



分类号: TN219

密 级: \_\_\_\_\_

U D C: \_\_\_\_\_

编 号: \_\_\_\_\_

# 硕士学位论文

## 钢管直线度智能检测技术研究

### RESEARCH ON STEEL PIPE STRAIGHTNESS INTELLIGENT DETECTION TECHNOLOGY

学位授予单位及代码: 长春理工大学 (10186)

学科专业名称及代码: 精密仪器及机械 (080401)

研 究 方 向: 仪器总体技术

申请学位级别: 硕 士

指 导 教 师: 马 宏 教授

研 究 生: 刘 雷

论文起止时间:

## 摘 要

针对钢管直线度检测的需要,本文详细论述了钢管直线度检测系统的设计和研制方案。

本文对各种钢管直线度的检测方法和数据处理方法进行了探讨,通过对各种方法的比较,确定了采用基于数字图像处理的光轴法的检测方法,提出了该测量方法的总体方案,利用光学反射放大原理,通过使用分光镜和 CCD 相机,并使用遗传算法评定直线度误差,提高了检测的灵敏度,也使得测量过程的自动化大大提高,从而提高了测量速度。最后通过精度分析和测试,得出了该测量系统能够达到用户要求的结论。

本系统能够达到的技术指标为,测量钢管长度为 10m,直径为 60mm 或 80mm,直线度误差 $\leq 0.02\text{mm}$ 。

关键词: 钢管 直线度 自动检测 图象处理

## ABSTRACT

A measuring system which can be used in steel pipe straightness detection is developed, the paper presents the design and implement schemes of the measuring system.

In this paper, the methods to measure the straightness error and the result data assessment are discussed. After compare of several traditional ways, we use the ray axis approach based on the digital image processing, and design its structure. Sensitivity and speed of measurement is improved by using the optical enlargement principle, beam splitter ,CCD camera and evaluate straightness error by genetic algorithm. At the same time, the way of image Processing is discussed. At last, the conclusion that the instrument can fit the users demand is gained through academic error analysis and calculation.

The targets that the system attained is:steel pipe length 10m,diameter60 or 80mm,straightness error is less than 0.02mm.

**Key words: steel pipe straightness error image processing**

## 长春理工大学硕士学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的硕士学位论文，《钢管直线度智能检测技术研究》是本人在指导教师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

作者签名： 刘雷 年 6 月 9 日

## 长春理工大学学位论文授权使用授权书

本学位论文作者及指导教师完全了解“长春理工大学硕士、博士学位论文授权使用规定”，同意长春理工大学保留并向中国科学信息研究所、中国优秀博硕士学位论文全文数据库和 CNKI 系列数据库及其它国家有关部门或机构送交学位论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅。本人授权长春理工大学可以将本学位论文的全部或部分内 容编入有关数据库进行检索，也可采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编学位论文。

作者签名： 刘雷 2009 年 6 月 9 日

指导导师签名： 马岩 2009 年 6 月 9 日

## 第一章 绪论

### 1.1 引言

#### 1.1.1 研究的目的

钢管是应用最广泛的钢材品种，它的质量直接影响到经济效益及人员的生命安全。大口径钢管广泛应用于冶金、石油及化工等行业，它的质量关系到工业设备的安全。

由于铸造、加工、自重以及使用中的碰撞、温度变化等原因造成钢管的塑性变形而形成不可恢复的弯曲，对于钢管的使用是有影响的。为了随时了解钢管的状态，必须定期检测其直线度从而决定其是否可继续使用或送修。

#### 1.1.2 研究的意义

直线度误差测量是几何计量领域中的一个基本测量项目，它是平面度、平行度、垂直度、同轴度等测量项目的基础，因而历来受到世界各国计量学领域学者的重视。直线度误差也是机械制造业中的一个非常重要的内容，它对产品零部件的性能具有决定性的影响。直线度误差与尺寸精度、圆度、粗糙度被称为影响产品质量的四大因素。但是从目前几何量领域的情况来看。直线度误差测量的技术水平已落后于其他三个项目。如尺寸精度和粗糙度已达到纳米级水平，且不断出现新技术，新成果；圆度测量在近几年业得到飞速发展，尤其是随着高精度的误差分离转台和各种误差分离技术的成功应用，测量精度已达到 $0.01\mu\text{m}$ 的水平；直线度误差测量水平目前较低，仅达到 $0.1\mu\text{m}$ 的水平。相比之下，直线度误差的测量落后至少一个数量级，这与几何计量领域的发展，与产品质量的要求是不相适应的。因此有必要探测各种新方法。

对直线度的测量过程和测量结果有两方面的要求，一是精确性要求，即测量结果必须达到一定的可信程度；二是经济性要求，即在保证测量结果精确性的前提下，应使测量过程简单、经济。针对目前直线度测量方法对钢管测量时存在的问题，我们研究的钢管轴线直线度测量仪，可以实现针对钢管轴线直线度的测量。本课题的目的在于，设计一种直线度测量仪，在满足精确性和经济性要求的前提下，实现钢管轴线直线度的测量，为钢管轴线直线度的测量提供一种高效准确的测量仪，从而提高实际测量的工作效率和准确性。同时，能将该测量仪加以改进使用于相同类型的深孔轴线直线度检测领域，因而具有较高的实际使用价值。

### 1.2 国内外研究现状

纵观国内外所报道的直线度测量方法，测量精度低于 $0.5\mu\text{m}/\text{m}$ 的为一般精度水平，高于 $0.5\mu\text{m}/\text{m}$ 的属高精度测量，而高于 $0.1\mu\text{m}/\text{m}$ 者属国际先进水平。但由于测量方法种类繁多，目前尚未见到统一而合理的分类方法。按照测量中有无直线基准，可将直线度测量方法大体上归纳为两大类。

#### 1.2.1 无直线基准测量

无直线基准测量法，是指被测对象直线度的测量不是与某种直线基准进行比较，而是沿被测表面以线值测量的方法，得到被测表面上各采样点的偏差值，然后经数据处理得到被测对象的直线度误差值。

无直线基准测量主要采用误差分离法。所谓误差分离法(Error Separation Technique, EST)

是指从测量结果中将标准量的误差和被测量的误差分离开来,从而提高测量精度和测量效率。按照信息获得的途径不同,无直线基准测量法又可分为反向法、错位法和多测头法。

1)反向法是将被测零件进行两次安装,并分别进行两次测量,两次安装的位置正好反向,经数据处理求出被测零件的直线度误差。根据采用的直尺的数量,又可分为单尺法,双尺法和三尺法。

2)移位法是通过被测零件的起始测量位置的变动进行两次测量,即第1次测量后,被测件向前平移一跨距,再进行第2次测量,经数据处理可消除测量基准本身的直线的误差,求出被测件的直线度误差。

3)多测头法也叫多测点法,其测量原理如图1所示。在测量架上安装多个测头(A, B),然后以测头间距(L)为步长逐次测量,各次测量的首尾端点相接,并记录下每个测头的读数,然后通过数据处理进行误差分析,可同时得到被测表面的直线度和测量架的直线度偏差。

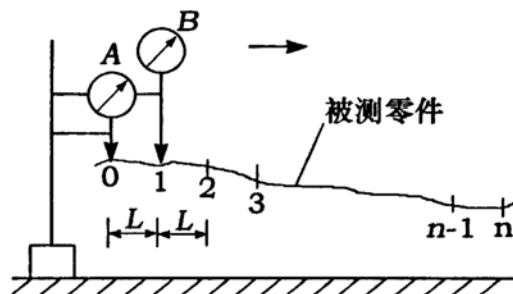


图1.1 多测头法测直线度误差

综上所述,误差分离法EST测量直线度误差的特点为:

- (1)实用可靠,适用于在线或离线测量,一次测量可获得多项测量误差,提高了测量精度和测量效率。
- (2)当长度L(被测件的总长度)一定时,采样点数N越大,测量精度越高。
- (3)在保证同样测量精度的条件下,可显著降低对基准件及测量仪的精度要求。
- (4)受多种因素影响,如测量装置结构参数选择不当、测头间距误差、传感器标定误差、工件安装误差等,使测量准确度下降。

## 1.2.2 有直线基准测量

直线基准测量法是直接采用一定的直线基础 (Straight Line Reference),并以此基准来检测被测表面的直线度偏差(线差或角度值),从而获得被测表面的直线度误差值。所采用的直线基准通常有三种:实物基准、重力水平基准和光线基准。其常用测量方法有光隙法、节距法、测微仪法、三坐标法,平晶干涉法、激光准直仪法、双频激光干涉法、激光全息法。

## 1.3 课题来源及主要工作内容

### 1.3.1 课题来源

中国兵器工业集团公司

### 1.3.2 课题主要工作内容

根据上述课题任务，以及对直线度测量方法的分析，本课题的主要工作内容是：

- 1)通过对现有直线度检测方法的分析比较，提出适合本课题的测量方法。
- 2)完成该测量系统的结构设计，对每个组成系统的功能和主要元器件的选取进行分析。
- 3)对图像处理的原理方法进行分析比较，提出适合于本测量系统的图像处理方法和步骤，并给出了软件实现的方法，满足图像处理的目的，同时为进一步的图像处理方法研究提供了开发平台。
- 4)对传统的直线度误差评定方法进行综合的比较并分别给出软件实现的方法，提出使用遗传算法进行空间直线度评定的方法和实现过程。
- 5)应用计算机实现自动测量、自动数据采集和自动测量数据处理。

由于改进了传统的轴线直线度测量方法，同时将激光准直技术，图像处理技术和计算机技术有机的结合并应用到仪器的设计中，误差数据处理使用了遗传算法等先进的直线度评定方法，因而本课题具有一定的创新意义。

## 1.4 系统技术指标

测量参数:	轴线直线度;
被测件孔径 d:	60mm 或 80mm;
被测件长度 L:	10000mm
测量点数	50
直线度测量误差	$\sigma \leq 0.02\text{mm}$

## 第二章 测量方案的确定

直线度测量方法较多,按照测量中有无直线基准,可将直线度测量方法大体上归纳为两大类:无直线基准测量法和直线基准测量法。

### 2.1 直线基准测量法

常用的有直线基准测量的直线度误差检测方法主要有:光隙法、测微仪法、平晶干涉法、节距法、多面互检法和误差分离法等几种方法。

#### 2.1.1 光隙法

光隙法是用刀尺作为理想直线测量直线度误差的一种方法,如图 2.1,这种方法通常用于对尺寸较小的磨削或研磨表面进行测量。直线度误差的大小可通过目测刀口与表面间光隙的大小来判断,误差值由比对法获得。选用刀口尺时,应注意保证刀口尺工作边的直线度误差为被测要素直线度误差值的  $1/3 - 1/5$  该方法操作简单,但自动化程度较低,仅适用于给定平面内和给定方向上的直线度误差检测。

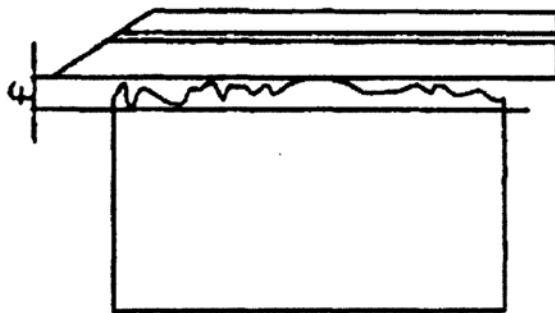


图 2.1 光隙法测量原理图

#### 2.1.2 测微仪法

该方法(又称打表法)通常以平板导轨或平尺作为测量基准如图 2.2 测微仪台架在平板上沿箭头方向移动时,仪器测头随之划过被测表面,测头上下移动量反映出被测表面对于平板(测量基准)的变化状况。也可以事先在被测表面上确定若干个测量点,测量只在各测量点上测取数据。上述方法测量时,要事先调整被测要素的位置,使其两端与测量基准的高度差相等。这样,在整个测量过程中,测微仪的最大读数与最小读数之差就可作为被测要素的直线度误差。这相当于按两端点连线法评定出的直线度误差值,理想直线由直尺、平台或导轨等形成。

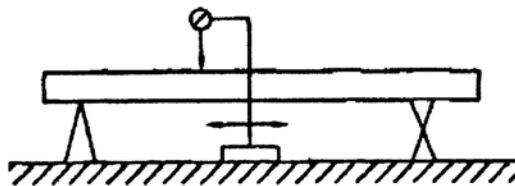


图 2.2 打表法测量原理图

### 2.1.3 平晶干涉法

在测量高精度光亮表面的直线度误差时,可采用平晶基准法,它是直接测量中精度最高的一种方法。该方法的原理是以平晶的工作面作为测量基准。测量时,选择与工件尺寸相当的平晶,然后将平晶工作面紧贴于被测工件表面,如图 2.3。由于被测工件表面有直线度误差存在,所以在平晶工作面和被测表面间存在间隙,并在平晶工作面上产生等厚干涉条纹,干涉条纹的条数  $N$  与间隙量  $f$  相对应。由于尺寸较小的加工表面多呈凸形或凹形,所以其直线度误差可按下式求得:

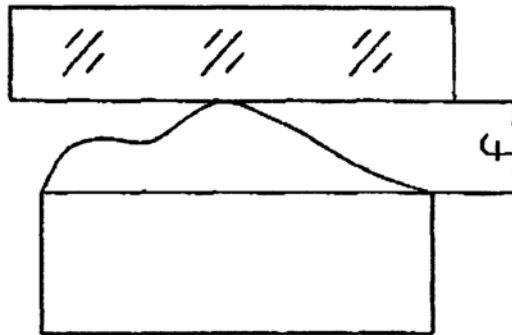


图 2.3 平晶干涉法测量原理图

$$f = \frac{N}{2} \times \frac{\lambda}{2} \quad (2.1)$$

该方法精度较高,一般仅适用于给定平面内和给定方向的直线度误差检测。

### 2.1.4 节距法

采用节距法测量直线度误差时,须首先把被测要素按一定长度(节距)划分为若干等份,然后使用测量微小角度的仪器测出各等分段相对于自然水平基准或某一固定光轴的倾角,再根据等分的长度将各段的角值偏差换算为线值偏差,最后根据该组线值偏差数据评定被测要素的直线度误差。

用于测量微小角度的仪器大致可分为三类:水平仪类,准直仪类,干涉仪类。准直仪类工作原理如图 2.4,由自准直仪发出一束平行光照射到置于被测表面的反射镜上,如果反射镜面垂直于仪器光轴,则光束沿原路返回,零点的像。将与零点重合;当反射镜倾斜角  $\theta$  时,反射光将沿与入射光成  $2\theta$  角的方向返回自准直仪,此时,点将移动距离  $b$ ,并有

$$b = f \times \text{tg}2\theta \quad (2.2)$$

式中  $f$  为自准  $f$  为定值,所以测量  $b$  的大小即可得到与其相对应的  $\theta$  值(在读数时,该  $\theta$  值由格数  $a_i$  表示)。

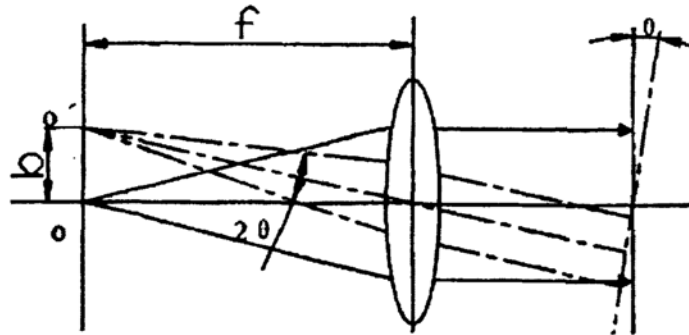


图 2.4 准直仪类测量原理图

激光准直干涉仪测量直线度误差的原理如图 2.5，激光器 1 发出的光具有良好的方向性，光经过调焦倒置望远镜 2 后，变成一束截面积大，方向性更好的平面波。该平面波在靶 3 的分光平板的前后两个表面上反射，形成两路相干光并重新会合，其中重叠部分相互干涉，产生一组等距，相互平行的干涉条纹。在测量时，靶 3 的分光平板随桥板移动，由于被测表面上直线度误差的存在，使分光板在各测量段上相对光束方向产生不同程度的倾斜角  $\theta_i$ ，因而改变了相干光的光程差  $\Delta$ ，这时在影屏 4 上的干涉条纹便会产生与相应的偏移量  $b_i$ ，由此得到反映被测表面直线度误差的原始数据  $b_1, b_2, \dots, b_i, \dots, b_n$ 。

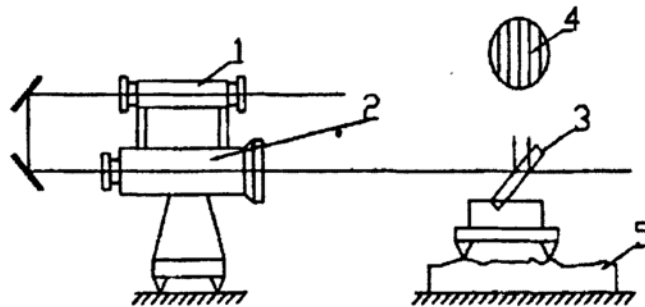


图 2.5 激光准直干涉仪类测量原理图

该方法为直线度误差评定较为常用的方法，本仪器所采用的测量方法即基于节距法测量的原理。

## 2.2 任意方向上的直线度误差检测方法

任意方向的直线度误差检测方法主要有：量规检验法、杠杆法、指示器法和光轴法等。

### 2.2.1 量规检验法

量规检验法主要用于圆柱表面母线或轴线直线度的检验。在批量生产中当圆柱体的长度较小，且形位公差为相关公差时，可以用综合量规进行检验。对于内圆柱表面，可用塞规来检验。塞规直径的最小极限尺寸为被测孔径的最小极限尺寸减去轴线直线度的给定公差。若量规能通过，则零件是合格的。如图 2.6 所示。

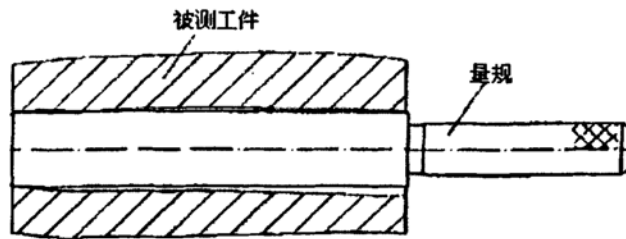


图 2.6 量规检验法测量原理图

### 2.2.2 杠杆法

杠杆法是目前我国一些生产单位正在使用的方法，如图 2.7 所示。测量时测量元件体现被测截面圆心纵向位置的变化，并通过杠杆反映给千分表进行读数。此方法属于近似测量，每次测量的都是某一轴向截面内的直线度，要达到测量轴线直线度的目的，要多次旋转钢管。而且，其测量精度不高，测量设备笨重，形成生产环节中的瓶颈，急需改进。这正是我们着手进行该项研究的目的。

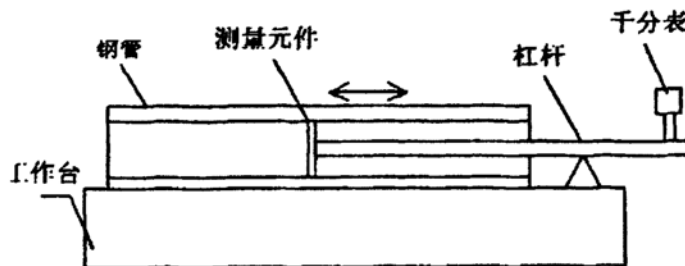


图 2.7 杠杆法测量原理

### 2.2.3 指示器法

被测零件被安装在精密分度装置的两同轴顶尖之间，这两个顶尖的公共轴线平行于平板底面，以公共轴线作为测量基准。根据被测部位的长度和精度要求，确定被测横截面的数目和位置以及各横截面轮廓上等分测点的数目和等分角。然后，转动被测零件，用指示器在各横截面轮廓上对各个等分测点逐一进行测量，同时记录各测点的示值。用各横截面轮廓中心的连线体现实际被测轴线。上述测量方法也可以用立式分度测量装置或圆度仪的测量仪器来实现。

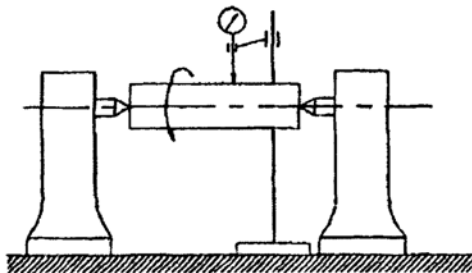


图 2.8 指示器法测量原理图

### 2.2.4 光轴法

测量原理如图 2.9 所示。将仪器本体安放在被测零件外面的固定位置上，瞄准靶放置在被测孔中，用瞄准靶中心体现被测横截面轮廓中心。测量时先把被测轴线的两端点连线(瞄准靶分别置于被测轴线两端)与仪器光轴调整到大致平行，然后沿被测轴线的长度方向(z 坐标轴)等距地逐段移动瞄准靶，测取各测点(被测截面轮廓中心)相对于测量基准在水平和铅垂方向的偏离量(x 坐标值和 z 坐标值)，同时记录这些被测点的直角坐标 $(x_i, y_i, z_i)$ ，再把它们进行数据处理，评定出直线度误差值。

光轴法可以通过自准直仪和准直望远镜等仪器来实现，图 2.9 是用准直望远镜测量的示意图。

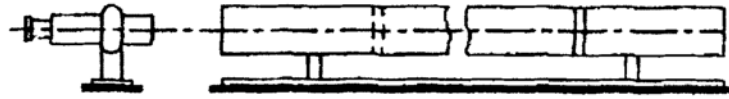


图 2.9 光轴法测量原理图

### 2.3 任意方向上的直线度误差检测方法分析

将各种任意方向上直线度误差检测方法进行综合的比较，列表于表 2.1

表 2.1 任意方向上直线度误差检测方法分析比较

方法	优点	缺点
量规检验法	方法简单，易于使用。	1)仅适用于较短的孔。 2)精度低。 3)设备自动化程度低。
杠杆法	原理简单。	1)测量长度受到场地的限制。 2)精度低。 3)设备自动化程度低。
指示器法	易于实现。	1)适用于轴类零件，通过此方法测量孔类零件轴线直线度时，对孔内外壁的同轴度和外壁的光洁度要求较高。 2)精度不高。 3)测量原理不符合直线度的定义。
光轴法	1)以光束能量为直线基准，适用于尺寸较长零件的测量。 2)精度高	1)激光在空气中传播并非绝对准直，易受外界的干扰，且存在激光输出功率波动和激光束的漂移。 2)采用传统的准直仪或准直望远镜，价格均较昂贵。 3)人工瞄准和记数容易引进人为误差，效率低。 4)如果直接使用光电接收元件接收能量中心，对孔径大小有一定限制。

由以上的分析中我们知道，光轴法是一种比较好的轴线直线度测量方法，但它本身存在一些缺点，必须在实际的应用中加以改善，使之满足测量要求。

## 2.4 光轴法实际应用的两种方案

### 2.4.1 方案一

其测量原理如图 2.10 所示。

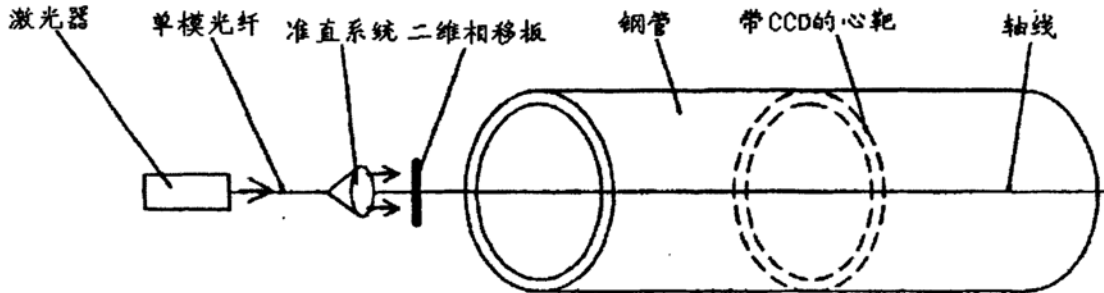


图 2.10 方案一测量原理图

测量时，激光器发出的激光经过单模光纤、准直系统，形成准直光束，再经过二维相移板，射向心靶。心靶感受炮管轴线位置的变化，其上固定的 CCD 面阵传感器即可摄得包含被测信息的图像，再经过图像处理和数据处理，即可得到被测孔的轴线直线度。经过二维相移板的目的是使激光在 CCD 上成的像为交叉的十字线，以便于图像处理，提高图像处理捕获激光束能量中心的精度。

该方法提高了截面中心位置确定的精度，即提高了图像处理寻找光斑中心的精度。

该方法将 CCD 固定于心靶上，因而受孔径尺寸影响较大，同时 CCD 电源线与信号线要具有一定的长度。

该方法未采用光学放大的原理，其分辨率较低。

### 2.4.2 方案二

其测量原理为常用的光轴法原理。该方法是以几何光轴作为测量基线，常用自准直仪或测微准直望远镜体现光轴。如图 2.11 所示，此光轴法，就是用准直望远镜测量钢管轴线的任意方向直线度误差。将仪器本体安放在被测零件外面的固定位置上，瞄准靶放置在被测钢管中，用瞄准靶中心体现被测横截面轮廓中心。测量时先把被测件的几何轴线的两端点连线(即瞄准靶分别置于被测轴线两端)与仪器光轴调整到大致平行，然后沿被测轴线的长度方向( $z$  坐标轴)等距地逐段移动瞄准靶，测取各测点(被测截面轮廓中心)相对于测量基准在水平和铅垂方向的偏离量( $x$  坐标值和  $y$  坐标值)，同时记录这些测点的直角坐标( $x_i, y_i, z_i$ )，再把它们进行数据处理，从而评定出直线度误差值。

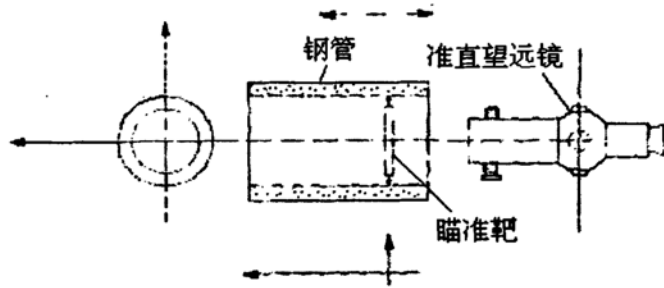


图 2.11 方案二光轴法原理图

由于该方案所采用弹簧夹头式活塞无法满足测量要求，可能形成卡死，同时对钢管划伤较为严重。

### 2.4.3 结论

从上述的任意方向上的直线度检测方法的优缺点分析和比较得出：光轴法是一种可以较好的适用于深孔轴线直线度检测的方法。我们的研究也建立在对这种方法改进之上，在沿用其优点的同时去尽量克服其中的缺点。使之更加适合钢管轴线直线度的检测。本系统采用的是基于图像处理的光轴法，其原理如图 2.12 所示。

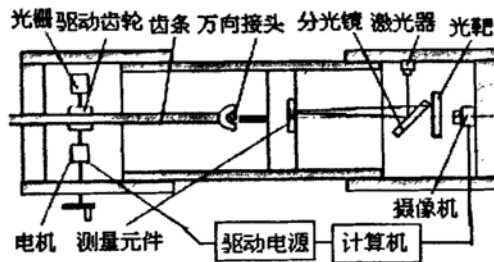


图 2.12 基于图像处理的光轴法测量原理

### 第三章 钢管轴线直线度测量系统结构设计

#### 3.1 基于图像处理的激光准直法

基于对常用的任意方向上直线度检测方法的比较，结合我们研究的被测对象的特点，以及适应现代生产中实时性要求较高，追求效率、经济效益和精度的特点，我们提出了基于图像处理的光轴法这种测量方案。

##### 3.1.1 钢管直线度测量原理

其测量原理如图 3.1 所示。

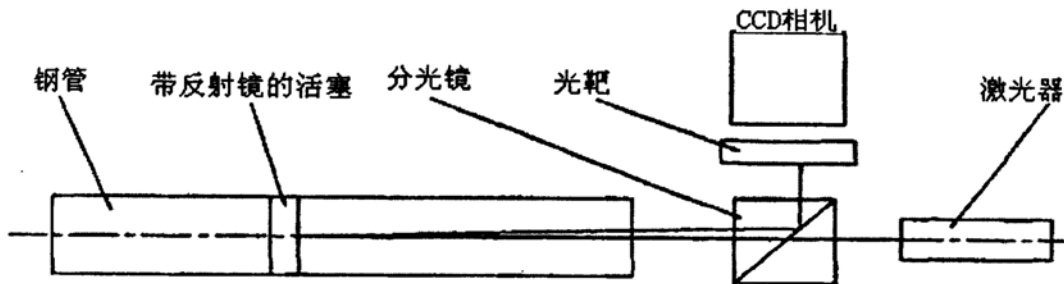


图 3.1 测量原理图

测量时，激光器发出的激光经准直后射向分光镜，一部分射向测量元件，测量元件在齿轮齿条的驱动下在炮管内移动，其步进量由光栅测量。测量元件感知炮管实际轴线位置的变化，其上固定一个反射镜，反射激光再经过分光镜反射后射到光靶上，CCD 摄像机即可摄得包含被测信息的图像。

再经过图像处理得出对应于每一个被测截面的图像中激光光斑的中心，按照角度积累的公式计算出空间直线度误差。

##### 3.1.2 该方法优缺点

优点：

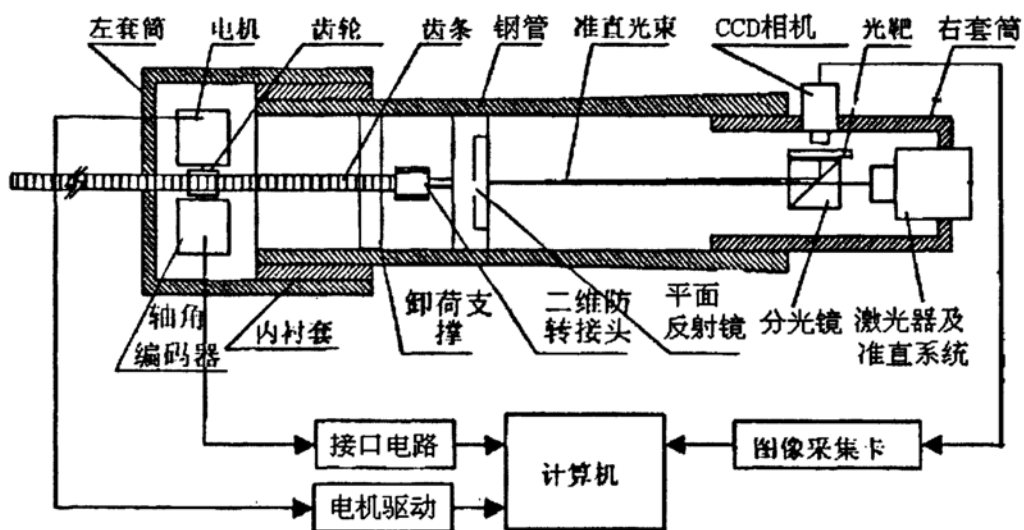
- 1) 采用光学反射放大原理，提高系统分辨率。
- 2) 应用图像处理加快测量速度，提高工作效率。
- 3) 方法精确，符合直线度定义。

缺点：

- 1) 光线在空气中并非绝对准直，测量范围越大，其偏差就越大。
- 2) 光束在传播过程中容易受各种干扰而出现偏差。

### 3.2 总体设计

#### 3.2.1 系统的总体结构



#### 3.2.2 系统的组成部分

钢管轴线直线度检测系统由以下几个部分组成：

##### 1) 激光器及准直系统

完成测量激光束的发射和准直为测量系统提供稳定良好的激光光源和光线基准。由以下几部分组成：

- a) 半导体激光器电源
- b) 半导体激光器
- c) 激光准直系统(完成激光的准直、扩束等功能)

##### 2) 光学成像系统

保证系统光路按设计执行，系统可获得稳定清晰的测量图像。由以下几个光学元件组成：

- a) 平面反射镜
- b) 分光镜
- c) 光靶
- d) CCD 相机
- e) 镜头
- f) 图像采集卡

##### 3) 活塞移动与位移测量系统

对活塞的移动进行控制，同时实时获取活塞的位移信息。由以下几部分组成：

- a)测量元件
- b)齿轮齿条机构(完成活塞的传动)
- c)卸荷支撑(消除齿条自重对测量元件运动精度的影响)
- d)步进电机(在控制器控制下提供活塞移动动力)
- e)光栅测位移系统(实时获取位移信息)

#### 4)辅助支撑系统

对被测钢管进行支撑与固定，同时对齿条(进给部件)进行支撑由身管支撑和齿条支持组成。

#### 5)左右套筒

完成各个测量部件的固定与支撑，形成封闭的光路系统。

### 3.3 各分系统设计

#### 3.3.1 激光发射准直系统设计

##### 3.3.1.1.激光的特性

激光, 英文为 Laser, 是英文 Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation 的缩写, 意为“受激的辐射放大”。人们通常将激光的特性概括为四个特性, 即方向性、单色性、高亮度和相干性。由测量原理可知, 本系统主要利用激光的方向性好这一优点。

方向性是指激光束的单一方向性, 可以用发射角度大小表示。光束的方向性好, 就是指光束的发射角小。通常的激光器发振的基本模态均为高斯形态的振幅分布, 随着传播距离的变化, 光强仍然保持高斯形态传播, 但其光束直径发生变化, 可以用基本模态的发射角表述。发射角  $\theta$  定义为:

$$\theta = \lambda / \pi \omega_0 \quad (3.1)$$

式中,  $\omega_0$  ---激光射出点幅值为  $1/e$  的光的半径。

$\lambda$  ----真空中光的波长。

##### 3.3.1.2 激光器的选择

自第一台固体脉冲红宝石激光器问世后, 激光器的研制发展非常迅速, 各种工作物质、运转方式的激光器不断出现。常用的激光器按照工作物质分类可以分为固体激光器、气体激光器、液体激光器和半导体激光器等类型, 由于半导体激光器具有超小型, 高效率, 结构简单和价格便宜等一系列优点, 同时考虑本台仪器设计小型化和经济性的特点, 故本设计选用半导体激光器。仪器采用的半导体激光器为西安华科光电有限公司生产的 DB670-3-3(5)型点状光斑半导体激光器。

其主要技术参数如下:

外形尺寸: 14mmx45mm

波长: 670nm

工作电压: DC3~5V

工作电流:  $\leq 50\text{mA}$

光束发散度:0.3mrad  
 出瞳孔径:0.5mm  
 出瞳功率:3mw  
 光学系统:光学玻璃透镜  
 导线长度:2×150mm 高导线  
 工作温度:-10℃~+40℃  
 储存温度:-40℃~+80℃

### 3.3.1.3 准直系统设计

通常所说的光束准直问题是指用光学仪器来改善光束的方向性,即压缩光束的发散角。

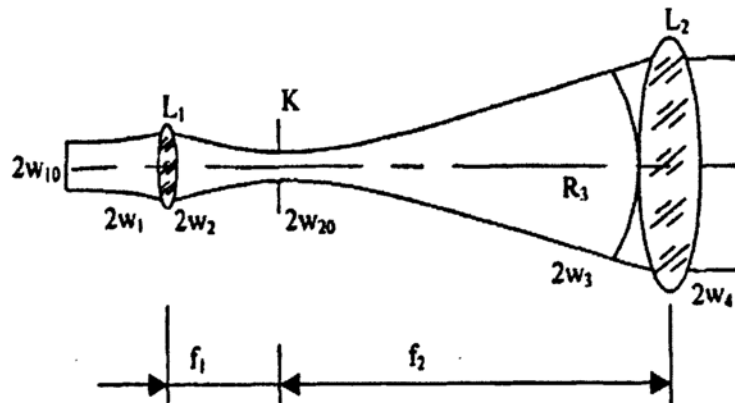


图 3.3 激光准直系统原理图

准直系统使用如图 3.3 所示的倒置的望远镜系统,它由两个焦距分别为  $f_1$  和  $f_2$  ( $f_2 \gg f_1$ ) 的透镜  $L_1$  和  $L_2$  组成,两透镜间距  $D=f_1+f_2$ 。通常以发散角  $2\theta$  来描述光束的发散度,  $2\theta$  的定义为:

$$2\theta = 2 \frac{dw(z)}{d(z)} = 2 \frac{\lambda^2 z}{\pi \omega_0} (\pi^2 \omega_0^4 + z^2 \lambda^2)^{\frac{1}{2}} \quad (3.2)$$

由此可以算得出射光束与入射光束的远场发射角的压缩比  $M$  为:

$$\frac{1}{M} = \frac{2\theta_4}{2\theta_0} = \frac{f_1}{f_2} \frac{w_{10}}{w_1} \quad (3.3)$$

因为  $f_2 \gg f_1$ , 又在一般的情况下,  $w_1 > w_{10}$ , 所以所以  $M > 1$ , 也就是将光束的发散角压缩了  $M$  倍。

为了消除激光信号中的高次谐波,减少光斑毛刺,在两个透镜的公共焦面安装一个空间滤波器  $K$ 。空间滤波器实际上就是一个很小的孔径,很容易精确准直。针孔就是空间滤波器的一个例子。入射到透镜  $L_1$  上的光中,那些不与透镜和滤波器平行的光线都将聚焦到滤波器的孔径以外,即被阻住。当然这与孔径的直径有关,一般说来,滤波器的孔径等于系统衍射极限的光束的尺寸。实验表明经该激光准直系统准直后,光束发散角较小,光斑对称性良好,能够满足测量要求。

本文所选望远镜的放大倍数为  $30\times$ , 则激光束的发散角缩小了  $30$  倍,其光束直径扩大了  $30$  倍。

### 3.3.1.4 激光束方向稳定性的提高

测量用的激光器，其光束发散角很小，理应具有极好的光束直线性和方向稳定性。事实上，从激光器端部发出的光束，其光斑中心位置一直是随时间在微量变动，也就是说，激光器发射的光束方向是随时间在变动，存在着影响激光束方向稳定性欠佳的主要原因，大约可归纳为以下几类：

- 1) 周围环境，外界振动干扰。
- 2) 外界温度变化致使系统各部件的热膨胀与收缩等热变形。
- 3) 激光源自身内部热变形。
- 4) 光束在介质中传播受周围环境、空气波动影响等。

减小以上各种因素的影响，均可以采取提高测量速度，减少测量时间的措施，本仪器利用图像处理，实时数据处理，大大的提高了测量速度。

克服因素 1) 应采取有效的防振隔振措施，应使机械部件运动平稳，使仪器整体远离振源。

克服原因 2) 应采取设置良好的恒温条件，减小热源热量及隔离热的传递，选用热膨胀系数低材料，整体恒温控制等措施。由于本仪器应用于生产车间的测量，难以整体恒温。故在测量时应尽量提高测量速度，以减小这一因素的影响。

对于原因 3)，本仪器选用半导体激光器，其内部发热较低，可以认为这一影响已基本消除。

原因 4) 是指利用激光束进行测量时，光束在空气中传播过程受到周围环境的温度、压力、密度变化等影响引起的方向稳定性问题。因此本仪器设计将整个测量光学系统密封在测量腔内，以减小这种影响。

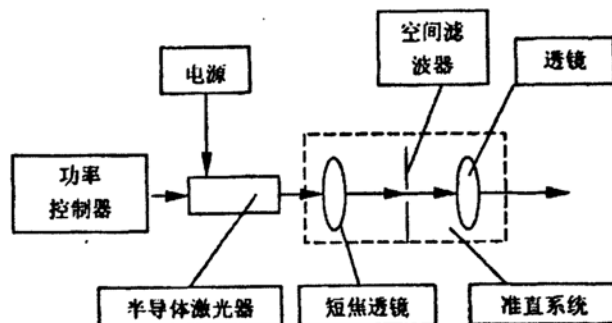
### 3.3.1.5 其它元器件的选取

为了使光斑亮度均匀，提高图像处理的精度，同时避免 CCD 的饱和现象，在该系统中增加功率控制器。

DB670-3-3(5) 型点状光斑半导体激光器电源采用随激光器附带的 LPS-1 型激光器专用电源。

### 3.3.1.6 激光器及准直系统结构图

该系统总体结构如图 3.4 所示。



3.4 激光器及准直系统原理框图

### 3.3.2 光学成像系统设计

#### 3.3.2.1 平面反射镜

平面镜转动时具有重要特性，当入射光线方向不变而转动平面镜时，反射光线将发生改变。如图 3.5 所示，设平面镜转动角  $\alpha$  时，反射光线转动  $\theta$  角，根据反射定律有：

$$\theta = 2\alpha \quad (3.4)$$

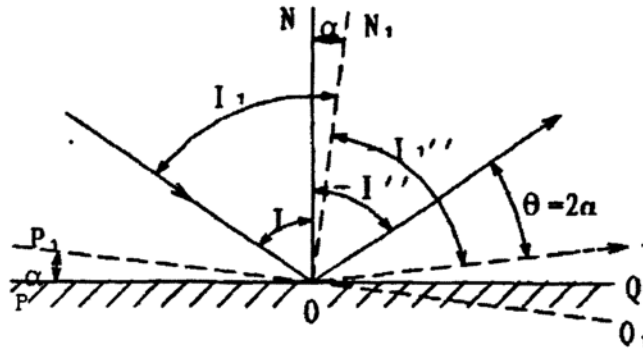


图 3.5 反射大原理图

因此反射光线的方向改变了  $2\alpha$  角。这就是光学中的反射放大原理，本仪器设计

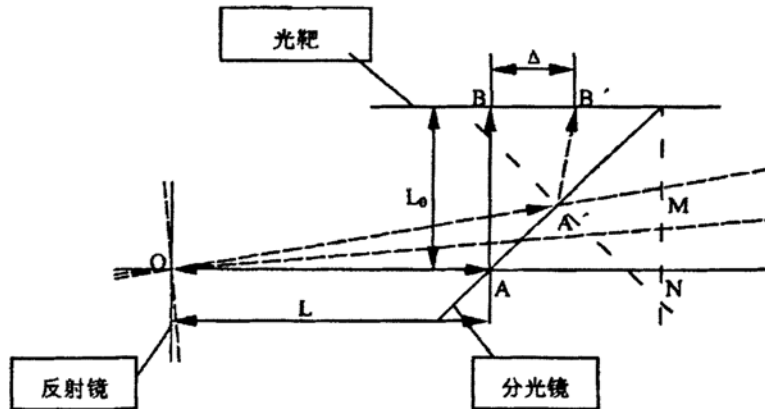


图 3.6 光路计算原理图

正是利用这种原理提高分辨率，实现微小角度的测量，从而完成直线度误差测量的。其计算光路如图 3.7 所示。

$$\Delta = (L+L_0) \operatorname{tg}2\alpha \approx 2(L+L_0)\alpha \quad (3.5)$$

其中：

$\Delta$ ——光靶上测量光斑中心相对于理想光斑中心的距离。

$L$ ——某测量面平面反射镜沿理想轴线方向与分光面的交点的距离。

$L_0$ ——理想轴线与分光面的交点和光靶的距离。

$\alpha$ ——反射镜倾斜角度。

因此可以实现微小角度的测量。

易知平面反射镜反射表面的质量对测量误差有较大的影响，因此在加工中反射面采用抛光后镀反光膜的方法，以提高表面质量。

### 3.3.2.2 分光镜

利用平板玻璃也可实现图 3.6 所示的光路，如图 3.7 所示。

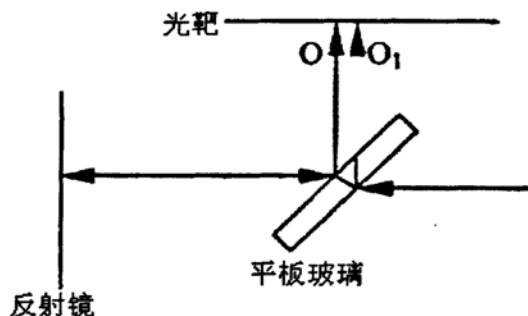


图 3.7 用平板玻璃实现测量光路

但利用平板玻璃会形成如图所示的双光斑，即“鬼象”，不便于图像的获取，因此本设计选用分光镜。另外，分光镜还具有由机械应力引起的变形小和易于安装和固定等优点。

分光镜如图 3.8 所示是将一块镀有中性分光膜的直角棱镜与另一块尺寸相同的直角棱镜胶合在一起，可以将一束光按比例分成两束光。

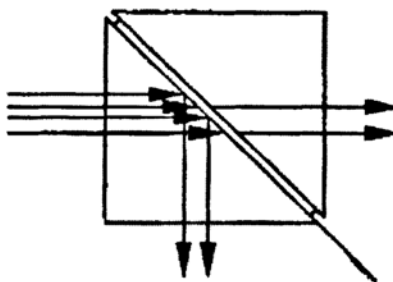


图 3.8 分光镜

分光镜如图 3.8 所示，是将一块镀有中性分光膜的直角棱镜与另一块尺寸相同的直角棱镜胶合在一起，可以将一束光按比例分成两束光。设透过率为  $x$ ，则反射率为  $(1-x)$ ，激光经过两次反射到达光靶上的比率为  $F=x(1-x)$ 。易知当  $x=50\%$  时， $F$  取得最大值 25%。因此，分光膜为半透半反膜(比例为 1:1)，从而获得最大的测量光强。

### 3.3.2.3 CCD 相机

CCD 是电磁耦合器件的简称，它是 20 世纪 70 年代初发展起来的半导体集成光电器件。CCD 具有以下特点：

- a. 固体化，体积小，重量轻；
- b. 工作电压低，工作可靠，寿命长；
- c. 灵敏度高，线性好，功能多；
- d. 制造方便，成本较低。

因此，近 30 年来 CCD 器件及其应用技术的研究取得了惊人的进展，特别是在机器视觉领域。本仪器正是充分利用了 CCD 图像传感器的上述优点来实现测量的。

CCD 图像传感器结构可分为线阵和面阵两种，线阵图像传感器是由一系列光敏单位组成的，只能用于一维图像的光电转换，要获得二维图像必须外加扫描机构。考虑到提高测量速度的要求，以及增加扫描机构使结构复杂，本仪器选用面阵 CCD 图像传感器。

本仪器选用的是 JAI 公司生产的 CV-M2350 型 CCD 相机，分辨率为 768(宽)×576(高)×256，像元大小为 7μm×7μm。

### 3.3.2.4 图像采集卡

通常的实时采集图像输入系统，是由图像采集卡配上外接 CCD 摄像机、监视器以及计算机等构成。其原理框图如图 3.9 所示。

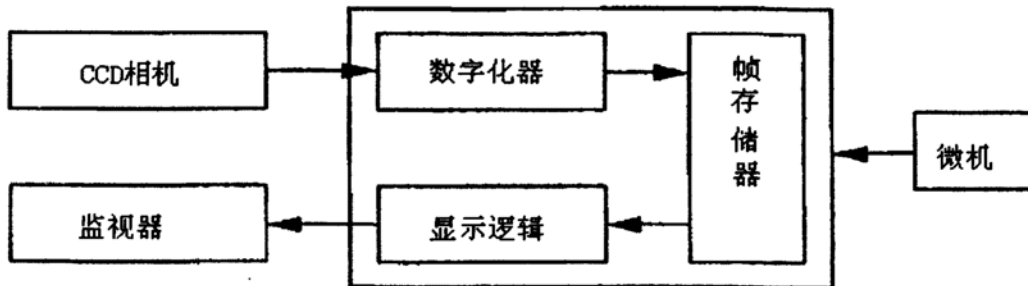


图 3.9 图像采集卡原理框图

由 CCD 摄像机采集的图像信号经过数字化转换器，转化成数字信号，进入帧存储器储存。一路由显示逻辑将数字信号转换成视频信号，在监视器上显示，另一路由计算机访问帧存储器，进行各种数据处理。

本仪器所采用的图像采集卡是 Aver 公司的 PV951 型图像采集卡，其最大分辨率为 640x480x256X3/NTSC 或 768X576X256X3/PAL。

### 3.3.2.5 其它元器件的选取

镜头：日本 COMPUTAR 公司生产，焦距为 75mm 的光学镜头。

光靶：由普通毛玻璃代替，要求表面无缺陷。

### 3.3.2.6 光学成像系统结构图

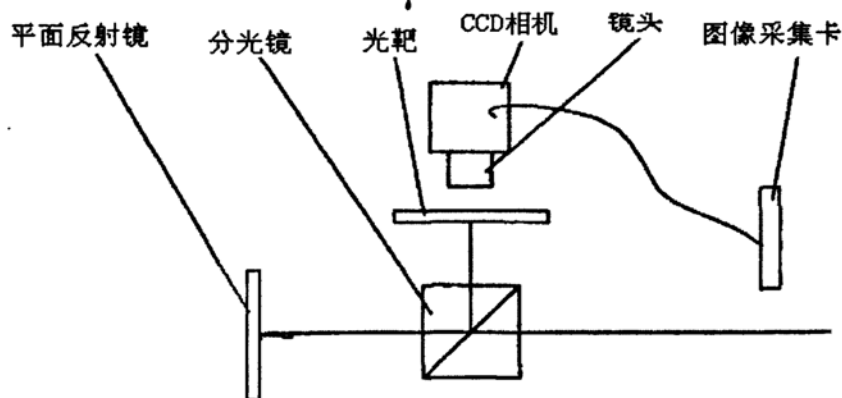


图 3.10 光学成像系统结构图

## 3.3.3 驱动装置的设计

### 3.3.3.1 测量元件设计

由于被测件长度 L=10000mm，取测量点数为 100，因此测量跨距为 10000/100=100mm 设计时，取测量元件总长度与测量跨距相等即测量元件总长为 100mm。测量元件直径应略小于被

测管径，因此对于 60 和 80 两种口径的钢管应设计尺寸不同的测量元件。

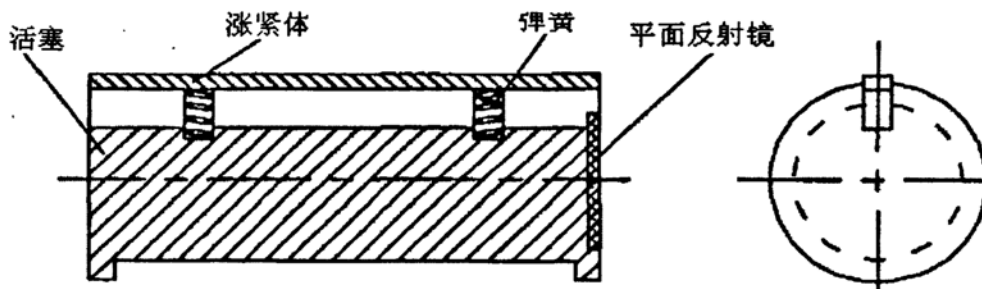


图 3.11 测量元件结构图

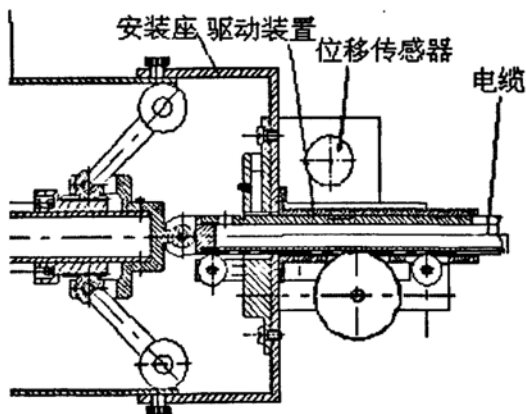
为了保证测量元件的移动真实的模拟炮管轴线的偏摆，同时也能适应钢管轴径的微小变化，测量元件采用涨紧机构，由活塞、涨紧体和弹簧组成。其结构如图 3.11 所示。

测量体整体削隙，上部开一个通槽，涨紧体嵌入槽内，以弹簧涨紧。涨紧体的上端面为与整活塞外表面弧度相同的圆柱面，它以弹簧和活塞连接，形成封闭结构。为避免擦伤平面反射镜，反射镜凹进活塞体内。

活塞材料应选择硬度小于钢管的材料，以避免划伤钢管内壁。涨紧体和活塞的材料相同。同时，活塞在炮管内移动，必然有磨损，因此，活塞和涨紧体应作为备件定期或按磨损情况进行更换。

### 3.3.3.2 进给装置

由于生产车间测量场地的限制，整体仪器的总体长度有一定的限制，因此驱动装置应尽量减小尺寸，而测量元件的驱动必须进行刚性传动，因此应将驱动装置的进给部分设计成分段式，因此我们选用齿轮齿条装置进行驱动。设计 5 根各长 2m 的齿条，可以拼接成一根使用，也可以在测量过程中手工安装拼接。其结构如图 3.12 所示。



3.12. 直线度检测进给系统装配图

由齿轮齿条啮合的性质可得位移计算公式如下：

$$S=Nc=2\pi Nr_b=2\pi n r_b/N_0 \tag{3.6}$$

其中：

- S——齿条的线位移(测量元件的位移量)。
- N——齿轮转过的圈数。

$C_b$ ----齿轮基圆周长

$r_b$ ----齿轮基圆半径。

$n$ ----光栅处理电路记录的记数脉冲数

$N_0$ ----光栅分度数。

### 3.3.3.3 光电轴角编码器

光电轴角编码器是一种以高精度计量圆光栅作为检测元件并集光、机、电于一体的数字测角传感器，它采用光电转换技术可将机械轴的角位置信息转换成相应的数字代码输出，因而可实现对角度、速度和其它机械物理量的测量。它具有以下优点：

- 1) 测量精度高；
- 2) 读数率高，适于动态测量；
- 3) 易于实现自动化、数字化测量；
- 4) 工作稳定可靠，抗外界干扰能力强。

绝对式编码器是利用自然二进制或循环二进制（葛莱码）方式进行光电转换的。

- 1) 可以直接读出角度坐标的绝对值；
- 2) 没有累积误差；
- 3) 电源切除后位置信息不会丢失。但是分辨率是由二进制的位数来决定的，也就是说精度取决于位数，目前有 10 位、14 位等多种。

在测量时考虑到与齿轮和步进电机配合测量，本系统使用绝对式轴角编码器进行位移测量。本文选用的是 Hortech 公司生产的 Bc-58 型多圈绝对式编码器，其分辨率为 12 位。

### 3.3.3.4 其它元器件的选取

测量元件在钢管内移动可能存在旋转，为了保证测量元件运动的平稳性，提高测量精度，我们在齿条和测量元件之间设计一个二维防转接头。齿轮齿条联接可能存在的颈向跳动就不会传递给测量元件。二维防转接头采用相互垂直的弹簧片结构。

为了消除齿条自重对测量元件运动精度的影响，在齿条与二维防转接头连接处设置一个卸荷支撑，该支撑也相当于一个活塞与齿条固定在一起，且具有一定的厚度，因此齿条自重的影响通过卸荷支撑和二维防转接头得以消除。

本仪器的驱动电机使用步进电机，它是一种将电的脉冲信号转换成相应的角位移的机电元件。它具有以下的优点：

- 1) 可以直接将电脉冲信号变换成相应的机械位移，符合数字控制系统的要求；
- 2) 步距值不受各种干扰因素的影响，转子运动的速度主要取决于脉冲信号的频率，转子运动的总位移量取决于总的脉冲信号数；
- 3) 误差不长期积累，每一圈的累计误差为 0；
- 4) 控制性能良好，起动，停车，反转及其他任何运行方式的改变，都在少数脉冲内完成。

### 3.3.3.5 测量过程

仪器测量步骤如下：

- 1) 将钢管安装在身管支撑上，保证其平稳；

- 2) 将测量元件安装在钢管内;
- 3) 安装测量左侧端盖, 锁紧;
- 4) 安装右侧端盖, 锁紧;
- 5) 调节光路微调系统(包含在右侧端盖中), 使得激光束能量中心大致与钢管轴线重合, 锁紧微调装置;
- 6) 开始测量(测量时测量元件从左侧移向右侧, 完成一遍测量, 再从右侧移向左侧, 完成一遍测量, 该测量方法符合转向消除误差的测量原理):
- 7) 结束测量(取下两侧端盖, 取下钢管, 准备进行下一次测量)。测量时, 步进电机匀速运动, 当移动一个测量跨距时, 拍摄一幅图像, 实时进行图像处理求得光斑圆心坐标, 将其和测量距离(跨距的整数倍)一同保存在直线度数据文件里, 以备直线度评定软件使用。

## 第四章 钢管轴线直线度检测系统软件设计

### 4.1 系统软件概述

#### 4.1.1 本系统软件流程图

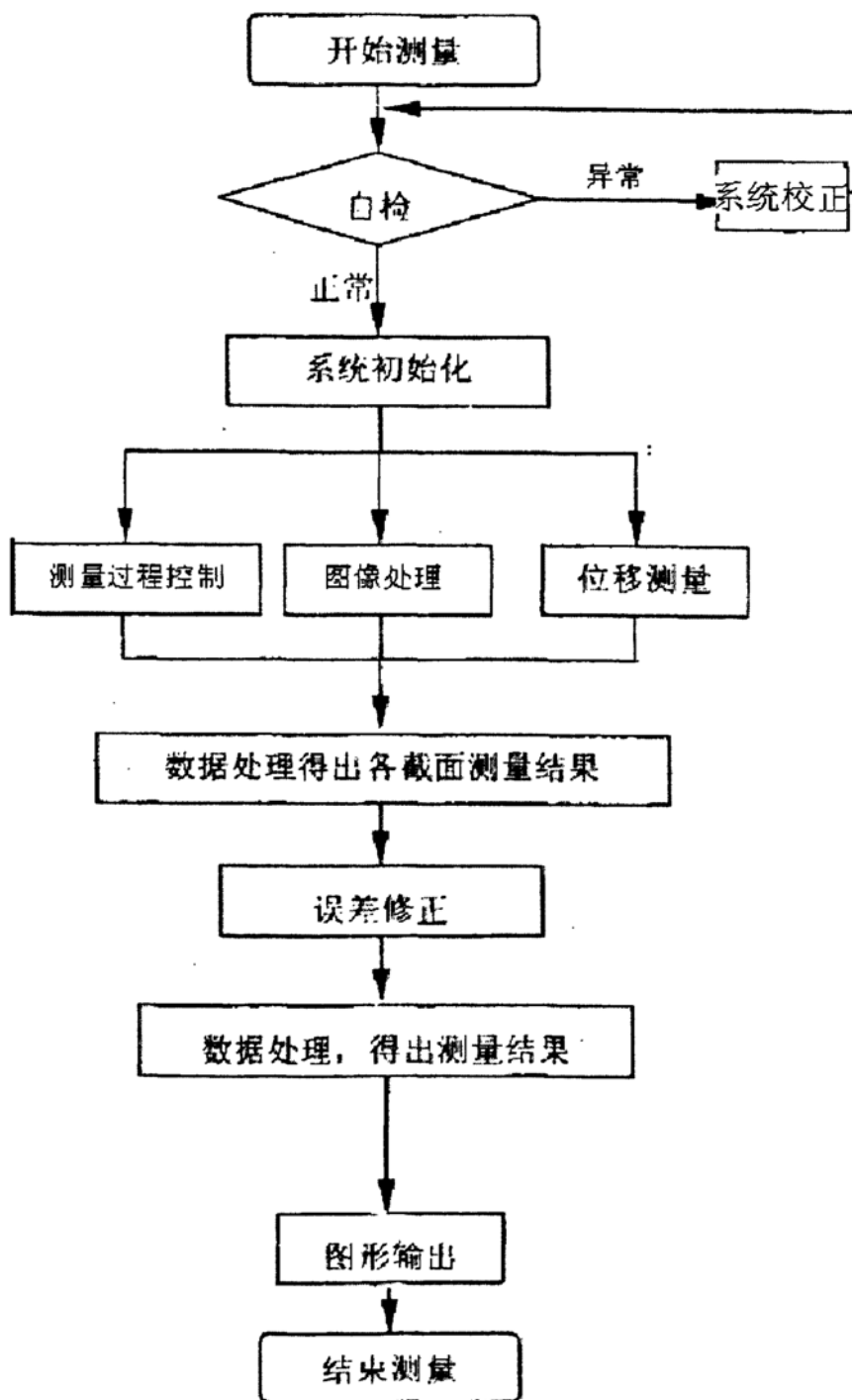


图 4.1 本系统软件流程图

#### 4.1.2 系统软件模块组成

本系统软件由以下几个模块组成:

##### 1.初始化模块

进行系统各个硬件、软件单元的初始化,包含自诊断模块,给出可能的错误原因。其中还包含光束对心调节模块,给出光束是否对心的图形和数据结果。

##### 2 图像处理模块

数字图像处理,取得光斑圆心坐标。

##### 3.数据处理模块

数据处理,将各测量截面的圆心坐标汇总成直线度数据文件,进行数据预处理,并进行直线度评定,同时能进行误差修正。

##### 4.测量过程控制模块

控制整个测量过程,控制测量元件的移动,位移的计算,图像采集的控制等。

##### 5 输出模块

能够以图形和数据两种形式输出测量结果。

### 4.2 数字图像处理软件模块的实现

#### 4.2.1 数字图像处理的理论基础

“图”是物体透射光或反射光的分布,“像”是人的视觉系统对图的接收在大脑中形成的印象或认识。前者是客观存在的,而后者为人的感觉,图像应是两者的结合。一幅黑白图像可用二维函数  $f(x, y)$  表示,其中  $x, y$  是平面的二维坐标,  $f(x, y)$  表示点  $(x, y)$  的亮度值(灰度值)。对模拟图像来讲,  $f(x, y)$  显然是连续函数。

为了适应数字计算机的处理,必须对连续图像函数进行空间的幅值数字化。空间坐标  $(x, y)$  的数字化成为图像采样,而幅值数字化被称为灰度级量化。经过数字化后的图像称为数字图像(或离散图像)(Digital Image)。

设连续图像  $f(x, y)$  按等间隔采样,排成  $M \times N$  阵列。如式(4.1)所示。

$$f(x,y)=\begin{bmatrix} f(0,0), f(0,1)\dots\dots\dots f(0,N-1) \\ f(1,0), f(1,1)\dots\dots\dots f(1,N-1) \\ \dots\dots\dots \\ f(M-1,0), f(M-1,1)\dots\dots\dots f(M-1,N-1) \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

图像阵列中每一个元素都是离散值,称为像素(Pixel)。在数字图像处理中,一般取阵列  $N$  和灰度级  $G$  都是 2 的整数幂,即取  $N=2^n$  及  $G=2^m$ 。一般  $N$  取 256。

彩色图像可用 R、G、B 三个矩阵表示,也可以组成混合矩阵。目前三个色彩各用 8bit,共用 24bit。显然各单色图像比特数较少,因为人眼彩色亮度分辨率低,并不妨碍图像的观察质量。

另外,二值图像只有两个灰度级,即像素灰度级非 1 即 0,其数字图像可用每个像素 1bit 的矩阵表示。二值图像可采用链码(又称 Freeman 码)表示。

#### 4.2.1.2 数字图像处理

数字图像处理(Digital Image Processing)技术起源于 20 世纪 20 年代, 当时通过海底电缆从英国伦敦到美国纽约传输了一幅照片, 它采用了数字压缩技术。数字图像处理一般用于计算机处理或实时的硬件处理, 因此也称之为计算机图像处理。其优点是处理精度高, 处理内容丰富, 可进行复杂的非线性处理, 有灵活的变通能力。其特点有以下几个方面:

- 1)图像信息量大
- 2)图像处理技术综合性强
- 3)数字图像中各个像素是不独立的, 其相关性大
- 4)只能处理三维景物的二维投影
- 5)数字图像处理后的图像受人的因素影响较大

目前, 数字图像处理的主要研究内容有以下几个方面:

- 1)图像信息的获取、存储、传送、输出和显示
- 2)图像变换
- 3)图像编码压缩
- 4)图像增强和复原
- 5)图像分割
- 6)图像描述
- 7)图像分类(识别)

#### 4.2.1.3 数字图像处理方法

##### 1.空域法

这种方法是把图像看作是平面中各个像素组成的集合, 然后直接对这一二维图像进行相应的处理。空域处理法主要有下面两大类:

##### 1)邻域处理法

包括:梯度运算, 拉普拉斯算子运算, 平滑算子运算和卷积运算等。

##### 2)点处理法

包括:灰度处理, 面积、周长、体积、重心运算等。

##### 2.变换域法

数字图像处理的变换域处理方法是首先对图像进行正交变换, 得到变换域系数阵列, 然后再施行各种处理, 处理后再反变换到空间域, 得到处理结果。包括:滤波、数据压缩、特征提取等处理。

#### 4.2.1.4 调色板(Palette)

现实世界的颜色种类是无限的, 但计算机显示系统所能显示的颜色数量是有限的, 为了使计算机能最好的重现实际图景, 就必须采用一定的技术来管理和取舍颜色。

真彩色(True Color)是指显示出来的颜色与真实世界中的颜色非常自然逼真, 人眼难以区分它们的差别。真彩色的颜色种类高达  $256 \times 256 \times 256 = 2^{24}$  种, 通常用 RGB 表示法来表现真彩色图像, 即用 3 个字节(24 位)来表示一个真彩色像素的颜色值。

在真彩色系统中，像素值与真彩色颜色值一一对应。但对于仅能同时显示 16 色或 256 色的系统，每一个像素仅能分别采用 4 位或 8 位来表示，像素值与真彩色值不能一一对应，用像素值代表颜色值的方法将不能得到最佳效果，而必须采用调色板技术。所谓调色板就是在 16 位活 256 色显示系统中，将图像中出现最频繁的 16 或 256 种颜色所组成的颜色表。对这些颜色按 4 位或 8 位，即 0 至巧或 255 进行编号，每一编号代表其中的一种颜色。这种颜色编号叫做颜色的索引号，4 位或 8 位的索引号与 24 位的颜色值的对应表叫做颜色查找表 LUT (LookUP Table)。使用调色板的图像叫做调色板图像，它们的像素值并不是颜色值，而是颜色在调色板查找表中的索引值。

#### 4.2.1.5 色彩系统

常见的色彩系统有：

##### 1 RGB 和 CMY 色彩系统

计算机屏幕的显示通常用 RGB 色彩系统，它通过颜色的相加来产生其他颜色。印刷工业上则通常 CMY(Cyan、Magenta、Yellow)色彩系统，它是通过颜色相减来产生其他颜色的。

##### 2. YIQ 色彩系统

YIQ 色彩系统通常被北美的电视系统所采用，属于 NTSC 系统，Y 指颜色的明视度 (Luminance)，即亮度 (Brightness)，也就是灰度值 (Grayvalue)，而 I 和 Q 则是指色调 (Chrominance)，即描述图像色彩及饱和度的属性。YIQ 与 RGB 之间的关系如下：

$$\begin{bmatrix} Y \\ I \\ Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.299 & 0.587 & 0.114 \\ 0.596 & -0.274 & -0.322 \\ 0.211 & -0.523 & 0.312 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

##### 3. YUV 色彩系统

YUV 色彩系统被欧洲的电视系统所采用，属于 PAL 系统，Y 指明视度，U 和 V 也是指色调。YUV 与 RGB 之间的关系如下

$$\begin{bmatrix} Y \\ U \\ V \end{bmatrix} := \begin{bmatrix} 0.299 & 0.587 & 0.114 \\ -0.148 & -0.289 & 0.437 \\ 0.615 & -0.515 & -0.100 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

图像处理多采用 RGB 色彩系统。

#### 4.2.1.6 灰度图

灰度图 (Grayscale) 是指只含亮度信息，不含彩色信息的图像。要表示灰度图，就需要把亮度值进行量化。通常划分成 0 到 255 共 256 个级别，0 最暗 (全黑)，255 最亮 (全白)。

BMP 格式的文件中没有灰度图的概念，但是我们可以很容易地用 BMP 文件来表示灰度图。方法是用 256 色调色板，这个调色板每一项的 RGB 值都相同。(0, 0, 0) 表示全黑，(255, 255, 255) 表示全白。这样灰度图就可以用 256 色图来表示了。将 R=G=B=a 代入式 (4.2)、(4.3) 中，有：

$$\begin{cases} Y = 0.299a + 0.587a + 0.114a = a \\ I = 0.596a - 0.274a - 0.322a = 0 \\ Q = 0.211a - 0.523a + 0.312a = 0 \end{cases} \quad (4.4)$$

$$\begin{cases} Y = 0.299a + 0.587a + 0.114a = a \\ U = -0.148a - 0.289a + 0.437a = 0 \\ V = 0.615a - 0.515a + 0.100a = 0 \end{cases} \quad (4.5)$$

易知，图像的色彩分量为 0，即没有色彩信息。

灰度图使用方便，其像素 RGB 值都一样，图像数据即调色板索引值就是实际 RGB 的亮度值。图像数据中一个字节代表一个像素。另外，如果是彩色 256 色图，图像处理时可能会产生不属于这 256 种颜色的新颜色，因此数字图像处理常用灰度图作为对象。本软件的图像处理采用 256 色灰度图。

#### 4.2.1.7 设备无关位图

本软件所处理的图像都是 WindowS 中的位图(BitmaP)，即 BMP 文件，因为在 BMP 文件中图像是以设备无关位图(DIB)的形式存放的。Windows3.0 以前版本只支持于设备相关位图 DDB。DDB 只是一种内部位图格式，它显示的图像依计算机显示系统的设置不同而不同，因此一般不存储为文件。DDB 中不包括颜色信息，显示时是以系统的调色板为基础进行各位的颜色映射的，Windows 只能保证系统调色板的前二十钟颜色稳定不变，所以 DDB 只能正确显示少于二十色位图。MFC 中定义的 CBitmaP 类来处理 DDB 位图。

DIB 是 Device-Independent Bitmap(设备无关位图)的缩写，DIB 位图可以在不同的机器或系统中显示位图所固有的图像。DIB 位图是一种外部的外部位图格式，它通常以 BMP(DIB)文件的形式被保存在磁盘上或者作为资源保存 EXE 文件中。设备无关位图自带颜色信息，因此调色板管理非常容易。同时，由于它良好的设备无关性，使得 DIB 位图成为图像处理中主要的对象。

BMP 文件由位图文件头、位图信息头、位图颜色信息和图像数据四部分组成，后

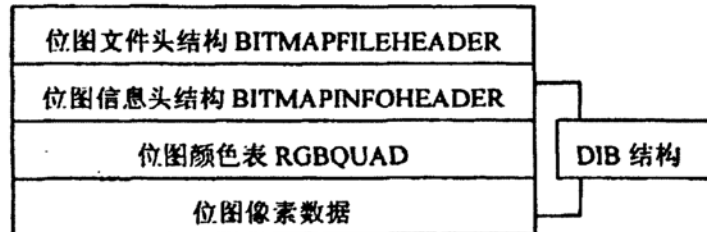


图 4.2 DIB 位图文件结构图

三部分组成基本的 DIB 结构，如图 4.2 所示。

#### 4.2.1.8 数字图像处理方法

VC 是 MICROSOFT VISUAL C++ 的简称，它是 Microsoft 公司推出的开发 Win32 环境程序，面向对象的可视化集成编程系统，它具有强大的功能，本软件是基于 Windows98 操作系统，使用 VISUAL C++6.0 编制的。

Microsoft 为进行 Win32 编程提供了一套名为 Win32SDK 的应用程序接口，其中包括了上千个 Win32 系统函数。Visual C++ 包括一套叫做 MFC(Microsoft Foundation Classlibrary)的 C++ 类库，其中定义了进行 Win32 编程所需要的各种类。VC 中提供的 CBITMAP 类用于处理 DDB(设备相关位图)，而没有专门处理 DIB 的类，因此 VC 中数字图像处理方法有两种：

1)基于 Win32SDK

2)基于 MFC

基于 Win32SDK 的方法属于非面向对象的编程方法，通常的编程方法都是基于 MFC，因此必须基于 Win32SDKAPI 函数构件新类 CDib 类处理 DIB，完成数字图像处理的软件实现过程。

#### 4.2.1.9 处理 DIB 的基本函数

Win32SDK 提供的一些 DIBAPI 函数如表 4.1 所示。

表 4.1 win32SDK 提供的处理 DIB 的基本 API 函数

函数	功能
GetDIBits	从 DDB 中获取位图的图像位，用于将 DDB 转换为 DIB 格式
SetDIBits	设置 DIB 位图的图像位，用于将 DIB 转换为 DDB 形式
CreateDIBitmap	用指定的 DIB 来创建 DDB 并用 DIB 信息初始化位图的图像位
SetDIBitsToDevice	直接将 DIB 位图的图像位输出到设备，用于显示 DIB
StretchDIBits	DIB 位图映射输出到设备的一个矩形区域，位图可能被缩放
CreateDIBPatternBrush	用 DIB 位图来创建模式画刷
CreateDIBSection	创建一个可直接写入的 DIB
GetDIBColorTable	获取 DIB 的颜色表
SetDIBColorTable	设置 DIB 的颜色表

#### 4.2.2 数字图像处理过程及软件实现

##### 4.2.2.1 图像处理的目的

图像处理的目的是获得图中光斑的圆心，再经过图像处理就可以获得该测量截面平面镜倾斜的角度，从而获得对应该截面的直线度误差值。

##### 4.2.2.2 图像处理的过程

由图像处理的目的可知图像处理的过程及各过程功能，列表如下：

表 4.2 图像处理过程

图像处理过程	功能
图像采集	获得原始测量图像，填充 DIB 结构
色彩变换	将测量图像转换成灰度图以便于处理
中值滤波	滤除图像噪声
阈值分割	将图像变成二值图
形态学滤波	滤除毛边和散斑
求取圆心	求取光斑圆心

##### 4.2.2.3 图像处理过程的软件实现

###### 1. 图像采集

图像采集的目的是将图像采集到内存中,同时填充 DIB 结构,为动态的图像采集。静态图像采集的软件很多,且功能已十分完善,但都无法满足我们动态测量的要求,因此本软件自行进行图像采集软件的编制。

VisualC++6.0 中关于数字视频的软件包 VideoForWindows(简称 VFW),为视频捕获的编程带来了极大的方便,特别是提供了功能强大、简单易行、类似于讹 IWnd 的窗口类 AVICap,使得图像采集的软件部分非常简单,只需要注册并编写系统的几个回调函数

ErrorCallBackProc

(当捕获过程发生错误时调用)

StatusCallBackProc

(当捕获窗状态发生改变时调用)

FrameCallBackProc

(当缓存中采满一帧数据时调用)

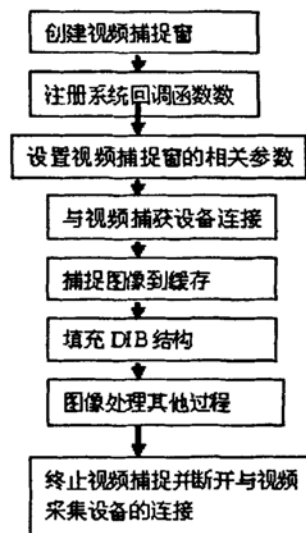


图 4.3 视频捕捉流程图

编程时,将 VFW32.lib 加入程序中,即可调用上述函数,其实现过程如图 4.3 所示。

## 2. 色彩变换

其实现过程如图 4.4 所示。图像采集获取的图像是 24 位图像,将其转换为 256 色灰度图,需要重新建立一个 8 位(256 色)图像,自建调色板,其像素数据是将 24 位图像像素数据去处颜色信息获得。分别取出 24 位图像每一个像素的值(就是该像素的颜色 RGB 值),取得 R、G、B 值,按公式(4.6)去处颜色信息即可得到 256 色对应的像素值。

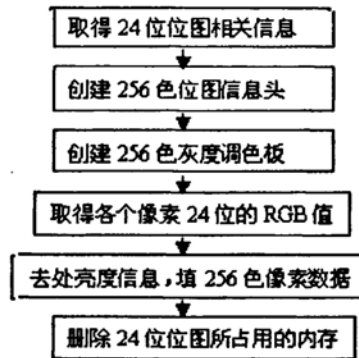


图 4.4 色彩变换流程图

$$Y=(0.299*R+0.587*G+0.114*B) \tag{4.6}$$

### 3. 中值滤波

中值滤波是一种非线性信号处理方法，与其对应的中值滤波器是一种非线性滤波器。中值滤波器是在 1971 年由 J. w. Jokey 首先提出并应用在一维信号处理技术中，后来被二维图像信号处理技术所应用。它在一定的条件下，可以克服线性滤波器、最小均方滤波、平均值滤波(平滑滤波)等所带来的图像细节模糊，而且对滤除脉冲干扰及图像扫描噪声最为有效。由于中值滤波具有平均效应，对本软件所处理的图像，可以认为不引起图像处理误差。

中值滤波就是用一个有奇数点的滑动窗口，将窗口中心点的值用窗口内各点的中值代替。本文根据实验对比，选择 3×3 的滤波窗。

### 4. 阈值分割

图像阈值分割是一种广泛使用的图像分割技术，它利用了图像中要提取的目标物与其背景在灰度特性上的差异，把图像视为具有不同灰度级的两类区域(目标和背景)的组合，选取一个合适的阈值，以确定图像中每一个像素点应该属于目标还是背景区域，从而产生相应的二值图像。阈值分割不仅可以大量压缩数据，减少存储容量，而且能大大简化在其后的分析和处理步骤。阈值分割是在最大限度的保留有用信息的基础上，尽可能的剔除无用信息。

设原始图像  $f(x, y)$ ，以一定的准则在  $f(x, y)$  中找出一个合适的灰度值作为阈值  $t$ ，则按上述方法分割后的图像  $g(x, y)$  可由公式(4-7)表示:

$$g(x,y)=\begin{cases} Z_E & f(x,y) \geq t \\ Z_B & f(x,y) < t \end{cases} \tag{4.7}$$

一般取  $Z_E=255$ ，表示目标; $Z_B=0$ ，表示背景。经过这样的变换，一幅图像就变成了二值图，即只有 0 和 255 两个灰度级的图像。

由此可见，要从复杂的景物中分辨出目标并将其形状完整地提取出来，阈值的选取是阈值分割技术的关键。如果阈值选取过高，则过多的目标点被误归为背景; 阈值选取过低，则会出现相反的情况。

常用的阈值选取方法有:

#### 1) 简单直方图分割法

灰度直方图即为灰度级的像素数  $n_i$  与灰度  $i$  的二维关系，它反映了一幅图像上灰度分布的统计特性，成为利用像素灰度做属性的分割方法的基础。

60年代中期，Prewitt 提出了直方图的双峰法，即如果灰度级直方图呈明显的双峰状，则选取两峰之间的谷底所对应的灰度级作为阈值。

2)最佳阈值法

所谓最佳阈值是指是图像中目标物和背景分割错误最小的阈值。其计算原理为使将背景像素错认为目标物像素和将目标物像素错认为背景像素的概率之和为最小的阈值。

此方法在一般的情况下求解较为复杂，因此应用不甚广泛。

3)类间方差法

类间方差阈值是 Ostu 于 1979 年提出的，他用灰度直方图的类内方差和类间方差的比值作为判断标准给出了阈值的选择方法。

设 L 为灰度值的范围， $h_k$  是灰度值为 k 的像素个数，则图像的像素总数 M 为：

$$M = \sum_{k=0}^{L-1} h_k \quad (4.8)$$

灰度直方图为：

$$P_k = \frac{h_k}{M} \quad (4.9)$$

设 T 为阈值，图像中灰度值小于或等于 T 的像素为一类( $C_0$ )，其平均灰度值为  $\mu_0$  大于 T 的像素为另一类( $C_1$ )，其平均灰度值为  $\mu_1$ ，则类间方差为：

$$\begin{aligned} \sigma_B^2 &= \omega_0 (\mu_0 - T)^2 + \omega_1 (\mu_1 - T)^2 \\ \omega_0 &= \sum_{k=0}^T P_k, \quad \omega_1 = 1 - \omega_0 \end{aligned} \quad (4.10)$$

$C_0$  和  $C_1$  的方差为：

$$\sigma_0^2 = \sum_{k=0}^T (k - \mu_0) P_k / \omega_0 \quad (4.11)$$

$$\sigma_1^2 = \sum_{k=T+1}^{L-1} (k - \mu_1) P_k / \omega_1 \quad (4.12)$$

定义类内方差为：

$$\sigma_n^2 = \omega_0 \sigma_0^2 + \omega_1 \sigma_1^2 \quad (4.13)$$

最佳阈值  $T^*$  为：

$$T^* = \text{Arg MAX}_{0 \leq T < L-1} (\sigma_B^2 / \sigma_n^2) \quad (4.14)$$

4)最大熵法阈值分割

一维最大熵法阈值分割的原理是选择这样一个阈值，使图像用这个阈值分割出的两部分，其一阶灰度统计的信息量最大。

一维最大熵法阈值分割算法仅仅利用了像素灰度信息而未充分利用图像的空间信息，所以当信噪比降低时，分割效果并不理想。二维最大熵法阈值分割算法综合利用了图像的像素

灰度特征和区域灰度特征。

本软件使用类间方差阈值法，进行阈值分割，实验证明该方法具有算法简单，速度快，自适应性高等优点。

## 5.形态学滤波

数学形态学(Mathematical Morphology)是分析几何形状和结构的数学方法，是建立在集合代数基础上，用集合论方法定量描述几何结构的科学。数学形态学是由一组形态学的代数运算符组成的。如腐蚀、膨胀、开、闭等。它在图像处理领域主要用在图像形状和结构的分析及处理，包括图像分割、特征抽取、边界检测、图像滤波、图像增强和恢复等方面。

对于一个给定的目标图像  $X$  和一个机构元素  $S$ ,  $S$  在图像上移动。对于每个当前位置  $x$ ,  $S[x]$  只有三种可能的状态：

- 1)  $S[x] \subseteq X$ ;
- 2)  $S[x] \subseteq X^c$ ;
- 3)  $S[x] \cap X$  与  $S[x] \cap X^c$  均不为空。

第一种情形说明  $S[x]$  与  $X$  相关最大;第二种情形说明  $S[x]$  与  $X$  不相关;而第三种情形说明  $S[x]$  与  $X$  只是部分相关。

$$X \ominus S = \{x \mid S[x] \subseteq X\} \quad (4.15)$$

因而满足 1) 的点  $x$  的全体构成结构元素与图像的最大相关点集。我们称

$$X \oplus S = \{x \mid S[x] \cap X \neq \emptyset\} \quad (4.16)$$

这个点集为  $S$  对  $X$  的腐蚀(简称腐蚀)。满足 1) 和 3) 的点的并集为  $S$  对  $X$  的膨胀(简称膨胀)。

腐蚀在数学形态学中的作用是消除边界点，可以把小于结构元素的物体去除，如果两个物体之间有细小的连通，那么当结构元素足够大时，通过腐蚀运算就可以将两个物体分开。

$$\begin{aligned} X \circ S &= (X \ominus S) \oplus S \\ X \bullet S &= (X \oplus S) \ominus S \end{aligned} \quad (4.17)$$

膨胀运算在数学形态学中的作用是把图像周围的背景点合并到物体中。如果两个物体之间距离比较近，那么膨胀运算可能会使这两个物体连通在一起，膨胀对填补图像分割后物体中的空洞很有用。开(Open)和闭(Close)的定义如下:开运算可以视为对腐蚀图像用膨胀来恢复，而闭运算可看作是对膨胀图像用腐蚀来恢复。这一恢复不是信息无损的，即它们通常不等于原始图像。开是所有  $X$  的与结构元素  $S$  全等的子集的并组成的。这一几何描述说明开是一个基于几何结构的滤波器。

本软件所使用的滤波器为  $(X \circ S) \bullet S$ 。开运算用于消除外部噪声，闭运算用于消除内部噪声。

## 6.求取圆心

求取光斑圆心有多种方法，如先对二值图像进行边缘识别，再进行曲线拟合(圆形)，求取其圆心，这种方法由于参加像素较少且过分的依赖图像的边缘，因此对图像质量要求较高，因而通用性和精度均较低。

本软件系统采用重心法求取光斑圆心。重心法具有精度高，计算简单等优点。其计算公

$$\text{式如下: } x_0 = (\sum_{i=1}^n x_i) / n \quad y_0 = (\sum_{i=1}^n y_i) / n \quad (4.18)$$

其中,  $(x_0, y_0)$  -----圆心坐标。

$(x_i, y_i)$  -----像素值为 255 的点的坐标。

$n$ -----所有像素值为 255 的点的数目。

图像处理时, 在计算重心之前先进行像素细分。细分采用基于亚像素的空间矩算法, 计算以每个像素中心为原点的  $2 \times 2$  细分窗口的各阶矩, 然后以这些矩为基础计算有关参数。通过细分, 测量精度可达到整像素的  $1/4$ 。

### 4.3 直线度评定软件设计

#### 4.3.1 给定平面内和给定方向上直线度误差的评定

给定平面内和给定方向上直线度误差评定方法有:最小包容区域法(最小条件法)、两端点联线法及最小二乘法。

其中, 最小包容区域法是国家标准规定的方法, 当要求严格确定直线度误差的大小, 或在评定结果发生争议时, 则必须按最小包容区域法进行评定或仲裁。两端点联线法具有方法简单、实用方便、手工计算简便等特点。而且当测量数据对评定基线呈单侧分布时, 两端点联线法与最小包容区域法具有相同的评定结果, 因而两端点联线法在实际中, 特别在手工计算时广为应用。相比较而言, 最小二乘法手工计算远不如两端点联线法方便, 评定方法又不符合国家标准, 故在实际中应用较少

##### 4.3.1.1 两端点连线法

两端点联线法是当各采样点的读数值确定后, 以首尾两点的偏差值为零值, 并以此两点的连线作为评定直线度误差的基线。先求出各采样点偏差值到首尾两点连线的纵坐标距离, 然后, 求得被测对象的直线度误差值  $f$ 。如图 4.5 所示。

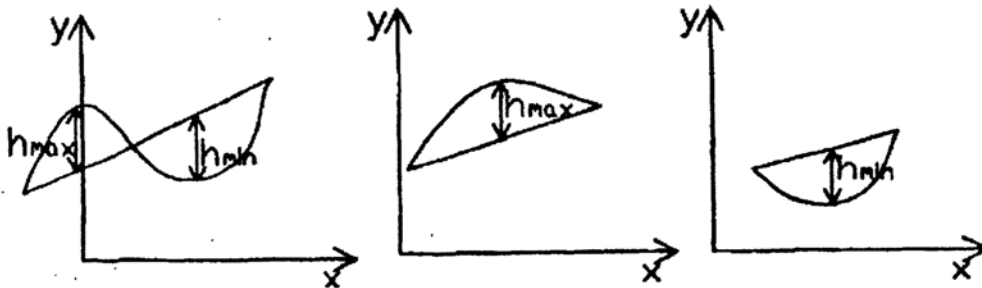


图 4.12 两端点连线法直线度计算原理图

当测量数据分布于评定基线的两侧时, 按下式求得  $f$ :

$$f = h_{\max} + |h_{\min}| \quad (4.19)$$

当测量数据分布于评定基线的上方一侧时, 按下式求得  $f$ :

$$f = h_{\max} \quad (4.20)$$

当测量数据分布于评定基线的下方一侧时，按下式求得  $f$ ：

$$f = |h_{\min}| \quad (4.21)$$

式中： $h_{\max}$ ——位于评定基线上方的距基线最远的点至该基线的纵坐标距离(位于基线上方的距离为正)。

$h_{\min}$ ——位于评定基线下方的距基线最远的点至该基线的纵坐标距离(位于基线下方的距离为负)。

#### 4.3.1.2 最小二乘法

最小二乘法是以各采样点偏差值的最小二乘直线为评定基线，求得距评定基线两侧最远点至该基线的纵坐标距离  $h_{\max}$  和  $h_{\min}$ ，然后以两者绝对值之和为被测件的直线度误差值。即：

$$f = h_{\max} + |h_{\min}|$$

这一方法由于手工计算不及两端点连线法，计算方法又不符合国家标准，计算结果比按最小包容区域法的结果偏大，故这一方法在实际中很少应用。

#### 4.3.1.3 最小包容区域法(最小条件法)

国家标准规定，直线度误差应按最小包容区域法(最小条件法)评定，即以包容实际轮廓线的许多对两两平行的直线中，纵向距离为最小的两平行直线之间的距离作为该轮廓的直线度误差的评定值。该两平行直线为评定直线度误差的基线，称为最小包容线。

按最小条件评定直线度误差步骤如下：

1. 将各采样点的偏差值分为高点和低点

以采样首点为坐标原点，连首尾两点。以两端点连线为基准，将各采样点分为高点和低点；

2. 构造两端点与高点的凸多边形

由原点分别向各高点及尾点作连线，判别诸直线中斜率最大者，该直线定为高点凸多边形的第一边；然后，以第一边的终点为起点，向序号在该点之后的各高点及尾点作连线，判别诸直线中斜率最大者，该直线定为高点凸多边形的第二边；之后再以第二边的终点为起点，再向序号在该点之后的各高点及尾点作连线……如此下去，形成高点与首尾两端点的凸多边形。

3. 构造两端点与低点的凸多边形

方法与 2 一样，不同的是，当由首点向各低点及尾点引连线后，判别的是直线中的斜率最小者(若斜率为负，则绝对值为最大者)；该直线即为低点凸多边形的第一边；然后，以第一边的终点为起点，向序号在其后的各低点作连线，判别直线中斜率最小者，该直线定为凸多边形的第二边；之后，再以第二边的终点为起点……

4. 构造整体封闭凸多边形

将高点及低点凸多边形构成整体凸多边形。

5. 求符合最小条件的直线度误差值

求封闭凸多边形各顶点到对应边的纵坐标距离，其中的最大值即为符合最小条件的直线度误差值。

### 4.3.3 空间直线度误差评定方法及软件实现

根据国家标准 GB/T1182 — 1996, 任意方向直线度误差是包容实际线最小圆柱面的直径。空间直线度误差评定的主要方法有以下几种: 简易算法、两端点连线法、最小二乘法、最小包容四棱柱法、最小包容区域法等。

#### 4.3.3.1 简易算法

在实际生产测量中, 如对直线度要求不高, 要求测量方法简单、快速时, 可以使用简易算法。简易算法又可称为投影法。主要有以下两种(1)单方向最大值法: (2)两方向方和根法。

单方向最大值法的包容圆柱只能保证直四棱柱的一条棱在圆柱上, 因此该方法只能保证一个点在圆柱面上; 两方向方和根法则只能保证两个点在圆柱面上。

简易算法不满足最小包容区域的条件, 因此是近似算法, 其误差较大。

#### 4.3.3.2 两端点连线法

设空间直线的方程为:

$$\frac{x-x_0}{a} = \frac{y-y_0}{b} = z \quad (4.22)$$

两个端点(所有测量点中第一个和最后一个)的坐标分别为 $(x_B, y_B, z_B)$ 和 $(x_E, y_E, z_E)$ 则两端点连线的直线方程参数如下:

$$\begin{cases} x_0 = x_B - \frac{x_E - x_B}{z_E - z_B} z_B \\ y_0 = y_B - \frac{y_E - y_B}{z_E - z_B} z_B \\ a = \frac{x_E - x_B}{z_E - z_B} \\ b = \frac{y_E - y_B}{z_E - z_B} \end{cases} \quad (4.23)$$

然后由其余各点的坐标 $(x_i, y_i, z_i)$ 分别求出它们至两端点 B 和 E 的连线  $l_{BE}$  的距离  $h_i$

$$h_i = \sqrt{(x_i - x_0 - az_i)^2 + (y_i - y_0 - bz_i)^2} \quad (4.24)$$

找出其中  $h_i$  的最大值  $h_{\max}$ , 判断以  $2h_{\max}$  为直径的圆柱面是否符合最小直径包容圆柱面的要求(两点接触或三点接触)。若不符合, 则按一定的优化方法改变  $x_0, y_0$  的数值(确定新的 B' 和 E' 两点的连线, 它平行于两端点连线  $l_{BE}$ )并重复上述计算, 一直到符合最小直径包容圆柱面的要求为止。最小直径包容圆柱面的直径  $f$  即为被测轴线的直线度误差。易知该方法只能保证两点到三点接触, 因此也属于近似方法。

#### 4.4.3.3 最小二乘法

其步骤大致与两端点连线法相同, 只是方向线的确定( $x_0, y_0, a, b$ )四个参数的确定)方法不同。该方法也属于近似算法。该方法和两端点连线法均可以通过网格细分的方法加以优化, 这种优化方法虽然也属于近似算法但可以达到一定的精度(0.1%), 故在一定的精度范围内能够满

是工程上的要求。

#### 4.3.3.4 最小包容四棱柱法

该方法是先将直线度误差数据投影到 XOZ 面和 YOZ 面, 在两个平面内分别按给定平面内直线度(二维直线度)的评定方法计算出两条最小包容线。

$$\text{XOZ 面} \begin{cases} l1: x = az + b_1 \\ l2: x = az + b_2 \end{cases} \quad (4.25)$$

$$\text{YOZ 面} \begin{cases} l3: y = cz + d_1 \\ l4: y = cz + d_2 \end{cases} \quad (4.26)$$

垂直于各自所在坐标面且经过以上直线的平面相交后形成一个直四棱柱, 该棱柱的底面周长分别是两个坐标面内的二维直线度误差的数值。该四棱柱就是包容被测线的最小包容四棱柱。

#### 4.3.3.5 最小包容区域法

该方法是国标中规定的方法, 其结果为理论上的真实值。

由于该算法编程相当复杂, 计算机实现较为困难, 且在编程时遇到了迭代不收敛的问题, 因此本系统未使用最小包容区域法。

### 4.4.4 遗传算法评定空间直线度

#### 4.4.4.1 遗传算法简介

遗传算法(Genetic Algorithms, 简称 GAS)是一种仿生优化算法, 它根据达尔文的自然选择学说和孟代尔的遗传变异理论, 通过概率和自适应策略对问题的最优解进行全局搜索。它最早由美国密执安大学的 Holland 教授提出, 起源于 60 年代对自然和人工自适应系统的研究。80 年代, Goldberg 进行归纳总结, 形成了遗传算法的基本框架。近年来, 遗传算法已广泛的应用于函数优化, 组合优化, 生产调度, 自动控制, 机器学习, 人工生命等众多领域

对应一个求函数最大值(最小值)的优化问题, 一般可描述下述数学规划模型:

$$\begin{cases} \max f(X) \\ \text{s.t. } X \in R \\ R \in U \end{cases} \quad (4.27)$$

其中,  $X=[x_1, x_2, \dots, x_n]^T$  为决策变量,  $f(X)$  为目标函数, 后两式为约束条件,  $U$  是基本空间,  $R$  是  $U$  的一个子集。满足约束条件的解  $X$  称为可行解, 集合  $R$  叫做可行解集合。

遗传算法中, 将  $n$  维决策向量  $X=[x_1, x_2, \dots, x_n]^T$  用  $n$  个记号  $X_i (i=1, 2, \dots, n)$  所组成的符号串  $X$  来表示:

$$X = X_1 X_2 \dots X_n = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T \quad (4.28)$$

把每一个  $X_i$  看作是一个遗传基因, 它的所有可能取值称为等位基因, 这样,  $X$  就可看作是由  $n$  个遗传基因所组成的一个染色体。

生物的进化是以集团位主体的, 与此相对应, 遗传算法的运算对象是由  $M$  个个体所组成

的集合，称为群体。与生物一代一代的自然进化过程相似，遗传算法的运算过程也是一个反复迭代过程，第  $t$  代群体记做  $P(t)$ 。这个群体不断地经过遗传和进化操作，并且每次都按照优胜劣汰的规则将适应度高的个体更多的遗传下一代，这样最终在群体中将会得到一个优良的个体  $X$ ，它对应的表现型  $x$  将达到或接近于问题的最优解  $X^*$ 。

生物进化过程主要是通过染色体之间的交叉和染色体的变异来完成的。与此相对应，遗传算法中最优解的搜索过程也模仿生物的这个进化过程，使用所谓的遗传算子(genetic operators)作用于群体  $P(t)$ 中，进行下述遗传操作，从而得到新一代群体  $P(t+1)$

**选择(selection):**根据各个个体的适应度，按照一定的规则或方法，从第  $t$  代群体  $P(t)$ 中选择出一些优良的个体遗传到下一代群体中。

**交叉(crossover):**将群体  $P(t)$ 内的各个个体随机搭配成对，对每一个个体，以某个概率(称为交叉概率， crossover rate)交换它们之间的部分染色体。

**变异(mutation):**对群体  $P(t)$ 中的每一个个体，以某一概率(称为变异概率， mutation rate)改变某一个或某一些基因座上的基因值位其他的等位基因。

遗传算法运算过程如图 4.13 所示。

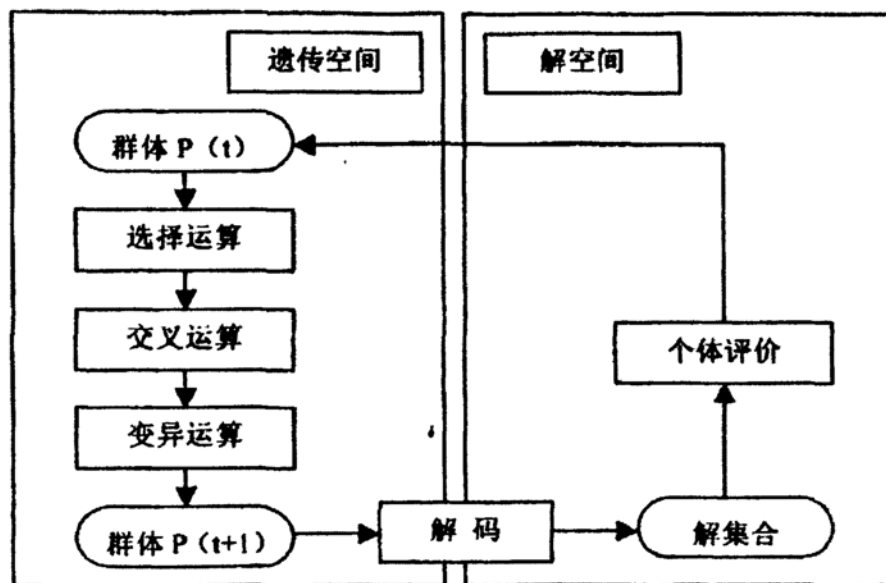


图 4.24 遗传算法的运算过程

遗传算法的显著特点包括:它是对问题参数的编码组进行进化，而不是直接对参数本身:它是从问题解的编码组开始搜索，而不是从单个解开始;它使用目标函数值(适应度)这一信息进行搜索，而不需要导数等其它信息;它使用的选择、交叉、变异这三个算子都是随机操作，而不是确定规则。基于这些特点遗传算法可以对复杂的非线性大空间问题进行有效的搜索。本系统正是利用遗传算法的这些特点来解决空间直线度的评定问题。

#### 4.4.4.2 遗传算法评定空间直线度实现技术

##### 1.个体编码

编码是应用遗传算法时要解决的首要问题，也是设计遗传算法时的一个关键步骤。常见的

个体编码方式有:二进制编码方式,格雷码编码方式,浮点数编码方式,符号编码方式等。本系统采用浮点数编码方式,因为浮点数编码方式精度高,便于在遗传算法中利用所求解问题的专门知识,便于遗传算法与相关近似算法之间的混合使用。

$$\text{个体为: } g(i) = (x_{oi}, y_{oi}, a_i, b_i) \quad (4.28)$$

## 2 目标函数的确定

由公式可知,该问题为求最小值问题,确定适应度时应转化为求最大值问题,只须在目标函数前加负号,再加上一个足够大的数即可。

根据个体  $g(i)$  可以确定每个测量点对应的  $R[g(i)]$ ,再求取这些值的最大值即得到目标函数。

$$\text{Fitness} = D - \max \{R[g(i)]\} \quad (4.29)$$

## 3.初始种群的选取

初始种群时进化的起点,一般是根据具体问题的可能解域确定一个种群变量的取值区间,在区间内随机生成一定数量的个体,组成遗传进化的种群。初始值的确定比较粗糙,取大的取值区间。

## 4 选择策略

本算法采用旋转赌轮法和最优保留法相结合的方法来选择下一代个体,具体步骤如下

1)计算种群中各个个体的适应度值  $f_i$ ,并选出适应度最大的个体保留到新种群中。

2)计算各个适应度之和

$$\text{sum} = \sum_{i=1}^{\text{popsize}} f_i \quad (4.30)$$

3)计算各个个体的选择概率  $p_i = f_i / \text{Sum}$

4)计算各个个体的累计概率  $p_k = \sum_{i=1}^k p_i, K=1.2, \dots, \text{popsize}$  (4.31)

5)选择操作:首先随机生成一个 $[0 - 1]$ 之间均匀分布的随机数  $r$ ,然后判断  $r \leq p_i$ ,是否成立,如果成立将个体选如新种群  $P$  中,否则选择满足条件  $p_{k-1} \leq r \leq p_k$ ,的第  $k$  个个体到新种群。

如此反复执行该操作  $\text{popsize}-1$  次,得到  $\text{popsize}$  个个体,加上保留的最优个体,最后得到  $\text{popsize}$  个个体的新种群。

## 5.交叉策略

采用启发式交叉法。

随机选择两个个体( $g(i)$ 和  $g(j)$ ),通过启发式交叉法来得到两个新个体

1)判断  $g(i)$ 和  $g(j)$ 哪一个个体的适应值较大,设  $F[g(i)] \gg F[g(j)]$ 。

2)产生一个 $[0, 1]$ 之间的随机数  $r$ ,则

$$\begin{cases} g^l(i) = r(g(i) - g(j)) \\ g^l(j) = g(j) \end{cases}$$

3)判断新个体的合法性。不符合则重复 1)、2)两步。

## 6 变异策略

采用单点实数变异法对种群实施进化操作。因为采用实数编码，每个基因对应一个变量，如果变异概率为  $P$ ，则整个种群中总的参加变异的基因数为  $\text{Popsizex}4xp$ 。（4 是个体中的基因数），将所有染色体个体排成一队，在  $[1, \text{popsizex}]$  之间随机选择一个数  $r$ ，则包还该基因个体在该位对应的基因发生变异。变异时，随机在变量的取值区间内产生一个实数，然后用来代替变异位的基因。

#### 4.4.4.3 计算结果

根据上述算法，选取如下的运行参数： $\text{popsizex}=40$ ， $\text{crossoverate}=0.8$ ， $\text{mutationrate}=0.05$ ， $\text{MaxGen}=1000$ 。得到测量结果  $f=0.052369$

遗传算法由于其算法简单，通用性强，精度高，理论上可以无限接近真值等优点，是空间直线度评定非常理想的方法。

· 最小区域法的算法较为复杂，计算机软件实现较为困难，故一般生产实际应用中只用做发生纠纷时的仲裁。

## 第五章 精度分析

由于种种原因，测量中存在误差是必然的，误差可能歪曲事实，导致错误结论，因此研究误差的来源及其规律性，减小或尽可能消除误差，以得到精确的测量结果，对于测量系统具有非常重要的意义。

### 5.1 影响直线度测量精度的因素

影响测量精度的因素有：挠度误差，CCD 引入的系统误差，数字图像处理误差，数据处理误差，激光束的能量中心与钢管的轴线不重合误差，反射镜制造误差，环境变化误差等。

#### 5.1.1 挠度误差

该误差性质为系统误差，其分布有规律，可按材料力学的方法加以计算，因此采用加修正值的方法可以加以消除，在形成数据文件之前进行的误差修正就是为了消除这一误差的影响。

#### 5.1.2 CCD 引入的系统误差

由于 CCD 的工作原理实际上是一个光学抽样和图像积分的过程，CCD 的光敏元间距限制了图像的抽样频率，当光敏元间距越小，抽样频率越高，所丢失的信息越小，误差就越小。由于计算机可读取由 CCD 器件传输图像的最小单位为一个像素，由此引入的系统误差也是一个像素单位。在本系统中，我们采用的面阵 CCD 的分辨率为  $7\mu\text{m (H)} \times 7\mu\text{m (V)}$ ，即 CCD 器件每个像元的横向宽度和纵向宽度。由于光学镜头的放大作用(设计镜头放大倍率为 2)，因此由 CCD 引入的系统误差为  $7 \div 2 = 3.5\mu\text{m}$ 。

#### 5.1.3 数字图像处理误差

数字图像处理过程也是将连续的图像信号进行离散采样数字化的过程，因此该过程必然存在误差。由于二值化、求重心等方法必然引入误差。数字图像处理的最小单位为 1 像素，因此该误差为 1 像素。又由于采用了光学镜头的放大作用和图像细分技术，因此该误差为  $7 \div 2 \div 4 = 0.875\mu\text{m}$ 。

#### 5.1.4 数据处理误差

直线度误差数据处理选用不同方法得到不同的结果，因此存在一定的误差。本系统主要采用遗传算法，由于遗传算法在理论上可以无限的逼近真值，可以通过提高最大世代数等方法提高其精度，因此可以认为，该项误差的影响忽略不计。

#### 5.1.5 激光束的能量中心与钢管的轴线不重合误差

由于安装的原因，激光束的能量中心无法绝对的与钢管的轴线重合，因此可能引入误差。

由于光线传播距离较长,可以认为光线中心大致与轴线重合,即认为反射镜保持与光线垂直,即由于二者不垂直引入的计算原理误差可以忽略。

由于在直线度获取的方法上采用了角度积累的计算方法,光线中心与轴线的夹角在测量过程中保持不变,该夹角对角度积累无影响,只是对初始偏角有影响,因此这项误差可以忽略不计。

光线不对心,对测量精度影响不大,但对测量误差的范围(量程)有较大的影响,因此在测量之前使用了微调结构,调节使光线中线大致与轴线重合。同理,反射镜初始安装偏角误差的性质及分析方法与本误差项相同。

### 5.1.6 反射镜制造误差

反射镜的反射面的平面度应达到一定的要求,但由于测量距离很大,很小的误差也会被放大后引入最终的直线度误差。该误差较为复杂,在此用最大角度误差给出,估算该值约为 $0.01'$ 。

### 5.1.7 环境变化误差

测量时,由于外界温度、压力,空气密度等变化会对激光束产生漂移,因此会引入误差。测量场所附近如有振源将会引起误差。由于本系统采用了自动化测量的方法,极大的提高了测量速度,测量时间极短,一般在2分钟之内,可以认为激光束为理想直线,其漂移忽略不计。

## 5.2 误差合成

以上分析的各项误差并非线性的传递给最终评定的直线度误差,由于光学杠杆放大原理,其误差必将变化。

误差传递计算公式如下:

$$\text{由公式 (3.5) } \Delta = (L+L_0) \operatorname{tg} 2\alpha \approx 2(L+L_0) \alpha$$

$$\text{令 } L_1 = L+L_0 \text{ 则 } \alpha = \Delta / 2 L_1 \quad (5.1)$$

$$\sigma_\alpha = \frac{1}{2} \sqrt{\Delta^2 L_1^{-4} \sigma_{L_1}^2 + L_1^{-2} \sigma_\Delta^2}$$

$$\sigma_{L_1} / L_1 \ll \sigma_\Delta / \Delta \Rightarrow \sigma_{L_1} / L_1 \ll \sigma_\Delta / L_1 \quad (5.2)$$

$$\Rightarrow \Delta^2 L_1^{-4} \sigma_{L_1}^2 \ll L_1^{-2} \sigma_\Delta^2$$

$$\sigma_\alpha = \sigma_\Delta / 2 L_1 \quad (5.3)$$

此分析证明了转角误差主要由光靶上光斑中心位置误差引起,而与轴向综合误差无关,

$$\text{由公式 } f=2R(u) \text{ 得 } \sigma_f = 2 \max(\sigma_{R_i}) \quad (5.4)$$

$$\text{又由公式 } R(v, u) = R(r, \theta, z, x_0, y_0, \alpha, \beta) = \sqrt{(r \cos \theta + x_0 + \alpha z)^2 + (r \sin \theta + y_0 + \beta z)^2}$$

$$\text{得 } R(i) = \sqrt{(x_i + x_0 + \alpha z_i)^2 + (y_i + y_0 + \beta z_i)^2} \quad (5.5)$$

忽略测量点误差对理想直线获得的影响,即认为  $u=(x_0, y_0, \alpha, \beta)^T$  为常数,同时忽略  $z$  方向误差的影响,认为直线度误差主要由  $x$  和  $y$  方向的误差引起。则

$$\sigma_{R(i)} = \sqrt{\frac{(x_i + x_0 + \alpha z_i)^2 \sigma_{x_i}^2 + (y_i + y_0 + \alpha z_i)^2 \sigma_{y_i}^2}{R^2}} \quad (5.6)$$

由对称性  $\sigma_{x_i} = \sigma_{y_i}$ , 则

$$\sigma_{R(i)} = \sqrt{\frac{(x_i + x_0 + \alpha z_i)^2 \sigma_{x_i}^2 + (y_i + y_0 + \alpha z_i)^2 \sigma_{y_i}^2}{R^2}} = \sigma_{x_i} \quad (5.7)$$

由公式  $x_i = x_{i-1} + \text{tg } \alpha = x_{i-1} + l \alpha_{xi-1}$

$$= x_0 + l \sum_{j=1}^i \alpha_{xi-1} \quad (5.8)$$

$\sigma_{x_i} = l \sqrt{i} \sigma_{\alpha} = \sqrt{i} l \sigma_{\alpha}$ , 则

$$\sigma_f = 2 \max(\sigma_{x_i}) = 10.9551 \sigma_{\alpha} = 5.4771 / L_1 \sigma_{\Delta} \quad (5.9)$$

这就是误差传递公式,其中:

1-----测量跨距

$\sigma_{\alpha}$  ---平面镜转角误差

$\sigma_{\Delta}$  ----光靶上光斑中心相对于靶心的距离误差

由此可得:

1) CCD 误差和图像处理误差影响(已换算到光靶上光斑中心位置误差):

$$\sigma_1 = 5.477 \times (3.5 + 0.875) \times 0.1 / 1 = 2.40 \mu\text{m}$$

2) 平面镜制造误差影响

$$\sigma_2 = 0.01 \times 10.955 \times 10^5 / 60 / 180 \times \pi = 3.19 \mu\text{m}$$

因此平面镜制造误差对整个系统的误差较大,应尽量提高其制造精度。

$$\text{系统总误差: } \sigma = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} = \sqrt{2.40^2 + 3.19^2} = 3.99 < 20 \mu\text{m}$$

满足系统测量精度指标要求。

### 5.3 系统对 $\Phi 60\text{mm}$ 钢管实测结果

利用本文设计的系统对长为 10m,直径 60mm 的钢管进行了实测,采样两组,每组采样点 10 个,步长 100mm,实测的结果如下表所示:

表 5.1 60mm 钢管直线度实测数据与测量误差

采样点	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
第一组实测值	0.070	0.075	0.065	0.065	0.070	0.070	0.065	0.075	0.070	0.075
第二组实测值	0.075	0.070	0.070	0.065	0.065	0.070	0.065	0.070	0.075	0.075
直线度	0.075									
测量误差	0.015									

实测的结果表明,测量系统的分辨率可以达到 0.005mm。测量误差不大于 0.015mm。同理论分析基本吻合,说明本系统达到了用户提出的测量要求。

## 第六章 总结与展望

### 6.1 结论

本文所设计的直线度的检测系统基于激光准直技术，计算机图像处理技术，光电探测技术等。准直激光束通过分光镜反射到活塞上的平面镜上，把移动活塞获得的在每个测量截面的深孔轴线的变化信息通过反射光，经分光镜投射到光靶上，由 CCD 摄像机接收激光光斑图像，再经图像采集卡送入计算机进行处理。

- 1 本系统基于光轴法进行测量，在传统光轴法的基础上进行了改进，理论分析表明该方法适用于钢管轴线直线度的测量，同时也适用于孔径尺寸相近的其他管类产品直线度的检测。
- 2 初步完成了系统的总体方案设计和结构设计，能够满足测量要求。
- 3 本测量系统对光斑中心坐标的求取方法是重心法，精度较高。
- 4 对于空间直线度的计算使用两 endpoint 连线法、最小二乘法、基于最小二乘法的网络分割法和遗传算法。经过比较，得出遗传算法是一种适合空间直线度计算的较好的方法。
5. 理论分析表明，该系统能够满足测量要求。

### 6.2 存在的问题及进一步研究的方向

1. 本设计未进行周密的实验，没有用具体的实践来检验该系统设计的合理性，因此可能还有一些问题是未被发现或未引起足够注意的，这是进一步研究中应注意的问题。
2. 对本文所设计的直线度检测系统进行功能完善和改进，制成商品化的仪器。

## 参 考 文 献

- 1 叶嘉雄, 常大定. 陈汝均, 光电系统与信号处理. 科学出版社. 1997. 1.
- 2 百野新治著, 张玉龙等编译. 传感器电路设计手册. 北京:中国计量出版社, 1989.
- 3 张宝寿, 张玉. 三点法EST测量直线度的误差分析. 宇航测试技术, 1996, vol.16.No.2
- 4 张俊哲. 无损检测技术及其应用[M]. 北京:科学出版社. 1993.
- 5 康华光. 电子技术基础(第四版) [M]. 北京: 高等教育出版社. 1999.
- 6 刘君华. 智能传感器系统[M]. 西安:西安电子科技大学出版社. 1999. 388 - 400.
- 7 姚广仁. 磁性金属基体上非磁性涂层厚度的无损检测方法[J]. 无损检测, 2000
- 8 任吉林, 林俊明, 高春法. 电磁检测. 北京:机械工业出版社, 2000.
- 9 李家伟, 陈积愚. 无损检测手册. 北京:机械出版社, 2002.
- 10 任吉林. 电磁无损检测. 北京:航空工业出版社, 1989.
- 11 石井勇五郎, 吴义等译. 无损检测学. 北京:机械工业出版社, 1986.
- 12 耿荣生. 新千年的无损检测技术—从罗马会议看无损检测技术的发展方向. 无损检测, 2001, 23(1):2-5.
- 13 雷银照, 马信山. 涡流法缺陷识别的研究现状. 无损检测, 19%, 18(3):81--83.
- 14 任吉林. 电磁无损检测的新进展. 无损探伤, 2001, 5:1--4.
- 15 张俊哲等. 无损检测技术及其应用. 北京:科学出版社, 1993.
- 16 中国机械工程学会无损检测学会会编无损检测概论. 北京:机械工业出版社
- 17 UdPa55LordW.AFourierdeseriPtorelassifeiationschemefordifferentialProbesignalJI.MaterialsEvaluation, 1984, 42(8):1136-1141.
18. RASmithGRHugo. TransienteddycurrentNDEforageingaircraftcaPabilitiesandlimitation.Insight, VOI43(1), Jan, 2001:14-25.
19. 许万忠. 低频涡流技术的应用. 无损检测, 19%, 18(8):227 — 231
20. 倪培军, 王存龙, 李旭东. 工业 CT 技术. 无损检测, 19%, 18(3):84--87.
- 21 严仍春. 涡流测厚无损检测技术及其应用. 无损检测, 19%, 18(6):169--172.
- 22 张春富, 张军, 唐文彦等. 激光跟踪仪在大尺寸工件集合参数测量中的应用. 工具技术 2002, 36(5).
- 23 J.W.Luquire, W.E.Deeds and C.V.Dodd. Alternating current distribution between planar conductors. Journal of Applied Physics, [970, Volume 41, 10.:3983-3991.
- 24 C.C.Cheng, C.V.Dodd, and W.E.Deeds. General analysis of probe coils near stratified conductors. Int. J. Nondestr. Test. 1971, 3: 109-130.
- 25 L.T.Rekanos, T.P.Theodoulidis, S.M.Panas and T.D.Tsiboukis. Impedance inversion in eddy current testing of layered planar structures via neural networks. NDT&E International, 1997, Volume 30, No.2: 69-74.
- 26 周龙声. 几何量精密测量技术. 机械工业出版社. 1988.
- 27 ZHANG L., ZHANG Y. Imitation analysis of the effect of initial value error on straightness EST method in time domain [C]. Proceedings of the ICPE' 96 and 6 th SJSU T. 1996 :4012403.
- 28 陈海燕, 海洁. 直线度自动检查仪的研究[J]. 工具技术, 2002, 36(5):34235.
- 29 Steven R.Kramer, James F.Harmon. Eddy Current Testing to Detect Cracks and Corrosion in the P-3C Orion Vertical Stabilizer Spar Caps. Materials evaluation 5, 1999:166-169
- 30 Y.S.Sun, T.Ouang, S.Udpa. Remote Field Eddy Current Testing: One of the Potential Solutions for Detecting Deeply Embedded Discontinuities in Thick and Multilayer Metallic Structures. Materials Evaluation, May, 2001:632-637.
- 31 Ja Donea, S. ciulinai, A. Philippe. Finite elements in the solution of electromagnetic induction problems. International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 8, 1974:359-367
- 32 E.A.Erdelyi, et al. Nonlinear magnetic field analysis of DC machines. IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Vol. 89 Sept.-Oct. 1970:1546-1583
- 33 P.Silvester, M.V.K.Chari. Finite element solution of saturable magnetic field problems. IEEE Transactions on power Apparatus and Systems. 1970, Vol. 89:1642-1651.
- 34 N.A.Dernerdash, T.W.Nehl. An evaluation of the methods of finite elements and finite differences in the solution of nonlinear electromagnetic fields in electrical machines. EE Transactions on Power Aparatus and Systems. 1979, 8, No. 1 :an.-Feb.
- 35 R.Palanisamy, W.Lord. Finite Element Modeling of electromagnetic NDT phenomena. IEEE Transactions on Magnetics, Vol. MAG-15, No. 6, Nov. 1979:1976-1981.
- 36 WANG C P. Laser doppler displacement measurement [J]. Laser and Opt ronics, 1987, 6(9):69271.
- 37 赵辉等. 基于双频激光干涉技术的高精度直线度基准装置中国激光, 2001, 7
- 38 李兰友. VisualC++ .NET 图形图像编程. 电子工业出版社. 2002.
- 39 陈强华, 吴健, 殷纯永. 双频激光远程直线度/同轴度测量系统 [J]. 中国激光, 2002, 29(7):625 — 630.
- 40 曹益平, 刘明健, 刘晓丽, 等. 大尺度二维直线度测量仪的研制[J]. 光电工程, 2004, 31(9): 57-60.
- 41 李慧鹏, 张军, 唐文彦, 等. 大尺寸回转体型面点坐标及形心轴线测量[J]. 仪器仪表学报, 2005, 26(5): 534-536. 546.
- 42 匡萃方, 冯其波, 刘斌, 等. 一种共路补偿激光漂移的直线度测量方法[J]. 光电工程, 2005, 32(4): 32-34, 38
- 43 赵斌. 无衍射光莫尔条纹空间直线度测量的原理与实验[J]. 计量学报, 2002, 23(2):81 — 86
- 44 王权陡, 余景池, 张忠玉, 等. 相移干涉技术在小角度及直线度测量中的应用[J]. 计量学报, 2002, 23(1):6 — 9

- 45 季 虎, 孙即祥, 邵晓芳, 等. 图像边缘提取方法及展望[J]. 计算机工程与应用, 2004, 14: 70-73.
- 46 刘 循, 游志胜. 多尺度形态学图像边缘检测方法[J]. 光电工程, 2003, 30(3): 56-58.
- 47 赵春江, 施文康, 邓 勇. 新的梯度边缘检测方法[J]. 光电工程, 2005, 32(4): 86-88.
- 48 张善钟, 赵辉. 国内外高精度直线度测量技术现状 [J]. 现代计量测试, 1994, (3): 2- 5.
- 49 罗延琦. 长轴与深孔轴线直线度误差的测定[J]. 机械. 1992, (2): 40- 41.
- 50 杨风丽, 韩冀皖, 李元宗. 面阵CCD 高精度测量技术的应用[J]. 太原: 太原理工大学学报, 2001, (9): 455- 458.

## 致 谢

本论文是在导师马宏教授的指导下完成的。马老师以广博的学识、严谨的学风给予学生严格的指导和热情的帮助。整个论文的顺利完成得益于马老师的悉心指导，字里行间都凝聚着唐老师的心血。导师对科学研究的开拓精神、对科研事业的执著追求、对新生力量的悉心栽培，使学生深受教诲，学生将永生不忘。

在论文研究过程中，光电工程学院的李明和孙安信同志也给予本人多方面的指导与帮助。并在学习、工作和生活等各方面给予了诸多关怀和照顾，对此表示十分感谢。

本人在此向其他热忱帮助过我的老师及同学们致以诚挚的谢意！



访问我们的官方网站了解更多内容

扫描二维码关注