

计算机应用技术丛书

智能型检测仪表及控制装置

● 李海青 主编

56.1

化学工业出版社

计算机应用技术丛书

智能型检测仪表及控制装置

李海青 主编

化学工业出版社

·北京·

(京)新登字 039 号

图书在版编目(CIP)数据

智能型检测仪表及控制装置/李海青主编. —北京:化学工业出版社, 1998. 9

(计算机应用技术丛书)

ISBN 7-5025-2266-2

I. 智… II. 李… III. ①检测仪表:自动化仪表:化工仪表②化工仪表-集中控制-控制设备 IV. TQ056

中国版本图书馆 CIP 数据核字(98)第 15475 号

计算机应用技术丛书
智能型检测仪表及控制装置
李海青 主编
责任编辑:刘 哲 李玉晖
责任校对:洪雅姝
封面设计:田彦文

化学工业出版社出版发行
(北京朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)
新华书店北京发行所经销
北京市彩桥印刷厂印刷
北京市彩桥印刷厂装订

*

开本 850×1168 毫米 1/32 印张 5½ 字数 152 千字

1998 年 9 月第 1 版 1998 年 9 月北京第 1 次印刷

印 数:1—3000

ISBN 7-5025-2266-2/TP·208

定 价:12.50 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者,本社发行部负责调换

前 言

计算机在化工中应用的重要方面之一,是采用基于计算机技术的检测仪表及控制装置实现化工过程控制。目前各种一般参数的智能型传感器、变送器、分散型控制装置(DCS)、可编程调节器、可编程逻辑控制器(PLC)、工业用 PC 微机及其他工业控制机等,在化工过程控制中已取得了广泛的应用,在有关的期刊及著作中已有不少论述和资料积累。

但在化工过程中还存在着大量难测、难控和不可测的过程变量(或特殊参数),这些实时过程变量的信息和控制策略在很大程度上决定着过程操作、控制和优化的水平。原有仪表系列和测试技术已难于满足要求,迫切需要发展基于“软测量”的智能型检测仪表和基于“知识”的智能型控制装置。现将有关基本概念简述如下。

(1) 知识

知识是人通过实践,认识到的客观世界规律性的东西。知识是信息经过加工、整理、解释、挑选和改造而形成的。知识可分为三类:用来提供概念和事实的称为说明性知识;用来在规则中表示问题的知识称为过程性知识;用控制策略表示问题的知识称为控制性知识,包括各种处理过程、策略和结构的知识。

(2) 软测量(soft sensor)

软测量是一种利用较易在线测量的辅助变量和离线分析信息去估计不可测或难测变量的方法。软测量通常是在成熟的硬件传感器基础上,以计算机技术为支撑平台,通过软测量模型运算处理而完成的。因此也可把实现软测量功能的实体看成是一种软仪表,它可利用多种易测变量传感器信息和先验分析信息,通过软测量模型计算处理得到所需检测的难测或不可测变量的信息。

(3) 智能型仪表和装置

智能是指运用知识解决问题的能力。智能通常包括三种要素,即推理、学习、联想。人工智能是应用计算机来模拟人类的智能行为。因此,所谓智能机器意味着其中含有一定的人工智能,即利用计算机来代替人的一部分脑力劳动,具有完成运用知识进行推理、学习、联想解决问题的功能。

智能型仪表及装置是基于微型机(微处理器、单片机或体积很小的微型计算机)的检测仪表及控制装置,具有以下特征:

- a. 自动完成某些测量任务或在程序指导下完成预定动作;
- b. 具有进行各种复杂计算和修正误差的数据处理能力;
- c. 具有自校准、自检和自诊断功能;
- d. 便于通过标准总线组成一个多种仪表的复杂系统,实现复杂的控制功能,并能灵活地改变和扩展功能。

为了促进基于“软测量”的智能型检测仪表和基于“知识”的智能型控制装置在化工过程中的应用和发展,本着进行技术交流和抛砖引玉的目的,我们选择了几项已初步获得应用的科研成果(激光微粒测量仪、过程成像智能检测系统、模糊控制器、气固两相流浓度及其分布的测量装置、啤酒发酵罐的计算机控制系统)为实例,在本书中作了介绍。

参加本书编写的人员为:李海青(前言),张宏建(第一章),黄志尧(第二章),于松来、陆水钧、杜维(第三章),杨江、胡赤鹰(第四章),周泽魁、张光新(第五章)。

限于编者水平,缺点错误在所难免,恳请读者批评指正。

编 者

1997年5月

内 容 提 要

本书以几项已初步获得应用的科研成果为实例,介绍基于“软测量”的智能型检测仪表和基于“知识”的智能型控制装置在化工过程中的应用,内容包括激光微粒测量仪、过程成像智能检测系统、模糊控制器、气固两相流浓度及其分布的测量装置和啤酒发酵罐的计算机控制系统。

本书注重应用,内容精练,对自动控制工程技术人员很有参考价值。

目 录

1 激光微粒测量仪	1
1.1 微粒尺寸及其分布的测量基础	3
1.1.1 光的散射现象	3
1.1.2 光散射规律	6
1.1.3 颗粒的粒度与粒度分布	13
1.2 激光微粒测量仪	17
1.2.1 激光微粒测量仪的基本原理	17
1.2.2 颗粒粒度分布的反演计算方法	24
1.2.3 激光微粒测量仪的结构及硬软件设计	32
1.3 激光微粒测量仪的应用	35
1.3.1 测量方法和测量步骤	35
1.3.2 样品的制备和测量	37
1.3.3 颗粒的相对折射率对粒度测量的影响	38
1.3.4 保证衍射式激光微粒测量仪测量精度的几个方法	41
参考文献	43
2 过程成像智能检测系统	45
2.1 概述	45
2.2 过程成像的特点、用途及系统构成	46
2.3 电容过程成像系统与图像重建模型	49
2.3.1 检测原理与系统	49
2.3.2 图像重建数学模型	50
2.4 图像重建算法	55
2.4.1 逆问题与不适定问题	55
2.4.2 反投影算法	57
2.4.3 正则化广义逆图像重建算法	60
2.4.4 最优化图像重建算法	63
2.5 应用	68

2.5.1	两相流流型辨识	68
2.5.2	离散相浓度测量	70
2.5.3	两相流流量测量	72
	参考文献	73
3	模糊控制器	75
3.1	模糊控制器原理	75
3.1.1	模糊控制简介	75
3.1.2	模糊控制关系阵的建立	81
3.1.3	模糊判决	89
3.1.4	模糊控制的实现	90
3.2	模糊控制器的软件设计	92
3.3	模糊控制器在控制系统中的应用	95
4	气固两相流浓度及其分布的测量装置	98
4.1	气固两相流浓度及其分布的测量原理	98
4.1.1	概述	98
4.1.2	电容法	103
4.1.3	成像算法	107
4.2	计算机测试系统	111
4.2.1	测量装置组成	111
4.2.2	阵列式电容传感器	112
4.2.3	接口电路	115
4.2.4	测量软件	118
4.3	在粉料气力输送系统中的应用	121
	参考文献	122
5	啤酒发酵罐的计算机控制系统	125
5.1	概述	125
5.2	发酵温度控制方案的确定	126
5.2.1	啤酒生产工艺简介	126
5.2.2	对象特性的分析	128
5.2.3	控制策略分析	131
5.3	SBWJ 温度变送器的开发	138
5.4	FCS 计算机测控管理系统的硬件组成	139
5.4.1	FCS 系统的硬件配置	139

5.4.2	输入转换接口	140
5.4.3	输出转换接口	143
5.4.4	电源检测和停电自动保护系统	145
5.5	FCS 计算机测控管理系统的软件设计	145
5.5.1	FCS 应用软件系统的结构框图	146
5.5.2	数据结构	146
5.5.3	画面制作	148
5.5.4	系统的汉化	152
5.5.5	中断服务程序	154
5.5.6	扩展内存的管理和使用	159
5.5.7	打印输出	160
5.5.8	监控程序	161
5.6	系统的实际运行结果	164
	参考文献	165

1 激光微粒测量仪

颗粒可以是固体粉末,也可以是液滴或气泡。虽然它们的尺寸一般都很小,但它们却在国民经济的许多部门,如化工、医药、机械、冶金、动力、电子、轻工、建筑及环保等,起着十分重要的作用。1985年4月在美国召开的第16届颗粒学会年会上,曾有人撰文指出,仅在化工及医药行业中,就有约60%的产品(包括中间产品)呈粉末或颗粒状,而其中约20%产品的性能质量与颗粒的大小密切相关^[1]。除此以外,在动力工程中,送入燃烧室中的煤粉或液体燃料液滴,其颗粒的大小及其分布直接影响到燃烧效率、点火特性、火焰稳定性以及污染情况等^[2];在原子能发电厂中,工作蒸汽中所含有的细微水滴对汽轮机会造成严重的水蚀,使经济性降低;在建筑行业中,水泥粉末的大小关系到水泥的质量和性能;在电子工业中,随着电子产品集成度的提高,对工作环境(生产车间的空气及清洗水等)中残留的颗粒数和这些颗粒的直径大小提出了愈加严格的要求,如不加控制就会造成很高的废品率;某些生产车间或劳动场所中各种排放的污染物和粉尘等颗粒的大小和含量对工人和周围居民的身体健康有重大影响,某些情况下,当空气中的粉尘浓度达到一定程度后,还会引起严重的生产事故。据报道,1987年哈尔滨市亚麻厂生产车间发生的严重爆炸事故可能就是由于空气中亚麻粉尘浓度过高所引起的^[3]。

以上这些简单的例子说明颗粒尺寸的大小及其分布和颗粒浓度在国民经济各个领域起着非常重要的作用。准确地测量细微颗粒的直径等参数,对改善产品质量,提高产品产量和性能,降低能源消耗,控制环境污染,保障人身健康等有重大的经济效益和社会意义。当前,随着我国经济建设和科学技术的不断进步和提高,快速而又准确的颗粒测量方法已经成为迫切需要研究和开发的一门技术。

所谓微粒是指线度为微米级或微米以下的颗粒。对于这样大小的颗粒显然无法用肉眼观察或用宏观量具进行测量。为了实现微粒尺寸的测量,科学工作者进行了大量的研究工作,利用颗粒的各种物理特性,研究和开发了很多的微粒测量方法和测量装置^[4~6]。据估计,目前世界各国研制的各种微粒测量装置和测量仪器已多达 200 种以上^[1]。比较普遍使用的方法有筛分法、沉降法、热力学法、照相法、干涉法和光散射法等。它们各有自己的适用范围和应用特点,其中不少已经有了很长的使用历史。然而,60 年代中期以来,随着激光、光导纤维、电子和光电子元件以及计算机等先进技术的不断发展和广泛应用,基于光散射理论的各种光散射微粒测量方法越来越受到人们的重视。和其他微粒测量方法相比,光散射法具有以下突出的优点。

①由于光的穿透性,可以实现非接触测量,无需从被测介质中抽取试样,从而提高了测量精度,对被测介质的干扰也可以减为最小。当被测介质不可及或有毒有害时,这一优点就表现得尤为明显。这也为在线粒径测量创造了有利条件。

②粒径测量范围宽。按各种不同光散射原理工作的颗粒测量仪,其可测粒径的下限为零点几微米,而上限则可达 1mm 左右,这个范围已能满足一般被测颗粒的需要。

③测量对象广。能对各种双相介质中的颗粒进行测量。

④易于和电子计算机配合使用,从而实现测量过程和数据处理的全盘自动化,使测量装置达到很高的智能化程度。另外,由于光电转换元件响应时间很短,可实现快速、实时的测量。

虽然光散射方法有很多优点,但这种方法是基于经典的颗粒光散射原理,散射光与颗粒尺寸等参数之间的关系复杂,计算过程十分繁琐。近年来,随着计算机的广泛使用,这种方法才得到实际应用。激光微粒测量仪就是一个典型的例子。它的基本思路是用计算机接收由颗粒所产生的散射光的大小,根据光散射理论,即散射光与颗粒尺寸的关系,由计算机经过优化等算法求出被测颗粒的尺寸。由于计算机的应用,整个信号采集和计算过程可在很短的时间内完成,同时测量精度也能得到保证。

1.1 微粒尺寸及其分布的测量基础

1.1.1 光的散射现象

根据麦克斯韦尔的电磁理论,光是一种电磁波。光束的特性可以用两个振动矢量,即电振动矢量 E 和磁振动矢量 H 来描述。电矢量 E 和磁矢量 H 彼此互相垂直,且都垂直于波的传播方向,三者呈右手螺旋关系,如图 1-1 所示。其中电矢量是产生光效应的原因,因此又称光矢量。

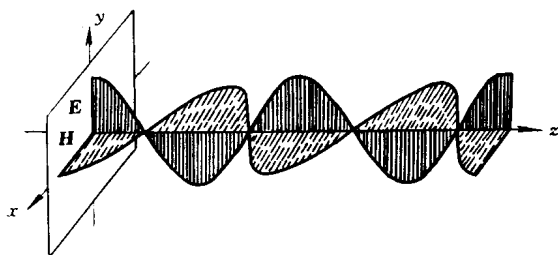


图 1-1 电磁波

光波的频率极高,约在 10^{15}Hz 的数量级,其光矢量相应地也变化极其迅速。如果光矢量的所有这些振动在垂直于传播方向的平面内不是局限在一个方向上,而是具有一切的可能方向,则称为自然光。如果光波的光矢量的方向始终不变,被限制在某一特定方向上,只是它的大小随相位而变,这种光称为线偏振光。如果光矢量的大小不变,而它的方向绕波的传播方向均匀地转动,光矢量的末端在垂直于光的传播方向平面内的轨迹是一个圆或椭圆,这称为圆或椭圆偏振光。

光线在真空以及均匀介质中通过时按直线方向传播。但是,当光线在某一非均匀介质中传播时,入射光的一部分将偏离其原来方向,而投射到其他各个方向去,这种现象称为光的散射。如果非均匀中含有许多微小颗粒,它们的直径与入射光的波长约为同一数量级,它们的折射率也与周围的均匀介质的折射率不相同,这种含有不规则分布颗粒的介质所引起的光散射称为亨达尔散射。另一种光散射称为分子散射,它是

由于“均匀”介质中存在着局部密度与平均密度之间统计性的偏差,破坏了它的光学均匀性。大气层对太阳光的散射就是一例。亨达尔散射与分子散射的共同特点是散射光的波长与入射光的波长相等。除此之外,喇曼在研究液体和晶体的散射时,发现散射光中除有与入射光频率相同的散射外,还有其他频率的散射光,这种散射称为喇曼散射。喇曼散射在测定分子固有频率,判断分子结构和成分等方面有广泛的应用。不过,以下要讨论的激光微粒测量方法主要涉及亨达尔散射。

当光束通过含有颗粒群的介质后,在入射方向上光强将发生衰减。这个衰减不仅是由于颗粒对光的散射,而且也由于颗粒对光的吸收。若不考虑可能的选择性吸收,绝缘体物质对可见光的吸收一般非常微弱。如果散射体的电导率不等于零,光波在其中传播时,在电磁场作用下会产生感应电流,使一部分光能耗散转变为热能。这种散射体对光表现为具有强烈的吸收作用。例如,1 μm 厚的金属膜的透射光只占入射光的1%以下。吸收程度一般还与入射辐射的波长有关,但在可见光范围内变化不大。

当散射体对入射光有吸收时,散射体介质的折射率为一复数,可表示为

$$m = n - \eta' i \quad (1-1)$$

其中 n, η' 由 $n^2 + \eta'^2 = \epsilon, n\eta' = \lambda\sigma/c$ 确定, ϵ 和 σ 是介质的介电常数和电导率, λ 是光在真空中的波长, c 是光速。复数折射率的实部 n 为光在介质中的传播速度与真空中的传播速度之比,与普通的折射率的意义相同。它的虚部 η' 反映了光因介质吸收作用而产生的是电磁波衰减。

每一个颗粒对入射光的散射和吸收程度可用散射系数、吸收系数和消光系数表征。散射系数 K_s 是单位时间内一个颗粒对入射光的全部散射光能量 E_s 与投射到该颗粒上的全部光能量的比值,即

$$K_s = \frac{E_s}{I_0 a} \quad (1-2)$$

式中 a 是颗粒在迎着入射光方向上的投影面积。

吸收系数 K_a 的定义与散射系数 K_s 类似,即

$$K_a = \frac{E_a}{I_0 a} \quad (1-3)$$

式中 E_s 为单位时间内一个颗粒所吸收的全部光能量。

消光系数 K 。则定义为单位时间内一个颗粒所散射和吸收的全部光能量与投影到该颗粒上全部光能量之间的比值。根据能量守恒定律, 消光系数应是散射系数与吸收系数之和, 即

$$K_e = K_s + K_a \quad (1-4)$$

一般的散射规律比较复杂, 要完全从理论上求得散射系数、吸收系数、消光系数以及散射光的强度和分布有很大的困难, 目前还只能对简单的散射情况进行较为完善的数学处理, 例如散射体颗粒为球形或椭球形。另外还要满足不相关的单散射。

所谓不相关散射是指均匀介质中所含有的微小颗粒间的距离足够大, 以至于一个颗粒的散射不因其他颗粒的存在而受影响。在这种情况下, 可以不管其他的颗粒的存在而研究一个颗粒的散射。严格来讲, 被不同粒子从同一入射光中在相同方向上散射的散射光仍具有一定相位关系, 是相干的, 但是由于小粒子的微小的位移或散射角度极微小变化可全然改变其相位差, 大量无规则杂乱分布的颗粒散射的净效应是各个颗粒散射的光强相加而不管相位差, 犹如不同颗粒的散射光是不相干的。Kerker^[7]提出, 当颗粒之间的距离大于颗粒直径 3 倍以上时, 就可以形成不相关散射。工程中所遇到的大多数实际问题都可以作为不相关散射来处理。例如, 即使浓度很大的雾, 各个水珠之间的距离仍然是水珠直径的 20 倍左右。

所谓单散射是指每一个散射颗粒都暴露于原始光线中, 对原始的入射光进行散射。反之, 有部分颗粒并不暴露于原始光线中, 它们对其他颗粒的散射光再次进行散射, 使原始光线通过介质时产生多次散射。当这种作用比较强时, 就称为复散射。与相关散射一样, 复散射在数学处理上也是很复杂的。实验指出, 光束通过样品后, 由于消光使光强变为

$$I = I_0 e^{-\tau l} \quad (1-5)$$

式中 I_0 为入射光强, τ 为介质的浊度, l 为光束通过样品的距离。 τ 与 l 二者的乘积称为样品的光学厚度。当光学厚度较小, 即 $\tau l < 0.1$ 时, 单散射占绝对优势; 当光学厚度较大, 即 $\tau l > 0.3$ 时, 复散射将起主要作

用;当 $0.1 < \tau l < 0.3$ 时,单散射和复散射并存。因此,为了保证是不相关的单散射,介质中散射颗粒的浓度及光线通过介质的光学厚度必须加以控制。以下的讨论只限于不相关的单散射。在这种情况下,由 N 个颗粒作为散射中心的集合体的散射强度是单个颗粒散射强度的 N 倍。

1.1.2 光散射规律

如图 1-2 所示,设散射颗粒处在坐标原点,入射光为沿 z 轴正方向传播的平面波,其电矢量为

$$\mathbf{E} = \begin{pmatrix} E_{i0} \\ E_{r0} \end{pmatrix} \quad (1-6)$$

在远离散射体处的散射波为球面波,其波源就是散射体。假设散射体为各向同性的球形颗粒,则空间某点的散射波的电矢量可写为

$$E_i = S_2(\theta) \frac{e^{-iKr+iKz}}{iKr} E_{i0} \quad (1-7a)$$

$$E_r = S_1(\theta) \frac{e^{-iKr+iKz}}{iKr} E_{r0} \quad (1-7b)$$

式中 $S_1(\theta)$ 和 $S_2(\theta)$ 称为颗粒的散射振幅函数,是取决于散射光方向的

的无因次函数,它描述散射光的方向特性,与颗粒的大小和相对折射率有关。 K 称为波矢,它与波长 λ 具有如下关系

$$K = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (1-8)$$

由式(1-7a)、(1-7b)可得到散射光的光强

$$I_i = \frac{i_2 \lambda^2}{4\pi^2 r^2} I_{i0} \quad (1-9a)$$

$$I_r = \frac{i_1 \lambda^2}{4\pi^2 r^2} I_{r0} \quad (1-9b)$$

式中 $i_1 = |S_1(\theta)|^2$, $i_2 = |S_2(\theta)|^2$, 称为散射光的强度函数。

当入射光为自然光时, $I_{i0} = I_{r0} = \frac{1}{2} I_0$, 则散射光为

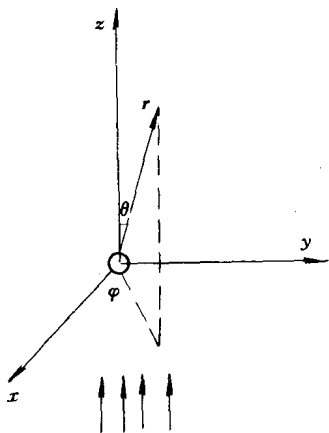


图 1-2 颗粒的光散射

$$I = I_i + I_r = \frac{(i_1 + i_2)\lambda^2}{8\pi^2 r^2} I_0 \quad (1-10)$$

对于球形颗粒的正向散射($\theta=0$),有

$$S_1(\theta) = S_2(0) = S(0) \quad (1-11)$$

进一步还可以推得,球形颗粒的消光系数为

$$K_e = \frac{4}{\alpha^2} \text{Re}[S(0)] \quad (1-12)$$

式中 $\alpha = \frac{\pi D}{\lambda}$ 为颗粒的无因次参数, D 为颗粒直径。

由前面的分析可以看到,颗粒的散射光强、消光系数等均与颗粒的散射振幅函数有关。因此,研究颗粒的散射规律主要是确定其振幅函数。

严格的光散射电磁场理论是把光波当作电磁波,应用麦克斯韦方程对散射颗粒形成的边界条件求解,从而求得振幅函数和强度函数。但严格的数学求解受许多限制,一些复杂问题至今还没有数学解。在平面单色波照射下处于均匀介质的球体的麦克斯韦方程的严格解称为米氏理论,该理论已得到广泛的使用。至于形状不规则的颗粒,虽然近年来已有一些理论和实验研究^[8],但离实际应用还有一段距离。

米氏理论虽然是有关颗粒光散射的普遍解,但是,该理论比较复杂,它的数学解也十分繁琐,只有通过计算机才能进行数值计算。因此,在一些特殊情况下,出现了某些近似理论和近似公式。当 $\alpha \ll 1$ 及 $|a(m-1)| \ll 1$ 时,米氏解的近似公式为瑞利公式,这种情况下的散射称为瑞利散射。当 $\alpha \gg 1$,即颗粒的尺寸远比波长小时,米氏理论可用衍射理论近似,此时的散射称为衍射散射。当 $\alpha \rightarrow \infty$ 时,米氏解与几何光学的结果相同。当颗粒尺寸在瑞利散射和衍射之间时只能用米氏理论求解光散射规律,称它为米氏散射。下面将简单介绍瑞利散射、衍射散射和米氏散射的一些主要散射规律。

(1) 瑞利散射

瑞利散射假设颗粒尺寸远小于波长,所以入射光的瞬时电场在颗粒所在处的范围内可看作是均匀的。又由于 $(m-1)\alpha \ll 1$,所以颗粒内部的电磁场在位相上与颗粒外没有大的差别,光线通过颗粒几乎不需

要时间,于是小颗粒在电场中极化形成电偶极子,它随入射光频率同步振荡。根据以上原理,瑞利推导出,当入射光为自然光,各向同性的小颗粒所产生的散射光 I_1 和 I_r 分别为

$$I_1 = \frac{\lambda^2 \alpha^6}{8\pi^2 r^2} \left(\frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right)^2 I_0 \cos^2 \theta \quad (1-13a)$$

$$I_r = \frac{\lambda^2 \alpha^6}{8\pi^2 r^2} \left(\frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right)^2 I_0 \quad (1-13b)$$

式中 r 是观察点与散射颗粒之间的距离。

由以上瑞利公式可得瑞利散射的特点如下。

① 散射光强与散射颗粒尺寸的六次方成正比。因此,随着颗粒的增大,散射光强将迅速增加。

② 散射光强与入射光波长的四次方成反比。波长越短,瑞利散射光强急剧增大。红光的波长是紫光波长的 1.8 倍,因而对于同样尺寸的颗粒紫光的散射光强将是红光的 10 倍。

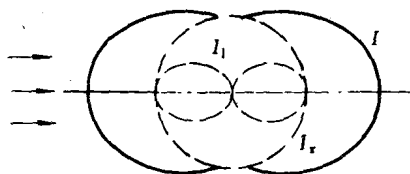


图 1-3 瑞利散射图形

③ 在瑞利散射范围内,散射光强的大小虽随颗粒的尺寸、入射光的波长的不同有很大的差异,但其光强的分布规律却一样,呈现为“腰子形”,如图 1-3 所示。

在 $\theta = \frac{\pi}{2}$ 处, $I_1 = 0$, 散射光为完全偏振光,其振动面垂直于散射面。散射角 θ 为其他任意值时,散射光强为部分偏振光。

若散射体是由 N 个同种物质,相同尺寸而且无规则分布的颗粒群组成,则由这颗粒群散射的光强应该是单个颗粒光强的 N 倍,但散射图形即光强分布仍然相同。

④ 根据散射系数的定义,可推得

$$K_s = \frac{8}{3} \alpha^4 \left(\frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right)^2 \quad (1-14)$$

(2) 衍射散射

当散射颗粒直径比入射光波长大得多时,颗粒引起的散射称为衍