

一种新的包装机电机算法切换系统设计

金爱娟, 唐新雯, 李少龙
(上海理工大学, 上海 200093)

摘要: **目的** 研究不同工况下包装机生产线中异步电机控制算法的在线灵活切换。**方法** 选用 2 种异步电机高性能控制策略 FOC 和 DTC 作为包装机电机算法的切换对象, 研究 2 种算法的共同基础, 得出新的 FOC_DTC 算法作为切换系统的过渡算法, 有效解决 2 种控制策略在线相互切换带来的转矩、电流突变等问题, 并且在硬件平台上与直接切换方案、重置 PI 切换方案进行对比。**结果** 在满足包装机各个工况要求的前提下, 混合 FOC_DTC 切换系统在切换响应时间、切换平滑度和切换效率上比上述 2 种方案更优越, 切换响应时间提高了 2%, 切换转矩尖峰降低了 30%。**结论** 通过使用混合 FOC_DTC 切换系统, 包装机在不同工况下可以在线实时切换动力系统电机的控制算法, 在平滑度和响应时间上比其他方案有明显的优势。

关键词: 包装机; 生产线; 异步电机; FOC_DTC; 重置 PI 切换; 在线切换算法

中图分类号: TB486 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2020)19-0172-08

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2020.19.025

Design of a New Hybrid Switching System for Packaging Machine Motor

JIN Ai-juan, TANG Xin-wen, LI Shao-long

(University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

ABSTRACT: The paper aims to study the online free switching of asynchronous motor control algorithm of packaging machine production line under different working conditions. Two high-performance control strategies FOC and DTC were selected as the switching object of the asynchronous motor algorithm of the packaging machine, and the common basis of the two algorithms was studied. A new FOC_DTC Algorithm was obtained as the transition algorithm of the switching system, which effectively solved the torque and current glitch caused by the online switching of the two control strategies. Furthermore, based on the hardware platform, the direct switching scheme and the reset PI switching scheme were compared with the proposed scheme. On the condition of meeting the requirements of all working conditions of the packaging machine, the hybrid FOC_DTC switching system had advantages over the above two schemes in switching response time, switching smoothness and switching efficiency, which improved the switching response time by 2% and reduced the switching torque peak by 30%. By using the hybrid FOC_DTC switching system, the packaging machine can switch the control algorithm of the power system motor online and real-time under different working conditions, which has obvious advantages over other schemes in smoothness and response time.

KEY WORDS: packaging machine; production line; asynchronous motor; FOC_DTC; resettable PI controller; switching algorithm online

收稿日期: 2019-12-26

基金项目: 国家自然科学基金 (11502145)

作者简介: 金爱娟 (1972—), 女, 博士, 上海理工大学副教授, 主要研究方向为控制理论、电机控制及电力电子。

随着国家工业自动化进程不断加快,包装生产过程的效率也在工业生产中愈加重要。包装工业生产由于带载不同,往往伴随着复杂的工况。尽管包装机的人机交互界面日渐友好^[1-2],机械结构也在不断优化^[3],操作人员可以根据不同工况切换包装机驱动电机的控制算法,但是考虑生产自动化的发展和人工的劳动成本,包装机若是可以在线自动切换适合当前工况的电机控制算法,生产效率则会大大提高。

磁场定向控制算法(Field Oriented Control, FOC)和直接转矩控制算法(Direct Torque Control, DTC)是最流行的异步电机控制技术,然而电机在不同工况下会不可避免地受不同工作环境的影响,此时这 2 种控制方案就各有各的优缺点^[4-6],不能同时满足各种工况的需求,所以在实际应用中需要按照不同工况切换控制方案。例如 DTC 起动性能不好,轻载和低速时容易有过流问题^[7-9],但是带载或是高速时动态响应迅速,则可以考虑在低速轻载时使用 FOC 控制,在满载和重载时使用 DTC 控制。

在包装机工作中,上述 2 种算法之间的相互直接切换对电机运行会有不同的影响。根据 2 种算法的理论基础可以知道,DTC 是定子磁链定向控制,FOC 是转子磁链定向控制,转子磁场建立与定子磁场建立在时间上存在一阶滞后的关系,因此,在电机运行中,若 DTC 直接切换到 FOC,短时间的转子磁链、定子电流是没有得到有效控制的,这会导致 FOC 中电流、转矩控制器积累比较多的误差值,在切换瞬间控制器会达到限幅值,因此会造成比较大的转矩和电流突变,转速也会受到较大的波动;若 FOC 直接切换到 DTC,由于 DTC 采用的是滞环控制,对当前误差信号有比较及时的控制效果,因此不会对电流、转矩造成比较大的突变,唯一的变化是从转子磁链控制到定子磁链控制造成的波动^[10]。陆志刚^[10]提出了一种重置 PI 控制器的切换技术,目的是在切换瞬间对 PI 控制器的参数进行重置,以此避免控制器在切换时刻以限幅值输出。这种方法极大程度地改善了切换过程,减缓了直接切换带来的变化,但是切换过程还是有明显的过渡过程和电流转矩变化,主要原因还是由于重置 PI 控制器的输出信号不完全是基于当前电机状态得到时。

文中从一种新的思路出发设计一种在线混合 FOC_DTC 切换算法,用于不同工况下的包装机电机算法切换。在基于 FOC 和 DTC 的共同特性得出新的 FOC_DTC 算法,并以此作为 FOC 和 DTC 相互切换的过渡算法。对比重置 PI 控制器切换算法和直接切换算法,没有明显的切换过程和电流转矩突变,不会改变原有 FOC 和 DTC 控制器参数,完全在线跟随电机动态变化,相当于电机只处在一种控制方案下运行。文中还在实物硬件平台上进行了不同控制方案下的实验,对比实验结果可以验证提出的设计方案的可行性和优越性。

1 重置 PI 控制器切换算法

重置 PI 控制器算法就是在切换瞬间将 PI 控制器的积分值和输出值重置为一个预设值^[10]。此方法是重置一个虚拟状态来改善 DTC 切换到 FOC 的过程,后发现对 FOC 切换到 DTC 也有减缓磁通变化的作用^[12]。主要原理:一般的 PI 控制器是单输入 e , 单输出 u , 见图 1a, 而重置 PI 控制器增加了一个触发信号输入和一个预设值信号输入, 见图 2b。切换的瞬间,触发信号把积分器的输出值重置为 X_0 ($X_0=K_p e + \text{预设值}$), 所以此时 PI 控制器的输出量为 u ($u=X_0+K_p e=\text{重置值}$)。这样,就可以在切换瞬间重置 PI 控制器的参数,同时 PI 控制器的积分状态清零。切换之后,重置 PI 控制器发挥着普通 PI 控制器的作用。重置的对象主要是 FOC 中的磁链和电流控制器。

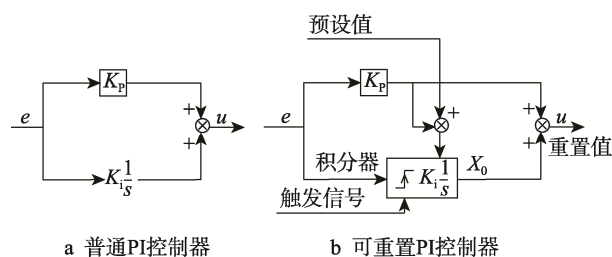


图 1 普通 PI 控制器及可重置 PI 控制器
Fig.1 The common and resettable PI controller

图 1 中, K_p , K_i 分别为控制器中的比例和积分参数。重置 PI 切换算法是一种有效的异步电机切换算法,每次切换需要对控制器的积分参数进行清零和重置,减缓了直接切换时由于控制器以限幅值输出带来的电流和转矩的突变。尽管 PI 控制器经过重置之后能够避免以限幅值输出,但此时 PI 控制器已经不完全是基于电机当前状态计算得出的控制器输出信号,对控制当前状态的电机有些许偏差,因此仍可能存在明显的切换突变和切换过程。

2 混合 FOC_DTC 切换算法

2.1 FOC 和 DTC 的共同基础

尽管 DTC 和 FOC 控制方案有不同的实现方式,但它们有些许共同点^[13-15],可以作为混合切换方案的特性。

异步电机定子磁链在 DTC 电压矢量控制下的变化见图 2。图 2 中, θ 为定子磁链和转子磁链的夹角; $\Delta\phi_s$ 为定子磁链的变化。

在 1 个逆变器开关周期 Δt 内,转子磁链保持为常量,因为转子时间常数比定子时间常数大得多。定子磁链从 $\phi_s(t)$ 到 $\phi_s(t+\Delta t)$, 变化量 $\Delta\phi_s$ 有 2 个分量,控制磁链变化的径向分量 $\Delta\phi_r$ 和控制转矩变化的切

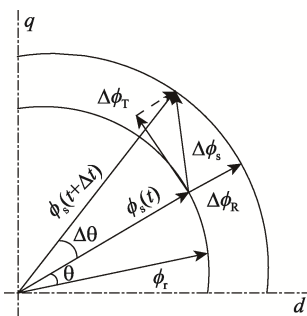


图 2 DTC 定子磁链变化

Fig.2 Variation of stator flux linkage in DTC

向分量 $\Delta\phi_T$ 。根据 DTC 的转矩表达式可得转矩变化 ΔT :

$$\Delta T = K_T |\phi_r| (|\phi_s(t+\Delta t)| \sin(\theta + \Delta\theta) - |\phi_s(t)| \sin\theta) \quad (1)$$

其中, 当 $\Delta\theta$ 足够小的时候, 有:

$$\sin(\theta + \Delta\theta) = \sin\theta + \cos\theta \sin\Delta\theta \quad (2)$$

$$\sin\Delta\theta = \frac{\Delta\phi_T}{|\phi_s(t+\Delta t)|} \quad (3)$$

$$|\phi_s(t+\Delta t)| = |\phi_s| + \Delta\phi_R \quad (4)$$

将式 (2—3) 代入 (1) 可得:

$$\Delta T = K_T |\phi_r| \left(\Delta\phi_T \cos\theta + \Delta\phi_R \sin\theta + \frac{\Delta\phi_T \Delta\phi_R}{|\phi_s|} \cos\theta \right) \quad (5)$$

由于式 (5) 中的 $\Delta\phi_R \sin\theta$ 和 $\frac{\Delta\phi_T \Delta\phi_R}{|\phi_s|} \cos\theta$ 比较小,

因此式 (5) 可以重新写为:

$$\Delta T = K_T |\phi_r| \Delta\phi_T \cos\theta \quad (6)$$

对于 DTC 而言, 转子磁链幅值 $|\phi_r|$ 是个常数, K_T 也是个常数, 当 θ 变化极小时, $\cos\theta \approx 1$, 因此, 综上所述, 可以得到:

$$\Delta T \propto \Delta\phi_T \quad (7)$$

从图 2 和式 (4) 可以看出, 定子磁链矢量的幅值变化为:

$$\Delta|\phi_s| = \Delta\phi_R \quad (8)$$

在忽略定、转子磁链 (ϕ_s , ϕ_r) 之间的一阶滞后有:

$$|\Delta\phi_r| = \Delta\phi_R \quad (9)$$

结合式 (8) 和式 (9) 可以得到:

$$|\Delta\phi_s| = |\Delta\phi_r| = \Delta\phi_R \quad (10)$$

根据 FOC 的理论可以知道, d 轴定子电流分量和 q 轴定子电流分量分别控制电机的磁链和转矩。在 DTC 中, 根据式 (7) 和式 (10) 可得电机转矩的变化和定子磁链幅值的变化分别与定子磁链的切向和径向分量有关, 故总结可得:

$$\begin{cases} \Delta\phi_R \propto \Delta i_d \\ \Delta\phi_T \propto \Delta i_q \end{cases} \quad (11)$$

式中: i_d , i_q 分别为定子电流 d 轴和 q 轴的电流

分量。

同样的, 在 FOC 控制理论中, 当转子磁链幅值恒定时, 有关系式:

$$\begin{cases} |\phi_r| = k_d i_d \\ T = k_q i_q \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} |\phi_r| \propto i_d \\ T \propto i_q \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \Delta\phi_r \propto \Delta i_d \\ \Delta T \propto \Delta i_q \end{cases} \quad (12)$$

式中: Δ 为微小的变化量; k_d 和 k_q 为常量。

式 (11) 和式 (12) 表明了 DTC 和 FOC 的 2 个相似特性, DTC 中的定子磁链切向分量 ϕ_T 与 FOC 中的定子电流的交轴分量 i_q 成正比; 同样地, DTC 中磁链的径向分量 ϕ_R 与 FOC 的磁链电流中的直轴分量 i_d 成正比。 ϕ_T 和 ϕ_R 在 DTC 中分别控制转矩和磁链大小, 在 FOC 中通过计算包括转差频率在内的角度 θ_s 来提高控制精度。如果在逆变器控制中增加开关矢量的数量, 提高开关频率, 那么这 2 种控制策略的 2 个相似特性就愈明显。事实上, 现在很多对速度和精度要求高的工业场合都需要相当高的开关频率和相当多的开关矢量, 除此之外, 运算能力不断提高的微处理器也为这 2 种控制策略的同时运行提供了计算条件。

2.2 混合 FOC_DTC 切换算法

根据 FOC 和 DTC 的共同理论基础可以得到一种新的 FOC_DTC 控制算法。它结合了 DTC 和 FOC 的优点, 可以为控制系统提供理想的性能和简单的实现。在文中的切换系统中, FOC_DTC 算法则作为切换算法的过渡过程。

混合 FOC_DTC 切换算法系统框图见图 3, 其中包括有 FOC_DTC 算法的系统框图。图 3 中, U_d 为逆变器的母线供电电压; e_d , e_q 分别为定子电流 d 轴和 q 轴的期望电流分量和实际电流分量的差值; i_{abc} , u_{abc} 分别为电机三相电流和三相线电压; i_α , i_β 和 u_α , u_β 分别为电机三相电流和三相线电压 α 轴和 β 轴的分量; ω^* , ω 分别为期望电机转速和实际电机转速; G1, G2 和 G3 分别为 DTC、FOC 和 FOC_DTC 策略的开关信号。

FOC 中经过坐标变换后的 d 轴和 q 轴的实际定子电流分量和期望的定子电流分量比较之后的误差信号, 分别送入 DTC 中的磁链和转矩滞环控制器, 作为控制器的输入。控制器的输出则作为开关矢量选择表的输入, 从中选择合适的电压矢量作为逆变器的开关信号。综上所述, FOC_DTC 算法就是一个直接转矩控制类型的通过电压矢量选择电流矢量控制系统, 具备 FOC 和 DTC 的特性。将此算法作为异步电机 FOC 和 DTC 切换过程的过渡算法, 可不需要重置 PI 参数来达到在线平滑切换控制策略的目的。

2.3 混合切换算法系统设计

基于上述 FOC_DTC 的算法理论, 结合 FOC 和 DTC 控制策略的优缺点, 文中设计一种混合 FOC_DTC

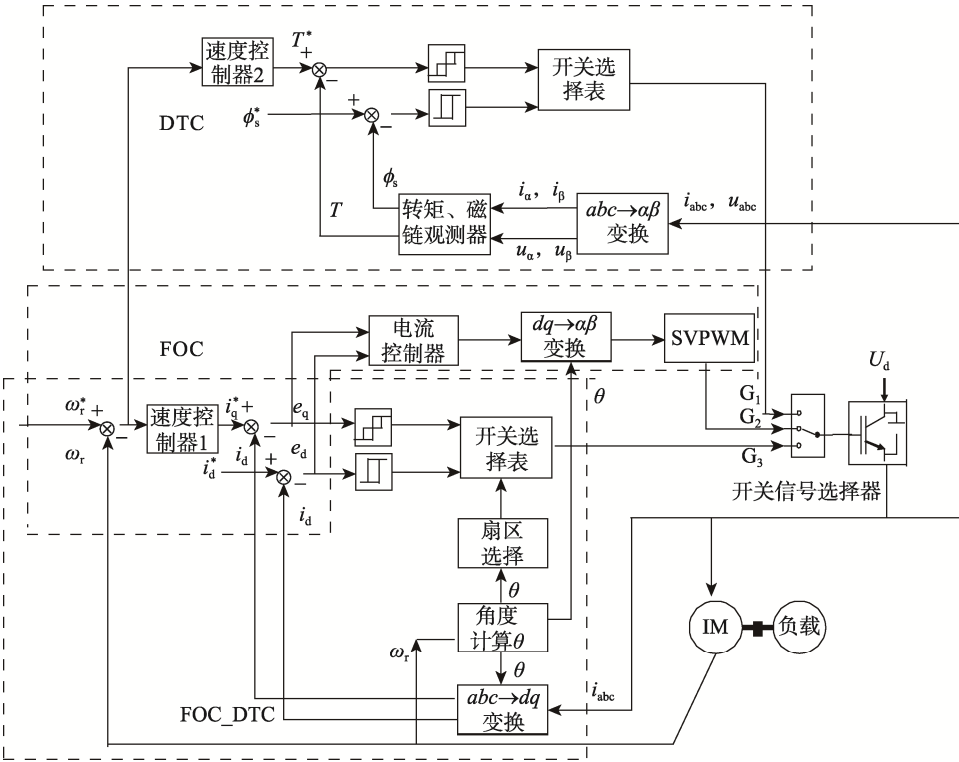


图 3 混合切换算法系统
Fig.3 Block diagram of hybrid switching algorithm

异步电机切换算法来实现异步电机在线平滑切换，并对比重置 PI 控制器切换算法来体现优越性。具体实现方法如下：当异步电机在启动时以及异步电机在带轻载负载运行时，采用 FOC 控制策略；当异步电机在带重载负载运行时，采用 DTC 控制策略；FOC 和 DTC 的在线双向切换过程使用混合 FOC_DTC 算法作为切换过度算法，不需要重置任何参数。

异步电机负载的定义：负载电流略大于额定电流视为重载，约为额定电流为满载，小于额定电流的 2/3 为轻载，小于额定电流的 1/2 为空载。异步电机的中低高速度没有明确地分类，主要根据电机的应用场合具体区分。在文中系统中，电机的负载，即电机的负载电流作为控制算法切换时刻的主要判断依据。

验证算法的实验装置见图 4，共由 4 部分组成：XPC 目标控制器，包含了主微控制处理器系统，运行设计的算法和接收、实时显示反馈的速度、电机线电压和相电流信号；三相逆变器+实时采集系统，将控制器的控制信号转为逆变器的开关信号，并且通过实时采集系统采集电机的速度、线电压和相电流信号；

三相异步电机+直流电机负载，验证电机在不同工况下不同控制策略的控制性能，电机参数见表 1；电脑，在 Matlab/Simulink 编程环境下生成代码并显示反馈波形。

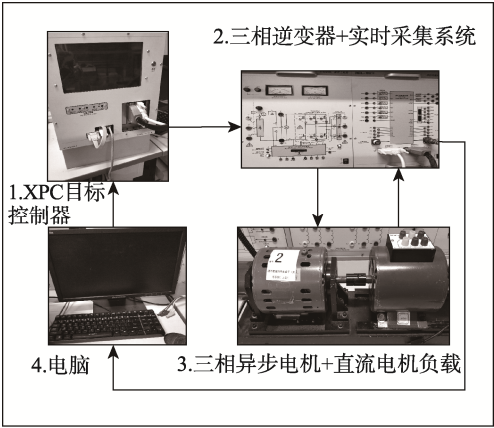


图 4 混合切换算法实验系统
Fig.4 Experimental setup of hybrid switching algorithm

表 1 异步电机参数
Tab.1 Parameters of asynchronous motor

功率/ kW	线电压/V	极对数	转动惯量/ (kg·m ²)	频率/Hz	定子电阻/Ω	定子电感/mH	转子电阻/Ω	转子电感/mH	互感/mH
1.5	24	2	0.003 374	100	0.0129	2.002	1.012	0.0181	0.852

切换系统的算法流程见图5。当程序开始之后,异步电机在FOC控制策略下完成启动,根据 $t(k)$ 时刻计算的电压、电流及转速值,3种控制方案得出了在 $t(k)$ 时刻时的开关信号。依据异步电机负载的定义,通过电流大小判断异步电机是否在轻载或是重载情况下运行,如若电机在轻载或轻载以下运行,电机仍然选择FOC下的开关信号,如若电机在轻载以上运行,使用DTC下的开关信号。同时,若 $t(k)$ 时刻即将选择的开关策略和 $t(k-1)$ 时刻选择的开关策略不同,先选择FOC_DTC下的开关信号作为过渡信号,再切换到即将选择的开关策略。

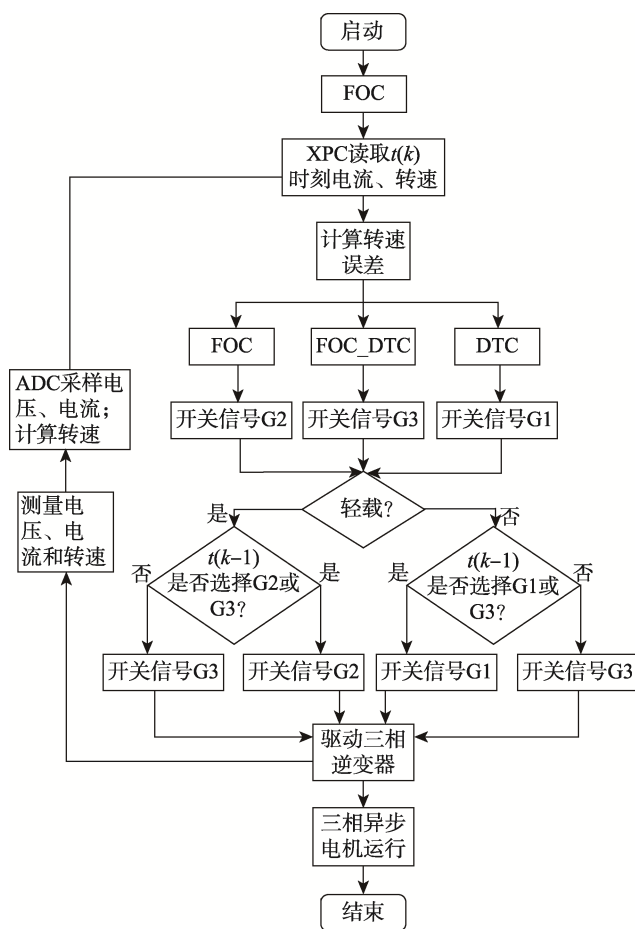


图5 混合切换算法系统流程
Fig.5 Flow chart of hybrid switching algorithm

3 重置PI控制器切换算法实验结果

以下将通过实验对设计的系统进行验证,实验结果是根据实时采集系统传回XPC目标控制器的数据绘制的。具体工况如下:待异步电机调速系统达到额定转速2800 r/min并完成启动后的0.1 s,加负载2 N·m,0.2 s后加5 N·m重载,0.1 s后空载。基于此工况下的直接切换、重置PI切换和混合切换方案的实验结果见图6—9。

异步电机A相电流响应见图6和图7,图7为图6中1—6部分细节放大图。图7a, c, e分别为3种方案下由2 N·m轻载加到5 N·m重载时电流响应图;图7b, d, f分别为3种方案下由5 N·m重载减少至空载时电流响应图。启动后的0.1 s加轻载2 N·m,依据切换原则,轻载状况下,仍然选择FOC控制算法,因此在轻载工况的0.2 s中,3种方案下的电流响应波形一致,见图6。

0.2 s后,工况由2 N·m轻载加到5 N·m重载,此时应该由FOC策略切换到DTC策略。如图7a, c, e所示,切换过程比较平滑。从图8的转矩响应图也可以看出,轻载到重载的控制策略切换过程整体比较稳定和平滑。这说明了即使是FOC直接切换到DTC,由于DTC的滞环控制器比较及时和迅速,切换带来的突变还是比较小的。仔细观察图8的转矩波形,直接切换方案的转矩有向下0.6 N·m的尖峰,重置PI切换方案有向下0.4 N·m的尖峰,而混合切换方案在切换时刻没有明显的尖峰,并且转矩达到稳定的时间是最快的。

0.1 s后,工况由5 N·m重载减少至空载,此时应该由DTC策略切换回FOC策略。根据前面的分析,由于在切换时刻无法控制FOC电流控制器以限幅值输出,DTC切换FOC会带来比较大转矩和电流突变。如图6和图7b所示,直接切换电流突变很大,正弦性差,甚至还混有明显的直流分量。图8的转矩响应

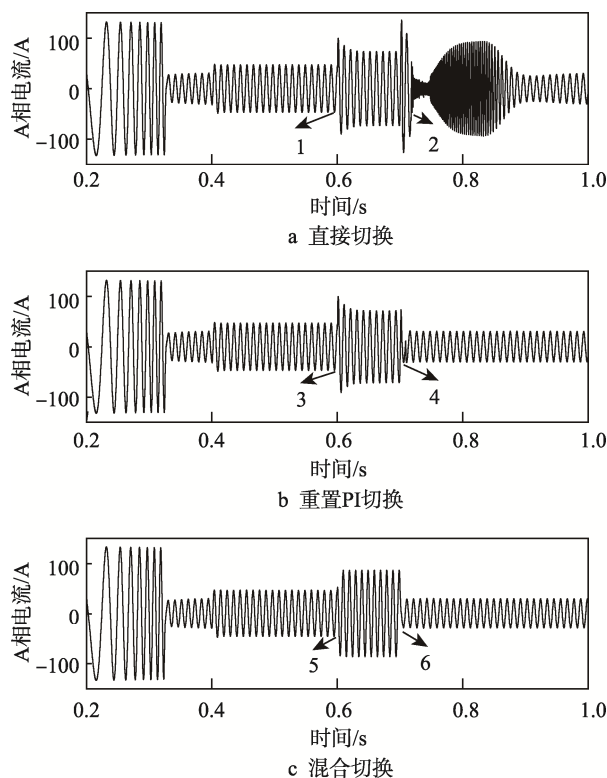


图6 A相电流响应
Fig.6 Current response of phase A

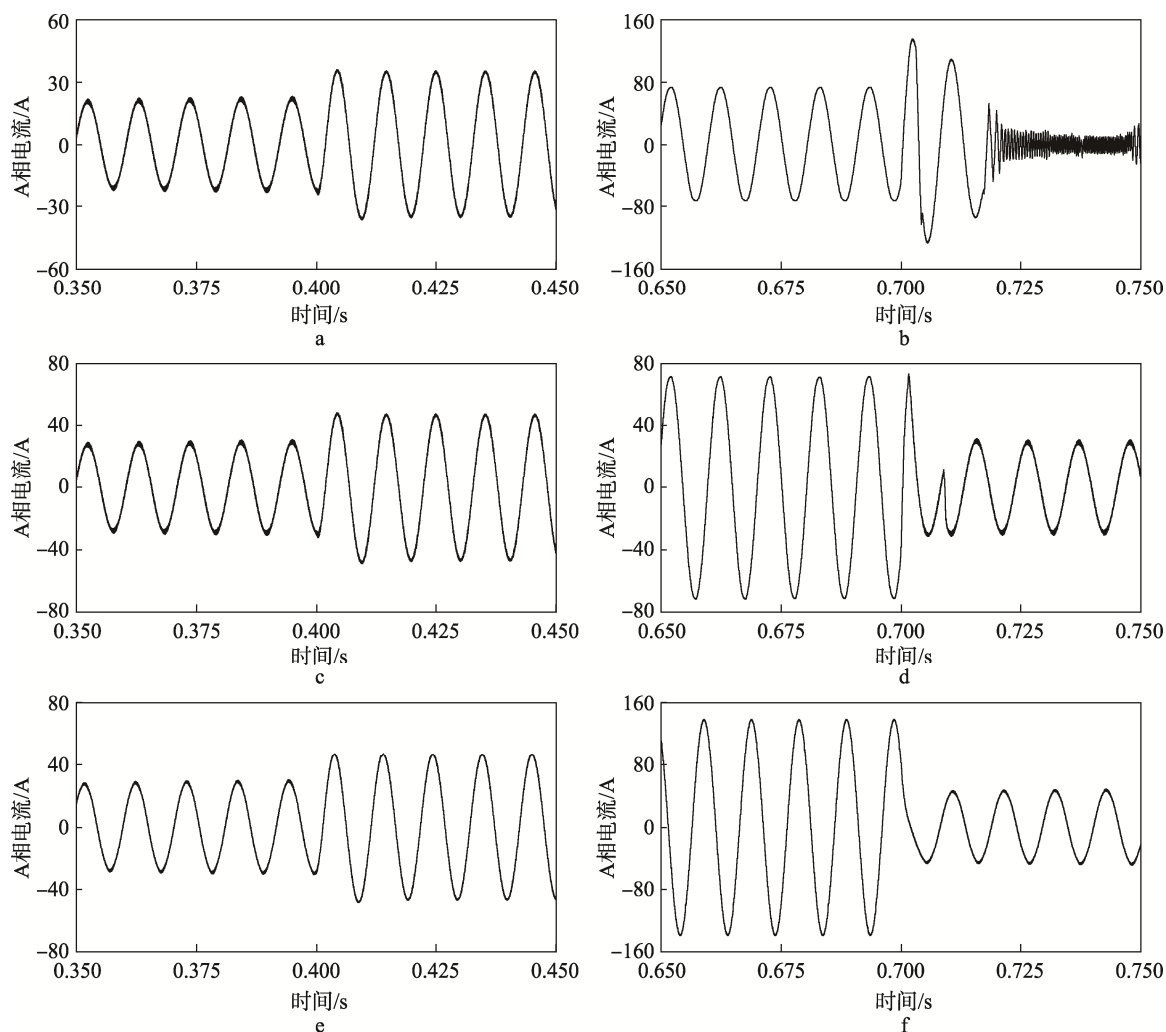


图 7 A 相电流响应细节
Fig.7 Detailed current response of phase A

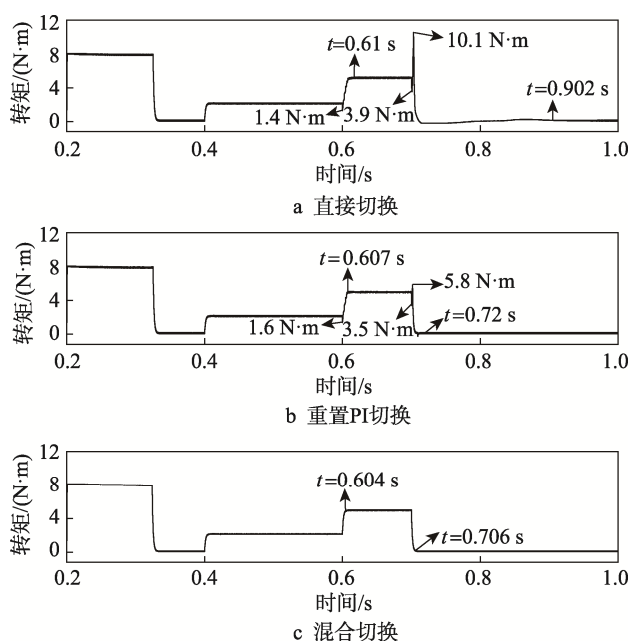


图 8 转矩响应
Fig.8 Torque response

中, 切换时刻的转矩尖峰达到负载转矩的 2 倍之多, 达到稳态耗时比较长, 这在实际系统中容易导致电机过流。重置 PI 切换方案下, 电流和转矩突变明显减小很多, 正弦性明显。但是切换过程仍然比较明显, 切换时刻有 16%~30% 的尖峰, 如图 8 中重置 PI 切换下的转矩响应。相比之下, 混合切换控制方案下的切换过程比较平滑且无突变, 也没有转矩尖峰, 达到稳定的时间也比较快, 比重置 PI 切换方案快 2%。

在 3 种切换方案下的定子磁链圆变化见图 9, 其中①—⑤表示磁链的切换路径。期望的定子磁链幅值为 0.0414 Wb。定子磁链圆内部不同半径的同心圆越多, 说明定子磁链幅值变化越频繁。如图 9 的直接切换方案下的定子磁链圆变化, 图 9 中的“切换路径”比较多, 这也间接表明了切换过程突变比较多, 切换不够平滑。相比之下重置 PI 切换的磁链圆更“简洁”, 同心圆较少, 切换过程较少。混合切换方案磁链圆的“切换路径”则更少, 只有 2 次切换, 说明在此工况下混合切换方案的效率和平滑度最高。

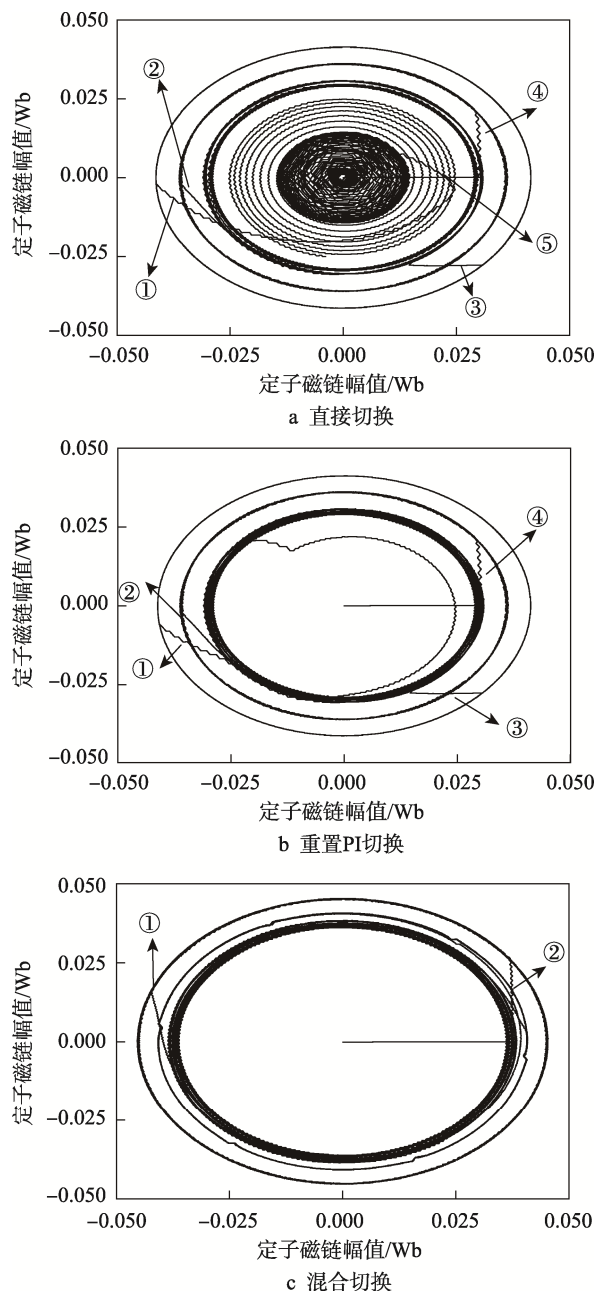


图9 定子磁链响应
Fig.9 Stator flux linkage response

4 结语

针对包装机动力系统中的异步电机在不同工况下需要切换控制策略的情况,选用了2种高性能FOC和DTC控制策略作为异步电机控制策略的切换对象并且设计了混合FOC_DTC切换方案。根据FOC和DTC共同理论基础得出的FOC_DTC算法作为混合切换方案在切换过程的过度算法,有效解决了2种控制策略相互切换,特别是从DTC切换至FOC时带来的转矩、电流突变,并且在硬件平台上与直接切换方案、重置PI切换方案进行了对比。实验结果表明,在满足工况要求的前提下,混合FOC_DTC切换方案

在切换响应时间、切换平滑度和切换效率上均比上述2种方案优越,对于应用于包装机电机切换系统有着借鉴意义。

参考文献:

- [1] 何舒姝,李世国,吴乃奇. 高速 Stick 多列充填包装机的交互界面设计[J]. 包装工程, 2015, 36(4): 80—83.
HE Shu-shu, LI Shi-guo, WU Nai-qi. The Interface Design of High Speed Stick Multi-row Filling and Packaging Machine[J]. Packaging Engineering, 2015, 36(4): 80—83.
- [2] 史小龙,李晓玲,高虹霓,等. 全息显控界面中多通道人机交互技术研究[J]. 包装工程, 2016, 37(4): 120—127.
SHI Xiao-long, LI Xiao-ling, GAO Hong-ni, et al. Research on Multi-channel Human-computer Interaction Technology in Holographic Display and Control Interface[J]. Packaging Engineering, 2016, 37(4): 120—127.
- [3] 刘瑞歌,宋锋,刘雪涛. 全自动水果包装机的设计[J]. 机电工程技术, 2017, 46(9): 79—81.
LIU Rui-ge, SONG Feng, LIU Xue-tao. Design of Automatic Fruit Packing Machine[J]. Electromechanical Engineering Technology, 2017, 46(9): 79—81.
- [4] KORKMAZ F, TOPALOĞLU İ, ÇAKIR M F, GÜRBÜZ R, et al. Comparative Performance Evaluation of FOC and DTC Controlled PMSM Drives[C]// Fourth International Conference on Power Engineering, Istanbul, 2013: 705—708.
- [5] 李耀华,刘晶郁,张德鹏,等. 永磁同步电机 FOC/DTC 系统启动方法研究[J]. 电气传动自动化, 2012, 34(5): 16—19.
LI Yao-hua, LIU Jing-yu, ZHANG De-peng, et al. Research on Start-up Method of Permanent Magnet Synchronous Motor FOC/DTC System[J]. Electric Drive Automation, 2012, 34(5): 16—19.
- [6] 卡萨蒂,郑洪涛. 异步电动机矢量控制(FOC)和直接转矩控制(DTC)方案的比较[J]. 变流技术与电力牵引, 2004(2): 11—16.
CASADEI D, ZHENG Hong-tao. Comparison of Vector Control (FOC) and Direct Torque Control (DTC) Schemes for Induction Motors[J]. Converter Technology and Electric Traction, 2004(2): 11—16.
- [7] 范文进,郑琼林,杨中平,等. 基于连续型定子磁链轨迹的异步牵引电机低转矩脉动控制算法[J]. 电工技术学报, 2015, 30(12): 228—236.
FAN Wen-jin, ZHENG Qiong-lin, YANG Zhong-ping.

- Low Torque Ripple Control Algorithm of Asynchronous Traction Motor Based on Continuous Stator Flux Trajectory[J]. Journal of Electrical Technology, 2015, 30(12): 228—236.
- [8] 李政学, 张永昌, 李正熙, 等. 异步电机新型占空比直接转矩控制方案[J]. 电工技术学报, 2015, 30(24): 23—31.
- LI Zheng-xue, ZHANG Yong-chang, LI Zheng-xi, et al. A New Duty Cycle Direct Torque Control Scheme for Induction Motor[J]. Journal of Electrical Technology, 2015, 30(24): 23—31.
- [9] 姚绪梁, 曾俊, 张燕, 等. 无刷直流电机直接转矩控制的新型零矢量研究[J]. 电气传动, 2017(3): 3—7.
- YAO Xu-liang, ZENG Jun, ZHANG Yan, et al. Research on New Zero Vector of Direct Torque Control for BLDCM[J]. Electric Drive, 2017(3): 3—7.
- [10] 陆志刚. 异步电机调速系统的混合控制方法[D]. 北京: 清华大学, 2004: 36—42.
- LU Zhi-gang. Hybrid Control Method of Asynchronous Motor Speed Control System[D]. Beijing: Tsinghua University, 2004: 36—42.
- [11] 蒋金星. 基于自适应磁链观测器的异步电动机 FOC 与 DTC 切换控制研究[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2008: 62—77.
- JIANG Jin-xing. Research on FOC and DTC Switching Control of Asynchronous Motor Based on Adaptive Flux Observer[D]. Qingdao: Qingdao University of Science and Technology, 2008: 62—77.
- [12] 邹会权. 电动汽车用异步电机混合控制系统的研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2012: 39—41.
- ZOU Hui-quan. Research on Hybrid Control System of Asynchronous Motor for Electric Vehicle[D]. Nanchang: Nanchang University, 2012: 39—41.
- [13] VAEZ-ZADEH S, JALALI E. Combined Vector Control and Direct Torque Control Method for High Performance Induction Motor Drives[J]. Energy Conversion and Management, 2007, 48(12): 3095—3101.
- [14] SURYAWANSHI H M, PATIL U V, RENGE M M, et al. Modified Combined DTC and FOC Based Control for Medium Voltage Induction Motor Drive in SVM Controlled DCMLI[J]. EPE Journal, 2013, 23(4): 23—32.
- [15] FARASAT M, TRZYNADLOWSKI A M, FADALI M S. Efficiency Improved Sensorless Control Scheme for Electric Vehicle Induction Motors[J]. IET Electrical Systems in Transportation, 2014, 4(4): 122—131.