

# 考虑分布和传递模型的机械系统可靠性分配方法

王治超<sup>1\*</sup> 刘超<sup>1</sup> 冉琰<sup>2</sup> 陈一凡<sup>3</sup> 蒋东翔<sup>1</sup> 张根保<sup>2,3</sup>

1.清华大学能源与动力工程系,北京,100084

2.重庆大学机械与运载工程学院,重庆,400044

3.重庆文理学院智能制造工程学院,重庆,402160

**摘要:**针对机械系统多层结构可靠性分配中下层单元分配的可靠性必须大于上层单元可靠性的问题,提出了一种新的可靠性分配方法。首先,对机械系统进行系统-功能-运动-动作(system-function-motion-action, SFMA)的层次结构划分。然后,根据层次结构由分布和传递模型组成,结合最小成本分配法和可靠度函数,提出可靠性分配技术,并自上而下地建立机械系统、功能单元、运动单元和分运动单元的可靠性分配模型。最后,以磨齿机为例,验证了所提方法的可行性和有效性。

**关键词:**机械系统;元动作单元;分布模型;传递模型;可靠性分配

**中图分类号:** TH123

**DOI:** 10.3969/j.issn.1004-132X.2025.06.001

**开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



## A Reliability Allocation Method Considering Distribution and Transmission Models for Mechanical Systems

WANG Zhichao<sup>1\*</sup> LIU Chao<sup>1</sup> RAN Yan<sup>2</sup> CHEN Yifan<sup>3</sup>

JIANG Dongxiang<sup>1</sup> ZHANG Genbao<sup>2,3</sup>

1. Department of Energy and Power Engineering, Tsinghua University, Beijing, 100084

2. College of Mechanical and Vehicle Engineering, Chongqing University, Chongqing, 400044

3. School of Intelligent Manufacturing Engineering, Chongqing University of Arts and Sciences, Chongqing, 402160

**Abstract:** To address the problems of the allocation reliability of lower-level units being greater than that of the upper-level unit in the multi-layer structure reliability allocation of mechanical systems, a novel reliability allocation method was proposed. Firstly, the mechanical systems were divided into a system-function-motion-action(SFMA) hierarchy structure. Then, according to the hierarchy structure consisting of distribution and transmission models, the reliability allocation techniques were proposed by combining the minimum cost method and reliability function, and the reliability allocation models of the mechanical systems, function units, motion units, and sub-motion units were established from top to bottom. Finally, taking the gear grinding machine as an example, the feasibility and effectiveness of the proposed method were verified.

**Key words:** mechanical system; meta-action unit; distribution model; transmission model; reliability allocation

### 0 引言

机电装备的固有可靠性首先是设计出来的,然后才是生产和管理出来的<sup>[1-2]</sup>。机械系统作为机电装备以动力和运动的传递实现功能和性能的最重要组成部分,可靠性分配是设计技术中的关键环节。系统可靠性分配的原理是按照一定的原则和方法,将研制设计任务书或合同中规定的系统总的可靠性指标,沿着系统层次结构自上而下、由整体到局部、逐层合理分配给组成该系统的子系统、部件、单元、零件等,使各级设计人员明确可

靠性设计的定量要求,是一个演绎分解的过程,其本质是在现有资源约束条件下按照给定的原则和方法实现系统可靠性指标的最大化<sup>[1-4]</sup>。机械系统常见的层次结构包括:系统-部件-组件-零件<sup>[5]</sup>、系统-功能-行为-结构/状态<sup>[6]</sup>、系统-部件/组件-套件-零件<sup>[7]</sup>、系统-功能或子系统-零件<sup>[8-11]</sup>等。在机械系统可靠性分配中,通常以串联模型为基础,通过给定的原理、准则、资源约束条件等进行可靠性分配,包括无约束条件和有约束条件两类。

无约束条件的可靠性分配法只以可靠性指标为约束条件,如等分配法、比例组合分配法、评分

收稿日期:2024-06-18

基金项目:国家自然科学基金(51835001)

分配法、故障相关分配法等,其中后两者是常用方法。在机械系统可靠性评分分配法中,通常考虑的影响因素有复杂程度、技术水平、工作时间和环境条件,常采用的评分原则为 1~10 的确定性数值评估,如飞机<sup>[2]</sup>和公铁两用车<sup>[12]</sup>的可靠性分配。此外,还可以考虑更多的影响因素,并采用不确定性评估方法。LI 等<sup>[13]</sup>考虑维修性采用灰色评估方法分配旋转机械的可靠性。张威等<sup>[14]</sup>考虑维修性和故障频率,采用概率语言术语集方法分配数控转台的可靠性。CHEN 等<sup>[15]</sup>考虑维修性和成本,采用模糊评估方法对加工中心交换架进行可靠性分配。还有通过影响因素的两两比较,采用数值评估方法分配数控伺服刀架<sup>[16]</sup>和航空发动机<sup>[17]</sup>以及模糊评估方法分配风电机组<sup>[18]</sup>和数控转台<sup>[19]</sup>的可靠性。在机械系统可靠性故障相关分配方法中,张玉刚等<sup>[4]</sup>和王昊等<sup>[20]</sup>结合失效危害度分配数控机床的可靠性。KIM 等<sup>[11]</sup>结合故障影响的严重性及频率,完成了复杂系统的可靠性分配。谢群亚<sup>[16]</sup>结合中间事件对顶事件的概率重要度,分别分配了水下生产系统和数控伺服刀架的可靠性。

有约束条件的可靠性分配方法除了以可靠性指标为约束条件外,还有其他的约束条件,如费用、重量、体积等<sup>[2]</sup>。在机械系统有约束条件的可靠性分配方法中,通常以最小成本为目标函数,以可靠性为约束条件,建立可靠性分配优化模型,并通过优化算法求解可靠性分配值。AI 等<sup>[10]</sup>利用拉格朗日乘子算法求解齿轮传递系统的可靠性分配优化模型。冯国弟等<sup>[21]</sup>通过粒子群算法求解机载通信系统的可靠性分配值。LIU 等<sup>[22]</sup>通过进化算法求解混联系统分配的可靠性。范晋伟等<sup>[23]</sup>利用改进粒子群算法求解数控磨床的可靠性分配值。王锋等<sup>[24]</sup>利用遗传算法求解电动飞机脚蹬机构的可靠性分配值。

现有的机械系统可靠性研究大多只结合功能和结构进行层次结构划分,且理论和技术来源于电子/电气系统的可靠性研究,未从动态角度诠释机械系统以动力和运动的传递实现功能和性能的特点,这有别于其他系统:电子/电气系统传递电子/电流,液压系统传递流动液体,气动系统传递流动气体,控制系统传递电位逻辑关系等。机械系统可靠性研究既不像电子产品和机械零部件产品(应力-强度干涉理论的结构和疲劳强度可靠性技术)那样已经具备了相对成熟的可靠性理论与技术,也不像航空航天产品和武器装备那样已经形成了比较完整的可靠性技术体系<sup>[1,3]</sup>,在已

有的机械系统 S 串联模型可靠性分配中, $m$  个单元串联组成且具有相同的运行时间,将系统的可靠度  $R^s(t)$  分配给  $m$  个单元,得到可靠度  $R_i(t)(i = 1, 2, \dots, m)$ ,需要满足数学不等式  $\prod_{i=1}^m R_i(t) \geq R^s(t)$ ,使得单元分配的可靠度必须大于系统的可靠度,即  $R_i(t) > R^s(t)$ ,导致多层结构的可靠性分配存在“层层加码”的问题。

基于上述发现,本文在机械系统可靠性分配中,根据其以动力和运动的传递实现功能和性能的特点,提出了系统—功能—运动—动作(system-function-motion-action, SFMA)的层次结构划分方法,研究了分布和传递模型的可靠性分配技术,自上而下建立了机械系统、功能单元、运动单元和分运动单元的可靠性分配模型,并应用于磨齿机的可靠性分配中。

## 1 层次结构与元动作可靠性

### 1.1 机械系统 SFMA 层次结构

传统机械产品可靠性研究忽略了“运动决定功能实现和性能水平”的特点,没有从运动的动态角度开展可靠性研究。针对该问题,基于元动作概念<sup>[14, 19, 25]</sup>,本文从功能的分解和运动的角度出发,建立 SFMA 层次结构,得到了传递动力和运动的最小运动粒度——元动作和最基本运动单元——元动作单元,如图 1 所示。

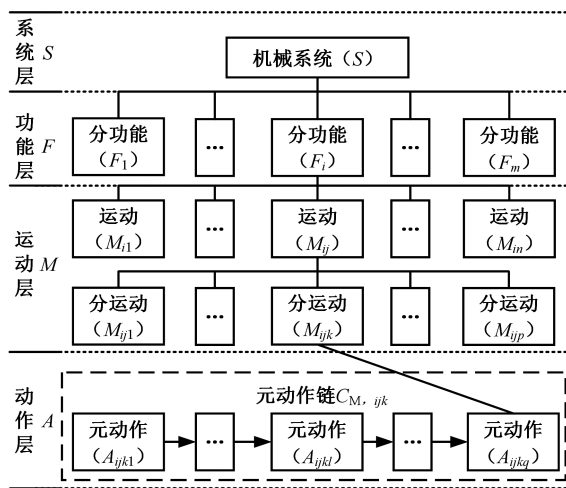


图 1 机械系统 SFMA 层次结构

Fig.1 SFMA hierarchy structure for mechanical systems

元动作定义为机械系统中传递动力和运动的最基本机械运动形式和最小机械运动粒度。从机械运动分解的角度来看,元动作是不可再分的运动形式,它是机械系统传动链运动组成的最基本和最小运动要素,具体表现为传动零件的定轴转动或线性移动。这种最基本和最小机械运动形式

被称为元动作,只包含转动和移动两类元动作。

元动作单元定义为机械系统中为了实现特定动作所需的所有零件按照特定装配关系构成的结构单元。元动作单元在结构上可以进一步分解为更小的零件但在运动上不能再作进一步分解,它是这些零件按照特定装配关系组装成的独立的结构体,也是实现特定功能和性能要求的元动作运动,故而可以进行独立的设计、制造、装配和试验。

元动作链定义为按照动力和运动传递方向有序链接的元动作序列。元动作链中通常只有一个驱动源,用来驱动末端元动作完成某一预定的运动。假设机械系统某分运动  $M_{ijk}$  所在的元动作链(meta-action chain, MC) $C_{M,ijk}$  由  $p$  个元动作  $A_{ijkl}$  ( $l=1,2,\dots,p$ ) 组成,则元动作链  $C_{M,ijk}$  如图 1 所示。

### 1.2 机械系统元动作可靠性

元动作可靠性定义为元动作单元在规定的条件下和规定的时间内元动作完成规定的功能要求或性能要求的能力,也即元动作的动力和运动性能特性保持在规定的功能或性能阈值范围内的能力,其概率度量称为元动作可靠度。

元动作可靠度是时间的函数,数学符号为

$$R^*(t) = \Pr(\tau > t \mid P \in P^*) \quad (1)$$

式中: $\tau$  为元动作故障前的工作时间,即元动作的性能特性超出规定阈值范围前的工作时间; $t$  为元动作规定的时间; $P$  为元动作的  $m$  个性能特性参数, $P = \{p_1, p_2, \dots, p_m\}$ ; $P^*$  为元动作  $m$  个性能特性参数规定的阈值范围, $P^* = \{p_1^*, p_2^*, \dots, p_m^*\}$ 。

根据概率论的知识,对于元动作相互独立的  $m$  个性能特性参数  $P = \{p_1, p_2, \dots, p_m\}$ ,式(1)表示为

$$R^*(t) = \Pr(\tau > t \mid p_1 \in p_1^*)\Pr(\tau > t \mid p_2 \in p_2^*) \cdots \Pr(\tau > t \mid p_m \in p_m^*) \quad (2)$$

## 2 分布与传递模型可靠性分配技术

机械系统 SFMA 层次结构并非串联模型,其中,机械系统、功能单元、运动单元分别由功能单元、运动单元和分运动单元分布组成,即分布模型;而分运动单元由元动作单元按照动力和运动的传递组成,且末端元动作单元的输出就是分运动单元的输出,即传递模型。

### 2.1 机械系统分布模型可靠性分配技术

在图 2 的机械系统可靠性分配中,机械系统 S 由  $m$  个单元分布组成,即分布模型。在机械系统分布模型的可靠性分配中,通常情况下机械系统与  $m$  个单元的运行时间不同,且第  $i$  ( $i=1, 2, \dots, m$ ) 个单元的运行时间  $t_i$  不大于机械系统的

运行时间  $t$ ,即  $t_i \leq t$ 。故而,将机械系统总的可靠度  $R^s(t)$  分配给  $m$  个单元时,第  $i$  个单元分配的可靠度为  $R_i(t_i)$ ,且满足:

$$R_i(t_i) \geq R^s(t) \quad (3)$$

机械系统分布模型的可靠性分配就是求解式(3)的不等式。

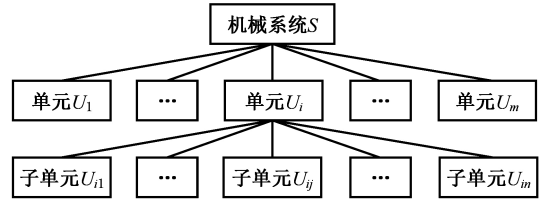


图 2 机械系统三层分布结构的可靠性分配  
Fig.2 Reliability allocation of the three-layer distribution structure for mechanical systems

假设某机械系统由图 2 的三层分布结构组成,需要将系统在运行时间  $t$  ( $t > 0$ ) 的可靠度  $R^s(t)$  分配给其下的单元和子单元。机械系统由  $m$  个单元  $U_i$  组成,运行时间为  $t_i$  ( $0 \leq t_i \leq t$ ),分配的可靠度表示为  $R_i(t_i)$ ;第  $i$  个单元由  $n$  个子单元  $U_{ij}$  ( $j=1,2,\dots,n$ ) 组成,运行时间为  $t_{ij}$  ( $0 \leq t_{ij} \leq t_i$ ),分配的可靠度表示为  $R_{ij}(t_{ij})$ 。

假设在机械系统的可靠度  $R^s(t)$  分配中,所有单元  $U_i$  和子单元  $U_{ij}$  能够独立完成规定的功能并运行到时间为  $t$ 。以最小成本法进行可靠性分配,在运行时间为  $t$  时,第  $i$  个单元  $U_i$  分配的可靠度  $R_i(t)$  为机械系统的可靠度  $R^s(t)$ ,第  $j$  个子单元  $U_{ij}$  分配的可靠度  $R_{ij}(t)$  为第  $i$  个单元  $U_i$  的可靠度  $R_i(t)$ ,即

$$R_i(t) = R^s(t) \quad (4)$$

$$R_{ij}(t) = R_i(t) \quad (5)$$

机械系统第  $i$  个单元  $U_i$  在运行时间  $t$  和  $t_i$  的可靠度  $R_i(t)$  和  $R_i(t_i)$ ,第  $j$  个子单元  $U_{ij}$  在运行时间  $t$  和  $t_{ij}$  的可靠度  $R_{ij}(t)$  和  $R_{ij}(t_{ij})$  分别为

$$R_i(t) = \int_t^{+\infty} f_i(t) dt \quad (6)$$

$$R_i(t_i) = \int_{t_i}^{+\infty} f_i(t) dt \quad (7)$$

$$R_{ij}(t) = \int_t^{+\infty} f_{ij}(t) dt \quad (8)$$

$$R_{ij}(t_{ij}) = \int_{t_{ij}}^{+\infty} f_{ij}(t) dt \quad (9)$$

式中: $f_i(t)$ 、 $f_{ij}(t)$  分别为机械系统第  $i$  个单元  $U_i$  和第  $j$  个子单元  $U_{ij}$  的故障概率密度函数。

根据式(4)~式(9),在运行时间  $t_i$  和  $t_{ij}$  时,机械系统第  $i$  个单元  $U_i$  分配的可靠度  $R_i(t_i)$  和第  $j$  个子单元  $U_{ij}$  分配的可靠度  $R_{ij}(t_{ij})$  分别为

$$R_i(t_i) = \frac{\int_{t_i}^{+\infty} f_i(t) dt}{\int_t^{+\infty} f_i(t) dt} R_i(t) = \frac{\int_{t_i}^{+\infty} f_i(t) dt}{\int_t^{+\infty} f_i(t) dt} R^s(t) \quad (10)$$

$$R_{ij}(t_{ij}) = \frac{\int_t^{+\infty} f_{ij}(t) dt}{\int_t^{+\infty} f_{ij}(t) dt} R_{ij}(t) = \frac{\int_t^{+\infty} f_{ij}(t) dt}{\int_t^{+\infty} f_{ij}(t) dt} R^s(t) = \frac{\int_t^{+\infty} f_{ij}(t) dt}{\int_t^{+\infty} f_{ij}(t) dt} R^s(t) \quad (11)$$

2.2 机械系统传递模型可靠性分配技术

在图 3 所示的机械系统可靠性分配中,机械系统 S 由  $m$  个单元沿着动力和运动传递的方向组成(即传递模型),第  $m$  个单元动力和运动的输出为机械系统的输出。在机械系统传递模型的可靠性分配中,机械系统与  $m$  个单元具有相同的运行时间。因此,将机械系统总的可靠度  $R^s(t)$  分配给  $m$  个单元时,第  $i$  个单元分配的可靠度为  $R_i(t)$ ,且满足

$$\left. \begin{aligned} R_m(t) &= R^s(t) & i &= m \\ 0 < R_i(t) &\leq 1 & i &= 1, 2, \dots, m-1 \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

机械系统传递模型的可靠性分配就是求解式(12)的不等式。

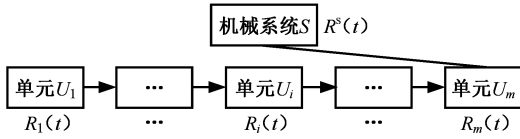


图 3 机械系统传递模型的可靠性分配

Fig.3 Reliability allocation of the transmission model for mechanical systems

根据式(12),在运行时间为  $t$  时,机械系统第  $i$  个单元  $U_i$  分配的可靠度  $R_i(t)$  为

$$R_i(t) = \begin{cases} \int_t^{+\infty} f_m(t) dt = R^s(t) & i = m \\ \int_t^{+\infty} f_i(t) dt & i = 1, 2, \dots, m-1 \end{cases} \quad (13)$$

3 SFMA 层次结构可靠性分配模型

根据机械系统 SFMA 层次结构,建立机械系统、功能单元、运动单元和分运动单元可靠性分配模型。假设机械系统 S 总的可靠度为  $R^s$ ,它由  $m$  个功能单元  $F_i (i = 1, 2, \dots, m)$  组成,分配的可靠度为  $R_i^f$ ;第  $i$  个功能单元由  $n_i$  个运动单元  $M_{ij_i} (j_i = 1, 2, \dots, n_i)$  组成,分配的可靠度为  $R_{ij_i}^m$ ;第  $j_i$  个运动单元由  $p_{ij_i}$  个分运动单元  $M_{ij_i k_{ij_i}}^s (k_{ij_i} = 1, 2, \dots, p_{ij_i})$  组成,分配的可靠度为  $R_{ij_i k_{ij_i}}^{m_s}$ ;第  $k_{ij_i}$  个分运动单元由  $q_{ij_i k_{ij_i}}$  个元动作单元  $A_{ij_i k_{ij_i} l_{ij_i k_{ij_i}}}^a (l_{ij_i k_{ij_i}} = 1, 2, \dots, q_{ij_i k_{ij_i}})$  组成,分配的可靠度为  $R_{ij_i k_{ij_i} l_{ij_i k_{ij_i}}}^a$ 。

3.1 机械系统可靠性分配模型

假设在运行时间为  $t$  时,机械系统 S 需要分配的可靠度为  $R^s(t)$ ,其下第  $i$  个功能单元  $F_i$  的

运行时间为  $t_i^f$ ,则根据式(10),分配的可可靠度  $R_i^f(t_i^f)$  为

$$R_i^f(t_i^f) = \frac{\int_{t_i^f}^{+\infty} f_i^f(t) dt}{\int_t^{+\infty} f_i^f(t) dt} R^s(t) \quad (14)$$

式中:  $f_i^f(t)$  为第  $i$  个功能单元  $F_i$  的故障概率密度函数。

3.2 功能单元可靠性分配模型

假设在运行时间为  $t_i^f$  时,第  $i$  个功能单元  $F_i$  需要分配的可靠度为  $R_i^f(t_i^f)$ ,其下第  $j_i$  个运动单元  $M_{ij_i}$  的运行时间为  $t_{ij_i}^m$ ,则根据式(11),分配的可可靠度  $R_{ij_i}^m(t_{ij_i}^m)$  为

$$R_{ij_i}^m(t_{ij_i}^m) = \frac{\int_{t_{ij_i}^m}^{+\infty} f_{ij_i}^m(t) dt}{\int_t^{+\infty} f_{ij_i}^m(t) dt} R_i^f(t) \quad (15)$$

$$R_i^f(t) = R^s(t)$$

式中:  $f_{ij_i}^m(t)$  为第  $j_i$  个运动单元  $M_{ij_i}$  的故障概率密度函数。

3.3 运动单元可靠性分配模型

假设在运行时间为  $t_{ij_i}^m$  时,第  $j_i$  个运动单元  $M_{ij_i}$  需要分配的可靠度为  $R_{ij_i}^m(t_{ij_i}^m)$ ,其下第  $k_{ij_i}$  个分运动单元  $M_{ij_i k_{ij_i}}^s$  的运行时间为  $t_{ij_i k_{ij_i}}^{m_s}$ ,则根据式(11),分配的可可靠度  $R_{ij_i k_{ij_i}}^{m_s}(t_{ij_i k_{ij_i}}^{m_s})$  为

$$R_{ij_i k_{ij_i}}^{m_s}(t_{ij_i k_{ij_i}}^{m_s}) = \frac{\int_{t_{ij_i k_{ij_i}}^{m_s}}^{+\infty} f_{ij_i k_{ij_i}}^{m_s}(t) dt}{\int_t^{+\infty} f_{ij_i k_{ij_i}}^{m_s}(t) dt} R_{ij_i}^m(t) \quad (16)$$

$$R_{ij_i}^m(t) = R_i^f(t) = R^s(t)$$

式中:  $f_{ij_i k_{ij_i}}^{m_s}(t)$  为第  $k_{ij_i}$  个分运动单元  $M_{ij_i k_{ij_i}}^s$  的故障概率密度函数。

3.4 分运动单元可靠性分配模型

假设在运行时间为  $t_{ij_i k_{ij_i}}^{m_s}$  时,第  $k_{ij_i}$  个分运动单元  $M_{ij_i k_{ij_i}}^s$  需要分配的可靠度为  $R_{ij_i k_{ij_i}}^{m_s}(t_{ij_i k_{ij_i}}^{m_s})$ ,其下第  $l_{ij_i k_{ij_i}}$  个元动作单元  $A_{ij_i k_{ij_i} l_{ij_i k_{ij_i}}}$  的运行时间与其相等,为  $t_{ij_i k_{ij_i} l_{ij_i k_{ij_i}}}^{m_s}$ ,则根据式(13),分配的可可靠度  $R_{ij_i k_{ij_i} l_{ij_i k_{ij_i}}}^a(t_{ij_i k_{ij_i} l_{ij_i k_{ij_i}}}^{m_s})$  为

$$R_{ij_i k_{ij_i} l_{ij_i k_{ij_i}}}^a(t_{ij_i k_{ij_i} l_{ij_i k_{ij_i}}}^{m_s}) = \int_{t_{ij_i k_{ij_i} l_{ij_i k_{ij_i}}}^{m_s}}^{+\infty} f_{ij_i k_{ij_i} l_{ij_i k_{ij_i}}}^a(t) dt \quad (17)$$

式中:  $f_{ij_i k_{ij_i} l_{ij_i k_{ij_i}}}^a(t)$  为第  $l_{ij_i k_{ij_i}}$  个元动作单元  $A_{ij_i k_{ij_i} l_{ij_i k_{ij_i}}}$  的故障概率密度函数。

特别地,在分运动单元所在的元动作链中,由于末端元动作单元动力与运动的输出也是分运动单元的输出,因此两者分配的可靠度相等,即  $R_{ij_i k_{ij_i} l_{ij_i k_{ij_i}}}^a(t_{ij_i k_{ij_i} l_{ij_i k_{ij_i}}}^{m_s}) = R_{ij_i k_{ij_i}}^{m_s}(t_{ij_i k_{ij_i}}^{m_s})$ 。

4 算例分析

以国内某机床厂制造的某型号高效高精度磨齿机(结构示意图见图4)为例,将磨齿机机械系

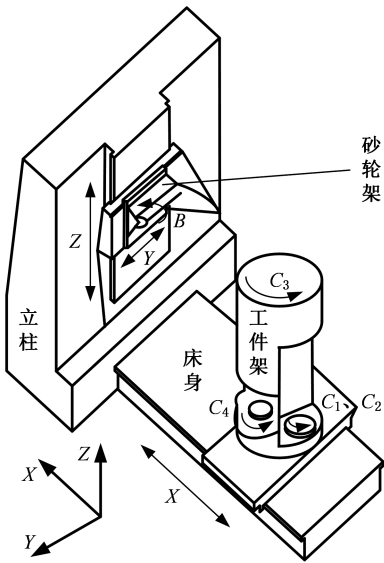


图4 磨齿机结构示意图

Fig.4 Structure schematic diagram of the gear grinding machine

汇总的可靠度沿着图5所示的SFMA层次结构自上而下分配给功能单元、运动单元、分运动单元和元动作单元。假设磨齿机机械系统S的运行时间为100 h,需要分配的可靠度为 $R^s = 0.96$ ,机械系统、功能单元、运动单元和分运动单元采用指数分布进行可靠性分配,可靠度函数为 $R(t) = e^{-\lambda t}$ , $\lambda$ 为故障率,元动作单元采用威布尔分布进行可靠性分配,可靠度函数为 $R(t) = e^{-(t/\eta)^\beta}$ , $\beta$ 和 $\eta$ 分别为形状参数和比例参数,则可以得到以下结果:

1) 功能单元分配的可靠度。如图5所示,磨齿机只有一个磨削齿轮的功能,因此,磨齿机磨削齿轮功能单元F分配的可靠度为 $R^f = R^s = 0.96$ 。

2) 运动单元分配的可靠度。因为运动单元采用指数分布进行可靠性分配,且运动单元在运行时间为100 h时分配的可靠度 $R^m(100) = e^{-100\lambda} = 0.96$ ,所以 $\lambda = 0.4082 \times 10^{-3}$ 。如图5所示,磨齿机

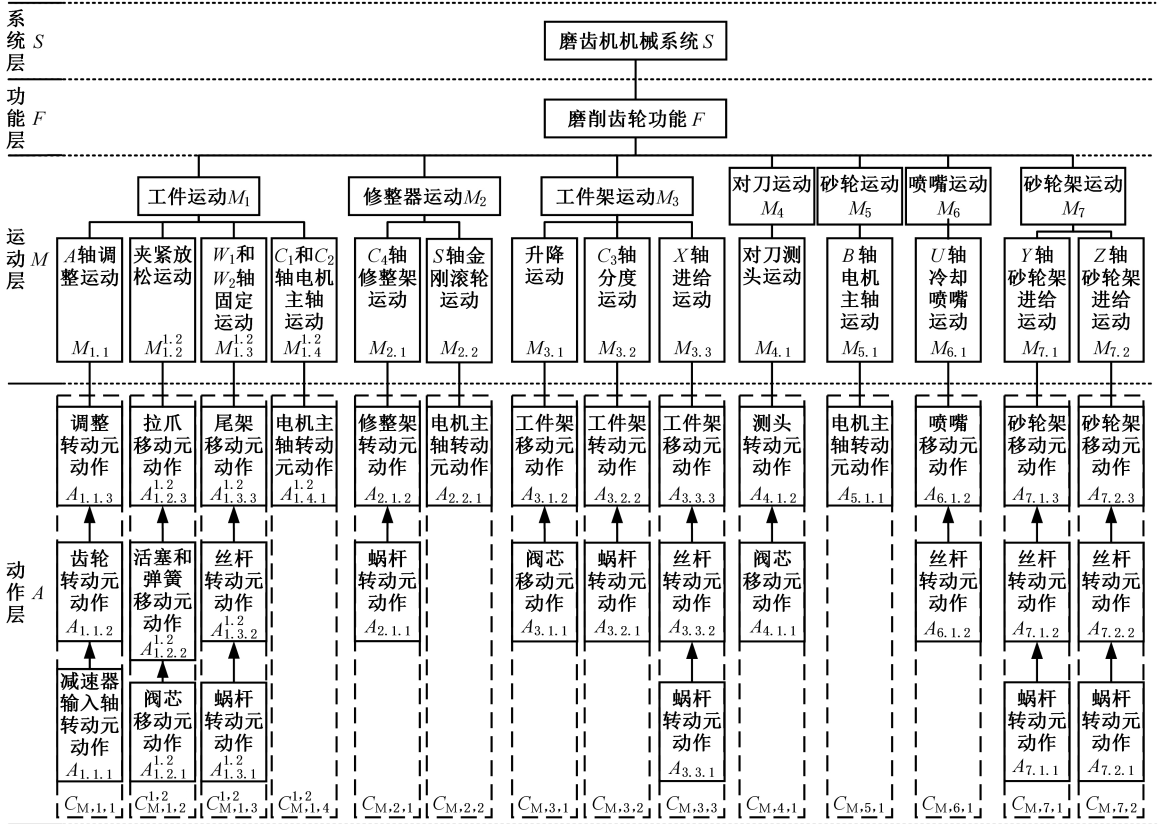


图5 磨齿机机械系统SFMA层次结构

Fig.5 SFMA hierarchy structure of the mechanical system in the gear grinding machine

有7个运动单元。假设运动单元 $M_1 \sim M_7$ 的运行时间为 $t^m = \{t_i^m, i = 1, 2, \dots, 7\} = \{96, 4, 85, 2, 92.5, 88, 91\}$ h,则根据式(15)和可靠度函数 $R^m(t) = e^{-0.4082 \times 10^{-3} t}$ ,运动单元 $M_1 \sim M_7$ 分配的可靠度为 $R^m = \{R_i^m, i = 1, 2, \dots, 7\} = \{0.9616, 0.9984, 0.9659, 0.9992, 0.9629, 0.9647, 0.9635\}$ ,如表1所示。

表1 磨齿机运动单元分配的可靠度

Tab.1 Allocated reliability of the motion units in the gear grinding machine

运动单元	运行时间 $t/h$	可靠度	运动单元	运行时间 $t/h$	可靠度
$M_1$	96	0.9616	$M_5$	92.5	0.9629
$M_2$	4	0.9984	$M_6$	88	0.9647
$M_3$	85	0.9659	$M_7$	91	0.9635
$M_4$	2	0.9992			

3) 分运动单元分配的可靠度。因为分运动单元采用指数分布进行可靠性分配,且分运动单元在运行时为 100 h 时分配的可靠度  $R^{m^s}(100) = e^{-100\lambda} = 0.96$ ,所以  $\lambda = 0.4082 \times 10^{-3}$ 。如图 5 所示,磨齿机有 14 个分运动单元,假设 14 个分运动单元的运行时间已知,则根据式(16)和可靠度函数  $R^{m^s}(t) = e^{-0.4082 \times 10^{-3}t}$ ,可以获得 14 个分运动单元分配的可靠度,如表 2 所示。此处,以运动单元  $M_1$  分配的可靠度到其下 4 个分运动单元  $M_{1.1} \sim M_{1.4}^{1.2}$  为例,运行时间为  $t_1^{m^s} = \{t_{1.1}^{m^s}, t_{1.2}^{m^s}, t_{1.3}^{m^s}, t_{1.4}^{m^s}\} = \{1.30, 0.80, 0.90, 45.75\}h$ 。根据式(16)和可靠度函数  $R^{m^s}(t) = e^{-0.4082 \times 10^{-3}t}$ ,分运动单元  $M_{1.1} \sim M_{1.4}^{1.2}$  分配的可靠度为

$$R_1^{m^s} = \{R_{1.1}^{m^s}, R_{1.2}^{m^s}, R_{1.3}^{m^s}, R_{1.4}^{m^s}\} = \{0.9995, 0.9997, 0.9996, 0.9815\}$$

表 2 磨齿机分运动单元分配的可靠度

Tab.2 Allocated reliability of the sub-motion units in the gear grinding machine

分运动单元	运行时间 t/h	可靠度	分运动单元	运行时间 t/h	可靠度
$M_{1.1}$	1.30	0.9995	$M_{3.2}$	1.80	0.9993
$M_{1.2}^{1.2}$	0.80	0.9997	$M_{3.3}$	83.00	0.9667
$M_{1.3}^{1.2}$	0.90	0.9996	$M_{4.1}$	2.00	0.9992
$M_{1.4}^{1.2}$	45.75	0.9815	$M_{5.1}$	92.50	0.9629
$M_{2.1}$	0.50	0.9998	$M_{6.1}$	88.00	0.9647
$M_{2.2}$	3.99	0.9984	$M_{7.1}$	90.50	0.9637
$M_{3.1}$	2.00	0.9992	$M_{7.2}$	89.50	0.9641

4) 元动作单元分配的可靠度。因为元动作单元采用威布尔分布进行可靠性分配,且元动作单元在运行时间 100 h 时分配的可靠度  $R^a(100) = e^{-(100/\eta)^\beta} = 0.96$ ,所以通过确定形状参数  $\beta$  和比例参数  $\lambda$  可以获得元动作单元在指定运行时间分配的可靠度,如表 3 所示。如图 5 所示,磨齿机有 31 个元动作单元,运行时间都处在早期故障期内,故而威布尔分布的形状参数  $\beta$  应该满足  $0 < \beta \leq 1$ 。此处,以分运动单元  $M_{1.1}$  分配可靠性到其下 3 个元动作单元  $A_{1.1.1} \sim A_{1.1.3}$  为例。假设元动作单元  $A_{1.1.1} \sim A_{1.1.3}$  威布尔分布的形状参数为  $\beta_{1.1}^a = \{\beta_{1.1.1}^a, \beta_{1.1.2}^a, \beta_{1.1.3}^a\} = \{0.6, 0.8, 1.0\}$ ,根据  $R^a(100) = e^{-(100/\eta)^\beta} = 0.96$ ,比例参数  $\eta_{1.1}^a = \{\eta_{1.1.1}^a, \eta_{1.1.2}^a, \eta_{1.1.3}^a\} = \{20\ 662.19, 5449.82, 2449.66\}$ ,则根据式(17)和可靠度函数  $R^a(t) = e^{-(t/\eta)^\beta}$ ,元动作单元  $A_{1.1.1} \sim A_{1.1.3}$  的运行时间为  $t_{1.1}^a = \{t_{1.1.1}^a, t_{1.1.2}^a, t_{1.1.3}^a\} = \{1.30, 1.30, 1.30\}h$ ,分配的可靠度为

$$R_{1.1}^a = \{R_{1.1.1}^a, R_{1.1.2}^a, R_{1.1.3}^a\} = \{0.9970, 0.9987, 0.9995\}$$

表 3 磨齿机元动作单元分配的可靠度

Tab.3 Allocated reliability of the meta-action units in the gear grinding machine

元动作单元	运行时间 t/h	形状参数 $\beta$	比例参数 $\eta$	可靠度
$A_{1.1.1}$	1.30	0.60	20 662.19	0.9970
$A_{1.1.2}$	1.30	0.80	5449.82	0.9987
$A_{1.1.3}$	1.30	1.00	2449.66	0.9995
$A_{1.2.1}^{1.2}$	0.80	0.40	297 005.47	0.9941
$A_{1.2.2}^{1.2}$	0.80	0.70	9647.99	0.9986
$A_{1.2.3}^{1.2}$	0.80	1.00	2449.66	0.9997
$A_{1.3.1}^{1.2}$	0.90	0.75	7114.45	0.9988
$A_{1.3.2}^{1.2}$	0.90	0.85	4307.67	0.9993
$A_{1.3.3}^{1.2}$	0.90	1.00	2449.66	0.9996
$A_{1.4.1}^{1.2}$	45.75	1.00	2449.66	0.9815
$A_{2.1.1}$	0.50	0.50	5449.82	0.9994
$A_{2.1.2}$	0.50	1.00	2449.66	0.9998
$A_{2.2.1}$	3.99	1.00	2449.66	0.9984
$A_{3.1.1}$	2.00	0.50	60 008.33	0.9942
$A_{3.1.2}$	2.00	1.00	2449.66	0.9992
$A_{3.2.1}$	1.80	0.80	5449.82	0.9984
$A_{3.2.2}$	1.80	1.00	2449.66	0.9993
$A_{3.3.1}$	83.00	0.80	5449.82	0.9654
$A_{3.3.2}$	83.00	0.90	3495.03	0.9661
$A_{3.3.3}$	83.00	1.00	2449.66	0.9667
$A_{4.1.1}$	2.00	0.50	60 008.33	0.9942
$A_{4.1.2}$	2.00	1.00	2449.66	0.9992
$A_{5.1.1}$	92.50	1.00	2449.66	0.9629
$A_{6.1.1}$	88.00	0.45	122 152.32	0.9622
$A_{6.1.2}$	88.00	1.00	2449.66	0.9647
$A_{7.1.1}$	90.50	0.80	5449.82	0.9630
$A_{7.1.2}$	90.50	0.90	3495.03	0.9634
$A_{7.1.3}$	90.50	1.00	2449.66	0.9637
$A_{7.2.1}$	89.50	0.80	5449.82	0.9633
$A_{7.2.2}$	89.50	0.85	4307.67	0.9635
$A_{7.2.3}$	89.50	1.00	2449.66	0.9641

### 5 结语

本文针对机械系统以运动和动力的传递实现功能和性能的特点,以及可靠性分配方法中存在“层层加码”的问题,提出了系统—功能—运动—动作(SFMA)层次结构的可靠性分配方法。根据机械系统 SFMA 层次结构由分布和传递模型组成,且分布模型中单元运行时间不大于系统运行时间,传递模型中单元运行时间等于系统运行时间,结合最小成本分配法和可靠性函数,研究了可靠性分配技术。沿着机械系统 SFMA 层次结构自上而下地建立了机械系统、功能单元、运动单元和分运动单元的可靠性分配模型,以国产某型号高效高精度磨齿机为例,建立了机械系统 SFMA 层次结构,并将总的可靠度分配给了 1 个功能单元、7 个运动单元、14 个分运动单元和 31 个元动作单元。结果表明所建立的机械系统 SFMA 层次结构层次分明,诠释了以运动和动力的传递实

现功能和性能的特点,且所提出的可靠度分配方法使得下层单元分配的可靠度可以不大于上层单元的可靠度,较好地规避了传统机械系统多层结构可靠性分配中存在的“层层加码”问题,即下层单元分配的可靠度必须大于上层单元的可靠度,为系统层次结构可靠性分配理论提出一种新的原理和思路。

在本文所提的机械系统层次结构可靠性分配方法中,可靠度函数很难确定。后续研究应结合仿真和实验方法获得可靠度函数,实施本文的可靠性分配方法;或者考虑可靠性分配的影响因素,开展可靠性评分分配法;或者考虑约束条件,建立可靠性分配的优化模型。

#### 参考文献:

- [1] 杨兆军,陈传海,陈菲,等.数控机床可靠性技术的研究进展[J].机械工程学报,2013,49(20):130-139.  
YANG Zhaojun, CHEN Chuanhai, CHEN Fei, et al. Progress in the Research of Reliability Technology of Machine Tools[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(20):130-139.
- [2] 曾生奎.可靠性设计与分析[M].北京:国防工业出版社,2011.  
ZENG Shengkui. Reliability Design and Analysis [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2011.
- [3] 谢里阳.机械可靠性理论、方法及模型中若干问题评述[J].机械工程学报,2014,50(14):27-35.  
XIE Liyang. Issues and Commentary on Mechanical Reliability Theories, Methods and Models[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(14):27-35.
- [4] 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 Yugang, SUN Jie, YU Tianxiang. A Reliability Allocation Method Considering Failure Correlation Based on Vine Copula[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(24):206-215.
- [5] EPPINGER S, WHITNEY D, SMITH R, et al. Organizing the Tasks in Complex Design Projects [C]// Computer-aided Cooperative Product Development. Berlin :Springer, 2005:229-252.
- [6] 王永,刘继红.面向协同装配规划的装配单元规划方法[J].机械工程学报,2009,45(10):172-179.  
WANG Yong LIU Jihong. Assembly Unit Partitioning for Collaborative Assembly Planning[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(10):172-179.
- [7] LAMBERT A J D F, GUPTA S M. Disassembly Modeling for Assembly, Maintenance, Reuse and Recycling[M]. Florida: CRC Press, 2005.
- [8] WANG Z C, RAN Y, CHEN Y F, et al. Failure Mode and Effects Analysis Using Extended Matter-element Model and AHP[J]. Computers & Industrial Engineering, 2020, 140:106233.
- [9] PEETERS J F W, BASTEN R J I, TINGA T. Improving Failure Analysis Efficiency by Combining FTA and FMEA in a Recursive Manner[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2018, 172:36-44.
- [10] AI Y B, CUI P, ZHANG W D, et al. Research on Reliability Allocation Strategy for Gear Transmission System of High-speed Train[J]. Eksploatacja I Niezawodnosc-Maintenance and Reliability, 2022, 24(3):574-582.
- [11] KIM K O, YANG Y, ZUO M J. A New Reliability Allocation Weight for Reducing the Occurrence of Severe Failure Effects[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2013, 117:81-88.
- [12] 刘美惠,刘辛夷,肖传栋.基于某高铁车的可靠性技术研究[J].机械工程与自动化,2022(2):142-144.  
LIU Meihui, LIU Xinyi, XIAO Chuandong. Research on Reliability Technology Based on Certain Road-Rail Vehicle[J]. Mechanical Engineering & Automation, 2022(2):142-144.
- [13] LI H Y, XIE L Y, SONG J X, et al. Reliability Allocation Optimization of Aero Engine Based on Grey Prediction Theory[C]// Proceedings of the 12th International Conference on Reliability, Maintainability, and Safety. Shanghai, 2018:457-462.
- [14] 张威,谢俊,杜彦斌,等.考虑双重不确定性的机械产品元动作可靠性分配方法[J].中国机械工程,2024,35(5):802-810.  
ZHANG Wei, XIE Jun, DU Yanbin, et al. A Reliability Allocation Method for Meta-action of Mechanical Products Considering Double Uncertainty [J]. China Mechanical Engineering, 2024, 35(5): 802-810.
- [15] CHEN Y F, RAN Y, WANG Z C, et al. Meta-action Reliability-based Mechanical Product Optimization Design under Uncertainty Environment[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2021, 100:104174.
- [16] 谢群亚.基于故障树的数控伺服刀架可靠性分配方法研究[D].长春:吉林大学,2017.  
XIE Qunya. Research on Reliability Allocation Method of CNC Servo Turret Based on Fault Tree

- Analysis[D]. Changchun: Jilin University, 2017.
- [17] 张强, 李坚, 谢里阳, 等. 考虑二层因素影响的综合因子可靠性分配法[J]. 中国机械工程, 2019, 30(19):2301-2305.  
ZHANG Qiang, LI Jian, XIE Liyang, et al. Integrated Factor Reliability Allocation Method Considering Influences of Two-layer Factors[J]. China Mechanical Engineering, 2019, 30(19): 2301-2305.
- [18] WU Y Y, SUN W L. Research on the Reliability Allocation Method for a Wind Turbine Generator System Based on a Fuzzy Analytic Hierarchy Process Considering Multiple Factors[J]. IEEE Access, 2021, 9:64461-64467.
- [19] 李健, 王宏伟, 慕宗焱, 等. 考虑性能稳定性的机械系统可靠性分配方法研究[J]. 中国机械工程, 2024, 35(5):821-828.  
LI Jian, WANG Hongwei, MU Zongyi, et al. Research on Reliability Allocation Method for Mechanical Systems Considering Performance Stability[J]. China Mechanical Engineering, 2024, 35(5):821-828.
- [20] 王昊, 张义民, 杨周, 等. 基于FMECA修正危害度的数控车床关键子系统可靠性分配[J]. 中国机械工程, 2016, 27(14):1936-1941.  
WANG Hao, ZHANG Yimin, YANG Zhou, et al. Reliability Allocation of Key Subsystems of CNC Lathes Based on FMECA Modified Criticality[J]. China Mechanical Engineering, 2016, 27(14):1936-1941.
- [21] 冯国弟, 郭宇, 冯威, 等. 基于新型成本函数的系统可靠性分配研究[J]. 工程机械, 2022, 53(7):17-21.  
FENG Guodi, GUO Yu, FENG Wei, et al. Research on System Reliability Allocation Based on New Cost Function[J]. Construction Machinery and Equipment, 2022, 53(7):17-21.
- [22] LIU Z J, SONG Q F. Reliability Allocation Multi-Objective Optimization for Products under Warranty[C]// Proceedings of the International Conference on Quality, Reliability, Risk, Maintenance and Safety Engineering (QR2MSE). Chengdu: 2012, 423-426.
- [23] 范晋伟, 刘会普, 张理想, 等. 基于改进粒子群算法数控磨床可靠性分配优化研究[J]. 制造技术与机床, 2022(6):153-157.  
FAN Jinwei, LIU Huipu, ZHANG Lixiang, et al. Research on Reliability Allocation Optimization of CNC Grinder Based on Improved Particle Swarm Optimization[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2022(6):153-157.
- [24] 王锋, 丁一宁, 雷洞婷, 等. 基于代价函数的电动飞机脚踏系统可靠性分配[J]. 沈阳航空航天大学学报, 2022, 39(1):29-35.  
WANG Feng, DING Yining, LEI Dongting, et al. Reliability Distribution of Electric Aircraft Pedal System Based on Cost Function[J]. Journal of Shenyang Aerospace University, 2022, 39(1): 29-35.
- [25] WANG Z C, RAN Y, YANG X, et al. Primary Failure Mode and Effects Analysis with Function-Motion-Action Hierarchy Structure for Mechatronic Systems[J]. Engineering Failure Analysis, 2021, 130:105775.

(编辑 王艳丽)

---

作者简介:王治超\* (通信作者),男,1991年生,博士、助理研究员。研究方向为机械系统可靠性、智能故障诊断。E-mail:wang-zhichao@mail.tsinghua.edu.cn.

**本文引用格式:**

王治超,刘超,冉琰,等.考虑分布和传递模型的机械系统可靠性分配方法[J].中国机械工程,2025,36(6):1143-1150.

WANG Zhichao, LIU Chao, RAN Yan, et al. A Reliability Allocation Method Considering Distribution and Transmission Models for Mechanical Systems[J]. China Mechanical Engineering, 2025, 36(6):1143-1150.