

doi: 10.7690/bgzdh.2020.08.014

基于比例危险模型的军机线路失效分析

肖楚琬¹, 王希彬², 张熹然³, 宋广大⁴

(1. 海军航空大学航空作战勤务学院, 山东 烟台 264001; 2. 海军航空大学航空基础学院, 山东 烟台 264001;
3. 中国人民解放军 91498 部队机务大队, 河北 秦皇岛 066000;
4. 海军航空大学航空仪器计量站, 山东 烟台 264001)

摘要: 为解决军机线路短路和断路失效的问题, 对基于比例危险模型的军机线路失效进行分析。通过对可能导致线路失效原因的分析, 建立军机线路失效模型, 对比例危险模型参数进行估计, 采用 SPSS 软件进行生存分析, 计算线路的失效率, 推算出电线的大致失效时间。分析结果表明: 该模型提高飞机电气线路的安全性和可靠性, 可为军机电气线路的风险评估提供参考依据。

关键词: 比例危险模型; 线路失效; 风险评估

中图分类号: TJ85 **文献标志码:** A

Military Aircraft Wiring Failure Analysis Based on Proportional Hazard Models

Xiao Chuwan¹, Wang Xibin², Zhang Xiran³, Song Guangda⁴

(1. College of Aeronautical Fight & Service, Navy Aviation University, Yantai 264001, China;
2. College of Aeronautical Foundation, Navy Aviation University, Yantai 264001, China;
3. Locomotive Operation Team, No. 91498 Unit of PLA, Qinhuangdao 066000, China;
4. Aviation Equipment Measuring Station, Navy Aviation University, Yantai 264001, China)

Abstract: To resolve the short circuit and broken circuit failure of military aircraft wiring, wiring failure based on proportional hazard model is analyzed for the military aircraft. By analyzing the reason of wiring failure, the model of wiring failure is built for military aircraft and the parameters are estimated for the proportional hazard model. Survival analysis is carried out based on the SPSS software to compute the failure probability and to calculate the failure time of wirings. The analyzed results show that this model improves the safety and reliability of electrical wirings for aircraft and can provide the research references for the risk assessment of electrical wirings for military aircraft.

Keywords: proportional hazard model; wiring failure; risk assessment

0 引言

随着我军现役飞机使用年限的增长, 电线电缆故障问题日益突出: 某些线路由于布置在高振荡区域, 线路表皮磨损、电缆接头焊点脱落、电缆断裂; 某些线路由于使用环境等原因, 线路腐蚀、老化严重, 导致性能下降; 某些布置在发动机周围的耐高温线路, 出现了老化、绝缘受损, 甚至断路等故障。这些因素都可能会产生飞机线路故障, 导致线路所属系统失效, 影响飞机正常飞行训练任务, 甚至影响飞机飞行安全。

比例危险模型 (proportional hazard models, PHM) 是一种统计学中的生存模型, 由英国统计学家 David. Cox 于 1972 年提出, 最初被应用于医学统计、金融分析预警等领域^[1]。目前该模型在更广泛的领域得到了应用, 如: 周志才等将威布尔比例

危险模型用于船用柴油机视情维修决策, 建立了视情维修的最优维修策略模型^[2]; 洪东跑等利用比例风险模型描述产品可靠性水平与其工作环境因素的定量影响关系, 提出了一种可靠性综合评估的方法^[3]; 黄婷婷等采用了基于比例危险-比例优势模型的试验优化设计方法, 并应用该方法对加速寿命试验的优化设计进行仿真研究^[4]等。

笔者针对军机上常见的问题, 如线路短路和断路故障, 从环境温度、振动强度、是否存在腐蚀性液体等 13 个方面对可能导致飞机电气线路失效的因素进行研究, 分析各因素的影响机理和作用方式, 定义危险级别, 建立线路失效模型, 运用基于 SPSS 软件进行生存分析的比例危险模型, 计算电线的失效概率, 为飞机电气线路的风险评估提供了研究基础, 为开展飞机线路的整治工作提供了参考依据。

收稿日期: 2020-04-24; 修回日期: 2020-05-10

基金项目: 2017 年山东省自然科学基金 (ZR2017MF036); 2016 年军队军内科研项目资助

作者简介: 肖楚琬 (1985—), 男, 湖南人, 博士, 讲师, 从事飞机电气系统研究。E-mail: wangxin-bin@163.com。

1 军用飞机电线失效模型构建

1.1 军用飞机电线失效原因分析

导致电线失效的因素有电线直径、导体类型、

绝缘类型、线束长度、振动、作业温度与高度等诸多因素^[5]。表 1 列举了 13 个导致电线失效的因素并定义了危险级别。

表 1 导致电线失效的物理和环境因素

种类	变量	危险级别			
		0	1	2	3
电线特性	电线规格	4/0~8 AWG	10~16 AWG	18~22 AWG	24~26 AWG
	导体类型	铝	铜	高强度铜合金	
	绝缘层类型	聚酰亚胺	乙烯四氟乙烯	并非由环境产生	
	接线管	无	由环境产生		
线束特性	线束长度	>1.25 英寸	0.5~1.25 英寸	0.2~0.5 英寸	<0.2 英寸
	线束保护	未受保护	某等级的保护	受保护	
	线束曲率	低	高		
	线束方向	水平/垂直	纵向		
环境特性	线束密度	低	中	高	
	环境温度与压力	温和(压力与温度可控)	D1: 压力可控、温度不可控 D2: 压力与温度都不可控		D3: 高温, 压力不可控
	振动	无	低	中	高
	暴露于腐蚀性液体	无	有		
	暴露于导电性液体	无	有		

1.2 电线失效模型

由于机上电线的失效率与飞机上的许多环境因素有关, 所以失效危险即为环境因素的函数。考虑到环境因素, 计算电线失效概率密度函数。假定 T_g (电线短路失效的时间) 和 T_0 (电线断路失效的时间) 的概率密度函数为指数分布, 概率密度函数为

$$f(t_i | \lambda_i) = \lambda_i e^{-\lambda_i t_i} \quad (1)$$

其中: i 为不同的失效模式, 对应至电线失效模式为短路、断路失效; λ_i 为不同失效模式所对应的失效危险度。根据 PHM 模型, 电线的失效危险度

$$\lambda = e^{\beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \dots + \beta_n X_n} \quad (2)$$

其中: $X=(X_1, X_2, \dots, X_n)$ 为不同的环境变量; n 为选取的环境变量个数。只要通过数据分析与计算确定了不同环境因素所对应的 β , 就可求得电线的失效危险度 λ 。假定单个失效模式行为独立, 不论失效模式如何, 分析中每种失效模式可单独考虑。

军用飞机所要完成的任务繁琐, 任务系统多, 飞机内环境比民用飞机更复杂, 导致飞机内电线有不同的工作环境, 例如发动机仪表的部分线路需要从发动机舱连接到飞机座舱内, 几乎贯穿整个飞机机身, 工作环境差异大。失效危险度采用以下步骤^[6]计算:

1) 分析电线的工作环境。将工作环境分解为相对差别较小的 N 个区域, 确定每个区域内的电线长度 $l_i (i=1, 2, \dots, N)$ 。

2) 确定单个区域的环境变量(共 n 的环境变量, 主要包含电线特性、所在区域工作环境), 并定义电线的环境变量 $X_i (i=1, 2, \dots, R)$ 的值(短路/断路)。

3) 将 X_i 代入式(2), 分别计算电线断路和短路的失效危险度。

4) 确定电线的长度 l , 计算电线失效危险度 (m/h), 得到系统所使用定长电线的短路失效危险度 λ_g 和断路失效危险度 λ_0 。

5) 计算得到该电线的失效危险度

$$\lambda = \lambda_g + \lambda_0 \quad (3)$$

2 比例危险模型参数估计

讨论单个变量的情况。假设有 n 个实验数据, 数据由三元数组 (t_i, x_i, c_i) 表示。其中, t_i 表示从参加试验开始到记录数据的时间, x_i 表示该实验的变量的取值, c_i 表示其状态。

首先建立 n 个生存变量的分布密度函数。对于任意一组三元数, 其似然函数为

$$\begin{aligned} f(t_i, x_i, \beta)^{c_i} \cdot S(t_i, x_i, \beta)^{1-c_i} = \\ h(t_i, x_i, \beta)^{c_i} \cdot S(t_i, x_i, \beta)^{c_i} \cdot S(t_i, x_i, \beta)^{1-c_i} = \\ h(t_i, x_i, \beta)^{c_i} \cdot S(t_i, x_i, \beta) \end{aligned} \quad (4)$$

从而, 对于 n 个生存数据, 其似然函数为

$$I(\beta) = \prod_{i=1}^n h(t_i, x_i, \beta)^{c_i} \cdot S(t_i, x_i, \beta) \quad (5)$$

对 $I(\beta)$ 求对数, 得到其对数似然函数为

$$L(\beta) = \ln(I(\beta)) = \sum_{i=1}^n [c_i \ln(h(t_i, x_i, \beta)) + \ln(S(t_i, x_i, \beta))] = \sum_{i=1}^n [c_i \ln(h_0(t_i)) + \beta x_i + \ln(S_0(t_i))e^{\beta x_i}] \quad (6)$$

在使用 PHM 模型时，由于对 h_0 、 S_0 具体形式未知；因此，不能直接利用式(5)估计 β 。1993 年，Anderson、Bvoregan、Gill 和 Keiding 证明了使用部分和使用完全似然函数得到的估计值具有相同的分布性质。其部分似然函数为

$$L_p(\beta) = \prod_{i=1}^n \left(\frac{e^{\beta x_i}}{\sum_{j \in R(t_i)} e^{\beta x_j}} \right)^{c_i} \quad (7)$$

其中， $R(t_i)$ 表示在 t_i 仍正常工作的个体集合，但实验个体有失效的可能。

如果没有个体在同一时间失效， n 个个体中失效发生了 m 次，其相应正常工作时间从大到小依次为 $t_i, (i=1, 2, \dots, n)$ ，此时式(5)变为

$$L_p(\beta) = \prod_{i=1}^m \frac{e^{\beta x_i}}{\sum_{j \in R(t_i)} e^{\beta x_j}} \quad (8)$$

对数似然函数为

$$L_p(\beta) = \sum_{i=1}^m \left(\beta x_i - \ln \left(\sum_{j \in R(t_i)} e^{\beta x_j} \right) \right) \quad (9)$$

对 $L_p(\beta)$ 求相对于 β 的偏导数得：

$$\frac{\partial L_p(\beta)}{\partial \beta} = \sum_{i=1}^m \left(x_i - \frac{\sum_{j \in R(t_i)} x_j e^{\beta x_j}}{\sum_{j \in R(t_i)} e^{\beta x_j}} \right) = \sum_{i=1}^m \left(x_i - \sum_{j \in R(t_i)} k_{ij}(\beta) x_j \right) = \sum_{i=1}^m (x_i - \bar{x}_{ki}) \quad (10)$$

其中，

$$k_{ij}(\beta) = \frac{e^{\beta x_j}}{\sum_{j \in R(t_i)} e^{\beta x_j}}, \quad \bar{x}_{ki} = \sum_{j \in R(t_i)} k_{ij}(\beta) x_j$$

当式(10)取 0 时，即

$$\frac{\partial L_p(\beta)}{\partial \beta} = \sum_{i=1}^m (x_i - \bar{x}_{ki}) = 0 \quad (11)$$

可以解得 β 的最大似然估计 $\hat{\beta}^{[7]}$ 。

3 基于 SPSS 的电线失效计算

IBM 公司的 SPSS Statistics (statistical product and service solutions, SPSS) 软件具备统计学分析计算、数据挖掘、预测分析和决策支持等功能，已被广泛应用于自然科学、技术科学、社会科学的各个领域^[8]。笔者采用 SPSS 软件进行生存分析，以腐蚀液体对电线短路影响为例，计算电线的失效危

险度。

3.1 利用 Kaplan–Meier 生存曲线进行 PH 检验

飞机上有些电线的工作环境存在腐蚀性液体。该变量为二分类变量的一种。设有以下一组电线在单一环境中短路失效数据 (X_i, t_i, c_i) ，其中：

- 1) X_i 表示环境是否存在腐蚀性液体，电线未暴露于腐蚀性液体取值为 0，暴露于腐蚀性液体取值为 1；
- 2) t_i 为观察时间，飞行时间*为所取电线长度；
- 3) c_i 为示性变量，表示电线的具体状态，失效取 1，未失效取 0。

笔者利用 SPSS 中的 Kaplan–Meier 功能进行数据的 PH 检验。

3.2 Kaplan–Meier 生存曲线结果分析

首先，个案处理摘要表详细统计了表格中的数据，其中事件总数、删失事件数、删失率等数据得到了很好的体现；其次，获得生存表，其中的均值和中位数表记录了因素不同所对应数据的均值估计值、中位数估计值及相应的标准差和致信区间；接着整体比较表记录了采用 Log Rank 检验方法得到的结果，选用 Log Rank 检验对数据进行比较时，要求曲线不能交叉，如果曲线交叉表明存在某种混杂因素，此时应采用分层法或多因素法来进行校正；最后，获得生存函数图像^[9]。

图 1 为生存函数图像。该图像显示了不同取值情况下电线的累计生存函数，可以看出，2 条曲线无明显交叉。在观察时间大约 150 000 s 时，2 条曲线差值变大，符合腐蚀因素对电线的影 响。根据前面介绍的内容，该影响因素满足比例风险假设，可以运用 PHM 模型。

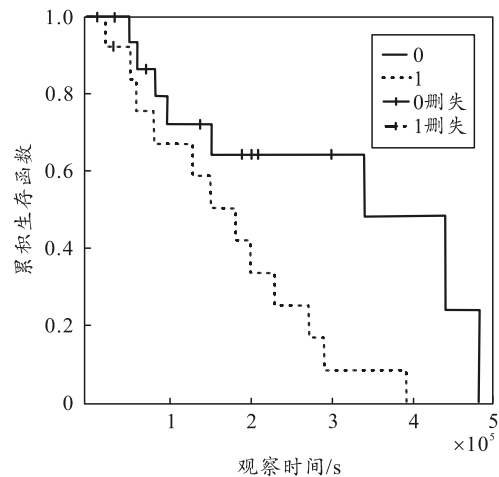


图 1 生存函数

3.3 PHM 模型建立与计算

在 SPSS 中选择分析/生存函数/Cox 回归，并对参数进行设置，建立 PHM 模型，经计算，运行结果如表 2。

表 2 方程中的变量

影响因素	B	SE	Wald	df	Sig.	exp(B)	95.0% CI 用于	
							下部	上部
是否暴露 腐蚀性液体	1.126	0.505	4.963	1	0.026	3.083	1.145	8.303

表中，B 值为该因素的对应 β 值，exp(B) 为该单位的相对危险度，意义为取值每增加 1，失效危险度增加 3.083 倍。95% 置信区间为 1.145~8.303。可以看出，电线暴露于腐蚀性液体对电线的短路有较大影响。

从图 2 可以看出，2 条曲线的斜率基本一致，即 X=0 和 X=1 的危险函数比 HR 为：

$$\frac{\Lambda(t|X=1)}{\Lambda_0(t)} = \text{const}。 \quad (12)$$

由于 HR 为常数不随时间变化，符合 PH 假设。

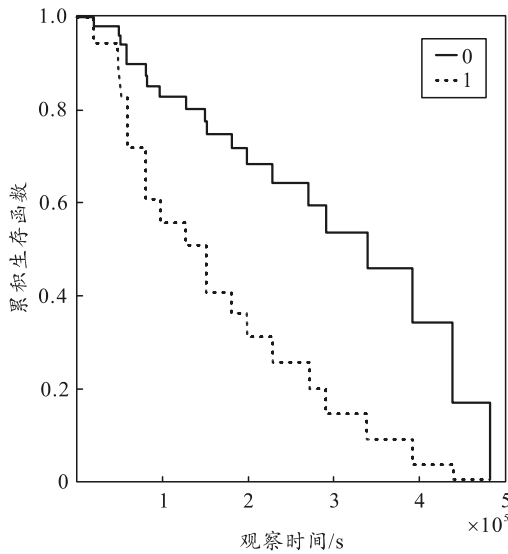


图 2 COX 生存函数

4 线路失效危险度的计算

任何其他因素都可定义为二分类变量和多分类变量。其他因素均可根据以上介绍进行检验与计算。按照上述分析方法可分别计算各影响因素对应的参数 β，以及各影响因素的危险度。将各 β 值代入式 (12)，即可算出电线的失效危险度。假设实验组与对照组电线在工作环境中，影响因素的取值及导致电线短路对应的 β 如表 3。

表 3 电线短路对应 X 与 β

实验组			对照组	
影响因素	X	β	影响因素	X
电线规格	1	-0.312	电线规格	0
导体类型	2	-0.212	导体类型	0
绝缘层类型	1	-0.314	绝缘层类型	0
接线管	1	-0.761	接线管	0
线束长度	2	-0.523	线束长度	0
线束保护	2	-0.743	线束保护	0
线束曲率	1	0.541	线束曲率	0
线束方向	1	0.103	线束方向	0
线束密度	2	0.285	线束密度	0
环境温度 与压力	3	0.786	环境温度 与压力	0
振动	2	0.692	振动	0
暴露于 腐蚀性液体	1	0.546	暴露于 腐蚀性液体	0
暴露于 导电性液体	1	0.437	暴露于 导电性液体	0

实验组电线相对于对照组电线的短路失效危险度为：

$$\lambda_g = e^{-0.312 \times 1 + (-0.212 \times 2) + \dots + 0.437 \times 1} = e^{2.496}。 \quad (13)$$

从表 3 可以看出：

- 1) 导致电线短路失效的因素中，环境温度与压力、振动和暴露于腐蚀性液体影响最为明显，影响较小的因素为线束方向和线束密度；
- 2) 线束保护与接线管 2 个因素可以很好地防止电线出现短路失效。

假设实验组与对照组电线工作环境中的影响因素的取值及对电线断路对应的 β 如表 4。

表 4 电线断路对应 X 与 β

实验组			对照组	
影响因素	X	β	影响因素	X
电线规格	1	-0.633	电线规格	0
导体类型	2	-0.312	导体类型	0
绝缘层类型	1	-0.414	绝缘层类型	0
接线管	1	-0.237	接线管	0
线束长度	2	-0.265	线束长度	0
线束保护	2	-0.361	线束保护	0
线束曲率	1	0.681	线束曲率	0
线束方向	1	0.123	线束方向	0
线束密度	2	0.305	线束密度	0
环境温度 与压力	3	0.536	环境温度 与压力	0
振动	2	0.711	振动	0
暴露于 腐蚀性液体	1	0.532	暴露于 腐蚀性液体	0
暴露于 导电性液体	1	0.353	暴露于 导电性液体	0

实验组电线相对于对照组电线的断路失效危险度为：

$$\lambda_0 = e^{-0.633 \times 1 + (-0.312 \times 2) + \dots + 0.353 \times 1} = e^{2.069}。 \quad (14)$$

control strategy for an upper limb rehabilitation exoskeleton[J]. *Mechatronics*, 2018, 53: 85-94.

[7] HE H, KIGUCHI K. A Study on EMG-Based Control of Exoskeleton Robots for Human Lower-limb Motion Assist[C]. *Information Technology Applications in Biomedicine*, 2007. ITAB 2007. 6th International Special Topic Conference on. IEEE, 2007: 292-295.

[8] ZHU J Y, WANG Y, ZHOU H. Human-machine coupling control of exoskeleton intelligent load carry robot[C]. *International Conference on Mechatronics & Automation*

IEEE, 2012: 268-271.

[9] GILBERT M, ZHANG X, GUI Y. Modeling and design on control system of lower limb rehabilitation exoskeleton robot[C]. *International Conference on Ubiquitous Robots & Ambient Intelligence*, 2016.

[10] 熊一帆, 曹维清, 周克栋. 六足机器人爬楼步态与仿真[J]. *兵工自动化*, 2019, 38(3): 74-79.

[11] 周海涛. 下肢外骨骼康复机器人结构设计及控制方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.

(上接第 75 页)

从表 4 可以看出:

1) 导致电线断路失效的因素中, 振动、线束曲率和环境温度与压力影响最为明显, 影响较小的因素为线束方向和线束密度;

2) 电线规格和绝缘层类型 2 个因素可以很好地防止电线出现断路失效。

电线总的失效危险度

$$\lambda = \lambda_g + \lambda_o = e^{2.496} + e^{2.069} = 20.051. \quad (15)$$

实验组电线相对于对照组电线的失效危险度增加了 20.051 倍。

通过计算出的基础危险函数 $\Lambda_0(t)$, 结合求得的 $e^{X^T\beta}$, 就可推算出电线的大致失效时间。

5 结论

笔者通过分析导致军用飞机电线失效的可能因素, 定义了其危险等级, 建立了线路失效的比例危险模型, 基于 SPSS 统计软件计算出生存函数, 计算出各因素的相对危险度, 对部队飞机线路方面的设计和维护起到了一定的指导意义。

参考文献:

[1] DAVID M, YIN B C, MAHESH K P. *Survival Analysis: A Practical Approach*[M]. John Wiley & Sons, Ltd, 2006: 72.

[2] 周志才, 刘东风, 石新发. 运用比例危险模型的船用柴油机视情维修决策[J]. *海军工程大学学报*, 2014, 26(6): 69-72.

[3] 洪东跑, 马小兵, 赵宇. 基于比例风险模型的可靠性综合估计[J]. *系统工程与电子技术*, 2010, 32(10): 2132-2135.

[4] 黄婷婷, 姜同敏. 基于比例危险-比例优势模型的加速寿命试验设计[J]. *北京航空航天大学学报*, 2010, 36(5): 570-579.

[5] 杨林, 郭强, 池巧君. 民用飞机导线失效率计算方法研究[J]. *科技信息*, 2013(18): 512-513.

[6] LINZEY W G, TRASKOS M G, MAZZUCHI T A. *Development of the Electrical Wiring Interconnection System Risk Assessment Tool*[R]. Federal Aviation Administration, 2010.

[7] 李元章, 何春雄. *实用生存模型: 不完全数据分析*[M]. 广州: 华南理工大学出版社, 2015: 60.

[8] 张文彤, 钟云飞. *IBM SPSS 数据分析与挖掘实战案例精粹*[M]. 北京: 清华大学出版社, 2013: 77.

[9] 李建春, 周克栋, 曹维清, 等. 一种指纹图像置信阈值极值化处理算法[J]. *兵工自动化*, 2019, 38(2): 64-67.