

基于多态共因失效的助航灯光供电系统可靠性分析

侯启真, 候祎飞

(中国民航大学 电子信息与自动化学院, 天津 300300)

摘要: 随着我国机场规模和航班运行时长的快速提升, 对助航灯光供电系统的可靠性要求越来越高, 文中针对助航灯光供电系统提出了一种基于多态共因失效的可靠性分析模型; 首先根据系统中多重串联元件间故障传递关系建立元件的多态模型, 其次针对传统共因失效 β 因子的单一赋值问题, 引入结构修正因子 C , 建立助航灯光冗余供电系统的改进 β 因子共因失效分析模型; 并以国内典型机场灯光供电系统为例, 通过建立共因失效前后的传统、多态贝叶斯模型和计算可靠度, 证明多态共因失效贝叶斯模型可正确描述灯光供电系统, 且模型复杂度更低, 更接近系统实际情况; 最后利用贝叶斯的反向推理找到助航灯光供电系统薄弱环节。

关键词: 多态共因失效; 贝叶斯网络; β 因子模型; 助航灯光; 供电可靠性

Reliability Analysis of the Aviation Ground Lighting Power Supply System Based on Multi-state and Common Cause Failure

HOU Qizhen, HOU Yifei

(College of Electronic Information and Automation, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: With the rapid increase in the scale of airports and the length of flight operations in China, the reliability of the power supply system for aviation ground lighting is becoming more and more demanding. In this paper, a reliability analysis model based on multi-state common cause failure is proposed for the aviation ground lighting power supply system. Firstly, according to the fault transmission relationship among the multiple series component in the system, the multi-state model of components is established. Secondly, for the single assignment problem of the traditional common cause failure β -factor, a structural modification C -factor is introduced. An improved model for the β -factor common-cause failure analysis is established in the redundant aviation ground lighting power supply system. The domestic typical airport lighting power supply system is taken as an example, by establishing traditional, multi-state Bayesian model and calculating reliability before and after common cause failure. It is proved that the multi-state common cause failure Bayesian model can correctly describe the aviation ground lighting power supply system. The model complexity is lower and closer to the actual situation of the system. Finally, The Bayesian reverse reasoning is used to find the weak link of the aviation ground lighting power supply system.

Keywords: multi-state common cause failure; Bayesian network; β -factor model; navigational light; power supply reliability

0 引言

机场目视助航灯光是低能见度或夜间条件下, 保障飞机安全起降的重要基础设施, 其安全、可靠地运行直接关系到民航安全乃至机上人员的生命财产安全, 作为助航灯具直接电力来源的供电系统是保证其可靠、有效运行的关键。随着我国机场规模和航班运行时长的快速提升, 留给助航灯光系统的维护时间越来越短, 对可靠性要求越来越高, 运行维护规程^[1]和飞行区技术标准^[2]规定, 助航灯属于一级负荷中特别重要负荷, 关键灯具应急电源切换时间不得超过 1 s, 对灯光供电系统的可靠性评估势在必行。

系统的可靠性研究常采用可以进行后验推理并找到系统薄弱环节的贝叶斯网络模型^[3-4], 多从元件状态建模^[4-5]和系统建模^[6]两方面进行分析。目前已有学者在电网^[8]、铁

路^[7-9]、飞机电源^[10]等方向进行了供电可靠性研究。而助航灯光供电系统是市电、油机冗余供电, 不间断电源 (UPS, uninterruptible power system) 作为应急电源, 在市电、油机切换时保障灯具正常运行。系统中元件多为串联关系, 不同功能元件受其前面元件的影响存在多种状态, 且具有相同功能或在同一配电柜中元件存在共因失效 (CCF, common cause failure), 这些问题的存在会降低助航灯光供电系统的电能质量和可靠性。当前已有文献 [12-13] 分别针对灯光系统中存在的高次谐波和三相不平衡问题进行治理和解决, 提高了助航灯光的供电质量, 但针对助航灯光冗余供电系统中存在的多态共因失效问题的可靠性研究尚未见相关文献。

针对系统存在的共因失效, 大多使用 β 因子模型^[14]进

收稿日期: 2022-03-03; 修回日期: 2022-03-31。

作者简介: 侯启真(1966-), 女, 天津人, 副教授, 硕士研究生导师, 主要从事助航灯光、机场电气、智慧机场等方向的研究。

候祎飞(1995-), 女, 河北邯郸市人, 硕士研究生, 主要从事机场助航灯光系统方向的研究。

引用格式: 侯启真, 候祎飞. 基于多态共因失效的助航灯光供电系统可靠性分析[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(8): 269-276.

行分析, β 因子值凭研究人员主观赋值, 其值单一, 忽略了不同冗余结构共因失效对系统的影响程度。文献[15-16]研究了仪器仪表领域存在的共因失效问题, 有文献提出了随机共因失效^[17]和贝叶斯网络模型^[18]分析多态复杂系统, 此外有文献提出不同冗余结构的共因失效影响的量化方法^[20-20]。但当前未有文献对影响助航灯光供电系统可靠性的多态共因失效进行精确建模。

文中依据某中型机场助航灯光供电系统, 首先考虑到系统存在的多重串联子系统, 建立系统多态贝叶斯模型。其次针对系统存在的共因失效问题, 引入结构修正因子, 构建针对助航灯光供电系统的改进 β 因子模型, 并将其引入多态贝叶斯模型中, 建立针对助航灯光供电系统的多态共因失效贝叶斯模型。再对系统进行可靠度计算, 对比考虑共因失效前后传统和多态贝叶斯模型计算结果, 验证文中方法的正确性。最后利用贝叶斯的反向推理, 找到助航灯光供电系统薄弱环节。

1 助航灯光供电系统多态贝叶斯模型

1.1 多重串联贝叶斯网络模型

图 1 为国内某中型机场助航灯光供电系统典型模型, 该系统由多元件串、并联构成。对该灯光供电系统中由 5 个元件串联的子系统建立其贝叶斯网络如图 2 所示。各根节点间为“或”逻辑关系, 节点 T 的条件概率表 (CPT, conditional probability table) 中独立概率参数个数为 2^5 。

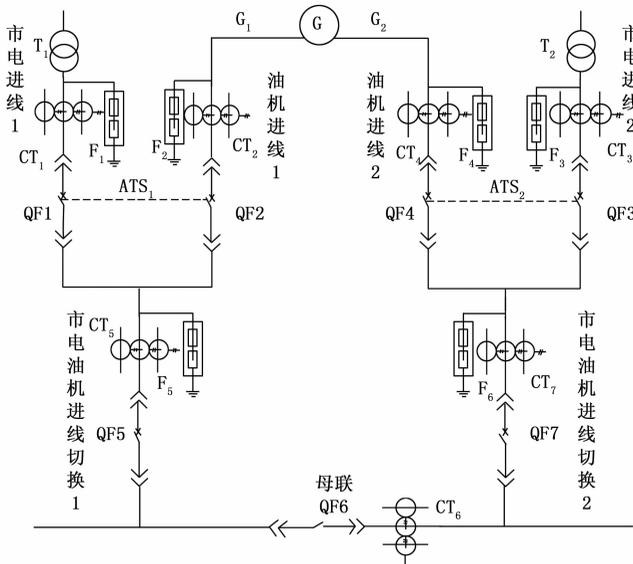


图 1 某中型机场助航灯光供电系统

根据模型复杂度公式: $O(m * \exp(n))$, 其中 n 为贝叶斯模型中根节点个数, m 为所有节点个数。则该贝叶斯网络的复杂度为: $O(6 * \exp(5))$ 。

1.2 改进的助航灯光供电系统多态贝叶斯模型构建

常见的供电系统可靠性分析中, 将元件视为“故障”和“正常”两种状态。由于助航灯光供电系统的特殊性, 系统中某些元件会出现“非物理性故障”状态: 元件本身无故障, 但其上游元件的故障导致该元件误动作。将系统

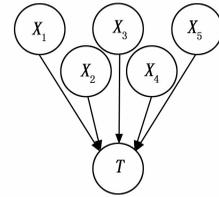


图 2 多重串联贝叶斯网络

中下游元件的“故障”状态分为两类: 由上游元件故障导致的“非物理性故障”和该元件自身物理损伤引起的“物理性故障”。

通过对助航灯光供电系统中主要元件进行失效原理分析, 获知各元件对下游元件的影响如表 1 所示。分别用“0”、“1”和“2”态表示下游元件的“正常”、“物理性故障”和“非物理性故障”状态。

表 1 下游元件状态

元件名称	下游元件状态	元件名称	下游元件状态
变压器 T	(0,1,2)	电流互感器 CT	(0,1,2)
油机 G	(0,1,2)	断路器 QF	(0,1)
避雷器 F	(0,1)		

建立助航灯光供电系统多态贝叶斯模型的步骤如下:

1) 按系统中元件串联顺序进行排序, 并将所有元件集合为 $Q(X_i)$ 。

2) 对 $Q(X_i)$ 中第一个元件建立其贝叶斯网络节点 X_1 , 由于节点 X_1 前无其它节点, 因此其状态为: “0”态和“1”态, 不存在“2”态。其 CPT 如表 2 所示。

表 2 节点 X_1 的 CPT

X_1	$P(X_1)$
0	λ_x
1	$1 - \lambda_x$

3) 根据 $Q(X_i)$ 中其他元件的状态建立对应贝叶斯网络节点, 对于二态节点, 只建立其“0”、“1”态模型; 对于三态节点, 建立其“0”、“1”和“2”态模型, 由于多态贝叶斯模型中是将所有节点首尾相连, 所有中间节点都会受前一节点状态的影响, 其 CPT 如表 3 所示。

表 3 中间节点 X_i 的 CPT

X_{i-1}	X_i	$P(X_i X_{i-1})$
0	0	$1 - \lambda_x$
0	1	λ_x
0	2	0
1	0	0
1	1	λ_x
1	2	$1 - \lambda_x$
2	0	0
2	1	λ_x
2	2	$1 - \lambda_x$

4) 根据“或”、“与”逻辑及与其相连的前一节点 X_i 状态, 建立与之唯一对应的中间节点 M_i , 其 CPT 如表 4 所示。

表 4 “或”、“与”逻辑的 CPT

X_i	M_i	$P(M_i X_i)$	
		或门	与门
0	0	1	1
0	1	0	1
1	0	0	1
1	1	1	0
2	0	1	1
2	1	0	1

5) 建立多态贝叶斯模型, 图 2 等价的多态贝叶斯网络模型如图 3 所示。

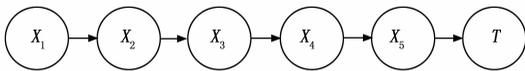


图 3 多态贝叶斯网络

从助航灯光供电系统多态贝叶斯网络建模过程可知, 各节点状态仅与其上游节点状态相关, 仅需分析上下游节点间的概率逻辑关系, 是一种局部建模方法。图 3 所示的多态贝叶斯网络复杂度为: $O(7 * \exp(1))$, 相比传统贝叶斯网络模型, 多态贝叶斯模型复杂度从指数阶降为线性阶。

2 助航灯光供电系统共因失效模型

针对助航灯光供电系统中存在的共因失效问题, 提出一种改进的 β 因子模型。图 4 为灯光供电系统的共因失效分类。

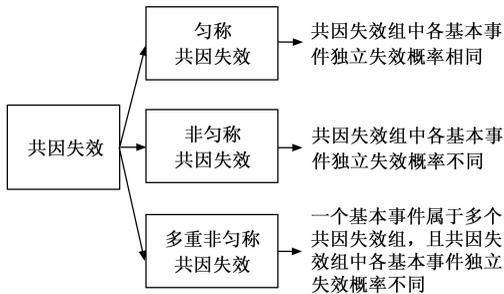


图 4 共因失效分类

2.1 灯光供电系统共因失效组的建立

对助航灯光供电系统中存在的多重非匀称共因失效进行共因失效组建立。如图 5 所示, 当元件 A 与 B、C 分别构成两个互斥共因失效组, C_{AB} 、 C_{AC} 分别表示元件 A 与 B、C 间的共因失效。由于元件 A 属于两个共因失效概率不同的共因失效组, 此时元件 A 存在多重非匀称共因失效, 根据公式 (1) 可得元件 A 的失效概率为:

$$P_T(A_0) = P_0(A_0) + P(C_{AB}) + P(C_{AC}) \quad (1)$$

其中: $P_T(A_0)$ 和 $P_0(A_0)$ 分别为元件 A 的总失效概率和独立失效概率。

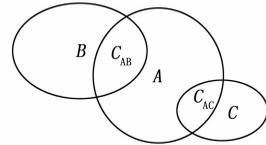


图 5 多重非匀称共因失效

此外在助航灯光供电系统中, 有多个不同故障率的串联元件处于同一配电柜中, 其间存在共因失效且共因失效概率 $P(C_{xyz})$ 相同, 将这些元件看作一个整体, 建立非匀称共因失效组。如图 6 所示, 将元件 X、Y、Z 看作模块 A, 则 A 的失效概率为:

$$P(A) = P(X) + P(Y) + P(Z) + P(C_{xyz}) \quad (2)$$

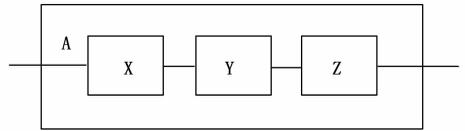


图 6 串联系统等效结构图

2.2 改进灯光供电系统 β 因子模型

在助航灯光供电系统中, 元件的失效率 λ 为独立失效率 λ_{ind} 与共因失效率 λ_{cef} 之和, 元件的相关标准或文献中给出的失效率一般为独立失效率, 无法直接计算出 β 因子的值。为了对 β 因子进行精确赋值, 根据助航灯光供电系统实际结构和运行状况, 建立针对助航灯光供电系统共因失效的改进 β 因子评价模型, 根据 β 因子评价表中 S 的值, 得到表 5 所示的 β 因子值。建立针对助航灯光供电系统多重非匀称共因失效的改进 β 因子模型, 以区分系统中共因失效事件对不同元件的影响程度。

表 5 β 因子值

S 值	β 因子值/%	S 值	β 因子值
$S \geq 120$	1	$58 \leq S < 61$	6
$70 \leq S < 120$	2	$55 \leq S < 58$	7
$67 \leq S < 70$	3	$52 \leq S < 55$	8
$64 \leq S < 67$	4	$48 \leq S < 52$	9
$61 \leq S < 64$	5	$S < 48$	10

此外, 在 β 因子模型的基础上, 引入结构修正因子 C 分析系统中多重非匀称共因失效率:

$$\lambda_C = C * \beta * \lambda \quad (3)$$

2.3 结构修正因子 C 的取值

助航灯光供电系统由市电和油机冗余供电, 引入结构修正因子 C 可以使共因失效分析结果更加贴近系统实际冗余运行方式。若某助航灯光供电系统由 N 个如图 6 所示的串联子系统冗余组成, 将 N 个子系统中只要有一个子系统能正常工作即系统为正常状态, 表示为“1ooN”冗余系统。

对于由 A_1 、 A_2 组成的 1oo2 双重冗余系统, β 因子为两个子系统发生共因失效的概率, 则这两个子系统的共因失效率为 $\lambda_{cef} = \beta\lambda$, $\beta \in [0, 1]$, 双重冗余结构 1oo2 的失效率

为 $\lambda_{1002} = \lambda_{cef} = \beta\lambda$ ，结合公式 (3) 可知 $C_{1002} = 1$ 。

对于由 A_1 、 A_2 、 A_3 构成的三重冗余系统，令 β_1 为其中两个子系统发生共因失效时第三个子系统也发生共因失效的概率，这 3 个子系统共因失效率为 $\lambda_{cef} = \beta_1\lambda$ ，则三重冗余结构 1003 的失效率为 $\lambda_{1003} = \lambda_{cef} = \beta_1\lambda$ ， $\beta_1 \in [0, 1]$ 。当 $\beta_1 = 1$ 时，表示两个子系统发生共因失效时，第三个子系统也发生共因失效，此时 $C_{1003} = 1$ 。但多重冗余系统中，两个子系统发生共因失效时，第三个子系统不一定发生失效，且其发生失效的概率通常难以确定。取 $\beta_1 = \frac{3-1}{3+1} = 0.5$ 时，可得到 $C_{1003} = 0.5$ 。

同理，可以推广至 100N ($N \geq 3$) 冗余系统，令 K ($K \geq 2$) 为冗余系统中 K 个子系统发生共因失效时，第 $K+1$ 个子系统也发生共因失效的概率，则对于 100N 冗余系统的共因失效结构修正因子可表示为：

$$C_{100N} = \frac{N-1}{N+1} C_{100K} \quad (4)$$

其中： $N = K + 1$ ，则不同冗余系统的结构修正因子 C_{100N} 取值如表 6 所示。

表 6 100N 冗余系统 C 取值

100N	N			
	2	3	4	5
C_{100N}	$C_{1002} = 1$	$C_{1003} = 0.5$	$C_{1004} = 0.3$	$C_{1005} = 0.2$

3 算例分析

3.1 系统多态贝叶斯

以图 1 为例，进行供电可靠性分析。首先考虑系统的结构及运行方式，同时还需要充分了解系统中各元件可靠性模型及故障形式。在综合考虑到供电系统主要设备的故障率往往较低，而通过统计方法得到的可靠性参数误差对系统可靠性的影响可能会更大，文章以国内某中型机场灯

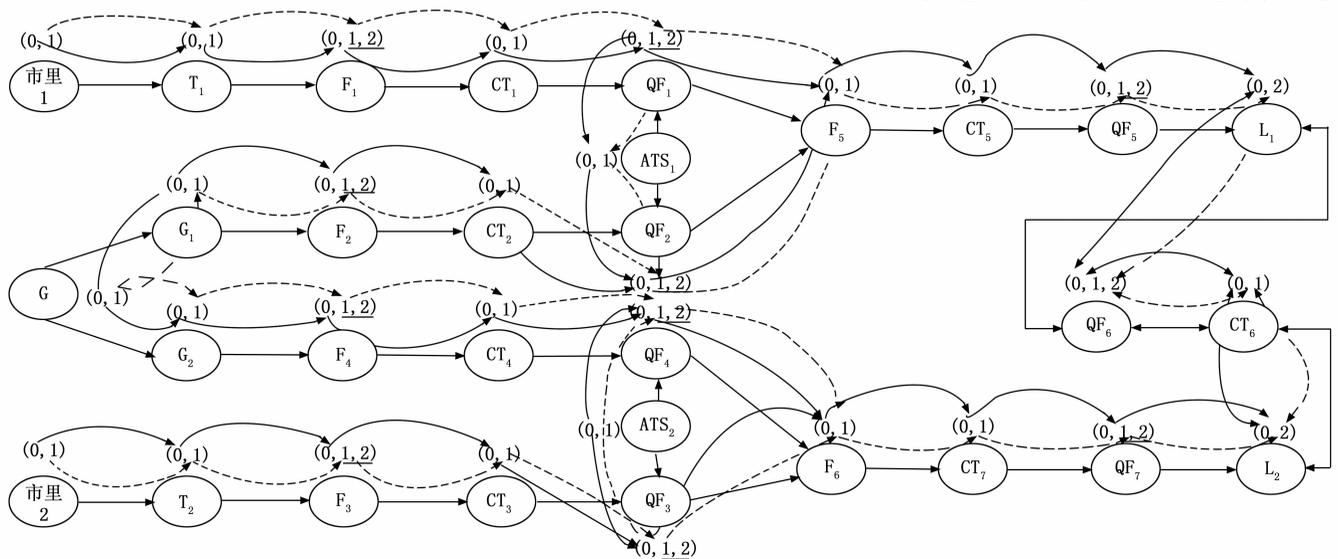


图 7 故障传播路径

光站助航灯光供电系统的实际运行情况及设备厂家及相关标准、文献提供的元件、设备失效率如表 7 所示。

在计算过程中假设所有元件均处于寿命中期的偶然故障区，即失效率为常数，分析系统中多态故障传播路径如图 7 所示，其中实线为功能传播路径，虚线为故障传播路径。

表 7 元件失效率

元件	失效率/h	元件	失效率/h
油机	4.0E-04	变压器	5.555 56E-06
油机开关	2.74E-06	断路器	1.934E-05
ATS	1.075E-05	电流互感器	1.418 21E-05
避雷器	1.0E-06	市电	3.22E-05

对于图 7 中市电进线 1 段故障传播路径描述为：市电 1 物理性故障与 T_1 物理性故障无关； T_1 物理性故障与 F_1 物理性故障无关，但 T_1 的物理性故障会引起 F_1 的非物理性故障； F_1 的非物理性故障及其自身的物理性故障均可导致 CT_1 的物理性故障； CT_1 的物理性故障与 QF_1 物理性故障无关，但会引起 QF_1 的非物理性故障。子系统节点 L_1 表示低压母线 1 段，其仅有正常的“0”态和表示该节点故障的“2”态。由图 7 中各曲线连接关系可知，非物理性故障状态的引入可使系统功能结构图从故障角度、功能角度均得到合理解释。

将图 7 转化为传统贝叶斯模型如图 8 (a) 所示，并建立其等价多态贝叶斯模型如图 8 (b) 所示。模型中各节点编号及名称如表 8 所示。

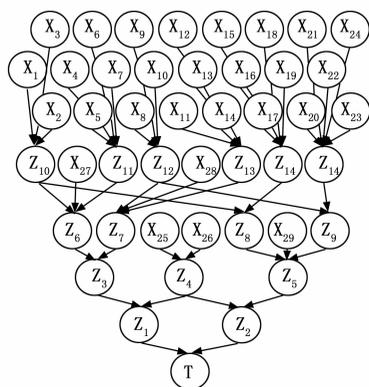
3.2 系统多态共因失效贝叶斯模型

在对助航灯光供电系统进行共因失效分析时，将具有相同冗余功能的元件放入同一共因失效组中，并根据 β 因子评价表确定各共因失效组的 β 因子值，如表 9 所示。

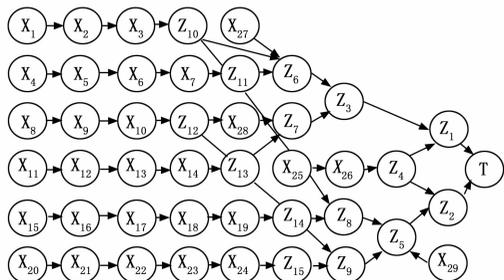
市电 1、2 和油机的进线 1、2 组成 1004 供电冗余系统，

表 8 贝叶斯模型的节点

编号	节点名称	编号	节点名称	编号	节点名称	编号	节点名称
T	低压母线失电	Z ₁₂	电源切换 2 故障	X ₈	F6 故障	X ₁₉	ATS1 故障
Z ₁	市电供电故障	Z ₁₃	市电 2 段故障	X ₉	CT7 故障	X ₂₀	G2 开关故障
Z ₂	油机供电故障	Z ₁₄	油机 1 段故障	X ₁₀	QF7 故障	X ₂₁	F4 故障
Z ₃	市电进线失电	Z ₁₅	油机 2 段故障	X ₁₁	T2 故障	X ₂₂	CT4 故障
Z ₄	低压母联故障	X ₁	F5 故障	X ₁₂	F3 故障	X ₂₃	QF4 故障
Z ₅	油机进线失电	X ₂	CT5 故障	X ₁₃	CT3 故障	X ₂₄	ATS2 故障
Z ₆	市电进线 1 失电	X ₃	QF5 故障	X ₁₄	QF3 故障	X ₂₅	QF6 故障
Z ₇	市电进线 2 失电	X ₄	T1 故障	X ₁₅	G1 开关故障	X ₂₆	CT6 故障
Z ₈	油机进线 1 失电	X ₅	F1 故障	X ₁₆	F2 故障	X ₂₇	市电 1 故障
Z ₉	油机进线 2 失电	X ₆	CT1 故障	X ₁₇	CT2 故障	X ₂₈	市电 2 故障
Z ₁₀	电源切换 1 故障	X ₇	QF1 故障	X ₁₈	QF2 故障	X ₂₉	油机故障
Z ₁₁	市电 1 段故障						



(a) 传统贝叶斯模型



(b) 改进多态贝叶斯模型

图 8 助航灯光供电系统贝叶斯模型

当其中任一供电子系统能正常供电就可正常输出至低压母线。在这 4 条供电子系统中, 均包括冗余元件 F、CT、QF 组成的串联子系统, 将其作为一个整体 A, 将市电 1、油机进线 1、市电 2、油机进线 2 分别看作 A₁、A₂、A₃ 和 A₄ 四个冗余模块, 由于这 4 个模块中所包括的元件种类和作用均相同, 认为该 4 个模块的独立失效概率相同。此外, 对于多重共因失效冗余系统, 根据表 6 取 C₁₀₀₄ = 0.3, 以 A₁ 为例说明模块 A₁ 的失效概率为:

$$P_{A_1} = (C_{1004} * \beta_{C_1} + \beta_{C_2}) * (P_{F_1} + P_{CT_1} + P_{QF_1}) + P_{A_1, ind} \quad (5)$$

其中: A₁ 模块的独立失效率为:

$$P_{A_1, ind} = P_{F_1, ind} + P_{CT_1, ind} + P_{QF_1, ind} \quad (6)$$

在公式 (5) 和 (6) 中, β_{C₁} 和 β_{C₂} 分别表示 4 个冗余模块的共因失效因子及 A₁ 模块中 3 个元件间共因失效因子。

根据供电方式对每个模块中元件进行共因失效分析。如元件 F₁ 在市电 1、2 单母线分段供电时, 与 F₃ 具有同一冗余功能, 二者间存在共因失效; 与 CT₁ 和 QF₁ 处于同一配电柜中, 其三者间也存在共因失效。在市电退出运行、由油机进行供电时, 对系统进行共因失效分析时不再需要考虑元件 F₁。由此得到位于同一配电柜中的共因失效组如表 10 所示。

表 9 具有冗余功能的共因组

编号	元件	共因失效形式	β 因子值/%	失效率/h
C1	F5, F6	非匀称	3	3.000E-08
C2	CT5, CT7	非匀称	3	4.254 63E-07
C3	QF5, QF7	非匀称	3	5.802E-07
C4	T1, T2	匀称	2	1.111 11E-07
C5	F1, F3	非匀称	3	3.000E-08
C6	CT1, CT3	非匀称	3	4.254 63E-07
C7	QF1, QF3	非匀称	3	5.802E-07
C8	G1, G2	匀称	3	1.200E-05
C9	F2, F4	非匀称	3	3.000E-08
C10	CT2, CT4	非匀称	3	4.254 63E-07
C11	QF2, QF4	非匀称	3	5.802E-07
C12	ATS1, ATS2	匀称	4	4.300E-07

表 10 同一配电柜中的共因失效组

共因组编号	元件	共因失效形式	β 因子值/%	失效率/h
C13	QF6, CT6	匀称	4	1.340 88E-06
C14	F1, CT1, QF1	非匀称	4	4.142 65E-07
C15	F3, CT3, QF3	非匀称	4	4.142 65E-07
C16	F2, CT2, QF2	非匀称	4	1.380 88E-06
C17	F4, CT4, QF4	非匀称	4	1.380 88E-06
C18	F5, CT5, QF5	非匀称	4	1.380 88E-06
C19	F6, CT7, QF7	非匀称	4	1.380 88E-06

助航灯光供电系统正常情况下是市电 1、2 单母线分段供电互为后备，与一台油机的两路进线并联冗余，油机两路进线为后备电源，因此市电供电电子系统为 1oo4 冗余系统，根据表 6 选取 $C_{1oo4} = 0.3$ ，此时市电 1、2 冗余子系统的共因失效组 C_{14} 、 C_{15} 的共因失效率为：

$$\lambda_{C_{14}} = \lambda_{C_{15}} = C_{1oo4} * \beta * (\lambda_{F_1} + \lambda_{CT_1} + \lambda_{QF_1}) \quad (7)$$

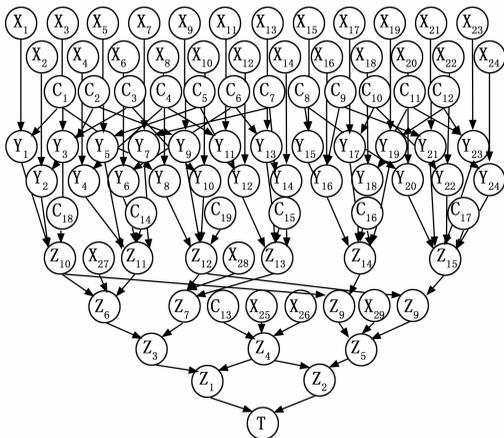
当两路市电均退出运行，由油机两路进线单母线分段对低压母线进行并联冗余供电，互为后备，构成 1oo2 冗余系统，此时油机进线 1、2 冗余子系统的共因失效组 C_{16} 、 C_{17} 的共因失效率为：

$$\lambda_{C_{16}} = \lambda_{C_{17}} = C_{1oo2} * \beta * (\lambda_{F_2} + \lambda_{CT_2} + \lambda_{QF_2}) \quad (8)$$

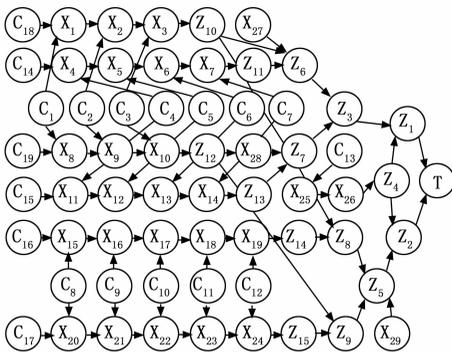
此外共因失效组 C_{18} 、 C_{19} 分别为助航灯光供电系统的两路市电油机切换子系统的共因失效组，该两路切换子系统构成 1oo2 冗余系统，根据表 6 选取 $C_{1oo2} = 1$ 。共因失效组 C_{18} 、 C_{19} 的共因失效率为：

$$\lambda_{C_{18}} = \lambda_{C_{19}} = C_{1oo2} * \beta * (\lambda_{F_3} + \lambda_{CT_3} + \lambda_{QF_3}) \quad (9)$$

结合上述助航灯光供电系统共因失效分析，分别建立如图 9 所示的考虑共因失效的传统贝叶斯模型和多态贝叶斯模型。图中各节点同表 8 中节点及表 9、10 中各共因失效组一一对应。



(a) 传统共因失效贝叶斯模型



(b) 多态共因失效贝叶斯模型

图 9 助航灯光供电系统共因失效贝叶斯模型

3.3 系统可靠性分析

分别对助航灯光供电系统的 4 种贝叶斯网络模型进行

分析，图 8 (a) 中根节点最多的中间节点是 Z_{14} 和 Z_{15} ，网络推理复杂度为 $O(m * \exp(n))$ ， $m=45$ ， $n=5$ ，其中 m 为贝叶斯模型中总节点个数， $n = \max\{\text{各中间节点和叶节点的父节点数目}\}$ ，图 8 (b) 中 Z_{14} 和 Z_{15} 都只有一个父节点，由节点 Z_5 和 Z_6 决定网络推理复杂度为： $m=45$ ， $n=3$ ，复杂度显著降低，大大简化了传统贝叶斯计算过程。其次，图 8 (a) 传统贝叶斯模型的建立依赖于系统整体故障连锁关系， Z_{14} 节点概率参数为 $2^5=32$ 个，而图 8 (b) 多态贝叶斯模型的构建只需要理解上下游节点关系，减少模型参数的同时，仅需局部把握系统中上下游元件间连锁故障关系，节点 Z_{14} 参数仅为 5 个。

同理对图 9 与图 8 进行对比分析，得到表 11 所示的贝叶斯网络推理复杂度对比。

表 11 不同建模方式复杂度比较

建模方法	决定复杂度节点	$O(m * \exp(n))$	
		m	n
传统贝叶斯	Z_{14} 和 Z_{15}	45	5
多态贝叶斯	Z_5 和 Z_6	45	3
传统共因失效贝叶斯	Z_{14} 和 Z_{15}	64	6
多态共因失效贝叶斯	Z_5 和 Z_6	64	3

假设助航灯光供电系统元件的可靠度函数服从指数分布，且系统平均每天运行 17 小时，运行一个月即 $t=510 h$ 时，得到图 8 和图 9 所示 4 种贝叶斯模型节点 T 的失效率并根据公式 (10) 计算系统可靠度，计算结果如表 12 所示。

$$R(t) = \exp(-\lambda t) \quad (10)$$

表 12 不同建模方式可靠度

建模方法	节点 T 失效率 λ	可靠度/%
传统贝叶斯	2.378 222 3E-08	99.998 787 1
多态贝叶斯	2.378 222 3E-08	99.998 787 1
传统共因失效贝叶斯	2.549 991 9E-08	99.998 699 5
多态共因失效贝叶斯	2.549 991 9E-08	99.998 699 5

从表 12 的 4 种贝叶斯网络模型的系统节点计算结果可知，多态贝叶斯模型计算结果均与传统贝叶斯计算结果一致，验证了本文提出的多态共因失效贝叶斯模型的正确性。将贝叶斯网络模型的系统节点 T 的失效率为 1，根据贝叶斯反向推理，可得到考虑共因失效前后系统故障时多态贝叶斯网络中各节点的失效概率如表 13 所示。

由表 13 各节点后验概率可知，无论是否考虑共因失效，节点 X_{25} 、 X_{29} 和 X_{26} 的失效率都较大，根据失效率从高到低进行排序： $QF_6 > \text{油机} > CT_6$ ，这 3 个设备为助航灯光供电系统的薄弱环节。此外由于考虑进共因失效的影响，同一节点的后验概率在多态共因失效贝叶斯网络比多态贝叶斯网络中要小，共因失效组的后验概率属于共因失效组中元件后验概率的一部分，如中间节点 Z_1 的后验概率：多

表 13 各节点的后验概率

多态贝叶斯				多态共因失效贝叶斯					
节点	后验概率%	节点	后验概率%	节点	后验概率%	节点	后验概率%	共因组	后验概率%
X_{25}	57.693 8	X_2/X_9	2.1400	X_{25}	55.474 8	X_6/X_{13}	2.969 3	C_{13}	3.846 2
X_{29}	56.381 3	X_4/X_{11}	0.7831	X_{29}	54.686 7	X_{16}/X_{21}	2.344 8	C_8	1.640 6
X_{26}	42.307 1	X_{15}/X_{20}	0.3862	X_{26}	40.679 9	X_2/X_9	2.326 7	$C_{16}/C_{17}/$ $C_{18} C_{19}$	0.188 8
X_{24}	6.767 4	$X_1/X_5/X_8/$ $X_{12}/X_{16}/X_{21}$	0.1410	X_{28}	9.452 2	X_{15}/X_{20}	2.204 0	$C_3/C_7/C_{11}$	0.079 3
X_{19}	5.252 2			X_{24}/X_{19}	8.593 6	X_5/X_{12}	0.972 2	C_{12}	0.058 8
X_{28}/X_{27}	4.538 7			X_{18}/X_{23}	7.065 2	X_4/X_{11}	0.831 4	$C_2/C_6/C_{10}$	0.058 2
X_{13}/X_6	2.923 0			X_7/X_{14}	5.692 6	X_1/X_8	0.329 6	C_{14}/C_{15}	0.056 6
$X_3/X_7/X_{10}/$ $X_{18}/X_{23}/X_{14}$	2.726 0			X_3/X_{10}	5.050 1			C_4	0.015 2
X_{17}/X_{22}	2.526 2			X_{27}	4.402 3			$C_1/C_3/C_9$	0.004 1
				X_{17}/X_{22}	4.341 9				

态贝叶斯中为节点 X_{25} 、 X_{26} 后验概率之和; 在多态共因失效贝叶斯中为 X_{25} 、 X_{26} 及 C_{13} 后验概率之和, 节点 Z_i 在两个不同模型中后验概率相等。

4 结束语

由于传统元件的二态、三态模型, 无法描述助航灯光供电系统中多重串联的多态元件, 提出一种多态贝叶斯模型, 经过算例证明该模型可靠度计算结果与传统贝叶斯模型一致为: 99.998 787 1%, 但复杂度比传统贝叶斯模型低。

针对传统共因失效分析方法中 β 因子赋值单一问题, 根据助航灯光市电与油机冗余供电形式, 确定系统中共因失效组, 对冗余共因失效模块引入结构修正因子 C , 建立针对助航灯光供电系统的多态共因失效贝叶斯模型。经过算例分析, 对比考虑共因失效前后多态贝叶斯模型的可靠度计算结果分别为: 99.998 787 1%、99.998 699 5%, 结果表明若不考虑系统中存在的共因失效因素, 会高估系统的可靠度, 导致对系统可靠性分析结果有误差, 加入共因失效分析后供电可靠度较低, 但更符合系统实际情况。

最后对多态共因失效贝叶斯模型算例进行反向推理, 得到各节点的后验概率, 找到助航灯光供电系统中的薄弱环节为母联断路器 QF6、油机和电流互感器 CT6, 为提高该供电系统可靠度, 需重点关注薄弱环节。

参考文献:

- [1] 民用机场助航灯光系统运行维护规程: AP-140-CA-2009-1 [Z]. 北京: 中国民用航空局机场司, 2009.
- [2] 民用机场飞行区技术标准: MH5001-2013 [S]. 北京: 中国民用航空局, 2013.
- [3] ZHOU T, PENG Y B. Adaptive Bayesian quadrature based statistical moments estimation for structural reliability analysis [J]. Reliability Engineering and System Safety, 2020, 198: 106902-106902.
- [4] CHEMWENO P, et al. Risk assessment methodologies in maintenance decision making: a review of dependability modelling approaches [J]. Reliability Engineering and System Safety,

2018, 173: 64-77.

- [5] 杨化动, 史宗杰. 基于共因失效的多态系统灰色贝叶斯网络可靠性分析模型 [J]. 中国工程机械学报, 2020, 18 (5): 390-394.
- [6] 王 瑶, 孙 秦. 一种解决组合爆炸问题的三态故障贝叶斯网络 [J]. 西北工业大学学报, 2014, 32 (6): 857-864.
- [7] 尹晓伟, 钱文学, 谢里阳. 基于贝叶斯网络的多状态系统可靠性建模与评估 [J]. 机械工程学报, 2009, 45 (2): 206-212.
- [8] 肖彦娟, 丁坚勇. 基于故障树的电气主接线可靠性及薄弱环节分析 [J]. 电测与仪表, 2020, 57 (16): 12-16.
- [9] 李 恒, 柴晓冬, 徐纪康, 等. 基于故障树的轨道交通车载电源可靠性分析 [J]. 计算机测量与控制, 2019, 27 (5): 35-38.
- [10] 张振海, 王悦榕, 党建武. 考虑共因失效的列车车载子系统可靠性分析 [J]. 铁道学报, 2021, 43 (9): 63-70.
- [11] 孔祥芬, 王 杰, 张兆民. 基于贝叶斯网络和共因失效的飞机电源系统可靠性分析 [J]. 航空学报, 2020, 41 (5): 270-279.
- [12] 李月英, 宋长健, 王守志. 机场供电系统无功功率补偿方案研究 [J]. 电力电容器与无功补偿, 2018, 39 (4): 30-35+88.
- [13] 侯启真, 左 璘, 王罗平. 基于精英自适应混合遗传算法的机场灯光站三相不平衡优化方法 [J]. 湖北电力, 2019, 43 (6): 49-55.
- [14] CHEN S Q, WANG J, et al. Asymmetrical common-cause failures analysis method applied in fusion reactors [J]. Journal of Fusion Energy, 2016, 35 (2): 221-228.
- [15] 李志强, 徐廷学, 安 进, 等. 冗余系统共因失效动态贝叶斯网络建模 [J]. 仪器仪表学报, 2018, 39 (3): 190-198.
- [16] MOURAD C. Generalized markovian consideration of common cause failures in the performance assessment of safety instrumented systems [J]. Process Safety and Environmental Protection, 2020, 141: 28-36.
- [17] WANG S C, et al. Research on simulation modeling for carrying spare parts optimization considering random common cause failures [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2018, 170 (2): 022004.

- [18] 米金华, 李彦锋, 彭卫文, 等. 复杂多态系统的区间值模糊贝叶斯网络建模与分析 [J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2018, 48 (1): 54-66.
- [19] 翟 胜, 田 硕, 陈倩倩. 基于贝叶斯网络可靠性分析方法的研究与应用 [J]. 计算机测量与控制, 2020, 28 (9): 262-266.
- [20] IEC 61508-6 Functional safety of electrical/ electronic/ pro-

grammable electronic safety-related systems-Part6: Guidelines on the application of IEC 61508-2 and IEC 61508-3 [S]. Geneva; 2010.

- [21] 张宏扬, 段 武, 王龙生, 等. 基于 PDS 的铁路信号冗余结构危险失效概率计算方法 [J]. 铁道标准设计, 2020, 64 (4): 168-174.

(上接第 263 页)

直观地了解各个站点的“健康状态”、是否存在故障或潜在风险, 为维修维护决策提供有力帮助。基于站点电源和通讯状态信息, 形成了针对自动气象站电源和通讯故障“两级告警”的预判方法, 根据疑似故障的严重程度, 分为“关注告警”和“风险告警”, 及时通过站点状态数据发现故障风险, 提醒运行监控人员关注和提前维护维修。通过开发软件实现了上述预判思路, 运行期间及时发出关注告警, 取得了一定的效果。

相比于传统的气象探测设备运行监控和评价方法, 该方法具有以下特点。1) 方法科学, 层次分析法是一种利用数学统计方法得到最优方案的决策方法, 在设备运行管理方面也具有较宽的适用性, 能够在气象探测设备运行监控业务中应用; 2) 结果直观, 将“健康评价”的概念用于设备的健康管理之中, 通过层次分析法将定性的问题量化处理, 得到直观可见的“健康值”, 设备健康状态优劣显而易见; 三是预判及时, 将历史状态极值与实际故障相结合, 通过分级告警的形式, 及时判断站点设备故障并发出告警, 在一定程度上缩短了故障持续时间, 使设备维护维修精准化、高效化。

然而, 作为 PHM 在自动气象站运行管理和维护方面的初步探索, 该方法存在一定的短板需要继续深入探究。主要包括: 一是层次分析法作为一种主观确定权重的方法, 其最终判断结果与实际情况存在一定的差距, 尤其是打分专家人数无法做到足够多的情况, 权重的确定有一定的片面性, 会对最终结果产生影响; 二是故障预判所利用的站点信息数据量不足, 阈值的设定存在不合理的可能性, 对预判结果的准确性造成影响。

参考文献:

- [1] 熊 峰, 潘 雪, 刘 颖, 等. 自动气象站线缆故障测试仪的研究与设计 [J]. 国外电子测量技术, 2021, 40 (1): 111-116.
- [2] 陈云峰, 高 歌. 近 20 年我国气象灾害损失的初步分析 [J]. 气象, 2010, 36 (2): 76-80.
- [3] 张晓磊. 基于 Android 的区域自动气象站维修系统设计 [J]. 电子设计工程, 2021, 29 (5): 16-20.
- [4] 李 雁, 李 峰, 赵志强, 等. 中国区域自动气象站运行监控系统建设 [J]. 气象科技, 2013, 41 (2): 231-235, 277.

- [5] 王林秋, 郑 磊, 张永武. 基于 PHM 的复杂机电系统健康管理技术研究 [J]. 计算机测量与控制, 2018, 26 (1): 27-30.
- [6] 隆金波, 曲昌琦, 蒋觉义, 等. 典型机电系统 PHM 评价指标分析 [J]. 计算机测量与控制, 2021, 29 (6): 255-259.
- [7] 程 科. 飞机操纵系统状态监测与故障预测方法研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2014.
- [8] 相 江. 基于多子波支持向量机航电设备健康管理系统关键技术研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2013.
- [9] 彭 宇, 刘大同, 彭喜元. 故障预测与健康管理技术综述 [J]. 电子测量与仪器学报, 2010, 24 (1): 1-9.
- [10] 景 博, 汤 巍, 黄以锋, 等. 故障预测与健康管理系统相关标准综述 [J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 28 (12): 1301-1307.
- [11] 程永明, 张 卉. 区域自动气象站故障预测方法的研究与应用 [J]. 山西气象, 2013 (4): 31-34.
- [12] 周 平, 王泽胜, 殷 波, 等. 基于层次分析法的云服务可用性评价方法 [J]. 北京邮电大学学报, 2021, 44 (1): 79-85.
- [13] 赵 倩, 邓咏梅. 基于层次分析法的三维人体扫描仪的选择 [J]. 纺织学报, 2021, 42 (4): 155-161.
- [14] 汪益敏, 郭继幸, 李林生, 等. 基于层次分析法的公路运营期路基状况评价 [J]. 华南理工大学学报 (自然科学版), 2017, 45 (6): 37-43, 51.
- [15] 宋改青, 董有尔. 用锁相放大器实现电池内阻在线测量 [J]. 中国测试技术, 2006 (2): 78-81.
- [16] 曹建平, 江国栋, 周健. 基于电池内阻分析的快速充电策略研究与设计 [J]. 电测与仪表, 2008 (2): 13-16.
- [17] 石 磊, 王 宾, 王爱荣, 等. 基于交流法的铅酸蓄电池内阻测量方法优化 [J]. 兵器装备工程学报, 2020 (s2): 238-241.
- [18] 姜 明, 史 静, 崔 明, 等. 区域自动气象站蓄电池异常状态判别方法 [J]. 气象科技, 2019, 47 (3): 413-419.
- [19] 姜 明, 党 岳, 李文博, 等. 区域自动气象站蓄电池亏电判别方法研究——以 CAWS600-R (T) 型站点为例 [J]. 气象水文海洋仪器, 2018, 35 (3): 25-30.
- [20] 卢 舟, 彭柏池, 袁 首, 等. 区域自动气象站供电及通信系统改良方法研究 [J]. 电子测量技术, 2020, 43 (12): 133-137.
- [21] 周继先, 聂 云, 袁 庆, 等. 新型自动气象站故障判断及处理办法 [J]. 中低纬山地气象, 2021, 45 (3): 117-121.