

文章编号: 1001-7453(1999)03-0098-05

# CCD 视觉检测系统的设计

沈爱红

(无锡轻工大学机械工程系, 江苏无锡 214036)

**摘要:** 给出了 CCD (Charge-Coupled Device, 简称 CCD) 视觉检测系统的总体设计方案, 提出了一种新结构的背景照明、平行光投影成像、CCD 光电接受、高速转镜光学补偿的光学系统。从测量方法上消除了被测件晃动或振动以及高速运动对测量的影响, 成功地补偿了高速运动造成的影像模糊, 获取了螺纹钢的清晰轮廓像。同时, 对影响精度的因素进行了讨论和分析。

**关键词:** 在线检测; 高速转镜; 光学补偿; CCD 摄像机

**中图分类号:** TH701/TH741.1      **文献标识码:** A

CCD 视觉检测系统属一种非接触测量手段。它是将从成像系统获得的图像信号变成 CCD 的电荷信号, 完成对图像的空间离散化过程, 同时在 CCD 面阵上产生 PAL 制所需的同步信号、场同步信号和消影信号, 合成完整的视频信号, 输出后由计算机处理的方法<sup>[1,2]</sup>。

系统由光学系统(包括照明系统、成像系统、光学补偿系统)、面阵 CCD 接受系统、图像卡、监视器、计算机接口及计算机等组成。

## 1 光学系统设计

光学系统的作用是将被测工件成像在 CCD 光敏面上(见图1), 它由成像系统、照明系统和光学补偿系统三部分组成。

在实验中, 被测件为一  $M8 \times 1.5$  的螺杆, 螺杆由转速为 3 000 r/min 的电机带动, 齿廓影像在沿螺杆方向上形成直线运动。

### 1.1 成像系统

成像系统见图1, 它是由物镜  $L_2$ 、光阑  $D_2$  和 CCD 器件组成。光阑  $D_2$  设在  $L_2$  的像方焦点平面  $F$  处, 光阑  $D_2$  为系统的孔径光阑, 形成了物方远心光路<sup>[3]</sup>, 以控制轴外物点主光线的方向, 使工件在 CCD 光敏面上的像点位置不变, 从而消除了螺纹钢在轧钢过程中的摆动对测量精度的影响。

收稿日期: 1998-07-06; 修订日期: 1999-05-20

作者简介: 沈爱红(1970年10月生), 女, 江苏如皋人, 工学学士, 管理学学士, 助教。

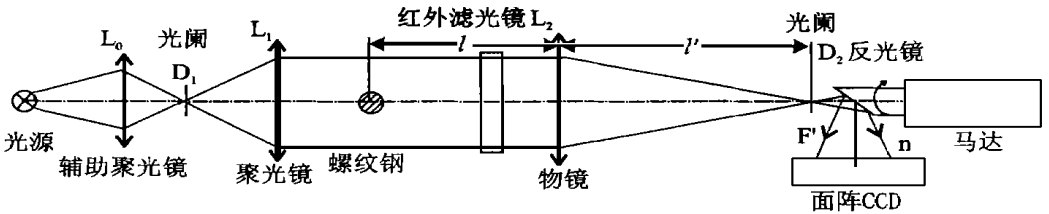


图1 光学系统光路图

1.1.1 系统放大率  $\beta$  面阵 CCD 的成像面积为  $7.95 \text{ mm} \times 6.45 \text{ mm}$ , 其像素为  $795(\text{H}) \times 596(\text{V})$ , 故每个像素为  $10 \mu\text{m}(\text{H}) \times 10.8 \mu\text{m}(\text{V})$ , 由于图像卡为  $512 \times 512$ , 故 CCD 成像面上有效像素为  $512 \times 512$ . 为防止工件晃动偏离视场, 在 CCD 成像面的两边需留有余量, 取成像面的  $10\%$ , 则可利用的尺寸为:  $512 \times 80\% \times 10 \mu\text{m} = 4.096 \text{ mm}$

系统放大率为  $\beta = 2Y / 2Y'$  ( $2Y$  —— 物方视场,  $2Y'$  —— CCD 面敏感尺寸)

故  $\beta = 4.096 / 8 = 0.512$ , 取  $\beta = 0.5$

确定物镜的焦距  $f$

$$\begin{cases} \beta = \frac{l}{f} \\ l - l' = L \quad (L \text{ 由结构尺寸定}) \\ \frac{1}{l} - \frac{1}{l'} = \frac{1}{f} \end{cases}$$

代入  $\beta = 0.5$ ,  $L = 75 \text{ mm}$  可得  $f = 150 \text{ mm}$ ,  $l = 75 \text{ mm}$ ,  $l' = 150 \text{ mm}$

1.1.2 确定孔径光阑  $D_2$  的直径  $d_2$  设热轧钢

面 A 处面积元  $ds$  的亮度为  $B$ , 其像为  $ds'$ , 亮度为  $B$ , 见图 2, 则达到  $ds'$  的光通量  $\Phi$  为:  $\Phi = \pi B \sin^2 \mu ds$

CCD 像表面上的照度  $E$  为:  $E = \Phi / ds' = \pi B \sin^2 \mu$

考虑光学系统的透光损失, 取透光系数为  $\tau$ , 则  $B = B \tau E = \pi B \sin^2 \mu$

式中  $B$  的单位为  $\text{cd}/\text{m}^2$ ,  $E$  的单位是  $\text{lx}$ . 设 CCD 的光积分时间为  $t(\text{s})$ , 则辐射成像的曝光量  $H_0 = \pi B \sin^2 \mu \cdot t$

由于  $\mu$  量很小, 故取  $\sin \mu = \tan \mu = d_2 / 2x$

得  $d_2 = 2x H_0 / (\pi B t)$

在本系统中, 选用敏通公司的 MTV1881CB 型摄像机, 使其工作在曝光量为  $0.5 \text{ lx} \cdot \text{s}$  的非饱和条件下, 光积分时间为  $18.4 \text{ ms}$ , 并要求热轧钢辐射造成的影像噪声比信号电平小一个数量级以上,  $H_0 < 0.05 \text{ lx} \cdot \text{s}$ , 取  $\tau = 0.7$ ,  $1000$  高温热轧钢的表面亮度为  $B = 5 \times 10^4 \text{ cd}/\text{m}^2$ , 代入上式得孔径光阑  $D_2$  的理论计算值  $d_2 = 0.75 \text{ mm}$ . 据以上计算, 采用的成像物镜焦距  $f = 150 \text{ mm}$ , 相对于孔径  $1:2$ ; 通光口径  $75 \text{ mm}$ , 孔径光阑的直径  $d_2 = 0.8 \text{ mm}$ .

1.2 照明系统

照明系统见图 1, 它由光源、辅助聚光镜  $L_0$ 、聚光镜  $L_1$  和光阑  $D_1$  组成, 它们满足以下成

像关系:光源经辅助聚光镜  $L_0$  成像于聚光镜  $L_1$  的物方焦平面  $F$  处,再经聚光镜  $L_1$  成像于无限远并与成像系统的入射光瞳重合,被灯丝照亮的辅助聚光镜  $L_0$  经聚光镜  $L_1$  成像于物平面处,即柯拉照明方式<sup>[4]</sup>。

该系统聚光镜  $L_1$  与辅助聚光镜  $L_0$  为:相对孔径 1:2; 焦距 150 mm,物镜通光口径为 75 mm,孔径光阑  $D_1$  选  $d_1 = 0.8$  mm,光源为卤光灯。

### 1.3 光学补偿系统

光学补偿系统见图3,转镜由直流伺服马达带动,其额定转速为 1 500 r/min,通过调节输入的直流电压可改变其转速.设螺纹钢的轧制速度为  $v$ ,则到 CCD 上影像的移动速度为

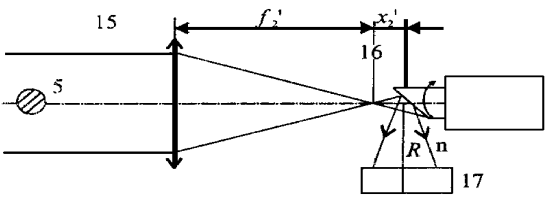


图3 转镜扫描光学补偿成像

$v = 2(x_2 + R)v/f_2$  (光线经过反射,影像速度提高一倍)。

设马达转速为  $n$  (r/min),扫描半径为  $R$ ,则有

$$2\pi nR/60 = 2(x_2 + R)v/f_2$$

螺杆的轴向运动速度  $v = pn\omega/60 = 1.5 \times 3\,000/60 = 75$  mm/s ( $p = 1.5$  为螺杆螺距)

$$\text{故 } n = 60(x_2 + R)v/\pi R f_2 = 60 \times 75 \times 75/(\pi \times 70 \times 150) = 10.23 \text{ r/min}$$

## 2 误差分析

### 2.1 系统误差

#### 2.1.1 光学系统的像差

本系统所使用的物镜是普通大口径物镜,对球差有较好的修正,而投影物镜口径不大,对像质要求较高,除了要对球差、色差、慧差、像散以及场曲进行校正外,还要特别对畸变进行校正,因为它直接影响检测精度。

初级畸变公式为:  $T_{ay} = -EY_0^3$

式中:  $T_{ay}$  —— 重轴像差的子午分量

$E$  —— 畸变系数

$Y_0$  —— 理想像高

可见初级畸变与像高的 3 次方成正比,视场小时畸变也小.由于所用的视场较小,物镜畸变所产生的系统误差小于 0.02 mm. 即  $|\Delta_0| = 0.02$  mm.

#### 2.1.2 物镜扫描光学补偿带来的误差

反射镜扫描过程中,像点的移动轨迹为一圆弧,而作为接受面的 CCD 光敏面为一平面,故而造成离焦,见图4。

图中  $\Delta X = CD$  为最大离焦量,  $2Y$  为 CCD 可用的敏感面尺寸,  $R$  为扫描半径, CCD 光敏面在位置 ①

$$X = \sqrt{R^2 - Y^2} = \sqrt{70^2 - \left(\frac{4.096}{2}\right)^2} = 69.97 \text{ mm,}$$

$$\Delta X = R - X = 0.03 \text{ mm}$$

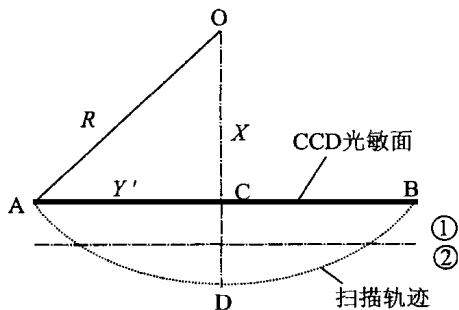


图4 转镜扫描光学补偿误差示意图

$$|\Delta_1| = \frac{s}{\beta} = \frac{0.0138}{0.5} = 0.0276 \text{ mm.}$$

### 2.1.3 CCD 制造误差

当像素为0.01 mm 时,其制造误差为:

$$|\Delta_2| = \frac{0.01 \times 0.1}{\beta} = \frac{0.001}{0.5} = 0.002 \text{ mm.}$$

### 2.1.4 定标误差

所用定标仪器为万能工具显微镜,显示误差为0.003 mm,即  $\Delta_3 = 0.003 \text{ mm}$ ,

故系统经过修正后的残余误差为:

$$|\Delta| = \sqrt{\Delta_0^2 + \Delta_1^2 + \Delta_2^2 + \Delta_3^2} = \sqrt{0.02^2 + 0.0276^2 + 0.002^2 + 0.003^2} = 0.0343 \text{ mm.}$$

## 2.2 随机误差

### 2.2.1 热轧钢轴向晃动时的成像弥散

被测件的轴向晃动,在 CCD 成像面上将形成以主光线为中心的弥散斑<sup>[5]</sup>,造成测量误差。见图5。

当轧件晃动量为  $\Delta x$  时,像面移动量为  $\Delta x'$ ,则

$$xx = ff = f^2 \quad (1)$$

$$(x - \Delta x)(x + \Delta x) = ff = f^2 \quad (2)$$

$$\text{由(1)得: } x = f^2/x \quad (3)$$

$$\text{由(2)得: } x + \Delta x = f^2/(x - \Delta x)$$

$$\text{将上式代入(3)得: } \Delta x = \frac{f^2}{(x - \Delta x)} - \frac{f^2}{x}$$

设孔径光阑的直径为  $d$ ,则在 CCD 成像面上弥散圆直径为  $d'$ ,

$$d' = \Delta x d / (x + \Delta x) = \Delta x d / x$$

可见,弥散圆大小与光阑尺寸有关,动态检测时轧件晃动量由导向机构限制,本系统中孔径光阑  $d = 0.8 \text{ mm}$ ,当工件沿轴向晃动量为10 mm 时,弥散斑的最大尺寸为

$$d' = 0.027 \text{ mm}$$

若把 CCD 光敏面置于位置 ②,则最大离焦量可缩小一半。即  $\Delta X = \Delta X / 2 = 0.015 \text{ mm}$ ,这么小的离焦量,不影响系统的成像清晰度。

又转镜的补偿精度与扫描速度有关,如转镜的速度存在 1% 的误差,则在 CCD 光积分时间(约为 18.4 ms)内,可造成影像移动距离约为:

$$s = \Delta vt = \pi \times 10.23 \times 1\% \times 70 \times 18.4 \times 10^{-3} / 30 = 0.0138 \text{ mm.}$$

考虑到系统放大率为  $\beta = 0.5$ ,故转镜扫描误差为:

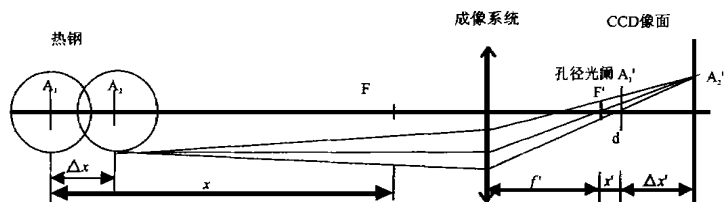


图5 工件轴晃动引起的测量误差

为 设  $r$  为弥散斑的半径, 考虑图象的上下两边缘及系统放大率, 则弥散斑引起的测量误差

$$|\Delta_4| = \frac{r}{\beta} = \frac{0.027}{2} \times \frac{2}{0.5} = 0.0382 \text{ mm.}$$

### 2.2.2 采样误差

采样误差与 CCD 的分辨率边缘算法以及放大倍数有关, 大小为

$$|\Delta_5| = \frac{0.001}{2} = 0.0028 \text{ mm.}$$

故总偶然误差为:  $|\Delta| = \sqrt{\Delta_4^2 + \Delta_5^2} = \sqrt{0.0382^2 + 0.0028^2} = 0.0383 \text{ mm.}$

### 2.3 误差合成

因为各项系统误差均为未定系统误差, 可以按随机误差处理, 故系统总的测量误差为:

$$|\Delta| = \sqrt{\Delta^2 + \Delta^2} = \sqrt{0.034^2 + 0.038^2} = 0.052 \text{ mm.}$$

## 参考文献:

- [1] 王庆有, 孙学珠. CCD 应用技术[M]. 天津: 天津大学出版社, 1993.
- [2] 刘晓昌. 线性 CCD 高精密检测技术[J]. 仪表技术与传感器, 1993, 3: 14
- [3] 乔亚天. 光学补偿高速摄影[M]. 北京: 科学出版社, 1984.
- [4] 许家隆. 转镜式高速摄影[M]. 北京: 科学出版社, 1985.
- [5] 吴晓波. 高精度图象测量系统[J]. 光学精密工程, 1994, 1: 28~33

## Design of Visual Measuring System with CCD

SHEN Ai-hong

(Department of Mechanical Engineering, Wuxi University of Light Industry, Jiangsu Wuxi 214036)

**Abstract:** The scheme of the measurement system of CCD is presented in this paper. A new optical is proposed, which uses background illumination, parallel light to project on the workpiece, high speed rotating mirror as an optical compensation, and a CCD camera as a photo-electronic receiver. Thus the bad effect of the sway and the vibration of the workpiece on the measurement is eliminated. Mean while the indistinction of the image is compensated successfully. The clear contour of the workpiece is grabbed.

The factors that have impact on the accuracy of the system are also discussed.

**Key words:** on line inspection; high speed rotating mirror; optical compensation; CCD camera.