

# 动态测量系统的精度损失均匀理论的研究

刘芳芳<sup>1</sup>, 费业泰<sup>1</sup>, 蒋敏兰<sup>1,2</sup>

(1. 合肥工业大学仪器仪表学院, 安徽合肥 230009; 2. 浙江师范大学信息学院, 浙江金华 321004)

**摘要:**在全系统精度理论模型的基础上,对动态测量系统的精度损失规律进行了分析,并依据动态误差分解与溯源的结果,建立了系统非均匀性分析的定量模型,给出各单元精度损失的不均匀性和不合理性;同时,按照系统等寿命设计原则,提出了动态系统均匀损失理论模型,用于指导系统进行均匀设计,使得系统内的各组成部分能在大致相同的时间内同时失效或损坏,发挥生产资料的最大效率.这显然具有显著科学价值和实际经济意义.

**关键词:**全系统结构误差理论;精度损失;非均匀性分析;均匀损失理论

**中图分类号:**TH701      **文献标识码:**A

## Research on the theory of the accuracy loss equality of dynamic measurement system

LIU Fang-fang<sup>1</sup>, FEI Ye-tai<sup>1</sup>, JIANG Min-lan<sup>1,2</sup>

(1. School of Instrumentation, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;

2. School of Information, Zhejiang Normal University, Jinhua 321004, China)

**Abstract:** Based on the whole-system accuracy theory, the rule of accuracy loss was analyzed. The formula of inequality analysis were obtained according to the decomposition and tracing results of dynamic errors. Then, a uniform loss theory for dynamic measurement systems was put forward based on a principle of equality life design to make every error source a simultaneous loss for the maximum efficiency.

**Key words:** whole-system accuracy theory; accuracy loss; inequality analysis; loss equality theory

## 0 引言

动态测量在测量技术领域已占主导地位,应用十分广泛.但作为动态测量重要基础理论之一的动态测量精度理论还不适应动态测量技术迅速发展的形势.动态测量精度理论是动态测量理论的核心问题,它的深入研究与发展对动态测量技术发展起着至关重要的作用.

动态测量系统在实际应用中,在其整个寿命过程期间,由于外界条件的影响和内部结构的不断变化,其动态精度随时间不断损失,当该损失达到一定程度时,测量系统不再满足测量精度的要求,测量系统的寿命随之终结.此时,系统内部各个组成单元由于其材料、性质、结构、性能等不同,造成其动态精度损失的规律也不同,可能有些单元已经完全损坏报废,而有些单元损失程度却很小,仍可以继续使用,

收稿日期:2007-11-13;修回日期:2008-04-07

基金项目:国家自然科学基金(50675057),高等学校博士学科点专项科研基金(20040359011)和合肥工业大学科学研究发展基金(060101F)资助.

作者简介:刘芳芳,女,1978年生,博士/讲师.研究方向:动态精度理论及应用. E-mail:liuff7839@126.com

通讯作者:费业泰,教授. E-mail:ytfei@hfut.edu.cn

这就形成了动态测量系统的非均匀动态精度损失问题,造成较大的结构资源浪费和大量不必要的维修成本支出.因此,需对非均匀精度损失的动态测量系统进行动态精度的均匀损失理论设计(即均衡精度损失设计),以使系统内部各单元精度损失大致同时达到各自的寿命临界值,实现均匀损失设计的思想.

## 1 全系统结构的动态精度损失模型及规律

为获得系统中各单元的精度损失规律,应首先明确各单元动态误差与系统总误差之间的关系.因此,必须建立全系统结构动态误差“白化”模型:

$$e(t) = e_x(t)F(f_i) + e_1(t)F_1 + e_2(t)F_2 + \dots + e_n(t)F_n + e_y(t) \quad (1)$$

其中, $e(t)$ 为动态系统输出总误差; $e_i(t)$ 为第*i*个单元的误差; $e_x(t)$ , $e_y(t)$ 分别是输入端、输出端的误差信号; $F_i$ 为全系统结构第*i*个单元的误差传递链函数; $F(f_i)$ 为全系统的传递链函数.

对于图1中的结构,其全系统结构动态误差“白化”模型为

$$e(t) = e_x(t)f_1(f_2f_3 + f_4) + (e_1(t)f_2 + e_2(t))f_3 + e_e(t) + e_1(t)f_4 + e_4(t) + e_y(t) \quad (2)$$

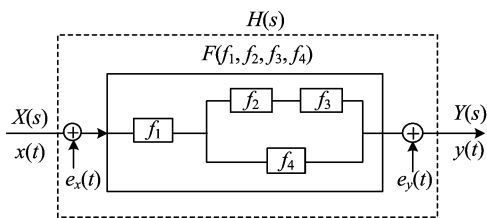


图1 混联式动态测量系统结构

Fig. 1 The framework of complex dynamic measuring system

由动态精度损失的内涵以及对系统的实验研究可知,动态系统的测量精度随着应用时间的增加将逐渐降低,从而产生动态精度损失,因此可定义精度损失函数为

$$\Delta e(t) = e(t) - e_0 \quad (3)$$

式中, $\Delta e(t)$ 为动态系统的精度损失; $e(t)$ 为动态系统的测量误差; $e_0$ 为动态系统的初始误差(即在 $t=0$ 时的动态系统测量误差).

对于各个单项母体误差源精度损失 $\Delta e_i(t)$ 也同样符合上述对精度损失函数的定义.

在详细分析研究了几套系统和装置后,我们发

现在经过早期磨合后,动态系统进入正常稳定运行阶段(使用寿命期),系统精度损失的速率较为缓慢,系统满足动态精度指标 $\delta_e$ 的要求;而随着时间样本的继续增大,系统中某些单元进入耗损期,其单元的精度损失急剧增加,它在系统总精度损失中迅速占领了主导地位,使得系统总精度损失也迅速增加,很快超出系统动态精度 $\delta_e$ 指标,导致整个系统失效,无法工作,则系统的稳定工作寿命大致等于较早进入耗损期的单元的寿命.同时,可初步推断动态系统精度损失趋势大致符合一指数规律,并且由于随机因素的存在,使得在每一个具体时刻,动态精度损失的分布又呈一正态分布规律,如图2所示.则系统的稳定工作寿命为 $t_1$ .

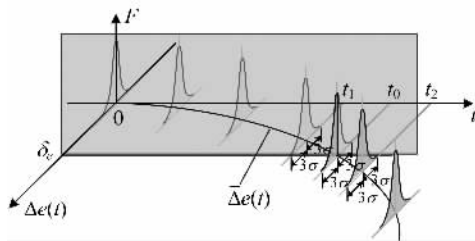


图2 动态系统精度损失趋势

Fig. 2 The accuracy loss trend in dynamic measuring system

由此可知该系统的正常使用寿命取决于系统的动态精度指标要求以及首先进入耗损期的单元的精度损失规律曲线.较早进入耗损期的单元即为系统的薄弱环节,这个薄弱环节会导致整个系统失效,此时其他的单元还处于正常寿命使用期,还未失效,这就造成了资源浪费.均匀损失理论研究的目的是建立均匀损失的理论模型,使之合理地设计各单元及系统的精度损失函数,消除或削弱薄弱环节对系统总精度损失的影响,使得总系统发生失效时,各个单元也大致同时达到各自的寿命临界值,改善系统的性能,最大程度地利用资源.

## 2 动态测量系统的均匀损失分析

衡量一个动态测量系统各个结构单元的精度损失是否均匀一致,以及如何找到系统的相对薄弱环节,应通过相应的动态测量系统均匀损失分析来进行,这是建立均匀设计模型的重要指导依据.

根据动态测量系统实际误差测量,得系统总体动态精度损失序列为 $\Delta e = [\Delta e(1), \Delta e(2), \dots,$

$\Delta e(m)$ ], 再经过误差的分解与溯源, 得到各个结构单元动态精度损失序列为

$$\begin{aligned} \Delta e_1 &= [\Delta e_1(1), \Delta e_1(2), \dots, \Delta e_1(m)], \\ \Delta e_2 &= [\Delta e_2(1), \Delta e_2(2), \dots, \Delta e_2(m)], \\ &\dots\dots\dots, \\ \Delta e_n &= [\Delta e_n(1), \Delta e_n(2), \dots, \Delta e_n(m)]. \end{aligned}$$

式中,  $1, 2, \dots, m$  为时间序列. 每个单元损失项对系统总的精度损失都有贡献, 其贡献的程度不仅与各个单元的单项精度损失量  $\Delta e_i$  有关, 还与各个单元的全系统结构误差传递链函数  $F_i$  有关. 因此, 各个单元精度损失对系统总精度损失的影响程度是该单元的单项精度损失量  $\Delta e_i$  与全系统结构误差传递链函数  $F_i$  的乘积  $\Delta e'_i = \Delta e_i \cdot F_i$  成正比,  $\Delta e'_i$  为第  $i$  单元的全系统结构的精度损失函数.

在一个动态测量系统中, 每个单元的全系统结构精度损失对系统总精度损失的影响程度可能不同, 这种不同性就反映了各单元之间精度损失的均匀性的程度. 由于绝对的均匀损失是不存在的, 可以说系统的均匀损失性是相对的, 而非均匀性却是绝对的. 因此, 在进行精度损失均匀性程度的定量分析时, 采用非均匀性程度参量来度量. 在精度损失全过程中, 第  $i$  个结构单元在第  $k$  时刻的精度损失变化微量对总精度损失变化的影响程度用  $P_i(k)$  表示, 即

$$P_i(k) = \frac{|F_i[\Delta e_i(k) - \Delta e_i(k-1)]|}{\Delta e(k-1) + |F_i[\Delta e_i(k) - \Delta e_i(k-1)]|}, \quad \left. \begin{aligned} i &= 1, \dots, n; k = 1, \dots, m \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

则第  $i$  个结构单元在精度损失全过程中对总精度损失变化的影响程度用其均值  $R_i$  表示, 即

$$R_i = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m P_i(k), \quad i = 1, \dots, n; k = 1, \dots, m \quad (5)$$

而系统的非均匀性即表征了各个单元对系统总精度损失影响程度的差异性, 这种差异性越大, 系统非均匀性程度就越大. 衡量某个系统的非均匀性程度, 应采用这个系统中各单元影响程度的最大差异值来表示. 即该系统的非均匀性程度参量  $v$  为

$$v = \frac{\max(R_i) - \min(R_i)}{\max(R_i)}, \quad i = 1, \dots, n \quad (6)$$

同时对于同类系统的不同样本, 该类系统的非均匀性程度参量又具有非唯一性, 体现了一种灰的思想, 因此这里采用灰数的概念来表征更为合理, 即

$$\otimes(v) = \otimes \left( \frac{\max(R_i) - \min(R_i)}{\max(R_i)} \right) \in [a, b], \quad \left. \begin{aligned} i &= 1, \dots, n \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

若已知动态测量系统的均匀损失目标的指标为  $\epsilon$ , 其中  $0 < \epsilon < 1$ , 其值可根据实际设计时对均匀损失的需求而定. 则

①若  $\otimes(v) > \epsilon$ , 即  $\otimes(v) \in [\epsilon, 1]$ , 则系统各个精度损失单元的精度损失情况不满足均匀损失设计要求, 认为系统是非均匀性精度损失. 此时,  $R = \max\{R_i\}$  即为系统的相对薄弱环节.

②若  $\otimes(v) \leq \epsilon$ , 即  $\otimes(v) \in [0, \epsilon]$ , 则系统各个精度损失单元的精度损失情况满足均匀损失设计要求, 认为系统是均匀性精度损失.

下面以电感式动态精度损失测量实验装置为例进行均匀损失分析, 实验系统结构简图见图 3. 实验的前 80 组原始数据  $\Delta e$  曲线及依据误差分解理论得到的 7 个单项误差源分别为铁芯长度误差  $\Delta h$ 、初级线圈长度误差  $\Delta l_1$ 、次级线圈长度误差  $\Delta l_2$ 、磁筒与铁芯直径比误差  $\Delta \epsilon$ 、偏心轮的偏心量误差  $\Delta e(t)$ 、放大电路放大倍数误差  $\Delta K$ 、由传感器动态频响引起的误差  $\Delta \delta_\omega$ , 它们的精度损失规律曲线见图 4.

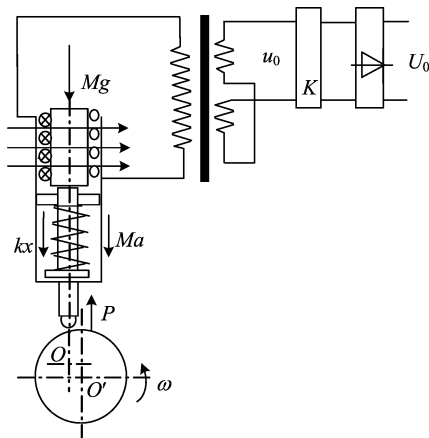


图 3 实验系统结构简图

Fig. 3 The structure diagram of experiment system

已知该系统的均匀损失指标  $\epsilon$  为 0.3, 现取前 30 组数据做精度损失的均匀性分析, 根据以上公式计算可得  $\otimes(v)_{30} = 0.61053$ , 即  $\otimes(v)_{30} \in [\epsilon, 1]$ , 则可推断该动态精度损失测量实验装置为非均匀性精度损失系统. 同时, 根据  $R = \max\{R_i\}$ , 放大电路放大倍数的损失较快, 而在总的精度损失中所占的比重也较大. 这与该系统的实际最终损失特性相吻合.

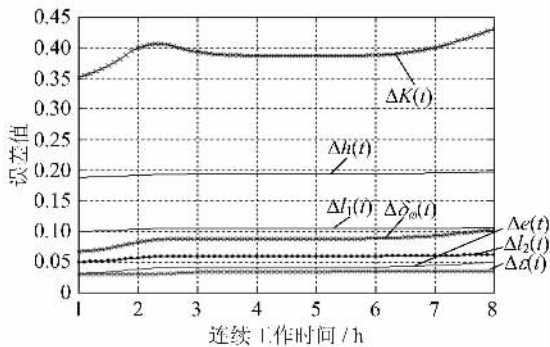


图4 各单项误差的变化曲线

Fig. 4 The trend diagram of every single error

对系统进行改进的均匀设计时,应对该相关单元进行重点设计,以减缓其精度损失速度,使系统延长达到精度指标允许值的工作时间,从而改善系统的动态特性,充分利用系统资源。

### 3 动态测量系统均匀损失设计的理论模型

对非均匀精度损失的动态测量系统进行有针对性的精度损失均匀设计时,其设计依据为上述各单元的全系统结构精度损失变化量对总精度损失的影响量  $R_i$ ,以及系统成本要求、加工工艺、实现难度等约束条件。在进行有针对性的优化或改进设计后,需对该动态系统进行再一次的精度损失均匀性分析,如果  $\otimes(v) \leq \epsilon$ ,则该设计达到均匀损失设计要求,此时系统是均匀性精度损失;若  $\otimes(v) > \epsilon$ ,则该设计未能达到均匀损失设计要求,系统仍为非均匀性精度损失,需进行进一步的改进和优化,直至  $\otimes(v) \leq \epsilon$ 。则建立系统均匀损失理论模型,其设计变量为系统各单元的精度损失量  $\Delta e_i(t)$ ,约束模型为

$$\left. \begin{aligned} \Delta e(t) |_{t=T} &= F_1 \Delta e_1(T) + F_2 \Delta e_2(T) + \dots + \\ & F_n \Delta e_n(T) \leq \delta_e \\ \otimes(v) &\leq \epsilon \\ T &\geq T_e \\ C &\leq C_e \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

其中,  $\otimes(v) \leq \epsilon$  为均匀损失的约束方程;  $\Delta e(t) |_{t=T} \leq \delta_e$  为系统动态精度指标的约束方程;  $T \geq T_e$  为系统寿命约束方程,  $T$  为该系统实际工作寿命,  $T_e$  为该系统的寿命指标要求;  $C \leq C_e$  为系统研发成本约束方程,  $C$  为该系统实际设计研制成本,  $C_e$  为该系统的成本指标要求。

在均匀损失设计过程中,在达到系统精度均匀损失目标的同时,可行的设计方案不是确定和唯一的。而对于不同的设计方案  $b_j$ ,所能完成的系统性能、寿命及成本等方面都会有所不同。究竟应采用哪种方案,对这些方案如何进行最优评价,需要根据实际要求和以下的约束模型来确定。

若系统设计需求为:在保证均匀损失和满足精度指标的前提下,要求成本最低,则系统均匀损失的约束模型为

$$\left. \begin{aligned} \Delta e(t) |_{t=T} &= F_1 \Delta e_1(T) + F_2 \Delta e_2(T) + \dots + \\ & F_n \Delta e_n(T) \leq \delta_e \\ \otimes(v) &\leq \epsilon \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

目标函数为

$$\min\{C\}, C = C_1 + C_2 + \dots + C_n \quad (10)$$

此时,可得到系统寿命为

$$T_C^* = [\Delta e(t) |_{t=T} = F_1 \Delta e_1(T) + F_2 \Delta e_2(T) + \dots + F_n \Delta e_n(T) \leq \delta_e]^{-1} \quad (11)$$

此寿命值即为成本要求最低时的系统实际寿命值。

同理,若系统设计需求为:在保证均匀损失和满足精度指标的前提下,要求寿命最长,则系统均匀损失的约束模型与上述相同,其目标函数为

$$\max\{T\}, T = [\Delta e(t) \leq \delta_e]^{-1},$$

此时,可得到系统成本为  $C_T^*$  即为寿命要求最大时的系统实际成本。

不论是上述何种情况,系统在经过均匀设计后各误差源在整个动态系统中的精度损失都具有等效性,即在系统精度损失临界时刻到来时,系统内部各单元精度损失大致同时达到各自的损失临界值,实现均匀损失的思想。

### 4 结论

本文针对实际动态系统中各单元精度损失的不均匀性和不合理性,提出了动态测量系统的均匀损失设计理论。非均匀损失一方面造成较大的结构资源浪费,另一方面还产生了大量不必要的维修成本支出。因此,对产品进行动态精度的均匀损失分析和均匀一致性设计,就可以做到使产品内的各组成部分能在大致相同的时间内同时失效或损坏,发挥生产资料的最大效率。这显然具有显著科学价值和实际经济意义。

#### 参考文献(References)

[1] B. A. 格拉诺夫斯基. 动态测量[M]. 傅烈堂,鲍建忠

- 译. 北京:中国计量出版社,1989:4-7.
- [2] Fei Ye-tai. The development and tendency of some research problems on accuracy theory [J]. China Mechanical Engineering, 2000, 11(3):255-256.  
费业泰. 精度理论若干问题的研究进展与未来[J]. 中国机械工程, 2000, 11(3):255-256.
- [3] Xu Zhen-ying, Fei Ye-tai, Chen Xiao-huai. Study and development of the theory of the accuracy of dynamic measurement [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2001, 22(4):70-71, 74.  
许桢英, 费业泰, 陈晓怀. 动态精度理论研究与发展[J]. 仪器仪表学报, 2001, 22(4):70-71, 74.
- [4] Chen Xiao-huai, Huang Qiang-xian, Fei Ye-tai. Research on the generalized dynamic measuring accuracy model and uncertainty[J]. Journal of China University of Science and Technology, 2001, 31(6):738-743.  
陈晓怀, 黄强先, 费业泰. 广义动态测量精度模型及不确定度研究[J]. 中国科学技术大学学报, 2001, 31(6):738-743.
- [5] Yu Lian-dong, Fei Ye-tai. Model analysis of dynamic measurement system of inductive displacement transducer[J]. Transactions of the China Society of Agricultural Machinery, 2004, 35(5):174-177.  
于连栋, 费业泰. 电感式位移传感器动态测试系统模型分析[J]. 农业机械学报, 2004, 35(5):174-177.
- [6] Xu Zhen-ying, Fei Ye-tai, Yu Lian-dong. Research on whitening modeling of a dynamic measuring system based on differential mutual inductive displacement transducer[C]//International Symposium on Precision Mechanical Measurements: IV. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2002: 403-408.

(上接第 413 页)

## 4 结论

本文通过对单件小批量生产模式下产品快速报价技术的研究,提出了基于产品快速设计结果的报价模型和方法,并开发出了实际应用系统. 本文方法将产品构成模块作为报价的基本单元,通过综合计算各种费用消耗确定各模块的报价,解决了单件小批量生产模式下产品快速报价问题,实现了企业信息共享与集成应用;同时基于本文建立的报价规则模型,具有良好的可维护性和伸缩性. 通过在锻压企业的应用,取得了较好的效果,使之在响应速度和对市场需求变化的适应能力方面都得到了提高.

### 参考文献(References)

- [1] 尚鋈,何建国. 单件与小批量制造模式下的信息集成系

统研究[J]. 机械, 2005, 32(增刊):128-130.

- [2] Wongvasu Naken. Methodologies for providing rapid and effective response to request for quotation (RFQ) of mass customization products [D]. Boston, Massachusetts: Northeastern University, 2001.
- [3] 唐敏,刘红平. 大规模定制环境下基于 GBOM 的精确报价实现[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2006, 29(6):158-161.
- [4] 王新,谭建荣,张树有. 大批量定制下产品快速报价响应技术研究[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2005, 17(8):1 717-1 724.
- [5] 李凡,吴斌,邓家祺,等. 需求产品报价系统的研究[J]. 中国机械工程, 2003, 14(6):497-500.
- [6] 俞铭,翟玉庆. 一种采用模糊逻辑方法的卖方报价策略[J]. 计算机工程与应用, 2004, 15:201-205.