

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2022.11.017

基于参数-非参数融合方法的精密机床性能评估^{*}

田子欣, 徐永智^{*}

(三门峡职业技术学院 汽车学院, 河南 三门峡 472000)

摘要:精密机床机械系统误差受传动系统的设计和调试,以及环境变化等多种因素的影响,属于分布未知的乏信息系统,为了很好地解决精密机床机械系统误差数据分布未知的乏信息评估问题,提出了一种用于评估精密机床机械系统性能变异的参数-非参数融合方法。首先,在服役现场,至少采集两个不同时间阶段精密机床加工产品尺寸的序列数据,构成了评估对象;其次,采用中位数与 Huber M 估计融合方法,对不同时间阶段序列数据进行了稳健处理,得到了次序统计量与尺寸性能区间,确定了置信水平;计算出了尺寸性能区间的分组数及尺寸数据列的累积频率,并用斯米尔诺夫假设检验标准统计量,对其进行了对比,评估了不同时间阶段序列数据的分布相似性特征,以此判断精密机床性能是否发生变异;最后,利用专用滚动轴承外圈检测装置,实测两个时间阶段的数据,对该方法的有效性进行了验证。研究结果表明:两个时间阶段产品精度分布是置信水平为 95% 的偏态分布,二者分布特征不相似,可推断出精密机床机械系统发生了变异;系统通过运用中位数与 Huber M 融合方法、斯米尔诺夫假设检验方法可以克服数据未知分布及置信水平特征的问题,有效地分析机械系统误差,为精密机床性能评估与维修提供可靠依据。

关键词:精密机床;机械系统误差调整;传动系统;分布未知乏信息系统;中位数估计;置信水平;斯米尔诺夫假设

中图分类号:TH161;TG659

文献标识码:A

文章编号:1001-4551(2022)11-1614-06

Performance assessment of precision machine tool based on parameter and non-parameter fusion method

TIAN Zi-xin, XU Yong-zhi

(Department of Automotive, Sanmenxia Polytechnic, Sanmenxia 472000, China)

Abstract: The mechanical system error of precision machine tools is affected by various factors such as transmission system design, debugging, environmental changes, etc., and belongs to the lack of information system with unknown distribution. Aiming at the evaluation problems of the mechanical system error of precision machine which belonged to poor information of unknown distribution, the parameter and non-parameter fusion method was proposed to assess the performance variation of mechanical system on precision machine. The first of all, in the service time, assessment objectives were constituted by taking at least two order data of products size on precision machine at the different time phase. Then, robust treatment for the assessment objective was conducted by adopting the fusion method of the median and Huber M estimate, order statistics and size characteristics interval were obtained and significance level was determined. Calculated grouping number and cumulative frequency, similarity characteristics of the difference time phases data were evaluated by taking Smirnov hypothesis test method conducted comparison with the standard statistics. So whether performance variation or not on the precision machine tool were judged. Finally, effectiveness of the methods were tested by precision data of the using two groups data of the special outer rings measuring devices on the bearings at the different time phase. Results show that precision distributions of the 2-time phases are the skew distribution of the 95% significance level, both distribution characteristics is not similarity, so the mechanical system on precision machine have been changed. Unknown distribution and confidence level characteristics of test data can be conquered by systematic using the fusion method of the median and Huber M estimate, Smirnov hypothesis test, error of mechanical system can be effective analyzed on the above methods. A reliable basis for the performance assessment and maintenance of the precision machine tool complex system is provided.

Key words: precision machine tool; mechanical system error adjustment; transmission system; information-poor system with unknown distribution; median estimation; confidence level; Smirnov hypothesis

收稿日期:2022-02-23

基金项目:河南省科技攻关项目(202102210279);三门峡市科技攻关项目(2020010124);三门峡职业技术学院校企合作项目(SZYhxkt-2021-002);三门峡职业技术学院博士专项基金资助项目(SZYGCCRC-2021-007)

作者简介:田子欣(1983-),男,河南南阳人,硕士,副教授,主要从事机械设计方面的研究。E-mail:tzxdek321@163.com

通信联系人:徐永智,男,博士,副教授。E-mail:xyyzyzhz@163.com

0 引言

在对精密机床产品精度进行评估时,机械系统误差是其中的重要指标。如何科学、有效地评估机床机械系统误差是现代制造业的难题之一。

为了解决精密机床机械系统误差调整问题,研究人员做了大量研究。针对精密机床机械系统的误差调整方法主要有:经验法、定期调试法。

其中,经验法是由葛江华等人^[1-9]提出的,这种方法有很大的不确定性,会出现较大偏差,造成生产零件出现废品、次品。定期调试法是由张立智等人^[10-13]提出的,这种方法往往是通过牺牲设备的使用寿命,以此来提高产品的可靠性,会造成设备的生产效率大大下降。

很多学者关注精密机床机械系统误差评估问题。精密机床机械系统误差受传动系统设计、调试、环境变化等多种因素的影响,属于分布未知的乏信息系统^[14-19]。

针对分布未知的乏信息评估问题,师义民等人^[20-25]采用统计学、非统计学对未知分布的乏信息进行了研究。王中宇等人^[26]提出了一种采用中位数估计与 Huber M 估计融合的方法,对未知分布数据进行了稳健分析,确定了稳健数据的边界值和显著性水平。夏新涛等人^[27]采用斯米尔诺夫假设检验方法来处理分布未知的乏信息评估一致性问题,并取得了一定的成果。

然而上述方法都没有很好地解决未知分布和置信水平的乏信息问题。其中,中位数估计与 Huber M 估计融合方法可用于数据稳健分析和确定置信水平,但是不能判断分布未知数据的变异情况;采用斯米尔诺夫假设检验方法可以判断分布未知数据的变异情况,但需要知道其置信水平。

为了很好地解决上述问题,笔者提出将两种方法进行融合,采用中位数估计与 Huber M 估计融合方法,确定实验数据的稳健数据及置信水平;根据实验数据的稳健数据及置信水平,采用斯米尔检验分析数据的变异性。

1 数学模型

在统计学中,非参数假设检验可以不需要知道数据的分布类型,实现对数据的趋势项进行有效评估目的。考虑到精密机床系统误差分布未知的特点,非参数假设检验方法可以用来分析精密机床机械系统误差。

笔者运用非参数假设检验方法之一的斯米尔诺夫检验来分析两个样本之间的相似性问题。假设精密机床机械系统误差没有发生变化,那么不同时间阶段生

产的零件分布具有相似性,否则不同时间阶段生产的零件分布不相似。反之,如果不同时间阶段生产的零件分布具有相似性,那么精密机床机械系统误差没有变化,否则精密机床机械系统误差发生变化。

笔者以此分析精密机床机械系统的误差。

但是,斯米尔诺夫检验在数据分析时需要划分参数区间,如果数据离散型较大,会造成区间分布过大,造成数据分析失真。因此,在采用斯米尔诺夫检验分析数据之前,需要对数据进行稳健化处理。笔者采用中位数与 Huber M 融合方法对数据进行稳健处理,得到稳健数据,再用斯米尔诺夫检验分析数据分布的相似性。

1.1 基本定义

(1)对服役期间,精密机床加工产品尺寸进行测量,该数据组成初始时间序列 X_0 :

$$X_0 = \{x_0(n)\}; n=1,2,\dots,N \quad (1)$$

式中: X_0 —初始时间序列; $x_0(n)$ —初始时间序列第 n 个数据;0—初始时间; n —数据序号; N —数据个数。

(2)间隔时间 t_i ,对精密机床加工产品尺寸进行测量,该数据组成顺序时间序列 X_i :

$$X_i = \{x_i(n)\}; i=1,2,\dots,m; n=1,2,\dots,N \quad (2)$$

式中: X_i —产品尺寸第 i 时间序列; $x_i(n)$ —第 i 时间序列第 n 个数据; i —时间序列序号; m —时间序列个数; n —数据序号; N —数据个数。

1.2 数据稳健处理

(1)精密机床加工产品尺寸的次序统计量。笔者采用中位数与 Huber M 估计融合方法,对精密机床加工产品尺寸的序列数据 $X_0, X_1, X_2, \dots, X_m$ 进行稳健处理,然后将其进行混合,按照从小到大顺序进行排列,得到次序统计量 Y_i :

$$Y_i = \{y_i(n)\}; i=1,2,\dots,m; n=1,2,\dots,2N \quad (3)$$

式中: Y_i —精密机床加工产品尺寸的时间序列数据的次序统计量; i —次序统计量序号; m —次序统计量个数; n —数据序号; $2N$ —数据个数。

(2)精密机床加工产品尺寸性能区间 (a_i, b_i) 。待精密机床加工产品尺寸序列数据稳健处理后,得出精密机床加工产品尺寸时间序列数据与次序统计量的尺寸区间 (a_i, b_i) , a_i 略小于 $y_i(1)$, b_i 略大于 $y_i(2N)$ 。

其中: a_i, b_i —统计区间临界值; $y_i(1)$ —精密机床加工产品尺寸时间序列与次序统计量的最小值; $y_i(2N)$ —精密机床加工产品尺寸时间序列与次序统计量的最大值。

1.3 斯米尔诺夫假设检验

(1)精密机床加工产品尺寸序列数据的分组区

间。根据精密机床加工产品尺寸序列的数据个数 N ，确定出精密机床加工产品尺寸区间个数 K 。

K 的选择如表 1 所示。

表 1 精密机床加工产品尺寸区间个数

序号	数据个数 N	组数 K
1	40 ~ 60	6 ~ 8
2	100	7 ~ 9
3	150	10 ~ 15
4	200	16
5	400	20
6	600	24
7	600	27

根据确定的区间个数，计算出精密机床加工产品尺寸数据的组距 p_i 为：

$$p_i = \frac{y_i(2N) - y_i(1)}{K}; i = 1, 2, \dots, m \quad (4)$$

式中： p_i —精密机床加工产品尺寸数据组距； i —时间序列序号； m —时间序列个数； K —精密机床加工产品尺寸数据列可分组数。

由此，确定出精密机床加工产品尺寸分组区间 (a_i, b_i) 为：

$$(a_i, a_i + p_i), (a_i + p_i, a_i + 2p_i) \dots, [a_i + (K-1)p_i, b_i]; i = 1, 2, \dots, m \quad (5)$$

式中： a_i, b_i —统计区间临界值； p_i —精密机床加工产品尺寸数据组距； i —时间序列序号； m —时间序列个数。

(2) 精密机床加工产品尺寸数据的频数。根据式 (5) 得到的分组区间，以及精密机床加工产品尺寸的时间序列 X_0, X_i ，计算出在精密机床加工产品尺寸时间序列 X_0 及 X_i 的个数 n_{0k} 及 n_{ik} ，其中， $k = 1, 2, \dots, K$ 。

(3) 精密机床加工产品尺寸数据的频率。根据精密机床加工产品尺寸数据的频数及时间序列 X_0, X_i 的数据个数，计算出在精密机床加工产品尺寸时间序列 X_0, X_i 的频率 f_{0k}, f_{ik} 分别为：

$$f_{0k} = \frac{n_{0k}}{N}; k = 1, 2, \dots, K \quad (6)$$

式中： f_{0k} —时间序列第 k 个区间的频率； k —时间序列频率序号； K —时间序列频率个数； N —时间序列数据个数。

第 i 时间序列第 k 个区间的频率为：

$$f_{ik} = \frac{n_{ik}}{N}; i = 1, 2, \dots, m; k = 1, 2, \dots, K \quad (7)$$

式中： m —时间序列个数； k —时间序列频率序号； K —时间序列频率个数； N —时间序列数据个数。

(4) 精密机床加工产品尺寸数据列的累计频率。精密机床加工产品尺寸初始时间序列数据的累积频率为：

$$F_{0v} = \sum_{k=1}^v f_{0k}; v = 1, 2, \dots, K \quad (8)$$

式中： F_{0v} —初始时间序列第 v 个累积频率； v —初始时间序列累计频率序号； f_{0k} —初始时间序列第 k 个区间的频率； k —时间序列频率序号； K —时间序列累积频率个数。

精密机床加工产品尺寸第 i 时间序列数据的性能累积频率为：

$$F_{iv} = \sum_{k=1}^v f_{ik}; i = 1, 2, \dots, m; v = 1, 2, \dots, K \quad (9)$$

式中： F_{iv} —第 i 时间序列第 v 个累积频率； i —时间序列序号； m —时间序列个数； v —时间序列累计频率序号； f_{ik} —时间序列第 k 个区间的频率； k —初始时间序列频率序号； K —时间序列累积频率个数。

(5) 精密机床加工产品尺寸偏差统计量。精密机床加工产品尺寸偏差统计量 D_{ik} 为：

$$D_{ik} = |F_{0k} - F_{ik}|; i = 1, 2, \dots, m; k = 1, 2, \dots, K \quad (10)$$

式中： D_{ik} —精密机床加工产品尺寸初始时间序列与第 i 时间序列的第 k 个频率的绝对差； F_{0k} —初始时间序列第 k 个区间的累积频率； F_{ik} —第 i 时间序列第 k 个区间的累积频率； i —时间序列序号； m —时间序列个数； k —时间序列频率序号； K —时间序列频率个数。

笔者以精密机床加工产品尺寸初始时间序列频率与第 i 时间序列频率的绝对差 D_{ik} 作为统计量，分析精密机床加工产品尺寸初始时间序列与第 i 时间序列数据分布的相似性。 D_{ik} 越小，表示初始时间序列与第 i 时间序列的尺寸数据分布相似； D_{ik} 越大，表示初始时间序列与第 i 时间序列的尺寸数据分布不相似。二者数据分布越相似，说明二者性能越相近，即机械系统性能相同；否则，二者性能不同，机械系统性能发生变异。

笔者以此分析精密机床加工产品尺寸性能的保持性，进而判断精密机床机械系统性能。

(6) 精密机床加工产品尺寸偏差统计量临界值 $D_{2N, \alpha}$ 。统计量临界值为 $D_{2N, \alpha}$ ，该值为斯米尔诺夫检验的临界值表（其中： N —时间序列数据个数； α —显著性水平）。

(7) 精密机床加工产品尺寸时间序列的相似性。为了分析精密机床加工产品尺寸初始时间序列与第 i 时间序列的相似性，需要找出初始时间序列频率与第 i 时间序列频率的绝对差 D_{ik} 的最大值 $\max D_{ik}$ 。

如果 $\max D_{ik}$ 小于统计量临界值 $D_{2N, \alpha}$ ，说明初始时间序列与第 i 时间序列的数据分布相似，即二者性能一致，继续对比第 $i = i + 1$ 时间序列，直到第 $p = i + 1$ 个时间序列， $\max D_{ik}$ 大于统计量临界值 $D_{2N, \alpha}$ ，说明初始时间序列与第 i 时间序列的数据分布不相似，即精密机床加工产品尺寸性能发生变化，进而判断出精密机床机械性能发生变异。

2 实验及数据分析

2.1 实验环境

为了验证上述理论,笔者在室温 20 ℃,湿度小于 10%,外部环境无振动条件下,对两个时间阶段精密机床加工的 $\varphi 50p5$ 轮毂轴承外径进行测量。

2.2 测试方法

根据《滚动轴承测量和检验的原则及方法》(GB/T307.2—2005),笔者采用专用滚动轴承外圈检测装置对两个时间阶段精密机床加工的 $\varphi 50p5$ 轮毂轴承外径进行测量。

该轴承外圈直径测量装置由固定支点、辅助支点、垂直仪表架、测量触点、测量仪表、锁紧螺母等部分组成。

轴承外圈直径测量装置的实物图如图 1 所示。



图 1 轴承外圈直径测量装置

测量滚动轴承外圈时,笔者利用三点法测量外径尺寸。最大测量力为 2 N,最小测头半径为 2.5 mm,仪表范围为 $D30 - 120$ mm,准确度为 ± 0.001 mm。

笔者根据测试要求调整好工作台,把轴承外圈安装在测试工作台上,使标准件置于固定支点和测量点之间,并横向移动;当测量仪表指针处在最大值时,把辅助支点调至与标准件外径表面接触,手动固紧,根据标准件的零位偏差对表,即可测量轴承外径。

笔者在若干个径向平面内,对其进行重复测量,并记下读数,确定出平均外径偏差,记录结果。

2.3 数据分析

在机床开始加工 40 min 后,待机床工作性能稳定,笔者抽取第 1 时间阶段 $n_1 = 150$ 个零件,按上述测量方法进行测量,减去基本尺寸,乘以 1 000 得到误差数据序列 X_1 ;

间隔 10 个工作日后,在第 2 时间阶段机床工作 40 min 后,笔者再抽取 $n_2 = 100$ 个零件进行相同方法测量,得到数据序列 X_2 。

第 1-2 时间阶段零件精度具体如图 2 所示。

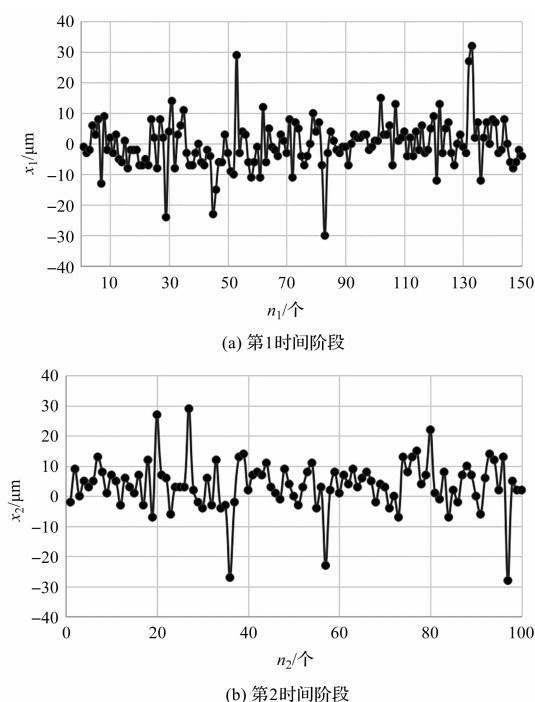


图 2 第 1-2 时间阶段零件精度

从图 2 可以看出:第 1、2 时间阶段零件精度没有明显的变化趋势,处于稳定状态,可以反映出机床系统的特征;每个时间阶段均有几个奇异数据,使数据处于不稳健状态。

如果直接进行统计分析,会增加数据分析的不确定性。因此,需要对数据进行稳健处理,笔者采用中位数估计与 Huber M 估计融合方法对数据进行处理,获取数据显著性水平。

第 1-2 时间阶段 D 值具体如图 3 所示。

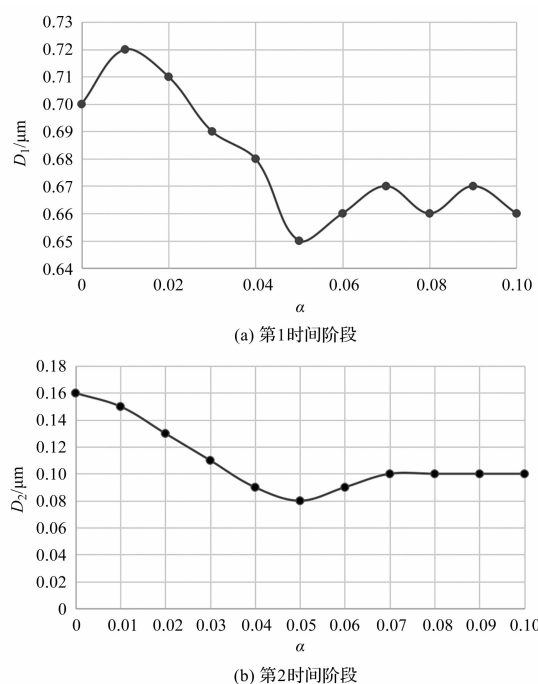


图 3 第 1-2 时间阶段 D 值

从图 3 可以看出,第 1 时间阶段、第 2 时间阶段的显著性水平为 0.05,置信水平 95%,进一步得出了第 1 时间阶段、第 2 时间阶段的零件精度 Y_1, Y_2 。为了方便数据分析,笔者将 Y_1, Y_2 数据转换为标准偏差 Z_1, Z_2 。

依据统计学规则,笔者把 Z_1, Z_2 划分为 8 个区间,并统计各个区间的零件个数,得到频数如表 2 所示。

表 2 $\varphi 50p5$ 测量区间及频数

序号	偏差 Z_i 的区间	频数/个	
		Z_1	Z_2
1	$[-15, -10)$	10	0
2	$[-10, -5)$	27	7
3	$[-5, 0)$	43	17
4	$[0, 5)$	38	30
5	$[5, 10)$	23	29
6	$[10, 15)$	8	15
7	$[15, -20)$	1	1
8	$[20, 25)$	0	1
9	总计	150	100

从表 2 可以看出: Z_1, Z_2 频数的规律很明显,数据符合从小到大,然后再从大到小的规律。但是, Z_1, Z_2 的频率分布情况又有区别。

不同时间阶段产品分布对比结果如图 4 所示。

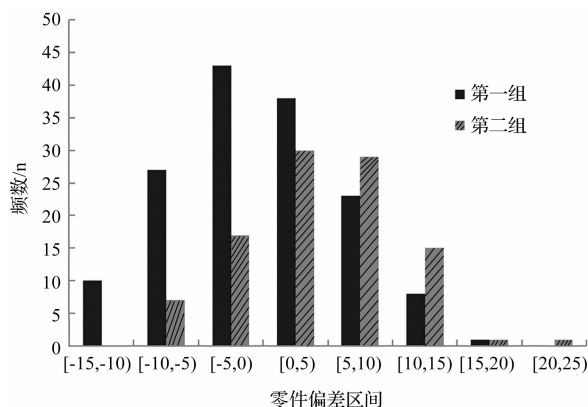


图 4 不同时间阶段产品分布对比

从图 4 可以看出: Z_1, Z_2 的频率分布不是对称的,不符合正态分布特征; Z_1, Z_2 的频率分布偏左,两者偏左的程度也不一致,属于未知分布。

可以看出,二者频率分布之间存在误差,属于系统误差。根据零件尺寸数据的稳健处理,得到测试数据的置信水平为 95%。由于 Z_1, Z_2 的数据分别为 150, 100,根据统计学斯米尔诺夫检验得到标准值为 0.172 31。

为了进一步分析 Z_1, Z_2 的系统误差,需分析二者不同尺寸的累积频率及统计量 D_{ik} 分布情况。

$\varphi 50p5$ 累计累积频率及统计量具体如表 3 所示。

表 3 $\varphi 50p5$ 累计累积频率及统计量

序号	Z_i	累积频率		统计量 D_{ik}	标准值
		Z_1	Z_2		
1	-10	0.067	0.000	0.067	
2	-5	0.247	0.070	0.177	
3	0	0.533	0.024	0.293	
4	5	0.787	0.540	0.247	
5	10	0.940	0.830	0.110	0.172 31
6	15	0.993	0.980	0.013	
7	20	1.000	0.990	0.010	
8	25	1.000	1.000	0.000	
9	总计	1.000	1.000	0.000	

从表 3 可以看出: -5,0,5 尺寸的累积频率差大于标准值 0.172 31,说明这两批零件存在差别,即精密机床的机械系统性能发生变异,需要维修、调试。

2.4 讨论

对精密机床机械系统来说,其系统是十分复杂的,机械系统性能呈现未知分布特征(图 1),精密机床加工产品质量随着服役时间的增加,产品质量不稳定性变大,可判定出其机械系统性能发生变异,性能退化;斯米尔诺夫假设检验是基于数据累积频率的差异,判断数据是否具有相似性能,需要知道数据的置信水平^[28]。

根据中位数与 Huber M 估计融合方法,可以确定数据的显著性水平,进而确定数据序列的置信水平。因此,根据中位数与 Huber M 估计融合方法确定的置信水平,采用斯米尔诺夫检验分析数据性能是否变异,符合精密机床服役过程中的性能特征。

该方法可以用来判断精密机床的机械系统是否发生变异,是否产生性能退化,为精密机床的维修、维护提供理论依据。

3 结束语

针对精密机床机械系统误差数据分布未知的乏信息评估问题,笔者提出了一种用于评估精密机床机械系统性能变异的参数-非参数融合方法,即将中位数估计与 Huber M 估计融合方法,确定实验数据的稳健数据及置信水平;根据实验数据的稳健数据及置信水平,采用斯米尔诺夫检验分析数据的变异性。

研究结论如下:

(1)在精密机床服役过程中,对不同时间阶段采集的数据直方图进行分析,判断出产品精度不稳定,属于分布未知的偏态分布特征;

(2)采用中位数估计与 Huber M 估计融合的方法,分析产品精度的显著性水平为 0.05,确定置信水平为 95% 左右,获取了产品精度的稳健数据;

(3)在置信水平 95% 条件下,采用斯米尔诺夫假设检验方法分析产品精度的相似性,发现随着服役时间的增加,产品精度不相似,表明机床机械系统发生了变异;

(4)将中位数与 Huber M 估计融合方法和斯米尔诺夫假设检验进行融合,不需要知道数据分布类型、置信水平,为未知分布数据的评估提供了一种信息方法。

在后续的研究中,笔者将使用中位数与 Huber M 估计融合方法和斯米尔诺夫假设检验方法计算出精密机床加工产品在未来时间的性能保持相对可靠度,预测其保持最佳性能状态的失效程度,以此评估机械系统性能退化问题。

参考文献 (References):

- [1] 葛江华,刘 奇,王亚萍,等. 支持张量机与 KNN-AMDM 决策融合的齿轮箱故障诊断方法[J]. 振动工程学报, 2018,31(6):1093-1101.
- [2] 左红艳,刘晓波,洪连环. 双阶自适应小波聚类的航空发动机故障分类与识别[J]. 振动工程学报,2018,31(1): 165-175.
- [3] HAN T, LIU C, YANG W, et al. A novel adversarial learning framework in deep convolutional neural network for intelligent diagnosis of mechanical faults [J]. **Knowledge-Based Systems**, 2019, 165: 474-487.
- [4] JIAO J, ZHAO M, LIN J, et al. Deep coupled dense convolutional network with complementary data for intelligent fault diagnosis [J]. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, 2019, 66(12): 9858-9867.
- [5] 杨 平,苏燕辰. 基于卷积门控循环网络的滚动轴承故障诊断[J]. 航空动力学报, 2019, 34(11): 2432-2439.
- [6] LI Y, ZOU L, JIANG L, et al. Fault diagnosis of rotating machinery based on combination of deep belief network and one-dimensional convolutional neural network [J]. **IEEE Access**, 2019, 7: 165710-165723.
- [7] 张立智,徐卫晓,井陆阳,等. 基于 EMD-SVD 和 CNN 的旋转机械故障诊断[J]. 振动、测试与诊断, 2020, 40(6): 1063-1070, 1228.
- [8] IBRAHIM R A, PETTIT C L. Uncertainties and dynamic problems of bolted joints and other fasteners[J]. **Journal of Sound and Vibration**, 2005, 279(3): 857-936.
- [9] 赵 广,金 鑫,崔 颖,等. 基于模态应变能的接触刚度识别方法[J]. 机械工程学报, 2020, 56(9): 147-153.
- [10] 李德水,陈国定,余永健. 基于拟动力学高速角接触球轴承动态特性分析[J]. 航空动力学报, 2017, 32(3): 730-739.
- [11] LIU Y, CHEN Z, TANG L, et al. Skidding dynamic performance of rolling bearing with cage flexibility under accelerating conditions [J]. **Mechanical Systems and Signal Processing**, 2021, 150: 107257. 1-107257. 21.
- [12] 蒋 聪,熊 欣,鲍毅超. 某型空气涡轮起动机异常振动分析与研究[J]. 机械工程与自动化, 2021(3): 137-139.
- [13] XU Y, XIA X, Nan X. Working performance evaluation of rolling bearing using modern statistics [J]. **Journal of Chinese Society of Mechanical Engineers**, 2019, 40(1): 63-72.
- [14] 代士超,郭 瑜,伍 星. 基于同步平均与倒频谱编辑的齿轮箱滚动轴承故障特征量提取[J]. 振动与冲击, 2015, 34(21): 205-209.
- [15] JAWADEKAR A, PARASKAR S, JADHAV S, et al. Artificial neural network-based induction motor fault classifier using continuous wavelet transform [J]. **Systems Science and Control Engineering**, 2014, 2(1): 684-690.
- [16] 付 胜,徐 斌,杜晓帆,等. 基于奇异值分解和支持向量机的齿轮故障诊断[J]. 机械传动, 2013, 37(9): 90-92, 102.
- [17] 庞梦洋,索中英,郑万泽,等. 基于 RS-CART 决策树的航空发动机小样本故障诊断[J]. 航空动力学报, 2020, 35(7): 1559-1568.
- [18] TAMILSELVAN P, WANG P. Failure diagnosis using deep belief learning based health state classification [J]. **Reliability Engineering and Systems Safety**, 2013, 115(7): 124-135.
- [19] 叶 壮,余建波. 基于多通道一维卷积神经网络特征学习的齿轮箱故障诊断方法[J]. 振动与冲击, 2020, 39(20): 55-66.
- [20] 夏新涛,陈晓阳,张永振,等. 滚动轴承乏信息实验分析与评估[M]. 北京:科学技术出版社, 2007.
- [21] XIA X, WANG Z, GAO Y. Estimation of non-statistical uncertainty using fuzzy-set theory [J]. **Measurement Science and Technology**, 2000, 11(4): 430-435.
- [22] 夏新涛,贾晨辉,王中宇,等. 滚动轴承摩擦转矩的乏信息模糊预报[J]. 航空动力学报, 2009, 24(2): 945-950.
- [23] 夏新涛,陈晓阳,张永振,等. 航天轴承摩擦转矩不确定度的灰自助动态评估[J]. 哈尔滨工业大学学报(增刊), 2006, 38(7): 294-297.
- [24] XIA X, CHEN X, ZHANG Y, et al. Dynamic assessment for uncertainty of friction moment of space bearing using grey bootstrap [J]. **Journal of Harbin Institute of Technology**, 2006(7): 294-297.
- [25] 师义民,许 勇,周丙常. 近代统计方法[M]. 北京:科学出版社, 2011.
- [26] 王中宇,夏新涛,朱坚民. 非统计及其工程应用[M]. 北京:科学出版社, 2005.
- [27] 徐永智,夏新涛. 内圈沟道损伤直径对滚动轴承振动性能的测度[J]. 航空动力学报, 2019, 36(4): 734-740.
- [28] 金 域,高 通,怀天澍,等. 数控机床主轴系统可靠性分析[J]. 机械制造, 2021, 59(7): 11-15, 24.

[编辑:李 辉]

本文引用格式:

田子欣,徐永智. 基于参数-非参数融合方法的精密机床性能评估[J]. 机电工程, 2022, 39(11): 1614-1619.

TIAN Zi-xin, XU Yong-zhi. Performance assessment of precision machine tool based on parameter and non-parameter fusion method[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2022, 39(11): 1614-1619.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>