

农用植保无人直升机飞行航路的自动规划算法与实现^{*}

万顺飞 祖家奎 刘世隆

(南京航空航天大学自动化学院 南京 210016)

摘要: 随着农业机械化和现代化的发展,微小型无人直升机在农业植保领域的应用日益得到重视,其飞行控制技术是农用植保无人直升机的核心技术。针对不规则形状的农田,如何自动、高效地规划出飞行航路,是保证无人直升机农业自动化应用和提高商业应用效益的关键技术之一。本文针对农用植保领域对微小型无人直升机飞行轨迹的技术需求,利用图形学理论,重点研究了不规则农田的辨识、最优航路设计等规划算法,并实现了规划算法的相应函数模块和应用软件。该软件在工程应用中得到了验证,取得了较好的应用效果。

关键词: 植保无人直升机 凹凸多边形识别 图形分割 航路规划

中图分类号: TP242 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 590.35

Route planning algorithm and implementation for Eppo unmanned helicopter

Wan Shunfei Zu Jiakui Liu Shilong

(College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Unmanned helicopter is becoming more and more popular in the field of agricultural plant protection, with the development of agricultural mechanization and modernization. And flight control technology is the core of unmanned helicopter. In view of the irregular shape of farmland, designing the flight route automatically and efficiently is one of the key technologies, which make sure the application of unmanned helicopter in the field of agriculture and improvement of commercial efficiency. With technical requirements of unmanned helicopter flight trajectory in agricultural plant field, the author of this paper researched irregular farmland identification and the optimal route design algorithm using the theory of graphics, and realized the corresponding function module and application software. The software has been proved in the engineering application, and achieved good application effect.

Keywords: Eppo unmanned helicopter; the concave and convex polygons identifying; graphic division; route panning

1 引言

在人工成本日益增长的当今社会,机器代替人工操作将会节约大量成本和时间。植保无人直升机能够代替人去完成农药喷洒这种对人体伤害很大的工作,并且植保无人直升机旋翼产生的涡流可极大地改善喷洒效果,能使农药均匀覆盖在农作物茎叶的背面,有效地减少单位面积农药喷洒使用量,提高农药喷洒效率,减少对周边环境的危害,因此农药喷洒、作物授粉等植保型无人直升机将在农业领域得到广泛的推广和应用^[1-2]。

微小型无人直升机在农业领域的应用需要解决控制律、自动飞行、应用等诸多问题,确保无人直升机既能实现对田地完整覆盖飞行,同时又要保证药量喷洒均匀。其中,针对不规则农田的飞行航路规划是实现植保型无人直升机自动飞行和工程应用的关键技术之一^[3-4]。本文首

先分析了农业领域对微小型无人直升机飞行轨迹的技术需求,详细论述了研究的技术思路和航路规划的算法,然后基于QT开发环境设计和实现了航路规划算法的相应函数模块和应用软件^[5-6],并且本文的研究成果在工程应用中得到了验证,取得了较好的应用效果。

2 需求分析与设计思想

农田的形状大体以长方形为主,但也有不少受地形或者其他因素的影响,形成不规则的多边形。微小型无人直升机的飞行需要对农田进行航路规划和设计,就要先获得农田的形状。由于现在GPS定位精度很高,可以轻松测得农田各个端点的经纬度坐标,将这些坐标点有序排列,就绘制出了农田的形状。

另外,农用直升机属于商用无人机,一定会追求利益和效益的最大化。由于技术的限制,无人直升机在转弯时会

收稿日期:2015-08

* 基金项目:南京航空航天大学基本科研业务费专项科研(NS2013031)资助项目

耗费大量油料和时间,严重影响飞行效益和商业利益。这就要求在设计航路时要尽可能地减少无人机的转弯次数。

农田的形状可以化解为凸多边形或凹多边形。凸多边形的处理,本文主要是通过解直角三角形的几何方法,来对其等间距地划分。凹多边形的处理相对比较复杂,特别是那种复杂的凹多边形,飞机根本无法一次连续地完成喷洒,需要人工对田地地进行二次划分,划分成多个凸多边形的组合,并重新标号和规划,如图1所示,即将凹多边形的航路设计转化成凸多边形的航路设计问题。

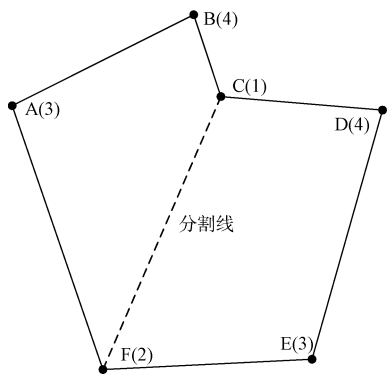


图1 凹多边形分割示例图

3 航路规划的原理与算法

3.1 凹凸多边形的识别

根据图形学理论,引入有向图的定义。

定义1:记 $G = (V, E)$ 为图,其中, $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ 称为顶点集, V 所包含的元素为 G 的顶点; $E = \{e_1, e_2, \dots, e_n\}$ 称为边集, E 所包含的元素为 G 的边;如果 v_i 是边 e_k 的一个端点,称点 v_i 与边 e_k 关联。图 G 中,若一条边与其关联的两个顶点的次序有关,即认为边 $v_i v_j$ 和 $v_j v_i$ 是不同的,这样的图称为有向图^[7]。

根据有向图的定义可将多边形定义为顺时针回路和逆时针回路,如图2所示。

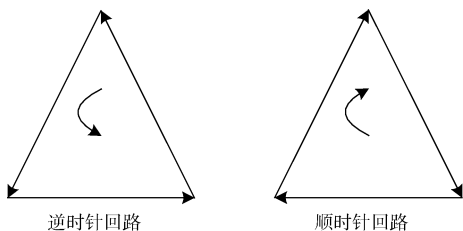


图2 顺时针回路和逆时针回路的定义

相邻的两条有向线段的夹角也存在方向,定义夹角逆时针方向角度增加,顺时针方向角度减小,如图3所示。在逆时针回路中,凸角的两条有向线段形成的夹角也为逆时针,夹角为负;凹角的两条有向线段形成的夹角则为顺时针,此时夹角为正。在顺时针回路中,结果则是相反的,凸

角的两条有向线段形成的夹角也为顺时针,夹角则为正;凹角的两条有向线段形成的夹角则为逆时针,夹角则为负。

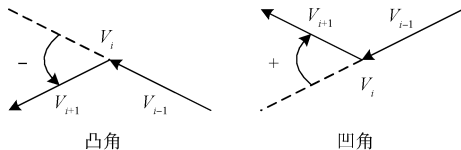


图3 凸角和凹角的定义

凸多边形的所有内角都为凸角,凹多边形的内角至少存在一个凹角,但一个多边形不可能全部由凹角组成。因此本文判断凹凸多边形的基本方法就是判断多边形任意相邻两条有向线段的夹角正负性是否一致,如果一致,说明所有内角全部为凸角,则多边形为凸多边形;如果不一致,说明至少有一个内角为凹角,则多边形为凹多边形^[8-9]。

凹凸多边形识别完成后,就需要对两者进行分类处理。由于航路规划和设计的核心是凸多边形农田的规划问题,而凹多边形的处理是通过图形分割划分为多个凸多边形来处理的,因此本文以下的论述主要针对凸多边形农田的航路规划问题展开的。

3.2 最优航路的设计

由需求分析可知,农用直升机要求在设计航路时要尽可能地减少无人直升机的飞行转弯次数。因此,在喷洒农药的过程中,无人直升机通常做等间距的航路飞行。本文以平行线等距切割凸多边形的方法来研究等距航路的设计和规划问题。由此,无人直升机的转弯次数跟这些等距平行分割线的个数存在直接的线性关系,等距平行分割线越少,转弯次数越少。

根据图形学理论,引入平行切割线和平行切割距离的定义。

定义2:一条平行线平行移动,从多边形任意一处平行推进直至横穿整个多边形的过程称为多边形的平行切割,该平行线称为平行切割线,平行切割线从开始切割多边形到刚好穿过多边形,其垂向移动的距离定义为该平行切割线的平行切割距离,本文记作 h 。

根据定义2可知,平行切割距离 h 越小,等距分割线就越少,无人直升机转弯次数必然也最少。由此,最小转弯次数的设计就等同于寻找有着最小的平行切割距离 h 的一组平行线。

平行线切割凸多边形有两种情形:一是平行于凸多边形的一条边;二是不平行于任意一条边。第一种情况,平行切割线为凸多边形的一条边,那么该边的平行切割距离一定为距离这条边最远端点到这条边的垂直距离。第二种情况,平行切割线不平行于任意一条边,那么这条平行线一定是从一个端点进从另一个端点出,如图4所示^[10]。在图4中,四边形ABCD被平行线 l 平行切割, l 为平行切割线, AF 为平行切割距离, A 是距离 BC 最远的点,且

AE ⊥ BC, 若以 BC 作为平行切割线, AE 则为 BC 的平行切割距离。

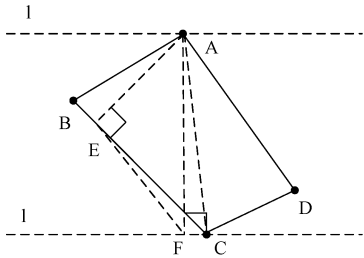


图 4 不平行于任意一条边的平行线切割

由图 4 可知, ΔAEC 和 ΔAFC 都为直角三角形。根据三角形正弦定理可得式(2)。

$$\begin{cases} \frac{AC}{\sin \angle AEC} = \frac{AE}{\sin \angle ACE} \\ \frac{AC}{\sin \angle AFC} = \frac{AF}{\sin \angle ACF} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \angle AEC = \angle AFC = 90^\circ \\ \frac{AE}{\sin \angle ACE} = \frac{AF}{\sin \angle ACF} \end{cases} \quad (1)$$

因为 l 是四边形 ABCD 的平行切割线, 那么 BC 一定在图 4 两条平行线 l 之内, 所以 $\angle ACE < \angle ACF$ 。由式 1 可得, $AE < AF$, 因此平行线 l 的平行切割距离大于 BC 的平行切割距离。同理可证得第二种情况中不平行于任意一条边的平行分割线的平行切割距离一定大于第一种情况的平行切割距离。

由此, 最小转弯次数的设计就简化为求取凸多边形每条边的平行切割距离 h 的最小值。具体方案分为 2 个步骤:

step 1: 找出多边形每条边对应的最远点。如图 5 所示, 以凸多边形任意一条边作为基准边, 其他点到这条基准边的垂直距离设为 L_1, L_2, \dots, L_n , 其中最大的 L 记为 L_{\max} , L_{\max} 对应的点为离这条基准边最远的点;

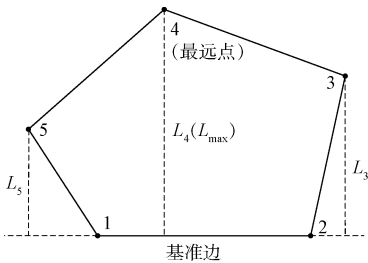


图 5 各点到基准边垂直距离

step 2: 寻找多边形的基准边和最小的平行切割距离 h 。凸多边形每条边都找到了最远点以及最远的垂直距离 L_{\max} , 其中最小的 L_{\max} 对应的边就为该多边形的基准边, 这个 L_{\max} 为最小的平行切割距离 h 。以这条基准边做平行切割, 航路的转弯次数最少。

3.3 平行切割交点的解算方法

对于凸多边形, 确定好平行分割的基准线后, 就可以进行航路点解算, 即求解平行线与凸多边形各边的交点。航路点的解算有两种方法:

第一种方法是通过直线方程求交点, 因为平行切割距离是固定的, 这样就能够得到所有平行切割线的直线方程, 然后再与多边形各条边的直线方程求交点, 就可以得到所有交点。

第二种方法是利用解直角三角形原理。解直角三角形需要先解算出多边形的长度和方位角, 本文多边形所有线段的长度和方位角中是根据多边形各顶点的经纬度坐标解算出来的。设一条线段的起点经纬度坐标为 $(Lon0, Lat0)$, 终点经纬度坐标为 $(Lon1, Lat1)$, 通过经纬度坐标转地面坐标系公式, 如式(2), 可求得地面坐标系下终点相对于起点的 XY 坐标。

$$\begin{cases} \phi = (Lat0 + Lat1)/114.5916 \\ x = (111412.876 * \cos\phi - 93.5030 * \cos 3\phi * (Lon1 - Lon0)) \\ y = (111132.952 - 559.849 * \cos 2\phi * (Lat1 - Lat0)) \end{cases} \quad (2)$$

式中: x, y 为地面坐标系下终点相对于起点的 XY 坐标。

在求得 XY 坐标后, 即可该线段的长度 Len 和方位角 θ , 如式(3):

$$\begin{cases} \theta = \arctan\left(\frac{y}{x}\right) \\ Len = \sqrt{x^2 + y^2} \end{cases} \quad (3)$$

多边形每条边都经过上述运算后, 每条边的长度和方位角都可解算出来, 接下来即可通过解直角三角形的方法来求解航路点坐标。

如图 6 所示, 平行切割线的间距为 m , 经过上述计算后 θ_1 易得, AF 就很容易计算出来。已知 AF 长度和 A 点经纬度坐标, 将 AF 在地面坐标系下分解成 XY 坐标, 再根据式(4)即可计算出 F 点经纬度坐标。

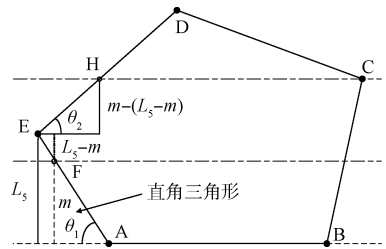


图 6 解直角三角形方法求航路点

$$\begin{cases} R = 6378165.0 * \cos(LatA/57.3) \\ LonF = LonA + 57.3 * x/R \\ LatF = LatA + 57.3 * y/6378165.0 \end{cases} \quad (4)$$

正常航路点坐标的解算都跟上述一致, 但当平行切割线跨越多边形端点后, 用于解算的边也相应发生改变, 并且

用于解算的直角三角形的直角边长度不再为间距 m , 而是变成 $m - (L_5 - m)$, 其他计算就跟上述计算过程一致。

第一种方法逻辑简单明了, 但是它存在不少弊端。由于直线方程是没有端点的, 当一条分割线与所有边的直线方程求交点时, 有时会产生平行线和多边形边的延长线的交点。而这些交点是不需要的, 这就需要软件摒弃不需要的点, 增加了软件工作量。另外, 直线方程的求解运算量也比较大, 大大增加软件的工作量。第二种方法计算过程简单, 逻辑也不是很复杂, 可以大大简化软件的工作量。综合考虑以后, 本文航路自动规划软件的实现选用了第二种方法。

4 航路规划算法的实现

4.1 基本功能模块

为了方便算法实现, 航线规划算法设计了如下基本功能模块:

1) GEO_RIGHTSIDE 函数, 求垂直距离 h 的函数, 即已知线段的一个端点和方位角, 求另外一点到这条线段的垂直距离;

2) GEO_POS2DP 函数, 即已知初始点和终点经纬度坐标可解算出这两点形成的有向线段的方位角和长度;

3) GEO_DP2POS 函数, 这个函数是与 GEO_POS2DP 函数逆向计算, 即已知一条有向线段长度方位角以及初始点经纬度坐标, 可解算出终点的经纬度坐标;

4) GEO_NEXTPOINT 解交点函数, 如图 7 所示, 即已知 A 点经纬度坐标和 AB、AC 的方位角以及分割间距 k , 求 D 点的经纬度坐标, 方法是先利用解直角三角形原理, 在已知直角边长度 k 和一个顶角后可求出 AD 长度, 在求得 AD 长度后, 方位角又已知, 然后根据 GEO_DP2POS 函数即可求得 D 点经纬度坐标。

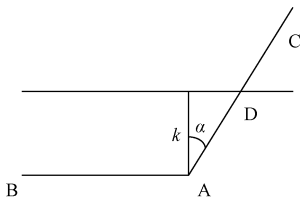


图 7 目标点坐标解算

4.2 凹凸多边形的自动辨别模块

凹凸多边形的自定辨别模块主要由两个函数组成:

1) GEO_LINEPSI 函数, 求两条有向线段的夹角函数, 即已知两条有向线段的方位角, 求这两者形成的夹角, 并将夹角范围调整为 $(-180 \sim 180)$;

2) GEO_SIGNTTEST 函数, 即检测一组数的正负极性号是否一致, 一致则返回 TRUE, 若不一致则返回 FALSE;

辨别凹凸多边形模块的软件实现思路很简单, 主要为两个步骤:

step 1: 从第一条有向线段开始, 依次计算两相邻有向线段的夹角, 保持夹角范围为 $(-180 \sim 180)$;

step 2: 判断这些夹角的正负性, 如果正负性一致, 则为凸多边形, 并进入下一步进行航路设计, 如果正负性不一致, 则为凹多边形, 提示需进行人工划分, 并退出程序。

4.3 寻找最小平行切割距离模块

寻找最小平行切割距离模块中需要调用基本功能模块里介绍的 GEO_RIGHTSIDE 功能函数以及 GEO_MAXLEN 函数。

GEO_MAXLEN 函数, 是已知一组距离的数据, 求出其中最大的值, 并返回这个最大值以及该最大值所对应的点号。

寻找最小平行切割距离模块的实现思路大致是运用 GEO_RIGHTSIDE 函数和 GEO_MAXLEN 函数, 以图 8 所示两重循环的方式, 求出这个多边形的最小平行切割距离 h , 其中多边形的点号从第 1 点开始, 最后一点跟第一点为同一点, 假设多边形总线段数为 n , 总点数为 $n+1$, 流程图如图 8 所示。

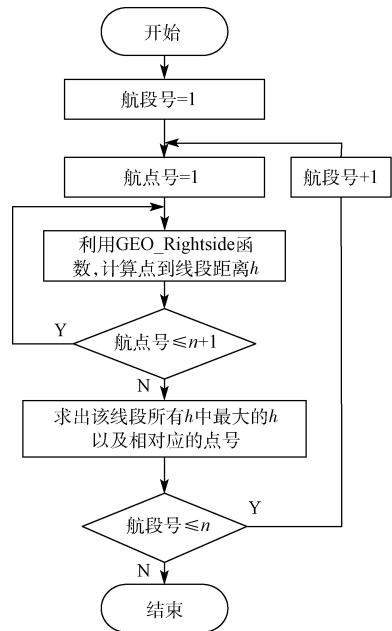


图 8 求解最小平行切割距离流程图

在求出最小平行切割距离 h 后, 会得到对应的基准线段号以及该基准线段对应的最远点号。为了方便下一环节的解算, 需要对点号重新排列, 将最小平行分割距离 h 对应的基准线段的两个端点分别记为 1 号点和 2 号点, 其他点依次顺移, 并记录好那个最远点号。

4.4 航路点坐标解算模块

航路点坐标解算模块需调用基本功能模块的所有函数。

为了方便连成航路, 以最远点为分界, 左右两边分别解算交点坐标, 并将解算出来的经纬度坐标放进两个不同的

数组里。左右两边解算交点的方式基本相同,本文就以点号逐次增加的一边为例讲解。上文分析过,利用解直角三角形求交点方法的难点在于过端点的处理。在航路设计软件中,当快要过端点时,这个端点号到最新的初始点在切割方向上剩余下的一点垂直距离一定小于固定的分割间距。这时把这个端点设为最新的初始点,选用下一个端点来计算垂直距离,同时将下一次解直角三角形的垂直边长度换为分割距离减去剩余下的距离,利用这样的方法就可以解决过端点问题了。具体流程图如图 9 所示。

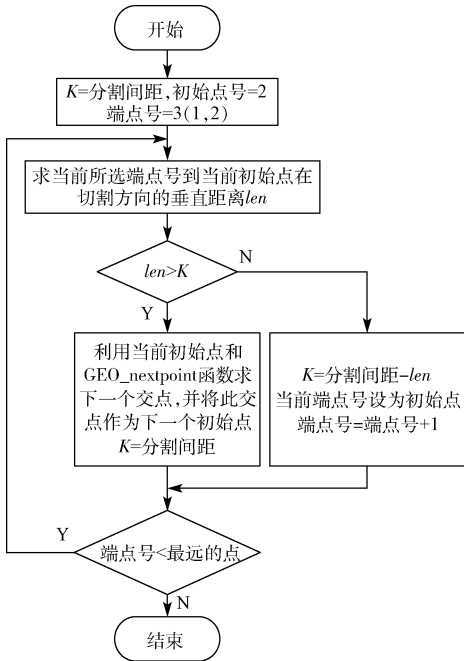


图 9 解航路点坐标流程图

4.5 飞行航路合成模块

飞行航路合成模块由函数 GEO_MAKELINE 构成。

GEO_MAKELINE 构成是根据最远点左右两边解算得到的交点数组,按照一定的规律,将这些点连成航路。假设飞机在左边第一点起飞,接着就是飞右边两个点,然后再是左边两个点,以此类推,将这些点连成航路,最后绘制出来即可。

5 航路软件效果图显示

5.1 凹多边形识别效果图

如图 10 所示,左侧为田地形状,右下方为端点的右上方为辨别的结果,凹多边形为红色警示显示。

5.2 凸多边形识别效果图

如图 11 所示,右上方为凸多边形辨别结果显示。

5.3 凸多边形分割及航路生成效果图

如图 12 所示,绿线为田地形状,红线为生成的航路,右下方为生成的航路点。

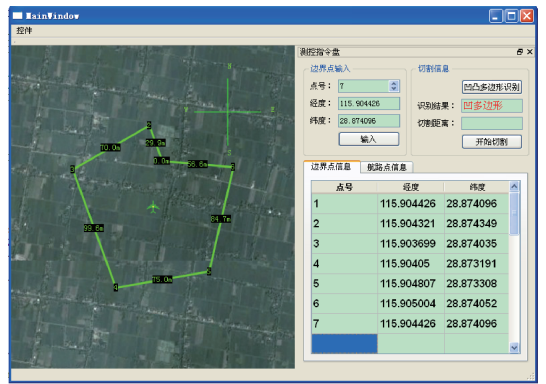


图 10 凹多边形识别效果图

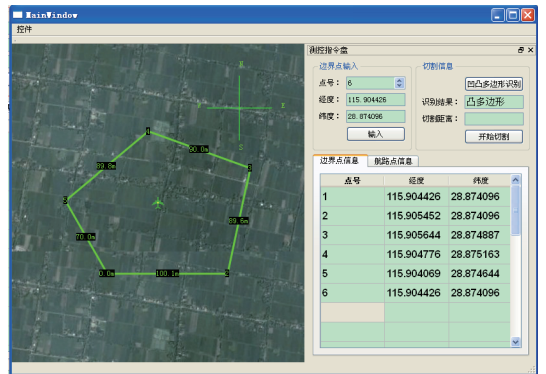


图 11 凸多边形识别效果图

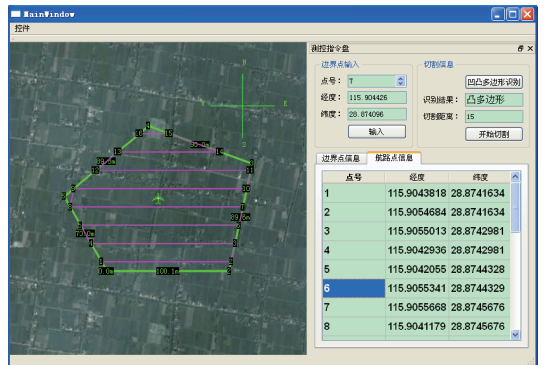


图 12 航路生成效果图

6 结论

本文针对农田的不规则形状,实现了凹凸多边形的自动识别、凸多边形的最优航路设计以及实现航路点经纬度坐标的解算的算法设计,并叙述了航路自动规划软件模块的设计流程。该航路规划算法和软件能够对各种不规则农田进行自动航路规划并形成航路数据,便于农用植保无人直升机进行自动农药喷洒的飞行任务,并提高其工作效率。

参考文献

- [1] 朱尧植. 小型农用无人直升机飞行控制技术[D]. 南京:南京航空航天大学,2013.
- [2] 李纪周. 我国农用无人直升机发展探讨[J]. 农机科技推广,2013(10):37-38.
- [3] 傅锡敏,薛新宇. 基于我国施药技术与装备现状的发展思路[J]. 中国农机化,2008(6):72-76.
- [4] 贾莉. 水稻施肥用上无人直升机[J]. 致富天地,2011(7):68.
- [5] BLANCHETTE J, SUMMERFIELD M, 闫锋欣, 等. C++ GUI Qt 4 编程[M]. 电子工业出版社,2013.
- [6] 狄辉辉,李京华,刘景桑,等. 基于 Qt/E 的嵌入式实时曲线显示界面设计与实现[J]. 电子测量技术,2011,34(12):76-79.
- [7] 赵泽超,康恒. 凹凸多边形快速识别和智能剖分技术研究[J]. 结构工程师,2012,28(6):34-38.
- [8] 万书亭,韩庆瑶. 平面多边形凹凸性的顶角判别法[J]. 水利电力机械,2000(4):6-8.
- [9] 汤荣伟,沈祖炎,赵宪忠,等. 有向凸多边形智能识别技术研究[J]. 结构工程师,2004,20(6):11-13.
- [10] 田光,谢忠,吴亮. 基于简单要素模型的多边形分割算法[J]. 地理与地理信息科学,2010,26(1):24-28.

作者简介

万顺飞,1991年出生,硕士研究生,研究方向无人直升机飞控技术。

(上接第12页)

参考文献

- [1] 赵巨波,宋杰,丁昊. 基于FPGA和DDS芯片的信号源设计[J]. 电子测量技术,2010,33(7):76-79.
- [2] 窦垭锡,陈星,高群福. 高速DAC与FPGA接口信号完整性的仿真分析[J]. 电子测量技术,2012,35(8):120-124.
- [3] 秦俊,李伟哲. 基于改进目标阻抗的电源分配网络设计方法[J]. 电子科技,2013,26(5):74-80.
- [4] 冉鹏,何为,徐征,等. 基于数字处理的频差电阻抗成像系统设[J]. 仪器仪表学报,2013,34(2):448-454.
- [5] 刘丽娟,杨兵初,倪兰,等. PDN电源地平面去耦电容网络设计[J]. 中南大学学报:自然科学版,2013,44(10):4088-4093.
- [6] 丁同浩,李玉山. 传输线耦合下的差分对共模特性分析[J]. 仪器仪表学报,2011,32(7):1485-1491.
- [7] 郭锐. 数模混合电路的PCB抗干扰设计[J]. 机电信息,2015(18):146-147.
- [8] 倪芸,姚晓东. 高速并行总线信号完整性分析设计[J]. 电子测量技术,2013,36(4):106-110.
- [9] 陈可,朱常其,何燕. 基于MAX2769的射频前端的设计和实现[J]. 国外电子测量技术,2014,33(1):59-60.
- [10] 何鹏,刘一清. 基于Spartan-6FPGA的DDR3布线分析和测试[J]. 电子测量技术,2014,37(6):89-92.
- [11] ZHOU R J, HAO Y Y, HU J S. Quick System-Level DDR3 Signal Integrity Simulation Research[J]. Journal of Electronic Science and Technology, 2013, 11(3):286-290.

作者简介

卢炜,1991年出生,华中师范大学物理科学与技术学院硕士研究生,电路与系统专业,主要研究方向为嵌入式系统及应用。

(上接第26页)

- [11] 田芳宁. 逻辑分析仪自动测试系统设计与实现[J]. 电子测量技术,2014,37(3):86-88.
- [12] 郭荣斌,赵秀才. 自动测试系统的发展趋势[J]. 国外电子测量技术,2014,33(6):1-4.
- [13] 宋斌,方葛丰,刘毅. 自动测试系统软件平台TestCenter体系结构设计与分析[J]. 测控技术,2013,32(8):115-118.
- [14] 丰淑迎,张华锋,李涛. 基于MET/CAL的TDS2000系列示波器自动校准系统设计[J]. 计测技术,2015,35:209-212.

作者简介

向前,1970年出生,高级工程师,主要研究方向为基础类电子测量技术及仪器。

E-mail: eiqd@ei41.com

刘洪庆,1983年出生,工程师,主要研究方向为基础类电子测量技术及仪器。

包思云,1965年出生,研究员,主要研究方向为基础类、通信类电子测量技术及仪器。