**飞控的来龙去脉及选型指南**

作者齐俊桐，一飞智控(天津)科技有限公司创始人、CEO，天津大学机器人与自主系统研究所 副所长、教授、博士生导师。本文略有删改。

无人机的核心是什么？稍微了解无人机的用户都知道，是飞行控制系统。不可否认，飞控技术的发展是这十年无人机变化的最大推手。

**先来说说飞控的三种起源——“固定翼飞控”、“开源飞控”、“自研飞控”。**干过无人机的人都知道，飞控不好搞！但面对市面上各种动不动就“高可靠”、“军工级”、“全自主”，圈外人根本不知道这伙人是怎么把飞控搞出来的？他们说的可靠么？了解了这三种起源，以后你跟搞飞控的聊，一定让他觉得你是“老司机”。

十多年前搞垂直起降无人机的主要技术来源是“固定翼飞控”，其实固定翼无人机才算是无人机真正的祖宗，100多年前就已经有人将战斗机加装简单的控制器尝试完成无人侦查和投弹的工作。那么为什么无论是载人飞机还是无人机都是先固定翼成熟、垂直起降的晚熟呢？从结构上看，固定翼飞行器没有垂直起降飞行器过多的旋转、振动部件，气动也比较简单；从控制方面看，固定翼飞行器属于静稳定系统，就像我们开车，手离开方向盘几秒钟汽车仍能正常直行，相比之下属于静不稳定的垂直起降飞行器则需要驾驶员无时无刻不在调整着操纵杆，稍有疏忽就会坠毁。这两方面且主要是控制上的困难，让垂直起降飞行器的控制非常困难。这个特性也让来源于固定翼飞控的团队在应对垂直起降飞行时显得束手无策，以往积累的固定翼飞行控制策略可借鉴意义不大，甚至直接使用原有的空速进行控制还经常导致致命的摔机。

再来说说“开源飞控”。这可能是市面上能见到最多数量的飞控了，其来源于“DIY DRONE”时期，最开始是为了满足欧美“极客”、“创客”对于自由飞行的梦想。本来挺好的事情，这里又要转折了！然而，“极客”这个词被中国又玩坏了！缺乏了分享和奉献精神的中国“极客”们，迅速将各类开源飞控直接商品化卖钱。更让人毛骨悚然的是，这样的“商品”不仅卖给了中国的玩家，更有甚者还没给了农业、电力、甚至警用这类行业用户！殊不知这种未商品化的天然“半成品”有着天然的基因缺乏：1）硬件器件未经可靠性、规模化验证。开源飞控的设计初衷是供极客们二次开发或者爱好者DIY的“半成品”，其硬件选型往往是用于移动终端或其他机器人的消费级器件，意在体现整体系统架构并控制较低成本，并未充分考虑温度、环境、振动、批量供货等产品化过程；2）软件技术体系冗余严重、资源不足。出于通用性的考虑，目前开源飞控适配几乎所有类型的飞行器、通信协议中预留了大量负载字段、占用了几乎大部分系统资源等等，这些特性会造成过度冗余的底层程序、控制策略、通信协议段、不足的内存及计算资源，后续的开发会持续处于“对付”的状态，造成产品不稳定。

最后唠一唠“自研飞控”的事。目前几家知名的无人机公司都是从自研飞控起家的，基本上都经历了10年以上的技术沉淀，为什么呢？因为……10年前还木有开源飞控！这些团队都是电容电阻逐个画到板子上、代码一行一行码到屏幕上。开发过程往往是模块化搭建的，比如先开发传感器采集、舵机／电机控制，再调试独立通道从航向、转速、定高、俯仰、横滚等让飞行器稳定，随后是稳定悬停，到这里已经是成功一大步了，最后是航线飞行，可以按照设定航迹点自动飞行。至此基本完成了“自研飞控”的基本过程，这里看起来短短几行字，我们的飞控攻城狮们至少要经历几年的时间，还是一切顺利的情况下！自研飞控确实耗时耗力，但带来的好处是由于对硬件和软件的充分理解，后续的开发和改进会大大加速，遇到任何问题的改进速度也会大大加快。也正是因为这些原因，前期的有效积累奠定了目前几个知名无人机公司的快速发展。

**问题来了，什么是好飞控呢？怎么选飞控呢？衡量飞控“好坏”主要考虑四个方面：适配、稳定、功能、服务。**

**适配**——目前众多无人机厂商中拥有自己飞控技术的较少，多数厂家走了一条设计、研发、生产机体，采购成熟飞控，最后开拓市场渠道的道路，这有利于公司的快速起步并且占领市场制高点。然而，不同厂商的设计思路不同、针对用户不同、适应场景不同，造成飞行器机体的千差万别。从单旋翼到多旋翼、从四轴到八轴、从开放式到函道式、从油动到电动，如果选择一款飞控能够快速适配将自己公司设计的飞机飞的又稳又好，您一定觉得成功不远了，想偷着笑。如果同一款飞机能把您公司不同类型、不同款的飞机一起搞定，那真是要笑出声来了，不仅可以提高研发效率更能减少维护成本。

**稳定**——相比起两年前，现在飞控以及基本稳定、市场也趋于成熟，没有试用过客户基本是不会出手了。可试用如何看出稳定、可靠呢？这里可以用“三看”诀窍：“一看”公司产能，年产至少达到1000套以上各类工艺流程、质量管理、测试体系才能基本走通、健全；“二看”器件筛选，工业级以上的产品尤其是需要“归零”管理的产品器件筛选非常重要，需要考察公司在器件筛选的流程、筛选率等，确定基础器件的稳定；“三看”测试环境，飞控产品属于“零容忍”故障产品，至少需要经历模块级测试、产品级测试、系统级测试。虽然产品形态是飞控，但必须要经过整机安装后的飞行测试再拆装复原才能出厂。不得不说一句，上述的测试如果你以为正常抽检即，可那就错了！要全检！全检！全检！

**功能**——不得不承认，现在的飞控还不能称为完全成熟，炸机率普遍还处于3%-20%的较高水平，但并不能阻止我们对功能的不懈追求。一般来讲，“开源飞控”由于丰富的生态，对于外在功能性需求响应较快；而“自研飞控”对于功能性定制更深入，对于系统性功能需求的开发周期更短。目前飞控除了基本飞行功能外，主要功能包括：1）高精度定位及控制，也就是我们俗称的差分GPS；2）地势变化的自动跟踪，主要用在农田喷洒；3）自动避障功能，可以保证飞行过程中不对飞行器造成伤害；4）飞行规划定制，客户可以在使用过程中定义A-B点飞行、指定区域覆盖飞行、飞行任务中断续飞等；5）手持终端任务规划与监控，通过手机、PAD、笔记本等设备下达飞行任务并实时任务监控；6）远程监控及分析，通过移动运营商网络在远程异地对飞行过程进行监控并分析运行状态及故障。

**服务**——前三个判断飞控好坏的关键词大家都能理解，说到服务很多人会摸不着头脑。其实这一条还真是一个特别重要的因素，尤其是对B端的客户。以农业植保应用为例，农田施药的作业季在3月到10月，而旺季主要集中在5-8月，需要高强度、大负荷、不间断作业，在温差大、湿度大、环境复杂的农田出现各类故障在所难免。优质的服务需要7x24小时提供不间断技术支持、配件更新、调试指导，才能让使用者最大限度减小损失、获取效益，而且这些专业的服务目前只有飞控生产厂商才能做的最好。

**“十年磨一剑”——飞控的研发到底有多难？**

如果说“飞控是无人机核心技术之一”，我想没有人会否认，而现实是大多数无人机厂商并不完全掌握这项技术，大家看不到重要性么？非也！其实很多厂商都曾尝试过自主研发，但绝大多数都由于技术积累薄弱、可靠性不高、技术迭代速度慢等因素而中途放弃，发自肺腑地说“搞飞控还真的挺难”！

先来看看无人机飞控的技术现状，由易到难基本分成三个层次：“飞行”、“感知”、“交互”。第一级“飞行”，指无人机了解自身状态进行稳定控制的基础上，可以通过地面人员遥控、移动端设置路线或远程指令完成预定航线的自动飞行，这是飞行控制的入门阶段，练好这一级可以完成一些基本的任务了，比如空旷区域的远程侦察。可应用在农业、物流、巡检等复杂环境怎么办？楼房能躲开么？能找到合适降落地点么？不行，必须升至第二级“感知”。感知层次是指无人机不仅了解自身状态，对外界环境也要通过传感器了如指掌。感知通过传感器选型、数字滤波、多传感器数据融合、基于感知的路径规划等技术，让无人机在复杂环境中完成任务且飞行自如。飞控等级修炼到这应该差不多吧？还有？没错！你有没有想过，今天无人机的技术状态类似地面机器人50年前的情形——稳定的行走、越过障碍物、把拍摄的场景录下来。而今的地面机器人不仅会“感知”，复杂“交互”的能力让他们完成诸如拆弹、换电瓶这样的工作游刃有余。无人机为什么不能“交互”呢？为什么不能空中进行危险品的采样、输电线路损坏器件的维修更换、货物的自动抓取与运输？“Nothing is Impossible”！交互是在感知的基础上，在了解了外界环境后对环境中的目标进行交互作业的过程。

按照这种方式分类，目前的无人机基本处于1.5级水平，那么**飞控的开发在不同技术层级到底难在哪？如何克服这些难点呢？**

首先来看看“飞行”。垂直起降无人机最大的控制特性就是其静不稳定特性，类似用指尖平稳地托起一支筷子，必须不停的调整姿态、位置得以平衡。人最快的反应速度大约每秒5次，而无人机要想达到优秀的控制性能，需要每秒300次的感知和计算，任何一次的计算错误或计算中断的结构都是机器坠毁任务停止。一套完整的飞控全部器件接近1000个，是一部复杂手机的几倍，下至OEM安卓机上至苹果，死机对于使用者仅仅是重启加一声叹息的事，而对于无人机则无法接受。这些部件首先要保证自身运转正常，其次要之间的电气、通信正常，组装后要经历各种测试、机体振动的冲击，最后要求忍受住风吹日晒及老化过程！艾玛，好难！想把“飞行”搞好，先要一套完善可扩展的硬件系统架构，具备强大的计算能力以及高带宽的总线通信能力；其次器件要根据飞行需求按照商业、工业、军工不同等级标准选择；在实时嵌入式操作系统上构建具有自身及环境适应性强的控制算法；最后，在使用前进行温度、压力、振动、电磁兼容、飞行性能等全科目全产品检验。

再来看看“感知”。人感知世界主要靠看，眼睛具有极高的分辨率、自动变焦、自动调焦、自动白平衡、自动光圈……各种自动，而目前无人机感知用到的摄像机和计算能力比人的能力还差十万八千里呢！智能引入其他传感器，比如激光、声纳、雷达等，每种传感器的特性不同，需要将这些流媒体、离散矩阵等结构化和非结构化数据归拢好形成合力，物理、数学、电子、电路等知识缺一不可啊！要做好“感知”也并非不可能，先要针对应用场景的环境变量、复杂程度、精度要求、响应时间进行感知传感器的硬件选型和组合；其次进行数据的初步整理、深度数据融合；最后基于感知结果以及飞行器的运动学和动力学特性进行任务、路径的重规划。

“交互”层级，想想都难！不妨让我们脑洞大开一下，某天发生大面积停电，无人机通过巡查发现了一处输电线路破损，这时飞机伸出机械手抓，熟练地废件摘除、取出备件、更换、缠绕绝缘胶带、放回工具，飞回基地完成任务。看似不起眼的过程，却因为所有操作都在空中而异常艰难。我们都看到过在空间站上进行维修任务的航天员、水下作业的潜航员，他们的任何动作都非常困难，就是因为他们都处在悬浮状态，任何的力都会产生反作用力导致定位、操作的不确定性。无人机空中交互也类似，在于目标接触过程中会产生反作用力影响飞行平稳，而飞行姿态的影响又会导致操作力的变化，进入一个恶性循环。要实现空中的有效交互首先要在时变的环境下进行精确的预测性感知，判断在反作用力后系统的状态；其次要考虑通过整体建模或解耦控制消除操作臂本身运动过程对飞行器的影响；最后保证在操作臂与目标接触及移动过程中，外力／力矩对飞行器的影响最小，实现安全交互任务。

**回顾历史，飞控技术发展分为两大流派。**

就是以苏俄、欧美为代表的两种技术体系。苏俄国家延承了载人机控制的研发技术体系直接转到了无人机，早期飞控硬件使用了战斗机的飞控计算机，控制算法一直使用分型模态分段辨识、建模、控制的方法。通俗来讲就是要通过吹风洞、机理建模等方法，知道飞行器在起飞、悬停、低速、中速、高速、降落等不同飞行状态下的参数，在不同状态设计相应控制器。飞行器飞行过程中不断切换控制方法或控制参数以保证飞行器处于理想状态。这种流派优势在于硬件经过长期飞行验证，控制算法在设计模态内系统稳定性可以有效理论证明；缺点在于硬件傻大笨粗且无法预测实际飞行过程中可以经历的所有飞行状态。

欧美和苏俄的派系区别最大的是：以嵌入式计算机为硬件核心、以自适应控制为算法的飞控体系。欧美很大程度上放弃了传统的模态分段控制，无需再对不同飞行状态进行建模、参数辨识，而是采取了在线辨识，也就是说在飞行器飞行的过程中通过在线辨识理论方法，控制器自己判断自身所处的状态、参数等，根据这些信息响应切换不同的控制策略或控制参数。这种流派的优势在于系统体积小、重量轻，缩短了新型无人机的研发过程，智能型进一步增强；缺点在于需要较长时间的理论技术积累，且某种程度上无法证明全局系统稳定性。但无论怎样，飞控的发展成为了重要的使能技术之一，让美国的军用无人机一跃成为世界领先，其他国家也纷纷效仿。

**结合前面所说飞控的三种起源——“固定翼飞控”、“开源飞控”、“自研飞控”，如果再往后看10年，未来的飞控还会是核心么？技术发展趋势是什么呢？**

硬件SoC化。片上系统（System on Chip,SoC）入侵无人机飞控就是这两年的事情，高通、Intel、英飞凌、华为海思等纷纷通过投资、收购消费无人机团队或企业进入这个市场。飞控SoC之所以选择消费级无人机作为突破口，主要原因是此类无人机数量大，对于SoC带来的投入产出比更好；另一方面消费级无人机比商用无人机应用环境更理想，对可靠性、平均无故障时间要求更低。而通过股权形式与无人机企业深度结合是因为传统的芯片厂商只有硬件的能力，需要与无人机企业在软件方面深度结合和定制开发，这里也足见飞控软件的难度之大，国际化的大企业也很难搞定。而未来飞控的硬件SoC化不可阻挡，只是在消费之外的领域需要更长时间的市场培养和技术迭代的过程，在解决了上述问题后，SoC将带来极大的成本降低，更多的飞控企业会更专注于应用层、数据端的技术开发。

软件模块化。硬件SoC化后会带来硬件结构的标准化，为软件的升级迭代提供了更好的生态，不同开发者之间可以通过标准的底层驱动支持及通信协议分享软件的代码。（听起来有点像现在的开源飞控，YES！）不同传感器处理程序、不同飞行控制算法、不同任务规划模块、不同诊断软件将被定义为模块化程序，这些模块将通过付费或其他形式形成飞控软件的商业模式，大大降低了新功能开发的难度，将更多的注意力集中在任务层或业务层。

系统终端化。目前的无人机系统应用还是将飞行器视为核心资产，所有的人力、财力、物力都围绕着飞行器本身转，预期通过无人机的使用愉悦人们心情或者在生产中创造价值。目前这个阶段有点像80年代的人们使用大哥大，当个宝贝一样但却没有发挥其很大的作用；而现在的手机已经终端化，仅仅是遍布全球的终端，人们从终端获取全球有益信息的同时也在贡献着自身的价值。未来无人机在各类应用中更像是布撒的一系列终端设备，飞控作为无人机的核心会在终端化过程中扮演重要作用，无论在消费、农业、巡视等各领域，飞控将成为数据终端的核心，大量的飞行状态、任务数据、载荷状态会被记录、回传、分发，用户或其他利益相关方会通过付费等商业模式获取终端的有用信息。

通信网络化。无人机发展了上百年，绝大多数情况下的通信都是点对点的直接联系，无论是早期的遥控盒还是航模遥控器、无论是便携式电脑地面站还是手持终端任务管理器，无非是通过加大功率通过LF（低频）到HF（高频）甚至到UHF（特高频）等波段进行点对点通信。随着美国GPS战略，可以通过卫星进行各类无人机等终端的组网，但目前其由于带宽、成本等问题而无法在商用中广泛推广。随着智能手机增长率的放缓以及无人机终端化的趋势，移动运营商们也敏锐捕捉到了商机，纷纷推出了面向无人机应用的移动通信解决方案。这类方案目前采用成熟商用2G、3G、4G网络，通过定义套餐、开发贴片SIM卡组件、天线定制等方式，使无人机作为终端接入商用网络。虽然还存在网络不稳定、覆盖区域不全等因素，但随着无人机数据价值的增加、移动通信技术的高速发展驱动以及无人机管控压力的增大，在不久的将来借助运营商的飞控网络化趋势不可阻挡。

数据可视化。在大数据时代，没有人否认原始数据的重要性。无人机+大数据喊了也有一段时间了，但目前受到终端化刚起步、网络化未完全落地、数据来源少等因素，无人机的大数据时代还没有真正来临。无人机数据与其他大数据最大的区别在于行业垂直度深。在不考虑消费娱乐应用的前提下，无人机的应用领域又几十种，而每一种都有其已有的、较深壁垒的行业模式，各类不同领域的数据融合的可能性不大。在未来无人机发展过程中不应空泛强调大数据的意义，而更应通过飞控的数据搜集能力获取高频率的有效信息进行分析，得到能够给行业带来价值的“可视化”数据，直接为行业服务。