

本文全文线上首发由
上海电器科学研究所
(集团) 有限公司
支持

李瑞棋, 杨波, 贺建湘, 陈立.
基于变论域模糊PI的永磁同步电机
无传感控制.
电机与控制应用, 2021, 48(10): 29.




数据监测
多维数据采集, 全面运行分析
全景可视窗口, 丰富报表类型


预测运维
海量行业数据, 精准趋势预测
生命周期管理, 性能尽在掌握


故障诊断
专业机理模型, 自动故障告警
在线智能诊断, 高效便捷派单


绿色节能
环保绿色先行, 助力低碳生产
节能降耗减排, 合理降本增效


聚汇商机
供需多方互联, 协同合作共赢
有效整合资源, 共享生态未来

SEARI
上电科

上海电器科学研究所(集团)有限公司
上海电机系统节能工程技术研究中心有限公司

云平台技术支持: 18918675776
固定电话: 021- 52669993

业务垂询: 18801608667
地址: 上海市普陀区武宁路505号9号楼



微信扫码关注我们

基于变论域模糊 PI 的永磁同步电机无传感控制

李瑞棋^{1,2}, 杨波^{1,2}, 贺建湘^{1,2}, 陈立³

(1. 哈电风能有限公司, 湖南湘潭 411101;

2. 海上风力发电技术与检测国家重点实验室, 湖南湘潭 411102;

3. 昆明理工大学 信息工程与自动化学院, 云南昆明 650504)

摘要: 受到带通滤波器的影响, 永磁同步电机(PMSM)脉振注入法中转子位置估算精度较低。为此, 提出了一种基于变论域模糊 PI 的 PMSM 无传感控制法。利用变论域模糊的方法对转速环上固定的 PI 参数进行动态调节, 达到减少系统延时、提高转子位置估算精度的目的。仿真的结果表明, 变论域模糊 PI 能够用于转子位置估算, 并且比传统 PI 无传感控制法减少了 0.331° 平均误差。

关键词: 永磁同步电机; 高频信号注入; 变论域; 模糊控制

中图分类号: TM 341 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2021)10-0029-06

doi: 10.12177/emca.2021.088

Sensorless Control of PMSM Based on Variable Universe Fuzzy PI

LI Ruiqi^{1,2}, YANG Bo^{1,2}, HE Jianxiang^{1,2}, CHEN Li³

(1. Harbin Electric Corporation Wind Power Co., Ltd., Xiangtan 411101, China;

2. State Key Laboratory of Offshore Wind-Power Technology and Testing, Xiangtan 411102, China;

3. Faculty of Information Engineering and Automation, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650504, China)

Abstract: Affected by the band-pass filter, the rotor position estimation accuracy in the pulsation injection method of the PMSM is low. For this reason, a method of sensorless control of PMSM based on variable universe fuzzy PI is proposed. The variable universe fuzzy method is used to dynamically adjust the fixed PI parameters on the speed loop. The system delay is reduced and the accuracy of rotor position estimation is improved. The simulation results show that the variable universe fuzzy PI can be used for rotor position estimation, and it reduces the average error of 0.331 degrees than that of the traditional sensorless control method.

Key words: permanent magnet synchronous motor (PMSM); high frequency injection; variable universe; fuzzy control

0 引言

对永磁同步电机(PMSM)进行矢量控制必须得到电机的转子位置以及转速信息, 而机械式的传感器会带来一定问题^[1], 无传感控制技术就此产生。根据额定转速对无传感控制法进行划分, 分为适用于低速以及中高速 2 大类。低速指的是

在额定转速 10% 处; 中高速是指按照额定转速的 50% 及以上。其中, 中高速 PMSM 无传感控制方法研究较为成熟, 主要有模型参考自适应^[2]、观测器法等^[3]。但是无法应用于低速控制, 主要的原因是中高速无传感控制法利用的是电机反电动势进行估算, 但是在低速阶段较难检测。低速阶段主要利用高频注入法进行 PMSM 无传感控制, 主

收稿日期: 2021-06-28; 收到修改稿日期: 2021-08-19

作者简介: 李瑞棋(1996—), 硕士, 研究方向为电机控制与设计。

要为脉振注入法、旋转注入法等,但是这些方法不仅需要通过滤波器过滤出基波信号,还要过滤得到含有转子位置信息的信号。而借助滤波器,不可避免使系统中信号滞后^[4],本文的研究方向放在低速无传感控制上。

借助滤波器使系统存在滞后,这是造成转子位置估算误差的主要原因。大部分学者主要通过2个方向减少转子位置估算误差:第1类估算算法优化法,基本思路是通过不同电机本体参数形成预测模型,对估算算法进行优化。这类方法一般通过不同电机的参数进行优化,但是无法适用于不同电机;第2类通过对电机控制方法优化,高频注入法主要依托于PMSM闭环矢量控制。其中包含2个闭环,即1个转速环、1个电流环,通过PI控制器进行联接。PI控制器控制简单易于理解,但是普通的PI控制器无法减少高频注入法产生的滞后,影响电机调速过程。文献[5]提出借助滞环控制器代替电流环的PI控制器。虽然对系统的滞后进行一定的补偿,但是影响了磁链的形状,带来电机振动等不必要的影响。文献[6]通过电流预测控制代替电流环的PI控制器,优化了系统的延时,但是预测控制对于电机参数鲁棒性较低,无法适用于不同电机。

本文通过变论域模糊的理论与方法,优化电机脉振注入法中的PI控制器参数,达到优化系统延时的问题。变论域模糊PI法通过利用伸缩因子来调整模糊论域进而调整PI的参数,从而改善系统的滞后,最终提高转子位置的估算精度。本文在MATLAB/Simulink中搭建PMSM无传感控制模型,然后用变论域模糊PI的方法来代替转速环上的PI控制器,达到减少滞后的效果,最后通过仿真证明了该方法具有可行性。

1 传统脉振注入法无传感控制

基于矢量控制法的脉振注入法不可避免地需要转子位置信息与转速信息。为了得到这2种信息,对于表贴式电机,需要注入高频脉振信号 $U_h \cos(\omega_h t)$,人为激发凸极效应^[7]。此时电机中的三相电流就含有转子位置信息,通过坐标变换转换得到矢量控制法所需要的 dq 轴电流。同时 dq 轴电流也含有转子位置信息, q 轴电流 $\hat{i}_q$ 通过带通滤波器得到1 kHz电流 $\hat{i}_{qh}$,最后通过低通滤

波器(LPF)得到 $f(\Delta\theta)$:

$$f(\Delta\theta) = \text{LPF}[\text{BPF}(\hat{i}_q) \sin(\omega_h t)] = -\frac{U_h Z_{\text{dif}}}{2\omega_h L_{dh} L_{qh}} \sin(2\Delta\theta) \quad (1)$$

式中: $Z_{\text{dif}} = (L_{dh} - L_{qh})/2$; L_{dh} 、 L_{qh} 分别为注入高配信号后旋转坐标轴下的 dq 轴电感; U_h 为高频注入幅值; ω_h 为注入高频信号的角频率; $\Delta\theta$ 为实际坐标轴与估算坐标轴位置差值。

整体程序框图如图1所示。

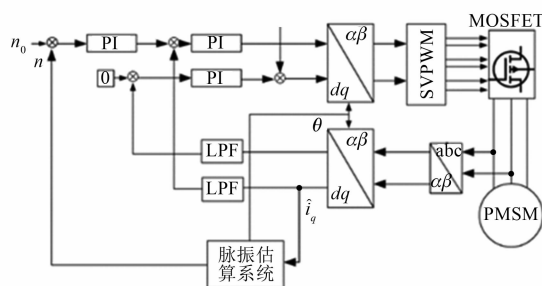


图1 PMSM控制框图

脉振估算系统框图如图2所示,此时得到了误差信号。主要有2种方法得到转子位置信息:第1种是龙伯格观测器,这种观测器精度高,但是需要额外转矩传感器;第2种是通过PI控制器控制估算误差为0得到转子位置信号。如图1所示。

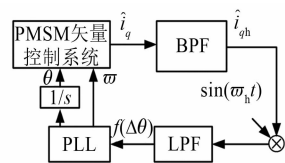


图2 脉振估算系统

图1、图2中,有3个地方使用滤波器。电流环中使用了LPF,用来过滤注入的高频信号,以及高频信号叠加到变频器上的多余高频信号;带通滤波器过滤出含有转子位置信号的1 kHz频率。

现在对带通滤波器进行详细分析,其需要过滤掉高频信号、基波信号以及变频器信号,得到1 kHz频率。但是带通滤波器过滤信号需要下一时刻的输入,这通常导致输出延时,由此得到转速信息以及转子位置信息也会存在延时^[8-9]。脉振注入法中估算得到的转速信息本身存在一定滞后,根据滞后得到 q 轴电流给定,通常导致电机控

制给定信号滞后,对电机控制会造成一定的影响。

普通的 PI 控制器结构,无法对持续增长的滞后做一定优化,最终使得转子位置的误差较大^[10]。

为了验证这一分析,本文使用 MATLAB/Simulink 对传统的高频脉振注入法进行仿真,电机参数如表 1 所示。

表 1 电机参数

参数名称	参数值
极对数	4
定子电阻/ Ω	0.025 25
磁链/Wb	0.483
电感/H	0.001 09
转动惯量/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-2})$	0.09

仿真结果如图 3 所示。通过转速信号分析电机是否能够正常运转;利用转子位置分析电机运行状态是否稳定。

从图 3(a)、图 3(c) 可以看出传统脉振注入法能够满足基本控制需求,但是最大误差相对于稳定误差相差较大,可以考虑对最大误差优化,达到减少平均误差的效果。从图 3(b) 可以具体看出起动阶段最大误差为 14.49° ,相对于稳态过程误差极大,通过解决最大误差就能够减少整体平均误差。

为了对带通滤波器的能力进行一定说明,本文在 MATLAB 中设计了仿真试验。

给定信号为最大值 10 的 1 kHz 基频信号、 $2\pi \times 1 \text{ kHz}$ 高频信号和 50 Hz 低频信号叠加,信号幅值为 10~20。由于高频注入给定信号为 $2\pi \times 1 \text{ kHz}$,则叠加高频信号同样为 $2\pi \times 1 \text{ kHz}$ 。带通滤波器为了得到转子位置信息,脉振注入法中用来过滤出 1 kHz 信号,所以试验设置相同,基频信号设置为 1 kHz。而 PMSM 电源频率为 50 Hz,同样设置低频信号为 50 Hz。为了与本文控制系统接近,本文所有带通滤波器参数如表 2 所示。

仿真结果如图 4、图 5 所示。

图 4 展示的是过滤信号输出结果对比图,可以看出经过一段时间以后,能够过滤出实际信号,说明带通滤波器在本文中能够使用。但是从 0 s 以及 0.1 s 2 个时刻的对比可以看出,信号阶跃时

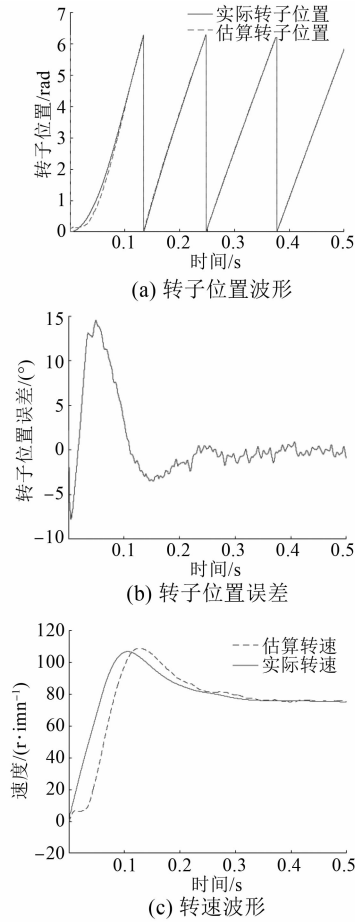


图 3 传统方法仿真结果

带通滤波器很难追踪实际信号,与上一时刻的信号存在一定啮合,无法快速接近实际信号。图 5 为图 4 在 0.08 s 左右的对比图,通过图 5 可以看出,即使稳定之后,信号也存在一定的延时以及幅值衰减。

表 2 带通滤波器参数

参数名称	参数值
导通频率/Hz	960
关断频率/Hz	1 040
阶数	2

2 变论域模糊转速环设计

按照上文分析在采用高频脉振注入法的无传感控制中,由于滤波延时的存在,会导致的估算出的转速以及转子位置滞后于实际值,并且不同时期信号延时以及幅值衰减有一定的区别。而普通的 PI 调节器本身不具备补偿反馈通道信号滞后

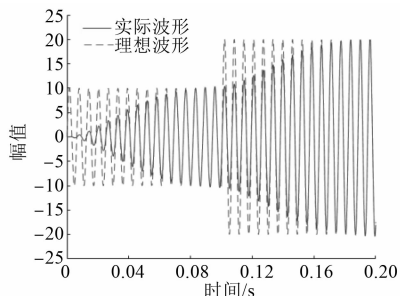


图4 滤波对比

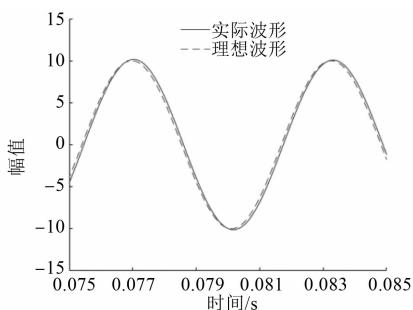


图5 信号稳定之后波形对比

的能力,不足以根据不同的信号延时、幅值衰减进行调节。因此本文考虑通过变论域模糊 PI 控制器代替速度环中的 PI 对系统存在的滞后进行一定的优化,达到减少转子位置估算误差的结果。

2.1 模糊自适应 PID 控制算法

传统 PID 控制器虽然原理简单,但是无法应用于复杂场合,对于阶跃信号、滞后情况无法很好地优化。而模糊控制 PID 通过输入模糊、自适应模糊推理以及最后的去模糊化达到模糊控制的效果^[11]。

本文设计的模糊控制器的输入是:给定的转速值和含有滞后信号的转速估算值相减的误差 e 和误差的变化率 ec ,输出是 ΔK_I 、 ΔK_P 和 ΔK_D 。

由于模糊控制只能处理模糊值,将确定值的输入模糊化,将给定转速以及估算转速的误差、误差变化率量化因子 K_e 与 K_{ec} 一一对应。可以设置模糊论域宽度为 6,其中包括 e 、 ec 和 ΔK_P 。设置大于 0 的模糊论域 ΔK_I 和 ΔK_D ,为 $[0, 6]$ 。而模糊论域主要采用 7 种模糊语言^[12]。最后的输出结果如下:

$$\begin{cases} K_P = K_{P0} + \Delta K_P \\ K_I = K_{I0} + \Delta K_I \\ K_D = K_{D0} + \Delta K_D \end{cases} \quad (2)$$

$$U(k) = K_P e(k) + K_I \int e(k) dt + K_D ec(k) \quad (3)$$

式中: $U(k)$ 为模糊控制器最后的输出; K_{P0} 、 K_{I0} 、 K_{D0} 为 PID 参数给定的初始值; K_P 、 K_I 、 K_D 为 PID 控制器最终输出。

ΔK_I 、 ΔK_P 和 ΔK_D 的模糊规则推理表参考文献^[12]。

2.2 变论域模糊控制器

变论域与模糊结合的基本思路是:结合变论域的伸缩因子与模糊的论域,表达式为

$$\begin{cases} [-\alpha E, \alpha E] = \alpha [-E, E] \\ [-\beta Y, \beta Y] = \beta [-Y, Y] \end{cases} \quad (4)$$

式中: $[-E, E]$ 、 $[-Y, Y]$ 分别为输入、输出模糊初始论域; α 、 β 分别为输入输出的伸缩因子。

由于伸缩因子的存在,可以借助伸缩因子动态调节初始论域,通过对比估算转速与给定转速的误差,如果误差较大,这时论域会被扩大,通过模糊规则降低结果敏感性,减少动态误差^[13]。

论域的伸缩变化图如图 6 所示。

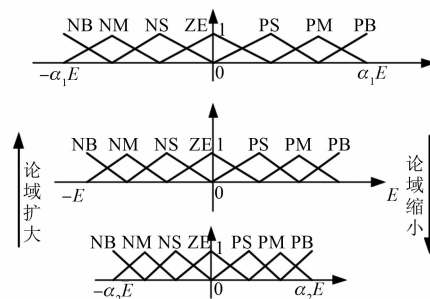


图6 论域的伸缩变化情况

对于变论域模糊控制效果,十分重要的因素就是较为准确给定伸缩因子,可以通过式(5)、式(6)进行推导:

$$\alpha(x) = \left(\frac{|x|}{x} \right)^\tau + \varepsilon \quad (5)$$

$$\beta(x, y) = \left[\frac{\frac{x}{x} + \frac{y}{y}}{2} \right]^\tau + \varepsilon \quad (6)$$

式中: $\tau > 0$, ε 为极小正数; $\alpha(x)$ 为输入论域的伸缩因子; $\beta(x, y)$ 为输出论域的伸缩因子。

通过不同 PID 参数对转速环的控制,减少转子位置估算误差,最终实现对电机无传感控制,本文无需 D 参数,设置为零即可。

本文无传感控制整体框图如图 7 所示。

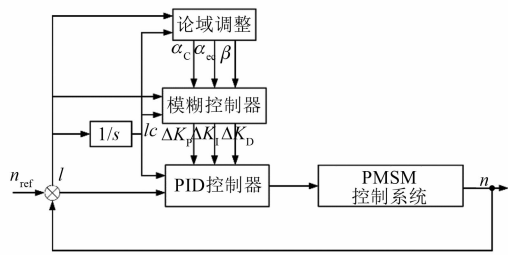


图7 变论域PID无传感控制框图

3 仿真分析

为了验证本文方法的有效性,与上文所做的试验环境相同。在额定转速 750 r/min 下进行试验。试验结果如图 8 所示。

在额定转速下试验,主要目的是展示本文方法的适用性。从图 8(c)中可以看出,本文所提方法调速性能较好,基本无超调量,电机起动稳定;从图 8(a)、图 8(b)可以得出本文方法,对转子位置估算较准确,可以适用于位置控制系统。说明

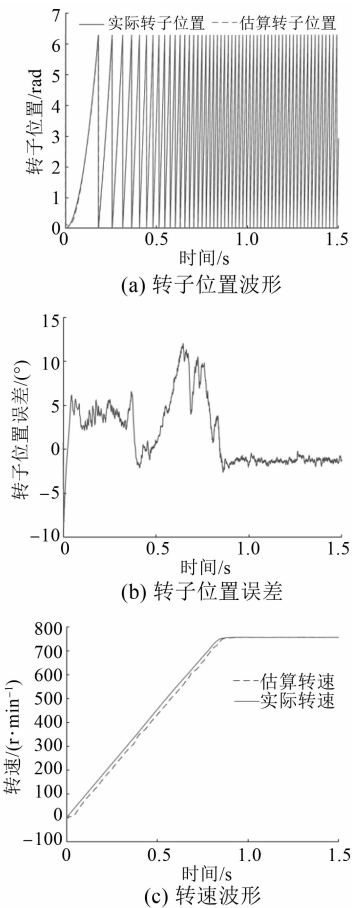


图8 额定转速下试验结果

本文使用的变论域模糊 PI 控制器能够提高电机调速性能。

为了与上文所做的传统脉振注入法进行对比,同样在 75 r/min 给定转速下进行电机无传感控制试验。其中带通滤波器的参数设计与上文相同为,导通频率 960 Hz,关断频率 1 040 Hz,阶数 2。试验结果如图 9 所示,具体转子位置误差如表 3 所示。

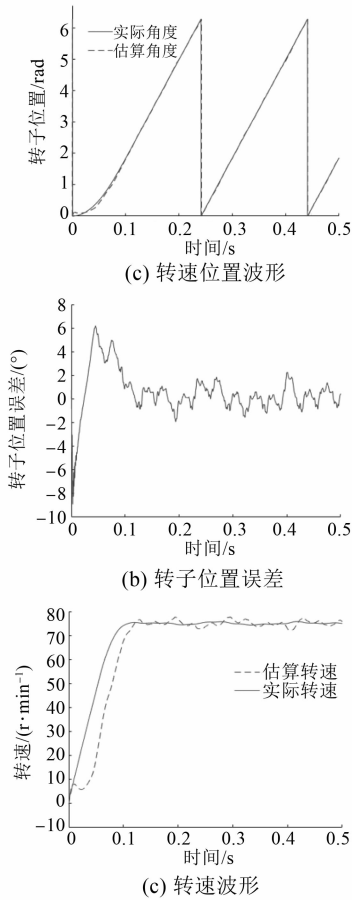


图9 75 r/min 转速下试验结果

表3 75 r/min 误差对比 (°)

方法	平均误差	最大误差
传统方法	0.820	14.49
本文方法	0.489	6.12

图 9 展示的是本文方法下的仿真试验结果,给定转速为 75 r/min,为与传统方法对比,同样运转电机 0.5 s。由图 9(a)对比图 3(a)可以看出,2 种方法下估算转子位置均能够很好地拟合实际转子位置,但是本文方法相对传统方法在起动阶段

能够更好拟合转子位置;从图 9(c)对比图 3(c)可以看出通过变论域模糊 PI 对转速环进行控制,相对传统方法能够减少转速的超调量,转速稳定之后通过模糊控制能够拟合实际转速;结合表 1 以及图 9(b)得出本文方法能够在起动过程减少转子位置估算最大误差到 6.12° ,平均误差减少到 0.489° 。

结果表明本文方法能够有效减少转子位置估算误差,鲁棒性较好。

4 结 语

本文分析了 PMSM 脉振注入法延时存在的原因。为了减少常规脉振注入法系统延时导致转子位置估算精度较差的问题。提出了一种基于变论域模糊 PI 的脉振注入法。分别在额定转速下,以及 10% 额定转速下进行试验。试验结果表明本文所提方法减少了转子位置估算误差,平均误差从 0.82° 减少到 0.489° ,最大误差从 14.49° 减小到 6.12° 。满足低速下无传感控制,并且同样可适用于高速阶段。

【参考文献】

- [1] 李瑞棋,黎英. 永磁同步电机转子初始位置检测方法[J]. 电子测量与仪器学报,2020,34(4): 194.
- [2] SHI J Z. A fractional order general type-2 fuzzy PID controller design algorithm[J]. IEEE Access, 2020, 8: 52151.
- [3] QUANG N K, HIEU N T, HA Q P. FPGA-based sensorless PMSM speed control using reduced-order extended Kalman filters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(12): 6574.
- [4] ZHANG X, LI H, YANG S, et al. Improved initial rotor position estimation for PMSM drives based on HF pulsating voltage signal injection[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(6): 4702.
- [5] 沈建新,陆媛, GASSNER A. 永磁同步电机两相斩波式电流滞环控制[J]. 电工电能新技术, 2014, 33(2), 35.
- [6] 齐洪峰,王轶欧,闫一凡. 无速度传感器永磁同步电机预测电流控制策略[J]. 北京交通大学学报, 2020, 44(2): 119.
- [7] LIN T C, ZHU Z Q. Sensorless Operation capability of surface-mounted permanent-magnet machine based on high-frequency signal injection methods[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2015, 51(3): 2161.
- [8] LUO X, TANG Q, SHEN A, et al. PMSM sensorless control by injecting HF pulsating carrier signal into estimated fixed-frequency rotating reference frame[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(4): 2294.
- [9] KUMBASAR T. Robot stability analysis and systematic design of single-input interval type-2 fuzzy logic controllers[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2016, 24(3): 675.
- [10] TANG Q, SHEN A, LUO X, et al. PMSM sensorless control by injecting HF pulsating carrier signal into ABC frame[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(5): 3767.
- [11] 张洪帅,王平,韩邦成. 基于模糊 PI 模型参考自适应的高速永磁同步电机转子位置检测[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(12): 1889.
- [12] MA F. An improved fuzzy PID control algorithm applied in liquid mixing system[C] // 2014 IEEE International Conference on Information and Automation (ICIA).
- [13] 谢雨岑,邹见效,彭超. 基于变论域模糊增量理论的质子交换膜燃料电池温度控制[J]. 控制理论与应用, 2019, 36(3): 428.

欢迎订阅 2022 年《电机与控制应用》

联系地址:上海市武宁路 505 号《电机与控制应用》编辑部

邮编: 200063

电话: 021-62574990-462

邮箱: eec@seari.com.cn

国内邮发代号: 4-199

每册定价: 15.00 元

全年定价: 180.00 元