doi:10.11887/j.cn.202004017　　http://journal.nudt.edu.cn

装备结构演化规律及重要度分析*

兑红炎[1],白光晗[2],张云安[2],张小可[3],王　闯[3]
(1. 郑州大学 管理工程学院,河南 郑州　450001;2. 国防科技大学 装备综合保障技术重点实验室,湖南 长沙　410073;
3. 中国人民解放军 75831 部队,广东 广州　510000)

摘　要:以装备设计模块化的现状为依据,运用重要度理论,分析了装备结构演化及其重要度排序的规律。从单一部件逐步演化到 5 部件结构,以及 N 部件串并联结构,在此基础上,对演化规律进行了梳理,并对典型结构进行了重要度分析,得到了关于装备结构演化与各部件重要度排序规律,填补了对装备重要度漂移规律的研究空白,为装备可靠性优化设计提供了技术支撑。

关键词:装备;结构演化;重要度;可靠性
中图分类号:TB114.3　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1001-2486(2020)04-107-08

Evolution law and importance analysis of equipment structure

DUI Hongyan[1], *BAI Guanghan*[2], *ZHANG Yunan*[2], *ZHANG Xiaoke*[3], *WANG Chuang*[3]
(1. College of Management Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China;
2. Laboratory of Science and Technology on Integrated Logistics Support, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;
3. The PLA Unit 75831, Guangzhou 510000, China)

Abstract: Based on the status quo of modularization of equipment design, the evolution of equipment structure and the order of importance ranking by using importance theory were analyzed. On the basis of the gradual evolution from single component to five-component structure and N-component series-parallel structure, the evolution law was sorted out, and the importance analysis of the typical structure was carried out. The evolution of equipment structure and the order of importance of each component are obtained, which fills in the blank of the research on the importance drift law of the equipment, and provides technical support for the reliability optimization design of the equipment.

Keywords: equipment; structure evolution; importance measure; reliability

随着科技的进步,装备的高度发展使得系统变得越来越复杂,系统的质量与可靠性分析已经成为系统设计、运行及维护阶段必须考虑的一项重要工作。自 20 世纪 50 年代可靠性理论及工程诞生以来,可靠性已经发展为一门重要的学科,其贯穿于系统的设计、制造、运行及维修等全生命周期[1]。在工程领域,可靠性作为装备的通用质量特性之一,已经成为衡量装备性能最重要的指标。可靠性对于装备性能的重要性已经不言而喻,几乎成为所有装备最重要的指标之一。苏联的 T34 坦克、AK47 自动步枪以及美国生产的 ZIPPO 打火机等,都以其极高的可靠性而成为产品中的传奇。

为了节约装备研制成本、缩短研制周期和降低研制风险,目前新研制的装备中,大部分是在原有装备的基础上进行增加而来。装备由于继承了上一代装备的全部或部分结构和部件,从可靠性角度来讲,其可靠性水平也必然含有上一代装备的信息,因此应该充分利用上一代装备的可靠性信息。

重要度是指系统部件状态改变对系统可靠性的影响程度,可以用来识别系统薄弱环节,为整个系统可靠性的提升和优化设计提供支撑依据[2]。重要度分析方法在风险系统、核反应堆系统、电子防护系统、铁路系统等领域得到了广泛的应用。Zio 等[3]针对铁路系统的性能改善,提出用风险减少当量(Risk Reduction Worth, RRW)解决。Borgonovo[4]针对风险系统结构和部件风险安全的重要性信息,提出用概率重要度、F-V 重要度、关键重要度、RRW、风险增加当量(Risk Achievement Worth, RAW)和微分重要度来识别和分析基本事件。Borgonovo[5]针对库存管理系

* **收稿日期**:2019-01-03
基金项目:国家自然科学基金联合重点资助项目(U1904211);国家自然科学基金资助项目(71501173, 71701207, 51705526);教育部人文社科规划基金资助项目(20YJA630012)
作者简介:兑红炎(1982—),男,河南郑州人,副教授,博士,硕士生导师,E-mail: duihongyan@zzu.edu.cn

统,提出用微分重要度来分析各个参数对库存策略的影响程度。Natvig 等[6]把 Natvig 重要度扩展到可维修系统,针对海上石油和天然气生产系统,提出用 Natvig 重要度来分析部件寿命和维修时间对系统寿命的重要性。张沛超等[7]针对全数字化保护系统,基于概率重要度和关键重要度,建立了全数字化保护系统元件重要度评价指标。于捷等[8]针对数控机床系统,分析了数控机床转塔刀架系统各部件的结构重要度和概率重要度,将系统各部件按其重要性排列出来。Dui 等[9-10]提出了综合重要度分析方法,建立了一套基于随机过程的状态转移率对系统性能影响的理论,并将其用于变结构系统和飞机系统平台的瓶颈识别,为系统可靠性优化提供了技术支撑。

本文试图运用重要度分析方法,对装备的结构演化和薄弱环节的变化规律进行了研究,讨论了在某种复杂程度下各种可能出现的系统结构,以应对在可靠性优化中出现的装备系统结构组合形式。然后,对上述演化出的结构进行综合分析,探讨其演化过程中重要度的漂移规律,为装备可靠性优化设计提供了技术支撑。

1 装备结构演化

装备的结构发展经历了从简单到复杂,再到简单的过程,在复杂装备的高可靠性要求下,复杂装备的结构被要求越简单越好,特别是电子信息技术的运用以及系统总线的出现,装备从以前复杂的拓扑结构发展为简单的串联和并联结构,降低了部件之间的相互关联性,提高了其独立性,即某一个部件的工作与失效不再严重依赖于其他部件。绝大部分复杂装备中的各个部件,除了电子信息系统严重依赖于供电单元、机械系统严重依赖于动力单元外,其自身工作与失效基本取决于自身的内部单元[11]。基于此现实情况,在装备结构的演化过程中主要以串联和并联 2 种连接方式作为系统的演化推进方式,并假定各部件相互独立。

1.1 两部件结构

两部件结构通过串联和并联 2 种连接方式,一共只有 2 种系统结构,即基本的串联和并联结构,如图 1 所示。

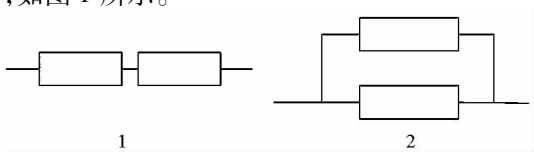


图 1 两部件结构

Fig. 1 Two-part structure diagram

1.2 三部件结构

三部件结构通过各种串并联组合,有 4 种结构,如图 2 所示。

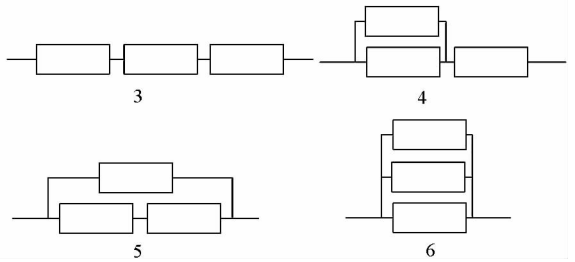


图 2 三部件结构

Fig. 2 Three-part structure

1.3 四部件结构

四部件结构相对比较复杂,通过组合,一共有 8 种结构,如图 3 所示。

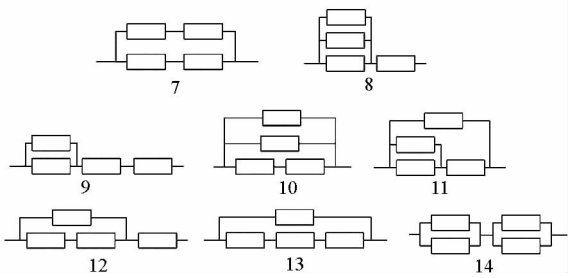


图 3 四部件结构

Fig. 3 Four-part structure

1.4 五部件结构

五部件结构相对四部件更为复杂,在四部件结构的基础上串联或并联一个部件可以得到 21 种结构,如图 4 所示。

由于继续增加部件会让系统结构变得越来越复杂,不便于分析和研究,在实际装备中,每一个部件,即图 4 所示的每一个方框,都有其内部的可靠性逻辑关系,用上述的任何一个结构代替上述任意结构中的一个部件便会得到更为复杂的系统结构。上述结构虽然不能涵盖所有的装备结构,但通过用结构替代部件进行扩展或对复杂系统进行简化后已经能够满足本文研究所需。下面对演化路径进行归纳。

1.5 装备演化路径

假设装备从单个部件开始演化,依次增加一个部件,该部件以串联或者并联的形式放置在原有结构的任一位置,从而形成新的结构,以此类推,通过排列组合形成所有的装备演化结构。用圆代表一种结构,其中 0 号为单个部件,用实线箭头代表增加一个部件,例如图 5 中的 1 号和 2 号

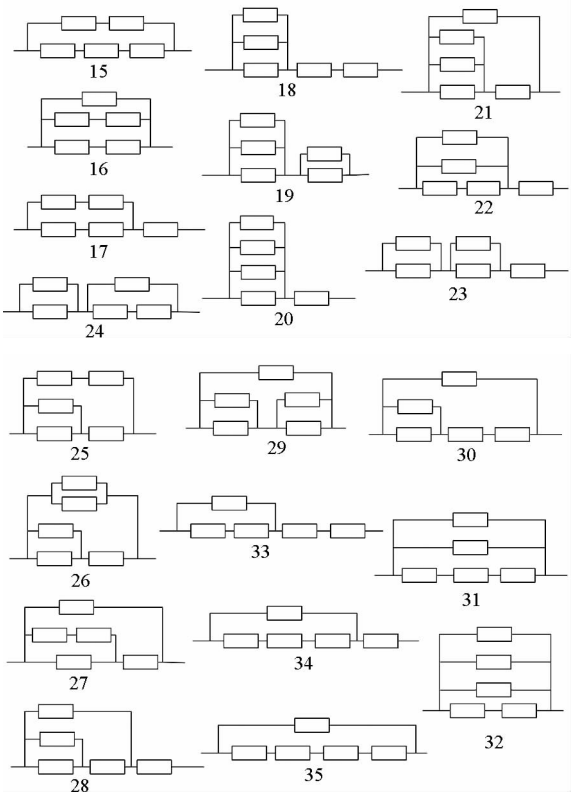


图 4　五部件结构

Fig. 4　Five-part structure

分别表示在 0 号的单部件上串联了一个部件和并联了一个部件,如图 1 所示。针对两部件的结构,增加一个部件有 4 种结构,如图 2 所示。以此类推,可以得到增加 N 个部件后的装备结构。因为 N 部件的演化过程比较烦琐,所以用虚线箭头代表用同样的串联或者并联的方式在所有位置上增加 N 个部件,比如 36 号和 37 号表示分别在三部件结构 3 号和 6 号增加 N 个部件后形成的新结构,虚线表示省略了在三部件结构增加 1 至 $N-1$ 个部件的过程,生成的演化总图如图 5 所示。

在图 5 中,以 1 个部件为基础,推导了 5 个部件所能形成的所有 35 种结构,加上 N 部件串联和并联结构共 37 种部件,并根据结构之间的相互继承关系,通过排列组合,共有 107 条演化路径。

2　演化结构的重要度分析

假设系统和部件具有故障和工作两个状态,其中状态 0 表示故障,状态 1 表示工作。部件之间相互独立。

二态系统的 Birnbaum 重要度[3]描述了部件可靠性变化对系统可靠性变化的影响程度,其表达式为 $I_i(t)=\dfrac{\partial R(t)}{\partial P_{i1}(t)}$,其中 $P_{i1}(t)$ 是 t 时刻部件

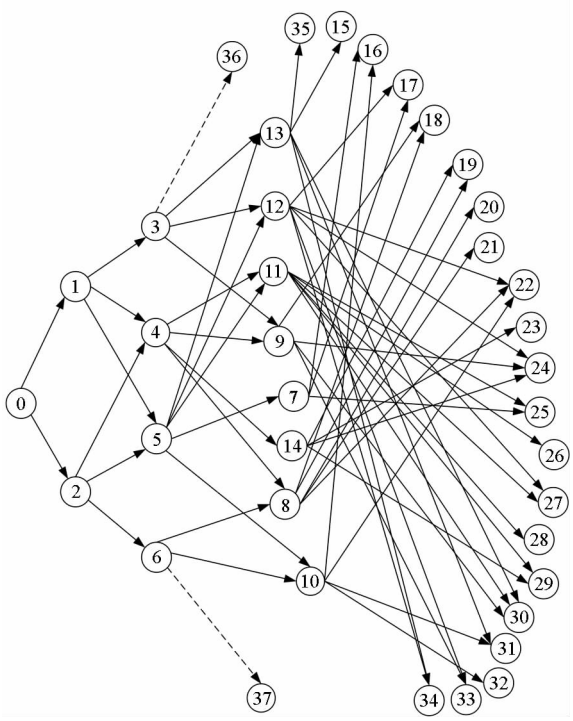


图 5　演化总图

Fig. 5　Evolution general plan

i 的可靠性,$R(t)$ 是 t 时刻系统的可靠性。

由第 1.5 节可知,装备的演化路径不仅不是唯一的,而且异常繁杂,由于串联和并联过于简单,所以本节为了方便研究,挑选出 3 条比较具有代表性的演化途径进行研究,分别是 1 号:0—1—4—8—20;2 号:0—1—5—13—35;3 号:0—2—4—14—19 3 条演化路径。

2.1　1 号演化路径

1 号演化路径的结构演变过程如图 6 所示。

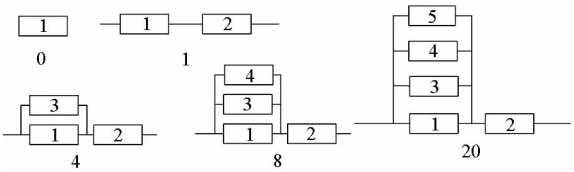


图 6　1 号路径结构演化图

Fig. 6　Route 1 evolution chart

在 1 号路径的演化过程中,由部件 1 先串联上部件 2 形成结构 2,再在结构 2 的基础上,部件 1 再并联上部件 3 形成结构 4,继续与部件 1、部件 3 并联上部件 4 形成结构 8,继续将部件 5 与部件 1、部件 3、部件 4 并联形成结构 20。

在结构 0 中,$I_1(t)=1$。在结构 1 中如果 $P_{21}(t)\geqslant P_{11}(t)$,那么 $I_1(t)\geqslant I_2(t)$。

在结构 4 中,系统的结构函数为 $\Phi(X(t))=\min\{\max\{X_1(t),X_3(t)\},X_2(t)\}$,则系统可靠性为 $R(t)=[1-(1-P_{11}(t))(1-P_{31}(t))]\cdot P_{21}(t)$。

各部件的重要度分别为：

$$I_1(t)=\frac{\partial R(t)}{\partial P_{11}(t)}=P_{21}(t)-P_{21}(t)P_{31}(t)$$

$$I_2(t)=\frac{\partial R(t)}{\partial P_{21}(t)}=P_{11}(t)+P_{31}(t)-P_{11}(t)P_{31}(t)$$

$$I_3(t)=\frac{\partial R(t)}{\partial P_{31}(t)}=P_{21}(t)-P_{11}(t)P_{21}(t)$$

性质 1 在结构 4 中：

1）当 $P_{21}(t)\leqslant P_{11}(t)\leqslant P_{31}(t)$ 时，各部件的 Birnbaum 重要度关系为 $I_2(t)>I_3(t)\geqslant I_1(t)$；

2）当 $P_{11}(t)<P_{21}(t)<P_{31}(t)$ 时，各部件的 Birnbaum 重要度关系为 $I_2(t)>I_3(t)>I_1(t)$。

证明：①由前文各部件重要度公式可知

$$\begin{aligned}&I_2(t)-I_3(t)\\&=P_{31}(t)(1-P_{11}(t))+P_{11}(t)-P_{21}(t)+P_{11}(t)P_{21}(t)\end{aligned}$$

因为 $P_{21}(t)\leqslant P_{11}(t)$，所以 $P_{11}(t)-P_{21}(t)\geqslant 0$ 且 $1-P_{11}(t)>0$，可得上式大于零，即 $I_2(t)-I_3(t)>0$。

又因为 $P_{11}(t)\leqslant P_{31}(t)$，所以有 $I_3(t)-I_1(t)=P_{21}(t)(P_{31}(t)-P_{11}(t))\geqslant 0$，即 $I_3(t)\geqslant I_1(t)$，所以 $I_2(t)>I_3(t)\geqslant I_1(t)$ 成立。

②由前文各部件重要度公式可知

$$\begin{aligned}&I_3(t)-I_1(t)\\&=P_{21}(t)-P_{11}(t)P_{21}(t)-P_{21}(t)+P_{21}(t)P_{31}(t)\\&=P_{21}(t)(P_{31}(t)-P_{11}(t))>0\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}&I_2(t)-I_3(t)\\&=P_{31}(t)(1-P_{11}(t))+P_{11}(t)-P_{21}(t)+\\&\quad P_{11}(t)P_{21}(t)>0\end{aligned}$$

□

另外，在结构 4 中，当 $P_{11}(t)<P_{31}(t)<P_{21}(t)$ 时，各部件的 Birnbaum 重要度关系只能根据各部件的可靠性具体值确定。

同理可得，在结构 8 中：

1）当 $P_{21}(t)\leqslant P_{11}(t)\leqslant P_{31}(t)\leqslant P_{41}(t)$ 时，各部件的 Birnbaum 重要度关系为 $I_2(t)>I_4(t)\geqslant I_3(t)\geqslant I_1(t)$；

2）当 $P_{11}(t)<P_{21}(t)<P_{31}(t)<P_{41}(t)$ 时，各部件的 Birnbaum 重要度关系为 $I_2(t)>I_4(t)>I_3(t)>I_1(t)$。

在结构 20 中：

1）当 $P_{21}(t)\leqslant P_{11}(t)\leqslant P_{31}(t)\leqslant P_{41}(t)\leqslant P_{51}(t)$ 时，各部件的 Birnbaum 重要度关系为 $I_2(t)>I_5(t)\geqslant I_4(t)\geqslant I_3(t)\geqslant I_1(t)$；

2）当 $P_{11}(t)<P_{21}(t)<P_{31}(t)<P_{41}(t)<P_{51}(t)$ 时，各部件的 Birnbaum 重要度关系为 $I_2(t)>I_5(t)>I_4(t)>I_3(t)>I_1(t)$。

由此可见，在串并混联结构中，串联部件的重要度始终最高，而并联部分的重要度取决于并联部件各自的可靠性。从设计的角度来讲，应重点关注串联部件的可靠性。

2.2 2 号演化路径

2 号演化路径的结构演变过程如图 7 所示。

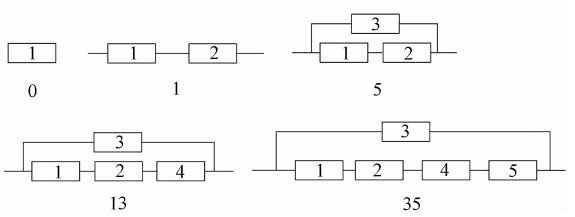


图 7 2 号路径结构演化图

Fig. 7 Route 2 evolution chart

在 2 号路径的演化过程中，由单个部件 1 串联上部件 2 形成结构 1，部件 1、部件 2 同时并联上部件 3 形成结构 5，在结构 5 的基础上再串联上部件 4 和部件 5 形成结构 13 和结构 35。

在结构 0 中，$I_1(t)=1$。在结构 1 中，如果 $P_{21}(t)\geqslant P_{11}(t)$，那么 $I_1(t)\geqslant I_2(t)$。

在结构 5 中，该系统的结构函数为 $\Phi(X(t))=\max\{\min\{X_1(t),X_2(t)\},X_3(t)\}$，则系统可靠性为

$$\begin{aligned}R(t)&=1-(1-P_{31}(t))(1-P_{11}(t)P_{21}(t))\\&=P_{11}(t)P_{21}(t)+P_{31}(t)-P_{11}(t)P_{21}(t)P_{31}(t)\end{aligned}$$

各部件 Birnbaum 重要度为

$$I_1(t)=P_{21}(t)-P_{21}(t)P_{31}(t)$$

$$I_2(t)=P_{11}(t)-P_{11}(t)P_{31}(t)$$

$$I_3(t)=1-P_{11}(t)P_{21}(t)$$

性质 2 在结构 5 中：

1）若 $P_{11}(t)>P_{21}(t)>P_{31}(t)$，且 $P_{11}(t)$，$P_{21}(t),P_{31}(t)\in\left(0,\frac{\sqrt{5}-1}{2}\right]$ 时，即在 0 到黄金分割点之间时，$I_3(t)>I_2(t)>I_1(t)$；

2）若 $P_{11}(t)>P_{31}(t)>P_{21}(t)$，则各部件的 Birnbaum 重要度排序为 $I_3(t)>I_2(t)>I_1(t)$；

3）若 $P_{31}(t)>P_{11}(t)>P_{21}(t)$，则各部件的 Birnbaum 重要度排序为 $I_3(t)>I_2(t)>I_1(t)$。

证明：①前文各部件 Birnbaum 重要度公式可得

$$I_3(t)-I_2(t)=1-P_{11}(t)(P_{21}(t)-P_{31}(t)+1)$$

令 $x=\max\left(0,\frac{\sqrt{5}-1}{2}\right]$，则

$$I_3(t)-I_2(t)=1-P_{11}(t)(P_{21}(t)-P_{31}(t)+1)>1-x(x+1)=0$$

即 $I_3(t)>I_2(t)$。

又因为 $P_{11}(t)>P_{21}(t)>P_{31}(t)$,所以 $I_2(t)-I_1(t)=(P_{11}(t)-P_{21}(t))(1-P_{31}(t))$;则 $I_2(t)>I_1(t)$。

综上可得:$I_3(t)>I_2(t)>I_1(t)$。

②因为 $I_2(t)-I_1(t)=(P_{11}(t)-P_{21}(t))\cdot(1-P_{31}(t))>0$,所以 $I_2(t)>I_1(t)$;

又因为 $I_3(t)-I_2(t)=1-P_{11}(t)+P_{11}(t)(P_{31}(t)-P_{21}(t))>0$,所以 $I_3(t)>I_2(t)$,则 $I_3(t)>I_2(t)>I_1(t)$。

③因为 $I_2(t)-I_1(t)=P_{11}(t)-P_{11}(t)P_{31}(t)-P_{21}(t)+P_{21}(t)P_{31}(t)=(P_{11}(t)-P_{21}(t))(1-P_{31}(t))>0$,所以 $I_2(t)>I_1(t)$。

又因为 $I_3(t)-I_2(t)=1-P_{11}(t)+P_{11}(t)(P_{31}(t)-P_{21}(t))>0$,则 $I_3(t)>I_2(t)$;所以 $I_3(t)>I_2(t)>I_1(t)$。

□

同理可得,在结构 13 中:

1)若 $P_{11}(t)>P_{31}(t)>P_{21}(t)>P_{41}(t)$,则各部件的 Birnbaum 重要度排序为 $I_3(t)>I_4(t)>I_2(t)>I_1(t)$;

2)若 $P_{31}(t)>P_{11}(t)>P_{21}(t)>P_{41}(t)$,则各部件的 Birnbaum 重要度排序为 $I_3(t)>I_4(t)>I_2(t)>I_1(t)$;

3)若 $P_{11}(t)>P_{21}(t)>P_{41}(t)>P_{31}(t)$,则各部件的 Birnbaum 重要度排序需要根据各部件的可靠性具体值确定。

在结构 35 中:

1)若 $P_{11}(t)>P_{31}(t)>P_{21}(t)>P_{41}(t)>P_{51}(t)$,则各部件 Birnbaum 重要度排序为 $I_3(t)>I_5(t)>I_4(t)>I_2(t)>I_1(t)$;

2)若 $P_{31}(t)>P_{11}(t)>P_{21}(t)>P_{41}(t)>P_{51}(t)$,则各部件 Birnbaum 重要度排序为 $I_3(t)>I_5(t)>I_4(t)>I_2(t)>I_1(t)$;

3)若 $P_{11}(t)>P_{21}(t)>P_{41}(t)>P_{51}(t)>P_{31}(t)$,则各部件的 Birnbaum 重要度排序需要根据各部件的可靠性具体值确定。

由上述分析可知,在 2 号演化路径中,当并联部件 3 的可靠性值不是最小时,其重要度值最高,所以串联部分部件的重要度取决于其可靠性值的大小,可靠性值越小,重要度值越高。当并联部件可靠性最小时,需要根据具体的可靠性数值进行定量分析。

2.3　3 号演化路径

3 号路径的结构演化过程如图 8 所示。

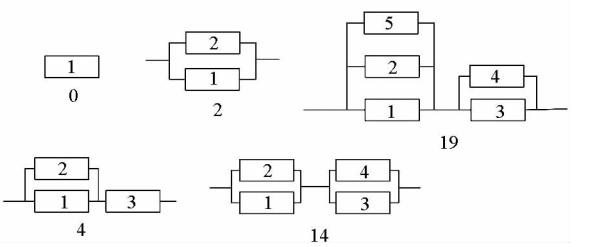


图 8　3 号路径结构演化图

Fig. 8　Route 3 evolution chart

在 3 号演化路径中由单个部件 1 并联部件 2 形成结构 2,再串联上部件 3 形成结构 4,结构 4 中的串联部件 3 再并联部件 4 形成并串结构,继续在部件 1、部件 2 上并联部件 5 形成结构 19,所以该路径是典型的并串混联结构,并不断在并联部分增加并联部件进行演化。

在结构 0 中,$I_1(t)=1$。在结构 2 中,如果 $P_{21}(t)\geqslant P_{11}(t)$,那么 $I_1(t)\leqslant I_2(t)$。

在结构 4 中,当 $P_{31}(t)\leqslant P_{11}(t)\leqslant P_{21}(t)$ 时,各部件的 Birnbaum 重要度关系为 $I_3(t)>I_2(t)\geqslant I_1(t)$;当 $P_{11}(t)<P_{31}(t)<P_{21}(t)$ 时,各部件的 Birnbaum 重要度关系为 $I_3(t)>I_2(t)>I_1(t)$。

在结构 14 中,系统结构函数为 $\Phi(X(t))=\min\{\max\{X_1(t),X_2(t)\},\max\{X_3(t),X_4(t)\}\}$,则系统可靠性函数为

$$R(t)=[1-(1-P_{11}(t))(1-P_{21}(t))]\cdot[1-(1-P_{31}(t))(1-P_{41}(t))]$$

各部件的重要度分别为

$$I_1(t)=(1-P_{21}(t))(P_{31}(t)+P_{41}(t)-P_{31}(t)P_{41}(t))$$
$$I_2(t)=(1-P_{11}(t))(P_{31}(t)+P_{41}(t)-P_{31}(t)P_{41}(t))$$
$$I_3(t)=(1-P_{41}(t))(P_{11}(t)+P_{21}(t)-P_{11}(t)P_{21}(t))$$
$$I_4(t)=(1-P_{31}(t))(P_{11}(t)+P_{21}(t)-P_{11}(t)P_{21}(t))$$

性质 3　在结构 14 中,若 $P_{11}(t)\geqslant P_{21}(t)\geqslant P_{31}(t)\geqslant P_{41}(t)$,则各部件 Birnbaum 重要度排序为 $I_3(t)\geqslant I_4(t)\geqslant I_1(t)\geqslant I_2(t)$。

证明:因为

$$I_1(t)-I_2(t)=(P_{11}(t)-P_{21}(t))(P_{31}(t)+P_{41}(t)-P_{31}(t)P_{41}(t))\geqslant 0$$

所以 $I_1(t)\geqslant I_2(t)$。

$$I_4(t)-I_1(t)=(1-P_{31}(t))(P_{11}(t)+P_{21}(t)-P_{11}(t)P_{21}(t))-(1-P_{21}(t))(P_{31}(t)+P_{41}(t)-P_{31}(t)P_{41}(t))$$

又因为 $1-P_{31}(t)\geqslant 1-P_{21}(t)$,$P_{11}(t)+P_{21}(t)-P_{11}(t)P_{21}(t)\geqslant P_{31}(t)+P_{41}(t)-P_{31}(t)P_{41}(t)$,所以 $I_4(t)-I_1(t)\geqslant 0$,则 $I_4(t)\geqslant I_1(t)$。

$$I_3(t)-I_4(t)$$
$$=(P_{31}(t)-P_{41}(t))(P_{11}(t)+P_{21}(t)-P_{11}(t)P_{21}(t))\geqslant 0,$$
则 $I_3(t)\geqslant I_4(t)$。

综上可得:$I_3(t)\geqslant I_4(t)\geqslant I_1(t)\geqslant I_2(t)$。

□

在结构 14 中,其他情况下,全部部件的重要度排序需要根据具体可靠性值来确定。

在结构 19 中,系统结构函数为

$$\Phi(X(t))=\min\{\max\{X_1(t),X_2(t),X_5(t)\},\max\{X_3(t),X_4(t)\}\}$$

系统可靠性函数为

$$R(t)=[1-(1-P_{11}(t))(1-P_{21}(t))(1-P_{51}(t))]\cdot[1-(1-P_{31}(t))(1-P_{41}(t))]$$

各部件的重要度分别为

$$I_1(t)=(1-P_{21}(t))(1-P_{51}(t))(P_{31}(t)+P_{41}(t)-P_{31}(t)P_{41}(t))$$
$$I_2(t)=(1-P_{11}(t))(1-P_{51}(t))(P_{31}(t)+P_{41}(t)-P_{31}(t)P_{41}(t))$$
$$I_3(t)=(1-P_{41}(t))[1-(1-P_{11}(t))(1-P_{21}(t))(1-P_{51}(t))]$$
$$I_4(t)=(1-P_{31}(t))[1-(1-P_{11}(t))(1-P_{21}(t))(1-P_{51}(t))]$$
$$I_5(t)=(1-P_{11}(t))(1-P_{21}(t))(P_{31}(t)+P_{41}(t)-P_{31}(t)P_{41}(t))$$

性质 4 在结构 19 中,若 $P_{11}(t)\geqslant P_{21}(t)\geqslant P_{51}(t)\geqslant P_{31}(t)\geqslant P_{41}(t)$,则有 $I_3(t)\geqslant I_4(t)>I_1(t)\geqslant I_2(t)\geqslant I_5(t)$。

证明:因为

$$I_1(t)-I_2(t)=(P_{11}(t)-P_{21}(t))(1-P_{51}(t))\cdot(P_{31}(t)+P_{41}(t)-P_{31}(t)P_{41}(t))\geqslant 0$$

所以 $I_1(t)\geqslant I_2(t)$,同理 $I_2(t)\geqslant I_5(t)$。

$$I_4(t)-I_1(t)$$
$$=(1-P_{31}(t))[1-(1-P_{11}(t))(1-P_{21}(t))\cdot(1-P_{51}(t))]-(1-P_{21}(t))(1-P_{51}(t))\cdot(P_{31}(t)+P_{41}(t)-P_{31}(t)P_{41}(t))$$

又因为 $1-P_{31}(t)>(1-P_{21}(t))(1-P_{51}(t))$,$1-(1-P_{11}(t))(1-P_{21}(t))(1-P_{51}(t))>P_{31}(t)+P_{41}(t)-P_{31}(t)P_{41}(t)$,则 $I_4(t)-I_1(t)>0$,所以 $I_4(t)>I_1(t)$。

$$I_3(t)-I_4(t)$$
$$=(P_{31}(t)-P_{41}(t))[1-(1-P_{11}(t))\cdot(1-P_{21}(t))(1-P_{51}(t))]\geqslant 0$$

所以 $I_3(t)\geqslant I_4(t)$,综上可得:$I_3(t)\geqslant I_4(t)>I_1(t)\geqslant I_2(t)\geqslant I_5(t)$。

□

在结构 19 中,其他情况下,全部部件的重要度排序需要根据具体可靠性值来确定。

由上述分析可知,在 3 号路径中,并串结构的各个部件虽然在结构中处于同等的位置,但是其重要度却取决于每个并联部分的可靠性值及各部件的具体值。这也是各部件重要度相差比较小的一种结构演化方式,特别是在结构 14 和结构 19 中,在进行系统设计或维护时,每一个部件对系统有重要影响,都应该被重视。

总之,通过以上装备结构中的部件重要度计算,对装备结构演化和薄弱环节的变化规律进行了分析,讨论了通过串联和并联形成的各种可能出现的系统结构,这些可以应用在可靠性优化中出现的装备系统结构组合形式,从而可以提高装备的可靠性并节约资源,为装备可靠性优化设计提供了技术支撑。

3 案例分析

某型火炮由底盘系统、火力系统、光学观瞄系统、火控系统和指挥通信系统等分系统组成。以该火炮基本任务剖面为背景,指挥通信系统接收作战任务的指令后,由底盘系统机动到预定地域并展开,再由火控系统计算射击诸元,驱动身管瞄准,由火力系统实施射击,或由光学观瞄系统进行瞄准,再由火力系统实施射击,最后通过指挥通信系统上报战况或接收新的指令。其可靠性模型如图 9 所示。

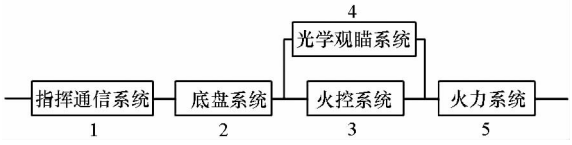


图 9 某型火炮可靠性框图

Fig. 9 Reliability diagram of a certain type of artillery

由图 9 可得系统的结构函数为

$$\Phi(X(t))=\min\{X_1(t),X_2(t),\max\{X_3(t),X_4(t)\},X_5(t)\}$$

则系统可靠性表达式为

$$R(t)=P_{11}(t)\cdot P_{21}(t)\cdot[1-(1-P_{31}(t))\cdot(1-P_{41}(t))]\cdot P_{51}(t)$$

各部件的重要度分别为

$$I_1(t)=P_{21}(t)P_{51}(t)(P_{31}(t)+P_{41}(t)-P_{31}(t)P_{41}(t))$$
$$I_2(t)=P_{11}(t)P_{51}(t)(P_{31}(t)+P_{41}(t)-P_{31}(t)P_{41}(t))$$
$$I_3(t)=P_{11}(t)P_{21}(t)P_{51}(t)(1-P_{41}(t))$$
$$I_4(t)=P_{11}(t)P_{21}(t)P_{51}(t)(1-P_{31}(t))$$

$$I_5(t) = P_{11}(t)P_{21}(t)(P_{31}(t) + P_{41}(t) - P_{31}(t)P_{41}(t))$$

该型火炮的主要改进部分为火控系统中的数字化电台和导航定位系统,还有指挥通信系统中的连线方式由原来的分布式改为总线式,优化了系统结构。所以指挥通信系统和包含导航定位系统的火控系统为新研制的系统,底盘系统、火力系统和光学观瞄系统为已定型系统。这些改进变化与第 2 节中的演化结构 1 和结构 4 相对应,即通过 3 部件(底盘系统、火力系统、光学观瞄系统)的串联系统并联上了一个部件(火控系统),又串联上了一个部件(指挥通信系统)。

对于新研制的系统,可以根据研制过程中的可靠性相关数据进行计算;对于已定型系统,通过其研制、定型和使用情况可以得到详细的可靠性数据,并计算其实际可靠度。如果无法获取相关数据,也可以进行定性分析。本文采取专家经验的定性评价,得到各部件的可靠度排序为

$$P_{11}(t) \approx P_{31}(t) < P_{21}(t) \approx P_{41}(t) \approx P_{51}(t)$$

由第 2 节演化结构 4 的分析,并基于性质 1 可知,当 $P_{31}(t) < P_{21}(t) \approx P_{41}(t)$,则有 $I_2(t) > I_4(t) > I_3(t)$。当 $P_{31}(t) < P_{41}(t) \approx P_{51}(t)$,有 $I_5(t) > I_4(t) > I_3(t)$。在串联系统结构 1 中,可靠性最小的部件重要度最大,所以 $I_1(t) > I_2(t) \approx I_5(t)$。则基于对应的演化路径可以得到所有部件重要度排序,即 $I_1(t) > I_2(t) \approx I_5(t) > I_4(t) > I_3(t)$。

因此,可将该型火炮中的部件分为 4 个等级,最重要的是指挥通信系统,其次是底盘系统和火力系统,再次是光学观瞄系统,最后是火控系统,如表 1 所示。

表 1　某型火炮部件重要度排序

Tab. 1　The ordering importance of a certain type of artillery component

部件	单元名称	重要度	排序	备注
1	指挥通信系统	$I_1(t)$	1	新研制
2	底盘系统	$I_2(t)$	2	已定型
3	火控系统	$I_3(t)$	4	新研制
4	光学观瞄系统	$I_4(t)$	3	已定型
5	火力系统	$I_5(t)$	2	已定型

与装备最终结构时的部件重要度相比,装备结构演化过程中的重要度显示了一个动态变化的过程。例如,在原始结构中某个部件的重要度可能是最大的,但是在演化后的结构中,该部件的重要度排序可能会发生变化。在实际应用中,一般认为,火控系统是该火炮的核心组成部分,是最重要的,但是从表 1 得知,该结论与大多数人一般性认识不同。原因在于,从系统对于完成任务的可靠性来讲,火控系统与光学观瞄系统可以相互替代,只是当采用光学观瞄系统替代火控系统时,其瞄准的精度、准备时间及全天候作战的性能会大大降低,但仍然具备瞄准的功能。即使火控系统出现故障,从整个系统来讲也并非致命故障,对于系统可靠性的影响不是最严重的。如果甲方不愿意以较大概率降级使用火炮,可以在研制指标中对火控系统单独设定可靠性指标。

因此,在可靠性优化设计和可靠性试验方案设计中,应将指挥通信系统作为最重要的分系统进行设计并规划单独的分系统可靠性研制试验方案;底盘系统和火力系统作为一般重要的分系统,光学观瞄系统由于重要度排序靠后,且为已定型产品,可以列为整系统可靠性研制和鉴定试验的参试品;火控系统虽然排序靠后,作为新研制的产品,应安排相应单独的分系统环境和可靠性试验,但可以进行适当剪裁。

4　结论

本文利用重要度理论对当前装备的各种演变结构进行分析,提出了将重要度理论运用于装备结构的变化,拓展了重要度理论的应用范围。分析了装备结构演化的过程,并进行了系统总结,得到了关于装备结构演化与各部件重要度排序规律,为装备可靠性模型的研究提供支撑。

参考文献(References)

[1] 曹晋华, 程侃. 可靠性数学引论[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
CAO Jinhua, CHENG Kan. Introduction to reliability mathematics [M]. Beijing: Higher Education Press, 2006. (in Chinese)

[2] Kuo W, Zhu X. Importance measures in reliability, risk, and optimization: principles and applications [M]. UK: Wiley, 2012.

[3] Zio E, Marella M, Podofillini L. Importance measures-based prioritization for improving the performance of multi-state systems: application to the railway industry [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2007, 92(10): 1303 - 1314.

[4] Borgonovo E. Differential, criticality and birnbaum importance measures: an application to basic event, groups and SSCs in event trees and binary decision diagrams [J].

Reliability Engineering & System Safety, 2007, 92(10): 1458 – 1467.

[5] Borgonovo E. Differential importance and comparative statics: an application to inventory management [J]. International Journal of Production Economics, 2008, 111(1): 170 – 179.

[6] Natvig B, Eide K A, Gåsemyr J, et al. Simulation based analysis and an application to an offshore oil and gas production system of the Natvig measures of component importance in repairable systems[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2009, 94(10): 1629 – 1638.

[7] 张沛超, 高翔. 全数字化保护系统的可靠性及元件重要度分析[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(1): 77 – 82.
ZHANG Peichao, GAO Xiang. Reliability and component importance analysis of fully digital protection system[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(1): 77 – 82. (in Chinese)

[8] 于捷, 孙立大, 石耀霖, 等. 基于BDD技术下的数控机床转塔刀架系统重要度分析[J]. 机床与液压, 2009, 37(1): 157 – 161, 163.
YU Jie, SUN Lida, SHI Yaolin, et al. Analysis of fault tree importance of CNC machine tools based on BDD [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2009, 37(1): 157 – 161, 163. (in Chinese)

[9] Dui H Y, Si S B, Yam R C M. Importance measures for optimal structure in linear consecutive-k-out-of-n systems[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2018, 169: 339 – 350.

[10] Dui H Y, Chen L W, Wu S M. Generalized integrated importance measure for system performance evaluation: application to a propeller plane system [J]. Eksploatacja I Niezawodnosc-maintena Nance and Reliability, 2017, 19(2): 279 – 286.

[11] 孟礼. 多阶段任务系统可靠性分析的二元决策图模型[J]. 国防科技大学学报, 2017, 39(2): 184 – 192.
MENG Li. Binary decision diagram model for reliability analysis of phased mission system [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2017, 39(2): 184 – 192. (in Chinese)