

永磁同步电机旋转变压器解码算法优化设计^{*}

马利娇, 贾欣雨, 陈少华

(北京信息科技大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100192)

摘要: 针对旋转变压器解码电路误差对永磁同步电机(PMSM)转子位置检测精度的影响, 深入分析了解码电路工作原理, 基于角度/速度观测器, 设计了一种高精度快响应的旋转变压器信号估算方法。电路采用低电压运放 MCA33202 对旋变输出正弦和余弦信号进行解码, 基于解码后的估算角度构建了单位反馈闭环系统, 优化了解码电路关键器件参数, 提高了 PMSM 转子位置检测精度。通过 1 台 2.5 kW 高速 PMSM 验证了该算法的有效性和可行性。

关键词: 永磁同步电机; 旋转变压器; 观测器; 解码电路; 位置检测精度

中图分类号: TM 341 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2021)02-0031-05

doi: 10.12177/emca.2020.187

Optimal Design of Resolver Decoding Algorithm for Permanent Magnet Synchronous Motor^{*}

MA Lijiao, JIA Xinyu, CHEN Shaohua

(School of Instrument Science and Opto-Electronics Engineering, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100192, China)

Abstract: The error of resolver decoding circuit has effect on the rotor position detection accuracy of permanent magnet synchronous motor (PMSM). In order to reduce the influence, the principle of decoding circuit is analyzed. A decoding circuit with the advantages of high precision and fast response is proposed. The low voltage operational amplifier MCA33202 is used to decode the sine and cosine signals from the resolver, and the unit feedback closed-loop system is constructed based on the estimated angle after decoding. The key device parameters of the decoding circuit are optimized and the rotor position detection accuracy of PMSM is increased by the proposed method. Finally, the effectiveness and feasibility of the decoding circuit are verified by a 2.5 kW high-speed PMSM.

Key words: permanent magnet synchronous motor (PMSM); resolver; observer; decoding circuit; position detection accuracy

0 引言

永磁同步电机(PMSM)具有结构简单、控制灵活、功率密度高等优点, 广泛的应用于航空航天、生物医疗、清洁能源等领域^[1]。PMSM 转子位置高精度检测对于系统控制精度的提升具有重要意义。PMSM 转子位置检测方法包括位置传感器

和无位置传感器^[2]。其中, 无位置传感器检测方法具有检测灵活, 可实现误差主动补偿控制等优点^[3], 但在工程应用中受限于电机转子结构和永磁体充磁方式等因素影响^[4], 难以实现零速位置检测, 延长了电机起动时间^[5]。PMSM 常用的位置传感器包括: 霍尔、光电码盘和旋转变压器等^[6-9]。其中, 霍尔元件用于检测转子位置时具有

收稿日期: 2020-11-02; 收到修改稿日期: 2020-12-04

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金项目(62003047); 北京市委组织部骨干人才项目(2018000020124G103)

作者简介: 马利娇(1995—), 女, 硕士研究生, 研究方向为永磁电机控制。

陈少华(1985—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为高速电机控制、高效电力变换。(通信作者)

体积小,价格低,易于实现等优点,但检测精度受安装位置精度和工作环境等因素影响较大^[10];光电码盘具有较高的检测的精度,但用于航空航天领域时,光电码盘受振动冲击易损坏^[11];旋转变压器基于电磁原理检测转子位置,具有检测精度高,可靠性好等优点,因此在航空航天等领域得到广泛应用^[12]。

旋转变压器在用于检测电机转子位置时,需要解码电路将旋变输出的正弦和余弦信号解析,估算转子位置和电机转速。文献[13]提出了一种基于神经网络算法估算转子位置角度的方法,提高了低速阶段转子位置估算精度。近年来更多的学者关注于基于旋变解码电路的优化设计^[14],文献[15]基于数字信号处理器(DSP),通过优化转子位置正弦和余弦提高了角度估算精度。PMSM 高精度的速度和位置角检测依赖于高精度的旋转变压器和快速的角度解码电路^[16-17]。常用的解码集成芯片是 AD2S1205,可实现转子位置和速度信息的估算,解码效果好,但价格昂贵^[17]。

本文深入分析旋转变压器及解码电路工作原理,建立解码电路传递函数,分析影响超调量、响应时间等关键指标对应的电路参数,基于 MATLAB 仿真优化电路设计。通过 2.5 kW 高速 PMSM 验证了所设计解码电路的有效性。

1 旋转变压器及解码电路原理

旋转变压器由定子和转子 2 部分组成,其中定子绕组包括励磁绕组和交轴绕组,转子绕组包括正弦输出绕组和余弦输入绕组。输出绕组中感应电动势分别为

$$\begin{cases} E_{\sin} = 4.44f_k N \Phi_D \sin\theta \\ E_{\cos} = 4.44f_k N \Phi_D \cos\theta \end{cases} \quad (1)$$

式中: f_k 为励磁信号频率; N 为励磁绕组匝数; Φ_D 为励磁磁通; θ 为励磁绕组轴线与余弦输出绕组轴线的夹角。

旋转变压器转子与定子实物图如图 1 所示。

将一路高频正弦信号作为激励源施加到定子绕组,定子绕组会出现励磁电流,进而建立脉冲式磁场,脉冲式磁场会在两路转子绕组中产生感应电动势,两路电动势的包络线幅值相等,相位相差 180°。两路反电动势中包含转子位置信息和激励信号信息。提取两路反电动势包络线可得到两路



图 1 旋转变压器转子与定子实物图

正弦和余弦信号。理想的激励信号包含高频脉冲的正弦信号和余弦信号,如图 2 所示。

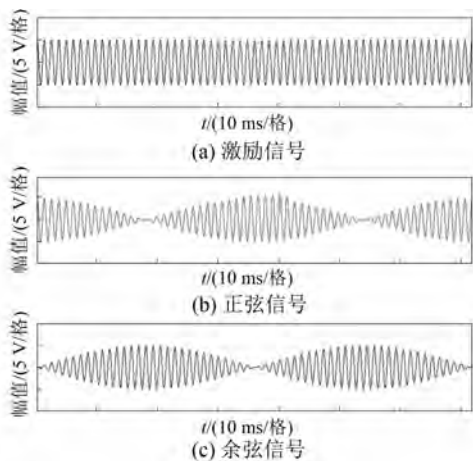


图 2 理想的激励信号

理想的激励信号、输出正弦信号、余弦信号解析式为

$$\begin{cases} S = \sin(f_k t) \\ U_{\sin} = \sin(f_k t) \cdot \sin\theta \\ U_{\cos} = \sin(f_k t) \cdot \cos\theta \end{cases} \quad (2)$$

式中: θ 为转子位置角度。

基于旋转变压器输出正弦和余弦信号构建观测器可用于估算转子位置角。

2 转子位置观测器设计

基于旋变工作原理可知,旋变输出正弦和余弦信号中包括了激励信号和转子位置信息,通过信号解调,可实现转子位置和转速的估算。旋变信号经 AD 采样后直接进行反正切变换后得到的转子位置信号存在阶跃性跳变,为此,设计转子位置角度观测器可估算转子位置,实现转子位置角度和转速的连续性平滑估算,提高了检测精度,减

小了电机振动。基于角度/速度观测器的转子位置估算结构图如图 3 所示。

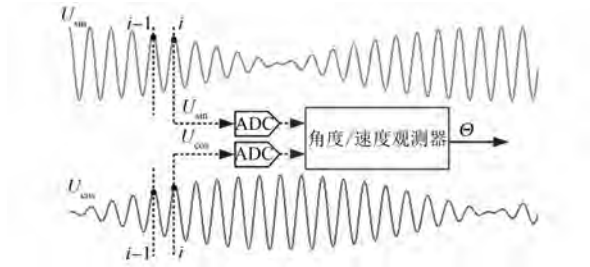


图 3 基于角度/速度观测器的转子位置估算结构图

传统的基于芯片的旋变解调电路包括正余弦乘法器、检波器、积分电路、低通滤波电路。导致转子位置估计产生滞后,影响电机控制精度。根据式(2)可知:

$$\frac{U_{\sin}}{U_{\cos}} = \frac{\sin(f_k t) \cdot \sin \Theta}{\sin(f_k t) \cdot \cos \Theta} = \tan \Theta \quad (3)$$

可得:

$$\Theta = \arctan \frac{U_{\sin}}{U_{\cos}} \quad (4)$$

在估算转子位置角度时,将一个周期 2π 内以每 $\frac{\pi}{4}$ 为一个区间进行划分,可得不同区间内转子位置角度估算公式如表 1 所示。

表 1 不同区间内转子位置角度估算公式

角度区间	计算公式
$0 \sim \frac{\pi}{4}$	$\Theta = \arctan \frac{U_{\sin}}{U_{\cos}}$
$\frac{\pi}{4} \sim \frac{\pi}{2}$	$\Theta = \arctan \frac{U_{\sin}}{U_{\cos}}$
$\frac{\pi}{2} \sim \frac{3\pi}{4}$	$\Theta = \arctan \frac{U_{\sin}}{U_{\cos}}$
$\frac{3\pi}{4} \sim \pi$	$\Theta = \arctan \frac{U_{\sin}}{U_{\cos}}$
$\pi \sim \frac{5\pi}{4}$	$\Theta = \arctan \frac{U_{\sin}}{U_{\cos}}$
$\frac{5\pi}{4} \sim \frac{3\pi}{2}$	$\Theta = \arctan \frac{U_{\sin}}{U_{\cos}}$
$\frac{3\pi}{2} \sim \frac{7\pi}{4}$	$\Theta = \arctan \frac{U_{\sin}}{U_{\cos}}$
$\frac{7\pi}{4} \sim 2\pi$	$\Theta = \arctan \frac{U_{\sin}}{U_{\cos}}$

通过 AD 实时高速检测 $U_{\sin}$ 和 $U_{\cos}$ 值,代入

计算公式,控制器需要实时计算反正切函数,计算速度较慢,导致位置估算误差,严重影响了系统效率。为此,本文在传统的旋变解码电路基础上构建角度/速度观测器,可以实现电机转子位置和速度的估算,其观测器内部工作原理如图 4 所示。

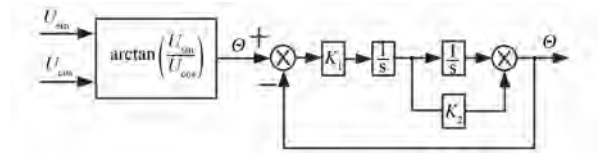


图 4 角度/速度观测器工作原理图

在传统的旋变解析算法的基础上串联 PI 控制器和积分器,通过单位反馈构成闭环系统。传递函数为

$$G(s) = \frac{\hat{\Theta}(s)}{\Theta(s)} = \frac{K_1(1 + K_2 s)}{s^2 + K_1 K_2 s + K_1} \quad (5)$$

根据闭环系统稳定性分析,可将式(5)化简为

$$G(s) = \frac{\omega_c^2}{s^2 + 2\zeta\omega_c s + \omega_c^2} \quad (6)$$

式中: ω_c 为系统固有频率; ζ 为阻尼系数。

根据式(5)和式(6)可知:

$$\begin{cases} K_1 = \omega_c^2 \\ K_2 = \frac{2\zeta}{\omega_c} \end{cases} \quad (7)$$

根据二阶系统稳定性可知,该系统只有一个零点。实轴零点的位置会影响振幅,当零点接近主极点时,对系统瞬态响应影响越大;当零点远离主极点时,影响越小。因此,通过设置不同的阻尼系数,可调整系统的响应时间和稳定裕度。

3 仿真分析

根据上述分析,基于 MATLAB 设计系统仿真。仿真系统基于多组参数分别验证系统的上升时间、调节时间和超调量等关键动态性能指标。在不同固有频率下验证阻尼系数对系统响应时间和稳定裕度的影响,具体设置如下:第 1 组数据 $\omega_c = 500 \text{ rad/s}$, ζ 分别取 0.5、0.6、0.7、0.8;第 2 组数据 $\omega_c = 1000 \text{ rad/s}$,同样地, ζ 分别取 0.5、0.6、0.7、0.8。阶跃信号输入下,系统动态响应如图 5 所示。

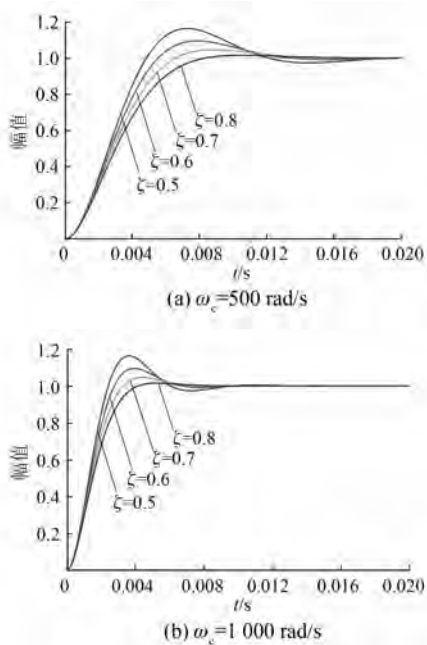


图5 不同参数下系统的动态响应

在 $\omega_c = 500 \text{ rad/s}$, ζ 分别取 0.5、0.6、0.7、0.8 时对应的上升时间、超调量和调节时间如表 2 所示。

表 2 不同参数下系统的关键动态响应指标

ζ	上升时间/ms	超调量/%	调节时间/ms
0.5	3.22	16	10.56
0.6	3.68	9	10.51
0.7	4.23	5	9.15
0.8	4.93	2	6.78

根据图 5 和表 2 可知,随着 ζ 取值的增大,上升时间逐渐增大,超调量和调节时间逐渐减小。 ζ 取值在 0.7 到 0.8 变化时,上升时间增加 16.5%,而超调量减小 60%,调节时间减小 25.9%。当 $\omega_c = 1\,000 \text{ rad/s}$ 时,也有类似的结论。该试验对象的系统固有频率 $100 \text{ rad/s} \leq \omega_c \leq 1\,500 \text{ rad/s}$,综合考虑后设计阻尼系数为 $\zeta = 0.8$ 的闭环系统,具有上升较快、超调较小且调节时间短等优点。

4 试验验证

为了验证上述分析,在仿真系统的基础上,同等条件下,基于额定功率 2.5 kW 的 PMSM 搭建试验平台,如图 6 所示。

试验平台基于 2 台 PMSM,通过联轴器和扭

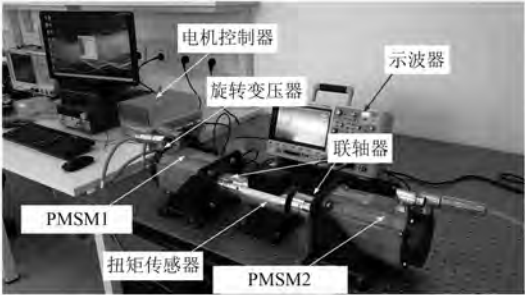


图6 PMSM 试验平台

矩传感器链接,其中一台为电机(PMSM1),一台为发电机(PMSM2),发电机输出连接电阻作为系统负载。试验数据可通过示波器电流探头和电压差分探头实时监测。

为了验证所提出方法的有效性,基于试验平台,在电机转速为 5 000 r/min 时,分别对基于传统解耦方法的转子位置检测和基于角度/速度观测器下转子位置检测进行对比。图 7 所示为基于传统解耦方法的转子位置检测曲线和角位置误差曲线。图 8 所示为基于角度/速度观测器下转子位置检测曲线和角位置误差曲线。

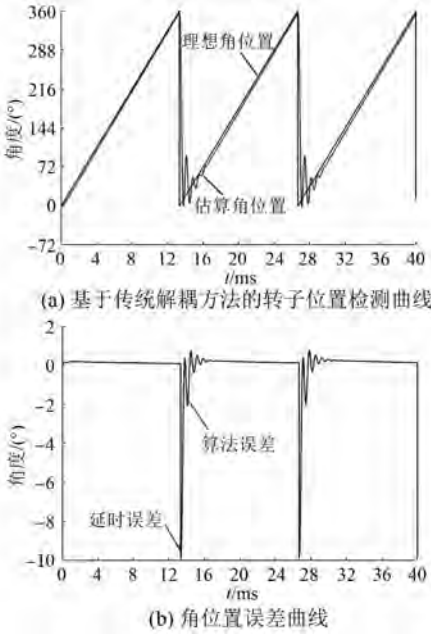


图7 基于传统解耦方法的转子位置检测曲线和角位置误差曲线

根据图 7 和图 8 可知,采用改进后的角度/速度观测器后转子位置估算延时误差从 10° 降到 8.4° ,减小 15%,算法误差从 2° 降低到 1.2° ,减小 40%。响应速度提高 30% 以上。

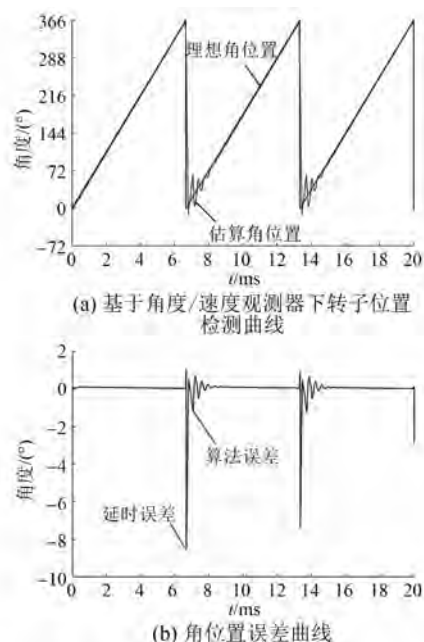


图8 基于角度/速度观测器下转子位置检测曲线和角位置误差曲线

为了验证所提出方法在电机全转速范围内的有效性,设计了全转速范围内估算误差采集试验,具体操作如下:试验分别采集了电机转速在 0~5 000 r/min 范围内转子位置估算误差,每隔 500 r/min 检测不同转速下的转子位置估算误差,将数据整理后描点曲线如图 9 所示。

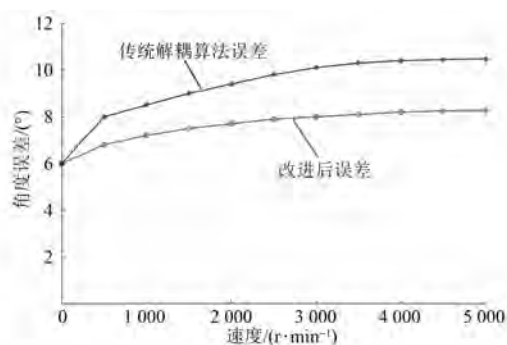


图9 基于传统解耦方法和基于角度/速度观测器下转子位置估计误差曲线

由图 9 可知,随着电机转速的升高,2 种算法由于计算量、电路硬件检测等影响,误差积累逐渐增加,但基于角度/速度观测器估算转子位置时,误差增加更小,且随着转速的上升,误差接近线性增加,因此可采用线性拟合的方法补偿延时误差,实现 PMSM 转子位置的高精度估算和误差补偿。

5 结 语

针对传统解耦算法估算 PMSM 转子位置时的系统误差,本文在分析转子位置估算解码电路工作原理的基础上,设计了一种高精度快响应的旋转变压器角度/速度观测器法,优化了解码电路关键器件参数,提高了 PMSM 转子位置检测精度。试验验证中观测器估算误差随电机转速上升而增大,且误差和转速近似线性,具体的离线线性补偿或闭环误差补偿并未讨论。本文所提出的观测器法在不增加硬件的基础上,通过构建闭环系统提高了角度估算速度,该方法可应用于 PMSM 的控制系统中,几乎不增加成本,且易于实现,具有广泛的应用价值。

【参考文献】

- [1] 王宏,于泳,徐殿国. 永磁同步电动机位置伺服系统[J]. 中国电机工程学报,2004,24(7):151.
- [2] 王高林,张国强,贵献国,等. PMSM 无位置传感器混合控制策略[J]. 中国电机工程学报,2012,32(24):103.
- [3] 张彦平. 基于高频信号注入法的 PMSM 无位置传感器方法研究[D]. 西安:西安理工大学,2017.
- [4] 李洁,周波,刘兵,等. 表贴式 PMSM 无位置传感器起动新方法[J]. 中国电机工程学报,2016,36(9):2513.
- [5] 艾胜,程思为,肖飞,等. PMSM 转子位置检测滤波方法研究[J]. 电机与控制学报,2018,22(3):66.
- [6] 李兵,胡亮灯. 基于旋转变压器的 PMSM 位置和速度检测方法[J]. 微特电机,2019,47(3):40.
- [7] 刘太广,朱晓宇,苗韵. 一种基于旋变电机控制的正余弦乘法器设计[J]. 电子与封装,2018,18(2):29.
- [8] 饶大伟,彭科容,杨雷. 基于旋转变压器换向的无刷伺服驱动控制研究[J]. 电子技术,2017,46(7):28.
- [9] 李红梅,王萍. 面装式 PMSM 驱动系统无位置传感器控制[J]. 电工技术学报,2016,31(增刊1):85.
- [10] 王子辉,叶云岳. 反电势算法的 PMSM 无位置传感器自启动过程[J]. 电机与控制学报,2011,15(10):36.
- [11] GARCÍA R C, SUEMITSU W I, PINTO J O P. Robust measurement of angular position using resolver sensor and ADALINE neural networks [C] // XI Brazilian Power Electronics Conference, 2011.

(下转第 44 页)

有较好动态及稳态性能,转矩/励磁反馈电流均能较好地跟随转矩/励磁指令电流。并且在牵引、制动过程中,电流和转子频率稳定变化,无明显振荡。

【参考文献】

- [1] MAITI S, CHAKRABORTY C, HORI Y, et al. Model reference adaptive controller-based rotor resistance and speed estimation techniques for vector controlled induction motor drive utilizing reactive power [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, 55(2): 594.
- [2] 冯晓云. 电力牵引交流传动及其控制系统[M]. 北京: 高等教育出版社, 2009.
- [3] 田庆, 侯晓军, 张彩霞, 等. 复矢量电流调节器在牵引永磁同步电机中的应用[J]. 机车电传动, 2018(5): 38.
- [4] BRIZ F, DEGNER M W, LORENZ R D. Analysis and design of current regulators using complex vectors [J]. IEEE Transactions on Industrial Applications, 2000, 36(3): 817.
- [5] FREIJEDO F D, VIDAL A, YEPES A G, et al. Tuning of synchronous-frame PI current controllers in grid-connected converters operating at a low sampling rate by MIMO root locus [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(8): 5006.
- [6] JUNG J, NAM K. A dynamic decoupling control scheme for high-speed operation of induction motors [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1999, 46(1): 100.
- [7] 赵雷廷, 刁利军, 张哲, 等. 低开关频率下异步电机电流环的数字控制[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(21): 3456.
- [8] 齐丽英, 王琛琛, 周明磊, 等. 一种异步电机的电流环解耦控制方法[J]. 电工技术学报, 2014, 29(5): 174.
- [9] 胡寿松. 自动控制原理[M]. 4版. 北京: 科学出版社, 2001.

(上接第 35 页)

- [12] BERGAS-JANÉ J, FERRATER-SIMÓN C, GROSS G, et al. High-accuracy all-digital resolver-to-digital conversion [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 59(1): 326.
- [13] SHI X, WEI B. An open-loop digital solver of shaft angle based on DSP [J]. WIT Transactions on Information and Communication Technologies, 2014, 51. doi:10.2495/ICCT130131.
- [14] ATTAIANESE C, TOMASSO G. Position measurement in industrial drives by means of low-cost resolver-to-digital converter[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2007, 56(6): 2155.
- [15] YIM C, HA I, KO M. A resolver-to-digital conversion method for fast tracking [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1992, 39(5): 369.
- [16] CARUSO M, DI TOMMASO A O, GENDUSO F, et al. A DSP-based resolver-to-digital converter for high-performance electrical drive applications [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(7): 4042.
- [17] 敖杰, 刘永强. 旋转变压器数字转换器 AD2S1205 在电机转子位置检测中的应用[J]. 仪表技术与传感器, 2013(5): 25.

【主要栏目】

- 控制与应用技术
- 研究与设计
- 故障诊断与保护
- 新能源发电与局域电网
- 新能源汽车技术
- 发电机组及其控制
- 测试技术与测控系统
- 材料与工艺
- 电机生产及质量管理
- 电力电子变流器技术
- 智能制造
- 节能应用
- 实用技术成果