

一种改进粒子群优化算法的多机器人地图拼接方法^{*}

陈超, 张志昂, 丁丽君

(江苏科技大学 机械工程学院, 江苏 镇江 212000)

摘要: 多机器人共同创建大规模地图, 实现的关键在于机器人相对位置未知的情况下将多张局部栅格地图进行拼接。结合图像特征匹配的方法和改进的粒子群优化算法, 先提取待拼接的两幅栅格地图的特征点进行匹配, 并筛选有效特征点对; 再将特征点对的信息作为改进的粒子群优化算法的输入参数, 计算从源图像到目标图像的最佳转换矩阵; 最后将转换后的源图像和目标图像使用栅格叠加的规则拼接在一起。通过仿真实验与数据分析, 证明了算法的稳定性与准确性。

关键词: 多机器人; 栅格地图拼接; 特征匹配; 粒子群优化算法

中图分类号: TN95; TP242

文献标识码: A

DOI: 10.16157/j.issn.0258-7998.200535

中文引用格式: 陈超, 张志昂, 丁丽君. 一种改进粒子群优化算法的多机器人地图拼接方法[J]. 电子技术应用, 2020, 46(12): 139-143.

英文引用格式: Chen Chao, Zhang Zhiang, Ding Lijun. An improved particle swarm optimization algorithm for multi robot map merging[J]. Application of Electronic Technique, 2020, 46(12): 139-143.

An improved particle swarm optimization algorithm for multi robot map merging

Chen Chao, Zhang Zhiang, Ding Lijun

(School of Mechanical Engineering, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212000, China)

Abstract: Multi robots create large-scale map together, the key of which is to splice multiple local grid maps when the relative position of robots is unknown. In this paper, the method of image feature matching and the improved particle swarm optimization algorithm are combined. Firstly, the feature points of the two grid maps to be spliced are extracted for matching, and the effective feature point pairs are screened. Then, the information of the feature point pairs is used as the input parameters of the improved particle swarm optimization algorithm to calculate the best conversion matrix from the source image to the destination image. Finally, the converted source image and destination image are stitched together by using the grid superposition rule. Through simulation experiments and data analysis, the stability and accuracy of the algorithm are proved.

Key words: multi-robot; grid map merging; feature matching; particle swarm optimization

0 引言

在机械化生产和日常生活中, 机器人的使用已非常广泛。在追求高效的现代生产中, 需要机器人能尽快完成任务。在构建大型地图时, 单机器人显得力不从心, 而多机器人可以分配多个区域, 同时构建局部地图, 然后再拼接成全局地图, 从而提高建图的效率和准确性。

如何将多张局部地图拼接成可以用来导航的全局地图是研究的热点, 也具有挑战性。国内外研究人员提出了很多方法, 大致可以分为两类: 一类是已知机器人之间的相对位置, 直接通过坐标转换拼接局部地图。文献[1]提出了通过单向观测来估计机器人的位置, 再搜索地图之间的最佳匹配。但在大多数情况下,

无法准确获取甚至无法获取机器人之间的相对位置。另一类是在相对位置未知的情况下, 通过图像配准的方法拼接地图。文献[2]提出一种基于图像正弦图的粒子群优化算法, 能够在拼接地图时抑制算法陷入局部最优。也有学者研究使用进化算法解决这个问题, 通过交叉变异寻找最优的适应度, 找到 1 地图最大重叠部分^[3-4]。这种方法耗时较长, 不能达到实时的效果。文献[5]研究了基于 SIFT 特征提取的地图拼接方法, 通过匹配特征点可以迅速找到图像之间的平移和旋转关系。

本文针对激光雷达扫描获得的栅格地图, 提出一种结合特征匹配和改进的粒子群优化算法的地图拼接方法。本文所提算法先通过提取特征点匹配两张局部栅格地图, 再通过粒子群优化算法精确计算两幅局部地图之间的最佳转换矩阵来拼接地图。

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金(51705217)

雷达与导航 Radar and Navigation

1 地图拼接

1.1 特征提取

ORB(Oriented FAST and Rotated BRIEF)算法^[6]可以快速提取图像中的特征点,常被用作图像的配准。其特征提取方法由FAST特征点检测算法发展而来。在原算法的基础上对特征计算进行简化,增加了尺度不变性和方向不变性。算法的描述子是对BRIEF描述子改进得到的rBRIEF描述子,在其基础上增加了方向不变性。描述方法是使用一个二进制串来描述特征点。

栅格地图是机器人导航中常用的地图保存方式,在计算机中常保存为便携式灰度图像格式(Portable Graymap File Format, PGM)。在对栅格地图进行处理前,先将栅格地图转换成灰度图。转换后的灰度图表示成 $N \times N$ 的矩阵,只有一个通道,每个元素只可能为三种像素值中的一种,如(0, 254, 205),对应栅格地图中的三种状态:(占据,空,未知),如图1所示。要获取两幅图中相似的区域,可以从灰度图中提取ORB特征,并将两幅图的特征点进行匹配。



图1 栅格地图像素值

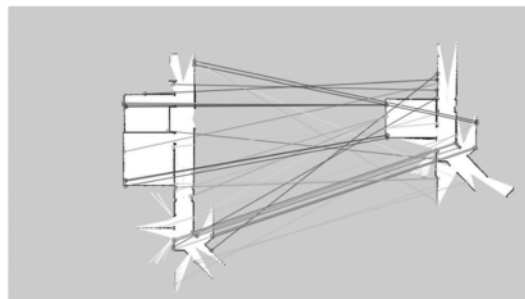
1.2 特征匹配

将生成的特征点使用K-最近邻匹配。对于使用二进制描述符的ORB算法,特征点之间的相似度根据Hamming距离衡量。源图中的特征在目标图中存在最优匹配特征点和次优匹配特征点两个匹配特征点^[7],本文根据两点间的欧氏距离 $d(P_0, P_1) < t \cdot d(P_0, P_2)$ 进行筛选,其中阈值 $t=0.75$ 。把距离较近的特征点选为优质特征点并放入匹配数据集。

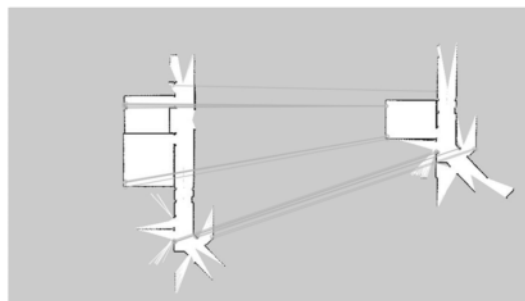
为了进一步减少误匹配,使数据更加准确,使用随机抽样一致性算法(Random Sample Consensus, RANSAC)找到最优的参数矩阵使得满足该矩阵的特征点对数最多。使用RANSAC算法可以有效降低特征点的误匹配,如图2所示。

1.3 改进的粒子群优化算法

粒子群优化算法(Particle Swarm Optimization, PSO)是基于鸟类觅食行为的智能算法^[8-9],算法操作简单,收敛



(a)ORB 特征匹配



(b)减少误匹配后

图2 局部栅格地图特征匹配

速度快。该算法使用粒子来表示每一个可能出现的解,每个粒子都有属于自身的位置向量以及速度向量。该算法用适应度来评价每一个粒子的好坏,从个体最优解pbest和群体最优解gbest两个方面不断更新粒子位置,最终获得想要的结果。

粒子群优化算法的速度更新公式:

$$v_{id}^k = \omega v_{id}^{k-1} + c_1 r_1 (pbest_{id} - x_{id}^{k-1}) + c_2 r_2 (gbest_{id} - x_{id}^{k-1}) \quad (1)$$

位置更新公式:

$$x_{id}^k = x_{id}^{k-1} + v_{id}^k \quad (2)$$

其中 v_{id}^k 表示第 k 次迭代粒子 i 第 d 维分量的速度,最大速度取粒子位置最大变化范围的10%。 x_{id}^k 表示第 k 次迭代粒子 i 第 d 维分量的位置。 ω 为惯性权重,可以对局部寻优性能和全局寻优性能进行调整。本文使用线性微分递减策略更新惯性权重:

$$\omega = \omega_{\max} - \frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{2} \cdot \frac{t^2}{t_{\max}} \quad (3)$$

其中 ω_{\max} 表示最大惯性权重, ω_{\min} 表示最小惯性权重, t_{\max} 表示最大迭代次数, t 表示当前迭代次数。惯性权重在越接近最大迭代次数时变换越快,这样可以使适应度函数快速收敛。

c_1 、 c_2 表示加速度常数,前者为每个粒子的个体学习因子,后者为每个粒子的社会学习因子。 r_1 、 r_2 为随机函数, r_1 、 $r_2 \in (0, 1)$,以增加搜索的随机性。

在二维栅格地图中,存在三个自由度,分别表示 x 、 y 轴方向上的位移和偏转角 θ 。因此将粒子群优化算法中第 i 个粒子的位置表示为式(4)。

雷达与导航 Radar and Navigation

$$\mathbf{x}_i = [x \ y \ \theta]^T \quad (4)$$

ORB 算法匹配特征点并筛选有效匹配点对后, 仍会存在匹配错误的点对。如果仅仅使用这些特征点对去计算仿射变换矩阵, 得到的拼接地图结果会差强人意。经典的 PSO 算法存在早熟收敛和易陷入局部极值的问题。基于这些, 本文结合 ORB 算法对经典的 PSO 算法进行改进。用优化后的特征点对计算二维高斯分布:

$$f(\mathbf{X}) = \frac{1}{2\pi|\boldsymbol{\Sigma}|^{\frac{1}{2}}} \exp\left[-\frac{1}{2}(\mathbf{X}-\mathbf{u})^T \boldsymbol{\Sigma}^{-1}(\mathbf{X}-\mathbf{u})\right] \quad (5)$$

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\mathbf{u} = \begin{bmatrix} u_x \\ u_y \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\boldsymbol{\Sigma} = \begin{bmatrix} \text{cov}(x, x) & \text{cov}(x, y) \\ \text{cov}(y, x) & \text{cov}(y, y) \end{bmatrix} \quad (8)$$

其中 \mathbf{X} 是特征点在 x, y 轴方向上的位移组成的列向量, \mathbf{u} 为均值, $\boldsymbol{\Sigma}$ 为协方差。再随机抽取指定数量的粒子, 粒子在较优解附近抽取概率高, 在其他地方抽取的概率低。这样既保证了粒子的多样性, 也能使算法不易陷入局部极值。

把得到的粒子加上栅格地图的偏转角 $\theta \in (-\pi/2, \pi/2)$ 构成一组三维的粒子群。

由于栅格地图只有三种状态, 也就是只包含三种不同灰度的像素点, 本文将算法的适应度函数定义为:

$$f(m_{\text{src}}, m_{\text{dst}}) = \begin{cases} 1, & \text{dis}(m_{\text{src}}, m_{\text{dst}}) = 0 \\ \frac{\text{dis}(m_{\text{src}}, m_{\text{dst}})}{\text{agr}(m_{\text{src}}, m_{\text{dst}}) + \text{dis}(m_{\text{src}}, m_{\text{dst}})}, & \text{dis}(m_{\text{src}}, m_{\text{dst}}) \neq 0 \end{cases} \quad (9)$$

其中 $\text{dis}(m_{\text{src}}, m_{\text{dst}}) = \{p = (x, y) | m_{\text{src}}[p] \neq m_{\text{dst}}[p] \in [0, 254]\}$ 表示两幅栅格地图(源图像 m_{src} 和目标图像 m_{dst})除未知区域外交叉的部分, $\text{agr}(m_{\text{src}}, m_{\text{dst}}) = \{p = (x, y) | m_{\text{src}}[p] = m_{\text{dst}}[p] = 0\}$ 表示两幅栅格地图除未知区域外重合的部分^[10]。当交叉的像素点的个数尽量少, 重合的像素点个数尽量多时, 适应度函数达到最优。由于设备和环境的影响, 两张栅格地图重叠的部分不可能完全一致, 如果交叉部分的值为 0, 表明两幅栅格地图只有边缘相接, 故将适应度函数的值置为 1。当适应度函数的值前后变化不明显时, 认为其收敛。

对每个粒子迭代优化, 粒子的适应度函数值越低, 则越接近局部最优解。达到最大迭代次数后, 得到全局最优解 $[x_{\text{best}} \ y_{\text{best}} \ \theta_{\text{best}}]^T$ 。将得到的解代入仿射变换矩阵:

$$T(x, y) = \begin{bmatrix} \cos\theta_{\text{best}} & -\sin\theta_{\text{best}} & x_{\text{best}} \\ \sin\theta_{\text{best}} & \cos\theta_{\text{best}} & y_{\text{best}} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

转换函数 $T(x, y)$ 将源图像整幅图从初始位置平移 $(x_{\text{best}}, y_{\text{best}})$ 并旋转 θ_{best} 角度。

1.4 栅格地图拼接

拼接后的栅格地图只能出现三种状态, 因此拼接过程两幅局部栅格地图相同位置的栅格叠加规则满足表 1 关系。

表 1 栅格叠加规则

状态	未知	空	占据
未知	未知	空	占据
空	空	空	占据
占据	占据	占据	占据

2 仿真与分析

2.1 仿真实验

本文使用基于 ROS 操作系统^[11]的仿真平台 gazebo 和 rviz 进行仿真。使用 gazebo 中提供的 willowgarage 模型, 选取部分场景使用三台自建的同构移动机器人模型搭载单线激光雷达进行建图, 建图所用的是官方提供的 gmapping 功能包。仿真实验环境及移动机器人如图 3 所示。

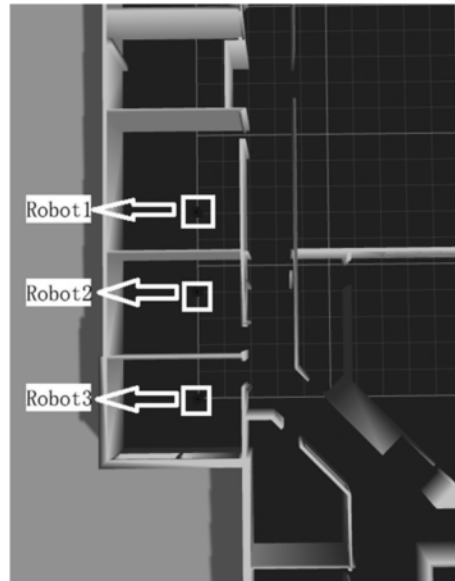
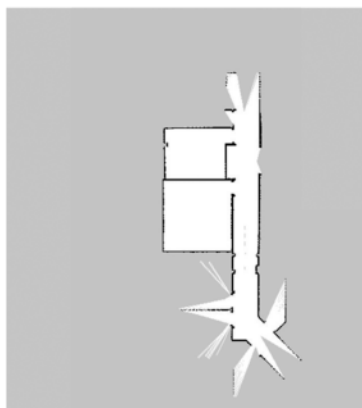


图 3 仿真实验环境及移动机器人

三台机器人从上到下分别为 Robot1、Robot2、Robot3, 对各自分配的区域进行建图, 生成三幅局部的栅格地图, 如图 4 所示。

2.2 数据分析

先将 Robot1 与 Robot2 建立的局部地图使用经典的 PSO 算法和本文算法分别进行地图拼接实验。两种算法采用的粒子数量都为 40, 迭代次数上限为 300。从拼接结果可以看出经典的 PSO 算法易陷入局部极值, 如图 5(a)所示, 即适应函数的值没有达到要求就已经收敛, 地图出现交叉的情况。而本文算法能较好地完成两幅地图的拼接, 且没有陷入局部极值, 如图 5(b)所示。再加入 Robot3 建立的局部地图, 本文算法仍能较好地将这三幅局部地图拼接在一起, 如图 5(c)所示。



(a)局部栅格地图 1



(b)局部栅格地图 2



(c)局部栅格地图 3

图 4 三个机器人分别建立的栅格地图

从图 6 的折线图可以看出,经典 PSO 算法收敛趋势较为平缓,且适应度到达 0.6 时便过早收敛,没有达到拼接的要求。而本文算法在接近 100 次迭代时能够快速收敛,没有出现早熟收敛的情况。

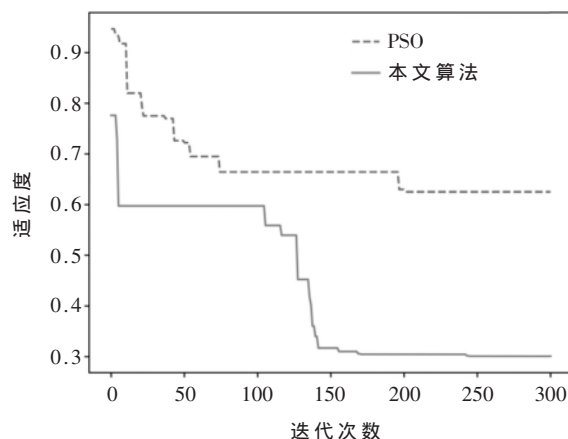


图 6 算法适应度折线图

为了验证本文算法的可靠性,使用经典 PSO 算法与本文算法分别进行 50 次拼接实验并依次记录实验数据。因为存在误差,根据多次实验反映的情况,在适应度小于 0.4 时,地图 1 与地图 2 拼接已基本准确。故这里将 0.4 作为阈值,小于这一阈值时认为两张局部栅格地图拼接的结果符合要求。从图 7 中可以看出经典 PSO 算法的适应度大多集中在(0.6~0.7)的区间,即过早收敛,

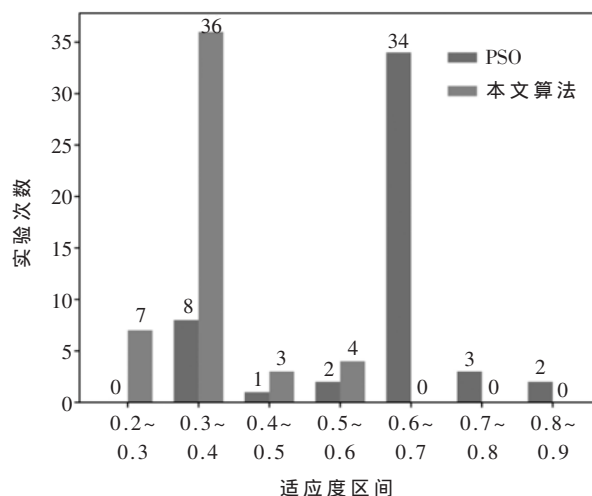
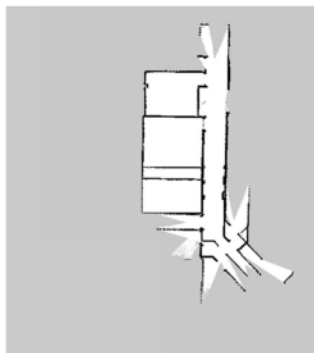
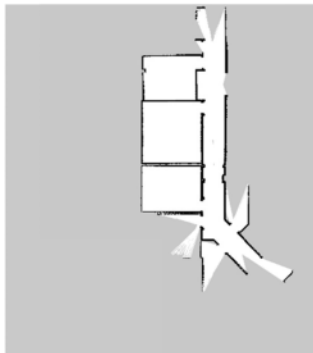


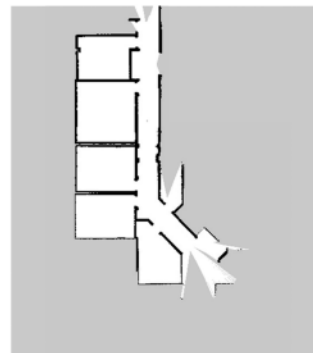
图 7 50 次实验最优适应度分布



(a)使用经典 PSO 算法拼接地图 1 和地图 2



(b)使用本文算法拼接地图 1 和地图 2



(c)使用本文算法拼接地图 1、地图 2 和地图 3

图 5 局部栅格地图拼接成全局栅格地图

雷达与导航 Radar and Navigation

只有少量能满足要求。本文算法的适应度大多集中在(0.3~0.4)的区间内,且满足适应度要求的次数大多连续分布,如图8所示,只有少量分布在(0.4~0.6)的区间。本文算法在精确度和稳定性上都较为优秀。

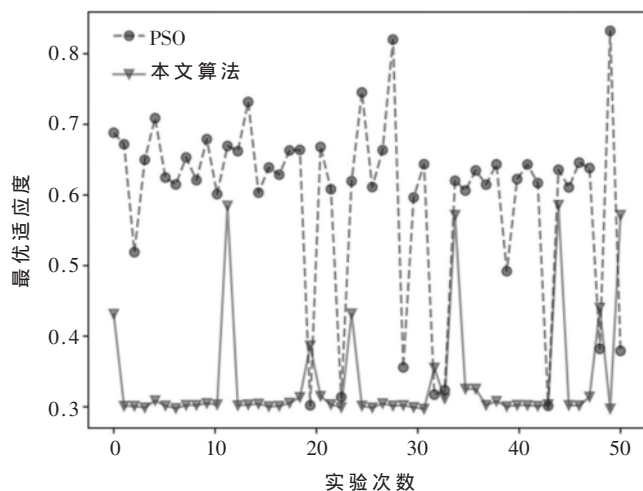


图8 50次实验最优适应度走势

3 结论

本文针对多机器人建立的局部栅格地图拼接成全局地图的问题,研究了一种结合ORB特征匹配和改进的粒子群优化算法的方法。该方法不需要知道机器人之间的相对位置,适用于大多数多机器人协作建图的场景。本文算法在继承两种算法的优越性的同时改善了经典PSO算法早熟收敛的问题和ORB算法误匹配的问题。最后通过仿真实验和数据比较,表明本文算法能稳定和准确地拼接栅格地图。

参考文献

[1] LEE H C, CHO Y J, LEE B H. Accurate map merging with virtual emphasis for multi-robot systems[J]. Electronics

Letters, 2013, 49(15): 932-934.

- [2] ROH B S, LEE H C, LEE B H. Multi-hypothesis map merging with sinogram-based PSO for multi-robot systems[J]. Electronics Letters, 2016, 52(14): 1213-1214.
- [3] 刘利枚, 蔡自兴. 多机器人地图融合方法研究[J]. 小型微型计算机系统, 2012, 33(9): 1934-1937.
- [4] 潘薇, 蔡自兴, 陈白帆. 复杂环境下多机器人协作构建地图的方法[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2010, 42(1): 143-148.
- [5] 祝继华, 周颐, 王晓春, 等. 基于图像配准的栅格地图拼接方法[J]. 自动化学报, 2015(2): 285-294.
- [6] RUBLEE E, RABAU D V, KONOLIGE K, et al. ORB: an efficient alternative to SIFT or SURF[C]. International Conference on Computer Vision. IEEE, 2012.
- [7] 贾文超. 基于ORB算法的全景图像拼接技术[J]. 城市勘测, 2019(3): 105-108.
- [8] Gerhard Venter, Sobieszczanski-Sobieski Jaroslaw. Particle swarm optimization[J]. AIAA Journal, 2002, 41(8): 129-132.
- [9] 喻金平, 王伟, 巫光福, 等. 基于博弈机制的多目标粒子群优化算法[J]. 计算机工程与设计, 2020, 41(4): 964-971.
- [10] CARPIN S. Fast and accurate map merging for multi-robot systems[J]. Autonomous Robots, 2008, 25(3): 305-316.
- [11] KOUBAA A. Robot operating system(ROS)[M]. Springer, 2016.

(收稿日期: 2020-06-22)

作者简介:

陈超(1974-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向: 智能机器人。

张志昂(1994-), 男, 硕士, 主要研究方向: 图像处理、机器人定位与导航。

丁丽君(1994-), 女, 硕士, 主要研究方向: 计算机视觉、机器人定位与地图创建。

(上接第138页)

- [11] 陈红兵, 闵晶妍. 基于正交信号发生器的单相锁相环的研究[J]. 电力电子技术, 2014, 48(11): 23-25.
- [12] WASISTO H S, ZHANG Q, MERZSCH S A. phase-locked loop frequency tracking system for portable microelectromechanical piezoresistive cantilever mass sensors[J]. Microsystem Technologies, 2014, 20(4): 559-569.
- [13] 薛军, 潘高峰, 谢勇. 基于ADF4350的多频段信号源的设计与实现[J]. 无线电工程, 2011, 41(11): 53-55.
- [14] 王宇舟. 三阶锁相环路滤波器参数设计[J]. 电讯技术, 2008(9): 51-55.

- [15] Chen Bingshuai, Li Chongjian, Wang Chengsheng, et al. An improved decoupled double synchronous reference frame phase locked loop and its application in grid connection system of permanent-magnet synchronous motor[C]. 2016 19th International Conference on Electrical Machines and Systems, 2016.
- [16] 姜信诚. 基于高速锁相环路的现代频率合成中的小数分频技术[J]. 科技信息, 2012(19): 82-83.

(收稿日期: 2020-06-17)

作者简介:

杜海龙(1984-), 男, 硕士, 讲师, 主要研究方向: 交通信息工程及控制、电路故障诊断。

版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所