



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 104242748 B

(45)授权公告日 2016.08.31

(21)申请号 201410525610.3

曾文禹.基于改进型磁链法的开关磁阻电机无位置检测的研究.《电气传动》.2010,第40卷(第7期),

(22)申请日 2014.10.08

审查员 刘慧媛

(73)专利权人 南京信息职业技术学院

地址 210023 江苏省南京市文澜路99号

(72)发明人 张磊 徐开军 张汉年

(74)专利代理机构 南京天翼专利代理有限责任公司 32112

代理人 朱戈胜 朱芳雄

(51)Int.Cl.

H02P 6/18(2016.01)

(56)对比文件

CN 101917151 A,2010.12.15,全文.

CN 101699757 A,2010.04.28,全文.

KR 101311377 B1,2013.09.25,全文.

CN 1185055 A,1998.06.17,全文.

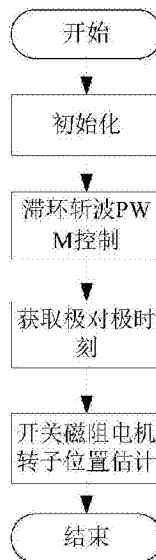
权利要求书1页 说明书6页 附图6页

(54)发明名称

一种用于开关磁阻电机系统的转子位置估计方法及装置

(57)摘要

本发明提供了一种用于开关磁阻电机系统的转子位置估计方法及装置,其中方法包括步骤:初始化、滞环斩波PWM控制、获取极对极时刻、开关磁阻电机转速计算以及开关磁阻电机转子位置估计;装置包括:初始化模块、滞环斩波PWM控制模块、获取极对极时刻模块、开关磁阻电机转速计算模块以及开关磁阻电机转子位置估计模块。本发明对低速运转阶段的开关磁阻电机系统的转子位置估计精度高,并且算法简单,不需要增加硬件,通用性强。



1. 一种用于开关磁阻电机系统的转子位置估计方法,其特征在于,所述开关磁阻电机系统包括采集开关磁阻电机电流信号的信号采样调理电路、驱动开关磁阻电机转动的功率变换器以及对电流信号进行处理并控制功率变换器的微处理器,所述转子位置估计方法包括如下步骤:

步骤1,初始化,设定电流滞环的限定电流值 i^* 以及环宽为 $2\Delta i$;

步骤2,滞环斩波PWM控制,读取信号采样调理电路采集的实时电流信号,将实时电流信号减去限定电流值 i^* 得电流变化量,若电流变化量 $> \Delta i$,则关闭滞环斩波PWM,向功率变换器发送关断开关管信号,若电流变化量 $< -\Delta i$,则开通滞环斩波PWM,向功率变换器发送导通开关管信号;

步骤3,获取转子与定子的极对极时刻,记录并分析滞环斩波PWM每次的开通时间,若开通时间在某时刻由连续增大变为连续减小,则该时刻即为开关磁阻电机的转子与定子的极对极时刻;

步骤4,开关磁阻电机转速计算,记录相邻两次转子与定子的极对极时刻,并计算两次转子与定子的极对极时刻的时间差 Δt ,再根据开关磁阻电机的转子相邻两极的角度差 $\Delta\theta$ 计算开关磁阻电机转子的角速度 $\omega = \frac{\Delta\theta}{\Delta t}(\text{deg/s})$;

步骤5,开关磁阻电机转子位置估计,根据开关磁阻电机的角速度 ω 以及估计时间间隔 ΔT 计算出开关磁阻电机转子在转动估计时间间隔后相对于转子与定子的极对极位置转过角度为 $\theta = \omega \Delta T$ 。

2. 一种用于开关磁阻电机系统的转子位置估计装置,其特征在于,所述开关磁阻电机系统包括采集开关磁阻电机电流信号的信号采样调理电路、驱动开关磁阻电机转动的功率变换器以及对电流信号进行处理并控制功率变换器的微处理器,所述微处理器包括如下模块:

初始化模块,用于设定电流滞环的限定电流值 i^* 以及环宽为 $2\Delta i$;

滞环斩波PWM控制模块,用于读取信号采样调理电路采集的实时电流信号,将实时电流信号减去限定电流值 i^* 得电流变化量,若电流变化量 $> \Delta i$,则关闭滞环斩波PWM,向功率变换器发送关断开关管信号,若电流变化量 $< -\Delta i$,则开通滞环斩波PWM,向功率变换器发送导通开关管信号;

获取极对极时刻模块,用于记录并分析滞环斩波PWM每次的开通时间,若开通时间在某时刻由连续增大变为连续减小,则该时刻即为开关磁阻电机的转子与定子的极对极时刻;

开关磁阻电机转速计算模块,用于记录相邻两次转子与定子的极对极时刻,并计算两次转子与定子的极对极时刻的时间差 Δt ,再根据开关磁阻电机的转子相邻两极的角度差 $\Delta\theta$ 计算开关磁阻电机转子的角速度 $\omega = \frac{\Delta\theta}{\Delta t}(\text{deg/s})$;

开关磁阻电机转子位置估计模块,用于根据开关磁阻电机的角速度 ω 以及估计时间间隔 ΔT 计算出开关磁阻电机转子在转动估计时间间隔后相对于转子与定子的极对极位置转过角度为 $\theta = \omega \Delta T$ 。

一种用于开关磁阻电机系统的转子位置估计方法及装置

技术领域

[0001] 本发明涉及一种开关磁阻电机的转子位置估计方法及装置,尤其是一种用于无位置传感器的开关磁阻电机系统的转子位置估计方法及装置。

背景技术

[0002] 在电机应用领域中,开关磁阻电机的运转需要转子位置信号,而开关磁阻电机的位置估计过程包括三个阶段:启动阶段、低速运转阶段和高速运转阶段。启动阶段需要获得开关磁阻的初始位置,该位置的获取有专门的方法;低速运转阶段需要获得转子实时位置,这正是本发明需要解决的技术问题;高速运转阶段也需要获得转子实时位置,该位置也有其他的专门检测方法。现有的开关磁阻电机调速系统主要由开关磁阻电机(SRM)、功率变换器、控制器、转子位置检测器四大部分组成,而转子位置检测器对转子位置信号的获取主要采用直接位置检测方法,该方法是在电机中专门增设一个位置传感器得到位置信号,典型的有电磁式、光电式、磁敏式等,其中光电传感器应用最广泛,但这些传统的机械传感器结构复杂,安装不方便,不仅增加了系统结构的复杂性,同时也降低了系统的可靠性和增加了成本,制约了开关磁阻电机的广泛应用,特别在高温、灰尘等恶劣环境下,位置传感器又容易出现故障,这又限制了电机的正常运转。为了克服开关磁阻电机这一弊端,探索一种算法简单、容易实现、又高可靠性的无位置传感器技术具有十分重要的实际意义。

[0003] 近年来,国内外学者对开关磁阻电机无位置传感器技术进行了广泛的研究,提出一系列的位置估计算法,主要有脉冲注入法、磁链/电流法、智能拟合算法、电感模型法以及非导通相电流波形检测、调制技术等,这些方法是利用电机固有的电、磁等与转子位置相关的信息间接估计位置信号,但由于算法模型本身设计的局限性,每种方法都存在其适应范围和优缺点,目前还不能应用到工程系统中,不过随着智能控制、数字信号处理、电力电子等技术的高速发展,复杂控制算法和高精度的转子位置估计算法得以实现途径可能变为现实。

[0004] 其中,根据电流波形、磁链特性估计具有换相功能的特征位置,以获取电机转子位置信号的方法得到国内外很多学者的研究,分别提出了简化磁链法和电流梯度法。前者是选定电感最大位置作为换相时刻的特征位置,通过实时计算磁链与特征位置磁链比较得实现换相,但需要测量电机的电磁特性曲线,离线测量过程复杂,测量的精度不高,影响位置估计的精度。后者在定转子极对极开始重合之前,电流梯度大于零,而在定转子极对极开始重合之后,由于反电动势的存在,使电流梯度小于零,所以根据电流梯度过零,估计定转子极对极开始重合的特征位置,该方法虽然不需要电机精确的数学模型,但相电流检测过程中需要增加滤波调理电路。

发明内容

[0005] 本发明要解决的技术问题是现有的无位置传感器的开关磁阻电机在低速运转阶段的转子位置估计方法中简化磁链法需要离线测量电磁特性,离线测量过程复杂,测量精

度不高;电流梯度法则需要额外增加相电流检测的滤波调理电路。

[0006] 为了解决上述技术问题,本发明提供了一种用于开关磁阻电机系统的转子位置估计方法,开关磁阻电机系统包括采集开关磁阻电机电流信号的信号采样调理电路、驱动开关磁阻电机转动的功率变换器以及对电流信号进行处理并控制功率变换器的微处理器,转子位置估计方法包括如下步骤:

[0007] 步骤1,初始化,设定电流滞环的限定电流值 i^* 以及环宽为 $2\Delta i$;

[0008] 步骤2,滞环斩波PWM控制,读取信号采样调理电路采集的实时电流信号,将实时电流信号减去限定电流值 i^* 得电流变化量,若电流变化量 $> \Delta i$,则关闭滞环斩波PWM,向功率变换器发送关断开关管信号,若电流变化量 $< -\Delta i$,则开通滞环斩波PWM,向功率变换器发送导通开关管信号;

[0009] 步骤3,获取转子与定子的极对极时刻,记录并分析滞环斩波PWM每次的开通时间,若开通时间在某时刻由连续增大变为连续减小,则该时刻即为开关磁阻电机的转子与定子的极对极时刻;

[0010] 步骤4,开关磁阻电机转速计算,记录相邻两次转子与定子的极对极时刻,并计算两次转子与定子的极对极时刻的时间差 Δt ,再根据开关磁阻电机的转子相邻两极的角度差 $\Delta \theta$ 计算开关磁阻电机转子的角速度 $\omega = \frac{\Delta \theta}{\Delta t}$ (deg/s);

[0011] 步骤5,开关磁阻电机转子位置估计,根据开关磁阻电机的角速度 ω 以及估计时间间隔 ΔT 计算出开关磁阻电机转子在转动估计时间间隔后相对于转子与定子的极对极位置转过角度为 $\theta = \omega \Delta T$ 。

[0012] 在开关磁阻电机低速运转时,首先利用滞环斩波PWM每次的开通时间的变化规律判断开关磁阻电机的转子与定子的极对极时刻,再利用时间差 Δt 角度差 $\Delta \theta$ 计算开关磁阻电机转子的角速度 ω ,从而进一步求出估计时间间隔 ΔT 后的转子的转过的角度,实现对转子位置的估计,整个过程无需进行复杂的离线测量,测量精度高,也无需在现有的开关磁阻电机系统中添加任何其他硬件,节省了成本。

[0013] 本发明还提供了一种用于开关磁阻电机系统的转子位置估计装置,开关磁阻电机系统包括采集开关磁阻电机电流信号的信号采样调理电路、驱动开关磁阻电机转动的功率变换器以及对电流信号进行处理并控制功率变换器的微处理器,微处理器包括如下模块:

[0014] 初始化模块,用于设定电流滞环的限定电流值 i^* 以及环宽为 $2\Delta i$;

[0015] 滞环斩波PWM控制模块,用于读取信号采样调理电路采集的实时电流信号,将实时电流信号减去限定电流值 i^* 得电流变化量,若电流变化量 $> \Delta i$,则关闭滞环斩波PWM,向功率变换器发送关断开关管信号,若电流变化量 $< -\Delta i$,则开通滞环斩波PWM,向功率变换器发送导通开关管信号;

[0016] 获取极对极时刻模块,用于记录并分析滞环斩波PWM每次的开通时间,若开通时间在某时刻由连续增大变为连续减小,则该时刻即为开关磁阻电机的转子与定子的极对极时刻;

[0017] 开关磁阻电机转速计算模块,用于记录相邻两次转子与定子的极对极时刻,并计算两次转子与定子的极对极时刻的时间差 Δt ,再根据开关磁阻电机的转子相邻两极的角

度差 $\Delta \theta$ 计算开关磁阻电机转子的角速度 $\omega = \frac{\Delta \theta}{\Delta t}$ (deg/s);

[0018] 开关磁阻电机转子位置估计模块,用于根据开关磁阻电机的角速度 ω 以及估计时间间隔 ΔT 计算出开关磁阻电机转子在转动估计时间间隔后相对于转子与定子的极对极位置转过角度为 $\theta = \omega \Delta T$ 。

[0019] 本发明的有益效果在于:在开关磁阻电机低速运转阶段,首先利用滞环斩波PWM每次的开通时间的变化规律判断开关磁阻电机的转子与定子的极对极时刻,再利用时间差 Δt 角度差 $\Delta \theta$ 计算开关磁阻电机转子的角速度 ω ,从而进一步求出估计时间间隔 ΔT 后的转子的转过的角度,实现对转子位置的估计,整个过程无需进行复杂的离线测量,测量精度高,也无需在现有的开关磁阻电机系统中添加任何其他硬件,节省了成本。

附图说明

- [0020] 图1为本发明的方法流程图;
 [0021] 图2为本发明的装置结构示意图;
 [0022] 图3为本发明的滞环斩波PWM控制原理图;
 [0023] 图4为本发明的电感与滞环斩波PWM开通时间关系图;
 [0024] 图5为本发明的电感与滞环PWM开通时间大小关系图;
 [0025] 图6为本发明的电感与转子位置关系示意图;
 [0026] 图7为本发明的相邻滞环控制PWM开通时间差波形图;
 [0027] 图8为本发明的位置检索脉冲及位置估计图。

具体实施方式

[0028] 如图1所示,本发明的用于开关磁阻电机系统的转子位置估计方法中,开关磁阻电机系统包括采集开关磁阻电机电流信号的信号采样调理电路、驱动开关磁阻电机转动的功率变换器以及对电流信号进行处理并控制功率变换器的微处理器,开关磁阻电机在低速运转阶段时的转子位置估计方法包括如下步骤:

[0029] 步骤1,初始化,设定电流滞环的限定电流值 i^* 以及环宽为 $2 \Delta i$;

[0030] 步骤2,滞环斩波PWM控制,读取信号采样调理电路采集的实时电流信号,将实时电流信号减去限定电流值 i^* 得电流变化量,如图3所示,若电流变化量 $> \Delta i$,则关闭滞环斩波PWM,向功率变换器发送关断开关管信号,电流大小下降,若电流变化量 $< -\Delta i$,则开通滞环斩波PWM,向功率变换器发送导通开关管信号,电流大小上升;

[0031] 步骤3,获取转子与定子的极对极时刻,极对极时刻即为转子与定子的极对极时刻,记录并分析滞环斩波PWM每次的开通时间,如图4所示,设滞环斩波PWM开通时间分别为 $\Delta t_1, \Delta t_2, \dots, \Delta t_k$,各开通时间里对应的采样点时刻分别设为 t_1, t_2, \dots, t_k ,则各开通时间里相电压为:

$$[0032] \quad U_k = Ri_k(t_k) + L_k(t_k) \frac{di_k(t_k)}{dt} + i_k(t_k) \frac{dL_k(t_k)}{dt} \quad (1)$$

[0033] 其中,k为采样点的序号, t_k 为第k采样点时刻,R为相电阻, $i_k(t_k)$ 为第k个滞环斩波PWM开通时间里相电流平均值, $L_k(t_k)$ 为第k个采样时刻对应的电感值,由(1)式可得连续的

两个PWM开通时间 Δt_k 和 Δt_{k+1} 里的相电压为:

$$[0034] \quad U_k = Ri_k(t_k) + L_k(t_k) \frac{di_k(t_k)}{dt} + i_k(t_k) \frac{dL_k(t_k)}{dt} \quad (2)$$

$$[0035] \quad U_{k+1} = Ri_{k+1}(t_{k+1}) + L_{k+1}(t_{k+1}) \frac{di_{k+1}(t_{k+1})}{dt} + i_{k+1}(t_{k+1}) \frac{dL_{k+1}(t_{k+1})}{dt} \quad (3)$$

[0036] 其中, $i_k(t_k)$ 和 $i_{k+1}(t_{k+1})$ 分别为 Δt_k 和 Δt_{k+1} 时间里相电流平均值,由于滞环宽度 $2\Delta i$ 很小,所以可以近似认为 $i_k(t_k) = i_{k+1}(t_{k+1})$,即:

$$[0037] \quad Ri_k(t_k) = Ri_{k+1}(t_{k+1}) \quad (4)$$

[0038] 由于 U_k 和 U_{k+1} 都是母线电压 U_d ,于是有:

$$[0039] \quad U_k = U_{k+1} = U_d \quad (5)$$

[0040] 由于电感值呈线性上升,所以 dL/dt 为恒定值,即 $\frac{dL_{k+1}(t_{k+1})}{dt} = \frac{dL_k(t_k)}{dt}$,所以有:

$$[0041] \quad i_{k+1}(t_{k+1}) \frac{dL_{k+1}(t_{k+1})}{dt} = i_k(t_k) \frac{dL_k(t_k)}{dt} \quad (6)$$

[0042] 再由式(2)到式(6)进行简化并整理得到:

$$[0043] \quad L_{k+1}(t_{k+1}) \frac{di_{k+1}(t_{k+1})}{dt} = L_k(t_k) \frac{di_k(t_k)}{dt} \quad (7)$$

[0044] 如图5所示,在滞环斩波PWM开通时间里,相电流的变化量为 $2\Delta i$,所以第 k 个滞环斩波PWM开通时间里相电流的变化可近似表示为:

$$[0045] \quad \frac{di_k(t_k)}{dt} = \frac{2\Delta i}{\Delta t_k} \quad (8)$$

[0046] 将式(8)代入式(7)得到:

$$[0047] \quad L_{k+1}(t_{k+1}) \frac{2\Delta i}{\Delta t_{k+1}} = L_k(t_k) \frac{2\Delta i}{\Delta t_k} \quad (9)$$

[0048] 由式(9)可以推导出相电流变化率与PWM开通时间之间关系为:当电感值在上升阶段 $dL/dt > 0$,因为 $L_{k+1}(t_{k+1}) > L_k(t_k)$,所以可得:

$$[0049] \quad \Delta t_{k+1} > \Delta t_k \quad (10)$$

[0050] 当在电感值在下降阶段 $dL/dt < 0$,因为 $L_{k+1}(t_{k+1}) < L_k(t_k)$,所以可得:

$$[0051] \quad \Delta t_{k+1} < \Delta t_k \quad (11)$$

[0052] 当电感值在最大位置 $dL/dt = 0$,因为 $L_{k+1}(t_{k+1}) = L_k(t_k)$,所以可得:

$$[0053] \quad \Delta t_{k+1} = \Delta t_k \quad (12)$$

[0054] 再由式(10)、(11)和(12)可以得出:当电感值在上升阶段,滞环斩波PWM开通时间 $\Delta t_2, \Delta t_3, \dots, \Delta t_{k-1}$ 逐渐增大,即 $\Delta t_2 < \Delta t_3 < \dots < \Delta t_{k-1}$,当电感值在下降阶段,滞环斩波PWM开通时间 $\Delta t_k, \Delta t_{k+1}, \Delta t_{k+2}, \dots$ 逐渐减小,即 $\Delta t_k > \Delta t_{k+1} > \Delta t_{k+2} > \dots$,当电机定转子极对极对齐的特征位置时,有 $\Delta t_{k-1} < \Delta t_k$,如图6所示,滞环斩波PWM开通时间在 t_k 时刻由连续增大变为连续减小,则表明此时刻电感值为最大位置,而该时刻即为开关磁阻电机的转子与定子的极对极时刻;

[0055] 如图7所示,在电感上升阶段,从 Δt_2 到 Δt_{k-1} 时间段里有 $\Delta t_3 - \Delta t_2 > 0 \dots \Delta t_{k-1} - \Delta t_{k-2} > 0$,微处理器在PWM下降沿时刻用后面的PWM开通时间减去前面的PWM开通时间,因为相

减的值大于零,所以在PWM下降沿时刻产生一个上升沿信号,在极对极对齐的特征位置,因为 $\Delta t_n - \Delta t_{n-1} < 0$,在PWM下降沿时刻产生一个下降沿信号;

[0056] 如图8所示,在得到极对极对齐特征位置的位置检索脉冲信号后,微处理器只要检测 S_2 即可判断出极对极对齐的特征位置,但是由于在电机开通时刻,电感值从零开始增加,电感值变化率较大,电流从0开始上升到 $i^* + \Delta i$,而在第二个滞环斩波PWM开通时间里电流是从 $i^* - \Delta i$ 上升到 $i^* + \Delta i$,滞环PWM的第一个开通时间 Δt_1 大于滞环PWM的第二个开通时间 Δt_2 ,又因为 $\Delta t_2 - \Delta t_1 > 0$,所以微处理器在滞环PWM的第二个下降沿时刻产生一个下降沿信号,由于滞环PWM的第一个下降沿信号是随着开通角变化而变化,所以该下降沿对应的 S_1 位置检索脉冲不能作为转子位置估计的检索脉冲信号,是属于误脉冲信号,需要除去,但是由于在转子与定子的极对极位置附近电感变化缓慢,相邻的滞环斩波PWM开通时间变化也很缓慢,即 $|\Delta t_k - \Delta t_{k-1}|$ 较小,所以可得到:

$$[0057] \quad |\Delta t_1 - \Delta t_2| > |\Delta t_{k-1} - \Delta t_k| \quad (13)$$

[0058] 依据式(13),可设置一个合适的时间阈值 M , 满足 $|\Delta t_{k-1} - \Delta t_k| < M < |\Delta t_1 - \Delta t_2|$, 通过逻辑比较即可除去位置检索脉冲 P_1 中的 S_1 信号,得到位置检索脉冲 P_2 ;

[0059] 步骤4,开关磁阻电机转速计算,记录相邻两次转子与定子的极对极时刻,并计算两次转子与定子的极对极时刻的时间差 Δt ,再根据开关磁阻电机的转子相邻两极的角度差 $\Delta \theta$ 计算开关磁阻电机转子的角速度 $\omega = \frac{\Delta \theta}{\Delta t}$ (deg/s);

[0060] 步骤5,开关磁阻电机转子位置估计,根据开关磁阻电机的角速度 ω 以及估计时间间隔 ΔT 计算出开关磁阻电机转子在转动估计时间间隔后相对于转子与定子的极对极位置转过角度为 $\theta = \omega \Delta T$,极对极位置即为转子与定子的极对极位置,也可以利用上次采样时间估算的位置角 $\theta(k)$ 求出本次采样时间估算的位置角 $\theta(k+1) = \theta(k) + \omega \Delta T$ 。

[0061] 在开关磁阻电机低速运转阶段,首先利用滞环斩波PWM每次的开通时间的变化规律判断开关磁阻电机的转子与定子的极对极时刻,再利用时间差 Δt 角度差 $\Delta \theta$ 计算开关磁阻电机转子的角速度 ω ,从而进一步求出估计时间间隔 ΔT 后的转子的转过的角度,实现对转子位置的估计,整个过程无需进行复杂的离线测量,测量精度高,也无需在现有的开关磁阻电机系统中添加任何其他硬件,节省了成本。在获得开关磁阻电机转子准确的位置估计以后便可以实时对开关磁阻电机的转动进行实时控制,为开关磁阻电机在低速运转阶段的精确控制提供了可靠依据。

[0062] 如图2所示,本发明的用于开关磁阻电机系统的转子位置估计装置中,开关磁阻电机系统包括采集开关磁阻电机电流信号的信号采样调理电路、驱动开关磁阻电机转动的功率变换器以及对电流信号进行处理并控制功率变换器的微处理器,微处理器包括如下模块:

[0063] 初始化模块,用于设定电流滞环的限定电流值 i^* 以及环宽为 $2\Delta i$;

[0064] 滞环斩波PWM控制模块,用于读取信号采样调理电路采集的实时电流信号,将实时电流信号减去限定电流值 i^* 得电流变化量,若电流变化量 $> \Delta i$,则关闭滞环斩波PWM,向功率变换器发送关断开关管信号,若电流变化量 $< -\Delta i$,则开通滞环斩波PWM,向功率变换器发送导通开关管信号;

[0065] 获取极对极时刻模块,用于记录并分析滞环斩波PWM每次的开通时间,若开通时间

在某时刻由连续增大变为连续减小,则该时刻即为开关磁阻电机的转子与定子的极对极时刻;

[0066] 开关磁阻电机转速计算模块,用于记录相邻两次转子与定子的极对极时刻,并计算两次转子与定子的极对极时刻的时间差 Δt ,再根据开关磁阻电机的转子相邻两极的角度差 $\Delta \theta$ 计算开关磁阻电机转子的角速度 $\omega = \frac{\Delta \theta}{\Delta t} (\text{deg/s})$;

[0067] 开关磁阻电机转子位置估计模块,用于根据开关磁阻电机的角速度 ω 以及估计时间间隔 ΔT 计算出开关磁阻电机转子在转动估计时间间隔后相对于转子与定子的极对极位置转过角度为 $\theta = \omega \Delta T$ 。

[0068] 本发明的装置在工作时,首先由初始化模块设定电流滞环的限定电流值为 i^* 以及环宽为 $2 \Delta i$,并将限定电流值为 i^* 以及环宽 $2 \Delta i$ 发送给滞环斩波PWM控制模块;然后再由滞环斩波PWM控制模块读取信号采样调理电路采集的实时电流信号,将实时电流信号减去限定电流 i^* 得电流变化量,若电流变化量 $> \Delta i$,则关闭滞环斩波PWM,向功率变换器发送关断开关管信号,若电流变化量 $< -\Delta i$,则开通滞环斩波PWM,向功率变换器发送导通开关管信号;然后再由获取极对极时刻模块记录并分析滞环斩波PWM每次的开通时间,若开通时间在某时刻由连续增大变为连续减小,则该时刻即为开关磁阻电机的转子与定子的极对极时刻;再由开关磁阻电机转速计算模块记录相邻两次转子与定子的极对极时刻,并计算两次转子与定子的极对极时刻的时间差 Δt ,再根据开关磁阻电机的转子相邻两极的角度差 $\Delta \theta$ 计算开关磁阻电机转子的角速度 $\omega = \frac{\Delta \theta}{\Delta t} (\text{deg/s})$;

最后由开关磁阻电机转子位置估计模块根据开关磁阻电机的角速度 ω 以及估计时间间隔 ΔT 计算出开关磁阻电机转子在转动估计时间间隔后相对于转子与定子的极对极位置转过角度为 $\theta = \omega \Delta T$,该位置便是对开关磁阻电机转子位置的估计结果。在获得开关磁阻电机转子准确的位置估计以后便可以实时对开关磁阻电机的转动进行实时控制,为开关磁阻电机在低速运转阶段的精确控制提供了可靠依据。

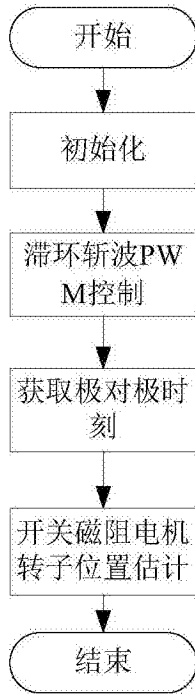


图1

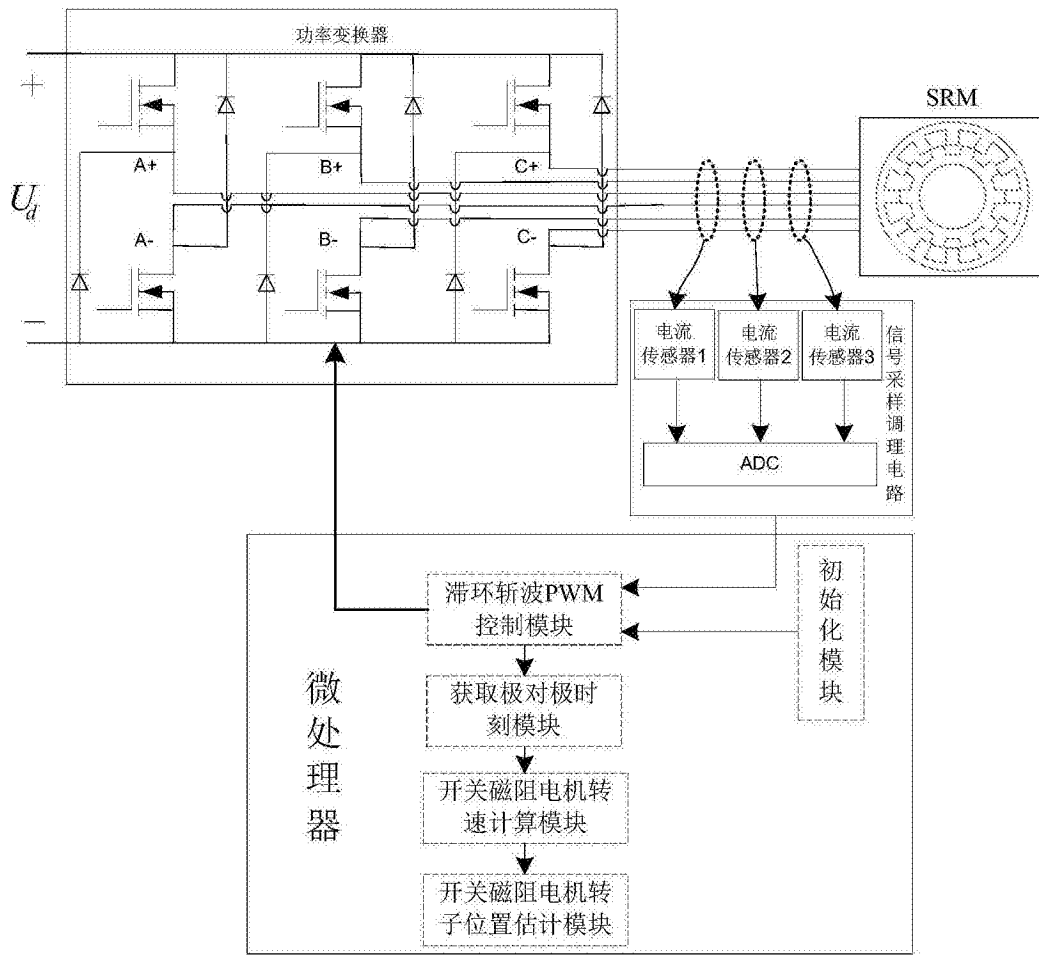


图2

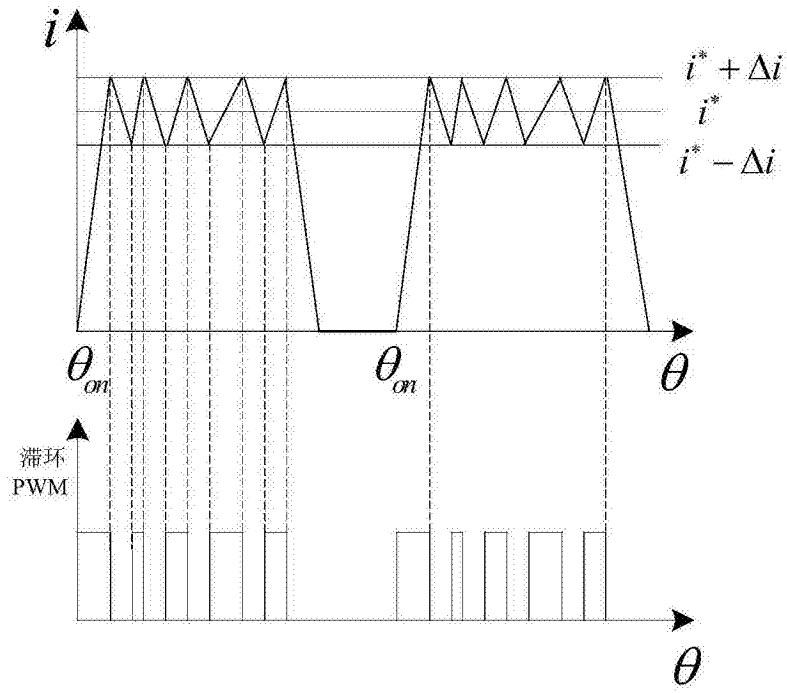


图3

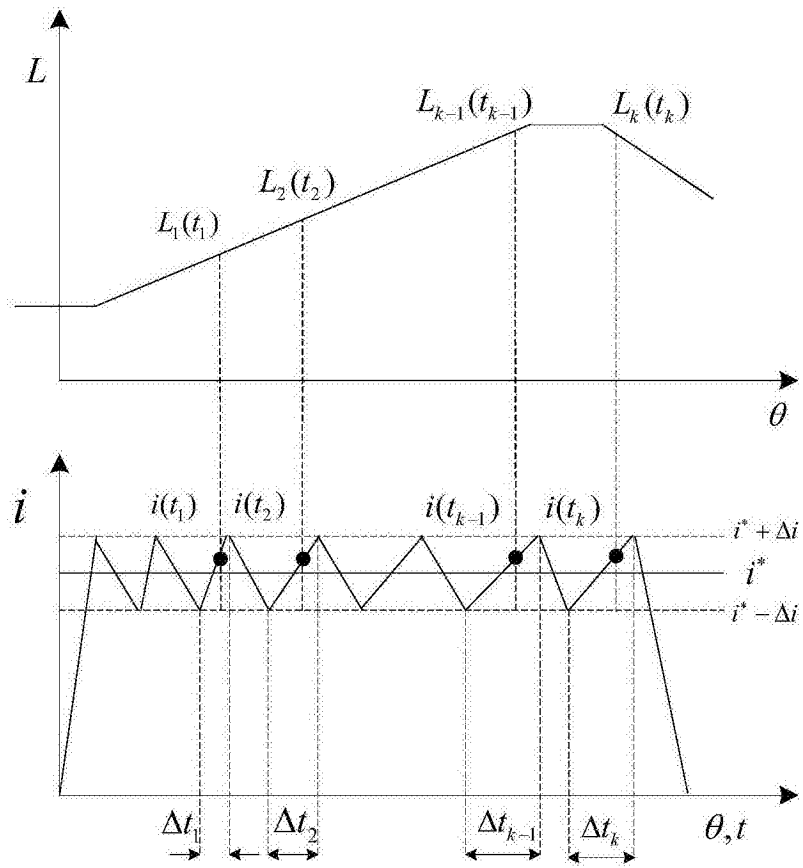


图4

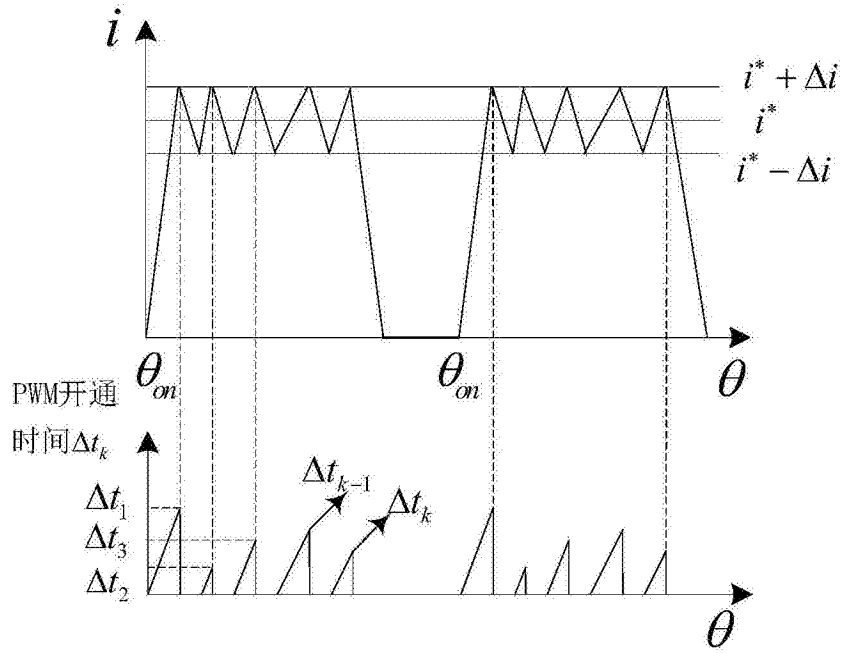


图5

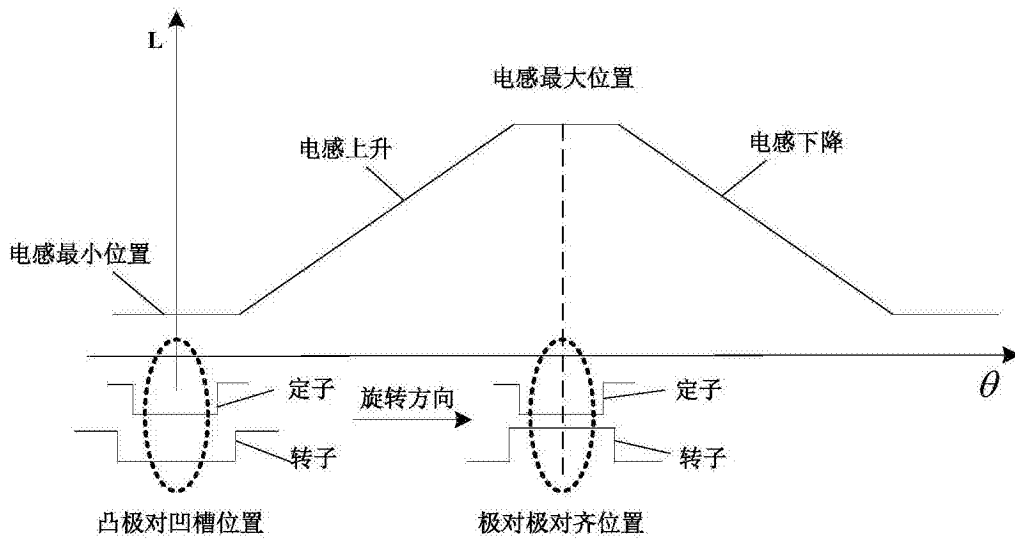


图6

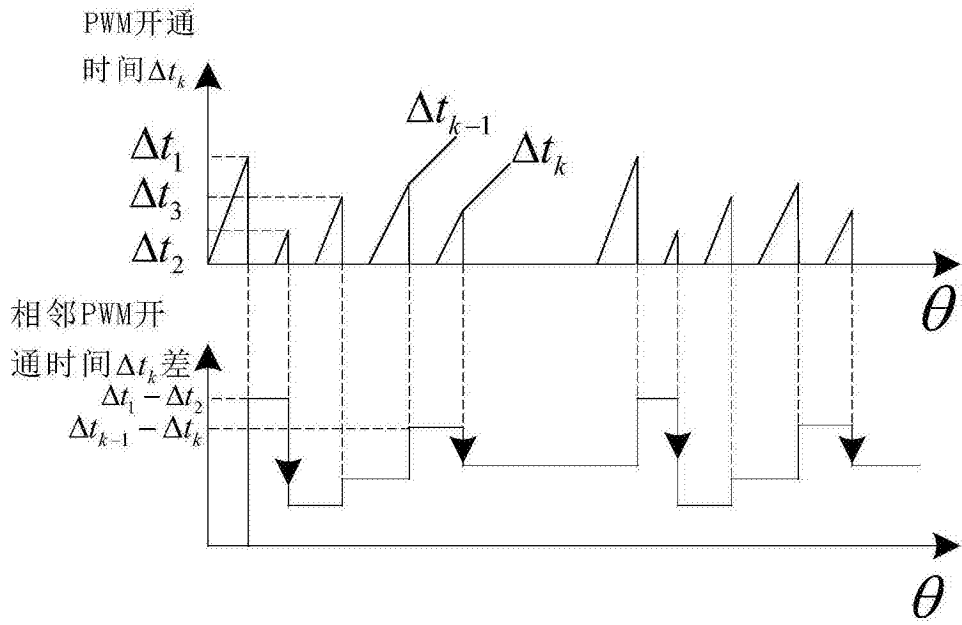


图7

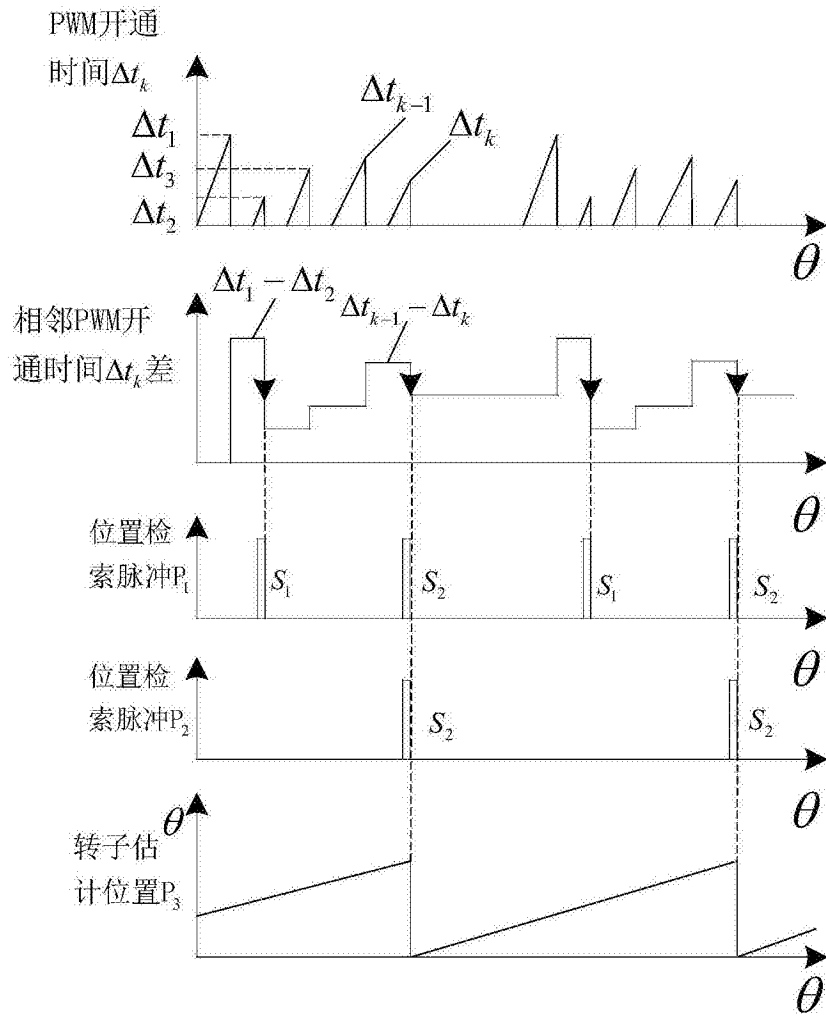


图8