

摘要

时间分辨荧光分析技术是目前非常灵敏和准确的一种微量分析技术,该技术作为一种非同位素免疫分析技术,近年来适用范围日趋广泛。通过将特殊的荧光标记物与样品中的待测物结合,然后利用荧光寿命来区分荧光信号和其他杂质。护肤品中若被违规添加一些激素,通过间断或者长时间的使用,会对人体造成不良影响,轻则泛红发痒,重则可能导致代谢紊乱甚至癌症。为了防止含激素的护肤品危险情况愈演愈烈,研制时间分辨的荧光分析系统来检测护肤品中的激素是十分必要的,而当前成熟的时间分辨荧光分析检测设备有多种,但大多数还是依托于实验室检测的大型设备,且设备的成本价格昂贵。基于此,课题采用一种将时间分辨荧光信号检测技术和下位机控制技术结合的办法,研制出了时间分辨荧光分析系统并实现对护肤品中糖皮质激素浓度的检测。

本文首先根据荧光的特点和时间分辨荧光分析技术的原理,完成时间分辨荧光分析系统总体方案的设计。在考虑系统功能的基础上,结合市场需要,由此确定了时间分辨荧光分析系统的优势、指标参数和 workflows。

在电控硬件设计方面,硬件电路以 STM32F407ZGT6 为控制核心,设计了主控制电路。以模块化的方式,设计了光源驱动模块、直线滑台模块、荧光信号采集模块、存储模块、串口通信模块和电源模块。为了满足不同场景下的使用需要,设计了两种操作简便的人机交互界面:一种是电容式可触摸屏,另一种是基于 Python 语言开发的上位机操作软件。

在软件程序设计方面,在下位机控制系统上采用相关滤波算法完成荧光信号的去噪;在 PC 端软件上采用经验模态分解算法对荧光信号进行去噪,效果较好。针对时间分辨荧光信号的双峰特征,采取基线矫正、峰值检测算法,实现荧光信号特征值的计算。完成特征值计算后,通过线性拟合方法,得到浓度转换方程。

在完成软硬件设计和联合调试后,搭建了时间分辨荧光分析系统实验平台。首先对原始荧光信号进行相关数字滤波,结合经验模态分解去噪算法,完成信号去噪。其次采用面积法计算出特征值,将特征值和实验样品浓度进行线性拟合,得到糖皮质激素的浓度检测方程式,记录到系统中备份。最后通过配置不同质量浓度的糖皮质激素样本,测试了系统的重复性和准确性。

本文研制的时间分辨荧光分析系统有着低成本、操作简单等优点,在护肤品中激素检测方面起到重要作用,对保障消费者健康的安全性具有重要意义。对时间分辨荧光分析系统进行了测试,测试结果表明系统检测精确度高、重复性误差小于 4%,对中、高浓度的样本检测结果较好。本系统稳定性好,满足系统设计的需求。

关键词: 激素检测, 荧光分析, 时间分辨, 下位机控制系统

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景及意义	1
1.2 国内外研究现状	2
1.3 论文的研究目标与内容	3
第 2 章 时间分辨荧光分析原理及系统总体设计	5
2.1 时间分辨荧光分析原理	5
2.2 时间分辨荧光分析系统总体设计	8
2.3 时间分辨荧光分析系统设计指标	11
2.4 本章小结	12
第 3 章 时间分辨荧光分析系统电控硬件设计	13
3.1 电控硬件总体设计	13
3.2 信号采集模块	20
3.3 人机交互模块	21
3.4 存储模块	22
3.5 串口通信模块	23
3.6 电源模块	23
3.7 系统集成	25
3.8 本章小结	26
第 4 章 时间分辨荧光分析系统软件设计	27
4.1 系统软件总体设计	27
4.2 下位机控制系统软件设计	27
4.3 上位机软件设计	33
4.4 本章小结	37
第 5 章 时间分辨荧光分析系统算法研究与检测性能分析	38
5.1 荧光分析系统的算法研究	38
5.2 荧光分析系统中各模块测试	49
5.3 荧光分析系统性能指标测试	50
5.4 本章小结	54
第 6 章 总结与展望	55

第1章 绪论

1.1 研究背景及意义

随着护肤品的广泛使用,消费者对于功效性的护肤品需求量日益增加^[1]。而该类护肤品中往往添加了各种激素,使得护肤效果见效快,满足了追求快速见效的消费者。在各种祛痘、美白淡斑、面膜等产品中,糖皮质激素使用较多,该激素具有快速消炎,抑制炎症,加快细胞新陈代谢,收缩毛细血管等功能,加入了该激素的护肤品可以使皮肤快速祛痘,剥脱角质,皮肤嫩白水润饱满。长期或高剂量使用糖皮质激素可能会产生骨质疏松、水肿、高血压、抑制免疫系统等副作用,这种危害在儿童和孕妇中更为严重。因此,一种快速准确检测糖皮质激素浓度的方法成为研究的热点和难点。

目前,针对护肤品中激素检测主要使用化学分析方法和免疫分析方法。其中化学分析方法包括气相色谱-质谱联用技术、高效液相色谱-质谱联用技术、液相色谱-紫外检测技术等,这些方法通过提取护肤品中的激素,然后将其纯化和分离,并使用特定的试剂或仪器进行定量分析^{[2][3][4]}。而免疫分析方法可分为酶联免疫吸附测定(ELISA, enzyme linked immunosorbent assay)、放射免疫测定(RIA, radioimmunoassay)和荧光免疫分析(FIA, fluorescence immunoassay)等,这些方法基于激素与特异性抗体的结合作用来检测激素的存在^{[5][6]}。具体而言,护肤品中的激素与标记有酶或放射性同位素的抗体结合,并经过特定的反应后,使用光学或放射性测量仪器来检测相应的信号。化学分析方法具有较高的灵敏度和精确度,但需要较复杂的仪器和技术,并且需要相对较长的分析时间;免疫分析方法则具有较高的速度和较低的使用成本。

免疫分析方法是一类基于生物学反应过程中抗原与抗体之间特异性结合作用的分析技术^{[7][8][9]}。免疫分析方法的核心是特异性反应原与抗体相互结合,从而实现对反应物的检测。这种检测方式不仅具有极高的选择性与灵敏度,而且所需的检测材料和设备也相对简单,操作流程简便,适用于大规模的检测。ELISA是一种利用酶标记抗体和抗原免疫结合的技术,通过酶反应将荧光或颜色变化转换为定量信号来测量目标物质的含量或活性^{[10][11][12]}。ELISA技术可分为间接法、夹心法、竞争法和直接法等多种类型,应用于各种不同的生物分析中。RIA是一种利用放射性同位素标记抗体或抗原作为探针测量抗原或抗体的方法^{[13][14]}。该方法具有极高的灵敏度和特异性,但由于存在辐射安全问题和高成本等限制,在现代分析中已经逐渐被其他技术所取代。FIA是一种使用荧光标记抗体或抗原,并通过激发荧光物质来追踪标识分子的一种光学分析技术^{[15][16]}。该技术具有灵敏度高,分析速度快,适用于复杂混合物和在线分析等场景。近年来,荧光免疫分析技术因其标记物制作

简单、检测重复性好等优点，迅速获得了广泛应用和发展。荧光免疫分析技术可分为时间分辨荧光分析技术（TRFA, time-resolved fluorescence analysis）、荧光偏振免疫分析技术（FPIA, fluorescence polarization immunoassay）和荧光酶免疫分析技术（FEIA, fluorometric enzyme immunoassay analysis）等^{[17][18]}。其中时间分辨荧光分析技术是一种基于荧光原理的高级光学分析技术，该技术利用荧光物质在激发后发出的光信号的特殊光学规律，通过衰减时间和发射波长等信号参数进行精确的定量和定性分析。时间分辨荧光分析技术可应用于多种领域，包括生物医学、分子生物学、药物研究、环境分析、材料科学等等。此外，时间分辨荧光分析技术还可与其他技术相结合，如蛋白质质谱、单细胞荧光成像等技术结合，增强分析的能力和拓展其应用范围。在药物研究领域，时间分辨荧光分析技术广泛应用于药物靶点和药物-抗体-受体复合物的研究和药物筛选；在生物医学领域，时间分辨荧光分析技术被用于诊断和治疗相关的生物分子和代谢物的测定；在环境分析领域，该技术被用于检测空气、水和土壤中的污染物、重金属和生物毒素；在材料科学领域也被广泛应用于纳米材料的表征，材料的界面和微观结构的研究。时间分辨荧光分析技术具有成本较低、分析灵敏度高、可重复性好、温度、速率、浓度变化不敏感等优点。该技术可广泛应用于生物、化学、环境等领域，为科学研究和产业检测提供了一种可靠、高效、准确和快速的分析手段。

综上所述，本文设计了一种基于时间分辨荧光分析技术的检测系统，适用于快速准确检测护肤品中糖皮质激素，对于人体健康的安全，具有重要意义。

1.2 国内外研究现状

时间分辨荧光分析技术是 1983 年 SOINI 和 KOJOLA 提出的一种微量检测技术，他们将镧系元素标记为示踪螯合物和荧光测量相结合，使得蛋白质、酶以及同位素等物质在被检测时，不在受检测物种自然荧光的干扰^[19]。L.S.L Yu 等建立了一种时间分辨荧光法和免疫磁分离的测定方法，为苹果酒中的大肠杆菌 O157:H7 的测定提供了一种快速且灵敏的方法^[20]。M. Adília Lemos 等利用时间分辨荧光分析技术用于研究与食品工业相关的生物活性化合物，结果显示时间分辨荧光分析技术具有提供光学、无损测量的优势^[21]。

国外公司在时间分辨荧光分析设备方面十分成熟。例如，瑞士 Roche Diagnostics 公司研发的 Cobas e 411 Immunoassay System 系统，可以定量测量人体中特定蛋白质的浓度。日本生物医疗公司 TaKaRa 开发了一款免疫荧光检测仪器，PCR Thermal Cycler Dice TP600，它适用于长片段 PCR 扩增，操作人员能够独立调节控制面板。其独特的升温 and 降温模式可以防止温度不均对检测结果的影响，从而使得到的结果更加准确。德国 Tecan 公司研制的 Infinite 200 PRO 多模式时间分辨荧光免疫分析仪，具有多个检测模块，可以满足各种实验需要。瑞典 Thermo Fisher Scientific

AB 公司开发的 Varioskan™ Flash 时间分辨荧光免疫分析仪, 实现了全自动化操作, 可以减少操作难度和误差。

时间分辨荧光分析技术在国内的发展十分迅速, 检测的稳定性很高。余治采用时间分辨荧光分析法和酶联免疫分析法进行定量和定性比较, 结果表明时间分辨荧光分析法能够有效检测乙肝血清标志物, 并且其灵敏度较高^[22]。魏娜和张飞龙运用时间分辨荧光分析技术成功建立了测定酥油中黄曲霉毒素 M1 含量的方法, 相对误差小于 12%, 与传统的免疫亲和柱净化-HPLC 法相比, 这种方法具有更高的准确性和可靠性^[23]。崔乃元等提出并建立了鱼、虾、蟹中氯霉素残留量的荧光定量方法, 其定量限为 0.1μg/kg, 对水产品氯霉素的快速检测具有很高的应用意义和价值^[24]。赵维章等提出了一种简单、快速、高灵敏度的荧光定量免疫层析检测法, 可用于测定牦牛肉中喹诺酮类药物的残留。该方法的定量限小于 0.96μg/kg, 具有高度的准确度、精密度、灵敏度和稳定性, 表现出良好的应用前景^[25]。

国内对于荧光分析设备的研究虽然开始时间晚, 但是取得了十分显著的研究成果。目前时间分辨荧光分析技术在国内发展至今已经十分快速, 国内企业也研制了许多成功的荧光分析设备, 广泛地应用于食品、环境、医学等领域^{[26][27]}。南京基蛋生物公司研制的型号为 Getein1100 荧光免疫定量分析仪^[28]。广州万孚生物技术股份有限公司推出了一系列荧光免疫分析产品, 实现定量荧光分析检测系统功能^[29]。上海复星医疗器械有限公司研制的 TD-3108 微量时间分辨荧光免疫分析仪, 具有高精度和可重复性, 保证分析结果的准确性和可靠性。北京隆博电子科技股份有限公司推出的 LB-9020A 时间分辨荧光免疫分析仪, 适用于研究、医疗、环境检测等多领域。深圳市诺禾生物科技有限公司研制的 NH-3100 时间分辨荧光免疫分析仪, 适用于大规模检测需求, 检测灵敏度十分高。

近年来, 基于时间分辨荧光分析原理的小型化快速检测系统也成为了各大高校的研究课题。华南师范大学田振研制了灵敏的时间分辨荧光分析仪, 该设备还解决了诱导荧光光源和滤光系统的重要问题^[30]。武汉纺织大学李颖设计了一款干式荧光分析装置, 该装置使得检测结果更准确, 在自动化程度上还有可以提升的空间如自动加样等功能^[31]。杭州电子科技大学曹明勤设计了一种荧光免疫分析仪, 能够对瘦肉精完成准确检测, 但仪器在一致性上还会产生一些误差^[32]。

综上所述, 根据时间分辨荧光分析技术和荧光分析设备的研究现状和研究成果, 存在设备制作成本费用高, 操作复杂等缺点。因此, 为了提高设备的整体检测性能, 结合时间分辨荧光分析技术的特点, 课题专注于研究和开发时间分辨的荧光分析系统。

1.3 论文的研究目标与内容

通过阅读大量文献, 本论文提出了一种用于检测糖皮质激素的时间分辨荧光分

析系统,且具有小型化、实时检测、人机友好等特点。该系统基于时间分辨荧光分析技术,采用下位机控制系统和PC端时间分辨荧光分析软件结合,制定出时间分辨荧光分析系统总体设计方案,构建时间分辨荧光分析系统实验平台,实现试纸条上荧光信号的定量检测,并将检测结果进行显示和存储。时间分辨荧光分析系统预期实现目标包括:系统功能全面且使用简便,准确性高,稳定性好,C.V值能够控制在10%以内。

本论文共分为六章,各章节研究内容如下:

第一章:通过阐述课题研究的背景和发展现状,明确本文的研究内容、研究目标以及研究意义和价值。

第二章:对本文时间分辨的荧光分析系统进行原理分析阐述,以及对系统的组成和性能指标做出了具体介绍。

第三章:对时间分辨荧光分析系统的电控硬件系统进行设计,电控硬件系统包括主控制器电路、光源驱动模块、直线滑台模块、信号采集模块、人机交互模块、存储模块和电源模块,对电控硬件系统进行选型工作、测试与结果分析。

第四章:对时间分辨荧光分析系统的软件系统进行设计,软件包括时间分辨荧光分析系统的下位机控制软件和基于PC端的时间分辨荧光分析上位机软件,并对软件系统进行测试和结果分析。

第五章:对时间分辨荧光分析系统进行算法研究和性能测试分析,论述荧光信号数据处理的实现过程,验证系统中各模块的功能,并对系统进行重复性和准确性实验。

第六章:对完成的工作进行了全面总结,并指出了时间分辨荧光分析系统中存在的不足之处。同时对未来时间分辨荧光分析系统的研究方向进行了展望。

第2章 时间分辨荧光分析原理及系统总体设计

本章旨在设计一个时间分辨荧光分析系统，它是一个集光学、机械、电子、算法和软件于一体的检测分析系统平台。首先，深入探究时间分辨荧光分析技术的原理，然后据此确定时间分辨荧光分析系统的总体设计方案。

2.1 时间分辨荧光分析原理

2.1.1 荧光现象

荧光是一种通过光激发而产生的冷发光现象。当某种物质在室温下受到特定波长的光照射时，其吸收能量并进入激发态，然后迅速退激发并释放出比入射光波长更长的光^{[35][36]}。许多荧光物质在停止入射光之后，其荧光现象会立即消失，荧光寿命较短，具有这种特性的出射光就被称之为荧光^{[37][38][39]}。

当一些物质受到光的照射时，由于光的能量作用，分子或原子内部的一些电子会从原来的轨道跃迁到较高能级的轨道上，但由于激发持续的时间较短，电子很快回到原来的轨道上，在返回低能级的轨道过程中释放能量，能量以光的形式释放出来，从而产生了荧光^{[40][41][42]}。

物质吸收光或电磁辐射后发出的光就是荧光。在大多数情况下，辐射光的波长会比吸收光的波长要长，能量要小。然而，可能存在双光子吸收现象，即当吸收强度较大时，可能出现辐射光短于吸收光波长的现象。共振荧光是当辐射光波长等于吸收光波长时发生的一种现象^[43]。例如，物质吸收紫外线并发出可见波段的荧光。

荧光现象中常见的重要参数如下：

- (1) 激发波长：是指激发发光材料的波长，用纳米表示。
- (2) 发射波长：是指发光材料受到外部能量激发时，所发出的波长。
- (3) 荧光强度：是指发光材料所发出光的强度，强度取决于发光材料受到的激发的强度以及发光材料中物质的浓度。
- (4) 斯托克斯（Stokes）位移：是指在最大荧光发射波长与最大吸收波长之间的差值^[44]。
- (5) 荧光寿命：是当一束光激发发光材料时，荧光物质的分子吸收能量，从基态跃迁到某一激发态，然后以辐射的形式发射荧光回到基态，当激发停止时，分子的荧光强度下降到激发的最大强度的 $1/e$ 时所需的时间^[45]，即为荧光寿命。荧光寿命的长短受到多种因素的影响，如温度、溶液浓度、分子结构等。
- (6) 荧光量子产率：是指发光材料吸收能量后产生发射光的效率，它是荧光强度和激发光强度的比值，通常用百分比来表示。
- (7) 激发光谱：是指发光材料在不同的波长激发下，该材料的某一波长的发光

谱线强度与激发波长的关系^[46]。

- (8) 发射光谱：是指发光材料在一定的激发光照射下,该材料在不同波长下发光强度的变化^[47]。
- (9) 荧光光谱：是指发光材料吸收电磁辐射后,再以较长波长的光线自发发射能量的过程。实际上荧光光谱是发射光谱的一种。

2.1.2 荧光的时间分辨技术

时间分辨技术通过时间区分需要分辨的信息。荧光的时间分辨技术是一种根据时间区分荧光发射体所发射荧光的光谱技术^[48]。在这里,时间包含两层含义:一是荧光发射体发射的荧光寿命的长短,二是利用延迟测量时间进行检测,从而获得被检测的荧光信息和强度。

荧光发射体在 t 时刻的荧光强度为:

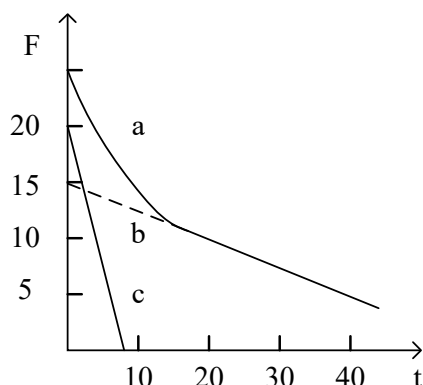
$$I_t = I_0 e^{-kt} \quad (2-1)$$

其中 I_0 是激发时最大荧光强度值, I_t 是在时间 t 时的荧光强度值, k 是衰减常数且 $k = \frac{1}{\tau}$, t 是关闭激发光后延迟的时间。

当 $I_t = \frac{I_0}{e}$ 时, $t = \tau$ 。将公式(2-1)两边取对数, 则

$$\ln I_t = \ln I_0 - \frac{t}{\tau} \quad (2-2)$$

根据公式(2-2)函数关系, 做出 $\ln I_t$ 与时间 t 之间的函数图形, 则是一条截距为 $\ln I_0$, 斜率为 $-\frac{1}{\tau}$ 的直线, 荧光衰减曲线如下图 2-1 所示。



a: 总荧光, b: 长寿命荧光, c: 短寿命荧光

图 2-1 荧光衰减曲线

Fig 2-1 Fluorescence decay curve

2.1.3 时间分辨荧光分析检测原理

目前免疫荧光检测技术种类很多,虽然检测方法和技术各有优劣,但时间分辨荧光分析技术是其中具有突出优势的一种。时间分辨荧光分析技术(TRFA)选择镧系稀土金属离子作为荧光标记物,可以实现时间分辨检测,提高了测量的准确性。

TRFA 是一种非放射性的微量分析技术,使用具有独特荧光特性的镧系金属离子及其复合物作为荧光标记物^{[49][50]}。使用镧系金属离子作为荧光标记物的优点如下:

- (1) 镧系金属离子的激发光谱和发射光谱之间的斯托克斯位移较大,最高可达 290nm,且激发光谱和发射光谱互不重叠,存在明显的差异性,荧光检测不受到激发光的光强干扰;
- (2) 镧系金属离子的荧光寿命长,易于实现时间分辨测定。一般的蛋白在激发光照射后发射的荧光寿命短,而含镧系金属离子的蛋白发射的荧光寿命较长,有 10us~1ms。因此,在测定过程中,通过延迟检测的时间,等待短寿命荧光完全衰减后再测定镧系金属离子的具体荧光强度,可以排除本征干扰,提升测量结果的准确性。结合数据处理技术,对测量的荧光强度进行比值处理,得到定量检测和分析的结果。时间分辨荧光检测的原理如下图 2-2 所示。

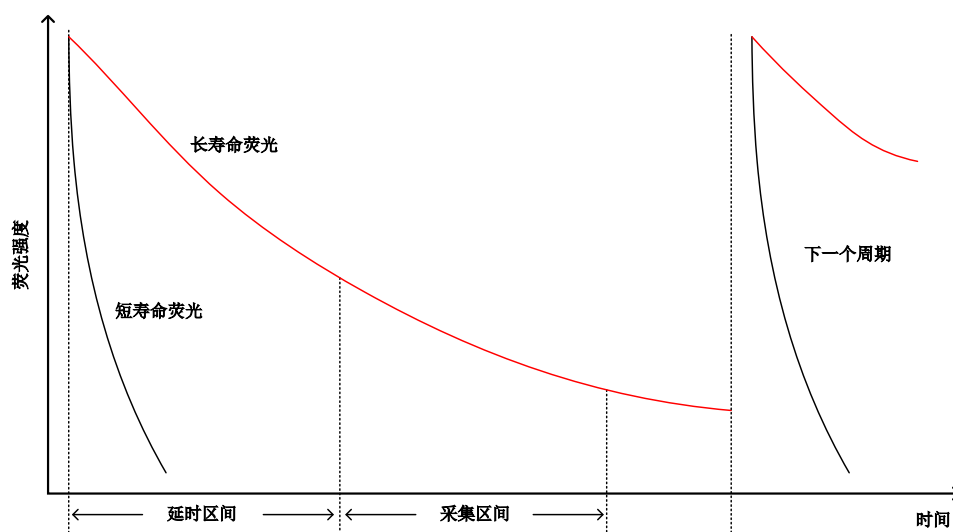


图 2-2 时间分辨荧光检测原理图

Fig 2-2 Schematic diagram of time-resolved fluorescence detection

基于时间分辨检测技术的荧光检测系统,最大程度消除了激发光、背景光和其他反射荧光的影响,有效提高了检测结果的准确性。时间分辨荧光分析技术具有无放射性污染、高灵敏度、易于操作等优点^[51]。因此,该技术被广泛应用于生物医学研究、临床生化、疾病诊断和食品安全等领域,已经成为常用的分析手段之一^[53]。

2.2 时间分辨荧光分析系统总体设计

2.2.1 系统总体架构设计框图

本文的研究旨在设计一种时间分辨荧光分析系统，该系统融合了光学、机械、电子和生物化学等多学科的知识 and 原理。通过市场调查和文献查阅，发现目前的荧光检测设备大多是配备了计算机的仪器，其内部结构是由光路、机械结构和电路等组成。这为本文的整体架构设计提供了清晰的思路。

时间分辨荧光分析系统整体架构设计如下图 2-3 所示，系统由两个组成部分构成，分别是时间分辨荧光分析软件和时间分辨荧光分析下位机控制系统。其中时间分辨荧光分析下位机控制系统可独立于上位机进行操作。配合上位机的使用，可以实现设备间的协调运作，从而更加有利于对测量数据结果进行深入的分析。

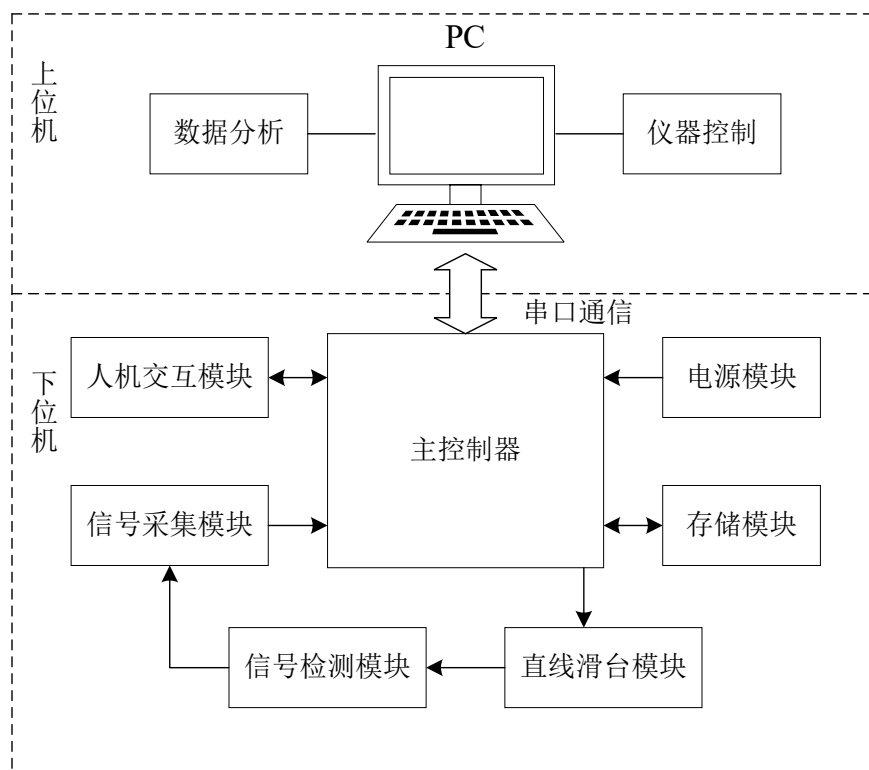


图 2-3 时间分辨荧光分析系统整体架构设计

Fig 2-3 Overall architecture design of the time-resolved fluorescence analysis system

基于时间分辨荧光分析系统的需求分析，本文设计了上图系统的总体框架，该框架包括两个部分。下面将针对这两个部分，分别进行详细介绍：

时间分辨荧光分析下位机控制系统的硬件部分主要由六个模块组成。其中，主控制器是硬件系统的核心控制部件，直线滑台模块带动待测试纸条运动至信号检

测模块下进行检测，信号采集模块进行荧光信号的采集，存储模块将采集到的数据进行保存，人机交互模块对荧光信号数据曲线和测量结果进行显示，电源模块负责整个设备系统的电源供应。

时间分辨荧光分析系统软件由两部分组成，分别是下位机控制系统软件 and 上位机软件。时间分辨荧光分析系统可以独立于上位机运行，使用固定的触摸屏来实现检测功能；为了能够进一步分析和研究数据，还设计了一个上位机软件来解决这方面的系统要求。

2.2.2 光学模块

光学模块在信号检测模块中具有核心作用，主要用于实现荧光信号的激发和接收，并且其稳定性是时间分辨荧光分析系统的关键。光学系统结构图如下图 2-4 所示。

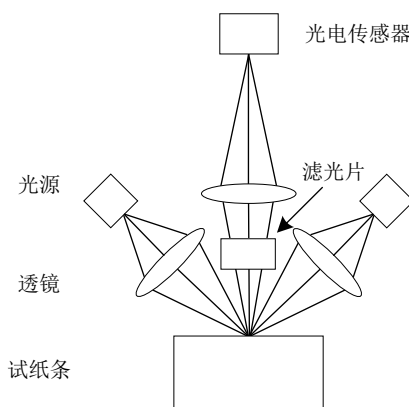


图 2-4 光学系统结构图

Fig 2-4 Diagram of optical system structure

光学模块共有两个部分：激发光路和采集光路。如上图 2-4 所示，其工作过程为：与试纸条成 45° 倾角的 LED 光源发射 340nm 的光，通过透镜聚焦到待测试纸条上。经过光源激发后，试纸检测区域所发出的荧光将被透镜聚焦到光电传感器的靶面上，然后光电传感器对光信号进行转换并输出电信号，系统将采集到的电信号数据，用于后续数据处理中的浓度计算问题。

实际操作可能会受到外界噪声因素的干扰^[52]，从而影响检测结果。为了避免外界噪声干扰，本系统将整个光路放置在暗盒中，所有的光学器件都固定在该暗盒中。

光学器件的选型十分重要，为了确保接收可靠的荧光信号，需要选取高质量、高精度的光学器件。系统中光学器件的基本参数如下：

(1) 光源

本设计中选用中心波长为 340nm 的发光二极管作为激发光源。发光二极管是通过电致发光实现高效的能量转换。

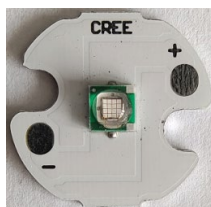


图 2-5 发光二极管实物图

Fig 2-5 Light-emitting diode physical picture

(2) 透镜

本系统中选用双凸透镜对光线进行聚焦作用。具体参数如下表 2-1 所示。

表 2-1 透镜参数

Tab 2-1 Lens parameters

名称	直径 (mm)	焦距 (mm)	中心厚度 (mm)	材质
双凸透镜	11.6	20	4.8	H-K9L

(3) 滤光片

滤光片的主要作用是滤除内部器件表面的反射光和散射光，留下系统所需波长的光。本系统采用的是窄带滤光片，具体的参数如下表 2-2 所示。

表 2-2 滤光片参数

Tab 2-2 Filter parameters

名称	波峰 (nm)	半带宽 (nm)	直径 (mm)	厚度 (mm)
滤光片	615	± 20	12	1

(4) 光电传感器

光电传感器的主要功能是将采集到的荧光信号转换为电流信号，它对检测结果的准确性有直接影响。本系统中采用北京敏光科技有限公司生产的 LSSAPD9-500 雪崩光电二极管 (Avalanche Photo Diode) 作为核心组件，直接将采集到的荧光信号转换为电流值，实物图如图 2-6 所示。LSSAPD9-500 具有高可靠性，低暗电流，顶部照明平面 APD，响应波段 400-1100nm，感光面的区域尺寸为 $\phi 1.5\text{mm} \times 1.5\text{mm}$ ，615nm 处的感光度 S 约为 0.3A/W，最小暗电流 0.1nA，响应频率达到 2GHz，具有高灵敏度和高可靠性。



图 2-6 雪崩光电二极管实物图

Fig 2-6 Avalanche photodiode physical picture

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/575004312022011320>