

基于 DGPS 航迹偏差的多旋翼无人机 磁干扰检测技术研究

何磊¹, 罗兵², 吴文启¹

(1. 国防科技大学 机电工程与自动化学院, 长沙 410073; 2. 北京韦加无人机科技股份有限公司, 长沙 410073)

摘要: 为了解决多旋翼无人机在飞行作业过程中受到环境磁干扰导致作业异常的问题, 在使用 DGPS 进行差分定位的基础上, 提出了一种基于航迹偏差的多旋翼无人机磁干扰检测技术; 其基本原理是, 当多旋翼无人机受到磁场干扰时, 其飞行航迹会偏离预设航线, 检测其航迹的偏离距离, 通过与阈值比较, 可以用来判断是否存在环境磁干扰; 实验结果表明该方法可以有效检测环境磁场异常, 在某些情况下比传统的磁航向角误差阈值检测方法可靠性更高, 虚警率更小; 综合使用航迹偏差检测方法和磁航向角误差检测方法, 可有效(提高)环境磁场异常检测的准确度, 降低虚警率。

关键词: 磁干扰; 多旋翼无人机; 飞行轨迹

Research on Magnetic Interference Detection of Multi-rotor UAV Based on DGPS Flight Path Deviation

He Lei¹, Luo Bing², Wu Wenqi¹

(1. College of Mechatronics Engineering and Automation, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China; 2. Beijing Viga UAV technology corp., LTD., Changsha 410073, China)

Abstract: In order to solve the problem that the multi-rotor unmanned aerial vehicle (UAV) is caused by environmental magnetic interference in the course of flight operation, a magnetic interference detection technology of multi-rotor unmanned aerial vehicle based on flight path deviation and differential positioning using DGPS is proposed. The basic principle is that when the multi-rotor UAV by the magnetic field interference, the flight path will deviate from the preset path, to detect the deviation of its track distance, compared with the threshold can be used to determine whether there is environmental interference. The experimental results show that this method can effectively detect the anomaly of environmental magnetic field, and in some cases, it is more reliable and less false than the traditional magnetic heading angle error detection method. The combination of flight path deviation detection method and magnetic heading angle error detection method can effectively improve the accuracy of environmental magnetic field anomaly detection and reduce false alarm rate.

Keywords: magnetic interference; UAV; flight path

0 引言

多旋翼无人机主要使用磁传感器配合微硅陀螺来测量航向。目前, 对机体自身造成的磁传感器误差的补偿方法已经比较成熟^[1-2]。然而, 多旋翼无人机一般在低空区域飞行, 受到环境的磁干扰, 比上述机体自身的磁干扰复杂, 例如矿区、大型铁磁建筑和高压线等。

此类干扰一般是低频且无规则的, 对于这类干扰, 暂时还没有有效的解决方法。而此类磁干扰会造成多旋翼飞机偏离正常航线飞行、无法定点悬停、位置控制失控等等现象, 使得多旋翼无人机无法正常作业。所以, 检测出环境中的磁干扰, 对于提高多旋翼无人机的作业可靠性有重要的意义。

文献[3]中提出了基于统计特性, 通过模糊一补偿滤波的

方法, 消除磁罗盘测量值中高频干扰与低频干扰的影响, 但是没有进行实验验证。文献[4]提出了在差分磁罗盘的基础上, 使用磁模量变化阈值判定和磁航向角差阈值判定加模糊 c-均值 FCM 分类算法的方法, 以提高动态低频干扰的识别率。

单一使用阈值判断法, 检测成功率并不稳定, 这是因为一方面环境磁干扰的因素复杂, 另一方面检测效果也与飞机自身的状态有关。本文所提出的方法中, 暂时不采用磁模量阈值判定法。因为, 使用大疆 450 飞机搭配 pixhawk 飞控进行的测试结果表明, 磁模量阈值判定法所用到的磁模量测量结果不稳定。具体表现为在电机启动后, 在环境中不存在磁干扰的情况下, 飞机原地旋转, 磁传感器测量的磁模量也会发生周期变化, 从而导致虚警, 所以使用磁模量阈值判定法的检测可靠性较低, 故本文暂不采用磁模量阈值判定法。

本文针对多旋翼无人机磁传感器受到外界磁干扰的情况, 在磁航向角误差阈值判断方法的基础上, 增加了对多旋翼无人机航迹偏差的检测, 综合两种方法, 以提高多旋翼无人机磁异常的检测几率并降低虚警率。多旋翼无人机航迹偏差^[5], 即多旋翼无人机飞行航迹和预期航线发生偏差。这个偏差值, 结合磁传感器的测量结果, 可以用来判断多旋翼飞机是否受到磁干扰。

收稿日期: 2017-07-17; 修回日期: 2017-08-09。

作者简介: 何磊(1981-), 男, 湖南长沙人, 硕士研究生, 主要从事导航技术与嵌入式系统方向的研究。

罗兵(1971-), 男, 重庆人, 副教授, 主要从事无人机导航与控制技术方向的研究。

吴文启(1967-), 男, 广西南宁人, 教授, 博士生导师, 主要从事高精度导航技术方向的研究。

1 单独使用磁航向差阈值判定法的局限性

姿态估计模块采用的是互补滤波器算法，陀螺所测量的姿态信息时刻在跟踪磁航向数据，因此在正常情况下，磁航向角和当前姿态估计所得到的航向角偏差值小于设定阈值。在磁航向出现突变等异常情况下，上述偏差值会大于阈值。磁异常检测方法就是基于阈值的检测原理，根据实际经验，阈值设定为 5σ ，当偏差值大于设定阈值时系统报警。

针对外界磁干扰剧烈增加和缓慢增加两种情况（即模拟飞机快速进入干扰区域和慢速进入干扰区域的飞行行为），使用磁航向角差阈值判断法，在开源飞控软件 pixhawk 和仿真工具 gazebo 中进行仿真，结果如图 1 和图 2 所示^[6]。

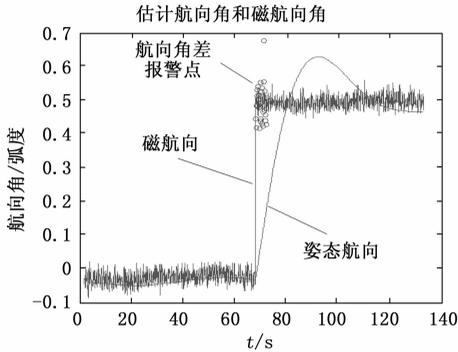


图 1 突变异常

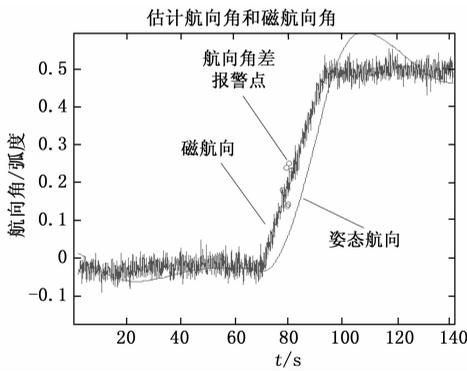


图 2 渐变异常

由图可见，当出现阶跃型磁干扰时，航向角差阈值判定法能够及时准确地报警；当出现渐变磁干扰时，飞机自身航向会跟随磁传感器的测量结果，航向角差阈值判定法报警会出现延迟及漏警的情况。

2 多旋翼无人机磁异常情况下的动力学模型分析

多旋翼无人机的动力学模型^[7-9]如式 (1)：

$$\begin{cases} \dot{\boldsymbol{p}}^e = \boldsymbol{v}^e \\ \dot{\boldsymbol{v}}^e = \boldsymbol{g}e_3 - \frac{f}{m}\boldsymbol{R}e_3 \end{cases} \quad (1)$$

其中：上标 e 表示地球坐标系，上标 b 表示机体坐标系， \boldsymbol{p} 表示位置微分， \boldsymbol{v} 表示速度向量， $\dot{\boldsymbol{v}}$ 为速度微分， \boldsymbol{R} 表示体坐标系到地理坐标系的旋转矩阵， $e_3 = [0 \ 0 \ 1]^T$ 为 Z 轴单位向量。设 $\Theta = [\varphi \ \theta \ \psi]^T$ 为姿态欧拉角，其中， φ 为横滚角， θ 为俯仰角， ψ 为偏航角，则旋转矩阵：

$$\boldsymbol{R} =$$

$$\begin{bmatrix} \cos\theta\cos\psi & -\cos\theta\sin\psi + \sin\theta\sin\psi\cos\varphi & \sin\theta\sin\psi\cos\varphi & \sin\theta\sin\psi + \cos\theta\sin\psi\cos\varphi \\ \cos\theta\sin\psi & \cos\theta\cos\psi + \sin\theta\sin\psi\sin\varphi & -\sin\theta\cos\psi + \cos\theta\sin\psi\sin\varphi & \\ -\sin\theta & \sin\theta\cos\psi & \cos\theta\cos\psi & \end{bmatrix}$$

假设多旋翼无人机以小倾角飞行，即 $\varphi \approx \theta \approx 0$ ，则 $\sin\varphi \approx \varphi$ ， $\sin\theta \approx \theta$ ， $\cos\varphi \approx \cos\theta \approx 1$ ，可得公式 (2)：

$$\boldsymbol{R}e_3 = \begin{bmatrix} \theta\cos\psi + \varphi\sin\psi \\ \theta\sin\psi - \varphi\cos\psi \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

假设无人机水平高度不变，即高度通道有 $g = f/m$ ，由公式 (1) 和公式 (2) 可以推出其水平通道的简化模型，如公式 (3)^[10-11]：

$$\begin{cases} \dot{\boldsymbol{p}}_h = \boldsymbol{v}_h \\ \dot{\boldsymbol{v}}_h = -g\boldsymbol{A}_\psi\Theta_h \end{cases} \quad (3)$$

其中：下标 h 表示水平面分量， $\boldsymbol{A}_\psi = \boldsymbol{R}_\psi \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix} =$

$\begin{bmatrix} \sin\psi & \cos\psi \\ -\cos\psi & \sin\psi \end{bmatrix}$ ， $\Theta_h = [\varphi \ \theta]^T$ ，由于多旋翼无人机的控制输出是机体加速度，产生该加速度的力是机体倾斜后，螺旋桨产生的拉力与重力的合力。所以，多旋翼无人机主要通过控制其机体姿态来产生水平通道加速度。由上述公式 (2) 可知^[12-13]，当多旋翼无人机要产生加速度 $\dot{\boldsymbol{v}}_h$ 时，需要首先通过控制分配得到期望姿态 Θ_{h_d} 。

$$\Theta_{h_d} = \begin{bmatrix} \varphi_d \\ \theta_d \end{bmatrix} = \frac{\dot{\boldsymbol{v}}_{h_d}}{-g} \begin{bmatrix} \sin\psi & -\cos\psi \\ \cos\psi & \sin\psi \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中： ψ 为当前航向角。当磁传感器受到环境中动态低频磁干扰的影响时，由于姿态估计模块采用了互补滤波算法，因此其计算所得的航向角将逐渐产生一个 $\Delta\psi$ 的偏差，即姿态估计模块输出的航向角变为 $\psi + \Delta\psi$ 。由上述公式 (3) 和 (4) 可得，实际输出加速度 $\dot{\boldsymbol{v}}'_{h_d}$ 将变成以下值：

$$\dot{\boldsymbol{v}}'_{h_d} = \dot{\boldsymbol{v}}_{h_d} \begin{bmatrix} \cos\Delta\psi & \sin\Delta\psi \\ -\sin\Delta\psi & \cos\Delta\psi \end{bmatrix} \quad (5)$$

即水平通道内，实际产生的加速度与期望加速度有一个 $\Delta\psi$ 的夹角。

3 基于航迹偏差的磁异常检测

本文提出了一种基于航迹偏差的多旋翼无人机磁异常检测方法。造成多旋翼无人机航迹偏差的原因有很多种，例如 GPS 定位误差、大风天气等。而本文研究的多旋翼无人机正常作业需要精确按照预设航线飞行，所以采用了一些技术手段来确保航迹飞行精度，例如 GPS 模块采用了载波相位差分 DGPS (RTK)，限制了作业风速不能大于 4 级等。因此使用航迹偏差来检测环境磁干扰的方法具有可行性。依据上文的多旋翼无人机动力学模型推导可知，环境磁干扰会造成多旋翼无人机的实际输出加速度与期望加速度在方向产生偏差，如公式 (5) 所示，在此加速度的作用下，飞行航迹也将与预设航线发生偏差，如图 3 所示。

图 3 中，A、B 点为预设航线起点和终点，虚线为预设航线，实线为实际飞行航迹。 d 就是多旋翼无人机到预设航迹的最近距离，即航迹偏差值。计算方法如公式 (6) 所示：

$$d = \frac{|(X-A) \times (B-A)|}{|B-A|} \quad (6)$$

其中：X、A、B 均是当前大地坐标系中的坐标点。当前大

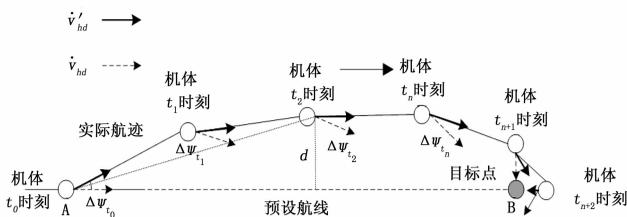


图 3 飞行轨迹推导

地坐标系以起飞点为坐标原点, 以北、东、地为 x 、 y 、 z 轴正向。 $X = [x_{N_X} \ y_{E_X} \ z_{D_X}]^T$ 为多旋翼无人机在大地坐标系中的位置, $A = [x_{N_A} \ y_{E_A} \ z_{D_A}]^T$ 为预设航线起点, $B = [x_{N_B} \ y_{E_B} \ z_{D_B}]^T$ 为预设航线终点。

航迹偏差的报警阈值, 需要根据无人机机体特征和实际应用环境来设置, 本文研究的多旋翼无人机, 当实际航迹偏离预设航线达到 1 米以上时, 作业任务即失效, 所以将航迹偏差的报警阈值设置为 1 米。

在上述条件下, 基于航迹偏差的磁异常检测就是指当多旋翼无人机在沿预定航迹飞行时, 排除 GPS 定位误差和大风天气等其他影响因素后, 如果偏离预设航迹超过设定阈值, 即认为当前作业环境中存在低频磁干扰, 磁传感器测量异常, 无人机切换至不使用磁传感器的飞行模式, 从而避免继续飞行而发生事故。

4 多旋翼无人机磁异常情况下航迹偏差仿真

首先, 对磁干扰环境下的多旋翼无人机飞行航迹偏差进行仿真验证。本文选用当前主流开源飞控 pixhawk 作为多旋翼无人机仿真控制源代码, 使用开源机器人仿真软件 gazebo 作为动力学仿真工具, 在 gazebo 环境中人为加入磁干扰后, 仿真多旋翼无人机的飞行情况。

在 gazebo 环境中, 分别进行两次仿真飞行, 一次不引入磁干扰; 一次引入的磁干扰是水平面内的一个先缓慢增强而后逐渐减弱的水平面内磁干扰。

在上述条件下, 进行任务飞行模式的飞行仿真。其结果如图 3~6 所示。

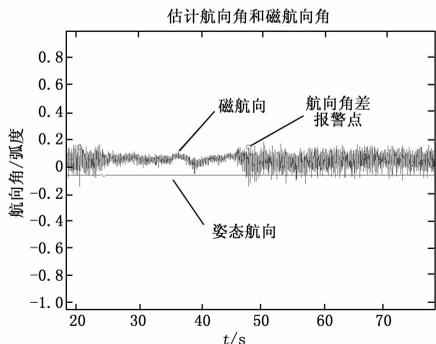


图 4 无干扰航向角差和航迹偏差报警时间图

图 3 和图 5 中, 直线为预设航迹, 另外一条即是实际飞行航迹, 其增粗部分为偏差大于报警阈值 (1 米) 的航迹。图 4 和图 6 中实心点为航向角误差报警点, 空心点为航迹偏差报警点。仿真无干扰情况下, 飞行器沿航迹飞行, 有偏差, 但不超过报警阈值, 无报警; 但磁传感器在飞行过程中, 出现 3 次虚

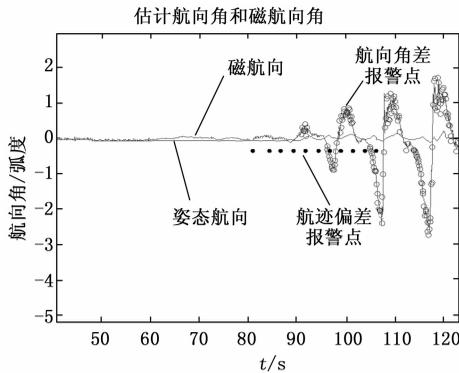


图 5 有干扰航向角差和航迹偏差报警时间图

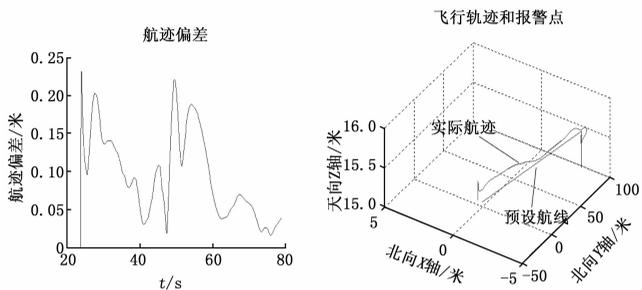


图 6 无干扰任务模式飞行航迹偏差图

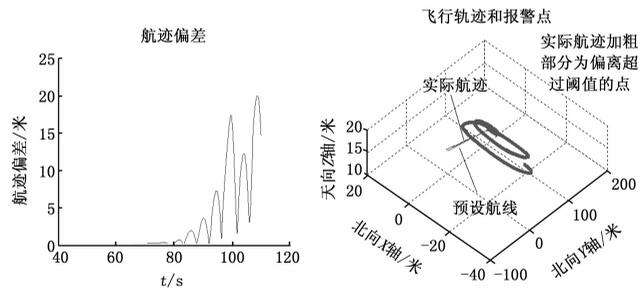


图 7 有干扰任务模式飞行航迹偏差图

警。仿真有干扰的情况下, 从图 3 中的航迹可以看到, 磁干扰缓慢增加时, 无人机的航迹仍然会产生发散的偏差, 但图 4 中的航向角误差阈值报警却延后于航迹误差报警, 即航向角误差阈值检测并不能及时准确的发现初期缓慢增加的磁干扰, 一直到航迹发散后对机体姿态造成明显干扰后, 才能发出报警信息。仿真结果符合上文的分析结论。

5 多旋翼无人机实际飞行测试

实际飞行实验使用大疆 450 机架, X 型布局, 任务模式 (自动按照预设航迹) 飞行。由于自然环境中显著磁干扰区域比较难找, 所以仍然使用人为增加磁干扰的方法。实验分为两组, 分别做磁干扰迅速增加和磁干扰缓慢增加的实验, 然后对比实验结果。实验地点的地球磁场总强度为 0.6 高斯左右。

第一组实验为磁干扰迅速增加的实验, 在磁传感器 Y 轴上增加一个每秒递增 0.06 高斯的干扰, 多次飞行的报警时间如表 1 所示。

第二组实验为磁干扰缓慢增加的实验, 在磁传感器 Y 轴上增加一个每秒递增 0.0125 高斯的干扰。多次飞行结果如表

2 所示。

表 1 快速增加磁干扰实际飞行报警时间表

| 报警类型 \ 飞行架次 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 磁异常出现时间/s | 60.79 | 56.29 | 59.51 | 57.26 | 59.13 |
| 阈值报警时间/s | 63.23 | 60.22 | 63.10 | 61.10 | 61.64 |
| 行为报警时间/s | 76.33 | 67.76 | 71.32 | 70.11 | 66.23 |

表 2 缓慢增加磁干扰实际飞行报警时间表

| 报警类型 \ 飞行架次 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|-------------|-------|-------|--------|--------|-------|
| 磁异常出现时间/s | 56.39 | 61.96 | 56.70 | 60.20 | 59.06 |
| 阈值报警时间/s | 91.21 | 99.27 | 101.25 | 110.34 | 93.21 |
| 行为报警时间/s | 60.99 | 66.27 | 67.80 | 66.71 | 65.10 |

两组实验各自架次 1 的报警时序图和飞行轨迹图如图 8 至图 11 所示。

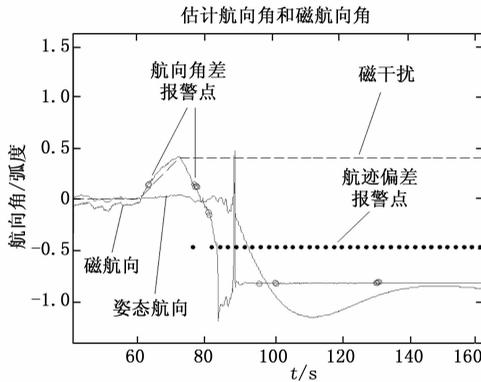


图 8 磁干扰快速增加时航向角差和航迹偏差报警时间图

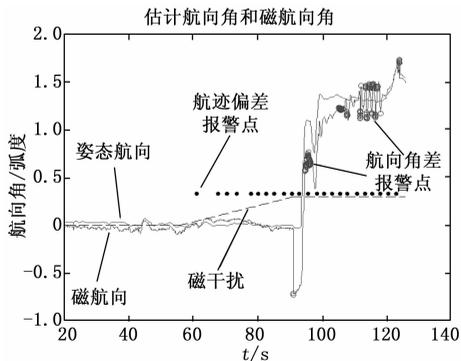


图 9 磁干扰缓慢增加时航向角差和航迹偏差报警时间图

从表 1 的数据可以看出，当外界磁干扰剧烈增加时，磁航向差阈值判断法可及时有效的检测出磁异常，航迹偏差判断法也可准确检测出磁异常，但报警时间要比磁航向差阈值判断法滞后。滞后时间与磁干扰的大小和变化速度有关，也与姿态估计中磁传感器对姿态的修正权重有关，在本次飞行实验的环境中，大概滞后 10 秒左右。从图 8 中可以看出，当磁干扰急剧增加时，磁航向角发生了剧烈变化，但姿态航向角并不会剧烈变化，所以磁航向差阈值判断法可以准确报警。

从表 2 的数据可以看出，当外界磁干扰缓慢增加时，航迹

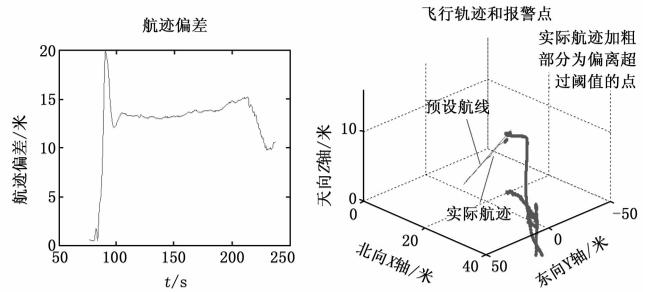


图 10 磁干扰快速增加时航迹偏差和飞行轨迹图

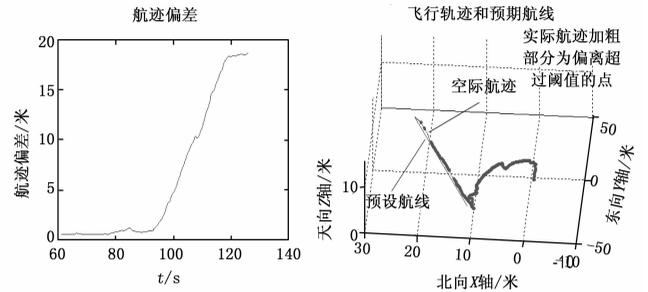


图 11 磁干扰缓慢增加时航迹偏差和飞行轨迹图

偏差判断法仍然可以检测出磁异常，报警延时在 7 秒左右。但磁航向差阈值判断法，基本不能检测出磁异常，其报警都出现在 30 秒之后，即报警出现在磁干扰导致姿态失控之后，此时磁干扰已经导致较为严重的飞行异常，报警意义不明显。图 10 中磁航向差阈值判断法的第一个报警点处，磁航向和姿态航向角出现了一个阶跃变化，也说明了此时无人机姿态已经失控。

两组实验数据可以说明，航迹偏差判断法在各种情况下都可以有效检测出磁异常。结合磁航向差阈值判断法，可以提高磁异常检测的可靠性和灵敏度。

6 结论

通过多次仿真飞行实验和多旋翼无人机实飞飞行实验，可得出以下结论：1) 使用 DGPS 差分定位，在无磁干扰的情况下，多旋翼无人机飞行航迹与预设航线偏差较小，在设定阈值 (1 米) 以内，能满足高精度作业要求；2) 当存在环境磁异常时，多旋翼无人机受其干扰，其飞行航迹会偏离预设航线，检测航迹的偏离距离，通过与阈值比较，可以用来判断是否存在环境磁干扰；3) 磁航向角误差检测方法同样可以用来检测环境磁异常，与航迹偏差检测方法各有优缺点，综合使用两种方法，可有效 (提高) 环境磁场异常检测的准确度，降低虚警率。

参考文献：

[1] Mark Pedley, Michael Stanley. Magnetic Calibration Algorithms. Freescale Semiconductor, Document Number: AN5019.
 [2] Vishwatheja S, Venkataratnam P, Siva Yellampalli. Algorithm development for soft and hard iron calibration of magnetic compass [J]. International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), 2016, 8.

所有数据集输入 DBN 网络进行前向传播, 将 DBN 输出的特征值输入异常检测器中进行判定, 结果如表 2 所示。对于训练样本 N0 进行故障检测是出现了 5% 的虚警率, 这与 SVDD 模型中允许误差范围参数 ν 设置为 0.05 一致, 说明 SVDD 模型拟合正确, 正常数据集 N1 出现了 5% 的虚警率也是同样原因造成。为避免 SVDD 故障检测模型出现过拟合, 其 ν 不宜设置过小, 由此带来的虚警现象从理论上来说不可避免, 但其值是预先可知的。在实际工程应用中可为报警数据再专门增加一个小 ν 值异常检测器环节, 进一步筛选数据以降低虚警率。

表 2 实验数据故障检测结果表

| 代号 | 故障情况 | 裂痕深度 / 英寸 | 识别故障百分率 % | 样本用途 | 备注 |
|----|------|-----------|-----------|------|-------|
| N0 | 正常 | 0 | 5 | 训练 | 训练用样本 |
| N1 | 正常 | 0 | 5 | 检验 | 实验数据 |
| F1 | 故障 | 0.07 | 100 | 检测 | 实验数据 |
| F2 | 故障 | 0.14 | 100 | 检测 | 实验数据 |
| F3 | 故障 | 0.21 | 100 | 检测 | 实验数据 |

故障数据集 F1、F2、F3 的故障识别率均为 100%, 效果十分理想。

4 结论

本文提出的基于深度学习的半监督故障检测方法, 利用 DBN 网络对高层特征自动提取的能力, 结合 SVDD 异常检测模型实现了故障的实时检测。在对标准轴承故障实验数据验证中, 该方法实现了 100% 的故障判别率, 效果十分理想。

本文提出的方法在工程应用中还具有以下优势: 1) 只需提供正常工况数据作为训练样本, 无需故障数据样本, 样本数据获取比较方便; 2) 无需应用领域专家选择故障特征和信号处理专家编制特征提取算法, 而由 DBN 网络自动提取, 技术门槛大幅度降低; 3) 该方法还具备普适性, 可广泛应用到各种信号的故障检测当中, 可推广至航空、航天、高铁等具备实验大数据条件的系统的故障检测应用。

深度学习可以从各类试验数据中直接挖掘有价值信息, 后续将针对大型复杂系统普遍采用的多传感器监测方式, 利用深度学习方法进行多源信息融合的故障诊断技术研究, 进一步拓展基于深度学习的故障诊断技术应用深度和范围。

(上接第 42 页)

- [3] 富立, 范耀祖. 智能航迹推算系统的研究 [J]. 航空学报, 2000; 299.
- [4] 郝振海, 杨新勇, 黄圣国. 基于差分磁罗盘的动态干扰识别技术 [J]. 西南交通大学学报, 2010; 445-450.
- [5] 齐骥, 王宇鹏, 钟志. 无人机多阶段航迹预测协同任务规划 [J]. 计算机测量与控制, 2016, 24 (6): 189-194.
- [6] 孙肖南, 孙陶, 辛春英, 等. 航磁姿态数据收录系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2017, 25 (5): 192-198.
- [7] 符长青, 曹兵. 多旋翼无人机技术基础 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2017.
- [8] Wu J, Zhou Z B, Chen J J, et al. Fast complementary filter for attitude estimation using low cost MARG sensors [J]. IEEE Sensors Journal, 2016, 16 (18): 6697-7007.

参考文献:

- [1] 傅建中. 智能制造装备的发展现状与趋势 [J]. 机电工程, 2014, 31 (8): 959-962.
- [2] 叶银忠, 潘日芳, 蒋慰孙. 动态系统故障检测及诊断方法 [J]. 信息与检测, 1986, 15 (6): 27-34.
- [3] 李睿, 郭迎清, 吴文斐. 航空发动机传感器故障诊断设计与验证综合仿真平台 [J]. 计算机测量与控制, 2010, 18 (3).
- [4] 吴明强, 史慧, 朱晓华, 等. 故障诊断专家系统研究的现状与展望. 计算机测量与控制, 2005 (13): 12.
- [5] 彭宇, 刘大同. 数据驱动故障预测和健康管理综述 [J]. 仪器仪表学报, 2014, 35 (3): 481-495.
- [6] 王国彪, 何正嘉, 陈雪峰, 等. 机械故障诊断基础研究何去何从 [J]. 机械工程学报, 2013, 49 (1): 63-72.
- [7] Bengio, Yoshua, Hinton G E. Deep learning [J]. Nature, 2015, 521 (14539): 436-444.
- [8] Bengio Y. Learning deep architectures for AI, Found. Trends Mach Learn, 2009, 2 (1): 1-127.
- [9] Liu Y, Zhou S, Chen Q. Discriminative deep belief networks for visual data classification [J]. Pattern Recognition, 2011, 44 (10): 2287-2296.
- [10] 葛强强. 基于深度置信网络的数据驱动故障诊断方法研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- [11] Hinton G E, Osindero S, Whye Y. A fast learning algorithm for deep belief nets [J]. Neural Computation, 2006 (18): 1527-1554.
- [12] Tax D, Duin R. Support vector data description [J]. Mach Learn, 2004, 54 (1): 45-66.
- [13] Banerjee A, Burlina P, Diehl C. A support vector method for anomaly detection in hyperspectral imagery [J]. IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing, 2006, 44 (8): 2282-2291.
- [14] 黄光鑫. 支持向量数据描述与支持向量机及其应用 [D]. 成都: 电子科技大学, 2011.
- [15] Lee S, Park J, Lee S. Low resolution face recognition based on support vector data description [J]. Pattern Recognition, 2006, 39 (9): 1809-1812.
- [16] The Case Western Reserve University Bearing Data Center [EB/OL]. URL: <http://csegroups.case.edu/bearingdatacenter/home>.
- [9] 张勇刚, 张云浩, 李 宁. 基于互补滤波器的 MEMS/GPS/地磁组合导航系统 [J]. 系统工程与电子技术, 2014, 36 (11): 2272-2279.
- [10] Goldenberg F. Geomagnetic navigation beyond magnetic compass [P]. IEEE PLAN, San Diego, California, 2006: 684-694.
- [11] Wang W, Ma H, Xia M, et al. Attitude and altitude controller-design for quad-rotor type MAVs [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2013.
- [12] Mellinger D, Shomin M, Michael N, et al. Cooperative grasping and transport using multiple quadrotors [M]. Distributed autonomous robotic systems. Springer Berlin Heidelberg, 2013: 545-558.
- [13] 彭孝东, 张铁民, 李继宇, 等. 基于传感器校正与融合的农用小型无人机姿态估计算法 [J]. 自动化学报, 2015, 41 (4): 854-860.