

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2018.04.002

故障树和人工神经网络在可靠性再分配中的应用

鞠萍华, 蒋德轩, 冉 琰

(重庆大学 机械工程学院, 重庆 400044)

摘 要:在产品可靠性设计过程中,通常情况下,可靠性指标的分配并不是一次可以完成的,不同的设计阶段有不同的可靠性分配方法。随着设计过程的深入,初步分配的结果可能会存在不合理的情况,所以在设计阶段中后期,还需要对可靠性指标进行再次分配。在进行指标分配之前,用一定的算法将所有最小割集进行筛选,再将筛选出的需要分配的最小割集利用人工神经网络进行指标分配,最终目标是将可靠性指标分配到故障树的最小割集或基本事件上。通过分配前初始可靠性与分配后的可靠性对比,可以找出产品设计中的薄弱环节进而改进设计,并在一定程度上检验了 FMECA (failure mode, effects and criticism analysis, 故障模式、影响及危害性分析) 的结果。

关键词:故障树;人工神经网络;可靠性再分配

中图分类号: TB114.3

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2018)04-011-09

The application of FTA and ANN in reliability reallocation

JU Pinghua, JIANG Dexuan, RAN Yan

(College of Mechanical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, P.R.China)

Abstract: In the process of product reliability design, usually, the distribution of reliability index is not completed in one time. Different design stages have different reliability allocation methods. With the deepening of the design process, the results of the preliminary distribution may be unsatisfactory, so it's necessary to re-allocate the reliability index in middle and late stages. Prior to the index allocation, all the minimal cut sets are classified by a certain algorithm, and then the selected minimum cut sets to be allocated are distributed by using an artificial neural network (ANN). The ultimate goal is to allocate the reliability index to the minimal cut sets or elementary events of fault tree. By comparing the initial

收稿日期: 2017-11-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51775070); 国家“高档数控机床与基础制造装备”科技重大专项(2016ZX04004-005); 中央高校基本科研业务费(106112017CDJXY110006)资助。

Supported by National Natural Science Foundation of China (51775070), National Major Scientific and Technological Special Project for “High-grade CNC and Basic Manufacturing Equipment”, China (2016ZX04004-005) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities (106112017CDJXY110006).

作者简介: 鞠萍华(1974—), 男, 重庆大学副教授, 博士, 主要从事机械设计制造及其自动化、机电产品可靠性研究, (E-mail) 408730760@qq.com。

冉琰(联系人), 女, 重庆大学讲师, 博士, 主要研究方向为现代质量工程、数控机床可靠性技术等, (E-mail) ranyan@cqu.edu.cn。

reliability before distribution and the reliability after distribution, we can find out the weak points in product design and then improve the design, which examines the results of FMECA (failure mode, effects and criticism analysis) to some extent.

Keywords: FTA(fault tree analysis); ANN; reliability reallocation

可靠性分配是指,将产品设计任务书中规定的可靠性指标按照一定的算法、权重分配给各个分系统、部件或元器件,最终目的在于帮助产品提升可靠性。其本质是一个工程决策问题,是一个众多因素综合权衡的过程。在现代机械产品的设计中,可靠性设计占到越来越重要的位置,而可靠性设计中,合理的可靠性分配可以大大提高设计效率并优化设计结果。实践中,可靠性指标分配是一个逐步迭代细化的过程,随着可靠性设计过程的深入,可靠性指标的分配也应该不断优化,而不同阶段,运用的方法也不同,所以进行可靠性再分配是十分必要的。传统的分配方法有等分配法、AGREE(美国电子设备可靠性顾问团)分配法、比例分配法和评分分配法。其中 AGREE 分配法考虑了组成系统的各单元故障对系统故障的影响程度及故障复杂度,但考虑范围不够全面;等分配法的前提是系统中各个分系统的重要度、复杂度等因素一样,分配过程过于理想化;比例分配法需要找到与该系统非常相似的系统作为参照,不具有一般性;评分分配法虽然考虑到了影响系统的诸多因素,但其中专家的个人主观判断对分配结果影响程度太大,且分配效率低下。因此,复杂系统的可靠性分配与优化已成为可靠性设计中亟待解决的问题。文献[1]用故障树结合贝叶斯网络对可靠性进行分配,将可靠性分配中影响因子的不确定性进行量化,但对较为复杂的故障树处理能力不足;文献[2]用故障树结合层次分析法对可靠性进行分配,使最小割集的筛选原则相较于可靠性再分配法而言更加合理,但筛选过程人为因素影响太大且筛选过程慢;文献[3]采用 Edgeworth 级数法和数据包络分析法对可靠性指标进行分配,使可靠性分配精细化;文献[4]将产品的功能以任务来划分,利用模糊可靠性分配法将指标分配到产品任务上,使可靠性指标分配不局限于只分配到子系统或零部件上,但文献[3-4]在进行可靠性分配时,对产品的技术成熟度及专家、设计人员的经验水平要求高,不适用于新产品或缺乏经验支撑的产品。笔者综合上述文献的优缺点,提出一种基于故障树(fault tree analysis,以下简称 FTA)和人工神经网络(artificial neural network,以下简称 ANN)的可靠性再分配方法。

FTA 是系统工程风险分析的重要方法,基于故障树的可靠性分配方法主要是利用故障树的定性和定量分析,得到系统的最小割集和重要度以及最小割集初始可靠度。先利用再分配法将系统的可靠性指标分配到最小割集,再以重要度为权重,分配到最小割集中的基本事件上,以此来将产品进行可靠性分配。利用传统的故障树分配法进行可靠性分配时,能够评价和分辨出系统中所具有的危险性,并能简化复杂系统中的逻辑关系,相对于其他分配法,更加形象鲜明,分配结果更加精准。但是在分配过程中,由于复杂系统故障树的最小割集数量往往非常庞大,逐个分配显然不现实,所以最难解决的问题是对于故障树中最小割集的筛选问题,传统的 FTA 可靠性分配法是将所有最小割集的初始可靠度按照大小排列,再以某一可靠度 R_k 为基点,根据可靠性再分配原理将低于 R_k 的单元可靠度均提高到 R_0 ,高于 R_k 的单元可靠度不变,使得整个系统的可靠性指标满足预设的期望值。这种方法默认初始可靠度较低的单元应该分配到较高的可靠度,如果对于某一单元或某一零件而言,是合适的,但在复杂系统中,可能存在某个最小割集包含的基本事件较少而导致初始可靠度较高的情况,其中每个基本事件的可靠度提升空间非常小,所以这种筛选最小割集的原则就显得不够合理。笔者考虑底事件发生概率、底事件概率重要度以及最小割集基本事件数目建立了一种新的筛选方式,使筛选过程更加精确化。

通常情况下,可靠性分配是将指标分配到子系统或零部件上,基于 FTA 和 ANN 的可靠性再分配方法是将最小割集假设为子系统,以底事件发生概率、底事件概率重要度以及最小割集基本事件数目为约束条件,对所有最小割集进行筛选。由于筛选出了对顶事件影响度很小的最小割集且每个最小割集之间是相互

独立的,所以在可靠性再分配问题上,只对影响较大的最小割集的集合提出更高的可靠性要求,这样使可靠性再分配的目的性更明确,还使分配效率有所提高。再利用 ANN 技术,以筛选过的最小割集的系统可靠度、最小割集重要度及最小割集基本事件数为输入,最小割集之间可靠度相对比值为输出,代入样本进行学习,最后利用得到的输出结果比较矩阵,解矩阵获得分配权重。重新分配后的最小割集有更高的可靠度,若产品设计要求需要可靠性分配更加细化,可以底事件相对概率重要度为权重,将可靠度分配到底事件上。

1 最小割集筛选方法

在 FTA 分析中,由定性分析可以得到顶事件的最小割集,由定量分析可以得到顶事件发生概率、底事件发生概率、底事件概率重要度及最小割集重要度。

底事件相对概率重要度计算公式为

$$I_i^p = \frac{\partial F_s}{\partial F_i} \cdot \frac{F_i}{F_s},$$

式中: I_i^p 是第 i 个底事件的相对概率重要度; F_s 是顶事件发生概率函数; F_i 是底事件发生概率函数。

底事件概率重要度反映出底事件对顶事件发生概率的影响程度,在最小割集的筛选中,不仅要考虑底事件对顶事件的影响程度,还要考虑到最小割集中包含的每个底事件可靠性提升空间的大小,因此提出最小割集平均影响因子 S_j^g 这一概念:

$$S_j^g = \frac{\sum_i^k F_i I_i^p}{n}, \quad (1)$$

式中: n 为底事件最小割集数目; i 为最小割集中底事件编号; j 为最小割集编号。

从式(1)可以看出 S_j^g 反映了最小割集初始可靠度、对顶事件的影响程度以及底事件的平均提升空间大小,该值越大,代表最小割集的初始可靠度越低;同时最小割集对顶事件的影响程度越大,底事件可靠性平均提升空间越大,分配到的可靠性指标越高。进行可靠性再分配时,仅对可靠性提升空间大且对顶事件影响大的最小割集进行分配。根据这一公式,计算出每个最小割集的 S_j^g 值,将其大小进行排列,仅对于 S_j^g 值小大于 K 值的最小割集进行可靠性分配,其中 K 的取值需综合考虑提高可靠度需要的技术水平、系统复杂程度及经济性等因素,通过对不同故障树的分析和试错,发现当 K 的取值满足需分配的最小割集占有所有最小割集的 37% 左右最能满足可靠性再分配的要求和上述 3 个约束。

2 3 层神经网络模型

人工神经网络是在现代神经科学的基础上提出和发展起来的,旨在反映人脑结构及功能的一种抽象数学模型。人工神经网络发展至今,已经在物理学、数学、计算机科学和神经生物学研究中得到广泛应用,它最大的特点在于可学习性,能将机械的、复杂程度高的问题进行知识储备,并在学习完成后能够独立解决问题,大大降低了人员的工作负担。与此同时,人工神经网络每进行一次学习或解决一次问题,知识储备会更加丰富,也就是所说的自我升级,这一系列优点使得人工神经网络可以被应用在可靠性分配问题上。

ANN 技术的本质是模拟人脑的思维模式,将人脑处理数据的方式程式化,通过样本学习储备知识,当再次处理某类问题时,利用神经元中储备的知识可以快速处理问题,因此 ANN 技术在一定程度上减少了产品设计中人力资源的消耗。

由于可靠性分配的本质是非线性约束问题的优化,所以对于一般的非线性拟合而言,3 层网络足以满足需求。笔者采用 3 层前向神经网络进行训练,如图 1 所示,它包含一个输入层,一个隐含层(处理层)和一个

输出层。输入层包含了可靠性分配中需要考虑的约束条件,根据约束条件个数确定单元数,隐含层的单元数取决于对学习速率和精度的要求,输出层单元数根据处理问题的目的而定。

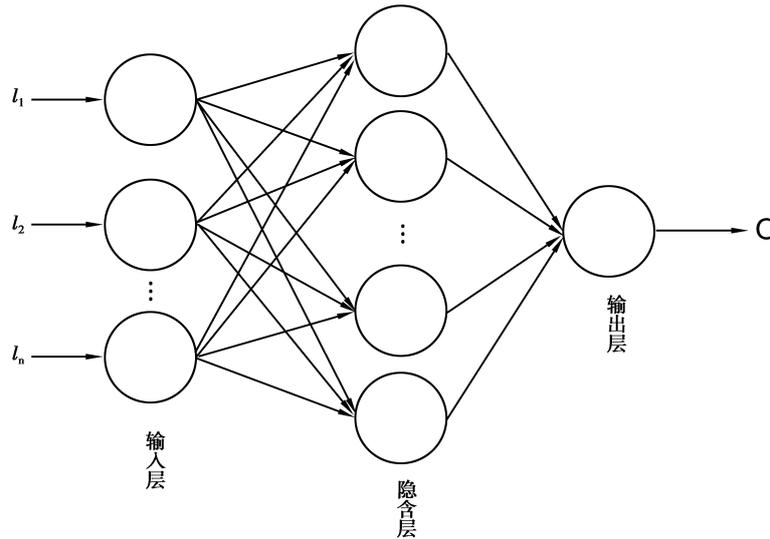


图 1 3 层神经网络模型

Fig.1 Three layered neural network model

在进行可靠性分配时,考虑的约束条件有:顶事件初始可靠度、最小割集基本事件数、最小割集发生概率及最小割集重要度 4 个因素,输入层为 7 单元输入,输出层为 2 个最小割集可靠度比值,采用一单元输出。

3 实例

3.1 某型号钠冷堆安全棒驱动机构结构描述及故障树

该驱动机构属于机电式结构,共包括主轴、抓手 2 条传动链。2 套传动装置安装在同一个装配单元里,采用同一个支撑法兰依靠螺栓和螺固定到接口设备法兰上,在 2 个法兰对接面上用橡胶垫片实现密封。

主轴传动链:采用全密封的步进电机提供驱动力,通过减速装置,将电机的旋转运动转化成主轴齿条的直线运动,实现控制棒的升降及悬停。

抓手传动链:采用全密封的步进电机提供驱动力,通过减速装置,将扭矩传递给下部凸轮,驱使抓手开、合,实现对控制棒的抓放。

按功能划分,安全棒驱动机构由 13 个部件组成,分别是主轴电机、抓手机器、主轴传动链、抓手传动链、抓手位置开关、主轴终端开关、快速释放装置、防反弹装置、可动体、连续位置检测装置、加速装置、缓冲装置和抓手部件,结构示意图如图 2 所示。

图 3 是该驱动机构不能进行反应堆控制故障树(部分),经过初步的可靠性预计和分配,得到的顶事件可靠度为 0.85,随着产品设计阶段的深入,认为初步分配的结果不够合理,需要进行可靠性再分配。

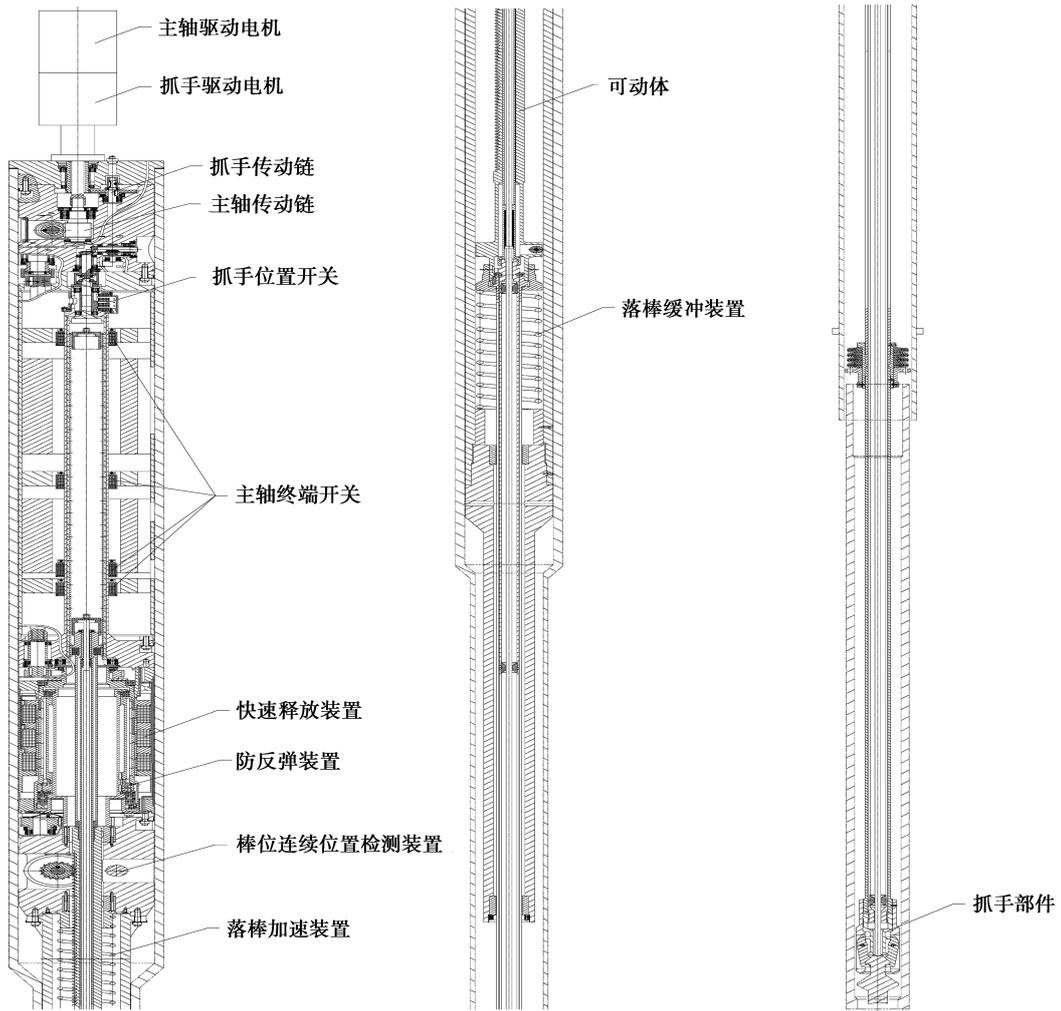


图 2 安全棒驱动机构结构示意图

Fig.2 The structural representation of save rod's driving mechanism

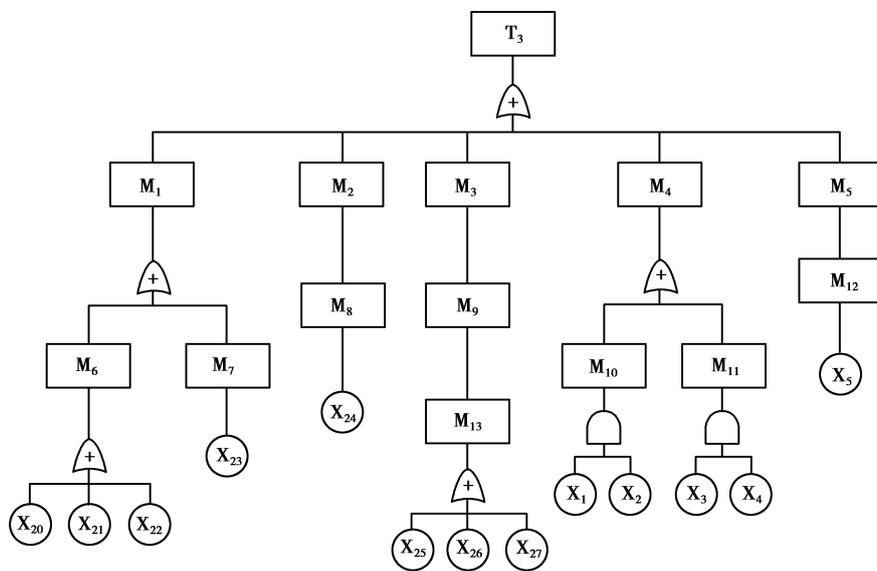


图 3 不能进行反应堆控制故障树

Fig.3 The fault tree of reactor control

通过对故障树进行定量分析,得到表 1。

表 1 不能进行反应堆控制故障树定量分析表
Table 1 The analysis of reactor control's fault tree

事件标号	事件定义	初始可靠度	事件发生概率/ h^{-1}	底事件相对 概率重要度
T_3	不能进行反应堆控制(功率调节)	0.850 0	5.324×10^{-6}	
X_{20}	蜗轮(HD/ II -01-12004)胶合	0.995 3	0.356×10^{-6}	0.103
X_{21}	主轴蜗轮(HD/ II -01-12004)齿弯曲变形	0.995 7	0.356×10^{-6}	0.103
X_{22}	主轴圆锥齿轮(HD/ II -01-12001)齿弯曲变形	0.996 2	0.356×10^{-6}	0.103
X_{23}	主轴圆锥齿轮齿弯曲变形(HD/ II -01-13001)	0.996 5	0.356×10^{-6}	0.103
X_{24}	齿轮(HD/ II -01-30007)齿弯曲变形	0.975 8	0.600×10^{-6}	0.112
X_{25}	外壳(050101)变形输入轴卡死	0.985 4	1.320×10^{-6}	0.060
X_{26}	深沟球轴承 A(GB/T 276-94)间隙过大	0.963 5	0.650×10^{-6}	0.122
X_{27}	深沟球轴承 B(GB/T 276-94)间隙过大	0.956 2	0.650×10^{-6}	0.122
X_1	主轴(HD/ II -01-41001)齿面变形	0.995 6	0.031×10^{-6}	0.002
X_2	圆柱齿轮(HD/ II -01-41003)齿面变形	0.995 6	0.031×10^{-6}	0.002
X_3	组合齿轮(HD/ II -01-42002)锥齿轮齿面变形	0.996 4	0.036×10^{-6}	0.005
X_4	组合齿轮(HD/ II -01-42002)圆柱齿轮齿面变形	0.991 3	0.760×10^{-6}	0.005
X_5	齿条(HD/ II -01-60006)齿弯曲变形	0.995 2	0.046×10^{-6}	0.009

3.2 最小割集的筛选

由故障树可以得到最小割集,经计算得到最小割集的 S_j^G 值见表 2。

表 2 最小割集 S_j^G 值表
Table 2 The S_j^G value of minimal cut sets

最小割集编号	基本事件	S_j^G 值
Z_1	X_1, X_2	0.000 558
Z_2	X_3, X_4	0.000 289
Z_3	X_5	0.000 396
Z_4	X_{20}	0.036 650
Z_5	X_{21}	0.036 650
Z_6	X_{22}	0.036 650
Z_7	X_{23}	0.036 650
Z_8	X_{24}	0.067 200
Z_9	X_{25}	0.079 200
Z_{10}	X_{26}	0.079 300
Z_{11}	X_{27}	0.079 300

当需要分配的最小割集数约为 37%时, K 取 0.06。

筛选得到 8,9,10,11 4 个最小割集的可靠度需重新分配,其余最小割集对顶事件的影响程度较小,进行可靠性再分配时不做考虑,根据最小割集相互独立的原则,对需要分配的 4 个最小割集的集合提出更高的可靠性要求(需求可靠度 $R_m=0.950 0$)。

3.3 选用 BP 神经网络进行分配

首先应确定隐节点个数,在 BP 神经网络的应用中,隐节点数的确定一般采用公式

$$N = (k + m)^{\frac{1}{2}} + a, \tag{2}$$

式中: N 为隐含层节点个数; k 为输入节点个数; m 为输出节点个数; a 为 1~10 的常数。

输入样本为重新分配前的故障树定量分析数据,输入节点 7 个,样本数共 8 个,输出节点 1 个,根据公式(2)确定隐节点数为 $4 < N < 13$ 。笔者采用 8-8-1 型 3 层网络,通过 Matlab 仿真后结果表明学习速率和精度满足要求。代入需重新分配的最小割集定量分析数据进行仿真,设定最多步数为 5 000 次,目标精度为 10^{-10} ,BP 神经网络共经过 13 步训练,精度为 $1.503 3 \times 10^{-9}$,如图 4 所示。最终结果如表 3 所示。

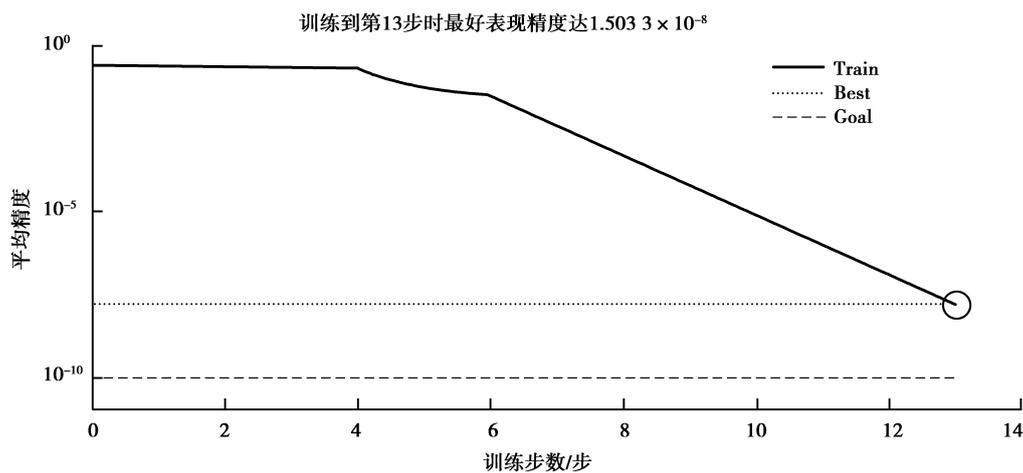


图 4 训练步数、精度图

Fig.4 The accuracy of training

表 3 BP 网络训练结果

Table 3 The result of BP training

最小割集 比值	最小割集基本事件数		发生概率		重要度		故障树顶 事件可靠度	可靠度 比值
	比值分子位	比值分母位	比值分子位	比值分母位	比值分子位	比值分母位		
Z_8/Z_9	1.000 0	1.000 0	0.600 0	0.320 0	0.112 0	0.060 0	0.850 0	0.990 3
Z_8/Z_{10}	1.000 0	1.000 0	0.600 0	0.650 0	0.112 0	0.122 0	0.850 0	1.012 8
Z_8/Z_{11}	1.000 0	1.000 0	0.600 0	0.650 0	0.112 0	0.122 0	0.850 0	1.020 5
Z_9/Z_{10}	1.000 0	1.000 0	0.320 0	0.650 0	0.060 0	0.122 0	0.850 0	1.022 8
Z_9/Z_{11}	1.000 0	1.000 0	0.320 0	0.650 0	0.060 0	0.122 0	0.850 0	1.030 5
Z_{10}/Z_{11}	1.000 0	1.000 0	0.650 0	0.650 0	0.122 0	0.122 0	0.850 0	1.007 1

在表 3 数据中,最小割集基本事件数、发生概率、重要度和顶事件可靠度作为神经网络的输入,最小割集可靠度比值作为神经网络的输出,得到的比值构造成正互反矩阵如下:

$$A = \begin{bmatrix} 1.000 0 & 0.990 3 & 1.012 8 & 1.020 5 \\ 1.009 8 & 1.000 0 & 1.022 8 & 1.030 5 \\ 0.987 4 & 0.977 7 & 1.000 0 & 1.007 1 \\ 0.979 9 & 0.970 4 & 0.992 9 & 1.000 0 \end{bmatrix}。$$

解这个矩阵的最大特征根对应的特征向量为 $[0.502 9 \quad 0.507 8 \quad 0.496 4 \quad 0.492 8]$,归一化处理后得到 $[0.251 5 \quad 0.253 9 \quad 0.248 2 \quad 0.246 4]$,以此为权重,根据公式

$$R_i = (R_m)^\omega$$

求出重新分配后的最小割集可靠度,其中 ω 为权重,重新分配后结果见表 4。

表 4 分配结果

Table 4 The result of allocation

最小割集序号	Z_8	Z_9	Z_{10}	Z_{11}
可靠度	0.987 2	0.987 1	0.987 3	0.987 4

若需要对可靠性指标进一步分配到基本事件上,可将最小割集中的底事件概率重要度归一化,以归一化的结果为权重进行再分配。

3.4 结果对比

利用文献[2]的分配方法,对本例中的故障树进行可靠性分配,通过层次分析法对最小割集进行筛选,再根据筛选后的最小割集重要度进行分配,得出结果见表 5。

表 5 分配结果

Table 5 The result of allocation

最小割集序号	Z_2	Z_3	Z_4	Z_5	Z_6	Z_7	Z_8	Z_9	Z_{10}	Z_{11}
可靠度	0.988 7	0.996 3	0.996 6	0.997 0	0.997 5	0.997 8	0.986 5	0.982 3	0.976 5	0.968 5

与文献[2]的分配结果对比,本文的分配过程耗时更少,在筛选最小割集时考虑因素更多,筛选的侧重点可控,需分配的最小割集数目少,但每个最小割集的可靠度提升空间更大,在可靠性设计后期,利用再分配结果改进 FMECA 分析时,能将重点放到最需要提高可靠性要求的故障模式上,节省了人力资源的消耗,兼顾了可靠性设计中的经济性问题。

4 结 论

经过对最小割集的筛选,剔除了对顶事件影响较小的最小割集,使可靠性再分配任务的目标更准确,ANN 技术使分配过程更加数据化,分配结果精确化。在实际应用中,可根据任务的需要增加更多约束条件,这样训练出的神经网络更具有可信性。

由于 FTA 的输出结果是 FMECA 的输入依据,通过对分配前后的最小割集可靠度对比,发现最小割集中包含的基本事件在作为 FMECA 的设计输入时属于产品设计的薄弱环节,所以在检验、改进 FMECA 时,需重点关注重新分配后的最小割集中的基本事件,提升产品的整体可靠性水平。但是在故障树最小割集筛选方法上,存在一定的局限性,未来研究方向可以向精确化最小割集筛选方法上发展。

参考文献:

- [1] 李大伟,陈云翔,项华春,等.一种改进的可靠性分配方法及其应用验证[J].电讯技术,2014,54(12):1700-1705.
LI Dawei, CHEN Yunxiang, XIANG Huachun, et al. An improved reliability allocation method and its application verification[J]. Telecommunication Engineering, 2014, 54(12): 1700-1705. (in Chinese)
- [2] 李博远.基于故障树和层次分析法的可靠性分配方法研究与系统实现[D].合肥:中国科学技术大学,2014.

- LI Boyuan. Study on FTA and AHP based reliability allocation method[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2014. (in Chinese)
- [3] 张义民,贾敬存,黄贤振.基于 Edgeworth 级数法和数据包络分析法的数控车床可靠性分配[J].机械强度,2016,38(01): 69-73.
ZHANG Yiming, JIA Jingcun, HUANG Xianzhen. Reliability allocation of CNC lathe based on edgeworth series method and data envelopment analysis[J]. Journal of Mechanical Strength, 2016, 38(01): 69-73. (in Chinese)
- [4] 张根保,柳剑,王国强.基于任务的数控机床模糊可靠性分配方法[J].计算机集成制造系统,2012,18(4):768-774.
ZHANG Genbao, LIU Jian, WANG Guoqiang. Fuzzy reliability allocation of CNC machine tools based on task[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2012, 18(4): 768-774. (in Chinese)
- [5] 贺星,孙丰瑞,刘永葆,等.基于 Hopfield 神经网络的燃气轮机可靠性分配[J].华中科技大学学报(自然科学版),2009(6): 48-51.
HE Xing, SUN Fengrui, LIU Yongbao, et al. Optimal apportionment of gas turbine reliability based on hopfield neural network[J]. Journal Huazhong University of Science & Technology (Natural Science Edition), 2009(6): 48-51. (in Chinese)
- [6] 郝庆波.数控机床可靠性及维修性的模糊综合分配与预计[D].长春:吉林大学,2012.
HAO Qingbo. Fuzzy comprehensive allocation and prediction for NC machine tools reliability and maintainability[D]. Changchun: Jinlin University, 2012. (in Chinese)
- [7] 林倩,蒋维,陈民海.基于人工神经网络的 IC 互连可靠性研究[J].半导体技术,2017,42(07):536-543.
LIN Qian, JIANG Wei, CHEN Minhai. Research on IC interconnect reliability based on the artificial neural network[J]. Semiconductor Technology, 2017, 42(07): 536-543. (in Chinese)
- [8] 方明.机械系统概念设计阶段可靠性分配方法研究[D].天津:天津大学,2014.
FANG Ming. Research on reliability allocation method of mechanical system in conceptual design stage[D]. Tianjin: Tianjin University, 2014. (in Chinese)
- [9] Tian P, Wang J, Zhang W, et al. A Fault Tree Analysis Based Software System Reliability Allocation Using Genetic Algorithm Optimization[C]// Wri World Congress on Software Engineering. [S.l.]: IEEE Computer Society, 2009: 194-198.
- [10] Tarawneh B. Predicting standard penetration test N -value from cone penetration test data using artificial neural networks[J]. Geoscience Frontiers, 2017, 8(1): 199-204.
- [11] Shu S X, Gong W H. An artificial neural network-based response surface method for reliability analyses of $c-\phi$ slopes with spatially variable soil[J]. China Ocean Engineering, 2016, 30(1): 113-122.
- [12] Qi Xiaoyan, Shen Guixiang, Zhang Yingzhi, et al. Reliability distribution of numerical control lathe based on correlation analysis[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2016, 23(5): 32-38.
- [13] Ramirez-Marquez J E, Rocco C M. All-terminal network reliability optimization via probabilistic solution discovery[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2008, 93(11): 1689-1697.
- [14] Zhou Y, Zhu Y, Ren H, et al. Comprehensive reliability allocation method for CNC lathes based on cubic transformed functions of failure mode and effects analysis[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2015, 28(2): 315-324.
- [15] Hu T S, Huang H Z, Wang X M, et al. Reliability allocation of large mining excavator electrical system based on the entropy method with failure and maintenance data[J]. Journal of Donghua University (English Edition), 2014, 31(6): 779-781.