2. 在积分球内的灯座上装上标准灯，然后关闭积分球。如图 5-11 所示。

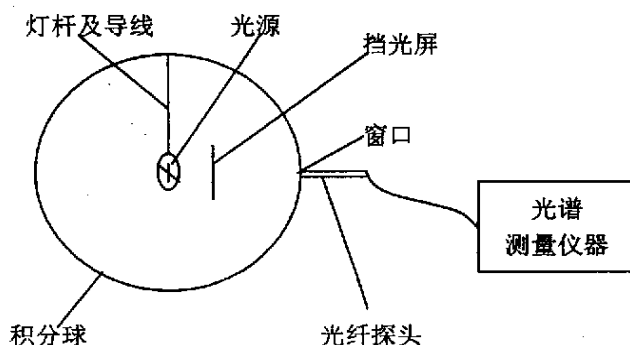






图 5-11 相对辐射测量示意图

3. 运行快速光谱分析测试系统的应用程序，打开监视器视图（通过菜单项“视图/监视器视图”或工具栏  打开监视器视图），设置监视器的工作模式为示波器模式（可点击菜单项“捕获/示波器模式”或工具栏  设置监视器的模式为示波器模式）。



4. 接通标准灯（标准灯为已知色温的用于对待测照明体进行定标的光源）电源，在光源工作稳定后，设置合适的积分时间，使监视器显示的最大值为 3500 左右为宜。并设置合适的平均次数及中值滤波的值。若积分时间已达到最小，探测器的测得值仍处于饱和状态，可在探测器的光入口处加上中性滤色片，直到探测器的输出值在合适的量程范围。同时应保证待测辐射源的输出也在量程范围之内。关闭标准灯。


5. 关闭光源或完全挡住入射光时，点击“捕获/捕获暗光谱”菜单项或  工具栏，捕获当前数据作为当前测量的暗光谱。

6. 打开参考光源，等光源稳定后，点击“捕获/捕获参考光谱”菜单项或  工具栏，捕获当前数据作为当前测量的参考光谱。

7. 点击“捕获/标准灯参数”菜单项，设置标准灯的色温及光通量值。

8. 关闭标准灯。打开积分球，等标准灯冷却后将标准灯从灯座上卸下并保存好。

9. 将待测辐射源安装在灯座上，关闭积分球，接通待测照明体的电源。设置工作模式为相对辐射测量模式（可点击“捕获/相对辐射分布测量模式”或工具栏  设置监视器的工作模式为相对辐射分布测量模式）。此时，在监视器窗口中看到的即为待测辐射体的相对辐射出射度的分布。若要对样品进行色度参数分析，点击“捕获/捕获样品”菜单项或工具栏 ，捕获当前测得的相对辐射出射度数据，并对其进行色度参数分析。

10. 保存当前测量值, 点击“文件/保存样品光谱”或  工具栏, 保存当前的测量值。若当前暗光谱、参考光谱未保存过, 系统将先保存暗光谱和参考光谱, 成功后再保存待测辐射源的数据。否则, 直接保存待测辐射源的数据。

实验结果如下所示:

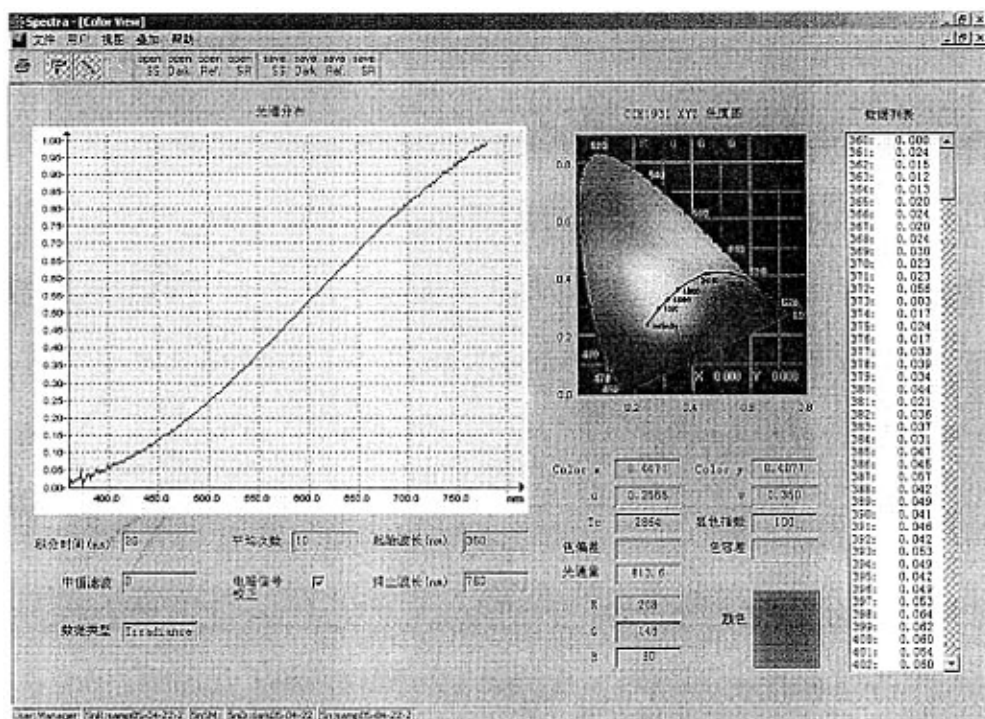


图 5-12 相对辐射强度分布

上图中的“数据类型”显示在“光谱分布”图中的数据类型, Irradiance 表示数据类型为定标后的光源的相对辐射强度。“起始波长、终止波长”分别为进行色度参数计算时使用的起始波长及终止波长, 单位为 nm。“x, y, u, v”分别为 CIE1931XYZ 色度空间及 1960 均匀色度空间的色坐标的值。“Tc”为待测光源的相关色温值。“显色指数”为待测光源的显色指数。“光通量”为待测光源的光通量的值, 单位为流明。“R, G, B”分别为待测光源或待测物体颜色对应的 R、G 和 B 的值。“数据列表”列出了在不同波长处对应的实际数据。

从图 5-12 中可以看到我们测量的白炽灯的“颜色”显示为黄色, 符合实际的颜色。图中显示的“色温”为 2864, 也符合白炽灯的实际色温。从“光谱分布”显示的这条曲线也符合实际的白炽灯的相对辐射的分布。右边“数据列表”中显示的数据也符合实际。

总之，以上这些结果均与实际值符合度良好。

第6章 总结与展望

§ 6.1 论文总结

在日新月异的光学技术领域，光谱仪器仍然是最重要和最基本的光学测试仪器之一。随着光谱学和光谱分析技术的不断完善，光谱仪器的应用场合日益广泛，对光谱仪器的也提出了越来越高的要求。虽然光谱测试技术在过去的几十年中已经得到长足的发展，绝大部分场合可以满足需要，但是，由于电子技术、计算机技术、激光技术的迅速发展和引进，使光谱仪器进入了朝着自动化、智能化、数字化、微型化等各个方向发展的新阶段。如何使一套光谱测试系统满足尽可能多的测试要求，即多功能化，也是光谱仪器的发展目标。

本课题的研究旨在从光谱测量和分析的基本原理入手，寻求一种多功能的快速光谱测试系统，以满足多种用途的需要。围绕这一研究目标，本论文从以下几个方面做了详细叙述：

本测量方法的基本思想。由于色度测量、光通量测量和光学元件透射率、反射率的测量都可以归于对光谱数据的分析，因此，开发前我们考虑，可以将这些功能都包含在我们开发的光谱实时测量系统中，用软件扩展的方法实现。所以，我们首先介绍了色度学以及光度学的相关基础知识；

光谱实时测量系统的硬件结构以及软件实现。由于我们要满足色度，光度，以及薄膜厚度测量等多种测量目的，在硬件上测量系统会稍有不同，围绕这点我们分别介绍了各测量的硬件组成，并对配套的系统分析软件作了详细介绍；

通过实验，我们验证了该系统的可靠性，并给出了相关数据及其分析讨论。

通过本论文的叙述，不难看出，我们开发电子扫描快速光谱测量系统有如下显著特点：

在硬件方面，我们搭建的系统既可以测量光学零件的透射率，又可以测量光学零件的反射率，具有比较高的灵活性，这在目前的市场上也比较少见，一般不能同时测量反

射率和透射率。

在软件方面，与国内同类产品相比，本测量系统的配套分析软件的主要优点可以归纳为以下几点：

1. 结构清晰，使用方便

软件采用标准的 Windows 操作界面，所有操作都能通过下拉式菜单完成。菜单采用光标的形式进行选择，易于使用者掌握。

2. 运行速度快

为了满足在线测量的需要，在测量的同时，实时地把数据显示在数据采集界面上，选择合适的优化算法，在毫秒量级的时间内，完成对数据地分析和处理，显示在分析主界面上。

3. 功能强大

在光谱测量的基础上，集成了各种功能，可进行光源的相对辐射强度分布、光通量、色温，色坐标等参数的测量，还可对样品进行透反射率的测量。

4. 测量精度高，容错能力强

测量精度高，可达 0.5%。测量系统的软件部分配有波长校正功能，可以有效抑制系统噪声，提高测量系统的信噪比。软件中设置了极强的保护措施，任何操作不会使测量的数据消失，即使一个完全不懂的人使用本程序，也不会出现死机余数据丢失现象。

5. 可移植性和可延续性强

这个软件可较为方便地移植到别的计算机机型上，也可较方便地增加功能，为用户的功能扩展提供了方便。

6. 性能稳定

在多次的实验中证实该系统有良好的稳定性。重复性可达 0.1%。

§ 6.2 本课题未来展望

由于时间的限制和作者水平的限制，光谱实时测量系统仍然存在一些不足和有待改进的方面，作者提出这些不足的方面和作者认为今后改进和尚需进一步开展工作的方向：

1. 减小损耗，提高精度：这点需要从硬件和配套软件两个方面着手改进。硬件上可以考虑使用测量带宽更大的光谱传感器等方式来改进；软件上可以考虑从选择更完善的去噪声处理，如用小波滤波法等方法加以改进。

2. 算法优化：算法优化的意义在于提高数据处理的速度和精度两方面。对于一个好的算法，需要满足对原始数据处理的高效性，以满足实时测量的要求，同时又要保证处理结果的高准确度性。比如考虑到计算速度，计算色温时采用了经验公式，色温大于8000K时误差较大，希望能找到一个兼顾速度和准确性的算法计算各点色温值。

3. 功能扩展：该测试系统目前实现了对光源光通量，色度，以及的光学元件的透射率、反射率测量的实时测量功能，对于光谱测量在其它领域的应用情况，如薄膜厚度的测量等需要做进一步的研究和扩展。

4. 网络技术的引进：当今网络铺天盖地、无孔不入，怎样将网络技术引入我们的光谱实时测量系统，实现异地分析与处理，多用户分析与处理等，也是我们值得探讨得改进的方向。

硕士期间发表的论文

陈乐君 刘玉玲 余飞鸿. 光声光谱探测器的新发展. 光学仪器. 已录用.

致 谢

本课题是在余飞鸿教授和刘玉玲老师的悉心指导下完成的。

感谢余飞鸿教授和刘玉玲老师在研究生阶段给予的指导和关怀。两位老师勤勤恳恳的工作态度和严谨的科研精神都给了我巨大的影响，让我在今后的工作中有了学习的榜样和指路的坐标。

感谢徐向东教授的关怀和指导。徐教授对学生的关爱和爱护使我们这些在异乡求学的学子感到非常温暖。

感谢 COERD 实验室中全体兄弟姐妹的帮助，当我在课题遇到困难时，他们给了我很多帮助和支持。同样要感谢还有 123 实验室的全体成员。

此外，还要感谢的有我的家人，来自他们的源源关爱和温暖信任，一直支持着我在人生的道路上不断前进和进步。

最后，还要感谢寝室的室友们，朝夕相处的两年半研究生生活因你们而变得更加丰富多彩。

陈乐君

二零零六年一月于求是园