



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 106903173 A
(43)申请公布日 2017.06.30

(21)申请号 201710101411.3

(22)申请日 2017.02.24

(71)申请人 北京科技大学

地址 100083 北京市海淀区学院路30号

(72)发明人 韩庆 邵建 荆丰伟 宋勇

(74)专利代理机构 北京金智普华知识产权代理有限公司 11401

代理人 皋吉甫

(51) Int. Cl.

B21B 37/00(2006.01)

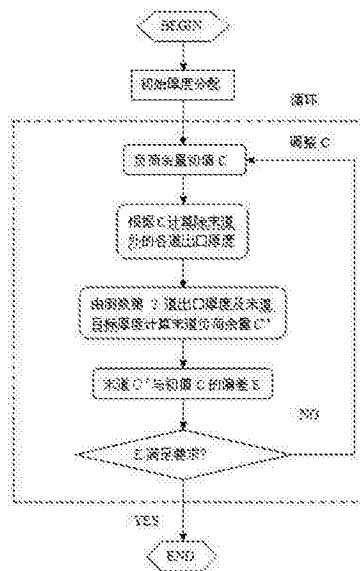
权利要求书1页 说明书4页 附图2页

(54)发明名称

一种基于综合等负荷函数的轧制规程优化方法

(57)摘要

本发明一种基于综合等负荷函数的轧制规程优化方法,步骤:1)根据初始厚度分配计算每道次的负荷函数值,并由此得出负荷余量初值;2)通过负荷余量初值计算出每道次的出口厚度;3)由倒数第2道次出口厚度及成品厚度计算末道次实际负荷余量;4)如果末道次负荷余量实际值与负荷余量初值有偏差,则根据修正后的负荷余量按第2步重新迭代计算,直至末道次负荷余量实际值与修正值偏差满足精度要求。此时各道厚度值及相应压力值构成了所需最优压下规程,当前的负荷余量修正值就是该规程的最优化负荷余量。通过本发明提及的一种基于综合等负荷函数的轧制规程优化方法,可以非常有效地解决压下规程的实时优化计算,具有较高的工程应用价值。



1. 一种基于综合等负荷函数的轧制规程优化方法,其特征在于,该优化方法具体包括以下步骤:

- 1) 根据初始厚度分配计算相应道次的负荷函数值,并由此得出负荷余量初值;
- 2) 通过负荷余量初值计算出每道次的出口厚度;
- 3) 由倒数第2道次出口厚度及成品厚度计算出末道次实际负荷余量;
- 4) 如果末道次负荷余量实际值与负荷余量初值有偏差,则根据修正后的负荷余量按第2步重新循环计算,直至上述偏差满足精度要求。

2. 根据权利要求1所述的方法,其特征在于,该方法具体步骤为:

步骤1:根据来料厚度 h_0 、成品厚度 h_n 、工艺给定厚度分配方案 h_1, h_2, \dots, h_{n-1} 及轧制力公式:

$$P = Bl'_{c}KQ_p \quad (1)$$

计算出每道次轧制力 P_i ,再由每道次最大允许轧制力 $P_{\max i}$ 这个工艺设备约束条件,求出每道次相应的负荷余量值 f_i :

$$f_i(h_{i-1}, h_i) = \frac{P_{\max i} - P_i}{P_{\max i}} \quad (2)$$

其中, i 为道次号, $i=1, 2, \dots, n$, n 为总道次数, P 为轧制力计算值, B 为轧件宽度, L'_{c} 为与轧辊接触弧长的水平投影长度, K 为变形抗力, Q_p 为应力状态系数;

步骤2:循环迭代的负荷余量初值 $C = (f_1 + f_2 + \dots + f_n) / n$,当 $i=1$ 时,根据第1道次最大允许轧制力 $P_{\max 1}$ 和负荷余量初值 C 由 $f_1(h_0, h'_1) = \frac{P_{m1} - P'_1}{P_{m1}} = C$,其中可以求得第1道次实际轧制力

P'_1 ,再根据轧制力模型 $P = Bl'_{c}KQ_p$ 可反推出此时的实际出口厚度 h'_1 ,然后依次求出各个道次的实际出口厚度 h'_i ,直到求得倒数第2道次实际出口厚度 h'_{n-1} ;

步骤3:根据步骤2求得的 h'_{n-1} 和成品厚度 h_n ,由轧制力模型 $P = Bl'_{c}KQ_p$ 计算出末道次实际轧制力 P'_n ,从而计算出末道次负荷余量实际值 $f'_n(h'_{n-1}, h_n) = \frac{P_{\max n} - P'_n}{P_{\max n}}$;

步骤4:根据步骤3的末道次负荷余量实际值 f'_n 求出与负荷余量初值 C 的偏差 $E = f'_n(h'_{n-1}, h_n) - C$,

如果偏差 E 绝对值 $|f'_n - C| \leq 0.0001$,则认为 f'_n 与 C 近似相等,此时已满足每道次等负荷要求而无需迭代;

如果 $E > 0$,以 $(1 - f'_n) / 15$ 步长增大 C ,即 $C' = C + (1 - f'_n) / 15$,如果 $E < 0$,以 $(1 - f'_n) / 15$ 步长减小 C ,即 $C' = C - (1 - f'_n) / 15$,然后根据负荷余量修正值 C' ,再从第2步开始作为循环迭代初值,直到末道次负荷余量实际值 f'_n 与负荷余量修正值 C' 的偏差满足精度要求为止,即 $|f'_n - C'| \leq 0.0001$,此时负荷余量 $f'_1 = f'_2 = \dots = f'_{n-1} = f'_n$,得到的 $h'_1, h'_2, \dots, h'_{n-1}, h'_n$ 即为综合等负荷下的最优厚度分配。

3. 根据权利要求2所述的方法,其特征在于,所述的目标函数 $E = f'_n(h'_{n-1}, h_n) - C$ 是 C 的单调函数, E 随 C 的增大而减小,随 C 的减小而增大,符合单调性。以 $(1 - f'_n) / 15$ 步长调整 C' 值,则肯定有一 C' 值满足 $|f'_n - C'| \leq 0.0001$ 条件,即满足 $f'_1 = f'_2 = \dots = f'_{n-1} = f'_n$ 。

一种基于综合等负荷函数的轧制规程优化方法

技术领域：

[0001] 本发明涉及冶金工艺、自动化及轧制技术，具体指一种基于综合等负荷分配法的轧制规程优化方法。

背景技术：

[0002] 带钢轧制生产过程中，轧制规程设定一向是组织生产的关键，其中，负荷分配决定了轧制过程的状态特性，其合理与否，对产品质量的高低、轧制设备调整的难易、机组运行的可靠性和生产过程的稳定性等均有直接的影响。从本质上讲，负荷分配决定了轧制过程的状态特性。例如，负荷分配直接影响到板形、板厚精度等产品质量，负荷分配还对轧制能耗、辊耗、生产过程的稳定性和作业率等项指标有重要影响。在某些情况下，负荷分配还将影响到产品最终的组织性能，因而负荷分配历来为人们所重视，成为当今轧制技术领域的一个十分重要的课题。

[0003] 文献1(关于轧机的最佳负荷分配问题，钢铁，1980，(1)：42~48)提出了综合等负荷函数法，其思想是基于轧制过程中轧制力、力矩等轧机系统的负荷是进出口厚度的单调函数这一工艺特性，选择如下工艺目标函数：

$$[0004] \quad f(h_1, h_2 \dots h_{n-1}) = \max_{1 \leq i \leq n} (f_i(h_{i-1}, h_i) | i=1, 2 \dots n) = \min \quad (1)$$

$$[0005] \quad \text{其中：} f_i(h_{i-1}, h_i) = \min \left\{ \alpha_{Pi} \frac{P_{mi} - P_i}{P_{mi}}, \alpha_{Ni} \frac{N_{mi} - N_i}{N_{mi}}, \dots \right\} \quad (2)$$

[0006] 则最优解 h_1^*, \dots, h_{n-1}^* 存在唯一并满足条件：

$$[0007] \quad f_1(H, h_1^*) = f_2(h_1^*, h_2^*) = \dots = f_n(h_{n-1}^*, h) = C^* \quad (3)$$

[0008] 相应的 C^* 是一个无量纲数，代表了轧机负载能力的最小余量。

[0009] 由(1)、(2)两式可见综合等负荷优化算法给出的是按各道相对负荷相等的厚度分配方案，而且是按(2)式中轧机压力、传动力矩、电机功率等项目中的薄弱环节(通过该式前面取最小值)选取的，这样就保证了优化规程是按指定的轧机装备中能力最差的环节来优化设计的。

[0010] 目前实际应用的负荷分配多根据生产经验制定，即厚度分配由工艺根据经验给定。但合理的厚度分配与设备条件、轧制品种、规格和加工过程中力学性能诸因素直接相关，各因素间又互相影响，关系十分复杂，故工艺给定的经验压下制度很难满足实际来料和当前设备运行状况等工艺条件的千变万化，往往只在某一特定工况下适用，但当工况变化时同样的压下制度便不合理或不是最优的。

发明内容：

[0011] 为了解决上述问题，本发明目的是提供一种基于综合等负荷函数的轧制规程优化方法，解决了经验负荷分配在实际应用中可能出现不是最优轧制规程的问题。理论分析和大量工程实践表明，该算法的稳定性和计算的快速性完全达到现代轧机实时应用的要求，

[0012] 本发明技术方案是：一种基于综合等负荷函数的轧制规程优化方法，具体技术方案如下：

[0013] 首先，根据每道次最大允许轧制力 P_{mi} 构造负荷函数 $f_i(h_{i-1}, h_i) = \frac{P_{\max i} - P_i}{P_{\max i}}$ ，其中， $i = 1, 2, \dots, n$ ， n 为总道次数；

[0014] 其次，根据来料厚度 h_0 、成品厚度 h_n 、工艺给定的初始厚度分配 h_1, h_2, \dots, h_{n-1} 和轧制力公式 $P = B l'_c K Q_p$ 计算出轧制力。其中， P 为轧制力计算值， B 为轧件宽度， l'_c 为与轧辊接触弧长的水平投影长度， K 为变形抗力， Q_p 为应力状态系数；

[0015] 然后，采用负荷函数 $f_i(h_{i-1}, h_i) = \frac{P_{\max i} - P_i}{P_{\max i}}$ 计算每道次相应的负荷函数值 $f_1, f_2, \dots, f_{n-1}, f_n$ ，而负荷余量的初值按下式计算 $C = (f_1 + f_2 + \dots + f_n) / n$ 。

[0016] 对于第1道次，由 $f_1(h_0, h'_1) = \frac{P_{m1} - P'_1}{P_{m1}} = C$ 可以求得第1道次轧制力 P'_1 ，再根据轧制力模型 $P = B l'_c K Q_p$ 可反推出 h'_1 ，与上类同，可以通过求解 $f_2(h'_1, h'_2) = C$ 得 h'_2 ，直到求得倒数第2道次出口厚度 h'_{n-1} ，这时有 $f'_1 = f'_2 = \dots = f'_{n-1} = C$ 。

[0017] 由 h'_{n-1} 和成品厚度 h_n 计算出末道次负荷余量 $f'_n(h'_{n-1}, h_n) = \frac{P_{\max n} - P'_n}{P_{\max n}}$ 。

[0018] 此时利用末道次负荷余量计算值与初值 C 的偏差 $E = f'_n(h'_{n-1}, h_n) - C$ 是 C 的单调函数，即 E 随 C 的增大而减小，随 C 的减小而增大，符合单调性这一特点重新作负荷余量修正值 C' 。

[0019] 如果偏差 E 绝对值 $|f'_n - C'| \leq 0.0001$ ，则认为 f'_n 与 C 近似相等，此时已满足每道次等负荷要求而无需迭代。

[0020] 如果 $E > 0$ ，以 $(1 - f'_n) / 15$ 步长增大 C ，则修正后的负荷余量 $C' = C + (1 - f'_n) / 15$ ，如果 $E < 0$ ，以 $(1 - f'_n) / 15$ 步长减小 C ，则修正后的负荷余量 $C' = C - (1 - f'_n) / 15$ 。以修正后的负荷余量

C' ，根据 $f_i(h_{i-1}, h_i) = \frac{P_{\max i} - P_i}{P_{\max i}} = C'$ 和轧制力模型 $P = B l'_c K Q_p$ 重新计算 h'_{n-1} ，再由

$f'_n(h'_{n-1}, h_n) = \frac{P_{\max n} - P'_n}{P_{\max n}}$ 得出末道次负荷余量实际值 f'_n ，循环迭代直到 $|f'_n - C'| \leq 0.001$ 为

止。此时得到的 $h_1, h_2, \dots, h_{n-1}, h_n$ 即为综合等负荷下的最优厚度分配。

[0021] 本发明的特点之一是，从计算方便来讲代表负荷余量的目标函数应该采用形如

(4) 式的相对负荷，比如更简单的形式 $f_i(h_{i-1}, h_i) = \frac{P_{\max i} - P_i}{P_{\max i}}$ 或 $f_i(h_{i-1}, h_i) = P_i$ ，前者是相对

压力负荷，而后者是绝对压力，一般界于0和1之间，仅当超负荷时出现负值，其值变化范围不大。而采用诸如轧制力等直接作为负荷函数，随着轧机大小的不同，其值变化范围很大，不利于建立算法的普适性；

[0022] 本发明的特点之二是，所述的目标函数 $E = f'_n(h'_{n-1}, h_n) - C$ 是 C 的单调函数，即 E 随 C 的增大而减小，随 C 的减小而增大，符合单调性，则肯定有一 C 值满足 $|f_n - C| \leq 0.0001$ 条件，从理论上保证了循环迭代的有解性。

[0023] 本发明的特点之三是,循环迭代算法的复杂化虽然增加了计算时间。但随着现代计算机技术的飞速发展,其计算速度也能完全满足在线应用,一个典型的粗轧5道轧制规程在服务器上的计算时间一般不超过200ms,如图2所示。上述基本原理对任何常规板带轧制过程均适用,包括有色金属的轧制。

附图说明:

[0024] 图1本发明的技术方案流程图。

[0025] 图2人工规程与等负荷规程压差对比曲线。

具体实施方式

[0026] 下面结合具体实际应用效果对本发明的技术方案做进一步说明。

[0027] 如图1所示,本发明一种一种基于综合等负荷函数的轧制优化方法,该方案据包括以下步骤:

[0028] 1) 根据来料厚度 h_0 、成品厚度 h_n ,工艺给定厚度分配方案 h_1, h_2, \dots, h_{n-1} 及轧制力模型 $P=B1'cKQ_p$ 计算出每道次轧制力 P_i ,再由每道次最大允许轧制力 P_{maxi} 这个工艺设备约束

条件,求出每道次相应的负荷余量值 $f_i(h_{i-1}, h_i) = \frac{P_{maxi} - P_i}{P_{maxi}}$,其中 $i=1, 2, \dots, n$, i 为道次号,

n 为总道次数, P 为轧制力计算值, B 为轧件宽度, L' 为与轧辊接触弧长的水平投影长度, K 为变形抗力, Q_p 为应力状态系数。一般情况下,由工艺给定厚度分配方案计算出来的每道次负荷余量互不相等,即 $f_1 \neq f_2 \dots \neq f_{n-1} \neq f_n$ 。为了达到等负荷分配规程的目的,需要进行循环迭代使最终的负荷余量值相等,即使 $f'_1 = f'_2 \dots = f'_{n-1} = f'_n$;

[0029] 2) 循环迭代的负荷余量初值 $C = (f_1 + f_2 \dots + f_n) / n$ 。当 $i=1$ 时,根据第1道次最大允许

轧制力 P_{max1} 和负荷余量初值 C 由 $f_1(h_0, h'_1) = \frac{P_{m1} - P'_1}{P_{m1}} = C$,其中可以求得第1道次实际轧制力

P'_1 ,再根据轧制力模型 $P=B1'cKQ_p$ 可反推出此时的实际出口厚度 h'_1 。然后依次求出各个道次的实际出口厚度 h'_1 ,直到求得倒数第2道次实际出口厚度 h'_{n-1} ;

[0030] 3) 根据步骤2求得的 h'_{n-1} 和成品厚度 h_n ,由轧制力模型 $P=B1'cKQ_p$ 计算出末道次实际

轧制力 P'_n ,从而计算出末道次负荷余量实际值 $f'_n(h'_{n-1}, h_n) = \frac{P_{maxn} - P'_n}{P_{maxn}}$;

[0031] 4) 根据步骤3的末道次负荷余量实际值 f'_n 求出与负荷余量初值 C 的偏差 $E = f'_n(h'_{n-1}, h_n) - C$ 。如果偏差 E 绝对值 $|f'_n - C| \leq 0.0001$,则认为 f'_n 与 C 近似相等,此时已满足每道次等负荷要求而无需迭代。如果 $E > 0$,以 $(1 - f'_n) / 15$ 步长增大 C ,即 $C' = C + (1 - f'_n) / 15$,如果 $E < 0$,以 $(1 - f'_n) / 15$ 步长减小 C ,即 $C' = C - (1 - f'_n) / 15$,然后根据负荷余量修正值 C' ,再从第2步开始作为循环迭代初值,直到末道次负荷余量实际值 f'_n 与负荷余量修正值 C' 的偏差满足精度要求为止,即 $|f'_n - C'| \leq 0.0001$,此时负荷余量 $f'_1 = f'_2 \dots = f'_{n-1} = f'_n$,得到的 $h'_1, h'_2, \dots, h'_{n-1}, h'_n$ 即为综合等负荷下的最优厚度分配。

[0032] 基于综合等负荷函数的轧制规程优化方法全面考虑了轧机系统的各个环节的约束条件,以厚度为160mm、宽度1250mm、长度8000mm、钢种为Q235B的板坯,轧制中间坯厚度为30mm的5道次轧制规程为例,优化规程目标函数采用等轧制力轧制。优化规程计算结果如表

1所示。

[0033] 表1采用相对轧制力作为目标函数的轧制规程

道次号	出口厚度/mm	压下量/mm	相对压下率	轧制力/ton	轧制速度/mps
1	117.41	42.58	0.2661	1726.55	2.0
2	84.34	33.06	0.2816	1726.66	2.0
3	60.14	24.19	0.2868	1727.31	2.5
4	42.69	17.45	0.2902	1727.31	3.0
5	30.00	12.70	0.2973	1727.31	3.0

[0035] 从上表可知,该算法可以有效计算出符合等轧制力标准的轧制规程,体现了等轧制力分配的原则。现场通过对优化规程的大量试算和分析,得到如下初步结果:基于综合等负荷函数的轧制规程优化方法能使轧机系统负荷均衡,显著减少轧制力、功率等负荷波动,且保证了算法的稳定性,为该方法的实时在线应用奠定了坚实的基础。新开发的优化规程算法,在不增加计算时间的前提下,可以按任意指定的负荷分配原则进行快速计算,完全能满足板带生产压下规程的实时计算和设定要求。

[0036] 本发明已在国内某1450mm热轧机上得到应用,以厚度160mm、宽度1250mm、长度8000mm、钢种Q235B的板坯轧制中间坯厚度30mm的粗轧规程为例,通过采集现场60块板坯实测数据来分析本发明的优越性。为了增加可比性,连续轧制的60块板坯由同一人操作,前30块板坯采用传统的经验方法分配规程进行辊缝设定,后30块是采用综合等负荷优化方法计算的规程来设定辊缝,每块板坯均轧5道次。考虑到第1道次轧制力会随板坯实际厚度和实际温度与原始数据的偏差而大范围波动,故取第2到5相邻两道次轧制压力差进行分析比较,即 $\Delta P_2 = P_2 - P_3$, $\Delta P_3 = P_3 - P_4$, $\Delta P_4 = P_4 - P_5$ 。由图2可知采用基于等压力原则的优化方法得出的轧制规程(后30块)的道次间实测轧制力差均在10吨以内,比传统经验负荷分配方式的轧制力差减少50%到90%,说明采用基于综合等负荷函数的轧制规程优化方法计算的轧制规程满足了等轧制力分配的原则。

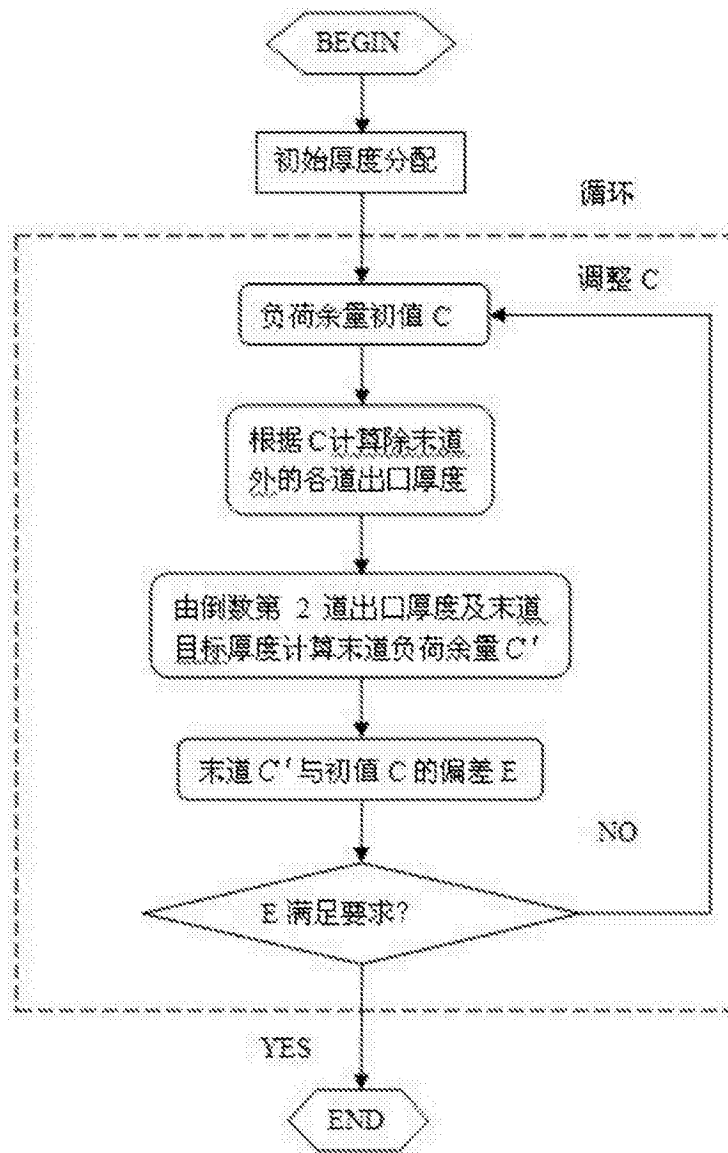


图1

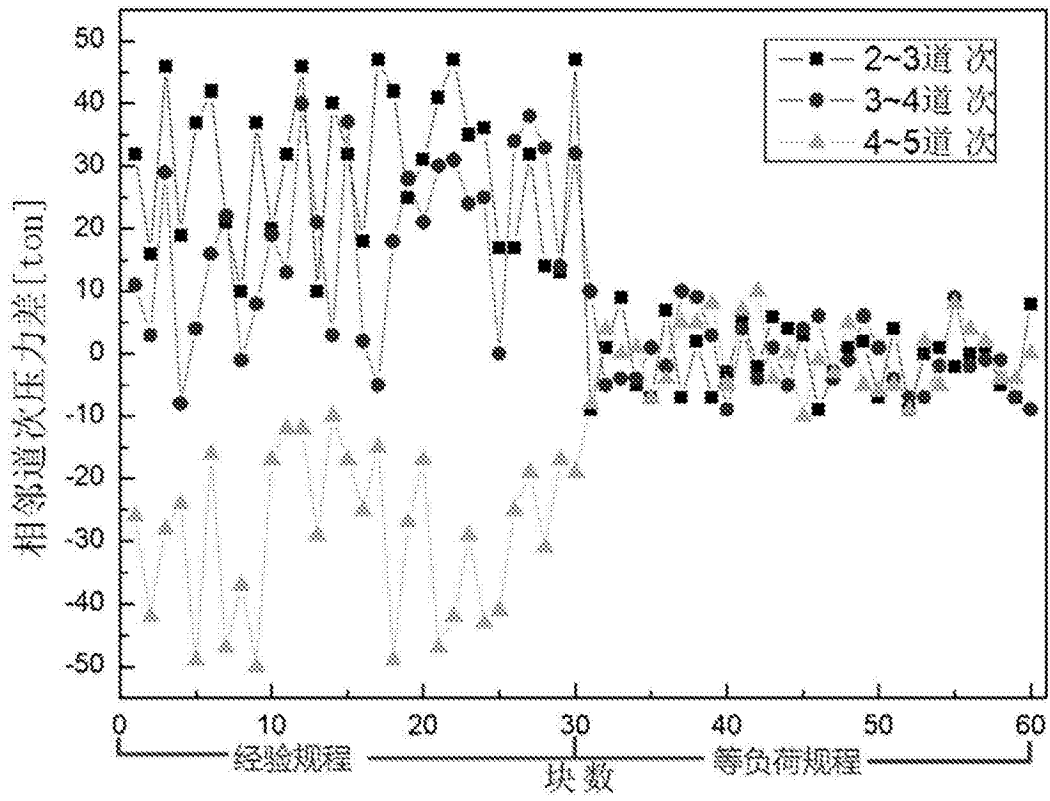


图2