

doi: 10.7690/bgzd.2015.01.019

无人机控制与导航系统故障分析及备件优化

王古常, 吴一波

(中国人民解放军武汉军械士官学校无人机系, 武汉 430075)

摘要: 针对某型无人机控制与导航系统的类型和特点, 设计一种无人机控制与导航系统最优维修策略。利用故障树构建系统的故障模型, 计算系统发生故障的概率, 分析了各部件的重要度; 建立航材备件数量的优化模型, 得到了控制与导航系统航材备件的最优配置数量。该策略为控制与导航系统的维修提供了决策依据。

关键词: 无人机; 控制与导航系统; 故障树; 航材备件

中图分类号: TJ85 **文献标志码:** A

Optimal Strategy for Aerial Spare Provision Configuration and Fault Analysis of Control and Navigation System in UAV

Wang Guchang, Wu Yibo

(Department of Unmanned Aerial Vehicle, Wuhan Ordnance Petty Officer Academy of PLA, Wuhan 430075, China)

Abstract: One optimal maintenance strategy for certain type unmanned aerial vehicle (UAV) is designed by analyzing the characteristics of the control and navigation system (CNS) of the UAV. The fault probability of the CNS is quantified and the importance of each components of the CNS is evaluated based on the fault tree model of the CNS. The optimum number of the aerial spare provision is assessed based on the optimization model of the CNS spare provision. The optimal strategy can support the maintenance decision-making.

Keywords: unmanned aerial vehicle (UAV); control and navigation system (CNS); fault tree; aerial spare provision

0 引言

在高技术战争条件下,无人机的使用非常广泛。它能够执行诸如战场侦察、监视、巡逻、炮火校射、激光制导、反装甲等多种类型的任务。某些甚至还可以拦截战术导弹和巡航导弹,代替人员在特殊环境下执行作战任务。

随着无人机的广泛使用,其可靠性有关的问题,特别是维修保障方面的问题逐渐涌现出来。保证无人机的可用性始终处于较高的水平,降低非战斗损坏,是保证战斗力充分发挥的关键。无人机的可靠性水平取决于飞机本身、操作使用、维护保养等各方面的因素。虽然随着制造工艺和技术水平的不断发展,飞机固有可靠性水平不断提升,但仍没达到可以高枕无忧的状态,某些多发性、易发性故障仍然能够对飞机的可靠性产生严重影响。

笔者针对某型无人机,深入分析其控制与导航系统的故障,并针对故障的类型和特点,设计最优的维修策略。就这一问题,已经有很多研究人员开展了相关的研究工作,如郭峰等人讨论了绝对寿控航材的预测模型^[1],夏秀峰等人建立了航材备件需求的马尔科夫模型^[2]。这些模型没有从优化的角度

考虑问题,这是与文中的不同之处。

1 控制与导航系统的故障分析

1.1 控制与导航系统的基本组成

在该型无人机中,控制与导航系统的作用在于实现无人机的人工控制和航迹自动控制,控制和稳定飞机的飞行状态,采集并显示相关参数和轨迹等。控制与导航系统包括地面设备和机载设备,如图1所示。其中,地面设备包括控制设备(含主控站和机动站)以及地面电源设备;机载设备包括飞控机、机载测量设备、舵机、机载供电设备和机载电缆。

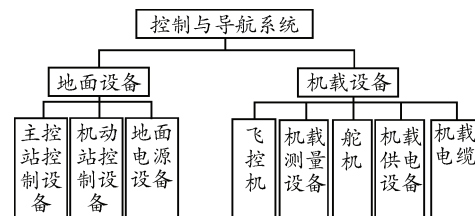


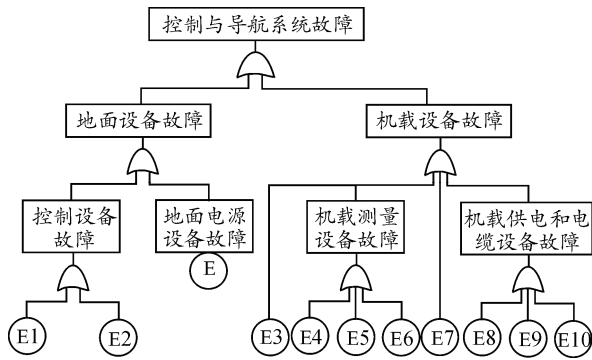
图1 控制与导航系统基本构成

1.2 故障建模与概率量化

从控制与导航系统的基本构成可以看出:主控站和机动站可以视为互为备份,只有当两者同时出现故障时,控制设备才发生故障。机载测量设备主

收稿日期: 2014-08-03; 修回日期: 2014-09-16
基金项目: 国家自然科学基金项目(31200777)
作者简介: 王古常(1967—),男,安徽人,硕士,教授,从事无人机维修工程研究。

要包括空速管、GPS 天线以及其他一些相关设备，这些设备都没有冗余设计^[3]，因此，一旦出现故障，意味着整个机载测量设备故障。机载电源和供电设备可以视为一个整体，包括夜航灯、各类电缆接插件以及其他相关部件，这些设备也都没有采用冗余设计。因此，以“控制与导航系统故障”作为顶事件，可得如图 2 所示的故障树。



其中各底事件具体含义如表 1 所示。表 1 中同时给出了各底事件对应的发生概率，受到故障统计资料缺失的影响，这些数据主要是由专家打分给出的，这些专家位于维修一线，具有丰富的经验，能够保证数据具有一定程度的可信性。

表 1 图 2 所示故障树的参数设置

底事件编码	含义	发生概率
E1	主控站故障	0.01
E2	机动站故障	0.03
E3	飞控机故障	0.01
E4	空速管损坏	0.02
E5	GPS 天线损坏	0.02
E6	其他故障	0.01
E7	舵机故障	0.02
E8	夜航灯故障	0.04
E9	各类接插件故障	0.06
E10	其他故障	0.03
E	地面电源故障	0.01

根据故障树分析方法^[4]，可得控制与导航系统及其各分系统的故障发生概率为：

$$\begin{aligned}
 P1 &= P(\text{控制设备故障}) = P(E1)P(E2) \\
 P2 &= P(\text{机载设备故障}) = \\
 &1 - [1 - P(E4)][1 - P(E5)][1 - P(E6)] \\
 P3 &= P(\text{机载供电和电缆设备故障}) = \\
 &1 - [1 - P(E8)][1 - P(E9)][1 - P(E10)] \\
 P4 &= P(\text{地面设备故障}) = 1 - [1 - P1][1 - P(E)] \\
 P5 &= P(\text{机载设备故障}) = \\
 &1 - [1 - P(E3)][1 - P3][1 - P(E7)](1 - P4) \\
 P(\text{控制与导航系统故障}) &= 1 - (1 - P4)(1 - P5)
 \end{aligned}$$

将表 1 中的数据代入后，可得“控制与导航系统故障”的发生概率为

$$P(\text{控制与导航系统故障}) = 0.2349$$

1.3 故障的重要度分析

所谓重要度，指的是某个部件出现故障后对无人机电整体故障上的“贡献”。通常可采用风险降低当量 (risk reduction worth, RRW) 或风险增加当量 (risk achievement worth, RAW)^[5]表示：

$$I_{x_i}^{RRW} = \frac{R_0}{R | P(x_i) = 0}, \quad I_{x_i}^{RAW} = \frac{R | P(x_i) = 1}{R_0}$$

其中， $I_{x_i}^{RRW}$ 和 $I_{x_i}^{RAW}$ 分别表示 RRW 和 RAW 指标， $R | P(x_i) = 1$ 或 0 表示将部件故障 x_i 的发生概率设定为 1 或者 0 之后，计算得到的无人机失效概率。 R_0 表示基准的失效概率，即事件 x_i 保持原有发生概率时故障概率。很明显，风险降低当量 RRW 指的是当部件 i 不发生故障时，“无人机故障”这一情况发生概率的降低程度；反之，RAW 指的则是当部件 i 一定出现故障时，“无人机故障”这一情况发生概率的增加程度。

根据 RRW 和 RAW 的计算公式，可得控制与导航系统的主要部件的重要性指标，如表 2 所示。

表 2 控制与导航系统主要部件重要性指标

部件名称	风险降低当量 RRW	风险增加当量 RAW
空速管	1.071 2	4.257 8
舵机	1.071 2	4.257 8
夜航灯	1.157 1	4.257 8
GPS 天线	1.071 2	4.257 8
机动站控制器	1.001 0	1.031 6
各类接插件	1.567 3	4.257 8

从 2 个指标结果来看，控制与导航系统中重要性最高的部件为各类接插件，其次为夜航灯、空速管、舵机，最后为机动站控制器。

2 控制与导航系统航材备件优化策略

2.1 航材备件优化模型

按照航材备件的使用特点，可以分为消耗件和周转件 (即可维修单元)。例行维修中的航材消耗件，可根据飞行训练的时间、器材的性能指标加以确定，是一个确定性指标；而非例行维修消耗件和周转件，由于故障的随机性，其需求量是一个随机变量。理论上说，航材备件数量越多，越有利于开展快速维修，但是，航材备件过多，容易造成浪费且占用空间；备件数量少，则可能导致无人机无法按时出动，

导致贻误战机。因此，必须在保证无人机的整体可靠性水平下，合理确定易损件的备件数量。

确定航材备件数量，就形式而言属于组合最优化问题。将无人机及其相应的备件作为一个系统，既要有一定的可靠度保证飞行训练的正常进行，同时又要实现占用费用和维护工作量的最小化，即在任务可靠性水平的约束下，实现最小费用问题。具体模型^[6]如下式：

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^N k_i P_i \rightarrow \min \\ \text{st. } f(K) > R_0 \end{cases} \quad (1)$$

其中 $K=\{k_1, k_2, \dots, k_N\}$ ， k_i 表示第 i 种备件的数量， P_i 表示第 i 种备件的成本(含采购成本和存储成本)， $f(K)$ 表示任务的总体可靠性

$$f(K) = \prod_{i=1}^N R(k_i) \quad (2)$$

其中， $R(k_i)$ 表示备件 i 的保障率，保障率的计算公式为

$$R(k_i) = \frac{\text{备件的库存量}}{\text{备件的需求量}} \times 100\% \quad (3)$$

该模型有 2 个假设前提：

1) “修复如新”假设，备件一旦安装成功，则系统可靠性恢复到原有的水平，即系统可靠性水平只取决于部件的失效率和备件数量；

2) 不会存在 2 个或 2 个以上的部件同时发生故障的现象。

2.2 控制与导航系统的易损件备件数量优化

控制与导航系统的主要部件及其成本如表 3 所示。假定 1 个机组共有 10 架飞机，单架飞机 100 个飞行小时。需要指出的是，这些成本并不是真实的成本，只是为了演示方便而设定的。

表 3 控制与导航系统主要部件及成本

易损件	成本(单价)/元	理论故障数	最优配置数量
空速管	1 000	20	20
舵机	8 000	20	20
夜航灯	500	40	40
GPS 天线	10 000	20	18
车外操纵器	1 000	30	30
各类接插件	平均 500	60	60

假定必须保证控制与导航系统的可靠性水平 $R_0 \geq 0.9$ ，则可得到控制与导航系统的主要部件航材备件数量优化模型：

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^6 k_i P_i \rightarrow \min \\ \text{st. } \prod_{i=1}^6 \left(\frac{k_i}{N_i} \right) \geq 0.9 \\ 0 \leq k_i \leq N_i \end{cases} \quad (4)$$

利用 Matlab 可求得最优的配置方案，如表 3 的第 4 列所示。在这一配置方案下，备件的总成本为 44 万元，控制与导航系统的可靠性水平为 0.9，可以满足可靠性水平的要求。

3 结论

针对某型无人机的控制与导航系统，笔者利用故障树方法，对其故障情况进行了分析，计算了控制与导航系统的故障概率，并分析了各部件的重要度水平，得出各类接插件的重要度最高的结论。笔者建立了航材备件优化模型，并给出了控制与导航系统各部件航材备件的最优配置数量。

接下来，笔者拟进一步细化故障分析工作，并在航材备件优化分析过程中考虑加入部件的重要度因素，设计更为符合实际的航材备件优化模型。

参考文献：

- [1] 郭峰, 温德宏, 刘军, 等. 绝对寿控航材需求预测[J]. 兵工自动化, 2013, 32(9): 32-36.
- [2] 夏秀峰, 董彦军. 基于改进马尔科夫模型的航空备件需求预测[J]. 兵工自动化, 2013, 32(11): 39-41.
- [3] 李伟, 张岩. 基于 ARM 和 $\mu\text{C}/\text{OS II}$ 的 PC/104 总线无人机火控计算机设计[J]. 四川兵工学报, 2013, 34(11): 125-127.
- [4] Vesely W E, Goldberg F F, Roberts N H, et al. Fault tree handbook (NUREG-0492)[R]. U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington D.C., 1981.
- [5] Borst M van der, Schoonakker H. An overview of PSA importance measures[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2001, 72(2): 241-245.
- [6] 纪义国, 丁吉, 梁伟. 一种评估航材备件保障需求的优化方法[J]. 长春工业大学学报: 自然科学版, 2007, 28(4): 394-396.