# 一种抑制永磁同步电机转速脉动的方法

储剑波 胡育文 黄文新 杨建飞
（南京航空航天大学航空电源航空科技重点实验室 南京 210016）

**摘要** 在永磁同步电机驱动的单转子压缩机变频空调系统中，脉动并呈周期性的负载转矩使得永磁同步电机的转速也产生同周期的脉动。在低速运行时，速度脉动引起的整个系统框架的振动、高噪声等现象尤其明显，同时降低了系统的效率。本文在分析这类周期性扰动对系统速率稳定度的影响的基础上，基于重复控制原理的动态补偿方法提出了在永磁同步电机速度控制环上采用一种重复控制和 PI 控制相结合的控制方案，以抑制周期性扰动引起的转速脉动。该方案在稳态时采用重复控制加 PI 控制以获得较好的稳态性能，在非周期扰动时采用 PI 控制以获得良好的动态响应。仿真和实验结果证明了该控制方案的可行性、正确性并具有很强的工程实用意义。

**关键词：** 永磁同步电机 重复控制 空调压缩机 速度环 转速脉动
**中图分类号：** TM921.51

## Suppressing Speed Ripples of Permanent Magnetic Synchronous Motor Based on a Method

*Chu Jianbo Hu Yuwen Huang Wenxin Yang Jianfei*
（Nanjing University of Aeronautics and Astronautics Nanjing 210016 China）

**Abstract** For a common permanent magnetic synchronous motor (PMSM) single rotor compressor system, cyclical fluctuation of the load torque also causes the ripples of speed at the same cycle. The vibration of the system framework, high noise et al. phenomenon caused by the ripple speed is particularly evident when compressor running at low speed. And the efficiency of the system comes down at the same time. After analysis the impact on the system stability of such periodic speed disturbances in detail, a new method aiming to suppress the pulsation of the speed caused by periodic torque disturbance is proposed in this paper. A composite controller consisting of PI controller and repetitive controller which are paralleled together is placed in the speed loop. The PI controller and repetitive controller are used together in the steady-state for better performance of the steady-state, and PI controller is left alone to obtain good dynamic response when non-periodic disturbance appears. Simulation and experimental results show the feasibility and validity of the control program.

**Keywords：** PMSM, repetitive control, air compressor, speed loop, speed ripple

国家自然科学 基金资助项目（ 50977045）。
收稿日期 2009-07-01 改稿日期 2009-09-14

## 1 引言

永磁同步电机（ PMSM）因具有高转矩 /惯量比、高功率密度、运行效率高、结构可靠、控制性能优良等特点，在化工、轻纺、家电等领域得到了广泛应用。目前为了节能减耗，以永磁同步电机驱动变频空调系统中的压缩机成为一种趋势。

影响永磁同步电机中转矩脉动的原因概括为两类：①电机内部因素如齿槽效应、磁链谐波、定子电流分布不对称等 。②电机外部因素如脉动的负载转矩等。转矩脉动会引起电机转速波动及噪声，这直接限制了 PMSM 的应用范围和应用领域。国内外学者针对此问题已进行了广泛的研究 ，主要方法有

两种：一种是改进电机本体设计 [1]，如改善定子绕组分布、斜槽等 [2]，但都不能完全消除转矩 /转速脉动并且带来电机设计和生产方面的困难。另外一种方法就是采用控制的方法减低转矩 /转速脉动：如文献[3]利用速度信号对转矩进行前馈补偿；文献 [4]采用了迭代学习控制方法来抑制因气隙 磁通密度的非正弦分布、电流测量误差和气隙磁阻变化引起的转矩脉动。

永磁同步电机的负载转矩在一些应用场合下呈现有规律的周期性，如空调压缩机中的周期性负载使得驱动压缩机的永磁同步电机的转速也呈现周期性波动。鉴于此特点文献 [5]采用了模型参考自适应的方法来估计转速，使用从轻负载到重负载的 8 条基本负载曲线，结合负载转矩电流前馈补偿的方法来对驱动空调压缩机的永磁同步电机的转速脉动进行抑制。该方法需预先保存 8 条负载曲线和相应的值，可见针对不同压缩机的不同工况该方法不具有通用性且较难实施。而基于内模原理的重复控制方法对周期性的输入信号能够实现完全跟踪和对周期性的干扰信号完全抑制。文献 [6]利用重复控制对三相电压源型逆变电源的波形进行控制，文献 [7]采用改进重复控制策略用于电力电子负载电流控制器设计。文献[8]提出了采用时变重复控制抑制混合式步进电机转矩波动的方法。本文研究的变频压缩机的机械频率调节范围大约为 20～120Hz。在其低速范围内，压缩机呈周期性的气体体积变化引起的负载转矩脉动会引起很大的周期性的转速波动，从而产生低频噪声和振动；而在高速范围内由于转子惯性，负载转矩脉动引起的转速波动相对较小。因此针对前述情况本文提出了重复控制和传统的 PI 控制器相结合的方法对压缩机低速范围内的转速周期性脉动进行抑制。仿真研究和试验结果表明该方案对降低压缩机因负载转矩脉动引起的转速脉动有效 、正确。

## 2 控制方案分析

在永磁同步电机的转子每旋转一周的过程中，由于单转子压缩机气缸内的气体需经过吸气、压缩和排气三个阶段，缸内气体压力是变化的，因此电机的负载转矩会周期性的波动。一个机械周期中的负载转矩波动如图 1 所示[5]。空调系统中温度调节是相对缓慢的，故在一段时间内压缩机的负载变化是呈有规律的周期性。根据永磁同步电机的机械运动方程式（1）可知，若电磁转矩不能很好地跟随周期性脉动负载转矩就会引起转速周期性的脉动，转速波动周期性示意图如图 2 所示。空调压缩机的能效比往往会随着运行频率的降低而升高。而压缩机的负载转矩波动引起永磁同步电机转速的脉动在低速运行时表现得更加明显，而在高速时转速脉动有所改善，故其低速运行受到脉动负载转矩的较大限制。变频空调的提出就是为了提高能效比，且单转子压缩机在目前制冷业仍然有较大的市场份额，因此迫切需要解决其在低速范围内的转速脉动问题。

$$J\frac{\mathrm{d}\Omega}{\mathrm{d}t}=T_{\mathrm{em}}-T_{\mathrm{L}}-B\Omega \qquad (1)$$

式中 $\Omega$——机械角速度；

$J$——转动惯量；

$T_{\mathrm{em}}$——电磁转矩；

$T_{\mathrm{L}}$——负载转矩；

$B$——阻尼系数。

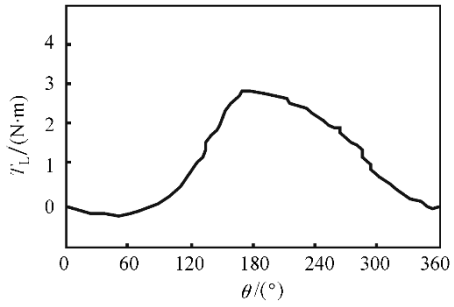



图 1 一个机械周期内（一转内）的波动转矩

Fig.1 Waveform of load torque in one mechanical period

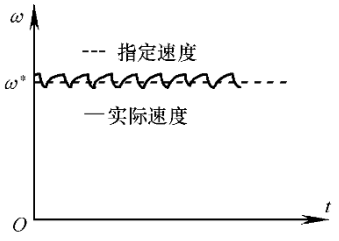



图 2 若干个机械周期的速度脉动

Fig.2 Waveforms of the cyclical speed ripple

永磁同步电机驱动的变频压缩机是一个速度闭环控制系统。若要求该反馈控制系统具有良好的跟踪指令的性能以及抑制扰动的能力，则在反馈控制环路内部必须包含一个外部输入信号 （含指令信号和扰动信号）动力学特性的数学模型，该数学模型就是所谓的“内模”。传统的速度环 PI 调节器以参数简单、易整定等特点得到了广泛应用，有着优良的动态性能。且其含有描述阶跃信号的数学模型

即积分环节 1/$s$，因此具有 PI 调节器的系统对阶跃指令可以做到无静差跟踪。由于本系统中的转速是一个周期性的脉动信号，其包含多种频率成 分，而 PI 调节器不包含这些信号的 “内模”，故 PI 调节器不能消除本系统的速度环稳态误差。

重复控制是日本的 Inoue 于 1981 年首次提出的，用于伺服系统重复轨迹的高精度控制。它根据内部模型原理和周期性参考信号的特点，将产生参考输出信号的“模型”置于稳定的闭环系统内，从而实现对周期性参考信号或周期性的外部干扰信号的稳态跟踪。图 3 中点划线内为重复控制器，它是任意周期为 $L$ 的信号的简单内模。当误差 $e$ 周期性重复出现时，重复控制器的输出逐周期累加；当 $e$ 为 0 时，重复控制器的输出并不消失，只是停止变化，维持上次的波形，并且周期性 地输出此波形。因此可以把重复控制器认为是一种特殊的积分器。若采用如图 3 所示的“重复信号发生器 ”内模时，即可跟踪周期性的指令信号或抑制周期性扰动信 号[9]，且该信号可以包含多种频率成 分，但在每一个基波周期内必须以完全相同的波形重复出现。图 3 中的 $G(s)$为重复控制器、$G_p(s)$为控制对象、$d(s)$为干扰信号、$r(s)$为输入速度指令信号、$y(s)$为输出信号、$e(s)$为误差信号和 $L$ 为信号周期。

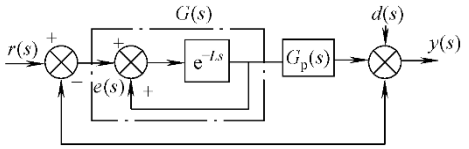



图 3　重复信号发生器

Fig.3　Repetitive singal generator

重复控制能使系统获得很好的静态性能，但却不能获得好的动态性能。在实际系统中，重复控制器一般直接嵌入常规控制环路内 [10-11]。因此，本文将上述两种控制方式结合在一起，从而提出了变频压缩机系统基于 PI 调节器和重复控制并行的速度环控制方案如图 4 所示。

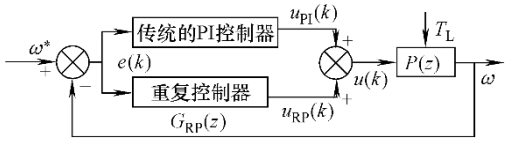



图 4　复合控制的速度环控制方案

Fig.4　Composite controll strategy in speed loop

从图 4 可知控制器输出 $u(k)$为 PI 控制器和重复控制器输出之和如式 （2）所示。

$$u(k)=u_{\mathrm{PI}}(k)+u_{\mathrm{RP}}(k) \tag{2}$$

该方法利用重复控制改善系统的稳态特性和抑制周期性的转速脉动，并利用 PI 调节器提高系统动态特性，从而使系统具有良好的稳态和动态特性。

## 3　复合控制方案

在该方案中，重复控制器与 PI 调节器并联在控制系统中的速度环内的前向通道中，共同对系统的输出产生影响。考虑到在变频压缩机系统中的参考输入为斜坡型或阶跃型的速度指令 $r(z)$而非以往逆变电源重复控制中的周期性参考输入信号。而外部扰动即负载转矩为周期性的，这是因为当压缩机达到给定转速并稳定下来后，由于负载脉动转矩的存在，转速产生与脉动负载转矩同频率的振荡，负载脉动周期为转子转动的机械周期，速度脉动波形如图 2 所示。从重复控制器原理可知在非周期性的给定指令信号时，重复控制器会产生错误的控制信号；而在周期性负载冲击下 PI 控制器虽会产生错误的控制信号，但该错误信号可经过重复控制器多个周期识别后给予抵消，其产生的影响相对较小。因此本文的复合控制方案必须解决以下两个问题：①如何识别周期性或者非周期性的信号或负载扰动；②如何选择合适的控制信号输出，从而避免错误的控制信号对系统的影响 [12]。

在变频压缩机系统中的非周期信号，一个为变化的给定速度指令信号，另一个是系统运行过程中的负载的突变。对于前一种情况，只要比较前后速度给定值，就可以快速辨别。而对后一种情况可以根据当前误差信号与上一个周期误差信号的差值的绝对值与一阈值 $e_{\mathrm{limit}}$ 进行比较，如小于该阈值，则系统处于正常运行状态；如比阈值大，则可认为系统出现了非周期性信号即扰动。

当系统处于稳定运行状态时，系统运行所需的控制量为 PI 调节器与重复控制器共同输出。一 旦发现系统的跟踪误差突然变大，关闭重复控制器，而由 PI 控制器单独起作用。这是因为重复控制器会对扰动周期内出现的一次性误差在随后的周期中进行纠正，但由于在随后的周期中扰动并不存在，从而重复控制器会出现错误的控制输出。若此时 PI 调节器单独起作用，其对检测到的误差信号会立即响应并快速产生校正作用。故在检测到非周期性

信号或扰动时，PI 调节器单独提供控制作用，关闭重复控制器并把重复控制器的控制量清零，为下次稳定运行状态时重复控制器起作用做好准备。一 旦系统辨别出非周期性信号或扰动消除时，重复控制器被起用。在经过一个周期过后，重复控制器作用增强并产生调节作用使跟踪误差减小，而 PI 调节器的控制作用减弱一些，它们共同起作用，其中 PI 控制器的输出占主要作用，重复控制器的输出用来消除周期性的扰动，系统又重新达到新的稳定运行状态。在非周期性与周期性信号或负载切换时的算法具体过程如式（ 3）所示。

$$\begin{cases} u_{\mathrm{RP}}(k)=0 & \\ u_{\mathrm{RP}}(k+1)=0 & |e(k)-e(k-N)|>e_{\mathrm{limit}} \quad (3a \\ \mathsf{M} & \\ u_{\mathrm{RP}}(k+N-1)=0 & \\ u_{\mathrm{RP}}(k)=e(k)G_{\mathrm{RP}}(z) & |e(k)-e(k-N)|<e_{\mathrm{limit}} \quad (3b \end{cases}$$

## 4 重复控制器设计

由于理想重复控制器的极点分布在虚轴上，处于临界稳定状态，故其系统的稳定性较差 [9]。为保证稳定性，重复控制通常采用改进型内模，如图 5 所示。离散化的重复控制器 $G_{\mathrm{RP}}(z)$由周期延迟正反馈环节 $G_{\mathrm{RP0}}(z)$、重复控制增益 $K_{\mathrm{RP}}$、延迟环节 $z^{-N}$、超前相位补偿环节 $z^{R}$ 以及补偿器 $S(z)$组成。其中 $N$ 是数字控制器每周期的采样个数， $e(z)$是闭环系统误差， $Q(z)$是低通滤波器或常数可增强系统稳定性、提高闭环系统的鲁棒性，补偿器 $S(z)$可改善开环系统的幅频特性，比例环节方便调节重复控制器的输出增益。

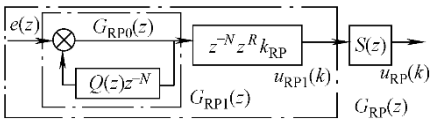



图 5 改进型重复控制器

Fig.5 Improved repetitive controller

从图 5 可得

$$G_{\mathrm{RP}}(z)=\frac{u_{\mathrm{RP}}(z)}{e(z)}=\frac{z^{-N+R}k_{\mathrm{RP}}}{1-Q(z)z^{-N}}S(z) \qquad (4)$$

$$u_{\mathrm{RP1}}(k)=u_{\mathrm{RP1}}(k-N)Q(z)+K_{\mathrm{RP}}e(k-N+R) \qquad (5)$$

式中，$k$ 为每周期中的采样点， $k$ 的取值范围为 0～（$N$–1）。由式（5）可知，改进型的重复控制器在忽略补偿控制器时，本周期 $k$ 时刻重复控制器的输出量为上周期 $k$ 时刻的控制量与上周期 $k+R$ 时刻误差的组合。这体现出改进型重复控制器有着复现上一时刻控制输出量和相位补偿的控制思想。

根据控制理论，复合控制系统的稳定性取决于各子系统的稳定性。只要 PI 控制器和重复控制器单独起作用时系统是稳定的，那么复合控制作用的结果系统仍然是稳定的。保证系统稳定的速度环 PI 调节器已是经典控制器设计，本文就不再叙述。图 4 中当只有重复控制器时，系统误差表达式 为

$$e(z)=\frac{z^{N}-Q(z)}{z^{N}-(Q(z)-z^{R}k_{\mathrm{RP}}S(z)P(z))}r(z)+\frac{Q(z)-z^{N}}{z^{N}-(Q(z)-z^{R}k_{\mathrm{RP}}S(z)P(z))}d(z) \qquad (6)$$

式（6）右侧第一项为系统的稳定误差，第二项为扰动误差。令 $H(z)=Q(z)-z^{R}k_{\mathrm{RP}}S(z)P(z)$。由控制理论小增益原理可知，系统稳定的条件是 $z^{N}-H(z)=0$的特征根都应处于以原点为圆心、幅值为 1 的单位圆内，即 $|z_i|<1,\ i=1,2\cdots$。因此具有重复控制器的系统稳定的充分条件为： ①控制对象 $P(z)$稳定； ②滤波器 $Q(z)$稳定； ③$\|H(z)\|_{\infty}<1$，$\forall z=\mathrm{e}^{\mathrm{j}\omega T_s}$ 且 $\omega\in(0,\pi/T_{\mathrm{s}})$， $\|H(z)\|_{\infty}$越小系统稳定裕度越大[13]。

由式（6）得系统稳态误差幅值特性为

$$|e(z)|=\left|\frac{1-Q(z)}{1-H(z)}\right||r(z)|+\left|\frac{1-Q(z)}{1-H(z)}\right||d(z)| \qquad (7)$$

从式（7）可知，稳态下系统输入引起的跟踪误差和扰动引起的误差，都将衰减到原来 $|1-Q(z)|/|1-H(z)|$的倍。理想情况下当 $Q(z)=1$ 时，重复控制器可抑制任何频率低于奈氏频率 1/（$2T_{\mathrm{s}}$）的周期扰动，其稳态误差均为零。表明有重复控制器的控制系统具有良好的扰动抑制能力和跟随输入指令的性能。

重复控制器的部件设计方案 如下：

（1）滤波器 $Q(z)$。$Q(z)=1$ 时，可使控制系统的稳态误差为零，但系统处于临界稳定状态。考虑稳态误差和稳定性两个方面的要求， $Q(z)$一般取为小于且接近 1 的常数或低通滤波器，本文取 $Q(z)=0.95$。

（2）补偿器 $S(z)$。根据 M.Tomizak 提出的 ZPETC（零相移误差跟踪 ）方法[11]，当 $S(z)=P(z)^{-1}$时，整个控制系统有最好的控制效果。

但由于系统的参数的不确定性，很难得到其精确 的数学模型。另外考虑到设计补偿器是为了抵消控制对象较高的谐振峰值，增强前向通道的高频衰减特性，以提高系统的稳定性和抗高频干扰能力。本文取

$$S(z)=S_1(z)\cdot S_2(z)=\frac{z^5+2+z^{-5}}{4}\cdot\frac{0.1164z+0.07881}{z^2-1.1164z+0.3116}$$

其中 $S_1(z)$为二阶低通滤波器， $S_2(z)$为 FIR 滤波器，该补偿器就具备上述的特征 [14]。

（3）超前环 $\mu z^R$。其用于补偿由 $P(z)S(z)$在中低频段引起的相位滞后。因此需要根据 $P(z)S(z)$在中低频段的相位情况，选择合适的超前节拍。本文 $R$ 取为 5。

（4）可调增益 $k_{RP}$。$k_{RP}$ 越小使得误差收敛速度越快，稳定裕度越大； $k_{RP}$ 越大，反之。因此，$k_{RP}$ 取值需要权衡考虑，本文 $k_{RP}$ 取 0.6。

## 5　仿真与实验

驱动压缩机的永磁同步电机控制方案采用 $i_d$=0 的无速度传感器的矢量控制方案，包括速度环、电流环、逆变器和速度估算模块等。由于压缩机内部处于密封状态，工作环境非常恶劣且充满强腐蚀性的高压制冷剂，无法安装位置传感器，本文采用了滑模变结构的无位置传感器技术以获得转子位置。由于本文旨在介绍利用重复控制抑制转矩脉动，滑模变结构的技术可 参见文献[15]，本文不再介绍。滑模观测器得到的转子位置信号送入锁相环以获得转子转速。系统组成 如图 6 所示，速度环的控制周期为 500μs，电流环的控制周期为 100μs。仿真采用 Matlab 软件，实验是基于 FreeScale 公司的 56F8037 控制芯片的硬件平台。其中变频压缩机参数如下：直流环节电压为 310V，额定功率为 850W，转速范围为 1200～7200r/min，极对数为 2，转子永磁体磁链为 0.39Wb，交轴电感为 9.1mH，直轴电感为 5.6mH，定子电阻为 0.35Ω，转动惯量为 0.000 685kg/m$^2$。

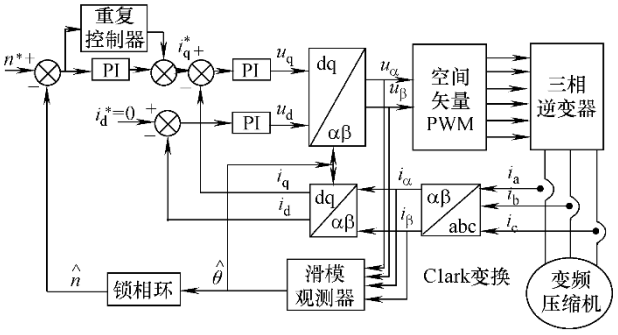
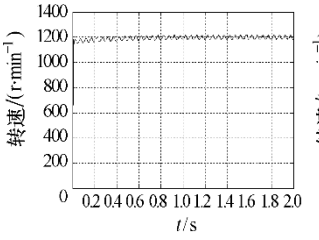


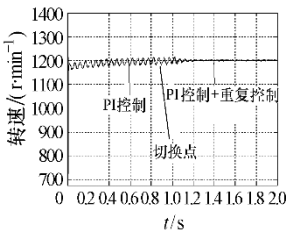

图 6　系统控制框图

Fig.6　Block diagram of system control

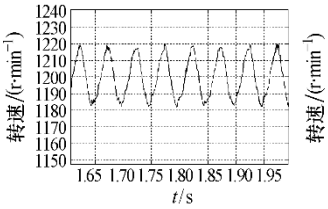
Matlab 的仿真实验结果 如图 7 所示。仿真所用负载是模拟压缩机的周期性负载，其周期为机械周期，且压缩机由静止 起动到转速 1200r/min。从图 7a、图 7b 可见 PI 控制器不能抑制由于脉动负载引起的速度脉动，速度脉动较大，脉动幅度约为 40r/min，且速度脉动的周期与转子的机械周期相同。图 7d、7e、7f 为速度环采用复合控制器的仿真结果图，压缩机 起动时速度环只采用 PI 控制器，当转速进入稳定状态时，速度环采用复合控制器。从图 7b、7e 可知采用复合控制后速度脉动幅度降低为无重复控制器时脉动幅值的 10%左右，速度脉动明显得到改善。由图 7c、7f 相比较发现采用重复控制后电流波形正弦度得到一定程度的改善。



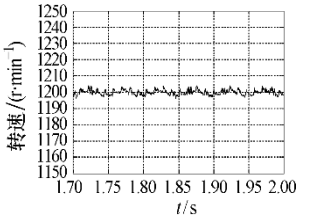

（a）加速至 1200r/min 转速波形（PI）



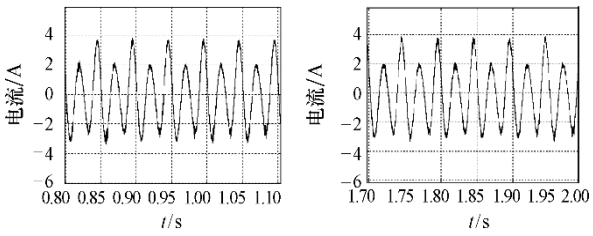

（d）加速至 1200r/min 转速波形（复合）




（b）1200r/min 转速局部放大（PI）




（e）1200r/min 转速局部放大（复合）

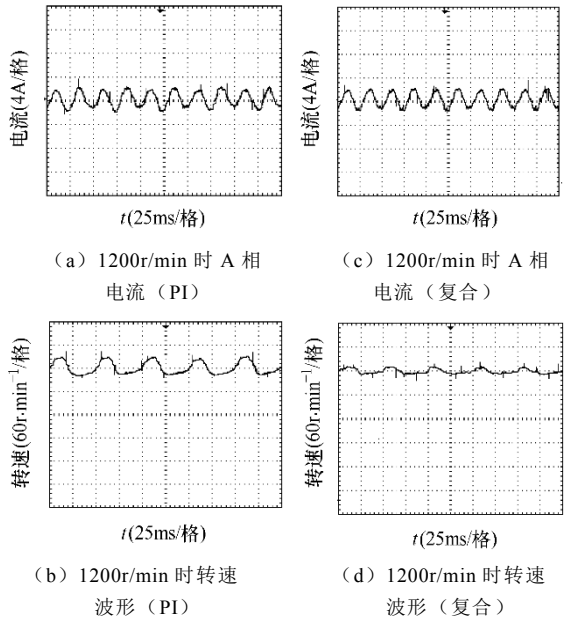



（c）1200r/min 时 A 相电流（PI）　　（f）1200r/min 时 A 相电流（复合）

图 7　速度环采用 PI 和复合控制器时的仿真结果

Fig.7　Simultation results of PI and composite control strategy

实验结果如图 8 所示，其中图 8a、图 8b 为 PI 控制时实验波形图，图 8c、图 8d 为复合控制时实验波形图。压缩机由静止 起动到低速 1200r/min。由图 8a 可见单有 PI 控制时，电流波形扭曲得比较严重，而与图 8c 相比较发现采用重复控制后电流波形正弦度得到一定程度的改善。这是因为采用重复控制后，电磁转矩能很好地跟踪周期变化的负载转矩，从而使得电流波形得到改善。从图 8b 可见 PI 控制器时脉动负载引起的速度脉动幅度较大，脉动幅度约为 60r/min。从图 8d 可知采用复合控制后速度脉动幅度降低为无重复控制器时脉动幅值的 20%左右，速度脉动得到了很好 地抑制。这些与仿真得到 的结论是相同的，进一步证明本文方案的有效性和正确性。另外，采用复合控制后，空调系统的振动、噪声也都明显减弱。




（a）1200r/min 时 A 相电流（PI）　　（c）1200r/min 时 A 相电流（复合）

（b）1200r/min 时转速波形（PI）　　（d）1200r/min 时转速波形（复合）

图 8　速度环采用 PI 和复合控制时的实验结果

Fig.8　Experimental results with PI and composite controller

## 6　结论

驱动压缩机的永磁同步电机低速时受脉动的负载转矩影响引起的振动、噪声尤其明显，故其低速运行受到限制。因此，为了减小永磁同步电机低速运行时的振动和噪声 、扩大压缩机的调速范围 、提高空调系统能效比，必须有效抑制负载转矩脉动带来的速度脉动。本文从控制方法上加以分析，提出在永磁同步电机速度控制环上采用一种重复控制和 PI 控制相结合的新型复合控制方案。该策略集成了 PI 控制和重复控制的特点，且具有结构简单、一定的鲁棒性等优点，使系统得到了较为理想的稳态效果和动态响应。仿真和 实验结果表明，由 PI 控制器和重复控制器构成的速度环新型复合控制器策略能有效地降低驱动压缩机的永磁同步电机低速运行时速度脉动，从而抑制了振动、噪声等现象。因此该策略为驱动压缩机的永磁同步电机的更低转速运行，提高空调系统的能效比提供了一个有效的途径，从而表明该方案具有很强的工程和节约能源意义。

## 参考文献

[1] Jahns T M, Soong W L. Pulsating torque minimization techniques for permanent magnet ac drives-a review[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1996, 43(2): 321-330.

[2] Studer C, Keyhani A, Sebastian T, et al. Study of cogging torque in permanent magnet machines[C]. Proceeding of IEEE Conference on Industry Applications, New Orleans, Louisiana, USA, 1997, 1(1): 42-49.

[3] Choi Jong Woo, Lee Sang Sup, Sang Yeop Yu, et al. Novel periodic torque ripple compensation scheme invector controlled AC motor drives[C]. Applied Power Electronics Conference and Exposition, 1998, 1: 81-85.

[4] Qian Weizhe, Panda S K, Xu Jianxin.Torque ripple minimization in PM synchronous motors using iterative learning control[J].IEEE Transactions on Power Electronics, 2004, 19(2): 272-279.

[5] 张猛，李永东，赵铁夫，等. 一种减小变频空调压缩机低速范围内转速脉动的方法 [J]. 电工技术学报，2006, 21(7): 99-104.

Zhang Meng, Li Yongdong, Zhao Tiefu, et al. A new method to reduce the periodic speed ripples of air-conditioners in low speed range[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2006, 21(7): 99-104.

[6] 孔雪娟，王荆江，彭力,等. 基于内模原理的三相电压源型逆变电源的波形控制技术 [J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(7): 67-70.
Kong Xuejuan, Wang Jingjiang, Peng Li, et al.The control scheme of three-phase voltage-source inverter output waveform based on internal model theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(7): 67-70.

[7] 王成智，邹旭东，许赟，等.采用改进重复控制的大功率电力电子负载 [J]. 中国电机工程学报 , 2009, 29(12): 1-9.
Wang Chengzhi, Zou Xudong, Xu Yun, et al.Improved repetitive control scheme for power electronic load[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(12): 1-9.

[8] 孙耀杰，左贺，康龙云，等. 抑制混合式步进电机转矩波动的时变重复控制 [J]. 中国电机工程学报 , 2004, 24(11): 183-187.
Sun Yaojie, Zuo He, Kang Longyun, et al. Time-varying repetitive control of restraining toque ripple for hybrid stepping motor system[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(11): 183-187.

[9] 李翠艳. 重复控制的一些设计问题研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学 , 2005.

[10] Tsai M C, Yao W S. Design of a plug-in type repetitive controller for periodic inputs[J]. IEEE Trans. Control Syst. Technol., 2002, 10(4): 547-555.

[11] Cosner C, Anwar G, Tomizuka M. Plug in repetitive control for industrial robotic manipulators[C]. Proceedings of IEEE Conference on Robotics and Automation , 1990, 3: 1970-1975.

[12] 王斌，王凤岩. 提高重复控制逆变电源的负载瞬态响应特性 [J]. 电源技术应用 , 2008, 11(2): 6-9.
Wang Bin, Wang Fengyan. Improving load transient reponse of inverter with repetitive control[J]. Power Supply Technologies and Applications, 2008, 11(2): 6-9.

[13] 陈宏. 基于重复控制理论的逆变电源控制技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学 , 2003.

[14] Tomizuka M. Zero phase error tracking algorithm for digital control[J]. ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, 1987, 109(1): 65-68.

[15] Chu Jianbo, Hu Yuwen, Huang Wenxin, et al. An improved sliding mode observer for position sensorless vector control drive of PMSM[C]. Power Electronics and Motion Control Conference, 2009, 6: 1898-1902.

**作者简介：**储剑波　男, 1972 年生，博士研究生，讲师，主要研究方向为电力电子与电力传动。 胡育文　男, 1944 年生，教授，博士生导师，主要研究方向为电力电子技术与运动控制。