

文章编号 1004-924X(2007)08-1253-04

基于精度成本控制的精密传输 机器人系统可靠度优化配置方法

陈伟¹, 钟健²

(1. 深圳职业技术学院 自动化系, 广州 深圳 518055;
2. 深圳职业技术学院 先进制造技术与工程系, 广州 深圳 518055)

摘要:提出了一种基于精度成本控制的系统可靠度优化配置法。该方法采用网络系统的优化原理合理调配系统精度、可靠度与成本的关系,结合精度、可靠度指标,建立了合理有效的系统可靠度优化配置数学模型,并应用混合递阶协调法进行求解。求解结果较好地实现了对精密传输机器人系统的可靠度配置。研究表明,本文所提出的可靠度优化配置方法对更加复杂的大系统的可靠度优化配置有一定的参考作用。

关键词:精密传输机器人;精度成本控制;可靠度;递阶协调;优化配置

中图分类号:TP242.6 **文献标识码:**A

Optimum reliability distribution of precise conveying robot system based on precision and cost controls

CHEN Wei¹, ZHONG Jian²

(1. Department of Automation, Shenzhen Polytechnic College, Shenzhen 518055, China; 2. Department of Advanced Manufacturing Technology and Engineering, Shenzhen Polytechnic College, Shenzhen 518055, China)

Abstract: A optimum reliability distribution method of precise conveying robot system based on precision and cost controls was proposed. The method sets up a reasonable and effective system reliability optimum distribution mathematic model using network system optimum principle to adjust the relation among system precision, reliability, and cost, and to meet the requirements of reliability and precision. The method also deploys the mixed successive coordinating method to solve proposed mathematical model. The research results achieve the optimum reliability distribution of the robot system and show that the method can be used in reference on setting up optimum reliability distribution of 6 or more dimensions for a precise conveying robot system or more-complicated large systems.

Key words: precise conveying robot; precision and cost controls; reliability; successive coordinating; optimum distribution

1 引言

精密传输机器人在实际应用中需要有高的可靠度,为此从设计开始,就应考虑以可靠性作为优化设计的指标,而其系统可靠度在一定约束下(如成本、精度、复杂度、环境因素等约束)的优化配置在其可靠性设计中至关重要^[1]。鉴于此,本文提出一种在保证精度且系统制造成本最合理前提下的系统可靠度优化配置方法—基于精度成本控制的系统可靠度优化配置法^[2-3]。

2 基于精度成本控制的精密传输机器人系统可靠度优化配置原理

精密传输机器人系统基于可靠性来讲,是一个多子系统的串联网络系统,而网络系统的优化原理可以合理调配系统精度、可靠度与成本的关系,再结合精密机器人系统精度、可靠度指标(系统总可靠度下限指标),建立合理有效的系统可靠度配置数学模型。针对这个配置模型,采用大系统理论的混合递阶协调法求解^[4-5],得出理想的各子系统的可靠度,完成其系统可靠度优化配置。

2.1 精密传输机器人的系统结构分析

精密传输机器人的自由度为 5,它主要有以下六个子系统构成:

- (1) 机器人本体机构子系统;
- (2) 真空沟道吸附式手爪子系统;
- (3) 检测传感子系统;
- (4) 开放及嵌入式控制子系统;
- (5) 伺服驱动子系统;
- (6) 模块化软件子系统。

精密传输机器人系统特点:

(1) 在限制体积范围内,完成了 5 个自由度的配置、驱动方式及传动方式,实现了嵌入式控制系统印刷线路板的安装和走线,保证了高洁净环境下对材料、润滑、电气等使用要求。

(2) 在抓取、运输过程中为了避免损伤掩模板现象发生,采用了基于可靠度设计的真空沟道吸附,并用启动塞辅助夹紧。

(3) 采用了开放式控制系统,便于各种系统的融合,同时在软件上采用模块化设计,方便二次

开发。

基于可靠性来讲,精密传输机器人系统既属于多子系统的网络系统,又属于串联型系统^[6]。

2.2 基于精度成本控制的系统可靠度优化配置的数学模型

对于精密传输机器人系统来说,基于可靠性它是一个多子系统的串联型网络系统。网络系统优化理论提出了一种系统可靠度优化配置基本原则为系统可靠度、精度限定,系统费用最小。根据这个原则,对该系统进行分析得出该系统要同时满足如下数学模型:

$$\min C_S = \sum_{i=1}^{n_i} C_i(R_i, P_S), \quad (1)$$

$$R_S = \prod_{i=1}^{n_i} R_i, \quad (2)$$

式中:

C_S —该机器人系统所需的总成本;

C_i —该机器人系统第 i 个子系统所需的成本;

R_S —该机器人系统的总可靠度;

R_i —该机器人系统第 i 个子系统的可靠度;

P_S —该机器人系统的精度指标;

n_i —该机器人系统中子系统的个数。

通过对常用精密级机器人各子系统的研制成本、可靠度及其精度三个指标的调查、整理和分析,通过采用数值分析方法,近似拟合出精密级机器人各子系统这三个指标之间的函数关系如下:

$$C_i(R_i, P_S) = \left[\frac{k_1 P_S}{1 - R_i} - \frac{\ln(1 - R_i)}{k_2} \right], \quad (3)$$

式中: k_1, k_2 是常数。

综上所述,对该机器人系统建立如下的可靠度优化配置数学模型:

$$\begin{cases} \min C_S = \sum_{i=1}^{n_i} C_i(R_i, P_S) \\ R_S = \prod_{i=1}^{n_i} R_i \geq R_{S_L} \\ C_i(R_i, P_S) = \left[\frac{k_1 P_S}{1 - R_i} - \frac{\ln(1 - R_i)}{k_2} \right], \end{cases} \quad (4)$$

式中, R_{S_L} —该机器人系统总可靠度最低允许值。

2.3 数学模型的递阶混合协调解法

应用常规的数学解法求解上面所建立的优化配置数学模型极其困难,因此,本文应用系统控制论中的递阶混合协调法并通过计算机编程进行

求解。

递阶混合协调法是二级递阶协调结构,第一级求解各子问题,第二级是协调器,修正协调向量,从而使解达到最优。下面给出求解过程:

递阶混合协调法要求整体问题的拉格朗日函数是加性可分的,因此要对式(4)进行适当的转换才能满足要求,令 $\tau_i = R_i$, 则式(4)给出的优化模型可以转换成如下形式:

$$\begin{cases} \min C_S = \sum_{i=1}^{n_i} C_i(R_i, P_S) \\ \tau_i = R_i \quad (i = 1, 2, \dots, n_i) \\ \sum_{i=1}^{n_i} \ln \tau_i - \ln R_{SL} = 0 \\ C_i(R_i, P_S) = \left[\frac{k_1 P_S}{1 - R_i} - \frac{\ln(1 - R_i)}{k_2} \right], \end{cases} \quad (5)$$

式(5)的拉格朗日函数为:

$$\begin{cases} L = \sum_{i=1}^{n_i} C_i(R_i, P_S) + \\ \sum_{i=1}^{n_i} \lambda_i (\tau_i - R_i) + \eta (\ln R_{SL} - \sum_{i=1}^{n_i} \ln \tau_i) \\ C_i(R_i, P_S) = \left[\frac{k_1 P_S}{1 - R_i} - \frac{\ln(1 - R_i)}{k_2} \right], \end{cases} \quad (6)$$

式中, λ_i 和 τ_i ($i=1, 2, \dots, n_i$) 为协调向量,其值由协调器给定,初始设为 $\lambda_i = \lambda_i^0$, $\tau_i = \tau_i^0$, 这样拉格朗日函数 L 可按加性分解成:

$$L = \sum_{i=1}^{n_i} L_i, \quad (7)$$

式中:

$$L_i = C_i(R_i, P_S) + \lambda_i (\tau_i^0 - R_i) + \eta \left(\frac{1}{n_i} \ln R_{SL} - \ln \tau_i^0 \right). \quad (8)$$

于是,第一级中 n_i 个子问题的任务是在由第二级给定 λ_i^0 和 τ_i^0 的情况下使 L_i ($i=1, 2, \dots, n_i$) 分别最优,第二级中不断修正 λ_i^0 和 τ_i^0 以保证整体最优。

由于第二级迭代终止时有:

$$\frac{\partial L}{\partial \tau_i^0} = 0, \quad \frac{\partial L}{\partial \lambda_i^0} = 0 \quad i=1, 2, \dots, n_i$$

即:

$$\begin{cases} [\tau_i^0]^{k+1} = [R_i]^k \\ [\lambda_i^0]^{k+1} = \frac{\eta}{[\tau_i^0]^k}, \end{cases} \quad (9)$$

式中 k 为迭代次数。

递阶混合协调法的计算流程为:

- (1) 令 $k=0$, 设定初值 τ_i^0 、 λ_i^0 、 η , 要求满足 $\tau_1^0 \tau_2^0 \dots \tau_{n_i}^0 = R_{SL}$;
 - (2) 用常规数学方法求解 $\min L_i$, 解出 R_i^k ;
 - (3) 由式(9)算出关联协调向量 $(\tau_i^0)^{k+1}$ 、拉格朗日乘子 $(\lambda_i^0)^{k+1}$ ($i=1, 2, \dots, n_i$);
 - (4) 检验误差 $\Delta_{i1} = |(\tau_i^0)^{k+1} - (\tau_i^0)^k|$
 $\Delta_{i2} = |(\lambda_i^0)^{k+1} - (\lambda_i^0)^k| \quad (i=1, 2, \dots, n_i)$;
- 如果均小于给定误差 Δ , 则结束; 否则令 $k=k+1$, 回到第二步。

以上就是对系统可靠度优化配置原理的分析描述。

3 基于精度成本控制的精密传输机器人系统可靠度的优化配置

利用上述原理在一定约束条件下对精密传输机器人系统进行具体的可靠度优化配置。

设系统要求的总可靠度最低允许值为 R_{SL} ($5\ 000$) = 0.832, 系统要求的精度为 $P_S = 0.93$, 该系统共有六个子系统, 分别用 R_1 、 C_1 表示机器人本体机构子系统的可靠度及成本; R_2 、 C_2 表示真空沟道吸附式手爪子系统的可靠度及成本; R_3 、 C_3 表示检测传感子系统的可靠度及成本; R_4 、 C_4 表示开放及嵌入式控制子系统的可靠度; R_5 、 C_5 表示伺服驱动子系统的可靠度及成本; R_6 、 C_6 表示模块化软件子系统的可靠度及成本, 成本的单位为千元。

经反复分析、整理, 各子系统的研制成本、可靠度及系统精度间的函数关系式分别近似如下:

$$C_1(R_1, P_S) = \left[\frac{0.265\ 4}{1 - R_1} - \frac{\ln(1 - R_1)}{0.056\ 2} \right], \quad (10)$$

$$C_2(R_2, P_S) = \left[\frac{-2.086\ 5}{1 - R_2} - \frac{\ln(1 - R_2)}{0.415} \right], \quad (11)$$

$$C_3(R_3, P_S) = \left[\frac{0.071\ 2}{1 - R_3} - \frac{\ln(1 - R_3)}{0.286\ 3} \right], \quad (12)$$

$$C_4(R_4, P_S) = \left[\frac{0.034\ 1}{1 - R_4} - \frac{\ln(1 - R_4)}{0.068\ 1} \right], \quad (13)$$

$$C_5(R_5, P_S) = \left[\frac{0.273\ 5}{1 - R_5} - \frac{\ln(1 - R_5)}{0.206\ 7} \right], \quad (14)$$

$$C_6(R_6, P_S) = \left[\frac{0.012\ 7}{1 - R_6} - \frac{\ln(1 - R_6)}{0.523\ 4} \right]. \quad (15)$$

基于上述各子系统间的研制成本、可靠度及系统精度间的函数式,利用本文提出的系统可靠度优化配置原理,在计算机上实现递阶协调法的反复迭代求解,计算流程如图 1 所示,得出的精密传输机器人系统的可靠度优化配置结果如表 1 所示。

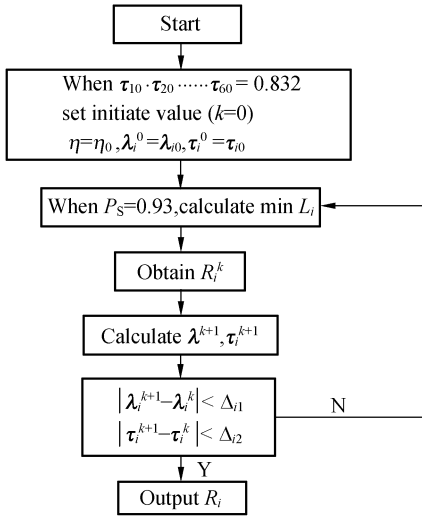


图 1 递阶协调计算流程

Fig. 1 Flow chart of mixed successive coordinating method

表 1 精密传输机器人系统的可靠度优化配置结果

Tab. 1 Reliability distribution results for precise conveying robot system

Subsystem	Reliability
Mechanism of the precise conveying robot	$R_1 = 0.9524$
Vacuum sucking gripper system	$R_2 = 0.9487$
Testing and sensing system	$R_3 = 0.9723$
Open embedded control system	$R_4 = 0.9842$
Servo drive system	$R_5 = 0.9649$
Multi-module software system	$R_6 = 0.9973$

4 结 论

本文采用网络系统可靠度的优化原理建立了合理有效的系统可靠度优化配置数学模型,并应用混合递阶协调法在一定约束条件下进行求解,较好地实现了对五自由度精密传输机器人系统的可靠度优化配置。本文所提出的可靠度优化配置方法对六自由度以上的精密传输机器人系统及更加复杂的多机器人协调系统的可靠度优化配置有一定的参考作用。

参考文献:

- [1] 金碧辉. 系统可靠性工程[M]. 北京:国防工业出版社,2004.
JIN B H. *Reliability Engineering for System* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2001. (in Chinese)
- [2] 孙麟治,李鸣鸣,程维明. 精密定位技术研究[J]. 光学 精密工程,2005,13(增): 69-75.
SUN L ZH, LI M M, CHENG W M. Study on precision positioning technique[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005,13 (Supp.): 69-75. (in Chinese)
- [3] 节德刚,刘延杰,孙立宁,等. 一种宏微双重驱动精密定位机构的建模与控制[J]. 光学 精密工程,2005,13(2): 171-178.
JIE D G, LIU Y J, SUN L N, et al.. Modeling and control of a macro-micro dual-drive ultra-precision positioning mechanism[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005,13(2): 171-178. (in Chinese)
- [4] 涂序彦,王枏,郭燕慧. 大系统控制论[M]. 北京:邮电出版社,2005.
TU X Y, WANG Z, GUO Y H. *Large Systems Cybernetics* [M]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications Press, 2005. (in Chinese)
- [5] KUMAR S C. An analytical approach to large-scale distribution system design[J]. *SPIE*,1999:153-167.
- [6] 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,2002,10(2):165-170.
CHEN W, ZHONG J. Research on three reliability distribution methods of an industrial robot system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2002,10(2): 165-170. (in Chinese)

作者简介:陈 伟(1967-),女,河北乐亭人,现在深圳职业技术学院从事机电一体化技术的科研和教学工作。E-mail: chenwei_szpt@hotmail.com

(本栏目编辑 李树军)