

doi: 10.7690/bgzdh.2018.06.016

传动销齿故障时间分布定量化建模及应用

孙明军, 欧阳中辉, 马爱平

(海军航空大学兵器科学与技术系, 山东 烟台 264001)

摘要: 为确保飞机调向转盘装置执行调运任务的成功率, 对其关键部件传动销齿的故障时间分布规律进行研究。采用基于极大似然估计和相关系数拟合优度检验建立可靠的传动销齿故障时间分布函数, 并应用于飞机调向转盘装置的使用和维护, 最后进行实例分析。分析结果表明: 建立的传动销齿故障时间分布函数对飞机调向转盘装置的使用和维护具有一定的指导意义, 能够确保飞机调向转盘装置执行调运任务的成功率。

关键词: 飞机调向转盘装置; 极大似然法; 相关系数法; 故障时间分布; 任务成功率

中图分类号: TP312 **文献标志码:** A

Quantitative Modeling and Application of Transmission Pin Tooth Fault Time Distribution

Sun Mingjun, Ouyang Zhonghui, Ma Aiping

(Department of Ordnance Science & Technology, Naval Aeronautical University, Yantai 264001, China)

Abstract: In order to ensure the success rate of transport tasks to the aircraft steering turntable device, making a study of the failure time distribution of the pin tooth. Use the method of maximum likelihood estimation and correlation coefficient fitting goodness establishing a reliable failure time distribution of pin tooth, and applied to the use and maintenance of the aircraft steering turntable device. Finally, example are analyzed. The analysis results show that the proposed transmission pin gear failure time distribution function of the aircraft to a turntable device use and maintenance has certain guiding significance, it can ensure the success rate of transport tasks to the aircraft steering turntable device.

Keywords: aircraft steering turntable device; maximum likelihood method; correlation coefficient method; failure time distribution; mission success rate

0 引言

飞机调向转盘装置是某舰船上机库内舰载机调运系统的专用设备之一, 通过一个与机库甲板面齐平的电动转盘转动, 将被牵引到转盘上的舰载机调转方向, 实现在空间有限的机库内调转舰载机牵引方向的功能, 配合调运系统其他设备一起完成机库内的舰载机调运作业。在执行调运任务中, 主驱动齿轮通过与传动销齿啮合拨动转盘回转来完成调运任务。

目前, 传动销齿的维修方式为事后维修, 这种维修方式在很大程度上制约调运任务的成功率, 为降低飞机调向转盘装置在调运任务期间的故障率, 笔者对其关键部件传动销齿故障时间分布规律进行研究, 以此为飞机调向转盘装置的使用和预防性维修提供理论依据, 确保飞机调向转盘装置执行调运任务的成功率。

当前开展了很多针对故障时间分布的研究^[1-2], 通常是直接假设故障时间服从指数分布、正态分布、

对数正态分布、威布尔分布中的一种, 然后进行拟合分析。但实际上, 在同样显著度的假设检验下, 故障时间可能同时满足几种分布, 导致以往的可靠性研究的准确度不高。文献[3]中用以拟合优度检验的样本数据少, 拟合优选的可信度低; 文献[4-5]对故障数据的处理应用, 是在故障时间分布的基础上求解故障率, 进一步进行备件需求和预防性维修周期的计算, 没有充分利用故障时间分布规律来指导装备的使用和维护。

为增加可靠性研究的准确度, 笔者假设故障时间同时服从正态分布、对数正态分布、指数分布、威布尔分布, 然后进行极大似然法参数估计和拟合优度检验。为增加拟合优度检验的可信度, 采用基于故障时间分布函数的拟合优度检验, 样本数据为故障时间数据统计分析的累积频率值, 可通过最大化故障时间数据的分组来实现最大化样本数据。为进一步扩展利用故障时间分布规律来指导装备的使用和维护, 笔者采用基于任务成功率的使用和维护

收稿日期: 2018-02-25; 修回日期: 2018-03-24

作者简介: 孙明军(1992—), 男, 山东人, 硕士研究生, 从事软件开发及信息管理技术研究。

决策方法, 通过实践检验, 得到了可靠的飞机调向转盘传动销齿故障时间分布函数, 并成功应用于飞机调向转盘装置的使用和维护, 确保了飞机调向转盘执行调运任务的成功率。

1 故障时间分布模型的建立

1.1 故障时间数据的分析处理

笔者收集到的设备故障时间数据用等时间间隔频次法^[6]来作故障时间分布密度函数图和故障时间分布函数图。

其操作步骤如下。

1) 在故障时间的统计数据中找出最大故障时间 T_{\max} 和最小时间 T_{\min} 。

2) 将所得数据进行分组。故障时间分布密度函数的 L 使用下面的经验公式进行划分。

$$L \geq \log_2(2N) = 1 + \log_2(N) = 1 + \frac{\ln(N)}{\ln 2} = 1 + 1.44 \ln(N)。 \quad (1)$$

其中: N 为有效数据的个数; L 取接近的最小整数。

为了提高拟合检验的可信度, 最大化样本数据, 故障时间分布函数的 $L = N$ 。

每一组的区间长为

$$\Delta L = \frac{T_{\max} - T_{\min}}{L}。 \quad (2)$$

3) 统计在各组区间内的次数 n_i 和频率。

$$f_i = \frac{n_i}{N}。 \quad (3)$$

4) 故障时间分布函数还需统计累计频率。

5) 以故障时间为横坐标, 分别以各组的频率和累计频率为纵坐标, 画出统计数据故障时间分布概率密度函数和分布函数图^[7]。

1.2 分布密度函数的极大似然估计

设 $f(t; \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_m)$ ($\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_m$ 是 m 个待估参数) 为随机变量 T 的总体概率密度根据随机变 T 的 n 个观测数据可构造似然函数^[8]:

$$L(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_m) = \prod_{i=1}^N f(t_i, \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_m)。 \quad (4)$$

对似然函数 $\ln L(\theta_j)$ ($j=1, 2, \dots, m$) 取极值, 可以得到似然方程组

$$\frac{\ln L(\theta_j)}{d\theta_j} = 0, \quad (5)$$

求解式(5)即可求得参数 θ_j 的估计值。

$F(t)$ 为故障时间分布函数, $F(t)$ 的表达式为:

$$F(t) = \begin{cases} \int_0^t f(t) dt & t \geq 0 \\ 0 & t < 0 \end{cases}。 \quad (6)$$

其中 $f(t)$ 为故障时间概率密度函数, 求解式(6)可求得故障时间分布函数 $F(t)$ 。

1.3 分布模型的拟合优选及一致性检验

计算得到的正态分布、对数正态分布、指数分布、威布尔分布的故障时间分布函数 $F(t)$, 进行拟合优度检验。考虑到故障时间分布函数 $F(t)$ 可能具有较强的非线性关系, 根据文献[9], 可采用基于拟合优度指标 R_{NL} 来对曲线拟合优度检验, 其表示式为

$$R_{NL} = 1 - \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^N y_i^2}}。 \quad (7)$$

式中: y_i 为第 i 个样本数据的值; \hat{y}_i 中 i 为拟合模型的第 i 个值; N 为样本数据的个数。

样本数据越多, 拟合优度检验越准确, 样本数据取 1.1 节的累计频率值。

最后通过 Matlab 数值分析工具中的秩和检验函数进行一致性检验。

2 基于任务成功率的使用和维护

在任务时间要求高的情况下, 需要装备能够正常无故障地执行任务, 如果出现故障, 则认定任务失败。所以, 在装备的实际使用当中, 已知任务强度, 还要知道装备在当前状态下是否具有正常无故障执行任务的能力, 如果没有, 为提高任务成功率, 需要采取预防性维修。

另一方面, 指挥人员在制定任务时, 如果制定的任务强度大, 则设备出现故障的可能性就高, 任务成功率就低。所以, 笔者要知道装备在当前的状态下, 能正常无故障地执行任务的时间, 从而来辅助指挥人员安排任务强度。

针对上述 2 种情况, 笔者定义任务成功率为装备在当前时刻正常的状态下, 执行完一定时间任务后, 继续保持正常的概率, 记为 $R_c(t)$:

$$R_c(t) = p(\tau > t + t_r | \tau > t) = \frac{p(\tau > t + t_r, \tau > t)}{p(\tau > t)} = \frac{p(\tau > t + t_r)}{R(t)} = \frac{1 - F(t + t_r)}{1 - F(t)} \quad (8)$$

其中： t 为当前正常状态下的累计工作时间； t_r 为计划任务时间。

式(8)定义的任务成功率能很好地解决上述 2 种情况，通过记录装备累计工作时间和设定任务成功率的阈值，即可通过式(8)判断是否采取预防性维修活动或者决定装备执行任务的强度。任务成功率阈值的设定取决于许多实际因素，在此阈值的确定不作研究，初步选定为 0.96。

3 实例分析

3.1 故障时间数据的分析处理

把飞机调向转盘装置工作 4 a 采集到的 164 个传动齿销故障时间数据，按照 1.1 节中介绍的基于经验公式的等时间间隔频次法，制作传动齿销故障频率表，如表 1 所示。

表 1 传动齿销故障频率

组号	组中值	频数	频率
1	110.333 3	24	0.146 3
2	215.000 0	34	0.207 3
3	319.666 7	40	0.243 9
4	424.333 3	37	0.225 6
5	529.000 0	14	0.085 4
6	633.666 7	7	0.042 7
7	738.333 3	1	0.006 1
8	843.000 0	4	0.024 4
9	947.666 7	3	0.018 3

结合表 1 绘制出实际故障时间分布密度函数如图 1 所示。

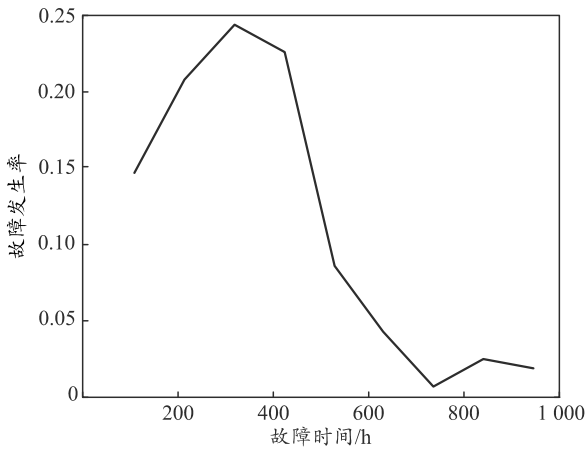


图 1 实际故障时间分布概率密度函数

实际故障时间分布函数的绘制同样按照 1.1 节中介绍的方法绘制，因传动齿销故障累计频率表数据量大，给出部分表信息，如表 2 所示。

表 2 传动齿销故障累计频率

组号	组中值	频率	累计频率	组号	组中值	频率	累计频率
1	60.872 0	0.012 2	0.012 2	148	905.225 6	0.000 0	0.987 8
2	66.615 9	0.006 1	0.018 3	149	910.969 5	0.000 0	0.987 8
3	72.359 8	0.000 0	0.018 3	150	916.713 4	0.000 0	0.987 8
4	78.103 7	0.006 1	0.024 4	151	922.457 3	0.000 0	0.987 8
5	83.847 6	0.000 0	0.024 4	152	928.201 2	0.000 0	0.987 8
6	89.591 5	0.000 0	0.024 4	153	933.945 1	0.000 0	0.987 8
7	95.335 4	0.000 0	0.024 4	154	939.689 0	0.000 0	0.987 8
8	101.079 3	0.000 0	0.024 4	155	945.432 9	0.006 1	0.993 9
9	106.823 2	0.006 1	0.030 5	156	951.176 8	0.000 0	0.993 9
10	112.567 1	0.006 1	0.036 6	157	956.920 7	0.000 0	0.993 9
11	118.311 0	0.006 1	0.042 7	158	962.664 6	0.000 0	0.993 9
12	124.054 9	0.006 1	0.048 8	159	968.408 5	0.000 0	0.993 9
13	129.798 8	0.018 3	0.067 1	160	974.152 4	0.000 0	0.993 9
14	135.542 7	0.018 3	0.085 4	161	979.896 3	0.000 0	0.993 9
15	141.286 6	0.018 3	0.103 7	162	985.640 2	0.000 0	0.993 9
16	147.030 5	0.012 2	0.115 9	163	991.384 1	0.000 0	0.993 9
∴	∴	∴	∴	164	997.128 0	0.006 1	1.000 0

结合表 2 绘制出实际故障时间分布函数如图 2 所示。

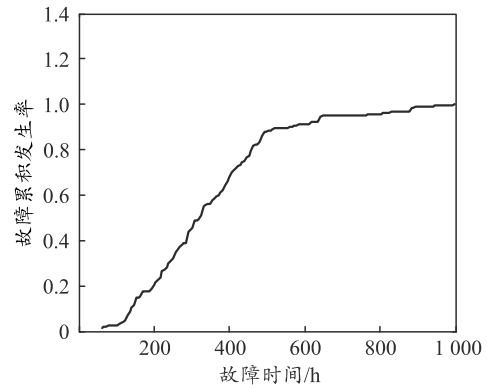


图 2 实际故障时间分布函数

3.2 分布密度函数极大似然估计

1) 假设故障时间分布类型服从 2 参数的威布尔分布，那么其概率密度函数为

$$f(t, \beta, \eta) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} \exp\left[-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta\right] \quad (9)$$

其中： η 为尺度参数； β 为形状参数。

利用式(1)求出对应的威布尔分布函数为：

$$F(t, \beta, \eta) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta\right] \quad (10)$$

用极大似然估计法估计参数得：

$$\eta = 393.474 2, \quad \beta = 2.050 5.$$

2) 假设故障时间分布类型服从正态分布那么其概率密度函数为：

$$f(t, \mu, \sigma) = \frac{1}{\sigma t \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(t - \mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (11)$$

利用式(1)求出对应的正态分布函数为：

$$F(t, \mu, \sigma) = \Phi\left(\frac{t - \mu}{\sigma}\right) \quad (12)$$

用极大似然估计法估计参数得：

$$\mu=347.553\ 7, \sigma^2=180.243\ 2。$$

3) 假设故障时间分布类型服从对数正态分布, 那么其概率密度函数为:

$$f(t, \mu, \sigma) = \frac{1}{\sigma t \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\ln t - \mu)^2}{2\sigma^2}\right)。$$
 (13)

利用式(1)求出对应的正态分布函数为:

$$F(t, \mu, \sigma) = \Phi\left(\frac{\ln t - \mu}{\sigma}\right)。$$
 (14)

用极大似然估计法估计参数得:

$$\mu=5.716\ 2, \sigma^2=0.540\ 9。$$

4) 假设故障时间分布类型服从对数正态分布, 那么其概率密度函数为:

$$f(t, \lambda) = \lambda \exp(-\lambda t)。$$
 (15)

利用式(1)求出对应的正态分布函数为:

$$F(t, \lambda) = 1 - \exp(-\lambda t)。$$
 (16)

用极大似然估计法估计参数得:

$$\lambda=347.553\ 7。$$

绘制出极大似然估计与统计数据的故障时间概率密度分布函数以及分布函数对比图, 图 3、图 4 为威布尔、正态、指数分布与统计数据对比, 图 5、图 6 为对数正态分布与统计数据对比。

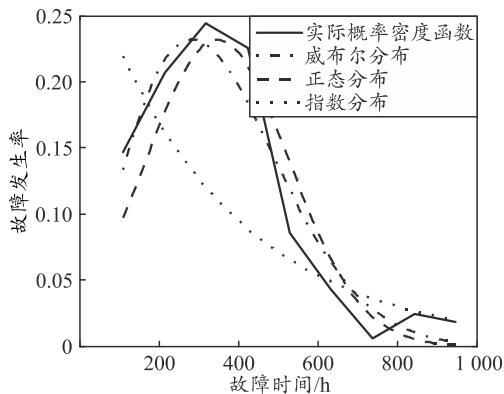


图 3 各分布与实际概率密度函数对比

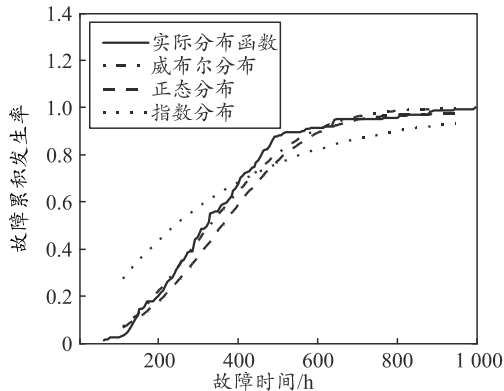


图 4 各分布与实际分布函数对比

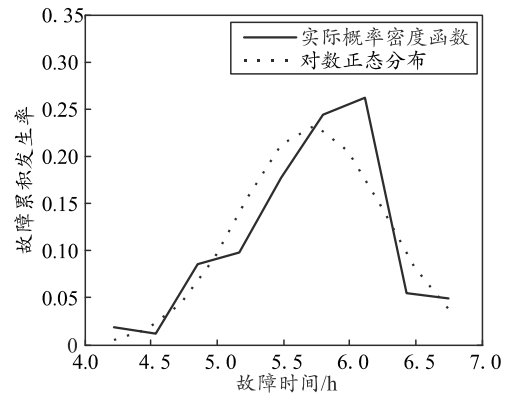


图 5 对数正态分布与实际概率密度函数对比

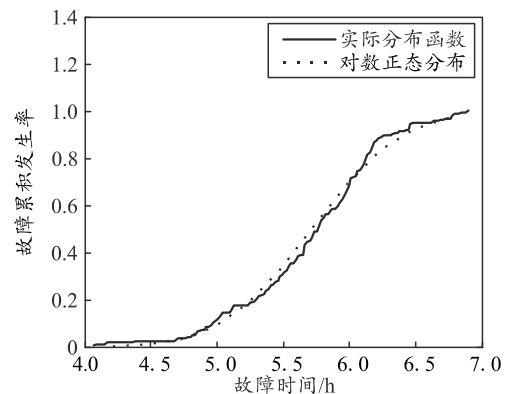


图 6 对数正态分布与实际分布函数对比

由图 3—6 可以初步判断威布尔分布与对数正态分布的拟合效果好。

3.3 分布模型的拟合优选及一致性检验

利用拟合优度指标 R_{NL} 对曲线拟合优度检验, 进一步选择优分布, 各分布的指标值如表 3 所示。

表 3 各分布的拟合优度

威布尔分布	正态分布	指数分布	对数正态分布
0.963 5	0.931 1	0.839 1	0.956 9

根据拟合优度表可以确定传动齿销的故障时间分布为威布尔分布。

调用 Matlab 中的秩和检验函数进行一致性检验, 得出在显著性水平为 0.05 时, 传动齿销的故障时间分布为威布尔分布的概率为 0.849 9, 一致性检验通过, 进而可以确定传动齿销的故障时间分布为威布尔分布。

3.4 基于任务成功率的使用和维护

现利用得到的传动齿销的故障分布规律来指导飞机调向转盘装置的使用和维护。

绘制出传动齿销累计工作时间分别为 60、120、180、240 h, 每次连续工作时间不超过 12 h 的任务成功率图, 如图 7 所示。

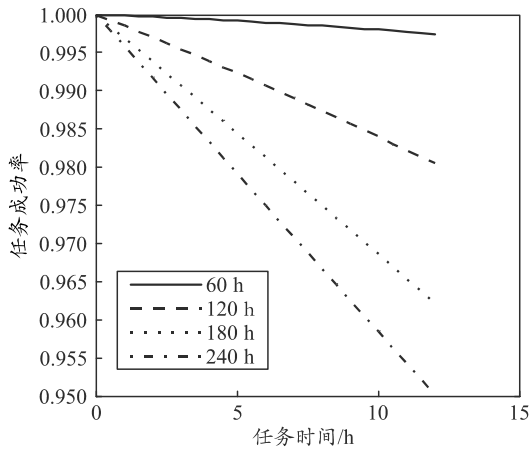


图 7 不同状态下各任务时间的成功率

由图可知：随着累计工作时间增加，飞机调向转盘装置执行调运任务的成功率随任务时间的增加而下降得越快。

1) 辅助任务决策。

现拟定传动齿销累计工作时间为 650 h, 成功率阈值设定为 0.96, 则执行任务强度可制定为连续工作 7.5 h, 当前状态下任务成功率如图 8 所示。

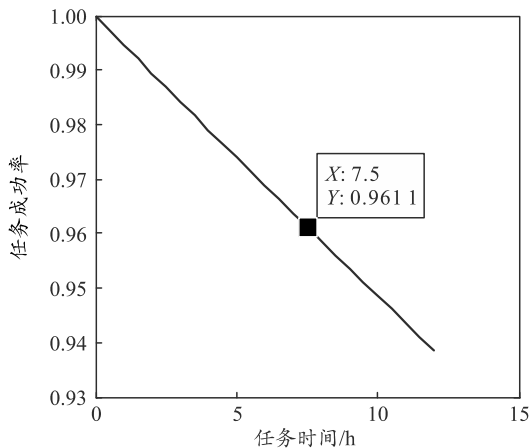


图 8 传动齿销累计工作 650 h 任务成功率

2) 维修决策。

在给定任务强度的情况下，可通过计算当前状态下任务成功率，来确定是否采取预防性维修活动。现拟定传动齿销累计工作时间为 560 h, 如果进行

6 h 的转运任务，利用式(12)计算其成功率为 0.968 2, 不需进行检修, 如果进行 8 h 的转运任务, 利用式(12)计算其成功率为 0.957 9, 则需要进行检修。

4 总结

基于极大似然法估计和相关系数法拟合优度检验的故障时间分布定量化建模方法，能很好地拟合传动齿销故障时间分布曲线。在此基础上，笔者通过定义的任务成功率能为调向转盘装置的使用和维护提供辅助决策支持，切实提高其任务成功率，具有实际指导意义。

为进一步完善传动齿销故障时间分布函数，要注意历史数据的积累。通过不断地积累外场使用数据、故障数据等历史数据，对这些历史数据的分析、处理，可以得到更为准确的故障时间分布函数，为决策提供技术支持。

参考文献：

- [1] 王兴珊. 包装机械的 MTBF 计算和故障分析[D]. 无锡: 江南大学, 2008.
- [2] 冯管印, 何川, 丁坚勇, 等. 电气设备故障率演化推算综合算法[J]. 武汉大学学报(工学版), 2014, 47(2): 243-249.
- [3] 范晋伟, 刘超, 刘益嘉. 数控磨床维修时间分布及维修性评估研究[J]. 机械设计与制造, 2016, 6(10): 165-166.
- [4] 王家海, 胡传胜, 张益飞. 基于故障率的机床预防性维修周期模型应用[J]. 控制与检测, 2010, 12(3): 43-46.
- [5] 高崎, 黄照协, 刘栋, 等. 基于比例故障率的周转备件预测方法[J]. 火力与指挥控制, 2013, 38(11): 148-152.
- [6] 王桂萍, 贾亚洲. MTBF 分布模型的案例分析[J]. 吉林工程技术师范学院学报, 2005, 21(3): 20-24.
- [7] 杨韦韦, 王东辉, 王跃萍. 基于 L1 自适应控制的飞机操纵面故障重构[J]. 兵工自动化, 2017, 36(5): 4-7.
- [8] 张根保, 唐贤进, 廖小波, 等. 专用数控机床故障率实验研究数控机床故障率分布曲线定量化建模及应用[J]. 重庆大学学报, 2013, 36(6): 121-122.
- [9] 张世强. 曲线回归的拟合优度指标的探讨[J]. 中国卫生统计, 2002, 19(1): 9-11.