

## 基于灰关系的制造过程稳定性评估

夏新涛, 秦园园, 邱明

(河南科技大学 机电工程学院, 河南 洛阳 471003)

**摘 要:** 基于灰色系统理论,通过对制造过程中的两个数据序列进行灰关系分析,实现了制造系统的稳定性评估.根据获取制造过程某属性的两个数据序列,对数据序列进行排序,得到排序数据图.按照排序数据图的分布特征,建立两个数据系列之间的灰关系,通过计算分析灰置信水平的大小,实现对制造过程的稳定性评估.计算机仿真试验和实际案例表明:通过对两个数据序列的灰关系分析,若求得的灰置信水平不小于 90%,则说明该制造系统是稳定的;否则是不稳定的.所提出的方法可以很好地检测制造系统的稳定性,准确率最高可以达到 100%.

**关键词:** 推进系统; 产品质量; 制造过程; 稳定性; 灰关系

中图分类号: V23; TH161<sup>+</sup>.1

文献标志码: A

## Evaluation for stability of manufacturing process based on grey relation

XIA Xin-tao, QIN Yuan-yuan, QIU Ming

(School of Mechatronics Engineering,

Henan University of Science and Technology, Luoyang Henan 471003, China)

**Abstract:** Based on the grey system theory, the stability evaluation of manufacturing system could be put into effect via grey relation analysis of the two data series in the manufacturing process. According to these two data sequences obtained in the manufacturing process with certain property, the data series could be sorted, so the sorting data figure was achieved. The grey relation between two data series was established by means of the distribution features of sorting data figure. And the stability evaluation of manufacturing process can be realized through calculation and analysis of the grey confidence level. Computer simulation experiment and actual case indicate that through analyzing the grey relation of two data series, if the grey confidence level is not less than 90%, the manufacturing system is stable; otherwise, the manufacturing system is not stable. The method proposed is very good at testing the stability of the manufacturing system, with accuracy up to 100%.

**Key words:** propulsion system; product quality; manufacturing process; stability; grey relation

推进系统产品零部件质量的不确定性对航空航天系统运行的性能寿命及其可靠性有重要影响<sup>[1-4]</sup>,因此,学术界与工程界都非常关注产品零部件的制造质量控制问题<sup>[5-6]</sup>.根据机械制造理论,应当对制造系统的过程稳定性实时评估与预

测,以便及时发现制造过程的不稳定因素,尽早采取措施,满足质量要求<sup>[7-9]</sup>.从现有文献看,对制造过程的稳定性分析,大都采用传统的统计方法,假设制造系统产生的误差服从正态分布<sup>[10-11]</sup>.但是,一般的制造过程具有更复杂的属性<sup>[12]</sup>,如非正态

收稿日期:2014-06-09

基金项目:国家自然科学基金(51475144,51075123);河南省高校科技创新团队支持计划(13IRTSTHN025)

作者简介:夏新涛(1957-),男,湖南衡东人,教授、博士生导师,博士,主要从事滚动轴承性能可靠性与信息处理等方面的研究.

E-mail:xiact1957@163.com

分布、一种典型或非典型的分布以及未知属性等系统. 如果再用传统的统计方法分析系统属性的稳定性是不可靠的.

近年来, 乏信息系统理论研究成为信息科学和系统科学领域的热点问题. 乏信息又称贫信息, 是指信息缺乏或严重缺乏. 乏信息系统被描述为信息不完备的不确定性系统, 有时还有数据残缺等. 邓聚龙提出的灰色系统理论<sup>[13]</sup>, 用灰关联度的概念可以描述多个系统属性之间的相对关系问题. 但是, 在研究系统属性之间的相对关系时, 要求建立至少 3 个系统, 才能分析系统之间的相对灰关系. 目前, 运用灰色系统理论中的灰关系概念对系统进行分析已经取得了很大的进展<sup>[14-18]</sup>.

本文运用灰关系概念, 基于两个数据序列之间的系统属性, 对制造过程稳定性进行分析, 对制造过程的概率分布没有特别要求. 通过对数据序列排序, 得到排序数据图, 提取数据序列的分布特征, 从而建立两个数据序列之间系统属性的灰关系, 进而实施制造过程的稳定性评估. 研究的目的是实现制造系统的稳定运行, 改善产品质量的不确定性, 提高产品质量水平.

### 1 制造过程的排序数据序列

设具有某特定属性的本征数据序列  $X_1$  为  $X_1 = [x_1(1), x_1(2), \dots, x_1(k), \dots, x_1(K)]$  (1) 式中  $x_1(k)$  为  $X_1$  的第  $k$  个数据;  $k=1, 2, \dots, K$ ;  $K$  为数据个数.

在制造过程中, 按加工顺序获得被加工工件的某质量参数的数据序列  $X$

$$X = [x_1, x_2, \dots, x_t, \dots, x_T] \quad (2)$$

式中  $x_t$  为第  $t$  个数据;  $t=1, 2, \dots, T$ ;  $T$  为  $X$  的数据个数,  $T > K$ .

为了分析制造过程的稳定性, 从  $X$  中依次抽取  $K$  个数据, 构成评估数据序列  $X_j$

$$X_j = [x_j(1), x_j(2), \dots, x_j(k), \dots, x_j(K)] \quad (3)$$

式中  $X_j$  也称为制造系统的  $j$  属性因素,  $j \geq 2$ ;  $x_j(k)$  为  $X_j$  的第  $k$  个数据;  $k=1, 2, \dots, K$ .

分别对数据序列  $X_1$  和  $X_j$  中的数据从小到大排序, 得到排序数据序列  $Y_1$  和  $Y_j$

$$Y_1 = [y_1(1), y_1(2), \dots, y_1(k), \dots, y_1(K)] \quad (4)$$

$$Y_j = [y_j(1), y_j(2), \dots, y_j(k), \dots, y_j(K)] \quad (5)$$

式中  $Y_1$  为  $X_1$  的排序数据序列;  $Y_j$  为  $X_j$  的排序数据序列.

基于灰关系概念, 对两个排序数据序列之间

的系统属性特性进行分析, 可以实时进行制造过程的稳定性评估.

### 2 两个排序数据序列的灰关系

根据灰关系概念<sup>[14-15]</sup>, 系统属性是系统内在的某种规律或特性. 系统属性可以用某种映射表示, 称为系统属性的描述. 系统属性可以用数据描述, 称这些数据为系统属性参数或系统属性数据.

通过对数据序列排序, 可以得到排序数据图, 从中可以得到数据序列的分布特征, 进而建立两个数据序列之间属性的灰关系.

设获得制造系统某属性的两个排序数据序列  $Y_1$  和  $Y_j$ , 其元素分别为  $y_1(k)$  和  $y_j(k)$ ,  $k=1, 2, \dots, K$ . 设

$$\bar{y}_h = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K y_h(k) \quad h \in (1, j) \quad (6)$$

令

$$s_h(k) = y_h(k) - \bar{y}_h \quad (7)$$

对式(7)进行归一化处理

$$z_h(k) = \frac{s_h(k) - s_{h,\min}}{s_{h,\max} - s_{h,\min}} \quad (8)$$

其中

$$s_{h,\min} = \min_k s_h(k) = s_h(1)$$

$$s_{h,\max} = \max_k s_h(k) = s_h(n) \quad (9)$$

称

$$Z_h = [z_h(k) | k=1, 2, \dots, K] \quad h \in (1, j) \quad (10)$$

为  $Y_h$  的规范化排序序列.

对于规范化排序序列  $Z_h$ , 有

$$z_h(k) \in [0, 1] \quad z_h(1) = 0 \quad z_h(n) = 1 \quad (11)$$

在最少量信息原理下, 对于任意的  $k=1, 2, \dots, K$ , 若  $Z_h$  是规范化排序序列, 则参考序列  $Z_0$  的元素可以为常数 0, 即

$$z_0(k) = z_0 = z_i(1) = 0 \quad (12)$$

定义灰关联度

$$\gamma_{0h} = \gamma(Z_0, Z_h) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \gamma[z_0(k), z_h(k)] \quad (13)$$

取分辨系数  $\xi \in (0, 1]$ , 得到灰关联系数的表达式

$$\gamma[z_0(k), z_h(k)] = \frac{\xi}{\Delta_{0h}(k) + \xi} \quad k=1, 2, \dots, K \quad (14)$$

灰差异信息为

$$\Delta_{0h}(k) = |z_h(k) - z_0(k)| \quad (15)$$

定义两个数据序列  $X_i$  和  $X_j$  之间的灰差为

$$d_{ij} = |\gamma_{0i} - \gamma_{0j}| \quad (16)$$

已知灰差  $d_{ij}$ , 称

$$r_{ij} = 1 - d_{ij} \quad (17)$$

为数据序列  $X_i$  和  $X_j$  之间的基于灰关联度的相似系数, 简称灰相似系数. 称

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{1j} \\ r_{j1} & r_{jj} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & r_{1j} \\ r_{j1} & 1 \end{bmatrix} \quad (18)$$

为灰相似矩阵, 又称为灰关系属性, 简称灰关系, 且有  $0 \leq r_{ij} \leq 1$ .

给定  $X_i, X_j$ , 对于  $\xi \in (0, 1]$ , 总存在唯一的一个实数  $d_{\max} = d_{1j\max}$ , 使得  $d_{ij} \leq d_{\max}$ , 称  $d_{\max}$  为最大灰差, 相应的  $\xi$  称为基于最大灰差的最优分辨系数.

定义基于两个数据序列  $X_i$  和  $X_j$  之间灰关系的属性权重为

$$f_{ij} = \begin{cases} 1 - d_{\max}/\eta & d_{\max} \in [0, \eta] \\ 0 & d_{\max} \in [\eta, 1] \end{cases} \quad (19)$$

式中  $f_{ij} \in [0, 1]$  为属性权重,  $\eta \in [0, 1]$  为  $\eta$  参数.

根据灰色系统理论的白化原理与对称原理, 若没有理由否认  $\lambda$  为真元, 则在给定的准则下, 默认  $\lambda$  为真元的代表. 在给定  $X_i$  和  $X_j$ , 取参数  $\lambda \in [0, 1]$  为水平, 若存在一个映射  $f_{ij} \geq \lambda$ , 则  $X_i$  和  $X_j$  具有相同的属性. 这里, 取  $f_{ij} = \lambda = 0.5$ , 认为  $X_i$  和  $X_j$  具有相同的属性.

设  $\eta \in [0, 0.5]$ , 由式(19)得

$$d_{\max} = (1 - f_{ij})\eta \quad (20)$$

称

$$P_{ij} = 1 - (1 - \lambda)\eta = (1 - 0.5\eta) \times 100\% \quad (21)$$

为灰置信水平, 又称为灰理论概率. 灰置信水平描述了  $X_i$  和  $X_j$  的属性相同的可信度.  $\eta$  可以由式(20)求得.

### 3 制造过程稳定性评估方法

对于一个具有某特定属性的制造系统而言, 在正常的制造过程中, 系统属性不会发生变化, 或者说, 产品的某个质量参数(例如尺寸误差、圆度、表面粗糙度等)被认为是一个随机变量, 属于某个特定的理想分布并具有理想特征值(例如, 正态分布的特征值是数学期望  $E$  与标准差  $\sigma$ ; 瑞利分布的特征值是标准差  $\sigma$ ; 均匀分布的特征值是取值的下限值  $a$  与上限值  $b$  等), 随着加工时间的推移, 由于制造过程的不确定性, 会有各种扰动出

现, 导致质量参数的分布偏离理想分布与特征值(即系统属性发生变化). 这是制造过程不稳定的一个特征表现.

从灰关系概念讲, 若评估数据序列  $X_j$  与本征数据序列  $X_i$  之间的关系越紧密, 则灰置信水平取值就越大, 制造过程就越稳定; 反之, 灰置信水平取值就越小, 制造过程就越不稳定.  $X_j$  与  $X_i$  之间的关系紧密性, 在排序图上表现为:  $X_j$  中是否包含有显著大于或显著小于  $X_i$  中的对应数据, 或者从整体趋势上是否有显著异于  $X_i$  的分布趋势. 如果  $X_j$  的排序图中包含有显著大于或显著小于  $X_i$  的排序图的对应数据, 或者从整体趋势上是有显著异于  $X_i$  的排序图的分布趋势. 则灰置信水平取值就较小, 表明此时的制造过程是不稳定的; 反之, 如果  $X_j$  的排序图和  $X_i$  的排序图的趋势一样, 对应的数据也相差不大. 则灰置信水平取值就较大, 表明此时的制造过程是稳定的. 这就揭示了两个数据序列的排序特征与制造过程稳定性之间的本质关系. 具体实施时, 可取  $f_{ij} = 0.5$ , 通过计算灰置信水平, 来评估与预测制造过程是否稳定. 若灰置信水平不小于 90%, 则认为制造过程是稳定的; 否则, 是不稳定的.

对于稳定的制造过程, 可以保持现状, 继续生产; 对于不稳定的制造系统, 必须停止生产, 发现原因, 进行维修, 重新调整后再继续生产.

在制造过程稳定性的实际评估中, 本征数据序列  $X_i$  应满足正常条件下的分布特征. 为此, 必须注重产品正式生产前制造系统的调整过程.

在调整制造系统时, 试加工  $K$  个工件, 获得将评估的质量参数的  $K$  个数据, 使得这  $K$  个数据满足理想特征值, 并将这  $K$  个数据作为本征数据序列  $X_i$ . 若制造过程的理想分布已知, 且约定好理想特征参数值, 则可以用蒙特卡洛方法模拟本征数据序列  $X_i$ . 在这种情况下, 将调整过程中以及随后的正式生产中获得的数据都作为评估数据序列中的数据而实施制造过程的稳定性评估.

在随后的正式生产中, 根据质量监控的需要, 随时采集数据, 按一定的时间间隔构成连续的评估数据序列  $X_j$ . 这样, 通过  $X_j$  与  $X_i$  之间的灰关系变化情况来评估制造过程的稳定性.

## 4 仿真试验与实际案例

### 4.1 正态分布

在制造过程中, 会有各种特征的误差出现, 必须进行计算机仿真. 由于误差的种类较多, 这里以

正态分布为例,以灰关系为依据,研究制造过程中的稳定性问题.

用计算机仿真一个数学期望  $E=0$  和标准差  $\sigma=0.01$  的服从正态分布的数据序列,共有 60 个数据.

在本仿真试验中,模拟一个制造过程的输出

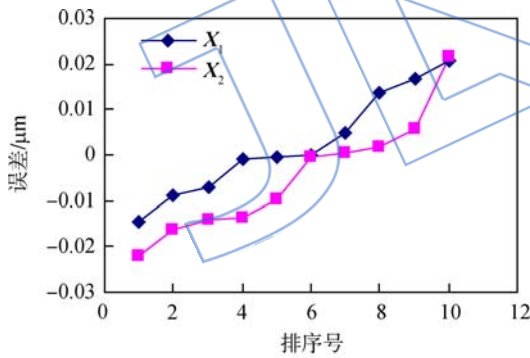
$$\begin{aligned}
\mathbf{X}_1 &= [-0.0006 \quad 0.00501 \quad 0.01388 \quad -0.00702 \quad -0.01466 \quad 0.02095 \\
&\quad -0.00019 \quad -0.00108 \quad -0.00872 \quad 0.01689] \\
\mathbf{X}_2 &= [0.00575 \quad -0.02214 \quad -0.00978 \quad -0.01417 \quad 0.02168 \quad -0.01621 \\
&\quad -0.01385 \quad 0.00176 \quad 0.00062 \quad -0.00027] \\
\mathbf{X}_3 &= [0.00209 \quad 0.0177 \quad 0.01656 \quad -0.00133 \quad 0.02103 \quad 0.00664 \\
&\quad 0.0025 \quad -0.01539 \quad 0.01697 \quad -0.00742] \\
\mathbf{X}_4 &= [0.01144 \quad 0.00054 \quad -0.0071 \quad -0.01149 \quad -0.01263 \quad 0.02648 \\
&\quad 0.00184 \quad -0.00255 \quad -0.01669 \quad -0.00458] \\
\mathbf{X}_5 &= [-0.00222 \quad -0.00661 \quad 0.01225 \quad -0.00864 \quad -0.00629 \quad -0.01068 \\
&\quad 0.00819 \quad -0.00271 \quad 0.00266 \quad -0.02173] \\
\mathbf{X}_6 &= [0.00412 \quad -0.00377 \quad 0.01859 \quad -0.0058 \quad 0.01306 \quad -0.01783 \\
&\quad 0.00453 \quad 0.00014 \quad 0.009 \quad 0.0081]
\end{aligned}$$

以第 1 个数据序列为本征序列,研究剩余数据序列与第 1 个数据序列的灰关系. 排序数据图如图 1 所示.

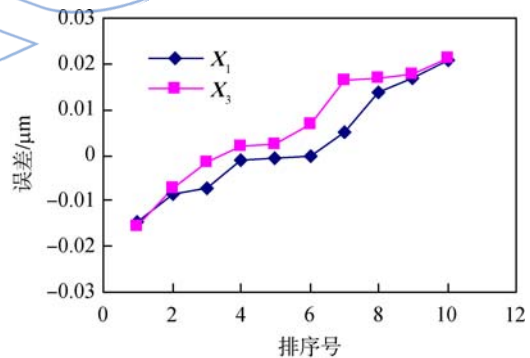
属于正态分布,即假设某产品质量参数随机变量的理想分布是正态分布,因此,事实是,该制造过程是稳定的. 下面评估该制造过程是否稳定,以检验本文提出方法的正确性.

将样本含量分 6 组,  $\mathbf{X}_1 \sim \mathbf{X}_6$ , 每个序列有 10 个数据,即

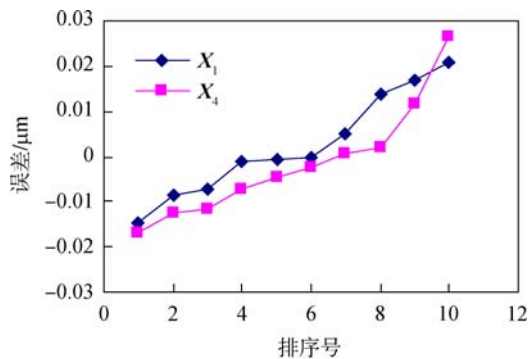
取属性权重  $f_{1j}=0.5$ , 计算灰置信水平  $P_{1j}$ , 结果如表 1 所示.



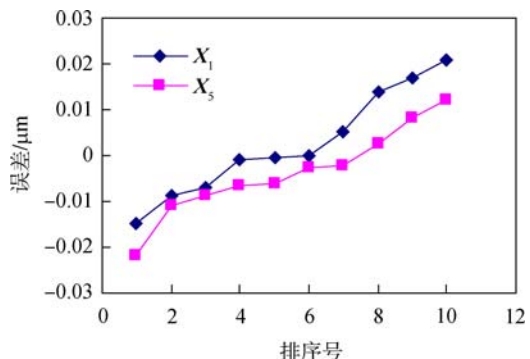
(a)  $X_1$ 和 $X_2$ 的排序数据图



(b)  $X_1$ 和 $X_3$ 的排序数据图

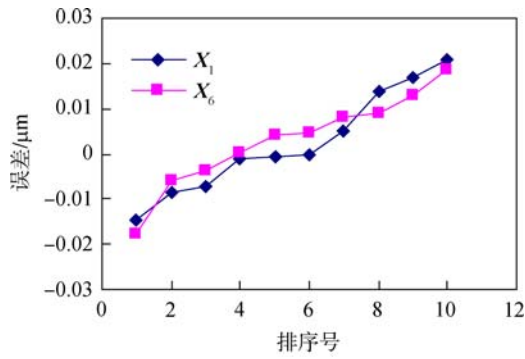


(c)  $X_1$ 和 $X_4$ 的排序数据图



(d)  $X_1$ 和 $X_5$ 的排序数据图





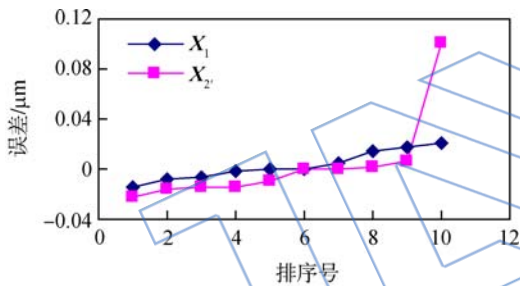
(c)  $X_1$ 和 $X_6$ 的排序数据图

图1 仿真排序数据图

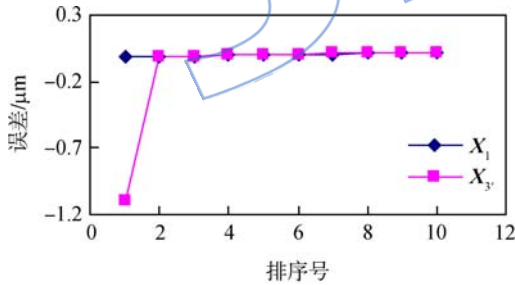
Fig.1 Sorting data figure of simulation

$$\begin{aligned}
 \mathbf{X}_{2'} &= [0.00575 \quad -0.02214 \quad -0.00978 \quad -0.01417 \quad \mathbf{0.1} \quad -0.01621 \\
 &\quad -0.01385 \quad 0.00176 \quad 0.00062 \quad -0.00027] \\
 \mathbf{X}_{3'} &= [0.00209 \quad 0.0177 \quad 0.01656 \quad -\mathbf{1.1} \quad 0.02103 \quad 0.00664 \\
 &\quad 0.0025 \quad -0.01539 \quad 0.01697 \quad -0.00742]
 \end{aligned}$$

相应地,其排序数据图也发生变化,如图2所示。



(a)  $X_1$ 和 $X_2'$ 的排序数据图



(b)  $X_1$ 和 $X_3'$ 的排序数据图

图2 加野值的排序数据图

Fig.2 Sorting data figure with outliers

取属性权重  $f_{1j}=0.5$ ,灰置信水平为  $P_{1j}$ ,如表2所示。

表2 关于加野值的正态分布的灰置信水平

Table 2 Grey confidence level about normal distribution with outliers

$f_{1j}$	$P_{12'}/\%$	$P_{13'}/\%$	$P_{14}/\%$	$P_{15}/\%$	$P_{16}/\%$
0.5	77	83.4	91.99	95.59	93.95

表1 关于正态分布的灰置信水平

Table 1 Grey confidence level about normal distribution

$f_{1j}$	$P_{12}/\%$	$P_{13}/\%$	$P_{14}/\%$	$P_{15}/\%$	$P_{16}/\%$
0.5	95.40	94.54	91.99	95.59	93.95

从表1可以看出,第1个基于排序的数据序列与其他5个数据序列的灰置信水平  $P_{1j}>90\%$ ,从而证明该制造过程是稳定的。

现人为地对数据序列  $X_2$  和数据序列  $X_3$  中的一个值分别故意加大和减小,造成野值,其数据序列变为  $X_{2'}$  和  $X_{3'}$ 。如下式所示,式中黑体数值表示野值。

从表2中可以看出,野值对制造系统稳定性的影响很大,灰置信水平  $P_{12'}$  和  $P_{13'}$  都小于  $90\%$ ,从而验证了运用基于两个排序数据序列的灰关系分析,可以检验制造过程的稳定性。

#### 4.2 实际案例

本案例在专用磨床上磨削某滚动轴承内圈滚道,研究滚道表面圆度误差,以评估制造过程的稳定性。

由于圆度数据服从瑞利分布,因此,用蒙特卡罗方法模拟出满足瑞利分布及其特征值要求的10个数据为 1.18, 0.75, 0.85, 0.75, 0.63, 0.95, 1.06, 0.85, 1.36, 0.65  $\mu\text{m}$ 。

将这10个数据作为本征数据序列  $X_1$ 。

在正式磨削开始后,根据质量监控要求,在一个时间区间内,连续抽取30个工件,获得圆度数据(其中黑体数值表示野值)依次为: 1.08, 0.90, 1.06, **3.28**, 1.28, 0.88, 1.87, 1.16, 1.06, 0.97, 1.01, 0.70, 1.15, 0.72, 1.08, 0.67, 1.10, 0.98, 1.15, 1.14, 1.64, 0.73, 0.87, 1.91, 1.95, 1.19, 0.78, 1.51, 1.39, 1.39  $\mu\text{m}$ 。

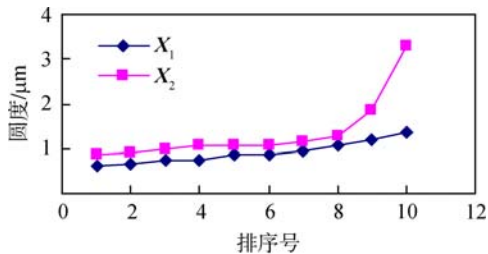
这些圆度数据构成一个数据序列  $X$ ,从  $X$  中可以获取多个评估数据序列  $X_j$ 。

取  $K=10$ ,将圆度数据序列  $X$  中的第1~10个数据  $x_1 \sim x_{10}$  作为第1个评估数据序列  $X_2$ ,将第6~15个数据  $x_6 \sim x_{15}$  作为第2个评估数据序列  $X_3$ ,将第11~20个数据  $x_{11} \sim x_{20}$  作为第3个评估数据序列  $X_4$ ,将第16~25个数据  $x_{16} \sim x_{25}$  作为第4个评估数据序列  $X_5$ ,将第21~30个数据

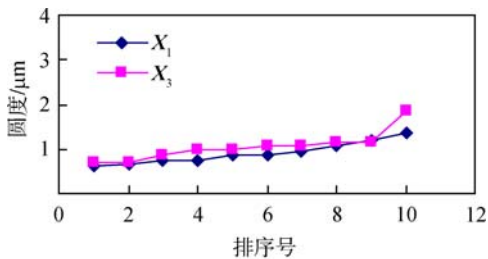
$x_{21} \sim x_{30}$  作为第 5 个评估数据序列  $X_6$ 。

下面对磨削过程的稳定性进行连续评估。

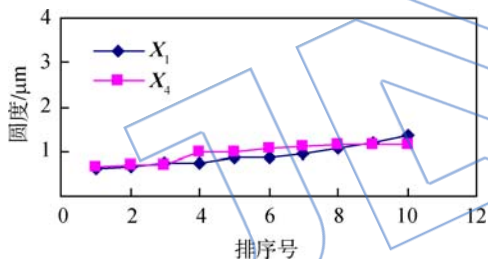
取属性权重  $f_{1j} = 0.5$ , 研究本征数据序列与实际加工数据序列的灰关系, 排序数据图如图 3 所示。



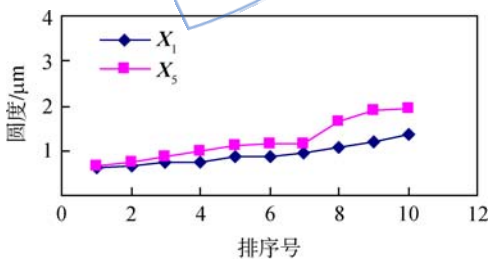
(a)  $X_1$ 和 $X_2$ 的排序数据图



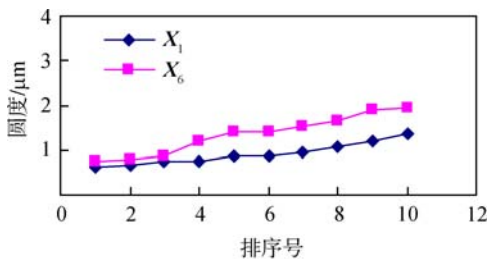
(b)  $X_1$ 和 $X_3$ 的排序数据图



(c)  $X_1$ 和 $X_4$ 的排序数据图



(d)  $X_1$ 和 $X_5$ 的排序数据图



(e)  $X_1$ 和 $X_6$ 的排序数据图

图 3 排序数据图(实际案例)

Fig. 3 Sorting data figure (actual case)

其灰置信水平如表 3 所示。

表 3 关于瑞利分布的灰置信水平

Table 3 Grey confidence level about Rayleigh distribution

$f_{1j}$	$P_{12}/\%$	$P_{13}/\%$	$P_{14}/\%$	$P_{15}/\%$	$P_{16}/\%$
0.5	80.45	96.66	88.78	97.35	93.59

由表 3 可以看出,  $P_{12}$  和  $P_{14}$  的灰置信水平都小于 90%, 所以制造过程中出现不稳定现象, 应该改进工艺过程或调整磨床。

灰置信水平  $P_{12} < 90\%$  表示评估数据序列  $X_2$  与本征数据序列  $X_1$  之间的属性关系不紧密, 主要是  $X_2$  中包含了一个特别显著地大于其他数据的野值 3.28 的缘故。

灰置信水平  $P_{14} < 90\%$  表示评估数据序列  $X_4$  与本征数据序列  $X_1$  之间的属性关系不紧密, 主要原因是, 虽然  $X_4$  与  $X_1$  的对应排序数据的数值相差不大, 但从整体的排序趋势上看,  $X_4$  中的后 7 个排序数据的分布趋势几乎趋于水平线, 没有明显的上升点(不像  $X_3$  那样), 而  $X_1$  中的后 7 个排序数据的分布趋势呈现明显上升趋势。

因此, 可以通过两个排序系统属性特性灰关系分析来判断制造过程的稳定性。

### 5 结 论

制造过程中的稳定性评估可以通过排序数据序列的灰关系实现, 对概率分布没有特别要求, 弥补了传统统计学的不足。

通过计算两个排序数据序列的灰置信水平, 及时发现制造系统中出现的工艺不稳定现象, 实现了对制造过程中的稳定性判断, 可以改善产品质量的不确定性, 提高产品质量水平。

仿真试验和实际案例表明, 运用灰关系分析, 检测系统属性的稳定性, 可以实现对制造过程中的稳定性进行判断, 预测效果好。

此外, 本文提出的灰关系分析, 对系统属性没有特殊要求, 能够对航空航天系统乃至任何系统的信息分析。

### 参考文献:

[1] Noel J P, Renson L, Kerschen G. Complex dynamics of a nonlinear aerospace structure: experimental identification and modal interactions[J]. Journal of Sound and Vibration, 2014, 333(12): 2588-2607.

[2] 毛景立. 航空动力系统制造管理中质量形成的不确定性[J]. 航空动力学报, 2008, 23(6): 1031-1040.

- MAO Jingli. Uncertainty of quality being produced in the course of manufacture management of aerospace power system[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2008, 23(6): 1031-1040. (in Chinese)
- [3] 唐云冰,高德平,罗贵火. 滚动轴承非线性轴承力及其对轴承系统振动特性的影响[J]. *航空动力学报*, 2006, 21(2): 366-373.
- TANG Yunbing, GAO Deping, LUO Guihuo. Non-linear bearing force of the rolling ball bearing and its influence on vibration of bearing system[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2006, 21(2): 366-373. (in Chinese)
- [4] Shamsaei N, Gladskyi M, Panasovsky K, et al. Multiaxial fatigue of titanium including step loading and load path alteration and sequence effects[J]. *International Journal of Fatigue*, 2010, 32(11): 1862-1874.
- [5] Amis E J, Gurvich M R. Reliability of aerospace composite structures: effect of inevitable material variability and imperfection[R]. Indianapolis: 246th National Meeting of the American Chemical Society(ACS), 2013.
- [6] 杨剑秋,陆山. 中长寿命轮盘应力寿命及可靠性分析方法[J]. *航空动力学报*, 2007, 22(6): 991-995.
- YANG Jianqiu, LU Shan. Methods for stress based life and its reliability analyses of discs with medium-long and long life[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2007, 22(6): 991-995. (in Chinese)
- [7] Polansky A M. Assessing the capability of a manufacturing process using nonparametric Bayesian density estimation[J]. *Journal of Quality Technology*, 2014, 46(2): 150-170.
- [8] Saeed F, Phill D, Richard H. Jetting stability of molten caprolactam in an additive inkjet manufacturing process[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2012, 59(1/2/3/4): 201-212.
- [9] Sezen B, Cankaya Y C. Effects of green manufacturing and eco-innovation on sustainability performance[J]. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 2013, 99(6): 154-163.
- [10] 王先逵. 机械制造工艺学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [11] 梁睿君,叶文华. 薄壁零件高速铣削稳定性预测与验证[J]. *机械工程学报*, 2009, 45(11): 146-151.
- LIANG Ruijun, YE Wenhua. Stability prediction for high-speed milling of thin walled structures and experimental validation[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2009, 45(11): 146-151. (in Chinese)
- [12] YOU Houxing. A novel approach to evaluate the stability of production manufacturing system based on Petri-net and analytic hierarchy process[J]. *Advanced Designs and Researches for Manufacturing* 2013, 605/606/607: 336-340.
- [13] 邓聚龙. 灰理论基础[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2002.
- [14] XIA Xintao, WANG Zhongyu. Grey relational analysis for optimized solution[J]. *The Journal of Grey System*, 2004, 16(2): 141-146.
- [15] XIA Xintao, CHEN Jianfeng. Fuzzy hypothesis testing and time series analysis of rolling bearing quality[J]. *Journal of Testing and Evaluation*, 2011, 39(6): 1144-1151.
- [16] Vijayan S, Raju R, Rao S R K. Multiobjective optimization of friction stir welding process parameters on aluminum alloy AA5083 using taguchi-based grey relation analysis[J]. *Materials and Manufacturing Processes*, 2010, 25(11): 1206-1212.
- [17] 王中宇,王倩,孟浩,等. 基于无衍射光的表面粗糙度三角测量及其灰色评定方法[J]. *应用光学*, 2011, 32(5): 909-912.
- WANG Zhongyu, WANG Qian, MENG Hao, et al. Surface roughness measurement based on non-diffracting beam triangulation and grey evaluation[J]. *Journal of Applied Optics*, 2011, 32(5): 909-912. (in Chinese)
- [18] TANG Xiaoyan, WANG Zhengguo. Predicting gas emission based on combination of grey relational analysis and improved fuzzy neural network[J]. *Advances in Computer Science and Information Engineering*, 2012, 169(2): 275-280.