

DOI: 10.3969/j.issn.1009-9492.2017.08.051

无人机电力巡检中定位绝缘子的方法

唐泽亮, 吴永明

(广东工业大学机电工程学院, 广东广州 510006)

摘要: 设计了一种将差分 GPS 和内部导航系统 (INS) 融合的无人机导航技术, 应用仿真分析技术对无人机的飞行定位过程和定位误差进行计算分析, 设计基于差分 GPS/INS 和图像识别的无人机飞行定位算法和控制程序, 解决无人机定位误差和定位失效的问题。应用上述无人机导航定位技术, 使无人机飞至距电线杆塔侧边一定距离的位置, 通过无人机上的云台进行扫描和定位杆塔, 拍摄杆塔全景照片, 应用图像识别技术确定绝缘子位置, 计算云台的转动角度, 对准绝缘子拍照, 获取清晰的绝缘子图像信息, 用于识别绝缘子的故障。

关键词: 无人机; 电力巡检; 定位; 差分 GPS/INS; 图像识别

中图分类号: TM73

文献标识码: A

文章编号: 1009-9492(2017)08-0172-05

A Method for Positioning Insulators in Power Inspection of UAV

TANG Ze-liang, WU Yong-ming

(School of Electromechanical Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract: An UAV navigation technology which integrated the differential Global Positioning System (DGPS) and Inertial Navigation System(INS) is designed in the paper, the UAV flight positioning process and deviation are calculated and analyzed in simulation technology, the UAV flight positioning algorithm and control program are researched based on the DGPS/INS and image identification to solve problems of UAV positioning deviation and lose efficacy. By application of the UAV navigation and positioning technology above, the UAV is able to fly to a certain location away from a wire pole at a distance, then scans and locates the wire pole by the UAV cradle, and takes a panoramic photo of the wire pole, by the image identification of the photo, the position of the insulators in the wire pole is able to be calculated accurately, through calculating the rotation angle of the cradle, the insulators are aimed to take clear pictures, the fault of the insulators could be identified by the image identification of the pictures.

Key words: unmanned aerial vehicle (UAV); power inspection; positioning; differential Global Positioning System (DGPS)/ Inertial Navigation System(INS); image identification

0 引言

电力在当今社会是一个非常重要的资源, 电力传输的稳定性至关重要。过去的人工电力巡检, 是一件费时费力、危险性高的工作, 目前一些电力公司使用装备有可见光相机、红外和紫外相机的直升机进行电力巡检, 这种方法的缺点是成本高, 而且飞行员的人身安全存在威胁^[1]。无人机应用在电力巡检中, 可以进行远距离的控制, 通过搭载在无人机上的摄像头, 实时获取目标点的图片和视频信息, 可为电力巡检工作提供一种省时省力、安全的解决方案。自动飞行的无人机已经开始运用到地形复杂的电力巡检工作之中, 使用 GPS 和惯性系统组合进行导航, 同时利用地理位置信息进行辅助导航^[2]。

日本关西电力公司和千叶大学一起开发出一套可以进行巡线的无人直升机系统, 将杆塔的坐标点输入到一个虚

拟地图中, 利用 GPS 进行导航, 它的故障自动检测分系统可以自动检查出导线断股、焊接裂缝、雷击引起局部热点等主要缺陷, 其数据库还在不断的更新过程中。研究人员还通过对电力线路走廊视频三维图像的构建以识别电力线下面的建筑物及草木, 在系统中储存三维图像和对应的 GPS 坐标, 用以测量电力线与其下面建筑物及草木的距离^[3]。西班牙马德里理工大学的 Campoy、Mejias 等研究将机器视觉技术运用于无人机导航, 同时用 GPS 进行辅助定位, 在实验过程中, 当飞机处于杆塔电线附近平行位置时, 成功地对导线和绝缘子进行识别和追踪^[4]。GPS 可以用于大多数的自主导航, 但是对于电力巡线的无人机定位却是一个不可靠的方式, 因为它的定位精度较低, Jason N. Gross, Yu Gu 等人采用 GPS/INS 联合进行无人机定位, 定位精度可以达到 10 cm 以内^[5]。对于精细巡检来说,

收稿日期: 2017-02-13

希望获得的照片清晰度越高越好,由于直升机的飞行和振动,获得的照片通常是模糊的^[6],而且直升机价格昂贵,成本高,不能进行大范围的推广。实现电力的自动巡检,无人机需要有较好的灵活性,飞行过程的定位精度要求较高,同时要避免与电线杆塔的碰撞和电磁干扰^[7]。精确的定位可以保证无人机悬停在杆塔单侧绝缘子分布中心正对位置,获取较好的拍摄角度,提高无人机对绝缘子的识别能力。本文采用四旋翼的无人机飞行器,它具有很好的机动性和稳定性,尺寸小、成本低,维修和制造简单^[8],通过差分GPS/INS进行无人机定位,结合图像识别的技术,自动定位绝缘子,克服定位误差带来的影响;利用长焦相机进行远距离拍摄,获取杆塔待巡检目标的图像信息。

1 无人机定位方法与实现流程

在电力输送中,绝缘子是杆塔的重要设备,必须对其进行定期巡检,巡检要求采集杆塔上绝缘子的照片,以供地面人员进行分析,判断电力传输是否存在安全隐患^[9]。如图1所示,使用无人机进行电力杆塔自动巡检,首先必须将无人机导航至杆塔附近目标位置C,C点为杆塔单侧绝缘子分布中心侧边正对方向20 m左右的GPS坐标,O点为已知的杆塔坐标,它位于六个绝缘子分布的中心位置,A、B为中间两个绝缘子的末端,同时OC垂直于AB,OC的长度为20 m,利用O点坐标可以计算C点坐标,无人机可以根据这个C点进行初步定位,接着转动云台搜寻杆塔,使机头和高清变焦摄像头正对杆塔方向,拍摄杆塔整

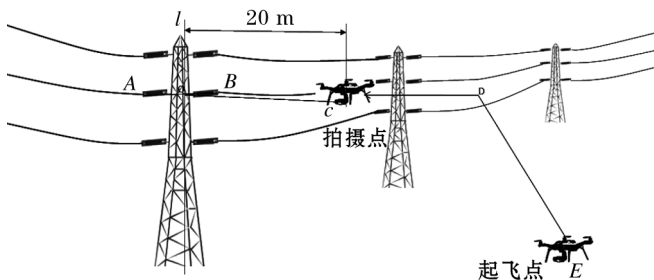


图1 无人机定位方法

Fig.1 UAV positioning method

体照片,利用飞机上搭载的处理器,对图像进行处理,提取相片里的绝缘子部分,并取绝缘子中心点处的坐标和照片的中心坐标,根据已知的实际杆塔绝缘子间的距离、相机CCD的尺寸和拍照时的焦距,就可以计算出飞机与杆塔的正向距离,同时也就计算出杆塔各绝缘子相对焦点中心线的夹角,进而控制云台转动角度进行对焦拍照,流程图如图2所示。

1.1 差分GPS/INS的初步定位方法

载波相位测量是通过测定GPS导航信号中的载波信号从卫星发射至接收机传播路程上的相位变化,来确定卫星至接收机的伪距^[10]。如图3所示,基站把伪距发送给无人机,无人机根据伪距对自身接收到的GPS数据进行修正,

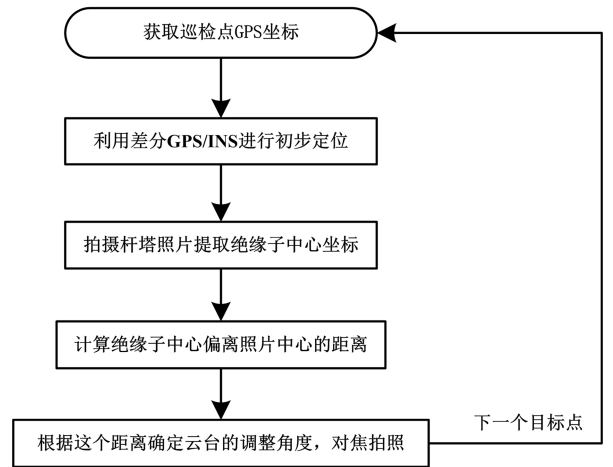


图2 系统流程图

Fig.2 System flow chart

便可以得到差分GPS坐标,INS主要组成部分是加速度计和陀螺仪,对陀螺仪进行积分可以得到无人机的姿态信息,对加速度计在导航坐标系下三个方向上的积分,也可以得到一个GPS坐标值,两者通过卡尔曼滤波融合处理,便得到更加精确的GPS坐标值,当GPS、INS其一失灵时,组合系统仍可继续给出定位结果,能保证定位的连续性,可靠性较高^[11]。

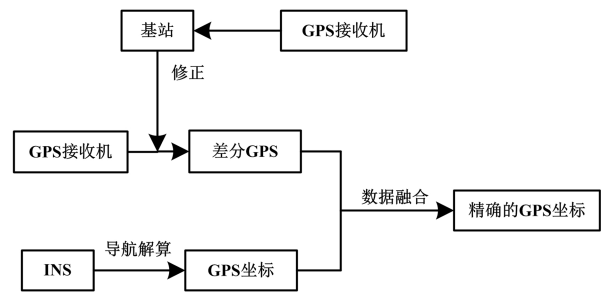


图3 差分GPS/INS组合定位原理

Fig.3 DGPS/INS combination positioning principle

每个高压电线杆塔都有一个GPS坐标,这个坐标可以由当地电力局提供,但是需要获取杆塔绝缘子分布中心侧边20 m处的GPS坐标,如图4所示,这就需要根据杆塔坐标和杆塔的方位进行计算。假设杆塔单侧绝缘子分布中心处O的GPS坐标为 $(origin_{longti}, origin_{lati}, h)$,根据下面的公式(1)至(4)可计算水平偏移坐标。

$$lati = \frac{x}{C_{EARTH}} + origin_{lati} \quad (1)$$

$$longti = \frac{y}{C_{EARTH} \cdot \cos\left(\frac{lati}{2} + \frac{origin_{lati}}{2}\right)} + origin_{longti} \quad (2)$$

$$\sin \theta = \frac{y}{20} \quad (3)$$

$$\cos \theta = \frac{x}{20} \quad (4)$$

这里的坐标采用的是弧度 C_{EARTH} 等于6 378 137, $lati$

和 $longti$ 为偏移后的坐标, x 为经度方向偏移的距离, y 为纬度方向偏移的距离, θ 为导线走向与纬度方向的夹角, 是已知数。将这些计算好的 GPS 坐标输入无人机控制系统, 无人机就会依次飞往这些目标点, 执行相应的任务。

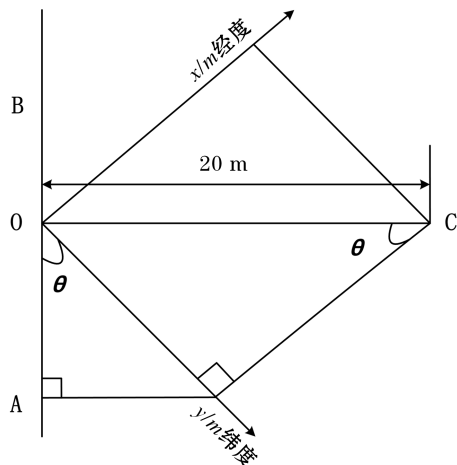


图4 偏移点坐标示意图

Fig.4 Offset point coordinate diagram

1.2 无人机初步定位实现过程

无人机目标点定位是一个航线规划的问题, 无人机从地面起飞, 经过一系列的点, 到达目标点。为了验证无人机使用差分 GPS/INS 的初步定位精度, 本次在 Matlab 上进行仿真, 首先是获取飞行的航点, 仿真时间 40 s, 每隔 0.01 s 进行采样, 共有 4 000 组 GPS 坐标数据和速度数据, 接着根据这些数据产生陀螺仪 (rad/s) 和加速度计 (m/s^2) 的数据, 并给陀螺仪和加速度计施加误差, 在这里施加的常值误差, 误差值都为 0.001^[12], 并给 GPS 坐标施加一个绝对值不大于 5 cm 的随机误差值, 陀螺仪和加速度计的误差会经过卡尔曼滤波的处理^[13], 解算出来的 GPS 坐标与差分 GPS 坐标进行融合^[14], 使飞行过程更平稳和准确, 仿真结果如图 5 和图 6 所示。

由图 5 可以看到, 无人机从起飞依次经过 E、D、C 点, 不管是经纬度还是高度, 在刚开始时都会出现一些误差,

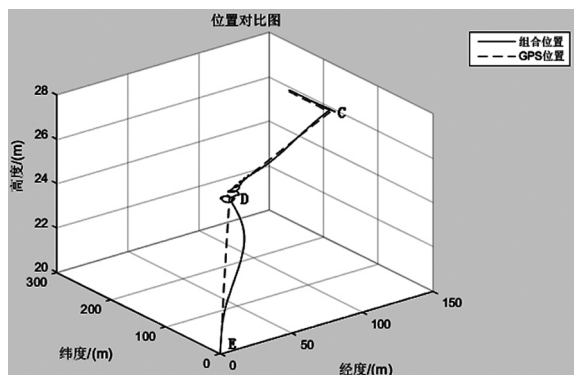


图5 目标位置 and 实际位置的对比

Fig.5 Comparison of target position and actual position

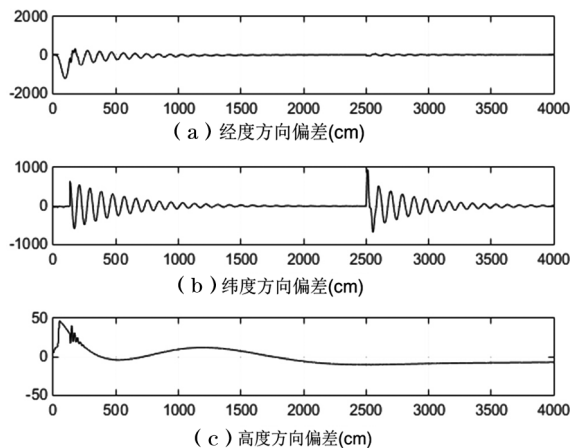


图6 无人机导航误差

Fig.6 UAV navigation error

随着飞行的进行, 误差逐渐减小, 并可以达到厘米级精度, 在飞行方向出现较大突变时, 误差也随之增大, 但是可以在 10 s 内调整过来, 使飞行定位精度达到厘米级, 满足了无人机初步定位的要求。

1.3 绝缘子的精确定位方法

当无人机已经定位到杆塔位置指定位置, 正对杆塔拍照, 在整副的图片中, 绝缘子的位置是很有规律的, 基本上是成对称分布, 而且颜色与其他干扰的色差较大, 所以提取绝缘子中心位置的坐标相对容易, 假设已经确定四个绝缘子的中心位置 A、B、C、D, 如图 7 所示, 在相机 CCD 上对应的位置为 A_1 、 B_1 、 C_1 、 D_1 , 已知拍照的焦距为 f , AD 间长度为 L , 在 CCD 上对应的长度为 l , 则可求出无人机和杆塔的正向距离 s 。

$$s = fL/l \quad (5)$$

A_1 、 B_1 、 C_1 、 D_1 在 CCD 上的位置已经通过图像处理求得, 以 A_1 为例, 假设 A_1 距离 CCD 中心 O_1 在 x 方向长度为 l_1 , 在 y 方向长度为 l_2 , 结合焦距, 就可以求得 A_1O_1 与 O_1O_2 之间在 x 和 y 方向上的夹角 θ_x 和 θ_y 。

$$\theta_x = \arctan(l_1/f) \quad (6)$$

$$\theta_y = \arctan(l_2/f) \quad (7)$$

无人机云台就可以根据这个角度进行调整拍照。

1.4 杆塔绝缘子精确定位实现过程

假设在 C 点处拍摄获得一张照片, 同时 θ 为零, 经过灰度变化、二值化、膨胀和去噪^[15]可获取如图 8 所示的图像, 图 8 (a) 中的黑色部分就是绝缘子, 下面要确定这张图像的中心坐标和各个绝缘子的中心坐标。由于绝缘子分布的规则性, 利用算法可以获得这六个绝缘子的外接最小矩形, 如图 8 (b) 所示, 同时可以知道六个矩形的长、宽和顶点坐标, 顶点坐标是指矩形左上角的坐标, 根据这些坐标就可以求得绝缘子的中心坐标, 如表 1 所示。

由已知相片像素为 729×486, 可知相片的中心坐标为

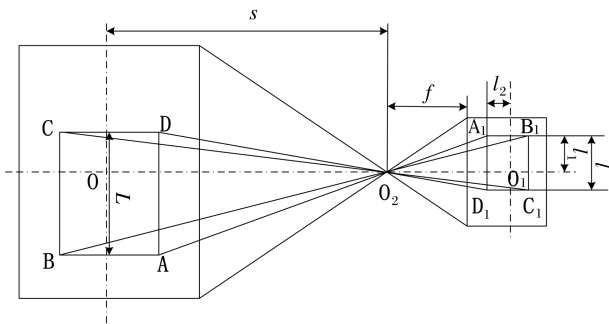
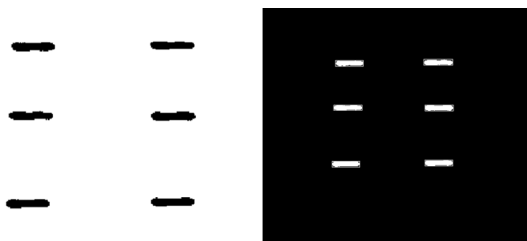


图7 精确定位原理
Fig.7 Precise positioning principle



(a) 处理后的图像 (b) 最小外接矩形
图8 绝缘子的图像识别
Fig.8 Image Recognition of Insulators

(364.50, 243.00)，假设像素点尺寸为 $2\mu\text{m}$ ，拍照时的焦距为 35mm ，则根据表1的数据可以计算出云台需要移动多少角度才能对准绝缘子，以1号绝缘子为例。

表1 绝缘子坐标分布
Tab.1 Insulator coordinate distribution

序号	x	y	长	宽	中心x	中心y
1	317.50	360.50	66	14	284.50	353.50
2	321.50	226.50	67	14	288.00	219.50
3	325.50	122.50	66	14	292.50	118.50
4	536.50	121.50	67	12	503.00	115.50
5	537.50	227.50	68	14	503.50	220.50
6	537.50	357.50	66	14	504.50	350.50

$$\Delta X = (284.50 - 364.50) \times 0.002 = -0.16\text{mm} ;$$
$$\Delta Y = (353.50 - 243.00) \times 0.002 = 0.221\text{mm} ;$$
$$\theta_x = \arctan(l_1/f) = -0.262^\circ ;$$
$$\theta_y = \arctan(l_2/f) = 0.362^\circ .$$

2 定位误差分析

本设计方案的定位误差主要来源于初步定位完成悬停拍照过程中无人机的振动与偏移，尤其是存在风的情况下，飞机小幅度的晃动就会造成镜头对准位置明显的偏

移，下面将对无人机悬停拍照过程中无人机的稳定性进行仿真分析。设定一个GPS坐标点，根据这些坐标点生成陀螺仪(rad/s)和加速度计 (m/s^2) 速度，并分别加上那个0.001的常值误差，考虑到GPS数据本身存在误差，因此需要给这个GPS坐标加上一个随机误差，无人机在X、Y、Z方向上的速度设为零，同时在这三个方向上加上一个0.001 m/s的常值误差，仿真结果如图9所示。

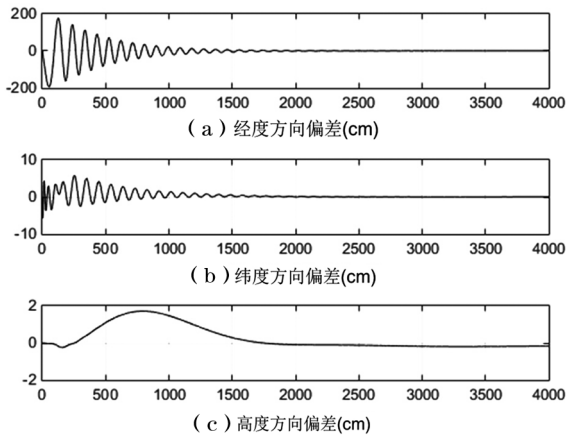


图9 无人机悬停误差
Fig.9 UAV hover error

从上面仿真数据可看出，初期无人机的振动幅度比较大，经过15 s左右的调整之后，无人机处在非常平稳的位置，各个方向上的误差可控制在3 cm以内，而大多数绝缘子的尺寸长度超过50 cm，直径超过8 cm，所以由于无人机振动产生的误差对与相机抓拍绝缘子的准确度影响很小。

3 结论

本文设计了一种专门针对电线杆塔进行自动巡检的方法，本方法先使用差分GPS/INS技术实现无人机在杆塔附近的初步定位，利用绝缘子在杆塔上分布规律和颜色特征，实现对绝缘子的精确定位，自动获取绝缘子的图像，通过上面的数据和分析，差分GPS/INS的初步定位精度可以保证无人机与杆塔的相对位置，为下一步的精确定位提供良好的前提条件，在对绝缘子的精确定位中，利用图像识别的方法可以取得很高的定位要求，因此这种方法在自动电力巡塔中有很强的实用性。在杆塔上除了绝缘子，还有防震锤等设备需要巡检，在同一根线中，这些设备都是分布在绝缘子附近，所以只要确定绝缘子的位置，就可以找到其他设备的位置，也就可以通过调整云台来进行拍照。

参考文献:

[1] Pagnano, Hopf. A roadmap for automated power line inspection.Maintenance and repair [C] . CIRP Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering. Holland: Elsevier , 2013.

[2] WU Jiang, FEI Wenkai, LI Qianru. An integrated mea-

- sure and location method based on airborne 2D laser scanning sensor for UAV's power line inspection [C]. Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation. Hong Kong: IEEE, 2013.
- [3] Jilien Beaudry, Kristopher Toussaint, Nicolas Pouliot. On the Application of VTOL UAVs to the Inspection of Power Utility Assets [C]. International Conference on Applied Robotics for the Power Industry, Montreal: IEEE, 2010.
- [4] Luis Mejias, Pascual Campoy. A vision-Guided UAV for Surveillance and Visual Inspection. Roma [C]. IEEE International Conference on Robotics and Automation, Rome: IEEE, 2007.
- [5] Jason N. Gross, Yu Gu. Robust UAV Relative Navigation With DGPS, INS, and Peer-to-Peer Radio Ranging [J]. IEEE Transactions On Automation Science and Engineering, 2015, 12 (3): 935-944.
- [6] Katra nik, Jaka, Pernu, Franjo. A Survey of Mobile Robots for Distribution Power Line Inspection [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2009, 29 (3): 1-9.
- [7] 焦海松, 陈军, 刘继东. 电磁干扰对GPS双频接收机定位精度的影响 [J]. 测绘科学技术学报, 2013, 30 (6): 559-568.
- [8] Oualid Araar and Nabil Aouf. Visual Servoing of a Quadrotor UAV for Autonomous Power Lines Inspection [C]. Mediterranean Conference on Control and Automation. Palermo: IEEE, 2014.
- [9] Thabo Moyo, Francois du. The Use of the Travelling Salesman Problem To Optimize Power Line Inspections [C]. Robotics and Mechatronics Conference. Durban: IEEE, 2013.
- [10] 杨一洲. GPS载波相位定位算法研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2011.
- [11] 陈允芳, 石波, 郭海花. 移动测图中 DGPS/INS 组合定位测姿 [J]. 中国惯性技术学报, 2010, 18 (3): 321-328.
- [12] 柳明. GPS失效下的无人机组合导航系统 [J]. 济南大学学报: 自然科学版, 2015, 29 (2): 129-132.
- [13] 何秀凤, 刘建业, 袁信. GPS/INS组合导航系统降阶滤波器设计 [J]. 中国惯性技术学报, 1997, 5 (2): 2-10.
- [14] 马宏阳, 程鹏飞, 黄华东. GPS/INS位置、速度和姿态全组合导航系统研究 [J]. 测绘通报, 2016 (3): 10-14.
- [15] 蒋志佳. 图像处理技术在架空线路绝缘子裂缝识别中的应用研究 [D]. 镇江: 江苏大学, 2009.

第一作者简介: 唐泽亮, 男, 1991年生, 江西赣州人, 硕士研究生。研究领域: 嵌入式控制, 无人机应用。

(编辑: 向 飞)

(上接第139页)

5 结语

本设计基于现如今商品的包装普遍是通过人工进行而浪费人力物力的问题, 提出了自动包装的构想。该设计具有很多的创新点: (1) 自动化程度高, 单人即可高效率地对商品进行包装; (2) 利用无毒无害的包装材料, 能够优化包装过程, 节约包装材料, 运行过程不产生有害物质, 达到安全环保的效益; (3) 包装材料的稳定性及安全性能能够使被包装的物品得到充分的保护; (4) 聚氨酯材料具有较好的理化特性, 可通过物理及化学方法进行回收利用; (5) 所包装商品尺寸范围广并可据标准化尺寸生成泡沫, 有利于物流的标准化运输。该设计可以广泛应用于各种物流行业、加工包装行业等。

参考文献:

- [1] 李绍雄, 刘益军. 聚氨酯胶粘剂 [M]. 北京: 化学工业出版社, 1998.
- [2] 周静. 浅谈聚氨酯的结构与性能 [J]. 黑龙江科技信息, 2013 (32): 58-58.

- [3] 成大先. 机械设计手册: 第五版 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2008.
- [4] 魏微. 催化剂和匀泡剂对聚氨酯软质泡沫泡孔结构的影响 [J]. 高分子材料科学与工程, 2016 (04): 86-89.
- [5] 陈平平, 谭永明. 单芯片方案的USB加密狗设计 [J]. 东莞理工学院学报, 2015, 22 (3): 18-22.
- [6] 庞志, 古鹏. 解决单片机控制系统干扰的一些办法 [J]. 广州大学学报: 综合版, 1998 (02): 23-26.

第一作者简介: 尤明光, 男, 1995年生, 广东茂名人, 大学本科。研究领域: 机械设计制造及其自动化。

通信作者简介: 何伟锋, 男, 1984年生, 工程师。研究领域: 机械设计。已发表论文3篇。

(编辑: 向 飞)