

结合BP神经网络和毕达哥拉斯模糊数的工业机器人系统的可靠性分配

徐闽军 董秋仙 刘汝良 刘君 夏辰光 方笑婕

(南昌大学 数学与计算机学院, 南昌 330031)

摘要: 为确保工业机器人实现可靠性目标,可靠性分配是其制造设计阶段需要完成的任务。根据工业机器人结构复杂、不确定度高、样品少且组成零件间具有失效相关性的特点,提出了一种基于反向传播(Back Propagation, BP)神经网络和毕达哥拉斯模糊数(Pythagorean Fuzzy Number, PFN)的工业机器人系统的可靠性分配方法,使用Copula函数建立系统可靠性模型,将工业机器人的故障分为系统级、子系统级和部件级3个层次,通过使用BP神经网络,将系统可靠性、子系统结构重要度和子系统复杂度作为输入变量,完成系统级到子系统级的可靠性分配;引入PFN对重要程度、环境条件、技术水平、可维修性、费用灵敏度、复杂性6个影响因素进行评分,从而构造分配权重,完成子系统级到部件级的可靠性分配。结果表明,该方法可以实现可靠性目标,并保证了可靠性的增长。

关键词: 可靠性分配; 工业机器人; Copula函数; BP神经网络; 毕达哥拉斯模糊数

中图分类号: TB114 **DOI:** 10.16579/j.issn.1001.9669.2025.08.016

0 引言

系统可靠性分配是将规定的系统可靠性指标自上而下、由整体到局部分配给组成该系统部件,确定系统各组成部件的可靠性要求的过程^[1]。其分配的本质是在现有的资源约束条件下实现系统可靠性指标的最大化。为了达到系统的可靠性目标,需要根据其可靠性分配方法来确定各部件的可靠性。其常用的可靠性分配方法可分为两类:加权因子和最优可靠性分配^[2]。基于加权因子的可靠性分配方法包括传统的均衡分配方法^[3]、分级分配方法^[4]等。最优可靠性分配方法^[5]是指应用数学规划技术获得组件的最优可靠性解,使整个系统的可靠性最大化或成本最低。

工业机器人是集计算机科学、控制与机制理论、信息与传感器技术、人工智能等多学科于一体的复杂机电耦合系统^[6]。人工智能作为人类劳动的替代品,代表着制造业的技术水平,在自动化生产线中具有不可替代的地位。但是,生产线的高度自动化也对安全性和可靠性提出了非常高的要求^[7]。因此,必须提高可靠性以减少低可靠性带来的额外维护成本,提高产品的竞争力。合理分配子系统和部件的可靠性指标

能保证整机满足设计要求^[8],从而确定系统各单元的定量可靠性要求。FAZLOLLAHTABAR等^[9]采用可靠性框图简化复杂机器人系统,建立故障树分析(Fault Tree Analysis, FTA)模型,检测故障原因和成功概率;BAI等^[10]针对现有可靠性分配方法中仅存在正常或故障2种状态而未考虑中间退化过程的缺陷,提出了一种综合因子评价-层次分析法-T-S模糊故障树分析,对具有多故障状态的工业机器人系统进行可靠性指标分配。BAI等^[11]基于2种认知不确定,结合D-S(Dempster-Shafer)证据理论和伯恩鲍姆重要度理论对工业机器人系统的可靠性指标进行了分配。由于工业机器人结构复杂,且在运行过程中,其精度会逐渐降低,振动会增大,定位时间会延长,运动轨迹会偏离。部件之间的状态会相互影响,这时就需建立部件失效相关性的系统可靠性模型。在研究部件失效相关性的系统上,常使用Copula函数来考虑组件失效相关的系统可靠性模型,ZHANG等^[12]构建了基于Vine Copula函数的不同失效相关性的串联可靠性分配模型;NAVARRO等^[13]构建了基于Clayton Copula函数时刻失效相关系统剩余寿命的可靠性函数;HSU等^[14]利用Copula函数对多类型-I截尾下具有相关性的寿命试

收稿日期: 2023-11-05 修回日期: 2024-01-08

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(72071099)

作者简介: 徐闽军,男,1997生,江西抚州人,硕士研究生;主要研究方向为系统可靠性分配;E-mail:2549519124@qq.com。

董秋仙(通信作者),女,1972生,江西上饶人,博士,教授;主要研究方向为可靠性数学;E-mail:dongqiuxian@163.com。

引用格式: 徐闽军,董秋仙,刘汝良,等. 结合BP神经网络和毕达哥拉斯模糊数的工业机器人系统的可靠性分配[J]. 机械强度, 2025, 47(8): 131-140.

XU Minjun, DONG Qiuxian, LIU Ruliang, et al. Reliability allocation of industrial robot systems based on BP neural network and Pythagorean fuzzy numbers[J]. Journal of Mechanical Strength, 2025, 47(8): 131-140.

验数据进行建模,精准估计出系统及其组件的分位数和可靠性函数。

神经网络作为人工智能领域的研究热点,可以利用信息处理技术模拟人脑神经网络建立模型,并按照不同的连接方式组成不同的网络。反向传播(Back Propagation, BP)神经网络作为典型的多层前向型人工神经网络,在模式识别、数据预测、函数逼近、分类、图像处理等方面应用广泛^[15]。滕凌云^[16]将建筑工程造价中的特征值量化,作为模型输入样本,构建BP神经网络工程造价预测模型,通过验证,证明BP模型能够满足建筑工程造价预测要求。宁武龙^[17]提出根据BP神经网络结构及其算法公式,并结合训练已获得的预测误差较小的权值和阈值来编写轴承寿命,预测M函数文件,替换掉神经网络工具箱中的函数,成功开发了集轴承寿命预测和轴承数据存储、查询、统计等功能于一体的用户平台,可用于实际生产中对轴承随时进行剩余寿命预测。DU等^[18]首次将神经网络与再制造系数相结合,提出一种改进的再制造机床可靠性分配方法。

上述方法都改进了传统的可靠性分配方法,但一般无法处理模糊信息。为了解决这一问题,SRIRAMDAS等^[19]将梯形模糊数引入到可靠性分配中,将梯形模糊数与极大熵有序加权平均算子相结合,提出了一种可靠性分配方法;CHENG等^[20]提出了语言中性数加权平均算子公式,并首次应用于系统可靠性分配领域中。CHENG等^[21]将直观的梯形模糊数与基于相似理想解的性能排序技术相结合,实现了机床可靠性的灵活分配。在直觉模糊集的决策过程中,可能会出现隶属函数与非隶属函数之和大于1的情况。为了克服模糊集的缺点,YAGER^[22]率先提出了毕达哥拉斯模糊集(Pythagorean Fuzzy Set, PFS)理论,属于PFS的元素的隶属等级和非隶属等级满足平方和小于等于1的条件。目前PFS已广泛应用于各种学科中。WU等^[23]提出了一种毕达哥拉斯模糊马哈赫算子,并给出了它们在基于PFS的多属性决策中的应用。RAHMAN等^[24]提出了基于PFS的Einstein混合平均聚合算子(Aggregation Operator, AO)来聚合多属性决策(Multiple Attribute Decision Making, MADM)过程中的信息。RANI等^[25]提出用PFS的散度量来计算PFS之间的区分程度。LIU等^[26]提出了PFS基于综合折中解决方案的MADM方法,用于评估具有不确定性的医疗废物处理技术。RANI等^[27]研究了现有PFS相似度测度不足的问题,提出了一种新的PFS相似度测度,并应用于处理PFS背景下的医疗设备供应商评估问题。

工业机器人系统结构复杂,组成成分众多且相互耦合。运行过程的可靠性受退化、环境等多种因素的影响,具有时变和动态性。即使是同一类型的工业机器人,如果环境发生变化,其动态特性也会有很大的不同。针对系统结构复杂、可靠性数据缺乏、现有认知不足等问题,迫切需要开发一种适用于工业机器人系统的可靠性分配方法,形成一种适用于工业机器人系统的可靠性质量保证技术。本文提出一种结合BP神经网络和毕达哥拉斯模糊数(Pythagorean Fuzzy Number, PFN)的工业机器人系统的可靠性分配方法,使用Copula函数建立系统可靠性模型,将工业机器人的故障分为系统级、子系统级和部件级3个层次,采用3层前馈人工神经网络将系统的可靠性分配到子系统级;考虑将重要程度、环境条件、技术水平、可维修性、费用灵敏度、复杂性6个影响因素作为分配准则,引入PFN对其进行评分,从而将可靠性从子系统级分配到部件级,最后与其他分配方法做实例对比分析,结果表明,该方法可以实现可靠性目标,并保证了可靠性的增长。

1 工业机器人的可靠性模型

工业机器人的结构复杂,由多个部件组成,很难将系统的可靠性直接分配给每个部件。故根据文献[10]¹⁰⁸²⁴⁸对工业机器人进行故障树分析,将系统分为各种子系统和零部件,其结构如图1所示,各子系统与相应部件均通过或门连接,转化为可靠性框图则为串联,框架如表1所示。在可靠性分配过程中,首先将整个系统的可靠性目标分配给子系统,然后将每个子系统的可靠性分配给每个部件。本文假设各子系统相依失效,部件也相依失效。



图1 工业机器人

Fig. 1 Industrial robot

对系统进行可靠性分配需要建立系统和组成部件的可靠性模型,传统的部件串并联的方式在计算系统可靠性时假设部件之间是失效独立的,针对部件失效相关的系统可靠性分配问题常用的方法是使用Copula函数。对于串联系统,可靠性计算式为

表 1 工业机器人的子系统和相应部件

Tab. 1 Subsystems and corresponding components of industrial robots

子系统 Subsystem	部件 Component
减速器 Reducer	齿轮、轴承、转动轴、针齿 Gears, bearings, botating shafts, needle teeth
电动机 Electrical machinery	皮带、联轴器、紧固螺栓、线圈、抱闸、编码器、转动轴 Belts, couplings, fastening bolts, coils, band brakes, encoders, rotating shafts
驱动器 Driver	编码器、晶体管、继电器、网口、接线 Encoders, transistors, relays, ethernet ports, wirings
控制器 Controller	开关、风扇、继电器、I/O 模块、制动电阻、内燃机 Switches, fans, relays, I/O modules, brake resistors, internal combustion engines
示教器 Teach pendant	主板、屏幕、电路、接线、接口 Main boards, screens, circuits, wirings, interfaces
机械手 Manipulator	大臂、小臂、螺纹、编码器、动力线、线缆 Big arms, small arms, threads, encoders, power lines, cables

$$R_s(t) = P(X_1 > t, \dots, X_n > t) = \Delta_{F_1(t)}^1 \Delta_{F_2(t)}^1 \dots \Delta_{F_n(t)}^1 C_\tau(u_1, u_2, \dots, u_n) \quad (1)$$

式中, $R_s(t)$ 为系统在 t 时刻的可靠度; $P(\cdot)$ 表示概率; X_i 为系统的第 i 个部件; $P(X_i > t)$ 代表系统的第 i 个部件在 t 时刻正常工作的可能性大小; Δ 为差分符号, 即 $\Delta_{x_1}^2 f(x) = f(x_2) - f(x_1)$; C_τ 为 Copula 函数; $u_i = F_i(t) = 1 - R_i(t)$, $R_i(t)$ 为第 i 个部件的可靠度。

对于并联系统, 可靠性计算式为

$$R_s(t) = P(X_1 > t \cup \dots \cup X_n > t) = 1 - C_\tau(u_1, u_2, \dots, u_n) \quad (2)$$

为解决系统可靠性分配问题, 本文采用 Gumbel Copula 函数, 其具体表达式为

$$C_\tau(u_1, u_2, \dots, u_n) = \exp - [(-\ln u_1)^\tau + (-\ln u_2)^\tau + \dots + (-\ln u_n)^\tau]^{1/\tau} \quad (3)$$

式中, τ 为相关程度参数, $\tau \in [1, +\infty)$, $\tau = 1$ 时表示组成部件之间独立失效。

由假设得工业机器人系统可靠性 R_s 为

$$R_s = \exp - [(-\ln R_1)^\tau + (-\ln R_2)^\tau + \dots + (-\ln R_6)^\tau]^{1/\tau} \quad (4)$$

式中, R_1 为减速器的可靠性; R_2 为电机的可靠性; R_3 为驱动器的可靠性; R_4 为控制器的可靠性; R_5 为示教器的可靠性; R_6 为机械手的可靠性。

一个组件越重要, 其在系统中的结构位置对系统的影响就越大, 本文引入结构重要度的概念^[28]。使用结构重要度来衡量子系统变化对系统变化的影响程度。

记 j 为系统中任一子系统; p_j 表示第 j 个子系统的

状态; $p_j = 1_j$ 表示子系统 j 正常; $p_j = 0_j$ 表示子系统 j 故障; p 表示其他子系统的某个状态; $\phi(p_j, p)$ 表示系统的结构函数; $\phi(p_j, p) = 1$ 表示系统正常; $\phi(p_j, p) = 0$ 表示系统故障。若

$$\phi(1_j, p) - \phi(0_j, p) = 1 \quad (5)$$

则表示 j 在 (p_j, p) 这种情形下是一个关键部件, 此时式(5)等价于

$$\phi(1_j, p) = 1, \phi(0_j, p) = 0 \quad (6)$$

子系统 j 正常时系统正常, j 失效时系统失效, 故称 $(1_j, p)$ 为 j 的一个关键路向量。记 j 的关键路向量总数为 $n'_\phi(j)$, 则

$$n'_\phi(j) = [\phi(1_j, p) - \phi(0_j, p)] \quad (7)$$

对于有 n' 个子系统的系统来说, p 总共有 $2^{n'-1}$ 种不同的结果, 因此定义子系统 j 的结构重要度为

$$I_\phi(j) = \frac{1}{2^{n'-1}} n'_\phi(j) \quad (8)$$

式中, $I_\phi(j)$ 表示 j 的关键路向量数目在所有 $2^{n'-1}$ 种可能情形中占的比例。

2 基于前馈人工神经网络的子系统可靠性分配

本文在工业机器人系统的可靠性分配中引入了人工神经网络。以成功分配的情况作为学习样本, 通过模型训练, 根据专家的设计经验存储每个神经元的权重。在将可靠性分配给子系统的过程中, 只需将参数输入模型, 就可以得到可靠性分配的结果, 具体操作如图 2 所示。

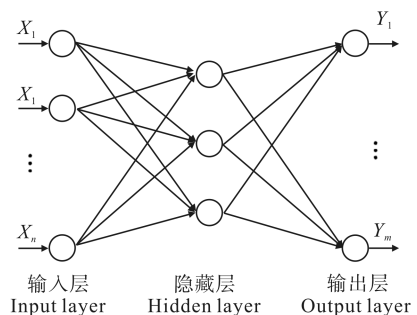


图 2 3层前馈神经网络

Fig. 2 Three-layer feedforward neural network

在 3 层前馈神经网络中, 输入 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 是工业机器人可靠性分配的参数, 如系统可靠性、子系统结构重要度、子系统复杂度等。然后通过式(9)计算第 h 个隐藏层的输入, 为

$$\alpha_h = \sum_{i=1}^n \gamma_{ih} x_i \quad (9)$$

式中, n 为输入层神经元的数量, 依赖于输入向量的维数; γ_{ih} 为输入层第 i 个神经元与隐藏层第 h 个神经元之

间的权值。

隐藏层的第 h 个神经元的输出结果为

$$Q_h = f(\alpha_h - \tau_h) \quad (10)$$

式中, $f(\cdot)$ 为隐藏层的激活函数, 这里使用线性整流 (Rectified Linear Unit, ReLu) 函数; τ_h 为阈值。

通过式 (9) 可以计算出输出层的第 j 个神经元的输入为

$$\beta_j = \sum_{h=1}^k \omega_{hj} Q_h \quad (11)$$

式中, ω_{hj} 为隐藏层第 h 个神经元与输出层第 j 个神经元之间的权值; k 为隐藏层神经元的数量, 可通过以下方法确定:

$$k = \sqrt{m+n} + a \quad (12)$$

式中, m 为输出层神经元的数量; a 为一个介于 1~10 的常数。

然后, 输出层中第 j 个神经元的输出值为

$$y_j = g(\beta_j - \theta_j) \quad (13)$$

式中, $g(\cdot)$ 为外层的激活函数, 通常为线性函数; θ_j 为阈值。

神经网络的输出与实际的可靠性分配值之间存在一定的误差, 误差为

$$E = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^m (y_j - \hat{y}_j)^2 \quad (14)$$

式中, \hat{y}_j 为对第 j 个神经元期望的输出值。随后, 开始错误的反向传播过程。

首先, 将误差传播到隐藏层, 即

$$E = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^m [g(\beta_j - \theta_j) - \hat{y}_j]^2 = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^m [g(\sum_{h=1}^k \omega_{hj} Q_h - \theta_j) - \hat{y}_j]^2 \quad (15)$$

进一步地, 它被传播到输入层, 误差为

$$E = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^m \{g[\sum_{h=1}^k \omega_{hj} f(\sum_{i=1}^n \gamma_{ih} x_i - \tau_h) - \theta_j] - \hat{y}_j\}^2 \quad (16)$$

由式 (16) 可以看出, 误差是权值 ω_{hj} 、 γ_{ih} 的函数, 因此 BP 算法的过程是指迭代调整权值使误差最小化, 采用梯度下降法使误差函数收敛到最小值。训练后的模型需要用一些样本进行测试, 当它达到要求的精度时, 可以用来分配工业机器人从系统到子系统的可靠性。

3 基于毕达哥拉斯模糊数的可靠性分配

3.1 毕达哥拉斯模糊数的基础理论

定义 1^{[29]119274}: 设 $U = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ 是一个有限非空集合, 则 U 上的一个 PFS 为

$$P' = \left\{ \langle a, u_p(a), v_p(a) \rangle : a \in U \right\} \quad (17)$$

式中, $u_p(a), v_p(a) \in [0, 1]$ 时, 表示 U 中的元素 a 属于 P' 的隶属度和非隶属度; 当满足 $0 \leq u_p^2(a) + v_p^2(a) \leq 1$, $\pi_p(a) = \sqrt{1 - u_p^2(a) - v_p^2(a)}$ 时, 表示 U 中的元素 a 属于 P' 的犹豫度。

定义 2^{[29]119274}: 设 $\theta = (u_\theta, v_\theta)$ 为一个 PFN, 其得分函数 S 和精确函数 A 分别为

$$S(\theta) = (\mu_\theta)^2 - (v_\theta)^2 \quad (18)$$

$$A(\theta) = (\mu_\theta)^2 + (v_\theta)^2 \quad (19)$$

式中, $S(\theta) \in [-1, 1]$; $A(\theta) \in [0, 1]$ 。

定义 3^{[29]119274}: 设 $\theta = (u_\theta, v_\theta)$, $\theta_1 = (u_{\theta_1}, v_{\theta_1})$, $\theta_2 = (u_{\theta_2}, v_{\theta_2})$ 是 3 个毕达哥拉斯模糊数, 则它们的运算规则为

$$\theta^c = (v_\theta, u_\theta) \quad (20)$$

$$\lambda \theta = [\sqrt{1 - (1 - u_\theta^2)^\lambda}, (v_\theta)^\lambda] \quad (21)$$

$$\theta^\lambda = [(u_\theta)^\lambda, \sqrt{1 - (1 - v_\theta^2)^\lambda}] \quad (22)$$

$$\theta_1 \oplus \theta_2 = (\sqrt{u_{\theta_1}^2 + u_{\theta_2}^2 - u_{\theta_1}^2 u_{\theta_2}^2}, v_{\theta_1} v_{\theta_2}) \quad (23)$$

$$\theta_1 \otimes \theta_2 = (u_{\theta_1} u_{\theta_2}, \sqrt{v_{\theta_1}^2 + v_{\theta_2}^2 - v_{\theta_1}^2 v_{\theta_2}^2}) \quad (24)$$

$$\theta_1 \cup \theta_2 = [\max(u_{\theta_1}, u_{\theta_2}), \min(v_{\theta_1}, v_{\theta_2})] \quad (25)$$

$$\theta_1 \cap \theta_2 = [\min(u_{\theta_1}, u_{\theta_2}), \max(v_{\theta_1}, v_{\theta_2})] \quad (26)$$

定义 4^{[29]119274}: 设 $\theta_1 = (u_{\theta_1}, v_{\theta_1})$, $\theta_2 = (u_{\theta_2}, v_{\theta_2})$, \dots , $\theta_n = (u_{\theta_n}, v_{\theta_n})$ 是一组 PFN, 其权重分别为 $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n$, 其中 $\varphi_i \in [0, 1]$, $\sum_{i=1}^n \varphi_i = 1$, 则 PFN 加权平均聚合算子为

$$G(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n) = [\sqrt{1 - \prod_{i=1}^n (1 - u_i^2)^{\varphi_i}}, \prod_{i=1}^n (v_i)^{\varphi_i}] \quad (27)$$

3.2 分配权重的计算

为了提高子系统到部件的可靠性分配的合理性和有效性, 本文选择 6 个影响因素, 即重要程度 h_1 、环境条件 h_2 、技术水平 h_3 、可维修性 h_4 、费用灵敏度 h_5 、复杂性 h_6 , 其遵循的可靠性分配原理^[30]如表 2 所示。

在对这 6 个影响因素进行评分时, 邀请一位专家分别对子系统的部件使用 PFN 进行评价, 构造的决策矩阵 Z_{xy} (xy 代表第 x 个子系统的第 y 个部件; $x = 1, 2, \dots, 6$; $y = 1, 2, \dots, n_0$) 如下:

$$Z_{xy} = \begin{bmatrix} (u_{11}, v_{11}) & \cdots & (u_{16}, v_{16}) \\ \vdots & (u_{yk}, v_{yk}) & \vdots \\ (u_{n_01}, v_{n_01}) & \cdots & (u_{n_06}, v_{n_06}) \end{bmatrix} \quad (28)$$

一个 PFN 包含隶属度部分、犹豫度和非隶属度部分, 本文使用十一分标度^[31]来转化语言标量, 评分标准如表 3 所示。例如, 若 Z_x 中 $(u_{yk}, v_{yk}) = (0.865, 0.135)$, 则表示第 x 个系统中第 y 个部件第 k 个影响因素符合工业机器人正常工作的隶属度和非隶属度。

表 2 工业机器人子系统-部件的分配基本原则

Tab. 2 Basic principles of component allocation for industrial robot subsystems

影响因素 Influence factor	工业机器人子系统-部件的分配基本原则 Basic principles of component allocation for industrial robot subsystems
重要程度 h_1 Importance level h_1	重要程度越高的部件故障对任务完成的影响越大,因此应分配较高的可靠性。 Higher the importance of component failures, the greater the impact on task completion, therefore higher reliability should be allocated.
环境条件 h_2 Environmental conditions h_2	对于工作环境恶劣的部件,由于部件需要连续工作或面临较严重的负荷条件,故障率始终较高,因此应分配较低的可靠性。 For components with harsh working environments, due to the need for continuous operation or facing severe load conditions, the failure rate is always higher, so lower reliability should be allocated.
技术水平 h_3 Technical level h_3	对于技术成熟的部件,产品的技术积累已达到一定水平,在设计阶段实现更高的可靠性,因此应分配更高的可靠性。 For technologically mature components, the accumulation of product technology has reached a certain level, achieving higher reliability in the design phase, therefore higher reliability should be allocated.
可维修性 h_4 Maintainability h_4	故障维修性差的部件维修需要耗费大量时间与资金,因此应分配较高的可靠性。 Repairing components with poor maintainability requires a significant amount of time and money, therefore higher reliability should be allocated.
费用灵敏度 h_5 Cost sensitivity h_5	费用灵敏度高的部件,提高相同可靠性所付出成本也高,因此应分配较低的可靠性。 Components with high cost sensitivity also incur high costs in improving the same level of reliability, therefore lower reliability should be allocated.
复杂性 h_6 Complexity h_6	对于复杂性较高的部件,由于对组件的数量和精度要求较高,需要大量的人力和物力来提高可靠性,因此需要分配较低的可靠性。 For components with higher complexity, due to higher requirements for the quantity and accuracy of components, a large amount of manpower and material resources are required to improve reliability, so lower reliability needs to be allocated.

由于重要程度 h_1 、技术水平 h_3 、可维修性 h_4 随评分的升高,分配的部件可靠性增大,环境条件 h_2 、费用灵敏度 h_5 、复杂性 h_6 随评分的升高,分配的部件可靠性降低,故决策矩阵需统一标准,为

$$\bar{z}_{yk} = (\bar{u}_{yk}, \bar{v}_{yk}) = \begin{cases} z_{yk} = (u_{yk}, v_{yk}), k = 1, 3, 4 \\ (z_{yk})^c = (v_{yk}, u_{yk}), k = 2, 5, 6 \end{cases} \quad (29)$$

然后构造得分矩阵 $\Omega = (\eta_{yk})_{n \times 6}$, 其中

$$\eta_{yk} = 0.5[(\bar{u}_{yk})^2 - (\bar{v}_{yk})^2 + 1] \quad (30)$$

则得到第 x 个子系统第 y 个部件的综合评分为

$$W_{xy} = \sum_{k=1}^6 \eta_{yk} \quad (31)$$

那么 y 个部件的权重因子为

表 3 语言术语到模糊分数转化的十一分制表

Tab. 3 Eleven-point table for converting linguistic terms into fuzzy scores

语言术语 Language terminology	模糊等级 Fuzzy level	分数 Score
异常低 Exceptionally low	M_1	0.045
极低 Extremely low	M_2	0.135
非常低 Very Low	M_3	0.255
低 Low	M_4	0.335
低于平均 Below average	M_5	0.410
平均 Average	M_6	0.500
高于平均 Above average	M_7	0.590
高 High	M_8	0.665
非常高 Very high	M_9	0.745
极高 Extremely high	M_{10}	0.865
异常高 Exceptionally high	M_{11}	0.955

$$w_{xy} = (6 - W_{xy}) / \left[\sum_{y=1}^n (6 - W_{xy}) \right] \quad (32)$$

假设部件的寿命分布服从指数分布,第 x 个子系统第 y 个部件的失效率为 λ_{xy} , 则部件的可靠性随失效率的增大而减小,而在部件独立失效的串联子系统分配方式为 $R_{xy} = R_x^{w_{xy}}$, 其本质反映的是分配权重 w_{xy} 越大(部件的重要程度 h_1 、技术水平 h_3 、可维修性 h_4 越低,环境条件 h_2 、费用灵敏度 h_5 、复杂性 h_6 越高), 部件分配得到的可靠性越小,故部件失效率与分配权重对部件可靠性影响单调性一致,可考虑使用失效率按分配权重计算,则

$$R_{xy}(t) = e^{-\lambda_{xy}t} \quad (33)$$

$$\lambda_{x1} : \lambda_{x2} : \dots : \lambda_{xn} = w_{x1} : w_{x2} : \dots : w_{xn} \quad (34)$$

$$R_x = \exp \left[-\left[(-\ln R_{x1})^\tau + (-\ln R_{x2})^\tau + \dots + (-\ln R_{xn})^\tau \right]^{\frac{1}{\tau}} \right] \quad (35)$$

通过联立上述方程组,即可求出在 t 时刻,子系统满足 R_x , 各个部件该分配的可靠性 $R_{xy}(t)$ 。

4 实例分析

假定工业机器人系统寿命服从指数分布,设定系统的目标为平均寿命达 80 000 h, 如果系统运行 1 920 h, 则可靠性为 $R_s = e^{-(0.0000125 \times 1920)} = 0.9763$ 。采用 3 层前馈神经网络将工业机器人系统的可靠性分配给各个子系统,表 4 列出了一些已成功分配的案例数据,即学习样本。由表 4 可知, $R_s = \exp \left[-\left[(-\ln R_1)^\tau + (-\ln R_2)^\tau + \dots + (-\ln R_6)^\tau \right]^{\frac{1}{\tau}} \right] = 0.9822 > 0.9763$, 其中相关系数 τ 取值为 2, 这说明子系统的可靠性分配结果可以保证系统的可靠性达到设计目标。

表 4 3 层前神经网络的部分学习样本

Tab. 4 Part of the learning samples for three-layer feedforward neural networks

样本数 Sample size	系统可靠性 System reliability	结构重要度 Structural importance	复杂性 Complexity	子系统可靠性 Subsystem reliability
1	0.976 3	0.031 6	0.216 7	0.989 0
2	0.976 3	0.037 6	0.131 7	0.995 4
3	0.976 3	0.045 2	0.059	0.996 1
4	0.976 3	0.042 8	0.247	0.991 4
5	0.976 3	0.039 2	0.131	0.989 8
6	0.976 3	0.038 5	0.207	0.999 4

系统可靠性是指整个系统的可靠性目标,复杂度是指子系统部件数量占整个系统的部件数量的比例。根据式(7)~式(9)选择由输入层的3个节点组成的前馈神经网络,即系统可靠性、结构重要性和复杂性。隐藏层有4个节点,输出层有1个节点。40个样本按照70%的训练样本、15%的验证样本和15%的测试样本的比例输入到模型中。将工业机器人的相关参数输入到具有足够精度的模型中,并对其进行了分配,可以得到如表5所示的6个子系统。由式(14)知,误差 $E = 0.000\ 048$,非常小,这说明BP神经网络预测数据合理。

表 4 子系统的可靠性分配结果

Tab. 5 Reliability allocation results of subsystems

子系统 Subsystem	减速器 Reducer	电动机 Electrical machinery	驱动器 Driver	控制器 Controller	示教器 Teach Pendant	机械手 Manipulator
本文分配可靠性 Allocation reliability in this article	0.987 8	0.985 9	0.996 5	0.992 7	0.996 5	0.992 7
文献[10] ¹⁰⁸²⁴⁸ 分配可靠性 Allocation reliability in reference [10] ¹⁰⁸²⁴⁸	0.997 6	0.998 4	0.998 4	0.998 5	0.998 3	0.998 7
相对误差 Relative error	0.009 8	0.012 5	0.011 9	0.005 8	0.001 8	0.006

将工业机器人系统可靠性分配给相应子系统后,下一步将子系统可靠性分给相应部件,以减速器子系统为例,其组成部件有齿轮、轴承、转动轴、针齿,邀请

3位专家采用PFN分别对相应部件的重要程度 h_1 、环境条件 h_2 、技术水平 h_3 、可维修性 h_4 、费用灵敏度 h_5 、复杂性 h_6 进行评分,构造6个决策矩阵,评分结果为

$$Z_1 = \begin{bmatrix} (0.865, 0.135) & (0.255, 0.745) & (0.500, 0.500) & (0.865, 0.135) & (0.135, 0.865) & (0.255, 0.745) \\ (0.745, 0.135) & (0.255, 0.745) & (0.955, 0.045) & (0.865, 0.135) & (0.255, 0.745) & (0.255, 0.865) \\ (0.865, 0.335) & (0.410, 0.865) & (0.865, 0.135) & (0.745, 0.255) & (0.410, 0.865) & (0.135, 0.865) \\ (0.745, 0.255) & (0.335, 0.745) & (0.745, 0.255) & (0.665, 0.335) & (0.255, 0.886) & (0.135, 0.955) \end{bmatrix} \quad (36)$$

决策矩阵统一标准后,为

$$\bar{Z}_1 = \begin{bmatrix} (0.865, 0.135) & (0.745, 0.255) & (0.500, 0.500) & (0.865, 0.135) & (0.865, 0.135) & (0.745, 0.255) \\ (0.745, 0.135) & (0.745, 0.255) & (0.955, 0.045) & (0.865, 0.135) & (0.745, 0.255) & (0.865, 0.255) \\ (0.865, 0.335) & (0.865, 0.410) & (0.865, 0.135) & (0.745, 0.255) & (0.865, 0.410) & (0.865, 0.135) \\ (0.745, 0.255) & (0.745, 0.335) & (0.745, 0.255) & (0.665, 0.335) & (0.865, 0.255) & (0.955, 0.135) \end{bmatrix} \quad (37)$$

将决策矩阵分别转化为得分矩阵,为

$$\Omega_1 = \begin{bmatrix} 0.865\ 0 & 0.745\ 0 & 0.500\ 0 & 0.865\ 0 & 0.865\ 0 & 0.745\ 0 \\ 0.768\ 4 & 0.745\ 0 & 0.955\ 0 & 0.865\ 0 & 0.745\ 0 & 0.841\ 6 \\ 0.818\ 0 & 0.790\ 1 & 0.865\ 0 & 0.745\ 0 & 0.790\ 1 & 0.865\ 0 \\ 0.745\ 0 & 0.721\ 4 & 0.745\ 0 & 0.665\ 0 & 0.841\ 6 & 0.946\ 9 \end{bmatrix} \quad (38)$$

则齿轮、轴承、转动轴、针齿的综合评分分别为

$$W_{11} = 4.585\ 0; W_{12} = 4.920\ 0; \quad (39)$$

$$W_{13} = 4.873\ 1; W_{14} = 4.664\ 9;$$

$$w_{11} = 0.285\ 5; w_{12} = 0.217\ 9; \quad (40)$$

$$w_{13} = 0.227\ 3; w_{14} = 0.269\ 3$$

结合式(35)、式(36)、式(37)可得

$$R_{11} = 0.993\ 1; R_{12} = 0.994\ 7; \quad (41)$$

$$R_{13} = 0.994\ 5; R_{14} = 0.993\ 5$$

电动机子系统构造的决策矩阵为

$$Z_2 = \begin{bmatrix} (0.745,0.255) & (0.255,0.745) & (0.745,0.255) & (0.665,0.335) & (0.255,0.865) & (0.335,0.865) \\ (0.745,0.255) & (0.500,0.665) & (0.745,0.500) & (0.865,0.135) & (0.135,0.955) & (0.255,0.745) \\ (0.865,0.335) & (0.255,0.865) & (0.955,0.135) & (0.665,0.410) & (0.255,0.865) & (0.135,0.865) \\ (0.955,0.135) & (0.410,0.665) & (0.955,0.135) & (0.745,0.335) & (0.410,0.665) & (0.500,0.665) \\ (0.745,0.335) & (0.335,0.745) & (0.665,0.500) & (0.955,0.135) & (0.255,0.745) & (0.255,0.865) \\ (0.865,0.410) & (0.335,0.865) & (0.745,0.410) & (0.865,0.255) & (0.135,0.955) & (0.335,0.745) \\ (0.665,0.410) & (0.135,0.865) & (0.745,0.335) & (0.745,0.410) & (0.335,0.865) & (0.135,0.865) \end{bmatrix} \quad (42)$$

则皮带、联轴器、紧固螺栓、线圈、抱闸、编码器、转动轴分配的可靠性分别为

$$\begin{aligned} R_{21} &= 0.994\ 3; R_{22} = 0.994\ 3; \\ R_{23} &= 0.995\ 9; R_{24} = 0.994\ 0 \end{aligned} \quad (43)$$

驱动器子系统构造的决策矩阵为

$$Z_3 = \begin{bmatrix} (0.665,0.410) & (0.255,0.745) & (0.865,0.335) & (0.865,0.410) & (0.255,0.865) & (0.255,0.745) \\ (0.865,0.335) & (0.335,0.745) & (0.955,0.135) & (0.865,0.335) & (0.135,0.955) & (0.255,0.745) \\ (0.955,0.255) & (0.255,0.865) & (0.955,0.135) & (0.745,0.500) & (0.335,0.865) & (0.135,0.865) \\ (0.955,0.135) & (0.410,0.865) & (0.665,0.410) & (0.955,0.255) & (0.410,0.745) & (0.135,0.865) \\ (0.865,0.410) & (0.135,0.865) & (0.865,0.255) & (0.745,0.335) & (0.500,0.745) & (0.410,0.665) \end{bmatrix} \quad (44)$$

则编码器、晶体管、继电器、网口、接线分配的可靠性分别为

$$\begin{aligned} R_{31} &= 0.998\ 2; R_{32} = 0.998\ 5; R_{33} = 0.998\ 8; \\ R_{34} &= 0.998\ 6; R_{35} = 0.998\ 1 \end{aligned} \quad (45)$$

控制器子系统构造的决策矩阵为

$$Z_4 = \begin{bmatrix} (0.955,0.045) & (0.410,0.745) & (0.865,0.335) & (0.865,0.135) & (0.135,0.955) & (0.135,0.955) \\ (0.745,0.335) & (0.255,0.745) & (0.665,0.335) & (0.745,0.255) & (0.135,0.865) & (0.255,0.745) \\ (0.865,0.335) & (0.255,0.865) & (0.665,0.410) & (0.745,0.335) & (0.255,0.865) & (0.500,0.865) \\ (0.500,0.665) & (0.745,0.665) & (0.665,0.500) & (0.955,0.410) & (0.50,0.865) & (0.665,0.335) \\ (0.865,0.255) & (0.335,0.745) & (0.955,0.335) & (0.865,0.410) & (0.335,0.745) & (0.410,0.745) \\ (0.665,0.500) & (0.500,0.665) & (0.745,0.500) & (0.665,0.500) & (0.500,0.745) & (0.335,0.745) \end{bmatrix} \quad (46)$$

开关、风扇、继电器、I/O 模块、制动电阻、内燃机分配的可靠性分别为

$$\begin{aligned} R_{41} &= 0.998\ 7; R_{42} = 0.997\ 4; R_{43} = 0.997\ 6; \\ R_{44} &= 0.995\ 5; R_{45} = 0.997\ 7; R_{46} = 0.996\ 2 \end{aligned} \quad (47)$$

示教器子系统构造的决策矩阵为

$$Z_5 = \begin{bmatrix} (0.865,0.500) & (0.335,0.745) & (0.955,0.255) & (0.865,0.135) & (0.410,0.665) & (0.255,0.745) \\ (0.665,0.335) & (0.255,0.745) & (0.955,0.135) & (0.865,0.255) & (0.500,0.745) & (0.255,0.745) \\ (0.955,0.135) & (0.500,0.665) & (0.865,0.335) & (0.865,0.335) & (0.255,0.865) & (0.335,0.865) \\ (0.500,0.500) & (0.255,0.865) & (0.665,0.410) & (0.665,0.255) & (0.410,0.665) & (0.135,0.865) \\ (0.865,0.335) & (0.410,0.865) & (0.865,0.255) & (0.745,0.335) & (0.335,0.745) & (0.410,0.955) \end{bmatrix} \quad (48)$$

则主板、屏幕、电路、接线、接口分配的可靠性分别为

$$\begin{aligned} R_{51} &= 0.998\ 5; R_{52} = 0.998\ 4; R_{53} = 0.998\ 7; \\ R_{54} &= 0.998\ 0; R_{55} = 0.998\ 6 \end{aligned} \quad (49)$$

机械手子系统构造的决策矩阵为

$$Z_6 = \begin{bmatrix} (0.665,0.500) & (0.665,0.500) & (0.745,0.410) & (0.745,0.410) & (0.335,0.665) & (0.500,0.500) \\ (0.955,0.335) & (0.255,0.745) & (0.955,0.255) & (0.865,0.255) & (0.135,0.955) & (0.135,0.865) \\ (0.745,0.335) & (0.335,0.865) & (0.665,0.410) & (0.745,0.335) & (0.255,0.865) & (0.255,0.865) \\ (0.955,0.410) & (0.355,0.865) & (0.665,0.745) & (0.955,0.410) & (0.500,0.865) & (0.410,0.665) \\ (0.865,0.410) & (0.255,0.865) & (0.865,0.335) & (0.865,0.410) & (0.335,0.745) & (0.410,0.745) \\ (0.745,0.665) & (0.665,0.410) & (0.745,0.500) & (0.665,0.665) & (0.500,0.745) & (0.255,0.865) \end{bmatrix} \quad (50)$$

则大臂、小臂、螺纹、编码器、动力线、线缆分配的可靠性分别为

$$\begin{aligned} R_{61} &= 0.9959; R_{62} = 0.9987; R_{63} = 0.9976; \\ R_{64} &= 0.9973; R_{65} = 0.9977; R_{66} = 0.9959 \end{aligned} \quad (51)$$

由文献[32]可知工业机器人各部件的失效率,由此可得 $t = 1920$ h时各部件的当前可靠性,如表6所示。

与表5数据对比可知,基于BP神经网络的分配方法与文献[10]¹⁰⁸²⁴⁸的研究方法得出的各子系统可靠性相对误差分别为0.0098、0.0125、0.0119、0.0058、0.0018、0.006,说明误差小,该方法有效,不同的是,本文方法要求减速器、电机、驱动器、控制器、示教器、机械手的可靠性均略低于文献[10]¹⁰⁸²⁴⁸方法。这说明

在考虑系统可靠性、子系统结构重要度、子系统复杂度的情况下,利用BP神经网络预测的可靠性结果比较乐观。由于工业机器人是集机械、电力、计算机科学、控制和机制理论、信息和传感器技术、人工智能等学科为一体的复杂耦合系统,考虑其部件相关失效更符合实际情况,并且运用BP神经网络预测的结果也能减少工业机器人的成本。

由表6可知,在工作1920 h时,大多数部件的工作状态能满足工业机器人平均寿命达80000 h,剩余一些部件如轴承、转动轴、针齿等则需要维修,增强一些可靠性,方能满足条件,以达到可靠性目标。

表6 各部件分配的可靠性和当前可靠性

Tab. 6 Reliability of component allocation and current reliability

部件 Component	分配可靠性 Allocation reliability	当前可靠性 Current reliability	部件 Component	分配可靠性 Allocation reliability	当前可靠性 Current reliability
齿轮 Gear	0.9931	0.9940	风扇 Fan	0.9974	0.9987
轴承 Bearing	0.9947	0.9856	继电器 Relay	0.9976	0.9996
转动轴 Rotating shaft	0.9945	0.9940	I/O模块 I/O module	0.9955	0.9991
针齿 Pin gear	0.9935	0.9923	制动电阻 Braking resistor	0.9977	0.9983
皮带 Belt	0.9943	0.9957	内燃机 Combustion engine	0.9962	0.9987
联轴器 Coupling	0.9943	0.9991	主板 Motherboard	0.9985	0.9962
紧固螺旋 Tighten the screw	0.9959	0.9991	屏幕 Screen	0.9984	0.9872
线圈 Coil	0.9940	0.9991	电路 Circuit	0.9987	0.9979
抱闸 Band-type brake	0.9944	0.9830	接线 Wire	0.9980	0.9953
编码器 Encoder	0.9953	0.9974	接口 Interface	0.9986	0.9979
转动轴 Rotating shaft	0.9945	0.9923	大臂 Big arm	0.9959	0.9996
编码器1 Encoder 1	0.9982	0.9915	小臂 Small arm	0.9987	0.9996
晶体管 Transistor	0.9985	0.9957	螺纹 Thread	0.9976	0.9987
继电器 Relay	0.9988	0.9979	编码器2 Encoder2	0.9973	0.9974
网口 Network interface	0.9986	0.9979	动力线 Power line	0.9977	0.9987
接线 Wire	0.9981	0.9983	线缆 Cable	0.9959	0.9970
开关 Switch	0.9987	0.9996			

5 结论

提出一种结合BP神经网络和PFN的工业机器人系统的可靠性分配方法,通过该方法得出主要结论如下:

1)建立了考虑部件失效相关的工业机器人系统可靠性模型,并提出了可靠性分配的原理。

2)在系统可靠性分配到子系统可靠性的过程中,引入BP神经网络来预测子系统可靠性,输入变量考虑了系统可靠性、子系统的结构重要度和子系统复杂度。

3)在考虑子系统可靠性分配到部件可靠性的过程中,将重要度、环境条件、技术水平、可维修性、费用

灵敏度、复杂性6个影响因素作为分配准则,引入了模糊理论和PFN来评价,以此减少了专家评价过程中的主观性。

4)完成工业机器人的可靠性分配后,分别与相关文献和部件当前可靠性作对比,结果表明,此法可以在减少成本的同时完成可靠性目标,并且可以将不满足要求的部件检验出来并及时维修。

参考文献(References)

[1] 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,2015:6-8.

FANG Ming. Research on reliability allocation method in the con-

- ceptual design stage of mechanical system[D]. Tianjin: Tianjin University, 2015: 6-8. (In Chinese)
- [2] 杜玉祥. 复杂机械系统可靠性分配方法研究[D]. 东北大学, 2017: 7-12.
DU Yuxiang. Research on the reliability allocation method of complex mechanical system[D]. Northeastern University, 2017: 7-12. (In Chinese)
- [3] KUO T C, HUANG S H, ZHANG H C. Design for manufacture and design for 'X': concepts, applications, and perspectives[J]. Computers & Industrial Engineering, 2001, 41(3): 241-260.
- [4] ZHUO H Y, LIU Z Q, LI X. Research on methods of allocation for reliability factors [C]//2013 International Conference on Quality, Reliability, Risk, Maintenance, and Safety Engineering (QR2MSE). IEEE, 2013: 513-515.
- [5] KUO W, PRASAD V R. An annotated overview of system-reliability optimization[J]. IEEE Transactions on Reliability, 2000, 49(2): 176-187.
- [6] KIM M, MOON W, BAE D, et al. Dynamic simulations of electro-mechanical robotic systems driven by DC motors [J]. Robotica, 2004, 22(5): 523-531.
- [7] LI Z B, LI S, LUO X. An overview of calibration technology of industrial robots [J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2021, 8(1): 23-36.
- [8] KIM H, KIM P. Reliability-redundancy allocation problem considering optimal redundancy strategy using parallel genetic algorithm [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2017, 159: 153-160.
- [9] FAZLOLLAHTABAR H, AKHAVAN NIAKI S T. Integration of fault tree analysis, reliability block diagram and hazard decision tree for industrial robot reliability evaluation[J]. Industrial Robot, 2017, 44(6): 754-764.
- [10] BAI B, XIE C X, LIU X D, et al. Application of integrated factor evaluation - analytic hierarchy process-T-S fuzzy fault tree analysis in reliability allocation of industrial robot systems[J]. Applied Soft Computing, 2022, 115: 108248.
- [11] BAI B, LI Z, ZHANG J Y, et al. Research on multiple-state industrial robot system with epistemic uncertainty reliability allocation method [J]. Quality and Reliability Engineering International, 2021, 37(2): 632-647.
- [12] ZHANG Y G, SUN J, YU T X. A reliability allocation method considering failure correlation based on vine copula [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(24): 206-215.
- [13] NAVARRO J, DURANTE F. Copula-based representations for the reliability of the residual lifetimes of coherent systems with dependent components[J]. Journal of Multivariate Analysis, 2017, 158: 87-102.
- [14] HSU T M, EMURA T, FAN T H. Reliability inference for a copula-based series system life test under multiple type-I censoring [J]. IEEE Transactions on Reliability, 2016, 65(2): 1069-1080.
- [15] 陈明. MATLAB 神经网络原理与实例精解[M]. 北京: 清华大学出版社, 2013: 130-158.
CHEN Ming. Principle of MATLAB neural network and exact solution of examples [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2013: 130-158. (In Chinese)
- [16] 滕凌云. 基于 BP 神经网络的建筑工程造价预测模型构建研究 [J]. 住宅产业, 2020(12): 110-113.
TENG Lingyun. Research on construction cost prediction model based on BP neural network[J]. Housing Industry, 2020(12): 110-113. (In Chinese)
- [17] 宁武龙. 基于 BP 神经网络的轴承寿命预测平台开发[D]. 成都: 西南交通大学, 2014: 47-52.
NING Wulong. Platform development of bearing life prediction based on BP neural network [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2014: 47-52. (In Chinese)
- [18] DU Y B, WU G A, TANG Y, et al. A two-stage reliability allocation method for remanufactured machine tools integrating neural networks and remanufacturing coefficient[J]. Computers & Industrial Engineering, 2022, 163: 107834.
- [19] SRIRAMDAS V, CHATURVEDI S K, GARGAMA H. Fuzzy arithmetic based reliability allocation approach during early design and development [J]. Expert Systems with Applications, 2014, 41(7): 3444-3449.
- [20] CHENG Q, WANG H, LIU Z F, et al. Reliability allocation method based on maximum entropy ordered weighted average and hesitant fuzzy Linguistic term set [J]. Journal of Intelligent & Fuzzy Systems, 2019, 37(6): 7991-8004.
- [21] CHENG Q, WANG C, SUN D Y, et al. A new reliability allocation method for machine tools using the intuitionistic trapezoidal fuzzy numbers and TOPSIS [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2023, 124(11): 3689-3700
- [22] YAGER R R. Pythagorean membership grades in multicriteria decision making [J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2014, 2013, 22(4): 958-965.
- [23] WU S J, WEI G W. Pythagorean fuzzy Hamacher aggregation operators and their application to multiple attribute decision making [J]. International Journal of Knowledge-Based and Intelligent Engineering Systems, 2017, 21(3): 189-201.
- [24] RAHMAN K, ABDULLAH S, ALI A, et al. Pythagorean fuzzy Einstein hybrid averaging aggregation operator and its application to multiple-attribute group decision making [J]. Journal of Intelligent Systems, 2020, 29(1): 736-752.
- [25] RANI P, MISHRA A R, PARDASANI K R, et al. A novel VIKOR approach based on entropy and divergence measures of Pythagorean fuzzy sets to evaluate renewable energy technologies in India [J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 238: 117936.
- [26] LIU P D, RANI P, MISHRA A R. A novel Pythagorean fuzzy combined compromise solution framework for the assessment of medical waste treatment technology [J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 292: 126047.
- [27] RANI P, MISHRA A R, LIU P D. New similarity and divergence measures-based Pythagorean fuzzy MULTIMOORA approach for decision-making problems [J]. Computational and Applied Mathe-

- ematics, 2023, 42(1):29.
- [28] 李志博, 于磊, 侯雪梅, 等. 基于结构重要度的 AGREE 软件可靠性分配方法[J]. 计算机应用与软件, 2014, 31(12):45-47.
LI Zhibo, YU Lei, HOU Xuemei, et al. Agree method in software reliability allocation based on structure importance [J]. Computer Applications and Software, 2014, 31(12):45-47. (In Chinese)
- [29] RANI P, CHEN S M, MISHRA A R. Multiple attribute decision making based on MAIRCA, standard deviation-based method, and Pythagorean fuzzy sets [J]. Information Sciences, 2023, 644: 119274.
- [30] 柳梦雪, 胡忠前, 刘健, 等. 基于模糊故障树的水下生产系统可靠性分析[J]. 中国海洋平台, 2023, 38(1):70-76.
LIU Mengxue, HU Zhongqian, LIU Jian, et al. Reliability analysis of subsea production system based on fuzzy fault tree [J]. China Offshore Platform, 2023, 38(1):70-76. (In Chinese)
- [31] CHEN S J, HWANG C L. Fuzzy multiple attribute decision making methods [M]//Fuzzy Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1992:289-486.
- [32] 张俊一. 工业机器人故障树及可靠性指标评估方法研究[D]. 天津:河北工业大学, 2021:16-27.
ZHANG Junyi. Research on fault tree and reliability index evaluation method for industrial robots [D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2021:16-27. (In Chinese)

Reliability allocation of industrial robot systems based on BP neural network and Pythagorean fuzzy numbers

XU Minjun DONG Qiuxian LIU Ruliang LIU Jun XIA Chenguang FANG Xiaojie

(School of Mathematics and Computer sciences, Nanchang University, Nanchang 330031, China)

Abstract: In order to ensure the industrial robot realizes the reliability goal, reliability allocation is a task to be accomplished in its manufacturing design stage. According to the characteristics of industrial robots, such as complex structure, high uncertainty, few samples, and failure correlation between component parts, a reliability allocation method for industrial robot systems based on BP neural network and Pythagorean fuzzy numbers was proposed. Using Copula function to establish a system reliability model, the failures of industrial robots were classified into three levels, the system level, the subsystem level, and the component level. By using the back propagation (BP) neural network, the system reliability, subsystem structure importance and subsystem complexity were taken as the input variables to complete the system-to-subsystem reliability allocation. The Pythagoras fuzzy number was introduced to score the influence factors of importance, environmental condition, technical level, maintainability, cost sensitivity and complexity, complete the reliability allocation from the subsystem level to the component level. The results show that the methodology achieves reliability goals and ensures reliability growth.

Key words: Reliability allocation; Industrial robot; Copula function; BP neural network; Pythagorean fuzzy number

Corresponding author: DONG Qiuxian, E-mail: dongqiuxian@163.com

Fund: National Natural Science Foundation of China (72071099)

Received: 2023-11-05 Revised: 2024-01-08