



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 102279605 B

(45) 授权公告日 2015. 06. 17

(21) 申请号 201110093154. 6

审查员 尹婷婷

(22) 申请日 2011. 04. 08

(30) 优先权数据

2010-090694 2010. 04. 09 JP

(73) 专利权人 谐波传动系统有限公司

地址 日本东京

专利权人 国立大学法人名古屋工业大学

(72) 发明人 冲津良史 加藤雄贵 佐佐木浩三
岩崎诚(74) 专利代理机构 上海专利商标事务所有限公
司 31100

代理人 钱慰民

(51) Int. Cl.

G05D 3/12(2006. 01)

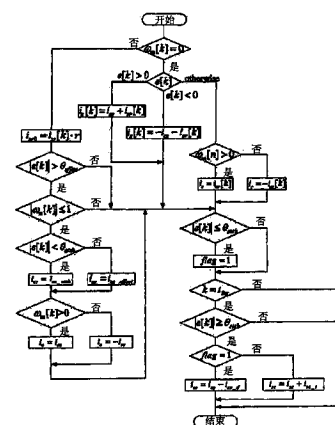
权利要求书3页 说明书9页 附图11页

(54) 发明名称

考虑波动齿轮传动机构摩擦特性随温度改变的变化在执行机构中作适应摩擦补偿的方法

(57) 摘要

根据一种对包括波动齿轮传动机构 (1) 的执行机构 (2) 执行适应性摩擦补偿的方法, 当电动机轴有偏差地停止时将静摩擦补偿电流 i_s 用作施加于电动机驱动电流的摩擦补偿电流, 并在其它情形下采用库仑摩擦补偿电流 i_c 。静摩擦补偿电流 i_s 是通过将单调递增的斜坡函数的补偿量 i_{sr} 作为阶梯函数的补偿量 i_{ss} , 并将阶梯函数补偿量 i_{cs} 用作库仑摩擦补偿电流 i_c 而获得的。由于摩擦补偿量可基于位置控制响应过程中的数据适应性地改变, 即使环境温度改变使得波动齿轮传动机构 (1) 的摩擦特性发生变化, 电动机轴 (6) 也能稳定在目标角而没有伴随显著的振动。



1. 一种考虑波动齿轮传动机构摩擦特性随温度改变的变化在执行机构中进行适应性摩擦补偿的方法,其特征在于,包括:

使用半闭环控制系统基于电动机的电动机轴的检测位置控制负载轴的位置以实现执行机构的驱动控制,其中所述电动机的输出旋转通过波动齿轮传动机构减速并从负载轴向负载传递;以及

通过所述半闭环控制系统使负载轴定位的精度降低减至最小,所述精度降低是由波动齿轮传动机构的摩擦特性伴随环境温度改变的变化造成的;

其中

作施加于驱动电动机的电动机驱动电流的摩擦补偿电流 i_{comp} ,当电动机轴有偏差地停止时使用静摩擦补偿电流 i_s ,在其它情形下使用库仑摩擦补偿电流 i_c ,如公式 (A) 所示:

$$i_{comp}[k] = \begin{cases} i_s[k] & , |e[k]| > 0 \quad \text{和} \quad \omega_m[k] = 0 \\ i_c[k] & , \text{其它} \end{cases} \quad (\text{A})$$

其中

k 是当前时间,

$e[k]$ 是电动机轴偏差,并且

$\omega_m[k]$ 是电动机轴转速;

根据公式 (B) 定义静摩擦补偿电流 i_s ,其中由公式 (C) 定义的单调递增斜坡函数的补偿量 i_{sr} 被加至阶梯函数的补偿量 i_{ss} ;

$$i_s[k] = \begin{cases} \text{sgn}(e[k]) \cdot (i_{ss} + i_{sr}[k]) & , |e[k]| > 0 \\ 0 & , \text{其它} \end{cases} \quad (\text{B})$$

$$i_{sr}[k] = i_{sr0}[k] + d_{sr} \cdot (k-1) \quad (\text{C})$$

其中

i_{sr0} 是斜坡函数补偿量 i_{sr} 的默认值,

d_{sr} 是斜坡增量,并且

1 是摩擦补偿驱动开始的时间;并且

根据公式 (D) 定义,库仑摩擦补偿电流 i_c 是阶梯函数补偿量 i_{cs} 或斜坡函数补偿量 i_{cr} ;

$$i_c = \begin{cases} \text{sgn}(\omega_m[k]) \cdot i_{cs} & , e[k] \neq 0 \\ i_{cr}[k] & , e[k] = 0 \end{cases} \quad (\text{D})$$

。

2. 如权利要求 1 所述的考虑波动齿轮传动机构摩擦特性随温度改变的变化在执行机构中进行适应性摩擦补偿的方法,其特征在于,还包括:

当电动机轴被再次驱动时,使用通过将前一斜坡函数补偿量 i_{sr} 乘以摩擦更新值 r 获得的值更新用来计算静摩擦补偿电流 i_s 的斜坡函数补偿量 i_{sr} 的默认值 i_{sr0} ,如公式 (E) 所示,

$$i_{sr0}[k] = \begin{cases} i_{sr}[k-1] \cdot r, & \omega_m[k] \neq 0 \\ i_{sr0}[k], & \omega_m[k] = 0 \end{cases} \quad (E)$$

。

3. 如权利要求1或2所述的考虑波动齿轮传动机构摩擦特性随温度改变的变化在执行机构中进行适应性摩擦补偿的方法,其特征在于,还包括:

定位试验结束时,

对于电动机轴在每次定位试验都未达到预设的稳定范围 θ_{stab} 的情形,使用来计算静摩擦补偿电流 i_s 的阶梯函数补偿量 i_{ss} 的值增加预设阶梯补偿增量 i_{ss_i} ;

对于电动机轴在给定的定位试验中达到稳定范围之后仍表现出超出稳定范围 θ_{stab} 的持续振动的情形,使补偿量 i_{ss} 的值减小预设的阶梯补偿减量 i_{ss_d} ;以及

对于电动机轴在定位中已一次或多次达到稳定范围但其轴角在试验结束时间 t_{Set} 落在稳定范围 θ_{stab} 的情形,确定超出稳定范围 θ_{stab} 的振动在持续;

如公式 (F) 所示:

$$i_{ss} = \begin{cases} i_{ss} + i_{ss_i}, & |e[t_{Set}]| > \theta_{stab} \text{ 和 } flag = 0 \\ i_{ss} - i_{ss_d}, & |e[t_{Set}]| > \theta_{stab} \text{ 和 } flag = 1 \\ i_{ss}, & \text{其它} \end{cases} \quad (F)$$

其中

“flag”是指示已达到稳定范围的标志。

4. 如权利要求1或2所述的考虑波动齿轮传动机构摩擦特性随温度改变的变化在执行机构中进行适应性摩擦补偿的方法,其特征在于,还包括:

在小于预设有效摩擦补偿范围 θ_{effect} 的稳定范围 θ_{stab} ($\theta_{stab} < \theta_{effect}$) 内,将用来计算库仑摩擦补偿电流 i_c 的阶梯函数补偿量 i_{cs} 从预设值 i_{cs_effect} 减小至一更小的值 i_{cs_stab} 。

5. 如权利要求4所述的考虑波动齿轮传动机构摩擦特性随温度改变的变化在执行机构中进行适应性摩擦补偿的方法,其特征在于,还包括:

当电动机轴停止时,将库仑摩擦补偿电流 i_c 设定为零,电动机轴转速低于有效摩擦补偿范围 θ_{effect} 内的预设值时除外。

6. 如权利要求5所述的考虑波动齿轮传动机构摩擦特性随温度改变的变化在执行机构中进行适应性摩擦补偿的方法,其特征在于,还包括:

将单调递减的斜坡函数的补偿量作为用来计算库仑摩擦补偿电流 i_c 的斜坡函数补偿量 i_{cr} 以逐渐减小库仑摩擦补偿电流 i_c , 从而在电动机轴停止在目标角时抑制电动机轴返回到前一角度。

7. 如权利要求3所述的考虑波动齿轮传动机构摩擦特性随温度改变的变化在执行机构中进行适应性摩擦补偿的方法,其特征在于,还包括:

在小于预设有效摩擦补偿范围 θ_{effect} 的稳定范围 θ_{stab} ($\theta_{stab} < \theta_{effect}$) 内,将用来计算库仑摩擦补偿电流 i_c 的阶梯函数补偿量 i_{cs} 从预设值 i_{cs_effect} 减小至一更小的值 i_{cs_stab} 。

8. 如权利要求 7 所述的考虑波动齿轮传动机构摩擦特性随温度改变的变化在执行机构中进行适应性摩擦补偿的方法,其特征在于,还包括:

当电动机轴停止时,将库仑摩擦补偿电流 i_c 设定为零,电动机轴转速低于有效摩擦补偿范围 θ_{effect} 内的预设值时除外。

9. 如权利要求 8 所述的考虑波动齿轮传动机构摩擦特性随温度改变的变化在执行机构中进行适应性摩擦补偿的方法,其特征在于,还包括:

将单调递减的斜坡函数的补偿量作为用来计算库仑摩擦补偿电流 i_c 的斜坡函数补偿量 i_{cr} 以逐渐减小库仑摩擦补偿电流 i_c , 从而在电动机轴停止在目标角时抑制电动机轴返回到前一角度。

10. 如权利要求 1 或 2 所述的考虑波动齿轮传动机构摩擦特性随温度改变的变化在执行机构中进行适应性摩擦补偿的方法,其特征在于,还包括:

将单调递减的斜坡函数的补偿量作为用来计算库仑摩擦补偿电流 i_c 的斜坡函数补偿量 i_{cr} 以逐渐减小库仑摩擦补偿电流 i_c , 从而在电动机轴停止在目标角时抑制电动机轴返回到前一角度。

考虑波动齿轮传动机构摩擦特性随温度改变的变化在执行机构中作适应摩擦补偿的方法

技术领域

[0001] 1. 发明领域

[0002] 本发明涉及定位控制方法,其中在采用波动齿轮传动机构的执行机构中通过半闭环控制系统来实现对负载轴的高精度定位控制。更具体地,本发明涉及适应性摩擦补偿方法,能补偿因波动齿轮传动机构的摩擦特性伴随温度改变的变化而造成的负载轴的定位精度降低。

[0003] 2. 相关技术描述

[0004] 在图 1 所示的波动齿轮装置 1 用作减速器的执行机构 2 中,如果不考虑波动齿轮传动机构 1 的摩擦特性因温度改变的变化,就不可能以高精度控制执行机构的负载轴 3 的定位。具体地说,在执行机构 2 中,基于电动机 4 的电动机轴 6 的检测位置控制负载轴 3 的位置的半闭环系统用来进行传动控制,由此电动机 4 的输出转动藉由波动齿轮传动机构 1 而减速并从负载轴 3 传向负载 5。因此,当波动齿轮传动机构 1 的摩擦特性由于环境温度变化而变化时,由半闭环控制系统对负载轴 3 进行定位的精度降低。在专利文献 1 中,披露了一种用于控制执行机构的驱动的伺服控制器,其中采用仿真来精确地确定随时间和温度变化的摩擦力,以使定位控制以及其它动作基于结果高精度地进行。

[0005] JP-A 2006-146572

发明概要

[0006] 因此,为了在各种温度环境和驱动条件下实现精确控制,确定系统运作的状态很重要,这必须有传感器和其它设备,从而影响到成本。

[0007] 本发明的一个目的是提供一种在执行机构中进行适应性摩擦补偿的方法,当波动齿轮传动机构的摩擦特性随着温度变化而改变时,不使用温度传感器也能提高控制性能。

[0008] 为了达到前述目的,本发明是一种在执行机构中进行适应性摩擦补偿的方法,包括:使用半闭环系统以基于电动机的电动机轴的检测位置来控制负载轴的位置,从而实现执行机构的驱动控制,其中电动机的输出转动藉由波动齿轮传动机构而减速并从负载轴朝向负载传递;并使负载轴通过半闭环控制系统定位的精度降低减至最小,该精度降低是由波动齿轮传动机构的摩擦特性伴随环境温度改变的变化造成的;将波动齿轮传动机构的摩擦特性伴随温度改变的变化考虑在内的在执行机构中进行适应性摩擦补偿的方法的特征在于,包括:作为施加于驱动电动机的电动机驱动电流的摩擦补偿电流 i_{comp} ,当电动机轴有偏差地停止时使用静摩擦补偿电流 i_s ,在其它情形下使用库仑摩擦补偿电流 i_c ,如公式 (A) 所示:

$$[0009] \quad i_{comp}[k] = \begin{cases} i_s[k] & (|e[k]| > 0 \text{ and } \omega_m[k] = 0) \\ i_c[k] & (otherwise) \end{cases} \quad (A)$$

[0010] (其中 k 是当前时间, $e[k]$ 是电动机轴偏差,而 $\omega[k]$ 是电动机轴转速);

[0011] 根据公式 (B) 定义静摩擦补偿电流 i_s , 其中由公式 (C) 定义的单调递增斜坡函数的补偿量 i_{sr} 被加至阶梯函数的补偿量 i_{ss} 。

$$[0012] \quad i_s[k] = \begin{cases} \text{sgn}(e[k]) \cdot (i_{ss} + i_{sr}[k]) & (|e[k]| > 0) \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (B)$$

$$[0013] \quad i_{sr} = i_{sr0}[k] + d_{sr} \cdot (k-1) \quad (C)$$

[0014] (其中 i_{sr0} 是斜坡函数补偿量 i_{sr} 的默认值, d_{sr} 是斜坡增量, 而 1 是摩擦补偿执行开始的时间); 并且

[0015] 根据公式 (D) 定义令库仑摩擦补偿电流 i_c 是阶梯函数补偿量 i_{cs} 或斜坡函数补偿量 i_{cr} 。

$$[0016] \quad i_c = \begin{cases} \text{sgn}(\omega_m[k]) \cdot i_{cs} & (e[k] \neq 0) \\ i_{cr}[k] & (e[k] = 0) \end{cases} \quad (D)$$

[0017] 本发明进一步的特征在于, 包括: 当电动机轴被再次驱动时, 使用通过将前一斜坡函数补偿量 i_{sr} 乘以摩擦更新值 r 获得的值更新用来计算静摩擦补偿电流 i_s 的斜坡函数补偿量 i_{sr} 的默认值 i_{sr0} , 如公式 (E) 所示。

$$[0018] \quad i_{sr0}[k] = \begin{cases} i_{sr}[k-1] \cdot r & (\omega_m[k] \neq 0) \\ i_{sr0}[k] & (\omega_m[k] = 0) \end{cases} \quad (E)$$

[0019] 本发明进一步的特征在于, 包括: 定位试验终止时, 对于电动机轴在每次定位试验都未达到预设的稳定范围 θ_{stab} 的情形, 使用用来计算静摩擦补偿电流 i_s 的阶梯函数补偿量 i_{ss} 的值增加预设阶梯补偿增量 i_{ss_i} ; 对于电动机轴在给定的定位试验中达到稳定范围之后仍表现出超出稳定范围 θ_{stab} 的持续振动的情形, 使补偿量 i_{ss} 的值减小预设阶梯补偿减量 i_{ss_d} ; 对于电动机轴在定位过程中已达到稳定范围一次或多次但轴角在试验结束时间 t_{Set} 落在稳定范围 θ_{stab} 外的情形, 确定超出稳定范围 θ_{stab} 的振动在持续,

[0020] 如公式 (F) 所示。

[0021] [公式 F]

$$[0022] \quad i_{ss} = \begin{cases} i_{ss} + i_{ss_i} & (|e[t_{Set}]| > \theta_{stab} \text{ and } flag = 0) \\ i_{ss} - i_{ss_d} & (|e[t_{Set}]| > \theta_{stab} \text{ and } flag = 1) \\ i_{ss} & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (F)$$

[0023] (其中“flag”是指示已达到稳定范围的标志)。

[0024] 本发明进一步的特征在于, 包括: 在小于预设有效摩擦补偿范围 θ_{effect} 的稳定范围 θ_{stab} ($\theta_{stab} < \theta_{effect}$) 内, 将用来计算库仑摩擦补偿电流 i_c 的阶梯函数补偿量 i_{cs} 从预设值 i_{cs_effect} 减至更小值 i_{cs_stab} 。

[0025] 因此, 当电动机轴停止时, 要求库仑摩擦补偿电流 i_c (i_{cs}) 为零, 电动机轴转速低于有效摩擦补偿范围 θ_{effect} 内的预设值时除外。

[0026] 本发明进一步的特征在于, 包括: 将单调递减的斜坡函数的补偿量作为用来计算库仑摩擦补偿电流 i_c 的斜坡函数补偿量 i_{cr} 以逐渐减小库仑摩擦补偿电流 i_c , 从而在电动

机轴停止在目标角时抑制电动机轴返回到前一角度。

[0027] 根据本发明,可基于表达电动机轴偏差、电动机轴转速、稳定状态的数据和响应过程中获得的其它数据相应地改变摩擦补偿量。这能计算出即使环境温度改变且摩擦特性变化也始终合用的摩擦补偿量;并使电动机轴稳定在目标角而不发生大的振动。

[0028] 附图简述

[0029] 图 1 是示出受本发明控制的系统的示意图;

[0030] 图 2 示出图表 (a)-(c),其示出当使用固定的静摩擦补偿量时处于不同温度下的电动机轴响应状态;

[0031] 图 3 示出图表 (a)-(c),其示出当不执行静摩擦补偿时处于不同温度下的电动机轴响应状态;

[0032] 图 4 示出图表 (a)-(c),其示出当不执行静摩擦补偿时处于不同温度下的电动机轴响应和电流命令值;

[0033] 图 5 是示出根据本发明在其中执行适应性摩擦补偿的控制系统的方框示意图;

[0034] 图 6 是示出根据本发明执行适应性摩擦补偿的过程的流程图;

[0035] 图 7 是示出在电动机轴停止在稳定范围之外的情形下的电动机轴响应和适应性摩擦补偿量的图表;

[0036] 图 8 是示出当摩擦补偿不足时的电动机轴响应的图表;

[0037] 图 9 是示出当摩擦补偿不足时的电动机轴响应和静摩擦补偿量的图表;

[0038] 图 10 是示出当未达到目标角时的电动机轴响应和适应性摩擦补偿量的图表;

[0039] 图 11 是示出当达到目标角时的电动机轴响应和适应性摩擦补偿量的图表;以及

[0040] 图 12 示出图表 (a)-(c),其示出在环境温度设定下的电动机轴响应。

具体实施方式

[0041] (1. 温度变化过程中的定位性能变化)

[0042] 发明人对依赖于执行机构中的波动齿轮装置的温度变化的特性进行了分析。具体地说,他们在执行机构的定位控制期间,对取决于电动机轴停止前后波动齿轮装置的温度变化的摩擦特性的变化进行了分析。

[0043] 首先,对执行机构的温度变化起作用的因素广泛地认为是电动机排出的热量以及环境温度的变化。然而,建立准确的自发热模型必须将与驱动相伴的热量和铝固定件散发的热量的热力学因素考虑在内,并且若无法维持要求的温度状态,则执行详细分析是困难的。因此,在使用可获得要求的环境温度的恒温浴将环境温度设定至 10℃、25℃或 40℃且已达到均一(下文中称该状态为“低于预设环境温度”)的状态下,在表 1 所示的试验状态下研究位置响应的改变。对于电动机发出的热量和环境温度之间的关系,试验显示在自发热情形下和预设环境温度下获得的结果是同等的。

[0044] [表 1]

[0045] 试验条件

[0046]

动作:	连续单向定位动作	
控制系统:	P-PI 控制系统+ 静摩擦补偿	P-PI 控制系统
静摩擦补偿:	0.07 [A]	无
进给角:	43.56 [度] (电动机轴: 6.05 转)	
间隔:	2 [s]	
旋转方向:	顺时针	

[0047] 图 1 所示的执行机构（下文中有时称其为“装置”）在静摩擦补偿期间的电动机轴的响应示于图 2。图 2 的垂直轴线表示通过电动机轴编码器测得的值（脉冲）。图 2 示出在 10℃ 和 25℃ 时电动机轴稳定在目标角，然而在 40℃，尽管电动机轴达到目标角，但产生了相对于目标角大约 ± 4 脉冲程度的 振动，从中可以确认特性的变化造成过度的静摩擦补偿。

[0048] 因此，为了研究定位过程中在电动机轴停止前后摩擦特性的变化，图 3 和图 4 示出无补偿响应，其中不执行任何静摩擦补偿。在图 4(a)-(c) 的下半部中高于和低于水平轴线的虚线表示 $\pm 0.07A$ 。

[0049] 基于图 3 所示的电动机轴响应，在 10℃ 和 25℃ 时，振动由于粘滑现象而持续，然而在 40℃ 时响应趋缓地稳定而没有显著振动。图 4 示出在 10℃ 和 25℃ 时，作用方向由于静摩擦而在靠近电流命令为 0.07A 的位置反转，然而在 40℃ 时，作用方向在电流命令达到 0.07A 前反转。通过比较 10℃ 和 25℃ [时获得的结果]，可确认在粘滑现象中的振动周期是不同的，并在电动机轴停止且环境温度增加时相信有从动摩擦至静摩擦的柔和过渡。

[0050] 基于前述内容，假设目标角附近的响应变化主要是由于摩擦特性变化，并为使电动机轴在所有温度下均停止在目标角，需要将静摩擦补偿扩大至足以将由于温度变化引起的摩擦特性变化考虑在内的补偿方法。

[0051] (2. 向适应性摩擦补偿的扩大)

[0052] 如前所述，使用传统静摩擦补偿方法，电动机轴在 40℃ 的环境温度下无法停止在目标角。因此，将补偿扩大至足以对温度改变引起的摩擦特性变化进行的摩擦补偿（下文称其为“适应性摩擦补偿”）。

[0053] 在适应性摩擦补偿中，要将下面的几个要点考虑在内：

[0054] 1) 摩擦补偿量基于在响应过程中获得的数据而改变，由此即使摩擦变化也不会有过度补偿和补偿不足。

[0055] 2) 传统静摩擦补偿方法仅将停止过程中的摩擦考虑在内，并且当电动机轴被驱动

时,补偿为零。因此,由于存在电动机轴在移动一非常小的量之后立即停止的情形,因此除了静摩擦补偿外还施加库仑摩擦补偿。

[0056] 适应性摩擦补偿被分成静摩擦补偿和库仑摩擦补偿,并通过根据响应过程中获得的数据在公式(1)所示的静摩擦补偿量 i_s 和库仑摩擦补偿量 i_c 之间切换来确定摩擦补偿量 i_{comp} 。

$$[0057] \quad i_{comp}[k] = \begin{cases} i_s[k] & (|e[k]| > 0 \text{ and } \omega_m[k] = 0) \\ i_c[k] & (otherwise) \end{cases} \quad (1)$$

[0058] (其中 k 是当前时间, $e[k]$ 是电动机轴偏差,而 $\omega[k]$ 是电动机轴转速);

[0059] 在静摩擦补偿过程中叠加积分器的补偿量,因此,如果不输入合适的补偿量,则会发生补偿恶化。因此,与传统静摩擦补偿方法一样,当静摩擦补偿开始和结束时,对积分器的内部状态进行清零。

[0060] 依照拟控制的对象,由于电动机轴编码器的分辨率较低,并且由于当电动机轴开始转动时量化误差的影响而从速度环加入大的控制输入,因此当电动机轴被再驱动时,采用零速度反馈信号。

[0061] 图5是根据本发明的适应性摩擦补偿的方框示意图,而图6是与之关联的流程图。参照这些附图阐述适应性摩擦补偿的具体过程。图6中使用的标记如下:

[0062] i_s :静摩擦补偿电流 [A]

[0063] i_{ss} :阶梯补偿量 [A]

[0064] i_{ss_d} :阶梯补偿减量 [A]

[0065] i_{ss_i} :阶梯补偿增量 [A]

[0066] i_{sr} :斜坡补偿量 [A]

[0067] i_c :库仑摩擦补偿电流 [A]

[0068] i_{cs} :阶梯补偿量 [A]

[0069] i_{cr} :斜坡补偿量 [A]

[0070] θ_{effect} :有效摩擦补偿范围 [脉冲]

[0071] θ_{stab} :稳定范围 [脉冲]

[0072] t_{Set} :定位结束时间 [采样]

[0073] n :停止在目标角的时间 [采样]

[0074] $flag$:指示已达到稳定范围的标志

[0075] (2.1 静摩擦补偿(当电动机轴停止时))

[0076] 传统的静摩擦补偿在电动机轴停止时以阶梯形式施加与事先测得的最大静摩擦力对应的摩擦量,籍此使电动机轴强制移动。因此,在摩擦力由于温度或其它因素改变而变化的情形下,补偿精度由于过度补偿或补偿不足而下降。

[0077] 因此,在适应性摩擦补偿中,当电动机轴有偏差地停止时施加的静摩擦补偿量 i_s 确定如下。

[0078] 当电动机轴有偏差地停止时,施加静摩擦补偿量 i_s 。将公式(3)的单调递增斜坡函数的补偿量 i_{sr} 加至如公式(2)所示的阶梯函数补偿量 i_{ss} ,由此使静摩擦补偿量 i_s 逐渐增大,直到电动机轴被驱动为止,并提高相对于温度的稳固性。在这种情形下,需要将较小

的值用于阶梯函数补偿量 i_{ss} 以避免过度补偿。

[0079] 当斜坡函数补偿量 i_{sr} 每当电动机轴停止就从零开始增大时, 每当电动机轴停止时都需要等待 i_{sr} 增大, 并且在稳定前需要更多的时间。因此, 当电动机轴被再驱动时, 补偿量 i_{sr} 的默认值 i_{sr0} 通过将前一斜坡函数补偿量 i_{sr} 乘以摩擦更新值 r 而更新, 如公式 (4) 所示那样。

$$[0080] \quad i_s[k] = \begin{cases} \text{sgn}(e[k]) \cdot (i_{ss} + i_{sr}[k]) & (|e[k]| > 0) \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (2)$$

$$[0081] \quad i_{sr}[k] = i_{sr0}[k] + d_{sr} \cdot (k-1) \quad (3)$$

$$[0082] \quad i_{sr0}[k] = \begin{cases} i_{sr}[k-1] \cdot r & (\omega_m[k] \neq 0) \\ i_{sr0}[k] & (\omega_m[k] = 0) \end{cases} \quad (4)$$

[0083] (其中 d_{sr} 是斜坡增量, 而 1 是摩擦补偿动作开始的时间)。

[0084] 图 7 示出当电动机轴有偏差地停止时装置的响应的示例。上半个图表表示电动机轴响应, 而下半个图表表示静摩擦补偿量 i_s 。在 0.638 秒和 0.644 秒之间, 从电动机轴有偏差地停止时至电动机轴被驱动时, 静摩擦补偿量 i_s 增加。当电动机轴在 0.644 秒被再驱动时, 用作默认值 i_{sr0} 的值是通过将电动机轴被驱动前一时刻的斜坡函数的补偿量 i_{sr} 乘以摩擦更新值 r 而获得的值, 并且电动机轴在其再次停止时再次被驱动的速度增大。由此当静摩擦力随着温度变化而变化时, 能可靠地驱动电动机轴而不需要输入额外的静摩擦补偿量。

[0085] 因此, 如果静摩擦补偿量存在过剩或不足, 则电动机轴无法停止在目标角。如前所述, 阶梯状和斜坡状静摩擦补偿共同用于适应性摩擦补偿。然而, 在补偿量存在大大不足的情形下, 等待斜坡函数积累对响应性能产生不利影响。因此, 如公式 (5) 所示, 当定位试验结束时, 改变阶梯函数补偿量 i_{ss} 。

$$[0086] \quad i_{ss} = \begin{cases} i_{ss} + i_{ss_i} & (|e[t_{Set}]] > \theta_{stab} \text{ and } flag = 0) \\ i_{ss} - i_{ss_d} & (|e[t_{Set}]] > \theta_{stab} \text{ and } flag = 1) \\ i_{ss} & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (5)$$

[0087] (其中 “flag” 是指示已达到稳定范围的标志)。

[0088] 具体地说, 在任何定位试验中电动机轴均未达到稳定范围 θ_{stab} 的情形下, 即当存在不足补偿时, 将阶梯函数补偿量 i_{ss} 的值增大 i_{ss_i} 。在每次试验中即使在电动机轴已达到稳定范围 θ_{stab} 之后超出稳定范围的振动仍然持续的情形下, 将补偿量 i_{ss} 的值减小 i_{ss_d} 以防止过量的摩擦补偿。在电动机轴角在试验结束时间 t_{Set} 仍落在稳定范围 θ_{stab} 之外的情形下, 尽管 [电动机轴] 在定位期间已进入稳定范围一次或多次, 落在稳定范围 θ_{stab} 以外的变化被确定为振动在持续。

[0089] 图 8 示出在五周期的定位驱动过程中的电动机轴响应, 而图 9 示出在第一次试验和第三次试验中装置的响应的示例。图 8 和图 9 上半部图中的黑色水平虚线代表稳定范围 θ_{stab} 。图 8 中的下半部中的直线 a-e 分别表示第一次试验、第二次试验、第三次试验、第四次试验和第五次试验。图 9 上半个图表表示电动机轴响应, 而下半个图表表示静摩擦补偿

量 i_s 。

[0090] 图 8 示出补偿根据来自第一次试验的响应是不足的,因此,电动机轴尚未被驱动至目标角。然而,根据图 9 中的下半个图表中的静摩擦补偿量,通过随每次连续试验增加阶梯函数补偿量 i_{ss} 而达到目标角的第三次试验和之后的试验的响应。

[0091] (2.2 库仑摩擦补偿 (当电动机轴被再驱动时))

[0092] 一旦驱动,电动机轴通过从静摩擦补偿切换至公式 (6) 所示阶梯函数的库仑摩擦补偿量 i_c 而不会立刻停止。

[0093] 在稳定范围 θ_{stab} ($\theta_{stab} < \theta_{effect}$), 电动机轴不需要被驱动至特别大的程度,但必须改变补偿量以使其停止在目标角。因此,如公式 (7) 所示,在稳定范围内 θ_{stab} , 将库仑摩擦补偿量 i_{cs} 从 i_{cs_effect} 减小至 i_{cs_stab} 。

[0094] 对于斜坡补偿量 i_{cr} (稍后讨论), 当电动机轴停止在目标角时,公式 (8) 所示的单调递减斜坡函数的补偿量 i_{cr} 用来逐渐减小库仑摩擦补偿量以抑制电动机轴回到前一轴角。

$$[0095] \quad i_c = \begin{cases} \text{sgn}(\omega_m[k]) \cdot i_{cs} & (e[k] \neq 0) \\ i_{cr}[k] & (e[k] = 0) \end{cases} \quad (6)$$

[0096]

$$i_{cs} = \begin{cases} i_{cs_stab} & (|e[k]| < \theta_{stab}) \\ i_{cs_effect} & (\theta_{stab} \leq |e[k]| < \theta_{effect}) \\ 0 & (\theta_{effect} \leq |e[k]| \text{ or } |\omega_m[k]| > 1[\text{pulse}/T_s]) \end{cases} \quad (7)$$

[0097]

$$i_{cr}[k] = \begin{cases} \text{sgn}(\omega_m[n]) \cdot (i_{cs_stab} - d_{cr} \cdot (k - n)) & (|i_{cs_stab}| > |d_{cr} \cdot (k - n)|) \\ 0 & (|i_{cs_stab}| \leq |d_{cr} \cdot (k - n)|) \end{cases} \quad (8)$$

[0098] (其中 d_{cr} 是斜坡补偿减小的量,而 n 是 [轴] 停止在目标角的时间)

[0099] 在电动机轴停止时研究摩擦的时候,在本补偿方法中,当电动机轴在有效摩擦补偿范围 θ_{effect} 内缓慢移动时,库仑摩擦补偿仅限于 $|\omega_m[k]| \leq 1$ (脉冲 / T_s)。

[0100] 已达到和尚未达到目标角时的装置响应示出于图 10 和图 11。电动机轴响应示出于上半个图表,而适应性摩擦补偿量 i_{comp} 示出于下半个图表。在上半个图表中,稳定范围 θ_{stab} 由水平虚线表示,而在下半个图表中,静摩擦补偿量由直线 a 表示,而库仑摩擦补偿量由直线 b 表示。

[0101] 当电动机轴在图 10 中的 0.65 秒位置被再驱动时,若电动机轴转速较低,即当 $|\omega_m[k]| \leq 1$ (脉冲 / T_s) 时,通过切换至直线 b 所示的库仑摩擦补偿来执行补偿。在 0.655 秒时,电动机轴已达到稳定范围 θ_{stab} ,将之后的库仑摩擦补偿量从 i_{cs_effect} 减小至 i_{cs_stab} 。

[0102] 根据图 11 所示装置在已达到稳定范围时的响应,电动机轴在 0.8 和 0.833 秒之间已停止在目标角,因此,逐渐减小补偿量使电动机轴不至回到前一角。

[0103] (3. 适应性摩擦补偿的有效性的研究)

[0104] (3.1 设定适应性摩擦补偿的参数)

[0105] 表 3 所示的适应性摩擦补偿的参数如下所述。

[0106] 摩擦补偿阶梯补偿量 i_{ss} ：

[0107] 较高值对应于再驱动电动机轴时的较高速度；然而，如果该值高于静摩擦力，则会产生过度补偿，并且将在目标角前后发生若干次脉冲的振动。当电动机轴以 40℃ 的环境温度被再驱动时，将参数设定至低于电流命令值的值以防止过度补偿。

[0108] 摩擦补偿斜坡补偿量 i_{sr0} ：

[0109] 由于每次电动机轴驱动时会被更新，因此默认值被置为“0”。

[0110] 摩擦补偿斜坡补偿增量 d_{sr} ：

[0111] 较高值对应于电动机轴再驱动时的较高速度；然而，如果该值过高，则很容易造成振动响应。大于电动机轴停止时积分器中的累积量的值 (0.0003[A/Ts]) 是通过试验和误差法设定的。

[0112] 摩擦补偿阶梯补偿增量 i_{ss_i} ：

[0113] 较高值对应于不足摩擦补偿的较低发生率并且能在较高速下再驱动电动机轴；然而，如果该值过高，则很容易造成振动响应。能在若干次试验中达到稳定范围内的值是通过试验和误差法设定的。

[0114] 摩擦补偿阶梯补偿减量 i_{ss_d} ：

[0115] 较高值对应于避免振动响应的较高可能性；然而，如果该值过高，则电动机轴的再驱动将被延迟，这意味着电动机轴可能在目标角之前就停止。补偿量逐渐减小的值是通过试验和误差法设定的。

[0116] 摩擦更新值 r ：

[0117] 较高值对应于当电动机轴再次停止时施加的静摩擦补偿量的较高值；因此，电动机轴以较高速度被再驱动。然而，如果该值过高，则振动响应容易发生。补偿在 40℃ 不会过量的值是通过试验和误差法设定的。

[0118] 库仑摩擦补偿阶梯补偿量 i_{cs_effect} ：

[0119] 较高值对应于无停止的较大程度的电动机轴驱动；然而，如果该值过高，则电动机轴更容易过冲超出目标角。为了防止电动机轴停止，使用通过 10℃ 下的恒速测试确定的库仑摩擦力。

[0120] 库仑摩擦补偿阶梯补偿量 i_{cs_stab} ：

[0121] 较高值对应于稳定范围 θ_{stab} 内的较高库仑摩擦补偿量 i_c ；因此，电动机轴甚至在稳定范围内也容易具有较大程度的驱动。然而，如果该值过高，则电动机轴不容易停止在目标角。使用与摩擦补偿阶梯补偿量 i_{ss} 相等的值，以使输入的补偿量就是令电动机轴没有较大程度驱动地停止在目标角时的补偿量。

[0122] 库仑摩擦补偿斜坡补偿减量 d_{cr} ：

[0123] 较高值对应于电动机轴停止在目标角后返回到到达目标角前的角度的更大可能性；然而，如果该值很小，则电动机轴将更可能过冲超出目标角。使用若干采样设定该值以使补偿量不为零。

[0124] 有效摩擦补偿范围 θ_{effect} ：

[0125] 根据所提出的适应性摩擦补偿，以目标角附近的静摩擦补偿为对象，然而对于响应过程中的动摩擦的补偿不考虑在内。因此，为了将足够的值设定为目标角附近的值，在

10-40℃环境温度下的定位响应过程中采用最大过冲值。

[0126] 稳定范围 θ_{stab} :

[0127] 稳定范围内的较高值对应于电动机轴在目标角附近容易驱动至不太高的程度以减少库仑摩擦补偿量 i_c , 然而, 如果该值过高, 则电动机轴容易在到达目标角前停止。稳定范围被设定为 2 个脉冲以取得与在 25℃的环境温度下的传统静摩擦补偿方法同等的补偿效果。

[0128] (3.2 使用装置的实验)

[0129] 使用在预设环境温度下的定位响应结果来研究适应性摩擦补偿的有效性。在该定位实验中采用的条件示出于表 2, 并且装置的电动机轴的响应示出于图 12。附图表示电动机轴在所有温度下在目标角前后没有显著振动地达到目标角, 并确认根据本发明的补偿方法对于伴随温度变化的特性变化具有强有力的补偿。

[0130] [表 2]

[0131] 实验条件

[0132]

动作:	连续单向定位
控制系统:	P-PI 控制系统 + 适应性摩擦补偿
适应性摩擦补偿的预设参数	单独在表 3 中表示
进给角: [deg]	43.56 (电动机轴: 6.05 转)
间隔: [s]	2
旋转方向:	顺时针

[0133] [表 3]

[0134] 适应性摩擦补偿的预设参数

[0135]

摩擦补偿阶梯补偿量 i_{ss}	[A]	0.01
摩擦补偿斜坡补偿量 i_{sr0}	[A]	0
摩擦补偿斜坡补偿增量 d_{sr}	[A/T _s]	0.005
摩擦补偿阶梯补偿增量 i_{ssi}	[A]	0.01
摩擦补偿阶梯补偿减量 i_{ssd}	[A]	0.005
摩擦更新值 r		0.3
库仑摩擦补偿阶梯补偿量 i_{cs_effect}	[A]	0.04

[0136]

库仑摩擦补偿阶梯补偿量 i_{cs_stab}	[A]	0.01
库仑摩擦补偿斜坡补偿减量 d_{cr}	[A/T _s]	0.0001
有效摩擦补偿范围 θ_{effect}	[脉冲]	100
稳定范围 θ_{stab}	[脉冲]	2
试验结束时间 t_{set}	[样本]	4000

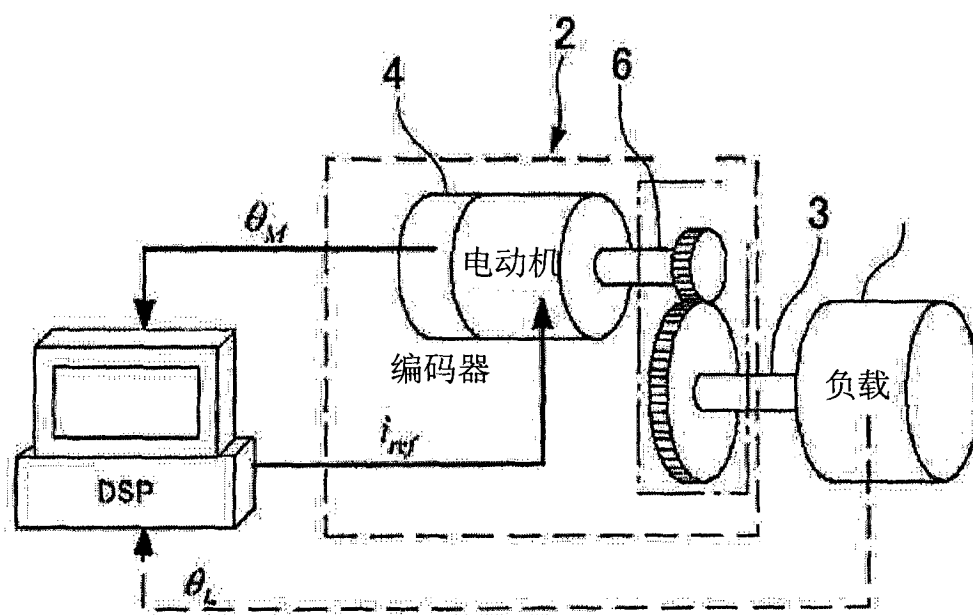


图 1

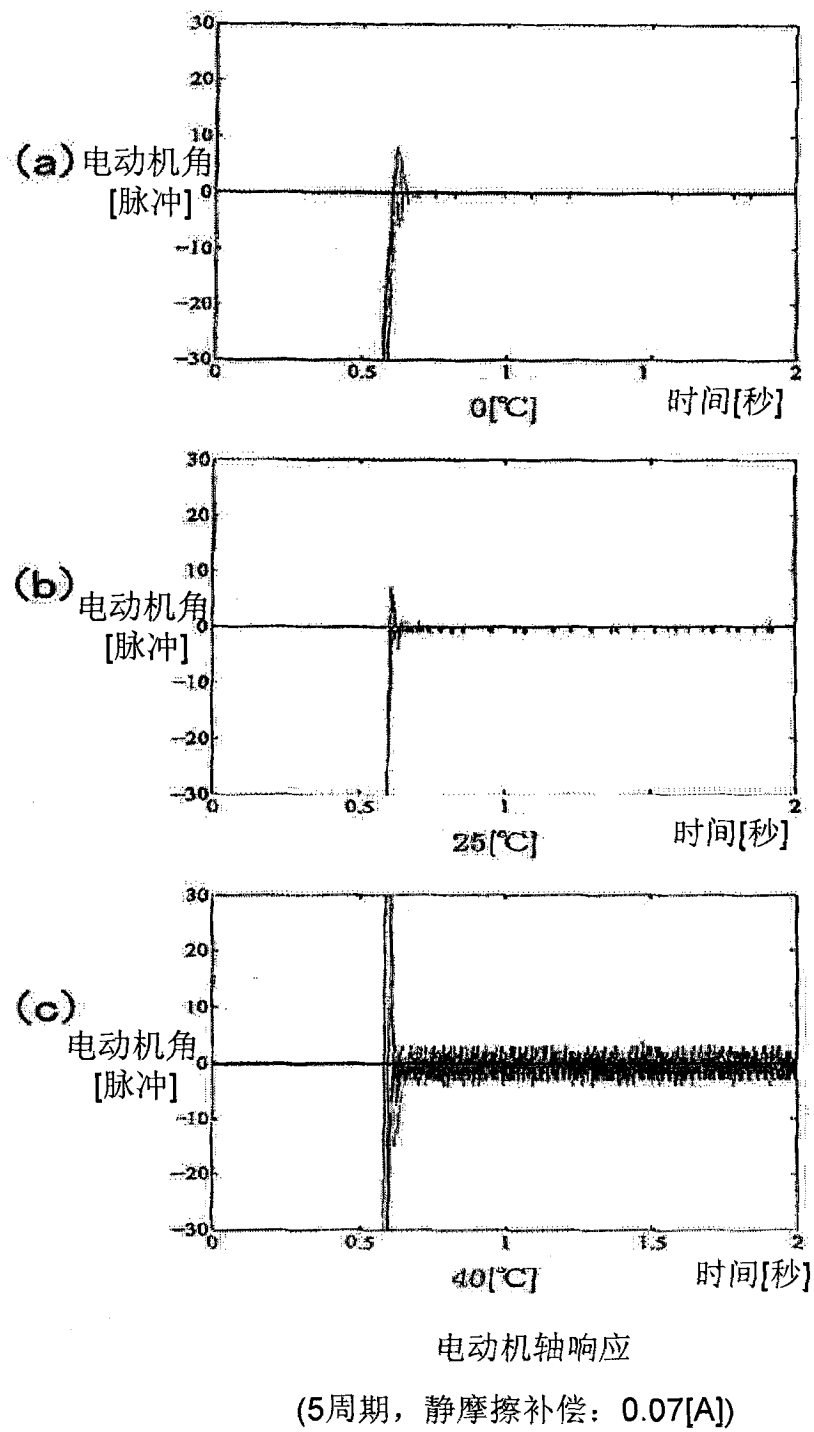
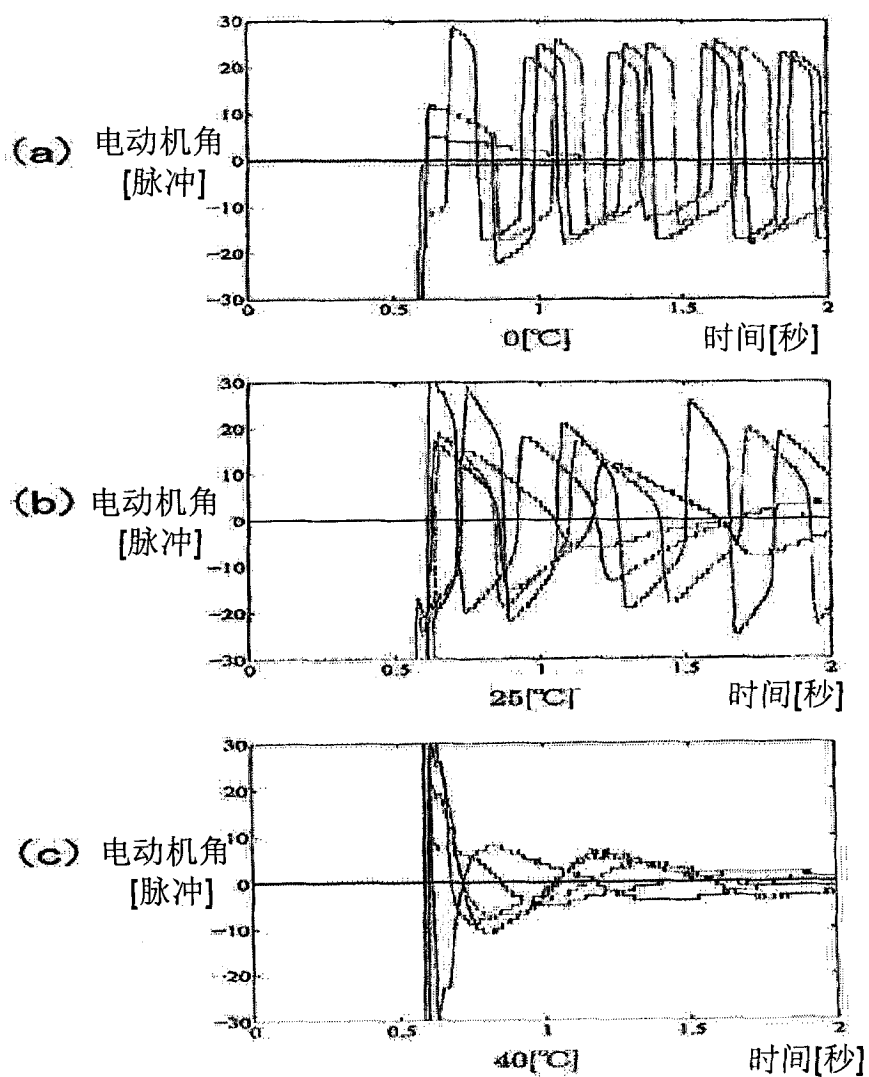
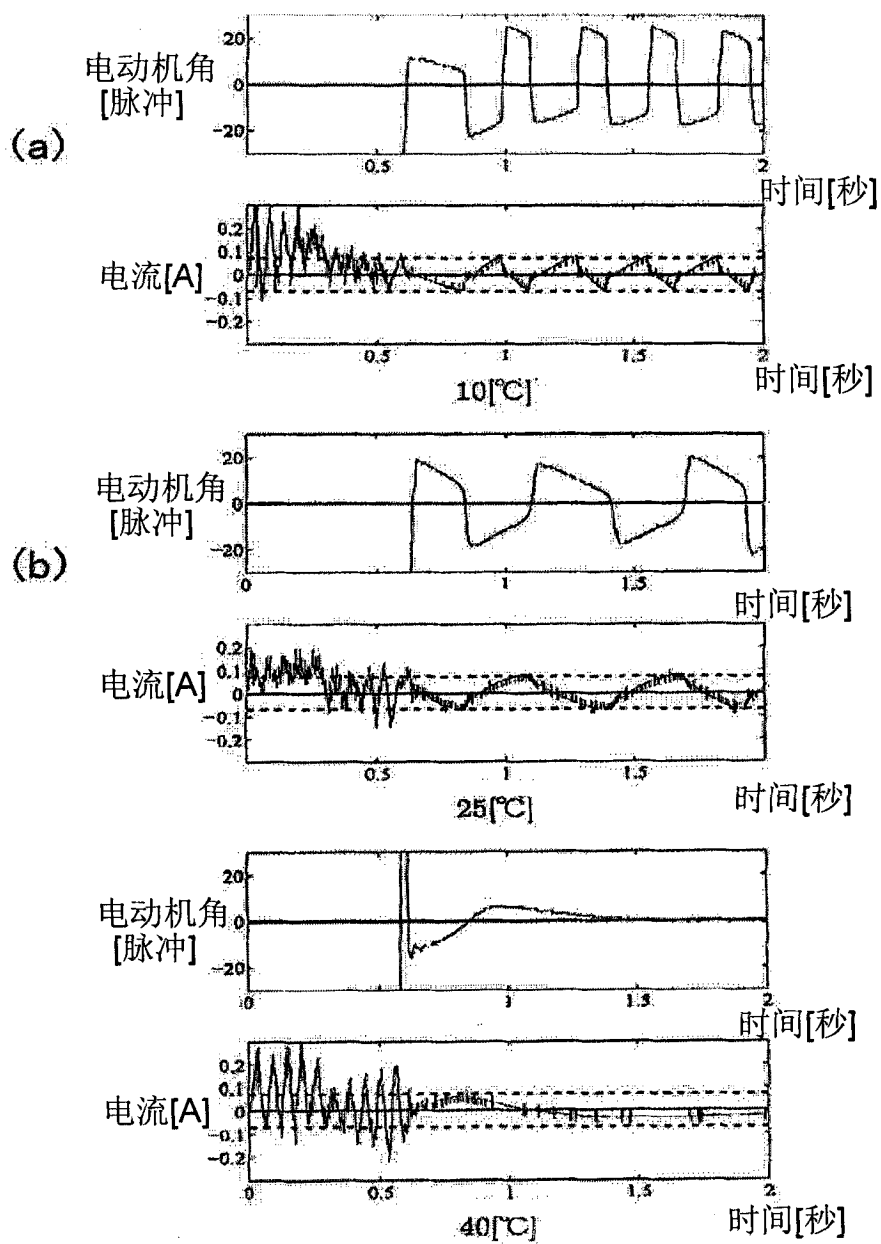


图 2



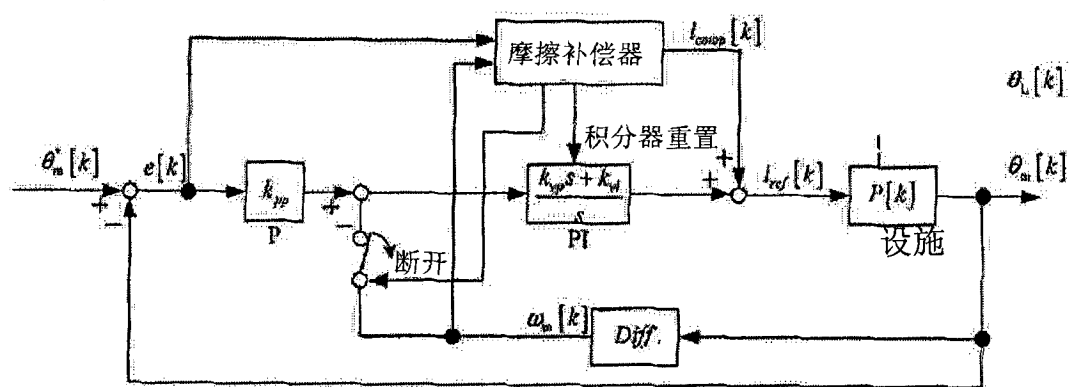
电动机轴响应
(5周期, 静摩擦补偿未执行)

图 3



电动机轴响应和电流命令值
(1周期, 静摩擦补偿未执行)

图 4



适应性摩擦补偿的方框示意图

图 5

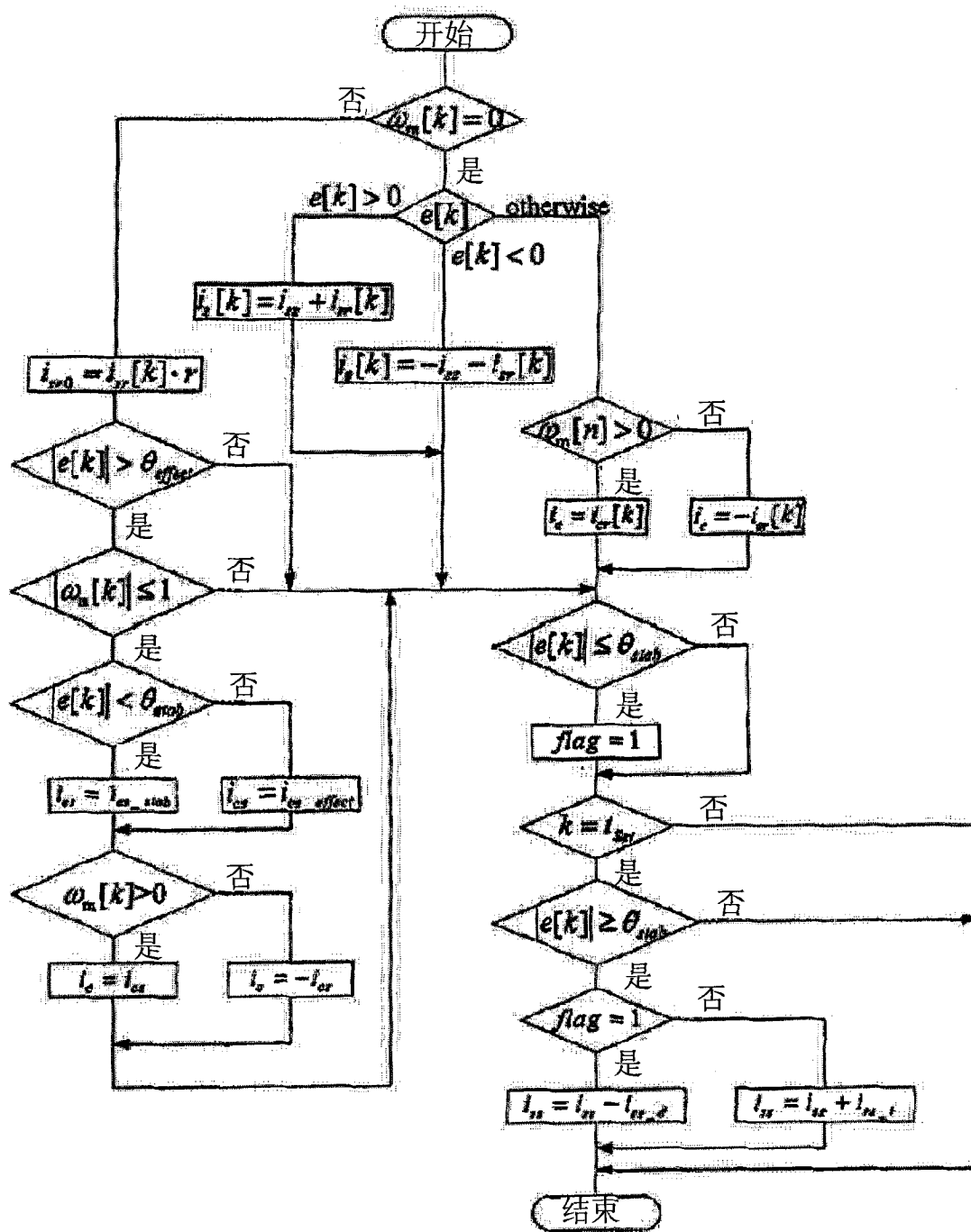
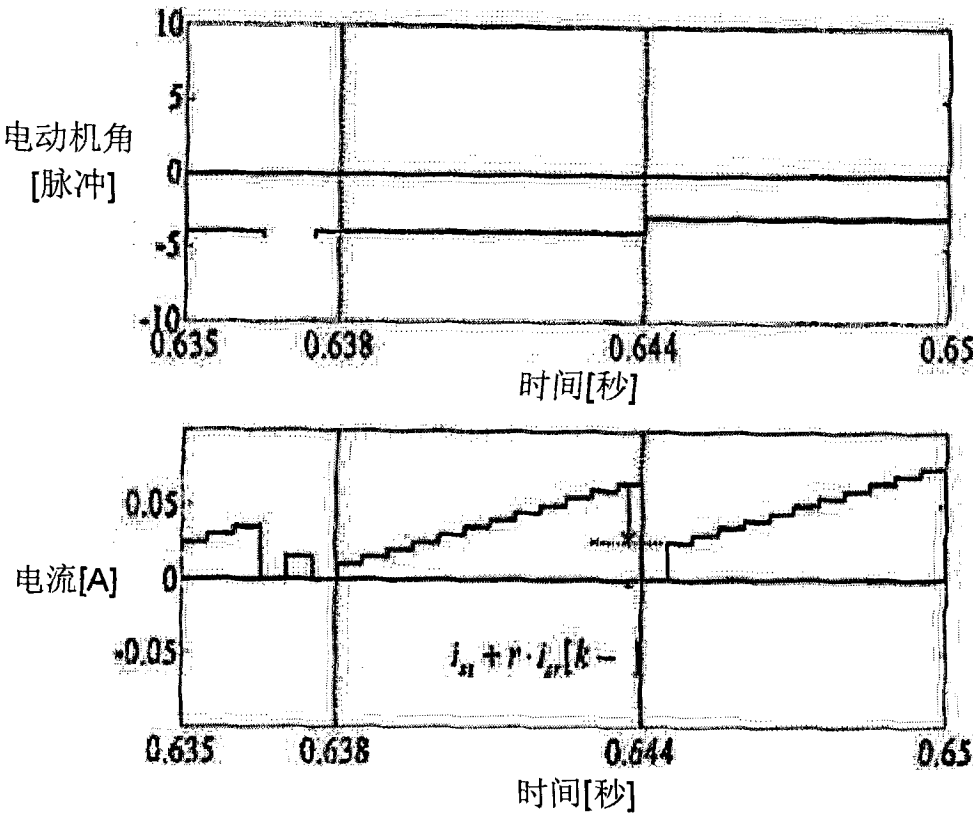
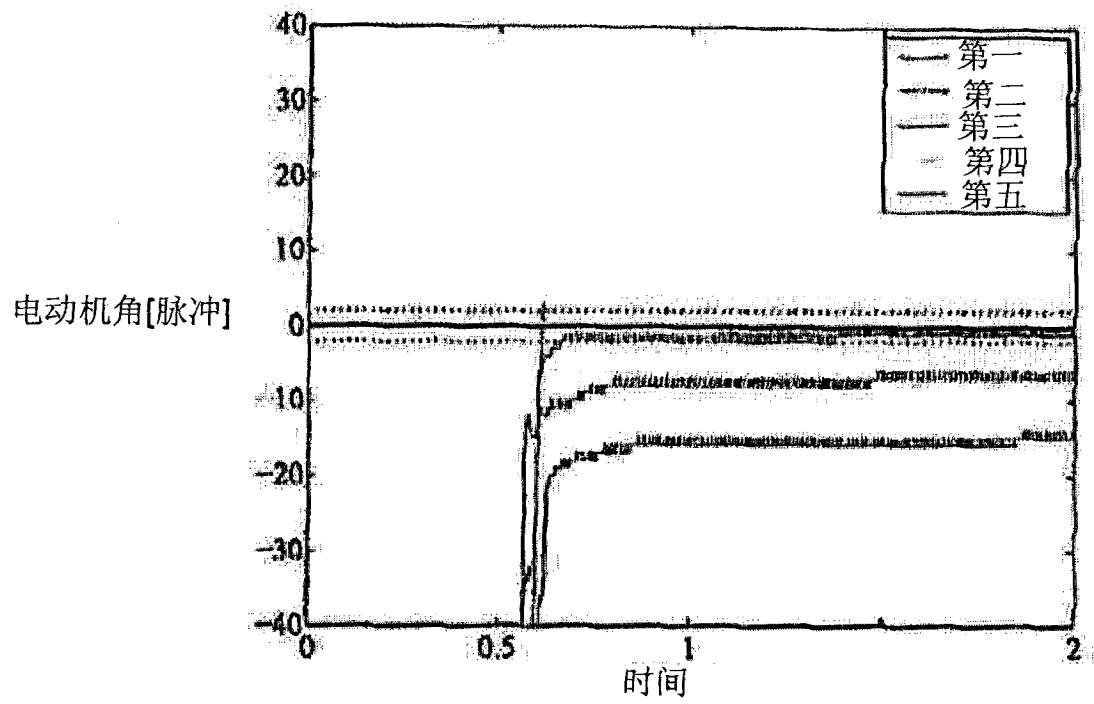


图 6



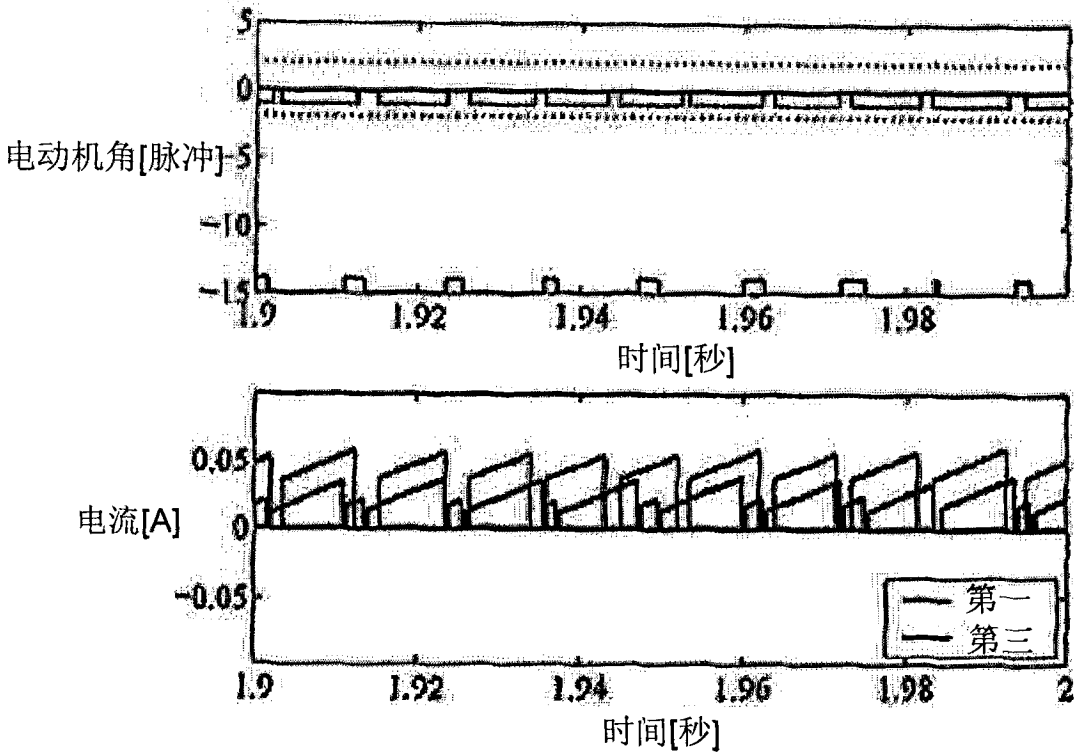
当电动机轴在稳定范围外停止时的电动机轴响应和适应性摩擦补偿量

图 7



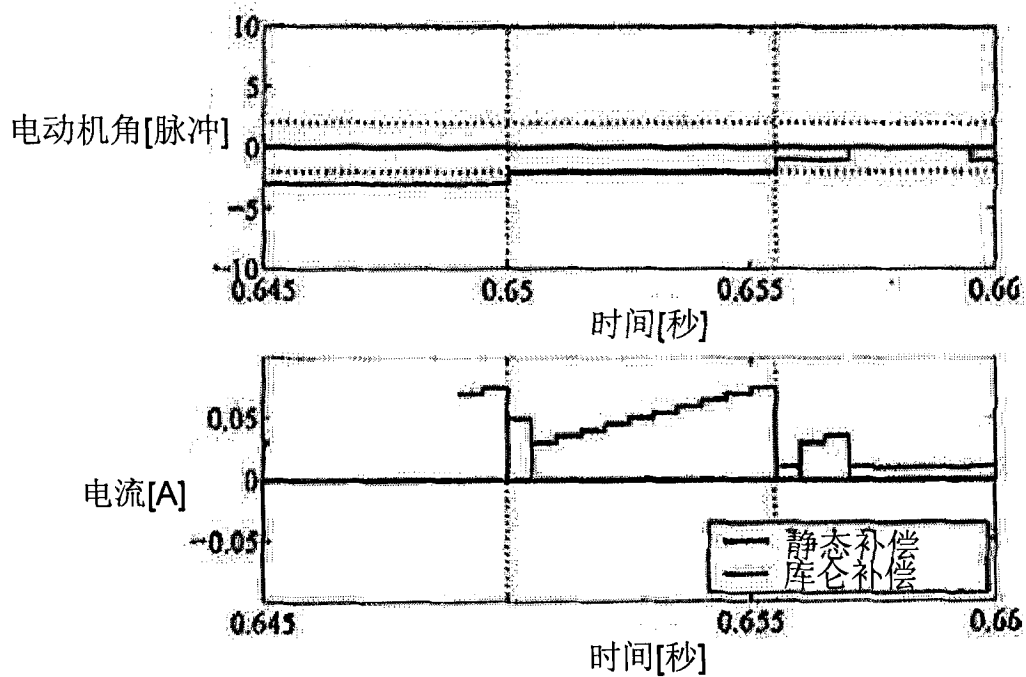
当摩擦补偿不足时的电动机轴响应

图 8



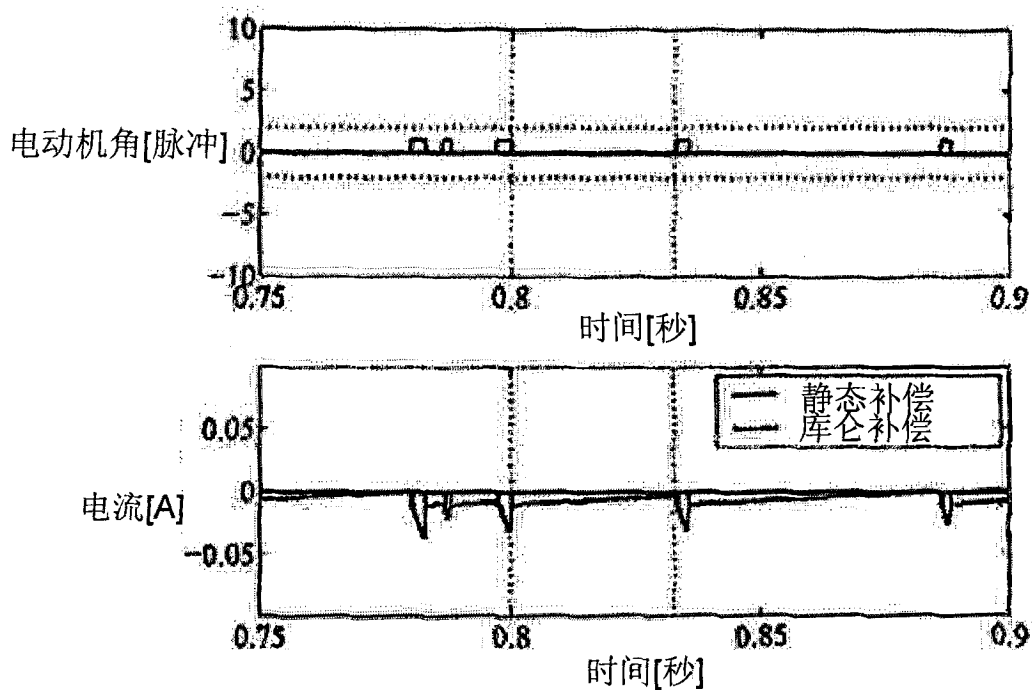
当摩擦补偿不足时的电动机轴响应和静摩擦补偿量

图 9



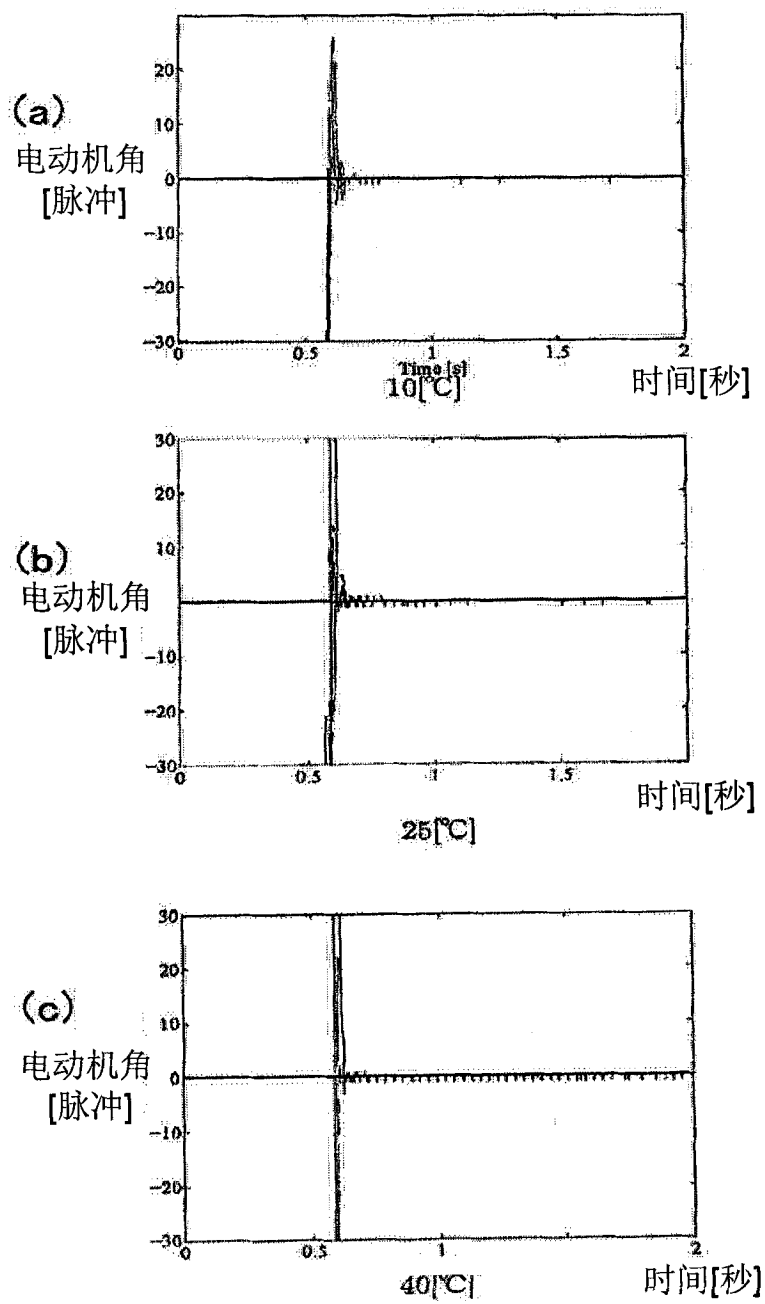
当未达到目标角时的电动机轴响应和适应性摩擦补偿量

图 10



当到达目标角时的电动机轴响应和适应性摩擦补偿量

图 11



在环境温度设定下的电动机轴响应(5周期)

图 12