

复杂产品质量特性波动混沌传递建模^{*}

任显林 张根保

(重庆大学 机械工程学院 重庆 400044)

摘要: 为了解决复杂产品质量系统非线性耦合状态下的质量特性波动传递与控制的不确定性问题, 指出在复杂产品质量控制中应用混沌分形动力学方法的必要性。通过分析复杂产品质量系统多尺度、多过程、非线性、耦合等特征, 以及复杂产品质量特性波动混沌演变过程, 提出质量特性波动混沌传递模式。在此基础上, 分析质量特性波动的初值敏感性、稠密性、分维性等非线性混沌特性, 进一步提出衡量复杂产品质量系统是否处于稳定控制时域或混沌控制时域的参数—质量系统结构参数这一新概念, 并给出质量系统结构参数进入混沌区域的临界点值的分析过程, 结合状态空间方程与混沌结构参数对产品质量特性波动传递建立计算模型并给出装配过程质量特性波动传递的实例建模。结合项目实施, 以零传动滚齿机装配过程质量特性波动传递为例, 对提出的理论与计算模型的有效性进行验证。

关键词: 质量控制 过程控制 混沌 状态空间方法

中图分类号: TH165.4

Chaotic Transfer Model of Quality Characteristics Variation for Complex Product

REN Xianlin ZHANG Genbao

(College of Mechanical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044)

Abstract: It is very important to implement chaotic-fractal dynamic method in the complex quality control process because there is the problem which the transfer and control of quality characteristics variation of the complex product can't be executed for uncertainty and it's high coupling in the nonlinear quality systems. According to the complex product quality system's characteristics of multi-dimensional, multi-processes, nonlinear, coupling and so on, based on the analysis of chaotic evolution process of the complex product quality characteristics variation, a chaotic transfer pattern is established. Then the chaotic characteristics of the quality characteristics variation are analyzed, such as the initial value sensitivity, density and fractal dimension, furthermore a new concept of quality system structure parameter – the parameter to determine whether the complex product quality system is in the stable control time domain or the chaos control time domain is proposed. And the deciding region of chaotic critical spot on structure parameters of complex quality system is discussed. Chaotic state-space mathematical model of quality characteristics variation transfer is conducted and a calculation model example for complex product assembly process is given. Finally, an instance related with the project on the direct-drive gear hobbing machine is given to prove that the proposal theories and model could solve quality characteristics variation transfer problem effectively.

Key words: Quality control Process control Chaotic State space methods

0 前言

质量特性波动在质量系统中的传递趋势与规律决定着产品质量系统的控制模式。复杂产品质量传

递链长, 质量特性与其影响因素关联关系复杂, 所形成的质量控制网络呈现出多维多过程多因素、动态变结构趋势。质量特性由于受各种复杂因素的制约与影响, 使质量特性的传递链呈现出非线性、复杂性和不确定性的基本特征。所以, 质量特性波动的正向追踪与逆向追溯是目前质量控制领域的难题之一。质量系统的复杂性决定了质量异常波动传递的无序与混沌, 质量问题经过多过程多次迭代演进,

^{*} 国家高技术研究发展计划(863计划, 2009AA04Z119); 国家自然科学基金资助项目(50835008); 国家“高档数控机床与基础制造装备”科技重大专项(2009ZX04014-016; 2009ZX04001-013; 2009ZX04001-023); 数字制造装备与技术国家重点实验室(华中科技大学)开放基金资助。*****收到初稿, *****收到修改稿

要准确快速定位到质量波动源显得尤为困难。因此,研究并建立面向复杂产品的质量特性传递规律以及质量特性波动传递模型极为重要。

当前,对质量特性异常波动理论及其传递规律的研究日益引起人们的广泛关注,LIN 等^[1]提出基于灰色关联分析方法解决波动过程质量特性间复杂相关关系;MYERS 等^[2]提出基于表面不相关回归的响应面方法研究质量特性波动优化设计;YANG 等^[3]给出了多元波动过程中多响应模拟算法;ELSAIE 等^[4]提出基于多元信噪比的优化方法解决质量特性波动过程的静态问题;TONG 等^[5]提出了田口质量特性参数多响应优化方法。然而上述研究大多集中在以单一信息主线研究质量特性波动,或者单一过程的质量特性集合局部优化,这些理论与方法的研究在复杂质量系统中难于剖析质量波动内在机理,同时也难于实现产品质量波动的追踪控制。对于面向复杂产品全寿命周期过程的质量特性波动传递规律的研究尚不多见。

本文围绕复杂产品质量特性波动在非线性复杂质量系统的演进与传递规律展开研究,分析了复杂产品质量特性的混沌特性以及复杂质量系统结构参数进入混沌区域的临界点,提出了质量特性波动混沌传递模式,构建了质量特性波动非线性混沌状态空间计算模型。

1 质量特性多维多过程混沌系统形成

现代生产模式映射在质量系统中,使质量系统呈现多过程、多环节、多因素、多尺度等综合特征,每个尺度下质量环节都受到人、机、料、法、测、环的综合影响。质量系统关键组分由多质量特性与多要素构成。这些组分不是孤立存在的,其内部是通过众多质量特性相互联系、相互作用构成一个微观质量域;并且组分之间多尺度下的耦合作用构成一个中观质量域;产品的质量是整个质量复杂系统各个组分耦合下的宏观整体涌现。不同尺度下的质量域具有复杂的非线性关系。质量域形态及其组合的随机性和质量域之间相互作用关系的随机性和模糊性,这使得质量特性在质量域间的传递变得复杂无序、不确定,质量特性的异常波动也具有不确定性。如图 1 所示,时间尺度下的质量特性波动,随着时间推移在产品全寿命周期各个时间阶段呈无序扩散。

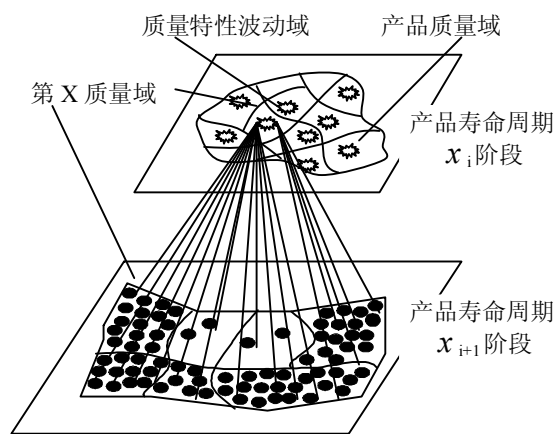


图 1 时间尺度下的质量特性波动扩散

在质量系统中,质量特性波动与产品质量环境之间的相互作用关系非常重要。通常质量特性波动的数目取决于产品复杂程度、产品全寿命周期环境、产品质量控制状态等因素。如用 t 表示时间,用 x_t 表示第 t 时间阶段的质量特性波动数,用 x_{t+1} 表示 $t+1$ 时间阶段的质量特性的波动数,则可用迭代函数

$$x_{t+1} = f(x_t, v) \quad (1)$$

式中 x_{t+1} —— $t+1$ 时间阶段的质量特性波动数

x_t —— t 时间阶段的质量特性波动数

v —— 系统的结构参数

来表示质量系统中质量特性波动在全寿命周期内的变化情况,式中 v 反映了产品质量全寿命周期环境中各种因素对质量特性波动的综合影响情况,将其定义为系统的结构参数或控制参数。实践证明,多样化的产品质量控制环境,函数 $f(x)$ 有多种表达式。其形式和参数存在差异,但通过相应的转换,都可以转换成通用的 logistic 映射^[7-13]

$$x_{t+1} = f(x_t, v) = vx_t(1 - x_t) \quad (2)$$

当质量特性从产生到进入受控状态,其所属环境及其影响因素从简单逐步向复杂演变。参数 v 从零逐渐增大,logistic 映射表现出很复杂的动态行为。当 $0 < v < 1$ 时,序列 x_t 迅速趋向不动点 $x_t \rightarrow 0$,由于 $f'(0) = v < 1$,故存在稳定的不动点,则说明质量波动数逐渐减少,最终导致质量波动消失,进入产品质量控制的理想状态。当 $1 < v \leq 3$,存在两个不动点,其中一个为 0 点, $f'(0) = v > 1$,故其是不稳定的;另外一点, $|f'(1 - \frac{1}{v})| = |2 - v| < 1$ 是稳定点,这是产品质量控制的期望状态;意味着控制参数 v 限制于 $(1, 3]$,质量特性波动从不稳定 0 点,逐步趋向稳定状态,这种情况称为周期 1 解。当 $3 < v \leq 1 + \sqrt{6}$ 时,上述稳定点变得不稳定,经过

短期迭代后, 分叉出一对新的稳定的不动点; 说明当质量特性环境变得复杂的同时, 单一控制措施与单阶段控制波动的方法, 已经不能彻底遏制波动扩散, 质量问题已经传递到下一环节, 并且有可能把波动控制在两个稳定点之间, 这种情况称为周期 2 解。随着产品质量系统复杂性增加, 控制参数 ν 逐步增大, 周期 2 的两个值也变得不稳定, 各自又产生一对新的不动点, 成为下一阶段控制的稳定状态, 成为周期 4 解。随着 ν 值不断增加, 周期解按 2^r 进行分叉, 即出现质量特性波动 2^r 次不稳定点, 同时出现 2^r 次趋向稳态。当 ν 达到极限值 $\nu_{\infty}=3.576\ 448$ 时, 系统的稳态解是 2^{∞} , 系统进入了混沌状态^[6-11]。

质量系统结构参数 ν 是随着系统复杂度的变化而变化的。复杂产品多维多过程质量特性与其影响因素的非线性、寿命周期内质量波动的随机性、质量特性初始值的敏感性等特征, 是质量特性系统进入混沌本质原因, 其决定着系统结构参数变化。质量系统结构参数 ν 的变化决定了质量系统处于周期区还是混沌区。这种现象导致未来质量控制两大发展趋势: 一是, 优化并分解产品设计制造流程, 降低质量系统结构参数, 控制质量系统进入混沌状态; 二是, 针对复杂产品的质量系统, 在通过优化系统结构无法达到有效控制质量特性波动的状态下, 采用混沌状态下的控制方法研究。

2 质量特性波动混沌特性

产品质量特性波动也伴随着产品质量特性在寿命周期过程中演化而不断分叉。质量特性细分到什么程度, 产品质量特性波动也扩散到什么程度, 并与产品设计制造过程融为一体。根据贝诺勒变换原理, 复杂产品质量特性波动扩散具有如下混沌特性^[14-16]:

(1) 初值敏感性

复杂产品质量特性波动扩散传递过程对初值敏感。这意味着产品质量波动具有很强的扩散性与不稳定性。特别是产品质量特性波动出现在产品寿命周期前期, 如果无任何约束条件, 那么其扩散程度会更大。比如在产品阶段某个质量特性或一组质量特性出现异常, 在没有及时诊断控制的情况下, 其传递深度与扩散面是很大的, 对产品后期质量保证难度与不稳定性增强。

(2) 稠密性

如果每个点 $a \in X$, 则存在于一个收敛于 a 的子序列 $\{x_n\}_{n=0}^{\infty}$ 说明, 产品质量特性波动经过多次迭

代以后, 在产品中任意一个点的小范围内, 存在有很多个质量特性异常波动, 同时存在多个产品质量缺陷源。

(3) 分维性

在无约束条件下, 复杂产品质量特性波动的混沌轨迹 $x_0, x_1, x_2, \dots, x_n, \dots$ 在相空间中无穷缠绕, 折叠和扭结, 构成了复杂层次的自相似结构。

对复杂产品质量特性波动的混沌特性的讨论, 是建立在无约束条件下的, 一种理想状态的分析。在实际中, 是不会允许质量特性波动自由扩散与传递的。产品在寿命周期过程中的设计迭代也不会进行无限多次, 但对产品寿命周期的每个主要阶段中还可能有多次的设计迭代循环。建立质量特性波动传递的实际状态空间模型对质量特性控制机理研究具有重要意义, 下面给出数学建模分析。

3 质量特性波动混沌传递模型

产品全寿命周期过程包含多阶段、多工序、多参数, 且各个阶段、各个工序、各个参数之间互相影响。存在于不同阶段、不同状态下的产品质量特性, 不仅质量特性之间存在耦合关联, 影响质量特性的因素(包括设计制造过程参数)与产品质量过程之间也存在耦合关系, 三者形成非线性耦合结构网络。质量特性波动将随着质量耦合网络进行传播, 并累积到最终产品上。从宏微观尺度看, 质量特性波动分为过程层次波动与工序层次波动。过程层次波动是指产品质量特性在寿命周期各个过程间的一系列波动传递特征, 体现产品质量异常全过程整体涌现; 工序层次波动是指产品质量特性在寿命周期各个阶段(比如设计阶段、制造阶段)中, 体现产品质量异常在每个过程的集体涌现。

状态空间分析法不仅可以描述系统的输入输出之间的关系, 而且还可以描述系统的内部特性, 特别适用于多输入多输出系统, 也适用于时变系统的数学模型非线性系统和随机控制系统, 它采用状态空间表达式作为描述系是对系统的一种完全描述^[17-20]。复杂产品质量系统是一个多输入输出的复杂系统, 为此采用状态空间分析法建立实际质量特性波动混沌分形传递模型。通过分析质量特性在质量系统中的运行状态及其变化, 建立质量特性在质量系统耦合网络中混沌分形传递规律。下面给出产品质量特性波动状态空间分析法的基本定义:

定义 1 质量特性系统状态变量 产品质量特性动态系统的状态变量是确定质量特性动态系统的

最小一组变量(称为质量特性状态变量), 如果至少需要 n 个变量 x_1, x_2, \dots, x_n 才能完全描述质量特性

动态系统的行为(即一旦给出 $t = t_0$ 时的输入量, 并

且给定 $t = t_0$ 时的初始状态, 就可以完全确定系统的未来状态), 则这个变量就是一组状态变量。

定义 2 质量特性系统状态矢量 如果完全描述质量特性系统需要 n 个状态变量, 那么这 n 个状态变量可以看作是矢量 \mathbf{X} 的 n 个分量。该矢量就称为质量特性系统的状态矢量。因此, 质量特性系统的状态矢量也是一种矢量, 一旦 $t = t_0$ 时的状态给

定, 并且给出 $t = t_0$ 时刻的输入量 $\mathbf{U}(t)$, 则任意时

间 $t \neq t_0$ 时的系统状态 $\mathbf{X}(t)$ 便可唯一地确定。

定义 3 质量特性系统状态空间 由质量特性系统状态矢量 $\mathbf{X}_1(t)$ 轴, $\mathbf{X}_2(t)$ 轴, \dots $\mathbf{X}_n(t)$ 所组成的 n 维空间称为状态空间。任何状态都可以用状态空间中的一点来表示。

定义 4 质量特性系统状态方程 用质量特性系统状态变量描述质量特性系统的动态方程。其一般形式是非线性、变系数、一阶常微分方程组

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = f_1(x_1, x_2, \dots, x_n; u_1, u_2, \dots, u_r, t) \\ \dot{x}_2 = f_2(x_1, x_2, \dots, x_n; u_1, u_2, \dots, u_r, t) \\ \vdots \\ \dot{x}_n = f_n(x_1, x_2, \dots, x_n; u_1, u_2, \dots, u_r, t) \end{cases} \quad (3)$$

式中 $x_i(t)$ ——状态变量, $i = 1, 2, \dots, n$, n 为有限正整数

$u_j(t)$ ——控制变量 $j = 1, 2, \dots, r, r \leq n$

f ——非线性函数

\dot{x}_i ——状态变量的一阶微分

t ——自变量(时间)

在产品质量特性全寿命周期过程中, 将质量特性状态节点看成是时间序列, 可视其为一维离散时变系统, 如图 2 所示。

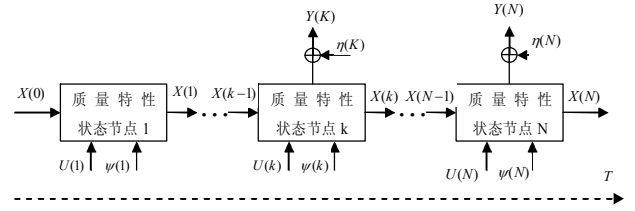


图 2 质量特性系统时间序列状态节点示意图

质量特性系统采用状态空间方程进行描述, 理想情况如式(4)所示

$$\begin{cases} \mathbf{X}^o(k) = \mathbf{A}(k)\mathbf{X}^o(k-1) & k = 1, 2, \dots, N \\ \mathbf{Y}^o(k) = \mathbf{C}(k)\mathbf{X}^o(k) & k \in \{1, 2, \dots, N\} \end{cases} \quad (4)$$

式中 $\mathbf{X}^o(k)$ ——经过状态节点 k 后生成的理想状态下的产品质量特性矢量

$\mathbf{Y}^o(k)$ ——经过状态节点 k 后生成的理想状态下的产品质量特性监测矢量

$\mathbf{A}(k)$ ——质量特性系统矩阵

$\mathbf{C}(k)$ ——质量特性监测矩阵

$\mathbf{A}(k)$ 表示不同质量特性状态节点之间的关系, 反映了产品质量特性在各状态节点间的转换情况, 当 $k = 1$ 时, $\mathbf{A}(1)$ 为单位矩阵; $\mathbf{C}(k)$ 是监测矩阵, 对应某状态节点的监测维数和所监测特性信息, 当该状态节点不进行测量时, 为零矩阵。

而实际产品质量特性控制过程中, 由于随机异常和系统不稳定因素的存在, 系统模型则如式(5)所示

$$\begin{cases} \mathbf{X}(k) = \mathbf{A}(k)\mathbf{X}(k-1) + \mathbf{B}(k)\mathbf{U}(k) + \boldsymbol{\psi}(k) \\ \mathbf{Y}(k) = \mathbf{C}(k)\mathbf{X}(k) + \boldsymbol{\eta}(k) \end{cases} \quad (5)$$

式中 $\mathbf{X}(k)$ ——实际状况下状态节点 k 后产品特征矢量

$\mathbf{Y}(k)$ ——实际状况下状态节点 k 后产品质量特性矢量

$\mathbf{U}(k)$ ——该质量特性状态节点 k 上的主要

经验波动矢量

$B(k)$ ——输入矩阵，反映状态节点 k 上因素对产品质量特性的影响

$\psi(k)$ ——产品生产噪声矢量

$\eta(k)$ ——产品监测噪声矢量

将式(4) (5)相减，则可得到产品寿命周期质量特性时间尺度上的波动传递模型，式 (6)

$$\begin{cases} \mathbf{x}(k) = \mathbf{X}(k) - \mathbf{X}^o(k) = \mathbf{A}(k)\mathbf{x}(k-1) + \mathbf{B}(k)\mathbf{U}(k) + \psi(k) \\ \mathbf{y}(k) = \mathbf{Y}(k) - \mathbf{Y}^o(k) = \mathbf{C}(k)\mathbf{x}(k) + \eta(k) \end{cases} \quad (6)$$

对于不同类型的产品质量特性系统单元，由于结构和机理的不同，模型中各符号对应的形式也不尽相同，式(4)是通用的原理性公式。下面针对具体的质量特性组合给出具体的分析过程。

4 应用实例分析

4.1 产品寿命周期装配过程质量特性波动传递分析

首先建立产品装配过程质量特性波动数学表达式

$$\mathbf{x}(k) = (x_1(k), x_2(k), \dots, x_i(k), \dots, x_{n_s}(k))^T \quad (7)$$

式中 n_s ——产品质量特性总数目

$x_i(k)$ ——表示装配状态节点 k 上被监测的质量特性 i 的质量特性波动值

装配过程的产品质量特性波动主要以产品特征尺寸及误差等具有矢量特征的质量特性组成，所以质量特性波动数学表达式为矢量结构式，具体形式如下

$$\mathbf{x}_i(k) = (\Delta Q_{ix}, \Delta Q_{iy}, \Delta Q_{iz}, \Delta \alpha_i, \Delta \beta_i, \Delta \gamma_i)^T \quad (8)$$

如果该质量特性 i 不在装配状态节点上体现，则为零矢量。另外装配过程质量特性的测量，涉及零件表面上的波动与测量点的转换，要将零件表面的波动转换到表面测量点上。当零件装配过程中质量特性由于平移或偏移而偏离正常位置产生波动的时候，如果旋转角度 ($\Delta \alpha$ 、 $\Delta \beta$ 和 $\Delta \gamma$) 很小，那么

零件表面 a 与测量点 b 之间的关系如下

$$\begin{pmatrix} \Delta X_b \\ \Delta Y_b \\ \Delta Z_b \\ \Delta \alpha_b \\ \Delta \beta_b \\ \Delta \gamma_b \end{pmatrix} = \mathbf{W}(b, a) \begin{pmatrix} \Delta X_a \\ \Delta Y_a \\ \Delta Z_a \\ \Delta \alpha_a \\ \Delta \beta_a \\ \Delta \gamma_a \end{pmatrix} \quad (9)$$

式中

$$\mathbf{W}(b, a) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & -L_x(b, a) & L_z(b, a) \\ 0 & 1 & 0 & L_x(b, a) & 0 & -L_z(b, a) \\ 0 & 0 & 1 & -L_x(b, a) & L_y(b, a) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$L_x(b, a)$ —— a 和 b 状态节点间 x 轴向位移，

$$L_x(b, a) = X_b - X_a$$

$L_y(b, a)$ —— a 和 b 状态节点间 y 轴向位移，

$$L_y(b, a) = Y_b - Y_a$$

$L_z(b, a)$ —— a 和 b 状态节点间 z 轴向位移，

$$L_z(b, a) = Z_b - Z_a$$

X_a, Y_a, Z_a ——点 a 在状态空间全局坐标系上的坐标

X_b, Y_b, Z_b ——点 b 在状态空间全局坐标系上的坐标

在装配过程中，引起质量特性波动来源的主要是夹具组合源和定位基准组合源。因此，经过装配状态节点 k 装配后的部件，其质量特性波动有三部分组成：装配状态节点 $k-1$ 传递过来的部件质量特性波动 $\mathbf{x}(k-1)$ 、装配状态节点 k 上的夹具组合源波动 $\mathbf{P}(k)$ 和从装配状态节点 $k-1$ 到装配状态节点 k 定位基准组合源波动 $\mathbf{H}(k-1)$ 。也即

$$\mathbf{x}(k) = \mathbf{x}(k-1) + \mathbf{P}(k) + \mathbf{H}(k-1) \quad (10)$$

(1) 夹具类组合波动造成的零部件质量特性整体波动 $\mathbf{P}(k)$

夹具类源波动是由夹具定位以及相关因素引起的质量特性波动。根据夹具定位原理, 定义夹具相关波动耦合点为 $G_1' \square G_6'$, 状态空间 P 点表述零件。首先选取 G_1' 作为零件与夹具之间建立联系的

$$\phi(k) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{L_x(G_1, G_2)}{L_x(G_2, G_3)} & \frac{L_x(G_1, G_2)}{L_x(G_2, G_3)} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{L_x(G_4, G_1)}{L_x(G_4, G_5)} & \frac{L_x(G_4, G_1)}{L_x(G_4, G_5)} - \frac{L_y(G_5, G_1)}{L_y(G_5, G_6)} & \frac{L_y(G_5, G_1)}{L_y(G_5, G_6)} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{L_y(G_5, G_1)} & -\frac{1}{L_y(G_5, G_1)} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{L_x(G_4, G_5)} & -\frac{1}{L_x(G_4, G_5)} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{L_x(G_2, G_3)} & \frac{1}{L_x(G_2, G_3)} & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (12)$$

由式(9) (11), 可得

$$\mathbf{P}_p(k) = \mathbf{W}(P, G_1') \Delta \mathbf{G}_1' = \mathbf{W}(P, G_1') \phi(k) \Delta \mathbf{G}_E \quad (13)$$

记 $\mathbf{M}(k) = \mathbf{W}(P, G_1') \phi(k)$, 则夹具类波动 $\Delta \mathbf{G}_E$ 与其造成零部件整体波动 $\mathbf{P}_p(k)$ 之间的关系如下

$$\mathbf{M}(k) = \begin{pmatrix} 1 & \frac{L_z(P, G_1)}{L_x(G_2, G_3)} & \frac{L_z(P, G_1)}{L_x(G_2, G_3)} & \frac{L_y(P, G_1)}{L_x(G_4, G_5)} & \frac{L_y(P, G_1)}{L_x(G_4, G_5)} & 0 \\ 0 & \frac{L_z(P, G_1) - L_x(G_1, G_2)}{L_x(G_2, G_3)} & \frac{L_x(G_1, G_2) - L_z(P, G_1)}{L_x(G_2, G_3)} & 0 & \frac{L_x(P, G_1)}{L_y(G_5, G_6)} & \frac{L_x(P, G_1)}{L_y(G_5, G_6)} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{L_y(P, G_1) - L_x(G_4, G_1)}{L_x(G_4, G_5)} & \frac{L_x(G_4, G_1) - L_y(P, G_1)}{L_x(G_4, G_5)} - \frac{L_y(G_5, G_1) + L_x(P, G_1)}{L_y(G_5, G_6)} & \frac{L_y(G_5, G_1) + L_x(P, G_1)}{L_y(G_5, G_6)} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{L_y(G_5, G_6)} & \frac{1}{L_y(G_5, G_6)} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{L_x(G_4, G_5)} & \frac{1}{L_x(G_4, G_5)} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_x(G_2, G_3)} & \frac{1}{L_x(G_2, G_3)} & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (15)$$

(2) 定位基准组合波动造成的零部件质量特性整体波动 $\mathbf{H}(k-1)$

对装配状态节点 k 来说, 定位基准组合波动造成的零部件质量特性波动主要反映前面装配状态节

关键耦合点, 其 G_1' 波动与夹具引起的波动之间的关系

$$\Delta \mathbf{G}_1' = \phi(k) \Delta \mathbf{G}_E \quad (11)$$

式中

$$\mathbf{P}_p(k) = \mathbf{M}(k) \Delta \mathbf{G}_E \quad (14)$$

式中 $\mathbf{M}(k)$ ——坐标转换矩阵

$\mathbf{M}(k)$ 将夹具组合波动转换成所定位零部件上相关质量特性的波动, 形式为

点波动的积累。假设从装配状态节点 $k-1$ 上传来的部件 P 由零件 a 和 b 组成, G_{a1}' 和 G_{b1}' 分别为装配状态节点 $k-1$ 上零件 a 和 b 各自与其定位点 G_1' 有

耦合作用点，根据其几何关系得

$$\mathbf{H}_p(k-1) = (\mathbf{N}(k)\mathbf{D}(k)) \begin{pmatrix} G_{a1}' \\ G_{b1}' \end{pmatrix} \quad (16)$$

式中

$$\mathbf{N}(k) = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{L_y(G_{a1}', G_{b1}')} \mathbf{O}_{6 \times 3} \\ 0 & -\frac{1}{L_x(G_{a1}', G_{b1}')} & 0 \\ -\frac{1}{L_z(G_{a1}', G_{b1}')} & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{D}(k) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ \mathbf{O}_{6 \times 3} & 0 & \frac{1}{L_y(G_{a1}', G_{b1}')} \\ 0 & \frac{1}{L_x(G_{a1}', G_{b1}')} & 0 \\ \frac{1}{L_z(G_{a1}', G_{b1}')} & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

根据以上对装配过程质量特性主要波动源影响的分析，可得到式(6)中质量特性时间尺度上的波动传递状态方程的各项具体结构。首先 $\mathbf{A}(k)$ 为 $6n \times 6n$ 维矩阵，具体如下

$$\mathbf{A}(k) = \mathbf{I}_{6n \times 6n} + \begin{pmatrix} \mathbf{N}(k)\mathbf{D}(k)_{6i \times 6i} & \mathbf{O}_{6i \times 6(n-i)} \\ \mathbf{O}_{6(n-i) \times 6i} & \mathbf{O}_{6(n-i) \times 6(n-i)} \end{pmatrix}_{6n \times 6n} \quad (17)$$

输入（控制）矩阵 $\mathbf{B}(k)$ 为 $6n \times 6x$ 维矩阵，其中 x 为装配状态节点 k 上夹具的数目，形式如下

$$\mathbf{B}(k) = \begin{pmatrix} \mathbf{M}_{p_1, G_{E1}}(k) & \cdots & \mathbf{O}_{6 \times 6} & \cdots & \mathbf{O}_{6 \times 6} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \mathbf{M}_{p_i, G_{E1}}(k) & \cdots & \mathbf{O}_{6 \times 6} & \cdots & \mathbf{O}_{6 \times 6} \\ \mathbf{O}_{6 \times 6} & \cdots & \mathbf{M}_{p_{i+1}, G_{E1}}(k) & \cdots & \mathbf{O}_{6 \times 6} \\ \vdots & & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{O}_{6 \times 6} & \cdots & \mathbf{O}_{6 \times 6} & \cdots & \mathbf{M}_{p_{i+x-1}, G_{E1}}(k) \\ & & \mathbf{O}_{6(n-i-x+1) \times 6n} & & \end{pmatrix}_{6n \times 6x} \quad (18)$$

$\mathbf{U}(k)$ 能够被表示为

$$\mathbf{U}(k) = (\Delta \mathbf{G}_{E1}, \cdots \Delta \mathbf{G}_{Ej} \cdots \Delta \mathbf{G}_{Ex})^T \quad (19)$$

式中 x —— 装配状态节点 k 上被装配的零部件质量特性数目

监测矩阵 $\mathbf{C}(k)$ 为

$$C(k) = \text{diag}(C_1(k), \dots, C_i(k), \dots, C_n(k)) \quad (20)$$

式中 $C_i(k)$ —— $3 \times (6 + m)$ 块矩阵

当第 i 个装配表面上没有测量点时为零矩阵，反之形式如下

$$C_i(k) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & -L_y(M_i, P_i) & L_z(M_i, P_i) \\ 0 & 1 & 0 & L_x(M_i, P_i) & 0 & -L_z(M_i, P_i) \\ 0 & 0 & 1 & -L_x(M_i, P_i) & L_y(M_i, P_i) & 0 \end{pmatrix} Q_{3 \times m} \quad (21)$$

式中 M_i —— 测量点

P_i —— 质量特性第 i 个表面的点

在实际测量中通常要对装配过程质量特性在某个面上进行多点测量，则可通过对监测矩阵增加相对应的块矩阵以满足要求，块矩阵结构如式(21)。

$\eta(k)$ 为表示监测噪声的白噪声，各测量点互相独立，根据测量工具的精度作相应估计。

4.2 零传动滚齿机装配过程关键质量特性波动传递分析

基于零传动原理的数控滚齿机是用传动功能部件取代了“电动机—中间传动环节—主轴”环节，中间传动环节的取消，最大限度地减小了传动误差，使得机床整体精度质量特性的控制，从宏观的角度看，集中在几个装配单元体上。将机床系统对应的单元体分为两个分支：床身 B1、工件主轴 B2、工件 B3 为一支；床身 B1、进给拖板 B8、立柱 B9、滚刀架转盘 B7、滚刀架 B6、刀具主轴部件 B4 和刀具 B5 为另一分支。其三维图与工程误差模型结构图见图 3、图 4。根据多体系统理论建立滚齿机的拓扑结构如图 4 所示。

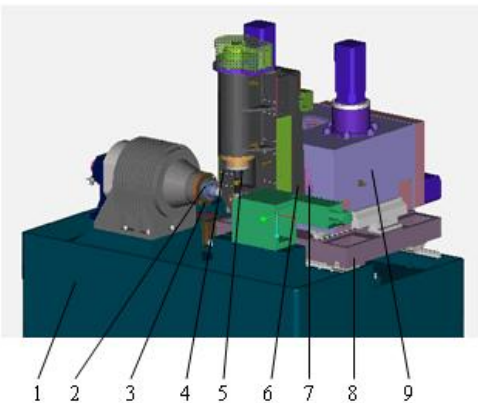


图 3 零传动滚齿机三维图

1. 床身 2. 工件 3. 工件主轴 4. 刀具主轴 5. 刀具
6. 滚刀架 7. 滚刀架转盘 8. 进给拖板 9. 立柱

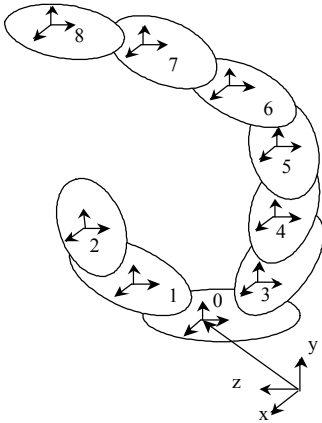


图 4 零传动滚齿机的拓扑结构

根据以上零传动滚齿机的拓扑结构描述，得到 YK3610 的低序体阵列如表 1 所示，表 2 给出了该样机各部件之间的自由度。其中 x 、 y 、 z 、 α 、 β 、 γ 分别代表沿 x 、 y 、 z 轴的移动和绕 x 、 y 、 z 轴的转动，“0”表示不能自由运动，“1”表示能自由运动。

表 1 零传动滚齿机低序体阵列

典型体 K	1	2	3	4	5	6	7	8
L0(K)	1	2	3	4	5	6	7	8
L1(K)	0	1	0	3	4	5	6	7
L2(K)	0	0	0	0	3	4	5	6
L3(K)	0	0	0	0	0	3	4	5
L4(K)	0	0	0	0	0	0	3	4
L5(K)	0	0	0	0	0	0	0	3
L6(K)	0	0	0	0	0	0	0	0

表 2 零传动滚齿机各部件之间的自由度

相邻体	量纲—自由度					
	x 轴	y 轴	z 轴	x 轴 旋转 α	y 轴 旋转 β	z 轴 旋转 γ
0—1	0	0	0	0	0	1
1—2	0	0	0	0	0	0
0—3	0	0	1	0	0	0
3—4	1	0	0	0	0	0
4—5	0	0	0	1	0	0
5—6	0	1	0	0	0	0
6—7	0	0	0	0	1	0
7—8	0	0	0	0	0	0

装配过程关键质量特性波动传递模型验证步骤如下：

(1) 按照上节公式确定装配过程模型及 YK3610 低序列阵体，如图 3、图 4 与表 1。

根据笛卡尔坐标体系原则建立零部件坐标系，以

床身 B0 中心点为原点, 确定各部件装配过程关键测试点坐标。零部件坐标体系选择的不同不会影响最终结果。

(2) 装配过程系统噪声的确定与关键质量特性波动传递模型的建立

首先对装配工具进行多次测量, 确定他们的可重复度。正常条件下, 装配过程只存在自然波动, 因此各部件装配设备噪声服从均值为零的正态分布, 其标准差为各自对应的可重复度。根据坐标间关系确定 ΔG_E 、 $M(k)$ 、 $N(k)$ 、 $D(k)$ 、 $C(k)$ 。

表 3 装配部件间噪声

相邻体	量纲一夹具噪声 f	量纲一定位噪声 l
0-1	0.001	0.001
1-2	0.01	0.01
0-3	0.001	0.01
3-4	0.001	0.001
4-5	0.01	0.001
5-6	0.001	0.001
6-7	0.01	0.01
7-8	0.001	0.001

根据上述数据并结合式(10)、式(14)、式(16)、式(19)、式(20)建立 YK3610 滚齿机质量特性波动传递模型。

(3) 模型仿真结果

用 Matlab 对上一步建立的质量特性波动传递模型进行仿真。首先通过三坐标测量机获取各部件关键质量特性值。然后采用质量特性波动传递模型分别仿真, 最后将实际生产与仿真数据比较。以滚刀主轴定位面异常导致整体装配精度的波动为例, 归一化处理 x 、 y 轴, 验证模型的有效性, 如图 5 所示。

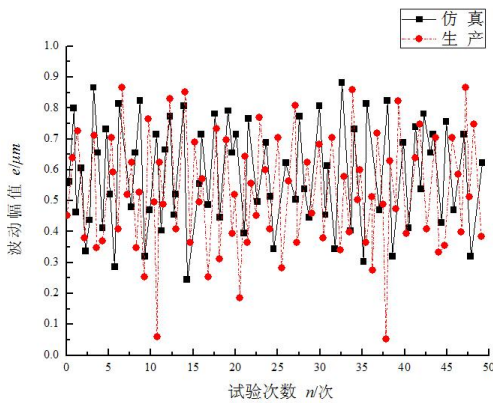


图 5 滚齿机滚刀主轴定位面导致装配精度波动

由图可知, 在正常情况下, 由滚刀主轴定位面引起的装配精度波动其模型仿真得到的数据与实际

测量的数据之间存在很小的差异。当生产过程中出现特殊异常时, 波动传递模型也能及时表现出来, 并且反映了质量特性在零部件装配过程中的传递。从而说明提出的质量特性波动传递模型是可行有效的。

5 结论

(1) 以复杂产品质量特性为研究对象, 从产品质量特性关联关系与系统结构等角度出发, 在分析复杂产品质量特性多维多过程非线性关系的基础上, 发展了一种关于质量特性与影响因素混沌传递的质量系统建模方法, 并解析了复杂产品质量特性系统混沌特性。

(2) 建立起产品质量特性波动混沌传递状态空间计算模型, 解决了产品质量特性波动过程中传递与波动源关联问题, 结合零传动滚齿机装配过程关键质量特性波动传递建模中的应用, 说明该所阐述理论与模型的有效性。这对在产品质量特性混沌分形机理的基础上, 研究质量系统混沌状态的控制方法具有一定的参考价值。

参 考 文 献

- [1] LIN C L, LIN J L, KO T C. Optimisation of the edm process based on the orthogonal array with fuzzy logic and grey relational analysis method [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2002, 19(4): 271-277.
- [2] MYERS R H, KHURI A I, VINING G G. Response surface alternatives to the Taguchi's robust parameter design approach [J]. American Statistician, 1992, 46(2): 131-139.
- [3] YANG Taho, KUO Yiyo, CHOU Pohung. Solving a multiresponse simulation problem using a dual-response system and scatter search method [J]. Simulation Modelling Practice and Theory, 2005, 13(4): 356-369.
- [4] ELSAYED E A, CHEN A. Optimal levels of process parameters for products with multiple characteristics [J]. International Journal of Production Research, 1993, 31(5): 1117-1132.
- [5] TONG L I, SU C T, WANG C H. The optimization of multi-response problems in the Taguchi method [J]. International Journal of quality & reliability management, 1997, 14(4): 367-380.
- [6] KOKAI G, TOTTH Z, VANYI R. Evolving artificial trees described by parametric L-systems[C]// IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering

-
- 'Engineering Solutions for the Next Millennium', May 9-12, 1999, Alberta, Canada. 1999: 1722-1727.
- [7] 吴光强, 盛云混. 沌理论在汽车非线性系统中的应用进展[J]. 机械工程学报, 2010, 46(10): 81-87.
- WU Guangqiang, SHENG Yunhun. Review on the application of chaos theory in automobile nonlinear system[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(10): 81-87.
- [8] 郜志英, 沈允文, 董海军, 等. 齿轮系统倍周期分岔和混沌层次结构的研究[J]. 机械工程学报, 2005, 41(04): 44-48.
- GAO Zhiying, SHEN Yunwen, DONG Haijun, et al. Research on period-doubling bifurcation and chaos hierarchy in gear system [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2005, 41(04): 44-48.
- [9] KUGIUMTZIS D. State space reconstruction parameters in the analysis of chaotic time series - the role of the time window length [J]. Physica D: Nonlinear Phenomena, 1996, 114(01): 95-96.
- [10] 辛厚文. 分形理论及其应用[M]. 合肥: 中国科技大学出版社, 1999.
- XIN Houwen. Theory of fractal and its application [M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 1999.
- [11] 石博强, 申众华. 机械故障诊断的分形方法: 理论与实践[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2002.
- SHI Boqiang, SHEN, Zonghua. Fractal method of mechanical fault diagnosis: Theory and Method [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2002.
- [12] WIKLANDER K, HOLM S. Dispersion effects in unreplicated factorial designs [J]. Applied Stochastic Models in Business and Industry, 2003, 19(01): 13-30.
- [13] JIN Jionghua, SHI Jianjun. State space modeling of sheet metal assembly for dimensional control [J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 1999, 121(7): 756-762.
- [14] DANIEL Y, FONG T, LAWLESS J F. The analysis of process variation transmission with multivariate measurements [J]. Statistica Sinica, 1998, 46(8): 151-164.
- [15] LAWLESS J F, MACKAY R J, ROBINSON J A. Analysis of variation transmission in manufacturing processes-part I[J]. Journal of Quality Technology, 1999, 31(2): 131-142.
- [16] AGRAWAL R, LAWLESS J F, MACKAY R J. Analysis of variation transmission in manufacturing processes-part II[J]. Journal of Quality Technology, 1999, 31(2): 143-154.
- [17] DING Yu, CEGLAREK D, SHI Jianjun. Design evaluation of multi-station assembly process by using state space approach [J]. Journal of Mechanical Design, 2002, 124(3): 408-418.
- [18] 涂麟生, 董达生, 杨永. 多变量线性控制系统(状态空间方法)[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1988.
- TU Qisheng, DONG Dasheng, YANG Yong. Multivariable linear control system: state space method [M]. Beijing: Coal Industry Press, 1988.
- [19] Zhang G. Simultaneous tolerancing for design and manufacturing [J]. International Journal of Production Research, 1996, 34(12): 3361-3382.
- [20] REYNOLDS J, MARION R. Multivariate control charts for monitoring the mean vector and covariance matrix [J]. Journal of Quality Technology, 2004, 38(3): 230-253.
-
- 作者简介: 任显林(通信作者), 男, 1978 年出生, 博士研究生, 主要研究方向为质量与可靠性工程、先进制造技术。
- E-mail: renxianlin0@163.com
- 张根保, 男, 1953 年出生, 教授、博士研究生导师, 主要研究方向为现代质量工程、先进制造技术、可重构制造装备和企业信息化等;