

板带热连轧轧制变形规程的模糊多目标优化设计

刘晓星, 张海兵, 潘琦英

(昆明理工大学机电工程学院, 云南 昆明 650031)

摘要: 研究了目前板带热连轧轧制变形规程设计方法及在该领域中的应用状况, 分析并建立了以能耗最低、负荷分配最均衡及板形质量最优的多目标优化模型, 并运用模糊学的理论和方法对板带热连轧轧制变形规程多目标优化问题进行了求解. 最后以某六机架热连轧机为例, 对常规轧制, 各单目标优化轧制以及模糊多目标优化轧制的轧制变形规程进行了分析比较, 结果表明了该方法的有效性.

关键词: 轧制变形规程; 热连轧机; 模糊理论; 多目标优化

中图分类号: TG331 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007 - 855X(2004)06 - 0035 - 04

Multi - Object Fuzzy Optimization Design of Rolling Deforming Schedule on Hot Continuous Rolling Strip

LIU Xiao-xing, ZHANG Hai-bing, PAN Qi-ying

(Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China)

Abstract: The characteristics of rolling deforming schedule on hot continuous rolling strip and the application on optimization method in this field are studied. The mathematical model of multi - object optimization for minimizing energy consumption balancing load and best profile on it is established. The problem of multi - object optimization is solved by fuzzy theory and method. With the example of a six - hot continuous rolling strip, the deforming schedule of the common rolling, the single - object optimization design and the multi - object fuzzy optimization design are compared with each other, thus proving the effectiveness of the method.

Key words: rolling deforming schedule; hot continuous rolling strip; fuzzy theory; multi - object optimization

0 引言

目前, 在生产中制定的热连轧板带轧制变形规程一般情况下是以经验法为主, 即按一般的原则依照经验分配各道次的压下率, 进而确定其速度制度、温度制度、张力制度和辊型制度. 虽然能满足生产要求, 但所选的参数不一定是最佳的. 而优化设计的轧制变形规程, 是根据实际生产条件, 由设计者选择优化目标并归纳为最优化的数学模型, 通过适当的计算方法求解得出目标函数的最优值及相应的设计变量(参数). 由于单一目标的优化结果对实际生产而言会产生很多不利因素, 因此在实际生产中, 追求的目标往往不是单一的, 而是多个目标的综合, 但有时候这些目标之间是矛盾的, 例如优质、高产、低消耗是带钢热连轧生产追求的多个目标, 这些目标之间往往是矛盾的. 采用加权系数法的多目标优化模型, 在一定程度上解决了轧制规程多目标优化设计问题, 但由于加权系数难于客观确定, 人为主观因素太多, 所得优化结果仍不能令人满意. 本文通过热连轧轧制理论的研究, 建立了相应的轧制变形规程的多目标模糊优化模型, 并运用模糊学的理论和方法, 获得了模糊多目标轧制规程优化的最优解. 通过算例研究分析, 所确定的轧制规程证明了该方法的有效性和实用性.

收稿日期: 2004 - 03 - 02.

第一作者简介: 刘晓星(1962~), 男, 硕士, 副教授. 主要研究方向: 模糊优化设计, 轧制工艺学.

E - mail: kindsh36@163.net.

1 热连轧轧制规程多目标优化模型的建立

1.1 目标函数和设计变量

轧制变形规程优化的目的应该是使轧制过程处于最佳状态,实现低能耗并充分发挥轧机的生产能力,并确保产品质量,假设有 n 机架处于热连轧状态,其目标函数有以下几种:

(1) 轧制能耗的目标函数

$$F_1 = \sum_{i=1}^n W_i \quad (1)$$

式中 W_i 为各轧制道次的能耗. 在轧制条件一定时,即原料与产品尺寸、钢种、辊径、轧制温度、轧制速度、张力等条件一定时,各机架的轧制能耗的总功率与压下量有关.

用轧制力矩表示的热连轧轧制能耗为^[1]:

$$W_i = 1.03 M_i n_i \quad (2)$$

式中 M_i 、 n_i 分别为第 i 机架轧制力矩和轧辊转速.

(2) 等相对负荷目标函数^[1]

该目标函数是按各设备主电机容量大小,使之相对负荷均衡,这对挖潜设备能力和提高生产率带来益处.

$$F_2 = \sqrt{\sum_{i=1}^n (N_i - N_i)^2} \quad (3)$$

式中 N_i 、 N_i 分别表示第 i 机架(设备)主电机额定功率和实际功率, $N_i = N_i$, 为负荷因数.

(3) 板形良好的目标函数

良好的板形是指在辊型制度的一定的情况下,保证轧制前后断面必须几何相似,在一定轧制条件下,影响这种状态的因素就是轧制压力^[2]. 因此定义为保证板形良好的目标函数为:

$$F_3 = \sqrt{\sum_{i=1}^n (p_i - p_{0pi})^2} \quad (4)$$

式中 p_i 、 p_{0pi} 分别为第 i 机架的实际轧制压力和能获得良好板形的轧制压力.

(4) 设计变量

热带连轧机轧制制度的优化设计应为在满足各种约束条件下,为一个或多个目标合理地确定压下制度、速度制度及张力制度,也可以在特定的一些制度下通过优化设计的方法确定另外一些制度,因此设计变量可以是各道次压下量、各道次之间的张应力、速度等,或者是其中的一部分,总之,要根据实际情况和要求来确定设计变量.

1.2 约束条件

热带连轧机的约束条件可分为设备因素约束条件和工艺因素约束条件两大类.

设备因素的约束条件有

$$p_i \quad [p_i] \quad (5)$$

$$M_i \quad [M_i] \quad (6)$$

$$N_i \quad [N_i] \quad (7)$$

式中 p_i 、 M_i 、 N_i 为各道次轧制压力、轧制力矩与轧制功率; $[p_i]$ 、 $[M_i]$ 、 $[N_i]$ 为各道次(设备)的许用轧制压力、轧制力矩和轧制功率,由设备的强度条件确定.

工艺因素的约束条件有:

$$i_{\min} \leq i \leq i_{\max} \quad (8)$$

$$n_{i\min} \leq n_i \leq n_{i\max} \quad (9)$$

$$S_{i\min} \leq S_i \leq S_{i\max} \quad (10)$$

式中 i 、 n_i 、 S_i 分别为各道次压下率、轧辊转速和张力; i_{\min} 、 $n_{i\min}$ 、 $S_{i\min}$ 及 i_{\max} 、 $n_{i\max}$ 、 $S_{i\max}$ 分别为各道次允许的最小和最大的压下率、转速与张力, 由工艺条件确定。

1.3 数学模型

热连轧带钢的数学模型有以下几种:

(1) 轧制压力模型(Sims)^[3]

$$P = BL_c Q_p K \quad (11)$$

式中: P —轧制压力; B —轧件轧制前后的平均宽度; L_c —考虑轧辊弹性压扁后的变形区长度; Q_p —外摩擦(应力状态)影响系数; K —系数, 由经验公式按 $K = 1.15$ 计算, 为高速高温下的材料变形阻力。

(2) 轧制力矩模型(根据轧制力得)

$$M = 2PL_c \quad (12)$$

式中 M 为轧制力矩, L_c 为力臂系数。

(3) 前滑模型

连轧过程必须遵从金属秒体积流量相等的原则, 对相邻两架轧机的速比关系要求十分严格。因此要考虑各架次的前滑因素, 第 i 架轧机的轧辊速度为^[2]:

$$v_i = \frac{V_s}{h_i(1 + S_{hi})} \quad (13)$$

式中: V_s —轧件单位宽度上的金属秒体积流量; h_i —第 i 架的出口厚度; S_{hi} —第 i 架的前滑, 按 E·Fink 公式计算^[3]:

$$S_{hi} = \frac{(1 - \cos \alpha_i)(D_i \cos \alpha_i - h_i)}{h_i} \quad (14)$$

式中: α_i —第 i 道次的中性角; D_i —第 i 道次的轧辊直径。

(4) 温降模型

第 i 机架到第 $i + 1$ 机架的温降为^[2]:

$$t_i = t_i - t_{i+1} = t_0 K_a \frac{L_{i,i+1}}{h_n V_n}$$

式中: t_0 —连轧入口温度; K_a —系数, 可由实测或计算确定; $L_{i,i+1}$ — i 和 $i + 1$ 机架间的距离; h_n 、 V_n —成品厚度和末架出口速度。

2 模糊优化过程

由上述获得的热带连轧机轧制规程的多目标优化模型为:

求 $(x_1, x_2, \dots, x_r)^T$, 使 $\min(F_1, F_2, F_3)$ 并满足各种约束条件:

$$g_u(x) \leq 0 \quad (16)$$

式中, x_i 为各设计变量; F_i 为各目标函数; $g_u(x)$ 为转化后的各种约束函数。

运用模糊理论和方法求解上述多目标优化模型的步骤为^[4]:

(1) 按普通单目标优化方法在可行域内求出各目标的最优值 F_i^* 和最坏值 \bar{F}_i , 显然应该有

$$F_i^* \leq F_i \leq \bar{F}_i \quad (17)$$

(2) 将各最优解模糊化, 构造出其隶属函数:

$$\tilde{N}_i(x) = \left[\frac{\bar{F}_i - F_i}{\bar{F}_i - F_i^*} \right]^q \quad (18)$$

式中, q 为非负数, $\tilde{N}_i(x) \in [0, 1]$, 当 F_i 为最优值时, $\tilde{N}_i(x)$ 取 1; 当 F_i 为最坏值时, $\tilde{N}_i(x)$ 取 0。

(3) 引入辅助变量 将多目标问题转化为单目标问题, 即求 $(x_1, x_2, \dots, x_r, \lambda)^T$, 使 $\max \lambda$, 并满足各约束条件:

$$g_u(x) \leq 0 \quad (19)$$

$$\tilde{N}_i(x) \geq$$

(20)

上式为一单目标普通优化设计模型,相应于最大的一组解 $(x_1^*, x_2^*, \dots, x_r^*)^T$ 即为所求的多目标模糊优化解。

3 算例分析

某六机架热轧带钢轧机,工作辊径为 $\phi 640$ mm, 轧机机架间距为 5 800 mm, 主电机功率为 3 700 kW, 允许轧制压力为 23 520 kN, 开轧温度为 950, 成品速度 5.9 m/s. 来料厚度 24 mm, 成品为 1 100 mm \times 4.07 mm.

表 1 为常规轧制规程与按能耗最小目标 (F_1)、按等相对负荷目标 (F_2)、按板形良好目标 (F_3) 的单目标的优化轧制变形规程以及按模糊多目标 (F_1 、 F_2 、 F_3 同时考虑) 的优化轧制变形规程的结果对比, 优化计算中各道次压下率按 1% 离散取值, 温度按 1 离散取值, 离散范围由约束条件确定, 单目标模糊化后的隶属函数中取 q

$$= \frac{1}{2}, \text{辅助变量} = 0.8.$$

由表 1 可见:

- (1) 多目标模糊优化结果与常规轧制相比较, 能耗降低了 1.4%, 负荷均衡程度也有所改善, 板形控制略有不足;
- (2) 与按 F_1 单目标优化比较, 虽然能耗有所增加, 但各机架的能耗分配以及板形控制都要好得多;
- (3) 以按 F_2 、 F_3 单目标优化结果比较, 能耗分别降低了 1.5% 和 0.3%, 其他指标除了单目标针对的指标外, 都有所提高.

总之, 单一目标的优化结果除其针对的目标外, 其他目标效果都很差, 因此从综合效果来看, 模糊优化结果比常规轧制和按 F_1 、 F_2 、 F_3 单目标优化的几种轧制方案更具优越性, 所得结果具有实际意义并令人满意.

4 结论

(1) 通过轧制规程的优化设计能使热轧生产的规程更具科学性, 避免了靠经验来确定的人为主观因素太多的轧制规程, 它能提高生产率、降低能耗、挖潜各机架的设备能力、保证产量质量等; (下转第 58 页)

表 1 各种轧制变形规程参数对比表

Tab. 1 Parameter comparison table in different rollings

项 目	机 架							
	1	2	3	4	5	6		
常 规 轧 制	厚度/mm	24	14.88	9.97	6.98	5.58	4.63	4.07
	压下率/%	38	33	30	20	17	12	
	压力/kN	17 855	14 857	13 671	7 673	6 468	4 067	
	功率/kW	3 959	3 690	3 862	1 908	1 619	902	
	温度/	950	942	932	922	902	882	866
	指标	$F_1 = 15\ 940$		$F_2 = 3\ 162$		$F_3 = 7\ 236$		
按 F_1 优化轧制	厚度/mm	24	15.38	10.54	7.71	5.95	4.80	4.07
	压下率/%	36	31	27	23	19	15	
	压力/kN	16 258	13 769	11 427	9 496	8 056	5 998	
	功率/kW	3 411	3 223	2 856	2 466	2 140	1 522	
	温度/	950	940	928	914	897	879	867
	指标	$F_1^* = 15\ 618$		$F_2 = 3\ 326$		$F_3 = 14\ 693$		
按 F_2 优化轧制	厚度/mm	24	16.56	11.92	8.82	6.02	5.1	4.07
	压下率/%	31	28	26	25	23	20	
	压力/kN	15 086	13 085	11 213	9 900	8 863	6 925	
	功率/kW	3 197	3 145	2 834	2 603	2 386	1 791	
	温度/	950	943	935	924	901	880	868
	指标	$F_1 = 15\ 956$		$F_2^* = 2\ 802$		$F_3 = 11\ 073$		
按 F_3 优化轧制	厚度/mm	24	14.88	9.82	7.17	5.88	4.87	4.07
	压下率/%	38	34	27	18	17	16	
	压力/kN	16 703	14 419	11 426	8 400	7 620	6 194	
	功率/kW	3 536	3 462	2 887	2 213	2 056	1 606	
	温度/	950	942	931	923	900	885	867
	指标	$F_1 = 15\ 760$		$F_2 = 3\ 169$		$F_3^* = 4\ 781$		
按模糊化轧制	厚度/mm	24	15.84	10.93	7.65	5.74	4/53	4.07
	压下率/%	34	31	30	25	21	11	
	压力/kN	15 800	13 769	12 044	9 900	8 469	5 136	
	功率/kW	3 346	3 108	3 042	2 603	2 281	1 337	
	温度/	950	941	931	920	899	881	866
	指标	$F_1 = 15\ 717$		$F_2 = 3\ 084$		$F_3 = 9\ 802$		

5 结束语

在国家计划委员会高科技产业化基金的资助下,自主开发了具有开放式控制系统的拆垛、码垛 SCARA 机器人,且已在某卷烟厂得到了实际应用.该机器人机械结构设计合理,控制系统的硬件和软件具有较高开放性.除了用于拆垛、码垛以外,还可以广泛用于物流自动化行业中的物料搬运、分拣等方面,具有广阔的市场前景.此外,由于该机器人的控制系统具有较好的可扩展性和兼容性,因此极易扩展、移植用于其余类型的机器人、数控机床等自动化设备.

参考文献:

- [1] 孙斌,杨汝清. 开放式机器人控制器综述[J]. 机器人, 2001, 23(4): 374~378.
- [2] 谈世哲,梅志千,杨汝清. 基于 DSP 的工业机器人控制器的设计与实现[J]. 机器人, 2002, 24(2): 134~139.
- [3] 彭韬,周学才. 基于国产 MCT8000 运动控制卡的开放式结构机器人控制系统[J]. 制造业自动化, 2001, 23(2): 65~67.
- [4] 戴齐,姚先启. 机器人程序设计语言[J]. 机器人 1997, 19(5): 390~399.

(上接第 38 页)

(2) 单一的目标来优化轧制规程会对生产产生很多不利因素,因此对于复杂的热连轧过程应采用多目标优化模型;

(3) 模糊学的理论和方法为解决热轧轧制变形规程的多目标优化设计问题提供了一条有效的解决途径,它避免了加权系数法组合的多目标优化问题的人为因素,可以获得令人满意的综合效果.

参考文献:

- [1] 刘战英. 轧制变形规程优化设计[M]. 北京:冶金工业出版社,1996. 198.
- [2] 孙一康. 带钢热连轧数学模型基础[M]. 北京:冶金工业出版社,1979. 107.
- [3] 曹鸿德. 塑性变形力学基础与轧制原理[M]. 北京:机械工业出版社,1981. 230.
- [4] 王彩华,宋连天. 模糊论方法学[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1998. 121.

(上接第 45 页)

3) 功能梯度材料的铝-钛区以穿晶解理断裂为主,同时由于铝-钛区存在固溶体,使塑性较好的 Ti 分布在边界上,因而在其颗粒边界发生韧性断裂;

4) 功能梯度材料的富钛区完全是穿晶解理断裂,是典型的脆性断裂.

参考文献:

- [1] 陈方明,朱诚意. 功能梯度材料的研究现状及发展[J]. Electroplating & Finishing, 2000, 6:42~48.
- [2] Government Industrial Research Institute Tohoku. Proceedings of Functional Gradient Materials[J]. Japan, Metallurgia, 1998, 57(7):302~304.
- [3] 熊华平,张联盟,李俊国,等. 一次烧结制备 W-Mo-Ti-TiAl 系密度梯度材料[J]. 中国有色金属学报, 2000, 4:491~496.
- [4] 陈世朴,王永端. 金属电子显微分析[M]. 北京:机械工业出版社,1990. 596~598.
- [5] 武汉工业大学等四校合编. 物相分析[M]. 武汉:武汉工业大学出版社,1994. 52~60.
- [6] 冶金工业部钢铁研究院编. 难熔金属断口分析图谱[M]. 北京:科学出版社,1988. 50~53.