



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 102363159 A

(43) 申请公布日 2012. 02. 29

(21) 申请号 201110330154. 3

(22) 申请日 2011. 10. 26

(71) 申请人 北京科技大学

地址 100083 北京市海淀区学院路 30 号北
科大科技处(72) 发明人 王晓晨 杨荃 刘华强 梁治国
何飞 马粹 孙友昭(74) 专利代理机构 北京东方汇众知识产权代理
事务所（普通合伙） 11296

代理人 刘淑芬

(51) Int. Cl.

B21B 37/16 (2006. 01)

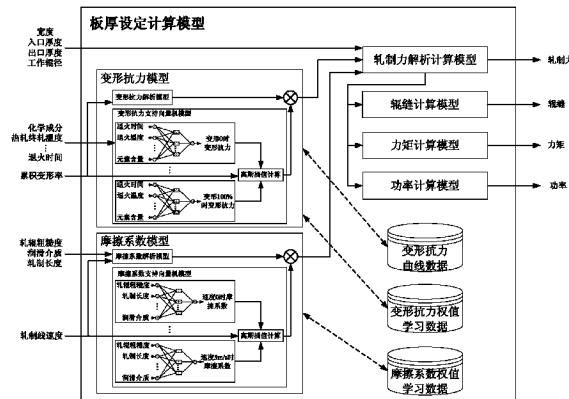
权利要求书 3 页 说明书 10 页 附图 2 页

(54) 发明名称

一种单张板精密冷轧板厚测量系统的厚度控
制方法

(57) 摘要

一种单张板精密冷轧板厚测量系统的厚度控制方法，属于机械自动化控制领域。由于单张板长度短、轧制时间少，测厚仪获得的厚度反馈值，无法用于进行厚度闭环控制。本发明将厚度测量值用于过程控制系统的板厚计算模型进行模型自学习，对材料变形抗力与实际工况摩擦系数进行修正，通过提高板厚计算模型的设定计算精度，来从根本上提高厚度控制精度。本发明采用先进的支持向量机建模方法对单张板变形抗力与摩擦系数进行统计建模，形成解析模型与统计模型相结合的模型结构，并根据不同累积压下率建立多个变形抗力支持向量机，以及根据不同轧制线速度建立多个摩擦系数支持向量机，从而缩小每个支持向量机的作用范围，有效提高了模型计算精度，能够大幅度提高单张板冷轧产品的厚度控制精度。



1. 一种单张板精密冷轧板厚测量系统的厚度控制方法,由于单张板长度短、轧制时间少,安装在单张板可逆轧机前后的测厚仪获得的厚度反馈值,无法用于进行厚度闭环控制,只能用于过程控制系统的板厚计算模型进行模型自学习,对材料变形抗力与实际工况摩擦系数进行修正,通过提高板厚计算模型的控制精度,来从根本上提高厚度控制精度;其特征在于该控制方法分为厚度设定计算与厚度自学习计算两部分内容,详细内容如下:

厚度设定计算部分:

对单张板在其单个轧程进行厚度设定计算时,首先进行各道次厚度分配,即确定各道次入口侧设定厚度与出口侧设定厚度,然后按照如下步骤从第1道次开始,进行每道次的厚度设定计算:

(1) 读取单张板轧制的轧机入口侧设定厚度H、轧机出口侧设定厚度h,单张板宽度W以及单张板轧制线速度v;

(2) 根据相应工况参数通过变形抗力模型计算得到单张板轧制此道次变形抗力计算值Kf,相应工况参数包括从第1道次开始的累积变形率 ϵ_a 、化学成分Che、作为前工序的热轧终轧温度FTe、卷取温度CTe、退火温度ATe、退火时间ATm,变形抗力模型为变形抗力解析模型与变形抗力统计模型相结合的模型,根据累积变形率 ϵ_a 通过变形抗力解析模型得到其输出Kf_B,变形抗力解析模型为 $Kf_B = f_1(\epsilon_a)$;

变形抗力统计模型根据累积变形率不同,分别对应累积变形率为0%、20%、40%、60%、80%、100%,由6个支持向量机组成,每个支持向量机的输入为化学成分Che、热轧终轧温度FTe、卷取温度CTe、退火温度ATE以及退火时间ATm,根据输入得到每个支持向量机输出 Kf_{Ci} ($i = 1, 2, \dots, 6$),6个支持向量机输出 Kf_{Ci} 通过累积变形率 ϵ_a 进行高斯插值得到总的统计模型输出 Kf_C ,高斯插值计算模型为:

$$Kf_C = \sum_{i=1}^6 Kf_{Ci} \cdot gk_i(\epsilon_a)$$

$$gk_i(\epsilon_a) = \frac{e^{-\frac{(\epsilon_a - \epsilon_{ai})^2}{\sigma^2}}}{\sum_{i=1}^6 e^{-\frac{(\epsilon_a - \epsilon_{ai})^2}{\sigma^2}}}$$

式中, ϵ_{ai} 为6个支持向量机所对应的标准累积变形率,分别为0%、20%、40%、60%、80%、100%, σ 为变形抗力统计模型高斯插值宽度,设为14%, $gk_i(\epsilon_a)$ 为累积变形率插值权重;

将变形抗力解析模型输出 Kf_B 与变形抗力统计模型输出 Kf_C 进行乘积,就得到单张板轧制此道次变形抗力计算值 Kf ,即:

$$Kf = Kf_B \cdot Kf_C$$

(3) 根据相应工况参数通过摩擦系数模型计算得到单张板轧制此道次摩擦系数计算值 μ ,相应工况参数包括轧辊粗糙度R,润滑介质LTy,轧制长度L,单张板轧制线速度v,摩擦系数模型为摩擦系数解析模型与摩擦系数统计模型相结合的模型,根据轧辊粗糙度R、润滑介质LTy、轧制长度L、单张板轧制线速度v通过摩擦系数解析模型得到其输出 μ_B ,摩擦系数解析模型为 $\mu_B = f_2(R, LTy, L, v)$;摩擦系数统计模型根据单张板轧制线速度不同,分别对应轧制线速度0m/s、1m/s、2m/s、3m/s、4m/s、5m/s由6个支持向量机组成,每个支持

向量机输入为轧辊粗糙度 R、润滑介质 LTy、轧制长度 L, 根据输入得到每个支持向量机输出 μ_{ci} ($i = 1, 2, \dots, 6$), 6 个支持向量机输出 μ_{ci} 通过单张板轧制线速度 v 进行高斯插值得到总的统计模型输出 μ_c , 高斯插值计算模型为 :

$$\mu_c = \sum_{i=1}^6 \mu_{ci} \cdot g\mu_i(v)$$

$$g\mu_i(v) = \frac{e^{-\frac{(v-v_i)^2}{\lambda^2}}}{\sum_{i=1}^6 e^{-\frac{(v-v_i)^2}{\lambda^2}}}$$

式中, v_i 为 6 个支持向量机所对应的标准速度, 分别为 0m/s、1m/s、2m/s、3m/s、4m/s、5m/s, λ 为摩擦系数统计模型高斯插值宽度, 设为 0.7m/s, $g\mu_i(v)$ 为速度插值权重;

将摩擦系数解析模型输出 μ_B 与摩擦系数统计模型输出 μ_c 进行乘积, 就得到单张板轧制此道次摩擦系数计算值 μ , 即 :

$$\mu = \mu_B \cdot \mu_c$$

(4) 在已经得到单张板轧制此道次变形抗力计算值 Kf 与摩擦系数计算值 μ 的基础上, 读取当前的轧制工况参数与轧机设备参数, 分别通过轧制力计算模型、力矩计算模型、功率计算模型计算轧制力设定值 P、力矩设定值 T 以及功率设定值 N, 并进一步通过辊缝计算模型得到辊缝设定值 S, 轧制工况参数为轧机入口侧设定厚度 H、轧机出口侧设定厚度 h, 单张板宽度 W 以及单张板轧制线速度 v, 轧机设备参数包括工作辊直径 D_w 与轧机纵向刚度 C_p , 轧制力计算模型为 $P = f_3(H, h, W, Kf, \mu, D_w)$, 轧制力矩计算模型为 $T = f_4(H, h, P, D_w)$, 功率计算模型为 $N = f_5(T, H, h, D_w, \mu, v)$, 辊缝设定模型为 $S = f_6(P, h, C_p)$;

至此, 得到了单张板轧制此道次的辊缝设定值, 完成了此道次的厚度设定计算, 重新回到步骤 (1) 直到末道次;

厚度自学习计算部分 :

在完成单张板单个轧程的轧制后, 按照如下步骤进行厚度自学习计算 :

(1) 读取由权利要求 1 ~ 7 任一所述的单张板精密冷轧板厚测量系统所测得的各道次轧机入口侧厚度测量值 H^* 、轧机出口侧厚度测量值 h^* ;

(2) 读取单张板轧制过程中各道次的轧制力测量值 P^* 、轧制功率测量值 N^* 以及单张板轧制线速度测量值 v^* ;

(3) 根据每道次轧机入口侧厚度测量值 H^* 、轧机出口侧厚度测量值 h^* 、轧制力测量值 P^* 、功率测量值 N^* , 单张板轧制线速度测量值 v^* 以及工作辊直径 D_w , 通过轧制力计算模型、轧制力矩计算模型以及功率计算模型建立方程组, 计算每道次的变形抗力实际值 Kf^* 与摩擦系数实际值 μ^* ;

(4) 计算每道次变形抗力实际值 Kf^* 与变形抗力计算值 Kf 的偏差 ek , 计算模型为 $ek = Kf - Kf^*$, 在此基础上根据高斯插值计算模型计算得到每个变形抗力支持向量机输出偏差 ek_i ($i = 1, 2, \dots, 6$), 计算模型为 :

$$ek_i = \partial ek / \partial gk_i(\varepsilon_a)$$

然后得到每个支持向量机新的输出 $Kf_{ci}^* = Kf_{ci} - ek_i$ ($i = 1, 2, \dots, 6$), 每个轧制道次, 6 个支持向量机新的输出与对应的工况参数化学成分 Che、热轧终轧温度 FTe、卷取温度 CTe、

退火温度 A_{te} 以及退火时间 AT_m 形成一组样本数据, 通过单个轧程中多个道次的样本数据, 用来对 6 个支持向量机的权值进行训练, 从而实现模型变形抗力自学习;

(5) 计算每道次摩擦系数实际值 μ^* 与摩擦系数计算值 μ 的偏差 eu , 计算模型为 $eu = \mu - \mu^*$, 在此基础上根据高斯插值计算模型计算得到每个变形抗力支持向量机输出偏差 eu_i ($i = 1, 2, \dots, 6$), 计算模型为:

$$eu_i = \partial eu / \partial g u_i(v)$$

然后得到每个支持向量机新的输出 $\mu_{ci}^* = \mu_{ci} - eu_i$, 每个轧制道次, 6 个支持向量机新的输出与对应的工况参数轧辊粗糙度 R 、润滑介质 $L Ty$ 、轧制长度 L 形成一组样本数据, 通过单个轧程中多个道次的样本数据, 用来对 6 个支持向量机的权值进行训练, 从而实现模型摩擦系数自学习;

至此, 通过对变形抗力与摩擦系数的自学习, 实现了对厚度设定模型的自学习。

2. 根据权利要求 1 所述的单张板精密冷轧板厚测量系统, 其特征在于: 所述单张板可逆冷轧机为四辊或六辊板卷两用式冷轧机, 轧机前后均有辊道与卷取机, 具备单张板轧制与成卷轧制两种生产方式。

3. 根据权利要求 1 所述的单张板精密冷轧板厚测量系统的厚度控制方法, 其特征在于: 所述单张板的长度最大值小于 10 米。

4. 根据权利要求 1 所述的单张板精密冷轧板厚测量系统的厚度控制方法, 其特征在于: 所述单张板为钛板或钛合金板。

一种单张板精密冷轧板厚测量系统的厚度控制方法

技术领域

[0001] 本申请属于机械自动化控制领域，尤其涉及一种单张板精密冷轧板厚测量系统的厚度控制方法。

背景技术

[0002] 在目前的冷轧生产中，较多地实现了张力成卷轧制，而对于钛合金等特殊品种的轧制，由于单批次需求量小，或者由于变形抗力较大弯曲困难，难以成卷轧制，较多地采用无张力单张板轧制。

[0003] 然而，单张板精密轧制却具有较多的技术难点：

[0004] (1) 单张板精密轧制规格灵活、单批次产量小，来料厚度与断面形状具有较大的不确定性；

[0005] (2) 单张板冷轧由于缺乏张力，使得变形抗力大，从而导致轧制负荷大、相对变形率小，轧程多、轧制道次多；

[0006] (3) 相对于成卷轧制，单张板冷轧由于单张板长度较短，缺乏在线厚度、板形自动调节，板厚、板形质量的保证极为依赖设定模型精度；

[0007] (4) 单张板无张精密轧制厚度薄（冷轧厚度 $\leqslant 6\text{mm}$ ，成品厚度 $0.2 \sim 2.0\text{mm}$ ），下游道次设定厚度误差可能与道次变形量达到同一量级，板厚控制难度大；

[0008] 综合以上特点可知，单张板精密冷轧变形抗力大，轧制道次多，是板厚板形精度最难保证的冷轧生产方式，然而，在单张板冷轧中，由于单张板长度较短，无法像张力成卷轧制那样实现在线厚度闭环控制，而只能通过提高模型的厚度设定精度来保证成品厚度精度。

[0009] 提高模型的厚度设定精度，必须解决两个主要环节，即获得准确的厚度测量值与基于厚度测量值的厚度控制方法。

[0010] 首先应解决厚度测量问题。目前的单张板冷轧，可以在专用的单张板轧机上完成，也可以在板卷两用轧机上完成。二者的轧机本身没有区别，均为四辊或六辊可逆轧机，主要在于机前、机后的辊道配置与卷取机配置的差别。专用板轧机在单机架可逆轧机前后安装辊道，实现单张板的运输与咬钢，板卷两用轧机既在轧机前后安装辊道，可以实现单张板轧制，同时也在两侧安装转向辊与卷取机，可以实现成卷轧制。

[0011] 目前的专用单张板轧机，一般自动控制精度较低，很少安装测厚仪，而专用带卷轧机，则较多地在轧机两侧安装X射线或Y射线测厚仪，并配备高精度的厚度自动控制系统，即AGC。板卷两用轧机，实际是在带卷轧机基础上，安装辊道系统，增加了轧制单张板的功能。

[0012] 对于专用单张板轧机，由于辊道的阻挡，测厚仪无法测得带钢厚度；而对于板卷两用轧机，虽然在轧机两侧安装测厚仪，但由于辊道的阻挡，在单张板轧制时无法测得板材厚度，而在带卷轧制时，移开内机前辊道与内机后辊道，从而避免辊道阻挡，实现厚度测量。

[0013] 本发明申请人在之前工作中，在轧机机前、机后设计了特殊的分段辊道结构，实现

了在单张板轧制时通过测厚仪对板厚的准确测量。本发明将根据单张板冷轧的特点,设计有针对性的厚度控制方法。

发明内容

[0014] 本发明所要解决的关键技术问题是,针对单张板冷轧厚度控制中存在的无法实时闭环控制、厚度精度保证难等问题,开发了基于解析模型与支持向量机统计模型相结合的具有参数自学习功能的板厚控制方法。

[0015] 本发明的技术方案为:一种单张板精密冷轧板厚测量系统的厚度控制方法。

[0016] 单张板精密冷轧的厚度测量系统与控制系统总体结构(如图1所示)包括以下三部分:

[0017] (1) 执行机构与测量装置

[0018] (2) 基础自动化控制系统

[0019] (3) 过程控制系统

[0020] 在特殊辊道结构设计的基础上,X射线(或γ射线)测厚仪测量得到的板带厚度信息,通过Profibus-DP网络传输到基础自动化级的厚度控制PLC,厚度控制PLC用以完成辊缝闭环控制、压力闭环控制两种压下闭环控制模式,即分别通过磁尺反馈信号与压头反馈信号,实现厚度控制系统执行内环功能。

[0021] 由于单张板长度短、轧制时间少,无法利用测厚仪获得的厚度反馈值进行厚度闭环控制。因此,本发明提出如下控制方法:将厚度测量值用于过程控制系统的板厚计算模型进行模型自学习,对材料变形抗力与实际工况摩擦系数进行修正,通过提高板厚计算模型的精度,来从根本上提高厚度控制精度。为找到模型计算误差的来源,分析各因素对模型精度的影响,该控制方法采用解析模型与统计模型相结合的方式进行建模,整体结构如图2所示。

[0022] 该控制方法分为厚度设定计算与厚度自学习计算两部分内容,形成厚度自学习控制方法,详细内容如下:

[0023] 厚度设定计算部分:

[0024] 单张板冷轧生产,是从热轧料开始到最终产品,根据规格要求,一般需要经过多次退火。在热轧料与第1次退火之间、或两次退火之间的单张板轧制,称为一个轧程。一个轧程内,又包括多个轧制道次。对单张板在其单个轧程进行厚度设定计算时,首先进行分配各道次厚度,即确定各道次入口侧设定厚度与出口侧设定厚度,然后按照如下步骤从第1道次开始,进行每道次的厚度设定计算:

[0025] (1) 读取单张板轧制的轧机入口侧设定厚度H、轧机出口侧设定厚度h,单张板宽度W以及单张板轧制线速度v;

[0026] (2) 根据相应工况参数通过变形抗力模型计算得到单张板轧制此道次变形抗力计算值Kf,相应工况参数包括从第1道次开始的累积变形率 ϵ_a (其计算模型为 $\epsilon_a = 0.4(H-h_{j-1})/H + 0.6(H-h_j)/H$, j为道次号)、化学成分Che(指单张板各组成化学元素的质量百分数)、作为前工序的热轧终轧温度FTe、卷取温度CTe、退火温度ATe、退火时间ATm,变形抗力模型为变形抗力解析模型与变形抗力统计模型相结合的模型,根据累积变形率 ϵ_a 通过变形抗力解析模型得到其输出 Kf_B ,变形抗力解析模型为 $Kf_B = f_1(\epsilon_a)$;

[0027] 变形抗力统计模型根据累积变形率不同, 分别对应累积变形率 0%、20%、40%、60%、80%、100%, 由 6 个支持向量机组成, 每个支持向量机的输入为化学成分 Che、热轧终轧温度 FTe、卷取温度 CTe、退火温度 Ate 以及退火时间 ATm, 根据输入得到每个支持向量机输出 Kf_{ci} ($i = 1, 2, \dots, 6$), 6 个支持向量机输出 Kf_{ci} 通过累积变形率 ε_a 进行高斯插值得到总的统计模型输出 Kf_c , 高斯插值计算模型为:

$$[0028] Kf_c = \sum_{i=1}^6 Kf_{ci} \cdot gk_i(\varepsilon_a)$$

$$[0029] gk_i(\varepsilon_a) = \frac{e^{-\frac{(\varepsilon_a - \varepsilon_{ai})^2}{\sigma^2}}}{\sum_{i=1}^6 e^{-\frac{(\varepsilon_a - \varepsilon_{ai})^2}{\sigma^2}}}$$

[0030] 式中, ε_{ai} 为 6 个支持向量机所对应的标准累积变形率, 分别为 0%、20%、40%、60%、80%、100%, σ 为变形抗力统计模型高斯插值宽度, 设为 14%, $gk_i(\varepsilon_a)$ 为累积变形率插值权重;

[0031] 将变形抗力解析模型输出 Kf_b 与变形抗力统计模型输出 Kf_c 进行乘积, 就得到单张板轧制此道次变形抗力计算值 Kf , 即:

$$[0032] Kf = Kf_b \cdot Kf_c$$

[0033] (3) 根据相应工况参数通过摩擦系数模型计算得到单张板轧制此道次摩擦系数计算值 μ , 相应工况参数包括轧辊粗糙度 R, 润滑介质 LTy, 轧制长度 L, 单张板轧制线速度 v, 摩擦系数模型为摩擦系数解析模型与摩擦系数统计模型相结合的模型, 根据轧辊粗糙度 R、润滑介质 LTy、轧制长度 L、单张板轧制线速度 v 通过摩擦系数解析模型得到其输出 μ_b , 摩擦系数解析模型为 $\mu_b = f_2(R, LTy, L, v)$; 摩擦系数统计模型根据单张板轧制线速度不同, 分别对应轧制线速度 0m/s、1m/s、2m/s、3m/s、4m/s、5m/s, 由 6 个支持向量机组成, 每个支持向量机输入为轧辊粗糙度 R、润滑介质 LTy、轧制长度 L, 根据输入得到每个支持向量机输出 μ_{ci} ($i = 1, 2, \dots, 6$), 6 个支持向量机输出 μ_{ci} 通过单张板轧制线速度 v 进行高斯插值得到总的统计模型输出 μ_c , 高斯插值计算模型为:

$$[0034] \mu_c = \sum_{i=1}^6 \mu_{ci} \cdot g\mu_i(v)$$

$$[0035] g\mu_i(v) = \frac{e^{-\frac{(v-v_i)^2}{\lambda^2}}}{\sum_{i=1}^6 e^{-\frac{(v-v_i)^2}{\lambda^2}}}$$

[0036] 式中, v_i 为 6 个支持向量机所对应的标准速度, 分别为 0m/s、1m/s、2m/s、3m/s、4m/s、5m/s, λ 为摩擦系数统计模型高斯插值宽度, 设为 0.7m/s, $g\mu_i(v)$ 为速度插值权重;

[0037] 将摩擦系数解析模型输出 μ_b 与摩擦系数统计模型输出 μ_c 进行乘积, 就得到单张板轧制此道次摩擦系数计算值 μ , 即:

$$[0038] \mu = \mu_b \cdot \mu_c$$

[0039] (4) 在已经得到单张板轧制此道次变形抗力计算值 Kf 与摩擦系数计算值 μ 的基础上, 读取当前的轧制工况参数与轧机设备参数, 分别通过轧制力计算模型、力矩计算模型、功率计算模型计算轧制力设定值 P、力矩设定值 T 以及功率设定值 N, 并进一步通过辊缝

计算模型得到辊缝设定值 S , 轧制工况参数为轧机入口侧设定厚度 H 、轧机出口侧设定厚度 h , 单张板宽度 W 以及单张板轧制线速度 v , 轧机设备参数包括工作辊直径 D_w 与轧机纵向刚度 C_p , 轧制力计算模型为 $P = f_3(H, h, W, Kf, \mu, D_w)$, 轧制力矩计算模型为 $T = f_4(H, h, P, D_w)$, 功率计算模型为 $N = f_5(T, H, h, D_w, \mu, v)$, 辊缝设定模型为 $S = f_6(P, h, C_p)$;

[0040] 至此, 得到了单张板轧制此道次的辊缝设定值, 完成了此道次的厚度设定计算, 重新回到步骤(1)直到末道次;

[0041] 在完成一块单张板一个轧程的轧制后, 根据设定命中情况, 可触发按照如下步骤进行厚度自学习计算:

[0042] (1) 读取单张板轧制的轧机各道次入口侧厚度测量值 H^* 、轧机出口侧厚度测量值 h^* ;

[0043] (2) 读取单张板轧制过程中各道次的轧制力测量值 P^* 、轧制功率测量值 N^* 以及单张板轧制线速度测量值 v^* ;

[0044] (3) 根据每道次轧机入口侧厚度测量值 H^* 、轧机出口侧厚度测量值 h^* 、轧制力测量值 P^* 、功率测量值 N^* , 单张板轧制线速度测量值 v^* 以及工作辊直径 D_w , 通过轧制力计算模型、轧制力矩计算模型以及功率计算模型建立方程组, 计算每道次的变形抗力实际值 Kf^* 与摩擦系数实际值 μ^* ;

[0045] (4) 计算每道次变形抗力实际值 Kf^* 与变形抗力计算值 Kf 的偏差 ek , 计算模型为 $ek = Kf - Kf^*$, 在此基础上根据高斯插值计算模型计算得到每个变形抗力支持向量机输出偏差 ek_i ($i = 1, 2, \dots, 6$), 计算模型为:

[0046] $ek_i = \partial ek / \partial gk_i(\varepsilon_a)$

[0047] 然后得到每个支持向量机新的输出 $Kfc_i^* = Kfc_i - ek_i$, 每个轧制道次, 6 个新的支持向量机输出与对应的工况参数化学成分 Che 、热轧终轧温度 FTe 、卷取温度 CTe 、退火温度 ATE 以及退火时间 ATm 形成一组样本数据, 通过单个轧程中多个道次的样本数据, 用来对 6 个支持向量机的权值进行训练, 从而实现模型变形抗力自学习;

[0048] (5) 计算每道次摩擦系数实际值 μ^* 与摩擦系数计算值 μ 的偏差 eu , 计算模型为 $eu = \mu - \mu^*$, 在此基础上根据高斯插值计算模型计算得到每个变形抗力支持向量机输出偏差 eu_i ($i = 1, 2, \dots, 6$), 计算模型为:

[0049] $eu_i = \partial eu / \partial gu_i(v)$

[0050] 然后得到每个支持向量机新的输出 $\mu_{ci}^* = \mu_{ci} - eu_i$, 每个轧制道次, 6 个新的支持向量机输出与对应的工况参数轧辊粗糙度 R 、润滑介质 LTy 、轧制长度 L 形成一组样本数据, 通过单个轧程中多个道次的样本数据, 用来对 6 个支持向量机的权值进行训练, 从而实现模型摩擦系数自学习;

[0051] 至此, 通过对变形抗力与摩擦系数的自学习, 实现了对厚度设定模型的自学习。

[0052] 本发明采用先进的支持向量机建模方法对单张板变形抗力与摩擦系数进行统计建模, 形成解析模型与统计模型相结合的模型结构, 并根据不同累积压下率建立多个变形抗力支持向量机, 以及根据不同轧制线速度建立多个摩擦系数支持向量机, 从而缩小每个支持向量机的作用范围, 有效提高了模型计算精度。

附图说明

[0053] 图 1 是单张板精密冷轧厚度测量与控制系统总体结构图；

[0054] 图 2 是板厚计算模型整体结构图。

[0055] 符号说明

[0056]

符号	名称	单位
H	轧机入口侧设定厚度	mm
h	轧机出口侧设定厚度	mm
W	宽度	mm
Kf	变形抗力	Mpa
ε_a	累积变形率	%
Che	化学成分	%
FTe	热轧终轧温度	°C
CTe	热轧卷取温度	°C
ATe	退火温度	°C
ATm	退火时间	min
Kf _B	变形抗力解析模型输出	Mpa
Kf _c	变形抗力统计模型输出	-
σ	变形抗力统计模型高斯插值宽度	%
μ	摩擦系数	-
R	轧辊粗糙度	μ m
LTy	润滑介质	-
L	轧制长度	km
v	轧制线速度	m/s
μ_B	摩擦系数解析模型输出	-
μ_C	摩擦系数统计模型输出	-

λ	摩擦系数统计模型高斯插值宽度	m/s
P	轧制力设定值	kN
T	力矩设定值	kNm
N	功率设定值	kW
S	辊缝设定值	mm
H*	轧机入口侧厚度测量值	mm
h*	轧机出口侧厚度测量值	mm
P*	轧制力测量值	kN
N*	轧制功率测量值	kW
v*	轧制线速度测量值	m/s
Kf*	变形抗力实际值	Mpa
μ^*	摩擦系数实际值	-

具体实施方式

[0057] 一种用于单张板精密冷轧板厚测量系统的厚度自学习控制方法,该控制方法分为厚度设定计算与厚度自学习计算两部分计算内容;对单张板在其单个轧程进行厚度设定计算时,首先进行分配各道次厚度,即确定各道次入口侧设定厚度与出口侧设定厚度,例如对于TA1单张板轧制,一个轧程厚度由3.5mm轧到1.5mm,板宽1090mm,由8个道次轧制完成,道次厚度分配如表1所示。

[0058] 表1TA1单张板(3.5~1.5×1090mm)轧制道次厚度分配

[0059]

道次数	1	2	3	4	5	6	7	8
入口厚度(mm)	3.5	2.859	2.425	2.134	1.936	1.776	1.66	1.58
出口厚度(mm)	2.859	2.425	2.134	1.936	1.776	1.66	1.58	1.51

[0060] 然后按照如下步骤从第1道次开始,进行每道次的厚度设定计算:

[0061] (1) 读取单张板轧制的轧机入口侧设定厚度H、轧机出口侧设定厚度h,单张板宽度W以及单张板轧制线速度v;

[0062] (2) 根据相应工况参数通过变形抗力模型计算得到单张板轧制此道次变形抗力计算值 Kf , 相应工况参数包括从第 1 道次开始的累积变形率 ϵ_a (其计算模型为 $\epsilon_a = 0.4(H-h_{i-1})/H + 0.6(H-h_i)/H$, i 为机架号或道次号)、化学成分 Che (指单张板各组成化学元素的质量百分数)、化学成分 Che、作为前工序的热轧终轧温度 FTe、卷取温度 CTe、退火温度 ATe、退火时间 ATm, 变形抗力模型为变形抗力解析模型与变形抗力统计模型相结合的模型, 根据累积变形率 ϵ_a 通过变形抗力解析模型得到其输出 Kf_B , 变形抗力解析模型为 $Kf_B = f_1(\epsilon_a)$;

[0063] 其中, 变形抗力解析模型详细表达式为:

$$[0064] Kf_B = b_0 + b_1 \epsilon_a + b_2 \epsilon_a^2 + b_3 \epsilon_a^3$$

[0065] 式中, b_0, b_1, b_2, b_3 为常系数, 针对 TA1 牌号钛合金 (也即工业纯钛) 分别设为 446、9.5、-0.07、0.00069, 针对 TC4 牌号钛合金分别设为 901、18、-0.27、0.0017;

[0066] 变形抗力统计模型根据累积变形率不同, 分别对应累积变形率 0%、20%、40%、60%、80%、100%, 由 6 个支持向量机组成, 每个支持向量机的输入为化学成分 Che、热轧终轧温度 FTe、卷取温度 CTe、退火温度 Ate 以及退火时间 ATm, 根据输入得到每个支持向量机输出 Kf_{Ci} ($i = 1, 2, \dots, 6$), 6 个支持向量机输出 Kf_{Ci} 通过累积变形率 ϵ_a 进行高斯插值得到总的统计模型输出 Kf_C , 高斯插值计算模型为:

$$[0067] Kf_C = \sum_{i=1}^6 Kf_{Ci} \cdot gk_i(\epsilon_a)$$

$$[0068] gk_i(\epsilon_a) = \frac{e^{-\frac{(\epsilon_a - \epsilon_{ai})^2}{\sigma^2}}}{\sum_{i=1}^6 e^{-\frac{(\epsilon_a - \epsilon_{ai})^2}{\sigma^2}}}$$

[0069] 式中, ϵ_{ai} 为 6 个支持向量机所对应的标准累积变形率, 分别为 0%、20%、40%、60%、80%、100%, σ 为变形抗力统计模型高斯插值宽度, 设为 14%, $gk_i(\epsilon_a)$ 为累积变形率插值权重;

[0070] 将变形抗力解析模型输出 Kf_B 与变形抗力统计模型输出 Kf_C 进行乘积, 就得到单张板轧制此道次变形抗力计算值 Kf , 即:

$$[0071] Kf = Kf_B \cdot Kf_C$$

[0072] (3) 根据相应工况参数通过摩擦系数模型计算得到单张板轧制此道次摩擦系数计算值 μ , 相应工况参数包括轧辊粗糙度 R, 润滑介质 LTy, 轧制长度 L, 单张板轧制线速度 v, 摩擦系数模型为摩擦系数解析模型与摩擦系数统计模型相结合的模型, 根据轧辊粗糙度 R、润滑介质 LTy、轧制长度 L、单张板轧制线速度 v 通过摩擦系数解析模型得到其输出 μ_B , 摩擦系数解析模型为 $\mu_B = f_2(R, LTy, L, v)$;

[0073] 其中, 摩擦系数解析模型详细表达式为:

$$[0074] \mu_B = \left(\mu_0(LTy) + d\mu_v(LTy) \cdot e^{-\frac{v}{v_0}} \right) \cdot \left(1 + c_R \cdot (R - R_0) \right) \cdot \left(1 + \frac{c_w}{1 + L/L_0} \right)$$

[0075] 式中 $\mu_0(LTy)$ ——由润滑介质决定的摩擦系数基准值;

[0076] $d\mu_v(LTy)$ ——由润滑介质决定的摩擦系数随速度变化关系;

[0077] v_0 ——基准速度, m/s;

[0078] R_0 ——粗糙度基准值, $\mu \text{ m}$;

[0079] c_R ——粗糙度系数, $\mu \text{ m}^{-1}$;

[0080] c_w ——轧制长度系数;

[0081] L_0 ——基本轧制长度, km ;

[0082] 摩擦系数统计模型根据单张板轧制线速度不同, 分别对应轧制线速度 0m/s 、 1m/s 、 2m/s 、 3m/s 、 4m/s 、 5m/s , 由 6 个支持向量机组成, 每个支持向量机输入为轧辊粗糙度 R 、轧辊材质 RTy 、润滑介质 LTy 、轧制长度 L , 根据输入得到每个支持向量机输出 μ_{ci} ($i = 1, 2, \dots, 6$), 6 个支持向量机输出 μ_{ci} 通过单张板轧制线速度 v 进行高斯插值得到总的统计模型输出 μ_c , 高斯插值计算模型为:

$$[0083] \mu_c = \sum_{i=1}^6 \mu_{ci} \cdot g\mu_i(v)$$

$$[0084] g\mu_i(v) = \frac{e^{-\frac{(v-v_i)^2}{\lambda^2}}}{\sum_{i=1}^6 e^{-\frac{(v-v_i)^2}{\lambda^2}}}$$

[0085] 式中, v_i 为 6 个支持向量机所对应的标准速度, 分别为 0m/s 、 1m/s 、 2m/s 、 3m/s 、 4m/s 、 5m/s , λ 为摩擦系数统计模型高斯插值宽度, 设为 0.7m/s , $g\mu_i(v)$ 为速度插值权重;

[0086] 将摩擦系数解析模型输出 μ_B 与摩擦系数统计模型输出 μ_c 进行乘积, 就得到单张板轧制此道次摩擦系数计算值 μ , 即:

$$[0087] \mu = \mu_B \cdot \mu_c$$

[0088] (4) 在已经得到单张板轧制此道次变形抗力计算值 Kf 与摩擦系数计算值 μ 的基础上, 读取当前的轧制工况参数与轧机设备参数, 分别通过轧制力计算模型、力矩计算模型、功率计算模型计算轧制力设定值 P 、力矩设定值 T 以及功率设定值 N , 并进一步通过辊缝计算模型得到辊缝设定值 S , 轧制工况参数为轧机入口侧设定厚度 H 、轧机出口侧设定厚度 h , 单张板宽度 W 以及单张板轧制线速度 v , 轧机设备参数包括工作辊直径 D_w 与轧机纵向刚度 C_p , 轧制力计算模型为 $P = f_3(H, h, W, Kf, \mu, D_w)$, 轧制力矩计算模型为 $T = f_4(H, h, P, D_w)$, 功率计算模型为 $N = f_5(T, H, h, D_w, \mu, v)$, 辊缝设定模型为 $S = f_6(P, h, C_p)$;

[0089] 其中轧制力计算模型的详细表达式为:

$$[0090] P = W \cdot Kf \cdot \sqrt{D_w' \cdot (H - h)} \cdot Q_P$$

[0091] 式中 W ——轧件宽度, mm ;

[0092] Q_P ——应力状态系数;

[0093] D_w' 为轧辊压扁半径, mm , 其计算公式为:

$$[0094] D_w' = D_w(1 + A_0 \cdot P / (W \cdot (H - h)))$$

[0095] 式中 A_0 ——轧辊压扁系数;

[0096] 应力状态系数 Q_P 计算模型如下:

$$[0097] Q_P = e_0 + e_1 \epsilon \mu \sqrt{D_w' / h} + e_2 \epsilon$$

[0098] 式中 ϵ ——为本道次变形率, 其计算模型为:

$$[0099] \epsilon = \frac{H - h}{H}$$

[0100] e_0, e_1, e_2 ——常系数, 目前常用的 Hill 公式分别取为 $1.08, 1.79, -1.02$;

[0101] 轧制力矩计算模型的详细解析表达式为：

$$[0102] T = 2P\sqrt{D_w \cdot (H-h)}\xi_M / 1000$$

[0103] 式中 ξ_M ——力臂系数；

[0104] 功率计算模型的详细表达式为：

$$[0105] N = \frac{2\pi \times 10^3}{60 \times 102} M \cdot n = 0.103 M \cdot n$$

[0106] 式中

[0107] M ——施加在电机轴上的总扭矩, kN·m, 其计算模型为：

$$[0108] M = \frac{T}{r} + M_f + M_x \pm M_d$$

[0109] 式中 T ——轧制力矩, kN·m；

[0110] M_f ——附加摩擦力矩, kN·m；

[0111] M_x ——空转力矩, kN·m；

[0112] M_d ——动力矩, kN·m；

[0113] r ——主传动速比；

[0114] n ——电机轴转速, rpm, 其计算模型为：

$$[0115] n = v / (1 + S_1) / (\pi \cdot D_w)$$

[0116] 其中, S_1 为前滑量, 其计算模型为：

$$[0117] S_1 = \frac{D_w}{h} \gamma_M^2$$

[0118] 式中 γ_M ——为中性角, 其计算模型为：

$$[0119] \gamma_M = \frac{H-h}{2h} \left(1 - \frac{1}{2\mu} \sqrt{\frac{H-h}{D_w}}\right)^2$$

[0120] 以六辊轧机为例, 辊缝设定模型的详细表达式为：

$$[0121] S = h - (P - P_0) / C_p - (F_w - F_{w0}) / C_{fw} - (F_m - F_{m0}) / C_{fm} - G$$

[0122] 式中 h ——出口厚度, mm；

[0123] P_0 ——零调轧制力, kN；

[0124] C_p ——轧制力纵向刚度, kN/mm；

[0125] F_w, F_m ——设定工作辊、中间辊弯辊力, kN；

[0126] F_{w0}, F_{m0} ——零调时的工作辊、中间辊弯辊力, kN；

[0127] C_{fw}, C_{fm} ——工作辊、中间辊弯辊力纵向刚度, kN/mm；

[0128] G ——轧辊热膨胀、磨损等因素引起的辊缝零位变化量, mm；

[0129] 若针对四辊轧机, 该模型只需将第 3 项关于中间辊弯辊的部分去掉；

[0130] 至此, 得到了单张板轧制此道次的辊缝设定值, 完成了此道次的厚度设定计算, 重新回到步骤 (1) 直到末道次；

[0131] 在完成一块单张板一个轧程的轧制后, 按照如下步骤进行厚度自学习计算：

[0132] (1) 读取由权利要求 1 ~ 6 任一所述的单张板精密冷轧板厚测量系统所测得的各道次轧机入口侧厚度测量值 H^* 、轧机出口侧厚度测量值 h^* ；

[0133] (2) 读取单张板轧制过程中各道次的轧制力测量值 P^* 、轧制功率测量值 N^* 以及单张板轧制线速度测量值 v^* ；

[0134] (3) 根据每道次轧机入口侧厚度测量值 H^* 、轧机出口侧厚度测量值 h^* 、轧制力测量值 P^* 、功率测量值 N^* , 单张板轧制线速度测量值 v^* 以及工作辊直径 D_w , 通过轧制力计算模型、轧制力矩计算模型以及功率计算模型建立方程组, 计算每道次的变形抗力实际值 Kf^* 与摩擦系数实际值 μ^* ;

[0135] (4) 计算每道次变形抗力实际值 Kf^* 与变形抗力计算值 Kf 的偏差 ek , 计算模型为 $ek = Kf - Kf^*$, 在此基础上根据高斯插值计算模型计算得到每个变形抗力支持向量机输出偏差 ek_i ($i = 1, 2, \dots, 6$), 计算模型为:

$$[0136] ek_i = \partial ek / \partial gk_i(\varepsilon_a)$$

[0137] 然后得到每个支持向量机新的输出 $Kfc_i^* = Kfc_i - ek_i$, 每个轧制道次, 6 个新的支持向量机输出与对应的工况参数化学成分 Che 、热轧终轧温度 FTe 、卷取温度 CTe 、退火温度 At_e 以及退火时间 AT_m 形成一组样本数据, 通过单个轧程中多个道次的样本数据, 用来对 6 个支持向量机的权值进行训练, 从而实现模型变形抗力自学习;

[0138] (5) 计算每道次摩擦系数实际值 μ^* 与摩擦系数计算值 μ 的偏差 eu , 计算模型为 $eu = \mu - \mu^*$, 在此基础上根据高斯插值计算模型计算得到每个变形抗力支持向量机输出偏差 eu_i ($i = 1, 2, \dots, 6$), 计算模型为:

$$[0139] eu_i = \partial eu / \partial gu_i(v)$$

[0140] 然后得到每个支持向量机新的输出 $\mu_{ci}^* = \mu_{ci} - eu_i$, 每个轧制道次, 6 个新的支持向量机输出与对应的工况参数轧辊粗糙度 R 、润滑介质 LTy 、轧制长度 L 形成一组样本数据, 通过单个轧程中多个道次的样本数据, 用来对 6 个支持向量机的权值进行训练, 从而实现模型摩擦系数自学习;

[0141] 至此, 通过对变形抗力与摩擦系数的自学习, 实现了对厚度设定模型的自学习。

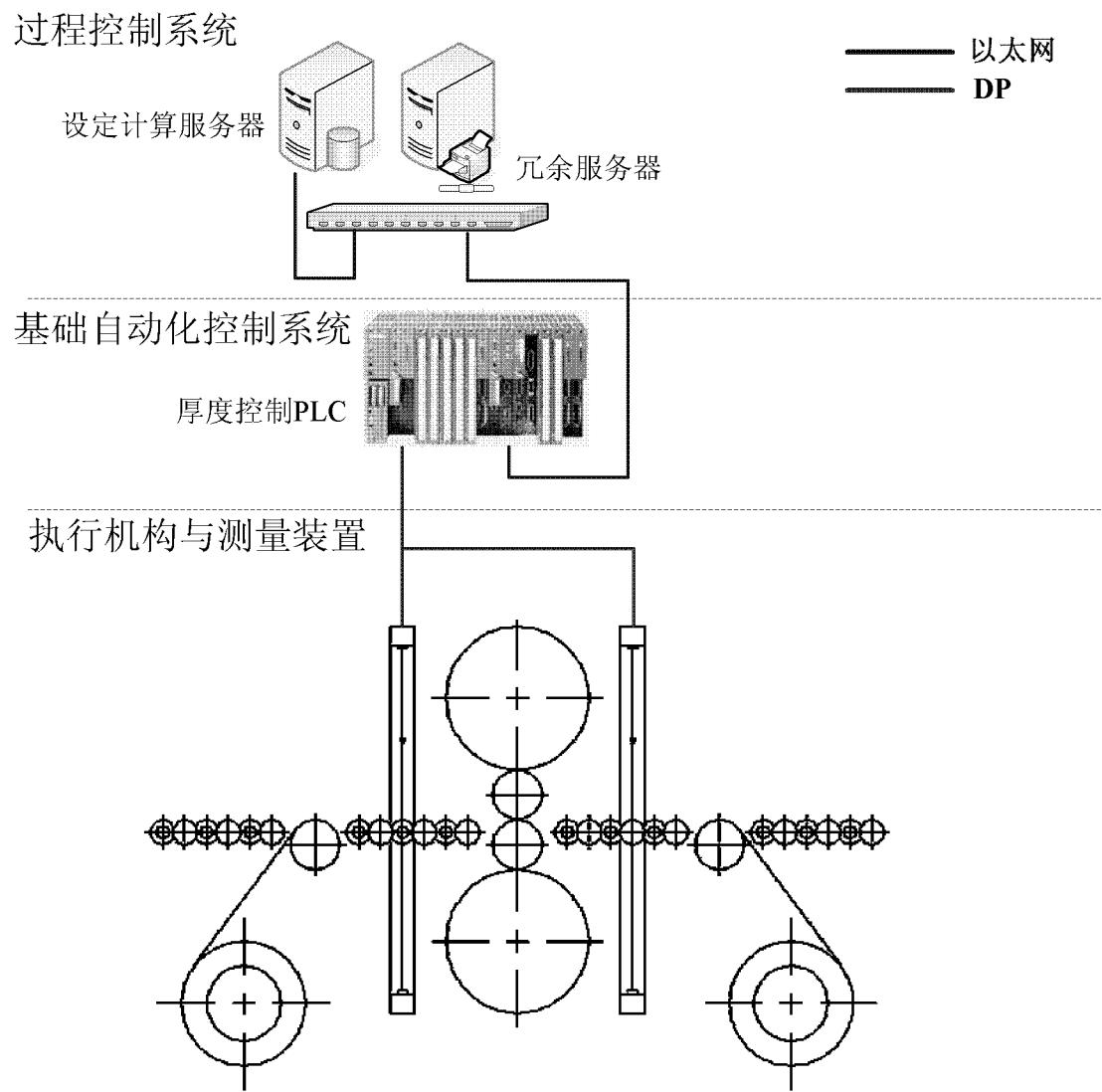


图 1

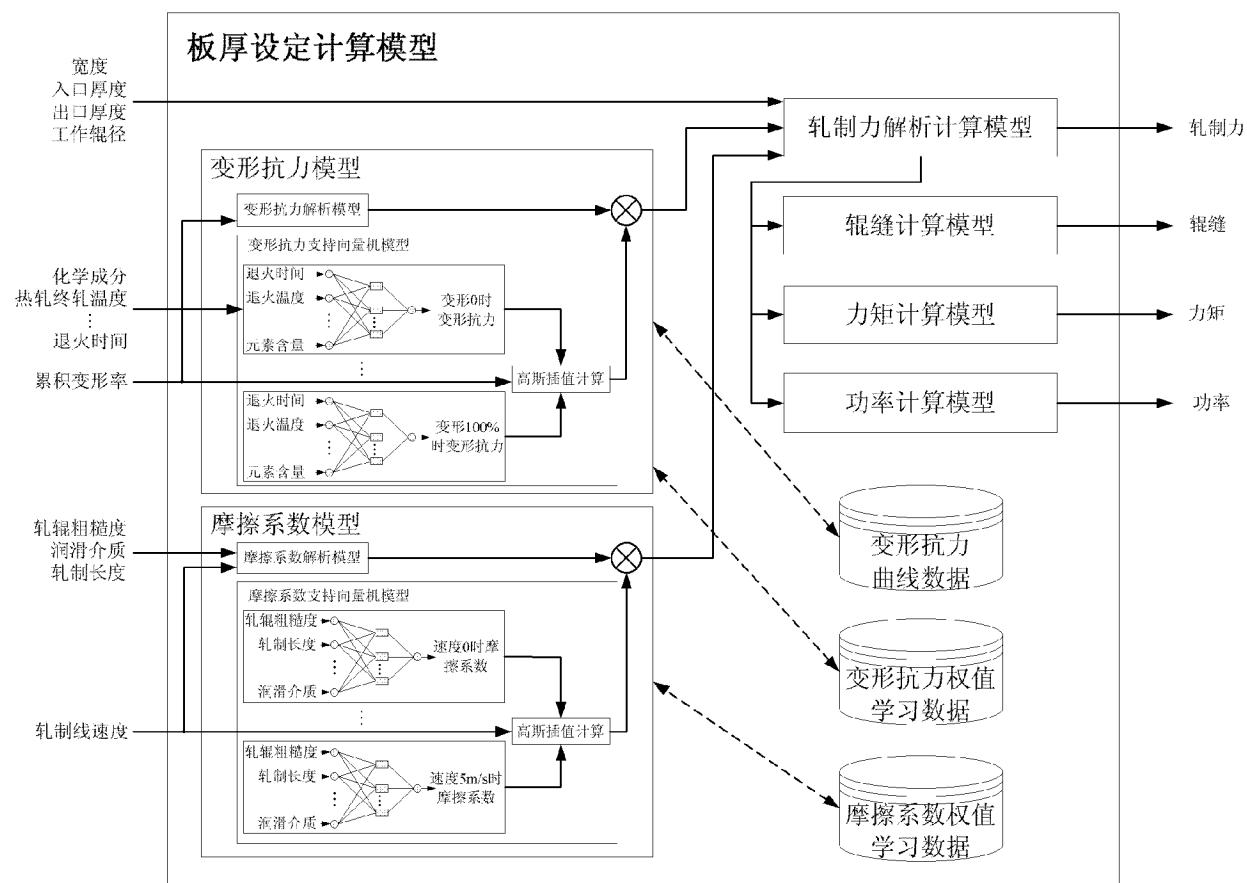


图 2