第10卷　第2期
2002年4月

光学　精密工程
Optics and Precision Engineering

Vol.10　No.2
Apr.　2002

文章编号　1004-924X(2002)02-0165-06

面向工业机器人系统的三种可靠度配置策略的研究

陈　伟,钟　健
(深圳职业技术学院先进制造系,广东 深圳 518055)

摘要:工业机器人的可靠性决定着它的应用前景及质量,而我国的工业机器人的可靠性并不容乐观,急需加以提高,针对这种情况,本文给出了三种有效的面向不同系统要求的工业机器人系统可靠度配置策略:"最小努力及比例"分配法适用于首次研制出来、已投入使用并准备进行产品生产,进一步提高其可靠度的工业机器人系统;"混联"分配法是一种简便易行的工业机器人系统可靠度分配方法,此方法适用于在无约束条件下进行研制新型工业机器人时,对其进行的系统可靠度分配,使得所研制的工业机器人具有较高的可靠性;"两级优化"分配是在有约束条件下的一种可靠度优化分配方法。这三种工业机器人配置策略的研究作为其可靠性设计中一个关键环节,不仅具有理论研究价值,同时具有重大的现实意义。

关　键　词:工业机器人;双层策略;两级优化分配
中图分类号:TP242.2　　**文献标识码**:A

1　引　言

工业机器人目前已被广泛应用于生产领域,为保证其安全生产和生产产品质量,工业机器人必须具有很高的可靠性,为此从设计开始,就应以可靠性作为优化设计的指标。由于工业机器人系统可靠度配置是其可靠性设计中不可或缺的一部分,因此在优化设计工业机器人时,对系统可靠度指标的分配方法的研究具有十分重要的理论和实际意义,基于此,本文提出了三种不同系统要求背景下的工业机器人系统可靠度配置策略。

2　工业机器人系统结构分析

工业机器人系统一般是由操作机、驱动单元、控制装置和为使机器人进行作业而要求的外部设备组成[1],下面是工业机器人系统组成简介:

(1)执行系统　是工业机器人完成作业的实体,通常由末端执行器、手腕、手臂、机座、移动装置等部分构成。

(2)驱动单元　是由驱动器、驱动元件及检测元件等组成。

(3)控制系统　由控制装置和控制软件两大部分组成。

(4)它主要由两部分组成,一部分为感觉系统,另一部分为决策–规化智能系统。

基于可靠性的一般工业机器人系统是串联系统[2]。

3　"最小努力"及比例分配法

对于已经研制出来并投入使用的低可靠性的工业机器人系统,为了提高其可靠性,在对其系统重新进行可靠度分配时,采用"最小努力"分配法与"比例"分配法并用最适宜。

将"最小努力"分配法用于第一层的可靠度配置,即工业机器人系统全局可靠度配置给单元。第二层的可靠度配置,即单元可靠度配置给零件或部件采用"比例"分配法。由于在第一层配置中,系统可靠度等于其组成单元可靠度之积,每个单元可靠度等于各自组成元器件可靠度之积,提高某一单元的可靠度的效果好于提高此单元某一组成元部件可靠度的效果,同时大幅度提高低可靠度单元的可靠度的难度要小于大幅度提高低可靠度元部件的可靠度。因此在第一层中采用最小努力法更合理。

收稿日期:2001-09-12;**修订日期**:2002-01-16

这种可靠度分配策略如下:

3.1　第一层分配

工业机器人系统全局可靠度分配给各单元。

设已知工业机器人系统各单元的可靠度,且 $R_1 \le R_2 \le \cdots \le R_n$,所以可以得知,工业机器人系统可靠度值为:

$$R_s = \prod_{i=1}^{n} R_i, \tag{1}$$

给定系统可靠度指标 $R_s^* > R_s$。因为可靠度低的单元容易改善,采取这样一种办法:把前 k 个单元的可靠度都提高到 R_0^*,而 $k+1$ 至 n 个单元不变。这种办法被称为“努力最小算法”。

为了解出 R_0 和 k 值,假定努力函数 $G(x,y) \ge 0, y > x \ge 0$,满足以下诸条件:

(1) $G(x,y) \ge 0$;

(2) $G(x,y) \le G(x,y+\Delta y), \Delta y > 0$,
$G(x,y) \ge G(x+\Delta x,y), \Delta x > 0$;

(3) $G(x,y) + G(y,z) = G(x,z), x < y < z$;

(4) $G(0,y)$ 具有导数 $h(y)$ 以使 $yh(y)$ 对 y 严格递增,$1 > y > 0$。

这表示,努力函数 $G(R_i, R_i^*)$ 代表将工业机器人系统第 i 单元从原有可靠度 R_i^* 所需的努力总额(代价)最小。

努力最小算法的数学模型是:

$$\begin{cases} \min \quad \{\sum_{i=1}^{n} G(R_i, R_i^*)\} \\ s.t. \quad \prod_{i=1}^{n} R_i^* \ge R_s^* \quad , \end{cases} \tag{2}$$

可以证明,这个最优化问题有如下的唯一解:

$$R_i^* = \begin{cases} R_0^*, \text{若 } i \le k_0 \\ R_i, \text{若 } i > k_0 \quad , \end{cases} \tag{3}$$

这就是上面所说的,前 k 个分系统可靠度都改进到 R_0^*,第 $k+1$ 个分系统以后不作改进,保持原有值不变。此时关键是确定 k_0 和 R_0^* 的数值。k_0 是保证式(4) 成立的 l 的最大值。

$$R_l < \left[\frac{R_s^*}{\prod_{i=l+1}^{n+1} R_i}\right]^{1/l} = r_l, \tag{4}$$

式中 $l = 1,2,\cdots,n; R_{n+1} \approx 1$。

数值 R_0^* 由下式给出

$$R_0^* = \left[\frac{R_s^*}{\prod_{l=k_0+1}^{n+1} R_l}\right]^{1/k_0}, \tag{5}$$

3.2　第二层配置

工业机器人系统各单元可靠度分配给基本元件及部件。很显然,对于已研制出来并投入使用的低可靠度的工业机器人系统,它的各个组成单元的可靠度通过第一层的配置得到提高,在第二层各单元可靠度配置给其组成元器件时,按照新的单元可靠度的要求,采用比例法,为其组成元部件配置新的可靠度。

这种方法是将单元的失效率分配给其组成元部件,然后再将失效率指标换算成可靠度指标。

$$\lambda_{ij}^* = \lambda_{ij} \cdot \frac{\lambda_i^*}{\lambda_i}, \tag{6}$$

式中:λ_{ij}^* —分配给新单元 i^* 中第 j 个元部件的失效率;

λ_i^* —新单元 i^* 的失效率指标;

λ_i —老单元 i 的失效率;

λ_{ij} —老单元 i 中第 j 个元部件的失效率。

通过式(6) 求出各单元配置给其组成元部件新的失效率,然后再根据式 $R_{ij}^*(t) = e^{-\lambda_{kj}^* t}$ 求出各单元分配给其组成元部件的可靠度指标,其中 R_{ij}^* 为分配给子系统 i 中第 j 个元部件的可靠度。

4　混联分配法

这是一种简便易行的工业机器人系统可靠度分配方法。此方法适用于在无约束条件下进行研制新型工业机器人时,对其进行的系统可靠度分配,使得所研制的工业机器人具有较高的可靠性。

由于一般工业机器人系统的机械子系统可靠性数据较缺乏,针对这一点,为了保证整个系统的可靠度较合理地分配下去,本文采用两层分配策略,第一层全局分配给子系统时,采取评分分配法,即用评分分配法将全局可靠度分给每个机械子系统和电子子系统。第二层各子系统将其可靠度分配给所属各元部件时,对于机械子系统由于可靠性数据缺乏,将采用等分配法进行分配,而对电子子系统,由于其服从指数分布,因此将采用阿林斯法进行分配。

4.1　第一层配置策略

评分法是按照几种因素进行评分,这种评分可以由有经验的工程师用投票方法给出。根据评分情况给每个子系统分配可靠性指标。

主要根据三种因素进行评分:复杂度、技术发展水平及环境条件。每种因素的分数在 1～10 之间。

(1) 复杂度 —它是根据组成子系统的元部件数量以及它们组装的难易程度来评定。最简单的评 1 分,最复杂的评 10 分。

(2) 技术发展水平 —根据子系统目前的技术水平和成熟程度来评定。水平最低的评 10 分,水平最高的评 1 分。

(3) 环境条件 —根据子系统所处的环境来评定。子系统工作过程中会经受极其恶劣而严酷的环境条件的评 10 分,环境条件最好的评 1 分。

这样分配给机器人每个子系统的失效率 λ_i^* 为

$$\lambda_i^* = C_i \cdot \lambda_s^* , \tag{7}$$

式中: C_i —第 i 个子系统的评分系数;

λ_s^* —系统规定失效率指标;(由其可靠度换算而来)

$$C_i = \omega_i / \omega_s , \tag{8}$$

式中: ω_i —第 i 个子系统的评分数;

ω_s —便携式机器人系统的评分数。

$$\omega_i = \prod_{j=1}^{3} r_{ij} , \tag{9}$$

式中 r_{ij} —第 i 个子系统,第 j 个因素的评分数; $j = 1$ 代表复杂度; $j = 2$ 代表技术发展水平; $j = 3$ 代表环境条件。

$$\omega_s = \sum_{i=1}^{n} \omega_i , \tag{10}$$

式中 $i = 1,2, \cdots, n$。n —便携式机器人系统中子系统数。

$$R_i^*(t) = e^{-\lambda_i^* t} , \tag{11}$$

通过上面可以得到分配给每个便携式机器人子系统的失效率值,通过式(11)将其换算成可靠度值。

4.2　第二层配置策略

各个子系统可靠度配置给其各组成元部件时,对机械子系统和电子子系统采用不同的分配策略,对其电子子系统,采用阿林斯分配法。对其机械子系统由于其可靠性数据缺乏,因而采用等分配法。

在第一层工业机器人系统可靠度配置给其子系统时,已经求得配置给每个子系统的可靠度值,设配置给工业机器人的机械本体子系统的可靠度为 R_1,配置给其它子系统的可靠度值为 $R_i (i \neq 1)$。

机械本体子系统可靠度配置给其组成元部件时,采用等分配法:

$$R_j = R_1^{\frac{1}{n}} , \tag{12}$$

式中 n —基于故障树的工业机器人机械本体子系统组成元部件的数量; R_j —工业机器人机械本体系统第 j 个组成元部件。

电子子系统(如控制子系统、伺服驱动子系统等)可靠度配置给其组成元器件时,采用阿林斯分配法:

(1) 根据过去积累的或观察、估计得到的可靠性数据,确定子系统的每个元部件的预计失效率 λ_{ik}。

(2) 根据分配前预计的子系统失效率 λ_i,确定各组成元部件的重要度分配因子 W_{ki}

$$W_{ki} = \frac{\lambda_{ik}}{\lambda_i} = \frac{\lambda_{ik}}{\sum_{k=1}^{n_i} \lambda_{ik}} , \tag{13}$$

(3) 计算重新分配的元部件的失效率 λ_{ik}^*

$$\lambda_{ik}^* = W_{ki} \lambda_i^* , \tag{14}$$

(4) 用下式计算子系统分配给每个组成元部件的可靠度:

$$R_{ik}^* = (R_i^*)^{W_{ki}} , \tag{15}$$

式中: λ_i^* —在第一层可靠度分配中,分配给子系统的失效率;

R_{ik}^* —在第二层可靠度分配中,子系统 i 分配给第 k 个组成元部件的可靠度, $k = 1,2, \cdots, n_i$;

n_i —基于故障树的第 i 个子系统中组成元部件的数量;

R_i^* —第一层中可靠度分配中,分配给子系统的可靠度。

5　两级优化分配法

这种方法是在有约束条件下的一种可靠度优化分配方法。

常规的工业机器人系统可靠度分配对全局采用一种优化原则,即在保证系统可靠度最低下限的同时,“花费最小”原则,本文提出一种两级优化原则,整体可靠度分配给单元采用考虑“权重”和

“复杂性”的优化原则,单元分配给元件或部件的可靠度采用“花费最小”原则并采用能简化求解过程的二级二维混合协调法以及 AGREE 法对可靠度优化分配进行求解,从而使系统全局可靠度优化分配效果更好。

5.1 工业机器人系统两级可靠度优化分配数学模型

第一级系统对子系统的可靠度优化分配采用考虑“权重”(重要性)和“复杂性”的优化原则。AGREE 法提供了基于这项优化原则的算法。

在第二级子系统对元件或部件的可靠度分配采用“花费最小”原则,建立以下优化数学模型:

$$\begin{cases} \min \quad C_i = \sum_{j=1}^{n_i} C_{ij}(R_{ij}) \\ s.t. \quad R_i = \prod_{j=1}^{n_i} R_{ij} \geq R_{i0}, \end{cases} \tag{16}$$

式中: C_i —第 i 个子系统的总花费;

C_{ij} —第 i 个子系统中第 j 个元件或部件的花费;

R_i —第 i 个子系统的可靠度;

R_{ij} —第 i 个子系统中第 j 个元件或部件的可靠度;

R_{i0} —第 i 个子系统可靠度的最低下限;

n_i —基于故障树的第 i 个子系统的元部件数。

5.2 两级优化分配的两级算法

(1) 第一级优化分配的算法“AGREE”法

在第一级系统对子系统的可靠度优化分配中,设工业机器人系统由 k 个子系统组成,则系统可靠度 R_S 为

$$R_S = \prod_{i=1}^{k} R_i, \tag{17}$$

式中: R_i —构成工业机器人系统的第 i 个子系统。由 AGREE 法可知,系统配置给第 i 个子系统的可靠度值为:

$$R_i(t_i) \approx 1 - \frac{1 - R_S^{(\frac{n_i}{N})}}{E_i}, \tag{18}$$

式中: $R_i(t)$ —第 i 个子系统工作 t 小时时的可靠度;

E_i —第 i 个单元的重要度, E_i 表示子系统 i 的失效引起系统失效的概率,其计算式为:

$$E_i = \frac{\text{第 } i \text{ 个子系统失效引起系统失效的次数}}{\text{子系统 } i \text{ 失效的总次数}}$$

n_i —基于故障树的第 i 个子系统的组成件数;

N —基于故障树的工业机器人系统组成元部件的数量, $N = \sum_{i=1}^{k} n_i$。

(2) 第二级优化分配的算法“二级二维混合协调法”

由于用常规的数学解法去求解所建立的优化模型几乎是不可能的,因此,本文采用大系统理论的二维混合递阶协调策略[3-4]进行求解,能够简化求解过程,从而比较容易地求得优化模型的解。

二维混合协调法是二级递阶协调结构,第一级是求解各子问题,第二级是协调器,修正协调向量,以保证整体的解合理。二维混合协调法中有两个协调向量,其中一个和模型协调法中的一样,另一个协调向量和目标协调法中的一样,所以它被称为混合协调法。以下便是二维混合协调法的求解过程:令 $\varepsilon_{ij} = R_{ij}$,则便携式机器人系统可靠度优化模型为:

$$\begin{cases} \min \quad C_i = \sum_{j=1}^{n_i} C_{ij}(R_{ij}) \\ s.t. \quad \varepsilon_{ij} = R_{ij} \quad (j = 1,2,\cdots,n_i) \\ R_i = \prod_{j=1}^{n_i} R_{ij} \geq R_{i0}, \end{cases} \tag{19}$$

混合协调法要求整体问题的拉格朗日函数是加性可分的,将式(19)中系统可靠度约束条件取为对数形式,则得如下等价数学规划:

$$\begin{cases} \min \quad C_i = \sum_{j=1}^{n_i} C_{ij}(R_{ij}) \\ s.t. \quad \varepsilon_{ij} = R_{ij}(j = 1,2,\cdots,n_i) \\ \sum_{j=1}^{n_i} \ln \varepsilon_{ij} - \ln R_{i0} = 0, \end{cases} \tag{20}$$

式(19)的拉格朗日函数为:

$$L = \sum_{j=1}^{n_i} C_{ij}(R_{ij}) + \sum_{j=1}^{n_i} \lambda_{ij}[\varepsilon_{ij} - R_{ij}] + \rho(\ln R_{i0} - \sum_{j=1}^{n_i} \ln \varepsilon_{ij})$$

取 λ_{ij} 和 $\varepsilon_{ij}(j = 1,2,\cdots,n_i)$ 为协调向量,它们的值由协调器给定,初始设为 $\lambda_{ij} = \lambda_{ij}^0$, $\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^0$,此时 L 可以按加性分解:

$$L = \sum_{j=1}^{n_i} L_{ij}$$

式中

$$L_{ij} = C_{ij}(R_{ij}) + \lambda_{ij}^0[\varepsilon_{ij}^0 - R_{ij}] + \rho(\frac{1}{n_i}\ln R_{i0} - \ln\varepsilon_{ij}^0)$$

于是,第一级中 n_i 个子问题的任务是在由第二级给定的 λ_{ij}^0 和 ε_{ij}^0 的情况下使 $L_{ij}(j = 1,2,\cdots,n_i)$ 分别最优,第二级中修正 λ_{ij}^0 和 ε_{ij}^0 以保证整体最优。

由于第二级迭代终止时有:

$$\frac{\partial L}{\partial\varepsilon_{ij}^0} = 0,\frac{\partial L}{\partial\lambda_{ij}^0} = 0 \quad j = 1,2,\cdots,n_i$$

即:

$$\begin{cases}[\varepsilon_{ij}^0]^{k+1} = [R_{ij}]^k \\ [\lambda_{ij}^0]^{k+1} = \dfrac{\rho}{[\varepsilon_{ij}^0]^k}\end{cases}, \tag{21}$$

式中 k 为迭代次数,上述就是如何用二维混合协调法对便携式机器人系统可靠度配置问题进行求解的过程。

二维混合协调法的计算流程为:

(1) 令 $k = 0$,设定初值 ε_{ij}^0、λ_{ij}^0、ρ,要求满足 $\varepsilon_{i_1}^0\varepsilon_{i_2}^0\Lambda\varepsilon_{in_i}^0 = R_{i_0}$;

(2) 对式 $\min L_{ij}$ 求解,解出 R_{ij}^k;

(3) 由式(21)算出关联协调向量 $(\varepsilon_{ij}^0)^{k+1}$、拉格朗日乘子 $(\lambda_{ij}^0)^{k+1}(j=1,2,\cdots,n_i)$;

(4) 检验误差 $\delta_{ij_1} = |(\varepsilon_{ij}^0)^{k+1} - (\varepsilon_{ij}^0)^k|$

$$\delta_{ij_2} = |(\lambda_{ij}^0)^{k+1} - (\lambda_{ij}^0)^k|$$

$$(j = 1,2,\cdots,n_i);$$

如果均小于给定误差 Δ,则结束;否则令 $k = k + 1$,回到第二步。

上述二维混合协调法能有效地对便携式机器人的第二级可靠度配置进行求解,且收敛速度较快。

6　示　　例

应用“最小努力及比例”法配置便携式机器人系统可靠度,对于已研制出来的便携式机器人,经过可靠性预测分析,可知:

$$R_1 = R_{控制子系统}(1000) = 0.671$$

$$R_2 = R_{伺服子系统}(1000) = 0.883$$

$$R_3 = R_{机械本体子系统}(1000) = 0.886$$

$$R_S(1000) = R_1 \times R_2 \times R_3 = 0.525$$

预测出的可靠度值不能满足用户要求,须对便携式机器人系统重新进行可靠度分配,以此提高系统的可靠度。为了便于改进系统可靠度所需努力代价最小,应采用“最小努力及比例”双层分配法:

(1) 第一层分配:按努力最小算法分配,根据用户要求,便携式机器人工作 1000 小时时,

$$R_S^*(1000) = 0.695$$

$l = 1$ 时,

$$R_1 = 0.671 < (\frac{0.695}{0.883\times0.886\times1})^{1/1} = 0.888$$

$l = 2$ 时, $R_2 = 0.883 < (\frac{0.695}{0.886\times1})^{1/2} = 0.886$

$l = 3$ 时, $R_3 = 0.886 > (\frac{0.695}{1})^{1/3} = 0.885$

所以, $k_0 = 2$, $R_0^* = (\frac{0.695}{0.886\times1})^{1/2} = 0.886$

即把控制子系统、伺服控制子系统可靠度各提高到 0.886,机械本体子系统可靠度不变,这样可以得到 $R_s(1000) = (0.886)^3 = 0.696$,既满足了要求,而且所需努力最小。

(2) 第二层分配:用比例法将各单元新的失效率分配给基本元件及部件,再根据式 $R_{ij}^*(t) = e^{-\lambda_{ij}^* t}$ 求出各基本元件及部件的可靠度。

控制子系统中, $\lambda_1 = 399363(fit)$,

$$\lambda_1^* = 121038(fit);$$

伺服驱动子系统中, $\lambda_2 = 123930(fit)$,

$$\lambda_2^* = 121038(fit);$$

可见,机械本体子系统各基本元件及部件的可靠度无需改动。

对于控制子系统:

$$\lambda_{1j}^* = \lambda_{1j}\frac{\lambda_1^*}{\lambda_1} = \frac{121038}{399363}\times\lambda_{1j}$$

对于伺服驱动子系统:

$$\lambda_{2j}^* = \lambda_{2j}\frac{\lambda_2^*}{\lambda_2} = \frac{121038}{123930}\times\lambda_{2j}$$

对于机械本体子系统: $\lambda_{3j}^* = \lambda_{3j}$

式中, λ_{1j}^* - 控制子系统中元部件 j 的新失效率;
λ_{2j}^* - 伺服驱动子系统中元部件 j 的新失效率;
λ_{3j}^* - 机械本体子系统中元部件 j 的新失效率;

根据上述“最小努力及比例”法就可以重新配置低可靠度的便携式机器人系统的可靠度了。

7　结束语

本文主要针对工业机器人系统结构特点,对

复杂的工业机器人系统给出了三种可靠度配置策略,三种策略均采用双层策略,淡化其复杂性,使其系统可靠度的配置更加合理易行,适合于不同系统要求背景下的工业机器人系统可靠度配置。

参考文献:

[1]周伯英. 工业机器人设计[M]. 北京:机械工业出版社,1994.
[2]陈伟. 工业机器人系统可靠度配置策略及其定量评价方法的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2000.
[3]达庆利. 大系统理论与方法[M]. 南京:东南大学出版社,1989:148 - 179.
[4]李士勇. 模糊控制(c)神经控制和智能控制论[M]. 哈尔滨工业大学出版社,1996:233 - 237.
[5]李旻,章亚男,龚振邦. 微小机器人移动方式[J]. 光学 精密工程,2000,8(4):303 - 308.

Research on three reliability distribution methods of an industrial robot system

CHEN Wei, ZHONG Jian

(*Advanced Fabrication Department, Shenzen College of Vocational Technology, Shenzhen* 518055, *China*)

Abstract: The prospect and quality of industrial robots depend on their reliability. However, the reliability of industrial robots in China needs improving. In this paper, three ways of making reliable distribution are put forward for industrial robot systems. The least effort and proportion distribution method is suitable for the industrial robot system that has been newly made, and it has been put in use and put in production to enhance its reliability. The mixed distribution method is a simple way of reliability distribution of an industrial robot system. It is fit for making system reliability distribution in the development of new industrial robots and without restrictions to achieve high reliability. The two - level optimizing distribution method is a reliability optimizing distribution method with restriction. Researches on these three reliability distribution methods of industrial robot systems as a critical part in the reliability design not only has a theoretical research value, but also has an important and practical value.

Key words: industrial robots; two-layer strategies; two-level optimizing distribution method

作者简介:陈　伟(1969 -),女,深圳职业技术学院先进制造技术与工程系,讲师,博士,研究方向:工业机器人,先进制造技术;

钟　健(1966 -),男,深圳职业技术学院先进制造技术与工程系,高工,研究生,研究方向:精密机械。E-mail:zj@oa.szpt.net