

图像曲线拟合理论及其应用

梁军利 著



科学出版社

图像曲线拟合理论及其应用

梁军利 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书系统阐述了机器视觉领域图像曲线拟合问题的最新进展,发展了多个算法确保图像曲线拟合的鲁棒性,如稀疏表达、迭代自适应、低秩矩阵复原及最大相关熵准则等。全书共8章,主要内容包括直线拟合和椭圆拟合两大部分。第3~8章中的拟合算法以作者在机器视觉领域的学术研究成果为基础,具有一定的学术价值。

本书方法新颖、知识结构完整,可供机器视觉领域的研究生、教师及研究人员参考。此外,本书结合实际应用问题列举了大量工程实例,因此也可供机器视觉应用领域的工程技术人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

图像曲线拟合理论及其应用/梁军利著. —北京:科学出版社,2017.3

ISBN 978-7-03-052348-8

I. ①图… II. ①梁… III. ①曲线拟合-应用-图象处理 IV. ①TN911.73

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 053473 号

责任编辑:祝 洁 / 责任校对:郑金红

责任印制:张 倩 / 封面设计:陈 敬

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京通州皇家印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017年3月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2017年3月第一次印刷 印张:8 1/4

字数:166 000

定价:85.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

近年来,机器视觉技术在实际中的应用越来越广泛,引起众多领域研究人员和工程技术人员的重视。机器视觉最基本的任务是利用所获取影像的轮廓信息进行曲线拟合,实现目标识别。例如,在工业领域,常见的应用包括单晶硅直径的在线测量、集成电路板的定位、磁罗盘误差校准、仪表指针表示值的自动识别及相机标定等;在移动智能领域,视觉定位、视觉避障也会用到图像曲线拟合技术,如无人驾驶汽车、机器人等;在军事领域,机器视觉具有成本低、电磁干扰小、数据获取准确度高等特点,因此图像曲线拟合为无人机提供了一种可行的着陆方式;在航天与空间探索领域,图像曲线拟合的一个典型应用是卫星姿态的估计。因此,图像曲线拟合在机器视觉应用方面具有十分重要的意义。

图像曲线拟合涉及数学建模、优化方法、信号处理、图像处理和机器视觉等多个领域的知识,属于基础性前沿课题。本书提出了多种方法,具有很好的鲁棒性和实用性。全书共三部分,第一部分(第1~2章)对图像曲线拟合的应用背景、基础知识及当前的研究现状做了详细介绍,便于读者入门了解。第二部分(第3~4章)主要介绍了基于稀疏表达的直线拟合和基于迭代自适应方法的直线拟合两种直线拟合算法,都是以阵列信号处理理论建模,前者利用压缩感知理论求解直线参数,而后者利用阵列信号处理领域的近场、远场目标定位算法求解直线参数。第三部分(第5~8章)介绍了四种椭圆拟合算法。第5章利用无线传感器网络中的信源定位思想提出了一种圆拟合算法,该算法将圆拟合问题转化为一种虚拟信源定位问题,利用经典的固定点迭代理论和传播因子算法确定圆的半径和中心。第6章通过最小化增广多维尺度矩阵的秩,利用交替方向乘子法求解该矩阵及其辅助参数,对获得的低秩矩阵进行特征值分解从而求得椭圆参数。第7章通过选择较好的椭圆点来表示椭圆参数向量,并采用误差的绝对值之和降低野点对参数估计的影响,通过二阶锥规划算法实现椭圆参数的求解。第8章在限制最小二乘模型的基础上引入最大相关熵准则和椭圆方程判定约束,应用半二次和半正定松弛优化技术求解椭圆参数。

在撰写本书过程中,研究生范文、李鹏亮、于国阳、张妙花、王云龙、叶中华、贾薇、叶欣、李敏等参与了文稿的整理和制图工作,孙强副教授为本书所做的工作进一步提高了本书的可读性,在此表示感谢。同时感谢晶体生长设备及系统集成国家地方联合工程研究中心提供的数据。对支持、关心本书出版工作的所有人

员,以及国家自然科学基金项目(编号:61172123 和 61471295)的资助表示衷心的感谢!

书中难免存在不妥之处,敬请读者批评指正。

作 者

2016 年 10 月

于西安

目 录

前言

第 1 章 概述	1
1.1 图像的直线拟合	1
1.1.1 直线拟合问题描述	1
1.1.2 实际应用中的直线拟合	2
1.2 图像的圆拟合	5
1.2.1 圆拟合问题描述	5
1.2.2 实际应用中的圆拟合	5
1.3 图像的椭圆拟合	7
1.3.1 椭圆拟合问题描述	7
1.3.2 实际应用中的椭圆拟合	7
参考文献	10
第 2 章 图像曲线拟合基础知识及研究现状	13
2.1 图像曲线拟合预处理步骤	13
2.1.1 图像分割	13
2.1.2 形态学图像处理	13
2.1.3 图像边缘检测	14
2.2 经典的图像曲线拟合方法	16
2.2.1 霍夫变换算法	16
2.2.2 最小二乘法拟合	17
2.2.3 SLIDE 算法直线检测	20
2.2.4 DLSF 算法椭圆拟合	22
2.3 小结	23
参考文献	23
第 3 章 基于稀疏表达的直线拟合	25
3.1 基础知识	25
3.1.1 压缩感知	25
3.1.2 最小二乘法支持向量回归机	25
3.1.3 二阶锥规划	25
3.2 直线拟合算法发展	26

3.2.1 虚拟单快拍信号形成	26
3.2.2 字典构造及直线倾斜角估计	27
3.2.3 字典构造及直线偏移量估计	31
3.3 实验结果	32
3.3.1 实验 1: 无噪声图像	32
3.3.2 实验 2: 含噪声的图像直线检测	34
3.3.3 实验 3: 平行直线检测	36
3.3.4 实验 4: 小角度差异时的直线检测	38
3.3.5 实验 5: 道路标记检测	39
3.3.6 实验 6: 单晶硅外形检测	42
3.4 小结	45
参考文献	45
第 4 章 基于迭代自适应方法的直线拟合	47
4.1 背景知识	47
4.2 算法描述	48
4.2.1 远场信号模型建立及直线倾斜角估计	48
4.2.2 近场信号模型建立及直线偏移量估计	50
4.3 实验结果	51
4.3.1 实验 1: 无噪声图像	51
4.3.2 实验 2: 含噪声的图像直线检测	53
4.3.3 实验 3: 图像中平行的直线检测	54
4.3.4 实验 4: 小角度差异时的直线检测	54
4.3.5 实验 5: 道路标记检测	56
4.4 小结	58
参考文献	58
第 5 章 基于无线传感网络虚拟源定位的圆拟合	60
5.1 基础知识	60
5.1.1 无线传感器网络定位	60
5.1.2 固定点迭代算法	60
5.1.3 传播因子算法	61
5.2 基于无线传感网络虚拟源定位的圆拟合算法	62
5.3 仿真和实验结果	64
5.3.1 实验 1: 仿真数据	64
5.3.2 实验 2: 点云数据	66
5.4 小结	67

参考文献	68
第 6 章 基于低秩矩阵复原的椭圆拟合	69
6.1 基础知识	69
6.1.1 低秩矩阵复原	69
6.1.2 余弦定理	69
6.2 算法描述	70
6.2.1 GMDS 矩阵构建	70
6.2.2 核范数最小化问题	73
6.2.3 椭圆参数求解	76
6.3 仿真及实验结果	78
6.3.1 实验 1: 仿真数据	78
6.3.2 实验 2: 虹膜图像	84
6.3.3 实验 3: 单晶图像	86
6.4 小结	88
参考文献	88
第 7 章 基于稀疏表达的椭圆拟合	89
7.1 算法描述	89
7.1.1 最小二乘拟合算法分析	89
7.1.2 稀疏表达算法发展	89
7.2 仿真及实验结果	92
7.2.1 实验 1: 无坏点仿真数据	93
7.2.2 实验 2: 仿真数据中存在坏点	94
7.2.3 实验 3: 虹膜数据	96
7.2.4 实验 4: 硅单晶图像	98
7.2.5 实验 5: 存在坏点的硅单晶图像	100
7.3 小结	103
参考文献	104
第 8 章 基于半二次和半正定松弛优化的椭圆拟合	105
8.1 基础知识	105
8.1.1 相关熵	105
8.1.2 CVX 工具包	105
8.2 算法描述	106
8.2.1 约束最小二乘算法分析	106
8.2.2 新算法发展	106
8.2.3 算法执行步骤描述	110

8.3 仿真及实验结果	110
8.3.1 实验 1:含噪仿真数据	110
8.3.2 实验 2:含 Outlier 仿真数据	115
8.3.3 实验 3:虹膜图像	118
8.3.4 实验 4:飞行器图像	120
8.3.5 实验 5:晶体图像	121
8.4 小结	123
参考文献	123

第 1 章 概 述

计算机视觉技术的发展和應用促进了人类社会智能化的进程。用摄影机等设备获取目标对象的图像或视频数据,是计算机进行目标检测、识别和跟踪的重要基础,上述任务的完成依赖于图像中所包含的目标轮廓或边缘信息^[1-5]。然而在实际应用中,由于各种原因造成的目标遮挡、光照变化等因素会造成图像预处理后目标轮廓信息缺失,不利于上述任务的有效执行。图像曲线拟合技术是复原感兴趣目标轮廓的重要技术,通过已获得的边缘数据点进行曲线拟合,使所获得的曲线逼近这些数据点,该技术对于后续目标检测、识别和跟踪效果具有重要的影响。图像曲线拟合分为直线拟合和曲线拟合两大类,而曲线拟合包括圆拟合和椭圆拟合等。本章主要介绍直线拟合、圆拟合和椭圆拟合,以及这些曲线拟合在不同领域中的应用。

1.1 图像的直线拟合

1.1.1 直线拟合问题描述

以平面直线为例,直线拟合问题可描述为:在平面直角坐标系中,对于给定的 N 个离散数据点 $(x_n, y_n), n=1, 2, \dots, N$, 寻找一条或多条直线,使其尽可能地通过或靠近这些数据点。以图 1-1 为例,平面中存在 80 个离散数据点,图像拟合问题是寻找这些点对应的两条直线,且每条直线仅由偏移量及倾斜角两个参数确定^[6,7]。

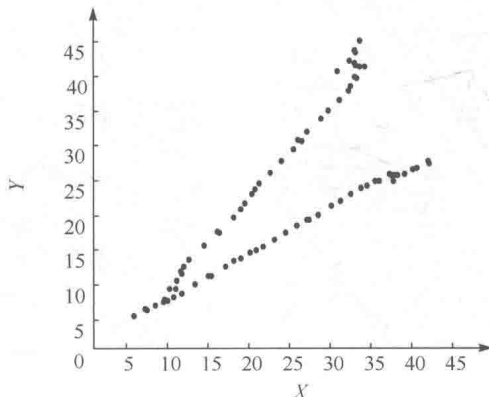


图 1-1 平面直线拟合示意图

1.1.2 实际应用中的直线拟合

直线拟合在众多工业和军事领域有着广泛应用。例如,在工业测量和控制领域中,指针仪表指示值的自动判读^[8,9]、板材边缘的检测^[10]、瓷砖尺寸检测系统中瓷砖角点定位^[11]、罐装 PET 瓶瓶盖的实时自动检测^[12]等;红外及遥感探测中海空背景下的海天线检测^[13]、桥梁检测^[14]、机场跑道检测^[15]等;医学中细胞边缘形状检测^[16]、心肌纤维方向的检测^[17]等;无人驾驶汽车路径规划;激光线检测^[18];列车制动梁目标检测^[19];农作物苗列检测^[20]等。这些都可归结为直线或者类直线形状的拟合问题。

1. 遥感图像中的桥梁和飞机跑道检测

遥感(remote sensing)技术是一种通过人造地球卫星上的遥测仪器对地球表面实施感应遥测的技术^[21]。利用对电磁波敏感的仪器,在远离目标和非接触目标物体条件下探测目标,获取其反射、辐射或散射的电磁波信息,实现目标的检测和识别等。

遥感技术在国防建设、经济发展、环境保护和资源勘探中有着重要的应用。桥梁是交通要道和军事目标,对其进行自动检测具有重要价值^[14]。如图 1-2 所示,桥梁的桥身两侧会和背景(如水域等)在像素灰度上形成一定的区别,形成两条平行的直线。因此,可将平行直线作为桥梁的重要特征,借助直线拟合技术对桥梁进行检测和定位。如图 1-3 所示,相似于桥梁,机场跑道亦呈现直线特征,因此也可对图像的直线进行拟合,实现机场跑道的检测^[15]。

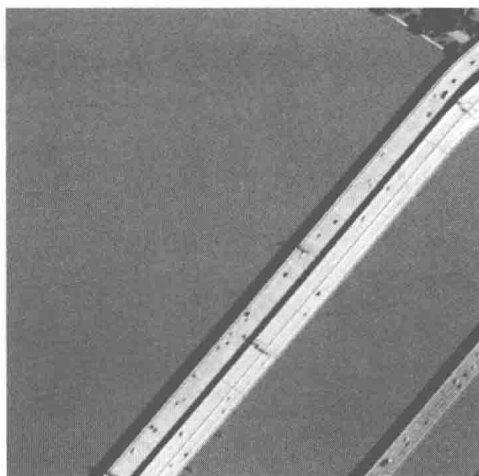


图 1-2 桥梁遥感图像^[22]



图 1-3 机场遥感图像^[22]

2. 无人驾驶汽车路径规划

无人驾驶汽车主要依靠车内以计算机系统为主的智能驾驶仪来实现无人驾驶,利用车载传感器感知车辆周围的环境,并根据感知所获得的道路、车辆位置和障碍物信息,自动规划行车路线并控制车辆的转向和速度,从而使车辆能够安全、可靠地在道路上行驶,如图 1-4 所示。道路交通标线是指在道路的路面上用线条、箭头、文字、立面标记、突起路标和轮廓标等向交通参与者传递引导、限制、警告等交通信息的标志,其作用是管制和引导交通。特别是车道两侧的车行道分界线用来分隔同向行驶的交通流,可作为无人驾驶汽车路径规划的重要信息来源。大多数情况下的分界线为直线,如图 1-4 所示的道路边界及白色虚线标志。因此,可通过直线拟合技术,检测与背景路面差异较大的交通标线来实现无人驾驶汽车的路径规划。



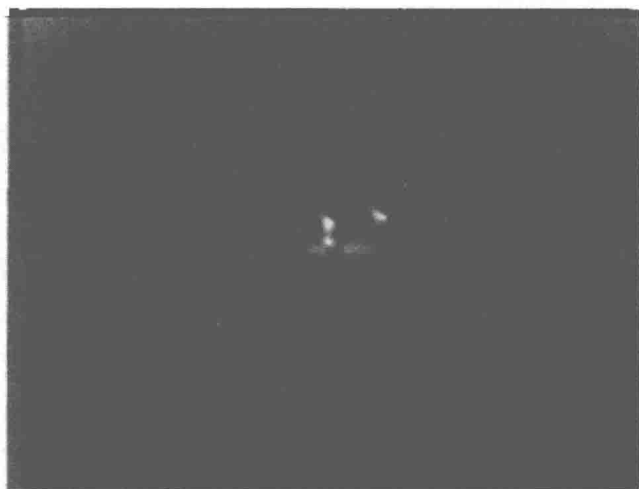
图 1-4 无人驾驶汽车图像^[23]

3. 红外图像中的海天线检测

红外探测是利用红外探测器和光学成像物镜接受被测目标的红外辐射能量分布图形反映到红外探测器的光敏元件上,从而获得目标的红外热像图,在军事领域有着重要的应用。海面目标通常出现在海天线区域,因此可通过检测海天线来缩小目标舰船的识别区域,从而加快目标的识别^[13]。如图 1-5 所示的海空环境下舰船红外图像,海天线通常为一条有一定倾斜度的亮度渐变带,近似为一条直线。因此,可采用直线拟合方法有效地检测出海空背景下的海天线,为舰船目标的识别奠定基础。

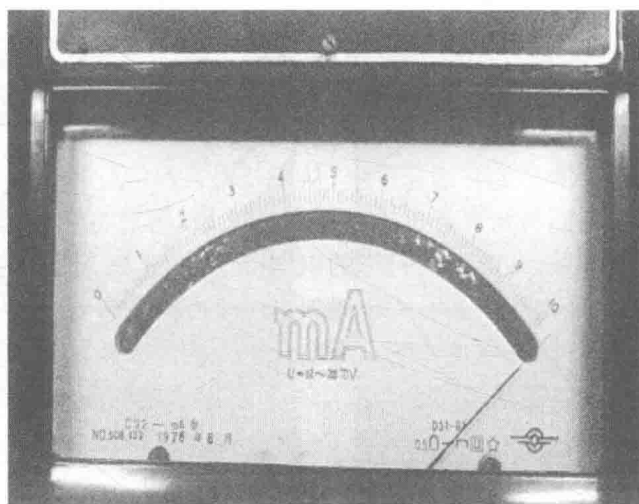
4. 指针式仪表表示值的自动识别

作为测量电信号和非电信号的重要指示工具,指针式仪表在工业测量领域有着广泛的应用^[8]。实现指针式仪表的自动识别及判读对工业测量领域有着重要的

图 1-5 海空环境下舰船红外图像^[13]

应用价值。仪表图像中指针及刻度线的提取是实现仪表自动化判读的首要问题,通过直线拟合技术实现指针和刻度线位置的精确判定,对于仪表自动化判读的测量精度有着直接影响。

以图 1-6 所示的安培表为例,表盘上的刻度是按弧度分布的短小直线,而指针为一条较长的直线,指示对应的测量值。因此,可以通过由像素坐标拟合出的指针及其指示刻度的直线方程,精确确定指针及刻度对应的直线方程,准确识别出仪表指针指示的读数。

图 1-6 安培表图像^[8]

1.2 图像的圆拟合

1.2.1 圆拟合问题描述

圆拟合属曲线拟合的一种^[24-30]。圆拟合问题可描述为:在平面直角坐标系中,对于给定的 N 个离散数据点 $(x_n, y_n), n=1, 2, \dots, N$, 寻找圆描述方程

$$\frac{(x-x_0)^2}{r^2} + \frac{(y-y_0)^2}{r^2} = 1 \quad (1-1)$$

使其尽可能靠近这些样本点。式(1-1)中, (x, y) 是圆上的数据点, 圆心为 $O(x_0, y_0)$, 半径为 r 。本书仅考虑平面圆拟合问题, 但所使用的研究方法可直接推广至球体或超球体拟合问题。如图 1-7 所示, 平面中存在 6 个离散点(黑色实心点), 圆拟合就是发现如虚线所示的圆使其尽可能逼近这些离散点。

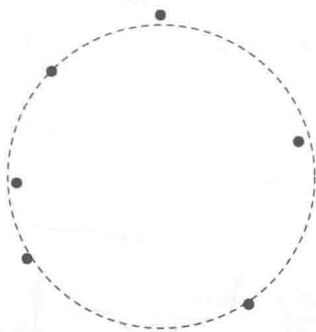


图 1-7 圆拟合示意图

1.2.2 实际应用中的圆拟合

圆拟合在工业和农业领域有着广泛的应用, 如硬币识别^[30]、机器人足球赛中的足球检测^[31]、激光光斑中心检测^[32]以及农业自动化中的果实采摘^[33]等, 这些都可归结为圆或者类圆形状的拟合问题。

1. 在机器人足球赛中的应用

国际组织 RoboCup 通过机器人足球赛这一标准问题的设立及研究, 促进人工智能、机器人及相关领域的发展^[31]。在比赛过程中, 机器人足球检测系统需要对球场图像进行边缘检测、圆拟合等图像处理, 估计足球图像圆心及半径, 进而确定足球在整个球场中的位置。如图 1-8 所示的机器人足球赛球场区域图像中, 足球为标准圆形, 可通过其区域的边缘检测及圆拟合来完成足球所在位置的

检测。



图 1-8 机器人足球赛球场区域图像^[31]

2. 在农业自动化中的应用

计算机视觉技术大大推动了农业自动化的进程,其中一项重要的任务是果实的定位与检测。通过对果实定位与检测,最终实现机器人自动采摘,可减少人力成本,并提高采摘的准确度和效率^[33]。如图 1-9 所示,机器人在采摘桃子时,需从复杂的果树树叶等背景中识别出桃子,并通过圆拟合技术估计桃子的圆心坐标与半径,进而将这些信息传递给机器人系统进行自动化采摘作业。



图 1-9 基于计算机视觉技术对桃子定位^[33]

1.3 图像的椭圆拟合

1.3.1 椭圆拟合问题描述

椭圆是计算机视觉应用中最常见的曲线图形之一。除目标本身为椭圆形外,图像采集系统采集角度也会导致圆形目标在图像中变换为椭圆形。因此,较之圆拟合,椭圆拟合具有更强的通用性。椭圆拟合问题可定义为:在平面直角坐标系中,对于给定的 N 个离散数据点 $(x_n, y_n), n=1, 2, \dots, N$ (图 1-10), 寻找一个尽可能靠近这些数据点的椭圆方程^[34]

$$\frac{[(x-x_0)\cos\theta+(y-y_0)\sin\theta]^2}{a^2} + \frac{[-(x-x_0)\sin\theta+(y-y_0)\cos\theta]^2}{b^2} = 1 \quad (1-2)$$

拟合数据并求得该椭圆的各个参数。式(1-2)中, (x, y) 是椭圆上的数据点, (x_0, y_0) 是椭圆心, a, b 分别是长、短轴半径, θ 是旋转角。



图 1-10 离散数据点示意图

1.3.2 实际应用中的椭圆拟合

椭圆拟合在实际中可应用于虹膜识别^[35]、晶体直径测量^[36]、卫星姿态估计^[37]、隧道断面检测^[38]、幼苗自动嫁接参数提取^[39]、变压器油位检测^[40]、钢铁线圈曲率估计^[41]、无人飞行器自主着陆^[42]、唇读检测^[43]以及人脸跟踪^[44]等。

1. 虹膜识别

如图 1-11 所示,人眼由巩膜、虹膜、瞳孔三部分构成。其中,虹膜是基于像冠、水晶体、细丝、斑点、结构、凹点、射线、皱纹和条纹等构成的织物状环状物。由于每一个虹膜都是独一无二的,因此虹膜是一种重要的生物特征。虹膜识别技术在安防、国防和电子商务等领域有着重要的应用。虹膜识别的首要任务是虹膜定位。眼睛和相机的相对运动使得瞳孔图像呈椭圆状,因此可借助图像阈值分割、边缘检

测和椭圆拟合等图像处理技术确定瞳孔区域,为后续的虹膜定位奠定基础^[45]。

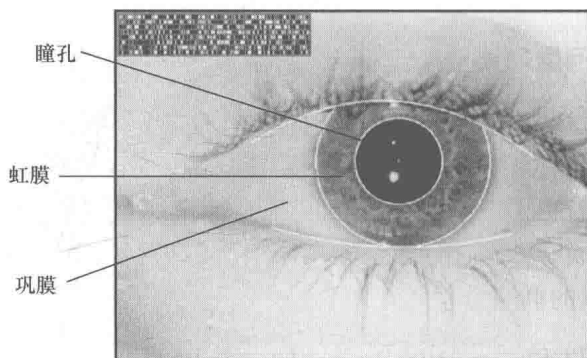


图 1-11 人眼结构示意图^[45]

2. 晶体直径测量

单晶硅是制造电视、电脑、冰箱、电话、手表、汽车、航天飞机、宇宙飞船和人造卫星等必不可少的原材料。直拉法单晶硅生长方式中,需要通过调整提升速度和温度来保证单晶硅的等径生长,最终等径的单晶硅成为有效的原材料^[46]。因此,实时的等径控制是晶体生长的重要步骤。如图 1-12 所示,在拉晶过程中,固态晶体与液态融液的交界处会形成一个明亮的光环,称为光圈,其本质是固液交界面处的弯月面对坩埚壁亮光的反射,反映了晶体直径的变化情况。因此,可通过对晶体图像进行阈值分割、边缘检测,以及椭圆状光圈边缘拟合技术,实时检测晶体直径的变化情况,为晶体直径控制系统提供重要的控制变量信息。

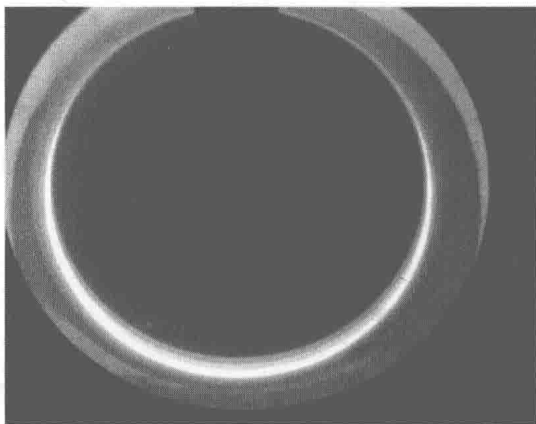


图 1-12 拉晶过程中的晶体图像^[46]