

1 种航空发动机整机质量分配方法

郑伟连¹, 杨纯辉², 刘仕运¹

(1. 中国航发沈阳发动机研究所, 沈阳 110015; 2. 空军装备部驻沈阳地区第二军事代表室, 沈阳 110043)

摘要: 为了在航空发动机方案设计阶段实现整机质量指标向发动机各单元体的分配, 定义了整机质量目标, 提出了整机质量名义值和质量公差分配方法。单元体质量公差的分配主要考虑了单元体的加工成本、质量占比、零部件特性的影响, 构建了“质量公差—加工成本”模型来确定质量公差与加工成本的关系; 采用蒙特卡洛法对单元体的质量公差分配结果进行综合, 对照整机质量目标迭代修改质量公差分配结果。结果表明: 本方法具有工程应用的可行性和合理性。

关键词: 质量分配; 质量公差; 加工成本; 公差综合; 航空发动机

中图分类号: V221.5

文献标识码: A

doi: 10.13477/j.cnki.aeroengine.2020.04.008

A Method of Engine Mass Distribution of Aeroengine

ZHENG Wei-lian¹, YANG Chun-hui², LIU Shi-yun¹

(1. AECC Shenyang Engine Research Institute, Shenyang 110015, China; 2. Shenyang Area 2nd Military Representative Room of Air Force Equipment Department, Shenyang 110043, China)

Abstract: In order to realize the distribution of the engine mass index to each unit of the engine in the aeroengine scheme design stage, the mass target of the engine was defined, and the distribution method of the mass nominal value and the mass tolerance of the engine were put forward. The distribution of unit mass tolerance mainly took into account the machining cost, mass proportion and component characteristics of the unit. A model of “mass tolerance—machining cost” was constructed to determine the relationship between mass tolerance and machining cost. Monte Carlo method was used to synthesize the results of mass tolerance distribution of the unit, and the results of mass tolerance distribution were modified iteratively according to the engine mass target. The results show that this method is feasible and reasonable for engineering application.

Key words: mass distribution; mass tolerance; machining cost; tolerance synthesis; aeroengine

0 引言

推重比是衡量战斗机发动机技术水平和作战效能的重要指标之一。为了实现航空发动机的推重比指标, 在设计过程中对整机质量有严格的要求。在发动机方案设计阶段, 将发动机整机质量指标合理地分配给各设计单元是实现整机质量控制的重要手段。

相关学者对涡喷、涡扇发动机质量的估算方法开展了大量研究。王团结等^[1]建立了采用粒子群优化算法的 BP 神经网络发动机质量估算模型; 张韬等^[2]根据发动机部件法思想, 建立了基于统计的各部件气动—结构经验关系模型, 发展了变循环发动机质量预

估方法; 潘代锋等^[3]从发动机热力循环参数出发, 通过流路分析确定总体轮廓尺寸, 进一步获得主要零件的几何尺寸并估算发动机质量。但是, 鲜有关于航空发动机整机质量分配技术方面的研究。

本文对发动机整机质量目标进行了定义, 提出了 1 种在方案论证阶段将发动机整机质量名义值和质量公差向各设计单元分配的方法。

1 整机质量目标定义

在发动机方案论证阶段, 航空发动机的质量目标来源为:

(1) 对于 1 台新研制的发动机, 通过整机质量估

收稿日期: 2019-05-07 基金项目: 航空动力基础研究项目资助

作者简介: 郑伟连(1987), 男, 硕士, 工程师, 从事发动机总体结构设计工作; E-mail: zwlbuaa@126.com。

引用格式: 郑伟连, 杨纯辉, 刘仕运. 1 种航空发动机整机质量分配方法[J]. 航空发动机, 2020, 46(4): 41-46. ZHENG Weilian, YANG Chunhui, LIU Shiyun. A method of engine mass distribution of aeroengine[J]. Aeroengine, 2020, 46(4): 41-46.

算方法得到发动机的整机质量名义值 m_0 ;

(2) 承接发动机用户的质量指标要求, 一般为发动机整机质量的最大值 $m_{\max}$ 。例如: 某型航空发动机用户要求的发动机干质量指标为不大于 $1780^{+2\%}$ kg, 即整机质量不超过 1815.6 kg。

以上质量指标仅明确了发动机整机质量的名义值或质量最大值, 以此作为发动机整机质量目标, 不能够准确地表征和描述发动机整机质量值的随机性。同时, 以上的质量指标未对发动机整机的质量公差进行定义, 无法满足发动机整机质量的分配需求。

考虑到航空发动机制造过程中存在的系统误差和随机误差, 假设发动机整机质量分布服从正态分布, 如图 1 所示。定义发动机整机质量目标为 (μ, σ) , 其中 μ 为发动机整机质量名义值, σ 为整机质量公差值。发动机整机质量公差范围为 $(\mu - \sigma, \mu + \sigma)$ 。

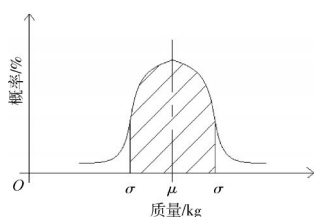


图 1 发动机整机质量目标

2 整机质量分配流程

航空发动机采用单元体思想开展设计工作, 单元体是航空发动机的设计、装配单元。在发动机方案设计阶段, 发动机总体设计专业人员需要将整机质量的名义值和公差分配给各单元体, 某型双转子涡轮风扇发动机的单元体划分为进气机匣、风扇、中介机匣、中央传动机匣及第 2 和第 3 号轴承、高压压气机转子、高压压气机前机匣、高压压气机后机匣、燃烧室机匣、燃烧室火焰筒、高压涡轮导向器、高压涡轮转子、高压涡轮机匣、低压涡轮、涡轮后机匣、混合器、加力扩压器、收-扩喷管、附件机匣、外涵机匣。

整机质量名义值分配和整机质量公差值分配的流程如图 2 所示。

从图中可见, 整机质量分配后, 确认整机质量名义值和公差值是

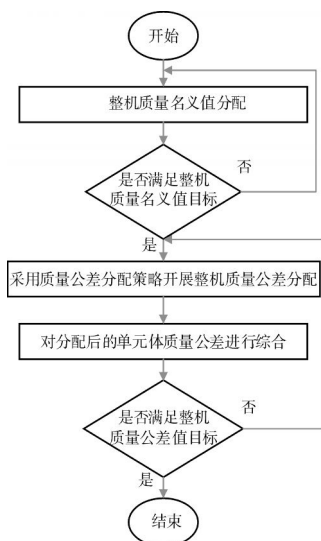


图 2 发动机整机质量分配流程

否满足整机质量目标。如果满足质量目标, 则结束质量分配工作; 如果不满足整机质量目标, 则调整单元体的质量分配结果, 将整机质量重新分配, 直至满足整机质量目标要求。

3 整机质量名义值分配

发动机整机质量名义值向各单元体分配的策略可表示为

$$\mu = \sum_{i=1}^n \mu_i \quad (1)$$

式中: n 为发动机单元体总数; μ_i 为第 i 个单元体的质量名义值。

对于从原型机改进研制的改型发动机, 其各单元体质量名义值可以参考已有原型机对应的单元体质量。针对改型机相对于原型机中单元体结构的改进设计, 在整机质量名义值分配过程中, 以原型机单元体质量为基础进行修正得到改型机单元体质量名义值。

例如: 某推力级别的叶型改进结构的 3 级风扇单元体的质量名义值为

$$M_1 = \alpha \cdot M_0 \quad (2)$$

式中: M_1 为改进叶型结构的风扇单元体质量名义值; M_0 为某推力级别的 3 级风扇的名义质量; α 为修正系数, 具体值依据改进结构的具体情况确定。

对于没有原型机的全新研制的发动机, 首先利用质量估算经验公式或软件对发动机各单元体的质量进行估算, 然后以估算的结果为依据确定单元体质量名义值, 最终实现发动机整机质量名义值的分配。

4 整机质量公差的分配

发动机整机质量公差向各单元体分配的策略可表示为

$$\sigma \geq \sum_{i=1}^n \sigma_i \quad (3)$$

式中: σ_i 为第 i 个单元体的质量公差值。

发动机整机质量公差分配受多种因素影响。单元体加工成本、其质量在整机质量的占比、零组件特性都会影响单元体质量公差的确定。

4.1 单元体加工成本的影响

工程实践表明, 零组件的质量公差和加工成本为负相关的关系, 即质量公差越小, 生产加工成本越高。在质量公差的分配过程中, 如果某单元体的质量公差

分配较大,其加工成本相应会降低;反之,如果分配的质量公差较小,则其加工成本会增加。定义单元体加工成本因素对质量公差分配的影响因子为 k_1 。

4.2 单元体质量占比的影响

每台发动机单元体的质量在发动机整机质量中所占的比例不一样。在发动机整机质量公差分配时,需要考虑各单元体质量在整机质量的占比来确定单元体质量公差值。例如:某单元体质量占整机质量的比例较大,该单元体的质量公差分配就需要重点考虑;相反,对于发动机中质量占比较小的单元体,其质量公差分配可以相对大一些。定义单元体质量占比因素对质量公差分配的影响因子为 k_2 。

质量占比的影响因素可表示为

$$k_2^i = \frac{\mu_i}{\mu} \times 100\% \quad (4)$$

式中: k_2^i 为第 i 个单元体质量占比因素系数。

4.3 单元体零件特性因素的影响

航空发动机零件按功能分为支撑结构件、转子件、联结件等;按应用特性又分为普通件、关键件、重要件等。发动机中的某些转子件,如盘轴、叶片等,由于其结构的重要性,设计精度要求比较高,多数都采用机加、精密铸造等方式制造,因此一般要求其具有较小的质量公差值;另外,一些采用铸造方式生产的支撑结构类的零件,由于其工作环境要求不高,其设计精度要求也比较低,因此其质量公差相对较大。定义单元体零组件特性因素对质量公差分配的影响因子为 k_3 。

单元体的零件特性因素影响因子可以采用权重系数法确定。定义单元体或组件中关键件的数量为 a , 其总质量为 m_a ; 重要件的数量为 b , 其总质量为 m_b ; 一般件的数量为 c , 其总质量为 m_c ; 暂不考虑螺帽、螺钉、锁片等小零件。定义关键件的权重系数为 η_a , 重要件的权重系数为 η_b , 一般件的权重系数为 η_c , 则组件的考虑零组件特性的综合权重系数 η 为

$$\eta = \frac{\eta_a m_a + \eta_b m_b + \eta_c m_c}{m_a + m_b + m_c} \quad (5)$$

η_a 、 η_b 、 η_c 的具体数值由专家系统打分评定。考虑上述影响因素,实现质量公差分配

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_i = f(k_1^i, k_2^i, k_3^i) \cdot \frac{\sigma}{n} \\ \sum_{i=1}^n \sigma_i \leq \sigma \end{array} \right. \quad (6)$$

式中: f 为质量公差影响权重函数; k_1^i 、 k_2^i 、 k_3^i 分别为第 i 个单元体的加工成本、质量占比、零件特性的影响因子。

5 加工成本 – 单元体质量公差模型

加工成本是影响单元体质量公差的重要方面。在发动机制造过程中,零组件的质量公差与加工成本相关。采用不同的加工方法,零组件的质量公差不同,产生的加工成本也不同。总体来说,加工成本和质量公差成反比关系。

不同的零组件质量公差需要采用不同的加工工艺和制造资源来实现。制造资源主要包括制造装备、工艺装备、工艺技术和人力资源。具体影响到加工成本的因素有 7 类^[4-5]: 设备价值、工艺方法、工序次数、工序工时、刀具和工具价值、检测工具价值、操作工人技术等级。这些因素都会对产品成本产生不同程度的影响,影响是综合、复杂且常常是模糊的,可以把各种因素按照一定的规则分为若干等级,并采用模糊数学理论对各加工因素进行处理:

首先应用二元对比排序法确定各类加工因素对成本影响的权系数,即先在二元对比中建立比较级;然后再按一定方法转化为总体的排序;最后对结果进行归一化处理,确定出各类加工因素对成本影响的权系数

$$A = (a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7) \quad (7)$$

式中: $a_1 \sim a_7$ 分别为 7 种加工因素对成本影响的权系数。

每类加工因素按照一定的规则(如按等比、等差)分成若干等级,专业人员对各等级评判给分并采用数理统计处理的方法确定各等级对加工成本的影响系数。

零组件的几何形状、尺寸千差万别,很难用 1 个数学模型精确描述所有尺寸的“加工成本 – 质量公差”,因此国内外还未建立成熟的发动机零组件加工成本和质量公差的数学模型。

本文采用基于模糊神经网络建立的“加工成本 – 质量公差”模型,为单元体质量公差的分配提供依据。把加工成本看成是质量公差值 T 和加工因素成本影响系数 V 的函数,并利用神经网络的高度非线性映射的特点,同时考虑到加工因素影响系数的模糊性问题,建立基于模糊神经网络^[6-8]的“加工成本 – 质量公差”模型。该网络的输入为零组件的质量公差值 T 和加工因素成本影响系数 V ,输出为加工成本。

模糊神经网络选用具有实数输入的模糊神经元,这种模糊神经元有 N 个非模糊输入,加权操作由隶属度函数代替^[9]。把质量公差和加工因素成本影响系数作为模糊神经网络的输入,神经元结构如图 3 所示。

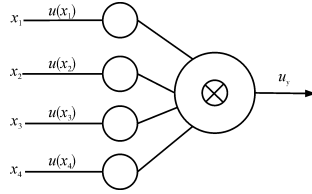


图 3 神经元结构

加权操作由隶属度函数代替, $\otimes$ 表示累积算子,则模糊神经元的数学表达式为

$$u_y(x_1, x_2, \dots, x_n) = u_1(x_1) \otimes u_2(x_2) \otimes \dots \otimes u_n(x_n) \quad (8)$$

式中: $x_1, x_2, \dots, x_n$ 为单元体质量公差; $u_1, u_2, \dots, u_n$ 为质量公差的加工因素成本影响系数; u_y 为加工成本。

“加工成本-单元体质量公差”模糊神经网络模型 4 层结构如图 4 所示。

从图中可见,第 1 层为输入层。

第 2 层的作用是计算各输入分量的隶属度。采用“加工成本-单元体质量公差”模糊神经网络模型 4 层结构如图 4 所示。

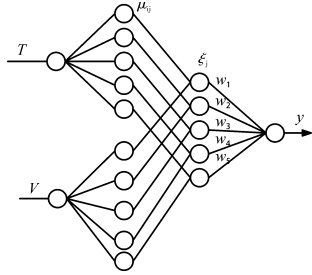


图 4 “加工成本-单元体质量公差”模糊神经网络模型

$$\mu_{ij} = \exp\left(-\frac{(x_i - c_{ij})^2}{\sigma_{ij}^2}\right), 1 \leq i \leq n, 1 \leq j \leq m \quad (9)$$

式中: x_i 为第 i 个输入; n 为输入层结点数; μ_{ij} 、 c_{ij} 、 σ_{ij} 分别为隶属度函数、隶属度函数的中心及宽度; 下标 i 表示第 i 个输入, j 表示推理结点的序号。

第 3 层为推理层,每个节点对应于 1 条模糊规则

$$\zeta_j = \mu_{1j} \mu_{2j} \dots \mu_{nj} = \prod_{i=1}^n \mu_{ij}, (1 \leq j \leq m) \quad (10)$$

第 4 层为反模糊化层。将第 3 层的结果通过一定的权值组合出最后的输出结果

$$y = w_1 \zeta_1 + w_2 \zeta_2 + \dots + w_m \zeta_m = \sum_{j=1}^m w_j \zeta_j \quad (11)$$

式中: w_j 为连接权值。

模糊神经网络的学习算法采用梯度下降法,在学习过程中对 c_{ij} 、 σ_{ij} 、 w_j 的调整量 Δc_{ij} 、 $\Delta \sigma_{ij}$ 、 Δw_j 可表示为

$$\Delta c_{ij} = c_{ij}(l+1) - c_{ij}(l) = -\eta \partial E_p / \partial c_{ij} \quad (12)$$

$$\Delta \sigma_{ij} = \sigma_{ij}(l+1) - \sigma_{ij}(l) = -\eta \partial E_p / \partial \sigma_{ij} \quad (13)$$

$$\Delta w_j = w_j(l+1) - w_j(l) = -\eta \partial E_p / \partial w_j \quad (14)$$

式中: η 为权值学习系数; E_p 为网络目标函数; l 为迭代步数。

模糊神经网络选用的目标函数^[10-11]为

$$E_p = \frac{(y_d - y_c)^2}{2} \quad (15)$$

式中: y_d 为网络期望输出; y_c 为网络实际输出; E_p 为期望输出和实际输出的误差。

网络算法的具体计算流程如图 5 所示^[12]。

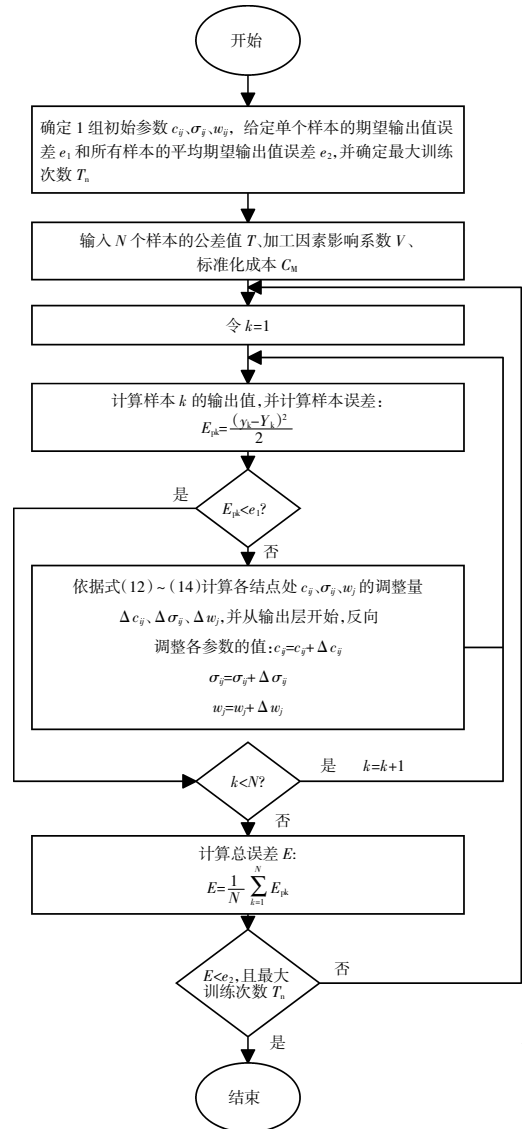


图 5 模糊神经网络算法流程

6 单元体质量公差综合

根据发动机方案设计结果,对该方案相同类型的发动机单元体的实际质量进行大量测量,形成单元体质量的数据积累。采用统计学工具,得出与设计方案相同类型发动机单元体的质量统计学分布规律。例如:假设发动机整机质量 M 服从正态分布 M

$\sim N(\mu, \sigma^2)$; 假设风扇单元体质量 M_1 服从正态分布 $M_1 \sim N(\mu_1, \sigma_1^2)$; 假设压气机单元体质量 M_1 服从正态分布 $M_2 \sim N(\mu_2, \sigma_2^2)$; 单元体 M_i 大量测量后经过数据分析得出其服从某种概率分布规律。

在整机质量公差分配后,综合各单元体的质量分布规律得到整机质量,完成 1 次质量公差分配的迭代。蒙特卡洛^[13-15]法能够较好地利用每台发动机单元体的概率分布特性,基于统计学原理给出科学的综合结果。

蒙特卡洛算法的计算流程如图 6 所示。

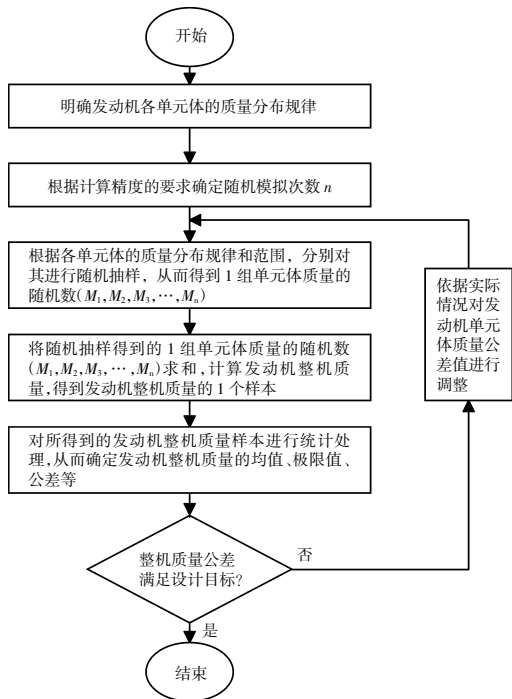


图 6 蒙特卡洛算法流程

7 整机质量分配算例

以某涡扇发动机为例,分别采用现有质量分配方法和本文提出的质量分配方法开展质量分配,结果见表 1。

表 1 质量分配结果

序号	单元体名称	原分配方法		本文分配方法	
		质量名 义值/kg	质量 公差/%	质量名 义值/kg	质量 公差/%
1	进气机匣	28	2	28	1.34
2	风扇	46	2	46	4.00
3	中介机匣	44	2	44	0.80
4	高压压气机	51	2	51	3.60
...	...	...	...	...	...

结果表明,本文提出的质量公差分配方法在考虑了生产成本、质量占比、零组件特性等因素后,得出了更合理的质量公差分配结果。

8 结束语

本文定义了发动机整机质量目标,提出了整机质量名义值和质量公差向单元体的分配流程和分配方法,在质量公差分配过程中重点考虑了单元体生产成本、质量占比、零组件特性 3 方面因素,具有工程应用可行性和合理性。

参考文献:

[1] 王团结,张赞,包亚.基于 PSO-BP 的涡扇发动机质量估算方法研究[J].系统仿真技术,2015(1):63-67.
WANG Tuanjie,ZHANG Yun,BAO Ya.Research on weight estimation of turbofan engine based on PSO-BP neural network[J].System Simulation Technology,2015(1):63-67.(in Chinese)

[2] 张韬,王占学,刘增文,等.变循环发动机质量预估方法研究[J].机械设计与制造,2014(8):15-18.
ZHANG Tao,WANG Zhanxue,LIU Zengwen,et al.Method research of variable cycle engine weight estimate[J].Machinery Design & Manufacture,2014(8):15-18. (in Chinese)

[3] 潘代锋,伏宇.一种预估涡喷/涡扇发动机质量的方法[J].燃气涡轮试验与研究,2010,23(3):49-51.
PAN Daifeng,FU Yu.A method of pre-estimation for turbojet/turbofan engine weight [J].Gas Turbine Experiment and Research,2010,23(3):49-51. (in Chinese)

[4] 刘保军. 基于制造资源的公差可制造性评价及其成本模型研究[D]. 杭州:浙江大学,2004.
LIU Baojun. Study on manufacturability evaluation of tolerance and cost-tolerance model based on manufacturing resources[D]. Hangzhou: Zhejiang University,2004. (in Chinese)

[5] 曹衍龙.面向制造环境的公差稳健设计方法与技术研究[D].杭州:浙江大学,2003.
CAO Yanlong.Study on methodology and technology of robust tolerance design for manufacture [D].Hangzhou:Zhejiang University,2003. (in Chinese)

[6] 何春梅.模糊神经网络的性能及其学习算法研究[D]. 南京:南京理工大学,2010.
HE Chunmei.The performance and learning algorithm of fuzzy neural network [D].Nanjing:Nanjing University of Science & Technology, 2010. (in Chinese)

[7] 翟东海.加乘型模糊神经网络理论和应用的研究[D]. 西安:西安交通大学,2003.
ZHAI Donghai. Theory and application of additive-multiplicative fuzzy neural networks[D].Xi'an:Xi'an Jiaotong University,2003. (in Chinese)

[8] 李辉.基于粒子计算的神经网络及集成方法研究[D]. 江苏徐州:中

- 国矿业大学,2015.
- LI Hui.Research of neural network and the ensemble method based on granular computing [D].Jiangsu Xuzhou:China University of Mining & Technology,2015. (in Chinese)
- [9] 肖伟跃.CAPP 中的智能信息处理技术[M]. 湖南长沙:国防科技大学出版社,2002:25-30.
- XIAO Weiyue.Intelligent information processing technology in CAPP[J]. Hunan Changsha:National University of Defense Technology Press, 2002:25-30. (in Chinese)
- [10] 刘光远,廖晓峰,虞厥邦,等.一种神经网络稳健估计方法的推广性研究[J].电子科学学刊,1999,21(1):128-131.
- LIU Guangyuan, LIAO Xiaofeng, YU Juebang,et al. Study on the popularization of a robust estimation method for neural networks[J]. Journal of Electronics,1999,21 (1):128-131. (in Chinese)
- [11] 鞠初旭.模糊神经网络的研究及应用 [D]. 成都:电子科技大学, 2012.
- JU Chuxu.Research and application of fuzzy neural network [D]. Chengdu:University of Electronic Science and Technology of China, 2012. (in Chinese)
- [12] 王士同.模糊系统、模糊神经网络及应用程序设计[M].上海:上海科学技术文献出版社,1997:80-95.
- WANG Shitong.Fuzzy system,fuzzy neural network and application program design [M].Shanghai:Shanghai Scientific and Technological Literature Press,1997:80-95. (in Chinese)
- [13] 全如松.基于蒙特卡洛法计量校准不确定度评定方法的研究[D].河北保定:河北大学,2013.
- TONG Rusong.Research on the assessment method of measurement calibration uncertainty based on monte carlo method [D].Hebei Baoding:Hebei University,2013. (in Chinese)
- [14] 王圣金.基于蒙特卡洛仿真的液压系统动态可靠性研究[D].南京:东南大学,2006.
- WANG Shengjin.Research on dynamic reliability for hydraulic system based on monte carlo simulation [D].Nanjing:Southeast University, 2006. (in Chinese)
- [15] 吴方才.基于蒙特卡罗仿真和遗传算法的公差设计[D].武汉:武汉理工大学,2005.
- WU Fangcai.Tolerance design based on monte carlo simulation and genetic algorithms [D].Wuhan:Wuhan University of Technology,2005. (in Chinese)

(编辑:刘 静)