

文章编号: 1001-0920(2001)04-0461-04

厚度计型和动态设定型变刚度系统的统一性证明

王 君, 牛文勇, 王国栋

(东北大学 轧制技术及连轧自动化国家重点实验室, 辽宁 沈阳 110004)

摘 要: 从轧机变刚度定义出发, 指出变刚度控制和厚度控制存在着对偶性关系。提出一种新的厚度计型变刚度模型, 并对新的厚度计型和动态设定型两种变刚度系统的统一性进行证明。

关键词: 变刚度控制; 厚度计型变刚度; 动态设定型变刚度; 对偶性

中图分类号: TP 29 文献标识码: A

Verification of the Uniformity of Gaugemeter Type and Dynamic Set Type Mill Modulus Control System

WANG Jun, NIU Wen-yong, WANG Guo-dong

(The State Key Laboratory of Rolling Technology and Automation, Northeastern University, Shenyang 110004, China)

Abstract: The definition of equivalent mill modulus is given. The dual relationship between mill modulus control (MMC) and gauge control is described. A new gaugemeter MMC system is introduced. It is proved that gaugemeter MMC and dynamic set MMC are uniform.

Key words: mill modulus control; gaugemeter MMC; dynamic set MMC; duality

1 引 言

轧制控制通常采用辊缝调节或张力调节, 主要抑制轧机内扰或轧机外扰, 基本目标是板厚精度和板形质量。这些不同轧制情况对轧机刚度提出了不同的要求。然而一旦轧机设备制造完成, 轧机固有的机械刚度也就确定, 不可能依据具体轧制条件的要求做相应改变。由于高响应速度、高精度液压压下辊缝控制系统的开发和应用, 通过控制液压系统便可改变轧机等效刚度。目前, 这种变刚度方法已在连轧机上得到广泛应用^[1]。为改善变刚度系统的动态响应速度, 又进一步提出了动态设定型变刚度系统^[2]。

文献[3]对各种形式的变刚度控制系统进行比

较分析, 指出传统厚度计型变刚度控制系统动态品质并不理想。本文从轧机变刚度定义出发, 指出变刚度控制和厚度控制之间存在着对偶性关系, 并提出一种新的厚度计型变刚度模型, 证明新的厚度计型与动态设定型变刚度系统是统一的。这为变刚度方法的进一步研究与应用提供了理论依据。

2 轧机变刚度控制的基本原理

轧制过程是轧辊和轧件相互作用的过程, 在轧制力的作用下, 轧件发生塑性变形, 轧辊及轧机系统发生弹性变形(也称轧机弹跳)。轧机弹跳方程描述了轧机有载辊缝 h (忽略轧机出口轧件微小弹性恢复, 即为轧件出口厚度)、空载辊缝 S 和轧制力 P 之

收稿日期: 1999-10-08; 修回日期: 2000-03-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(59995440)

作者简介: 王君(1965—), 男, 辽宁建平人, 副教授, 硕士, 从事轧制技术及自动化研究; 王国栋(1942—), 男, 辽宁大连人, 教授, 博士生导师, 从事轧制技术及自动化研究。

间的关系,其增量形式为

$$\Delta h = \Delta S + \Delta P/M \quad (2.1)$$

式中 M 是轧机刚度,它是轧机弹性曲线上工作点切线的斜率,即在轧机空载辊缝保持恒定条件下,使轧机产生单位弹跳量所需的轧制力,可表示为

$$M = \Delta P / \Delta h |_{\Delta S=0} \quad (2.2)$$

对于特定的轧机,一定的轧制力变化量所产生的轧机弹跳变化量是一定的。但是对于具有快速响应特性的液压压下系统,可通过对轧制力的测量,及时控制液压压下系统动作,以补偿轧制力变化引起的轧机弹跳。如果只从轧机有载辊缝和轧制力增量的角度看,相当于轧机刚度的改变,也称轧机等效刚度的改变。

轧机等效刚度 M_c 反映了轧制力变化 ΔP 和与之对应的有载辊缝变化 Δh 之间的关系,即

$$M_c = \Delta P / \Delta h \quad (2.3)$$

在空载辊缝变化情况下,轧机弹跳量等于轧机有载辊缝变化与空载辊缝变化之差。轧机固有机械刚度 M 可表示为

$$M = \Delta P / (\Delta h - \Delta S) \quad (2.4)$$

将式(2.4)变形为

$$1/M = \Delta h / \Delta P - \Delta S / \Delta P \quad (2.5)$$

将式(2.3)式代入式(2.5),得

$$1/M_c = 1/M + \Delta S / \Delta P \quad (2.6)$$

式(2.6)表达了轧机固有机械刚度 M 和轧机等效刚度 M_c 之间的数量关系。可见,通过控制 ΔS 使之满足

$$\Delta S = f(\Delta P) \quad (2.7)$$

便可获得所要求的等效刚度 M_c 。如有必要,式(2.7)完全可以是非线性关系,相应的轧机等效刚度是一个变量。一般取

$$\Delta S = -c\Delta P/M \quad (2.8)$$

式中 c 为一常数。将式(2.8)代入式(2.6)得

$$M_c = M / (1 - c) \quad (2.9)$$

可见,通过改变 c 值,就可以改变轧机等效刚度。 c 与 M_c 之间关系见表 1^[4]。

表 1 c 与 M_c 之间关系

c 取值	M_c	轧机等效刚度
$c = 1$	$M_c =$	无穷硬刚度
$0 < c < 1$	$M_c > M$	硬刚度
$c = 0$	$M_c = M$	固有机械刚度
$c < 0$	$M_c < M$	软刚度

3 变刚度控制和厚度控制的对偶性

通过控制 ΔS , 使之满足式(2.8), 可得到式(2.9)表示的轧机等效刚度值。将式(2.8)变形为

$$\Delta S + c\Delta P/M = 0 \quad (3.1)$$

依据轧机弹跳方程(2.1), 令 $\Delta h = 0$, 可得到 BISRA 压力 AGC 模型

$$\Delta S + \Delta P/M = 0 \quad (3.2)$$

对比式(3.1)和式(3.2), 可见二者具有类似的模型结构。与式(3.2)的 BISRA 压力 AGC 模型相类比, 可称式(3.1)为 BISRA 变刚度模型。其具体意义在于: 式(3.2)是实现目标厚度控制的稳态条件, 而式(3.1)则是实现目标轧机等效刚度控制的稳态条件。

同理, 与厚差 Δh 和轧机弹跳方程(2.1)相对应, 定义等效厚差为 Δh_c , 定义等效轧机弹跳方程增量形式为

$$\Delta h_c = \Delta S + c\Delta P/M \quad (3.3)$$

这样, 变刚度控制问题便转化为控制等效厚差 $\Delta h_c = 0$ 的问题。

需要说明的是, 引入等效厚差、BISRA 变刚度模型和等效轧机弹跳方程等新概念, 目的是为了阐明轧机变刚度控制和厚度控制之间存在的对偶关系, 从而将厚度控制中成熟的思想方法移植到变刚度控制中来, 以改善变刚度系统的特性。但等效厚差和厚差是截然不同的两个概念, $\Delta h = 0$ 表示厚度偏差为零, 即轧件实际轧出厚度与要求的目标厚度相等; 而 $\Delta h_c = 0$ 则表示等效厚差为零, 说明轧机等效刚度与所要求的目标轧机等效刚度相等。

4 新的厚度计型变刚度模型

在厚度计型厚度控制系统中, 由于 BISRA 压力 AGC 模型只考虑了为保证轧件出口厚度偏差为零, 须有式(3.2)成立, 未考虑到在进行辊缝调节过程中, 也会引起轧制力的变化, 因而影响了厚度控制系统的动态特性。具体解决方法如下: 以锁定工作点 (S_0, P_0) 为基准, 假设某时刻轧制工作点为 ($S_0 + \Delta S, P_0 + \Delta P$), 依据轧机弹跳方程(2.1), 其对应的轧件出口厚差为 Δh 。为消除此厚差, 以此工作点为基准, 所需的辊缝位移量 ΔS^* 及其产生的轧制力增量 ΔP_s^* 应满足

$$\Delta P_s^* = -\Delta S^* M Q / (M + Q) \quad (4.1)$$

$$-\Delta h = \Delta S^* + \Delta P_s^* / M \quad (4.2)$$

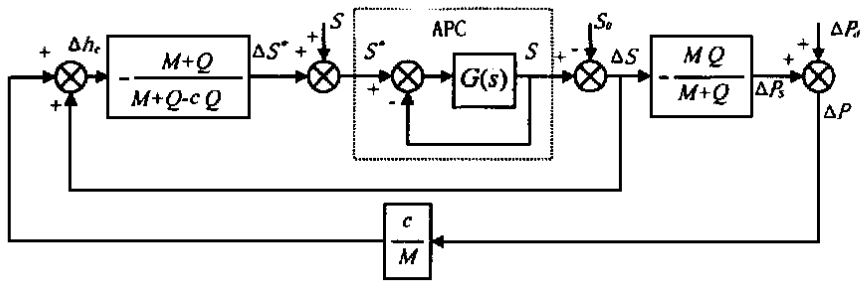


图 1 厚度计型变刚度系统框图

整理得

$$-\Delta h = \Delta S^* M / (M + Q) \quad (4.3)$$

式(4.3)反映了辊缝位移量 ΔS^* 和由此产生的轧件厚度增量 $-\Delta h$ 之间的对应关系。比例系数 $M / (M + Q)$ 称为压下有效系数, 而 $(M + Q) / M$ 称为压下补偿系数。

将式(4.3)变形为

$$\Delta S^* = -\Delta h (M + Q) / M \quad (4.4)$$

则式(4.4)即为厚度计型 AGC 的基本算法。

与厚度计型 AGC 的基本算法推导过程相对应, 下面推导厚度计型变刚度系统的基本算法。

以锁定工作点 (S_0, P_0) 为基准, 假设某时刻轧制工作点为 $(S_0 + \Delta S, P_0 + \Delta P)$, 依据等效轧机弹跳方程(3.3), 其对应的等效厚差为 Δh_c 。为消除此等效厚差, 以此工作点为基准, 所需的辊缝位移量 ΔS^* 及其造成的轧机弹跳增量 ΔP_s^* 应满足

$$\Delta P_s^* = -\Delta S^* M Q / (M + Q) \quad (4.5)$$

$$-\Delta h_c = \Delta S^* + c \Delta P_s^* / M \quad (4.6)$$

整理得

$$-\Delta h_c = \frac{\Delta S^* (M + Q - cQ)}{M + Q} \quad (4.7)$$

式(4.7)反映了辊缝位移量 ΔS^* 和由此产生的等效厚度增量 $-\Delta h_c$ 之间的对应关系。比例系数 $(M + Q - cQ) / (M + Q)$ 称为等效压下有效系数, 而 $(M + Q) / (M + Q - cQ)$ 称为等效压下补偿系数。

将式(4.7)变形为

$$\Delta S^* = \frac{-\Delta h_c (M + Q)}{M + Q - cQ} \quad (4.8)$$

式(4.8)即为新的厚度计型变刚度系统的基本算法。其对应的控制系统原理框图如图 1 所示。

图 1 中, $G(s)$ 为位置控制系统调节器、电液伺服阀和液压缸及轧机系统的综合传递函数; S 和 P 分别为液压缸位置和轧制力实际值; S_0 和 P_0 分别为位置和轧制力锁定值; ΔS 和 ΔP 分别是以位置和轧制力锁定值为基准的位置和轧制力增量; ΔP_s 和 ΔP_d

分别是由位置调节量和外扰量引起的轧制力增量; Δh_c 是以锁定等效厚度为基准的等效厚度偏差; ΔS^* 和 ΔS 均为克服等效厚度偏差 Δh_c 所需的位置增量, 但前者以液压缸位置实际值 S 为基准, 后者以液压缸位置锁定值为基准; M 为轧机刚度; Q 为轧件塑性系数。

最后归纳出厚度计型变刚度系统的控制算法表达式如下

$$\Delta h_c = \Delta S + \frac{c \Delta P}{M}$$

$$\Delta S^* = \frac{-\Delta h_c (M + Q)}{M + Q - cQ} \quad (4.9)$$

$$\Delta S = S - S_0 \quad (4.10)$$

$$\Delta P = P - P_0 \quad (4.11)$$

$$S^* = S + \Delta S^* \quad (4.12)$$

5 动态设定型变刚度模型

动态设定型变刚度系统^[2]的基本思想是: 在工作点锁定后的第一个采样周期, 由于位置系统还未进行调节, 轧制力增量 ΔP 全部由轧件扰动引起 ΔP_d , 因此有

$$\Delta S = 0, \quad \Delta P_s = 0, \quad \Delta P_d = \Delta P \quad (5.1)$$

此时对应的等效厚度偏差 Δh_c 为

$$\Delta h_c = c \Delta P_d / M \quad (5.2)$$

消除此等效厚差所需的位置调节量

$$\Delta S = -c \frac{\Delta P_d}{M} \frac{M + Q}{M + Q - cQ} \quad (5.3)$$

在其后的位置调节过程中, 轧制力增量 ΔP 既包含轧件扰动引起的部分 ΔP_d , 又包含位置调节量 ΔS 引起的部分 ΔP_s , 即有

$$\Delta P = \Delta P_s + \Delta P_d \quad (5.4)$$

$$\Delta P_s = -M Q \Delta S / (M + Q) \quad (5.5)$$

从轧制力增量 ΔP 中减去 ΔP_s 部分, 即得到轧件扰动引起的部分 ΔP_d 。 ΔP_d 与位置调节量 ΔS 有直

接的对应关系式(5.3)。

在位置调节过程中,位置系统设定值

$$S^* = S_0 + \Delta S \quad (5.6)$$

S^* 只与轧件扰动量 ΔP_d 有关,与位置调节过程本身无关,从而实现了动态设定(或设定一步到位)。

动态设定型变刚度模型实质上是在控制系统构成中使用了静态扰动观测器

$$\Delta P_d = \Delta P + MQ\Delta S / (M + Q) \quad (5.7)$$

动态设定型变刚度模型系统实用框图如图2所示。

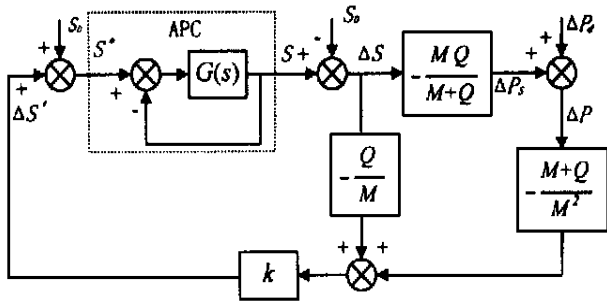


图2 动态设定型变刚度系统实用框图

示。动态设定型变刚度模型系统的控制算法表达式为

$$S^* = S_0 + \Delta S \quad (5.8)$$

$$\Delta S = \frac{-k\Delta S Q}{M} - \frac{k\Delta P(M+Q)}{M^2} \quad (5.9)$$

$$k = cM / (M + Q - cQ) \quad (5.10)$$

6 厚度计型和动态设定型变刚度模型的统一性证明

对于厚度计型和动态设定型 AGC 系统的统一性,作者在文献[5]中以控制算法表达式、控制系统框图和 P-h 图 3 种途径做了详细证明。同理,也可通过这 3 种途径详细证明厚度计型变刚度模型和动态设定型变刚度模型的统一性。为了简略,本文只从控

制算法上对上述问题加以证明。

变刚度模型控制算法的一般形式为

$$S^* = f(S, P, S_0, P_0) \quad (6.1)$$

对于厚度计型变刚度模型控制算法,将式(3.3), (4.9) ~ (4.12) 代入式(3.1) 得

$$S^* = S_0(M + Q) / (M + Q - cQ) - ScQ / (M + Q - cQ) - (P - P_0)c(M + Q) / M(M + Q - cQ) \quad (6.2)$$

对于动态设定型变刚度模型控制算法,将式(3.3), (4.9), (5.9) 和(5.10) 代入式(5.8), 所得结果与式(5.2) 完全相同。所以,厚度计型变刚度模型和动态设定型变刚度模型是统一的。

7 结 语

传统的厚度计型变刚度控制系统只是 BISRA 变刚度系统和厚度计型 AGC 系统的简单复合,系统的动态品质并不理想^[3]。本文提出一种新的厚度计型变刚度控制系统,它具有良好的动态特性,并证明新的厚度计型变刚度系统与动态设定型变刚度系统是完全统一的。这一结果澄清了一些轧机变刚度控制中的认识问题,为变刚度方法的进一步研究与应用提供了理论依据。

参考文献:

- [1] 日本钢铁协会. 板带轧制理论与实践[M]. 王国栋, 吴国良译. 北京: 中国铁道出版社, 1990.
- [2] 张进之. 压力 AGC 系统参数方程及变刚度轧机分析[J]. 冶金自动化, 1984, 8(1): 24-31.
- [3] 张进之. 压力 AGC 分类及控制效果分析[J]. 钢铁研究总院学报, 1987, 8(2): 87-94.
- [4] 丁修彦. 轧制过程自动化[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1986.
- [5] 王君. 厚度计型和动态设定型 AGC 系统的统一性证明[J]. 控制与决策, 2000, 15(3): 333-335.

(上接第 460 页)

- [8] 马钧水, 刘贵忠, 贾玉兰. 改进遗传算法搜索性能的大变异操作[J]. 控制理论与应用, 1998, 15(3): 404-407.
- [9] 伍永刚, 王定一. 一种改进的双基因遗传算法[J]. 华中理工大学学报, 1996, 24(10): 47-50.
- [10] 潘正君, 康立山, 陈毓屏. 演化计算[M]. 北京: 清华大学出版社, 1998.
- [11] K J 奥斯特隆姆, B 威顿马克. 自适应控制[M]. 北京: 科

学出版社, 1992.

- [12] P B Wilson, M C Macleod. Low implementation cost IIR digital filter design using genetic algorithms[A]. Workshop on Natural Algorithms in Signal Processing [C]. Essex, 1993. 1-8.
- [13] 刘妹琴, 邓燕妮, 廖晓昕. 实时遗传算法在位置伺服系统中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(2): 5-9.