

# 多光路光散射扬尘检测方法研究

李晋惠 于亚琳 田军委

(西安工业大学理学院 西安 710021)

**摘要:** 针对传统扬尘传感器在测量方法中测量精度低、长期户外测量精度保持性差的不足,在 Mie 光散射原理基础上,研究了一种多光路扬尘检测方法,设计了一套面向建筑工地扬尘检测的光学扬尘浓度测量系统。介绍了扬尘监测系统的光学测量原理,研究了新方法中光通量和离子浓度计算方法,并对检测系统参数进行了优化分析。设计了多光路激光扬尘检测系统,分析了光透过率与粉尘层厚度之间关系。对所设计系统以国控点数据为基础进行了对比实验,实验结果表明新方法相对国控点数值最大偏差 8.5%,较 PPD4NS 检测精度明显提高。

**关键词:** 扬尘检测;光散射;激光测量;信号处理

**中图分类号:** X85    **文献标识码:** A    **国家标准学科分类代码:** 610.30

## Reach on multi-laser scattering dust detection method

Li Jinhui Yu Yalin Tian Junwei

(School of Science, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China)

**Abstract:** Traditional dust sensor is low precision and its precision keeping is poor in case of out door using, to resolve these problems, a multi-laser dust detection method is studied based on Mie light scattering principle and a dust concentration detection system is designed. The optical measuring principle of dust detection system is introduced, luminous flux and particulate concentration calculation method is studied, and parameters of the measuring system are optimized. Moreover, a multi-laser dust detection system is designed and the relationship between light transmittance and dust thickness is analysis. Experiment is performed compared with national measurement point and PPD4NS dust sensor, the result show that maxim relative deviation of the new system compared with national measurement point is 8.5%, the measuring accuracy is improved greatly compared PPD4NS.

**Keywords:** dust detection; light scattering; laser measurement; signal processing

## 1 引言

扬尘浓度检测方法和检测仪器是当前环境检测热点之一<sup>[1-4]</sup>。在常用扬尘浓度检测中,光散射法因无污染、成本较低受到国内外研究人员重视。该方法为间接测量法,其测量准确度不足,许多研究人员研究新方法和系统以提高该方法测量准确度。

为了得到正确光散射法测量结果,研究人员对粒子及其光散射特性进行了深入研究<sup>[5-12]</sup>。杨晖等人<sup>[5]</sup>在动态光散射测量研究中提出了一种提高信号信噪比的方法,顾芳等人<sup>[6]</sup>研究了悬浮物颗粒光散射特性及其信息提取方法,韩秀英等人<sup>[7]</sup>在激光粒度测量中提出了一种非独立反演算法,彭善琼等人<sup>[8]</sup>在动态光散射测量中研究了一种光子相关光谱测量法,巩蕾等人<sup>[9]</sup>对缺陷粒子的光散射特性进行了研究,张小林等人<sup>[10]</sup>研究了一种气溶胶粒子的光散射特

性,并在此基础上对气溶胶浓度进行测量,刘伟等人<sup>[11]</sup>对动态光散射特性进行了研究,在此基础上提出了扬尘浓度测量的最优拟合累积分析法,王志永等人<sup>[12]</sup>将动态光散射特性应用于图像分析以实现纳米粒子的测量分析。

光散射扬尘浓度测量方法为间接测量法,为了提高测量精度,研究人员对光散射法标定方法进行了大量研究<sup>[13-16]</sup>。高志良等人<sup>[13]</sup>分析和研究了基于光散射法的粒子计数器计量和标定方法,郜津慧等人<sup>[14]</sup>研究了光散射扬尘浓度测试仪的标定方法,章燕等人<sup>[15]</sup>对比了称重法和光散射法在 PM2.5 浓度测量中表现,证明了光散射法测量准确性和实用性,张维等人<sup>[16]</sup>研究了利用称重法和光散射法同时测量扬尘浓度,并将该方法应用到建筑工地扬尘浓度测量中。

在上述研究基础上,国内外推出了多种扬尘检测仪器及传感器,如煤炭科学研究院推出的 GCG500 粉尘检测仪,

可实现  $0.1 \sim 500 \text{ (mg/m}^3\text{)}$  扬尘浓度检测, 准确度为  $\pm 15\%$ , 工作电流  $\leq 120 \text{ mA}$ ; 郑州光力公司推出的 GCG1000, 测量范围为  $0.1 \sim 1000 \text{ mg/m}^3$ , 准确度为  $\pm 25\%$ , 工作电流  $\leq 200 \text{ mA}$ ; 江苏三恒推出的 GC1000, 测量范围为  $2 \sim 1000 \text{ mg/m}^3$ , 准确度为  $\pm 25\%$ , 工作电流为  $\leq 250 \text{ mA}$ 。目前, 市场上常用的粉尘传感器有日本荣神 PPD4NS 型粉尘传感器, SHARP 公司 GP2Y1010AUOF 型粉尘传感器, 韩国 SYHITECH 的 DSM501A 型粉尘传感器等。

尽管国内外关于扬尘检测方法和仪器取得了丰富的成果, 但针对建筑工地扬尘检测的方法和实现研究不足, 已有的方法和仪器难以应用于建筑环境扬尘检测。国内外成品粉尘仪尽管测量稳定性好, 但价格高昂, 难以大面积推广, 同时不适合进行长时间现场检测, 而已有的粉尘传感器参数分散性大, 标定调整困难, 难以实现扬尘标准含量的准确检测。针对现有方法存在的问题, 在光散射理论上, 提出了利用多光路方法实现建筑环境扬尘检测, 实现灵敏度和量程的统一, 提高扬尘传感检测的适应性和稳定性。

## 2 Mie 光散射理论

光散射粉尘浓度测量方法主要利用灰尘区对给定光线散射能量的影响来实现粉尘浓度的判别, 其基本理论基础为 Mie 光散射理论<sup>[1]</sup>。

Mie 散射理论讨论的是各向同性的均匀球形颗粒的光散射问题, 并给出了具有适当边界条件的麦克斯韦方程的解。

根据 Mie 理论, 当直径为  $d$  的球形粒子受到一光强为  $I_0$ 、波长为  $\lambda$  的入射光照射时, 在与散射体相距  $r$ , 与光轴  $Z$  成  $\theta$  角的观察点  $P$  处的散射光强为  $I$ ,  $I$  是由垂直于散射体的散射光强  $I_r$  和平行于散射面的散射光强  $I_l$  综合效应所引起。

$$I = I_l + I_r \tag{1}$$

Mie 散射理论中, 散射面为观察点与  $Z$  轴所构成的平面, 如图 1 所示。

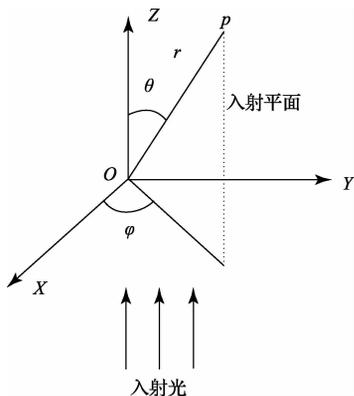


图 1 球面颗粒的 Mie 散射坐标

其中  $I_r$  和  $I_l$  由下式得出。

$$I_r = \frac{\lambda^2 I_0}{4\pi^2 r^2} i_1 \sin^2 \varphi \tag{2}$$

$$I_l = \frac{\lambda^2 I_0}{4\pi^2 r^2} i_2 \cos^2 \varphi \tag{3}$$

式中:  $\varphi$  为入射光的偏振角,  $i_1$  和  $i_2$  为强度函数, 他们表达式为:

$$i_1 = | \hat{S}_1(m, \theta, \alpha) |^2 \tag{4}$$

$$i_2 = | \hat{S}_2(m, \theta, \alpha) |^2 \tag{5}$$

式中:  $\hat{S}_1, \hat{S}_2$  为振幅函数, 他们是由贝塞尔函数和勒让德函数组成的无穷级数<sup>[6]</sup>:

$$s_1 = \sum_{l=1}^{\infty} \frac{2l+1}{l(l+1)} (a_l \pi_l + b_l \tau_l) \tag{6}$$

$$s_2 = \sum_{l=1}^{\infty} \frac{2l+1}{l(l+1)} (a_l \pi_l + b_l \tau_l) \tag{7}$$

式中:  $\pi_l, \tau_l$  为散射角函数, 它只与散射角  $\theta$  有关,  $a_l, b_l$  是 Mie 系数, 他们是颗粒径参数  $\alpha = \pi d / \lambda$  和散射体的相对折射率  $m$  有关的函数。

## 3 新型扬尘浓度检测方法

### 3.1 光通量的计算

如图 2 所示。设入射光沿  $Z$  轴方向照射到位于坐标原点的颗粒, 散射光通量是在偏离  $Z$  轴的某点附近的球冠面范围内(散射角在  $\phi_1 \sim \phi_2$ ) 进行采集。这时方位角  $\phi_1 \sim \phi_2$  与散射角  $\theta$  有关。

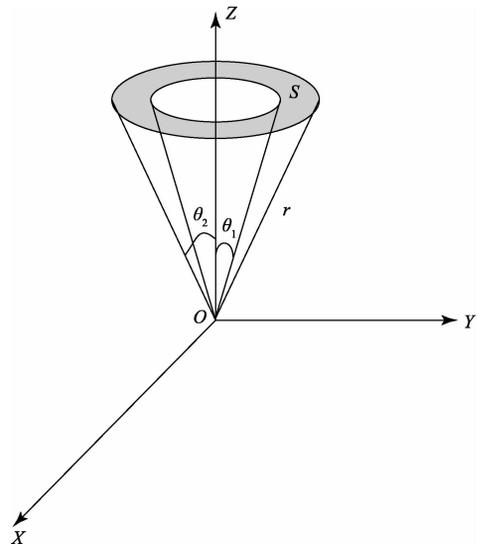


图 2 近前向散射光收集系统

当入射光为自然光时, 光通量可按下式计算:

$$F = \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} d\varphi \int_{\theta_1}^{\theta_2} I_s r^2 \sin\theta d\theta =$$

$$\frac{\lambda^2 I_0}{4\pi^2} \int_{\theta_1}^{\theta_2} [i_1(\theta) + i_2(\theta)] \Delta\varphi \sin\theta d\theta \tag{8}$$

式中:

$$\Delta\varphi = (\varphi_2 - \varphi_1)/2 =$$

$$\arccos \left[ \frac{\cos \frac{\theta_2 - \theta_1}{2} - \cos\theta \cos \frac{\theta_2 + \theta_1}{2}}{\sin \frac{\theta_1 + \theta_2}{2} \sin\theta} \right] \quad (9)$$

当入射光为全偏振光时,光通量如下:

$$F = \frac{\lambda^2 I_0}{4\pi^2} \int_{\varphi_0 - \Delta\varphi}^{\varphi_0 + \Delta\varphi} \int_{\theta_1}^{\theta_2} [i_1(\theta) \sin^2\varphi + i_2(\theta) \cos^2\varphi] \sin\theta d\theta d\varphi \quad (10)$$

### 3.2 粒子浓度计算<sup>[5]</sup>

激光器发出的平行光  $I_0$  经过扬尘区的粉尘颗粒散射后的光  $I$  有如下关系式。

朗伯比尔定律公式:

$$I = I_0 e^{-\frac{1}{4} K_{ext} d^2} \quad (11)$$

式中:  $K_{ext}$  为消光系数,  $d$  为粉尘直径,  $L$  为待测粉尘区厚度,  $N_V$  表示粉尘的粒子数浓度,  $\lambda$  为光源波长,  $m$  为介质的相对折射率。

由上式可得:

$$\ln\left(\frac{I_0}{I}\right) = \frac{\pi}{4} d^2 N_V K_{ext} L \quad (12)$$

即粒子数浓度:

$$N_V = \ln\left(\frac{I_0}{I}\right) \frac{4}{\pi d^2 K_{ext} L} \quad (13)$$

由于被测颗粒为球形颗粒,且密度  $\rho$  已知,直径为  $d$ ,则可求得质量浓度为:

$$M_V = N_V \rho \frac{4\pi}{3} \left(\frac{d}{2}\right)^3 = \ln\left(\frac{I_0}{I}\right) \frac{4}{\pi d^2 K_{ext} L} \rho \frac{4\pi}{3} \left(\frac{d}{2}\right)^3 \quad (14)$$

式中:  $V$  是单个球形颗粒的体积。

假设颗粒直径  $d = 10 \mu\text{m}$ , 入射光波长  $\lambda = 0.65 \mu\text{m}$ ,  $\alpha = \pi d/\lambda$ , 此时  $\alpha = 50$ , 则消光系数  $K_{ext}$  基本趋于一常数。此时  $m$  的大小不会影响消光系数。

在实际工程测量中,粉尘颗粒直径远大于入射光波长,为了工程计算方便,可以近似取  $K_{ext}$  的值为 2。

## 4 参数优化计算

### 4.1 最大灵敏度参数

系统利用的是朗伯-比尔定律,简化后可写成:

$$I = I_0 e^{-xCL} \quad (15)$$

式中:  $I_0$  为入射光光强;  $x$  为被测粉尘单位浓度,  $C$  为消光系数,  $L$  为吸收层厚度。

该测量方法的灵敏度为:

$$S_C = \frac{\Delta I}{\Delta C} = -xLI_0 \exp(-xLC) = xIL \quad (16)$$

测量的灵敏度与粉尘的消光系数  $x$ , 通过吸收层的光强  $I$ , 以及吸收层厚度  $L$  是正比例关系。

在给定的粉尘浓度范围条件下,假设其他参数的设置如下:

1) 粉尘样品直径:  $d = 10 \mu\text{m}$ ;

2) 密度:  $\rho = 2.7 \text{g/cm}^3$ ;

3) 折射率:  $m = 1.54$ ;

4) 波长:  $\lambda = 650 \text{nm}$ 。

用 MATLAB 可以仿真计算出  $L$  与扬尘浓度以及透过率  $I/I_0$  之间的关系如图 3 所示。

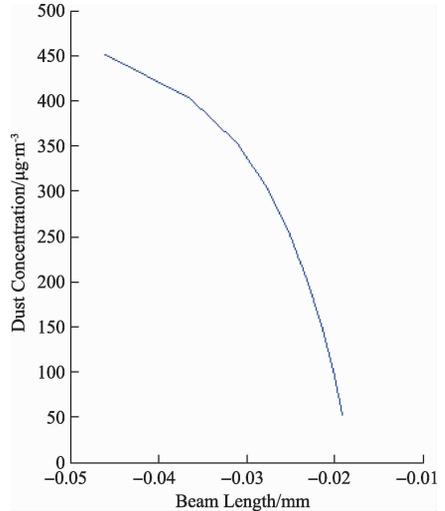


图3 灵敏度与粉尘层厚度之间关系

同样环境条件下,粉尘的消光系数是常数,提高灵敏度最好的方法就是增大  $L$ , 但  $L$  过大时就会相应的减少  $I$  的值,当粉尘浓度在某一个范围内,根据范围就能确定合适的吸收层厚度如图 4 所示。

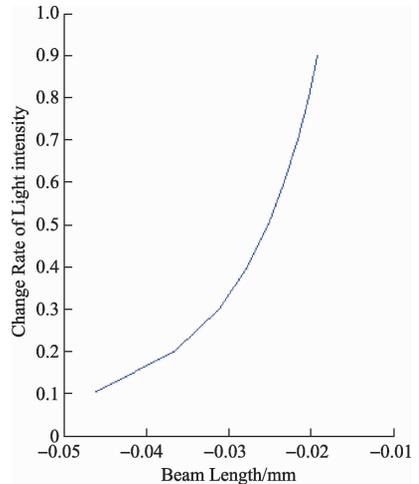


图4 透过率与粉尘层厚度之间关系

可以通过适当增加激光器的功率增大  $I_0$  而增大出射光  $I$  来增大灵敏度。根据测量范围选取合适的激光器和  $L$  来提高灵敏度。

### 4.2 最大量程参数

表 1 是用计算机计算出的几组数据,当给定被测粉尘

浓度范围,就可确定相应的吸收层厚度。

表 1 不同的光程长度对应的浓度测量范围

质量浓度范围/ $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$	光路长度/m
0~5	5
0~10	2.5
0~20	1.3
0~40	0.8
0~80	0.33
0~100	0.24
0~200	0.13
0~300	0.08
0~400	0.06
0~500	0.05

根据表 1 的实验数据,按照实际需要的量程范围。对传感器的激光器进行不同位置的安装,使得在多光源情况下,检测系统可以检测出不同范围的粉尘浓度。

根据实验所得数据分析得出在同样粉尘浓度条件下, $L$  越大,灵敏度越高,量程范围比较窄,要根据所要测试的浓度范围,调整  $L$  值,使得灵敏度和量程达到最优化。

### 5 系统实现方法

系统工作原理框图如图 5 所示。

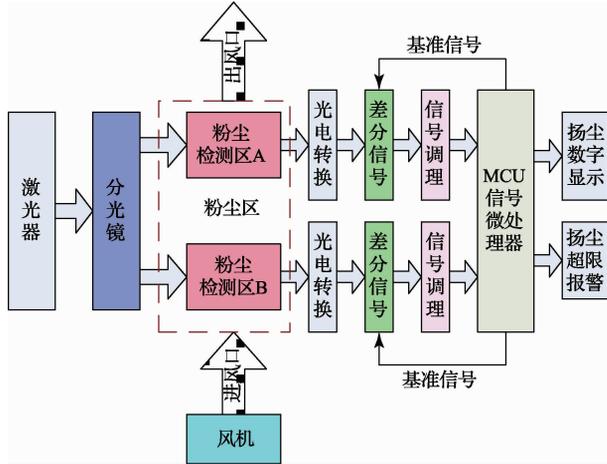


图 5 系统工作原理

#### 5.1 系统原理

当系统置于建筑工地时,每隔 30 s 钟显示一个数据,显示的数据为  $\text{PM}_{10}$  的含量,介绍的测量系统有两路光电接受转换系统,假设一路光电系统的灵敏度较高为 0.001,量程较小为 0.001~400;另一路光电系统的灵敏度稍低为 0.01,量程为 0.01~1000。开机时两路系统同时工作,当数据处理器采集到的两路数据时,对所采集到的数据进行处理,选择数据绝对值高得优先显示。也可以通过人工选择,分别显示  $\text{PM}_{2.5}$  的浓度和

$\text{PM}_{10}$  的浓度,对建筑工地的扬尘超标问题进行实时在线监测,工地扬尘指数 =  $\text{PM}_{10}$  指数 -  $\text{PM}_{2.5}$  指数。可以解决建筑工地上扬尘超标因为空气  $\text{PM}_{2.5}$  含量过高而导致扬尘超限报警,使得建筑工地可以根据目前的  $\text{PM}_{2.5}$  的指数做一些施工上的调整和实行降尘措施,从而使建筑工地对环境污染降到最低。

#### 5.2 检测适应性和稳定性改进方法

##### 1) 适应性改进

现在市场上已有的传感器只能垂直安装,设计的传感器自带小风机,在使用过程中不受方位的限制,给安装带来了很大的方便。

##### 2) 稳定性改进

由光电转换器件转换后的电流信号非常小,在信号传输中容易受外界干扰,造成测量数据失真,使得测试数据分散度高,一致性比较差。本文所采用的复合滤波数据处理,使得信号所受到的干扰信号全部被滤除掉,测量值极少出现失真。使得系统测量数据的有很高的一致性。

### 6 实验及分析

采用本文方法,设计了扬尘浓度检测实验模块,参考国控点发布  $\text{PM}_{10}$  浓度,和日本荣神 PPD4NS 型粉尘传感器进行了对比实验。

实验地点:5 楼楼顶,通风良好

实验方式:采集国控点数据,同步采集本方案测量数据和 PPD4NS 数据。

实验数据如表 2 所示。

表 2 测量数据

序号	D0	D11	D12	D1	D2
1	256	243	277	260	301
2	267	236	287	261.5	266
3	329	425	289	357	254
4	331	397	293	345	247
5	342	330	371	350.5	307
6	353	422	318	370	276
7	360	345	369	357	369
8	273	278	279	278.5	315

上述实验数据变化曲线如图 6 所示。

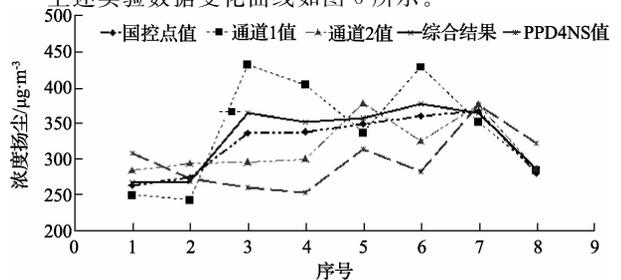


图 6 检测数据变化曲线

上述实验中,综合评定结果取两通道数据的平均值。根据实验数据,国控点检测数据在8 h内基本呈上升趋势,在最后一个小时数据开始下降。新检测方案变化趋势和国控点数据基本吻合,在8 h之内,综合评定结果最大偏差为 $28 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,测量结果和国控点数据偏差在8.5%以内。

PPD4NS传感检测结果也基本和国控点数据趋势吻合,在8 h内最大偏差为 $84 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,相对国控点数据最大相对偏差25.4%。

实验结果表明,尽管单个通道数据相对于国控点值偏差较大,但双通道的平均效应使综合评定结果精度提高。

## 7 结 论

基于光散射原理对测量系统最大灵敏度计算方法做出了分析以及对最大量程计算方法做了理论性的解释,设计了一种新型的扬尘监测实施方案,依据该原理设计出的扬尘监测系统。对提出方法搭建了实验平台,并进行了对比实验分析,实验结果表明,本文所提出方法和国控点相对偏差在8.5%以内,较PPD4NS提高了近3倍,证明了本文方法的正确性。

本文所提出方法可以很方便为建筑工地的扬尘情况实现在线不间断的监测,为获取准确的建筑工地施工扬尘数据提供手段,同时为后续控制建筑工地的扬尘污染提供一手资料和调控参考。

## 参考文献

- [1] WHILE W R, MACIAS E S, NININGER R C. Size-resolved measurement of light scattering by ambient particles in the southwestern USA[J]. Atmospheric Environment, 1994, 28(5): 909-902.
- [2] 郜津慧,王智超,杨英霞,等. 光散射式数字粉尘测试仪的标定及不确定度分析[J]. 价值工程, 2014(24): 301-303.
- [3] 钟妮,罗逸龙,黄美霞,等. 光散射粉尘测试仪的发展现状与趋势[J]. 仪器仪表用户, 2013, 34(6): 24-26.
- [4] 高波,库校东. 基于光散射测量方法的粉尘传感器及应用[J]. 电器, 2013(增刊1): 731-735.
- [5] 杨晖,郑刚,李孟超,等. 提高动态光散射测量系统信

噪比的一种方法[J]. 仪器仪表学报, 2008, 29(8): 1750-1755.

- [6] 顾芳,杨娟,卞保民,等. 悬浮颗粒物信号幅度分布提取及信息熵的应用[J]. 仪器仪表学报, 2008, 29(11): 2341-2345.
- [7] 韩秀英. 激光粒度测试的非独立反演算法的研究[J]. 国外电子测量技术, 2010, 29(7): 27-28.
- [8] 彭善琼. 基于光子相关光谱法动态光散射测量系统研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2013, 27(3): 205-210.
- [9] 巩蕾,吴振森,高明. 基片与不同方位多形态缺陷粒子的复合光散射特性分析[J]. 光学学报, 2012(6): 273-278.
- [10] 张小林,黄印博,饶瑞中. 一种内混合气溶胶粒子模型光散射的等效性[J]. 光学学报, 2012(6): 260-266.
- [11] 刘伟,王雅静,申晋. 动态光散射最优拟合累积分析法[J]. 光学学报, 2013(12): 319-326.
- [12] 王志永,蔡小舒,徐呈泽,等. 动态光散射图像法测量纳米颗粒粒度研究[J]. 光学学报, 2014(1): 282-287.
- [13] 高志良,季启政,王慧,等. 光散射尘埃粒子计数器的计量校准规范浅析[J]. 标准科学, 2013(7): 42-45.
- [14] 郜津慧,王智超,杨英霞,等. 光散射式数字粉尘测试仪的标定及不确定度分析[J]. 价值工程, 2014(24): 301-303.
- [15] 章燕,冯智田,秦红梅,等.  $\text{PM}_{10}$ 浓度重量法与光散射法测定结果比较分析[J]. 中国公共卫生, 2014(6): 840-842.
- [16] 张维. 重量法与光散射法联用监测建筑施工扬尘排放浓度的研究[J]. 黑龙江科技信息, 2014(25): 50.

## 作者简介

李晋惠,1962年出生,教授,研究生导师。主要研究方向为数字图像处理、自控技术。现任西安工业大学理学院院长。

于亚琳,1982年出生,硕士研究生,攻读专业为光学。主要研究方向为光学检测。