

文章编号: 1002-0446(2002)01-0035-05

## 基于便携式机器人系统的可靠度配置策略的研究

陈伟<sup>1</sup> 侯琳祺<sup>2</sup> 蔡鹤皋<sup>2</sup>

(1. 深圳职业技术学院先进制造技术与工程系 518055; 2. 哈尔滨工业大学机器人研究所 150001)

**摘要:** 本文提出了一种有效的面向便携式机器人系统的可靠度二级配置策略, 这种配置策略是有约束条件下的一种可靠度优化配置方法, 其第一级配置采用评分分配法, 第二级配置采用“花费最小”原则并用能简化求解过程的二维混合协调法对优化配置进行求解, 用此法进行便携式机器人的可靠度配置合理易行, 优化分配效果好。

**关键词:** 二级配置; 评分分配法; 花费最小; 二维混合协调法

**中图分类号:** TP24      **文献标识码:** B

## A RESEARCH ON RELIABILITY DISTRIBUTION METHOD FOR PORTABLE ROBOT SYSTEM

CHEN Wei<sup>1</sup> HOU Lin-qi<sup>2</sup> CAI He-gao<sup>2</sup>

(1. Shenzhen Polytechnic 518055; 2. Harbin Institute of Technology 150001)

**Abstract:** This paper proposes an effective two-level reliability distribution method for portable robot, it is a reliability optimizing distribution method with restrictions, its first level distribution uses marking distribution method, and the second adopts “the least cost” principle, at the same time, the two dimension mixed coordinating method can solve reliability distribution optimizing model easily, therefore, this reliability distribution method is an effective and easy method to give the portable robot a reliability distribution result.

**Keywords:** two-level distribution, marking distribution method, least cost, two dimension mixed coordination

### 1 引言(Introduction)

由于便携式机器人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, 并且能够在保证系统可靠度最低下限的同时, 全局花费最小, 本文采用二级分配策略, 第一级全局可靠度分配给子系统时, 采取评分分配法, 第二级子系统可靠度分配给元件或部件时, 采用花费最小优化配置策略并应用能够简化其求解过程的二维混合协调法<sup>[1~3]</sup>对其优化配置进行求解。基于可靠性的便携式机器人系统属于串联系统<sup>[4]</sup>, 若其系统可靠度配置采用此方法, 能够淡化其系统复杂性并得到较好的优化配置结果。

### 2 第一级配置策略——评分分配法(The first level distribution method-marking distribution method)

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为

$$\lambda_i^* = C_i \lambda_s^* \quad (1)$$

式中  $C_i$ ——第  $i$  个子系统的评分系数;

$\lambda_s^*$ ——系统规定失效率指标;(由其可靠度换算而来)

$$C_i = \omega_i / \omega_s \quad (2)$$

式中  $\omega_i$ ——第  $i$  个子系统的评分数;

$\omega_s$ ——便携式机器人系统的评分数.

$$\omega_i = \prod_{j=1}^3 r_{ij} \quad (3)$$

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.

$$\omega_s = \sum_{i=1}^n \omega_i \quad (4)$$

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

$$R_i(t) = e^{-\lambda_i^* t} \quad (5)$$

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(5)将其换算成可靠度值.

### 3 第二级配置策略——最小花费法及其实现算法 (The second level distribution method—the least cost method and its algorithm)

#### 3.1 “最小花费”优化模型的建立

上述的第一级配置策略——评分法, 为便携式机器人的每个子系统配置了较合理的可靠度, 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:

$$\begin{cases} \min C_i = \sum_{j=1}^{n_i} C_{ij}(R_{ij}) \\ s. t. R_i = \prod_{j=1}^{n_i} R_{ij} \geq R_{i0} \end{cases} \quad (6)$$

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.

#### 3.2 求解优化模型的算法——“递阶协调的二维混合协调法”

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  $\epsilon_{ij} = R_{ij}$ , 则便携式机器人系统可靠度优化模型为

$$\begin{cases} \min C_i = \sum_{j=1}^{n_i} C_{ij}(R_{ij}) \\ s. t. \epsilon_{ij} = R_{ij} \quad (j=1, 2, \dots, n_i) \\ R_i = \prod_{j=1}^{n_i} R_{ij} \geq R_{i0} \end{cases} \quad (7)$$

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(7)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

$$\begin{cases} \min C_i = \sum_{j=1}^{n_i} C_{ij}(R_{ij}) \\ s. t. \epsilon_{ij} = R_{ij} \quad (j=1, 2, \dots, n_i) \\ \sum_{j=1}^{n_i} \ln \epsilon_{ij} - \ln R_{i0} = 0 \end{cases} \quad (8)$$

式(7)的拉格朗日函数为

$$L = \sum_{j=1}^{n_i} C_{ij}(R_{ij}) + \sum_{j=1}^{n_i} \lambda_{ij} [\epsilon_{ij} - R_{ij}] + \rho (\ln R_{i0} - \sum_{j=1}^{n_i} \ln \epsilon_{ij}) \quad (9)$$

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

$$L = \sum_{j=1}^{n_i} L_{ij} \quad (10)$$

式中

$$L_{ij} = C_{ij}(R_{ij}) + \lambda_{ij}^0 [\epsilon_{ij}^0 - R_{ij}] + \rho \left( \frac{1}{n_i} \ln R_{i0} - \ln \epsilon_{ij}^0 \right) \quad (11)$$

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

由于第二级迭代终止时有

$$\frac{\partial L}{\partial \epsilon_{ij}^0} = 0$$

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda_j^0} = 0$$

$$j = 1, 2, \dots, n_i$$

即

$$\begin{cases} [\epsilon_{ij}^0]^{k+1} = [R_{ij}]^k \\ [\lambda_j^0]^{k+1} = \frac{\rho}{[\epsilon_{ij}^0]^k} \end{cases} \quad (12)$$

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图为

- (1) 令  $k=0$ , 设定初值  $\epsilon_{ij}^0, \lambda_j^0, \rho$ , 要求满足  $\epsilon_{i1}\epsilon_{i2}\dots\epsilon_{in}^0 = R_{i0}$ ;
- (2) 对式  $\min L_{ij}$  求解, 解出  $R_{ij}^k$ ;
- (3) 由式(12)算出关联协调向量  $(\epsilon_{ij}^0)^{k+1}$ 、拉格朗日乘子  $(\lambda_j^0)^{k+1} (j=1, 2, \dots, n_i)$ ;
- (4) 检验误差  $\delta_{ij1} = |(\epsilon_{ij}^0)^{k+1} - (\epsilon_{ij}^0)^k|$   
 $\delta_{ij2} = |(\lambda_j^0)^{k+1} - (\lambda_j^0)^k| \quad (j=1, 2, \dots, n_i)$ ;  
 如果均小于给定误差  $\Delta$ , 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。

#### 4 便携式机器人系统可靠度的配置 (Reliability distribution of the portable robot system)

##### 4.1 便携式机器人系统的构成

(1) 执行机构 它的机器人本体即执行机构是由六个关节将机座、手臂(一个小臂、一个大臂)、手腕、末端执行器串联而成, 全部采用回转运动副。

##### 4.2 第一级配置

已知便携式机器人系统可靠度指标为  $R(1000) = 0.574$ , 即工作到 1000 小时时, 其系统正常工作的概率为 0.574。系统总的失效率为 597682 (fit), 平均寿命为 1673 小时。

第一级系统可靠度配置给予系统时采用评分法。

$$\omega_1 = \prod_{j=1}^3 r_{1j} = 9.5 \times 8 \times 9 = 684$$

$$\omega_2 = \prod_{j=1}^3 r_{2j} = 9 \times 9 \times 9 = 729$$

$$\omega_3 = \prod_{j=1}^3 r_{3j} = 8 \times 6 \times 8 = 384$$

$$\omega_s = \sum_{i=1}^3 \omega_i = 1797$$

- 式中  $\omega_1$ ——控制子系统的评分数;  
 $\omega_2$ ——伺服驱动子系统的评分数;  
 $\omega_3$ ——机械本体子系统的评分数;  
 $r_{1j}$ ——控制子系统中第  $j$  个元素的评分数;  
 $r_{2j}$ ——伺服驱动子系统第  $j$  个元素的评分数;  
 $r_{3j}$ ——机械本体子系统第  $j$  个元素的评分数;  
 $\omega_s$ ——便携式机器人系统的总评分数。

$$C_1 = \omega_1 / \omega_s = 0.38$$

$$C_2 = \omega_2 / \omega_s = 0.41$$

$$C_3 = \omega_3 / \omega_s = 0.21$$

$$\lambda_1^* = C_1 \lambda_s = 0.38 \times 597682 = 227119$$

$$R_1(1000) = e^{-\lambda_1^* (1000) \times 10^{-9}} = 0.7968$$

$$\lambda_2^* = C_2 \lambda_s = 0.41 \times 597682 = 245050$$

$$R_2(1000) = e^{-\lambda_2^* (1000) \times 10^{-9}} = 0.7827$$

$$\lambda_3^* = C_3 \lambda_s = 0.21 \times 597682 = 125513$$

$$R_3(1000) = e^{-\lambda_3^* (1000) \times 10^{-9}} = 0.8820$$

式中  $\lambda_i^*$ ——系统可靠度配置后, 控制子系统的失效率;

$R_1$ ——系统可靠度配置后, 控制子系统工作到 1000 小时时的可靠度;

$\lambda_2^*$ ——系统可靠度配置后, 伺服驱动子系统的失效率;

$R_2$ ——系统可靠度配置后, 伺服驱动子系统工作到 1000 小时时的可靠度;

$\lambda_3^*$ ——系统可靠度配置后, 机械本体子系统的失效率;

$R_3$ ——系统可靠度配置后, 机械本体子系统工作到 1000 小时时的可靠度。

##### 4.3 第二级优化配置

在第一级配置中, 便携式机器人系统可靠度配置给其控制子系统、伺服驱动子系统及机械本体子系统后, 三者的可靠度值分别为 0.7968、0.7827 和 0.8820。

第二级优化分配中采用“花费最小”原则, 并将大系统理论中的递阶协调策略用于对“花费最小”原则建立起来的优化模型进行求解, 即采用二维混合协调法对建立的优化模型进行求解。

- (1) 面向二级二维混合协调法建立的优化模型对于控制子系统, 其优化模型为

$$\begin{cases} \min C_1 = \sum_{j=1}^{25} C_{1j}(R_{1j}) \\ s. t. \quad \epsilon_{1j} = R_{1j} \\ R_{10} = \prod_{j=1}^{25} R_{1j} = 0.7968 \end{cases} \quad (13)$$

对于机械本体子系统,其优化模型为

$$\begin{cases} \min C_3 = \sum_{j=1}^7 C_{3j}(R_{3j}) \\ s. t. \quad \epsilon_{3j} = R_{3j} \\ R_{30} = \prod_{j=1}^7 R_{3j} = 0.8820 \end{cases} \quad (15)$$

对于伺服驱动子系统,其优化模型为

$$\begin{cases} \min C_2 = \sum_{j=1}^{18} C_{2j}(R_{2j}) \\ s. t. \quad \epsilon_{2j} = R_{2j} \\ R_{20} = \prod_{j=1}^{18} R_{2j} = 0.7827 \end{cases} \quad (14)$$

(2) 二维混合协调法求解优化模型

便携机器人系统中,对于购买费用大于20元的组成元部件,其花费与可靠度的拟合函数(花费的单位为元):

表1 便携式机器人组成元部件“花费”与可靠度拟合函数

Table 1 The cost and reliability function of the components of the portable robot system

控制子系统		PMDIO(2个)	$C_{1i} = -1125 - \frac{\ln(1-R_{1i})}{0.00187}$ $i=18,19$
主控计算机	$C_{11} = 13308 - \frac{\ln(1-R_{11})}{0.0006}$	CYC342(2个)	$C_{1i} = -137 - \frac{\ln(1-R_{1i})}{0.14722}$ $i=20,21$
RS422通信卡	$C_{12} = 895 - \frac{\ln(1-R_{12})}{0.02327}$	AD1866(4个)	$C_{1i} = 22 - \frac{\ln(1-R_{1i})}{0.34904}$ $i=22, \dots, 25$
八位串行通信卡	$C_{13} = 228 - \frac{\ln(1-R_{13})}{0.01199}$	驱动伺服子系统	
单片机8031	$C_{14} = -38 - \frac{\ln(1-R_{14})}{0.02013}$	伺服电机驱动器(6个)	$C_{2i} = -29975 - \frac{\ln(1-R_{2i})}{0.00012}$ $i=1, \dots, 6$
16K的数据存储器	$C_{15} = -4 - \frac{\ln(1-R_{15})}{0.18547}$	交流伺服电机(6个)	$C_{2i} = 1579 - \frac{\ln(1-R_{2i})}{0.02734}$ $i=7, \dots, 12$
32K的27256程序存储器	$C_{16} = -230 - \frac{\ln(1-R_{16})}{0.01567}$	光电码盘(6个)	$C_{2i} = -1243 - \frac{\ln(1-R_{2i})}{0.003764}$ $i=13, \dots, 18$
键盘	$C_{17} = -24 - \frac{\ln(1-R_{17})}{0.09308}$	机械本体子系统	
可编程液晶显示模板控制器	$C_{18} = 5 - \frac{\ln(1-R_{18})}{0.02327}$	FC-A15-89RV减速器(3个)	$C_{3i} = 3160 - \frac{\ln(1-R_{3i})}{0.005538}$ $i=1, \dots, 3$
液晶显示屏	$C_{19} = 62 - \frac{\ln(1-R_{19})}{0.11461}$	谐波XB1-50-100减速器(2个)	$C_{3i} = 1148 - \frac{\ln(1-R_{3i})}{0.0818}$ $i=4,5$
PC9D10高速光隔(6个)	$C_{1i} = 31 - \frac{\ln(1-R_{1i})}{0.35458}$ $i=10, \dots, 15$	谐波XB3-50-100减速器	$C_{36} = 973 - \frac{\ln(1-R_{36})}{0.01496}$
PMDCP(2个)	$C_{1i} = -804 - \frac{\ln(1-R_{1i})}{0.0187}$ $i=16,17$	轴承ROLLIX03.0181.07	$C_{37} = 6604 - \frac{\ln(1-R_{37})}{0.00122}$

用二级二维混合协调法求解式(13)、式(14)及式(15)所建立的优化模型,求得优化模型的解为:

控制子系统:

$R_{11}=0.914515, R_{12}=0.997596, R_{13}=0.995344,$   
 $R_{14}=0.997222, R_{15}=0.999698, R_{16}=0.996434,$   
 $R_{17}=0.999398, R_{18}=0.997596, R_{19}=0.999511,$   
 $R_{110}=0.999842, R_{111}=0.999842, R_{112}=0.999842,$   
 $R_{113}=0.999842, R_{114}=0.000000, R_{115}=0.99984,$   
 $R_{116}=0.970881, R_{117}=0.970881, R_{118}=0.970881,$   
 $R_{119}=0.970881, R_{120}=0.999619, R_{121}=0.999619,$   
 $R_{122}=0.999839, R_{123}=0.999839, R_{124}=0.999839,$   
 $R_{125}=0.999839,$

伺服驱动子系统:

$R_{21}=0.961387, R_{22}=0.961387, R_{23}=0.961387,$   
 $R_{24}=0.961387, R_{25}=0.961387, R_{26}=0.961387,$   
 $R_{27}=0.999824, R_{28}=0.999824, R_{29}=0.999824,$   
 $R_{210}=0.999824, R_{211}=0.999824, R_{212}=0.999824,$   
 $R_{213}=0.998721, R_{214}=0.998721, R_{215}=0.998721,$   
 $R_{216}=0.998721, R_{217}=0.998721, R_{218}=0.998721$

机械本体子系统:

$R_{31}=0.985943, R_{32}=0.985943, R_{33}=0.985943,$   
 $R_{34}=0.999063, R_{35}=0.985943, R_{36}=0.994750,$   
 $R_{37}=0.939216$

(上接封 4)

5 结论(Conclusion)

本文采用两级可靠度配置方案,对便携式机器人进行系统可靠度配置,效果良好.尤其是采用二级二维混合协调法求解第二级配置优化模型时,其收敛速度和效率都很高.本文针对便携式机器人所提出的二级系统可靠度配置策略,对工业机器人的系统及更加复杂的机电大系统的可靠度配置提供了一定的参考.

参考文献 (References)

- 1 达庆利.大系统理论与方法.东南大学出版社,1989
- 2 李士勇.模糊控制(c)神经控制和智能控制论.哈尔滨工业大学出版社.1996
- 3 Kumar, Sharath C. An analytical approach to large-scale distribution system design. 1999;153-167
- 4 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:[博士学位论文].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2000

作者简介:

陈 伟 (1968-),女,深圳职业技术学院先进制造技术与工程系,讲师,博士.研究领域:工业机器人,先进制造技术.

侯琳琳 (1945-),女,哈尔滨工业大学机器人研究所,教授.研究领域:工业机器人及机电一体化.

慕鹤皋 (1934-),男,哈尔滨工业大学机器人研究所,博士生导师,中国工程院院士.研究领域:机器人技术,机电一体化.

Title	2003	Place	Further Information
IMACS/IFAC Symposium Mathematical Modelling-4 <sup>th</sup> MATHMOD	February 5-7	Vienna Austria	<a href="http://simtech.tuwien.ac.at/MATHMOD">http://simtech.tuwien.ac.at/MATHMOD</a> e-mail:inge.troch@tuwien.ac.at
IFAC Conference Intelligent Control Systems and Signal Processing-ICONS 2003	April 8-11	Faro Portugal	<a href="http://conferences.ptrede.com">http://conferences.ptrede.com</a> e-mail:icons03@ualg.pt
IFAC Symposium 5 <sup>th</sup> Fault Detection, Supervision and Safety of Technical Processes-SAFEPROCESS	June 9-11	Washington DC, USA	http: not yet available e-mail:jgertler@gmu.edu
IFAC Symposium 6 <sup>th</sup> Advances in Control Education -ACE 2003	June 16-18	Oulu Finland	<a href="http://ntsat.oulu.fi/ace">http://ntsat.oulu.fi/ace</a> e-mail:leena.yliniemi@oulu.fi
IFAC Conference Analysis and Design of Hybrid Systems -ADHS03	June 16-18	Saint Malo France	<a href="http://www.supelec-rennes/adhs03/">http://www.supelec-rennes/adhs03/</a> e-mail:
IFAC Symposium 4 <sup>th</sup> Robust Control Design-ROCOND 2003	June 25-27	Milan Italy	<a href="http://www.elet.polimi.it/ROCOND2003">http://www.elet.polimi.it/ROCOND2003</a> e-mail:Colaneri@elet.polimi.it