

传感器集成与电力电子集成传动系统

秦峰 贺益康 钱照明

秦峰女士，浙江大学电气工程学院博士；贺益康先生，教授，博导；钱照明先生，教授，博导。

关键词：传感器集成 凸极跟踪 转子位置自检测 电力电子传动系统集成

一 电力电子系统集成

一个标准的、模块化的、可编程的系统有利于加速系统级水平的设计，可以极大地提高电力电子产品的标准化、模块化、智能化和生产自动化程度，从而使电力电子系统，真正成为现代工业生产自动化大系统中的一个名副其实的智能部件。同样，通过系统集成，可望进一步扩大电力电子的应用场合。

所谓电力电子系统集成应包含：模块级的集成，即电力电子子系统的集成；系统级的集成，即电力电子实际应用系统的集成。

1. 电力电子子系统的集成

这是将功率器件、电路元件、控制器、传感器及动作开关等集成为一个完整的智能的电力电子子系统。根据其传递功率的大小，它们可以引入微电子学中的新工艺、新技术，将系统中的微处理器、控制电路、信号处理和接口电路、小功率的变换电路和保护电路等采用系统芯片集成的方法，集成在同一块硅片上(通常小于 100W)，构成一个独立、完整的小功率、标准化的智能功率系统(又称集成化电力电子系统标准芯片 Power SoC)；也可将若干块功率器件裸芯片、控制裸芯片(包括 mP, CPU, DSP 芯片等)、接口、保护电路裸芯片及表面贴装元器件等，用厚膜技术集成在同一块导热、绝缘良好的基板上(通常小于几百瓦)，然后封装在一个模块内，从而构成一个独立、完整的中小功率、标准化的智能功率系统，又称集成化电力电子系统标准模块 Power SOP。当需要传递更大功率时(如几千瓦及

以上),人们可以用分立的大功率器件、元件、专用控制集成电路和标准通信接口构成一个独立、完整的中等功率、标准化的、分立的智能功率模块。

电力电子模块级集成的目标是建立电力电子标准模块。与常规的智能功率模块相比,其主要特点是标准化、通用性和可扩充性。它应包含两种类型的标准接口:功率传输标准接口和数据通信标准接口。通过这些标准接口,几个不同类型的标准模块可以通过编程组成一个新的电力电子系统。智能标准模块的数目与类型可以依据应用系统的需要选定。

电力电子标准模块的通用性,是指电力电子标准模块通过软件设置可以适应大部分的应用场合。标准模块可通过附加标准的其他功能部件,实现拓扑变结构,以便更好地适应特定的应用需要。

2. 电力电子实际应用系统的集成

人们可以根据电力电子系统集成理论和设计规则,利用上述这些子系统方便地集成和扩展为最终用户所需要的(定义的)智能化的电力电子应用系统,如分布式电源系统、电力电子集成传动系统、电源设备等。

为了实现系统集成,必须对标准模块与应用系统控制器之间建立一套适合于电力电子系统的高速通信总线和能量传输母线技术,建立标准的通信协议,将各类标准模块自由、灵活及可靠地集成为一个实际的电力电子应用系统。

基于标准模块的集成应用系统的结构必须是开放的,分层分级控制的。开放式的结构可以使控制器的设计标准化,分级控制可以使系统集成更加方便。应用系统的控制器(称为应用管理器),通过标准模块的标准接口控制标准模块内部的控制器(称为硬件管理器),实现系统功能。这样,应用管理器不依赖于标准模块的拓扑、开关和传感器的数目,通过标准的通信协议,控制下一层的控制器,实现系统功能。在设计合理的情况下,一个大功率的电力电子系统只需通过软件编程,更改相应功能的标准模块,就可改变整个系统的功能,而不必重新设计硬件。

3. 电力电子系统集成的目标

通过系统集成,人们可以利用这些标准智能功率模块,方便地集成所需要的复杂的电力电子实际应用系统,从而使一个复杂的电力电子应用系统的研制、设计成本和设计时间大大减少。通过电力电子系统集成与标准智能功率模块的研究,可指望像装配一台个人计算机一样,人们可灵活地扩展、配置、升级、布置(部件

到部件, 拔出、插入) 一个符合现场需要的智能化的电力电子应用系统, 甚至于一个非专业人员也能用基本模块组装他所希望的智能化的电力电子应用系统。通过系统集成, 电力电子标准模块的生产也可通过有源集成模块、无源集成模块、传感器集成模块以及其他标准集成模块的组合来完成。这样, 一个电力电子应用系统就象一个计算机, 标准模块类似于标准插件, 而标准模块内部的集成模块, 如有源集成模块等, 就相当于一个标准的 IC, 从而可能将电力电子工业革命性地转变成一种类似于个人计算机工业一样的工业部门, 从而有力地促进电力、能源、工业生产过程自动化产生革命性的变革, 彻底改变目前劳动密集和技术密集的现状。

二 电力电子集成传动系统

若将电力电子集成技术应用于交流传动系统中, 就可获得电力电子集成传动系统, 其硬件结构如图 1 所示。图 1 中的滤波器、AC / DC 整流器、DC/AC 逆变器均为智能化、标准化的集成电力电子标准化模块, 或基于电力电子标准模块的集成系统, 它们作为图 1 所示的应用系统的子系统, 在应用管理器的统一控制下, 再集成为能够实现各种控制策略的电力电子集成传动系统。

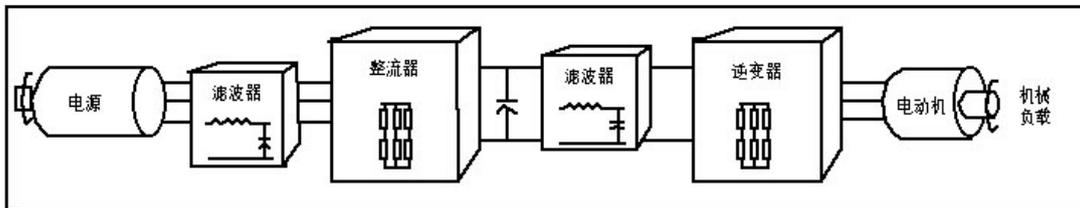


图1 电力电子集成传动系统示意图

但仅有集成化的电力电子功率变换模块只能构成低性能开环控制系统, 难以满足高性能的技术要求。以永磁同步电动机的运动控制系统为例, 为实现高精度、高动态性能的速度和位置控制, 一般应采用磁场定向矢量控制或直接转矩控制。但无论采取哪种控制策略, 都必须获得一些反馈量信息。这些反馈量包括电动机定子的电压和电流、转子的位置和速度以及转矩和磁链。因此, 在高性能的电力电子集成传动系统中, 不仅需要应用集成化的电力电子功率变换模块, 还需要能将电动机转子位置和速度的估计、端电压和电流的检测、转矩和磁链的观测等 3 类传感器的功能集成于一体化的传感器模块, 以期通过检测电动机端电压、电流后, 经过相应处理能获得电动机控制所需的反馈量, 从而实现高精度、高性能的速度和位置控制。因此, 传感器模块是电力电子系统集成, 特别是电力电子集成传动系统中不可缺少的部分。

三 传感器集成模块

在集成传感器构想中，最难实现的是全速度范围内转子位置和速度的检测。传统控制系统中采用光电编码器或旋转变压器来检测转子的位置和速度，但这类机械式传感器有安装、电缆连接和维护等问题，降低了系统的可靠性，更无法实现系统的集成。对此，须应用无位置/速度传感器控制技术，即采用检测电动机出线端电量的方式，经信号处理获得电动机转子位置、速度，同时观测电动机内部的磁通、转矩等，进而构成可观测到系统闭环控制所需一切反馈量的“传感器模块”。

目前无位置/速度传感器技术的研究可分为两类，一类是依赖对电动机基波方程的分析，仅适合于较高转速的应用，在低速运行时仍有不少问题亟待解决；另一类是采用空间凸极跟踪法，能够解决低速甚至零速下转子位置的估计，实现全速度范围内转子位置、速度的检测。

下面从传感器集成的要求出发，首先介绍空间凸极跟踪法实现转子位置自检测的原理，通过内插式永磁同步电动机(IPM)高、低速运行下转子位置自检测的实验验证了检测机理的正确性和实用性。以此为基础提出了“概念性”集成传感器模块的结构，描述了在集成化电力传动系统中的应用方式。

1. 基于空间凸极跟踪的转子位置自检测机理

凸极跟踪法的基本原理是在电动机出线端注入三相平衡高频电压信号，通过对电动机内部寄生或人为的不对称性(凸极性)的检测来获取转子位置信息。为将位置传感器集成到永磁电动机中，简单的做法就是将转子永磁体结构设计成内插式，使转子 d、q 轴电感具有一定的差异，获得可检测的凸极效果。

凸极跟踪法的转子位置自检测原理可用图 2 说明。图中，BSF、BPF、SFF 分别是为带阻、带通、同轴高通滤波器。当电动机采用 SPWM 电压源逆变器供电情况下，可通过逆变器将一组三相平衡的高频电压信号直接迭加在电动机的基波激励上。假设高频注入电压的角频率为 ω_i ，幅值为 V_{si} ，则在静止 d-q 两相坐标系中注入的高频电压信号可表示为：

$$\mathbf{V}_{qdsi}^s = \begin{bmatrix} V_{qsi}^s \\ V_{dsi}^s \end{bmatrix} = V_{si} \begin{bmatrix} \cos(\omega_i t) \\ -\sin(\omega_i t) \end{bmatrix} = V_{si} e^{j\omega_i t} \quad (1)$$

高频注入信号频率一般为(0.5~2)kHz，远高于电动机基波频率，故高频激励下的永磁电机模型可简化为：

$$\mathbf{V}_{qdsi}^s \approx \mathbf{L}_{qds}^s \frac{d\mathbf{i}_{qdsi}^s}{dt} \quad (2)$$

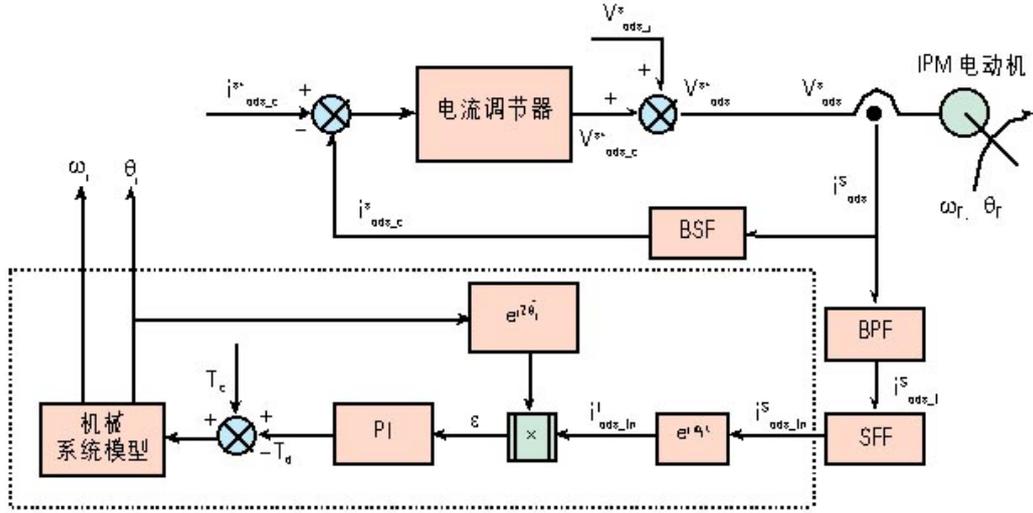


图2 凸极跟踪法的转子位置自检测原理图

在转子 d-q 坐标系中，电动机定子电感可以表示为：

$$L_{qds}^r = \begin{bmatrix} L_q & 0 \\ 0 & L_d \end{bmatrix} \quad (3)$$

在静止 d-q 坐标系中，式(3)转化为：

$$L_{qds}^s = \begin{bmatrix} L + \Delta L \cos(2\theta_r) & -\Delta L \sin(2\theta_r) \\ -\Delta L \sin(2\theta_r) & L - \Delta L \cos(2\theta_r) \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中， $L=(L_d+L_q)/2$ 为平均电感； $\Delta L=(L_d-L_q)/2$ 为半差电感； θ_r 为定子(A 相轴线)与转子(d 轴)间的空间电位置角。

根据式(2)、(4)，可求得高频激励下永磁同步电动机的电流响应为：

$$i_{qdi} = i_{ip} e^{j(i\theta(t)-\pi/2)} + i_{in} e^{j(2\theta_r - \theta_i(t) + \pi/2)} \quad (5)$$

式中，正、负相序电流分量的幅值分别为：

$$i_{ip} = \left[\frac{L}{L^2 - \Delta L^2} \right] \frac{v_i}{\omega_i}, \quad i_{in} = \left[\frac{L}{L^2 - \Delta L^2} \right] \frac{v_i}{\omega_i} \quad (6)$$

从式(6)可以看出，只有负相序电流分量 $i_{in} e^{j(2\theta_r - \theta_i(t) + \pi/2)}$ 的相角中包含有转子的位置信息 θ_r 。

为了提取高频电流负相序分量相角中所包含的转子凸极位置信息，必须很好地滤除基波电流、SPWM 载波频率电流和高频电流的正序分量。基波电流与高频电流幅值相差很大，载波频率远比注入高频频率高，这两者都可通过常规的带通滤波器(BPF)予以滤除。高频电流正相序分量与负相序分量的旋转方向相反，因此先将高频电流转换到与高频注入电压同步旋转的参考坐标系中，使其正相序分量呈现成直流，再利用同步轴系高通滤波器(SFF)将其滤除。

滤去无关信号后，被跟踪的信号是一个相位由转子或磁通角调制的旋转电流

矢量，可利用图 2 中虚线框内所示转子位置跟踪观测器来实现转子空间位置的自检测。为了提高跟踪精度，应先通过坐标变换把旋转电流矢量变换到一个与注入高频电压信号同速反向旋转的参考轴系中，再采用能够实现相角调制的外差算法解调出经空间凸极调制的负相序分量，此时矢量角误差可表达为：

$$\varepsilon = \sin(2\theta_r - 2\hat{\theta}_r) \quad (7)$$

这样，通过调节矢量角的误差使之趋于零，就可使转子位置的估计值 $\hat{\theta}_r$ 收敛于真实值 θ_r 。对 $\hat{\theta}_r$ 作时间微分，就可以获得转子角速度 $\hat{\omega}_r$ 。由于引入了转矩指令值的前馈，其输出信号可无相位滞后地跟踪其输入信号。

2. 永磁同步电动机转子位置自检测实验验证

为验证以上转子位置自检测原理的正确性，对一台内插式永磁同步电动机样机进行了实验研究。实验用永磁同步电动机参数如表所示。

永磁同步电动机参数表

电动机参数	参数值
额定频率	200 Hz
额定电压	220 V
额定电流	2 A
额定功率	400 W
额定转速	6000 r/min
额定转矩	0.64 N·m
定子每相电阻	1.51 Ω
d 轴电感	0.0048 H
q 轴电感	0.0134 H
主磁极磁通	0.1073 Wb
极对数	2
转动惯量	$0.244 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$

电动机由 PWM 电压源型逆变器供电，控制器以 DSP 芯片 TMS320LF2407 为核心，通过软件实现 SVPWM 调制、高频电压信号注入、反映转子空间位置的高频负序电流信号提取和转子位置、速度估计。逆变器功率器件开关频率为 10kHz、注入高频电压信号频率为 937Hz，其幅度为基波幅度的 0.25 倍。

为评估凸极跟踪转子位置自检测方法的可行性和精度，进行不同速度下转子

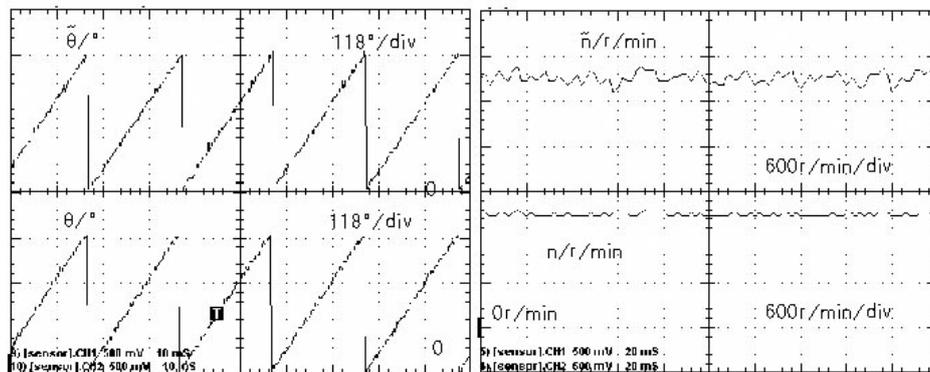


图3 转子位置、速度的估计值与实际值(1500r/min)

位置及速度估计值与旋转编码器实测值的对比实验。当电动机转速为 1500r/min 时转子位置及速度的估计值 $\hat{\theta}$ 、 \hat{n} 与实测值 θ 、 n 如图 3 所示，图 4 给出了两种转子位置检测方法的误差，最大误差约 $\pm 5^\circ$ 电角度。

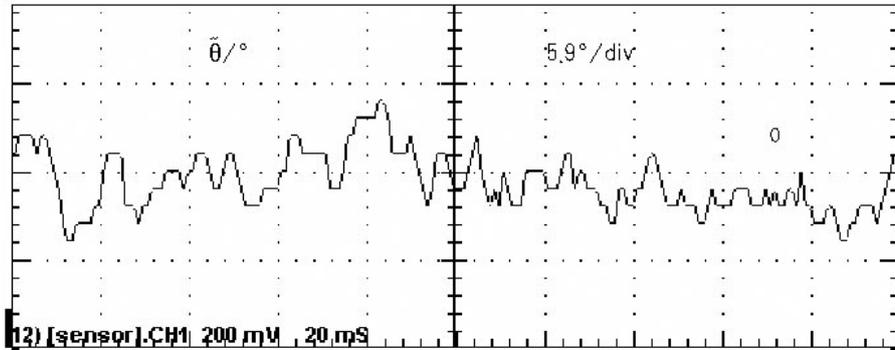


图4 转子位置估算值与实际值的差值(1500r/min)

当电动机转子以低速 60r/min 旋转时，转子位置及速度估计值与实测值如图 5 所示，图 6 给出了两种转子位置检测的误差，最大误差为 $\pm 14.7^\circ$ 电角度。

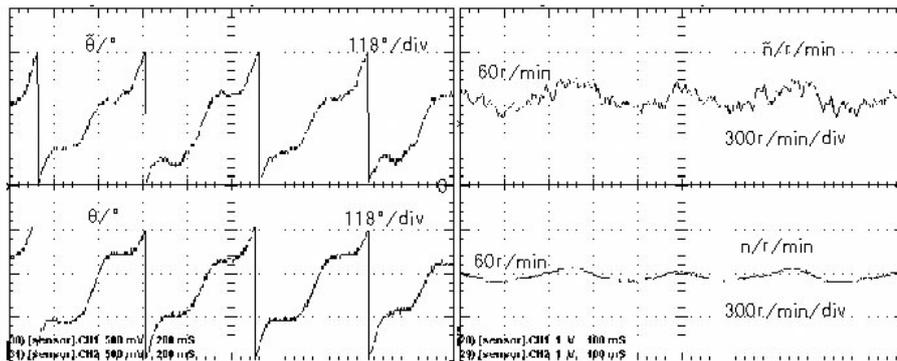


图5 转子位置、速度的估计值与实际值(60r/min)

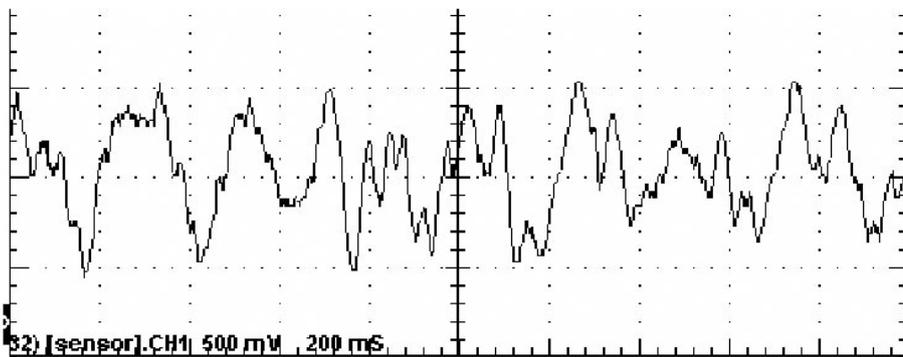


图6 转子位置估算值与实际值的差值(60r/min)

3. “概念性”传感器集成模块

在实现了转子位置/速度自检测的基础上，可提出一种“概念性”的传感器集成模块。该模块的硬件结构和内部功能分别如图 7 和图 8 所示。模块首先利用霍尔传感器检测出电动机的端电压和电流，然后采用凸极跟踪法实现转子位置/速度的检测，最后利用电压、电流和转速信息计算磁链和转矩。传感器模块在集成化电力传动系统中的应用方式如图 9 所示，模块输入端与电动机的出线端相连接，获得电动机的端电压和电流，输出端与能够同时实现整个电力电子应用系统所有模块控制的应用管理器相连接，通过一定的通信协议，在应用管理器中实现高频信号的注入，同时将检测到的信息送到应用管理器中，以便实现高性能的电力传动控制。

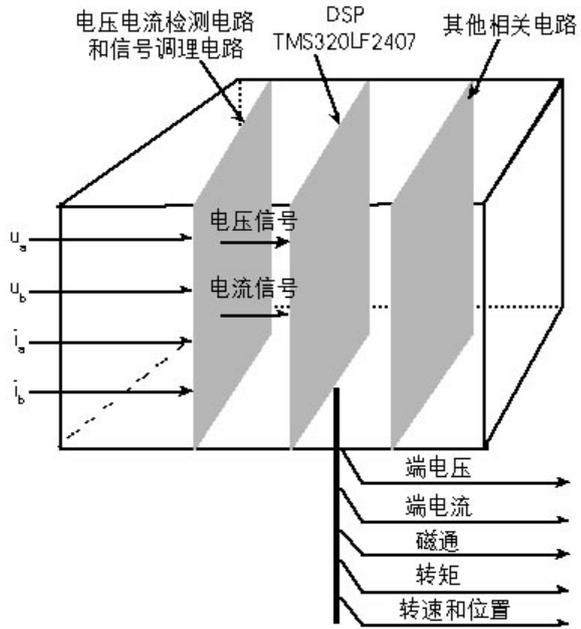


图 7 概念型传感器模块的硬件结构

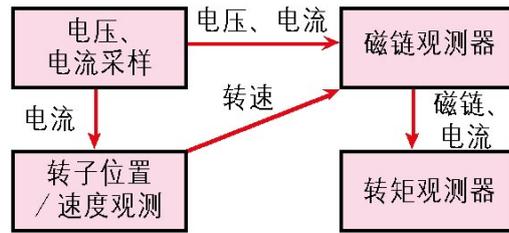


图 8 概念型传感器模块的功能示意图

为了进一步验证这种采用转子空间位置自检测方法的传感器集成模块的实用性，采用所获得的转子位置及速度估算信号进行了永磁同步电动机矢量控制传动系统的实验研究。调速系统采用 $i_{sd}^* = 0$ 的矢量控制方式，图 10 为电动机从零速到 1500r/min 启动过程的转速波形，实验结果还表明，这种采用转子空间位置自检测方法的传感器集成模块可以应用于电力传动系统中，如果与其他电力电子功率模块相配合，就能构成高性能的电力电子集成传动系统。

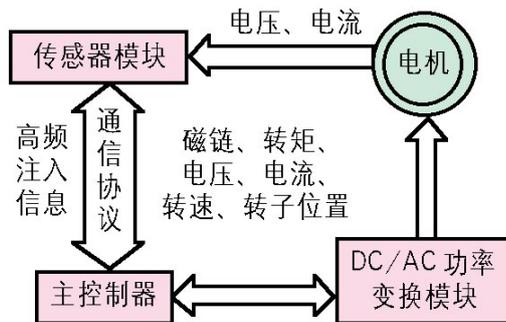


图 9 概念型传感器模块在集成化电力传动系统中的应用

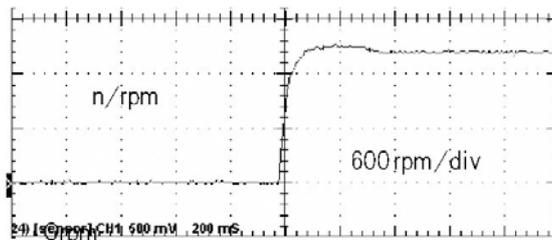


图 10 启动过程的转速波形

四 结论

电力电子系统集成涉及到许多共性的电力电子应用基础理论和关键技术问题，具有促进电力、能源、工业生产过程自动化产生革命性的变革的良好前景，开展电力电子系统集成的研究具有重要的学术和实用意义。

电力电子集成传动系统是电力电子系统集成的重要应用，传感器模块中的核心技术可采用凸极跟踪法实现转子位置/速度自检测。从系统集成的概念来说，利用、制造和检测凸极的过程实际上是将机械位置传感器与电动机本体的集成；从信号处理的技术看，这是从电动机端部对电动机内部变量的一种观测，是各类传感器/观测器的集成。这种集成传感器模块的概念，将扩大电力电子系统集成的内涵，推动集成技术、特别是集成应用系统的发展。

（全文完）

来源：《世界仪表与自动化》

出版日期：2005 年 4 月