

## 基于 TDI 成像技术的镀锡带钢表面质量在线检测系统研发

彭铁根, 何永辉, 李兵虎, 杨水山, 宗德祥

(宝山钢铁股份有限公司, 上海 201900)

**摘要:** 针对高速、高分辨率带钢表面质量在线检测, 研究开发了以 TDI 成像技术为基础的视觉检测系统。系统采用高速 TDI CCD 器件, 配合照度自适应 LED 光源成像, 将采集得到的带钢图像经光纤送至图像分送器, 各处理单元并行接收图像分送器的数据并进行实时处理, 完成带钢表面质量检测。现场应用表明, 基于 TDI 成像技术的镀锡带钢表面质量在线检测系统可有效实现镀锡带钢表面缺陷检测。

**关键词:** TDI CCD; 照度自适应; 缺陷检测; 镀锡带钢

**中图分类号:** TP391.4    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1007-2276(2014)01-0294-06

## Research and development of tin steel strip surface online inspection system based on TDI imaging technology

Peng Tiegeng, He Yonghui, Li Binghu, Yang Shuishan, Zong Dexiang

(Baoshan Iron & Steel Co., Ltd. Shanghai 201900, China)

**Abstract:** For high-speed, high-resolution images of steel strip surface online inspection, a machine vision system based on TDI (Time Delayed Integration) imaging technology was researched and developed. TDI CCD sensor was used and cooperated with adaptive illumination LED light in this system. The acquired images of steel strip were sent to the image splitter through the fiber and then real-time processed by the Image Processing Units (IPU). Surface defects on tin strip were detected in this system. Application and results show effectiveness for tin strip surface defect inspection of the system (SIS) based on TDI (Time Delayed Integration) imaging technology.

**Key words:** TDI CCD; adaptive illumination; defect inspection; tin strip

收稿日期: 2013-05-05; 修订日期: 2013-06-03

基金项目: 宝山钢铁股份有限公司科研项目

作者简介: 彭铁根(1977-), 男, 高级工程师, 博士, 主要从事带钢表面质量检测技术的研究。Email: pengtiegen@baosteel.com

## 0 引言

在金属带材中,镀锡板因镀锡层无毒,且具有良好的焊接和延展性,被广泛应用于电子、食品、汽车等工业领域。随着人们物质生活水平的提高,对这类应用于日常生活的产品要求也越来越高。同样,对作为制造这些生活用品原材料的镀锡带钢也提出了更高的质量要求。在带钢的质量检测领域,国内外研究者在光学、漏磁、超声等无损检测技术方面进行了不懈的努力并不断开发出了新的检测设备<sup>[1-3]</sup>。在带钢在线质量检测方面,目前主要应用方式有光学和漏磁两种检测方式。光学检测方式主要有激光扫描和视觉成像两种技术,近年来由于视觉成像技术的不断进步及成像器件成本的降低,这种技术已在带钢质量检测领域得到大量的应用。

宝钢 1420 镀锡机组是镀锡板生成的最后一道工序,也是最重要的表面质量控制工序。前道工序,本道工序的缺陷均要在本机组进行检测,缺陷种类多,情况复杂,机组设计速度达 480 m/min,传统检测方式检测难度大,特别是缺陷尺寸微小,表面光亮,缺陷对比度低,人眼很难检出。1997 年,宝钢从日本引进两套激光扫描式带钢表面缺陷在线检测系统分别用于 1420 的两条镀锡生产线<sup>[4]</sup>,该激光表面检测系统可检测的最小缺陷尺寸为 0.5 mm(横向)\*5 mm(纵向),系统只能根据光电倍增管的电压或电流信号反应缺陷的大小,且不能对缺陷类别进行准确判断。目前,该设备因年久老化且缺乏维护等原因已停止使用。

通过对镀锡带钢缺陷样本的试验和分析,确定系统需要检出缺陷的分辨率需达到 0.16 mm\*0.16 mm 以上,这对现场相机的扫描行/帧频提出了很高的要求。试验表明,针对镀锡带钢在最高机组速度情况下的表面缺陷检测,需要 50 kHz 以上的扫描行频,普通线、面阵相机无法满足成像要求。另外,在高的扫描行频下使用普通线阵相机时,因曝光时间短,需要很高的光源照度才能满足成像要求;面阵相机虽然对光源的照度要求较低,但在高速高分辨率情况下使用时,相机帧频难以满足要求。

TDI(Time Delayed Integration,时间延迟积分)成像是近年来发展起来的一种新技术,在不需要过高的光源照度情况下,相机 CCD 芯片利用时间延迟积

分技术对同一目标点进行多次曝光,从而使获得的图像信号具有很高的灵敏度和信噪比,成像速度也比普通线、面阵相机高很多。正是这一优势,使得 TDI CCD 相机广泛应用于航天遥感遥测等领域,国内外学者已对这种成像技术进行了全面的研究<sup>[5-7]</sup>。

针对镀锡带钢表面质量检测,新研发系统采用了最新的 TDI 成像技术,并采用照度自适应光源克服不同镀锡量的镀锡表面对成像造成的影响,在机组最高设计速度下有效检测最小缺陷的尺寸为 0.16 mm\*0.16 mm,可通过分类器自动识别缺陷类别并提供清晰的缺陷图像。与原有激光表面检测系统相比,新系统在使用性能、维护和操作便捷方面都得到了极大的提高。

## 1 系统原理及架构

### 1.1 TDI 成像技术

以四级 TDI CCD 相机为例,TDI 相机的基本成像原理如图 1 所示。假设运动对象表面的文字“AAAAAAA”为每级 TDI CCD 像元的感光对象,最后输出的一行图像是前面四次曝光对象的叠加。当图像行转移时间与被检对象运动速度严格匹配时,四次叠加在一起的图像为清晰成像图像,否则图像将产生模糊。

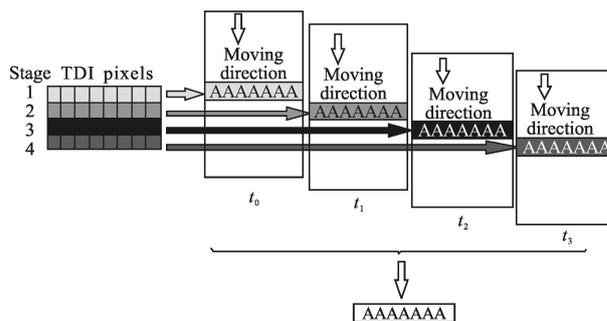


图 1 TDI 成像过程示意图

Fig.1 TDI imaging process

要保证 TDI 相机清晰成像,必须实现图像行转移时间与被检对象运动速度之间的匹配,试验表明该误差一般需控制在 2%~4% 之内。

### 1.2 系统架构

根据镀锡机组带钢表面缺陷的检测要求,系统采用 TDI CCD 相机成像,上下表面各使用两台 4k 像素相机。现场图像信号经相机 CameraLink 接口转光纤之后,送至电气室的图像分送器内,图像分送器

再将图像信号送至各处理单元,图像处理单元实时完成带钢图像数据处理,实现带钢缺陷的检出和分类,并通过网络接口上传缺陷数据(包括缺陷类别、

位置、大小等信息)至服务器。

镀锡带钢表面质量在线检测系统的架构如图 2 所示。

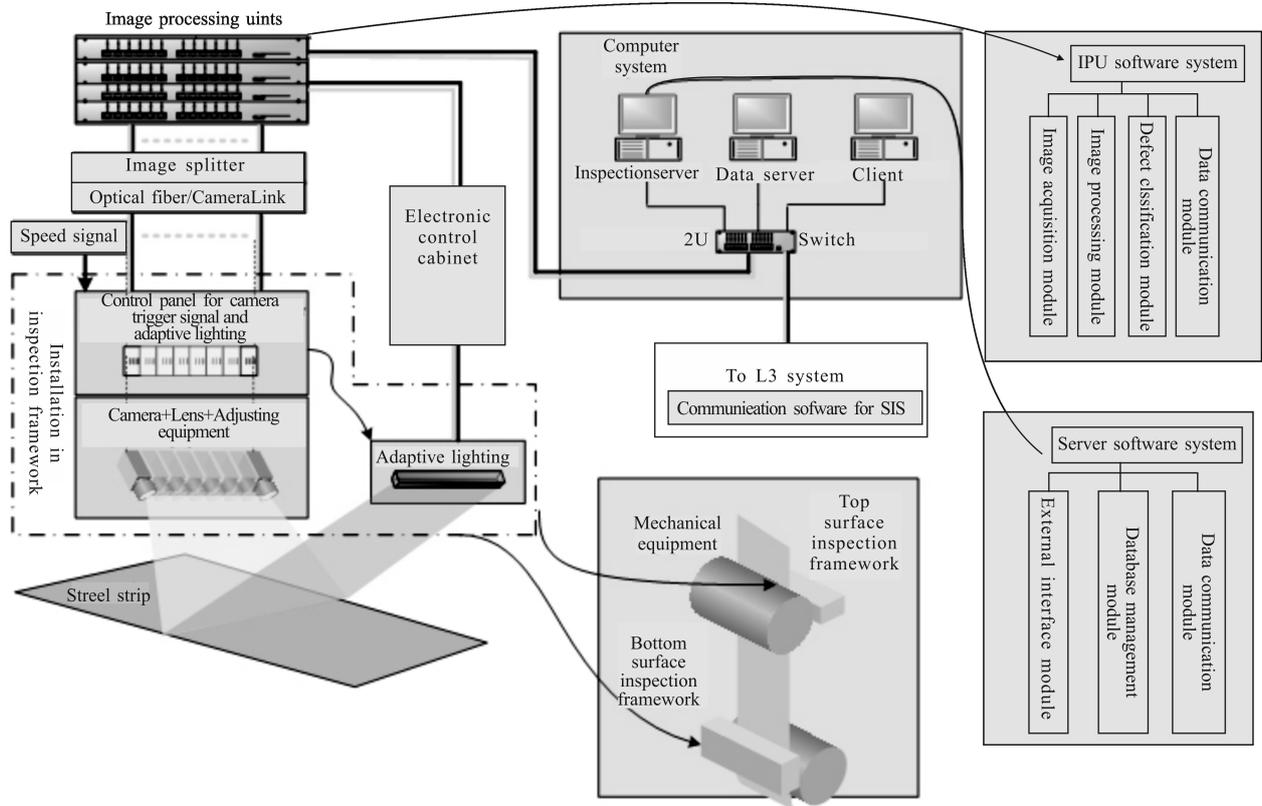


图 2 镀锡带钢表面质量在线检测系统架构

Fig.2 Framework of tin steel strip surface online inspection system

在镀锡带钢表面检测系统中,检测现场每台 TDI CCD 相机的数据经 CameraLink 接口转光纤之后送至电气室的图像分送器,图像分送器将图像数据复制多份并行输出给图像处理单元,各图像处理单元在图像宽度方向上进行图像数据切分,各取一部分图像数据进行处理。

### 1.3 照度自适应光源设计及控制

TDI CCD 相机为了满足快速成像的技术要求,在设计时最大限度地实现最长时间的曝光,并最大限度地利用两次曝光触发信号之间的时间间隔,因此其曝光时间设计为不可调。对于匀速运动对象及在光源照度不变的情况,TDI CCD 相机可以很好地满足应用要求。在镀锡带钢检测系统中,因机组有加速、减速运动,当光源照度保持不变时,与带钢运动速度相关联的曝光时间是不确定的,当速度变化较大时得到的带钢图像将会出现较大的明暗区别,从

而影响检测系统的性能。具体来说,当带钢运动速度高时,因累积曝光时间短,图像平均灰度值低;带钢运动速度低时,累积曝光时间长,图像平均灰度值高。

为了克服 TDI CCD 相机在带钢速度变化时图像灰度不均的现象,研发了一种自适应照度 LED 光源,即根据带钢运动速度实时调整光源照度。当带钢运动速度高时,因 TDI CCD 曝光时间短,适当调高光源照度;当带钢运动速度低时,TDI CCD 曝光时间长,为保证获得灰度一致的图像,则适当调低光源照度。该 LED 光源通过恒流源进行控制,恒流源输出给 LED 光源的电流  $I(t)$  满足如下关系:

$$I(t)=kv(t) \quad (1)$$

式中: $k$  为调整系数; $v(t)$  为带钢运动速度。

相机输出图像的灰度直接受相机曝光量的影响,而曝光量又取决于 CCD 传感器获得的光照度及持续曝光的时间。根据曝光公式  $E(\text{曝光量})=I(\text{照度})\times$

$T$ (曝光时间),要保持曝光量为恒定值,则有:

$$E = \int_0^t I(t) dt = C (\text{常量}) \quad (2)$$

当运动速度与光源照度之间存在正比关系,即  $I(t) = kv(t)$  时,下面分析 CCD 传感器获得的曝光量。

对于非匀速运动被测对象及  $N$  级 TDI CCD 相机,在从第一级到第  $N$  级曝光输出一行图像时,可以近似认为该过程速度保持不变,即  $v(t_1) = v(t_2) = \dots = v(t_N)$ ,则该过程光源照度也保持不变,有  $I(t_1) = I(t_2) = \dots = I(t_N)$ 。设累积曝光过程被测对象运动的距离为  $S$ ,则曝光时间为:

$$t_N - t_1 = \frac{S}{v(t_1)} \quad (3)$$

CCD 获得的曝光量为:

$$E = I(t_1) \times (t_N - t_1) = kv(t_1) \times \frac{S}{v(t_1)} = kS \quad (4)$$

设下一累积曝光过程速度发生变化,速度值为  $v(t_{N+1}) = v(t_N) + \Delta v(t_N)$ ,则光源照度为:

$$I(t_{N+1}) = kv(t_{N+1}) = k[v(t_N) + \Delta v(t_N)] \quad (5)$$

设累积曝光时间为  $T$ ,因被测对象在累积曝光过程中运动的距离与上一曝光过程相同,则累积曝光时间为  $T = \frac{S}{v(t_N) + \Delta v(t_N)}$ ,累积曝光量为:

$$E = I(t_{N+1}) \times T = k[v(t_N) + \Delta v(t_N)] \times \frac{S}{v(t_N) + \Delta v(t_N)} = kS \quad (6)$$

以上说明,当光源照度与被测对象运动速度按线性关系进行调整时,可使 CCD 传感器获得一致的曝光量,从而得到灰度均匀的图像。

另外,因镀锡带钢材料和镀锡量不同,每种板面对光源的反射系数不一,在进行 LED 光源照度控制时,需使用不同的调整系数  $k$ ,调整系数  $k$  值由现场测试确定。根据带钢材质和镀锡量的不同,一共确定了 26 种情况下的光源调整系数。

针对高亮表面反射情况,在光源本体前加装了带有散射作用的扩散膜,有效地解决了高亮表面对成像的影响。

照度自适应光源的控制过程如下:机组速度信号分两路分别送至光源照度控制器和相机触发频率控制器,配合 TDI 相机完成检测对象的成像。送至相机触发频率控制器的脉冲信号经转换后接相机信号触发端,以保证 TDI 相机能够清晰成像。送至光源照度控制器的脉冲频率先按线性关系转换输出控制电

压,光源照度控制器该电压值控制恒流源的输出电流,从而自适应调整光源照度,以保证 TDI 相机输出灰度一致的图像。

用于照度自适应光源控制的频率/电压转换关系如图 3 所示。

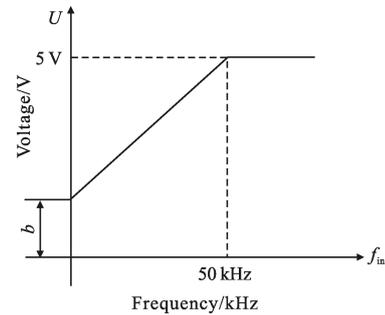


图 3 频率电压转换曲线

Fig.3 Relationship between frequency and voltage

光源照度控制器中的转换器电路实现了输入脉冲频率对输出电压的控制。为保证低频输入和高频输入时转换电压在设定范围内,控制关系设计为:

$$U = mf_{in} + b \quad (7)$$

式中: $U$ 为输出电压,用于控制恒流源; $m$ 为比例系数; $f_{in}$ 为输入频率; $b$ 为偏置电压。相关参数可根据实际使用情况自行确定。在镀锡表面检测系统的光源照度控制器中, $f_{in}$ 的范围为 0~50 kHz,输出电压  $U$  的最大值为 5.0 V,偏置电压  $b$  的范围为 0~5 V,比例系数  $m$  根据  $b$  值进行调整。

## 2 软件设计

因镀锡带钢需要检测的缺陷小,机组速度高,板面类型和材料复杂,在软件设计时采用了多种技术实现镀锡带钢表面缺陷的检测和分类。

### 2.1 多核并行处理技术

为了适应高速、高分辨率检测要求,在对图像数据进行分流的同时,软件设计中启用了多核并行运算技术。在镀锡表面检测系统中,利用 OpenMP 并行库在多核平台上实现图像的并行处理。OpenMP 编程时,充分利用了共享存储体系结构的特点,避免了消息传递的开销<sup>[8]</sup>。

在镀锡带钢表面检测系统中,利用 OpenMP 并行库进行开发时,采用多张图像数据并行处理。多张图像并行处理算法中,图像存储缓冲区内的图像顺序分配给各个核进行处理,每个核单独处理一张图

像,并行图像的最大处理时间为最后完成单张图像处理的一个核的处理时间决定。多张图像并行处理效率更高,更适合在带钢表面图像处理中使用。在镀锡表面检测系统中,使用多张图像并行处理算法流程,图像处理单元采用四核 CPU,每次并行处理四张图像。

对于镀锡带钢表面图像处理,由相机及采集卡得到的图像数据放入存储缓冲区队列中,每次取出四张图像分别送四核 CPU 进行处理,四张图像全部处理完成后,再从缓冲队列中取出后四张图像送多核 CPU,依次进行。

### 2.2 出口子卷质量信息查询

另外,软件设计时充分考虑了现场需求,系统离线软件界面可查询显示出口钢卷号(即子卷号),系统根据 L2 发送的钢卷长度及接收到的剪切信号,自动生成出口钢卷号,并写入数据库。离线查看钢卷时,自动显示出口钢卷号。如图 4 离线界面所示,母卷号以 00 结尾,切分后的子卷号结尾分别为 00,10,20,以此类推。

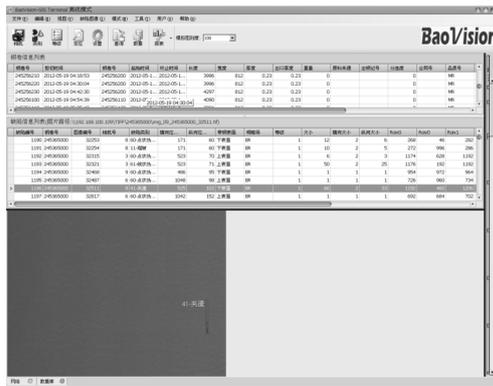


图 4 检测系统离线界面

Fig.4 Offline interface of the surface inspection system

### 2.3 动态调节光源亮度

镀锡线不同的材料组、不同的镀锡厚度,成像后图像亮度差异很大。经过深入研究,将材料分为若干组,并测试每组材料对应的光源亮度,使得不同材料图像的平均灰度稳定在设定值。系统运行时,根据 L2 发送的材料信息,自动判断并调节光源系数。

### 2.4 打印线去除

镀锡板上有时会有不同类型的打印线,打印线类型(单线、双线、边部、全版)根据客户要求定制。软件设计时根据打印线的打印规则,结合 L2 发送的打

印线标记,自动判断打印线类型,并在系统中自动去除打印线。

### 2.5 不同分类器组合

一般来讲,系统划分材料组是为了更好地进行缺陷检测,材料组并无必要采用不同的分类器。但镀锡生产线材料组复杂,各材料组表面状况差异很大,各材料组关注的缺陷也不同,系统软件设计时将产线材料组划分为 3 类(普板、K 板和 DI 材),各材料组都有自己特殊的缺陷类别。各材料组除了检测参数设置不同外,还应用了不同的分类器。

## 3 现场应用

TDI CCD 相机在宝钢 1420 镀锡表面检测系统中的应用,是国内第一次将 TDI CCD 相机用于钢铁工业产品检测而进行的尝试,从现场的应用情况来看,系统有效地克服了被测对象非匀速运动情况下 TDI CCD 相机成像技术、现场高亮表面对成像的影响及 200MB/s 以上图像数据的实时处理技术难题。

检测系统检出的典型缺陷图像如图 5 所示。

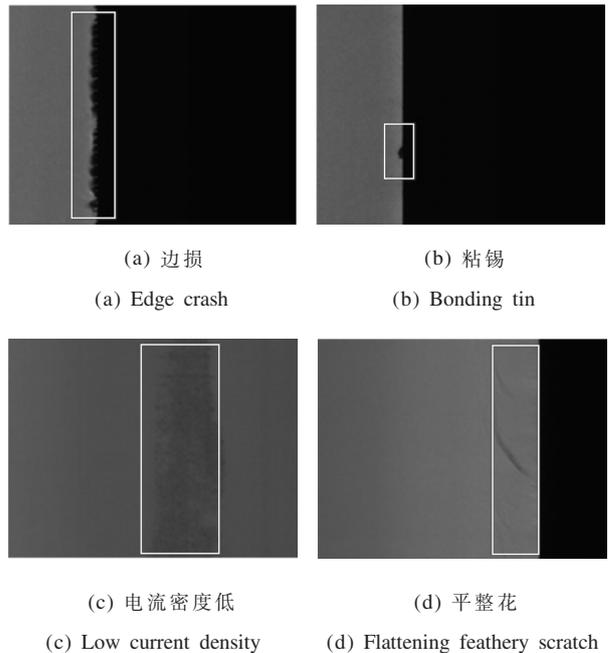


图 5 典型缺陷

Fig.5 Typical defects

在线界面检测界面如图 6 所示。在线界面中,缺陷信息以入口母卷号的形式进行显示,用户可实时跟踪检出的缺陷并对质量信息进行查询、统计和分析。另外,软件系统还增加了诊断功能,可实现相机、

光源及终端的在线监视,及时发现系统存在的故障并给出报警。

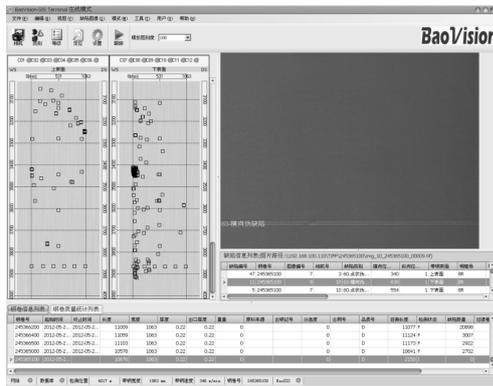


图 6 检测系统在线界面

Fig.6 Online interface of the surface inspection system

## 4 结论

现场应用情况表明,基于 TDI 成像技术的镀锡带钢表面质量在线检测系统可以有效检测镀锡带钢的各类缺陷,缺陷检出率 96.6%,平均分类识别率 83.3%。与其它带钢表面质量在线检测系统相比,该系统具有的主要特点有:

(1) 系统采用特制光源克服高亮表面的反射影响,并可根据不同材质、镀锡量及带钢速度自适应进行光源照度调节。

(2) 照度自适应光源根据被测对象情况配合 TDI CCD 相机成像,可得到清晰且灰度均匀的带钢表面图像。

(3) 在图像数据处理方面,硬件和软件分别采用了图像分送器分送技术和多核 CPU 并行处理技术,实现了每秒 200 MB 以上图像数据的实时处理。

(4) 在软件方面,带钢质量数据可根据出口剪切情况以机组出口分卷号的情况进行查询、统计和分析。

系统在现场试运行一年多以来,有效实现了镀锡带钢的在线质量检测,为现场镀锡带钢的质量提升和工艺改进起到了重要作用。

## 参考文献:

[1] He Yonghui, Miao Runtao, Chen Yun, et al. Development and application of the on-line surface inspection system for

hot-rolled strips based on LED light source [J]. *Baosteel Technology*, 2011, 3: 1-5. (in Chinese)

何永辉,苗润涛,陈云,等.基于 LED 光源的热轧带钢表面质量在线检测系统的开发与应用[J].*宝钢技术*, 2011, 3: 1-5.

[2] Ai Yonghao, Xu Ke. Development and prospect of on-line surface inspection of steel plates [J]. *Metal World*, 2010, 43 (5): 37-39. (in Chinese)

艾永好,徐科.钢板表面在线检测技术的发展和展望[J].*金属世界*, 2010, 43(5): 37-39.

[3] Xu Ke, Xu Jinwu, Liang Zhiguo, et al. Online application research on automatic surface quality inspection system for cold rolled strips [J]. *Metallurgical Industry Automation*, 2003, 74(1): 51-53. (in Chinese)

徐科,徐金梧,梁治国,等.冷轧带钢表面质量自动检测系统的在线应用研究[J].*冶金自动化*, 2003, 74(1): 51-53.

[4] Gong Xuenan. Surface quality inspection and control technology for Baosteel 1420mm tin plate[C]//Proceedings of the Thin Plate Quality Seminar of the Chinese Society for Metals, 2000: 19-29. (in Chinese)

贡雪南.宝钢 1420 镀锡板表面质量检测与控制技术[C]//中国金属学会薄钢板质量研讨会, 2000: 19-29.

[5] Sajana M R, Taya C J, Shanga H M, et al. Improved spatial phase detection for profilometry using a TDI imager [J]. *Optics Communications*, 1998, 150(1-6): 66-70.

[6] Wang Dejiang, Zhang Tao. Effects of gyro de-noising algorithm on aerial camera motion compensation system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(5): 976-971, 978. (in Chinese)

王德江,张涛.陀螺去噪算法对航空相机像移补偿系统的影响[J].*红外与激光工程*, 2010, 39(5): 976-971, 978.

[7] Li Weixiong, Xu Shuyan, Yan Dejie. Influencing parameters of estimate errors of space camera's drift angle [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(8): 1530-1536. (in Chinese)

李伟雄,徐抒岩,闫得杰.影响空间相机偏流角估值误差的参数[J].*红外与激光工程*, 2011, 40(8): 1530-1536.

[8] Liu Xin, Yang Shaochen, Wen Junhao, et al. Multi-core parallel spatial image enhancement algorithms [J]. *Microcomputer Information*, 2011, 27(4): 182-184. (in Chinese)

刘昕,杨少晨,文俊浩,等.多核并行空间域图像增强算法[J].*微计算机信息*, 2011, 27(4): 182-184.