

某雷达天线阵面 T/R 组件的共因失效模型*

倪大江

(南京电子技术研究所, 江苏 南京 210039)

摘要:在计算一些大型复杂系统可靠度时,传统的可靠性模型往往默认系统中的各部件、组件是相互独立的,忽略了系统的相关性,导致对可靠性进行定性分析和定量计算时,产生了较大的误差。文中基于雷达天线阵面 T/R 组件的可靠性模型,充分考虑了系统中组件的相关性,引入了共因失效的概念;并以并联系统为基础,分析计算了并联系统在独立失效和共因失效两种状态下的系统可靠度。借助 Matlab 软件,建立了某雷达天线阵面 T/R 组件共因失效模型,并分别在独立失效与共因失效条件下,对天线阵面 T/R 组件的可靠性模型做出仿真,仿真结果表明,相对于传统模型,本文建立的共因失效模型与实际情况更吻合。

关键词:雷达天线阵面;并联系统;共因失效;可靠度

中图分类号: TN956; TN958.92 **文献标识码:** A **文章编号:** 1008-5300(2012)01-0026-03

Common Cause Failure Model of T/R Modules of a Radar Antenna Array

NI Da-jiang

(Nanjing Research Institute of Electronics Technology, Nanjing 210039, China)

Abstract: In the computation of large complex system reliability, traditional reliability models often by default assume the independence between system components, ignore the system correlation, lead to more error when performing qualitative analysis and quantitative calculation. Based on the reliability model of T/R modules of radar antenna array, this paper fully considers the system component correlation, introduces the concept of common cause failure; and based on parallel system, the system reliability under independent failure state and common cause failure state are analyzed and computed. With the help of Matlab software, the common cause failure model of T/R modules of a radar antenna array is built and the reliability model of T/R modules is simulated under the conditions of independent failure and common cause failure respectively. Simulation results show that compared with traditional model, the common cause failure model in this paper matches actual situation more closely.

Key words: radar antenna array; parallel system; common cause failure; reliability

引言

从 20 世纪 70 年代到现在,国内外分析人员先后对共因失效问题提出了许多模型和方法,其中包括基本参数模型、C 因子模型、 α 因子模型、多希腊字母模型、二项失效率 BFR 模型、应力强度干涉模型等,达数十种之多。后来也有很多分析人员在这些模型的基础上做了大量的工作。但以上诸多模型均是共因失效看作独立于系统之外的额外事件而单独考虑,忽略了

系统之间的相关性。

1 雷达阵面 T/R 组件间的共因失效概述

对于一些大型复杂系统,如雷达天线阵面,“相关”是其失效的普遍特征;我们把由同一个原因或事件引起系统中多个部件同时失效这种相关失效称为共因失效。共因失效是一种相依失效,共因失效的产生说明存在一定数量的失效在统计上不是独立的。这种相关性、非独立性是导致系统内部各部分失效相关的

* 收稿日期:2011-06-08

一个重要原因。这种失效普遍存在于工程系统中,增大了系统各失效模式的联合失效概率,降低了冗余系统的可靠度。忽略系统的共因失效,简单地假设各部分失效独立,对系统可靠性进行定性分析和定量计算,常会导致较大的误差。

2 并联系统在独立失效与共因失效条件下的可靠度

例如:某系统是由 X 、 Y 两单元组成的并联系统,某时刻系统 X 与 Y 的失效概率 $P(X) = P(Y) = 1.0 \times 10^{-3}$ 。若考虑共因失效,则单元 X 和 Y 的失效事件可以分解为: $X = X_1 + C_{XY}$, $Y = Y_1 + C_{XY}$ 。 X 、 Y 分别代表单元 X 、 Y 完全失效, X_1 、 Y_1 代表单元 X 、 Y 独立失效, C_{XY} 代表单元 X 、 Y 共因失效。其中 X 与 Y 独立失效概率为 $P(X_1) = P(Y_1) = 9.9 \times 10^{-4}$, 由于共因失效引起的失效概率 $P(C_{XY}) = 1.0 \times 10^{-5}$ 。

以系统失效为顶事件建立故障树, S 代表系统失效,下图为并联系统的失效故障树。

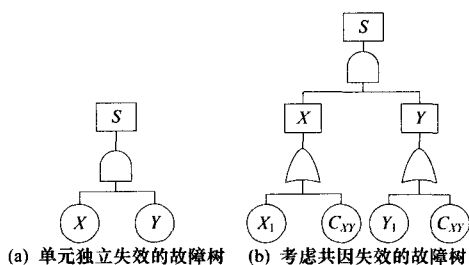


图1 并联模型下的系统失效故障树

在不考虑共因失效的情况下,系统最小割集为: $\{X, Y\}$; 在考虑共因失效的情况下,系统最小割集为: $\{X_1, C_{XY}\}$, $\{Y_1, C_{XY}\}$, $\{X_1, Y_1\}$, $\{C_{XY}\}$ 。由最小割集求顶事件(系统失效)概率。

a) 不考虑共因失效(认为 X 、 Y 相互独立)时系统的失效概率:

$$P(S) = P(X \cap Y) = P(X) \times P(Y) = 1.0 \times 10^{-6}$$

b) 考虑共因失效(认为 X 、 Y 不独立)时系统的失效概率:

$$P(S) = P(X_1 Y_1 \cup X_1 C_{XY} \cup Y_1 C_{XY} \cup C_{XY}) = 1.1 \times 10^{-6}$$

对于并联系统,如果仅仅考虑系统的独立失效,忽略系统的相关性,忽视系统单元间的共因失效,这样计算得出的系统失效概率比实际值偏低,可靠度比实际值偏高。特别是对于复杂设备的冗余系统或表决系统。例如:相控阵雷达的天线阵面往往由几百个甚至上千个 T/R 组件组成,各单元间共因失效地存在会极大地降低天线阵面的可靠度。

为了说明问题,以上的例子假定共因失效发生的概

率 $P(C_{XY})$ 是已知的,而在实际的计算中 $P(C_{XY})$ 是未知的;下文通过共因失效模型的建立来实现 $P(C_{XY})$ 的计算。

3 共因失效模型的建立

3.1 构建模型的假设条件

在构建的模型中,先做以下假设:

1) 组成系统的各单元在独立失效情况下,其寿命具有相同的概率分布,服从指数分布。

2) 组成系统的各单元存在多种失效过程。用 Z_j ($j=1, 2, \dots, n$) 表示失效过程,即 n 个单元组成的系统中指定的 j 个单元同时失效。此处失效过程是指组成系统的若干个单元同时或在短时间内相继失效的现象,每个失效过程对应系统中若干个指定单元同时失效。以图 1 中的 2 个单元组成的并联系统为例,共有 3 个失效过程:仅单元 X 失效,仅单元 Y 失效,单元 X 与 Y 同时失效。

3) 假定各失效过程相互独立,并服从泊松分布,那么同一失效过程的任意两个连续失效事件之间的时间间隔服从指数分布。失效过程 Z_j 不发生的概率为 $P_j = \exp(-\lambda_j t)$ 。

3.2 模型建立过程

假设某雷达阵面有 n 个 T/R 组件,编号为 1, 2, ..., n , 若某一指定 T/R 组件发生失效(如组件 1),则可能存在的失效过程包括:

1) 该单元独立失效,则记该失效过程为 $Z_{1(1)}$,即除了该指定组件之外的其他 $n-1$ 个组件均完好,对应的失效率为 λ_1 。

2) 两个单元同时失效,则记为失效过程 $Z_{2(1)}$ 。在失效的两个单元中,其中一个为指定单元(如单元 1)。另一个可以是其他 $n-1$ 个单元中的任何一个,可能存在的组合数为 C_{n-1}^1 种,对应的失效率为 λ_2 。依此类推, j 个单元同时失效的情况属于失效过程 $Z_{j(1)}$,可能存在的组合数为 C_{n-1}^{j-1} 种,对应的失效率为 λ_j 。 n 个单元组成的系统中,某指定单元(如单元 1)在时刻 t 仍正常工作的概率 $R_n^{(1)}(t)$ 为上述各失效过程均不发生的概率:

$$\begin{aligned} R_n^{(1)}(t) &= P_1^{C_{n-1}^0} P_2^{C_{n-1}^1} \dots P_n^{C_{n-1}^{n-1}} \\ &= \exp(-\lambda_1 t)^{C_{n-1}^0} \exp(-\lambda_2 t)^{C_{n-1}^1} \dots \exp(-\lambda_n t)^{C_{n-1}^{n-1}} \\ &= \prod_{j=1}^n \exp(-\lambda_j t)^{C_{n-1}^{j-1}} \end{aligned} \quad (1)$$

在某指定时刻,单元 1 和单元 2 均完好的概率可表示为

$$P_r\{S_1 \cap S_2; t\} = P_r\{S_1; t\} \times P_r\{S_2 | S_1; t\}$$

式中: S_1 、 S_2 为单元 1、2 完好的事件; $P_r\{S_2 | S_1; t\}$ 表示某时刻 t 单元 1 完好的条件下单元 2 完好的概率,也就是除了单元 1 之外的其余 $n-1$ 个单元中单元 2 完好的概

率,即为 $R_n^{(1)}(t)$ 。由于 $R_n^{(m)}(t) = P_r\{S_1 \cap S_2 \cap \dots \cap S_m; t\}$, 且所有单元的寿命具有相同的概率密度函数,故有

$$\begin{aligned} R_n^{(m)}(t) &= P_r\{S_1; t\} \times P_r\{S_2 | S_1; t\} \times \\ &P_r\{S_3 | S_1, S_2; t\} \times \dots \times P_r\{S_m | S_1, \dots, S_{m-1}; t\} \\ &= R_n^{(1)}(t) R_{n-1}^{(1)}(t) R_{n-2}^{(1)}(t) \dots R_{n-m+1}^{(1)}(t) \\ &= \prod_{j=n-m+1}^n R_j^{(1)}(t) \end{aligned} \quad (2)$$

3.3 共因失效计算的主要步骤

以第2节的并联系统为例,假设 $P(X) = P(Y) = P(t)$ ($P(t)$ 为指定组件 A 或 B 完好的概率), 在独立失效条件下,二单元并联系统可靠度表达式为

$$R_s(t) = 2P(t) - P^2(t) \quad (3)$$

当考虑共因失效时,系统可靠度表达式为

$$R_c(t) = 2R_2^{(1)}(t) - R_2^{(2)}(t) \quad (4)$$

比较两式可以看出,考虑共因失效后系统可靠度表达式实际上是将式(3)中的 $P(t)$ 和 $P^2(t)$ 替换成式(4)中的 $R_2^{(1)}(t)$ 和 $R_2^{(2)}(t)$ 和,系数相同。综合,可以总结出计算共因失效的方法主要包括以下步骤:

1) 按照传统的可靠性框图方法,在各组件独立失效的条件下求出系统的可靠度表达式。

2) 假设各组件寿命在独立失效条件下具有相同的概率分布,即在同一时刻,它们的可靠度相同, $P_1 = P_2 = P_3 = \dots = P_k = P(t)$, 简化步骤1(注: $P_1, P_2, P_3, \dots, P_k$ 在独立失效时具有相同的可靠度,当共因失效时, $P_1, P_2, P_3, \dots, P_k$ 各不相同)。

3) 用 $R_n^{(k)}(t)$ 代替步骤2中的 $P^k(t)$ 。

4 某雷达天线阵面共因失效时的可靠度

例:某相控阵雷达的阵面由567个T/R组件组成,最多允许5%失效(即不超过28个失效),各T/R组件的寿命在独立失效情况下均服从指数分布,即 $P_1 = P_2 = P_3 = \dots = P_{567} = \exp(-2 \times 10^{-3} \times t)$, 天线阵面任务运行时间 $t = 12$ h。统计天线阵面加电工作共1000次,其中出现5次一阶失效,2次二阶失效,7次三阶失效,其余为成功事件。

1) 不考虑共因失效时雷达阵面的可靠度为

$$R_s(t) = \sum_{i=539}^{567} C_{567}^i (P(t))^i (1 - P(t))^{567-i} \quad (5)$$

由于是独立失效,此时各组件可靠度相同, $P_1 = P_2 = P_3 = \dots = P_{567} = \exp(-2 \times 10^{-3} \times t)$, 则 $P(t) = \exp(-2 \times 10^{-3} \times t)$ 。应用 CARMES 软件选取 k/n 表决系统模块计算可得 $R_s(12) = 0.999\ 874\ 28$ 。

2) 当考虑共因失效时,根据3.3节共因失效计算的步骤,将式(5)中的 $P^k(t)$ 用 $R_n^{(k)}(t)$ 代替,可得

$$R_c(t) = C_{567}^{539} R_{567}^{(539)}(t) (1 - R_{567}^{(1)}(t))^{28} + \dots \quad (6)$$

将式(1)、(2)代入式(6)中,即可得 $R_c(t)$ 为关于 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{567}$ 的表达式。此时各 T/R 组件的可靠度: $P_1 \neq P_2 \neq P_3 \neq \dots \neq P_{567}$ 。 $\lambda_1 = (5/1\ 000)/C_{567}^1 = 8.818 \times 10^{-6}$, $\lambda_2 = (2/1\ 000)/C_{567}^2 = 1.2 \times 10^{-8}$, $\lambda_3 = (7/1\ 000)/C_{567}^3 = 2.316\ 33 \times 10^{-10}$ 。四阶、五阶以及更高阶失效过程的失效率近似于0,可以认为 $\lambda_3 = \lambda_4 = \dots = \lambda_{567} \approx 0$ 。

当天线阵面任务运行时间 $t = 12$ h 时,由式(6)可得阵面的可靠度 $R_c(12) = 0.978\ 955$ 。图2给出了考虑共因失效前后系统可靠度随时间变化曲线的对比。雷达阵面 T/R 组件实际工作时,某一组件的失效会增加其他组件尤其是相邻组件失效的概率,独立失效忽略了部分信息,给出了相对乐观的结果。

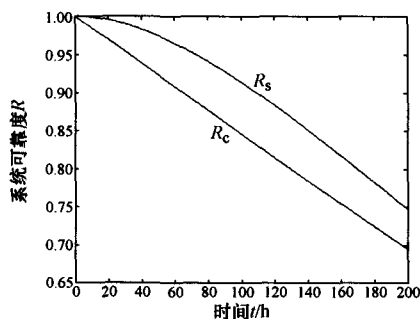


图2 某天线阵面系统独立失效和共因失效的系统可靠度对比

5 结束语

在计算雷达阵面可靠度时,引入了共因失效的概念,并建立了共因失效模型,弥补了传统可靠性计算中忽视部件之间相关性的缺陷。

参考文献

- [1] 陈怀春,杨秉喜,后小明,等. 雷达综合技术保障工程[M]. 北京:中国标准出版社,2001.
- [2] 富立,王新玲,岳亚洲. 基于可靠性分析的最优冗余配置数量确定方法[J]. 北京航空航天大学学报,2010(9): 1030-1033.
- [3] 杨明俊,张玲玲,陶有德,等. 两相同部件并联部分可修复系统的可靠性分析[J]. 数学的实践与认识,2010(20):118-122.
- [4] MOSLEH A. Common cause failures: an analysis methodology and examples[J]. Reliability Engineering & System Safety, 1991, 34(3): 249-292.
- [5] VAURIO J K. Common-cause failure models, data, quantification[J]. IEEE Transactions on Reliability, 1999, 48(3): 213-214.
- [6] HUGHES R P. A new approach to common cause failure[J]. Reliability Engineering & System Safety, 1987, 17(3): 211-236.

倪大江(1982-),男,工程师,主要研究方向为共因失效可靠性模型、可靠性热设计、软件可靠性。

如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深, 让许多工程师望而却步, 然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上, 我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识, 借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训(www.edatop.com)专注于微波射频和天线设计人才的培养, 推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程, 化繁为简, 直观易学, 可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛, 让天线设计不再难...



HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书, 课程从基础讲起, 内容由浅入深, 理论介绍和实际操作讲解相结合, 全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程, 可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计, 让天线设计不再难...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程, 由经验丰富的专家授课, 旨在帮助您从零开始, 全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程, 边操作边讲解, 直观易学; 购买套装同时赠送 3 个月在线答疑, 帮您解答学习中遇到的问题, 让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程, 培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合, 全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作, 同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习, 可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试...

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



关于易迪拓培训:

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立,一直致力和专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养;后于 2006 年整合合并微波 EDA 网(www.mweda.com),现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地,成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 ADS、HFSS 等专业软件使用培训课程,广受客户好评;并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书,帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司,以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年, 10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养,更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果,又能免除您舟车劳顿的辛苦,学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲,结合实际工程案例,直观、实用、易学

联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>