1932049

分类号_____ 密 级_____

UDC _____

学 位 论 文

首钢1850冷连轧机组板形控制系统研究与应用

作 者 姓 名： 金洪军

指 导 教 师： 高立群 教授

东北大学导航制导理论与导航技术研究所

申请学位级别： 硕士 学 科 类 别 ： 专业学位

学科专业名称： 控制工程

论文提交日期： 2008 年 6 月 15 日 论文答辩日期： 2008 年 7 月 6 日

学位授予日期： 2008 年 月 日 答辩委员会主席： 高福祥

评 阅 人 ： 高福祥 王玥

东 北 大 学

2008 年 6 月

A Thesis in Control Engineering

Y1843549

The Research and Application of the Flatness Control System in the Shougang 1850 Tandem Cold Mill

by Jin Hongjun

Supervisor : Professor Gao Liqun

Northeastern University

June 2008

独创性声明

本人声明，所呈交的学位论文是在导师的指导下完成的。论文中取得的研究成果除加以标注和致谢的地方外，不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包括本人为获得其他学位而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示谢意。

学位论文作者签名：金洪军

日　　期：2008.7.6

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者和指导教师完全了解东北大学有关保留、使用学位论文的规定：即学校有权保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和磁盘，允许论文被查阅和借阅。本人同意东北大学可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索、交流。

作者和导师同意网上交流的时间为作者获得学位后：

半年 □　　一年□　　一年半□　　两年□

学位论文作者签名：金洪军　　导师签名：

签字日期：2008.7.6　　签字日期：2008.7.6

首钢1850冷连轧机组板形控制系统研究与应用

摘 要

冷轧带钢轧制厚度和板形的精确控制是冷轧薄板品质要求的核心环节，板形平直度不仅是衡量带钢质量的重要指标之一，也是决定产品市场竞争力的重要因素。几十年来，尽管冷轧板形控制的研究一直是轧钢研究的中心内容，研究方法和控制手段也不断创新并取得不少理论和应用成果，但在实际的冷轧生产中，板形问题依然是生产中最常见、最难解决的关键技术问题。

本文在研究HC、CVC等板形控制轧机以及垂直弯辊、水平弯辊、轧辊横移、轧辊交叉、分段冷却等板形控制技术的基础上，以首钢顺义1850板形控制冷轧机为背景，研究了五机架CVC六辊轧机执行机构的结构特点及控制思想，具体包括液压弯辊、 中间辊窜辊系统、五机架分段冷却喷淋装置等。进而针对该轧机板形控制系统之BFI板形测量、系统组成、数据处理、TDC控制功能、板形偏差调节、数学模型等展开研究。另外还结合系统调试和生产中遇到的实际应用问题进行解决分析，提出了板形曲线调整方法、HMI系统操作方法、典型故障的分析排查和具体应对策略等，对指导板形系统的应用具有重要指导价值。

通过项目实施，板形控制系统达到设计性能指标并如期投运，有力地保障冷轧的顺利生产。本项目的研究对首钢开拓冷轧产业提供了宝贵的实践经验，具有重要的现实意义和推广价值，必将为首钢带来巨大的市场竞争力和可观的经济效益。

关键词：冷轧带钢；六辊CVC轧机；板形控制；应用研究

The Research and Application of the Flatness Control System in the Shougang 1850 tandem cold mill

Abstract

The accurate thickness and flatness control is the core of the cold-rolled strip quality. And the strip flatness is, however, not only one of the most important quality features of cold-rolled products, but also the significant factor which determines the competence in the market. In the past decades, although the research to the cold-rolled strip flatness has been the most important direction and we have continuously been creating the new methods and control ways, meanwhile we have got many developments in the theoretical and practical application. But in the cold rolling production, flatness is still the most frequent and the most difficult key technical problem to deal with.

Based on the research of HC, and CVC flatness control and the flatness control technology like the vertical bending, traversing bending, roll traversing, roll crossing, multi-zone cooling and so on, and under the background of Shougang Shunyi 1850 flatness control cold stand mill, this thesis makes the research on the composition characteristics and control ideology of the stand mill NO.5's CVC six rolls stand mill's execution unit. These include hydraulic bending roll, intermediate roll shifting system, and stand mill NO.5's multi-zone cooling spraying equipment and so on. And then this thesis begins the research on this kind of stand mill's flatness control system 's BFI flatness measuring, system component, data processing, TDC control function, flatness difference adjusting, and mathematic mode and so on. Besides, this paper also combines the practical problems that occur in the commissioning and the production to make analysis and put forwards the adjusting method of flatness curve, operation method of HMI system, the analyzing and detecting process of the classical faults and specific dealing plan and so on. This contains significant guiding value to direct the flatness system's application.

Through the implement of this project, the flatness control system has reached the designing target and put into operation on schedule, so it has greatly guaranteed the successful production of the cold rolling plant. The research of this item will supply valuable practice experience for Shougang to exploiting its cold rolling industry, and it has profound practical meaning and popularizing value. This must bring Shougang with great market competitive ability and considerable benefit.

Keywords: Cold rolling strip; Six-roll CVC stand mill; Flatness control; Application research.

目 录

独创性声明 II
摘 要 II
ABSTRACT III
第一章 绪 论 1
1.1 冷轧带钢板形控制的目的和意义 1
1.2 带钢断面形状及板型的表示方法 1
1.2.1 带钢断面形状表示方法 1
1.2.2 板型的表示方法 2
1.3 冷轧带钢的特点 5
1.4 板形自动控制所需条件 7
1.5 本课题研究的意义及主要内容 8
第二章 冷轧板形控制轧机执行机构 11
2.1 板形控制轧机的发展历程 11
2.1.1 典型板形轧机 11
2.1.2 板形轧机的执行机构 14
2.2 首钢 1850 冷连轧板形轧机 18
2.2.1 首钢 1850 冷连轧机组 18
2.2.2 首钢 1850 六辊 CVC^{plus} 轧机 19
第三章 首钢 1850 冷轧板形控制系统的设计 25
3.1 首钢 1850 板形测量系统的设计 25
3.1.1 板形测量原理 26
3.1.2 首钢 1850 冷轧板形测量系统的组成 27
3.1.3 板形测量数据的处理 29
3.2 首钢 1850 板形控制系统的设计 30
3.2.1 板形控制系统组成 30
3.2.2 带钢板形偏差的类型 32
3.2.3 板形偏差调节方法 33
3.2.4 首钢 1850 板形控制的实现 34
第四章 首钢 1850 控制系统的调试 39

6

4.1 目标板形曲线的优化 39
4.1.1 逐段设定法 42
4.1.2 参数设定法 43
4.1.3 目标曲线调整 45
4.2 板形控制系统参数调整 48
4.3 板形仪使用的相关问题 49
4.3.1 带钢楔形问题 49
4.3.2 板形目标曲线 50
4.3.3 冷却剂用量的选择 50
4.3.4 板形仪的标定 50
第五章 结束语 53
参考文献 55
致 谢 57

第一章 绪 论

1.1 冷轧带钢板形控制的目的和意义

冷轧是带钢生产中最重要的工序。热轧带钢经过一定程度的冷轧变形获得了厚度很薄、尺寸精确、表面光洁和性能均一的冷硬状态带钢，再经过以后热处理和精整就能使带钢具有良好的力学性能、加工性能和优良的物理性能。因此冷轧钢板以其品种多、性能高、用途广等特点广泛的应用在各个行业。在汽车、仪表、家用电器、电机制造、食品罐头，轻工和建筑等行业中得到了极为广泛的应用。同时随着这些行业的蓬勃发展，也促进了冷轧带钢的生产及对产品质量要求的不断提高。冷轧带钢生产技术发展的主攻方向是要不断提高产品质量，主要是带钢厚度精度和板形平直度，以满足用户的要求并提高市场竞争能力。

在实际的冷轧生产中，板形问题仍然是生产中最常见、最难解决的问题。板形是带钢产品最重要的质量指标之一，在过去的几十年里吸引着众多研究人员及工程技术人员的目光。板形理论的研究不仅是近40年来轧钢工艺理论的中心内容，而且依然是当前轧钢生产中最令人注目的课题之一。

1.2 带钢断面形状及板型的表示方法

1.2.1 带钢断面形状表示方法

(1) 板凸度

板凸度是描述带材横截面形状的一项主要指标。首先介绍板凸量(△)的概念，板凸量为板带宽度中点处厚度与边部标志点厚度之差。如式 1.1 所示。

$$\triangle = hc - he \tag{1.1}$$

式中：he 为边部的标志点厚度。所谓标志点是指不包括边部减薄部分的边部点，一般取离实际边部 40mm 左右处的点。hc 为带材宽度方向中心点的厚度。

板凸度则表示为板凸量与板带边部标志点厚度之比，即△/he。

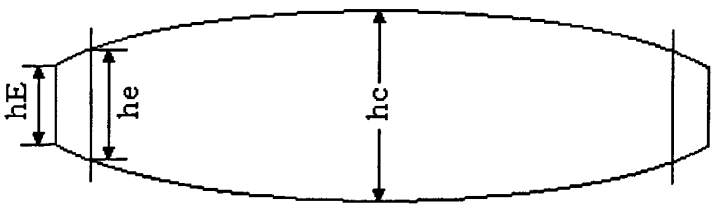


图1.1板带断面形状示意图
Fig.1.1 Strip cross section

所谓板凸度一定原则就是指为了满足均匀变形的条件，保证板形良好，必须使轧制前板凸度等于轧制后的板凸度。

(2) 楔形

楔形（CT）即左右边部标志点厚度之差，如图 1.2 所示。

$$CT=her-hel \tag{1.2}$$

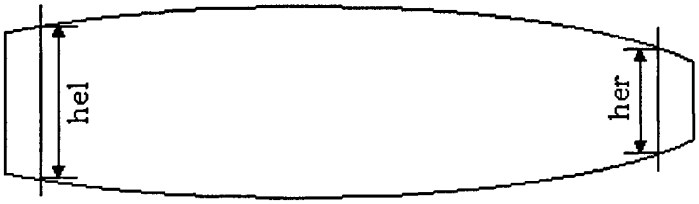


图1.2 楔形断面示意图
Fig.1.2 Wedge cross section

(3) 边部减薄

边部减薄（E）是指带钢与轧辊接触处的轧辊压扁在板带边部由于过渡区而造成的带钢边部减薄的现象，如图 1.1 所示。

$$E=he-hE \tag{1.3}$$

式中：hE 为带材实际边部的厚度。

1.2.2 板型的表示方法

板形(Shape)所含的内涵很广泛，从外观表征来看，包括带钢整体形状（横向、纵向）以及局部缺陷；从表现形式看，有明显板形及潜在板形之分。

理想板形：理想板形应该是平坦的，内应力沿带钢宽度方向上均匀分布。当去除带钢所受外应力和带钢纵切时，带钢板形仍然保持平直。

潜在板形：潜在板形产生的条件是内部应力沿带钢宽度方向上不均匀分布，但是带钢的内部应力足以抵制带钢平直度的改变。当去除带钢所受外力时，带钢板形仍然保持平直。然而，当纵切带钢时，潜在的应力会使带钢板形发生不规则的改变。

表观板形：表观板形产生的条件是内部应力沿带钢宽度方向上不均匀分布。同时，带钢的内部应力不足以抵制带钢平直度的改变。结果局部区域发生了弹性翘曲变形。去除带钢所受外力和纵切带钢都会加剧带钢的表观板形。

混合板形：混合板形指的是带钢的各个部分板形形式不同。例如，带钢的一部分呈现潜在板形，其它的部分呈现表观板形[1]。

板带的横截面轮廓(Profile)和平坦度(Flatness)是目前用以描述板形的两个重要方面。横截面外形反映的是带钢沿板宽方向的几何外形，而平坦度反映的是带钢沿长度方

向的平坦形状。这两方面的指标相互影响，相互转化，共同决定了带钢的板形质量，是板形控制中必须兼顾的两个方面。

我们通常所说的板形一般指平坦度或称为平直度。带钢平坦度是指带钢中部纤维长度与边部纤维长度的相对延伸差。带钢产生平坦度缺陷的内在原因是带钢沿宽度方向各纤维的延伸存在差异，导致这种纤维延伸差异产生的根本原因，是由于轧制过程中带钢通过轧机辊缝时，沿宽度方向各点的压下率不均所致。当这种纤维的不均匀延伸积累到一定程度，超过了某一阈值，就会产生表观可见的浪形。

连轧过程中，带钢一般会被施以一定的张力，使得这种由于纤维延伸差而产生的带钢表面翘曲程度会被消弱甚至完全消除，但这并不意味着带钢不存在板形缺陷。它会随着带钢张力在后部工序的卸载而显现出来，形成各种各样的板形缺陷。因此仅凭直观的观察是不足以对带钢的板形质量做出准确判别的。由此出现了诸多原理不同、形式各异的板形检测仪器，如张力分布式板形仪、平坦度仪等。它们被安设在轧机的适当位置，在轧制过程中对带钢进行实时的板形质量监测，以利于操作人员根据需要调节板形，或是指导板形自动调节机构进行工作。

平坦度的表示方法有很多，如波高法、波浪度法、纤维相对长度差法、残余应力法、矢量法等。

(1) 相对长度表示法

这是一种比较简单的表示板形的方法，就是取横向上不同点的相对延伸差$\Delta L/L$来表示板形。其中L是所取基准点的轧后长度，ΔL是其它点相对基准点轧后长度之差。相对长度差也称为板形指数β，$\beta=\Delta L/L$。如图1.3所示：

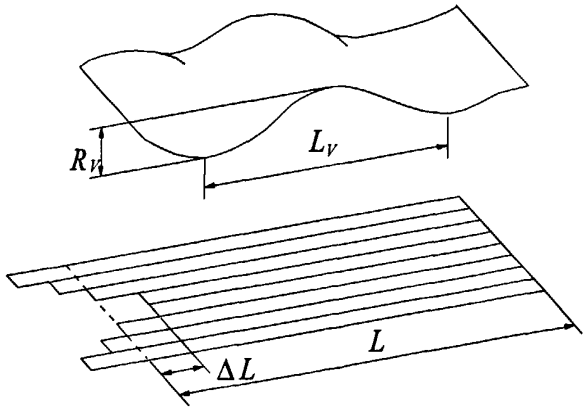


图1.3 翘曲带钢及其分割
Fig.1.3 Strip warp and its division

英国的相对长度差的单位是蒙(mon)，该术语是由W.K.泼森建议的，1蒙相当于相对长度差为10-4。泼森定义板形为横向上单位距离上的相对长度差，以mon/cm表示，即：

$$\Sigma_s = 10^4 \times \frac{\Delta L}{L} \tag{1.4}$$

加拿大铝公司是取横向上最长与最短纵条之间的相对长度差作为板形单位，称为 I 单位，1个I单位相当于相对长度差为10-5。所以板形表示为：

$$\Sigma_{st} = 10^5 \times \frac{\Delta L}{L} \tag{1.5}$$

(2) 波形表示法

在翘曲的板带上测量相对长度差很不方便，所以人们采用了更为直观的方法，即以翘曲波形来表示板形，称之为翘曲度。如图1.4的(a)和(b)所示：

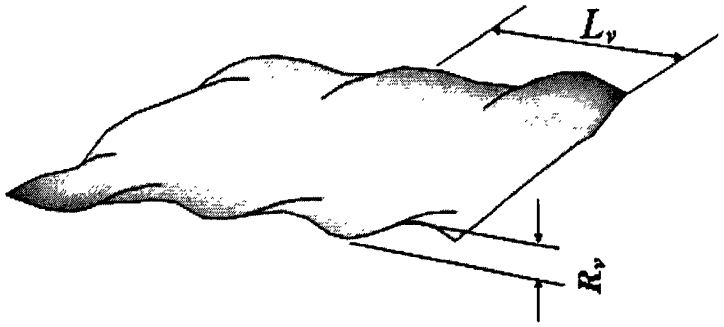


图1.4(a) 带钢翘曲
Fig.1.4 (a) Strip warp

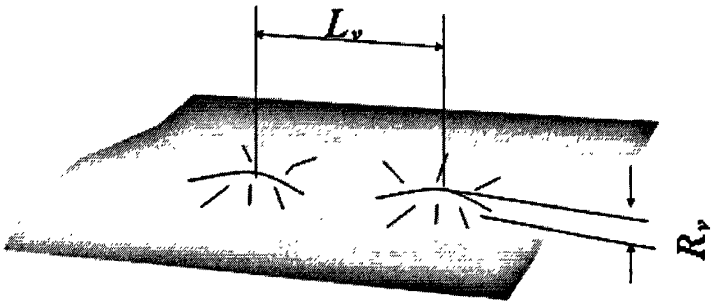


图1.4(b) 带钢翘曲
Fig.1.4(b) Strip warp

从翘曲的带钢切取一段置于平台上，如将最短纵条视为一直线，最长纵条视为一正弦波，以翘曲波形来表示板形，称为翘曲度。如图 1.5 所示：

$$\lambda = RV/LV \tag{1.6}$$

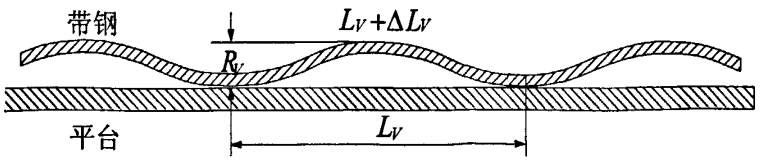


图1.5 波形表示法
Fig.1.5 Wave notation

设与 Lv 的直线部分相对应的曲线部分长为 Lv+△L v，并认为曲线按正弦规律变化：

$$y=\frac{R_v}{2}\sin\left(\frac{2\pi x}{L_v}\right) \tag{1.7}$$

则可利用线积分求出曲线部分的长度

$$\begin{aligned} L_v+\Delta L_v &= \int_0^{L_v}\sqrt{1+\left(dy/dx\right)^2}dy \\ &= \frac{L_v}{2\pi}\int_0^{2\pi}\sqrt{1+\left(\pi R_v/L_v\right)^2\cos^2\theta}d\theta \\ &\approx L_v\left[1+\left(\pi R_v/2L_v\right)^2\right] \end{aligned} \tag{1.8}$$

上式经过整理可得：曲线部分和直线部分的相对长度差

$$\frac{\Delta L_v}{L_v}=\left(\frac{\pi R_v}{2L_v}\right)^2=\frac{\pi^2}{4}\left(\frac{R_v}{L_v}\right)^2=\frac{\pi^2}{4}\lambda^2\times10^{-4} \tag{1.9}$$

$$\Downarrow$$

$$\sum_{St}=\frac{\Delta L_V}{L_V}\times10^5=\frac{5\pi^2}{2}\lambda^2=24.674011\times\lambda^2 \tag{1.10}$$

式中：λ：翘曲度，%， ΣSt：相对长度差，I。

因此：π λ2/4=10－5 I 单位，λ=1%，对应 7.85 I 单位。

(3) 残余应力表示法

该方法采用带钢内部的残余应力来表示板形。因为带钢内应力的分布直接决定了板形的好坏，所以这种方法更能反应板形的实质，并且与实际应用中采用的测张式板形仪趋于一致。

1.3 冷轧带钢的特点

与热轧相比，冷轧带钢变形抗力高，再加上轧制过程中产生的加工硬化现象，使带钢变形抗力进一步加强。当钢种一定时，带钢加工硬化的剧烈程度与冷轧变形程度有关。变形量加大到使变形抗力超过一定程度后，就不能继续轧制。

冷轧生产最重要的特点就是采用张应力轧制。施加在带钢前后的张应力在冷轧过程中起着重要的作用。首先张应力可以防止带钢的轧制过程中跑偏；其次张应力可以使带钢保持平直和良好的板形；最后张应力的施加可以降低轧制压力，便于轧制更薄的产品。带钢在轧制时受到张应力作用，若出现不均匀的延伸，则在带钢宽向上的张应力分布就会随之发生相应的变化，在延伸较大的区域张应力减小，而在延伸较小的区域张应力增加，这种张应力分布的变化反过来又促使带钢的延伸均匀化。

从带钢的几何上看，冷轧带钢的厚度很薄，因此带钢在变形过程中产生的板形问题就尤为突出。板形和板凸度是衡量带钢形状质量的两个重要指标。当带钢变形过程中产生纵向延伸不均，必然会导致组成带钢的若干窄条的纵向延伸程度不同，造成各窄条的长短不一。但带钢实际上是一个整体，各个窄条之间必然相互影响相互制约。窄条在延伸变形大的区域受到周围金属的牵制而产生压应力作用；而延伸小的窄条则受到拉应力作用。这种内在的应力作用只要存在，我们就认为带钢的板形是不良的称为潜在的板形不良，如果这种内应力达到一定的临界值时，受压的部分失稳屈曲，带钢产生浪形，这种板形不良成为表观板形不良。因此板形问题的实质就是带钢内部残余应力的分布[2]。冷轧板常见的板形分类如图 1.6 所示[3]。

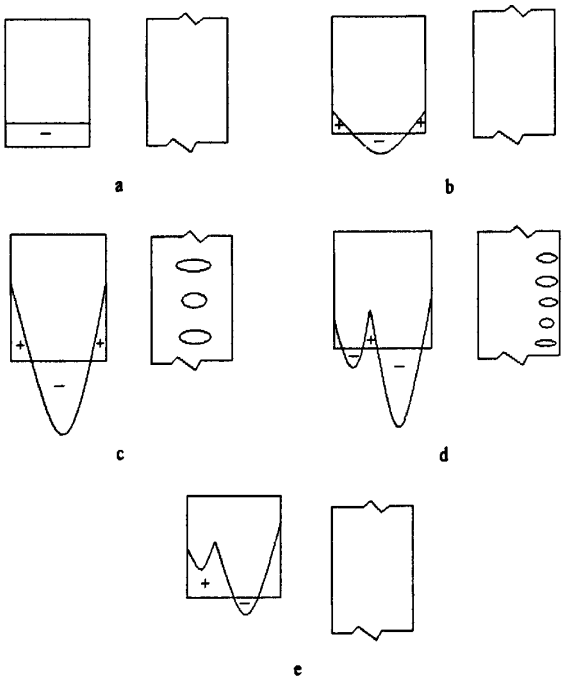


图 1.6 带钢的板形
Fig.1.6 Shape of strip

其中：a：理想板形，b：潜在板形，c：表观板形，d：混合板形，e：张力影响的板形。图中左边为应力分布，右边为外观显示图。

带钢的板形和板凸度有着直接必然的联系。带钢在变形过程中纵向的延伸不均在轧前及轧后的板凸度上可清楚的反映出来。在轧制过程中保持板形良好就要求带钢在宽向上的厚度压下均一，反映在板凸度上就是轧前轧后带钢板凸度相等[4]。因此板形与板凸度的关系为：轧前轧后板凸度相同则板形良好。

由于热轧来料的横截面总要有一定的凸度，而这种带钢的凸度将要带到冷轧，因此想要轧出平直度好的冷轧板，必须对工作辊有载辊缝形状进行研究。工作辊有载辊缝的形状又与工作辊、中间辊、支撑辊的弯曲及压扁密切相关，对带钢板形的研究也就必然

与辊系的研究密不可分。

冷轧产品厚度薄，因此冷轧机的工作辊辊径不大。支撑辊辊径较大以抵制辊系的弯曲，增加辊系的刚度。中间辊一方面可以改善板形，成为一种板形控制的手段，另一方面，相对于四辊轧机，中间辊的增加可以有效的增加辊系的刚度[5-9]。在冷轧过程中，由于轧制力很大，因此辊系的弯曲变形及压扁变形均很大，而且带钢的厚度有时达到0.2~0.3mm，与带钢的厚度相比辊系的各种弹性变形均不能轻视。

1.4 板形自动控制所需条件

板形控制的最终目的在于解决板形质量问题[10]，为此需要配备完善的板形自动控制环节，要实现对板形的自动控制必须具备以下几个方面的条件[11]。

(1) 完整有效的板形控制数学模型。这将涉及到对板形基本理论的各个领域的研究（图 1.7），即通过对板形生成全过程的研究，揭示板形生成机理，确定所有对板形有影响的因素，及其影响作用的大小，建立板形生成过程的定量模型，并且要研究板形检测方法及计算机控制所需的信号处理方法、控制规律和控制算法。最终建立一套能够根据实测板形信号及相关轧制工艺参数分析得出合理的调控方案及正确的各种板形调节机构的设定值的板形自动控制系统的算法。

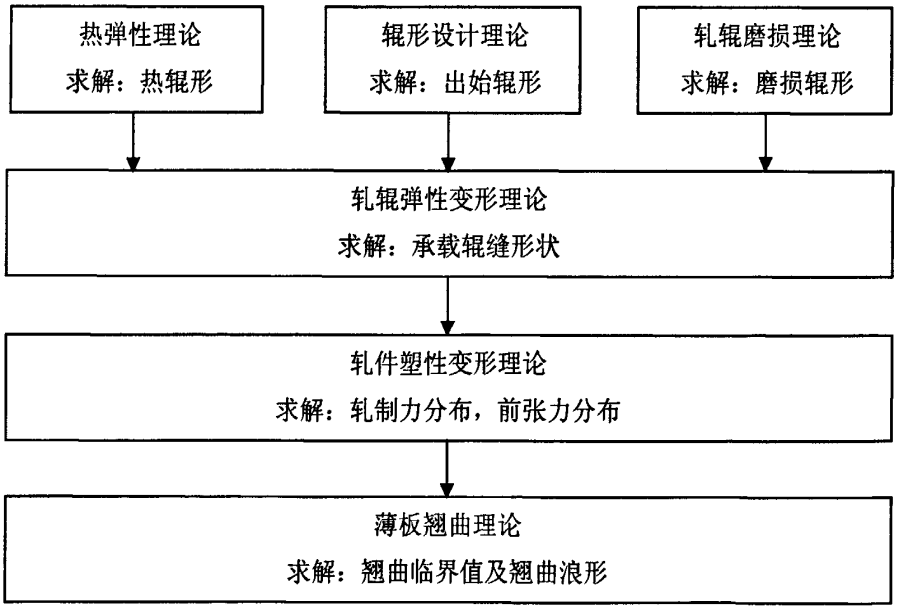


图1.7 板形控制涉及的理论
Fig.1.7 Theory about flatness control

(2) 板形检测技术。板形检测包括横截面几何形状检测和平坦度检测。横截面几何形状检测装置与测厚仪的原理是相同的，有时称凸度仪，可分为采用单个测量点横向可移动的扫描仪和采用多个测量点固定位置同时测量的同步瞬态式。凸度仪在热轧上应用

较多，冷轧上使用不多。平坦度检测装置（又称板形仪），在冷轧上应用已经经过了相当长时间的发展，形成了特点各异的多种形式。对于检测内容不同的板形平坦度仪，板形自动控制系统需要采用不同的数学模型。就我国钢铁行业的情况，在冷带钢轧机上，大多使用分段接触检测张应力式板形仪。

(3) 板形控制手段。板形控制手段有多种，其中工艺手段、压下倾斜、弯辊和工作辊热辊形调节都属于传统手段，而其余各项均为新的调控手段。从实现控制板形的原理来看，各种板形控制技术都基本遵循两种技术思路：一是增大有载辊缝凸度可调控范围；二是增大有载辊缝的横向刚度，减少轧制力变化对辊缝凸度的影响。就目前应用最广泛的HC（含UC）、CVC和PC技术而言，HC技术通过轧辊轴向移位消除辊间有害接触区，提高了辊缝横向刚度，属于刚性辊缝形。CVC和PC分别以轧辊轴向移位和轧辊成对交叉提供变化的轧辊辊形，使有载辊缝的凸度在一定范围内可调，属于柔性辊缝形。拥有几种不同板形控制技术的板带轧机的板形控制性能可用有载辊缝凸度调节域和横向刚度特性来界定。调节域是指轧机各种板形控制技术共同作用所能提供的有载辊缝二次凸度和四次凸度的最大变化范围。横向刚度特性是指平均单位板宽轧制力发生波动时的变化量和相应引起的有载辊缝凸度变化量的比值。有载辊缝的调节域表明了辊缝的调节柔性，而横向刚度特性表明了辊缝在轧制力变动时的稳定性。

1.5 本课题研究的意义及主要内容

冷轧带钢板形是衡量带钢质量的重要指标之一，也是决定产品市场竞争力的重要因素。因此，准确可靠的板形检测及控制系统，对于控制纵向应力分布，成品板形质量具有非常重要的意义。

本课题以首钢顺义冷轧 CVC^{plus} 轧机为背景，对板形控制系统进行研究与分析。CVC^{plus} 轧机具有极强的板形控制能力[12]，可以消除中浪、边浪到两肋浪、复合浪等多种不良板形，保证轧后成品质量。该课题的研究对首钢新产品的开发以及产品战略调整具有深远意义。顺义冷轧薄板生产线是首钢全新引进的第一条冷轧薄板线。随着京唐、宝业等新钢铁钢基地的建设，将陆续新上几条冷轧薄板生产线，因此研究、消化吸收五机架 CVC^{plus} 板形控制技术必将为首钢带来巨大的市场竞争力和可观的经济效益。

本文的主要研究内容包括：

(1) CVC^{plus} 轧机板形执行机构特点分析。CVC^{plus} 轧机与其它常用轧机的比较分析，轧辊液压弯辊技术、中间辊横移技术、特殊辊形轧辊、及轧辊分段冷却技术的原理与应用；

(2) 板形检测与自动板形控制(AFC)的原理。BFI分段式张力测量板形仪的结构及原理，数据处理方法，板形闭环控制思路等；

(3) 板形影响因素的分析。目标板形曲线的设定原则，控制系统的参数设定等；

(4) 系统调试、生产操作与维护技术的研究。侧重探讨系统调试过程疑难问题的处理策略，HMI 系统参数修改，系统常见故障处理方法及维护。

第二章 冷轧板形控制轧机执行机构

2.1 板形控制轧机的发展历程

所谓板形控制，就是针对板形影响因素所引起的辊缝形状变化进行相应补偿的技术。具有这种补偿能力的轧机即称为板形控制轧机。

冷轧机的发展大致经历了三个阶段：第一阶段是在战后 20 年，这时轧机向大型、高刚度、高速度方向发展，并致力于对张力拉断的控制，以适应生产高速发展的需要；第二阶段是从 1964 年实现计算机厚度控制开始的，20 年来，厚度自动控制从运用到成为一个成熟的技术，为了满足用户的需求，在现代化冷连轧机上配备有完善的厚度自动控制系统。该系统包括：高精度的测量装置，同位素厚度测量或激光厚度测量，具有快速响应的液压压下装置（响应速度高达 3μs），合理的厚度控制模型，加上计算机的自动控制等，使冷轧厚度 0.4mm 以下的薄板纵向厚度公差可达±3μm；最近 10 多年步入了第三阶段，其特征是致力于产品断面和平直度的改善。此时，不仅原有的板形控制技术（如弯辊、轧辊冷却等）有了很大进步，并且综合地运用了这些技术。大多数冷连轧都装备了板形检测系统，与液压压下、弯辊装置、分段冷却结合起来，完成板形控制闭环回路。此外，出现了许多用来改善板形的新型轧机，这些轧机的基本特征就是更加有效地控制辊缝形状[13]。在这些新轧机中主要有 HC 轧机、CVC 轧机、UPC 轧机、PC 轧机、VC 轧机等类型，它们各有其优势和特点。目前应用较多的是 HC（High Crown）轧机和 CVC（Continuously Variable Crown）轧机[14]。

2.1.1 典型板形轧机

1. HC 轧机

日本日立公司在 70 年代初开发的 HC 轧机是目前应用较广的冷轧机型。这种轧机的主要特征是在普通四辊轧机的工作辊与支承辊之间增加了可轴向抽动的中间辊，中间辊又增加了弯辊装置，工作辊也可改成轴向抽动式并带有弯辊。HC 轧机共有 6 个型号，它们都是六辊 HC 系列[15]。还有一种四辊 HC 轧机，它与普通四辊轧机的不同之处是工作辊可以轴向移动。 HC 系列轧机主要机型有:

(1) HCW：是四辊工作辊可弯曲及轴向抽动轧机；

(2) HCWM：是六辊中间辊和工作辊轴向可抽动，工作辊可弯曲轧机；

(3) HCM：是六辊中间辊轴向可抽动，工作辊可弯曲轧机；

(4) UCM：是具有中间辊弯辊的中间辊可抽动，工作辊可弯曲轧机；

(5) UCMW：是具有中间辊及工作辊弯棍的中间辊和工作辊可抽动轧机；

(6) UCW：是具有中间辊弯辊的工作辊可抽动轧机。

HC 轧机与普通四辊轧机相比，HC 轧机具有板形控制能力强、板形稳定性好、控制带钢边部减薄的能力、补偿热凸度的特点。

HC 轧机的板形控制可通过调整中间辊轴向位置的 δ 量以及扩大了液压弯辊的效果来体现。图 2.2 表示中间辊轴向位移后的 δ 值与板形和板凸度的关系。当 δ >0 时，带钢产生边浪；当 δ <0 时，带钢产生中浪；当 δ =0 时，带钢平直。

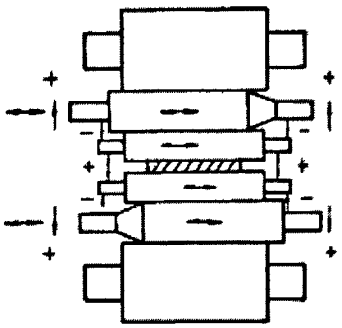


图2.1 UCMW轧机
Fig.2.1 UCMW mill

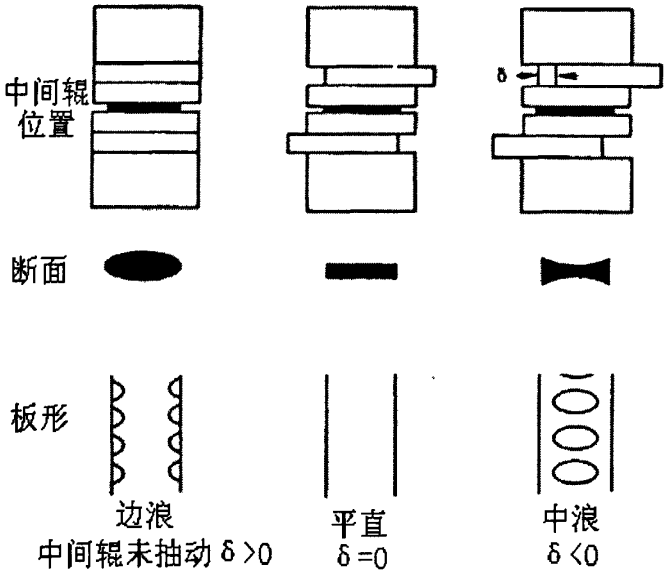


图2.2 HC轧机中间辊位置对板形的影响
Fig.2.2 The impact of the HC mill IR on the strip flatness

板形稳定性是指轧制压力波动时板形变化小。一般四辊轧机，轧制压力波动，带钢板形也波动。而 HC 轧机横刚度系数大，轧制压力波动时，板形没有变化。

在带钢边部，由于工作辊弯曲、轧辊弯曲、轧辊压扁和金属的宽展等，使边部产生减薄现象。六辊 HC 轧机通过中间辊横移可以减少工作辊的挠曲变形和压扁变形，同时 HC 轧机可以使用较小的工作辊径，这些都显著地减少了边部减薄的现象。

一般四辊轧机在换辊后需轧制一些厚规格的产品，使轧辊产生热凸度或者预热轧辊，这样才能保证轧制宽薄规格时板形良好。而采用 HC 轧机作成品机架后，可以通过中间辊移动，配合工作辊弯曲达到补偿热凸度的要求，使换辊后的第一卷带钢就能得到良好的板形，而且轧制产品的规格也不必受严格限制。

HC 轧机的缺点是轧辊轴向抽动后，辊面接触线缩短，平均辊间压力增大。特别是在辊端接触处会形成局部压力尖峰，致使辊耗增加。此外，轧机结构复杂，投资较大。

2. CVC 轧机

CVC 轧机是德国西马克公司于 80 年代初开发的新机型[16]。这种轧机的特点是采用了特殊的 S 型轧辊，上下辊形状相同，但左右倒向配置，并可按相反方向同时作轴向移动。四辊 CVC 轧辊的轴向抽动将直接改变辊缝的几何形状（图 2.3）。六辊 CVC（图 2.4）用这种辊作中间辊时，可以调整工作辊的弯曲变形，从而改变实际辊缝凸度。工作辊（四辊 CVC）和中间辊（六辊 CVC）均设正负弯辊。

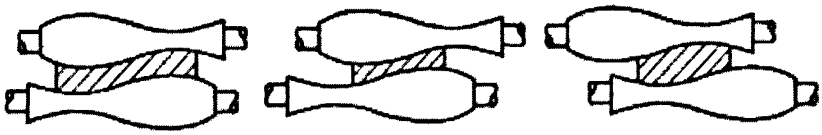


图2.3 CVC系统原理
Fig.2.3 CVC system theory

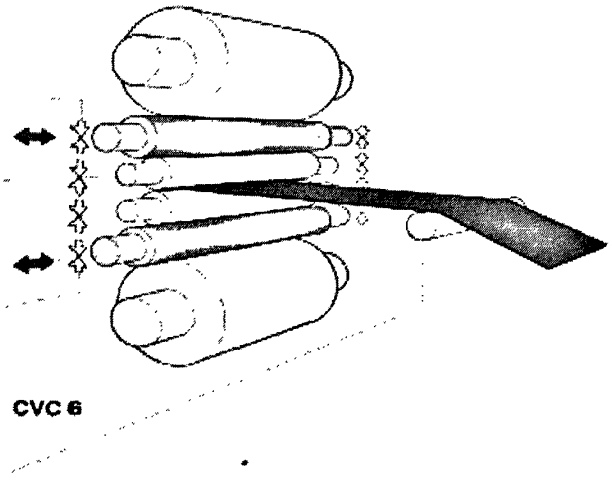


图2.4 6辊CVC示意图
Fig.2.4 6rolls CVC

CVC 轧机自开发成功以来，由于其一系列的优点，获得了迅速的推广。首先，不仅辊凸度可调的范围大，而且能连续调节。在轧制不同凸度要求的产品时，对于普通轧机，需储备多种具有不同原始凸度的轧辊，而用 CVC 轧机，通过工作辊的轴向移动，只需一对轧辊即可满足要求，从而减少了轧辊的储备量。其次，CVC 轧机具有良好的

带钢板形控制能力和稳定性，可以利用调整弯辊力、CVC 辊轴向移动、分区冷轧等几个方面，求得最佳辊缝，得到最佳平直度。最后，由于 CVC 轧机使弯辊力始终处于比较小的状态，降低了弯辊力，提高轧辊和轴承的使用寿命。

CVC 轧机的主要优点：

(1) 凸度调节范围大。调整 CVC 辊型参数可直接改变调节区域和调节幅度；

(2) 辊间接触压力变化不大，但压力分布有些变化。平均接触压力与普通四辊相同；

(3) 可以动态调整。CVC 辊的抽动可以在轧制过程中进行，参与板形闭环控制；

(4) 板形控制能力较强。CVC 辊的抽动与弯辊力的配合，可以有效纠正板形缺陷。

CVC 轧机的缺点是辊型复杂，磨削难度大，适用轧制较宽产品。为了弥补 CVC 轧机的缺点，西马克公司又开发了 ESS 辊。ESS 辊一段仍为 CVC 曲线，但另一段为平辊。当使用 ESS 辊时，CVC 轧机的使用方法与 HC 轧机类似：生产前按照来料宽度进行轧辊串动预设定，在线不能调整。

2.1.2 板形轧机的执行机构

为了获得良好的板形，人们起初是从工艺上着手，通过设定初始辊缝形状，改变轧制规程及调整热凸度等方法进行了种种尝试，然而这些调节手段都普遍存在着响应速度慢，不能实现在线的即时控制等不足之处[17]。鉴于这种情况，人们的眼光开始转向了轧机本身，从设备的结构出发，开发设计出装备有各种执行机构的板形控制轧机。以下是根据不同的板形控制手段，分别对各种板形控制轧机的构造及特征作一些简要的介绍。

1. 弯辊

(1) 垂直弯辊

为控制板凸度，最直接的想法是改变两个工作辊在垂直方向上的间隙，故此开发出工作辊垂直方向可弯曲轧机。对四辊轧机而言，根据具体设备和工艺条件的不同，可进行工作辊弯辊，如图 2.5 所示。弯辊方式可选用正弯，也可选用负弯。对于六辊轧机而言，除了工作辊弯辊，还可选用中间辊弯辊。

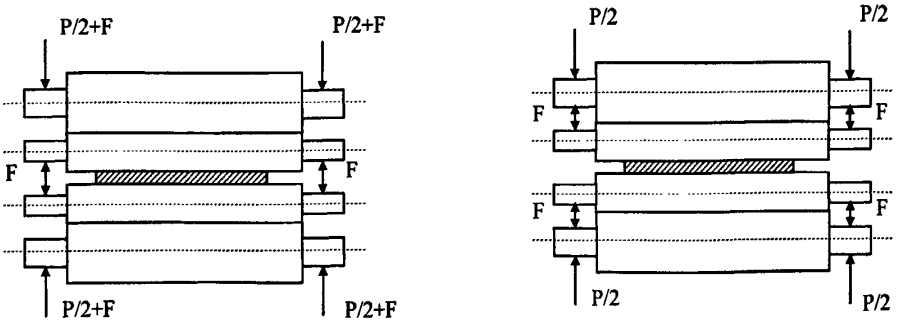


图2.5 液压弯辊示意图

Fig.2.5 Hydraulic roll bending

其中： a 工作辊正弯， b 工作辊负弯。

然而，采用垂直弯辊进行控制的轧机也存在不足之处，其一是当轧件宽度与工作辊直径的比值较大时，弯辊控制的效果不能达到板宽的中部；其二是弯辊能力的大小受到轧辊轴承能力，辊颈强度及轴承强度等诸因素的制约，解决第一个问题的措施，是在轧制宽薄带材采用小辊径工作辊时，除采用弯辊手段外，还利用其它控制手段如横移，中间辊弯辊及冷却水分段等进行综合控制。解决第二个问题的方法，可以采用双轴承座工作辊弯辊技术。

双轴承座工作辊弯辊是日本石川岛播磨工业公司于七十年代开发的一项改善液压弯辊控制能力的新技术。其原理为，针对普通单轴承座工作辊弯辊存在的问题，即工作辊轴承座应力和变形的不均等状况，将工作辊轴承座一分为二，内侧轴承座施加弯辊力，实现轧辊的正，负弯。由于内外轴承座的功能分开，弯辊力独立于平衡力进行调整，从而可以优化辊颈形状的设计，充分利用轴承座，轴承及辊颈的强度，增大弯辊能力，扩大轧机的凸度控制范围。

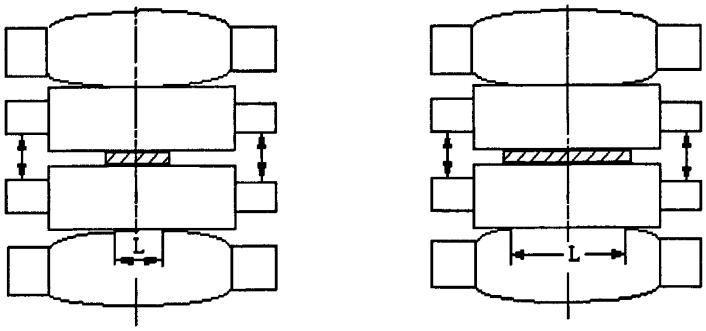
由于双轴承座工作辊弯辊技术对原有设备改动不大，且有比较明显的控制效果，故该项技术在热带连轧机，冷带连轧机，单机架板带冷轧机及平整机等多种型式的轧机上得到应用。

普通四辊轧机的实验及理论分析均表明，工作辊和支撑辊之间存在着有害弯曲接触区。记载板宽范围之外的支撑辊与工作辊的接触压力对工作辊形成有害弯矩，使工作辊弯曲，从而影响着轧后板凸度的大小。板越窄，这种板宽范围以外的接触区域越大，由此带来的有害弯矩也就越大，从而引起的轧辊挠曲量也越大。此外板宽范围之外工作辊与支撑辊的相互接触还限制了弯辊效果的正常发挥。基于以上原因，开发了双阶梯支撑辊 BMC 和大凸度支撑辊 NBCM。

双阶梯支撑辊 BCM，是将支撑辊加工成双阶梯形，使在板宽之外支撑辊与工作辊间完全脱离接触，从而排除有害弯矩对工作辊的影响，扩大工作辊弯辊的效果，不过双阶梯支撑辊存在的一点致命问题是，一旦双阶梯加工完备，则其长度将保持不变，然而轧制过程中所轧产品的宽度却不是恒定不变的，要适应不同宽度的轧件，在生产中瞬时的改变双阶梯支撑辊的阶梯长度显然是不切实际的。

大凸度支撑辊 NBCM，是采用大凸度支撑辊解决双阶梯支撑辊不能适应不同板宽轧制问题的方法。它是利用轧制不同宽度带钢时轧制力不同这一特点，并从 HC 轧机工作原理得到启发而研制成功的，工作原理如图 2.6 所示。使用大凸度支撑辊，轧制宽带钢时，轧制压力较大，工作辊与支撑辊之间的接触长度也较长；而当轧制窄带钢时，轧制压力较小，使得工作辊与支撑辊之间的接触压扁减小，从而导致两辊间接触长度缩短。由此，辊间接触长度可随板宽不同而变化，增大了轧机可轧带钢宽度范围。在相同轧制

条件下，轧制窄带或宽带时，工作辊挠度曲线可以基本保持不变，因此，NBCM 是实现自由宽度轧制的关键轧机之一。



(a) 窄带　　(b) 宽带

图2.6 NBCM轧制原理
Fig.2.6 Control principle of NBCM

研究证明，NBCM 布置于下游机架可明显增大板凸度控制能力，提高弯辊效率，可实现精轧工作辊的无辊型轧制。在精轧机组中，上游机架采用板凸度控制能力很强的 CVC 轧机，末架或后两架轧机采用工作辊（强力）弯辊装置，再与 NBCM 技术相结合，其板凸度控制能力可与 6 辊轧机或对辊交叉轧机相当，而投资比 6 辊轧机或对辊交叉轧机少。

(2) 水平弯辊

在水平方向上对工作辊施加弯辊力，利用控制工作辊轧制是在垂直面上的变形差，实现轧件宽度上的板厚控制。基于此原理开发了平直度自由控制轧机 FFC 轧机(Flatness Control Mill)。该轧机由上下支撑辊，上大直径工作辊，下小直径工作辊，下中间辊及水平弯曲辊和组合支撑辊后面的液压缸总水平推力及分布，经水平弯曲辊传递，即可任意的控制小直径工作辊的水平挠度，从而实现对各种形状的变形控制。

2. 轧辊横移

作为横移轧机的先驱代表，当首推日本日立公司于 20 世纪七十年代初期开发的 HC 轧机(Hitachi High Crown Control Mill)，如图 2.7 所示。工作辊可进行弯辊，而中间辊则可沿轴向进行左右移动。通过上下中间辊沿相反方向的相对横移，改变工作辊与中间辊的接触长度，使工作辊和支撑辊在板宽范围之外脱离接触，从而有效的消除了有害接触弯矩，与此同时也增加了工作辊弯辊的控制效果。

在生产中，为了轧制更宽更薄及更精的带材，需要采用小辊径的工作辊，并增加高次板形缺陷的控制手段。于是，在 HC 轧机的基础上又发展起来一种新型的轧机，即 UC 轧机(Universal Crown Control Mill)[18]。采用小辊径工作辊的 HC 轧机，由于其刚度不足，结果导致所轧带钢边部厚度与中间不一致，出现复杂波形，而 UC 轧机的控制是

十分有效的。UC 轧机各控制手段的分工如下：中间辊弯辊控制带钢的二次板形；工作辊弯辊控制带钢的四次板形；中间辊横移则起着中间影响的作用，并可扩大中间辊和工作辊的控制效果。上述控制手段相互结合，即可对生产中所出现的各种板形缺陷实现有效的控制。

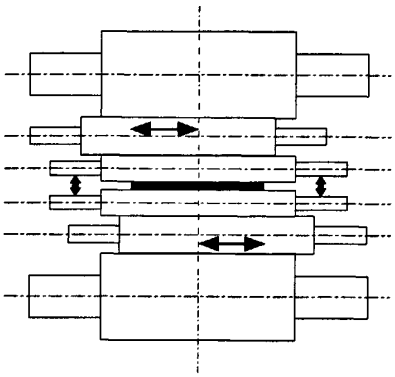


图2.7 HC轧机
Fig.2.7 HC mill

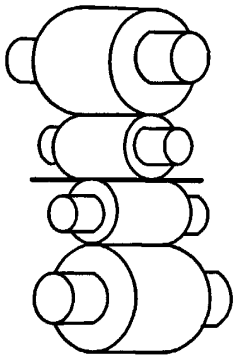


图2.8 对辊交叉(PC)轧机
Fig.2.8 PC mill

3. 轧辊交叉

PC 轧机(Pair Cross Mill)是日本新日铁和三菱重工公司共同开发的板凸度控制设备，是轧辊成对交叉的 4 辊轧机，轧辊交叉角为 0～1.2°，如图 2.8 所示。成对交叉轧机的工作原理是：成对的工作辊和支撑辊交叉，使得轧辊辊缝呈抛物线形，相当于工作辊具有原始凸度，这种当量轧辊凸度C_r可用下式表示：

$$C_r = \frac{b^2 \tan^2 \theta}{2D_w} = \frac{b^2}{2D_w}\theta^2 \tag{2.1}$$

式中：b：带钢宽度，单位 mm，θ：为交叉角，单位 rad，D_w：为工作辊直径，单位 mm。

通过调整工作辊交叉角θ即可改变轧辊凸度，当轧辊交叉角为 1.0°时，轧辊凸度可达 1000μm。初始轧辊凸度是传统热带钢轧机编排轧制计划的主要限制因素，若要获得良好板形，需根据所轧带钢的材质和规格优化轧辊凸度设计及交叉角设定[19]。

概括起来，PC 轧机具有下列特点：板凸度控制范围广，居所有板凸度控制轧机之首；通过调整轧辊交叉角，实现轧辊凸度的变化，这样，用一种辊型即可轧制不同规格的带钢；在精轧机组的后几架轧机可实行大压下率轧制。但 PC 轧机需要安装角度调整和侧推力支撑两套机构，结构复杂，造价高，且轴向力大(一般为轧制力的 5%～10%)。

4. 分段冷却

冷轧生产中，轧件塑性变形以及轧件与轧辊摩擦所产生的热能使轧辊的温度升高，从而使轧辊产生热凸度，以至难以获得平坦的带钢和形状满意的产品。因此，必须对轧辊的温度场和热变形进行深入的研究。同时应对轧辊的温度场实施有效的控制。

轧制过程中，轧辊的温度变化是一个热交换过程，轧件塑性变形所产生的热量、轧辊与轧件接触摩擦所产生的热量使工作辊温度升高，正常轧制时，工作辊表面有空气、冷却液对其进行冷却，此外工作辊与支撑辊接触，使工作辊温度降低。

工作辊轴向温度在与带钢相接触的中间大部分范围内温度基本相同。在靠近带钢边缘部位，温度迅速下降。

换辊或停机一段时间的轧机在开轧的初期，轧辊从轧件吸收的热量大于向冷却剂和周围空气排出的热量，轧辊温度逐渐升高，热凸度不断增大。稳定轧制后，轧辊吸收的热量和排出的热量相等，处于平衡状态，轧辊热凸度保持一个稳定值。

轧辊的热凸度对板形的影响非常大，轧辊的热凸度主要还是靠冷却液来控制。一方面控制辊温沿辊身的分布，以控制热凸度。另一方面控制辊温，减轻辊面龟裂。

分段冷却是最有效的控制方法[20]，通过改变冷却液流量沿辊身方向的分布来实现这一目的。提高冷却剂对轧辊的冷却能力，可设法增大传热系数。要选择合适的喷嘴并且合理地布置喷嘴。水流密度越大，传热系数越大。

2.2 首钢 1850 冷连轧板形轧机

2.2.1 首钢 1850 冷连轧机组

首钢 1850 酸洗一冷轧联合机组，选用了当今世界上最先进的生产工艺，机组设备由德国 SMS-Demag 公司和日本 TMEIC 公司提供，电气系统由德国 Siemens 公司提供。机组产品以汽车用板为标志产品，工艺配置和装备选型都是按照生产汽车用板设计的，同时还可以大批量生产家电用板。

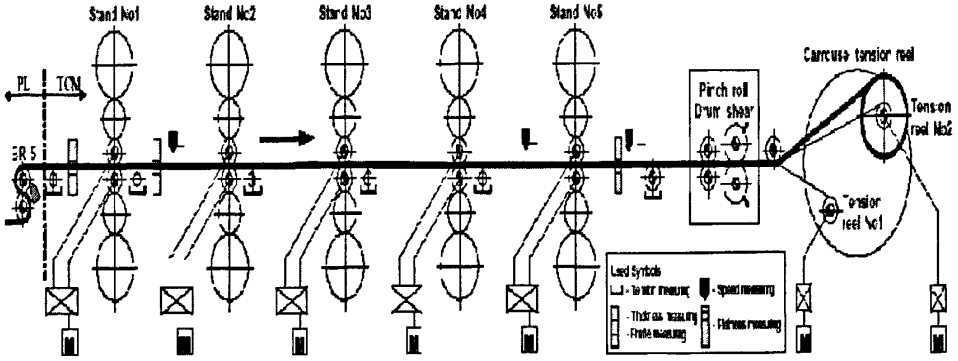


图2.9 首钢1850冷连轧机组
Fig.2.9 Shougang1850 tandem cold mill

工艺特点：

酸洗段采用的是浅槽紊流酸洗，与传统的深槽酸洗相比，可以使整个机组的张力达到最优化，另外由于酸槽内液位比较低，有利于酸液的循环和充分利用，并且缩短酸洗时间，提高酸洗质量。酸洗机组还配有酸洗工艺模型。通过工艺模型对生产过程进行控制，可以提高带钢表面的酸洗质量，减少维护费用，同时使热能消耗和酸液消耗实现最优化。

轧机段采用的是五机架六辊 CVC^{PLUS} 轧机，中间辊的辊身曲线是五次方 CVC 曲线，支撑辊的辊身曲线是高次方 CVC 补偿曲线，从而大大增强了轧机的板形控制能力。另外，在 1、2 机架的前面和 5 机架的后面配有测厚仪，在第 1 机架的后面和 5 机架的前后配有激光测速仪，在 5 机架的后面还配有板形仪，这些仪表的配备提高了轧机的厚度控制和板形控制的精度。另外，在 AGC 控制上，引入了扩展秒流量的概念，从而提高了 AGC 的控制精度。

主要参数：

表2.1 首钢1850冷连轧机组参数

Table 2.1 Shougang1850 tandem cold mill parameter

产品规格		机组速度		设备参数	
主要产品	CQ、DQ、DDQ、EDDQ、SEDDQ、HSS、BH、DP、TRIP	入口段	Max. 700m/min	酸洗能力	Max. 600t/h
来料厚度	1.6～6.0mm	酸洗段	Max. 230m/min	轧制压力	Max. 33000KN
来料宽度	800～1900mm	切边剪	Max. 260m/min	工作辊直径	Φ480～Φ560
成品厚度	0.2～2.5mm	轧机段	Max. 1400m/min	中间辊直径	Φ570～Φ650
成品宽度	800～1870mm	出口段	Max. 1470m/min	支撑辊直径	Φ1300～Φ1465

2.2.2 首钢 1850 六辊 CVC^{plus} 轧机

首钢 1850 冷连轧机选用西马克—德马格公司开发的五机架 6 辊 CVCplus 轧机。CVCplus 轧机是在传统 CVC 轧机的基础上发展起来的，它与传统 CVC 轧机相比，轧辊的曲线形状得到了改进，因此对带钢的凸度和平坦度控制效果更好。特别适合控制带钢的复合浪形，适合轧制宽规格、硬质、大压下率的产品。

1. 轧辊

首钢 1850 六辊 CVC^{plus} 轧机的工作辊采用圆柱辊形，易于轧辊的磨削；支撑辊、中间辊均为 CVC^{plus} 辊形，利于板形控制。

轧辊尺寸：（辊身直径×辊身长度）

工作辊：Φ480~Φ560×1970mm；

中间辊：Φ570~Φ650×2540mm；

支撑辊：Φ1300~Φ1465×1970mm。

(1) 工作辊

冷轧机上的工作辊直接与带钢接触。冷轧工作辊在很大的静载荷和动载荷下工作，轧辊表面与轧材之间存在着巨大的摩擦力，使辊面迅速拉毛，加剧了摩擦并出现了疲劳裂纹，同时生产中不可避免的轧钢事故，如跑偏、打滑等，甚至可能产生高于相应点温度的热冲击，使轧钢瞬间损坏。这些条件决定了冷轧工作辊必须具备下列性能：

(a) 具有较高的抗断裂和抗剥落性能；

(b) 具有较高的抗热冲击（抗网状裂纹）和抗事故的能力；

(c) 具有很高的耐磨性能，从而保证钢板的表面质量。

因此，冷轧辊要具有高表面硬度、良好的抗热冲击性、抗剥落性和耐磨性。

(2) 中间辊

中间辊硬度选择主要考虑以下两因素：

(a) 从保持中间辊 CVC 曲线形状的角度出发，中间辊材质的硬度应尽可能大些，以减少生产中 CVC 辊表面的磨损。

(b) 从轧制带钢的质量考虑，为防止异物落入时，工作辊表面受到损伤，从而影响带钢质量，考虑中间辊的硬度应比工作辊低。

(3) 支撑辊

在使用支承辊时，其最重要的技术要求是：

(a) 辊面具有较高的屈服极限和疲劳强度，以抵抗剥落。

(b) 足够的辊面硬度以抵抗中间辊对其造成的磨损。

(c) 辊面材料应具有一定的抗冲击性能，以避免钢板卷入工作辊与支承辊之间的意外事故导致辊面严重烧伤。

(d) 辊芯具有较高强韧性和较低内应力，避免负荷突然增加引起断辊。

支承辊一般采用复合锻钢轧辊，由于不直接与钢板接触，不需要更高的耐磨性和热强性，而需要更高的韧性、抗剥落性。

2. 液压弯辊

液压弯辊法是 20 世纪 60 年代发展起来的一种控制带钢板形的有效方法。它是通过液压弯辊系统对工作辊或中间辊端部附加一可变的弯曲力，使轧辊弯曲来控制凸度以校正带钢的板形。液压弯辊法可使轧辊瞬时凸度量在一定范围内迅速地变化，且能连续完成调整动作，有利于实现板形调整的自动化。

首钢 1850 冷连轧机组，采用的液压弯辊装置为以下四种形式：正弯工作辊、负弯工作辊、正弯中间辊和负弯中间辊。正弯工作辊的弯辊装置安装在工作辊轴承座之间，产生的弯辊力与轧制力同向，使工作辊产生的挠曲与由轧制力引起的挠曲方向相反，如在轧制过程中带钢出现对称波浪时，则采用该形式的弯辊装置；负弯工作辊的弯辊装置

安装在工作辊轴承座和中间辊轴承座之间，对工作辊轴承座附加一个与轧制力方向相反的作用力，使工作辊产生的挠曲与由轧制力引起工作辊的挠曲方向相同。如带钢横断面出现中间波浪时，则采用负弯辊装置来校正板形。

液压弯辊技术是获得良好板形，最有用、最基本的方法。而实现液压弯辊，设备上就要采用液压缸和弯辊块，而且轧辊的平衡装置也需用液压缸。

功能：液压缸块：用来安放上支撑辊平衡液压缸、中间辊弯辊液压缸。

弯辊块：安放工作辊和中间辊轴承座以及工作辊弯辊液压缸。

位置：液压缸块固定在牌坊上；弯辊块在液压缸块中垂直运动。

(1) 液压缸块

4 个液压缸块，材料是经过热处理的锻钢。在液压缸块内，有 8 个带有滑套和紧固元件的导槽，引导工作辊弯辊块。4 个液压缸块中共有 4 个上支撑辊平衡液压缸和 16 个中间辊弯辊液压缸。

(2) 弯辊块

8 个工作辊弯辊块，材料是经过热处理的锻钢，衬有青铜。在液压缸块内垂直运动。另外，8 个中间辊弯辊块，材料也是经过热处理的锻钢，衬有青铜。在液压缸块内垂直运动。每两个工作辊弯辊块内有一个弯辊缸（共 4 个工作辊弯辊液压缸）。

技术数据：每边支撑辊辊颈上的平衡力： 大约 500KN，每边工作辊辊颈上的弯辊力：约+ 500/-350 kN，每边中间辊辊颈上的弯辊力：约+ 650/-450 kN，弯辊液压缸类型：差动油缸，平衡液压缸类型：差动油缸。

工作辊和中间辊径向轴承的油气润滑采用的是自动接头，安装在弯辊块上。两个中间辊轴承座定位板安放在入口操作侧。

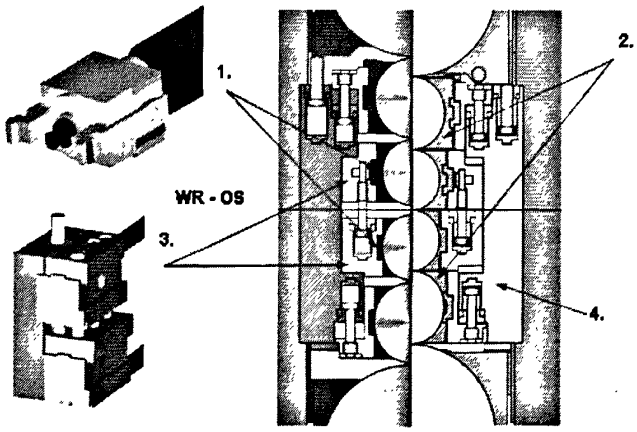


图2.10 弯辊块示意图
Fig.2.10 Roll bending block

3. 中间辊窜辊系统

首钢 1850 冷连轧机组采用 6 辊 CVC^{plus} 轧机，中间辊带辊形。CVC^{plus} 轧机可以通过中间辊的轴向横移得到最佳的辊缝形状。CVC^{plus} 窜辊系统在轧制过程中，根据来自二级机的指令而自动动作。或者在换辊期间，根据来自主控室操作工的命令而动作。当轧辊在轧机内到达最终的指定位置后，中间辊窜辊系统将自动锁住中间辊轴承座。轧制过程中，在承受额定载荷和速度的时候，中间辊可以根据指令横移。

位置：安装在轧机驱动侧中间辊弯辊块上。

技术数据：横移驱动（每根辊）：两个液压缸（每一个液压缸配有位置传感器），位置精度:- 0.5 mm，窜辊行程：+/- 200 mm（CVC+）。

在驱动侧，通过锁销向中间辊辊颈传递横移力,中间辊窜辊系统的润滑采用手动干油润滑。除锁紧缸外，其他所有动作都采用高压液压伺服系统控制。

每个窜辊系统包括两套窜辊装置，一套用于上中间辊，一套用于下中间辊；每套窜辊装置由两个横移单元组成，它们分别被固定在入口和出口侧中间辊的弯辊块上。

每个横移单元的组成：

(1) 一个带滑衬的钢结构支架，用于安放可移动锁紧块和液压缸的附件。

(2) 一个液压缸，用来窜动锁紧块。一个钢制锁紧块，带有衬套和锁定销。

(3) 连接润滑油油路和中间辊轴承座的润滑油接头，用于对轴向轴承的润滑。

(4) 连接润滑油油路和中间辊轴承座的油气润滑接头，用于对径向轴承的润滑。

(5) 一个附在锁紧块上的液压缸，用于在换辊时驱动锁定销和介质接头。

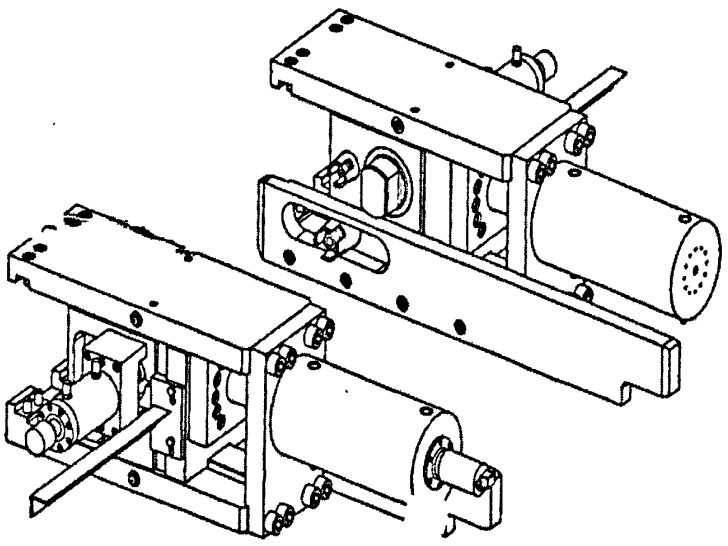


图2.11 中间辊窜辊机构示意图
Fig.2.11 IR shifting structure

4. 五机架分段冷却的喷淋装置

分段冷却控制法是通过对轧辊热凸度的控制来改善板形的一种传统控制方法。将冷却系统沿工作辊轴向分成若干区段，调节沿辊身长度冷却液流量的分布来改变轧辊温度的分布，从而调节热凸度的大小，达到控制板形的目的。例如，当出现中间波浪时，加大中间段（或减小两侧）冷却液的流量，以减少轧辊的热凸度；当带钢两边出现波浪时，减小中间段（或加大两侧）冷却液的流量，以加大轧辊的热凸度，使板形得到改善。

首钢1850冷连轧机组5#机架入口工作辊及其辊缝的润滑和冷却为精细冷却，分38个区，通过152（4×38）个电磁先导气动通断阀控制，用于轧制板形的闭环控制。工作辊辊缝润滑和上工作辊辊身选择性冷却，通过温度变化，改变轧辊辊身凸度，进而控制带钢的平直度。

位置：第五机架入口侧轧制线上、下方。

技术数据：

(1) 介质：乳化液；

(2) 喷梁喷嘴用于工作辊分段冷却：喷嘴指向轧辊辊身；

(3) 用于选择性工作辊冷却的喷淋阀：

(a) 类型：气压控制阀－材质为不锈钢；

(b) 控制压力：最大10bar。

(4)控制喷淋阀的控制阀：

(a) 类型：模块设计电磁阀，放在控制柜中；

(b) 控制阀的启动：通过板形平直度控制系统。

喷嘴的喷淋阀与喷梁连在一起，通过压缩空气启动。在闭环控制中，分段冷却装置的不同区域根据板形辊所给出的不同的信号而启动。

控制阀的构成：

控制阀为模块设计的电磁阀，放置在控制柜中；控制线的材质是塑料，敷设在控制柜和喷淋阀之间。

控制线按以下方式固定在喷淋阀上：

(1) 在喷梁后面的转接板用于在后面安装喷淋阀。这些转接板装备有快速插拔接头，避免了螺母等的使用。

(2) 如果要更换喷淋阀不需要拆卸控制线。

(3) 控制线的保护软管（标准液压软管）端部有软管接头连接，拆卸方便。保护软管与喷淋阀后面通过手动接头连接。

(4) 有用于控制下喷梁的控制线的软管通道。

第三章 首钢1850冷轧板形控制系统的设计

首钢冷连轧机组5个机架都设置了CVC系统，通过CVC^{plus}辊的在线可调轧辊辊型来提高轧机出口带钢凸度的可控性（利用弯辊和CVC^{plus}辊）。前4机架的板形控制为开环系统，按照目标板形曲线，调节执行机构。冷连轧的主要板形控制手段是板形反馈控制[21]，即在第5机架出口配置了独立的板形自动闭环控制系统，它共有如下几个组成部分：板形测量辊，信号处理电路，带钢应力分布显示监视器，板形控制计算机，转换和控制电路，液压控制系统和冷却控制系统。

3.1 首钢1850板形测量系统的设计

板形测量系统是板形控制系统的重要组成部分，是实现板形闭环控制的前提条件。测量数据的精确度对于板形控制的效果，起着很大的决定因素。板形检测难度较大，几乎所有能反应板形质量的物理量都被尝试用于板形检测方法的研究，测距法、测张法、电磁法、位移法、光学法等[22]。按板形仪与带钢的接触方式可将其分为两大类：与带钢直接接触的板形仪为接触式板形仪，不与带钢接触的为非接触式板形仪。板形的非接触式检测，由于外界干扰对检测信号影响很大，实际上获得的检测信号包含板宽、板厚、张力、轧制速度、温度、振动等多方面的干扰。因此，接触式板形仪的检测精度一般高于非接触式板形仪。

表3.1 板形仪
Table 3.1 Flatness meter

板形仪	工作原理	检测内容	特点
ABB	接触式，压磁传感器		冷轧使用最多
VIDIMON	接触式，空气动压轴承	张力分布	箔材、有色领域使用
PLANICIM	接触式，差动变压器位置传感器		传感器少，结构简单
BFI	接触式，压电石英晶体传感器		使用少
VOLLMER	接触钻石探头位移传感器		
NKK	非接触涡流测距式	波高(波浪度)	任何小张力生产线
BLD-91	非接触激光测距		
激光式（摹尔波形法）	非接触激光测距，扫描式工作	波高(延伸度)	热轧或冷轧精整用
激光式（三角法）	非接触激光测距，多点同步式工作	波高(纤维长度)	热轧或冷轧精整用

目前，常用的板形仪如表3.1 所示。首钢1850冷轧生产线选用了德国BFI高精度的接触式板形仪作为板形控制的反馈系统。通过板形辊里不同角度沿轴向分布的各个压电传感器，测量带钢横向的张力分布，从而反应出带钢的板形状况。BFI板形辊测量精度高，响应快、使用及维护方便，满足冷连轧机组生产时，板形闭环控制系统的要求。

3.1.1 板形测量原理

广义的板形包括带钢断面形状和平直度两个方面，就冷轧而言板形概念通常指带钢的平直度。冷轧带钢轧制过程中由于轧辊倾斜、弯曲、变形等原因造成带钢沿宽度方向上材料区延伸率不均匀，这种不均匀的延伸率在带钢出现的程度称为带钢的的平直度，即板形。带钢的板形用相对延伸率来ΔL / L 来表示，因此板形没有量纲为一比值。如图3.1 所示：

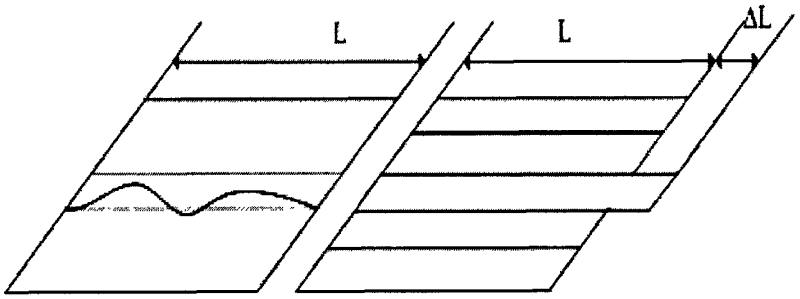


图3.1 带钢相对延伸率
Fig.3.1 Strip relative elongation

通常带钢的板形偏差用I单位来衡量，一个I单位为10-5（10μm/1m）。首钢顺义冷轧生产线选用的BFI高精度板形测量辊测量精度可达±1I单位，其完全满足冷轧工艺对带钢板形控制的要求。

相对延伸率定义为ΔL / L，而在冷轧生产线上运行中的带钢受到相当高的张力，带钢材料区长度变化在张力下与带钢张力在宽度方向上的张力分布成正比。板形测量辊和带钢有一定的包角，将带钢的张力传递给辊身，测量辊整个长度方向分为若干个测量区，每个测量区布置一个传感器，测量整个宽度上带钢张力的分布，从而可以得到带钢宽度上材料延伸率的分布，进一步得到带钢的板形[23]，如图3.2 所示。

各个测量区测得的径向力：

$$F_{Ri} = F_{Ti} * \left(2 * \sin \frac{\alpha}{2} \right) \tag{3.1}$$

平均径向力：

$$\overline{F}_R = \frac{1}{n} \sum_{n-1}^{n} F_{Ri} \tag{3.2}$$

其中：n为和带钢接触的有效测量区的数量。

那么，各个测量区的应力差为：

$$\Delta\sigma vi = \frac{F_{Ri} - \overline{F}_R}{\overline{F}_R} \times \frac{S}{A} \tag{3.3}$$

其中：S：带钢张力，A：带钢截面积。

根据材料的弹性模量E，可以计算出带钢的相对延伸率：

$$\sigma L/L = (-1) \times \Delta\sigma/E = \times I\text{单位} \tag{3.4}$$

若I单位为正数，表明测得的径向力比平均值小，相对延伸率大；若为负数，表明测得的径向力比平均值大，相对延伸率小。

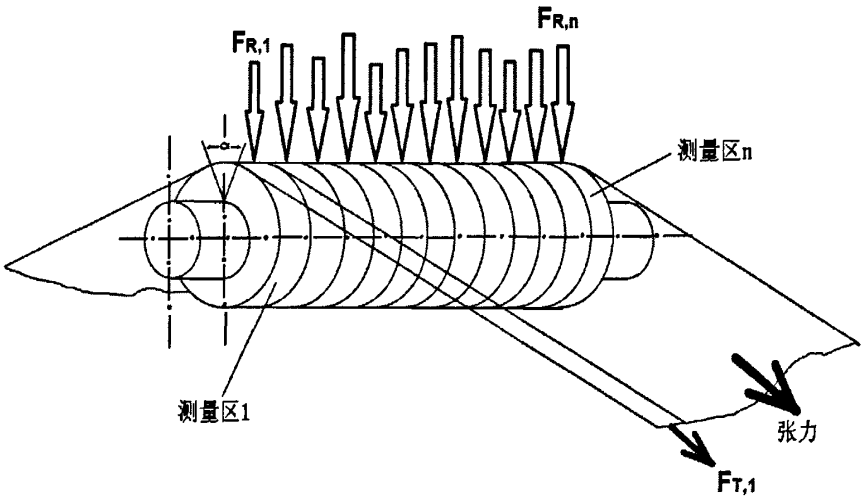


图3.2 板形测量原理
Fig.3.2 Strip flatness measuring theory

3.1.2 首钢1850冷轧板形测量系统的组成

首钢顺义冷轧生产线选用德国BFI高精度的板形测量系统，根据连轧机组板形的控制主要在5#机架完成的特点，板形测量辊设置在5#机架出口，通过反馈控制使冷轧成品带钢的板形偏差满足工艺设计的要求。

根据最大带钢宽度和预定的模型，BFI测量辊沿轴向分为若干个测量区。每个测量区布置一个测量传感器，置于辊子表面分立的孔中，这些孔用密封栓密封。密封栓带有一特殊的张紧螺丝，用于调节传感器所必须的预应力，从而使传感器工作在线性范围内。传感器和密封栓之间有一个大约为10－30μm宽的气隙，此气隙用一“O”形环封闭。这种结构确保传感器不受辊体应力的影响，不会出现由于辊子弯曲引起的力或其他扭矩作用于传感器而带来的测量误差，提高了测量辊子的测量精度。

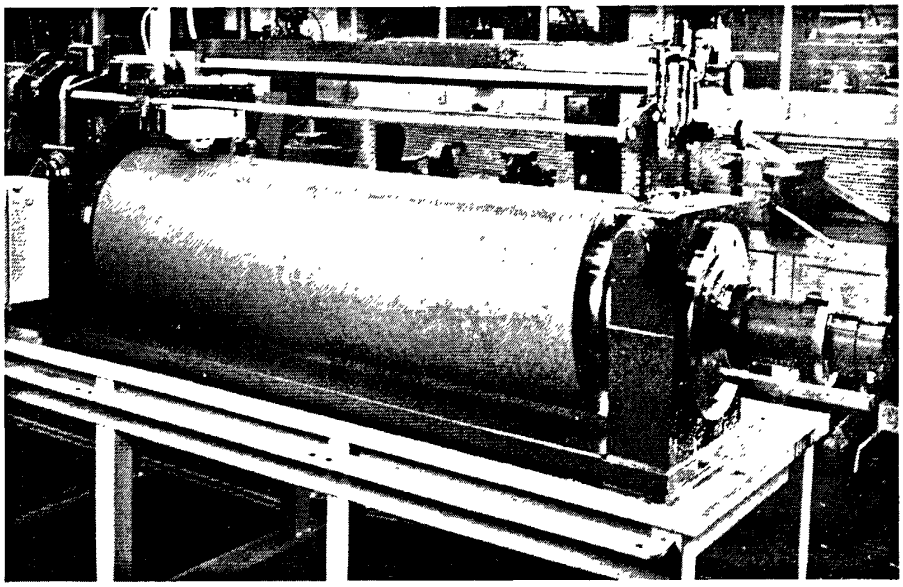


图 3.3 板形仪
Fig. 3.3 The shape meter

板形辊的测量传感器为压电式传感器，传感器产生的电荷与带钢张力的径向分量作用在传感器上的力成正比，这是板形测量的基础。压电晶体传感器在所有测量范围上具有较高的精度[24]，因此，它能用于高精度的板形测量系统中。

电荷放大器用来将压电传感器产生的电荷放大，可以根据带钢的张力自动切换量程，在测量辊圆周上没有传感器布置的角度位置上系统对电荷放大器进行标定。它固定地连接到测量辊的传感器，与测量辊一起转动。由于压电传感器围绕辊子表面以恒定的角度参差排列，最多可以将 8 个传感器连接到一个电荷放大器。也就是在辊子圆周上某一角度，最多可以有 8 个传感器位于同一条轴线上。当传感器位于测量辊包角中心时传感器的测量值最大，一个增量位置传感器用来确定测量辊的角度位置。这样，传感器测得的值以确定的时间间隔（由位置传感器的脉冲给出）到达电荷放大器，电荷放大器的输出接到 A / D 转换器，将测量的模拟信号转换为数字信号[25]。然后，再用 PCM（脉冲码调制）编码器将数字信号进行编码后送到 PCM 光耦单元，A / D 转换器和 PCM 编码器也固定安装在测量辊上，和测量辊一起转动。

PCM 光耦装置为一特殊光耦装置，它由固定部分和旋转部分组成。固定部分和测量辊外的接线端子箱连接，旋转部分安装在测量辊上，和测量辊一起转动。通过光学耦合，它一方面将编码的测量信号送到测量辊外部电路，另一反面将外部电路的电源及控制信号送到测量辊内部电路，提供测量辊内电路所需电源和电荷放大器量程的切换。另外，PCM 光耦装置带有内设的位置传感器，该位置传感器输出两个信号，一个为记录测量辊转速的计数脉冲，一个为确定测量辊绝对角位置的同步脉冲。测量辊每转动一圈输出一个板形信号，从 PCM 光耦装置输出的测量信号经过一个接线端子箱连接到电气

室计算机柜内的 PCM 解码单元，解码后的测量信号通过以太网通信送到轧机板形控制 TDC，用于板形控制和显示[26]。

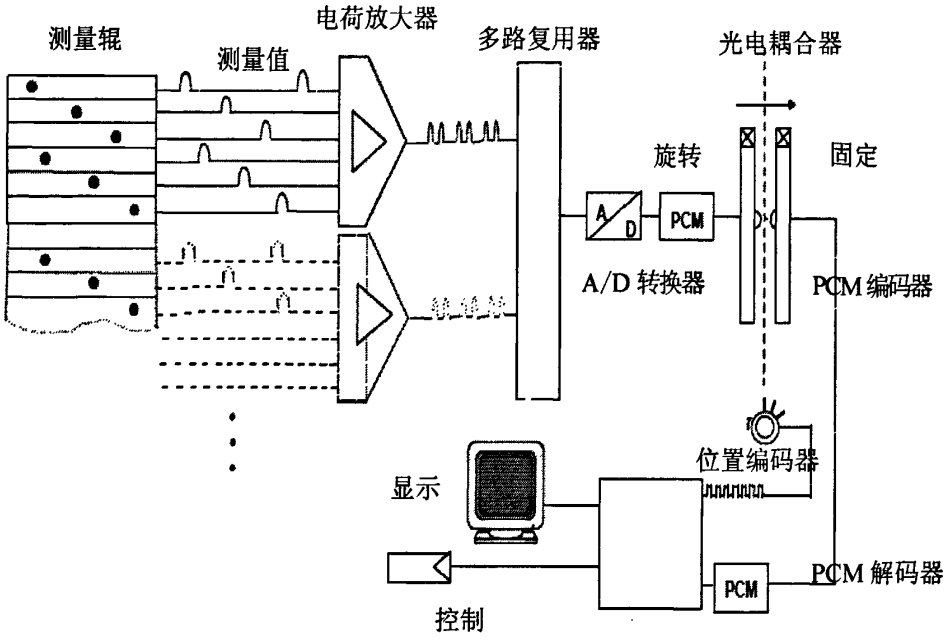


图3.4 板形测量系统
Fig. 3.4 Strip flatness measuring system

3.1.3 板形测量数据的处理

轧后带钢通过 BFI 测量辊时，各测量段上实测的径向力可以反映出横向不同位置带钢所受的张力大小，通过对测量数据进行处理分析，进而得出带钢板形的分布：

$$\Delta\varepsilon_i = \frac{\Delta\sigma_i}{E} = \frac{F_i - F}{E \cdot F} \cdot \frac{S}{A} = \frac{\sigma_i - \sigma_0}{E} \tag{3.5}$$

$$F = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^{n} F_i \tag{3.6}$$

式中：$\Delta\varepsilon_i$ 为延伸率，$\Delta\sigma_i$ 为应力偏差，σ_0 为平均应力，F_i 为实测径向力，F 为径向力平均值，E 为弹性模量，A 为带钢横截面积，S 为带钢总张力。

板形控制系统中，通常采用一个多项式对带钢的实测板形进行回归，将实测板形带入多项式进行正交分解，分解成一次，二次，三次，四次及高次板形分量，利用最小二成法求出多项式中的板形分量系数，$A_1 \sim A_4$，用以表示各板形分量的大小，板形控制过程中以板形分量系数的目标值和实测值的偏差作为调整值，利用轧辊倾斜，弯辊，轧辊横移，分段冷却来消除各种板形缺陷。

$$\beta(i) = f(i) + \varepsilon(i) = A_0 \cdot \phi_0(i) + A_1 \cdot \phi_1(i) + A_2 \cdot \phi_2(i) + A_3 \cdot \phi_3(i) + A_4 \cdot \phi_4(i) + \varepsilon(i) \tag{3.7}$$

$$\phi_0(i)=a \tag{3.8}$$

$$\phi_1(i)=b\cdot x(i) \tag{3.9}$$

$$\phi_2(i)=c\cdot x(i)^2+d \tag{3.10}$$

$$\phi_3(i)=e\cdot x(i)^3+f\cdot x(i) \tag{3.11}$$

$$\phi_4(i)=g\cdot x(i)^4+h\cdot x(i)^2+k \tag{3.12}$$

$$x(i)=\sin(i)\cdot\frac{2|i|-1}{2n-1} \qquad i=-n\sim n \qquad x=-1\sim 1 \tag{3.13}$$

式中：$\beta(i)$：为板形实测值，$\phi(i)$：为正交函数，A：为板形分量系数，$\varepsilon(x)$：为板形高次量，$a\sim k$板形计算参数。

由于板形检测辊的检测信号可能受到外部干扰的影响，因此在实测值处理程序中，要对板形仪各测量段实测数据进行确认，校正及平滑处理。将处理后的实测板形值$\Delta\varepsilon(i)$带入上面多项式中，构成一个超静定线性方程组，该方程组用矩阵可以表示为：

$$\begin{bmatrix}\phi_0(x_1) & \phi_1(x_1) & \phi_2(x_1) & \phi_3(x_1) & \phi_4(x_1)\\ \phi_0(x_2) & \phi_1(x_2) & \phi_2(x_2) & \phi_3(x_2) & \phi_4(x_2)\\ \phi_0(x_3) & \phi_1(x_3) & \phi_2(x_3) & \phi_3(x_3) & \phi_4(x_3)\\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot\\ \phi_0(x_n) & \phi_1(x_n) & \phi_2(x_n) & \phi_3(x_n) & \phi_4(x_n)\end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix}A_0\\A_1\\A_2\\A_3\\A_4\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\Delta\varepsilon_0\\\Delta\varepsilon_1\\\Delta\varepsilon_2\\\Delta\varepsilon_3\\\Delta\varepsilon_4\end{bmatrix} \tag{3.14}$$

通过求解这个方程组可以得到板形分量系数$A_0\sim A_4$，根据实测的板形系数与板形目标系数对应分量的偏差，由板形控制机构加以消除。

3.2 首钢1850板形控制系统的设计

首钢1850冷连轧机组在对带钢平坦度进行控制的过程中，为机组中的五架轧机均配备了工作辊和中间辊的弯辊、中间辊窜辊、支承辊倾斜及分段冷却等多种板形调节手段。其中前四机架用于板形的静态调整（预设定），最后一机架对带钢板形进行动态调节。板形预设定过程由二级过程计算机根据板形模型中设定的板形曲线进行各个机架板形调节机构的动作值设定。在带钢动态轧制时，西门子采用接触式板形辊反馈测量信号对带钢平坦度进行闭环控制，同时使用前馈轧制力补偿手段消除由于轧制力造成的板形影响。

3.2.1 板形控制系统组成

如图3.5所示：板形控制系统的控制器为Siemens64位高性能控制器SIMATIC TDC，测量装置为BFI高精度的板形测量辊。板形设定值通过二级系统中的轧机模型计算后给出并通过以太网送到TDC，TDC将板形设定值和板形辊反馈的实际值比较后将偏差值

送到各执行器进行板形调节。另外，为了便于操作人员的操作、标定及维护，板形控制系统配置了显示终端(HMI)，显示板形辊每个测量区张力的分布及各种板形调节执行器的执行效率。

二级计算机、HMI、TDC 控制系统及板形测量解码器 PCM 之间通过工业以太网传输数据和信息。 工业以太网是为工业应用而专门设计的，它是一种遵循国际标准 IEEE802.3(以太网)的开放式、多供应商、高性能的区域和单元级网络[27]。工业以太网将自动化系统相互连接，而且还可以将自动化系统连接到 PC 机和工作站上。板形控制系统的 PLC、工程师站及 HMI 就是连接在整个冷轧基础自动化网络上的。同时，工业以太网能够以高达 100Mbit/s 的速度实现广泛的、开放的网络解决方案。恰好能满足板形闭环控制，需要快速响应的通讯要求。

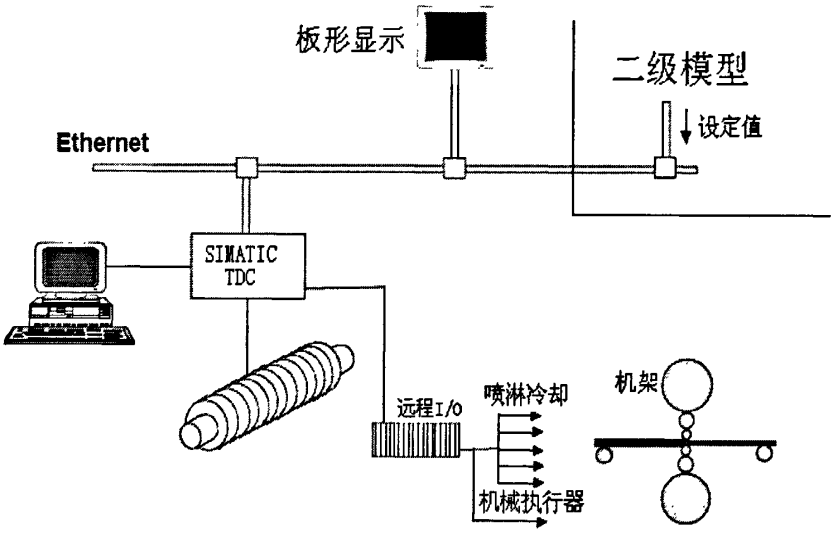


图3.5 板形控制系统组成
Fig. 3.5 Compositison of strip flatness control

板形控制器选用西门子公司 SIMATIC TDC（SIMATIC Technology and Drive Control），即工艺和驱动自动化系统[28]。SIMATIC TDC 擅长解决处理复杂的驱动、控制和通讯任务，在单一平台上拥有最大数量的框架和最短的循环周期。模块化的系统结构，硬件可扩展。采样时间间隔短，可达 100us，特别适用动态控制任务。这也正是冷连轧轧机各功能控制（如板形控制）选用 TDC 作为控制系统的原因之一。TDC 中央处理器采用 64 位结构，具有最大性能，同步多处理器运行，每个机架最多可有 20 个 CPU。板形控制功能就是由第 5 机架 TDC 控制系统的一个 CPU 控制模板来完成的。TDC 控制系统内部通讯，依靠 GDM 方式来完成。TDC 控制系统与外部的通讯，分别通过以太网、PROFIBUS-DP/MPI 模板来实现。现场 I/O 通过 SM500 信号模板连接。SIMATIC TDC

控制系统的软硬件组态，由STP7来实现。程序用图形化组态语言CFC（工艺图）和SFC（流程控制图）编制。

人机界面（HMI）系统，采用西门子SIMATIC WinCC软件组态。WinCC适用于工业领域，具有便捷高效的组态方法、开放式的标准。WinCC是西门子全集成自动化的组成部分，是用于实现SIMATIC PCS 7过程控制系统的可视化组件[29]。首钢1850冷连轧机组基础自动化HMI系统，采用多用户系统-客户机/服务器解决方案，服务器承担集中任务，例如多用户系统中各个站的过程通讯和归档以及项目数据的集中管理。客户机站使用服务器提供的服务，每个客户机站上的过程作业或消息确认对其它站都是同步的。各站可以协同运行。板形控制系统HMI集成在各个WinCC客户机上，可以非常便捷地对板形控制系统进行监视及参数调整。

3.2.2 带钢板形偏差的类型

冷轧带钢板形偏差多种多样，为了调节带钢板形偏差首先必须从带钢板形偏差分离出延伸率分布的情况，然后根据各种板形调节器的特点确定执行器的效率调节带钢板形到目标板形[30]。

板形偏差在带钢上出现时一般不会只是一种，多为各种板形偏差的叠加。带钢板形偏差的叠加和其对应的延伸率分布如图3.6所示。

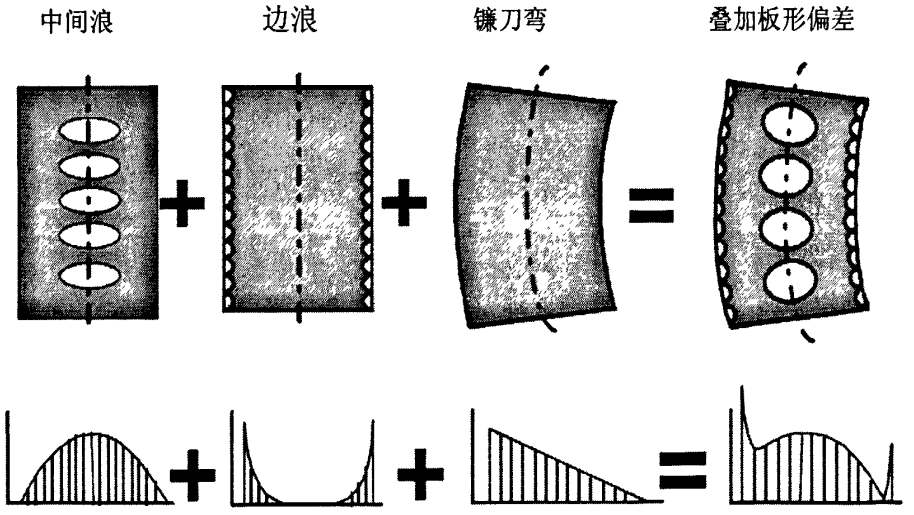


图3.6 板形偏差叠加
Fig. 3.6 Flatness deviation overlap

常见的板形偏差对应的材料延伸率分布如图3.7所示：

(1) 侧弯。带钢侧弯也称镰刀弯，是由于带钢伸长率在带钢宽度上从一侧向另一侧逐渐变大而形成的。

(2) 中浪。中浪也称为中波、松心等，是由于带钢伸长率在带钢宽度上从中心向两侧逐渐减小而形成的。

(3) 边浪。边浪也称为松边，是由于带钢在带钢宽度上从中心向两侧逐渐变大而形成的。单侧边浪又称为单边浪。

(4) 二肋浪。二肋浪是带钢伸长率沿着距带钢边侧的四分之一处直线局部增大的结果。

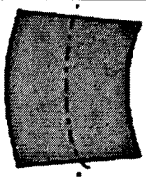
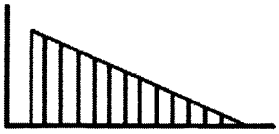
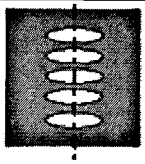
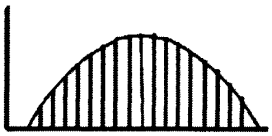
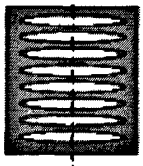
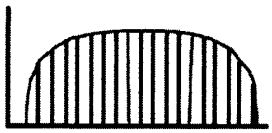
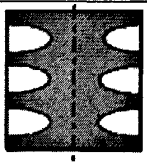
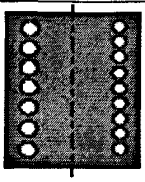
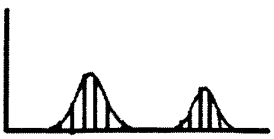
板形偏差名称	板形偏差	延伸率分布
镰刀弯		
二次中间浪		
高次中间浪		
二次边浪		
高次边浪		
四分之一浪		

图3.6 常见板形偏差
Fig. 3.6 The usual strip flatness deviation

3.2.3 板形偏差调节方法

首钢顺义1850冷连轧机为六辊轧机，中间辊带有CVC辊形，配置了支撑辊倾斜、中间辊弯辊、窜辊、工作辊窜辊及分段冷却等板形偏差调节方法。镰刀弯产生的原因是沿轧辊轴线方向的辊缝大小不一致，边浪是由于轧辊轴向中心部位凸度偏小造成带材边部偏薄造成。

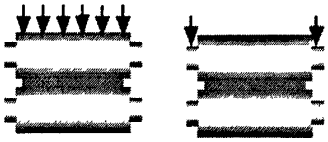
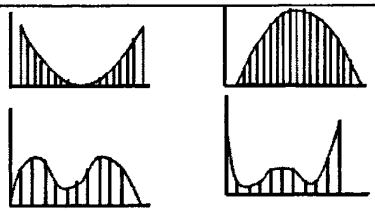
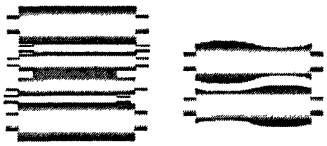
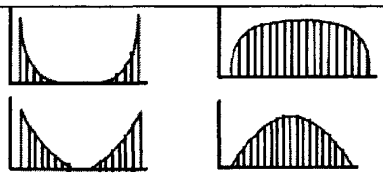
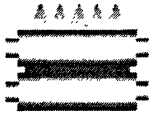
板形调节方法	执行单元	执行效率
轧辊倾斜		
轧辊弯辊		
轧辊窜辊		
分段冷却		

图3.8 冷轧板形调节方法
Fig. 3.8 cold rolling flatness adjustment

中心浪是由于轧辊轴向中心部位凸度偏大造成带材中心线部分偏薄造成 纠正这些缺陷，主要依靠，窜辊、弯辊等手段。不规则的板形缺陷主要依靠轧辊分段冷却控制纠正。各种板形偏差调节方法和执行器效率如图3.8所示。

3.2.4 首钢1850板形控制的实现

来自板形测量辊的带钢纵向张力偏差$\Delta\sigma(i)$测量信号送入TDC控制器[31]，TDC控制系统将该偏差量利用最小二乘法寻优算法，计算得到每个执行环节所需的控制量。西门子的执行器动作值计算模型如下：

$$F=\sum_{i=1}^{n}[g_i(\Delta\sigma_i-p_1(x_i)*v_1-p_2(x_i)*v_2-...)]^2 \qquad (3.15)$$

其中：F：目标函数表达式，gi：张应力偏差值的权重，P1 (xi)：执行器1在第i个测量区的执行效率，P2 (xi)：执行器2在第i个测量区的执行效率，v1：执行器1的动作量，v2：执行器2的动作量，n：所有有效测量区的数量。

在式3.15中P1，P2的计算是在测量辊进行标定的时候得出，其具体含义为外用标

定力与标定该区域时测量所得的实际标定力相比的比值。在用最小二乘进行动作量v1、v2的求解时要尽量使得动作量为常数以便执行机构完成控制动作。动作量计算完成后按照下面的控制系统图来生成执行器的实际控制量。

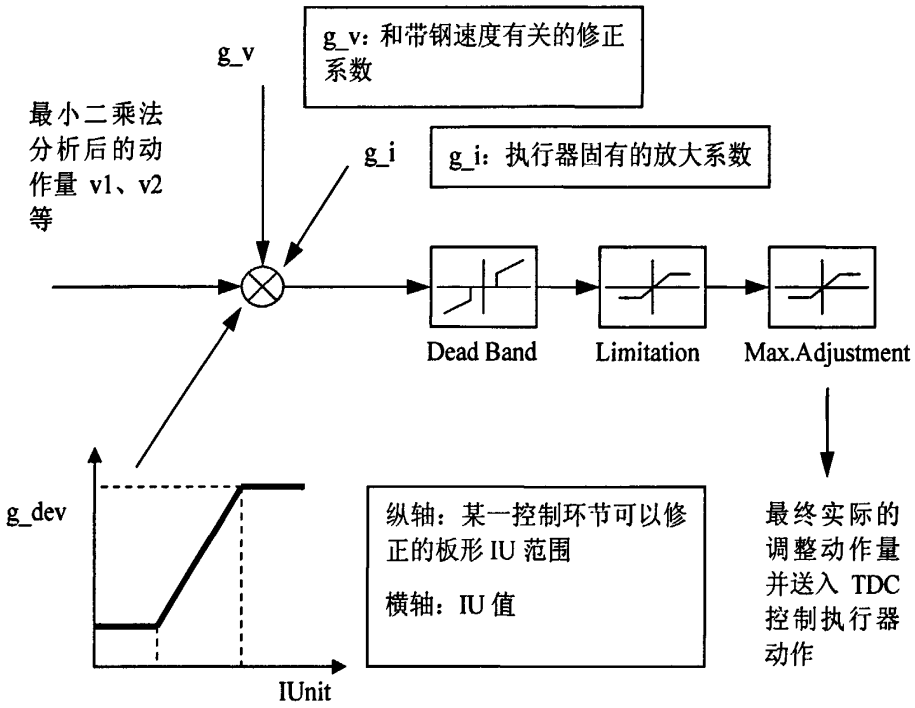


图 3.9 冷轧板形控制动作量转换系统图
Fig. 3.9 Cold rolling flatness control motion conversion

在图3.9中，Dead Band控制环节仅在弯辊控制时投入，即Vx为弯辊液压缸的动作量。该环节是一个死区控制环节，调节死区范围的大小可以改变使执行器动作的最小变化量ΔVx，从而避免执行器调节能力超限，并为和下一控制手段进行切换做准备。Max. Adjustment控制环节仅在窜辊控制时投入，即Vx为窜辊液压缸的动作量。该环节是为了保证窜辊的速度与最大窜辊量的匹配。窜辊速度和轧制速度是轧制力的函数，并且在某一轧制压力下，窜辊速度和轧制速度的比值是一定的，即不同的窜辊速度对应不同的轧制速度。同时窜辊速度与最大窜辊量也有一定的关系，所以在已知了轧制力的范围和某一轧制力下的轧制速度后，相应的窜辊速度和最大窜辊量也就确定下来了。实际的执行器控制动作量通过TDC控制系统下放动作信号给各个板形执行机构，图3.10为板形反馈控制执行手段示意图。

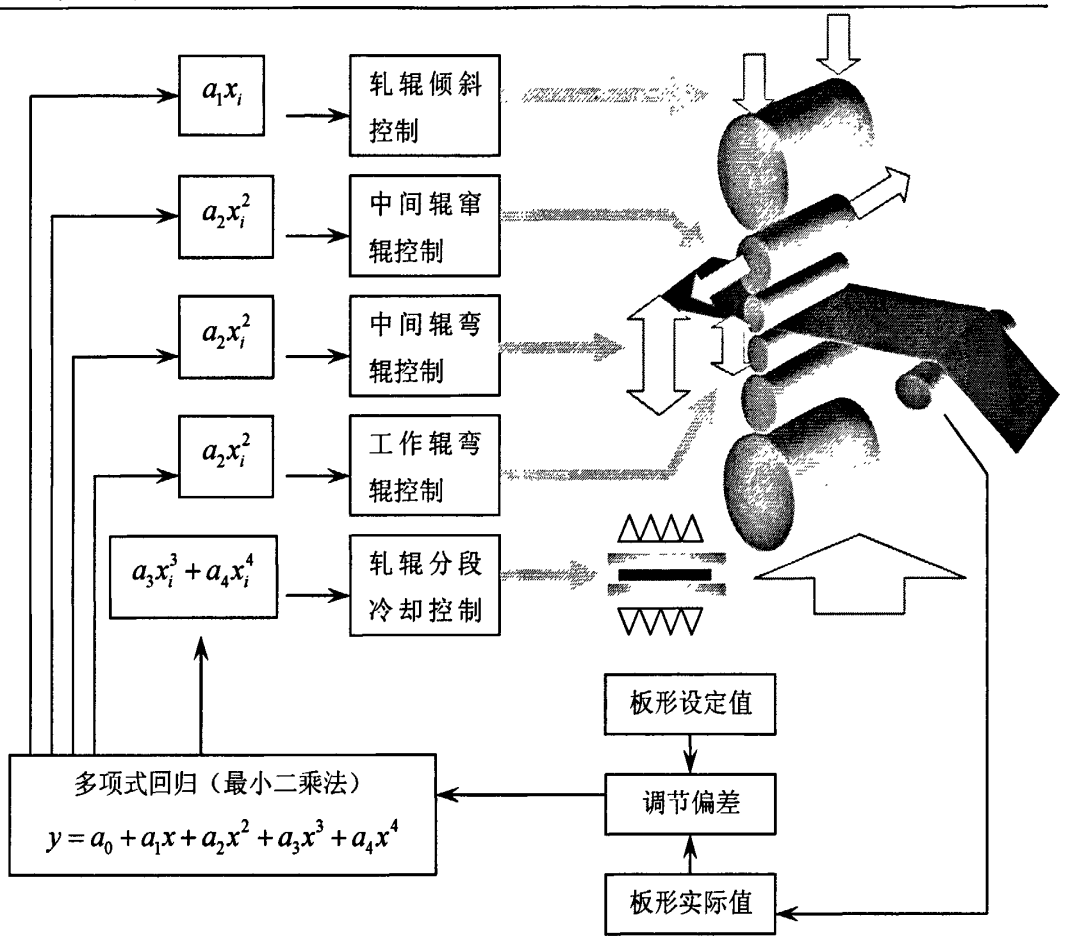


图 3.10 冷轧板形控制方式示意图
Fig. 3.10 Cold rolling flatness control method

1. 轧辊倾斜调节

轧辊倾斜调节用于消除非对称性的带钢断面形状（如锲形、单边浪）的平坦度缺陷，即回归多项式中的 a1x 分量[32]。该调节系统根据带钢左、右两边的不对称张应力分布，根据数学模型计算出轧辊倾斜的调节量，并与原轧辊倾斜设定值迭加，作为新的轧辊倾斜值输出给倾斜控制回路对轧辊的左右压下位置进行修正。

2. 工作辊弯辊和 CVC 位置调节

工作辊弯辊和 CVC 位置调节是用于消除对称带钢断面形状缺陷（如中间浪、两边浪等），即抛物线形状的平坦度缺陷，亦即回归多项式中的 $a2x^2$ 分量。

这个调节系统根据带钢两边的对称张应力分布，再根据数学模型计算出实际需要的轧辊弯辊力调节值[33]。由于带钢的断面形状各种各样，并且弯辊力对轧辊辊型的改变受到轴承强度的限制，其变化量是有限的，因而需要配置不同辊型不同凸度的 CVC 辊来适应多变的轧制参数。通过轴向移动轧辊就可获得各种不同的轧辊凸度。

带钢断面形状的二次缺陷（中间浪、两边浪）首先由工作辊弯辊装置来消除。但此时凸度调节范围有限，所以通过弯辊控制系统常常不能完全消除板形缺陷，为此亦需要

轴向移动轧辊来改变轧辊凸度，即由弯辊和 CVC 轴向移动系统来共同消除板形二次缺陷。通过工作辊弯辊和 CVC 轴向移动系统组成的闭环回路可扩大对轧辊辊缝形状进行调节的范围。

通常，当板形的二次缺陷在弯辊控制系统调节范围的 60%（该值是可调节的）以内时，仅通过弯辊控制系统来调节，因为弯辊动作快，调节简单；当超过调节范围的 60% 时，则需要投入 CVC 调节系统，以增加或减小轧辊凸度。这时工作辊弯辊和 CVC 位置轴向移动控制系统共同对二次板形缺陷进行调节。

3. 轧辊分段冷却控制

分段冷却主要用于消除其他带钢断面形状（如二肋浪等）的平坦度缺陷，即多项式中的分量 $a3x^3$，a4x4。由于三次、四次板形缺陷在整个板形缺陷中所占的比例较小，因而可以采用轧辊分段冷却来控制。

如前所述，轧辊辊身方向共有 38 个冷却区，对这些区段喷射不同剂量润滑及冷却剂即可控制每个测量段所对应的轧辊段的热膨胀量，从而得到不同的轧辊凸度。为此在 5 号机架工作辊上方横梁上安装了 152（4×38）个电磁先导气动通断阀控制，并通过它来控制每个冷却区的冷却量。每个冷却区的控制都可以单独进行。

在轧辊分段冷却控制系统中，根据与每个测量段上带钢张应力相对应的轧辊分段冷却分量按数学模型计算出每个冷却区的冷却设定值，同时要保证在轧制过程中轧辊在任何时候都有一个基本冷却量，该基本冷却量约为最大冷却量的三分之一。这两个冷却量迭加后作为每个冷却区实际的冷却量输出给下级控制装置，并由控制装置打开和关闭相应的控制阀，达到对板形控制的目的。

第四章 首钢1850控制系统的调试

通过前面几章对轧机板形控制系统组成、结构和控制调节执行机构的分析，以及对板形检测原理的研究，我们结合首钢 1850 冷轧机组实际，对西门子板形控制系统的参数进行优化，在实际应用中取得了明显的效果。

4.1 目标板形曲线的优化

如前面所述，在板形控制过程中，是把实际的板形曲线与理想的板形曲线相比较，以此差值做为控制量，进行板形自动控制。由此可见，理想的板形目标设定曲线是十分重要的，它的设定好坏，直接影响到板形自动控制的效果和可靠性。这种理想的板形目标曲线即所谓“板形目标设定曲线”，它用于近似地反映绝对延伸率或张力在板宽方向的目标分布。

在未应用板形仪之前，板形控制是通过设计辊型曲线来进行的，主要考虑轧制压力和轧辊温度。板形检测仪出现后，则通过目标曲线的设定来达到板形控制的目的。由于此曲线综合考虑了影响板形的诸方面因素，故具有综合的板形控制功能。

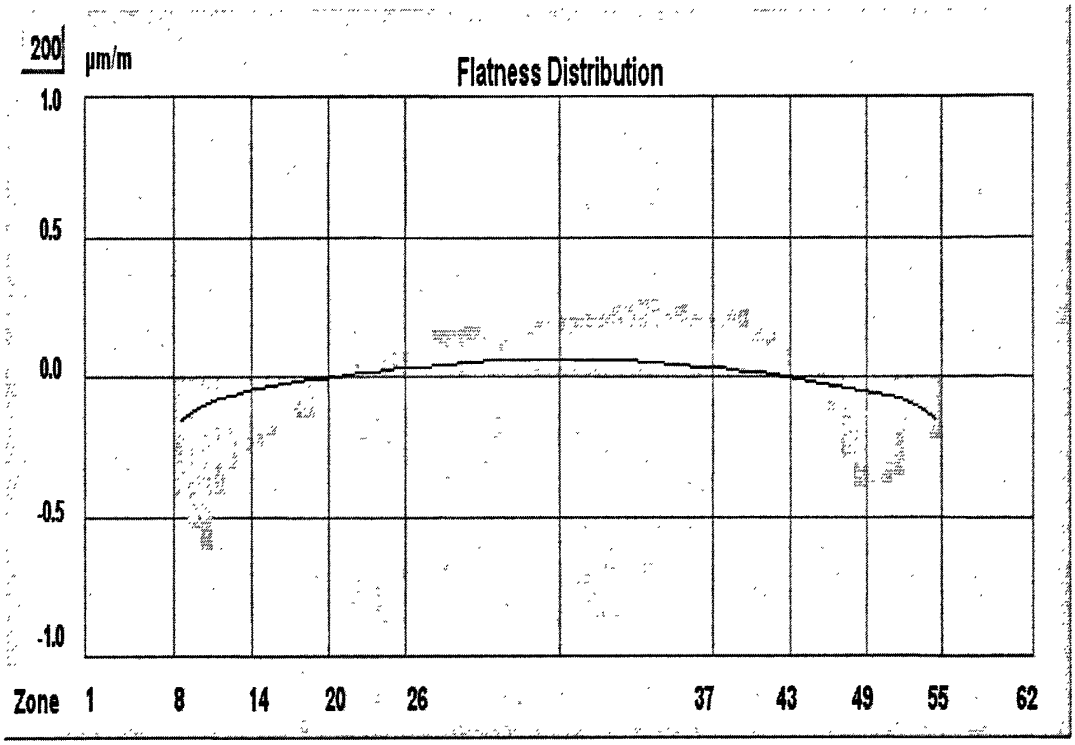
目标设定曲线的正确制定是十分必要的，其设定随设备条件（轧机刚度、轧辊材质、尺寸），轧制工艺条件(轧制速度、轧制压力、工艺润滑)以及产品情况（尺寸、材质）的不同而不同，总的要求是使最终产品的板形良好，并消除边部减薄现象。因此对于不同材质的产品，不同的规格，要求有不同的目标设定曲线。

但在西门子公司为首钢 1850 机组提供的控制系统中，最初只有一套目标设定曲线，该曲线在生产较薄带钢时，控制精度较差，成品板形不良。选择薄、厚两卷带钢分析。两卷带钢的材质规格，工艺参数如表 4.1 所示。

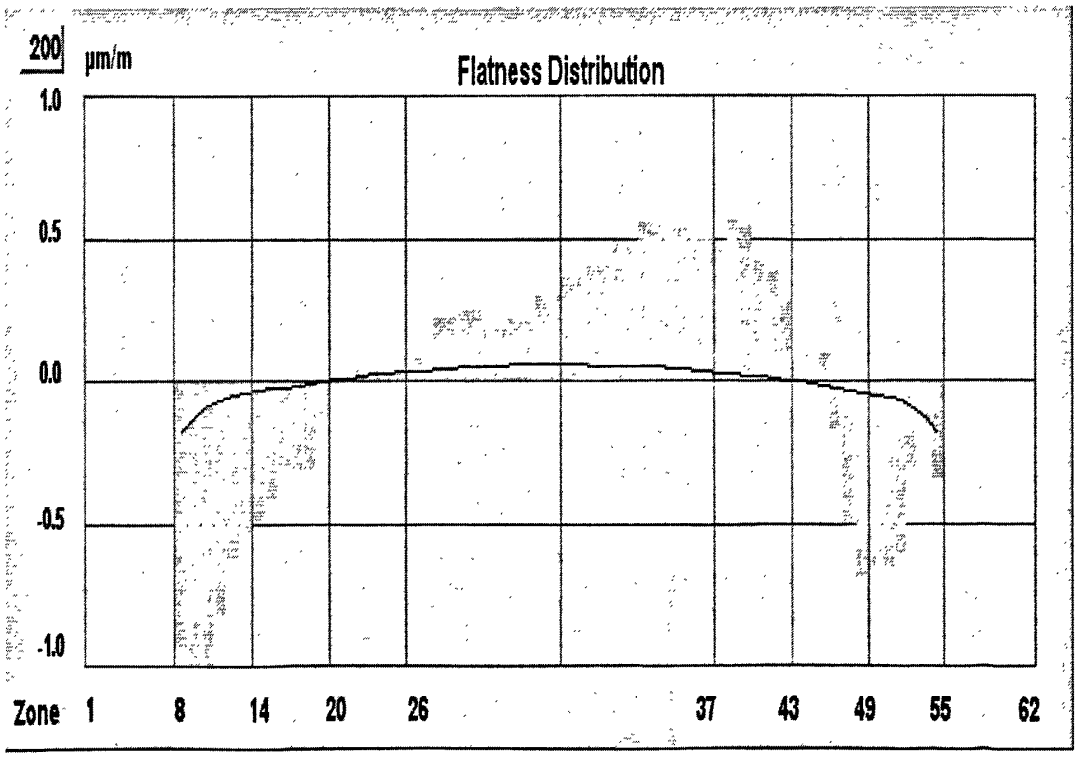
表4.1 带钢工艺参数表
Table 4.1 Strip technics parameter table

钢种：DC01	各机架单位张力(N/ mm^2)					规格(mm)			第5机架压下率
卷号	1	2	3	4	5	入口厚度	出口厚度	宽度	(%)
0830805012040	40	100	115	120	150	4.5	1.0	1250	1
0830908411050	40	100	115	120	150	2.3	0.3	1250	1

两卷带钢的目标板形曲线如图 4.1 所示,实际板形值如图 4.2 所示。

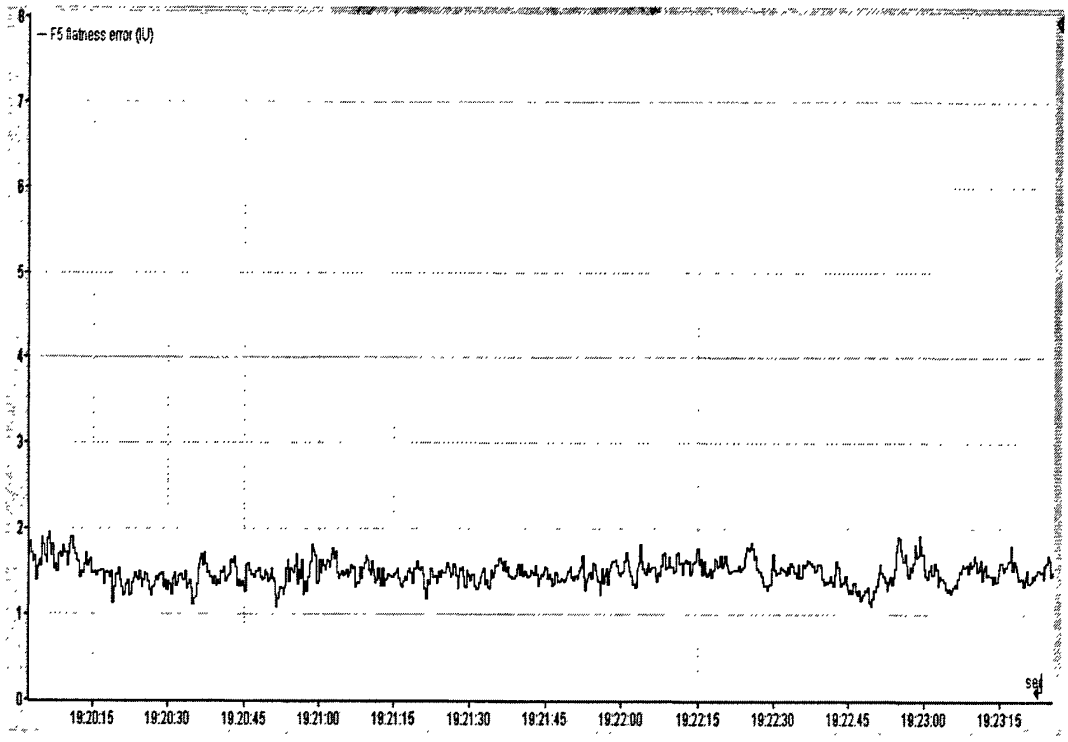


(a) 厚带钢

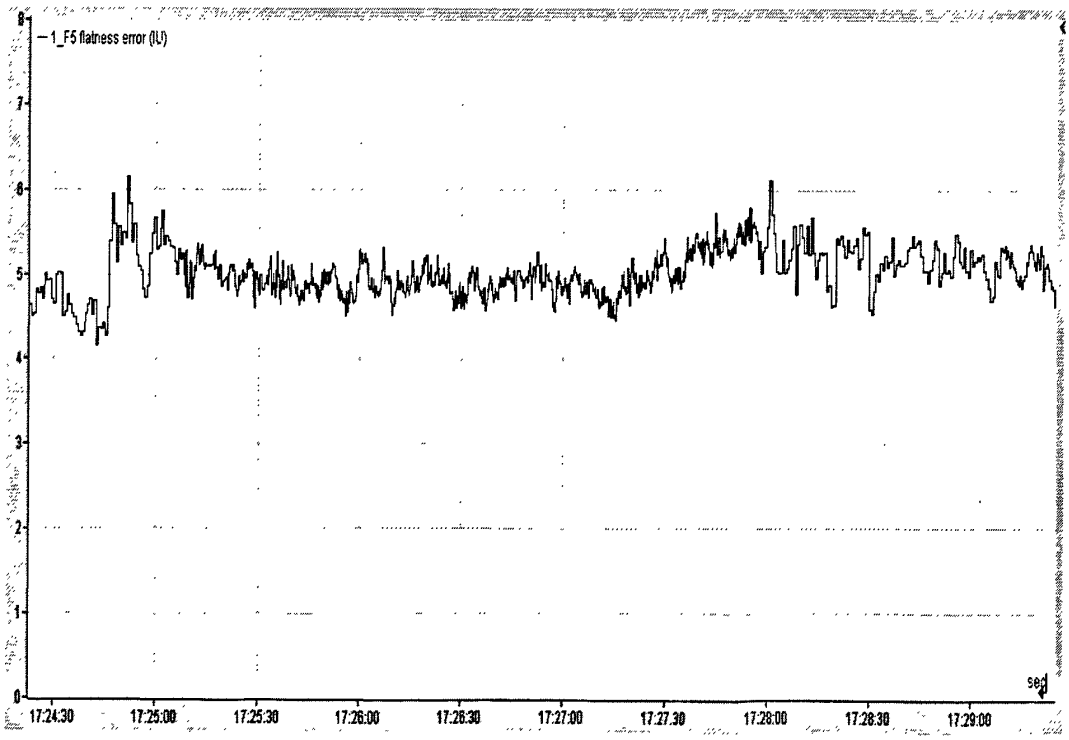


(b) 薄带钢

图 4.1 目标板形曲线
Fig.4.1 Objective flatness curve



(a) 厚带钢



(b) 薄带钢

图 4.2 板形实际值
Fig.4.2 Flatness actual value

如上所示，对于卷号为0830805012040和0830908411050的两卷钢卷，在采用同样的张力设定值，相同的第5机架压下率（如表4.1），相同的目标板形曲线（如画4.1）时，实际板形值相差较大（如曲线4.2），平均相差3-4个IU。这说明该目标板形曲线不适用于薄带钢的生产，需要重新设定目标曲线。因此本文作者依据不同原料、不同轧制工艺对应不同目标曲线的原则，对西门子控制系统中的目标板形曲线进行添加及优化。

首钢1850机组的板形控制系统可以采用两种方法来设定目标板形曲线，在生产过程中，目标板形曲线可同其他工艺参数一样储存在二级数据库中。

4.1.1 逐段设定法

为了获得理想的板形，原则上可以设定任意形式的板形标准曲线，因此可以采用这种设定方法，按照一定的带材宽度，对测量辊上所有被带材覆盖的测量区段，依次给定板形应力的数值。由于板形标准曲线是轧后带材残余内应力的分布曲线，因此仍须满足断面上自相平衡的条件。

$$\sum_{i=1}^{n} \sigma_i = 0 \tag{4.1}$$

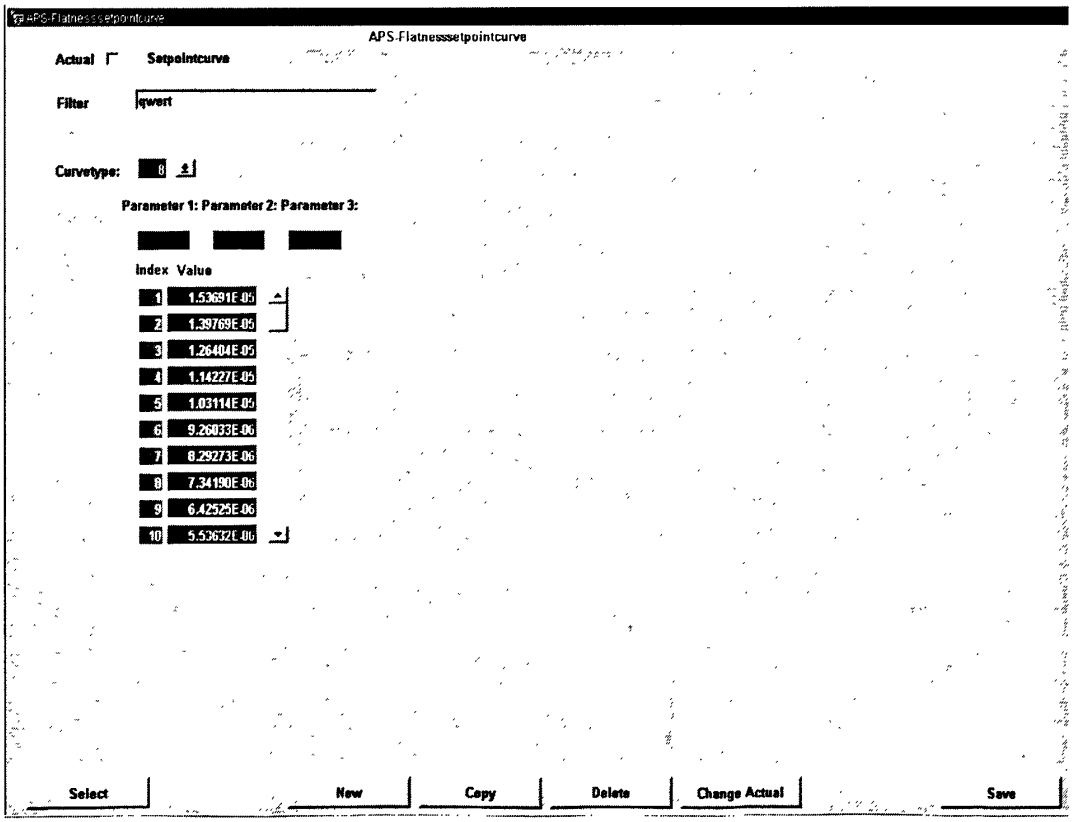


图4.3 逐段设定目标板形界面
Fig.4.3 Section set-point flatness interface

这样设定曲线可具有任意的形式，但由于它必须与带材的宽度相适应，因此应用时

有一定的局限性，设定时需逐段输入，比较繁琐。如图4.3所示。

4.1.2 参数设定法

即把轧后残余应力分布表示成典型的斜直线或抛物线，或两者叠加的函数形式。

斜直线形式，如图4.4所示：

$$\sigma(x)=K\left(1-\frac{2x}{B}\right) \tag{4.2}$$

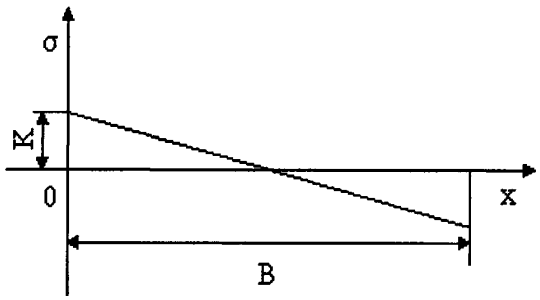


图4.4 斜直线形式的板形标准曲线
Fig.4.4 Bias flatness standard curve

抛物线形式，如图4.5所示：

$$\sigma(x)=\frac{4(R-M)}{B^2}\left(x-\frac{B}{2}\right)^2+M \tag{4.3}$$

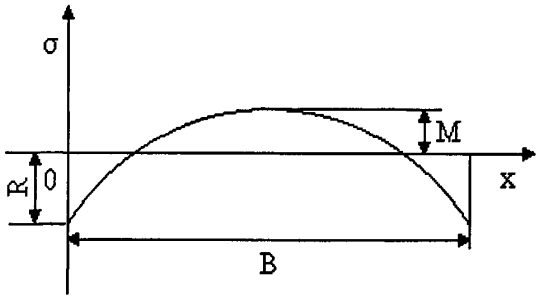


图4.5 抛物线形式的板形标准曲线
Fig.4.5 Parabola flatness standard curve

当采用抛物线和斜直线叠加的形式来作为板形控制目标时，标准曲线的函数是：

$$\sigma(x)=K\left(1-\frac{2x}{B}\right)+\frac{4(R-M)}{B^2}\left(x-\frac{B}{2}\right)^2+M \tag{4.4}$$

该式具有更一般的形式，它主要取决于K,R,M三个参数，当$K=0$时，该标准曲线为抛物线，对应着对称双边浪或中浪的板形缺陷。当$R=M=0$时，标准缺陷为斜直线，

对应着单边浪的板形缺陷，当$R=M=K=0$时，标准曲线则代表不存在残余应力的板形状态，即为以往板形控制所要求的绝对均匀的前张应力分布。同样，上式也需要满足残余内应力自相平衡的条件：

$$\int_0^B \sigma(x)dx = 0 \tag{4.5}$$

由此式可得$R=-2M$，在参数设定时要满足这个关系

上述板形标注曲线的设定方法还可以推广到四次多项式形式的板形标准曲线

$$\sigma(x)=\frac{16(R-M)}{B^4}\left(x-\frac{B}{2}\right)^4+M \tag{4.6}$$

同样根据平衡关 $\int_0^B \sigma(x)dx=0$ 系有$R=-4M$关系式成立。参数设定界面如图4.6所示，参数1、2、3分别对应系数K、M、R。

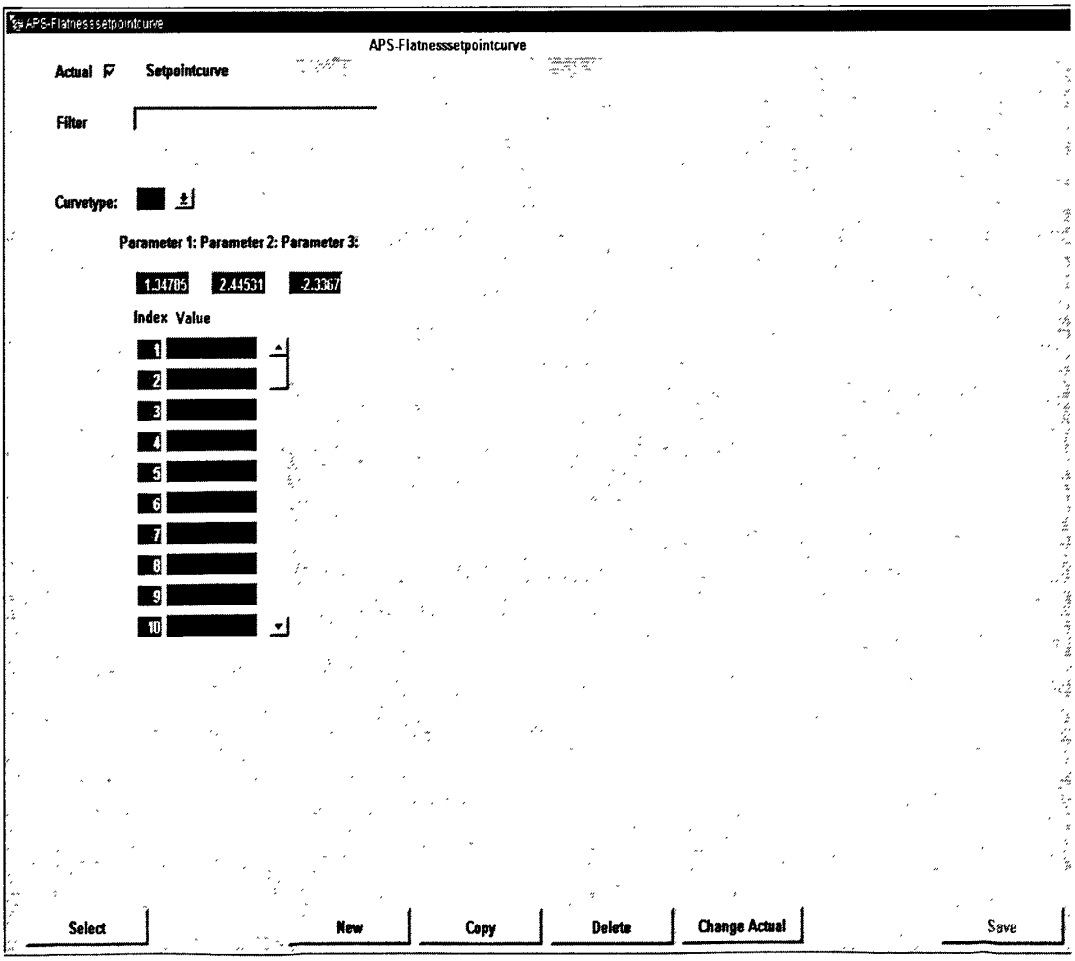


图4.6 参数设定目标板形界面
Fig.4.6 Parameter set-point flatness interface

4.1.3 目标曲线调整

如图4.1所示，对于卷号为0830805012040和0830908411050的两卷，都采用同样的目标板形曲线。通过对上述两卷生产过程中实际数据的分析，在生产薄带钢时，由于压下率较大，故各机架轧制力较大，如图4.7所示，相对于厚带钢，各机架轧制力高出50%。因此，轧辊压扁也比较严重。

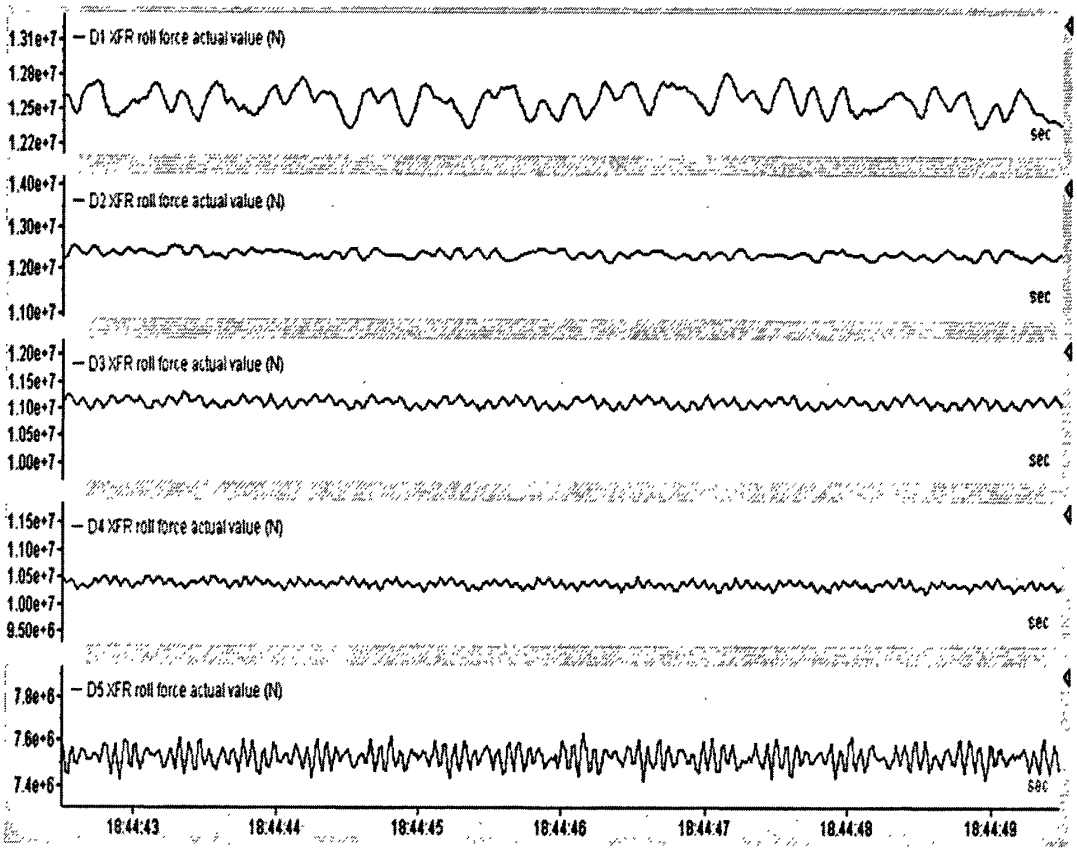


图4.7 生产薄带钢时各机架的轧制力
Fig.4.7 The rolling force of each stand

$$R' = R\left\{1 + \frac{16\left(1-\nu^2\right)}{\pi E}\frac{F \times 1000}{W \cdot \Delta h_{eq}}\right\} \tag{4.7}$$

$$\sqrt{\Delta h^p} + \sqrt{\Delta h^e{}_{in}} = \sqrt{h_{in} - h_{out} + \frac{1-\nu^2}{E} h_{out}\left(k_{out} - t_{out}\right)} \tag{4.8}$$

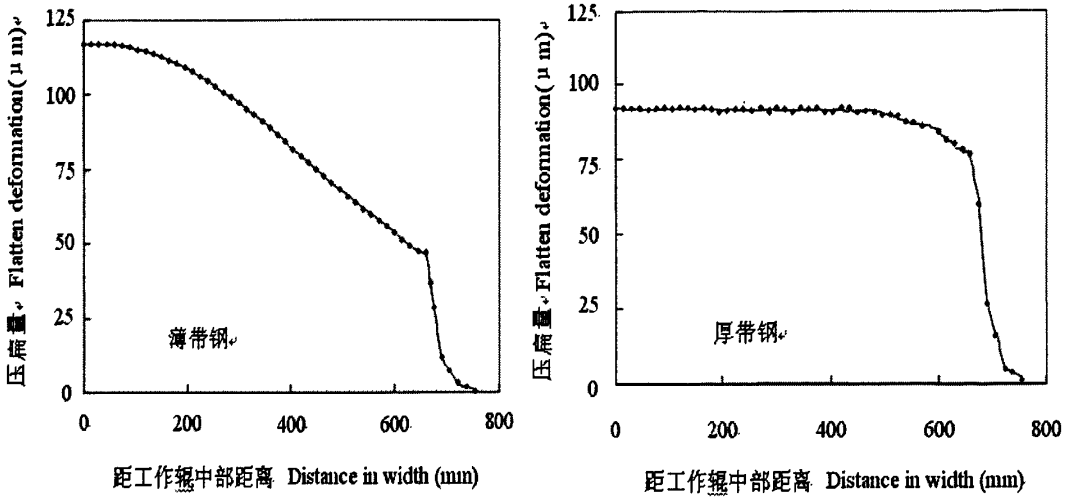
$$\Delta h_{eq} = \left(\sqrt{\Delta h^e_{out}} + \sqrt{\Delta h^p} + \sqrt{\Delta h^e_{in}}\right)^2 \tag{4.9}$$

$$\sqrt{\Delta h^e{}_{out}} = \sqrt{\frac{1-\nu^2}{E} h_{out}\left(k_{out} - t_{out}\right)} \tag{4.10}$$

其中：R'：轧辊压扁半径，R：轧辊半径，Δh_{eq}：等效压下率，Δh^p：塑性区压下率，

Δh^e_m：弹性压缩区压下率，Δh^e_{out}：弹性回复区压下率，π：3.1415。

如数学模型所示，随着轧制力的提高，轧辊压扁严重，如图4.8所示：



（a）薄带钢　　（b）厚带钢

图4.8 轧辊压扁量
Fig.4.8 Roll stave amount

首钢1850机组，工作辊采用的是凸辊，以增加板形控制能力，如图4.9所示。

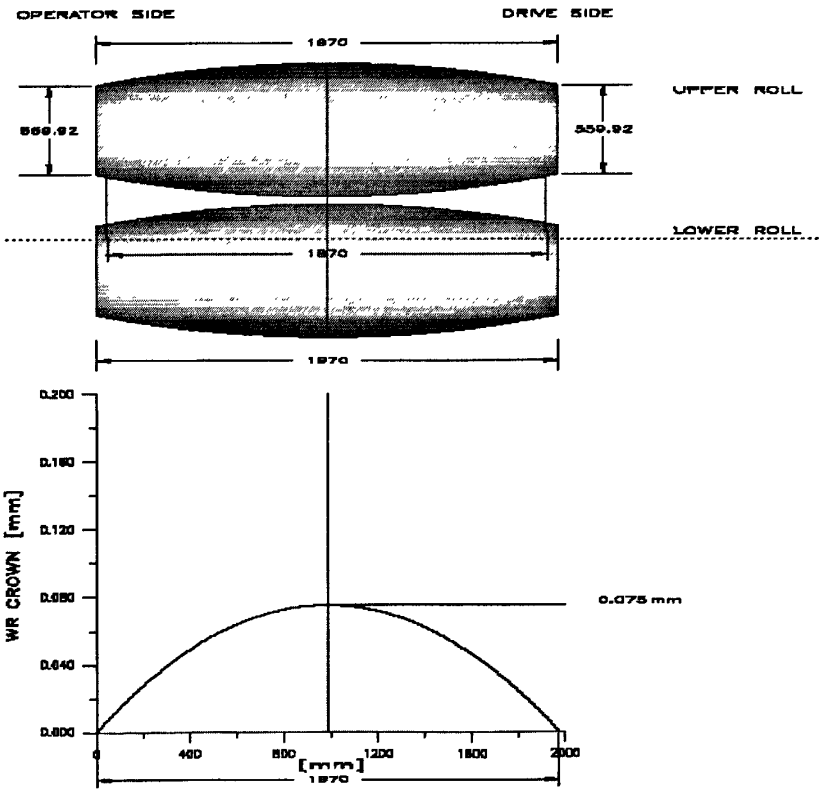


图4.9 首钢1850轧机工作辊
Fig.4.9 Shougang 1850 cold rolling mill work roll

表4.2 带钢工艺参数表
Table 4.2 Strip technics parameter table

钢种：DC01	各机架单位张力(N/ mm^2)					规格(mm)			第5机架压下率(%)
卷号	1	2	3	4	5	入口厚度	出口厚度	宽度	
0840908413070	40	100	115	120	150	2.3	0.3	1250	1

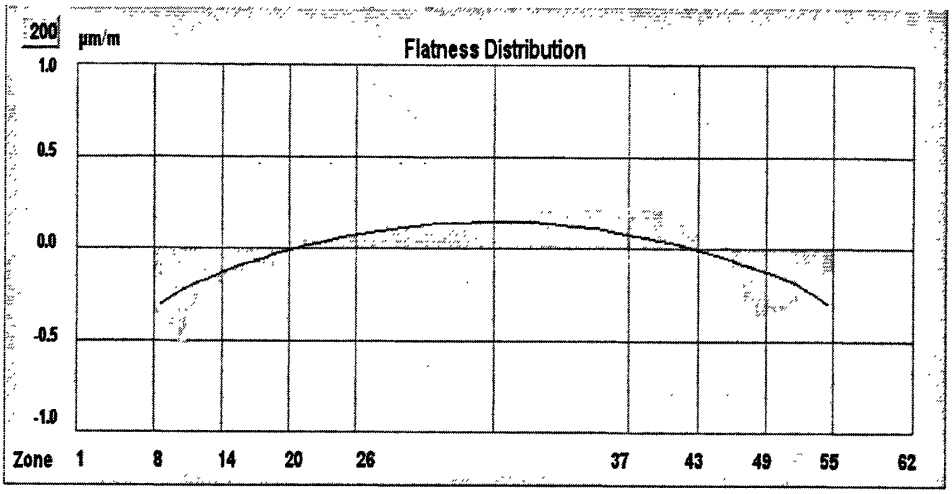


图4.10 目标板形设定
Fig.4.10 Objective flatness control

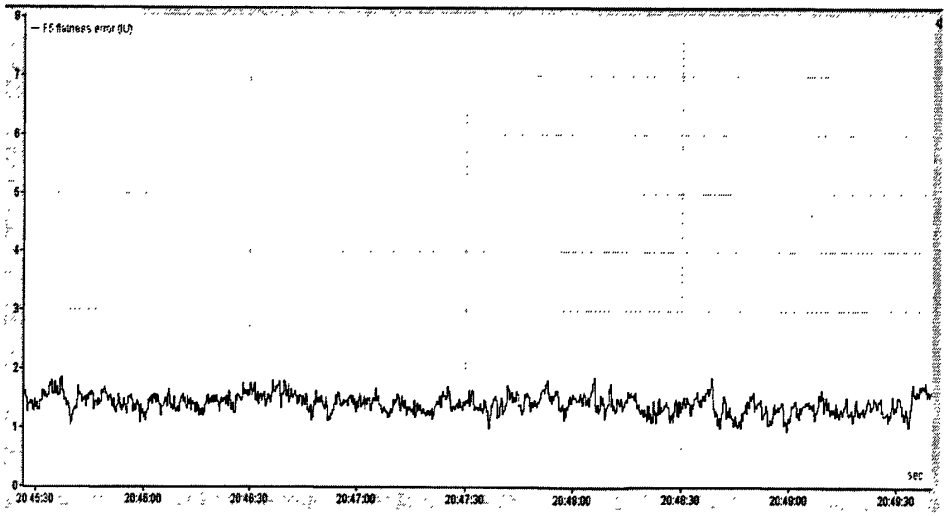


图4.11 板形值
Fig.4.11 Flatness value

当轧制薄带钢时，由于轧制力较大，故压扁量较大，另外如图4.9所示，轧辊中部压扁量比边部大，这就导致轧辊的凸度减小，板形控制能力削弱，如果仍采用相同的目标板形曲线，容易出现边浪。故需要对板形目标曲线进行修改，在轧制薄带钢时，采用微中浪的轧制方法对目标曲线进行设定。通过对板形曲线进行修改，采用参数设定法，

调整数值，在实际生产中取得了良好的效果。如表4.2所示，跟踪一卷采用相同轧制规程的薄带钢。

卷0840908413070与前面所述卷0830908411050相比，通过改变板形曲线，在轧制力，张力恒定的情况下，实际板形值由5IU，变为2IU。

4.2 板形控制系统参数调整

在轧制初期，我们发现，在HMI界面上，经常显示产线上的带钢存在严重的单边浪或双边浪如图4.12所示，但将下线钢卷送到离线检查站进行开卷检查时，并没有严重的浪形。

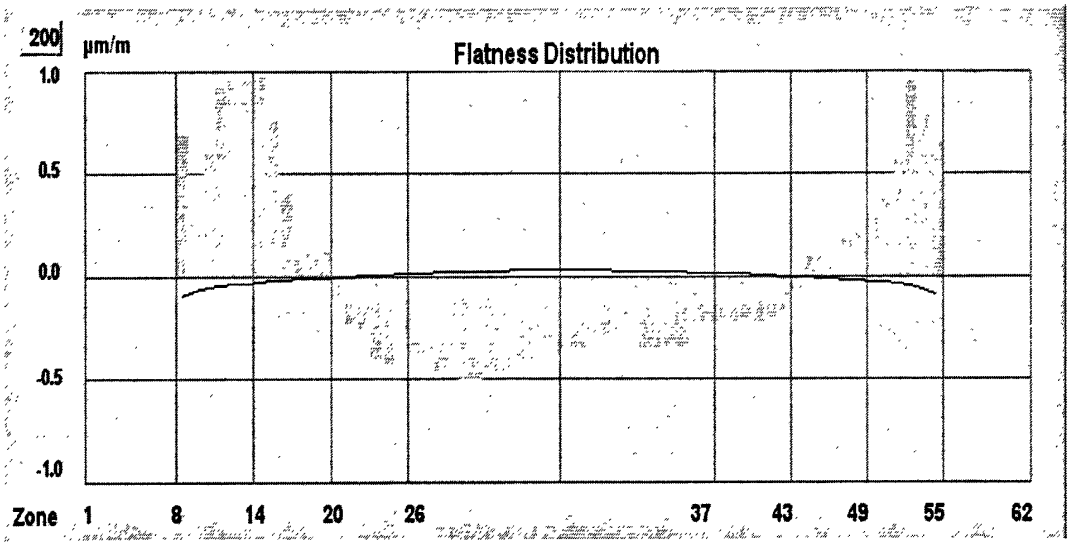


图4.12 带钢边浪
Fig.4.12 Strip side wave

通过分析，我们认为，这是由于板形控制系统中的参数设定存在问题。因为，根据板形仪的基本原理可知，测量辊是根据压应力计的原理制成的。每132 mm分为一个区段,各区域相互是分开的。各个测量区段感应到的正压力的大小仅仅同这一区段上的窄带材的拉应力和包角有关，见图 3.2。可见，板形仪的测量精度取决于每个测量区的测量精度。而每个传感器的精度又与该传感器所采集到的带钢张力有关。对于带钢边部的传感器，可能没有被带钢完全覆盖，这就会导致该传感器所采集的数据存在误差。因此，在西门子的板形控制系统中，外方调试人员对带钢覆盖面积进行了规定——即当带钢覆盖住传感器50%以上时，系统认为该传感器采集到的数据是真实有效的。而从实际的情况分析，当覆盖面积超过 50%时,传感器也经常反馈回错误的数据，导致上述情况的发生。因此，笔者对该参数进行了调整，如图4.13所示，将该参数调整到85%，通过实际现场跟踪，彻底解决了该问题。

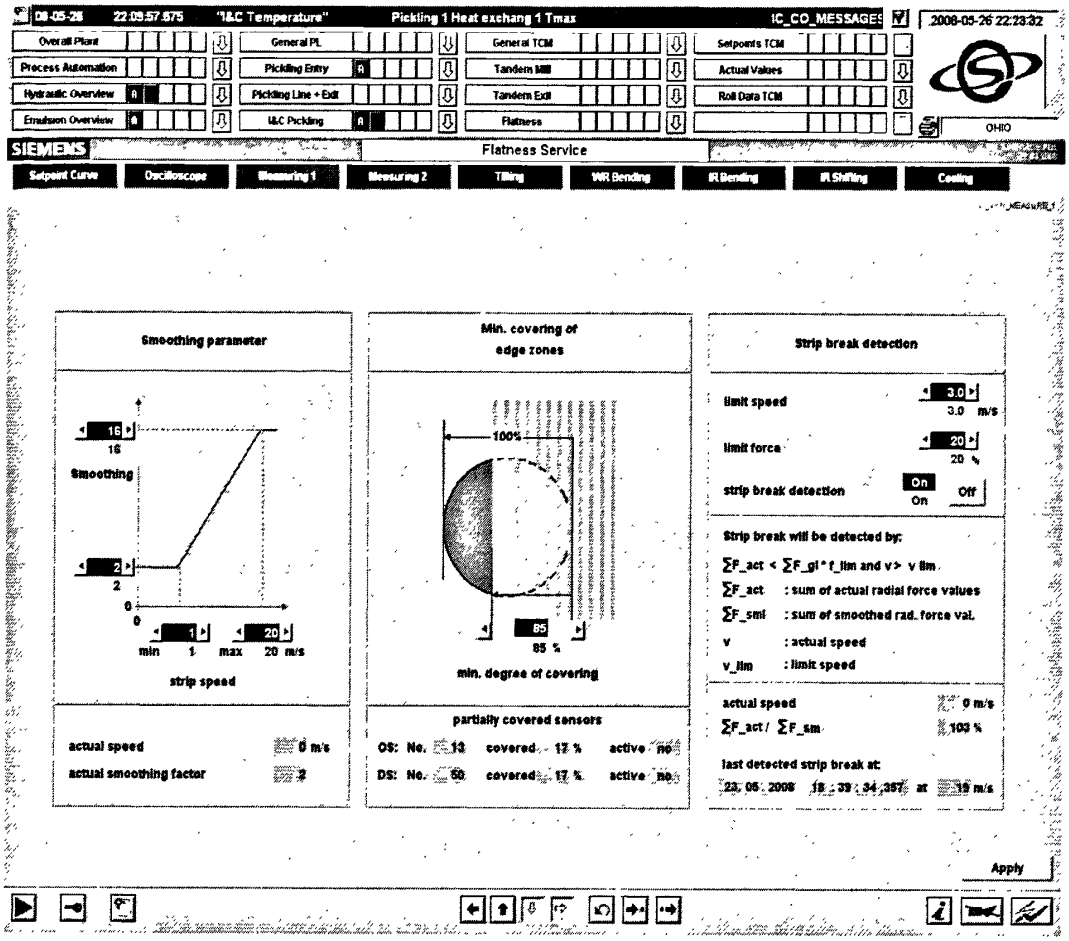


图 4.13 板形参数调整界面

Fig.4.13 Flatness parameter adjustment interface

4.3 板形仪使用的相关问题

板形仪对于自动测量和控制板形具有非常良好的效果[34]，但必须正确地使用。只有合理应用板形控制系统，才能更好地发挥出作用。根据冷轧实际工艺情况，结合生产实际应用，发现下面几点需要注意。

4.3.1 带钢楔形问题

板形控制的最根本目的，是通过弯辊、倾斜、喷淋等手段，使轧机工作辊的辊缝形状同来料板形相谐调[35]。由于冷轧过程中，轧制材料横向基本上不变形，仅考虑纵向上的延伸。当辊缝形状同来料板形相一致时，生产出的板片是平整的，没有波浪。因此来料形状的好坏同生产的最终板形有极大关系。根据经验，要求来料基本对称，凸度0.5%~2%，30 m 纵向凸度变化率小于 1%。来料中的楔形和负凸度，即通常说的凹形(骨棒形)，板形仪是无法进行控制的。如果由于轧辊倾斜或是卷取机轴的绕度变化引起的楔形，可以通过楔形补偿，进行适量的调整。这个补偿量比较小。

4.3.2 板形目标曲线

由于来料情况不同，或是根据客户的需要，或是根据生产的实际情况，如裂边、中浪，可选择不同的目标曲线组织生产。板形控制手动控制时，可以存贮多条目标曲线，供操作工选择。目标曲线的设定由工艺工程师根据工艺要求确定参数，由电气工程师输入，操作工根据操作规程选用。目标曲线的选用分为两个参数：一是形状，即目标曲线号。二是幅值，即弯曲的曲率。幅值的增减，一般为产品越薄的道次幅值逐渐加大。实际测量曲线减去目标曲线之差即为控制系统的修正函数。所以，改变了目标曲线，即改变了控制函数。从而适应冷轧产品多样的要求。

4.3.3 冷却剂用量的选择

板形仪将根据带钢宽度自动关闭带宽以外的喷嘴。根据冷却剂量的选择决定同一时刻应打开的选择冷却喷嘴数，根据板形仪测量计算的结果决定优先打开哪几个喷嘴。因此，冷却剂量的选择是很重要的。

一般的选择范围是 30%~65%。厚板和宽板冷却剂量选择大，薄板和窄板冷却剂量选择小。冷却剂量的选择还应同正负弯辊的控制情况综合考虑。因为冷却量的大小，影响到工作辊的弯曲变形。如轧制采用正弯(一般 30%~70%选择量)，弯曲量比较大，但仍觉得不够理想，需要继续加大弯曲量，此时可适当减少冷却量，如从 50%下降到 35%，立即可以看出正弯修正控制量下降，板带质量提高。负弯时反之。

4.3.4 板形仪的标定

板形仪是测量在线板形情况，并根据目标曲线发出控制函数，修正工作辊正负弯辊系统、中间辊横移系统、轧辊倾斜系统和冷却液选择喷淋系统，使控制板形同目标板形曲线相一致。如果轧机控制系统执行机构不动作，或是不按照既定的曲线规律动作，效果将大打折扣。因此需要定期检查执行机构的动作情况。

每周检查一次喷淋系统。观察喷淋阀有没有按照规定程序打开或是关闭。喷嘴有没有堵塞或常喷的情况。每两周检查一次倾斜系统-冷轧 AGC 系统有无信号反映，是否中断，或是比例不正常。每两周检查一次正负弯辊系统，看响应是否正常。经常更换滤芯，防止堵塞。每更换一次比例调压阀，做一次正负弯辊特性曲线试验，修正弯曲补偿系数表。定期检查测量辊调速系统，是否同主轧机同步。

同时，需要定期标定板形仪。板型仪有一个专用的标定支架，定标之前先把该支架放在板型辊上，用四颗内六角螺丝拧紧。支架上有一根航空插头信号电缆，板型辊 OS 侧上有相应的母头插座。把它们连接好。

在 HMI 上，有 flatness 项，打开 flatness calibration 子菜单，可看到标定界面如图

4.14 所示，

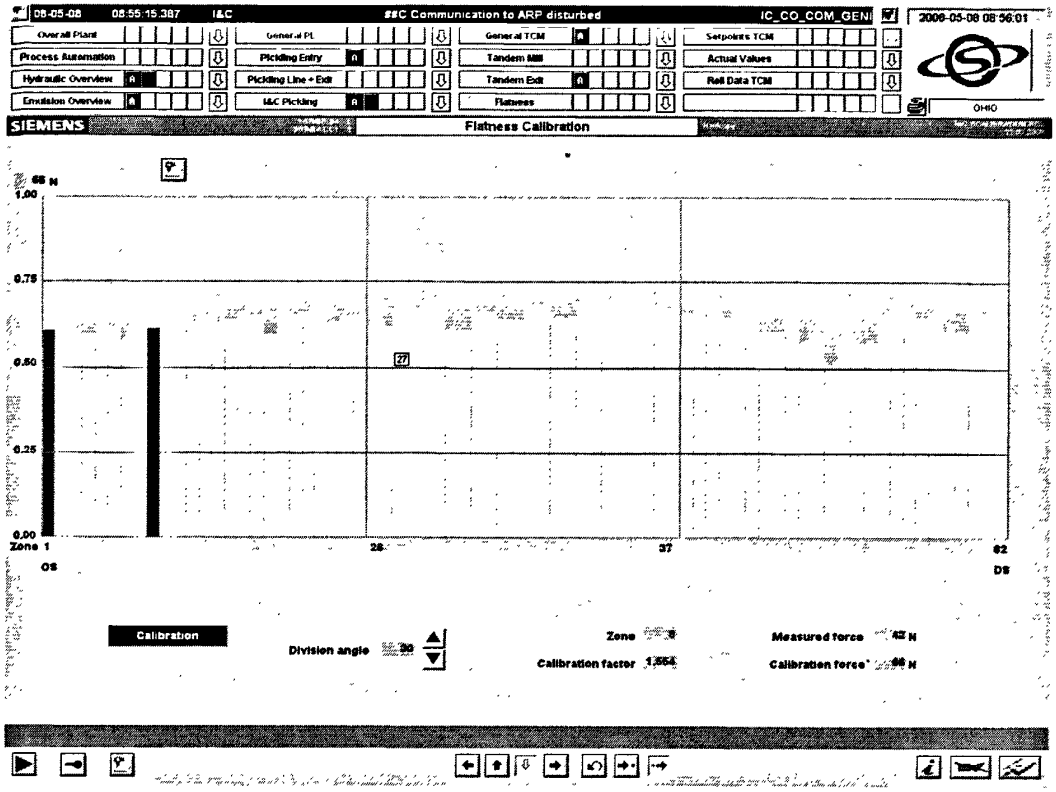


图 4.14 板形仪标定界面
Fig.4.14 Flatness meter calibration interface

其中 1-62 为板型辊上传感器序号，这些传感器按照 30 60 120 150 210 240 300 330 八组角度在辊子表面排列开来，每组有 7 个或 8 个传感器。点击画面上的 calibration，传感器的颜色将全变为黄色，哪个传感器标定完毕哪个得颜色就会变为绿色，图 4.14 中的两个绿色部分就是已经标定完毕的两个传感器。

点击 calibration 开始标定，从 30 角度开始，将板型辊旋转到 30 度，标定支架上有个定位头，使其把辊定位住，标定支架上有个刻度盘，上面有每个传感器对应的位置数据，转动支架上的摇棒转到相应位置，扳动红色扳手向前压下，待支架上的 sensor calibration 灯点亮，证明数据采集完毕，可以进行下一个传感器的标定。为了提高标定的准确度，建议每个传感器标定四次，也就是压下四次。默认压下力为 66N，通过测量传感器的受力情况，得出标定因数，即用 66 除以测量值，规定该值不能大于 2。 图 4.14 中的 calibration factor 就是该值。上面的 zone 是传感器序号。

当把 30 度上的所有传感器都标定完毕后，就可以进行 60 度的标定。全部标定完毕后，点击 HMI 的 flatness 的下级子菜单 flatness calibration data ，如图 4.15 所示。标定完的数据在图右侧，这时需要把最新的数据写入系统文本，只需点击画面上的 restore 即

可。

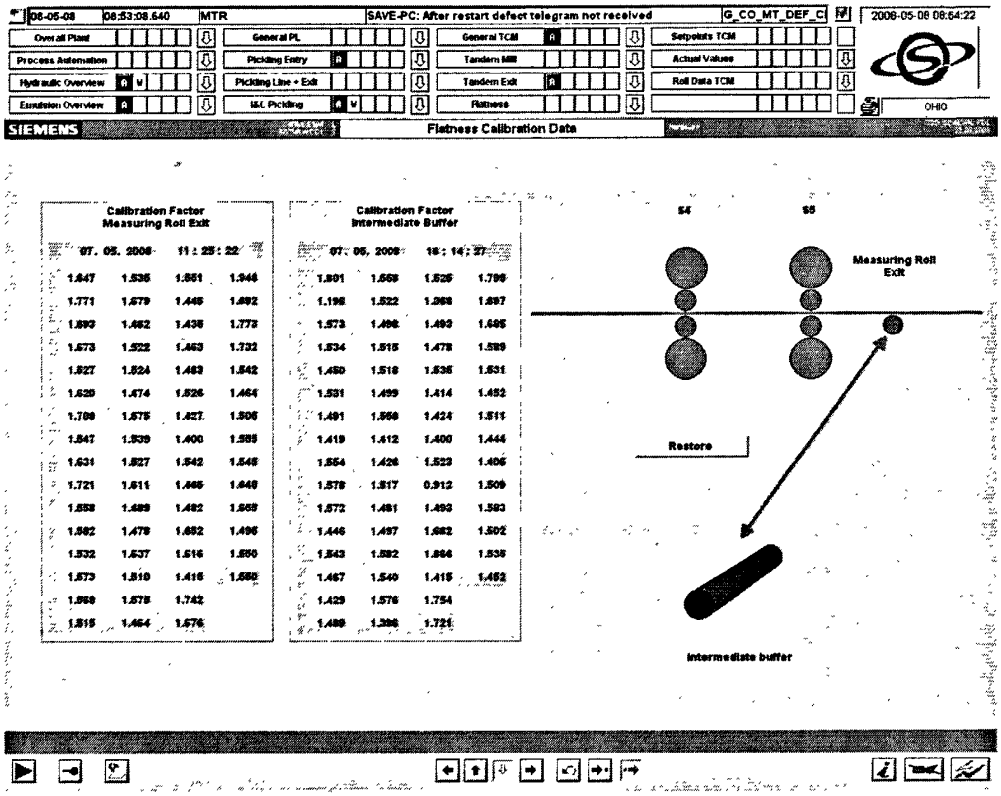


图 4.15 板形仪标定参数

Fig.4.15 Flatness meter parameter calibration

第五章 结束语

本课题以首钢 1850 冷连轧机组板形自动控制系统为基础，介绍了冷轧板形控制的主要特点和执行机构，以及自动控制过程的实现。板行检测选用德国 BFI 接触式板形仪，板形控制系统采用 Siemens64 位高性能控制器 SIMATIC TDC，通过工业以太网，实现检测与数据处理系统与控制系统和 HMI 之间的通讯。满足冷轧控制过程反映迅速，控制精度高，生产控制方案复杂、安全可靠性要求高的要求。人机界面采用功能强大的西门子 WinCC 组态软件，生产过程控制中产生的各种报警信息及故障信息，可以在 HMI 画面中得到详细的信息，并能从此信息中判断故障点。非常方便对板形控制设备进行系统的监控及参数调整。该项目自 3 月份试生产以来，板形控制系统基本上达到设计性能指标并如期投运，人机界面操作方便；生产信息与故障报警查询便利；出现故障时能提供迅速迅捷有效的技术支持，取得良好的实际应用效果。

在论文工作中，利用所学习的冷轧板形控制工艺理论和自动控制理论，结合现场生产调试情况，加以深入研究冷轧板形控制系统，并成功得以实施应用，取得很好的效果。通过本系统的研究与应用，更加掌握了所学冷轧工艺及控制系统理论知识，锻炼并提高了自己利用科学理论解决实际问题的能力。熟练掌握了西门子 TDC 的知识，系统的研究了板形控制理论在生产实际中的应用过程，对今后生产运行、设备使用维护提供有益的帮助。

参考文献

1. 金兹伯格著, 马东清 等译. 板带轧制工艺学[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2003,16-22.
2. 王国栋. 板形控制和板形理论[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1986, 35-39.
3. Vladimir B. Ginzburg. High-quality steel rolling theory and practice[M]. New York: Marcel Deker. Inc, 1993, 456-471.
4. 朱简如, 徐耀寰. 边缘降控制技术的应用[J]. 宝钢技术, 2001, 5, 10-13.
5. 金兹伯格著,姜明东,等译. 高精度板带材轧制理论与实践[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2000, 35-40.
6. 许健勇. 薄板冷轧厚度预板形高精度控制技术[J]. 钢铁, 2002, 37(1): 73-77.
7. 张清东, 何安瑞, 周晓敏, 等. 冷轧 CVC 和 DSR 板形控制技术之比较[J]. 北京科技大学学报, 2002, 24(3): 291-294.
8. 徐乐江. 冷轧板带生产技术的现状与发展[J]. 轧钢, 1997, 7(2): 3-8.
9. 杨荃. 冷轧机的板形控制目标模型[J]. 北京科技大学学报, 1995, 8(12): 23-28.
10. 乔梭飞. 板形控制现状及未来发展[J]. 冶金自动化, 1997, 4(1): 12-15.
11. 孙一康. 带钢冷连轧计算机控制[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2002, 33-40.
12. Klamma K. CVC Technology in Cold Rolling Mills [J]. Metallurgical Plant and Technology, 1985, 8(6): 74-90.
13. Wood G. E. et al. Modernization of Hot Strip Mill with CVC Technology and a New Roughing Mill with Automatic Width Control [J]. MPT, 1989, 12(5): 92-106.
14. Tsukamoto H., Matsumoto H.. Shape and Crown Control Mill-Crossed Roll System [J]. Iron and Steel Engineer, 1984, 61(10): 26-37.
15. Anon. Schedule Free Rolling and Flatness from the HC-mill [J]. Steel Times International, 1989, 13(5): 32-33.
16. Bald W, Beisemann G, Feldmann H, et al. Continuously Variable Crown (CVC) Rolling [J]. Iron and Steel Engineer, 1987, 64 (3): 32-41.
17. 唐谋凤. 现代带钢冷连轧机的自动化[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1995, 56-60.
18. K. Yasuda, et al. Shape Controllability in New 6-High Mill (UC-4 Mill) with Small Diameter Work Rolls[J]. ISIJ Internal, 1987, 31(11):34-41.
19. Nakanishi, Tsuneo. Application of a Work Roll Shift Mill to Plate Rolling [J]. Steel Times, 1986, 214(6): 292-239.
20. 许健勇, 陈守群, 王骏飞. 冷轧板形的系统控制[J]. 轧钢, 1999, 7(3): 32-35.
21. 孙一康. 适用于轧钢过程的计算机控制系统[J]. 中国工程科学, 2002, 3(2): 73-76.
22. 刘玠. 冷轧生产自动化技术[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2006, 87-92.
23. 秦政. 冷轧自动化系统—冷轧机实现现代化的选择[J]. 西门子公司专家报告, 2007, 11-12.
24. 彭军. 传感器及检测技术[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2003, 350-354

25. Cold Rolling Mill and Processing Lines Technologies Shougang Iron & Steel PLTCM Vol II/II Annex 2 Technical Specification, 2007, Section 5.4 Measurement Equipment.
26. Cold Rolling Mill and Processing Lines Technologies Shougang Iron & Steel PLTCM Vol I/II Annex 2 Technical Specification, 2007, Section 5.1 Basic Automation.
27. 崔坚. 西门子工业网络通信指南[M], 北京: 机械工业出版社, 2005, 6-8.
28. 鲍伯祥, 陆章杰. 西门子 TDC 编程及应用指南[M], 北京: 北京航空航天大学出版社,2007,1-3.
29. 苏昆哲. 深入浅出西门子 Wincc V6[M], 北京: 北京航空航天大学出版社, 2005,2-6.
30. Gunter Sorgel. Siemens and the Thinking Mill [J]. Steel Times, 1996, 21(9): 312-321.
31. 吉顺平, 孙承志, 路明志. 西门子 PLC 与工业网络技术[M], 北京: 机械工业出版社, 2008, 34-35.
32. Shougang Iron & Steel PLTCM External Specification, 2007, Section 5.4 Measurement Equipment.
33. Shougang Iron & Steel PLTCM External Specification, 2007, Section 5.1 Basic Automation.
34. 王慧. 计算机控制系统[M], 北京: 化学工业出版社, 2000, 49-50.
35. 华建新, 王贞祥. 全连续式冷连轧机过程控制[M], 北京: 冶金工业出版社, 2000, 57-65.

致 谢

本论文是在导师高立群教授的悉心指导与关怀下完成的。导师渊博的学识、敏锐的思想、严谨的治学态度、不倦的工作精神深深地感染着我，使我终生受益。在论文选题、设计和完成期间，导师都给予了极大的关心和支持，在此，向他致以最衷心的感谢。

在课题的研究与论文的写作过程中，得到了首钢顺义冷轧厂同事们的大力帮助，在此要向他们表示诚挚的谢意。

本论文还要献给我的家人，感谢他们对我的鼓励和支持。