

• 机械电子工程 •

基于改进 FCEM 的工业机器人可靠性 分配与预测



黄洪钟^{1,2}, 邓哲^{1,2}, 黄山^{1,2}, 黄鹏^{1,2}, 李彦锋^{1,2*}

(1. 电子科技大学机械与电气工程学院 成都 611731; 2. 电子科技大学系统可靠性与安全性研究中心 成都 611731)

【摘要】针对工业机器人在缺乏故障信息的研发初期开展可靠性分配和预测时存在的不确定性问题, 基于模糊数学理论, 采用考虑多影响因素的模糊综合评价法 (FCEM) 对工业机器人进行可靠性分配与预测。为提高 FCEM 的评估效率, 建立了基于最优最劣法 (BWM) 的 FCEM, 以增加判断结果的一致性和减小主观错误发生的可能性。根据工业机器人的工作原理和结构组成, 确定工业机器人的单元集以及影响工业机器人可靠性分配和预测的因素集。将 BWM 运用到 FCEM 的比较过程中, 以确定影响工业机器人可靠性分配和预测的因素权重。通过模糊综合运算求得工业机器人各子系统可靠性分配权重和可靠性预测修正因子, 以此对工业机器人进行可靠性分配和预测。

关键词 最优最劣法; 模糊综合评价法; 工业机器人; 可靠性分配; 可靠性预测
中图分类号 TP242.2 **文献标志码** A **doi**:10.12178/1001-0548.2021257

Application of Improved Fuzzy Comprehensive Evaluation Method in Reliability Allocation and Prediction of Industrial Robots

HUANG Hongzhong^{1,2}, DENG Zhe^{1,2}, HUANG Shan^{1,2}, HUANG Peng^{1,2}, and LI Yanfeng^{1,2*}

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 611731;

2. Center for System Reliability and Safety, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 611731)

Abstract In order to solve the problem of uncertainty in reliability allocation and prediction of industrial robots at the early stage of development in the absence of fault information, a fuzzy comprehensive evaluation method (FCEM) considering multiple influencing factors is proposed for reliability allocation and prediction of industrial robots on the basis of fuzzy mathematical theory. In order to improve the computational efficiency of the FCEM, the best worst method (BWM) is introduced to increase the consistency of the judgment results and reduce the possibility of subjective errors. First, the unit set of the industrial robot and the set of factors affecting its reliability allocation and prediction are determined according to its working principle and structural composition. Then, the BWM is applied to the comparison process of the fuzzy comprehensive evaluation method to determine the weights of factors affecting the reliability allocation and prediction of industrial robots. Finally, the reliability allocation weights and reliability prediction correction factors for each subsystem of the industrial robot are obtained by fuzzy comprehensive operation to allocate and predict its reliability.

Key words best-worst method; fuzzy comprehensive evaluation; industrial robot; reliability allocation; reliability prediction

可靠性分配和预测对提高工业机器人可靠性水平起着重要作用。其中, 可靠性分配将整机的可靠性要求由上至下、由大至小地分配到产品的各个子系统、零部件, 若零部件可靠性指标分配过低, 会造成整机可靠性达不到规定要求, 反之, 则会造成局部“可靠性过剩”, 既增加开发成本, 又增大研

发难度^[1]。可靠性预测则由下至上, 从子系统到整机预测其可靠性水平, 为工业机器人设计方案是否满足可靠性指标要求提供判断依据。因此, 对工业机器人开展准确合理的可靠性分配和预测具有重要意义。

可靠性分配方法有等分配法、评分分配法、AGREE 分配法、层次分析法等, 在实际工程中均

收稿日期: 2021-09-13; 修回日期: 2022-01-13

基金项目: 国家重点研发计划 (2017YFB1301300)

作者简介: 黄洪钟 (1963-), 男, 博士, 教授, 主要从事可靠性设计、寿命预测、人工智能与机器人技术方面的研究。

*通信作者: 李彦锋, E-mail: yanfengli@uestc.edu.cn

有广泛的应用^[2-5]。文献 [6] 引入隶属度的概念, 构建了模糊综合评判模型, 在一定程度上克服了影响系统可靠性分配的各个因素之间存在的模糊性问题。文献 [7] 针对数控机床的可靠性分配问题, 提出了一种综合故障率分配方法。文献 [8] 利用层次结构模型和三标度法对模糊层次分析法进行改进。文献 [9] 将模糊相似比例法与模糊综合评价模型相结合, 通过相似旧机型的可靠性数据对模糊综合评判模型进行修正。文献 [10] 将系统可靠性分配影响因素分为直接和间接两类, 据此提出一种考虑不同失效相关性的可靠性分配方法。此外, 考虑实际研发过程中常常存在的成本、大小、质量等约束, 基于优化理论的可靠性分配方法也受到了国内外学者的广泛关注。文献 [11] 得到了保证串并联系统全局最优解的成本函数的凸性条件, 采用近似解析法克服其限制太大的问题。文献 [12] 针对冗余分配问题建立了一个新的模型, 用系统的平均故障时间最大化来代替给定时间内系统可靠性最大化。文献 [13] 将总成本分为研发成本和使用费用, 构建可靠性优化分配模型, 利用遗传算法将系统整体可靠性指标分配给各子系统。

可靠性预测方法有相似产品法、故障率预测法、应力强度干涉法等。文献 [14] 在发电机组可靠性数据的基础上, 建立其检修数学模型, 预测其等效可用系数。文献 [15] 对相似产品法进行改进, 提出了“三要素”可靠性评估方法, 以此对运载火箭进行可靠性预测。文献 [16] 针对可靠性预测过程中故障数据缺乏且存在较大主观性的问题, 在相似产品法中引入模糊数, 对柴油机进行可靠性预测。文献 [17] 引入神经网络算法, 利用相似产品可靠性数据修正专家评价, 提高了可靠性指标预测结果的精度和可信任度。文献 [18] 提出了一种基于网络模型的任务可靠性预计方法, 利用二元决策树进行分析计算, 提高了可靠性预测的计算效率。文献 [19] 针对船舶电气系统保护单元的特点, 采用元器件的误动失效率代替通用失效率, 对其进行可靠性预测, 增加了系统可靠性预测结果的可信任度。

然而, 上述可靠性分配和预测方法有着明显的限制和缺陷。如评分分配法和相似产品法中专家针对影响各子系统可靠性的因素进行简单评分, 往往存在较大的主观性。在文献 [20] 中, 针对工业机器人, 采用评分分配法将整机可靠度分配给机械、电子子系统, 并采用不同的方法将各个机械、电子

子系统的可靠度分配给其元器件, 虽然其将机械、电子子系统独立分析, 但在采用评分分配法时难免会使结果具有较大的主观性。文献 [21] 引入区间数和层次分析法, 采用基于区间层次分析的相似产品法对工业机器人进行可靠性预测, 但传统层次分析法对比评分次数较多, 结果同样会具有较大的主观性。

因此, 为了减少工业机器人可靠性分配和预测时受主观不确定性问题的影响, 本文采用考虑多影响因素的模糊综合评价法, 对工业机器人进行可靠性分配和预测, 同时引入最优最劣法 (the best worst method, BWM) 对求解过程进行改进, 减小主观错误发生的可能性。

1 工业机器人工作原理

工业机器人是由各种类型的机械零部件和电子元器件构成的多关节多自由度复杂机电系统, 遵照预先编排的程序或人类的实时指挥完成预定的操作, 其工作原理如图 1 所示。基本原理是示教再现, 通过人为控制工业机器人按照实际的工作顺序运行一遍, 在此期间, 工业机器人的速度、位置等运动参数会被记录下来, 自动生成一个可以连续执行并完成预定操作的控制程序, 并且, 也可以通过人为编制控制程序, 只需要一个启动指令, 工业机器人就可以按照控制程序精准地执行预先规定的操作。

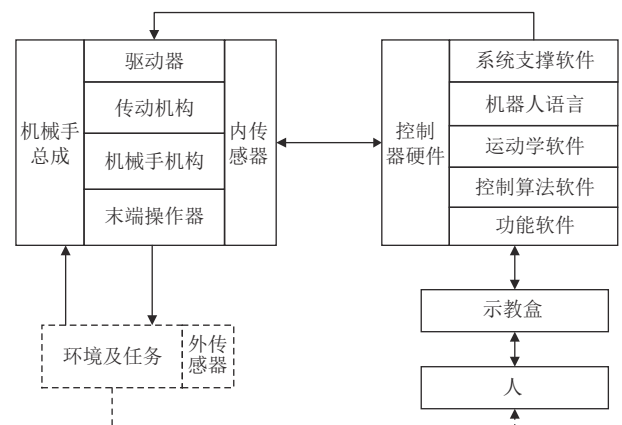


图 1 工业机器人工作原理

本文将工业机器人划分为本体、伺服电机、减速器、控制器和驱动器 5 个子系统, 其可靠性框图如图 2 所示。其中, 工业机器人的本体是用来执行预定操作的部分, 一般由手部、腕部、臂部、腰部和底座构成; 伺服电机用于控制本体进行相关预定操作; 减速器在电机及执行机构之间, 完成减速及传动工作; 控制器通过控制程序对机器人发出指

令，控制机器人完成预设的操作；驱动器的主要功能是为执行机构的运动提供动力。

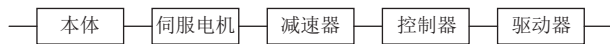


图 2 工业机器人可靠性框图

2 改进模糊综合评价法及应用

2.1 模糊综合评价法

模糊综合评价可对受多种因素影响的事物做出一个总体的评判，结果清晰，系统性强，能较好地解决存在认知不确定性及难以量化的问题^[22]。

1) 基于模糊综合评价法的可靠性分配

模糊综合评价法在系统的单元集和影响系统可靠性分配的因素集的基础上，构建系统层次分析模型，根据专家对单元集中的子系统和因素集中的影响因素进行两两对比评分，获得影响因素的权重和隶属度矩阵，通过模糊综合运算求得各子系统可靠性分配权重，将规定的整机可靠性指标分配给各子系统^[23]。基于模糊综合评价法的可靠性分配的分析步骤如图 3 所示。

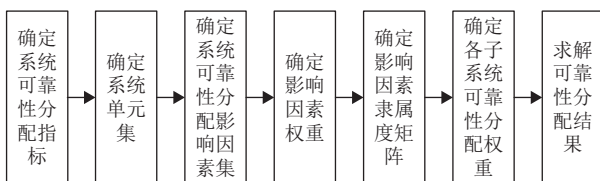


图 3 基于模糊综合评价法的可靠性分配的分析步骤

2) 基于模糊综合评价法的可靠性预测

在确定系统单元集的基础上，明确影响系统可靠性预测的因素集，根据专家对因素集中的影响因素进行两两对比评分，获得影响因素的权重，同时在单一影响因素下对比新产品与相似产品的差异程度，并进行评分，通过影响因素的权重和差异程度的综合运算，获得可靠性修正因子，对产品进行可靠性预测^[9,21]。基于模糊综合评价法的可靠性预测的步骤如图 4 所示。

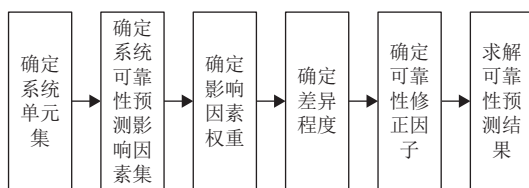


图 4 基于模糊综合评价法的可靠性预测步骤

2.2 最优最劣法

最优最劣法可以在不确定的环境下为各因素的

权重赋值，具体步骤如图 5 所示^[24-25]。

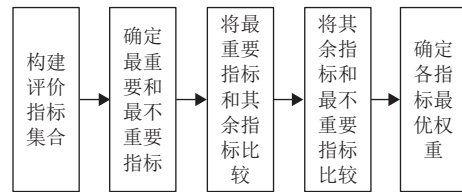


图 5 最优最劣法分析步骤

1) 构建评价指标集合 $C = \{c_1, c_2, c_3, \dots, c_n\}$ ，确定最重要的指标 c_B 和最不重要的指标 c_W ；

2) 将最重要的指标与其余指标进行比较，得到判断向量 $(a_{B1}, a_{B2}, a_{B3}, \dots, a_{Bn})$ ；将其余指标和最不重要的指标进行比较，得到判断向量 $(a_{1W}, a_{2W}, a_{3W}, \dots, a_{nW})$ 。

3) 根据判断向量及式 (1) 获取各指标最优权重：

$$\begin{cases} \min \xi^* \\ \text{s.t.} \\ \left| \frac{\omega_B}{\omega_j} - a_{Bj} \right| \leq \xi^* \\ \left| \frac{\omega_j}{\omega_W} - a_{jW} \right| \leq \xi^* \\ \sum_{j=1}^n \omega_j = 1 \\ \omega_j \geq 0, j = 1, 2, 3, \dots, n \end{cases} \quad (1)$$

式中， ω_B 为最重要指标的权重； ω_W 为最不重要指标的权重； ω_j 为各指标权重； ξ^* 为一致性指标； a_{Bj} 和 a_{jW} 分别为指标 c_j 与最重要的指标 c_B 和最不重要的指标 c_W 相比较得到的判断向量中的值。

利用式 (1) 获取各指标最优权重和一致性指标 ξ^* 后，对 BWM 方法进行一致性检验：

$$CR = \frac{\xi^*}{\max \xi} \quad (2)$$

式中， ξ^* 为一致性指标， ξ^* 越大，比较结果越不可靠。 $\max \xi$ 取值如表 1 所示，其中， a_{BW} 表示判断向量中最重要的指标 c_B 与最不重要的指标 c_W 的比较值， $\max \xi$ 表示 a_{BW} 取不同值时 ξ 的最大值^[26-27]。

表 1 $\max \xi$ 取值表

a_{BW}	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\max \xi$	0.00	0.44	1.00	1.63	2.30	3.00	3.73	4.47	5.23

当 $CR < 0.1$ 时，认为通过一致性检验，否则应重新构建判断向量。

2.3 改进模糊综合评价法

模糊综合评价法和最优最劣法的比较如图 6 和

图 7 所示。

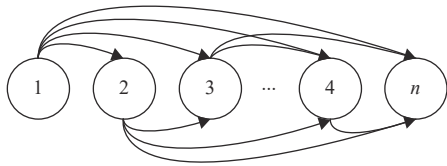


图 6 模糊综合评价法比较

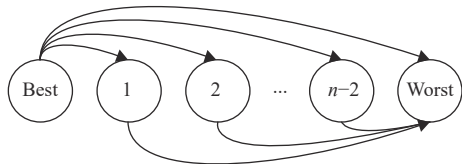


图 7 最优最劣法比较

模糊综合评价法在影响因素两两对比评分过程中, 专家采用九标度法对影响因素集中的任意两个因素的重要程度进行两两对比评分, 获得每一个因素与其他因素作较得到的分值, 判断次数较多, 会增大主观错误发生的可能性, 因此引入最优最劣法对其进行改进。

根据图 6 和图 7 可知, 模糊综合评价法通过专家对评价指标的两两比较来评分, 需要比较 $n(n-1)/2$ 次, 而最优最劣法则只需将 c_B 和其余评价指标以及其余评价指标和 c_W 进行对比评分, 即只需要比较 $2n-3$ 次, 尤其是当评价指标数量较多时, 最优最劣法可以有效减少比较次数。因此, 将最优最劣法引入到模糊综合评价法的对比评分过程中, 可以增加判断结果的一致性, 减小主观错误发生的可能性。

2.4 改进模糊综合评价法的改进过程

1) 工业机器人可靠性分配

根据图 3 所示的可靠性分配流程, 确定工业机器人单元集和影响可靠性分配的因素集。将单元集作为对象层, 因素集作为准则层, 建立如图 8 所示的工业机器人可靠性层次分析结构模型。

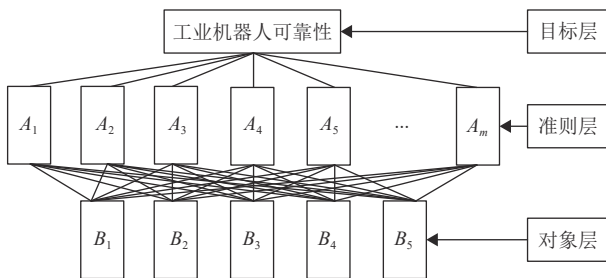


图 8 工业机器人可靠性层次分析结构模型

引入最优最劣法, 并结合如表 2 所示的九标度

法, 改进图 3 中确定影响因素权重和隶属度矩阵时模糊综合评价法的两两对比评分过程。

表 2 九标度法具体含义

标度 a_{ij}	含义
1	i 和 j 同等重要
3	i 比 j 稍显重要
5	i 比 j 明显重要
7	i 比 j 强烈重要
9	i 比 j 极端重要
2、4、6、8	介于上述情况之间

采用体现权数较明显、综合程度较强且可综合考虑全部单因素评价信息的模糊算子 (\cdot, \oplus) 求解模糊综合评价结果, 得到工业机器人各子系统可靠性分配权重为:

$$\omega = \alpha \times S \tag{3}$$

式中, α 为各可靠性分配影响因素权重向量; S 为隶属度矩阵。

将规定的工业机器人整机可靠性指标分配给各子系统, 得到工业机器人各子系统平均无故障工作时间为:

$$MTBF_i = \frac{\sum_{i=1}^5 \omega_i}{\omega_i} MTBF_s \tag{4}$$

式中, $MTBF_i$ 为各子系统平均无故障工作时间; $MTBF_s$ 为工业机器人整机平均无故障工作时间。

2) 工业机器人可靠性预测

根据图 4 所示的可靠性预测流程, 确定工业机器人单元集和影响可靠性预测的因素集。

引入最优最劣法, 并结合如表 2 所示的九标度法和表 3 所示的差异程度量化表, 改进图 4 中确定影响因素权重时模糊综合评价法的两两对比评分过程。

表 3 差异程度量化表

尺度	定义
1	两者无差异
2 (1/2)	新产品可靠性水平略有提高(降低)
3 (1/3)	新产品可靠性水平提高(降低)较少
4 (1/4)	新产品可靠性水平提高(降低)较多
5 (1/5)	新产品可靠性水平提高(降低)很多

求解模糊综合评价结果, 得到工业机器人可靠性修正因子为:

$$D = \beta \times d \quad (5)$$

式中, β 为各可靠性预测影响因素权重向量; d 为影响因素差异程度矩阵。

工业机器人可靠性水平预测值为:

$$\lambda = \lambda_o / D \quad (6)$$

式中, λ 为产品故障率预测值; λ_o 为相似产品故障率。

工业机器人平均无故障工作时间预测值为:

$$MTBF = \frac{1}{\lambda} \quad (7)$$

3 算例分析

某主机厂工业机器人可靠性测试数据为: 样本总数 80 台, 累积测试时长 (修正后) 4 520 796 h, 累积故障数 80 次, 子系统故障频次如表 4 所示。

表 4 子系统故障频次

本体	伺服电机	减速器	控制器	驱动器
13	8	17	19	23

3.1 工业机器人可靠性分配

根据工业机器人的工作原理、结构组成和工作环境, 将工业机器人划分为 5 个子系统, 确定工业机器人单元集 $B = (B_1, B_2, B_3, B_4, B_5) = (\text{本体}, \text{伺服电机}, \text{减速器}, \text{控制器}, \text{驱动器})$ 。

1) 确定工业机器人可靠性分配影响因素集

收集并分析工业机器人的故障数据, 对工业机器人可靠性分配产生影响的主要因素有: 工作环境、技术水平、复杂程度、维修性、成本、故障危害。因此, 影响工业机器人可靠性的因素集 $A = (A_1, A_2, A_3, A_4, A_5, A_6) = (\text{工作环境}, \text{技术水平}, \text{复杂程度}, \text{维修性}, \text{成本}, \text{故障危害})$ 。

2) 确定可靠性分配影响因素权重向量

经分析可得, 最重要的影响因素为故障危害, 最不重要的影响因素为工作环境。将故障危害 A_6 分别与工作环境 A_1 、技术水平 A_2 、复杂程度 A_3 、维修性 A_4 、成本 A_5 进行比较, 采用最优最劣法和表 2 所示的九标度法, 并结合专家评分法, 依据专家经验得判断向量为 $(a_{61}, a_{62}, a_{63}, a_{64}, a_{65}) = (5, 3, 3, 4, 2)$ 。在此基础上, 为便于计算, 增加判断向量元素 a_{66} , 意为故障危害 A_6 与自身相比较的重要程度, 其值应取 1, 后续专家评分过程同理。因此, 判断向量为 $(a_{61}, a_{62}, a_{63}, a_{64}, a_{65}, a_{66}) = (5, 3, 3, 4, 2, 1)$ 。

将技术水平 A_2 、复杂程度 A_3 、维修性 A_4 、成本

A_5 、故障危害 A_6 分别与工作环境 A_1 进行比较, 判断向量为 $(a_{11}, a_{21}, a_{31}, a_{41}, a_{51}, a_{61}) = (1, 2, 2, 3, 4, 5)$ 。

求解式 (1), 得到工作环境 A_1 、技术水平 A_2 、复杂程度 A_3 、维修性 A_4 、成本 A_5 和故障危害 A_6 这 6 个影响因素的权重为 $\varphi_t = (0.057 0, 0.139 2, 0.139 2, 0.104 4, 0.208 9, 0.351 3)$, ξ^* 的值为 0.066 5, 一致性比率 $CR = \xi^* / \max \xi = 0.028 9$, 通过一致性检验。

3) 确定隶属度矩阵

在工作环境 A_1 、技术水平 A_2 、复杂程度 A_3 、维修性 A_4 、成本 A_5 和故障危害 A_6 这 6 个可靠性影响因素中的单一因素影响下, 分析确定最重要的子系统 B_B 和最不重要的子系统 B_W , 如表 5 所示。

表 5 最重要和最不重要的子系统

子系统	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6
B_B	B_3	B_3	B_4	B_3	B_3	B_5
B_W	B_4	B_1	B_1	B_1	B_1	B_2

单一影响因素下, 将最重要的子系统 B_B 分别与其余 $n-1$ 个子系统进行比较, 并且将其余 $n-1$ 个子系统分别与最不重要的子系统 B_W 进行比较, 得到判断向量, 如表 6 所示。

表 6 各影响因素下的判断向量

子系统	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6
B_B	(3,2,1,6,3)	(6,2,1,3,2)	(7,2,2,1,3)	(6,2,1,3,2)	(5,2,1,2,3)	(2,3,2,2,1)
B_W	(2,4,6,1,4)	(1,4,6,4,3)	(1,3,6,7,4)	(1,4,6,3,4)	(1,4,5,4,3)	(2,1,2,2,3)

求解式 (1), 得到在工作环境 A_1 、技术水平 A_2 、复杂程度 A_3 、维修性 A_4 、成本 A_5 、故障危害 A_6 这 6 个影响工业机器人可靠性的单一因素影响下, 本体 B_1 、伺服电机 B_2 、减速器 B_3 、控制器 B_4 、驱动器 B_5 的权重与一致性指标, 如表 7 所示, 各单一因素影响之下工业机器人子系统的权重判断结果均通过一致性检验。

因此, 隶属度矩阵为:

$$S = \begin{bmatrix} 0.155 6 & 0.233 3 & 0.400 0 & 0.055 5 & 0.155 6 \\ 0.051 6 & 0.216 5 & 0.371 1 & 0.144 3 & 0.216 5 \\ 0.046 7 & 0.198 4 & 0.221 8 & 0.385 2 & 0.147 9 \\ 0.058 1 & 0.209 3 & 0.383 7 & 0.139 5 & 0.209 3 \\ 0.064 1 & 0.211 5 & 0.371 8 & 0.211 5 & 0.141 1 \\ 0.184 2 & 0.105 3 & 0.184 2 & 0.184 2 & 0.342 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

4) 确定工业机器人可靠性分配结果

计算模糊综合评价结果, 得到工业机器人各子系统的可靠性分配权重为: $\omega=(0.106\ 7, 0.174\ 1, 0.287\ 8,$

$0.200\ 3, 0.231\ 1)$, 假设工业机器人系统规定的整机可靠性指标为 $MTBF_s=80\ 000\ h$, 则所得工业机器人可靠性分配结果如表 8 所示。

表 7 各子系统最优权重和一致性指标

	B_1	B_2	B_3	B_4	B_5	ξ^*	$\max \xi^*$	CR
A_1	0.155 6	0.233 3	0.400 0	0.055 5	0.155 6	0.066 7	3.00	0.022 2
A_2	0.051 6	0.216 5	0.371 1	0.144 3	0.216 5	0.061 9	3.00	0.020 6
A_3	0.046 7	0.198 4	0.221 8	0.385 2	0.147 9	0.058 4	3.73	0.015 7
A_4	0.058 1	0.209 3	0.383 7	0.139 5	0.209 3	0.034 9	3.00	0.011 6
A_5	0.064 1	0.211 5	0.371 8	0.211 5	0.141 1	0.051 3	2.30	0.022 3
A_6	0.184 2	0.105 3	0.184 2	0.184 2	0.342 1	0.026 3	1.00	0.026 3

表 8 工业机器人可靠性分配结果

子系统	本体	伺服电机	减速器	控制器	驱动器
MTBF/h	749 638.18	459 565.84	278 001.29	399 350.03	346 170.30

根据工业机器人可靠性分配的结果可知, 分配给减速器的可靠性指标最低, 这与实际情况相符。因为减速器复杂程度高, 技术相对不成熟。根据可靠性分配的准则, 应该给复杂程度相对较高、技术相对不成熟的产品或子系统分配较低的可靠性指标。

3.2 工业机器人可靠性预测

工业机器人单元集为 $B=(B_1, B_2, B_3, B_4, B_5)=($ 本体, 伺服电机, 减速器, 控制器, 驱动器)。

1) 确定影响工业机器人可靠性预测的因素集

收集并分析工业机器人的故障数据, 对工业机器人可靠性预测产生影响的主要因素有: 结构复杂程度、制造装配方式、设计参数特性、可靠性体系的完整性及工作环境。因此, 影响工业机器人可靠性预测的因素集 $P=(P_1, P_2, P_3, P_4, P_5)=($ 结构复杂程度, 制造装配方式, 设计参数特性, 可靠性体系的完整性, 工作环境)。

2) 确定可靠性预测影响因素的权重向量

经分析可得, 最重要的影响因素为制造装配方式, 最不重要的影响因素为工作环境。将制造装配方式 P_2 分别与结构复杂程度 P_1 、设计参数特性 P_3 、可靠性体系的完整性 P_4 、工作环境 P_5 进行比较, 判断向量为 $(a_{21}, a_{22}, a_{23}, a_{24}, a_{25})=(3, 1, 3, 4, 6)$ 。将结构复杂程度 P_1 、制造装配方式 P_2 、设计参数特性 P_3 、可靠性体系的完整性 P_4 分别与工作环境 P_5 进行比较, 判断向量为 $(a_{15}, a_{25}, a_{35}, a_{45}, a_{55})=(3, 6, 4, 5, 1)$ 。

求解式 (1), 得到结构复杂程度 P_1 、制造装配

方式 P_2 、设计参数特性 P_3 、可靠性体系的完整性 P_4 、工作环境 P_5 这 5 个影响因素的权重为 $\varphi_i=(0.186\ 1, 0.436\ 0, 0.186\ 1, 0.139\ 5, 0.052\ 3)$, ξ^* 的值为 0.122 1, 一致性比率 $CR = \xi^* / \max \xi = 0.040\ 7$, 通过一致性检验。

3) 确定可靠性预测影响因素的差异程度

在结构复杂程度 P_1 、制造装配方式 P_2 、设计参数特性 P_3 、可靠性体系的完整性 P_4 、工作环境 P_5 这 5 个可靠性预测影响因素中的单一因素影响下, 利用表 3 对各子系统差异程度进行量化评分, 评分结果如表 9 所示。

表 9 各子系统差异程度

	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5
B_1	2	2	2	3	3
B_2	1.1	1.1	1.2	1.4	1.2
B_3	1.1	1.2	1.3	1.5	1.2
B_4	1.5	2	1.5	1.5	2
B_5	1.5	2	1.5	2	2

4) 确定工业机器人可靠性预测结果

利用式 (5) 得可靠性预测修正因子, 利用表 4 得相似产品各子系统故障率, 利用式 (6) 和式 (7) 求解新工业机器人产品各子系统可靠性水平预测值, 整理如表 10 所示。

由表 10 可得工业机器人整机故障率及 MTBF 预测值分别为:

$$\lambda = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_5 = 1.107\ 3 \times 10^{-5}$$

$$MTBF = \frac{1}{\lambda} = 90\ 313.39 \tag{9}$$

工业机器人的可靠性分配和预测结果如表 11 所示。

表 10 各子系统差异程度

子系统	相似产品 λ_0	可靠性修正因子	新产品 λ 预测值	新产品MTBF预测值
本体	$\lambda_{01} = 2.8756 \times 10^{-6}$	2.191 8	$\lambda_1 = 1.3120 \times 10^{-6}$	762 206.20
伺服电机	$\lambda_{02} = 1.7696 \times 10^{-6}$	1.165 7	$\lambda_2 = 1.5181 \times 10^{-6}$	658 730.83
减速器	$\lambda_{03} = 3.7604 \times 10^{-6}$	1.241 9	$\lambda_3 = 3.0281 \times 10^{-6}$	330 244.14
控制器	$\lambda_{04} = 4.2028 \times 10^{-6}$	1.744 2	$\lambda_4 = 2.4097 \times 10^{-6}$	414 997.17
驱动器	$\lambda_{05} = 5.0876 \times 10^{-6}$	1.813 9	$\lambda_5 = 2.8048 \times 10^{-6}$	356 533.55

表 11 工业机器人可靠性分配和预测结果

子系统	可靠性分配结果(MTBF/h)	可靠性预测结果(MTBF/h)
本体	749 638.18	762 206.20
伺服电机	459 565.84	658 730.83
减速器	278 001.29	330 244.14
控制器	399 350.03	414 997.17
驱动器	346 170.30	356 533.55

4 结束语

对工业机器人这个由各种类型零部件和元器件构成的多关节多自由度复杂机电系统而言,其故障状态、故障现象与故障原因之间存在着大量的不确定性,且影响工业机器人系统可靠性的因素有很多,这给采用传统方法进行可靠性分配和预测带来了很大的困扰。

本文采用改进模糊综合评价法,在缺乏故障数据的研究初期完成对工业机器人系统可靠性的分配和预测,首先分析并确定工业机器人单元集以及影响可靠性分配和预测的因素集,在可靠性分配过程中,构建工业机器人可靠性层次分析结构模型,利用九标度法和最优最劣法求得可靠性分配影响因素的权重向量和隶属度矩阵,并计算模糊综合评价结果,对工业机器人进行可靠性分配;在可靠性预测过程中,利用九标度法和最优最劣法求得可靠性预测影响因素的权重向量,并量化新产品与相似产品两者之间的差异程度,对工业机器人进行可靠性预测。根据工业机器人可靠性分配和预测结果,可以使各级设计人员明确工业机器人各子系统的可靠性设计要求,选出既满足可靠性和其他性能要求,又能达到较好经济效益的最佳方案,节约人力和时间。

参 考 文 献

[1] 张永进,孙有朝,刘小弟.基于线性松弛规划的系统可靠性分配决策分析[J].*机械工程学报*,2015,51(18):204-212.

- ZHANG Y J, SUN Y C, LIU X D. Decision analysis of system reliability allocation based on linear relaxation programming[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2015, 51(18): 204-212.
- [2] SILVESTRI A, FALCONE D, DI B G, et al. A new method for reliability allocation: Critical flow method[J]. *Lecture Notes in Control & Information Sciences*, 2015, 20: 249-261.
- [3] 张锐,李波.无人机系统可靠性分配方法[J].*南京航空航天大学学报*,2009,41(S1):106-108.
- ZHANG R, LI B. UAV system reliability allocation method[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2009, 41(S1): 106-108.
- [4] 贾鹏,刁飞,王洪海,等.全电式阀门执行器可靠性设计[J].*机械设计与制造*,2019(7):29-33,38.
- JIA P, DIAO F, WANG H H, et al. Reliability design of all electric valve actuator[J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2019(7): 29-33, 38.
- [5] 李博远,胡丽琴,陈珊琦,等.基于故障树和层次分析的可靠性分配方法[J].*安全与环境工程*,2015,22(1):117-120.
- LI B Y, HU L Q, CHEN S Q, et al. Reliability allocation method based on fault tree and analytic hierarchy process[J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2015, 22(1): 117-120.
- [6] 黄洪钟.机械系统可靠性分配的模糊方法[J].*机械科学与技术*,1996(2):182-186.
- HUANG H Z. Fuzzy method for reliability allocation of mechanical system[J]. *Mechanical Science and Technology*, 1996(2): 182-186.
- [7] WANG Y Q, YAM R C M, ZUO M J, et al. A comprehensive reliability allocation method for design of CNC lathes[J]. *Reliability Engineering and System Safety*, 2001, 72(3): 247-252.
- [8] 方明.基于改进模糊层次分析法的复杂装备可靠性分配研究[J].*电子设计工程*,2014,22(10):117-119,123.
- FANG M. Research on reliability allocation of complex equipment based on improved fuzzy analytic hierarchy process[J]. *Electronic Design Engineering*, 2014, 22(10): 117-119,123.
- [9] 杜丽,刘宇,黄洪钟,等.基于模糊相似比例与综合评判的发动机可靠性分配[J].*航空动力学报*,2009,24(2):385-389.
- DU L, LIU Y, HUANG H Z, et al. Engine reliability allocation based on fuzzy similarity ratio and comprehensive evaluation[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2009, 24(2): 385-389.
- [10] 张玉刚,孙杰,喻天翔.考虑不同失效相关性的系统可靠

- 性分配方法[J]. *机械工程学报*, 2018, 54(24): 206-215.
- ZHANG Y G, SUN J, YU T X. System reliability allocation method considering different failure correlations[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2018, 54(24): 206-215.
- [11] YALAOUI A, CHU C, CHATELET E. Reliability allocation problem in a series-parallel system[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2005, 90(1): 55-61.
- [12] NAJAFI A A, KARIMI H, CHAMBARI A, et al. Two metaheuristics for solving the reliability redundancy allocation problem to maximize mean time to failure of a series-parallel system[J]. *Scientia Iranica*, 2013, 20(3): 832-838.
- [13] 刘伯颖, 李志刚, 黄晓勤, 等. 复杂系统的可靠性优化分配方法及应用[J]. *电工技术学报*, 2014, 29(S1): 497-501.
- LIU B Y, LI Z G, HUANG X Q, et al. Reliability optimal allocation method of complex system and its application[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2014, 29(S1): 497-501.
- [14] 史进渊. 大型发电机组可靠性预测方法与应用[J]. *机械工程学报*, 2011, 47(18): 165-172.
- SHI J Y. Reliability prediction method and application of large generator set[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2011, 47(18): 165-172.
- [15] 吕箴, 张华, 丁秀峰, 等. 新一代运载火箭可靠性量化评价技术研究与应用[J]. *上海航天*, 2016, 33(S1): 13-17.
- LYU Z, ZHANG H, DING X F, et al. Research and application of reliability quantitative evaluation technology for new generation launch vehicle[J]. *Aerospace Shanghai*, 2016, 33(S1): 13-17.
- [16] 杜丽, 张晗亮, 黄洪钟, 等. 模糊相似产品法与综合评判法结合的柴油机可靠性预计[J]. *电子科技大学学报*, 2010, 39(4): 629-633.
- DU L, ZHANG H L, HUANG H Z, et al. Reliability prediction of diesel engine based on fuzzy similar product method and comprehensive evaluation method[J]. *Journal of University of Electronic Science and Technology of China*, 2010, 39(4): 629-633.
- [17] LIU Y, HUANG H Z, LING D. Reliability prediction for evolutionary product in the conceptual design phase using neural network-based fuzzy synthetic assessment[J]. *International Journal of Systems Science*, 2013, 44(3): 545-555.
- [18] 陆志毅, 周云, 王璟玢. 一种基于网络模型的任务可靠性预计方法[J]. *电子技术与软件工程*, 2021(13): 1-3.
- LU Z Y, ZHOU Y, WANG J F. A task reliability prediction method based on network model[J]. *Electronic Technology & Software Engineering*, 2021(13): 1-3.
- [19] 吴志良, 李能, 姚玉斌, 等. 船舶电气系统保护单元可靠性预计的修正方法[J]. *中国航海*, 2019, 42(4): 81-84, 103.
- WU Z L, LI N, YAO Y B, et al. Correction method for reliability prediction of marine electrical system protection unit[J]. *Navigation of China*, 2019, 42(4): 81-84, 103.
- [20] 陈伟, 钟健. 面向工业机器人系统的三种可靠度配置策略的研究[J]. *光学精密工程*, 2002(2): 165-170.
- CHEN W, ZHONG J. Research on three reliability allocation strategies for industrial robot system[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2002(2): 165-170.
- [21] 蔡俊. 考虑认知不确定性的工业机器人可靠性指标预测方法[D]. 成都: 电子科技大学, 2019.
- CAI J. Reliability index prediction method of industrial robot considering cognitive uncertainty[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2019.
- [22] 邓新蕴. 工业机器人可靠性预计与分配的模糊方法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2021.
- DENG X Y. Research on fuzzy method of reliability prediction and distribution for industrial robots[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2021.
- [23] 杨斌. 工业机器人的可靠性分配方法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2019.
- YANG B. Reliability allocation methods of industrial robot[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2019.
- [24] ZHANG R C, XU Z S, GOU X J. An integrated method for multi-criteria decision-making based on the best-worst method and Dempster-Shafer evidence theory under double hierarchy hesitant fuzzy linguistic environment[J]. *Applied Intelligence*, 2020, 51: 1-23.
- [25] WAN S P, DONG J Y, CHEN S M. Fuzzy best-worst method based on generalized interval-valued trapezoidal fuzzy numbers for multi-criteria decision-making[J]. *Information Sciences*, 2021, 573: 493-518.
- [26] REZAEI J. Best-worst multi-criteria decision-making method: Some properties and a linear model[J]. *Omega*, 2016, 64: 126-130.
- [27] REZAEI J. Best-worst multi-criteria decision-making method[J]. *Omega*, 2015, 53: 49-57.

编辑 叶芳