

基于灰关联度的数控磨床故障间隔时间 分布模型决策*

范晋伟, 梁晓霞, 郑德荣, 刘勇军
(北京工业大学 机电学院, 北京 100124)

摘要: 在数控磨床整机系统的可靠性评价过程中, 最重要的评价指标是平均故障间隔时间, 即 MTBF 值。计算 MTBF 值之前最重要的工作是对可靠性数据进行统计处理, 判定分布类型, 估计分布参数, 从而确定故障间隔时间的概率分布。可靠性数据分析经常采用的分布类型有威布尔分布、指数分布、正态分布和指数正态分布, 目前计算中都是直接根据拟合情况人为地选定分布类型, 这样使分布模型决策带有主观性。针对上述情况, 运用灰关联度分析法, 计算各分布的灰关联度值, 最后根据定量计算的结果选定故障间隔时间的分布类型。文章以 MKS 系列数控磨床为实例, 说明了灰色关联度分析的具体方法。

关键词: 灰关联度分析; 数控磨床; 故障间隔时间; 分布模型决策

中图分类号: TH161; TG506

文献标识码: A

Decision-making of the NC Grinding Machine Fault between Time Distribution Model Based on Grey Correlation Degree

FAN Jin-wei, LIANG Xiao-xia, ZHENG De-rong, LIU Yong-jun

(Department of Mechanical and Electronic Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124)

Abstract: In the process of reliability evaluation about nc grinding machine system, the most important evaluation index is the average time between failures, namely the MTBF. To statistic and analysis reliability data, determine the distribution type and estimate distribution parameters are the most important tasks before Calculating MTBF value. And then we can determine the probability distribution of time between failures. Analysis of reliability data has often adopt the distribution type of weibulldistribution, exponential distribution, normal distribution and the index of normal distribution. At present, we are often directly selected distribution type according to the the fitting results. So the decision of distribution model is subjective. Based on the above situation, we calculated grey correlation degree of every distribution type using grey relational analysis method in the paper. Finally, we select appropriate distribution type according to the results of the quantitative calculation. Based on the MKS CNC grinding machine as an example, the paper illustrates the concrete methods of grey correlation degree analysis.

Key words: grey relational analysis; CNC grinding machine; time between failures; decision-making of distribution model

0 引言

科学技术的高速发展, 使可靠性变成了产品的重要指标之一, 并贯穿于产品的整个研制过程。数控磨床作为现代制造业的工作母机, 其对可靠性研究的需求也显得越来越迫切^[1]。平均无故障间隔时间(即 MTBF) 作为衡量数控磨床可靠性的一个重要指标, 其

计算的精确性也日渐重要。

可靠性评价过程中, 首先要收集整理数控磨床无故障间隔时间, 对数据进行分析处理后, 给出该系列数控磨床的故障间隔时间的分布模型。通常采用的模型有威布尔分布、指数分布、正态分布和指数正态分布, 但具体符合哪种分布大部分情况仍然由人为因素决定, 故本文引入了灰色关联度分析法。

收稿日期: 2013-11-21

* 基金项目: 国家科技重大专项: 中高档国产数控磨床可靠性规模化提升工程(2013ZX04011013); 国家自然科学基金: 数控机床加工缺陷成因的逆向追踪理论与实验研究(51275014)

作者简介: 范晋伟(1965—), 男, 河南西平人, 北京工业大学教授, 工学博士, 研究方向为数字化精密加工与检测; 通讯作者: 梁晓霞(1988—), 女, 山西原平人, 北京工业大学硕士研究生, 研究方向为数控磨床的可靠性 (E-mail) 704533238@qq.com。

灰色关联度分析法是灰色系统分析方法的一种,灰色系统理论提出了对各曲线形状进行灰色关联度分析的概念。灰色关联度分析的意义是指在曲线拟合过程中,如果两条曲线的变化态势是一致的,即拟合程度较高,则可以认为两者关联度较大;反之,则两者关联度较小^[2]。因此,通过计算比较拟合曲线关联度的大小,便可更准确的决策故障间隔时间的分布类型,从而可精确计算数控磨床无故障间隔时间。

1 灰色关联度分析法简介

灰色关联度分析^[3-4]来自灰色系统理论,最早由邓聚龙教授于1982年创始。灰关联分析法的基本思想是根据统计序列曲线与拟合分布几何形状的相似程度来确定相关度。两曲线的几何形状越接近,它们的关联程度越大。对于时间离散序列,所谓两条曲线的接近程度是指两时间序列在对应各时段上的曲线斜率的接近程度。若两曲线在各时段上的曲线斜率相等或相差较小,则两曲线的关联度就大,反之就小。通过二十多年大批学者的发展,相继发展了相对关联度、绝对关联度、斜率关联度、T型关联度、B型关联度、C型关联度以及若干种改进的关联度计算方法,吉林大学张英芝等人参考王坚强教授提出的新的灰色关联度的计算模型^[5]将灰色关联分析引入机床故障分布拟合的择优中。具体方法如下:

(1) 生成增量序列:

$$\Delta y_1 = \{ \Delta y_1(t_k) = [F_n(t_k) - F_n(t_{k-1})] / \Delta t_k \mid k = 2, 3, \dots, n \}$$

$$\Delta y_2 = \{ \Delta y_2(t_k) = [F_0(t_k) - F_0(t_{k-1})] / \Delta t_k \mid k = 2, 3, \dots, n \}$$

$$\Delta t_k = t_k - t_{k-1}$$

(2) 标准化:

$$D_1 = \sum_{k=2}^n |F_n(t_k) - F_n(t_{k-1})| / (b - a)$$

$$D_2 = \sum_{k=2}^n |F_0(t_k) - F_0(t_{k-1})| / (b - a)$$

(3) 计算各时间点的关联系数:

$$\xi(t_k) = \frac{1}{\left[1 + \left| \frac{\Delta y_1(t_k)}{D_1} - \frac{\Delta y_2(t_k)}{D_2} \right| \right] \left[1 + \frac{\min(D_1, D_2)}{\max(D_1, D_2)} \right]}$$

(4) 计算两序列的关联度 $r(x_1, x_2)$:

$$r(X_1, X_2) = \frac{1}{b - a} \sum_{k=2}^n \Delta t_k \xi(t_k)$$

$r(X_1, X_2)$ 越大,则拟合的分布与样本图在相邻两时间点的曲线斜率越相近,则拟合分布曲线就越能描述故障间隔时间的分布规律。因而 $r(X_1, X_2)$ 最大的分布模型为描述产品故障分布规律的最佳函数。

2 灰关联度分析在数控磨床中的应用

本文以 MSK 系列数控磨床为例,运用灰关联分析法对其故障间隔时间分布模型进行决策。

2.1 可靠性数据采集

可靠性采集数据的方式有定数截尾、定时截尾、随机截尾三种方式^[6]。

鉴于分析对象为数控磨床,成批量生产,且使用厂家分散,不可能进行全数试验。而且基于产品故障间隔时间从几小时到上千小时不等,范围较广,不方便使用定数截尾试验,因论文对包装机械采用定时截尾试验。

2.2 绘制散点图

将统计的样本点按从小到大的顺序排列,以样本值为横坐标,对应的经验分布函数值为纵坐标,得到故障间隔时间累积分布函数 $F(t)$ 的散点图。

设寿命样本值由小到大的观测值为: $t_1 \leq t_2 \leq \dots \leq t_n$, 则其经验分布函数^[7]为:

$$F(t_i) = \frac{i - 0.3}{n + 0.4}$$

根据上式计算各故障对于的经验分布函数值结果如表1所示。

表1 图形拟合检验数据计算表

i	t_i	$F(t_i)$	i	t_i	$F(t_i)$	i	t_i	$F(t_i)$
1	12	0.006641	36	240	0.3387097	71	744	0.670778
2	12	0.016129	37	264	0.3481973	72	768	0.6802657
3	12	0.025617	38	264	0.3576850	73	792	0.6897533
4	12	0.035104	39	264	0.3671727	74	816	0.699241
5	12	0.044592	40	288	0.3766603	75	840	0.7087287
6	24	0.0540797	41	288	0.3861480	76	840	0.7182163
7	24	0.0635674	42	288	0.3956357	77	840	0.727704
8	24	0.0730550	43	312	0.405123	78	888	0.7371917
9	24	0.0825427	44	312	0.4146110	79	912	0.7466793
10	48	0.0920304	45	312	0.4240987	80	960	0.756167
11	48	0.1015180	46	360	0.4335863	81	1008	0.7656547
12	72	0.1110057	47	360	0.4430740	82	1104	0.7751423
13	72	0.1204934	48	360	0.452562	83	1152	0.784630
14	72	0.1299810	49	360	0.4620493	84	1152	0.7941177
15	72	0.1394687	50	360	0.471537	85	1200	0.803605
16	72	0.1489564	51	384	0.4810247	86	1200	0.813093
17	72	0.1584440	52	384	0.4905123	87	1392	0.822581
18	96	0.1679317	53	384	0.5	88	1392	0.832068
19	96	0.1774194	54	384	0.5094877	89	1392	0.841556
20	120	0.1869070	55	456	0.5189753	90	1416	0.8510437
21	144	0.1963947	56	480	0.528463	91	1464	0.8605313
22	144	0.205882	57	504	0.5379507	92	1488	0.870019
23	144	0.215370	58	528	0.547438	93	1560	0.8795067
24	144	0.224858	59	552	0.556926	94	1728	0.8889943
25	144	0.234345	60	552	0.5664137	95	1752	0.898482
26	144	0.243833	61	576	0.5759013	96	1872	0.9079697
27	144	0.2533207	62	600	0.585389	97	1896	0.9174573
28	168	0.2628083	63	600	0.594877	98	1920	0.926945
29	192	0.2722960	64	624	0.604364	99	1944	0.9364327
30	192	0.2817837	65	624	0.613852	100	2016	0.9459203
31	192	0.2912713	66	648	0.623340	101	2040	0.955408
32	216	0.3007590	67	672	0.632827	102	2328	0.9648957
33	216	0.3102467	68	696	0.642315	103	2712	0.9743833
34	240	0.3197343	69	696	0.6518027	104	2712	0.983871
35	240	0.3292220	70	744	0.6612903	105	3144	0.9933587

以 t_i 作为横坐标, $F(t_i)$ 作为纵坐标, 即可获得故障间隔时间样本分布的散点图, 如图 1 所示。

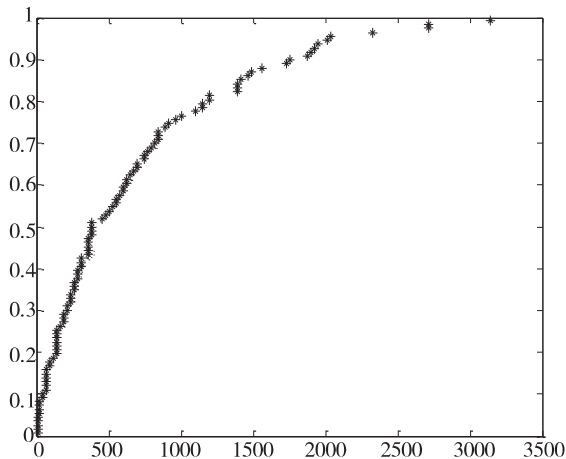


图 1 分布函数散点图

2.3 故障间隔时间分布函数的拟合与检验

由图 1 的曲线走势可知, 该数控磨床故障间隔工作时间所服从的分布不会是正态分布或对数正态分布, 而可能是指数分布或威布尔分布。

2.3.1 威布尔分布

(1) 分布拟合

威布尔分布密度函数为^[8]

$$f_w(t; m, \eta, \gamma) = \frac{m}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta} \right)^{m-1} e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^m} \quad (\gamma \leq t < \infty, m, \eta > 0)$$

威布尔分布函数为

$$F_w = \int_{-\infty}^t f_w dt = 1 - e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^m}$$

式中 m 为形状参数, $m > 0$; η 为尺度参数, $\eta > 0$; γ 为位置参数, $\gamma > 0$ 。在实际应用中, 往往假设在 $t = 0$ 时产品便发生故障。这样, 简化为两参数威布尔分布, 相应地, 上式分别简化为:

$$f(t) = \frac{m}{\eta} \left(\frac{t}{\eta} \right)^{m-1} e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^m} \quad t \geq 0$$

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^m} \quad t \geq 0$$

对于两参数威布尔分布^[9], 其累积分布函数为

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^m}$$

对上式两端进行变换, 并取自然对数得

$$\ln \left[\ln \left(\frac{1}{1 - F(t)} \right) \right] = m \ln t - m \ln \eta$$

$$x = \ln t, y = \ln \left[\ln \left(\frac{1}{1 - F(t)} \right) \right]$$

设样本的线性回归函数为:

$$y = A + Bx$$

则, $B = m$, $A = -m \ln \eta$

根据最小二乘法的原理, 假设 y 与 x 有如下关系:

$$y_i = A + Bx_i + \varepsilon_i$$

其中 $\varepsilon_i \sim N(0, \sigma^2)$,

解矩阵方程得:

$$A = -4.2675 \quad B = 0.6494$$

则 $m = 0.6494$ $\eta = 714.6679$

威布尔分布函数为: $F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{714.6679}\right)^{0.6494}}$

图 2 为威布尔分布拟合出来的概率分布函数:

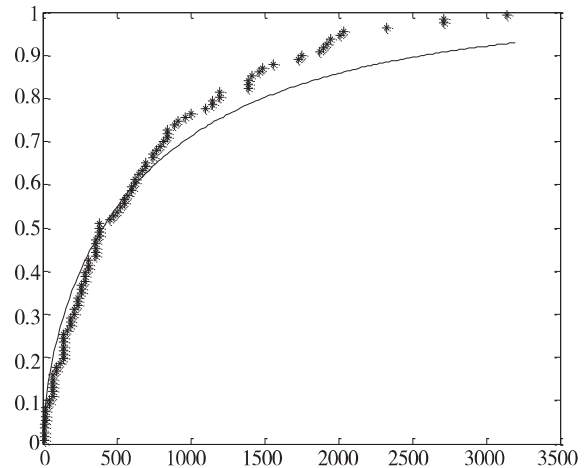


图 2 威布尔分布拟合概率分布函数

(2) 线性相关性检验

由于威布尔分布可以变成线性关系来处理, 故在显著水平 $\alpha = 0.05$ 下采用相关系数法进行检验。

若采用相关系数法进行检验, 其相关系数为^[10]:

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i - n \bar{x} \bar{y}}{\sqrt{\left(\sum_{i=1}^n x_i^2 - n \bar{x}^2 \right) \left(\sum_{i=1}^n y_i^2 - n \bar{y}^2 \right)}}$$

当 $|\rho| > \rho_{(n-2, \alpha)}$ 时, 认为 x 与 y 之间的线性相关性显著。其中 $\rho_{(n-2, \alpha)}$ 为相关系数的临界值, 可查表求出。

由于有 105 个故障间隔时间, 显著水平 0.05, 则查表可以得到 $\rho_{(103, 0.05)} = 0.19179$ 。

经计算得威布尔拟合函数的线性相关系数为:

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i - n \bar{x} \bar{y}}{\sqrt{\left(\sum_{i=1}^n x_i^2 - n \bar{x}^2 \right) \left(\sum_{i=1}^n y_i^2 - n \bar{y}^2 \right)}} = 0.988914915$$

由计算结果得: $|\rho| > \rho_{(n-2, \alpha)}$, 故故障间隔时间符合威布尔分布。

2.3.2 指数分布

(1) 分布拟合

指数分布概率密度函数为^[8]:

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad (0 < \lambda < \infty, 0 \leq t < \infty)$$

指数分布函数为:

$$F(t) = \int_0^t f(t) dt = 1 - e^{-\lambda t}$$

根据最小二乘法的原理拟合得:

$$\lambda = 0.001388723$$

则指数分布函数为: $F(t) = 1 - e^{-0.001388723t}$

图 3 为指数分布拟合出来的概率分布函数:

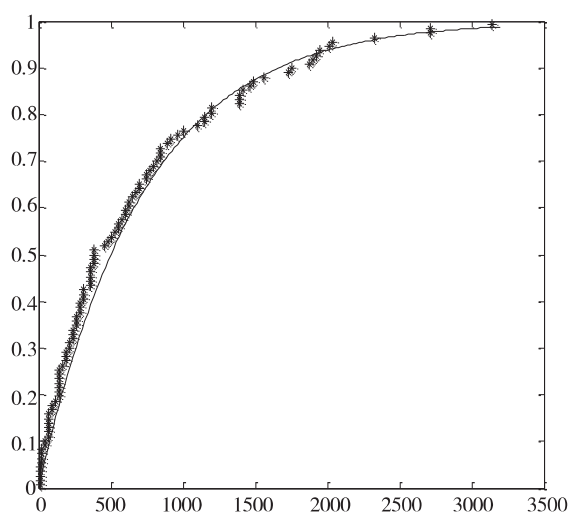


图3 指数分布拟合概率分布函数

(2) 线性相关性检验

同样在显著水平 $\alpha = 0.05$ 下采用相关系数法进行检验^[10]:

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i - n \bar{x} \bar{y}}{\sqrt{(\sum_{i=1}^n x_i^2 - n \bar{x}^2)(\sum_{i=1}^n y_i^2 - n \bar{y}^2)}} = -0.960953235$$

由计算结果得: $|\rho| > \rho_{(n-2, \alpha)}$, 故故障间隔时间符合指数分布。

2.4 灰关联度分析法决策分布模型

根据灰色关联度分析方法的具体计算过程,下面分别计算两种分布的关联度值。

首先计算增量序列,其中 Δy_1 表示威布尔分布拟合的数据列的增量, Δy_2 表示指数分布拟合的数据列的增量, Δy_0 表示原始整理的数据列的增量。然后分别进行标准化、计算各时间点的关联系数。最后分别求得威布尔分布和指数分布拟合数据列与采集故障数据列的关联度 $r(X_1, X_0)$ 和 $r(X_2, X_0)$ 为:

$$r(X_1, X_0) = \frac{1}{b-a} \sum_{k=2}^n \Delta t_k \xi(t_k) = 0.070658013$$

$$r(X_2, X_0) = \frac{1}{b-a} \sum_{k=2}^n \Delta t_k \xi(t_k) = 0.092199401$$

从几何上,灰关联度分析法实际上是一种曲线间

几何形状的分析比较,即几何形状越接近,则关联度越大,反之则小。所以根据上述计算结果,指数分布的灰色关联度更大,所以确定 MSK 系列数控磨床的故障间隔时间的分布符合指数分布。

3 结论

灰色关联度分析法已成功应用于很多领域,并取得很好的效果。但在数控磨床可靠性领域的应用却几乎没有。本文将灰色关联度分析法引入数控磨床故障间隔时间分布模型的决策中,能够定量的择优选择分布模型,避免了很多认为因素,使可靠性评价的结果更准确、更具说服力。同时,将 MKS 系列数控磨床作为实例,运用灰关联度分析法进行故障间隔时间分布模型的决策,详细说明了灰关联分析的具体方法和步骤。最后,灰关联度分析简单、实用,在数控磨床可靠性研究过程中发挥了很大作用。

[参考文献]

- [1] 邱邵虎, 吴必才, 苏春. 国产数控机床可靠性现状及其改善对策研究[J]. 中国制造业信息化(学术版) 2009 38(7): 1-4.
- [2] 肖新平, 毛树华. 灰预测与决策方法[M]. 北京: 科学出版社 2013.
- [3] 吕峰, 刘翔, 刘泉. 七种灰色系统关联度的比较研究[J]. 武汉工业大学学报 2000 22(2): 41-43.
- [4] 周媛, 张颖超, 张大庆. 基于灰关联度分析的综合评价模型的应用研究[J]. 科技管理研究 2006(1): 230-232.
- [5] 王坚强. 关于灰色绝对关联计算模型的探讨[J]. 数学理论与应用 2000(3): 103-108.
- [6] 金伟娅, 张康达. 可靠性工程[M]. 北京: 化学工业出版社 2005.
- [7] 周广文, 贾亚洲. 专用计算机数控机床故障率实验研究[J]. 组合机床与自动化加工技术 2005(1): 45-48.
- [8] Nelson W. Analysis of accelerated life test data-part I: The Arrhenius model and graphical methods[J]. Electrical Insulation IEEE Transactions on. 2007(4): 165-181.
- [9] Zhang L F et al. A study of two estimation approaches for parameters of weibull distribution based on WPP[J]. Reliability Engineering and System Safety 2007(92): 360-368.
- [10] 苟卫东. 高速加工中心可靠性统计技术应用[J]. 制造技术与机床 2012(11): 56-61. (编辑 赵蓉)

(上接第 77 页) 实现柴油机的故障诊断。

[参考文献]

- [1] 赵龙庆, 王裕鹏. 基于小波包分析和神经网络柴油机故障诊断研究[J]. 小型内燃机与摩托车 2009 38(3): 9-12.
- [2] 刘占军, 康建设, 张星辉. 基于粒子群优化的支持向量机在机械模式分类中的应用[J]. 微计算机应用 2010 31(12): 8-13.
- [3] 杨勇, 郭凯, 马西丁. 基于小波包和支持向量机的提升机滚动轴承故障诊断研究[J]. 矿山机械 2011 40(11): 41-44.
- [4] 袁浩东, 陈宏, 侯亚丁, 等. 基于优化支持向量机的轴承故障诊断方法研究[J]. 机械设计与制造 2012(5):

118-120.

- [5] 费胜巍, 苗玉彬, 刘成良, 等. 基于粒子群优化支持向量机的变压器故障诊断[J]. 高电压技术 2009 35(3): 509-513.
- [6] 邵信光, 杨慧中, 陈刚. 基于粒子群优化算法的支持向量机参数选择及其应用[J]. 控制理论与应用 2006, 23(5): 740-743.
- [7] 范江东. 基于粒子群优化与支持向量机的齿轮箱故障诊断研究[D]. 太原: 中北大学 2010. (编辑 赵蓉)