

文章编号 :1000-582X(2007)11-0027-05

高温连铸坯表面缺陷的机器视觉无损检测

欧阳奇¹, 张兴兰², 陈登福¹, 张 涛¹, 肖建平¹

(1. 重庆大学 材料科学与工程学院, 重庆 400030 2. 重庆工学院 计算机科学与工程学院, 重庆 400050)

摘 要 :针对高温连铸坯表面缺陷无法在线检测问题,采用机器视觉技术和相应的试验装置,建立了高温背景下 CCD 快门控制时间成像模型,同时设计分类器算法对缺陷种类进行归类。系统所选 CCD 成像装备采用水冷风冷双层冷却方式,在高温状态下能长时间连续工作。系统可检测最大铸坯宽度为 3 000 mm,能有效抑制铸坯表面振痕产生的图像噪声影响,实现热态铸坯表面缺陷在线检测与分类。

关键词 :连铸坯;机器视觉;无损检测;表面缺陷

中图分类号 :TG335. 12

文献标志码 :A

连铸坯热送-直轧(CC-DR)是综合了炼钢、连铸和轧钢等方面的最新技术而迅速发展起来的一项冶金工业技术。它具有大量节能、提高成材率和缩短生产周期等许多优点。为了保证炼钢、连铸和轧钢能按照生产计划进行,保证整个生产流程的节奏均衡,在热态下及时发现铸坯的缺陷并及时清除,对于实现 CC-DR 具有重要的意义^[1]。20 世纪 90 年代后,基于线阵 CCD 器件的机器视觉技术成为表面缺陷在线检测的主流。芬兰 Rautaruukki New Technology 公司^[2]研制了 Smartvis 表面检测系统,应用机器学习方法设计了决策树分类器结构。美国 Cognex 公司于 1996 年先后研制成功了 iS-2000 自动检测系统^[3]和 iLearn 自学习分类器软件系统^[3]。1996 年上海宝钢与原航天部二院联合研制出冷轧连铸坯表面缺陷在线检测系统^[4]。德国 Parsytec 公司^[5]于 1997 年为韩国浦项制铁公司研制了 HTS-2 冷轧带钢表面检测系统。英国 European Electronic System 公司^[6]将研究的重点确定为提高系统的实用性和可靠性,以增强缺陷目标的检出能力和缺陷图像的显示质量,并完善系统对环境的有效控制能力,其热轧带钢表面检测系统已在欧美主要钢铁制造企业得到应用。但是,所有国内外表面缺陷检测系统大多针对低温状态下的热轧或冷轧带钢,对高温热状态的铸坯表面缺陷检测局限于传统的人工

抽检法、电涡流法、红外线检测法和漏磁检测法的研究^[7],这些检测方法对缺陷的敏感程度各不相同,漏检率较高,无法综合评价连铸坯表面质量,只能用在要求不太高的场合。有关机器视觉用于高温热状态的铸坯表面检测,则很少有文献报道。因此,开展基于机器视觉的高温热状态连铸坯表面缺陷研究,以提高表面缺陷检测自动化程度。

1 系统构成

整个系统由 CCD 成像装置、图像处理系统、冷却系统、检测控制台组成。CCD 成像装置安装在生产线上,由 3 台 Blaser 高速摄像机、3 通道 Mator 图像采集卡和 3 套摄像机冷却保护罩等设备组成。摄像机放置在垂直于连铸坯线的方向上,摄像机的数目由检测的精度和连铸坯的宽度决定。为了保护摄像头,避免恶劣环境的影响,检测装置安装在保护罩内进行水冷风冷保护,摄取的视频信号传送给计算机缺陷检测与识别系统。计算机系统与 3 台摄像机相连,负责图像处理、缺陷检测与缺陷分类等任务。计算机系统还有输入连铸坯运行速度的接口,以便系统根据运行速度来调整图像采集的速度,保证采集的表面图像不重叠。检测人员可以通过用户接口向计算机系统输入连铸坯信息。计算机系统可以根据连铸坯表面图像的状况向

收稿日期 2007-07-12

基金项目 国家自然科学基金资助项目(50674109),第三届重庆大学大学生创新基金资助项目(20060325)

作者简介 欧阳奇(1971-),男,重庆大学副教授,主要从事机器视觉及过程控制等方面的研究(Tel)023-65112108;

(E-mail)oyq617@sina.com。

摄像机发出快门控制信号,以控制摄像机快门时间,防止 CCD 输出信号饱和,以保证图像清晰度。系统结构如图 1 所示。

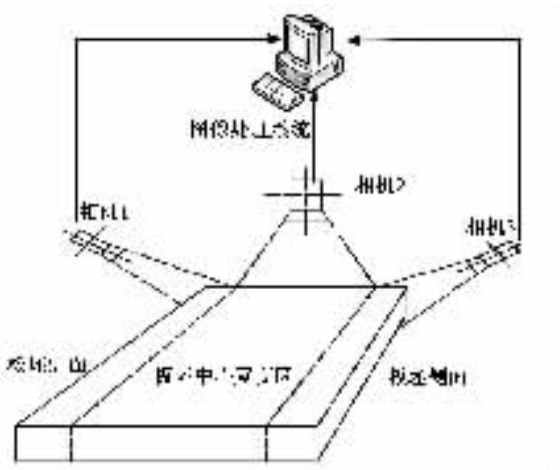


图 1 系统安装结构示意图

2 高温状态下 CCD 快门控制模型

机器视觉中的信息获取是首要的环节,图像质量的好坏将直接影响最终的识别效果。通常情况下红坯状态的取像是非常困难的,CCD 输出因易出现过饱和电流问题而缺陷图像“发白”,无法进行进一步的图像处理与缺陷识别。CCD 器件是积分型器件,输出电流信号既和 CCD 器件光敏面上的照度有关,也和两次取样的时间间隔,即快门时间有关,在非饱和工作范围内有^[8]

$$I_i = \mu E_i t = \mu Q_i, \quad (1)$$

式中 I_i 为第 i 个光敏面的输出电流; E_i 为第 i 个光敏面的照度; t 为快门时间; μ 为光电转换系数; Q_i 为第 i 个光敏面的曝光量。设 $\Psi(\lambda)$ 为 CCD 在 $\lambda = [\lambda_1, \lambda_2]$ 的光谱范围内某波长 λ 的响应函数,则摄像机第 i 个像素灰度值为

$$H_i = \frac{\pi}{4} K \mu A t \left(\frac{D}{f'}\right)^2 \frac{1}{(1-\alpha)^2} \cos^4 \theta \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\varepsilon(\lambda, T) c_1}{\lambda^5 e^{\frac{c_2}{\lambda T}}} \Psi(\lambda) d\lambda, \quad (2)$$

式中 K 为光学透过率; H_i 为辐射图像第 i 个像素灰度值; D 为出瞳直径; λ 为光学波长; f' 为焦距; $\frac{D}{f'}$ 为相对孔径,令 $m = \frac{D}{f'}$; A 为 CCD 电流信号转换为灰度值转换系数; α 为光学系统的纵向放大率; θ 为视场角; c_1 和 c_2 为常数; $c_1 = 3.742 \times 10^{-16} \text{ W} \cdot \text{m}^2$; $c_2 = 1.439 \times 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{K}$; $\varepsilon(\lambda, T)$ 为黑体系数; t 为快门控制时间。对于普通彩色单管 CCD 摄像机,在 $[\lambda_1, \lambda_2]$ 波长区间内三基色灰度积分表达式经拉格朗日(Lagrange)中值

处理后得

$$H_j = \frac{\pi}{4} K \mu A t m^2 \frac{1}{(1-\alpha)^2} \cos^4 \theta \frac{\varepsilon(\lambda_\eta, T) c_1}{\lambda_\eta^5 e^{\frac{c_2}{\lambda_\eta T}}} \Psi(\lambda_\eta), \quad (3)$$

式中 $H_j(j=r, g, b)$ 为辐射图像灰度值; r 为红色; g 为绿色; b 为蓝色; λ_η 为 $[\lambda_1, \lambda_2]$ 波长区间内某波长值; $\Psi(\lambda_\eta)$ 为 CCD 在波长 λ_η 的光谱响应函数。为了简化模型,只考虑主光轴附近的面元,不考虑光学系统的纵向放大率,即 $\alpha = 0, \theta = 0^\circ$, 则式(3)可简化为:

$$H_j = \frac{\pi}{4} K \mu A t m^2 \frac{\varepsilon(\lambda_\eta, T) c_1}{\lambda_\eta^5 e^{\frac{c_2}{\lambda_\eta T}}} \Psi(\lambda_\eta). \quad (4)$$

对于既定 CCD 器件,为了避免过饱和电流输出,光敏面上任何光敏单元上的曝光量 Q 均应低于上限饱和曝光量 Q_{sat} ,即要求光敏面上任何点的照度应满足:

$$E < \frac{Q_{\text{sat}}}{t}. \quad (5)$$

对于 24 位真彩色 CCD 相机,为了避免输出电流过饱和,则式(6)三基色灰度值满足:

$$H_j < 255. \quad (6)$$

联立式(4)(5)(6),可得控制 CCD 快门时间满足:

$$t < \frac{1.024 \lambda_\eta^5 e^{\frac{c_2}{\lambda_\eta T}}}{\pi A m^2 \varepsilon(\lambda_\eta, T)}. \quad (7)$$

若令 $t_{\text{max}} = \frac{1.024 \lambda_\eta^5 e^{\frac{c_2}{\lambda_\eta T}}}{\pi A m^2 \varepsilon(\lambda_\eta, T)}$ 表示三基色灰度值中等于 255 时的最大快门时间。则防止 CCD 过饱和电流输出,摄像机的快门时间应满足:

$$t \leq t_{\text{max}}. \quad (8)$$

同时,光敏面的照度不能太低,如果某些点的照度低于 CCD 器件的灵敏阈,这些较暗部便无法测出,从而降低图像的层次,产生测量误差。设摄像机噪声总量为 Q_N ,CCD 最小快门时间控制应满足:

$$H_j > 0. \quad (9)$$

设彩色 CCD 3 个滤色器映射到光敏面照度的最低照度为 E_{min} ,则满足式(11)的快门时间为:

$$t > \frac{Q_N}{KE_{\text{min}}}. \quad (10)$$

取 $t_{\text{min}} = \frac{Q_N}{KE_{\text{min}}}$ 表示防止低于临界暗电流输出的最小快门时间。则既防止摄像机过饱和电流输出又防止低于临界暗电流输出的摄像机快门时间 t_c 应满足:

$$t_{\text{min}} < t_c < t_{\text{max}}. \quad (11)$$

3 缺陷图像检测与识别软件

3.1 缺陷目标检测

对采集的表面图像进行灰度分析,如果一幅图像中存在至少一个异常点,则该图像中存在缺陷,这样既可以减少计算量又可以尽量避免漏检。图像异常点的判断取决于该像素灰度值与图像灰度均值的差和该像素梯度值与图像梯度均值的差。如果存在缺陷的话,那么就把缺陷区图像放入缓冲区,进行可疑点检测、图像兴趣区(ROI)搜索和 ROI 区合并^[9]。

对铸坯表面图像进行分析,搜索所有铸坯表面的缺陷区域,然后提取 ROI 区域的所有特征量,以充分反应铸坯表面图像的缺陷特征。

3.2 缺陷识别数学模型

缺陷识别算法的目的是把所给缺陷 ROI 特征数据集合分配到几个不同的类中,使在同一类中的数据比其它类中的数据更相似,最好的相似度对输入的各变量的范围是很敏感的,每个输入的变量对其单元间隔必须是格式化的。因此,假定所给的数据对每个单元(超立方体)已经格式化。

设 $x = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 是一个 p (这里 $p = 5$) 维特征空间的变量 $x_j = (x_j(1), x_j(2), \dots, x_j(p))$, 把所给定的数据归类到 c 个聚类中,并算出每聚类的中心 $V = \{m_1, m_2, \dots, m_c\}$, 使下面的目标函数最小。

$$I = \sum_{i=1}^c I_i = \sum_{i=1}^c \left(\sum_{x_j \in G_i} d_{ij}^2 \right) = \sum_{i=1}^c \sum_{j=1}^n u_{ij} d_{ij}^2, \quad (12)$$

式中: $\sum_{x_j \in G_i} d_{ij}^2$ 表示第 i 类的价值函数; G_i 表示输入第 i 类的数据; d_{ij} 表示第 i 个聚类中心与第 j 个数据点 x_j 的欧式距离。

$$d_{ij} = \|x_j - m_i\|^2. \quad (13)$$

u_{ij} 定义如下:

$$u_{ij} = \begin{cases} 1 & |x_j - m_j| \leq |x_j - m_k| \quad k \neq i \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (14)$$

当 $u_{ij} = 1$ 时表示数据 x_i 属于第 i 类, 当 $u_{ij} = 0$ 时表示数据 x_i 不属于第 i 类, 因此 u_{ij} 应满足下面 2 个条件:

$$\sum_{i=1}^c u_{ij} = 1, \forall j = 1, 2, \dots, n. \quad (15)$$

$$\sum_{i=1}^c \sum_{j=1}^n u_{ij} = n. \quad (16)$$

当 $u_{ij}, i = 1, 2, \dots, c; j = 1, 2, \dots, n$ 被确定, 这个聚类的中心 m_i , 即式(12)的最小值意味着该数据属于第 i 类, 并且被 m_i 描述:

$$m_i = \frac{1}{|G_i|} \sum_{x_j \in G_i} x_j. \quad (17)$$

这里 $|G_i|$ 表示属于第 i 类数据的数量。该算法的具体编程流程如下:

1) 初始化聚类中心 $m_i, i = 1, 2, \dots, c$, 从数据点中随机选取 c 个点来完成。

2) 通过式(14)确定 $u_{ij}, i = 1, 2, \dots, c; j = 1, 2, \dots, n$ 。

3) 计算符合式(12)的价值函数, 直到其收敛或改进到阈值以下。

4) 用式(17)修正聚类中心 m_i , 然后返回 2)。

3.3 缺陷图像聚类验证

根据某炼钢厂连铸坯表面缺陷图谱, 表面缺陷种类共计 30 余种, 但其中在最为常见表面缺陷为角部裂纹、横向裂纹、表面夹渣和凹坑重皮等。以 1/1 000 s 快门控制时间摄取铸坯表面图像, 对图像进行 3×3 平滑滤波, 以消除图像噪声。同时, 用 Edge 函数提取表面缺陷图像边缘, 对图像边缘 ROI 区的轮廓搜索(FindROI 函数)和勾勒(DrawROI 函数)采用基于概率的直线算法(Canny 函数), 对铸坯表面的所有缺陷区进行 ROI 标记和 ROI 搜索, 借助 Microsoft OpenCV 图像开发工具包进行软件开发, ROI 搜索软件流程如图 2 所示。

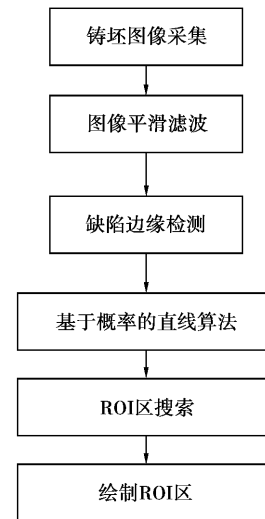


图 2 ROI 搜索流程图

例如, 针对如图 3 所示的连铸坯表面图像(含多种缺陷类型), 经过 ROI 搜索得到表面缺陷 ROI 区。如图 4 所示。

为了对不同缺陷 ROI 区进行缺陷识别, 需对 ROI 区图像进行图像数字化处理, 以分析不同 ROI 区的图像像素点灰度值。例如缩孔缺陷如图 5 所示。



图3 连铸坯表面缺陷图像

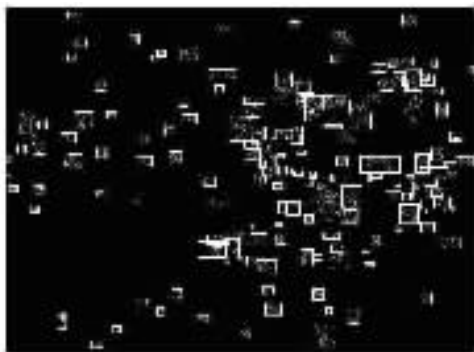


图4 表面缺陷图像的ROI区

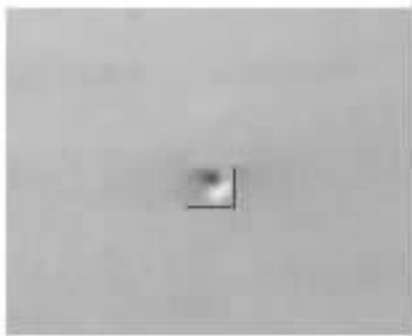


图5 缩孔缺陷ROI区

其几何尺寸约为 2.0 mm × 2.5 mm,方框为缺陷ROI区范围,ROI像素点范围为 7 × 12 像素点阵,ROI区像素点阵灰度点阵分布为:

165 162 147 139 132 129 135 138 166 191 173 179
 153 142 135 132 117 85 84 106 161 186 160 176
 153 147 151 146 128 98 80 91 150 182 183 191
 163 157 147 135 144 145 150 188 221 232 204 162
 164 157 157 154 185 205 222 237 243 239 192 161
 160 160 168 171 196 223 246 233 203 194 177 166
 165 166 170 173 178 191 215 185 167 185 165 162

为了建立一个识别不同类型对象的系统,首先确定缺陷对象的哪些属性,以便描述不同缺陷对象的特征。缺陷对象量化的属性就是缺陷的特征,每个特征的量化值组成了每个对象的特征向量。对铸坯表面图

像进行分析,搜索所有铸坯表面的缺陷区域,然后提取ROI区的所有特征量,在提取特征量时要考虑ROI区的所有特征,包括ROI区的几何特征 W_1 、分形特征 W_2 、灰度特征 W_3 、投影特征 W_4 、纹理特性 W_5 ,以充分反应缺陷的图像信息特征。对不同缺陷ROI区提取的特征向量,经数值处理后特征量如表1所示。

表1 不同缺陷ROI区的特征量

模式	缺陷类型	W_1	W_2	W_3	W_4	W_5
0	无缺陷	53.5	0.130	0.013 0	0.79	0.13
1	角部裂纹	51.1	0.130	0.006 0	0.79	0.20
2	气孔气泡	41.6	0.110	0.001 8	0.81	0.18
3	表面夹渣	55.9	0.130	0.003 3	0.75	0.24
4	角部裂纹	50.8	0.118	0.001 2	0.75	0.24
5	凹坑重皮	78.0	0.122	0.019 0	0.68	0.29
6	表面夹渣	54.9	0.115	0.004 0	0.76	0.23
7	表面夹渣	54.1	0.126	0.007 0	0.79	0.20
8	无缺陷	52.7	0.116	0.004 2	0.79	0.20
9	角部裂纹	51.4	0.131	0.004 5	0.75	0.24

运行聚类算法对表1特征值进行聚类,得到各缺陷特征向量样本聚类结果和聚类中心,如表2所示。

表2 聚类中心向量及缺陷分类

编号	缺陷类型	相近度	聚类中心
0	无缺陷	5.810 0	[53.100 ρ .123 ρ .008 6 ,
8		2.561 5	0.790 ρ .106 5]
2	气孔气泡	90.255 0	[41.600 ρ .110 , 0.001 80 ρ .810 ρ .180]
5	凹坑重皮	723.620 0	[78.000 ρ .122 ρ .019 0 , 0.680 ρ .290 0]
6	表面夹渣	14.440 0	[54.967 ρ .124 ρ .004 8 , 0.766 7 ρ .223]
7		9.001 4	
3		23.040 0	
4	角部裂纹	0.090 4	[51.100 ρ .126 ρ .003 9 , 0.763 ρ .226 7]
1		0.001 4	
9		0.090 4	

对于该分类器,输入未知缺陷图像,提取ROI区并分析ROI特征值,如表3所示。

表3 未知缺陷特征向量

编号	缺陷类型	W_1	W_2	W_3	W_4	W_5
No1	未知	49.5	0.287	0.003 7	0.96	0.35
No2	未知	80.5	0.345	0.003 5	0.78	0.43
No3	未知	34.7	0.458	0.006 5	0.79	0.53
No4	未知	32.6	0.234	0.004 5	0.67	0.47

对表3未知缺陷特征值进行聚类分析,并提取聚类中心,分析结果如表4所示。

表 4 新聚类分类中心向量及缺陷分类

编号	缺陷类型	相近度	聚类中心
0	无缺陷	16.2	[54.22 ρ . 12 ρ . 006 , 0.77 ρ . 177]
3		41.0	
6		29.3	
7		21.2	
8		10.3	
1	角部 裂纹	2.6	[51.10 ρ . 13 ρ . 003 9 , 0.76 ρ . 227]
4		1.8	
9		3.7	
2	气孔 气泡	62.5	[36.30 ρ . 270.004 3 , 0.76 ρ . 393]
No3		219.1	
No4		285.7	
5	凹坑 重皮	812.4	[79.25 ρ . 233 50.011 3 , 0.73 ρ . 36]
No2		961.0	
No1	新缺陷		[49.50 ρ . 287 ρ . 003 7 , 0.960 ρ . 35]

从表 4 可知,该聚类算法能有效地进行聚类分析,识别未知的缺陷类型。表面缺陷 ROI 的模式 No1 为新类型缺陷,通过新的缺陷聚类器进行识别, No2 为凹坑重皮缺陷, No3、No4 为气孔气泡缺陷类型。

4 结论与展望

1)面阵 CCD 摄像机传感器,在高温热铸坯表面成像时,为了克服 CCD 过饱和输出问题,设计了 CCD 快门控制模型,解决了高温热铸坯表面图像成像的过饱和问题。

2)采用了风冷水冷双层保护装置,能克服现场恶劣环境如水雾、粉尘、高温等因素造成的影响。

3)采用缺陷 ROI 区搜索和合并技术,缺陷检测采用实时处理,缺陷分类采用准实时处理。

Nondestructive Test of Surface Defect of Hot Slabs Based on Machine Vision at High Temperature State

OUYANG Qi¹, ZHANG Xing-lan², CHEN Deng-fu¹, ZHANG Tao¹, XIAO Jian-ping¹

(1. College of Materials Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, P. R. China;

2. College of Computer Science and Engineering, Chongqing Institute of Technology, Chongqing 400050, P. R. China)

Abstract: Aimed at the problem of online detection of continuous slabs surface defect at high temperature, The CCD shutter control model was established using machine vision technology and equipment at high temperature states. The default clustering algorithm was provided. The CCD imaging equipment with dual cool modes of water and air was selected to ensure continuous work at high temperature conditions. The slab width of 3 000 mm can be detected, and the system can effectively restrain the influence of noise signals brought by oscillation marks on the surface of slabs and realize monitoring and clustering of the slab surface default.

Key words: continuous casting slabs; machine vision; nondestructive test; surface detect

(编辑 李胜春)

4)系统能在高温状态下长时间连续工作,可检测铸坯的最大宽度为 3 000 mm,能有效抑制铸坯表面振痕产生的图像噪声影响,实现热态铸坯表面缺陷在线检测与分类。

今后研究工作的重点集中在多维特征量降维特征提取研究,并优化缺陷识别算法,同时将铸坯表面缺陷、内部缺陷检测的结果与推钢机控制基础自动化接口,实现缺陷铸坯的自动剔除,为实现连铸坯的热送-直轧生产工艺打下基础。

参考文献:

- [1] 贾慧明,范弘,张克,等. 1 100 °C 以上高温连铸坯表面缺陷的模拟在线无损检测[J]. 钢铁研究学报,1994,6(1): 12-15.
- [2] 韩英莉,颜云辉. 一种带钢表面缺陷识别与分类的研究——基于混合加权特征和 RBF 网络的方法[J]. 计算机工程与应用,2007,43(24): 207-222.
- [3] BADGER J C, ENRIGHT S T. Automated surface inspection system[J]. Iron and Steel Engineer, 1996, 73(3): 48-51.
- [4] CHRIS A C, THEODORE Y F, CHARLES F. Learn self-learning defect classifier[J]. Iron and Steel Engineer, 1998, 75(8): 50-53.
- [5] WANG XUE, XIE ZHI-JIANG. Research on automatic inspection system for defects on precise optical surface based on machine vision[J]. Journal of Chongqing University: English Edition, 2006, 5(2): 89-93.
- [6] DAVID G P, MARTIN P L, HANEGHEM A V. Practical application of on-line hot strip inspection system at hoogovens[J]. Iron and Steel Engineer, 1995, 72(7): 40-43.
- [7] BINDRA A. Speedier ADCs pickup more bits and samples[J]. Electronic Design, 1999, 47(2): 66-74.
- [8] 吴平川,路同浚,王炎. 机器视觉与钢板表面缺陷的无损检测[J]. 无损检测, 2000, 22(1): 12-15.
- [9] 徐科,徐金梧. 基于图像处理的冷轧带钢表面缺陷在线检测技术[J]. 钢铁, 2002, 37(12): 61-64.