

DOI: 10.13382/j.jemi.2017.04.001

# 带钢表面粗糙度在线检测技术最新进展

瞿雪元<sup>1</sup> 顾廷权<sup>2</sup> 方百友<sup>3</sup>

(1. 宝山钢铁股份有限公司规划与科技部 上海 2019001; 2. 宝山钢铁股份有限公司研究院 上海 2019001;  
3. 宝钢新日铁汽车板有限公司 上海 201900)

**摘要:**表面粗糙度作为冷轧带钢重要的一项表面质量指标,其在线检测方法研究已成为高品质汽车板带产品生产的关键技术之一。传统的带钢表面粗糙度检测手段触针法存在离线测试、损伤表面、响应速度慢等问题,使得基于光学作用机理的光切法、光干涉法、散斑法、散射法等在线实时检测技术得到关注并发展迅速。近年来,带钢表面粗糙度的在线检测技术在原理推导、模型构建、样机实验、分析校准等方面取得了长足的进展,但冷轧带钢平整作业的轧辊控制(如辊形、运行速度等)与表面粗糙度在线检测精度之间的矛盾仍然是实时测控的难点问题。从带钢表面粗糙度在线检测的实际需求出发,分析理论研究成果,比较相应检测设备的特点和适应性,提出有效解决实时检测难点问题的可行方案,并对国内外带钢表面粗糙度在线检测的理论与实践发展趋势进行展望。

**关键词:** 冷轧带钢;表面粗糙度;在线检测;理论发展;技术实践

**中图分类号:** TG333;TN06 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.8040

## Review of surface roughness online measurement techniques of steel strip

Qu Xueyuan<sup>1</sup> Gu Tingquan<sup>2</sup> Fang Baiyou<sup>3</sup>

(1. Strategy & Science Technology Department, Baoshan Iron & Steel Co. Ltd., Shanghai 201900, China;  
2. Research Institute, Baoshan Iron & Steel Co. Ltd., Shanghai 201900, China;  
3. Baosteel-NSC Automotive Steel Sheets Co. Ltd., Shanghai 201900, China)

**Abstract:** Surface roughness of cold-rolled steel strip is an important surface quality parameter, so the online measurement of surface roughness has become the key technology for high quality car plate and strip production. The traditional measurement of strip surface roughness uses off-line test method, which will do harm to the steel surface and slow down the response speed. To solve the problem, novel methods based on optical mechanism, such as light cutting method, optical interferometry, speckle method and scattering method, are proposed for the online real-time measurement. In recent years, the strip surface roughness online measurement has made considerable progress in theory, model building, experiment and analysis of calibrations, but the contradiction between the roll of temper rolling operation control (such as roller shape, running speed) and the precision of online detection is still a difficult task for real time measurement and control. In view of the actual demand of surface roughness online measurement, the research results in theory are analyzed and the characteristics and adaptability of the corresponding measurement equipment are compared in this paper. And we put forward the feasible schemes to effectively solve the problem of real-time measurement and give an outlook of the theory of strip surface roughness online measurement and its engineering practice development trend.

**Keywords:** cold-rolled strip steel; surface roughness; on-line measurement; theory development; engineering practice

### 1 带钢表面粗糙度检测方法概述

目前汽车销售增长热点在中国,国内各汽车板材公

司正在研制先进带钢轧制技术。建设世界领先的汽车板生产线,其目标已经不仅是满足国内市场的需求,更在于汽车板材制造流程所需的高性能、高品质、高收益冷轧带钢产品<sup>[1]</sup>。

在汽车冷轧带钢技术的不断改进和创新过程中,冷轧带钢表面粗糙度检测时要求不损坏被检表面,并且需要实时监测表面质量<sup>[2]</sup>。这样可以进一步节省能源和材料、减少成本、避免或降低零件的废品率、提高产品质量。目前国内外多数汽车板材公司的带钢表面粗糙度检测采用离线方式,现有的技术还未达到在线检测与闭环控制。离线测量方法一般采用触针法,利用金刚石触针刻画带钢表面轮廓,通过数据分析计算完成表面粗糙度参数的求取。触针法测量简单,但会破坏带钢表面且计算繁琐,效率较低,不能实现带钢表面粗糙度的实时监测与控制。

带钢表面粗糙度在线检测技术亟待改进。

近 10 年,带钢表面粗糙度在线测量方法发展快速,其中以光学测量方法最为普遍。光学测量方法具有不损伤带钢表面、数据处理效率高、可实现在线闭环控制的优点,克服了触针法存在的不足,能够很好地满足高性能冷轧板带产品要求<sup>[3-4]</sup>。实际应用较为成熟的方法主要有散斑法、光干涉法、光切法和散射法。基于光学原理,带钢表面粗糙度在线检测技术形成了多个不同种类的在线测量手段和设备,如图 1 所示,各类技术间的优缺点对比如下。

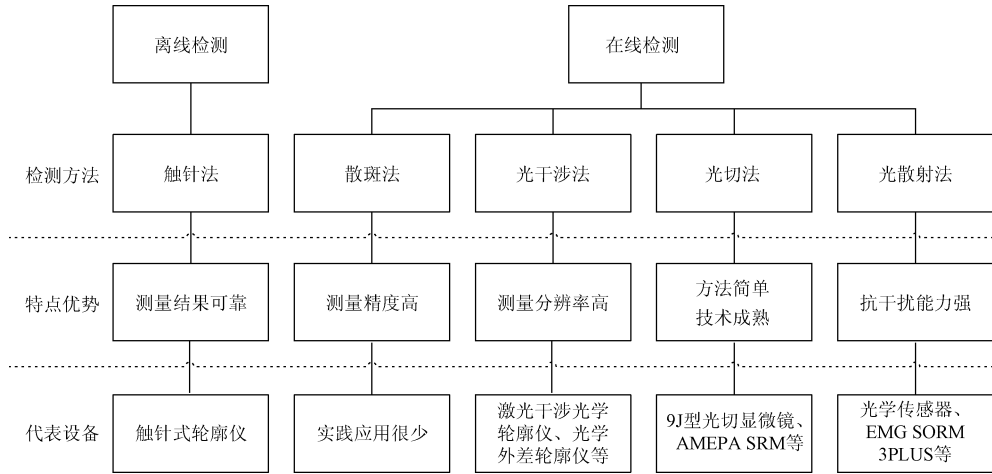


图 1 表面粗糙度主要测量方法

Fig. 1 Measurement methods of surface roughness

1) 散斑法测量精度高,抗干扰能力强,因此适用于表面粗糙度的在线测量,但是粗糙度测量对于非高斯分布的表面精确度不高。

2) 光干涉法测量分辨率高,适用于超光滑表面粗糙度的测量,但是测量精度对光波波长具有较强的敏感性,从而干扰到测量范围。

3) 光切法应用光切显微镜、CCD 相机、虚拟仪器和图像处理技术已较为成熟,测量精度较高,在汽车冷轧板带产品生产中已有应用。

4) 光学散射法相比其他在线测量方法虽然精度较低,但是其抗环境干扰能力强,适合实时检测,在粗糙度检测领域也有不少应用案例。

散斑参数,可迅速计算出被测表面的粗糙度情况,测量原理如图 2 所示。

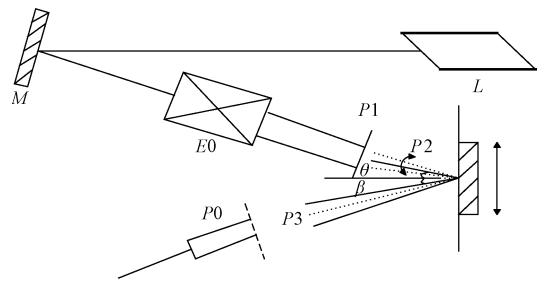


图 2 散斑法测量原理

Fig. 2 Measuring principle of speckle method

由激光发生器生成的激光束经反射和扩束系统获得平行光,平行光经光栏后,由聚光镜聚集到带钢表面上,经光电管得反射光斑。根据带钢表面粗糙度和散斑对比度之间的关系,经数据处理分析,可求取带钢表面粗糙度参数。

2) 理论发展与技术实践

散斑对比度法和散斑图样相关法是散斑在线测量技术的两个主要应用方向<sup>[5-6]</sup>。

## 2 带钢表面粗糙度在线检测方法的理论发展与技术实践

### 2.1 散斑法

1) 测量原理

散斑是强度分布为颗粒状的条纹,由相干的且带有相位差的二次球面子波相遇产生的。通过测量分析激光

散斑对比度法利用 CCD 相机捕获激光散斑图像,通过对其离散化处理,计算求得散斑对比度特征量,进而求取表面粗糙度参数。该方法适用于带钢表面粗糙度  $Ra$  低于  $0.25 \mu\text{m}$  的测量条件,具有测量宽度窄的缺陷,可以通过改变激光波长或激光入射角度来适当增加测量宽度。

散斑相关法通过记录不同条件下的带钢表面散斑图像,对比分析相关散斑图像间的干涉条纹相似度,计算带钢表面粗糙度参数。但该方法适用于  $Ra$  在  $0.6 \sim 13 \mu\text{m}$  间的测量条件。但震动和偏心会对该方法造成很大的影响,因此只有较少相关的在线测量案例。

Hirabayashi 等提出通过相关法测量表面峰值数目得出粗糙度的方法,可以在  $3 \text{ s}$  内计算出表面粗糙度参数<sup>[7]</sup>。通过分析研究表面随机起伏的概率分布和衍射散斑强度变化的平均对比度相关的特性, Jeyapooan 等人<sup>[8]</sup>设计基于均值的散斑对比度法,通过检测散斑图像对比度平均值,计算带钢表面粗糙度参数。王婧等人<sup>[9]</sup>提出不同角度条件下的散斑相关法,由不同入射角下的散斑图样干涉条纹相似度求取带钢表面粗糙度参数。刘晨等人<sup>[10]</sup>提出采用图像处理法解决散斑图像中粗糙度参数的精确度问题并由仿真验证了方法的可行性。郑伟花等人<sup>[11]</sup>和王志永等人<sup>[12]</sup>根据散斑图像的二阶统计特性,提出了采用计算机模拟产生夫琅禾费面散斑场的方法,计算带钢表面粗糙度参数。

散斑法理论研究和应用于带钢表面粗糙度检测的工程实践表明,该方法原理简单,计算迅速,对实际测量条件要求不高,对震动干扰并不敏感,尤其适合于有规则加工纹理的表面,可实现高精度测量。但散斑法仅可获得表面粗糙度特征参数,无法描述表面粗糙度轮廓曲线,在线测量难以直观展现形貌特征。

## 2.2 光干涉法

### 1) 测量原理

用一个平晶和被测工件成一定楔角,利用在等厚干涉条件下,会出现明暗相间的干涉条纹。由于干涉条纹弯曲度,计算带钢表面粗糙度参数。由条纹边缘的高频分量中能反映出表面粗糙度,假设条纹的间隔为  $e$ , 弯曲量为  $a$ , 光波波长为  $\lambda$ , 则对应的表面高度变化为:

$$\Delta h = \frac{\lambda}{2} \times \frac{a}{e} \quad (1)$$

### 2) 理论发展与技术实践

干涉法通过分析相干光束在带钢表面形成的干涉图像,经参考光束对比分析,求取带钢表面粗糙度参数。干涉法相比散斑法具有准确、快速、全场的特点<sup>[13-15]</sup>。

Nasrullah 等人采用共光路的 Mirau 干涉仪,利用 CCD 相机或二极管阵列摄取干涉条纹,通过高度对比计算表面不平度参数。Paul Kumar 等人<sup>[16]</sup>采用白光干涉

法测量不同材料表面粗糙度参数。对比干涉光强度的变化范围,由相移器计算被测材料表面高度信息,据此求取表面粗糙度信息,并对比了白光干涉法对于不同材料粗糙度测量精度的适用性。何向同等人<sup>[17]</sup>利用 Mirau 干涉仪检测带钢表面粗糙度,验证了相移干涉测量法具有测量精度高的优点,可使误差缩小至  $0.1 \mu\text{m}$ 。高传梅等人<sup>[18]</sup>应用光纤外差光干涉法,实现了带钢表面粗糙度参数的远程测量与实时监控。

产品方面, Taylor-Hobson 公司的 Taly CCI 2000 型非接触式粗糙度检测仪利用相移干涉技术及数字信号处理来产生快速、准确的三维轮廓测量,测量范围为  $0 \sim 100 \mu\text{m}$ ,分辨率为  $0.1 \text{ nm}$ 。美国洛克西德导弹公司设计光学外差轮廓仪,采用共模抑制技术实现了高精度、高速度、非接触式的带钢表面粗糙度在线检测。国内,华中科技大学研发了 2D-SROP-1 型表面粗糙度轮廓仪,该仪器基于光干涉法,采用外同步技术、相移干涉技术和有效算法,以避免背景光强不均匀、人眼瞄准误差、数值孔径等多种因素带来的误差,且在很小的条纹对比度条件下也能获得较好的测量精度。实验结果表明,这套设备测量精度高,测量时间仅需  $3 \text{ s}$ ,垂直分辨率和重复测量精度优于  $1 \text{ nm}$ 。

光干涉法理论研究和应用于带钢表面粗糙度检测的工程实践表明,该方法数据处理简单快捷,分辨率高,适用于非规则表面的粗糙度测量,且能够准确描述表面粗糙度轮廓。但检测精度与抗扰能力、测量范围成为矛盾关键因素,难以实现带钢表面粗糙度的高速、精准、实时测量。

## 2.3 光切法

### 1) 测量原理

光切法通过光束在被测表面经反射后反射光范围实现对工件表面微小凹凸深度的测量,光切法测量原理如图 3 所示。

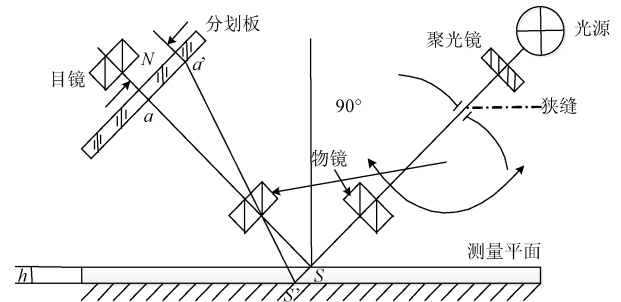


图 3 光切法测量原理

Fig. 3 Measuring principle of light-section method

由光源发出的平行光束在不平被测表面进行反射,通过  $45^\circ$  方向上设置的显微镜观测反射光束,测量平行光

束的宽度  $N$ , 求取被测表面波峰与波谷间的凹凸深度

$$h = \frac{N}{M} \cos 45^\circ, \text{ 其中 } M \text{ 为显微镜放大倍数。}$$

### 2) 理论发展与技术实践

光切法通过目测显微镜形成的轮廓图像, 对带钢表面粗糙度参数进行测量<sup>[19-21]</sup>。随着计算机图像处理技术的发展, 蒋剑锋等提出在目镜分划板位置安装 CCD 相机, 通过图像处理 CCD 相机捕获的视频信号, 分析计算带钢表面不平度参数, 其测量流程如图 4 所示。该方法具有成本低、易于操作等特点, 因此在带钢表面粗糙度的在线检测中被广泛应用。

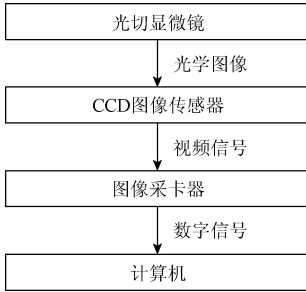


图 4 光切法图像处理流程

Fig. 4 Flow chart of image processing with light-section method

杨光辉等人<sup>[22]</sup>结合激光和 CCD 成像技术采用角度位移法检测带钢表面不平度参数。徐新华等人<sup>[23]</sup>通过实验对比分析了光干涉法的适用范围, 结果表明测量重复性引起的不确定度为 0.9 nm, 总的展伸不确定度为 3 nm。

应用光切法, 德国 AMEPA 公司研制了一套带钢表面粗糙度在线检测装置 SRM, 工作原理如图 5 所示<sup>[24]</sup>。SRM 适用于 1 450 m/min 以下带钢速度, 测量范围  $Ra$  在 0.25 ~ 8  $\mu\text{m}$ , 误差在  $\pm 10\%$  以内。自 2005 年开始应用以来, 截止至 2016 年 1 月, SRM 系统已经在德国 TKS、Salzgitter Flachstahl、AUDI AG 钢厂、比利时 ArcelorMittal Belgium 钢厂、荷兰 TaTa Steel 钢厂、奥地利 Voestalpine 钢厂、西班牙 ArcelorMittal 钢厂、中国首钢、沙钢的冷轧带钢、电/热镀锌钢板、退火带钢等不同生产线上安装了 30 余套, 实施现场应用。实时测量统计结果与触针法测量值/标准测量值比较表明, 在线检测结果与触针法结果具有良好的一致性。

光切法理论研究和应用于带钢表面粗糙度检测的工程实践表明, 该方法具有快速性好、测量准确度高、稳定性好等特点。所具备的 CCD 图像采集功能, 不仅为表面粗糙度参数分析提供了准确测量的必要条件, 更可以将在线获得的带钢表面微观图像用于表面缺陷的实时监测与辨识, 为高品质带钢生产提供了保障手段。

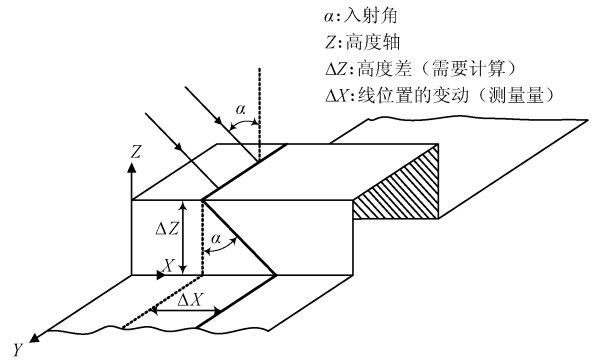


图 5 SRM 装置光切法在线测量原理

Fig. 5 Light-section on-line measuring principle of SRM

### 2.4 光散射法

#### 1) 测量原理

将平行光束垂直投射到被测表面, 测量反射光束与散射光束间的角度, 可在一定范围内准确计算带钢表面粗糙度参数。通常, 中等或较光滑表面粗糙度测量时适合采用衍射模型, 而描述光在较粗糙表面的散射时适合采用微小镜面模型。Beckmann 等人提出采用衍射模型计算带钢表面粗糙度的方法得到了较为广泛的应用。

#### 2) 理论发展与技术实践

光散射法采用光纤式表面粗糙度测量仪<sup>[25-27]</sup>, 将平行光束经调制器投射于被测表面, 在调制区内促使光的性质(如光的相位、波长、强度、频率、偏振态等)产生改变, 成为被调制的信号光, 由解调器求取被测物件表面粗糙度参数, 如图 6 所示。

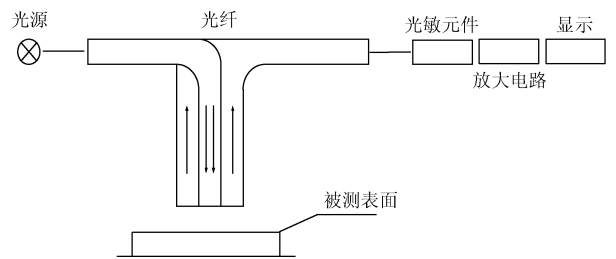


图 6 光散射法测量原理

Fig. 6 Measuring principle of light scattering method

除了光纤传感法外, 很多学者基于光散射法测量原理, 还提出了多种改进方法<sup>[28-29]</sup>。Brodmann 等人研究 1 ~ 10 nm 的表面粗糙度光散射在线测量方法, 研究表明当  $\sigma \ll \lambda$  时, 有  $TIS = (\frac{4\pi}{\sigma\lambda})$  成立。Tay 等人研制了光散射表面粗糙度检测仪, 并将之与原子力显微镜的测量结果相比较, 得到的结果显示两者误差非常微小。徐建强等人设计了基于光散射原理的核环比法, 具有较高的计算精度。陈淑妍等人<sup>[28]</sup>建立表面粗糙度参数和光散射

角间的函数模型,可直接用于表面粗糙度参数的计算分析。潘永强等人<sup>[29]</sup>在分析单层薄膜不同散射条件下的偏振双向反射分布函数,研究表面形貌特征变化规律。

应用光散射法,德国 EMG 公司开发的带钢表面粗糙度在线检测 SORM 3plus 系统,通过角度传感器对材料表面散射光角度的测量实现带钢表面质量在线实时监测<sup>[27,30]</sup>。工作原理如图 7 所示,用一束激光照射到材料表面,利用三角函数式  $dh = 5 \mu\text{m} \times \tan\alpha$  计算每个采样点对应的高度差  $dh$ ,对数据求和,经高斯滤波器进行高通滤波,然后根据 DIN EN ISO4287/4288 国际标准计算表面粗糙度参数。SORM 3plus 系统适用于 2 400 m/min 以下带钢速度,测量范围  $Ra$  在 0.1 ~ 3  $\mu\text{m}$ ,误差在  $\pm 10\%$  以内。自 2002 年开始应用以来,截止至 2016 年 1 月,SORM 3plus 系统已在德国 ThyssenKrupp Duisburg 钢厂、奥地利 Voestalpine 钢厂、韩国 POSCO 钢厂、荷兰 TATA Steel 钢厂、国内武钢、鞍钢等钢厂冷轧带钢生产线上安装 50 余套,实践结果表明,使用 SORM 3plus 系统能够更好地设计冷轧产品的表面质量指标。

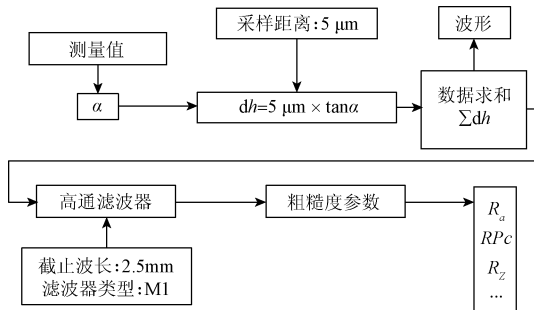


图7 EMG-SORM 3plus 粗糙度在线检测仪工作原理  
Fig. 7 Measuring principle of on-line surface roughness measurement of cold-rolled strip steel using EMG-SORM system

光散射法理论研究和应用于带钢表面粗糙度检测的工程实践表明,该方法检测速度快,测量范围宽,工作稳定性好,体积小,易于集成,适于在线测量。虽不具有 CCD 图像采集功能,但能够定量地揭示表面形貌的多项特征参数。因此,较其他测量方法可为带钢表面粗糙度在线高精度控制提供更多可利用方式和条件。

### 2.5 带钢表面波纹度在线检测方法

带钢表面波纹度是与表面粗糙度、表面原始轮廓都相关的一个表面形貌特征参数,通常将间距大于表面粗糙度而小于表面原始轮廓的表面不平度定义为波纹度参数。随着对带钢表面粗糙度研究的深入,表面波纹度的研究也逐渐受关注,成为影响带钢表面质量的重要因素之一<sup>[31]</sup>。

通常采用轮廓法测量表面波纹度参数,由于波纹度

参数计算的前提是从表面轮廓中通过滤波获得波纹度轮廓,因此滤波器种类、滤波截止波长以及测量长度等成为波纹度测量的关键因素<sup>[32-33]</sup>。蒋光锐等人<sup>[34]</sup>通过比较 2RC、指数、高斯等不同滤波器在波纹度测量中的差异,分析了轮廓法的频谱特性。罗五四等人<sup>[35]</sup>通过对比分析国内外现有轮廓法测量表面波纹度的性能差异,为汽车板材设计了适用度较宽的表面波纹度测量方法。

从目前技术发展现状分析可知,波纹度参数检测方法正在起步与发展,表面粗糙度的检测方法较为完善和成熟,多数汽车板材生产企业通常只关注表面粗糙度,但未对波纹度检测表现出关注。对于一般精度的带钢生产,表面波纹度对带钢性能质量的影响不大;然而针对高精度的带钢生产,表面波纹度的在线检测与控制成为影响表面质量的重要指标之一。德国 EMG 公司开发的带钢表面粗糙度在线检测 SORM 3plus 系统已可实现带钢高速运行条件下表面波纹度的在线准确检测,为波纹度实时控制提供了技术准备和条件<sup>[36]</sup>。随着波纹度检测方法与控制技术研究的深入,带钢表面质量要求的逐步提升,表面波纹度必将成为实现带钢表面质量实时控制的必要手段之一。

## 3 带钢表面粗糙度在线检测技术的发展趋势

现今,带钢表面粗糙度在线检测技术的理论发展较为成熟,但工业现场实践才刚刚起步。从实践结果可以看出,粗糙度在线检测仪不仅能够达到实时在线检测的目的,测量精度满足生产现场要求,尤其能够比较及时地发现生产过程中带钢表面粗糙度的异常波动等情况。但由于粗糙度在线检测仪实现现场应用的时间较短,目前多数钢厂的带钢表面粗糙度在线检测数据仅用于生产过程监视,产品质量判定和出厂数据仍以离线检测数据作为品质依据。

带钢表面粗糙度在线检测技术经过 10 余年发展,以仪表厂家为主体的带钢表面粗糙度、波纹度在线检测仪系统设计与制造技术已完成了现场应用与实践,但冷轧平整机控制(如平整辊形、带钢板型等)与表面粗糙度之间的协调控制问题还未获得切实的解决方案<sup>[37]</sup>。因此,深入发展带钢表面粗糙度在线检测技术的重点在于以钢厂为主体的粗糙度在线检测应用技术研究,主要包括如下 3 点:

1) 如何利用在线检测数据部分甚至基本代替取样和离线检测;

2) 如何利用在线检测得到的大量的、连续的粗糙度数据指导钢厂进行产品质量设计、生产工艺优化以致下

游用户使用技术优化;

3) 如何根据在线检测数据实时地实施生产过程粗糙度的人工操作控制、甚至计算机在线自动控制等。

关于带钢表面粗糙度在线检测应用技术的研究,国外奥钢联等已开始开发应用平整过程粗糙度闭环控制技术,并实现了部分代替取样和离线检测,但国内各钢厂均未开展相关应用技术研究。同样,表面波纹度在线检测应用技术的研究国内外也正处于起步阶段。因此,为了更好地应用带钢表面粗糙度、波纹度在线检测数据,开展平整机实时闭环控制应用技术的研究,具有深刻的实际意义和广阔的推广前景。

## 参考文献

- [ 1 ] 白振华,王骏飞.冷连轧机成品板面粗糙度控制技术的研究[J].钢铁,2006,41(11):46-49,68.  
BAI ZH H, WANG J F. Control technique for surface roughness of strip in cold tandem rolling[J]. Iron and Steel, 2006, 41(11): 46-49, 68.
- [ 2 ] 乐静,杨洁,王建,等.基于多层序列图像的三维表面粗糙度检测[J].仪器仪表学报,2010,31(9):2036-2041.  
LE J, YANG J, WANG J, et al. Three-dimensional surface roughness measurement based on sequence multi-images [ J ]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2010, 31(10): 2036-2041.
- [ 3 ] HANI A F M, PRAKASA E, NUGROHO H, et al. Sample area for surface roughness determination of skin surfaces[J]. Intelligent and Advanced Systems, 2012, 13(12): 328-332.
- [ 4 ] 董友耕,管声启.使用光学测量表面粗糙度方法比较研究[J].组合机床与自动化加工技术,2009,11(8):80-83.  
DONG Y G, GUAN SH Q. A Study of measuring surface roughness with optical methods [ J ]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2009, 11(8):80-83.
- [ 5 ] YUAN Z H, HUANG J. Analysis of the curved surface on surface roughness measurement using dichromatic speckle pattens [ C ]. Third International Conference Digital Manufacturing and Automation, 2012: 218-221.
- [ 6 ] 王政平,张锡芳,张艳娥.表面粗糙度光学测量方法研究进展[J].传感器与微系统,2007,26(9):4-6.  
WANG ZH P, ZHANG X F, ZHANG Y E. Progress on optical measurement of surface roughness [ J ]. Transducer and Microsystem Technologies, 2007, 26(9): 4-6.
- [ 7 ] 张楠.激光在线检测晶圆表面质量的研究[D].上海:上海交通大学,2009.
- ZHANG N. Study of in-process optical measurement of wafer surface quality [ D ]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2009.
- [ 8 ] JEYAPOOVAN T, MURUGAN M. Statistical analysis of surface roughness measurements using laser speckle images Bovas [ C ]. B. C. Information and Communication Technologies, 2012: 378-382.
- [ 9 ] 王婧,刘恒彪,李同保.空间平均的角度散斑相关粗糙度测量模拟研究[J].光学学报,2007,27(2):259-264.  
WANG J, LIU H B, LI T B. Numerical simulation of surface roughness measurement based on angular speckle correlation method using spatial average[J]. Acta Optica Sinica, 2007, 27(2): 259-264.
- [ 10 ] 刘晨,卢荣胜,陈磊,等.基于光学法表面粗糙度的测量研究进展[J].半导体光电,2010,31(4):495-500.  
LIU CH, LU R SH, CHEN L, et al. Progress of surface roughness measurement based on optical method [ J ]. Semiconductor Optoelectronics, 2010, 31(4): 495-500.
- [ 11 ] 郑伟花,贾虎.高斯界面反射超声散斑场的数字模拟[J].江苏科技大学学报:社会科学版,2014,28(1):98-102.  
ZHENG W H, JIA H. Digital simulation of ultrasonic speckle field back scattered from a Gaussian interface [ J ]. Journal of Jiangsu University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2014, 28(1): 98-102.
- [ 12 ] 王志永,刘威,曾韬,等.螺旋锥齿轮大轮齿形误差的在机测量[J].仪器仪表学报,2015,36(5):1047-1053.  
WANG ZH Y, LIU W, ZENG T, et al. On-machine measurement of tooth profile errors for the spiral bevel gears [ J ]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(5): 1047-1053.
- [ 13 ] 张婉怡,于玥,刘喆.全息干涉条纹的数字图像处理[J].科技资讯,2013(6):15.  
ZHANG W Y, YU Y, LIU ZH. Digital image processing of holographic interference fringes [ J ]. Science & Technology Information, 2013 (6) : 15.
- [ 14 ] 李慧鹏,谭曦曦,朱伟伟,等.基于白光干涉测试技术的改进Carre相移算法[J].光子学报,2016,45(6):0612001.  
LI H P, TAN M X, ZHU W W, et al. Improved Carre phase shifting algorithm based on white light interferometry [ J ]. Acta Photonica Sinica, 2016, 45(6): 0612001.
- [ 15 ] 王红玉,冯筠,牛维,等.基于再模糊理论的无参考

- 图像质量评价[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(7): 1647-1655.
- WANG H Y, FENG J, NIU W, et al. No-reference image quality assessment based on re-blur theory[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(7): 1647-1655.
- [16] PAUL K U, WANG H F. White light interferometry for surface profiling with a colour CCD[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2012, (8): 1084-1088.
- [17] 何向同, 李保庆. 采用相移干涉原理的平面度测量系统误差分析与校正[J]. 现代制造工程, 2010, 44(3): 100-103.
- HE X T, LI B Q. The analysis and calibration of systematic errors of phase-shifting interferometry for flatness measurement[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2010, 44(3): 100-103.
- [18] 高传梅, 王辉林. 基于光纤声光调制的轮廓检测技术研究[J]. 应用光学, 2013, 34(6): 1062-1066.
- GAO CH M, WANG H L. Contour detection based on optical-fiber acousto-optic modulation[J]. Journal of Applied Optics, 2013, 34(6): 1062-1066.
- [19] 李博, 黄镇昌, 全燕鸣. 光切法在动态表面粗糙度检测中的应用[J]. 微计算机信息, 2007, 23(10): 127-129.
- LI B, HUANG ZH CH, QUAN Y M. Application of light-section method to roughness measurement on dynamic surface[J]. Microcomputer Information, 2007, 23(10): 127-129.
- [20] 莫燕玲, 姚松丽, 王瑞能, 等. 工件表面粗糙度检测装置的智能化改造[J]. 机械工程师, 2014, 10: 192-193.
- MO Y L, YAO S L, WANG R N, et al. Intellectualized transformation of workpiece surface roughness detector[J]. Mechanical Engineer, 2014, 10: 192-193.
- [21] 刘坚, 路恩会, 易怀安, 等. 基于图像质量的磨削表面粗糙度检测[J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(3): 374-381.
- LIU J, LU EN H, YI H AN, et al. Grinding surface roughness measurement based on image quality assessment[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2016, 30(3): 374-381.
- [22] 杨光辉, 张杰, 曹建国, 等. 一种新的带钢平坦度在线检测方法的研究[J]. 冶金设备, 2006, 6(3): 5-10.
- YANG G H, ZHANG J, CAO J G, et al. Research on a new flatness detection method for strip steel[J]. Metallurgical Equipment, 2006, 6(3): 5-10.
- [23] 徐新华, 王青. 基于干涉图像处理的表面粗糙度检测系统[J]. 激光与光电子学进展, 2009, 37(12): 61-66.
- XU X H, WANG Q. Surface roughness measurement system based on interference image processing[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2009, 37(12): 61-66.
- [24] GARCIA L D O, GUTIÉRREZ ESPINOSA M, WÁSQUEZ TORRES W, et al. Online industrial roughness and topography measurement for continuous lines[J]. Metallurgical Analysis, 2012, 32(1): 29-33.
- [25] 代雷, 吴迪, 张健, 等. 精磨光学元件面形的干涉检测技术研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(4): 558-562.
- DAI L, WU D, ZHANG J, et al. Research on interferometric measurement technology for fine grinding optics surface[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2015, 29(4): 558-562.
- [26] 李亚非, 谢竹生. 基于光纤传感器的表面粗糙度在线检测研究[J]. 中国机械工程, 2007, 18(4): 411-414.
- LI Y F, XIE ZH SH. In-process measurement of surface roughness based on optical fiber sensor[J]. China Mechanical Engineering, 2007, 18(4): 411-414.
- [27] GONZALEZ-DIAZ J B, ARREGI J A, MARTINEZ-DE-GUERENU A, et al. Quantitative magneto-optical characterization of diffusive reflected light from rough steel samples[J]. Journal of Applied Physics, 2013, 113(15): 1-5.
- [28] 陈淑妍, 齐立红, 陈波. 光学散射法表面特征的测量与分析[J]. 红外与激光工程, 2006, 35(1): 82-85.
- CHEN SH H, QI L H, CHEN B. Measurement and analysis of surface profiles by optical scattering method[J]. Infrared and Laser Engineering, 2006, 35(1): 82-85.
- [29] 潘永强, 田爱玲, 杭凌侠. 单层二氧化钛薄膜的偏振散射特性[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(10): 3015-3019.
- PAN Y Q, TIAN AI L, HANG L X. Polarized light scattering of single titanium dioxide thin film[J]. Infrared and Laser Engineering, 2015, 44(10): 3015-3019.
- [30] 朱久发. 连续热镀锌技术研究动向与热点[J]. 武钢技术, 2010, 48(5): 59-62.
- ZHU J F. Research trends and focal points of continuous hot-dip galvanized technology[J]. Wisco Technology, 2010, 48(5): 59-62.
- [31] 关佳亮, 陈玲, 朱磊, 等. KDP晶体表面波纹度的分析与研究[J]. 工具技术, 2015, 49(8): 87-91.

GUAN J L, CHEN L, ZHU L, et al. Analysis and research on KDP crystal surface waviness [J]. Tool Engineering, 2015, 49(8): 87-91.

[32] 蒋光锐, 滕华湘, 张浩, 等. 冷轧薄板表面波纹度评价标准研究[J]. 表面技术, 2013, 42(5): 112-115.

JIANG G R, TENG H X, ZHANG H, et al. Filters in waviness measurement on sheet surface [J]. Surface Technology, 2013, 42(5): 112-115.

[33] 罗五四, 张耿旭, 李玲, 等. 金属薄板表面粗糙度与波纹度测试截止波长重叠问题的探讨[J]. 理化检验:物理分册, 2013, 49(10): 637-646.

LUO W S, ZHANG G X, LI L, et al. Discussion on problem of cut-off wavelength overlapping in measurement of surface roughness and waviness on cold rolled steel sheets[J]. Physical Testing and Chemical Analysis-Part A: Physical Testing, 2013, 49(10): 637-646.

[34] 蒋光锐, 张浩, 刘李斌, 等. 平板表面波纹度测量中的滤波器研究[J]. 表面技术, 2016, 45(3): 183-187, 192.

JIANG G R, ZHANG H, LIU L B, et al. Filters in waviness measurement on sheet surface [J]. Surface Technology, 2016, 45(3): 183-187, 192.

[35] 罗五四, 李玲, 周存锋, 等. 汽车用薄钢板表面波纹度试验方法[J]. 理化检验(物理分册), 2015, 51(8): 570-574.

LUO W S, LI L, ZHOU C F, et al. Method of surface waviness testing for automotive steel sheets [J]. Physical Testing and Chemical Analysis (Part A: Physical Testing), 2015, 51(8): 570-574.

[36] MOREAS I R G, MARTINO A G. Waviness link with production parameters for automotive product quality improvement[C]. The METEC and 2nd European Steel Technology and Application Days, 2015: 1-6.

[37] 顾廷权, 王骏飞, 薛栋梁. 一种冷轧带钢机械性能在线控制方法:中国, 201110206206.6[P]. 2015.

GU T Q, WANG J F, XUE D L. Online control method for mechanical properties of cold rolled steel strip[P]. Baoshan Iron & Steel Co., 201110206206.6.

作者简介



**瞿雪元**, 1974 年出生, 硕士、工程师, 现从事机电控制专业。  
E-mail: quxueyuan@baosteel.com

**Qu Xueyuan** was born in 1974, M. Sc., engineer. His main research direction is mechatronics and control.



**顾廷权**, 1970 年出生, 博士、教授级高工、首席研究员, 现从事机电控制专业。  
E-mail: gutq@baosteel.com

**Gu Tingquan** was born in 1970, Ph. D., professor, chief engineer. His main research direction is mechatronics and control.



**方百友**, 1972 年出生, 硕士、高工, 首席工程师, 现从事汽车用钢专业。  
E-mail: fangbaiyou@baosteel.com

**Fang Baiyou** was born in 1972, M. Sc., chief engineer. His main research direction is automotive steel.