

直升机旋翼系统可靠性分析

翁梓华

(厦门大学机电工程系 厦门 福建 361005)

摘要: 本文针对某型号直升机旋翼系统,从现场数据着手研究和分析了旋翼系统的可靠性。在整理现场数据得到的随机截尾数据的基础上,运用极大似然估计法估计了该混合型数据的威布尔分布参数。运用故障树分析方法建立和分析了旋翼系统的故障树结构。最后,运用蒙特卡罗模拟方法对旋翼系统进行可靠性模拟和分析。

关键词: 直升机 旋翼系统 可靠性 极大似然估计法

一、引言

直升机的旋翼系统是用于起飞、巡航、降落过程的关键的和复杂的系统。使用的条件较直升机上的其它部件更为恶劣。在工程上,对其可靠性的要求程度是较为严格的。

旋翼系统是一个复杂的庞大的系统,要对整个系统的实际外载情况加以精确的测量和理论计算是相当困难的。国内外的大量的以往经验表明,通过现场调研和数据收集,可获取大部分的失效模式和失效数据。这将涉及到大量的有用数据的收集和整理。数据的分析理论、方法和验证对将要取得的结果具有较为重大的影响。以上是对单个失效模式而言的。要对整个旋翼系统的可靠性进行计算,所要采用的可靠性分析理论和方法将具有重大影响。对于较复杂的系统,可采用故障树的分析方法。同时,较为复杂的旋翼系统的可靠性并不能直接计算得到,可采用系统的蒙特卡罗模拟方法来分析,以获取满意的结果数据。

二、可靠性模型

直升机的旋翼系统,是最为关键的和最为复杂的系统之一。本文中,我们简化了其模型,使研究的范围局限在以下的四个部分:桨叶、桨毂、转轴和桨叶销。一旦上述四个串联形式的组成部分之中的任何一个出现故障,都将使整个系统发生故障。在获取的现场数据中,转轴和桨叶销尚未发现它们的故障情况,可以说它们的可靠度均为 100%。在桨毂的现场数据中,整理出了三类失效模式的数据。桨毂的失效模式包括了星形件支臂裂纹、星形件其它部位裂纹和支臂端衬套松动等。在桨叶的现场数据中,发现了九类失效模式的数据。桨叶的失效模式包括了 Ref1000 上表面裂纹、Ref1000 下表面裂纹、包片裂纹、包片开胶(露天)、包片开胶(一般)、风蚀、配重支座锈蚀、桨叶下表面保护带损伤和桨根盖缝带损伤等。

三、极大似然估计法

直升机旋翼系统的可靠性原始数据是属于随机截尾数据。直升机旋翼系统为具有多种失效模式的复杂系统。在直升机的旋翼系统的可靠性分析中,将选用威布尔分布的极大似然估算各种故障模式的失效概率分布。

某一故障模式的概率密度函数 $f(t)$ 已有 n 个故障数据 (t_1, t_2, \dots, t_n) , 同时又存在有 k 个中断数据 (h_1, h_2, \dots, h_k) 。根据概率论的知识可知,可构造该故障模式的随机截尾分布的似然函数为

$$L = \prod_{i=1}^n f(t_i) \prod_{j=1}^k R(h_j) \quad (2)$$

其中,概率密度分布函数为威布尔分布

$$f(t_i) = (m/t_0) t_i^{m-1} \exp(-t_i^m/t_0) \quad (3)$$

$$R(h_j) = \exp(-h_j^m/t_0) \quad (4)$$

在直升机的旋翼系统的可靠性分析中,运用牛顿-拉普森迭代方法和割弦法,以及数值计算中的

上山法和下山法，可以求解 \hat{m} 和 \hat{t}_0 的数值（表1）

序号	失效模式	\hat{m}	\hat{t}_0
1	星形件支臂裂纹	0.49	2.90
2	星形件其它部位裂纹	0.57	2.54
3	Ref1000 上表面裂纹	0.87	6.53
4	Ref1000 下表面裂纹	0.83	5.88
5	包片裂纹	2.55	14.51
6	包片开胶（一般）	0.83	5.11
7	包片开胶（露天）	2.53	10.81
8	支臂端衬套松动	0.46	5.58
9	配重支座锈蚀	2.56	6.25
10	盖缝带损伤	2.54	4.83
11	风蚀	0.71	16.43
12	聚胺脂保护带破损	0.77	15.54

表1 旋翼系统的 \hat{m} 和 \hat{t}_0 数值

步骤	1	2	3	4
	M_1	X_1	X_1	X_1
	M_2	M_3	X_2	X_2
		M_4	X_3	X_3
		M_5	X_4	X_4
		X_{10}	X_5	X_5
过程		X_{11}	M_6	X_6
		X_{12}	X_8	X_7
			X_9	X_8
			X_{10}	X_9
			X_{11}	X_{10}
			X_{12}	X_{11}
				X_{12}

表2 旋翼系统故障树的割集

四、故障树分析

在本世纪的六十年代，人们对系统已开始进行了可靠性分析。随着尖端的和军用的高科技领域的长足进步，人们逐步运用到了大型的高复杂性的系统，如载人飞船、导弹和核反应堆等。这些复杂的系统要求具有很高的安全性能，急需对其可靠性指标进行定量的计算。六十年代初，美国贝尔电话实验室的沃森提出了故障树分析方法（FTA）。迄今为止，故障树分析方法被一致公认为是对复杂系统安全性和可靠性进行分析的一种优良方法。该方法既可进行定性分析，也可进行定量的计算。

在直升机的旋翼系统的可靠性分析中，旋翼系统是一个复杂的机械系统，将选用故障树方法分析之。在本文的分析中，顶事件是旋翼系统的失效。顶事件是不希望发生的故障事件。导致顶事件发生的直接原因有桨叶故障、桨毂故障、转轴故障和桨叶销故障等。这些故障又由更进一层次的几种故障引起。

运用布尔代数可求解直升机旋翼系统故障树图的最小割集。由于本故障树为串联方式，无论是用富塞尔—凡斯列的下行法，还是用西门德勒斯的上行法，都能容易地求出其最小割集。计算的结果表明，每一个失效模式都是一个最小割集（表2）。

直升机旋翼系统是一个复杂的可维修系统。该系统中的产品经过修复之后，其状态将“完好如初”（即完全修复）。这意味着，当设备发生故障时，经过维护之后，其可靠性能可以恢复到全新的状态。

本文中，仅计算其中的一部分可靠性参量。这些参量包括，旋翼系统及其各失效模式的可靠度、不可靠度、平均间隔故障时间、寿命的方差、模拟的误差、概率分布密度和重要度等。在直升机的旋翼系统的可靠性分析中，许多的性能参量由于与多个的影响因素有着复杂的联系，需应用计算机来求解和进行模拟。

系统的平均故障间隔时间，能由其定义经过计算而求得。在可修产品的可靠性分析中，平均故障间隔时间（MTBF）可定义为总工作小时数与总故障数之比。

在本文中，直升机旋翼系统视为可修复产品组成的系统。依照 MTBF 的定义，可求得各种故障模式的和整个旋翼系统的 MTBF 值（表3）。

序号	失效模式	MTBF(千小时)
1	星形件支臂裂纹	2.30
2	星形件其它部位裂纹	2.12
3	Ref1000 上表面裂纹	6.29
4	Ref1000 下表面裂纹	5.59
5	包片裂纹	16.94
6	包片开胶(一般)	4.84
7	包片开胶(露天)	12.64
8	支臂端衬套松动	4.45
9	配重支座锈蚀	7.26
10	盖缝带损伤	5.65
11	风蚀	15.26
12	聚胺脂保护带破损	14.52

表3 旋翼系统的 MTBF 值

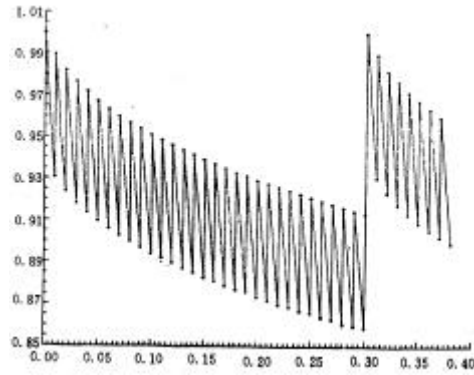


图1 旋翼系统可靠度随时间变化曲线

由于旋翼系统的故障不服从指数分布，其 MTBF 值并不是常数，而是飞行时间的函数。本文给出 MTBF 值为至某一定飞行小时数之内 MTBF 平均值。对于旋翼系统，可求得其等效的飞行小时数为各架机飞行小时数总和与架数之比值。其等效的故障数为各架机故障数总和与架数之比值。则可以统计出现有数据条件下的旋翼系统的 MTBF 平均值约为 157 飞行小时。

在实际应用中，直升机的旋翼系统是一个复杂的可修复的系统。在每一次检测中，出现的故障和潜在故障得到了最大程度的排除和处理。随后其规定的功能又恢复到其初始状态，达到了“完好如初”的状态。即，可靠度又恢复为 1。

在本文中，可修复的复杂的旋翼系统包含许多可修复的零部件。该系统包含了十二种可修复的故障模式。每一种故障模式都影响着整个系统的可靠度。由于每一种故障模式的检查周期不尽相同，使得系统的可靠度曲线呈现复杂的变化趋势。具体地说，可靠度随着飞行时间的推移呈现复杂的周期性分布。其可靠度曲线如图 1 所示。纵坐标为系统可靠度 $R(t)$ ，横坐标为飞行时间（单位为千小时）。

五、结束语

通过数年时间和对数十架直升机现场数据的收集与统计分析，本文对直升机旋翼系统已整理出了十二种失效模式。运用极大似然估计法估计了混合型随机截尾数据的威布尔分布参数。运用故障树分析方法建立和分析了旋翼系统的故障树结构图。若能够继续收集并整理尚未收集的数据，还可获取更多的故障数据、中断数据、失效模式和失效原因等，可建立更为庞大的复杂的故障树图，可以更为全面地和广泛地分析直升机的旋翼系统的可靠性。

参考文献：

- 1 野中保雄. 可靠性数据的收集和分析方法[M]. 高金钟译. 机械出版社, 北京, 1988.
- 2 陈家鼎. 随机截尾情况下 Weibull 分布参数的极大似然估计的相合性[J]. 应用概率统计, 1989: 226 - 233.
- 3 A. C. Cohen. Maximum Likelihood Estimation in the Weibull Distribution Based on complete and Censored Sample[J]. Technometrics, 1965, 7(4): 578.