

# 包装印刷用永磁同步电机控制及 无速度传感器控制技术综述

doi:10.3969/j.issn.1674-7100.2017.01.003

赵凯辉 何 静  
李祥飞 黄 刚

湖南工业大学  
电气与信息工程学院  
湖南 株洲 412007

**摘 要:** 对包装印刷用永磁同步电机控制方式及无速度传感器控制技术进行了综述。首先,介绍了适合包装、印刷机械行业的永磁同步电机(PMSM)矢量控制系统的主要控制方式;然后,采用霍尔茨教授的无速度传感器控制2大类分类方法对永磁同步电机无速度传感器控制技术进行了分类,介绍了各种永磁同步电机无速度传感器控制方法的工作原理,详细分析了其优缺点;最后展望了包装印刷用永磁同步电机控制和无速度传感器控制在包装印刷领域的应用前景。

**关键词:** 永磁同步电机;无速度传感器控制;矢量控制

**中图分类号:** TM351 **文献标志码:** A

**文章编号:** 1674-7100(2017)01-0013-08

## 0 引言

《中国制造2025》提出,应大力推广自动化功能包装、高通量检测及分级包装等设备的应用<sup>[1]</sup>。这对包装、印刷机械的性能提出了更高要求。电机是包装、印刷机械的核心部件,通常分为2类:1)用于拖动机械完成生产任务的动力电机;2)作为自动控制系统中执行元件、检测元件用的伺服控制电机。永磁同步电机(permanent magnet synchronous motor, PMSM)因具有体积小、功率因数高、响应快、易于维护等优点<sup>[2-3]</sup>,而成为包装、印刷机械用电机的主流。合理的控制策略能提高永磁同步电机的精度,并实时动态响应<sup>[4]</sup>。因此较多学者对永磁同步电机控制方法

进行了研究,给出了自动套印控制系统<sup>[5]</sup>、基于虚拟总轴同步控制技术的无轴传动印刷机<sup>[6]</sup>等。直接转矩控制(direct torque control, DTC)和矢量控制(vector control)是永磁同步电机控制系统的主要控制方法。

无速度传感器控制省去了机械传感器装置<sup>[7]</sup>,降低了机械故障率,减小了电机体积,减少了转子转动惯量,提高了系统可靠性,降低了系统成本<sup>[8]</sup>。因此,无速度传感器控制技术成为了电机领域的研究热点。国内外学者对该控制技术进行了大量研究,提出了各种方法,这些方法各有优缺点,适用于不同的应用场合。因此,本文拟对永磁同步电机控制方法和无速度传感器控制技术的现状进行综述,并对包装印刷用永磁同步电机进行展望。

收稿日期:2016-11-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61473117, 61273157),湖南省自然科学基金资助项目(2016JJ5012),湖南省教育厅科学研究基金资助重点项目(16A058),湖南省高校产业化培育基金资助项目(13CY018)

作者简介:赵凯辉(1973-),男,陕西富平人,湖南工业大学副教授,博士,主要从事永磁电机智能控制方面的研究,  
E-mail: kh.zhao@163.com

通信作者:何 静(1971-),女,广东开平人,湖南工业大学教授,博士,主要从事非线性控制及应用方面的研究,  
E-mail: hejing@263.net

# 1 永磁同步电机控制方法

## 1.1 直接转矩控制

直接转矩控制也称为直接自控制 (direct self-control, DSC), 是由 A. B. Piunkett 于 1977 年提出的。1985 年, 德国的 M. Depenbrock<sup>[9]</sup> 教授和日本的 I. Takahashi<sup>[10]</sup> 教授分别实现了直接转矩控制。DTC 是在两相静止  $\alpha-\beta$  坐标系, 通过控制定子磁链来实现转矩的直接控制, 其优点是省去了坐标变换且受电机参数变化的影响较小, 提高了系统的快速响应能力, 可以直接控制电机的输出转矩和运行状态。但直接转矩控制没有改变 PMSM 系统的非线性特征, 转矩控制与定子磁链控制间存在耦合。由于没有电流闭环控制, 负载突变时控制系统会产生很大的瞬态电流。因此, DTC 只能用于调速范围窄、转矩脉动要求低的场合, 不适合用于包装、印刷机械<sup>[11-12]</sup>。

## 1.2 矢量控制

矢量控制也称转子磁场定向控制 (field oriented control, FOC) 或解耦控制, 由 F. Blaschke 博士于 20 世纪 60 年代提出。矢量控制的工作原理是: 磁场定向方向在  $d$  轴, 通过  $d-q$  旋转坐标变换, 把定子电流矢量  $i_s$  分解为互相垂直、彼此独立的直轴电流  $i_d$  (励磁电流) 和交轴电流  $i_q$  (电枢电流), 分别控制励磁电流和电枢电流, 达到控制电机转矩的目的, 从而使非线性耦合解耦。PMSM 矢量控制系统可以获得与直流调速系统相媲美的控制效果。虽然坐标变换和转子位置检测增加了控制系统的复杂性<sup>[11-12]</sup>, 但矢量控制是连续控制, 理论上转矩没有脉动, 调速范围更广, 因此能满足包装、印刷机械电机控制系统要求。

包装、印刷机械 PMSM 闭环矢量控制系统主要有转速闭环矢量控制系统、位置转速闭环矢量控制系统、转矩闭环矢量控制系统等。

### 1) 转速闭环矢量控制系统

转速闭环矢量控制系统是通过转速、电流双闭环间接控制 PMSM 的输出转矩。其原理如图 1 所示, 图中,  $n^*$  为转速给定值,  $n$  为转速实际值,  $\Delta n$  为转速偏差,  $i_{dq}^*$  为  $d-q$  轴电流给定值,  $i_{dq}$  为  $d-q$  轴电流实际值,  $\Delta i_{dq}$  为  $d-q$  轴电流偏差, 外环为速度环, 内环为电流环。该控制系统的工作原理是进行速度闭环控制, 首先将速度给定值与速度实际值的差值送入转速控制器, 然后由转速控制器的输出调节电流控制器, 再由电流控制器的输出采用合适的策略控制逆变

器, 从而控制电机的电压, 并适时调节电机的转矩, 使输出转速跟踪转速给定值, 电机的转矩必须为保持该速度而调整。转速闭环矢量控制系统通常被用于包装、印刷机械的动力电机控制。

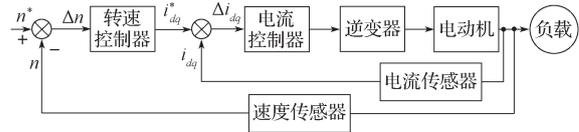


图 1 永磁电机转速闭环矢量控制系统原理图

Fig. 1 Schematic diagram of PMSM speed closed loop vector control system

### 2) 位置-转速闭环矢量控制系统

位置-转速闭环矢量控制系统的原理如图 2 所示。图中,  $\theta^*$  为转子位置角给定值,  $\theta$  为转子位置角实际值,  $\Delta\theta$  为转子位置角偏差。

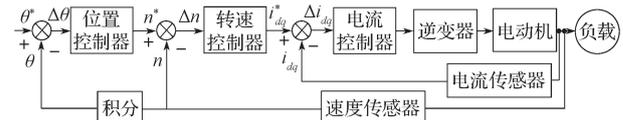


图 2 永磁电机位置-转速闭环矢量控制系统原理图

Fig. 2 Schematic diagram of PMSM position, speed closed loop vector control system

位置-转速闭环矢量控制系统有位置、速度和电流 3 个闭环。与转速闭环矢量控制系统相比, 位置-转速闭环矢量控制增加了转子位置的控制, 将位置控制器作为外环控制器, 较好地实现了转子位置的精确定位。即使在负载转矩变化较大时, 该系统也能平稳运行, 动态响应速度快, 电磁转矩纹波系数小。高精度的位置伺服电机经常采用此种控制方式。

### 3) 转矩闭环矢量控制系统

转矩闭环矢量控制系统的原理如图 3 所示。图中,  $T^*$  为转矩给定值,  $T$  为转矩实际值,  $\Delta T$  为转矩偏差。此系统只有转矩闭环和电流闭环, 以控制电机的输出转矩为目的。与转速闭环矢量控制系统相比, 其优点是减小了转矩脉动。

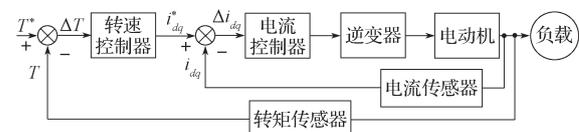


图 3 永磁电机转矩闭环矢量控制系统原理图

Fig. 3 Schematic diagram of PMSM torque closed loop vector control system

为防止超速, 高性能的永磁同步电机转矩闭环矢量控制系统一般要设置速度外环, 形成转速-转矩

闭环矢量控制系统, 如图 4 所示。

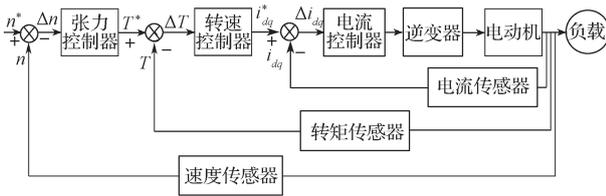


图 4 永磁电机转速-转矩闭环矢量控制系统原理图

Fig. 4 Schematic diagram of PMSM speed, torque closed loop vector control system

转矩闭环矢量控制系统包含 3 个闭环, 最外层是速度闭环, 其次是转矩闭环, 最内层是电流环。因负载转矩的直接测量成本较高, 且其受机械传感器的响应速度和精度的影响较大, 在线观测转矩是现实可行的解决方案<sup>[7]</sup>。与转速闭环矢量控制系统相比, 转速、转矩闭环矢量控制减小了转矩脉动, 可保证在负载波动或供电电压波动时系统具有快速的动态性能, 因此更适用于对材质的受力有严格要求的包装、印刷机械装置中。

## 2 无速度传感器控制

无速度传感器控制技术无需速度检测装置, 增加了系统可靠性, 降低了系统成本, 因此成为永磁电机控制领域的研究热点, 在许多工业场合都有着极其重要的意义。

上海大学陈伯时教授和清华大学杨耕教授提出了无速度传感器电机调速系统获得转速信号的 3 条思路<sup>[13-14]</sup>。德国伍普脱大学 (University of Wuppertal) 霍尔茨教授 (J. Holtz)<sup>[15]</sup>总结了无速度传感器控制方法, 把它归纳成 2 大类 6 种方法<sup>[13-14]</sup>。陈伯时教授在文献 [16] 中指出了其分析的 3 条思路与霍尔茨教授的 2 类分类方法思路一致。浙江大学赵光宙教授按照控制思路的不同把无速度传感器控制划分为 3 类: 基于观测器的方法、高频电流或电压信号注入法、基于人工智能理论的方法<sup>[17]</sup>。清华大学李永东教授把 PMSM 无速度传感器控制方法分为 3 类: 基于电机基波模型的开环计算方法、基于电机基波模型的闭环算法和基于电机凸极特性的高频注入法<sup>[7]</sup>。

国际上一般采用霍尔茨教授所提出的将无速度传感器控制分为 2 类的方法<sup>[18]</sup>: 一类是基于电机基波模型的方法; 另一类是基于电机凸极特性的方法。本文采用这种分类方法简述永磁同步电机无速度传感器控制。

### 2.1 基于电机基波模型的方法

基于电机基波模型的方法假定气隙正弦磁通密度分布, 忽略空间谐波等的影响, 利用 PMSM 基波模型和测量的定子电流、定子电压估计转子速度和位置。基于反电动势的方法都是基于电机基波模型, 利用电机方程中的反电动势项来获取转子转速和位置。

#### 1) 利用电机模型直接计算方法

利用电机模型直接计算方法利用检测到的永磁电机定子电压和定子电流来计算转子的位置和转速, 是基于电机数学模型的开环估计方法。

以定子电流为状态变量, 表贴式永磁同步电机 (surface permanent magnetic synchronized motor, SPMSM) 的数学模型<sup>[11-12]</sup>为

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{\alpha} \\ i_{\beta} \end{bmatrix} = -\frac{R_s}{L_s} \begin{bmatrix} i_{\alpha} \\ i_{\beta} \end{bmatrix} + \frac{1}{L_s} \begin{bmatrix} u_{\alpha} \\ u_{\beta} \end{bmatrix} - \frac{\omega_e}{L_s} \psi_r \begin{bmatrix} -\sin \theta_e \\ \cos \theta_e \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式 (1) 中:  $i_{\alpha}$ 、 $i_{\beta}$  分别为定子电流在  $\alpha$ - $\beta$  轴的分量;

$R_s$  为定子相电阻;

$L_s$  为 SPMSM 的定子等效电感;

$u_{\alpha}$ 、 $u_{\beta}$  分别为电压在  $\alpha$ - $\beta$  轴的分量;

$\omega_e$  为转子电角速度;

$\psi_r$  为永磁磁链幅值;

$\theta_e$  为转子电角度。

反电动势  $e_{\alpha}$ 、 $e_{\beta}$  为

$$\begin{cases} e_{\alpha} = -\omega_e \psi_r \sin \theta_e = u_{\alpha} - R_s i_{\alpha} - L_s \frac{di_{\alpha}}{dt} \\ e_{\beta} = \omega_e \psi_r \cos \theta_e = u_{\beta} - R_s i_{\beta} - L_s \frac{di_{\beta}}{dt} \end{cases}, \quad (2)$$

转子电角度的估算值  $\hat{\theta}_e$  可以由如下式 (2) 进行确定<sup>[11-12]</sup>, 即

$$\hat{\theta}_e = \arctan \left( \frac{-u_{\alpha} + R_s i_{\alpha} + L_s \frac{di_{\alpha}}{dt}}{u_{\beta} - R_s i_{\beta} - L_s \frac{di_{\beta}}{dt}} \right). \quad (3)$$

对于插入式和内置式 PMSM, 定子电压的矢量方程<sup>[11-12]</sup>为

$$\begin{bmatrix} u_{\alpha} \\ u_{\beta} \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} i_{\alpha} \\ i_{\beta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} pL_d & \omega_e (L_d - L_q) \\ -\omega_e (L_d - L_q) & pL_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\alpha} \\ i_{\beta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_{0x\alpha} \\ e_{0x\beta} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式 (4) 中:  $p$  为微分算子;

$L_d$ 、 $L_q$  分别为定子  $d$ - $q$  轴的等效电枢电感;

$e_{0x\alpha}$ 、 $e_{0x\beta}$  为扩展反电动势  $e_{0x}$  在  $\alpha$ - $\beta$  坐标系的分量，

$$\begin{bmatrix} e_{0x\alpha} \\ e_{0x\beta} \end{bmatrix} = e_{0x} \begin{bmatrix} -\sin\theta_e \\ \cos\theta_e \end{bmatrix}, \text{ 且 } e_{0x} = \omega_e \psi_r + (L_d - L_q)(\omega_e i_d - p i_q)。$$

转子电角度的估算值  $\hat{\theta}_e$  [11-12] 为

$$\hat{\theta}_e = \arctan\left(\frac{-\hat{e}_{0x\alpha}}{\hat{e}_{0x\beta}}\right)。 \quad (5)$$

该方法的特点是计算简单，动态响应快，几乎没有延迟。但永磁电机运行时，参数会随着运行状态和环境而改变。而利用电机模型直接计算方法需要准确的电机参数，且该方法没有补偿环节，所以会导致估算的转速和位置有很大误差。

### 2) 模型参考自适应方法

模型参考自适应方法 (model reference adaptive system, MRAS) 是基于电机基波模型来建立 2 个系统模型，即可调模型 (自适应模型) 和参考模型。可调模型含待估计参数，选择合适的自适应律实时跟踪、校正参考模型。当系统状态误差最终趋于零时，自适应模型的输出状态能跟踪参考模型的输出状态。图 5 为模型参考自适应方法的控制原理 [11-12]。

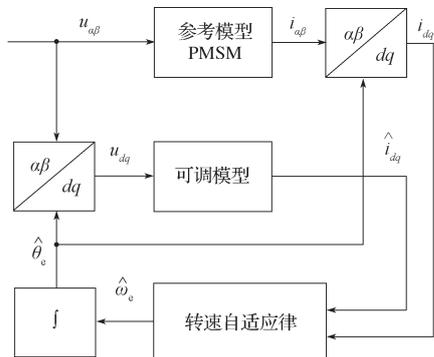


图 5 模型参考自适应方法估计转子速度和位置

Fig. 5 The estimation of rotor speed and position based on MRAS

当电机参数随着工作和环境温度发生改变时，MRAS 的控制精度会下降，且低速运行时控制精度下降严重。文献 [19] 基于 MRAS 技术实现了 IPMSM (interior permanent magnet synchronous motor) 无传感器速度控制，低速运转时利用 Popov 超稳定性理论辨识定子电阻估计，定子电阻的估计值形成反馈，补偿了系统偏差。该方法对电机参数具有一定鲁棒性。

### 3) 观测器方法

基于观测器的无速度传感器的研究成果最为丰硕，该方法可分为自适应观测器、D-state 观测器、

非线性全阶 / 降阶观测器、滑模观测器等。

#### ① 自适应观测器方法

自适应观测器可用于观测永磁同步电机转子速度和转子位置，其原理如图 6 所示。自适应观测器可减小电机参数变化对系统的影响，提高系统的可靠性。自适应观测器与 MRAS 采用的电机数学模型相同，且自适应规律都采用 Popov 超稳定理论推导。但自适应观测器是在状态估计中增加了一个校正项，估计的状态被连续地进行反馈校正，构成了闭环状态估计的自适应观测器 [11-12]。

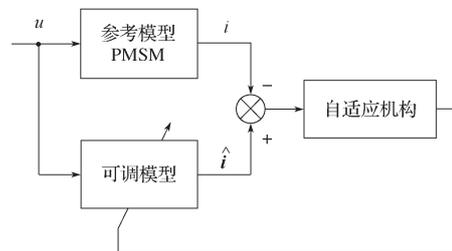


图 6 自适应观测器的原理图

Fig. 6 The control principle of Adaptive control

#### ② D-state 观测器方法

基于 D-state 观测器的永磁同步电机转速、位置估算方法由日本学者 Shinnaka S. 提出 [20-21]。此方法可在  $\alpha$ - $\beta$  和  $d$ - $q$  坐标系对 SPMSM 和 IPMSM 进行转速、位置观测，具有观测器参数设计简单、计算量小等优点。但此方法给定的参考速度是斜坡函数，在给定速度阶跃时系统运行不稳定。

#### ③ 非线性全阶 / 降阶观测器方法

非线性状态观测器方法是把系统状态变量作为输入信号，使观测器输出信号与原系统状态等价。状态观测器方法的实质是重新构造了一个系统。文献 [22] 研究了无速度传感器永磁同步电机自适应全阶观测器的稳定性和动态性能，对定子电阻和电感变化的自适应全阶观测器鲁棒性进行了讨论。文献 [23] 提出了一种静止坐标下永磁同步电机非线性降阶状态观测器的转速和转子位置估计方法，给出了收敛的充分条件以及收敛速度，仿真结果表明所设计的降阶观测器能很好地估计转子位置和转速，但对电机参数的变化敏感。

#### ④ 滑模观测器方法

滑模观测器 (sliding mode observer, SMO) 以永磁同步电机的电流变量建立观测器的状态方程，以电流观测误差作为滑模面，通过观测反电动势获得转子速度和位置信息 [3]。滑模观测器的原理如图 7 所

示。滑模观测器将 Luenberger 观测器中的反馈控制回路替换成开关函数, 继承了滑模变结构控制的优点, 如比鲁棒性更加优越的不变性、算法简单、易于工程实现等, 但也继承了滑模控制的抖振, 从而影响 PMSM 控制的精度和可靠性。为了消除传统滑模观测器的抖振, 高阶滑模观测器的方法被应用到无速度传感器控制中。基于滑模观测器观测反电动势的无速度传感器方法由于在中高速具有良好的控制性能, 转子转速、位置观测精度高, 获得了国内外学者的关注, 取得了大量的研究成果<sup>[24-28]</sup>。文献 [26] 应用自适应滑模观测器和高频信号注入法在  $d-q$  旋转坐标系实现了内置式永磁同步电机无速度传感器控制。文献 [27] 在  $d-q$  旋转坐标系设计了反电动势的非奇异终端滑模观测器, 实现了插入式永磁同步电机低速时的无速度传感器控制。滑模观测器存在的问题是, 低速时电机反电动势很小, 观测误差加大。

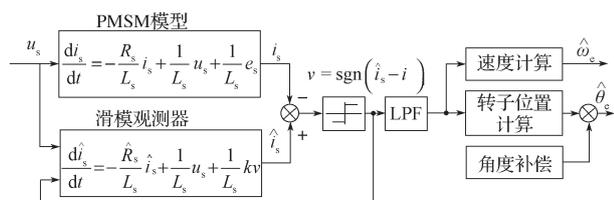


图7 滑模观测器方法估计转子速度和位置  
Fig. 7 The estimation of rotor speed and position based on sliding mode observer

#### 4) 扩展卡尔曼滤波器方法

卡尔曼滤波器 (Kalman filter) 是由 R. E. Kalman 提出的应用于时变线性系统的递推估计算法。扩展卡尔曼滤波器 (extended Kalman filter, EKF) 是卡尔曼滤波器在非线性系统中的扩展应用。扩展卡尔曼滤波器具有自适应能力强和随机性、非线性等特点, 在抑制测量噪声干扰方面表现良好。在永磁同步电机调速系统中, EKF 方法不需检测转子的初始位置, 把实时测量的定子电压和定子电流作为输入, 从而估计 PMSM 的转子转速和位置, 同时不断修正, 以适合永磁同步电机控制系统。文献 [29] 提出了一种降阶 EKF 的永磁同步电机磁链和转速估算算法。

此外还有基于人工智能算法的转速估算方法, 如神经网络<sup>[30]</sup>、模糊控制<sup>[31]</sup>等。

## 2.2 基于电机凸极特性的方法

目前, 基于反电动势的永磁同步电机无速度传感器控制方法在中高速区控制性能良好, 但在低速区和极低速区永磁同步电机的反电动势很小, 且受电机参

数变化及测量噪声的影响, 低速区控制性能不理想。基于电机凸极特性的方法是利用 PMSM 的凸极特性来估算电机转速及位置, 是永磁同步电机无速度传感器最有效的方法之一<sup>[32]</sup>。利用电机的凸极特性, 学者们提出了信号注入法等解决速度较低时的速度观测问题。根据给电机注入电流或电压频率, 信号注入法可分为高频信号注入法和低频信号注入法<sup>[33-34]</sup>。

### 1) 高频信号注入法

高频信号注入法是给电机注入高频信号, 利用电机自身的凸极特性或由饱和引起的凸极效应来获取电机转子位置和转速。此法可解决内置式永磁同步电机和表贴式永磁同步电机低速甚至零速的转速估算问题。根据注入信号的类型不同, 可分以下 3 种。

#### ① 旋转高频电压注入法

旋转高频电压注入法是在基波励磁基础上叠加了三相平衡的高频电压激励, 由此感应出正相序分量、负相序分量和零相序分量 3 个电流矢量, 其中负相序分量包含转子位置信息。凸极率较大的内置式永磁同步电机的转子速度和位置检测主要采用旋转高频电压注入法, 在低速时其性能良好<sup>[35]</sup>。

#### ② 旋转高频电流注入法

旋转高频电流注入法是在基波励磁电流上叠加一个三相平衡的高频电流激励, 转子位置信息在感应出的负相序高频电压分量相位中。旋转高频电流注入法利用 PMSM 基波模型, 观测输入旋转高频电流后 PMSM 电流峰值, 来估算转子位置和速度<sup>[7]</sup>。

#### ③ 高频脉振电压注入法

高频脉振电压注入法是在 PMSM 的  $d$  轴上注入高频正弦电压信号, 来估算转子位置和转速<sup>[7]</sup>。高频脉振电压信号注入法还可用于凸极率很小的表贴式永磁同步电机的转子速度和位置的检测<sup>[36]</sup>。

以上 3 种高频信号注入法都能在低速甚至零速估计转子转速和位置。但高频信号的注入, 增加了系统噪声, 造成了高频损耗, 降低了系统效率。

此外基于电机凸极特性的方法还有电感计算方法、INFORM 方法 (indirect flux detection by on-line reactance measurement)<sup>[37]</sup>等。

### 2) 低频信号注入法

低频信号注入法是通过注入低频定子电流信号, 利用产生的电压响应估计电机转速。文献 [38] 将低频信号注入法应用于永磁同步电机无速度传感器控制, 并实验证明了在极低速区甚至零速下表面式永磁

同步电机无速度传感器能获得较好的控制效果。

为了实现全速范围的无速度传感器控制,一般将基于电机基波模型的方法和基于电机凸极特性的方法相结合。

### 3 总结与展望

随着电力电子技术的高速发展、电机控制理论的不完善、永磁材料以及高性能芯片不断被开发,永磁同步电机无速度传感器控制技术已取得了巨大的进步,永磁同步电机已被广泛地应用于包装、印刷机械等系统中。本文通过对既有文献的梳理,总结了包装、印刷机械用永磁同步电机的控制方式;并对近年来提出的永磁同步电机无传感器控制方法进行了归纳,采用霍尔茨教授的无速度传感器控制2大类的方法进行了分类,介绍了各种控制方法的基本原理及适用范围,指出了各种方法的优缺点。

包装、印刷机械的未来发展方向如下:

1) 包装、印刷行业积极应用新技术、新工艺、新控制方法,推动包装印刷机械高速、高效、高质量向数字化、智能化、自动化方面发展。

2) 包装、印刷机械的控制是由很多微电机作为执行元件、检测元件和驱动元件而实现的。包装、印刷机械的自动化程度越高,微电机的使用量越大。现代包装、印刷机械行业使用的微电机正向永磁、微小化方向发展。

3) 单台永磁电机采用无速度传感器控制,多台永磁电机很容易实现多电机同步控制系统。无速度传感器控制技术在高精度的无轴传动印刷机和包装机械中有着广阔的应用前景。

#### 参考文献:

[1] 国家制造强国建设战略咨询委员会.《中国制造2025》重点领域技术路线图(2015版)[EB/OL]. [2016-11-10]. <http://b2b.toocle.com/detail--6282305.html>.  
National Manufacturing Strategy Advisory Committee. The "Made in China 2025" Technology Roadmaps in Key Areas (2015 Edition) [EB/OL]. [2016-11-10]. <http://b2b.toocle.com/detail--6282305.html>.

[2] 张昌凡,王耀南,何静.永磁同步伺服电机的变结构智能控制[J].中国电机工程学报,2002,22(7):13-17.

ZHANG Changfan, WANG Yaonan, HE Jing. Variable Structure Intelligent Control for PM Synchronous Servo Motor Drive[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(7): 13-17.

[3] 张凯,秦斌,王欣,等.基于电压前馈解耦的地铁永磁同步电机矢量控制研究[J].湖南工业大学学报,2016,30(5):22-26.  
ZHANG Kai, QIN Bin, WANG Xin, et al. Research on Vector Control of Metro Permanent Magnet Synchronous Motor Based on Voltage Feed-Forward Decoupling[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2016, 30(5): 22-26.

[4] 莫会成,闵琳.现代高性能永磁交流伺服系统综述:传感装置与技术篇[J].电工技术学报,2015,30(6):10-21.  
MO Huicheng, MIN Lin. Summary of Modern High Performance Permanent Magnet AC Servo System: Sensor Device and Technology[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(6): 10-21.

[5] 何静,张昌凡.自动套印控制系统的设计[J].包装工程,2002,23(3):31-32.  
HE Jing, ZHANG Changfan. Research and Design for Automatic Overprint Control System[J]. Packaging Engineering, 2002, 23(3): 31-32.

[6] ZHANG C F, HE J, JIA L, et al. Virtual Line-Shafting Control for Permanent Magnet Synchronous Motor Systems Using Sliding-Mode Observer[J]. IET Control Theory and Applications, 2015, 9(3): 456-464.

[7] 李永东,朱昊.永磁同步电机无速度传感器控制综述[J].电气传动,2009,39(9):3-10.  
LI Yongdong, ZHU Hao. Overview of Sensorless Control of Permanent Magnet Synchronous Motors[J]. Electric Drive, 2009, 39(9): 3-10.

[8] SINGH B, SINGH B P, DWIVEDI S. A Review of Sensor Reduction Techniques in Permanent Magnet Synchronous Motor Drives[J]. International Journal of Power & Energy Systems, 2009, 29(1): 10-18.

[9] DEPENDROCK M. Direct Self-Control(DSC) of Inverter-Fed Induction Machine[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1988, 3(4): 420-429.

[10] TAKAHASHI I, NOGUCHI T. A New Quick-Response and High-Efficiency Control Strategy of an Induction Motor[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1986, IA-22(5): 820-827.

[11] 王成元,夏加宽,杨俊友,等.电机现代控制技术[M].北京:机械工业出版社,2006:242-245.  
WANG Chengyuan, XIA Jiakuan, YANG Junyou, et al. Motor Modern Control Technology[M]. Beijing:

- Mechanical Industry Press, 2006: 242-245.
- [12] 王成元, 夏加宽, 孙宜标. 现代电机控制技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009: 181-182.  
WANG Chengyuan, XIA Jiakuan, SUN Yibiao. Modern Control Technique of Electric Machines[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2009: 181-182.
- [13] 杨耕, 陈伯时. 交流感应电动机无速度传感器的高动态性能控制方法综述[J]. 电气传动, 2001, 31(3): 3-8.  
YANG Geng, CHEN Boshi. Review the Methods for the Speed Sensor-Less Control of Induction Motor[J]. Electric Drive, 2001, 31(3): 3-8.
- [14] 陈伯时, 杨耕. 无速度传感器高性能交流调速控制的三条思路及其发展建议[J]. 电气传动, 2006, 36(1): 3-8.  
CHEN Boshi, YANG Geng. Three Approaches to the Control Strategies of Sensorless High-Performance ASD Systems and Proposals for Their Development[J]. Electric Drive, 2006, 36(1): 3-8.
- [15] HOLTZ J. Sensorless Control of Induction Machines- With or Without Signal Injection[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2006, 53(1): 7-30.
- [16] 陈伯时. 异步电动机无速度传感器控制的成就与发展[J]. 电气技术, 2006, 36(9): 75-76.  
CHEN Boshi. The Achievement and Development of Speed Sensorless Control of Induction Motors[J]. Electrical Engineering, 2006, 36(9): 75-76.
- [17] 赵光宙, 黄雷. 交流传动的无速度传感器技术综述[J]. 电气应用, 2008, 27(4): 20-26.  
ZHAO Guangzhou, HUANG Lei. Overview of Speed Sensorless Technology for AC Drive[J]. Electrotechnical Application, 2008, 27(4): 20-26.
- [18] PACAS M. Sensorless Drives in Industrial Applications [J]. IEEE Industrial Electronics Magazine, 2011, 5(2): 16-23.
- [19] KHLAIEF A, BOUSSAK M, CHÂARI A. A MRAS-Based Stator Resistance and Speed Estimation for Sensorless Vector Controlled IPMSM Drive[J]. Electric Power Systems Research, 2014, 108(3): 1-15.
- [20] SHINNAKA S. New "D-State-Observer" -Based Vector Control for Sensorless Drive of Permanent-Magnet Synchronous Motors[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2006, 41(3): 825-833.
- [21] SHINNAKA S. 一种新型的基于D状态观测器的永磁同步电机无传感器驱动向量控制方法[J]. 桂许军, 曲国杰, 译. 电气技术, 2006(10): 87-95.  
SHINNAKA S. New "D-State-Observer" -Based Vector Control for Sensorless Drive of Permanent-Magnet Synchronous Motors[J]. GUI Xujun, QU Guojie, Translated. Electrical Engineering, 2006(10): 87-95.
- [22] PO-NGAM S, SANGWONGWANICH S. Stability and Dynamic Performance Improvement of Adaptive Full-Order Observers for Sensorless PMSM Drive[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(2): 588-600.
- [23] SOLSONA J, VALLA M I, MURAVCHIK C. A Nonlinear Reduced Order Observer for Permanent Magnet Synchronous Motors[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1996, 43(4): 492-497.
- [24] WANG G L, YANG R F, XU D G. DSP-Based Control of Sensorless IPMSM Drives for Wide-Speed-Range Operation[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(2): 720-727.
- [25] COMANESCU M. Sensorless Rotor Position Estimation of PMSM by Full-Order and Sliding Mode EMF Observers with Speed Estimate[J]. International Journal of Vehicle Autonomous Systems, 2013, 11(2/3): 157-189.
- [26] FOO G, RAHMAN M F. Sensorless Sliding-Mode MTPA Control of an IPM Synchronous Motor Drive Using a Sliding-Mode Observer and HF Signal Injection[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 57(4): 1270-1278.
- [27] 袁雷, 沈建清, 肖飞, 等. 插入式永磁低速同步电机非奇异终端滑模观测器设计[J]. 物理学报, 2013, 62(3): 37-45.  
YUAN Lei, SHEN Jianqing, XIAO Fei, et al. Nonsingular Terminal Sliding-Mode Observer Design for Interior Permanent Magnet Synchronous Motor Drive at Very Low-Speed[J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(3): 37-45.
- [28] SAADAOUÏ O, KHLAIEF A, ABASSI M, et al. A Sliding-Mode Observer for High-Performance Sensorless Control of PMSM with Initial Rotor Position Detection[J]. International Journal of Control, 2016, 90(2): 377-392.
- [29] 武明珠, 李宏, 王磊, 等. 基于降阶EKF的永磁同步电机转速和磁链观测器[J]. 测控技术, 2012, 31(8): 59-62.  
WU Mingzhu, LI Hong, WANG Lei, et al. Speed and Flux Linkage Observer for PMSM Based on Reduced-Order EKF[J]. Measurement & Control Technology, 2012, 31(8): 59-62.
- [30] 蒋彦, 刘国海, 赵文祥, 等. 基于TD-NNLI的永磁同步电机转速辨识[J]. 电机与控制学报, 2014, 18(2): 62-68.  
JIANG Yan, LIU Guohai, ZHAO Wenxiang, et al.

- Speed Identification of Permanent Magnet Synchronous Motor by Using TD-NNLI Method[J]. *Electric Machines and Control*, 2014, 18(2): 62–68.
- [31] 柯希彪, 鲁怀伟, 李鹏飞. 基于模糊变结构模型参考自适应观测器的永磁同步电机控制[J]. *电机与控制应用*, 2016, 43(12): 24–30.  
KE Xibiao, LU Huaiwei, LI Pengfei. Permanent Magnet Synchronous Motor Control Based on Fuzzy Variable Structure Model Reference Adaptive System Observer[J]. *Electric Machines & Control Application*, 2016, 43(12): 24–30.
- [32] YANG S C, HSU Y L. Full Speed Region Sensorless Drive of Permanent-Magnet Machine Combining Saliency-Based and Back-EMF-Based Drive[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2016, 63(2): 1092–1101.
- [33] KIM S I, SONG E Y, IM J H, et al. A New Rotor Position Estimation Method of IPMSM Using All-Pass Filter on High-Frequency Rotating Voltage Signal Injection[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2016, 63(10): 6499–6509.
- [34] WANG G L, YANG L, ZHANG G Q, et al. Comparative Investigation of Pseudorandom High-Frequency Signal Injection Schemes for Sensorless IPMSM Drives[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2016, 32(3): 2123–2132.
- [35] 张少华, 吴湘频. 低速区永磁同步电机无传感器控制技术综述[J]. *船电技术*, 2014, 34(7): 14–18.  
ZHANG Shaohua, WU Xiangpin. Review on Sensorless Control of PMSM at Low Speed Range[J]. *Marine Electric & Electronic Engineering*, 2014, 34(7): 14–18.
- [36] 刘海东, 周波, 郭鸿浩, 等. 脉振高频信号注入法误差分析[J]. *电工技术学报*, 2015, 30(6): 38–44.  
LIU Haidong, ZHOU Bo, GUO Honghao, et al. Error Analysis of High Frequency Pulsating Signal Injection Method[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2015, 30(6): 38–44.
- [37] ARELLANO-PADILLA J, SUMNER M, GERADA C. Condition Monitoring Approach for Permanent Magnet Synchronous Motor Drives Based on the INFORM Method[J]. *IET Electric Power Applications*, 2016, 10(1): 54–62.
- [38] 吴姗姗, 李永东. 基于信号注入的极低速 PMSM 无速度传感器控制[J]. *电气传动*, 2008, 38(1): 19–22.  
WU Shanshan, LI Yongdong. Speed Sensorless Control of PMSM at Very Low Speeds Based on Signal Injection[J]. *Electric Drive*, 2008, 38(1): 19–22.

## Review of Permanent Magnet Synchronous Motor Control and Sensorless Technology for Packaging and Printing

ZHAO Kaihui, HE Jing, LI Xiangfei, HUANG Gang

(School of Electrical and Information Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

**Abstract:** The control methods of permanent magnet synchronous motor (PMSM) for printing and packaging and sensorless control technology were reviewed. Firstly, the main control methods of permanent magnet synchronous motor vector control system for packaging and printing machinery industry were presented. Then, PMSM sensorless control was classified by the two sensorless classification method of Professor Holtz with the introduction of methods of PMSM sensorless control provided and the advantages and disadvantages discussed in detail. In the end, the prospect of PMSM application and sensorless control in packaging and printing were described.

**Keywords:** permanent magnet synchronous motor; sensorless control; vector control