

## 说明书

发明名称: 结晶器非正弦液压振动曲线的控制方法

### 技术领域

[0001] 本发明属于冶金连铸自动化技术领域，涉及一种结晶器非正弦液压振动曲线的控制方法。

### 背景技术

[0002] 高效连铸是现代连铸技术发展的主要方向，其主要含义包括高拉速、高质量、高作业率及高温热装几个方面，其中高拉速是现代连铸技术发展的主要标志之一。但是高拉速会导致铸坯与结晶器间摩擦力加大，造成铸坯拉裂拉漏等质量或生产事故的发生。为此，一方面考虑加入适合高速浇铸的保护渣，另一面则是采用适应高速浇铸的结晶器振动方式。非正弦振动就是为满足高速浇铸而开发出的一种新的结晶器振动技术。为满足连铸生产需求，理想的非正弦振动曲线波形应具有上振速度小，下振速度大，负滑脱时间短，速度曲线连续光滑，加速度变化平稳的特点，但是目前现存的非正弦振动方式中，都存在一些问题，比如加速度存在突变、偏斜率有限，模型复杂等。为提高铸坯质量，减少对设备的冲击，新型的结晶器非正弦振动方式有待提出，以此改善振动波形，提高生产效率，降低生产成本。

### 发明内容

[0003] 有鉴于此，本发明的目的在于提供一种结晶器非正弦液压振动曲线的控制方法，本方法优化了非正弦振动曲线，实现了油缸运动速度曲线平稳光滑，峰值小，加速度变化连续、光滑、无突变，其控制方法简单，易于实现，且控制参数少，便于操作。

[0004] 为达到上述目的，本发明提供如下技术方案：

[0005] 一种结晶器非正弦液压振动曲线的控制方法，采用三段式线性-正弦复合函数，其位置曲线的一个振动周期包含三个阶段：第一阶段为角速度为 $\omega_1$ 的标准正弦函数与斜率为 $-\frac{T_1}{2\pi}a(a-1)$ 的线性函数叠加复合得到的类正弦曲线，第二

阶段为角速度为 $\omega_2$ 的标准正弦函数与斜率为 $\frac{T_1^2}{2\pi} \frac{1-a}{T_2}$ , 偏移量为 $\frac{T_1^2}{4\pi} \frac{a^2-1}{a}$ 的线性函数叠

加复合得到的类正弦曲线, 第三阶段为角速度为 $\omega_1$ 的标准正弦函数与斜率为 $-\frac{T_1}{2\pi} a(a-1)$ , 偏移量为 $-\frac{T_1^2}{2\pi} a(a^2-1)$ 的线性函数叠加复合得到的类正弦曲线, 在不同采样时刻与第一阶段的类正弦曲线相接。

[0006] 通过连续循环周期可知, 该函数是角速度分别为 $\omega_1$ 和 $\omega_2$ 的标准正弦曲线与不同斜率的线性函数叠加变形得到的类正弦曲线相接得到的函数。所述非正弦振动曲线的位置曲线方程如下:

$$f(t) = \begin{cases} -\frac{T_1}{2\pi} \left( \frac{T_1}{T_1} \sin\left(\frac{2\pi}{T_1} t\right) + a(a-1)t \right), t \in (0, \frac{T_1}{2}) \\ \frac{T_1^2}{2\pi} \left( \frac{a}{2\pi} \sin\left(\frac{2\pi}{T_2} \left(t - \frac{T_1}{2}\right)\right) - \frac{a-1}{T_2} t + \frac{a^2-1}{2a} \right), t \in (\frac{T_1}{2}, \frac{T_1}{2} + T_2) \\ -\frac{T_1}{2\pi} \left( \frac{T_1}{T_1} \sin\left(\frac{2\pi}{T_1} (t - T_2)\right) + a(a-1)(t + T_1(a+1)) \right), t \in (\frac{T_1}{2} + T_2, T_1 + T_2) \end{cases}$$

[0007] 其中,

[0008]  $\omega_1$ 和 $\omega_2$ 分别为两个标准正弦曲线的角速度, 对应的振动周期分别为 $T_1$ 和 $T_2$ , 单位ms;  $t$ 为振动曲线采样时间, 单位ms,  $a$ 为振动曲线中平稳上升时间, 单位ms, 且 $T_2 = aT_1$ 。

[0009] 所述非正弦振动曲线方程对应的某一周期的振动速度曲线方程如下:

$$v(t) = \begin{cases} -\frac{T_1}{2\pi} \left( \cos\left(\frac{2\pi}{T_1} t\right) + a(a-1) \right), t \in (0, \frac{T_1}{2}) \\ \frac{aT_1^2}{2\pi T_2} \left( \cos\left(\frac{2\pi}{T_2} \left(t - \frac{T_1}{2}\right)\right) - \frac{a-1}{a} \right), t \in (\frac{T_1}{2}, \frac{T_1}{2} + T_2) \\ -\frac{T_1}{2\pi} \left( \cos\left(\frac{2\pi}{T_1} (t - T_2)\right) + a(a-1) \right), t \in (\frac{T_1}{2} + T_2, T_1 + T_2) \end{cases}$$

[0010] 因此根据上述振动速度曲线方程以及极值原理, 可以求出一个周期内出现的最小、最大振动位置对应的时间即振动速度等于0时刻。由以下公式可以求得:

$$\begin{cases} -\frac{T_1}{2\pi} \left( \cos\left(\frac{2\pi}{T_1} t_{min}\right) + a(a-1) \right) = 0, t_{min} \in (0, \frac{T_1}{2}) \\ -\frac{T_1}{2\pi} \left( \cos\left(\frac{2\pi}{T_1} (t_{max} - T_2)\right) + a(a-1) \right) = 0, t_{max} \in (\frac{T_1}{2} + T_2, T_1 + T_2) \end{cases}$$

[0011] 得

$$t_{\min} = \frac{-T_1 \arccos(a^2 - a)}{2\pi}, \quad t_{\max} = \frac{T_1(\pi + \arccos(a^2 - a))}{2\pi} + T_2。$$

[0012] 其中：

[0013]  $t_{\min}$ 为一个周期内振动位置最小时对应的时间，单位ms。

[0014]  $t_{\max}$ 为一个周期内振动位置最大时对应的时间，单位ms。

[0015] 定义振动偏斜率为一个振动周期内振动曲线斜率为正的时间与斜率为负的时间的差值占整个振动周期的比例，因此计算非正弦振动曲线的偏斜率，如下：

$$s = \frac{2(t_{\max} - t_{\min}) - T}{T} * 100\% = \frac{\pi a + 2 \arccos(a^2 - a)}{(1 + a)\pi} * 100\%$$

[0016] 其中， $T = T_1 + T_2$ 为一个振动周期时间，单位ms， $a = \frac{T_2}{T_1}$ 。

[0017] 由上式可知，决定非正弦振动曲线波形的偏斜率只与振动周期参数 $T_1$ 和 $T_2$ 的比值有关。

[0018] 所述非正弦振动曲线方程相应的某一周期的振动加速度曲线方程如下：

$$\delta(t) = \begin{cases} \sin\left(\frac{2\pi}{T_1}t\right), & t \in (0, \frac{T_1}{2}) \\ -\frac{1}{a} \sin\left(\frac{2\pi}{T_2}(t - \frac{T_1}{2})\right), & t \in (\frac{T_1}{2}, \frac{T_1}{2} + T_2) \\ \sin\left(\frac{2\pi}{T_1}(t - T_2)\right), & t \in (\frac{T_1}{2} + T_2, T_1 + T_2) \end{cases}$$

[0019] 由上式可知，振动加速度曲线由三段标准正弦曲线组成，并在取值区间边缘处相接，由上述函数可知该振动曲线的加速度变化平缓，是一个连续无突变的光滑曲线。

[0020] 本发明的有益效果在于：

[0021] 1)采用三段式线性-正弦复合函数构成的非正弦振动曲线，上升时间较长，下降速度快，可有效提高保护渣的利用率，提升结晶器的润滑效果，减少漏钢事故，并且上述非正弦振动曲线其振动速度光滑平稳，且减小了速度峰值，也确保了振动加速度的变化更加平缓，光滑连续无突变，对设备造成的冲击和损伤很小，对设备非常友好，可有效延长振动设备的使用寿命。

[0022] (2)结合上述非正弦振动曲线方程实现振动控制方法，其参数设定简单，可随任意工艺值改变，因此采用上述振动波形可应用于板坯、扁坯、小方坯连铸机等，实现简单，应用范围广泛，实用性强。

[0023] 本发明的其他优点、目标和特征在某种程度上将在随后的说明书中进行阐述，并且在某种程度上，基于对下文的考察研究对本领域技术人员而言将是显而易见的，或者可以从本发明的实践中得到教导。本发明的目标和其他优点可以通过下面的说明书来实现和获得。

## 附图说明

[0024] 为了使本发明的目的、技术方案和优点更加清楚，下面将结合附图对本发明作优选的详细描述，其中：

[0025] 图1为本发明实施例提供的振动方法的一个周期的位置曲线图；

[0026] 图2为本发明实施例提供的振动方法的一个周期的振动速度曲线；

[0027] 图3为本发明实施例提供的振动方法的一个周期的振动加速度曲线；

[0028] 图4为本发明实施例提供的振动方法的多个周期的振动曲线；

[0029] 图5为本发明实施例提供的振动方法在不同偏斜率时对应的位置曲线；

[0030] 图6为本发明实施例提供的振动方法在不同偏斜率时对应的速度曲线；

[0031] 图7为本发明实施例提供的振动方法在不同偏斜率时对应的加速度曲线。

## 具体实施方式

[0032] 以下通过特定的具体实例说明本发明的实施方式，本领域技术人员可由本说明书所揭露的内容轻易地了解本发明的其他优点与功效。本发明还可以通过另外不同的具体实施方式加以实施或应用，本说明书中的各项细节也可以基于不同观点与应用，在没有背离本发明的精神下进行各种修饰或改变。需要说明的是，以下实施例中所提供的图示仅以示意方式说明本发明的基本构想，在不冲突的情况下，以下实施例及实施例中的特征可以相互组合。

[0033] 其中，附图仅用于示例性说明，表示的仅是示意图，而非实物图，不能理解为对本发明的限制；为了更好地说明本发明的实施例，附图某些部件会有省略、

放大或缩小，并不代表实际产品的尺寸；对本领域技术人员来说，附图中某些公知结构及其说明可能省略是可以理解的。

- [0034] 本发明实施例的附图中相同或相似的标号对应相同或相似的部件；在本发明的描述中，需要理解的是，若有术语“上”、“下”、“左”、“右”、“前”、“后”等指示的方位或位置关系为基于附图所示的方位或位置关系，仅是为了便于描述本发明和简化描述，而不是指示或暗示所指的装置或元件必须具有特定的方位、以特定的方位构造和操作，因此附图中描述位置关系的用语仅用于示例性说明，不能理解为对本发明的限制，对于本领域的普通技术人员而言，可以根据具体情况理解上述术语的具体含义。
- [0035] 请参阅图1~图7，本发明提供了一种结晶器非正弦液压振动曲线的控制方法，采用三段式线性-正弦复合函数，其位置曲线的一个振动周期包含三个阶段：第一阶段为角速度为 $\omega_1$ 的标准正弦函数与斜率为 $-\frac{T_1}{2\pi}a(a-1)$ 的线性函数叠加复合得到的类正弦曲线，第二阶段为角速度为 $\omega_2$ 的标准正弦函数与斜率为 $\frac{T_1^2}{2\pi} \frac{1-a}{T_2}$ ，偏移量为 $\frac{T_1^2}{4\pi} \frac{a^2-1}{a}$ 的线性函数叠加复合得到的类正弦曲线，第三阶段为角速度为 $\omega_1$ 的标准正弦函数与斜率为 $-\frac{T_1}{2\pi}a(a-1)$ ，偏移量为 $-\frac{T_1^2}{2\pi}a(a^2-1)$ 的线性函数叠加复合得到的类正弦曲线，在不同采样时刻与第一阶段的类正弦曲线相接。
- [0036] 通过连续循环周期可知，该函数是角速度分别为 $\omega_1$ 和 $\omega_2$ 的标准正弦曲线与不同斜率的线性函数叠加变形得到的类正弦曲线相接得到的函数。所述非正弦振动曲线的位置曲线方程如下：

$$f(t) = \begin{cases} -\frac{T_1}{2\pi} \left( \frac{T_1}{2\pi} \sin\left(\frac{2\pi}{T_1}t\right) + a(a-1)t \right), t \in (0, \frac{T_1}{2}) \\ \frac{T_1^2}{2\pi} \left( \frac{a}{2\pi} \sin\left(\frac{2\pi}{T_2} \left(t - \frac{T_1}{2}\right)\right) - \frac{a-1}{T_2}t + \frac{a^2-1}{2a} \right), t \in (\frac{T_1}{2}, \frac{T_1}{2} + T_2) \\ -\frac{T_1}{2\pi} \left( \frac{T_1}{2\pi} \sin\left(\frac{2\pi}{T_1}(t - T_2)\right) + a(a-1)(t + T_1(a+1)) \right), t \in (\frac{T_1}{2} + T_2, T_1 + T_2) \end{cases}$$

- [0037] 其中，

[0038]  $\omega_1$ 和 $\omega_2$ 分别为两个标准正弦曲线的角速度，对应的振动周期分别为 $T_1$ 和 $T_2$ ，单位ms； $t$ 为振动曲线采样时间，单位ms， $a$ 为振动曲线中平稳上升时间，单位ms，且 $T_2=aT_1$ 。

[0039] 所述非正弦振动曲线方程对应的某一周期的振动速度曲线方程如下：

$$v(t) = \begin{cases} -\frac{T_1}{2\pi}(\cos(\frac{2\pi}{T_1}t) + a(a-1)), t \in (0, \frac{T_1}{2}) \\ \frac{aT_1^2}{2\pi T_2}(\cos(\frac{2\pi}{T_2}(t - \frac{T_1}{2})) - \frac{a-1}{a}), t \in (\frac{T_1}{2}, \frac{T_1}{2} + T_2) \\ -\frac{T_1}{2\pi}(\cos(\frac{2\pi}{T_1}(t - T_2)) + a(a-1)), t \in (\frac{T_1}{2} + T_2, T_1 + T_2) \end{cases}$$

[0040] 因此根据上述振动速度曲线方程以及极值原理，可以求出一个周期内出现的最小、最大振动位置对应的时间即振动速度等于0时刻。由以下公式可以求得：

$$\begin{cases} -\frac{T_1}{2\pi}(\cos(\frac{2\pi}{T_1}t_{\min}) + a(a-1)) = 0, t_{\min} \in (0, \frac{T_1}{2}) \\ -\frac{T_1}{2\pi}(\cos(\frac{2\pi}{T_1}(t_{\max} - T_2)) + a(a-1)) = 0, t_{\max} \in (\frac{T_1}{2} + T_2, T_1 + T_2) \end{cases}$$

[0041] 得

$$t_{\min} = \frac{-T_1 \arccos(a^2 - a)}{2\pi}, \quad t_{\max} = \frac{T_1(\pi + \arccos(a^2 - a))}{2\pi} + T_2。$$

[0042] 其中：

[0043]  $t_{\min}$ 为一个周期内振动位置最小时对应的的时间，单位ms。

[0044]  $t_{\max}$ 为一个周期内振动位置最大时对应的的时间，单位ms。

[0045] 定义振动偏斜率为一个振动周期内振动曲线斜率为正的时间与斜率为负的时间的差值占整个振动周期的比例，因此计算非正弦振动曲线的偏斜率，如下：

$$s = \frac{2(t_{\max} - t_{\min}) - T}{T} * 100\% = \frac{\pi a + 2 \arccos(a^2 - a)}{(1 + a)\pi} * 100\%$$

[0046] 其中， $T=T_1+T_2$ 为一个振动周期时间，单位ms， $a = \frac{T_2}{T_1}$ 。

[0047] 由上式可知，决定非正弦振动曲线波形的偏斜率只与振动周期参数 $T_1$ 和 $T_2$ 的比值有关。

[0048] 所述非正弦振动曲线方程相应的某一周期的振动加速度曲线方程如下：

$$\delta(t) = \begin{cases} \sin\left(\frac{2\pi}{T_1}t\right), t \in (0, \frac{T_1}{2}) \\ -\frac{1}{a}\sin\left(\frac{2\pi}{T_2}(t - \frac{T_1}{2})\right), t \in (\frac{T_1}{2}, \frac{T_1}{2} + T_2) \\ \sin\left(\frac{2\pi}{T_1}(t - T_2)\right), t \in (\frac{T_1}{2} + T_2, T_1 + T_2) \end{cases}$$

[0049] 由上式可知，振动加速度曲线由三段标准正弦曲线组成，并在取值区间边缘处相接，由上述函数可知该振动曲线的加速度变化平缓，是一个连续无突变的光滑曲线。

[0050] 在本实施例中，其具体实施步骤为：

[0051] 1) 设定振动幅值H为4mm，振动频率为150次/min，即振动周期T为400ms；

[0052] 2) 根据上述基础参数，设定振动曲线偏斜率s=20%，即对应的 $T_1=276\text{ms}$ ， $T_2=124\text{ms}$ ，从而得到角速度 $\omega_1=\frac{\pi}{138}$ ，角速度 $\omega_2=\frac{\pi}{62}$ ；

[0053] 3) 根据上述参数，结合公式推导得到振动的一个周期的位置曲线，振动速度曲线，振动加速度曲线，其曲线如图1、2、3所示；

[0054] 4) 通过循环周期振动过程，得到多个周期的振动位置、速度、加速度曲线，如图4所示；

[0055] 5) 返回第2)步，保持振动周期恒定，改变偏斜率，依次设定s为0、10%、20%，则对应的 $T_1$ 分别为400ms、320ms、276ms， $T_2$ 分别为0ms、80ms、124ms，因此角速度 $\omega_1$ 对应分别为 $\frac{\pi}{200}$ 、 $\frac{\pi}{160}$ 、 $\frac{\pi}{138}$ ，角速度 $\omega_2$ 对应分别为0、 $\frac{\pi}{40}$ 、 $\frac{\pi}{62}$ 。再依次执行3)至4)步，得对应的振动位置、速度、加速度曲线，如图5、6、7所示。

[0056] 从上述实施例得出，该非正弦振动位置曲线光滑平稳，参数设定可随任意工艺值改变。由速度曲线可知，在上振过程中速度变化小，在大部分时间里以平稳光滑的速度上升，且中途有一段速度略有减小，减小了速度峰值，这能明显减小结晶器与铸坯之间的摩擦力，提升了振动稳定性；而在下振过程中，结晶器速度以类正弦方式快速平滑变化，明显减小了负滑脱时间。此外，由加速度曲线可知，加速度的变化连续光滑、无突变，这大大减小了对设备造成的冲击和损伤，对设备非常友好，可有效延长设备的使用寿命。

- [0057] 综上所述，本结晶器非正弦液压振动曲线的控制方法实现了油缸运动速度曲线平稳光滑，加速度变化连续、无突变，其控制参数可随任意工艺值改变，偏斜率可以在20%以内任意选择，实现简单，应用范围广泛，实用性强。
- [0058] 最后说明的是，以上实施例仅用以说明本发明的技术方案而非限制，尽管参照较佳实施例对本发明进行了详细说明，本领域的普通技术人员应当理解，可以对本发明的技术方案进行修改或者等同替换，而不脱离本技术方案的宗旨和范围，其均应涵盖在本发明的权利要求范围当中。

## 权利要求书

[权利要求 1] 一种结晶器非正弦液压振动曲线的控制方法，其特征在于：采用三段式线性-正弦复合函数，其位置曲线的一个振动周期包含三个阶段：第一阶段为角速度为  $\omega_1$  的标准正弦函数与斜率为  $-\frac{T_1}{2\pi}a(a-1)$  的线性函数叠加复合得到的类正弦曲线，第二阶段为角速度为  $\omega_2$  的标准正弦函数与斜率为  $\frac{T_1^2}{2\pi} \frac{1-a}{T_2}$ ，偏移量为  $\frac{T_1^2}{4\pi} \frac{a^2-1}{a}$  的线性函数叠加复合得到的类正弦曲线，第三阶段为角速度为  $\omega_1$  的标准正弦函数与斜率为  $-\frac{T_1}{2\pi}a(a-1)$ ，偏移量为  $-\frac{T_1^2}{2\pi}a(a^2-1)$  的线性函数叠加复合得到的类正弦曲线，在不同采样时刻与第一阶段的类正弦曲线相接。

[权利要求 2] 根据权利要求1所述的结晶器非正弦液压振动曲线的控制方法，其特征在于：通过连续循环周期可知，所述三段式线性-正弦复合函数是角速度分别为  $\omega_1$  和  $\omega_2$  的标准正弦曲线与不同斜率的线性函数叠加变形得到的类正弦曲线相接得到的函数。

[权利要求 3] 根据权利要求2所述的结晶器非正弦液压振动曲线的控制方法，其特征在于：所述非正弦振动曲线的位置曲线方程如下：

$$f(t) = \begin{cases} -\frac{T_1}{2\pi} \left( \frac{T_1}{2\pi} \sin\left(\frac{2\pi}{T_1}t\right) + a(a-1)t \right), t \in (0, \frac{T_1}{2}) \\ \frac{T_1^2}{2\pi} \left( \frac{a}{2\pi} \sin\left(\frac{2\pi}{T_2}\left(t - \frac{T_1}{2}\right)\right) - \frac{a-1}{T_2}t + \frac{a^2-1}{2a} \right), t \in (\frac{T_1}{2}, \frac{T_1}{2} + T_2) \\ -\frac{T_1}{2\pi} \left( \frac{T_1}{2\pi} \sin\left(\frac{2\pi}{T_1}(t - T_2)\right) + a(a-1)(t + T_1(a+1)) \right), t \in (\frac{T_1}{2} + T_2, T_1 + T_2) \end{cases}$$

其中，

$\omega_1$  和  $\omega_2$  分别为两个标准正弦曲线的角速度，对应的振动周期分别为  $T_1$  和  $T_2$ ，单位ms； $t$  为振动曲线采样时间，单位ms， $a$  为振动曲线中平稳上升时间，单位ms，且  $T_2 = aT_1$ 。

[权利要求 4]

根据权利要求3所述的结晶器非正弦液压振动曲线的控制方法，其特征在于：所述非正弦振动曲线方程对应的某一周期的振动速度曲线方程如下：

$$v(t) = \begin{cases} -\frac{T_1}{2\pi}(\cos(\frac{2\pi}{T_1}t) + a(a-1)), t \in (0, \frac{T_1}{2}) \\ \frac{aT_1^2}{2\pi T_2}(\cos(\frac{2\pi}{T_2}(t - \frac{T_1}{2})) - \frac{a-1}{a}), t \in (\frac{T_1}{2}, \frac{T_1}{2} + T_2) \\ -\frac{T_1}{2\pi}(\cos(\frac{2\pi}{T_1}(t - T_2)) + a(a-1)), t \in (\frac{T_1}{2} + T_2, T_1 + T_2) \end{cases}$$

。

[权利要求 5]

根据权利要求4所述的结晶器非正弦液压振动曲线的控制方法，其特征在于：根据上述振动速度曲线方程以及极值原理，可以求出一个周期内出现的最小、最大振动位置对应的时间即振动速度等于0时刻；

由以下公式求得：

求得：

$$\begin{cases} -\frac{T_1}{2\pi}(\cos(\frac{2\pi}{T_1}t_{\min}) + a(a-1)) = 0, t_{\min} \in (0, \frac{T_1}{2}) \\ -\frac{T_1}{2\pi}(\cos(\frac{2\pi}{T_1}(t_{\max} - T_2)) + a(a-1)) = 0, t_{\max} \in (\frac{T_1}{2} + T_2, T_1 + T_2) \end{cases}$$

得

$$t_{\min} = \frac{-T_1 \arccos(a^2 - a)}{2\pi}, \quad t_{\max} = \frac{T_1(\pi + \arccos(a^2 - a))}{2\pi} + T_2。$$

其中：

$t_{\min}$ 为一个周期内振动位置最小时对应的时间，单位ms；

$t_{\max}$ 为一个周期内振动位置最大时对应的时间，单位ms。

[权利要求 6]

根据权利要求5所述的结晶器非正弦液压振动曲线的控制方法，其特征在于：定义振动偏斜率为一个振动周期内振动曲线斜率为正的时间与斜率为负的时间的差值占整个振动周期的比例，因此计算非正弦振动曲线的偏斜率，如下：

$$s = \frac{2(t_{\max} - t_{\min}) - T}{T} * 100\% = \frac{\pi a + 2 \arccos(a^2 - a)}{(1 + a)\pi} * 100\%$$

其中， $T=T_1+T_2$ 为一个振动周期时间，单位ms， $a=\frac{T_2}{T_1}$ ;

由上式可知，决定非正弦振动曲线波形的偏斜率只与振动周期参数 $T_1$ 和 $T_2$ 的比值有关。

[权利要求 7]

根据权利要求6所述的结晶器非正弦液压振动曲线的控制方法，其特征在于：所述非正弦振动曲线方程相应的某一周期的振动加速度曲线方程如下：

$$\delta(t) = \begin{cases} \sin\left(\frac{2\pi}{T_1}t\right), t \in (0, \frac{T_1}{2}) \\ -\frac{1}{a}\sin\left(\frac{2\pi}{T_2}(t - \frac{T_1}{2})\right), t \in (\frac{T_1}{2}, \frac{T_1}{2} + T_2) \\ \sin\left(\frac{2\pi}{T_1}(t - T_2)\right), t \in (\frac{T_1}{2} + T_2, T_1 + T_2) \end{cases}$$

由上式可知，振动加速度曲线由三段标准正弦曲线组成，并在取值区间边缘处相接，由上述函数可知该振动曲线的加速度变化平缓，是一个连续无突变的光滑曲线。