

本文引用格式: 刘诚,刘忆森,周松斌,等.面向多旋翼无人机的模态分析及结构优化[J].自动化与信息工程,2023,44(2):6-10;21.

LIU Cheng, LIU Yisen, ZHOU Songbin, et al. Modal analysis and structural optimization for multi-rotor UAV[J]. Automation & Information Engineering, 2023,44(2):6-10;21.

面向多旋翼无人机的模态分析及结构优化*

刘诚^{1,2} 刘忆森¹ 周松斌¹ 赵路路¹ 袁飞³

(1.广东省科学院智能制造研究所, 广东 广州 510070

2.昆明理工大学机电工程学院, 云南 昆明 650051

3.广东技术师范大学, 广东 广州 510665)

摘要: 多旋翼无人机装载 5G 模块后, 为避免对其飞行稳定性产生不良影响, 需进行模态分析及结构优化。首先, 通过 SolidWorks 软件建立多旋翼无人机的三维模型, 并将该模型导入 ANSYS Workbench 软件进行模态分析, 分别得到多旋翼无人机装载 5G 模块前后的模态; 然后, 根据模态分析结果得出, 多旋翼无人机存在固有频率与激励频率过于耦合而引发共振的可能性; 接着, 分别对多旋翼无人机的固定板厚度、5G 模块装载位置和起落架结构进行模态分析, 得知起落架结构对多旋翼无人机的固有频率影响显著; 最后, 在减少起落架质量的基础上, 优化起落架结构, 提高多旋翼无人机的固有频率, 有效避免共振现象, 提升其飞行稳定性。

关键词: 多旋翼无人机; 5G 模块; 模态分析; 共振; 结构优化

中图分类号: TH128

文献标志码: A

文章编号: 1674-2605(2023)02-0002-06

DOI: 10.3969/j.issn.1674-2605.2023.02.002

Modal Analysis and Structural Optimization for Multi-rotor UAV

LIU Cheng^{1,2} LIU Yisen¹ ZHOU Songbin¹ ZHAO Lulu¹ YUAN Fei³

(1. Institute of Intelligent Manufacturing, Guangdong Academy of Science, Guangzhou 510070, China

2. Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650051, China

3. Guangdong Polytechnic Normal University, Guangzhou 510665, China)

Abstract: After the multi-rotor unmanned aerial vehicle is loaded with 5G modules, modal analysis and structural optimization are necessary to avoid adverse effects on its flight stability. Firstly, a three-dimensional model of a multi-rotor unmanned aerial vehicle is established using SolidWorks software, and the model is imported into ANSYS Workbench software for modal analysis to obtain the modes of the multi-rotor unmanned aerial vehicle before and after loading the 5G module; Then, based on the modal analysis results, it is concluded that there is a possibility of resonance caused by excessive coupling between the natural frequency and the excitation frequency of the multi-rotor unmanned aerial vehicle; Next, modal analysis was conducted on the fixed plate thickness, 5G module loading position, and landing gear structure of the multi-rotor unmanned aerial vehicle, indicating that the landing gear structure has a significant impact on the natural frequency of the multi-rotor unmanned aerial vehicle; Finally, on the basis of reducing the weight of the landing gear, optimize the landing gear structure, increase the natural frequency of the multi-rotor unmanned aerial vehicle, effectively avoid resonance phenomena, and improve its flight stability.

Keywords: multi-rotor UAV; 5G module; modal analysis; resonance; structural optimization

0 引言

多旋翼无人机可承担无人监测、医疗救援、危险地域检修、工农业巡查等工作, 在军事、民用等领域

应用广泛^[1-4]。随着多旋翼无人机技术的发展和使用需求的提高, 现有基于 4G 模块的多旋翼无人机在信息传输距离较远, 图传质量要求较高的场合表现欠佳。

6 * 基金项目: 国家重点研发计划 (2019YFB1804203)

此外,重新设计多旋翼无人机的成本较高。为此,本文将5G模块装载到现有的多旋翼无人机中,实现高清、稳定的图传效果^[5-6]。

本文采用的多旋翼无人机基于模块化设计,可通过更换不同的模块来完成不同的需求^[7]。目前,大多数多旋翼无人机没有专门预留扩展模块放置的位置。若随意更改多旋翼无人机的结构或增加模块,会导致其飞行时机身不稳定。因此,有必要对多旋翼无人机的模块进行结构设计。

本文对装载5G模块的多旋翼无人机进行整体模态分析。首先,利用SolidWorks软件建立多旋翼无人机的三维模型;然后,通过ANSYS Workbench软件分析多旋翼无人机的模态,确定其共振频率;接着,分析固定板厚度、5G模块装载位置和起落架结构对多旋翼无人机固有频率的影响;最后,通过优化起落架结构来提高多旋翼无人机的固有频率,进而解决共振问题。

1 理论模型

1.1 多旋翼无人机模型

多旋翼无人机通过多个电机转动获得升力,而电机转动会带来扭力矩。为了使扭力矩不影响多旋翼无人机,电机使用数量一般为偶数,利用多组旋翼的相反向来抵消扭力矩^[8-9]。

1.2 模态分析与共振分析

模态分析主要对物体结构求解特征值和特征向量,也叫做模态提取。物体动力学通用方程为

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = \{F(t)\} \quad (1)$$

式中:[M]为质量矩阵,[C]为阻尼矩阵,[K]为刚度矩阵,{x}为位移矢量,{F(t)}为力矢量,{x'}为速度矢量,{x''}为加速度矢量。

无阻尼情况下,物体的运动方程为

$$[M]\{\ddot{x}\} + [K]\{x\} = \{0\} \quad (2)$$

多旋翼无人机结构的自由振动为简谐振动,位移为正弦函数,即

$$x = x \sin(\omega t) \quad (3)$$

将公式(3)代入公式(2),可得

$$([K] - \omega^2 [M])\{x\} = \{0\} \quad (4)$$

由公式(4)可以得到多旋翼无人机机身的自振频率为 $f = \frac{\omega_i}{2\pi}$ 。

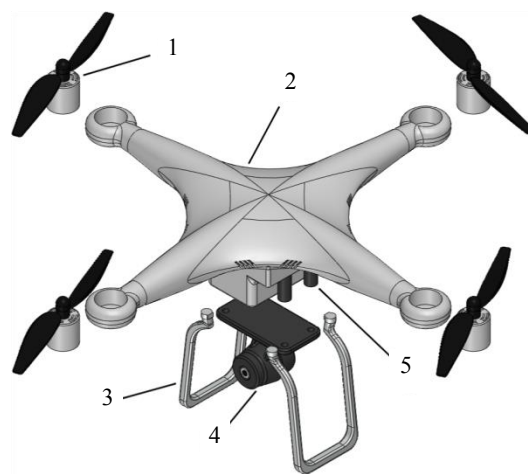
当多旋翼无人机的激励频率与机身的固有频率接近时,会产生共振现象,导致机身不稳定,影响正常飞行。因为低阶的固有频率比高阶频率更容易被外界激励,所以本文仅对前6阶的固有频率进行共振分析。

多旋翼无人机的激励频率主要是自身电机产生的工作频率,即电机旋转带动桨叶得到升力时产生的周期性振动。本文只对多旋翼无人机的工作频率与机身的固有频率进行对比分析,并根据分析结果来判断是否产生共振。

2 多旋翼无人机模型建立和模态分析

2.1 多旋翼无人机模型建立

本文分析的多旋翼无人机的机身为一体化设计,其他部件(相机、起落架等)均可以拆解或更换。利用SolidWorks软件对多旋翼无人机进行简化三维建模,并对桨叶、电机、相机等部件做了简化处理,如图1所示。



1—电机; 2—机身; 3—起落架; 4—相机; 5—固定桩。

图1 多旋翼无人机模型

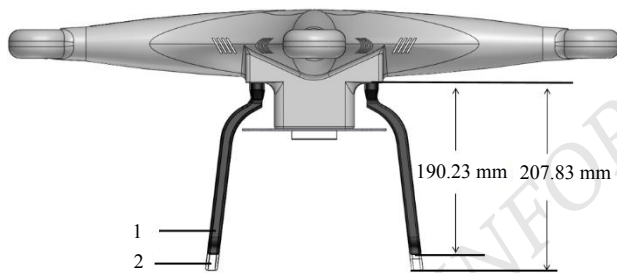
2.2 5G 模块的外壳设计

为便于对多旋翼无人机进行整体模态分析,本文对 5G 模块的装载外壳进行简易设计。选用的 5G 模块为 RM500Q-GL 模组,其外形尺寸为 90 mm×40 mm×4.5 mm。基于该 5G 模块的外形尺寸,设计其外壳尺寸为 100 mm×50 mm×9 mm,壁厚为 1 mm。

2.3 固定板与起落架设计

为便于分析 5G 模块的装载位置对多旋翼无人机固有频率的影响,需使用固定板固定 5G 模块的外壳。本文将固定板制成长、宽为 200 mm×160 mm 的镂空板^[10],在承受力范围内可减轻 5G 模块的质量,提高多旋翼无人机的续航时间。

考虑到在多旋翼无人机的相机和机身之间装载 5G 模块,增大了相机碰撞地面的可能性,将起落架的垂直高度由 190.23 mm 升高到 207.83 mm,如图 2 所示。



1—原起落架; 2—起落架延长部分。

图 2 起落架升高示意图

2.4 多旋翼无人机的材料属性

目前,多旋翼无人机采用的材料主要有铝合金、碳纤维和其他复合材料^[11]。本文对常用的铝合金和碳纤维 2 种材料进行比较,如表 1 所示。

表 1 铝合金和碳纤维材料比较

材料	密度/ (g·cm ⁻³)	抗张强度 ×10 ³ /MPa	弹性模量 ×10 ⁵ /MPa	比强度 ×10 ⁷ /cm	比模量 ×10 ⁹ /cm
铝合金	2.80	0.47	0.75	0.17	0.26
碳纤维	1.60	1.07	2.40	0.67	1.50

由表 1 可知,碳纤维在密度较小的情况下拥有较高的硬度,即在相同的体积下选用碳纤维会更轻。为

提高多旋翼无人机的续航时间,其起落架、固定板与 5G 模块外壳都选用碳纤维材料。

2.5 多旋翼无人机网格划分

利用 ANSYS Workbench 软件对未装载 5G 模块的多旋翼无人机模型进行网格划分。因为在相同精度等级下,使用不同的网格划分数量对模态分析的结果影响较小^[12],所以本文选择四节点矩阵单元划分机身,其余部件选择网格自动划分。多旋翼无人机模型以 5 mm 的网格大小进行划分,如图 3 所示。



图 3 未装载 5G 模块的多旋翼无人机模型网格划分

3 模态分析

3.1 未装载 5G 模块的多旋翼无人机模态分析

利用 ANSYS Workbench 软件对划分网格后未装载 5G 模块的多旋翼无人机模型进行模态分析,得到其前 12 阶的固有频率。因采用自由模态分析,其前 6 阶的刚性频率都约等于零^[13],所以一阶模态从第 7 阶开始算起,得到的 7~12 阶整体振型对应的固有频率如表 2 所示,7~12 阶振型云图如图 4 所示。

表 2 未装载 5G 模块的多旋翼无人机模态分析的固有频率

阶数	固有频率/Hz
7	84.826
8	93.772
9	118.190
10	133.930
11	149.720
12	178.240

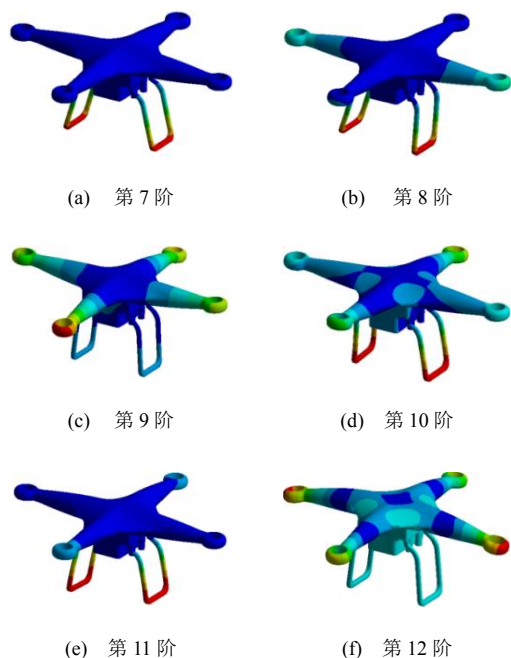


图4 未装载 5G 模块的多旋翼无人机 7~12 阶振型云图

由图 4 可以看出,多旋翼无人机的振型主要集中于起落架与无人机机身。

3.2 固定板厚度分析

多旋翼无人机仅安装固定板后,不同厚度的固定板的固有频率如表 3 所示。

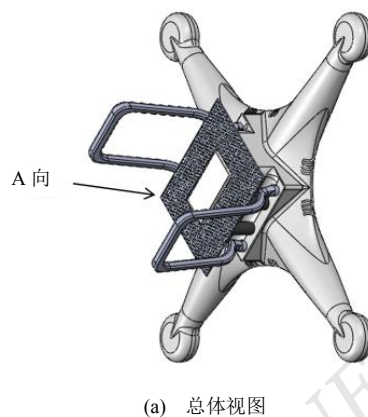
表 3 不同厚度的固定板的固有频率

厚度/ mm	7 阶/ Hz	8 阶/ Hz	9 阶/ Hz	10 阶/ Hz	11 阶/ Hz	12 阶/ Hz
2	88.262	95.361	120.820	133.980	150.050	178.520
4	88.403	95.316	121.250	133.740	150.260	177.080
6	88.460	95.261	121.800	133.490	150.440	176.100

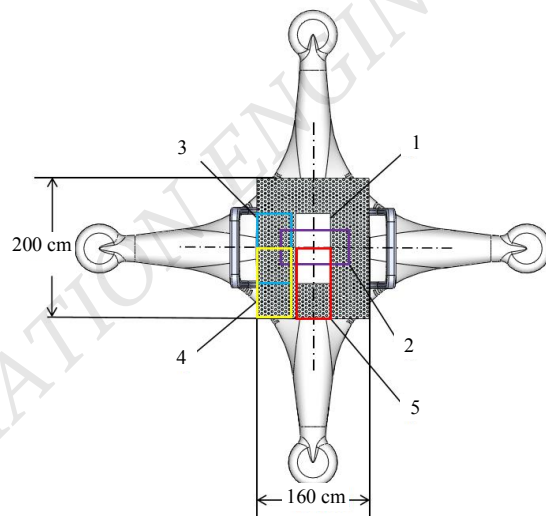
由表 3 可知,固定板厚度对多旋翼无人机的固有频率影响甚微。为了减少多旋翼无人机的载重,本文选用 2 mm 厚的固定板。

3.3 5G 模块装载位置分析

固定板为长方形,上和下、左和右都是对称关系,设定的 5G 模块装载位置如图 5 所示。共测试图 5(b) 中 5 个 5G 模块的装载位置(1、2、3、4、5 分别代表位置 1、位置 2、位置 3、位置 4、位置 5)的固有频率,结果如表 4 所示。



(a) 总体视图



(b) A 向视图

图 5 5G 模块装载位置示意图

表 4 5G 模块不同装载位置的固有频率 单位: Hz

位置	7 阶	8 阶	9 阶	10 阶	11 阶	12 阶
1	88.286	95.206	120.810	133.870	150.280	177.160
2	88.389	95.307	121.020	133.920	150.220	177.400
3	88.380	95.296	121.240	133.940	150.110	177.380
4	88.331	95.285	121.100	133.750	150.110	177.260
5	88.280	95.208	120.790	133.730	150.230	177.100

由表 4 可知,5G 模块的装载位置对多旋翼无人机的固有频率影响甚微。在考虑多旋翼无人机的重心前提下,本文选用位置 1 装载 5G 模块。

3.4 起落架高度分析

对改变高度后的起落架进行模态分析,结果如表 5 所示。

表 5 起落架改变高度前后的模态分析结果 单位: Hz

起落架高度	7阶	8阶	9阶	10阶	11阶	12阶
改变前	88.276	95.195	120.810	133.860	150.270	177.160
改变后	77.364	85.393	119.140	123.780	129.600	176.570

由表 5 可知, 起落架升高后, 多旋翼无人机的固有频率降低。

4 结果讨论

4.1 仿真结果分析

未装载 5G 模块、装载固定板 (2 mm)、5G 模块装载位置 1 和改变起落架高度的多旋翼无人机 7~10 阶模态分析结果如图 6 所示。

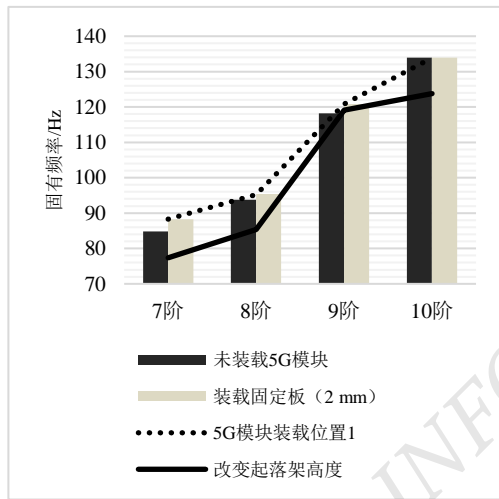


图 6 多旋翼无人机改动方案的固有频率数据对比

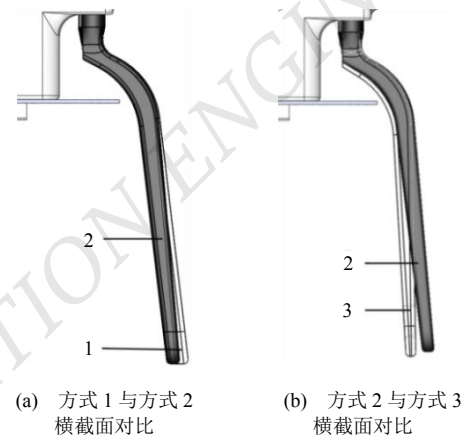
多旋翼无人机在装载固定板和 5G 模块后, 每一阶的固有频率在 4~5 Hz 范围之间增加, 该频率增幅对多旋翼无人机固有频率的影响甚微; 但起落架升高后, 多旋翼无人机在 7 阶时的固有频率从 88.276 Hz 降到 77.364 Hz。本文多旋翼无人机电机产生的激振频率在 55~80 Hz 之间, 升高起落架高度后的 7~8 阶模态均在 80 Hz 左右, 会产生共振, 影响多旋翼无人机的飞行稳定性。通过优化起落架结构来改变多旋翼无人机的固有频率, 可防止共振现象发生。

4.2 起落架结构优化

起落架是多旋翼无人机的可拆卸部分, 通过更改起落架结构, 使多旋翼无人机的固有频率增大, 可避

免共振现象发生。

本文主要对起落架的接地端和上端进行结构优化。采用优化斜角的方式, 将起落架接地端横截面变窄, 以减轻起落架的质量, 如图 7(a)所示; 采用优化斜角和上端厚度的方式, 将起落架接地端变窄的同时, 将起落架上端变宽, 如图 7(b)所示。对上述 2 种优化方式及升高后的起落架进行模态分析, 结果如表 6 所示。通过对优化后的起落架模型赋予材料属性可得到其质量, 结果如表 7 所示。



1—升高起落架; 2—优化斜角; 3—优化斜角和上端厚度。

图 7 3 种起落架优化方式

表 6 3 种起落架优化方式的模态数据对比 单位: Hz

方式	7阶	8阶	9阶	10阶	11阶	12阶
1	77.364	85.393	119.140	123.780	129.600	176.570
2	91.895	97.363	120.680	132.340	143.830	177.750
3	104.970	108.990	120.800	138.030	152.810	178.010

由表 6 可知: 优化起落架的斜角可将多旋翼无人机 7 阶之后的固有频率都提升至 90 Hz 以上; 而优化起落架的斜角和上端厚度可将多旋翼无人机 7 阶之后的固有频率都提高至 100 Hz 以上。

表 7 优化起落架的质量

起落架优化方式	质量/g
升高	120.78
优化斜角	95.80
优化斜角和上端厚度	90.10

(下转第 21 页)

IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2016:779-788.

[16] REDMON J, FARHADI A. YOLO9000: better, faster, stronger[C]//Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2017:7263-7271.

[17] REDMON J, FARHADI A. YOLOv3: an incremental

improvement[J]. arXiv preprint arXiv:1804.02767, 2018.

[18] LIU W, ANGUELOV D, ERHAN D, et al. SSD: single shot multibox detector[C]//European Conference on Computer Vision. Springer, Cham, 2016:21-37.

[19] 魏溪含,涂铭,张修鹏著.深度学习与图像识别:原理与实践[M].北京:机械工业出版社, 2019.

作者简介:

熊治国, 男, 1977 年生, 博士, 副教授, 主要研究方向: 无人机飞行控制。E-mail: xiongzhi guo416@163.com

周恒旭(通信作者), 男, 1992 年生, 硕士, 助教, 主要研究方向: 机器人智能控制等。E-mail: 1281859757@qq.com

~~~~~

(上接第 10 页)

根据表 6 的分析结果并结合表 7 优化起落架后的重量, 本文选用起落架优化斜角和上端厚度的方式, 提升多旋翼无人机的固有频率及其续航时间。

## 5 结论

针对多旋翼无人机装载 5G 模块后, 导致其飞行不稳定的问题, 本文利用 SolidWorks 和 ANSYS Workbench 软件对多旋翼无人机进行模态分析。通过具体分析多旋翼无人机的固定板厚度、5G 模块装载位置和起落架升高后的固有频率, 得知起落架结构对多旋翼无人机的固有频率有显著影响。

为了避免多旋翼无人机的固有频率和激励频率相近导致共振现象的发生, 对多旋翼无人机的起落架进行结构优化设计, 提高多旋翼无人机的固有频率, 进而保证其飞行稳定性。

#### 参考文献

[1] FENG Licheng, KATUPITIYA Jay. UAV-based persistent full area coverage with dynamic priorities[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2022, 157: 104244.

[2] 陈梅香,张瑞瑞,陈立平,等.无人机农林业应用全球研究态势

分析[J].智慧农业(中英文),2021,3(3):22-37.

[3] 李永红,洪小刚,邢涛.无人机在桥梁检测中的实用研究[J].测绘与空间地理信息,2022,45(7):81-84.

[4] 梁宇锋,潘满清,霍翔,等.基于无人机多光谱图像的荔枝叶片氮磷钾含量检测[J].机电工程技术,2022,51(5):138-142.

[5] 张红,宋凯廷.5G 与超高清视频融合应用关键技术探讨[J].数字通信世界,2022(9):100-102.

[6] 郑杰,陈高亮,时海龙,等.5G 环境下无人机高清视频数据实时传输组网方式研究[J].通信技术,2020,53(4):923-926.

[7] 王筱淇,刘震磊,李颖,等.四轴无人机总体结构模块化设计[J].中国科技信息,2020(2):21-23.

[8] 田卫军,李郁,何扣芳,等.四轴旋翼飞行器结构与模态分析[J].制造业自动化,2014,36(4):37-39.

[9] 刘峰,高鸿渐,喻辉,等.基于有限元的四旋翼无人机碳纤维结构优化设计与固有模态分析[J].玻璃钢/复合材料,2017(4):17-23.

[10] 练伟,王华山,余嘉.基于有限元分析的 3D 打印脊柱侧弯矫形器局部优化设计[J].医用生物力学,2021,36(6):855-861.

[11] 段国晨,赵景丽,赵伟超.先进复合材料在无人机结构的应用[J].纤维复合材料,2022,39(2):105-114.

[12] 张坤金,郑忠才,高岩,等.不同网格划分对机体有限元模态分析结果的影响[J].小型内燃机与摩托车,2009,38(5):69-71.

[13] 魏文菲,张春元,李超,等.某四旋翼飞行器机架的模态分析[J].兵器装备工程学报,2017,38(2):40-42.

#### 作者简介:

刘诚, 男, 1998 年生, 硕士研究生, 主要研究方向: 复杂系统的集成与设计。E-mail: 805327372@qq.com

刘忆森(通信作者), 女, 1985 年生, 博士研究生, 副研究员, 主要研究方向: 智能传感及深度学习。E-mail: ys.liu@giim.ac.cn

周松斌, 男, 1978 年生, 博士研究生, 研究员, 主要研究方向: 智能传感与检测。E-mail: Sb.zhou@giim.ac.cn

赵路路, 男, 1995 年生, 硕士研究生, 助理工程师, 主要研究方向: 复杂系统的集成与设计。E-mail: 282731537@qq.com

袁飞, 男, 1984 年生, 博士, 讲师, 主要研究方向: 智能数据处理。E-mail: eric\_f\_y@foxmail.com