

(12) 按照专利合作条约所公布的国际申请

(19) 世界知识产权组织
国际局

(43) 国际公布日
2018 年 12 月 20 日 (20.12.2018)



(10) 国际公布号
WO 2018/227769 A1

- (51) 国际专利分类号:
H02P 21/34 (2016.01) H02P 21/24 (2016.01)
- (21) 国际申请号: PCT/CN2017/099662
- (22) 国际申请日: 2017 年 8 月 30 日 (30.08.2017)
- (25) 申请语言: 中文
- (26) 公布语言: 中文
- (30) 优先权:
20171044429.3 2017 年 6 月 13 日 (13.06.2017) CN
- (71) 申请人: 中山大洋电机股份有限公司
(ZHONGSHAN BROAD-OCEAN MOTOR CO., LTD)
[CN/CN]; 中国广东省中山市西区沙朗第三
工业区, Guangdong 528400 (CN)。
- (72) 发明人: 王继忠 (WANG, Jizhong); 中国广东省
中山市西区沙朗第三工业区, Guangdong
528400 (CN)。
- (74) 代理人: 中山市汉通知识产权代理事
务所 (普通合伙) (ZHONGSHAN HANTONG

INTELLECTUAL PROPERTY AGENCY(GENERAL
PARTNERSHIP)); 中国广东省中山市石岐
区岐头新村龙凤街 8 号 A 幢 4 层 305-308
号, Guangdong 528400 (CN)。

- (81) 指定国(除另有指明, 要求每一种可提供的国家
保护): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG,
BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU,
CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB,
GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS,
JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK,
LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX,
MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL,
PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL,
SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG,
US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW。
- (84) 指定国(除另有指明, 要求每一种可提供的地区
保护): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ,
NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), 欧亚 (AM,
AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), 欧洲 (AL, AT, BE, BG,
CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU,

(54) Title: METHOD FOR STARTING POSITION SENSORLESS BLDC MOTOR

(54) 发明名称: 一种无位置传感器的BLDC电机的启动方法

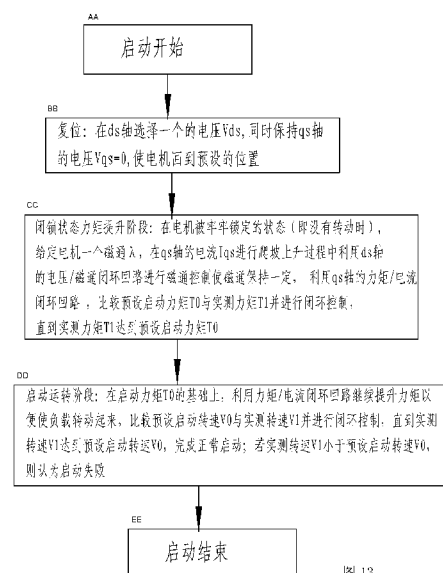


图 13

(57) Abstract: A method for starting a position sensorless BLDC motor, comprising step A: reset: selecting a voltage V_{ds} on a ds shaft, keeping the voltage V_{qs} of a qs shaft equal to 0, and allowing the motor to return to a preset position; step B: giving the motor a magnetic flux λ when the motor is firmly locked, using a voltage/magnetic flux closed-loop circuit of the ds shaft to control and keep the magnetic flux fixed during a climbing and rising process of the current I_{qs} of the qs shaft, and using a torque/current closed-loop circuit of the qs shaft to compare a preset starting torque T_0 with an actual measurement torque T_1 and carry out closed-loop control until the actual measurement torque T_1 reaches the preset starting torque T_0 ; step C: on the basis of the starting torque T_0 , using the torque/current closed-loop circuit to continue increasing the torque so as to rotate a load, compare a preset starting rotating speed V_0 with an actual measurement rotating speed V_1 , and carry out closed-loop control. In the method, closed-loop control is carried out during the whole process, smooth, even and stable starting is implemented, a small starting current and a small impact on a current power assembly are achieved, and little noise is produced.

AA Begin starting
BB Reset: select a voltage V_{ds} on a ds shaft, keep the voltage V_{qs} of a qs shaft equal to 0, and allow a motor to return to a preset position
CC Phase during which a torque in a locked state is increased: give the motor a magnetic flux λ when the motor is firmly locked (i.e., not rotating), use a voltage/magnetic flux closed-loop circuit of the ds shaft to control and keep the magnetic flux fixed during a climbing and rising process of the current I_{qs} of the qs shaft, and use a torque/current closed-loop circuit of the qs shaft to compare a preset starting torque T_0 with an actual measurement torque T_1 and carry out closed-loop control until the actual measurement torque T_1 reaches the preset starting torque T_0
DD Starting running phase: on the basis of the starting torque T_0 , use the torque/current closed-loop circuit to continue increasing the torque so as to rotate a load, compare a preset starting rotating speed V_0 with an actual measurement rotating speed V_1 , and carry out closed-loop control until the actual measurement rotating speed V_1 reaches the preset starting rotating speed V_0 , to complete a normal starting; if the actual measurement rotating speed V_1 is less than the preset starting rotating speed V_0 , consider that the starting fails
EE End starting



IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT,
RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI,
CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG)。

本国际公布:

— 包括国际检索报告(条约第21条(3))。

(57) 摘要: 一种无位置传感器的BLDC电机的启动方法, 包括步骤A: 复位: 在ds轴选择一个电压 V_{ds} , 同时保持qs轴的电压 $V_{qs}=0$, 使电机回到预设的位置; 步骤B: 在电机被牢牢锁定的状态, 给定电机一个磁通 λ , 在qs轴的电流 I_{qs} 进行爬坡上升过程中利用ds轴的电压/磁通闭环回路进行磁通控制使磁通保持一定, 利用qs轴的力矩/电流闭环回路, 比较预设启动力矩 T_0 与实测力矩 T_1 并进行闭环控制, 直到实测力矩 T_1 达到预设启动力矩 T_0 ; 步骤C: 在启动力矩 T_0 的基础上, 利用力矩/电流闭环回路继续提升力矩以便使负载转动起来, 比较预设启动转速 V_0 与实测转速 V_1 并进行闭环控制。该方法全程闭环控制, 启动顺滑均匀平稳, 启动电流小, 对电流功率组件冲击小, 产生噪音的噪音小。

一种无位置传感器的 BLDC 电机的启动方法

技术领域：

本发明涉及一种无位置传感器的 BLDC 电机的启动方法。

背景技术：

无位置传感器的 BLDC 电机多数采用矢量控制方法进行控制，由于转子角/位置 θ 是矢量控制中电压和电流转换的关键，在先前无位置传感器无刷电动机实际运行前中确少关键要素，启动无位置传感器器无刷电动机时，通常的方法是先给能量给电机，将用直流电流 I_d 送到 d 轴（转子旋转坐标系的直轴），同时保持 q 轴（转子旋转坐标系的交轴）电流 I_q 为零。电动机将锁到它原来的位置，定义为零时的位置。然后，它雇佣了一个开环控制的模式控制电机运行，在到达预定义速度时实现正常启动，然后进入正常工作状态并切换到常规的闭环控制模式。因为传统的无位置传感器的 BLDC 电机采用反电动势（BEMF 信号）去估算转子位置，当转子启动阶段的低速状态无法测量计算反电动势，故一开始只能开环控制。如美国专利号：US7667423 (B2) 所述描述的电机启动方法。

由于在初始阶段没有反馈信号，针对不同的负载条件下，无位置传感器电动机启动策略适应性很差，尤其是在初始加载是未知的情况下，比如：在一个洗衣机，每天的衣服和水量都不同，也就是负载是不定的，有时候比较大，有时候比较轻，负载可以大幅变化。为了弥补这个弱点，常见的做法是增加初始启动阶段尽量增大启动电流以尽量增加启动转矩，适应不同的启动负载。这种方法的缺点是，你必须为最坏的情况设计，以大电流启动增大力矩，但这样可能导致冲击电流功率组件和产生噪音，电子元器件的寿命会缩短，电机容易发生故障。因为当轻的负载时，用大的启动电流给电机造成较大的冲击。

发明内容：

本发明的目的是提供一种无位置传感器的 BLDC 电机的启动方法，解决现有

技术中电机启动阶段冲击电流大，造成冲击电流功率组件和产生噪音，影响电机工作寿命的技术问题。

本发明的目的是通过下述技术方案予以实现的：

一种无位置传感器的 BLDC 电机的启动方法，其特征在于：它包括如下步骤：

步骤 A：复位：在 ds 轴选择一个电压 V_{ds} ，同时保持 qs 轴的电压 $V_{qs}=0$ ，使电机回到预设的位置，ds 轴和 qs 轴是定子磁通旋转坐标系里面的两个轴；

步骤 B：闭锁状态力矩提升阶段：在电机被牢牢锁定的状态（即没有转动时），给定电机一个磁通 λ ，在 qs 轴的电流 I_{qs} 进行爬坡上升过程中利用 ds 轴的电压/磁通闭环回路进行磁通控制使磁通保持一定，利用 qs 轴的力矩/电流闭环回路，比较预设启动力矩 T_0 与实测力矩 T_1 并进行闭环控制，直到实测力矩 T_1 达到预设启动力矩 T_0 ；

步骤 C：启动运转阶段：在启动力矩 T_0 的基础上，利用力矩/电流闭环回路继续提升力矩以便使负载转动起来，比较预设启动转速 V_0 与实测转速 V_1 并进行闭环控制，直到实测转速 V_1 达到预设启动转速 V_0 ，完成正常启动；若实测转速 V_1 小于预设启动转速 V_0 ，则认为启动失败。

上述所述的步骤 B：闭锁状态力矩提升阶段：给定电机一个磁通 λ 值是在 60% 的饱和磁通 至 100% 的饱和磁通的范围。

上述所述的步骤 B：闭锁力矩提升阶段：给定电机一个磁通 λ 是一个电机饱和磁通值。

上述所述的启动力矩 T_0 是一个临界力矩值，即当实测力矩 T_1 大于启动力矩 T_0 时，电机才能转动。

上述所述的电机驱动的是一个固定负载，启动力矩 T_0 是一个预设值，是通过实验手段测量得到，即要启动负载需要多大的力矩值。

上述所述的电机驱动的是一个可变负载，启动力矩 T_0 是一个预设值，是通过实验手段测量的，即要启动最小负载时需要的力矩值。

上述所述的步骤 C：启动运转阶段，利用所有的闭环 PID 控制来控制电机，每间隔一段时间提升力矩 ΔT ，直到转速度达到要求。

本发明与现有技术相比，具有如下效果：

1) 在闭锁状态力矩提升阶段：在电机被牢牢锁定的状态（即没有转动时），给定电机一个磁通 λ ，在 q_s 轴的电流 I_{qs} 进行爬坡上升过程中利用 d_s 轴的电压/磁通闭环回路进行磁通控制使磁通保持一定，利用 q_s 轴的力矩/电流闭环回路，比较预设启动力矩 T_0 与实测力矩 T_1 并进行闭环控制，直到实测力矩 T_1 达到预设启动力矩 T_0 ；在启动力矩 T_0 的基础上，利用力矩/电流闭环回路继续提升力矩以便使负载转动起来，比较预设启动转速 V_0 与实测转速 V_1 并进行闭环控制，直到实测转速 V_1 达到预设启动转速 V_0 ，完成正常启动；若实测转速 V_1 小于预设启动转速 V_0 ，则认为启动失败。本发明的启动力矩 T_0 与启动负载相适应，采用全程闭环控制，启动顺滑均匀平稳，不会象现有的开环控制方式给与太大的启动力矩，从而避免电机启动阶段冲击电流大，造成冲击电流功率组件和产生噪音；因此，启动电流小，对电流功率组件冲击小，产生噪音的噪音小，有效保障电机的正常运作，延长产品寿命。

2) 当闭锁状态力矩提升阶段：给定电机一个磁通 λ 值是在 60%的饱和磁通至 100%的饱和磁通的范围。当磁通 λ 为一定值时，根据力矩计算公式计算力矩的就方便，给定电机一个磁通 λ 最好是一个电机饱和磁通值，提升力矩时力矩的增量是最大的，提升力矩的时间可以进一步缩短。

3) 电机驱动的是一个固定负载，启动力矩 T_0 是一个预设值，是通过实验手段测量得到，即要启动负载需要多大的力矩值，操作性强，容易实施；

4) 电机驱动的是一个可变负载，启动力矩 T_0 是一个预设值，是通过实验手段测量的，即要启动最小负载时需要的力矩值，靠步骤 C：启动运转阶段：在启动力矩 T_0 的基础上，利用力矩/电流闭环回路继续提升力矩以便使负载转动起来，来适应负载的变化。

附图说明：

图 1 是本发明无位置传感器的 BLDC 电机的示意图；。

图 2 是本发明无位置传感器的 BLDC 电机的电机控制器的电路方框图；

图 3 是本发明无位置传感器的 BLDC 电机采用凸极内转子的结构图；

图 4 是本发明的直接定子磁通矢量控制的坐标系图；

图 5 是本发明的直接力矩输入的直接定子磁通矢量控制的方框图；

图 6 是本发明的速度输入的直接定子磁通矢量控制的方框图；

图 7 是本发明的图 5 中直接磁通矢量控制方块的展开图；

图 8 是本发明的图 5 中定子磁通观测器的展开图；

图 9 是本发明的直接定子磁通矢量控制参考磁通的产生流程图；

图 10 是本发明的直接定子磁通矢量控制最大 q_s 轴电流的产生流程图；

图 11 是本发明的控制方法的矢量控制参考图；

图 12a 本发明微处理器里面的部分软件控制流程图；

图 12b 本发明微处理器里面的另一部软件控制流程图；

图 13 是本发明的无位置传感器的 BLDC 电机的启动流程图；

图 14 是本发明的启动线路与传统启动线路的对照示意图。

具体实施方式：

下面通过具体实施例并结合附图对本发明作进一步的描述。

本发明是借鉴专利号为 CN201210179372.0、专利名称为：一种变速风机系统的控制方法、公告号为：CN103452883A 的专利文献，其中部分内容与 CN201210179372.0 是相同的，本领域普通技术人员完全可能参考 CN201210179372.0 的技术方案的内容，理解本发明的技术方案。

实施例一：

如图 1、图 2、图 3 所示，无位置传感器的 BLDC 电机包括定子组件、转子组件 2 和电机控制器，定子组件包括定子铁芯 1 和线圈绕组，定子铁芯 1 设置齿 12 和槽 11，线圈绕组绕在齿 12 上，转子组件是凸极内转子，电机控制器采用无位置传感器的矢量控制方式，电机控制器包括微处理器、变频器和检测单元，检测单元将相电流，DC 总线电流及相电压输入到微处理器，微处理器输

出信号控制变频器，变频器与定子组件的绕组连接，所述的凸极转子的凸极性 L_q/L_d 的范围 1.3—1.7，凸极转子表面气隙磁密的范围在 0.6 特斯拉—0.8 特斯拉，处理器通过驱动电路输出信号控制变频器，变频器与定子组件的绕组连接。

所述的凸极内转子 2 包括转子铁芯 21 和永磁体 22，转子铁芯 21 包括设置有中心轴孔的环形圈 210 和从环形圈 210 外侧凸出的若干块导磁块 211，在相邻两导磁块 211 之间形成用于安装永磁体 22 的径向凹槽 212，在径向凹槽 212 的开口部的两侧导磁块 211 上凸出挡钩 213，导磁块 211 的外侧面 214 的截面形状是圆弧线，外侧面 214 是以偏移中心轴孔的中心 o 一定距离 H 的点 A 为圆心。如图 17 所示，外围虚线 6 代表定子内壁，内围虚线 7 代表转子铁芯 21 的外边缘，外围虚线 6 与内围虚线 7 之间径向形成间隙，我们称为气隙 L1，永磁体 22 也可以称为磁钢，磁钢厚度用 H 标示，气隙 L1 与磁钢厚度 H 的比值 0.03—0.065 可使所述的凸极转子的凸极性 L_q/L_d 的范围 1.3—1.7，转子铁芯 21 的极弧长度 L2 与磁钢长度 L3 的比值 0.8—1.0，依靠两片永磁铁相同极性的那一面通过铁芯形成聚磁效果，可使凸极转子表面气隙磁密的范围在 0.6—0.8 特斯拉，改进电机力矩密度，而且通过利用凸极结构提高磁通密度来降低电机成本，磁钢可以采用铁氧体取代原来的钕铁硼，进一步减低成本，转子的磁极数为 8 极或者 10 极 或者 12 极。

如图 4 所示，图 4 定义了永磁同步电机矢量的参考坐标，静止坐标系 $\alpha - \beta$ ，转子旋转坐标系 $d-q$ ，定子磁通旋转坐标系 $ds-q_s$ ， ω 转子速度， δ 是负载角（即定子磁通旋转坐标系与 转子旋转坐标系的夹角），角度 θ 是静止坐标系 $\alpha - \beta$ 与转子旋转坐标系 $d-q$ 的夹角，定子磁通矢量 λ ；角度 θ_s 是静止坐标系 $\alpha - \beta$ 与定子磁通旋转坐标系 $ds-q_s$ 的夹角。

在静止坐标 α, β 下内置永磁电机的电压与力矩的关系如下：e：

$$\bar{v}_{\alpha\beta} = R_s \cdot \bar{i}_{\alpha\beta} + \frac{d\bar{\lambda}_{\alpha\beta}}{dt} \quad (1)$$

$$T_e = \frac{3}{2} \cdot p \cdot (\lambda_\alpha \cdot i_\beta - \lambda_\beta \cdot i_\alpha) \quad (2)$$

R_s 是定子电阻， p 是磁极对数。

电机的控制模式将通过磁通耦合电流，因此，转化为电磁磁通控制，对于内置永磁电机的磁通通常在转子坐标 d, q 来表达数学式：

$$\bar{\lambda}_{dq} = [L] \cdot \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \lambda_m \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda_d(i_d, i_q) \\ \lambda_q(i_d, i_q) \end{bmatrix} \quad (3)$$

λ_m 是磁链

如果是磁通未饱和状态，上述公式可以简化为：

$$\bar{\lambda}_{dq} = \begin{bmatrix} L_d & 0 \\ 0 & L_q \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \lambda_m \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

L_d 是电机 d 轴电感， L_q 是电机 q 轴电感。

如果转子位置是 θ ，然后磁域在静止坐标 α, β 下，该公式表示为

$$\bar{\lambda}_{\alpha\beta} = A(-\theta) \cdot \bar{\lambda}_{dq} = A(-\theta) \cdot \left\{ \begin{bmatrix} L_d & 0 \\ 0 & L_q \end{bmatrix} \cdot A(\theta) \cdot \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \lambda_m \\ 0 \end{bmatrix} \right\} \quad (5)$$

$$A(\theta) = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix}。$$

在定子磁通坐标 ds, qs ，电压模型和力矩关系如下：

$$\bar{v}_{dqs} = R_s \cdot \bar{i}_{dqs} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \lambda \\ 0 \end{bmatrix} + \lambda \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ \omega + \frac{d\delta}{dt} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$T_e = (3/2) \cdot p \cdot \lambda \cdot i_{qs} = k_T \cdot i_{qs} \quad (7)$$

ω 转子速度， δ 是负载角

从公式 6 知道，我们得到定子磁通矢量 λ ， ds 轴电压被直接修正，而负

载角和力矩 能被 q_s 轴电压控制 公式 7 控制 q_s 轴电流 I_{qs} 直接控制力矩。
而 V_{qs} 与 I_{qs} 相关；

$V_{qs} = I_{qs} \cdot R_s + L_s \cdot dI_{qs}/dt$ R_s 是定子电阻, 故控制 q_s 轴的电压 V_{qs} 可以控制 q_s 轴电流 I_{qs} ;

从公式式 (6) 中立即发现, 定子磁通矢量值 λ 可直接通过 ds -轴电压 V_{ds} 来调节, 而负载角 (因而和转矩) 可通过 q_s -轴电压 V_{qs} 来控制。然而, 公式 (7) 显示, 调节 q_s -轴电流 I_{qs} 可直截了当地调节转矩。因此, (ds, qs) 坐标系的电压模型具有 q_s 轴电流 I_{qs} 作为状态变量来替代在 [7] 中用到的负载角。

如在 [6] 中证实的那样, 在 (ds, qs) 构架中的电压模型就变成:

$$\frac{d\lambda}{dt} = -R_s \cdot i_{ds} + v_{ds} \quad (8)$$

如图 5 所示, 它力矩控制模式磁通控制控制组合模块图, 包括直接磁通矢量控制 DFVC、定子磁通观测器和死区时间补偿模块。经由力矩增益导入力矩指令, 作为要求的力矩基准而重新调节。

如图 6 所示, 它速度控制模式磁通控制组合的模块图包括直接磁通矢量控制 DFVC、定子磁通观测器和死区时间补偿模块。速度指令用作比例积分 (PI) 控制器的基准, 然后, 速度环控制器生成力矩指令。

图 7 是整个直接磁通矢量控制 DFVC 方案的模块图, 方案在定子磁通基准构架中实施, 从磁通观测器传感的反馈信息和输出量输送给这个直接磁通矢量控制 DFVC 控制策略, 力矩指令是作为控制参照变量, 在方案内有两个控制环路, 定子磁通环路和 q -轴电流环路, 比例积分控制器用于这两个控制环路, 这个直接磁通矢量控制 DFVC 方案的优点是, 当调节磁通和电流时, 变频器电压、电流限制和负载角限制予以相关考虑。

图 7 中本方案中有两个环路 PID 控制。第一个 PID 控制是: 力矩电流环控

制 PI D (力矩控制器), 第二个 PID 控制是 电压磁通环控制 PID (磁通控制器)。力矩电流环控制 PI D 就是根据输入力矩要求 T 利用公式 (7) 来计算出 I_{qs} 的大小, 再与 q_s 轴实测电流进行比较, 然后通过 q_s 轴电流积分控制器来实现, 从而得到控制 q_s 轴的电压 V_{qs} ; 第二个 PID 控制是 电压磁通环控制 PID, 根据输入力矩要求 T 和 d_s 轴实测电流, 根据 MTPA 控制方式查表法获得最佳控制磁通 λ (即参考磁通), 利用参考磁通 λ 与实测磁通进行比较, 利用磁通积分控制器和公式 (8) 得到 d_s 轴的电压 V_{ds} ; 通过 q_s 轴的电压 V_{qs} 和 d_s 轴的电压 V_{ds} 利用坐标变换方式得到静止坐标电压 V_{α}, V_{β} , 利用静止坐标电压 V_{α}, V_{β} 再转成三相电压 V_a, V_b, V_c ;

图 8 是定子磁通观测器的模块图, 观测器是关键实体, 提供定子磁通值、定子磁通位置和负载角, 来自这个定子磁通观测器的输出量是对直接磁通矢量控制 DFVC 的输入量。自然, 定子磁通观测器是两个不同模型的混杂体, 基于变频器是否饱和以两种不同的情形适当地处理, 在低速时, 以电流模式运行, 即根据输入力矩只控制电流, 便完成控制, 也就是上面提到的力矩电流控制模块; 另一方面, 在高速时以电压模式工作, 只控制电压, 也就是上面提到的直接定子磁通矢量控制模块, 交叉角频率在低速与高速模式之间转换模式状态, 可用观测器增益 (rad/s 拉德/秒) 来定义。

图 9 是磁通基准生成的模块图, 图示说明低速 MTPA 控制和提升力矩的弱磁控制, 基准磁通生成模块基于变频器饱和状态或速度范围提供基准磁通, 如图 6 所示, 在基本转速之下时, 基准磁通由如下最佳控制方式给出, 命名为最大力矩每安培 MTPA 方式。这种 MTPA 的生成使用指令力矩作为输入, 对于大多数内置永磁电机来说, 这种 MTPA 方式是非线性曲线, 进行特性测试可以得到此曲线, 或有限元分析模拟这种曲线。然后, 查表法较为有效地实施。当转速上升时, 电机的反电动势增大, 变频器开始饱和, 这就使得电压限制条件有效, 同时 MTPA 条件不再有效。最高电压取决于 PWM 脉宽调制策略以及瞬时 DC 链路电压, 电压限制运行通过限制定子磁通基准值而得以实现, 此基准值来自弱磁限制模块。

按照这种方法，弱磁控制与 MTPA 控制之间转换自动执行，这基于实际的有效的最高 DC 总线电压和所需要的 q_s 轴电流，如图 10 所示，电压限制作用犹如对磁通和电流控制器输出。

电压限制根据如下公式：

$$\left(R_s i_{ds}\right)^2 + \left(R_s i_{qs} + \omega \lambda\right)^2 \leq V_{s,\max}^2 \quad (9)$$

$V_{s,\max}$ 依靠 PWM 策略和即时的最高 DC 总线电压 V_{dc} . 从公式 (9) 知道电压约束的操作是使定子磁通被约束

$$\lambda_{\lim} = \frac{\sqrt{V_{s,\max}^2 - (R_s \cdot i_{sd})^2} - R_s \cdot |i_{qs}|}{|\omega|} \cong \frac{V_{s,\max} - R_s \cdot |i_{qs}|}{|\omega|} \quad (10)$$

$$V_{s,\max} = V_{dc} / \sqrt{3}.$$

如图 10 所示，图 10 是最大 q_s 轴电流生成的模块图，图示说明在提升力矩控制的 MTPV——最大力矩每伏特—控制策略中，电流和负载角的限制。为了传送所要求的力矩， q_s 轴电流从图 10 中的力矩 / 电流生成模块计算出来，然而，这一 q_s 轴电流为最大变频器电流所限制。电流限制器对于 q_s 轴所要求电流的正负值是双向的。

q_s 轴电流被约束被最大的变频器电流， q_s 轴最大参考电流被定义：

$$i_{qs,\max} \leq \sqrt{I_{s,\max}^2 - i_{ds}^2} \quad (11)$$

i_{ds} 是 ds 轴定子电流 在高速时力矩提高控制中，最佳控制策略是使可供利用的相电压的有效性最大化，导致最小电流，为了实施这项策略，电机运行或是开启或是关闭最大负载角条件，称之为最大力矩每伏特 MTPV 运行，这一最大负载角通过利用负载角分析过程可以得到，包括模拟和加速实施评估测试。这一最大负载角的确立如同负载角限制那样，确保电机稳定性。如图 10 所示，负载角限制是利用 PI 比例积分控制器来执行的，降低最大许可电流。

如图 11 所示, 在低速范围, 电机控制操作在 MTPA 工作模式下, 标示为曲线段 (0, W1), 电流矢量 $ISW1$, 随着速度增加, 变频器饱和, 电机工作在 MTPV 模式的曲线, 即线段 (W1, W2), 电流矢量 $ISW2$, 达到最大力矩和转速, 控制非常高效和节约电能。电流矢量 IWN 是点 W1 到点 W2 的电流过度矢量, 从图中可以看过, 路径是非常短的, 是高效的, 节约过渡阶段的能量损耗。

如图 12a、图 12b 所示是一种无位置传感器的 BLDC 电机启动成功后的控制方法, 所述的 BLDC 电机包括定子组件、转子组件和电机控制器, 转子组件是在转子铁芯内嵌入磁钢的凸极内转子, 电机控制器采用无位置传感器的矢量控制方式, 电机控制器包括微处理器、变频器和检测单元, 检测单元将相电流、相电压及 DC 总线电压输入到微处理器, 微处理器输出信号控制变频器, 变频器与定子组件的绕组连接, 微处理器设置力矩电流控制模块、直接定子磁通矢量控制模块 (即磁通电压控制模块) 和定子磁通观测器, 该方法包括如下步骤:

步骤 1) 读取需求力矩;

步骤 2) 定子磁通观测器输出定子磁通、磁通角和负载角;

步骤 3 基于 MTPA 工作模式下计算参考磁通, 所述的 MTPA 工作模式是按每安培最大力矩输出的工作模式;

步骤 4) 基于 MTPV 工作模式下计算限制磁通, 所述的 MTPV 工作模式按每伏特最大力矩输出的工作模式;

步骤 5) 限制磁通是否大于参考磁通;

步骤 6) 若限制磁通大于参考磁通, 变频器未饱和, 根据力矩需求计算电压 V_{qs} , 在 MTPA 工作模式下计算电压 V_{ds} ; 若限制磁通不大于参考磁通, 根据力矩需求计算电压 V_{qs} , 在 MTPV 工作模式下计算电压 V_{ds} ;

步骤 7) 将电压 V_{ds} 、 V_{qs} 转换成静止坐标下的电压 V_{α} 、 V_{β} , 再将静止坐标下的电压 V_{α} 、 V_{β} 变换成三相电压 V_a 、 V_b 、 V_c , 利用三相电压 V_a 、 V_b 、 V_c 进行 PWM 调制。

以上是申请人对本发明的无位置传感器的 BLDC 电机启动后的控制方法及相

关理论作了详细的描述，以便本领域普通技术人员对本发明有一个大概的了解，有了这个基础，下面着重介绍无位置传感器的 BLDC 电机启动方法，如图 13 所示，它包括如下步骤：

步骤 A：复位：在 d_s 轴选择一个电压 V_{ds} ，同时保持 q_s 轴的电压 $V_{qs}=0$ ，使电机回到预设的位置， d_s 轴和 q_s 轴是定子磁通旋转坐标系里面的两个轴；

步骤 B：闭锁状态力矩提升阶段：在电机被牢牢锁定的状态（即没有转动时），给定电机一个磁通 λ ，在 q_s 轴的电流 I_{qs} 进行爬坡上升过程中利用 d_s 轴的电压/磁通闭环回路进行磁通控制使磁通保持一定，利用 q_s 轴的力矩/电流闭环回路，比较预设启动力矩 T_0 与实测力矩 T_1 并进行闭环控制，直到实测力矩 T_1 达到预设启动力矩 T_0 ；

步骤 C：启动运转阶段：在启动力矩 T_0 的基础上，利用力矩/电流闭环回路继续提升力矩以便使负载转动起来，比较预设启动转速 V_0 与实测转速 V_1 并进行闭环控制，直到实测转速 V_1 达到预设启动转速 V_0 ，完成正常启动；若实测转速 V_1 小于预设启动转速 V_0 ，则认为启动失败。

上述步骤 B：闭锁状态力矩提升阶段：给定电机一个磁通 λ 值是在 60%的饱和磁通 至 100%的饱和磁通的范围。上述步骤 B：闭锁力矩提升阶段：给定电机一个磁通 λ 是一个电机饱和磁通值。

上述启动力矩 T_0 是一个临界力矩值，即当实测力矩 T_1 大于启动力矩 T_0 时，电机才能转动。

上述电机驱动的是一个固定负载，启动力矩 T_0 是一个预设值，是通过实验手段测量得到，即要启动负载需要多大的力矩值。

上述电机驱动的是一个可变负载，启动力矩 T_0 是一个预设值，是通过实验手段测量的，即要启动最小负载时需要的力矩值。

上述所述的步骤 C：启动运转阶段，利用所有的闭环 PID 控制来控制电机，每隔一段时间提升力矩 ΔT ，直到转速度达到要求， ΔT 可以是 5% T_0 至 10% T_0 的范围。

本发明的无位置传感器的 BLDC 电机启动方法的原理是：基于图 7 的两个环路 PID 控制。第一个 PID 控制是：力矩电流环控制 PI D（力矩控制器），第二个 PID 控制是 电压磁通环控制 PID（磁通控制器）。并利用如下的公式：

$$\bar{v}_{dqs} = R_s \cdot \bar{i}_{dqs} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \lambda \\ 0 \end{bmatrix} + \lambda \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ \omega + \frac{d\delta}{dt} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$T_e = (3/2) \cdot p \cdot \lambda \cdot i_{qs} = k_T \cdot i_{qs} \quad (7)$$

$$\frac{d\lambda}{dt} = -R_s \cdot i_{ds} + v_{ds} \quad (8)$$

$$V_{qs} = I_{qs} \cdot R_s + L_s \cdot \frac{dI_{qs}}{dt} \quad (12)$$

启动阶段没有外部输入的力矩需求，假设电机驱动的是一个固定负载，启动力矩 T_0 是一个预设值，是通过实验手段测量得到，即要启动负载需要多大的力矩值，将启动力矩 T_0 视为一个外部输入的力矩需求，给定电机一个磁通 λ 是饱和磁通值（在启动阶段固定不变，可最快速度提升力矩），利用公式 7 逐步爬升 q_s 轴的电流 I_{qs} 以逐步提升力矩，并利用力矩电流环控制 PI D（力矩控制器）进行闭环控制，同时利用第二个 PID 控制是 电压磁通环控制 PID（磁通控制器）进行闭环控制，使磁通处于饱和磁通。步骤 B：闭锁状态力矩提升阶段就是利用上述的原理实现。因为启动力矩 T_0 是一个临界力矩值，步骤 C：启动运转阶段：在启动力矩 T_0 的基础上，利用力矩/电流闭环回路继续提升力矩以便使负载转动起来，比较预设启动转速 V_0 与实测转速 V_1 并进行闭环控制，直到实测转速 V_1 达到预设启动转速 V_0 ，完成正常启动；若实测转速 V_1 小于预设启动转速 V_0 ，则认为启动失败。

上述的无位置传感器的 BLDC 电机启动方法的原理中，给定电机一个磁通 λ 不一定是饱和磁通值，也可以是 60%饱和磁通值，也可以是 80%饱和磁通值，只要

是一个定值就可以，利用第二个 PID 控制是 电压磁通环控制 PID （磁通控制器）进行闭环控制，使磁通保持不变，然后通过公式（7）就可以定量计算出力矩值，实现力矩电流环控制 PID （力矩控制器）进行闭环控制。

当电机驱动的是一个可变负载，例如洗衣机，其负载是可变的，但可变负载有一个范围，即最小负载至最大负载的范围，启动力矩 T_0 是一个预设值，是通过实验手段测量的，即要启动最小负载时需要的力矩值，当完成步骤 B 后，进入步骤 C，启动运转阶段：在启动力矩 T_0 的基础上，利用力矩/电流闭环回路继续提升力矩以便使负载转动起来，比较预设启动转速 V_0 与实测转速 V_1 并进行闭环控制，直到实测转速 V_1 达到预设启动转速 V_0 ，完成正常启动；若实测转速 V_1 小于预设启动转速 V_0 ，则认为启动失败。利用所有的闭环 PID 控制来控制电机，每隔一段时间提升力矩 ΔT ，直到转速度达到要求， ΔT 可以是 $5\%T_0$ 至 $10\%T_0$ 的范围。步骤 C 中引入了速度闭环控制的环节，可以更加好适应可变负载的启动。

图 14 所示，是本发明的无位置传感器的 BLDC 电机启动方法的启动线路与传统启动方法的启动线路的对比图，图中 A 线是传统无位置传感器的 BLDC 电机启动方法的启动线路，B 线是本发明的无位置传感器的 BLDC 电机启动方法的启动线路，很明显传统的无位置传感器的 BLDC 电机启动方法的启动线路一开始就给与很大的电流和力矩，而没有估算实际负载需要；而本发明的的无位置传感器的 BLDC 电机启动方法的启动线路一开始就注意实际负载需要，因而启动柔和，适应范围广，全程闭环控制，启动顺滑均匀平稳，从而避免电机启动阶段冲击电流大，造成冲击电流功率组件和产生噪音；因此，启动电流小，对电流功率组件冲击小，产生噪音的噪音小，有效保障电机的正常运作，延长产品寿命。

以上实施例为本发明的较佳实施方式，但本发明的实施方式不限于此，其他任何未背离本发明的精神实质与原理下所作的改变、修饰、替代、组合、简化，均为等效的置换方式，都包含在本发明的保护范围之内。

权利要求

1、一种无位置传感器的 BLDC 电机的启动方法，其特征在于：它包括如下步骤：

步骤 A：复位：在 ds 轴选择一个电压 V_{ds} ，同时保持 qs 轴的电压 $V_{qs}=0$ ，使电机回到预设的位置，ds 轴和 qs 轴是定子磁通旋转坐标系里面的两个轴；

步骤 B：闭锁状态力矩提升阶段：在电机被牢牢锁定的状态（即没有转动时），给定电机一个磁通 λ ，在 qs 轴的电流 I_{qs} 进行爬坡上升过程中利用 ds 轴的电压/磁通闭环回路进行磁通控制使磁通保持一定，利用 qs 轴的力矩/电流闭环回路，比较预设启动力矩 T_0 与实测力矩 T_1 并进行闭环控制，直到实测力矩 T_1 达到预设启动力矩 T_0 ；

步骤 C：启动运转阶段：在启动力矩 T_0 的基础上，利用力矩/电流闭环回路继续提升力矩以便使负载转动起来，比较预设启动转速 V_0 与实测转速 V_1 并进行闭环控制，直到实测转速 V_1 达到预设启动转速 V_0 ，完成正常启动；若实测转速 V_1 小于预设启动转速 V_0 ，则认为启动失败。

2、根据权利要求 1 所述的一种无位置传感器的 BLDC 电机的启动方法，其特征在于：步骤 B：闭锁状态力矩提升阶段：给定电机一个磁通 λ 值是在 60%的饱和磁通至 100%的饱和磁通的范围。

3、根据权利要求 2 所述的一种无位置传感器的 BLDC 电机的启动方法，其特征在于：步骤 B：闭锁力矩提升阶段：给定电机一个磁通 λ 是一个电机饱和磁通值。

4、根据权利要求 3 所述的一种无位置传感器的 BLDC 电机的启动方法，其特征在于：启动力矩 T_0 是一个临界力矩值，即当实测力矩 T_1 大于启动力矩 T_0 时，电机才能转动。

5、根据权利要求 4 所述的一种无位置传感器的 BLDC 电机的启动方法，其特征在于：电机驱动的是一个固定负载，启动力矩 T_0 是一个预设值，是通过实验手段测量得到，即要启动负载需要多大的力矩值。

6、根据权利要求 4 所述的一种无位置传感器的 BLDC 电机的启动方法，其特征

在于：电机驱动的是一个可变负载，启动力矩 T_0 是一个预设值，是通过实验手段测量的，即要启动最小负载时需要的力矩值。

7、根据权利要求 1 至 6 任何一项所述的一种无位置传感器的 BLDC 电机的启动方法，其特征在于：步骤 C：启动运转阶段，利用所有的闭环 PID 控制来控制电机， 每间隔一段时间提升力矩 ΔT ，直到转速度达到要求。

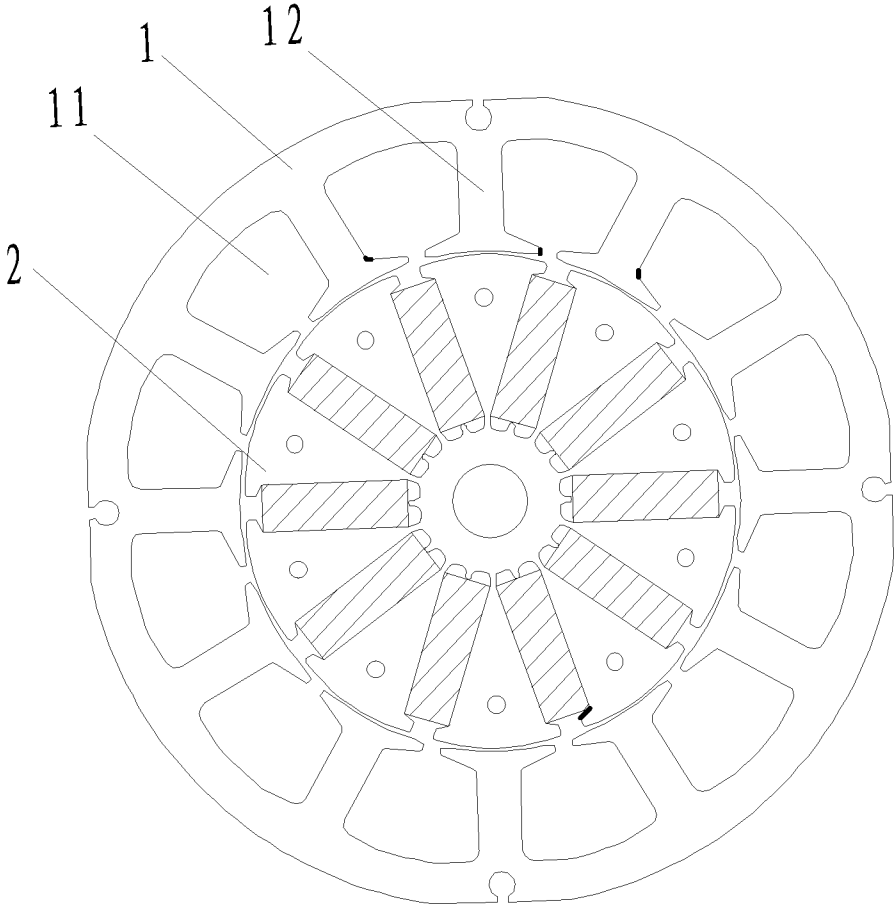


图 1

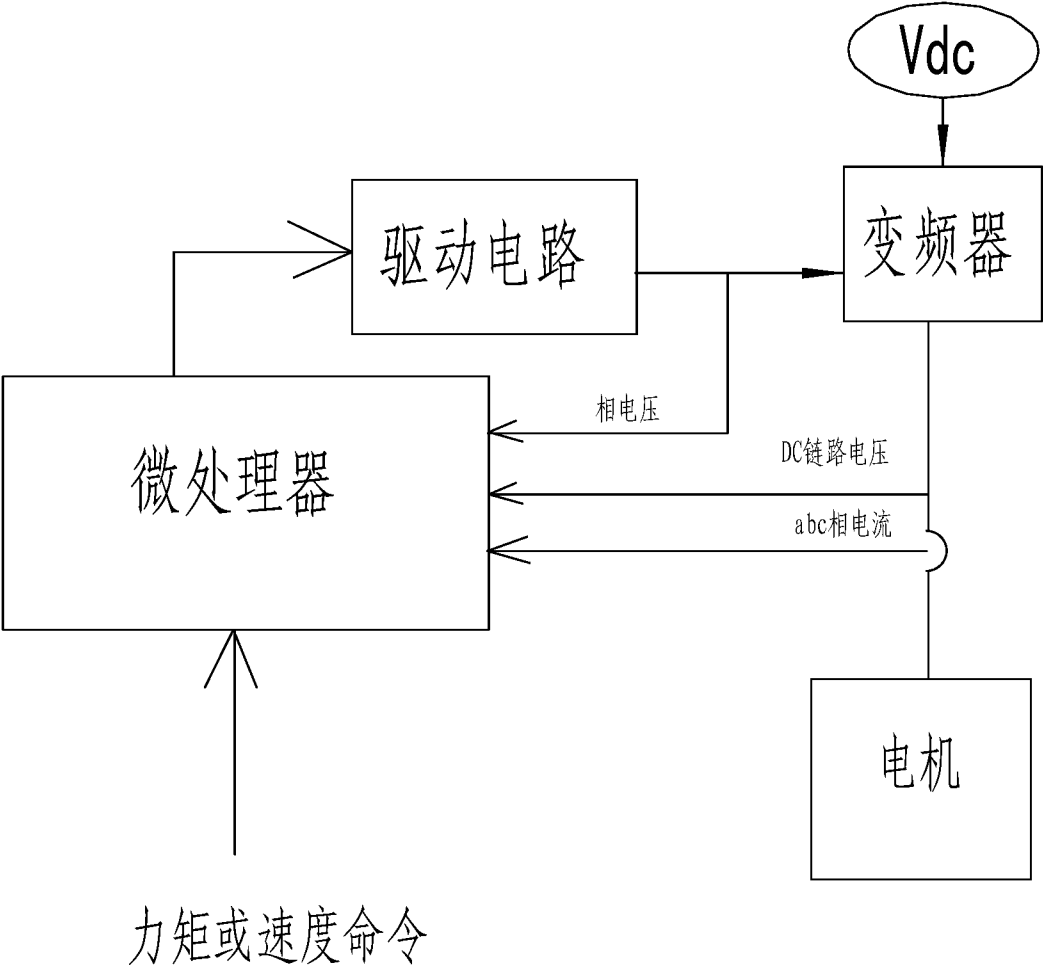


图 2

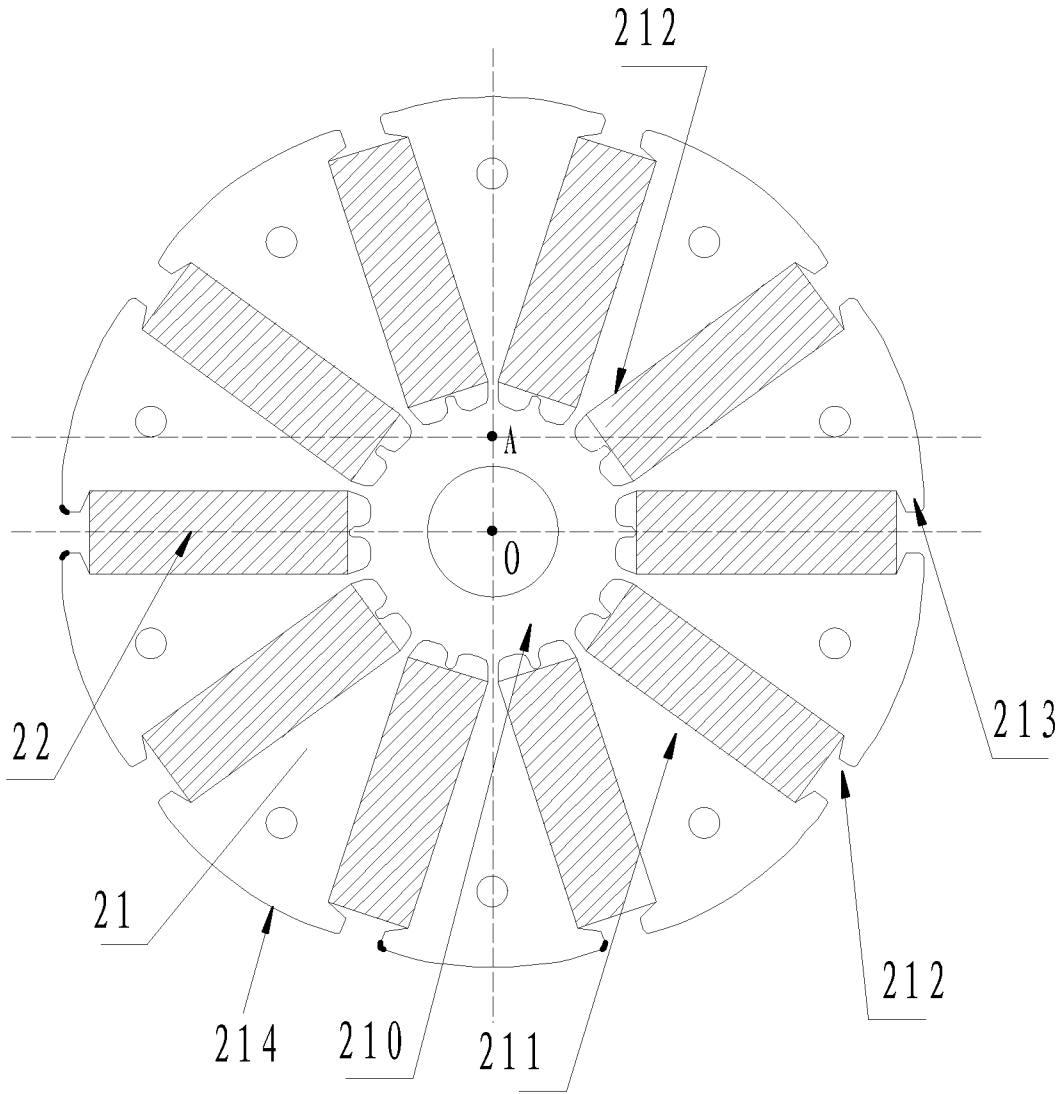


图 3

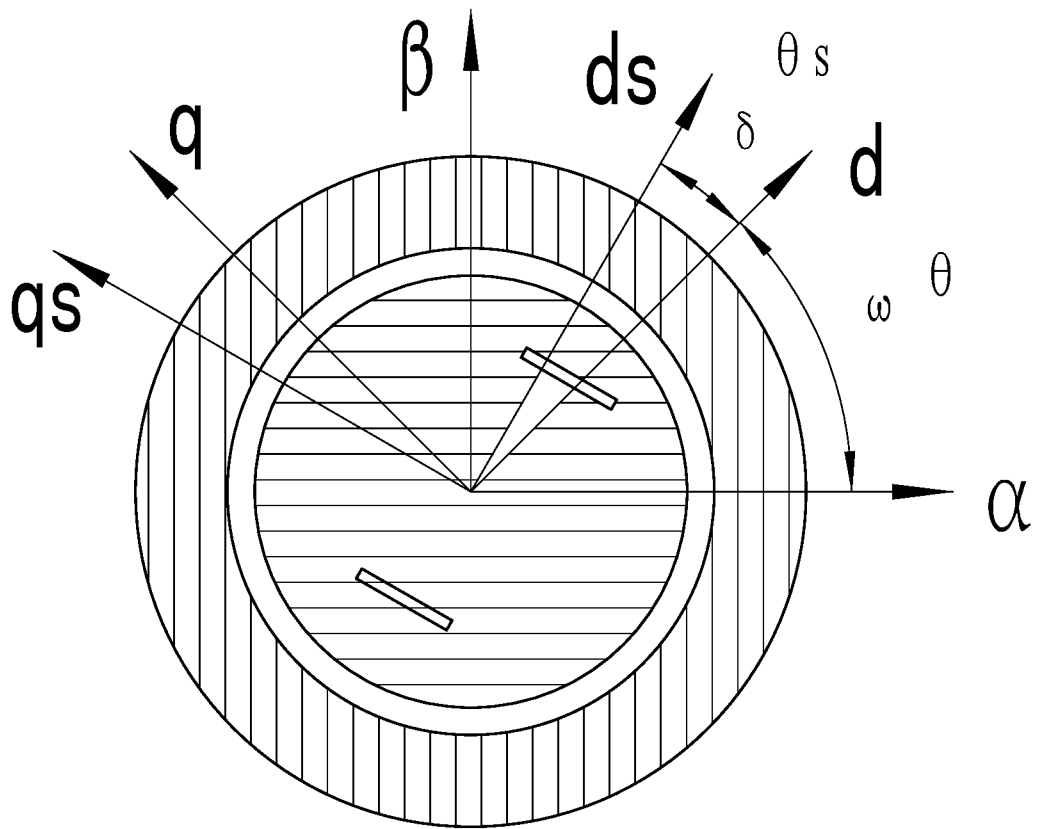


图 4

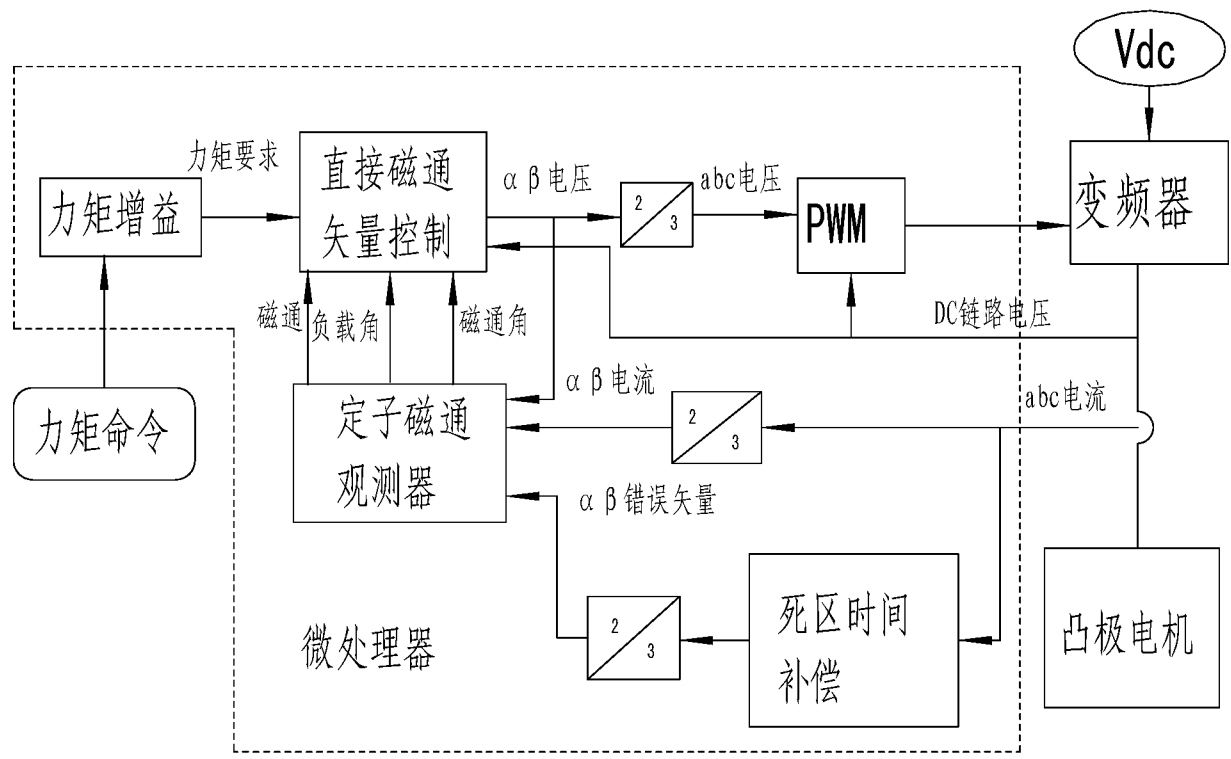


图 5

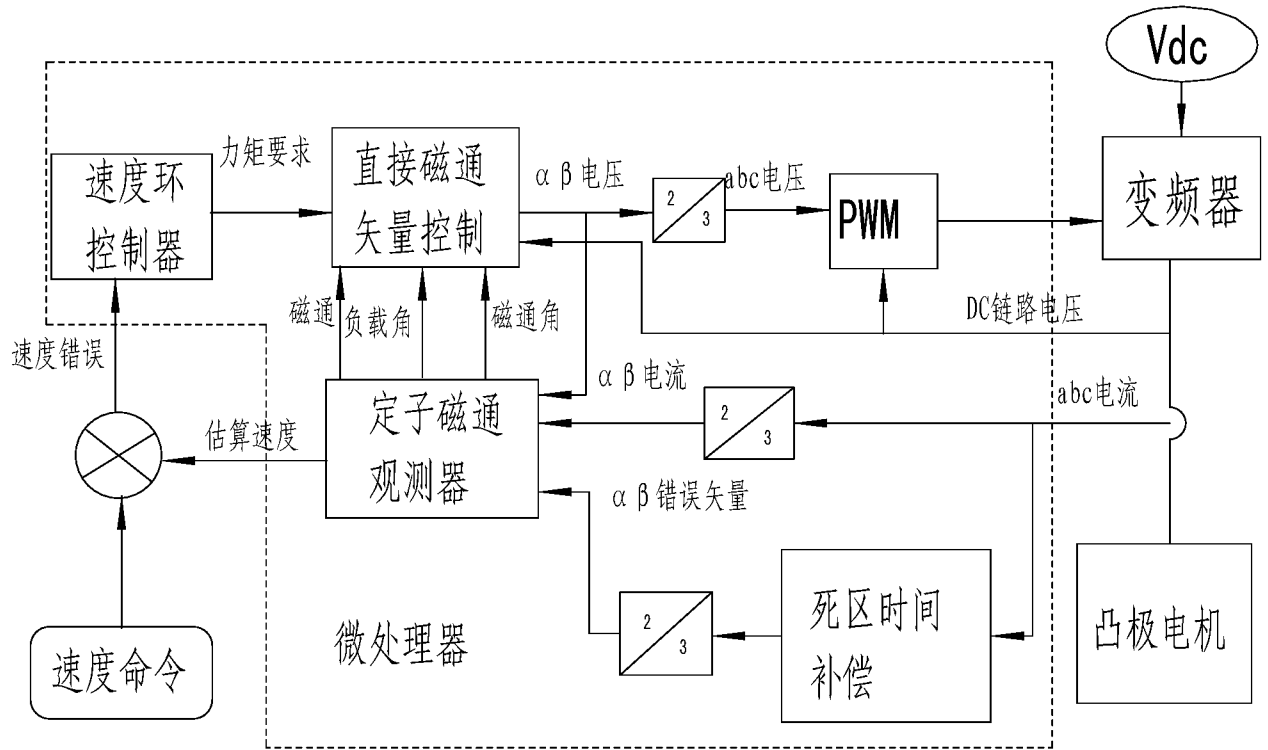


图 6

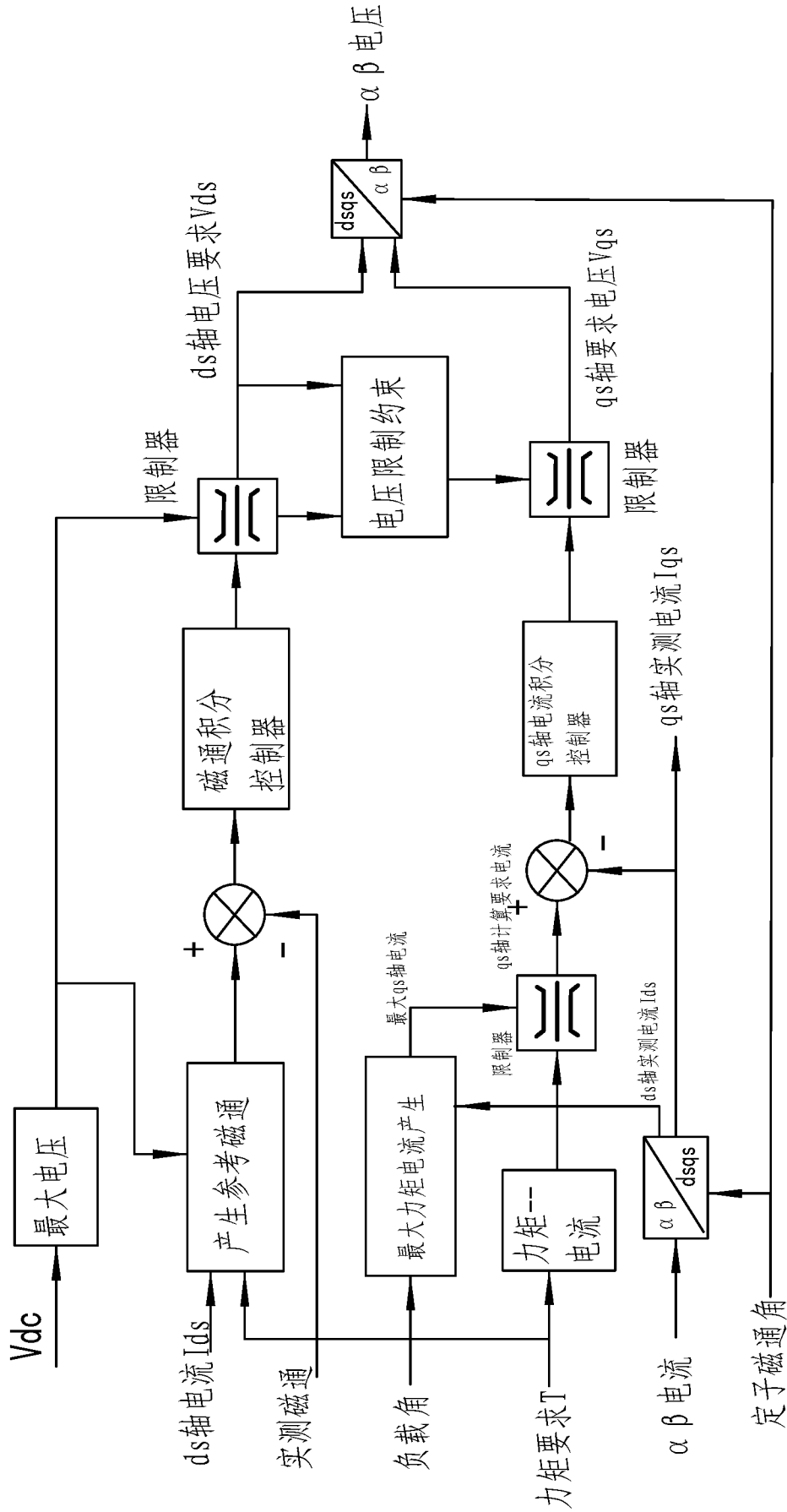
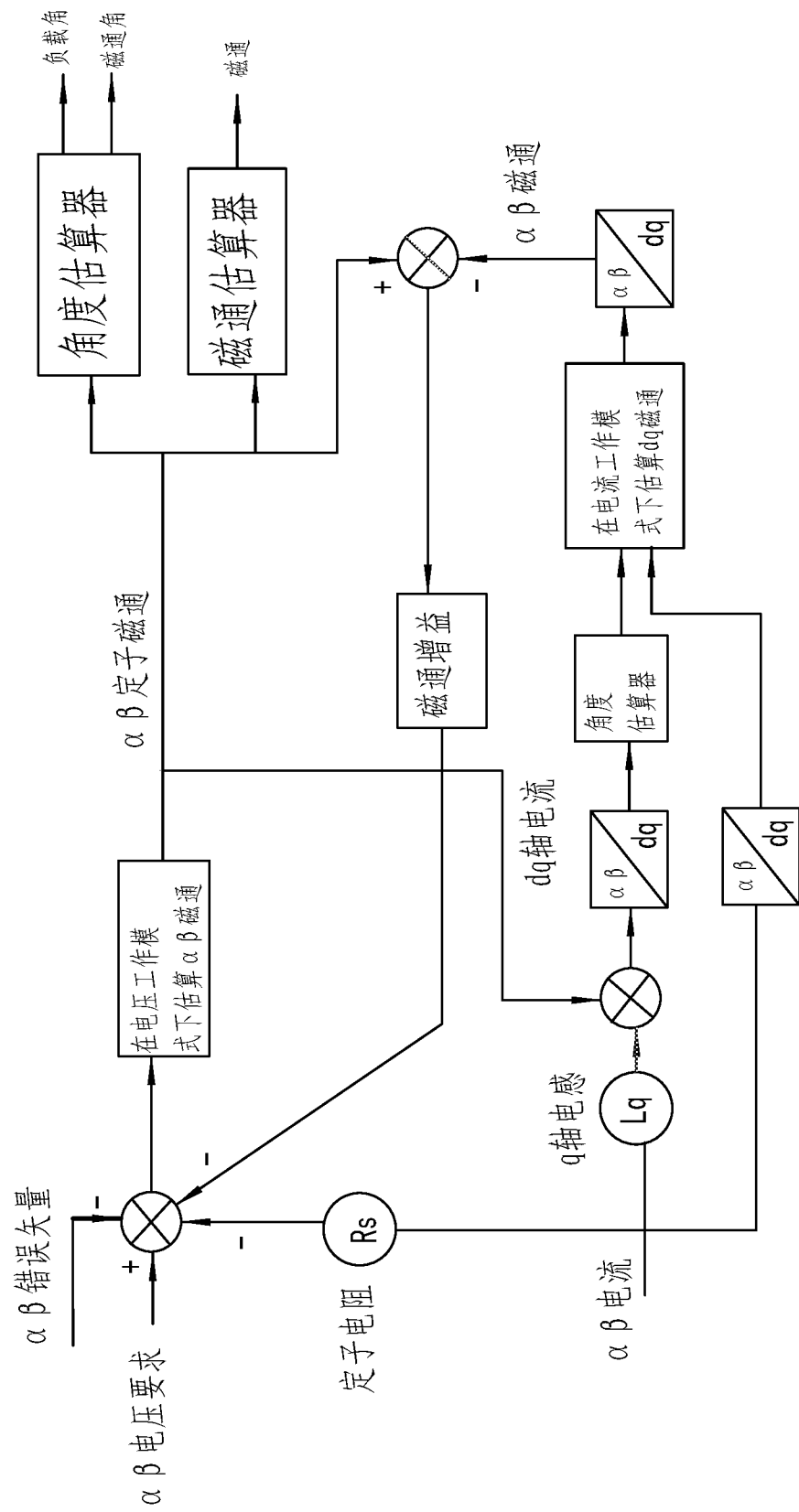


图7


$$\frac{\infty}{\infty}$$

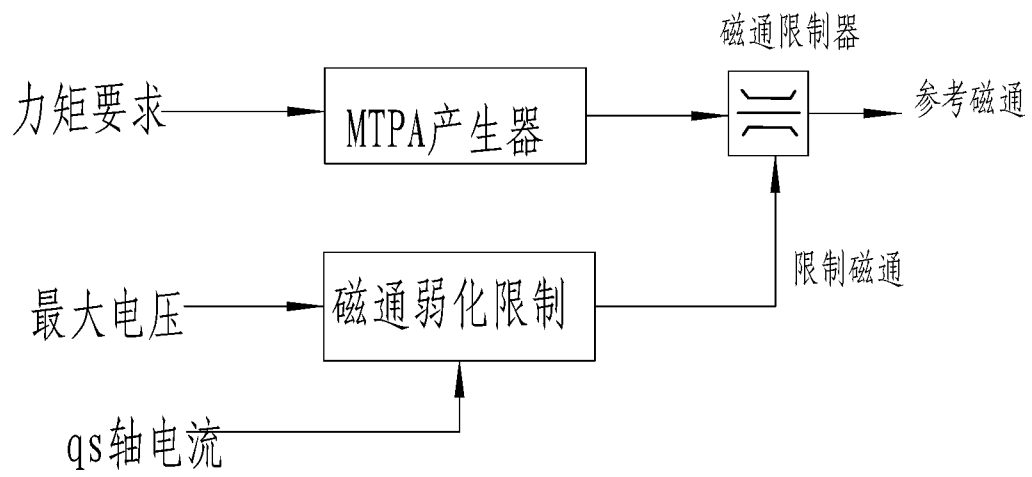


图 9

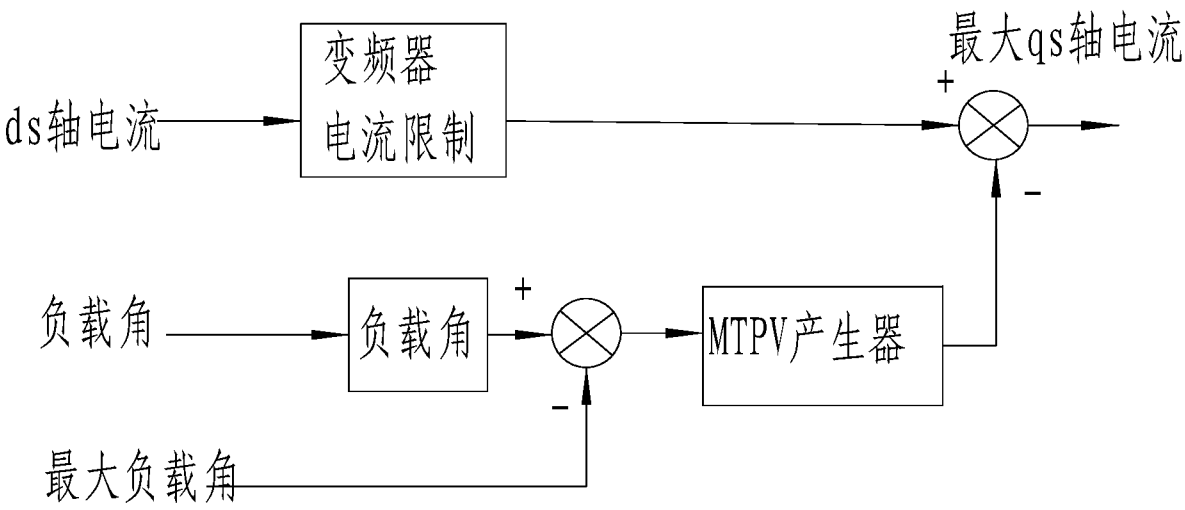


图 10

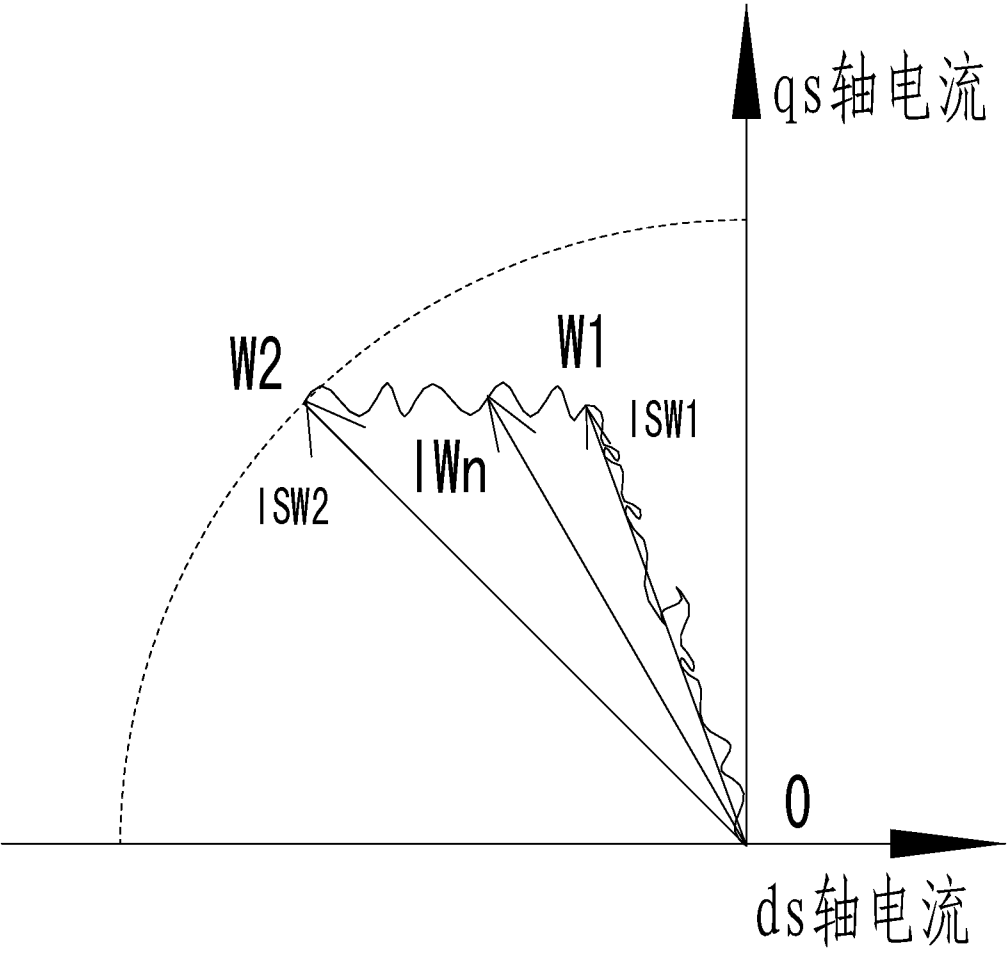


图 11

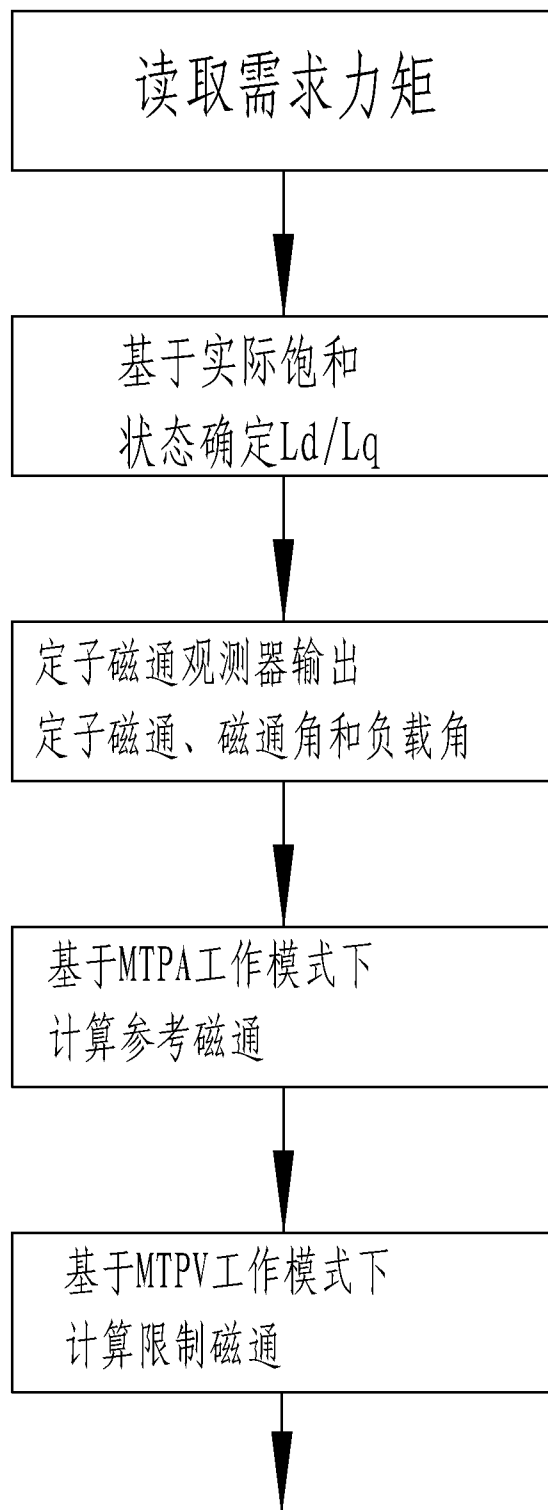


图 12a

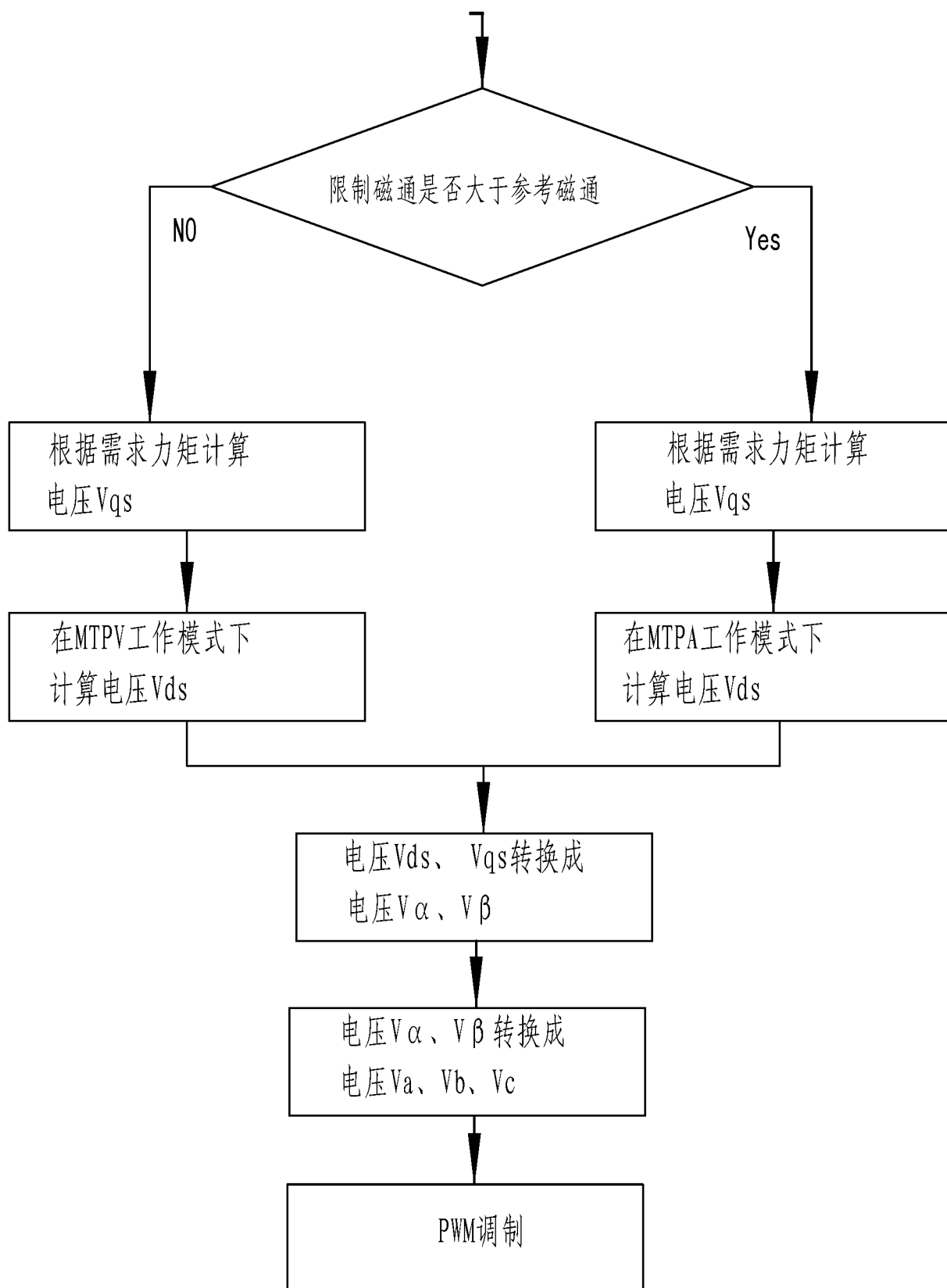


图 12b

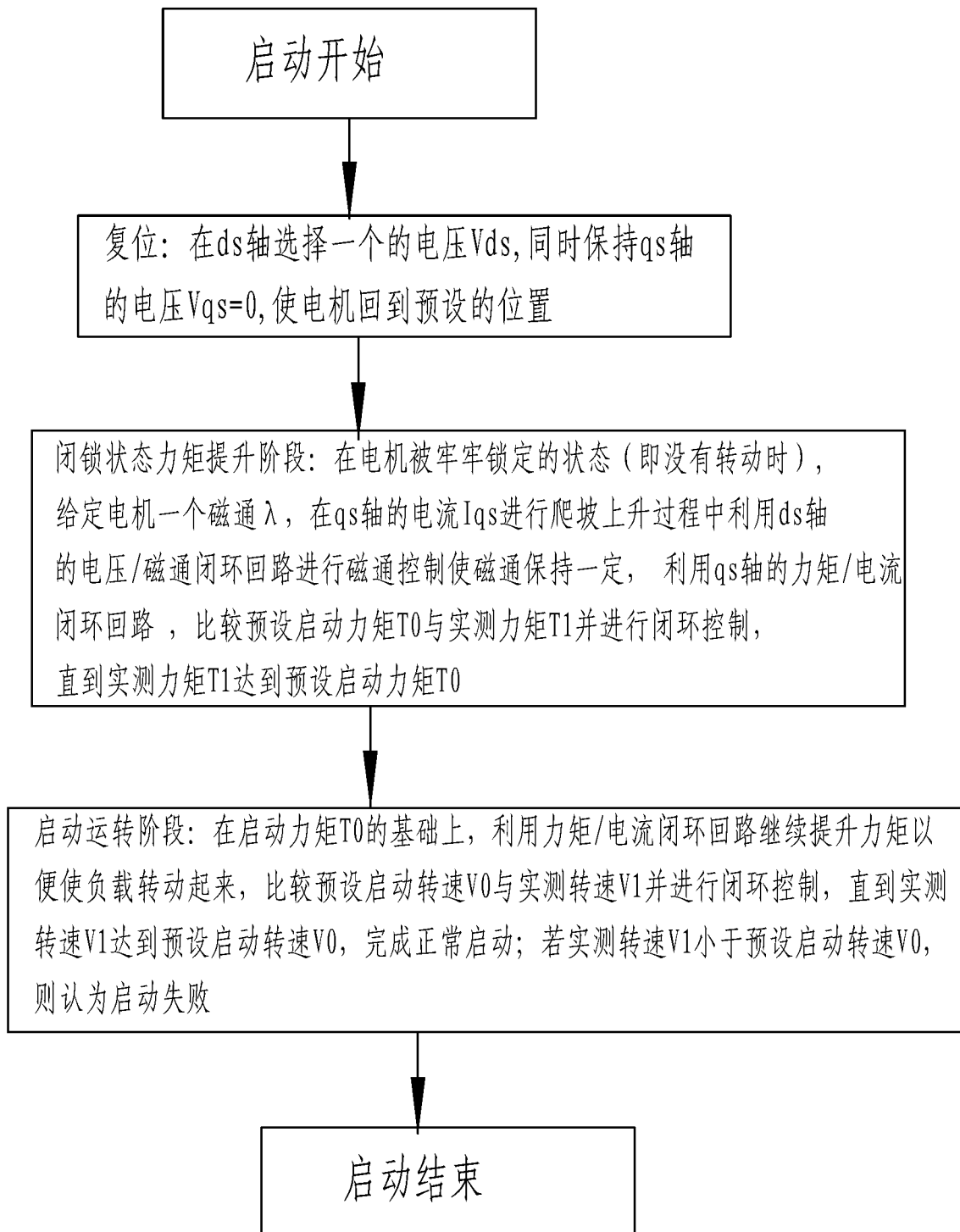


图 13

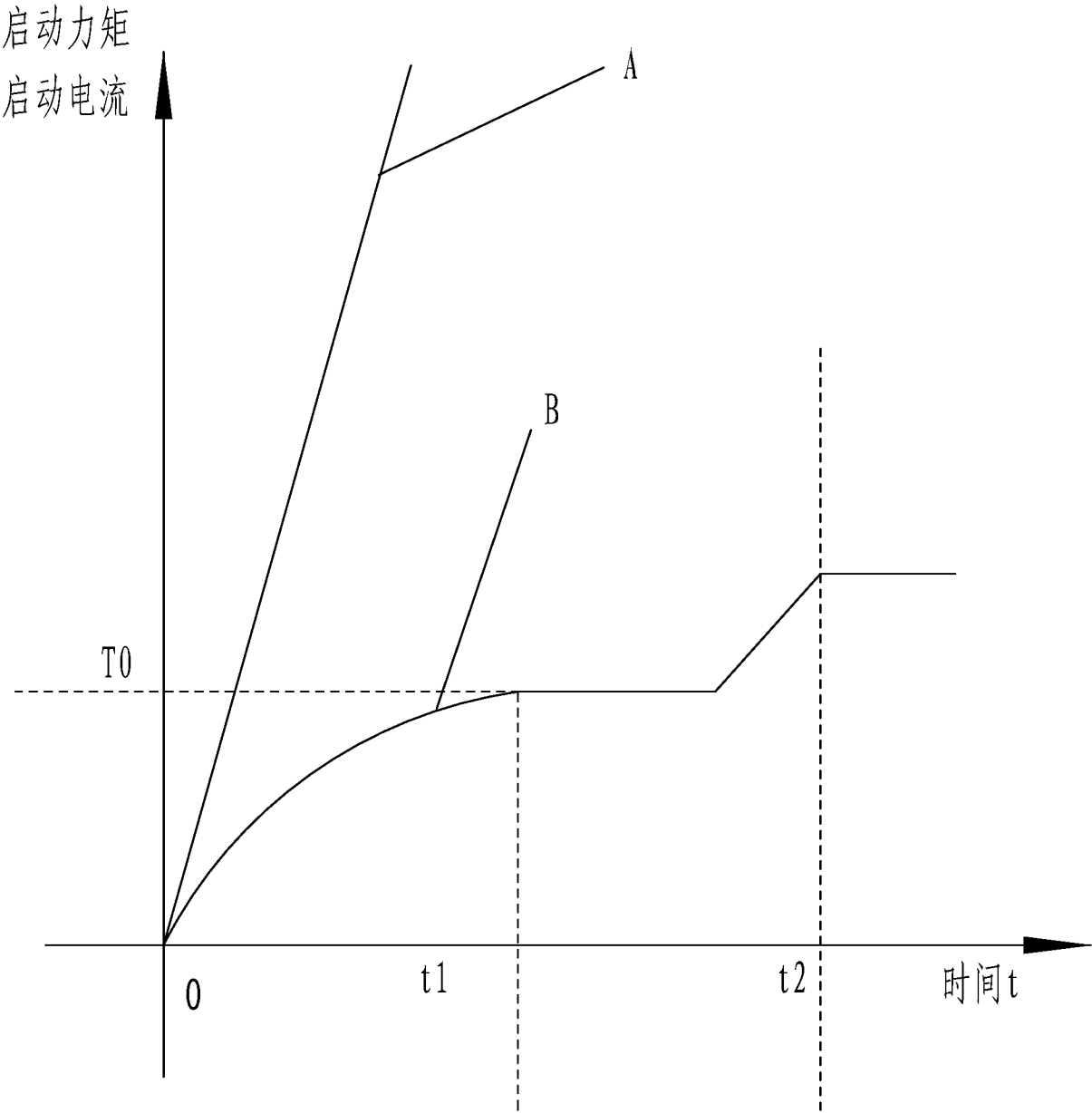


图 14

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/CN2017/099662

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

H02P 21/34 (2016.01) i; H02P 21/24 (2016.01) i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

H02P

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

CNPAT, CNKI, EPODOC, WPI: 中山大洋电机股份有限公司, 无位置传感器, 闭环, 转矩, 力矩, 启动, 起动, sensor, sensorless, torque, torsion, close

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	CN 102638216 A (HANGZHOU HUGE ELECTRONIC TECHNOLOGY CO., LTD.), 15 August 2012 (15.08.2012), description, paragraphs [0041]-[0060]	1-7
A	US 5905348 A (SL MONTEVIDEO TECHNOLOGY, INC.), 18 May 1999 (18.05.1999), entire document	1-7
A	CN 101478281 A (QIU, Shaojie et al.), 08 July 2009 (08.07.2009), entire document	1-7
A	CN 101729013 A (HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY), 09 June 2010 (09.06.2010), entire document	1-7

☐ Further documents are listed in the continuation of Box C.

☒ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:	“T” later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
“A” document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance	
“E” earlier application or patent but published on or after the international filing date	“X” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
“L” document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)	“Y” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art
“O” document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means	
“P” document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed	“&” document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search
16 January 2018

Date of mailing of the international search report
26 January 2018

Name and mailing address of the ISA
State Intellectual Property Office of the P. R. China
No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao
Haidian District, Beijing 100088, China
Facsimile No. (86-10) 62019451

Authorized officer
LI, Sha
Telephone No. (86-10) 010-61648506

International application No.
PCT/CN2017/099662

Form PCT/ISA/210 (patent family annex) (July 2009)

国际检索报告

国际申请号

PCT/CN2017/099662

A. 主题的分类 H02P 21/34 (2016.01) i; H02P 21/24 (2016.01) i 按照国际专利分类 (IPC) 或者同时按照国家分类和 IPC 两种分类																	
B. 检索领域 检索的最低限度文献 (标明分类系统和分类号) H02P 包含在检索领域中的除最低限度文献以外的检索文献 在国际检索时查阅的电子数据库 (数据库的名称, 和使用的检索词 (如使用)) CNPAT, CNKI, EPDOC, WPI: 中山大洋电机股份有限公司, 无位置传感器, 闭环, 转矩, 力矩, 启动, 起动, sensor, sensorless, torque, torsion, close																	
C. 相关文件 <table border="1"> <thead> <tr> <th>类 型*</th> <th>引用文件, 必要时, 指明相关段落</th> <th>相关的权利要求</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>A</td> <td>CN 102638216 A (杭州洲钜电子科技有限公司) 2012年 8月 15日 (2012 - 08 - 15) 说明书第 [0041] - [0060] 段</td> <td>1-7</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>US 5905348 A (SL MONTEVIDEO TECHNOLOGY, INC.) 1999年 5月 18日 (1999 - 05 - 18) 全文</td> <td>1-7</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>CN 101478281 A (邱少杰 等) 2009年 7月 8日 (2009 - 07 - 08) 全文</td> <td>1-7</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>CN 101729013 A (哈尔滨工业大学) 2010年 6月 9日 (2010 - 06 - 09) 全文</td> <td>1-7</td> </tr> </tbody> </table>			类 型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求	A	CN 102638216 A (杭州洲钜电子科技有限公司) 2012年 8月 15日 (2012 - 08 - 15) 说明书第 [0041] - [0060] 段	1-7	A	US 5905348 A (SL MONTEVIDEO TECHNOLOGY, INC.) 1999年 5月 18日 (1999 - 05 - 18) 全文	1-7	A	CN 101478281 A (邱少杰 等) 2009年 7月 8日 (2009 - 07 - 08) 全文	1-7	A	CN 101729013 A (哈尔滨工业大学) 2010年 6月 9日 (2010 - 06 - 09) 全文	1-7
类 型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求															
A	CN 102638216 A (杭州洲钜电子科技有限公司) 2012年 8月 15日 (2012 - 08 - 15) 说明书第 [0041] - [0060] 段	1-7															
A	US 5905348 A (SL MONTEVIDEO TECHNOLOGY, INC.) 1999年 5月 18日 (1999 - 05 - 18) 全文	1-7															
A	CN 101478281 A (邱少杰 等) 2009年 7月 8日 (2009 - 07 - 08) 全文	1-7															
A	CN 101729013 A (哈尔滨工业大学) 2010年 6月 9日 (2010 - 06 - 09) 全文	1-7															
☐ 其余文件在C栏的续页中列出。 ☒ 见同族专利附件。																	
* 引用文件的具体类型: “A” 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件 “E” 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利 “L” 可能对优先权要求构成怀疑的文件, 或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件 (如具体说明的) “O” 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件 “P” 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件 “T” 在申请日或优先权日之后公布, 与申请不相抵触, 但为了理解发明之理论或原理的在后文件 “X” 特别相关的文件, 单独考虑该文件, 认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性 “Y” 特别相关的文件, 当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时, 要求保护的发明不具有创造性 “&” 同族专利的文件																	
国际检索实际完成的日期 2018年 1月 16日		国际检索报告邮寄日期 2018年 1月 26日															
ISA/CN的名称和邮寄地址 中华人民共和国国家知识产权局 (ISA/CN) 中国北京市海淀区蓟门桥西土城路6号 100088 传真号 (86-10) 62019451		受权官员 李莎 电话号码 (86-10) 010-61648506															

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号

PCT/CN2017/099662

检索报告引用的专利文件			公布日 (年/月/日)	同族专利	公布日 (年/月/日)
CN	102638216	A	2012年 8月 15日	CN 102638216 B	2014年 7月 16日
US	5905348	A	1999年 5月 18日	无	
CN	101478281	A	2009年 7月 8日	CN 101478281 B	2011年 6月 8日
CN	101729013	A	2010年 6月 9日	CN 101729013 B	2012年 7月 18日