

一种自适应交流伺服电机电流控制方法及系统

技术领域

本发明涉及电机控制领域，具体而言，涉及一种自适应交流伺服电机电流控制方法及系统。

背景技术

随着智能化科技的不断发展，人们的生活、工作、学习之中越来越多地用到了智能化设备，使用智能化科技手段，提高了人们生活的质量，增加了人们学习和工作的效率。在电机控制领域，其电机系统本质上是非线性，时变和不确定系统，控制系统的设计需要采用非线性自适应控制算法。

目前所有电机的伺服控制系统算法均采用传统的 PID 控制算法。PID 控制算法是一种基于线性系统的控制算法，利用 PID 算法来控制非线性伺服电机的时候，遇到问题就是如何整定 PID 的比例、积分和微分参数。由于电机系统的非线性，时变和不确定性，对电机非线性模型或线性化模型的离线或在线辨识是必需的。得到的电机模型用来实时或分段整定 PID 参数。传统的 PID 算法在整个控制过程中其参数是常数。而在实际运用中，整个被控系统是无法提前预测的，从而固定的 PID 参数无法使系统达到最好的控制效果。利用模型辨识虽然能够达到较为可观的控制精度，但模型辨识特别是在线模型辨识极大地增加了系统的复杂程度，而且模型辨识不能保证总能得到正确的模型和模型参数，这样的控制系统很难得到认证。同样其它自适应或智能算法包括模糊控制，滑模控制，基于神经网络控制，模型参考自适应等也同样有不能保证算法稳定和在任何工况负载干扰环境下稳定工作的问题。

针对上述的问题，目前尚未提出有效的解决方案。

发明内容

本发明实施例提供了一种自适应交流伺服电机电流控制方法及系统，以至少解决现有技术中电机模型辨识特别是在线模型辨识极大地增加了系统的复杂程度，而且模型辨识不能保证总能得到正确的模型和模型参数，模糊控制、滑模控制、基于神经网络

络控制和模型参考自适应不能保证算法稳定和在任何工况负载干扰环境下稳定工作的技术问题。

根据本发明实施例的一个方面，本发明提供了一种自适应交流伺服电机电流控制方法，包括：

一种自适应交流伺服电机电流控制方法，其特征在于，包括：

获取原始电流；

将所述原始电流输入至电流矢量变换模块，生成第一目标数据；

将所述第一目标数据输入至电流控制环，同时将第一目标数据取时间导数生成第二目标数据；

将所述第二目标数据与电流控制环的输出同时输入至增量型逆动力学控制模块，并将所述增量型逆动力学控制模块的输出输入至所述电流矢量逆变换模块。

进一步的，所述原始电流是原始三相交流电机电流。

进一步的，所述增量型逆动力学控制模块表达式如下：

$$\Delta u_d = (u_d - u_{d0}) = L_d \left(v_d - \frac{di_d}{dt} \Big|_0 \right)$$

$$\Delta u_q = (u_q - u_{q0}) = L_q \left(v_q - \frac{di_q}{dt} \Big|_0 \right)$$

其中， Δu_d 和 Δu_q 为d轴和q轴的控制增量， v_d 和 v_q 为逆动力学控制中的虚拟控制变量， $\frac{di_d}{dt} \Big|_0$ 和 $\frac{di_q}{dt} \Big|_0$ 为电流 i_d 和 i_q 在采样点的时间导数， u_d 和 u_q 为d轴和q轴的控制输出当前采样值， u_{d0} 、 u_{q0} 分别为d轴和q轴的控制输出前一采样值， L_d 为d轴电感， L_q 为q轴电感。

进一步的，所述交流伺服电机控制还包括：转速控制环、转角位置控制环。

本发明的第二方面提供了一种自适应交流伺服电机电流控制系统，包括：

采样模块，用于获取原始电流；

电流矢量变换模块，用于将所述原始电流输入至电流矢量变换模块，生成第一目标数据；

电流控制模块，用于将所述第一目标数据输入至电流控制环，同时将第一目标数据取时间导数生成第二目标数据；

增量型逆动力学模块，用于将所述第二目标数据与电流控制环的输出同时输入至增量型逆动力学控制模块，并将所述增量型逆动力学控制模块的输出输入至所述电流矢量逆变换模块。

本发明还公开了一种非易失性存储介质，所述非易失性存储介质包括存储的程序，其中，所述程序运行时控制非易失性存储介质所在的设备执行上述任意一项所述的方法。

进一步的，本发明还公开了一种电子装置，包含处理器和存储器；所述存储器中存储有计算机可读指令，所述处理器用于运行所述计算机可读指令，其中，所述计算机可读指令运行时执行上述任意一项所述的方法。

根据本发明实施例的另一方面，还提供了一种非易失性存储介质，所述非易失性存储介质包括存储的程序，其中，所述程序运行时控制非易失性存储介质所在的设备执行一种自适应交流伺服电机电流控制方法。

根据本发明实施例的另一方面，还提供了一种电子装置，包含处理器和存储器；所述存储器中存储有计算机可读指令，所述处理器用于运行所述计算机可读指令，其中，所述计算机可读指令运行时执行一种自适应交流伺服电机电流控制方法。

在本发明实施例中，利用电流的时间导数来替代所需电机系统模型，进而在逆动力学控制中无需系统模型，从而解决了现有技术中电机模型辨识特别是在线模型辨识极大地增加了系统的复杂程度，而且模型辨识不能保证总能得到正确的模型和模型参数，模糊控制、滑模控制、基于神经网络控制和模型参考自适应不能保证算法稳定和在任何工况负载干扰环境下稳定工作的技术问题。

附图说明

此处所说明的附图用来提供对本发明的进一步理解，构成本申请的一部分，本发明的示意性实施例及其说明用于解释本发明，并不构成对本发明的不当限定。在附图中：

图1是根据本发明实施例的一种自适应交流伺服电机电流控制方法的流程图；

图2是根据本发明实施例的一种自适应交流伺服电机电流控制方法的结构框图；

图3是现有交流伺服电机电流控制原理框图；

图 4 是根据本发明实施例的自适应电流矢量控制原理框图。

具体实施方式

为了使本技术领域的人员更好地理解本发明方案，下面将结合本发明实施例中的附图，对本发明实施例中的技术方案进行清楚、完整地描述，显然，所描述的实施例仅仅是本发明一部分的实施例，而不是全部的实施例。基于本发明中的实施例，本领域普通技术人员在没有做出创造性劳动前提下所获得的所有其他实施例，都应当属于本发明保护的范围。

需要说明的是，本发明的说明书和权利要求书及上述附图中的术语“第一”、“第二”等是用于区别类似的对象，而不必用于描述特定的顺序或先后次序。应该理解这样使用的数据在适当情况下可以互换，以便这里描述的本发明的实施例能够以除了在这里图示或描述的那些以外的顺序实施。此外，术语“包括”和“具有”以及他们的任何变形，意图在于覆盖不排他的包含，例如，包含了一系列步骤或单元的过程、方法、系统、产品或设备不必限于清楚地列出的那些步骤或单元，而是可包括没有清楚地列出的或对于这些过程、方法、产品或设备固有的其它步骤或单元。

根据本发明实施例，提供了一种自适应交流伺服电机电流控制方法的方法实施例，需要说明的是，在附图的流程图中示出的步骤可以在诸如一组计算机可执行指令的计算机系统中执行，并且，虽然在流程图中示出了逻辑顺序，但是在某些情况下，可以以不同于此处的顺序执行所示出或描述的步骤。

图 1 是根据本发明实施例的一种自适应交流伺服电机电流控制方法的流程图，如图 1 所示，该方法包括如下步骤：

步骤 S100，获取原始电流；

所述电流是三相交流电机电流。

步骤 S200，将所述原始三相交流电机电流输入至电流矢量变换模块，生成第一目标数据；

步骤 S300，将所述第一目标数据输入至电流控制环，同时将第一目标数据取时间导数生成第二目标数据；

步骤 S400，将所述第二目标数据与电流控制环的输出同时输入至增量型逆动力学控制模块，所述增量型逆动力学控制模块的输出输入至电流矢量逆变换模块。

图 2 是根据本发明实施例的一种自适应交流伺服电机电流控制系统的结构框图，

如图 2 所示，该系统包括：

原始电流获取模块，获取原始三相交流电机电流；

控制电流模块，将所述原始三相交流电机电流输入至电流矢量变换模块，生成第一目标数据；

电流时间导数模块，将第一目标数据取时间导数生成第二目标数据；

电流控制模块，将所述第一目标数据与所要求的第一目标数据进行比较，其结果输入至电流控制模块；

具体的，所述电流控制模块具有比例、积分、微分功能。

增量型逆动力学模块，将所述第二目标数据与电流控制模块的输出同时输入至增量型逆动力学控制模块，增量型逆动力学控制模块的输出输入至电流矢量逆变换模块。

或，所述系统包括：

采样模块，用于获取原始电流；

电流矢量变换模块，用于将所述原始电流输入至电流矢量变换模块，生成第一目标数据；

电流控制模块，用于将所述第一目标数据输入至电流控制环，同时将第一目标数据取时间导数生成第二目标数据；

增量型逆动力学模块，用于将所述第二目标数据与电流控制环的输出同时输入至增量型逆动力学控制模块，并将所述增量型逆动力学控制模块的输出输入至所述电流矢量逆变换模块。

电流矢量变换模块和电流矢量逆变换模块是基于电流矢量控制理论将交流电流的控制变换成像直流电流控制一样容易，先将交流电流变换为直流电流（电流矢量变换模块），在直流电流环境下实现控制，然后再将直流电流变换为交流电流（电流矢量逆变换模块）对交流电机进行控制，见图 3。电流矢量变换模块包括 Clarke 变换和 Park 变换，见图 3。电流矢量逆变换模块包括 Park 逆变换，空间矢量频宽调制和 Clarke 逆变换（三相逆变器），见图 3。

所述增量型逆动力学控制模块，表达式如下：

$$\Delta u_d = (u_d - u_{d0}) = L_d \left(v_d - \frac{di_d}{dt} \Big|_0 \right)$$

$$\Delta u_q = (u_q - u_{q0}) = L_q \left(v_q - \frac{di_q}{dt} \Big|_0 \right)$$

其中, Δu_d 和 Δu_q 为 d 轴和 q 轴的控制增量, v_d 和 v_q 为逆动力学控制中的虚拟控制变量, $\frac{di_d}{dt} \Big|_0$ 和 $\frac{di_q}{dt} \Big|_0$ 为电流 i_d 和 i_q 在采样点的时间导数, 本式中, u_d 和 u_q 为 d 轴和 q 轴的控制输出当前采样值, u_{d0} 、 u_{q0} 分别为 d 轴和 q 轴的控制输出前一采样值, L_d 为 d 轴电感; L_q 为 q 轴电感。

具体的, 如图 4 所示, 图 4 是根据本发明实施例的自适应电流矢量控制原理框图, 本发明实施例上述的自适应交流伺服电机电流控制系统中的数学模型包括: 电流模型、速度模型、位置模型, 上述三种数学模型可以是:

电流模型:

$$\frac{di_d}{dt} = \frac{1}{L_d} (u_d - R i_d + p \omega_m L_q i_q) \quad (1)$$

$$\frac{di_q}{dt} = \frac{1}{L_q} (u_q - R i_q + p \omega_m L_d i_d - p \omega_m \psi_m) \quad (2)$$

速度模型:

$$\frac{d\omega_m}{dt} = \frac{1}{J} \{ p i_q [\psi_m - (L_q - L_d) i_d] - B \omega_m - T_L \} \quad (3)$$

位置模型:

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega_m \quad (4)$$

上述公式 (1) 至 (4), 其中的变量及参数定义为: i_d 、 i_q 为 d 轴和 q 轴电流; L_d 为 d 轴电感; L_q 为 q 轴电感; ω_m 为转子角速度; p 为磁极数, T_L 为未知负载力矩输入; B 未知阻力系数; J 转动惯量; R 未知等效阻抗; θ 为电机转子转角; ψ_m 为永磁磁通; u_d 和 u_q 为 d 轴和 q 轴的控制输入。

需要说明的是, 永磁同步马达 (permanent-magnet synchronous motor), 即永磁同步电机, 简称 PMSM, 是指一种转子用永久磁铁代替绕线的同步马达。永磁同步马达可依磁通方式分为径向、轴向或是横向几种, 依其元件的布局而定, 各种的永磁同步马

达在效率、体积、重量及工作速度都有不同的表现。永磁同步电机的运行原理与电励磁同步电机相同，但它以永磁体提供的磁通代替后者的励磁绕组励磁，使电机结构更为简单。PMSM 是由永磁体励磁产生同步旋转磁场的同步电机，永磁体作为转子产生旋转磁场，三相定子绕组在旋转磁场作用下通过电枢反应，感应三相对称电流。此时转子动能转化为电能，PMSM 作发电机(generator)用；此外，当定子侧通入三相对称电流，由于三相定子空间位置上相差 120°，所以三相定子电流在空间中产生旋转磁场，转子旋转磁场中受到电磁力作用运动，此时电能转化为动能，PMSM 作电动机(motor)用。

由于未知参数与输入 (B, R, T_L) 的存在，电流模型和速度模型为非线性且不确定，基于线性系统的 PID 控制将无法保证高性能。其中，PID 即：Proportional（比例）、Integral（积分）、Differential（微分）的缩写。顾名思义，PID 控制算法是结合比例、积分和微分三种环节于一体的控制算法，它是连续系统中技术最为成熟、应用最为广泛的一种控制算法，该控制算法出现于 20 世纪 30 至 40 年代，适用于对被控对象模型了解不清楚的场合。实际运行的经验和理论的分析都表明，运用这种控制规律对许多工业过程进行控制时，都能得到比较满意的效果。PID 控制的实质就是根据输入的偏差值，按照比例、积分、微分的函数关系进行运算，运算结果用以控制输出，另外，在 PID 控制中，闭环控制是根据控制对象输出反馈来进行校正的控制方式，它是在测量出实际与计划发生偏差时，按定额或标准来进行纠正的。比如控制一个电机的转速，就得有一个测量转速的传感器，并将结果反馈到控制路线上。提到闭环控制算法，不得不提 PID，它是闭环控制算法中最简单的一种。PID 是比例（Proportion）积分，（Integral）微分，（Differential coefficient）的缩写，分别代表了三种控制算法。通过这三个算法的组合可有效地纠正被控制对象的偏差，从而使其达到一个稳定的状态。

本发明实施例通过串级逆动力学控制原理，不需要逆动力学控制所需的非线性动力学和运动学模型得到系统的完全线性化。其实例具体实现步骤首先利用方程 1 和 2 在时间采样得到逆动力学控制：

$$v_d = \frac{di_d}{dt} = \frac{di_d}{dt} \Big|_0 + \frac{1}{L_d} \left((u_d - u_{d0}) - R(i_d - i_{d0}) + p\omega_m L_q (i_q - i_{q0}) \right) \quad (5)$$

$$v_q = \frac{di_q}{dt} = \frac{di_q}{dt} \Big|_0 + \frac{1}{L_q} \left((u_q - u_{q0}) - R(i_q - i_{q0}) + p\omega_m L_d (i_d - i_{d0}) \right) \quad (6)$$

式 (5) 和 (6) 中的 v_d 和 v_q 为逆动力学控制中的虚拟控制变量， $\frac{di_d}{dt} \Big|_0$ 和 $\frac{di_q}{dt} \Big|_0$ 为电流 i_d 和 i_q 在采样点的时间导数， u_d 和 u_q 为 d 轴和 q 轴的控制输出当前采样值， u_{d0} 、 u_{q0} 分别为 d 轴和 q 轴的控制输出前一采样值， i_{q0} 和 i_{d0} 为 d 轴和 q 轴电流前一采样值。

所有伺服电机已经具备的高速采样(10kHz)条件下可得到具有增量型逆动力学电流控制。

另外,对于本发明实施例的电流矢量变换控制,即高性能永磁同步电机的一种控制理论和方法,例如在一个以同步角速度 ω_1 旋转的坐标系 M、T 中,如保持 M 轴始终与转子磁链矢量同向,则异步电动机的转矩由定子电流在 M 轴上的分量 i_{M1} 决定,异步电动机的转子磁链由定子电流在 T 轴上的分量 i_{T1} 决定;通过对 i_{M1} 和 i_{T1} 分别进行控制,实现转矩和磁链控制的完全解耦。

$$\Delta u_d = (u_d - u_{d0}) = L_d \left(v_d - \frac{di_d}{dt} \Big|_0 \right) \quad (7)$$

$$\Delta u_q = (u_q - u_{q0}) = L_q \left(v_q - \frac{di_q}{dt} \Big|_0 \right) \quad (8)$$

这个结果表明利用测量 d 轴和 q 轴的电流 i_d 和 i_q 计算电流的时间导数 $\frac{di_d}{dt} \Big|_0$ 和 $\frac{di_q}{dt} \Big|_0$ 得到的控制算法避免了复杂且不确定 (R) 的电流模型。电流导数代替了模型在逆动力学控制器中起到控制器自适应的作用。由于增量控制 Δu_d 与 Δu_q 的应用电流系统被完全线性化,定常化和解耦, Δu_d 和 Δu_q 中的逆动力学虚拟控制可应用定参数 PID 控制。

$$v_d = K_{Pd}(i_{dd} - i_d) + K_{Id} \int (i_{dd} - i_d) dt + K_{Dd} \frac{d(i_{dd} - i_d)}{dt} \quad (9)$$

$$v_q = K_{Pq}(i_{qd} - i_q) + K_{Iq} \int (i_{qd} - i_q) dt + K_{Dq} \frac{d(i_{qd} - i_q)}{dt} \quad (10)$$

由于 (1) 和 (2) 相对度都为 1, (9) 和 (10) 可简化为 PI 控制。

$$v_d = K_{Pd}(i_{dd} - i_d) + K_{Id} \int (i_{dd} - i_d) dt \quad (11)$$

$$v_q = K_{Pq}(i_{qd} - i_q) + K_{Iq} \int (i_{qd} - i_q) dt \quad (12)$$

式中, K_{Pd} , K_{Id} 和 K_{Dd} 为 d 轴 PID 控制系数, K_{Pq} , K_{Iq} 和 K_{Dq} 为 q 轴 PID 控制系数, i_{dd} 和 i_{qd} 为 d 轴和 q 轴控制期望值, 由转速控制环给出。

本发明实施例具有以下特点: 1、不需要电机模型的自适应控制; 2、非线性控制; 3、控制系统对不确定的系统参数不敏感; 4、控制系统对不确定的外部干扰不敏感; 5、控制系统保证在任何现实干扰负载条件下得到闭环稳定和高性能控制; 6、控制算法简单易实现。

通过上述实施例，解决了现有技术中电机模型辨识特别是在线模型辨识极大地增加了系统的复杂程度，而且模型辨识不能保证总能得到正确的模型和模型参数，模糊控制、滑模控制、基于神经网络控制和模型参考自适应不能保证算法稳定和在任何工况负载干扰环境下稳定工作的技术问题。

上述本发明实施例序号仅仅为了描述，不代表实施例的优劣。

在本发明的上述实施例中，对各个实施例的描述都各有侧重，某个实施例中沒有详述的部分，可以参见其他实施例的相关描述。

在本申请所提供的几个实施例中，应该理解到，所揭露的技术内容，可通过其它的方式实现。其中，以上所描述的装置实施例仅仅是示意性的，例如所述单元的划分，可以为一种逻辑功能划分，实际实现时可以有另外的划分方式，例如多个单元或组件可以结合或者可以集成到另一个系统，或一些特征可以忽略，或不执行。另一点，所显示或讨论的相互之间的耦合或直接耦合或通信连接可以是通过一些接口，单元或模块的间接耦合或通信连接，可以是电性或其它的形式。

所述作为分离部件说明的单元可以是或者也可以不是物理上分开的，作为单元显示的部件可以是或者也可以不是物理单元，即可以位于一个地方，或者也可以分布到多个单元上。可以根据实际的需要选择其中的部分或者全部单元来实现本实施例方案的目的。

另外，在本发明各个实施例中的各功能单元可以集成在一个处理单元中，也可以是各个单元单独物理存在，也可以两个或两个以上单元集成在一个单元中。上述集成的单元既可以采用硬件的形式实现，也可以采用软件功能单元的形式实现。

所述集成的单元如果以软件功能单元的形式实现并作为独立的产品销售或使用，可以存储在一个计算机可读取存储介质中。基于这样的理解，本发明的技术方案本质上或者说对现有技术做出贡献的部分或者该技术方案的全部或部分可以以软件产品的形式体现出来，该计算机软件产品存储在一个存储介质中，包括若干指令用以使得一台计算机设备（可为个人计算机、服务器或者网络设备）执行本发明各个实施例所述方法的全部或部分步骤。而前述的存储介质包括：U 盘、只读存储器（ROM, Read-Only Memory）、随机存取存储器（RAM, Random Access Memory）、移动硬盘、磁碟或者光盘等各种可以存储程序代码的介质。

以上所述仅是本发明的优选实施方式，应当指出，对于本技术领域的普通技术人员来说，在不脱离本发明原理的前提下，还可以做出若干改进和润饰，这些改进和润饰也应视为本发明的保护范围。

权 利 要 求 书

1. 一种自适应交流伺服电机电流控制方法，其特征在于，包括：

获取原始电流；

将所述原始电流输入至电流矢量变换模块，生成第一目标数据；

将所述第一目标数据输入至电流控制环，同时将第一目标数据取时间导数生成第二目标数据；

将所述第二目标数据与电流控制环的输出同时输入至增量型逆动力学控制模块，并将所述增量型逆动力学控制模块的输出输入至所述电流矢量逆变换模块。

2. 根据权利要求 1 所述的方法，其特征在于，所述原始电流是原始三相交流电机电流。
3. 根据权利要求 2 所述的方法，其特征在于，所述增量型逆动力学控制模块表达式如下：

$$\Delta u_d = (u_d - u_{d0}) = L_d \left(v_d - \frac{di_d}{dt} \Big|_0 \right)$$

$$\Delta u_q = (u_q - u_{q0}) = L_q \left(v_q - \frac{di_q}{dt} \Big|_0 \right)$$

其中， Δu_d 和 Δu_q 为 d 轴和 q 轴的控制增量， v_d 和 v_q 为逆动力学控制中的虚拟控制变量， $\frac{di_d}{dt} \Big|_0$ 和 $\frac{di_q}{dt} \Big|_0$ 为电流 i_d 和 i_q 在采样点的时间导数， u_d 和 u_q 为 d 轴和 q 轴的控制输出当前采样值， u_{d0} 、 u_{q0} 分别为 d 轴和 q 轴的控制输出前一采样值， L_d 为 d 轴电感， L_q 为 q 轴电感。

4. 根据权利要求 3 所述的方法，其特征在于，所述交流伺服电机控制还包括：转速控制环、转角位置控制环。
5. 一种自适应交流伺服电机电流控制系统，其特征在于，包括：

采样模块，用于获取原始电流；

电流矢量变换模块，用于将所述原始电流输入至电流矢量变换模块，生成第一目标数据；

电流控制模块，用于将所述第一目标数据输入至电流控制环，同时将第一目标数据取时间导数生成第二目标数据；

增量型逆动力学模块，用于将所述第二目标数据与电流控制环的输出同时输入至增量型逆动力学控制模块，并将所述增量型逆动力学控制模块的输出输入至所述电流矢量逆变换模块。

6. 一种非易失性存储介质，其特征在于，所述非易失性存储介质包括存储的程序，其中，所述程序运行时控制非易失性存储介质所在的设备执行权利要求 1 至 5 中任意一项所述的方法。
7. 一种电子装置，其特征在于，包含处理器和存储器；所述存储器中存储有计算机可读指令，所述处理器用于运行所述计算机可读指令，其中，所述计算机可读指令运行时执行权利要求 1 至 5 中任意一项所述的方法。