

# 一种基于频率响应辨识的开关频率对永磁电机控制环性能影响的新分析方法

俞学初, 蒋 栋

(华中科技大学电气与电子工程学院, 湖北 武汉 430074)

**摘要:** 分析了交流永磁同步电机控制环性能与逆变器的开关频率之间的关系, 建立了电机电流环与速度环的数学模型。在此基础上采用经典的反馈控制原理, 通过合理地配置反馈控制调节器的系数, 指明了电机电流环的截止频率近似与逆变器开关频率成正比的关系, 且满足足够的相位裕度。而在一定的范围内, 逆变器开关频率对速度环的截止频率影响较小, 速度环截止频率主要与电机系统自身的惯性时间常数有关, 并满足一定的相位裕度。同时应用了一种特定的自适应噪声消除技术(ANC), 通过自适应最小均方算法(LMS), 对电流环与速度环的频率响应进行了在线辨识, 进而可以得到控制环传递函数的波特图进行分析和比较研究。仿真结果与实验结果均验证了所提出新辨识方法的有效性和电流环与速度环数学模型的正确性。

**关键词:** 电流环; 速度环; 截止频率; 自适应噪声消除; 最小均方算法

**DOI:** 10.12067/ATEEE1806058      **文章编号:** 1003-3076(2018)12-0001-08      **中图分类号:** TM341

## 1 引言

近年来, 交流永磁同步电机因为其优异的性能, 例如结构简单、体积小、重量轻、损耗少、效率高等, 在工业领域被大量应用<sup>[1,2]</sup>, 具有很好的发展前景。

矢量控制<sup>[3,4]</sup>和直接转矩控制<sup>[5,6]</sup>作为交流电机的两种主流的控制方式, 最近几十年来得到了长足有效的发展, 并且成功地应用在永磁同步电机的控制系统中。在永磁电机的矢量控制系统中, 一般采用了电流环作为内环和速度环作为外环的双环控制方式, 这既可以保证整个电机系统对指定响应的快速跟随性, 又可以保证足够的抗扰性能<sup>[7,8]</sup>。

在永磁电机控制的内外环性能设计和评估中, 一般需要通过分析控制闭环或者开环波特图的性能指标来评判控制效果, 例如系统的截止频率、相位裕度等。基于控制系统平台小信号分析的传递函数辨识方法成为一个极其重要的研究方向。图1展示的是一个电机控制系统中辨识控制环传递函数的典型结构: 在参考指令值的基础上注入小信号从而激

励系统的小信号响应, 将小信号的激励与响应同时送入辨识模块, 从而得到传递函数的波特图。

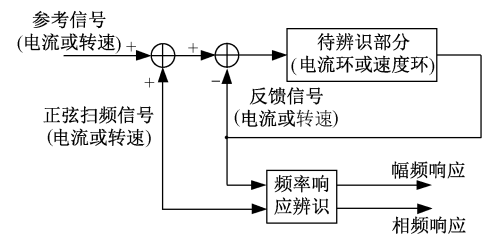


图1 通过小信号分析方法辨识传递函数

Fig. 1 Transfer function identification through small signal analysis

系统的频率响应可以通过不同的方法辨识得到, 文献[9]以伪随机二进制信号(Pseudo-Random Binary Sequence, PRBS)作为正激式变换器的激励信号, 应用相关分析法辨识得到了系统的频率响应, 并分析了PRBS序列的长度对辨识效果的影响。而在文献[10]中, 正弦扫频信号用来作为在线辨识机电系统频率响应的激励信号, 并且使用了一种自适

收稿日期: 2018-06-20

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(51607077)

作者简介: 俞学初(1993-), 男, 浙江籍, 博士研究生, 研究方向为永磁同步电机的无位置传感器控制;  
蒋 栋(1983-), 男, 湖南籍, 教授, 博士, 研究方向为电力电子与电力传动、电磁兼容等。

应最小均方 (Least Mean Square, LMS) 算法。

闭环控制的性能指标通常和反馈控制的方式有关,比例积分 (Proportional-Integral, PI) 调节器因为其简单的结构,易于数字实现,常被应用于工程控制中。文献[11]分析了 dq 旋转坐标系下三相电压型逆变器 (Voltage Source Inverter, VSI) 带阻感负载的电流环模型,指出电流环的截止频率与电压、电流反馈信号的采样方式有关,但未与逆变器开关频率联系起来。文献[12]提出了一种能提高控制环截止频率的方式,不过同样没有给出截止频率与开关频率近似的函数关系,同时均没有结合相位裕度这一因素。

电机控制逆变器在脉宽调制 (Pulse Width Modulation, PWM) 条件下高频开关是实现高性能数字控制的基础。尤其是随着宽禁带电力电子器件的应用,电机控制器的开关频率进一步提高,对电机动态性能的改善也有期望。不过目前国内外针对提高开关频率对电机控制动态性能的改善的研究还较为欠缺,难以充分发挥新型电机控制器的优势。同时传统的频率响应辨识方法常使用 M 序列作为待辨识系统的辨识输入信号,在计算输入自相关信号与输入输出互相关信号后,使用相关分析法来计算系统的频率响应。在此过程中 M 序列的产生和相关信号的计算繁琐且对硬件资源负担大。针对这些问题展开了相关研究。

通过理论分析建立了逆变器开关频率对永磁同步电机的电流环和速度环影响的模型,应用不同的设计方式来设置 PI 调节器的参数。根据电流环具有快速跟随性的特征,参考二阶最佳设计方法,把电流环设计成一个典型 I 型系统,而速度环一般要求具备良好的抗扰性能,故根据幅频特性峰值最小设计准则,把速度环整定成典型 II 型系统。模型表明电流环的截止频率与开关频率成正比,而逆变器的开关频率则对速度环的截止频率影响很小,并且两者均具有了足够的相位裕度。同时采用小信号扰动方法,在系统的特定稳态点将整个系统近似等效为一个线性系统,然后利用一系列的正弦信号作为这个系统的输入,其输出必然是相同频率的正弦形式,只是幅值和相位会变化,最后应用一种特定的自适应噪声消除技术,理论分析得出当干扰信号为正弦信号时,整个自适应滤波器可以等效为带通滤波器,对上述输出信号进行自适应滤波,只有特定频率的正弦部分通过滤波器时会被留下来,进而可以依次求得特定频率信号的幅值和相位,于是可以得到一

定频率范围内的系统波特图,仿真和实验都验证了这种新方法的正确性和有效性。

## 2 频率响应辨识原理

自适应噪声消除技术作为一种常见的数字滤波技术,工程上常用于对特定噪声的滤波,如心电图信号中对频率 60Hz 的电源线干扰的消除,语音信号中噪声的消除等<sup>[13]</sup>。自适应噪声消除技术的原理如图 2 所示,其中的主要输入信号包括期望得到的信号  $s$  和噪声信号  $n_0$ ,而参考输入信号  $n_1$  可以是我们指定的一系列信号,如正弦信号、伪随机二进制信号等,其可以与  $s$  或  $n_0$  相关。而自适应滤波器可以采用常见的不同算法实现,如最小均方算法 (LMS)<sup>[14]</sup>、递归最小二乘法 (Recursive Least Squares, RLS)<sup>[14]</sup> 等。

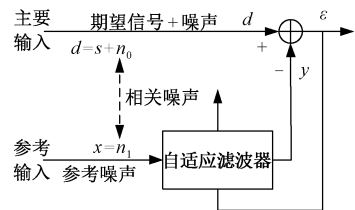


图 2 自适应噪声消除技术原理图

Fig. 2 Principle of adaptive noise canceling system

最小均方算法因为其简单的迭代形式,高效的收敛速度,常用于自适应滤波技术中,其主要离散形式的迭代方程如下:

$$\begin{cases} y_k = w_k^T x_k \\ \varepsilon_k = d_k - y_k \\ w_{k+1} = w_k + \alpha \varepsilon_k x_k \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $x_k$ 、 $y_k$ 、 $d_k$ 、 $\varepsilon_k$  分别为输入信号、输出信号、期望信号和误差信号的离散形式;  $w_k$  为每次算法的迭代权重向量;  $\alpha$  为算法每次的迭代步长。当迭代步长选择合适时, Widrow 证明了最小均方算法对于静态随机过程<sup>[15]</sup>, 期望的迭代权重向量能收敛到最优解  $w^*$ 。

当参考输入信号为正弦信号形式时, 即  $x_k$  用以下形式表达,  $C$ 、 $\omega_r$ 、 $\theta$  分别为信号的幅度、角频率和初始相位。

$$x_k = C \cos(\omega_r kT + \theta) \quad (2)$$

以下将证明, 当一定的条件状况满足时,  $G(z)$  可以近似等效为一个带通滤波器, 如图 3 所示。

作为参考输入信号的任意一个分量, 可以写成:

$$x_{ik} = C \cos(\omega_r kT + \theta_i) = \frac{C}{2} (e^{j\omega_r kT} e^{j\theta_i} + e^{-j\omega_r kT} e^{-j\theta_i}) \quad (3)$$



器时只有对应频率的正弦成分才会被保留下来。

### 3 电机控制环模型分析

交流永磁同步电机(Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM)应用矢量控制时可以等效为一台他励直流电机,简化了控制策略。

#### 3.1 电流环控制模型

对交流永磁同步电机进行建模后,其 dq 旋转坐标系下的数学模型如下<sup>[16]</sup>:

$$\begin{cases} u_d = Ri_d + L \frac{di_d}{dt} - \omega_e Li_q \\ u_q = Ri_q + L \frac{di_q}{dt} + \omega_e Li_d + \omega_e \psi_f \end{cases} \quad (13)$$

式中,  $u_d, u_q$  和  $i_d, i_q$  分别为电机在 dq 坐标系下的电压与电流;  $L_d, L_q$  分别为电机的交直流电感(若对于隐极永磁电机,  $L_d = L_q = L$ );  $R$  为电机定子端的电阻;  $\omega_e$  为电机的电角速度;  $\psi_f$  为电机的转子永磁磁链。通过分析以上的模型,当电流闭环控制采用 PI 调节方式时,永磁电机电流环控制框图如图 5 所示。

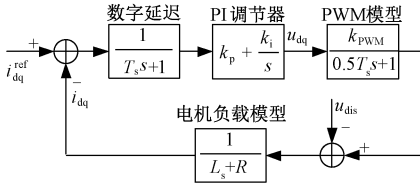


图5 PMSM 电流环控制框图

Fig. 5 Control diagram of current loop for PMSM

图 5 中  $T_s$  为逆变器的开关周期,即中断采样周期,  $k_{PWM}$  为 PWM 调制环节的等效增益。依据以上的控制框图,电流环的传递函数可以写成:

$$F_o \approx \frac{k_{PWM}(k_p s + k_i)}{s(1.5T_s s + 1)(L_s + R)} \quad (14)$$

从式(14)中可以发现,这是一个潜在的三阶系统。而作为内环的电流环而言,应当主要考虑对参考指令的快速跟随性,故工程上常常把电流环的传递函数配置成典型的 I 型系统<sup>[17]</sup>,即 PI 调节器的零点与分母中惯性较大的极点相抵消。

$$\frac{k_p}{k_i} = \frac{L}{R} \quad (15)$$

通过式(15)设置后,电流环的传递函数将变成一个典型的二阶系统,为了把系统设计成欠阻尼状态,同时兼顾系统的快速性与稳定性,常把阻尼比  $\xi$  设计成 0.707,故式(16)成立。

$$\frac{k_{PWM}k_i}{R} = \frac{1}{3T_s} \quad (16)$$

联立式(15)、式(16),可以唯一确定 PI 调节器的比例常数和积分常数。

$$k_p = \frac{L}{3T_s k_{PWM}} = \frac{Lf_s}{3k_{PWM}}, \quad k_i = \frac{R}{3T_s k_{PWM}} = \frac{Rf_s}{3k_{PWM}} \quad (17)$$

式中,  $f_s$  为逆变器的开关频率。可以发现 PI 调节器的参数与开关频率有关,当传递函数的增益为 1 时,即  $|F_o(s)| = 1$ ,通过计算后得到,截止频率为:

$$f_{oc} = 0.0483f_s \quad (18)$$

将求得的截止频率代入式(19)计算后可以得到相应的相位裕度(Phase Margin, PM)。

$$PM = 180^\circ - F_o(j2\pi f_{oc}) \approx 65.3^\circ \quad (19)$$

通过建立永磁同步电机的电流环数学模型以及分析电流环的性能指标,给出了 PI 调节器参数的设置方式,同时经过理论推导后表明,电流环的截止频率与逆变器的开关周期有关,并且近似为一个正比关系,而相位裕度能达到  $65.3^\circ$ 。所有的性能指标均保证了电流环快速的跟随性与稳定性。

#### 3.2 速度环控制模型

速度环作为电机矢量控制的外环,影响着电机的调速性能和转矩输出。对于永磁同步电机,其转矩方程如下(忽略摩擦):

$$T_e - T_L = J \frac{d\omega_m}{dt} \quad (20)$$

式中,  $T_e$  与  $T_L$  分别为电机的电磁转矩和负载转矩;  $J$  为转子的转动惯量;  $\omega_m$  为电机的机械角速度。

对于一般的隐极式永磁同步电机而言,当采用  $i_d = 0$  的矢量控制方式时,电磁转矩可通过式(21)求得:

$$T_e = 1.5P\psi_f i_q \quad (21)$$

式中,  $P$  为电机的极对数。

电流环的时间常数远远小于速度环的时间常数,故当速度闭环控制后,电流内环可以近似地等效为一个一阶惯性环节,这也从侧面说明电流闭环控制改造了控制对象,加快了电流的跟随作用。结合式(20)、式(21)两个方程,对于隐极式永磁同步电机,整个速度控制的动态结构框图如图 6 所示。

根据图 6 所示的控制框图,速度环的传递函数可以写成:

$$\begin{aligned} F_{os} &= \frac{k_p s + k_i}{s} \frac{1}{T_{ci}s + 1} \frac{1}{T_{fs}s + 1} \frac{1.5P\psi_f}{Js} \\ &\approx \frac{1.5P\psi_f(k_p s + k_i)}{Js^2(T_{on}s + 1)} \end{aligned} \quad (22)$$





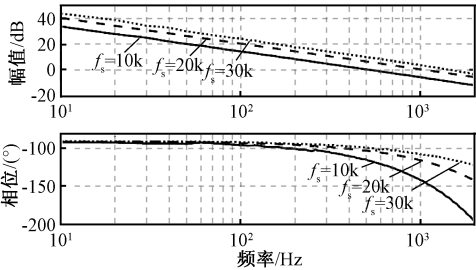


图9 不同开关频率的电流环波特图(仿真结果)  
Fig.9 Current loop bode diagram with different switching frequency (simulation result)

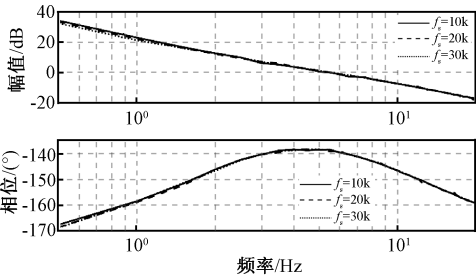


图10 不同开关频率的速度环波特图(仿真结果)  
Fig.10 Speed loop bode diagram with different switching frequency (simulation result)

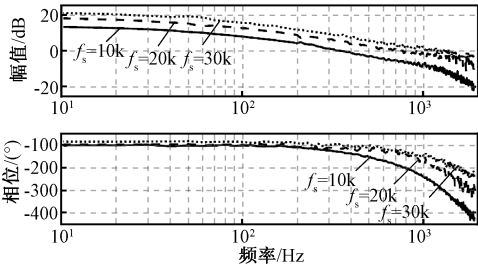


图12 不同开关频率的电流环波特图(实验结果)  
Fig.12 Current loop bode diagram with different switching frequency (experimental result)

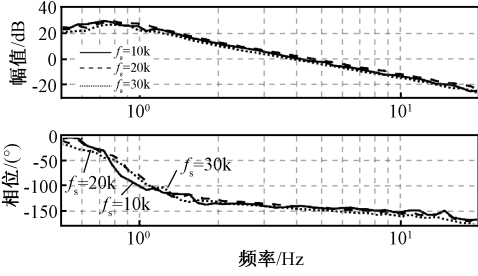


图13 不同开关频率的速度环波特图(实验结果)  
Fig.13 Speed loop bode diagram with different switching frequency (experimental result)

量控制实验,并使用频率响应分析仪来测量不同开关频率下的电流环与速度环波特图,实验装置如图11所示。

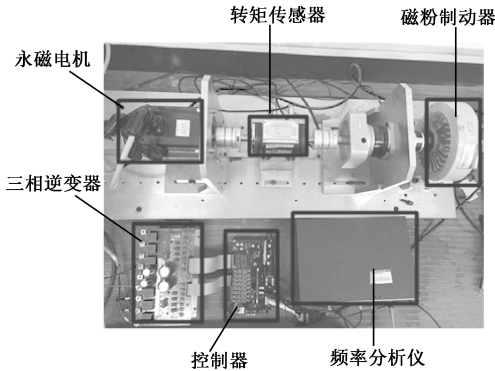


图11 实验装置  
Fig.11 Experimental setup

在电机转速为 600r/min 的稳态情况下使用频率响应分析仪测量得到的不同开关频率下的电流环与速度环波特图如图12和图13所示。

4.2 结果分析与讨论

根据仿真与实验所得到的数据以及波特图,相应地就可以求得内外控制环的截止频率以及相位裕度,完整的结果见表2和表3。

表2 不同开关频率电流环性能指标

Tab.2 Performance indicators of current loop under different switching frequency

开关频率/kHz	截止频率/Hz (理论/仿真/实验)	相位裕度/(°) (理论/仿真/实验)
10	483/504/408	65.3/63.8/51.8
20	966/1010/868	65.3/64.1/49.6
30	1449/1456/1347	65.3/65.1/47.3

表3 不同开关频率速度环性能指标

Tab.3 Performance indicators of speed loop under different switching frequency

开关频率/kHz	截止频率/Hz (理论/仿真/实验)	相位裕度/(°) (理论/仿真/实验)
10	5.47/5.36/3.96	41.3/40.8/39.6
20	5.52/5.58/4.25	41.3/40.3/37.2
30	5.54/5.43/4.31	41.3/40.1/38.1

从表2和表3中可以发现,无论是对于电流控制环还是速度控制环,仿真所得到的数据结果均与理论分析结果相差无几,一方面是因为仿真环境没有额外因素的干扰,另一方面也验证了所提出的新辨识方法的正确性与有效性。但观察实验结果可以

发现,电流控制环与速度控制环的截止频率均比理论分析结果小一些,相位裕度也是如此,这主要是由于实验中其他因素的干扰,比如信号采样滤波环节带来的延迟,算法执行环节带来的延迟等。同时由于真实电机系统的复杂性以及非线性,测量控制环波特图时,必须合理地考虑扫频小信号幅值与参考指令值的比例,比例过小可能会导致扫频小信号在反馈信号中没有体现,比例过大可能会导致电机的异常运行。

## 5 结论

基于一种自适应噪声消除技术的应用,提出了一种基于正弦形式小信号注入的频率响应辨识的新算法,并且在理论上证明了算法的正确性。同时针对永磁电机的矢量控制方法,合理地建立了电机内外控制环的数学模型,通过控制器最优整定方法设置控制参数后,指出了电流控制环的截止频率近似地与逆变器的开关频率成正比,而速度控制环的截止频率则与转速测量滤波环节的时间常数有关,仿真结果与实验结果均验证了新算法的有效性。本文提出的在线频率响应辨识的新方法适用于任何机电控制系统,从而为从频域角度分析系统控制性能提供了一种途径,同时特有的在线参数辨识技术能自动调节控制器的控制参数,能提高系统的控制效果,但硬件的计算能力可能满足不了某些复杂的在线辨识算法,未来稳定可靠的辨识算法仍然是研究热点。

## 参考文献 (References):

- [1] 唐任远 (Tang Renyuan). 稀土永磁电机发展综述 (The development review of rare earth permanent magnet machine) [J]. 电气技术 (Electrical Engineering), 2005, 4 (4): 1-6.
- [2] 李静,程小华 (Li Jing, Cheng Xiaohua). 永磁同步电机的发展趋势 (Development tendency of permanent magnet synchronous machine) [J]. 防爆电机 (Explosion proof electric machine), 2009, 44 (5): 1-4.
- [3] 周好 (Zhou Hao). 永磁同步电机矢量控制调速系统研究 (Research on vector controlled velocity regulating system of permanent magnet synchronous motor) [D]. 大连: 大连理工大学 (Dalian: Dalian University of Technology), 2010.
- [4] 张兴华,陈鹏飞 (Zhang Xinghua, Chen Pengfei). 内置式永磁同步电机的效率最优直接转矩控制 (Optimal-efficiency direct torque control of interior permanent magnet synchronous motors) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2017, 36 (7): 57-62.
- [5] 李文帅,吴爱国,董娜 (Li Wenshuai, Wu Aiguo, Dong Na). 基于优化滑模观测器的无刷直流电机变结构直接转矩控制 (Variable structure direct torque control for BLDCM based on optimized sliding mode observer) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2017, 36 (1): 25-29.
- [6] 丁强 (Ding Qiang). 永磁同步电机矢量控制系统弱磁控制策略研究 (Study on weak magnetic control strategy of vector control system of permanent magnet synchronous motor) [D]. 长沙: 中南大学 (Changsha: Central South University), 2010.
- [7] Kim H, Degner M W, Guerrero Juan M, et al. Discrete-time current regulator design for AC machine drives [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2010, 46 (4): 1425-1435.
- [8] Kim S K, Lee J S, Lee K B. Self-tuning adaptive speed controller for permanent magnet synchronous motor [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 32 (2): 1493-1506.
- [9] Miao B, Zane R, Maksimovic D. System identification of power converters with digital control through cross correlation methods [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2005, 20 (5): 1093-1099.
- [10] Kshirsagar P, Jiang D, Zhang Z. Implementation and evaluation of online system identification of electromechanical systems using adaptive filters [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2016, 52 (3): 2306-2314.
- [11] Blasko V, Kaura V, Niewiadomski W. Sampling of discontinuous voltage and current signals in electrical drives: A system approach [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1998, 34 (5): 1123-1130.
- [12] Wang H J, Yang M, Niu L, et al. Current-loop bandwidth expansion strategy for permanent magnet synchronous motor drives [A]. 2010 5th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications [C]. Taichung, China, 2010. 1340-1345.
- [13] Widrow B, Glover J R, McCool J M, et al. Adaptive noise cancelling: Principles and applications [J]. Proceedings of the IEEE, 1975, 63 (12): 1692-1716.
- [14] Ljung L. System Identification: Theory for the User (2nd ed.) [M]. New Jersey: Prentice-Hall, 1999.
- [15] Widrow B. Adaptive filters I: Fundamentals [M]. New York: Springer, 1966.
- [16] 王成元,夏加宽,孙宜标 (Wang Chengyuan, Xia Jiakuan, Sun Yibiao). 现代电机控制技术 (第2版)

(Modern control technology for electric machines (second edition)) [M]. 北京: 机械工业出版社 (Beijing: China Machine Press), 2014.

[17] 陈伯时 (Chen Boshi). 电力拖动自动控制系统: 运动控制系统 (第 3 版) (Automatic control system of electric drive: Motion control system (Third edition)) [M]. 北京: 机械工业出版社 (Beijing: China Machine Press), 2003.

**Novel method for analyzing influence of switching frequency on control loop of PMSM based on frequency response identification**

YU Xue-chu, JIANG Dong

(School of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** This paper analyzes the relationship between the control loop performance of permanent magnet synchronous motor and the switching frequency of the inverter, and establishes the mathematical model of the current loop and the velocity loop. On this basis, by choosing appropriate coefficients of the feedback regulator by using classical principle of feedback control, it is indicated that the cut-off frequency of the current loop is approximately proportional to the switching frequency of the inverter, with enough phase margin. But in a specific range, the switching frequency of the inverter has less impact on the cut-off frequency of the speed loop, which is in connection with the inertial time constant of permanent magnet synchronous motor. Meanwhile, specific adaptive noise canceling (ANC) is used by the least mean square (LMS) algorithm, frequency response of current loop and velocity loop can be identified online, and then the Bode diagram of transfer function is obtained, analyzed and compared. The simulation result and the experimental result confirm the validity of the new proposed identification method and the mathematical model of current loop and velocity loop.

**Key words:** current loop; speed loop; cut-off frequency; adaptive noise canceling; least mean square algorithm