



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 113084112 B

(45) 授权公告日 2022.08.02

(21) 申请号 202110376356.5

CN 1654142 A, 2005.08.17

(22) 申请日 2021.04.02

审查员 王学菲

(65) 同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 113084112 A

(43) 申请公布日 2021.07.09

(73) 专利权人 河北农业大学

地址 066003 河北省秦皇岛市海港区河北

大街东段52号

专利权人 燕山大学

(72) 发明人 周超 王芳 张兴中 于艳磊

杨超

(51) Int. Cl.

B22D 11/16 (2006.01)

(56) 对比文件

CN 103752783 A, 2014.04.30

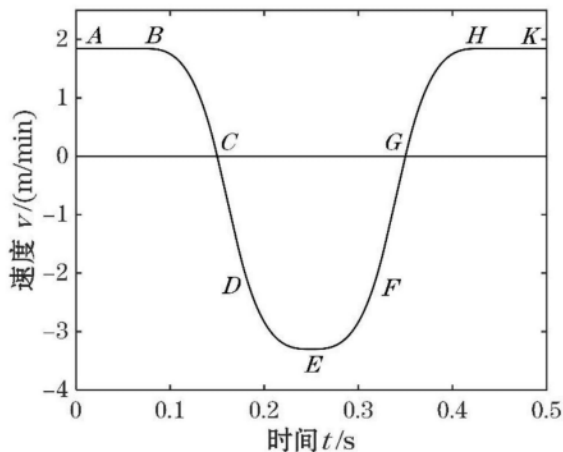
权利要求书2页 说明书8页 附图2页

(54) 发明名称

连铸结晶器非正弦振动方法

(57) 摘要

本发明涉及一种连铸结晶器非正弦振动方法,在每一个振动周期内,振动波形由八段函数组成,通过控制结晶器驱动装置的运动规律,使结晶器实现八段函数表示的非正弦振动波形;在  $0 \leq t \leq t_B$  内,结晶器匀速向上运动,速度为一常数;在  $t_B \leq t \leq t_C$  内,结晶器向上做变减速运动,速度曲线为三次方曲线,运动到  $t_C$  时刻,速度变为0;在  $t_C \leq t \leq t_D$  内,结晶器匀加速向下运动,速度为斜直线;在  $t_D \leq t \leq t_E$  内,结晶器先是变加速向下运动,在  $t_E \leq t \leq t_F$  内,变减速向下运动,速度曲线均为三次方曲线;在  $t_F \leq t \leq t_G$  内,结晶器匀减速向下运动,到达  $t_G$  时刻,速度变为0,该时间段内速度曲线为直线;在  $t_G \leq t \leq t_H$  内,结晶器变加速向上运动,速度曲线为三次方曲线;在  $t_H \leq t \leq t_K$  内,结晶器匀速向上运动,速度为一常数,是一段水平线。



1. 一种连铸结晶器非正弦振动方法,其特征在于:非正弦振动方法的具体过程为:通过控制结晶器驱动装置的运动规律,使连铸结晶器在驱动装置的带动下,在每个振动周期内实现如下八段函数所确定的非正弦振动波形:

$$v = \begin{cases} v_B & 0 \leq t \leq t_B \\ -k(t-t_B)^3 + v_B & t_B \leq t \leq t_C \\ -3k(t_C-t_B)^2(t-t_C) & t_C \leq t \leq t_D \\ -k\left(t-\frac{1}{2f}\right)^3 - 3k(t_C-t_B)^2\left(\frac{1}{2f}-2t_C+t_B\right) - v_B & t_D \leq t \leq t_E \\ k\left(t-\frac{1}{2f}\right)^3 - 3k(t_C-t_B)^2\left(\frac{1}{2f}-2t_C+t_B\right) - v_B & t_E \leq t \leq t_F \\ 3k(t_C-t_B)^2\left(t-\frac{1}{f}+t_C\right) & t_F \leq t \leq t_G \\ k\left(t-\frac{1}{f}+t_B\right)^3 + v_B & t_G \leq t \leq t_H \\ v_B & t_H \leq t \leq t_K \end{cases}$$

式中, $v$ 为结晶器运动的速度, $t$ 为时间; $t_B$ 、 $t_C$ 、 $t_D$ 、 $t_E$ 、 $t_F$ 、 $t_G$ 、 $t_H$ 和 $t_K$ 分别为非正弦振动波形各阶段时间点, $v_B$ 为 $t_B$ 时刻的速度, $k$ 为待定参数, $f$ 为振动频率;

在每一个振动周期内,振动过程分为以下八个阶段,每个阶段分别按照如下八段速度波形进行振动,使结晶器实现上述八段函数表示的非正弦振动:

在 $0 \leq t \leq t_B$ 内,结晶器匀速向上运动,速度为一常数;

在 $t_B \leq t \leq t_C$ 内,结晶器向上做变减速运动,速度曲线为三次方曲线,运动到 $t_C$ 时刻,速度变为0;

在 $t_C \leq t \leq t_D$ 内,结晶器匀加速向下运动,速度为斜直线;

在 $t_D \leq t \leq t_E$ 内,结晶器变加速向下运动,速度曲线为三次方曲线;

在 $t_E \leq t \leq t_F$ 内,结晶器变减速向下运动,速度曲线为三次方曲线;

在 $t_F \leq t \leq t_G$ 内,结晶器匀减速向下运动,到达 $t_G$ 时刻,速度变为0,该时间段内速度曲线为直线;

在 $t_G \leq t \leq t_H$ 内,结晶器变加速向上运动,速度曲线三次方曲线;

在 $t_H \leq t \leq t_K$ 内,结晶器匀速向上运动,速度为一常数,是一段水平线;

其中,参数 $k = \frac{4h}{4t_C(t_C-t_B)^3 - (t_C-t_B)^4}$ , $h$ 为结晶器从0时刻运动到 $t_C$ 时刻的运动位移。

2. 根据权利要求1所述的连铸结晶器非正弦振动方法,其特征在于:对于结晶器非正弦振动,

$$t_C = \frac{1+\alpha}{4f}$$

其中, $f$ 为振动频率、 $\alpha$ 为波形偏斜率。

3. 根据权利要求2所述的连铸结晶器非正弦振动方法,其特征在于:

$$t_B = \frac{(1+\alpha) - \sqrt{(1+\alpha)^2 - 3\alpha}}{2f}。$$

4. 根据权利要求3所述的连铸结晶器非正弦振动方法,其特征在于:

$$t_E = \frac{1}{2f}$$

$$t_F = \frac{1}{f} - t_D,$$

$$t_G = \frac{1}{f} - t_C,$$

$$t_H = \frac{1}{f} - t_B,$$

$$t_D = \frac{1}{2f} + t_B - t_C。$$

5. 根据权利要求2或3所述的连铸结晶器非正弦振动方法,其特征在于:

$$t_B \text{时刻的速度 } v_B = k(t_C - t_B)^3。$$

## 连铸结晶器非正弦振动方法

### 技术领域

[0001] 本发明属于连铸技术领域,涉及一种连铸结晶器非正弦振动方法。

### 背景技术

[0002] 连铸结晶器振动波形经历了矩形波、梯形波、正弦波以及现在的非正弦波。以往的正弦振动,只通过改变振幅和频率两个参数进行调节,因此调节范围有限,不利于铸坯质量的进一步提高,而结晶器非正弦振动除了振幅和频率,还增加了波形偏斜率,弹性的控制铸坯的振动工艺参数,因此结晶器非正弦振动是实现高效连铸的关键技术之一,其对于提高拉坯速度和铸坯质量具有重要的意义。

[0003] 目前,非正弦振动波形函数主要有整体函数和分段函数。整体函数虽然位移、速度、加速度曲线光滑连续,但是构造复杂,振动工艺参数不易求解,调节范围有限。比如德马克非正弦振动波形,椭圆齿轮、蜗线齿轮、面齿轮、双偏心等实现的非正弦振动波形。而分段函数构造简单、易于求解、调节范围大。专利CN105081241A给出的两段函数非正弦振动波形,其波形函数构造复杂,不易给出解析表达式,因此不易控制。专利CN 109766514 A给出的三段函数非正弦振动波形,虽然构造简单,同样存在,振动工艺参数不易求解,因此不利于在线调节。专利CN105945249A构造的四段函数非正弦振动波形,虽其加速度光滑连续,其也不能给出解析解,不便于在线调节振动工艺参数。专利CN103752783A给出七段函数构造的非正弦振动波形,虽然降低波形的最大加速度,但波形函数构造复杂,涉及参数较多,调控能力差。专利CN 109807297 A给出七段函数构造的非正弦振动波形,虽然形式简单,但高频振动时,不易获得较大的负滑动时间和较小的正滑动速度差。专利106311995A给出八段函数构造的非正弦振动波形,构造复杂,且参数较多,不存在解析解,因此,该波形不易在线调节。

[0004] 总之,非正弦振动波形的构造,既要满足非正弦振动的特征,又要表达形式简洁,易求解,实际应用调控性能好。

### 发明内容

[0005] 针对现有技术的不足,本发明提供一种连铸结晶器非正弦振动方法,采用八段函数构造的非正弦振动波形,在波形偏斜率增大时,其正滑动速度差相比其他非正弦振动波形较低,且高频振动时,负滑动时间相对较大,保证较好的铸坯质量,波形函数形式简单,调控能力强,易于给出振动工艺参数解析表达式。

[0006] 本发明是这样实现的:

[0007] 一种连铸结晶器非正弦振动方法,具体过程为:通过控制结晶器驱动装置的运动规律,使连铸结晶器在驱动装置的带动下,在每个振动周期内实现如下八段函数所确定的非正弦振动波形:

$$[0008] \quad v = \begin{cases} v_B & 0 \leq t \leq t_B \\ -k(t-t_B)^3 + v_B & t_B \leq t \leq t_C \\ -3k(t_C-t_B)^2(t-t_C) & t_C \leq t \leq t_D \\ -k\left(t-\frac{1}{2f}\right)^3 - 3k(t_C-t_B)^2\left(\frac{1}{2f}-2t_C+t_B\right) - v_B & t_D \leq t \leq t_E \\ k\left(t-\frac{1}{2f}\right)^3 - 3k(t_C-t_B)^2\left(\frac{1}{2f}-2t_C+t_B\right) - v_B & t_E \leq t \leq t_F \\ 3k(t_C-t_B)^2\left(t-\frac{1}{f}+t_C\right) & t_F \leq t \leq t_G \\ k\left(t-\frac{1}{f}+t_B\right)^3 + v_B & t_G \leq t \leq t_H \\ v_B & t_H \leq t \leq t_K \end{cases}$$

[0009] 式中,  $v$  为结晶器运动的速度,  $t$  为时间;  $t_B$ 、 $t_C$ 、 $t_D$ 、 $t_E$ 、 $t_F$ 、 $t_G$ 、 $t_H$  和  $t_K$  分别为非正弦振动波形各阶段时间点,  $v_B$  为  $t_B$  时刻的速度,  $k$  为待定参数,  $f$  为振动频率;

[0010] 在每一个振动周期内, 振动过程分为以下八个阶段, 每个阶段分别按照如下八段速度波形进行振动, 使结晶器实现上述八段函数表示的非正弦振动:

[0011] 在  $0 \leq t \leq t_B$  内, 结晶器匀速向上运动, 速度为一常数;

[0012] 在  $t_B \leq t \leq t_C$  内, 结晶器向上做变减速运动, 速度曲线为三次方曲线, 运动到  $t_C$  时刻, 速度变为 0;

[0013] 在  $t_C \leq t \leq t_D$  内, 结晶器匀加速向下运动, 速度为斜直线;

[0014] 在  $t_D \leq t \leq t_E$  内, 结晶器变加速向下运动, 速度曲线为三次方曲线;

[0015] 在  $t_E \leq t \leq t_F$  内, 结晶器变减速向下运动, 速度曲线为三次方曲线;

[0016] 在  $t_F \leq t \leq t_G$  内, 结晶器匀减速向下运动, 到达  $t_G$  时刻, 速度变为 0, 该时间段内速度曲线为直线;

[0017] 在  $t_G \leq t \leq t_H$  内, 结晶器变加速向上运动, 速度曲线三次方曲线;

[0018] 在  $t_H \leq t \leq t_K$  内, 结晶器匀速向上运动, 速度为一常数, 是一段水平线。

[0019] 优选地, 对于结晶器非正弦振动,

$$[0020] \quad \text{时间点 } t_C = \frac{1+\alpha}{4f}$$

[0021] 其中,  $f$  为振动频率、 $\alpha$  为波形偏斜率。

$$[0022] \quad \text{优选地, 时间点 } t_B = \frac{(1+\alpha) - \sqrt{(1+\alpha)^2 - 3\alpha}}{2f}。$$

[0023] 优选地, 时间点  $t_F = \frac{1}{f} - t_D$ , 时间点  $t_G = \frac{1}{f} - t_C$ , 时间点  $t_H = \frac{1}{f} - t_B$ , 时间点

$$t_D = \frac{1}{2f} + t_B - t_C,$$

[0024] 时间点  $t_E = \frac{1}{2f}$ 。

[0025] 优选地,  $t_B$ 时刻的速度  $v_B = k(t_C - t_B)^3$ 。

[0026] 优选地, 参数  $k = \frac{4h}{4t_C(t_C - t_B)^3 - (t_C - t_B)^4}$ , 其中,  $h$ 为结晶器从0时刻运动到  $t_C$ 时刻的运动位移。

[0027] 与现有技术相比, 本发明具有以下有益效果:

[0028] 1、本发明的非正弦振动波形函数在波形偏斜率增大时, 其正滑动速度差小, 且所构造的非正弦振动波形函数位移、速度、加速度连续, 保证装置的平稳运行。采用八段函数构造的非正弦振动波形函数形式简单, 调控能力强, 易于求解合理的振动工艺参数和同步控制模型。

[0029] 2、本发明的振幅、频率和波形偏斜率可在较大范围内选取, 满足不同钢种的要求。相比其它波形函数, 在振动频率较大时, 仍能保证较长的负滑动时间和较小的正滑动速度差, 从而保证铸坯的表面质量。

[0030] 3、本发明采用的非正弦波形振动函数位移和速度曲线光滑连续, 加速度没有突变, 不存在刚性和柔性冲击具有良好的波形动力学特性。

## 附图说明

[0031] 图1是本发明的速度波形曲线;

[0032] 图2是本发明在不同波形偏斜率下非正弦振动的位移曲线图;

[0033] 图3是本发明在不同波形偏斜率下非正弦振动的速度曲线图; 以及

[0034] 图4是本发明在不同波形偏斜率下非正弦振动的加速度曲线图。

## 具体实施方式

[0035] 以下将参考附图详细说明本发明的示例性实施例、特征和性能方面。附图中相同的附图标记表示功能相同或相似的元件。尽管在附图中示出了实施例的各种方面, 但是除非特别指出, 不必按比例绘制附图。

[0036] 一种连铸结晶器非正弦振动方法, 具体过程为: 通过控制结晶器驱动装置的运动规律, 使连铸结晶器在驱动装置的带动下, 在每个振动周期内实现如下八段函数所确定的非正弦振动波形:

$$[0037] \quad v = \begin{cases} v_B & 0 \leq t \leq t_B \\ -k(t-t_B)^3 + v_B & t_B \leq t \leq t_C \\ -3k(t_C-t_B)^2(t-t_C) & t_C \leq t \leq t_D \\ -k\left(t-\frac{1}{2f}\right)^3 - 3k(t_C-t_B)^2\left(\frac{1}{2f}-2t_C+t_B\right) - v_B & t_D \leq t \leq t_E \\ k\left(t-\frac{1}{2f}\right)^3 - 3k(t_C-t_B)^2\left(\frac{1}{2f}-2t_C+t_B\right) - v_B & t_E \leq t \leq t_F \\ 3k(t_C-t_B)^2\left(t-\frac{1}{f}+t_C\right) & t_F \leq t \leq t_G \\ k\left(t-\frac{1}{f}+t_B\right)^3 + v_B & t_G \leq t \leq t_H \\ v_B & t_H \leq t \leq t_K \end{cases}$$

[0038] 式中,  $v$  为结晶器运动的速度,  $t$  为时间;  $t_B$ 、 $t_C$ 、 $t_D$ 、 $t_E$ 、 $t_F$ 、 $t_G$ 、 $t_H$  和  $t_K$  分别为非正弦振动波形各阶段时间点,  $v_B$  为  $t_B$  时刻的速度,  $k$  为待定参数,  $f$  为振动频率;

[0039] 在每一个振动周期内, 振动过程分为以下八个阶段, 每个阶段分别按照如下八段速度波形进行振动, 使结晶器实现上述八段函数表示的非正弦振动:

[0040] 在  $0 \leq t \leq t_B$  内, 结晶器匀速向上运动, 速度为一常数;

[0041] 在  $t_B \leq t \leq t_C$  内, 结晶器向上做变减速运动, 速度曲线为三次方曲线, 运动到  $t_C$  时刻, 速度变为 0;

[0042] 在  $t_C \leq t \leq t_D$  内, 结晶器匀加速向下运动, 速度为斜直线;

[0043] 在  $t_D \leq t \leq t_E$  内, 结晶器变加速向下运动, 速度曲线为三次方曲线;

[0044] 在  $t_E \leq t \leq t_F$  内, 结晶器变减速向下运动, 速度曲线为三次方曲线;

[0045] 在  $t_F \leq t \leq t_G$  内, 结晶器匀减速向下运动, 到达  $t_G$  时刻, 速度变为 0, 该时间段内速度曲线为直线;

[0046] 在  $t_G \leq t \leq t_H$  内, 结晶器变加速向上运动, 速度曲线三次方曲线;

[0047] 在  $t_H \leq t \leq t_K$  内, 结晶器匀速向上运动, 速度为一常数, 是一段水平线。

[0048] 以下给出波形中各待定参数的计算方法及非正弦振动的位移、速度和加速度波形:

[0049] 速度函数为:

$$[0050] \quad v = \begin{cases} v_B & 0 \leq t \leq t_B \\ -k(t-t_B)^3 + v_B & t_B \leq t \leq t_C \\ -3k(t_C-t_B)^2(t-t_C) & t_C \leq t \leq t_D \\ -k\left(t-\frac{1}{2f}\right)^3 - 3k(t_C-t_B)^2\left(\frac{1}{2f}-2t_C+t_B\right) - v_B & t_D \leq t \leq t_E \\ k\left(t-\frac{1}{2f}\right)^3 - 3k(t_C-t_B)^2\left(\frac{1}{2f}-2t_C+t_B\right) - v_B & t_E \leq t \leq t_F \\ 3k(t_C-t_B)^2\left(t-\frac{1}{f}+t_C\right) & t_F \leq t \leq t_G \\ k\left(t-\frac{1}{f}+t_B\right)^3 + v_B & t_G \leq t \leq t_H \\ v_B & t_H \leq t \leq t_K \end{cases}$$

[0051] 对于结晶器非正弦振动,一般振动频率 $f$ 、波形偏斜率 $\alpha$ 已知,上式中各参数的求解方法如下:

[0052] 其中 $h$ 、 $f$ 、 $\alpha$ 、 $t_E = \frac{1}{2f}$ 、 $t_C = \frac{1+\alpha}{4f}$ 已知,  $t_F = \frac{1}{f} - t_D$ 、 $t_G = \frac{1}{f} - t_C$ 、 $t_H = \frac{1}{f} - t_B$ 、 $t_B$ 待

求。

[0053] 由于结晶器运动到 $t_C$ 时刻,速度连续,则

$$[0054] \quad -k(t-t_B)^3 + v_B = 0 \quad (1)$$

[0055] 整理得

$$[0056] \quad v_B = k(t_C - t_B)^3 \quad (2)$$

[0057] 由于结晶器运动到 $t_D$ 时刻,速度连续,则

$$[0058] \quad -3k(t_C - t_B)^2(t_D - t_C) = -k\left(t_D - \frac{1}{2f}\right)^3 - 3k(t_C - t_B)^2\left(\frac{1}{2f} - 2t_C + t_B\right) - v_B \quad (3)$$

[0059] 将式(2)代入式(3)得

$$[0060] \quad t_D = \frac{1}{2f} - t_C + t_B \quad (4)$$

[0061] 结晶器从0时刻运动到 $t_C$ 时刻,运动的位移为 $h$ ,则有

$$[0062] \quad \int_0^{t_B} v_B dt + \int_{t_B}^{t_C} [-k(t-t_B)^3 + v_B] dt = h \quad (5)$$

[0063] 整理得

$$[0064] \quad v_B t_C - \frac{k(t_C - t_B)^4}{4} = h \quad (6)$$

[0065] 将式(2)代入式(6)得

$$[0066] \quad k = \frac{4h}{4t_C(t_C - t_B)^3 - (t_C - t_B)^4} \quad (7)$$



[0067] 结晶器从 $t_c$ 时刻运动到 $1/(2f)$ 时刻,运动的位移为 $-h$ ,则有

$$[0068] \int_{t_c}^{t_D} [-3k(t_c - t_B)^2(t - t_c)] dt + \int_{t_D}^{\frac{1}{2f}} \left[ -k \left( t - \frac{1}{2f} \right)^3 - 3k(t_c - t_B)^2 \left( \frac{1}{2f} - 2t_c + t_B \right) - v_B \right] dt = -h \quad (8)$$

[0069] 将式(2)、(4)、(7)代入式(8),整理得

$$[0070] 4f^2 t_B^2 - 4f t_B (1 + \alpha) + 3\alpha = 0 \quad (9)$$

$$[0071] t_B = \frac{(1 + \alpha) \pm \sqrt{(1 + \alpha)^2 - 3\alpha}}{2f} \quad (10)$$

[0072] 由于 $t_B < t_c$ ,所以

$$[0073] t_B = \frac{(1 + \alpha) - \sqrt{(1 + \alpha)^2 - 3\alpha}}{2f} \quad (11)$$

[0074] 位移函数为:

$$[0075] s = \begin{cases} v_B t & 0 \leq t \leq t_B \\ -\frac{k}{4}(t - t_B)^4 + v_B t & t_B \leq t \leq t_c \\ -\frac{3k}{2}(t_c - t_B)^2(t - t_c)^2 + c_1 & t_c \leq t \leq t_D \\ -\frac{k}{4}\left(t - \frac{1}{2f}\right)^4 - 3k(t_c - t_B)^2\left(\frac{1}{2f} - 2t_c + t_B\right)t - v_B t + c_2 & t_D \leq t \leq t_E \\ \frac{k}{4}\left(t - \frac{1}{2f}\right)^4 - 3k(t_c - t_B)^2\left(\frac{1}{2f} - 2t_c + t_B\right)t - v_B t + c_3 & t_E \leq t \leq t_F \\ \frac{3k}{2}(t_c - t_B)^2\left(t - \frac{1}{f} + t_c\right)^2 + c_4 & t_F \leq t \leq t_G \\ \frac{k}{4}\left(t - \frac{1}{f} + t_B\right)^4 + v_B t + c_5 & t_G \leq t \leq t_H \\ v_B \left(t - \frac{1}{f}\right) & t_H \leq t \leq t_K \end{cases} \quad (12)$$

[0076] 其中, $c_1, c_2, c_3, c_4, c_5$ 为待求参数,推导过程如下:

[0077] 结晶器在 $t_c$ 时刻的位移为 $h$ ,则有

$$[0078] c_1 = h \quad (13)$$

[0079] 因结晶器运动到 $\frac{1}{2f}$ 时刻,此时的位移为0,则有

$$[0080] c_2 = c_3 = \frac{k(t_c - t_B)^2}{2f} \left( \frac{3}{2f} - 5t_c + 2t_B \right) \quad (14)$$

[0081] 结晶器在 $t_c$ 时刻,位移为 $-h$ ,则有

$$[0082] c_4 = -h \quad (15)$$

[0083] 结晶器在 $t_H$ 时刻,位移函数连续,则有

$$[0084] \quad c_5 = -\frac{v_B}{f} \quad (16)$$

[0085] 加速度a的函数为:

$$[0086] \quad a = \begin{cases} 0 & 0 \leq t \leq t_B \\ -3k(t-t_B)^2 & t_B \leq t \leq t_C \\ -3k(t_C-t_B)^2 & t_C \leq t \leq t_D \\ -3k\left(t-\frac{1}{2f}\right)^2 & t_D \leq t \leq t_E \\ 3k\left(t-\frac{1}{2f}\right)^2 & t_E \leq t \leq t_F \\ 3k(t_C-t_B)^2 & t_F \leq t \leq t_G \\ 3k\left(t-\frac{1}{f}+t_B\right)^2 & t_G \leq t \leq t_H \\ 0 & t_H \leq t \leq t_K \end{cases} \quad (17)$$

[0087] 因此,当结晶器振动的振幅 $h=4\text{mm}$ ,频率 $f=2\text{Hz}$ ,波形偏斜率取不同值时,非正弦振动波形式(1)中,各参数的取值如表1所示。

[0088] 表1各参数的取值

$\alpha$	$t_B$	$t_C$	$t_D$	$t_F$	$t_G$	$t_H$	$v_B$	$k$
0.05	0.0185	0.1313	0.1373	0.3627	0.3688	0.4815	0.0388	27.0839
$\alpha$	$t_B$	$t_C$	$t_D$	$t_F$	$t_G$	$t_H$	$v_B$	$k$
0.15	0.054	0.1437	0.1602	0.3398	0.3563	0.446	0.033	45.5815

$\alpha$	$t_B$	$t_C$	$t_D$	$t_F$	$t_G$	$t_H$	$v_B$	$k$
0.25	0.0872	0.1563	0.1809	0.3191	0.3438	0.4128	0.0288	87.2457
$\alpha$	$t_B$	$t_C$	$t_D$	$t_F$	$t_G$	$t_H$	$v_B$	$k$
0.35	0.1178	0.1688	0.199	0.301	0.3312	0.3822	0.0256	193.5189

[0091] 当结晶器振动的振幅 $h=4\text{mm}$ ,频率 $f=2\text{Hz}$ ,波形偏斜率 $\alpha=20\%$ ,得到结晶器振动一个周期内的速度波形,如图1所示,该速度波形光滑连续无突变点,装置不会产生刚性冲击。此外,还给出不同偏斜率下非正弦振动的位移、速度和加速度曲线,如图2~4所示。由图中可以看出,随着波形变偏斜率增大,非正弦振动的特征更加明显,波形偏斜率可在较大范围内调节,以满足不同钢种的需求,加速度曲线连续无突变,设备不会产生柔性冲击,保证其平稳运行,具有较好的动力学性能。

[0092] 最后应说明的是:以上所述的各实施例仅用于说明本发明技术方案,而非对其限制;尽管参照前述实施例对本发明进行了详细的说明,本领域的普通技术人员应当理解:其依然可以对前述实施例所记载的技术方案进行修改,或者对其中部分或全部技术特征进行等同替换;而这些修改或替换,并不使相应技术方案的本质脱离本发明各实施例技术方案

的范围。

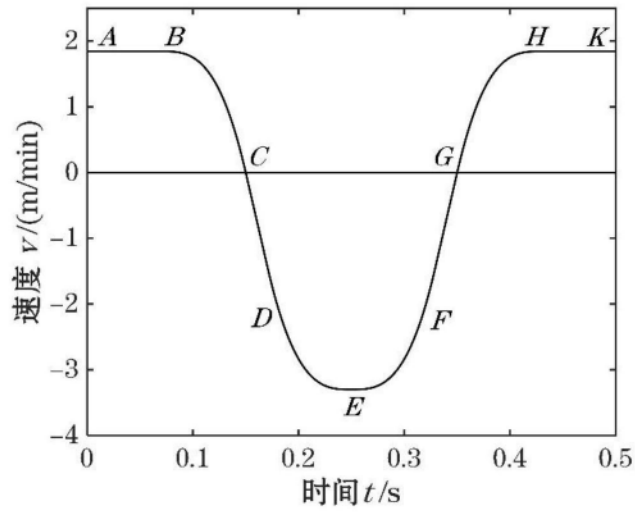


图1

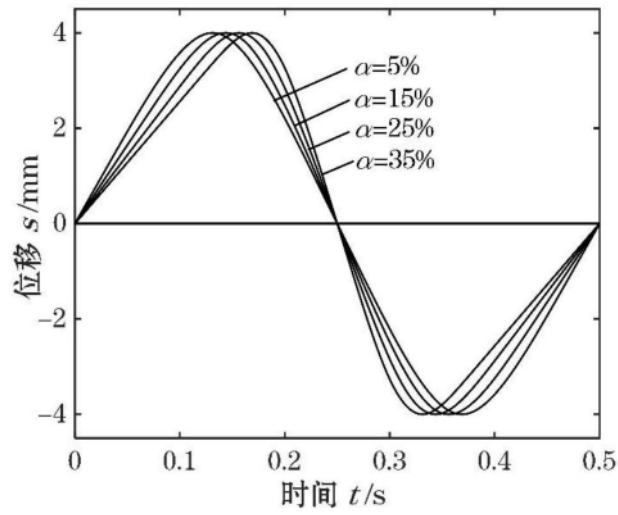


图2

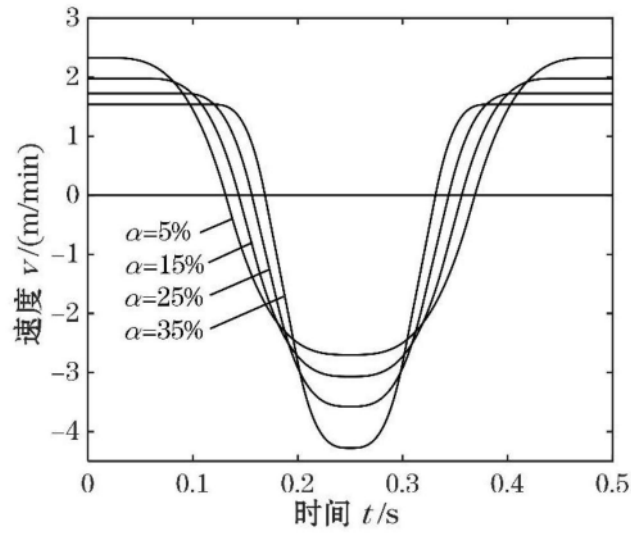


图3

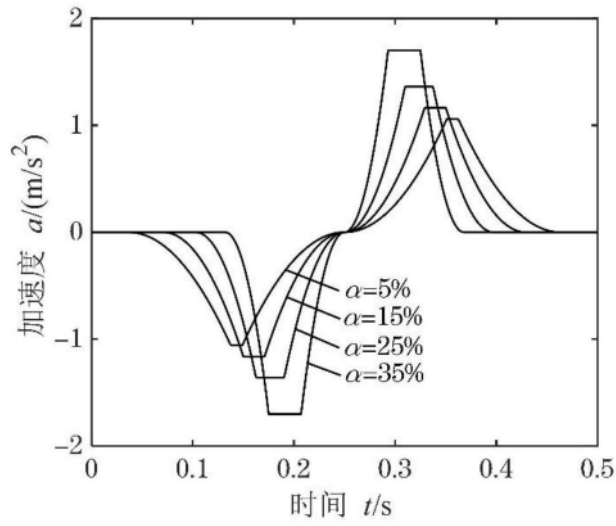


图4