

基于熵权法的数控机床可靠性综合评价

申桂香, 张英芝, 薛玉霞, 陈炳锟, 何宇

(吉林大学 机械科学与工程学院, 长春 130022)

摘要:通过一种客观赋权的熵权法来评价数控机床的可靠性,有效克服了加权综合评价法中主观确定权重的缺陷。根据所构建的综合评价指标体系(平均首次故障间隔时间 MTTFF、平均故障间隔时间 MTBF 和当量故障率 D)和两种加工中心的可靠性数据,计算出各个指标的权重并对加工中心的可靠性进行了综合评价。

关键词:机床; 熵权法; 可靠性评价; 平均首次故障间隔时间; 平均故障间隔时间; 当量故障率

中图分类号:TG659 **文献标识码:**A **文章编号:**1671-5497(2009)05-1208-04

Comprehensive evaluation on reliability of numerically-controlled machine tool based on entropy weight method

SHEN Gui-xiang, ZHANG Ying-zhi, XUE Yu-xia, CHEN Bing-kun, HE Yu
(College of Mechanical Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China)

Abstract: An entropy weight method with objective weighting was used to evaluate the reliability of the numerically-controlled machine tool. The method avoids the shortcoming of the weighted comprehensive evaluation method which lies in the subjectivity in weight determination. Based on the built comprehensive evaluation indicator system (mean time to first failure MTTFF, mean time between failures MTBF, equivalent failure rate D) and the reliability data from the 2 types of machining center, the weights of indicators were calculated and the comprehensive evaluation on the reliability of the machining centers was performed.

Key words: machine tool; entropy weight method; reliability evaluation; mean time to first failure (MTTFF); mean time between failures(MTBF); equivalent failure rate

目前,许多数控机床企业都把平均故障间隔时间作为评价产品可靠性的指标,只要平均故障间隔时间长,就认为可靠性高,这实际上是不全面的。因此进行数控机床可靠性评价方法研究具有重要意义^[1-2]。

数控机床可靠性首先决定于在设计过程中赋予的固有可靠性,其次决定于数控机床的使用、维

修质量及故障对系统功能的危害程度和影响。参考汽车、货车、汽油机、柴油机等可修产品,数控机床的可靠性评价指标确定为以下几项:平均首次故障间隔时间 MTTFF、平均故障间隔时间 MTBF 和当量故障率 D^[3-4]。可靠性评价方法中,权重是综合评价的一个重要指标,合理分配权重是量化评估的关键。常用的评价方法在确定指标

收稿日期:2007-11-01.

基金项目:“863”国家高技术研究发展计划项目(2007AA04Z402);吉林省科技发展计划项目(20050535).

作者简介:申桂香(1957-),女,教授,博士生导师. 研究方向:面向生命周期的数控装备可靠性技术.

E-mail:shengx@jlu.edu.cn

通信作者:张英芝(1970-),女,副教授,博士. 研究方向:数控机床可靠性增长技术. E-mail:zhangyz@jlu.edu.cn

的相对权重时主要根据评价者判断的主观信息进行量化和综合,由于评价过程的信息不对称,人为给出的权重会使评价结果不能完全反映数控机床产品的真实可靠性水平^[5-6]。为克服这一缺陷,本文采用一种客观赋权方法——熵权法来评价数控机床的可靠性水平。

1 可靠性评价指标的计算

1.1 平均首次故障时间 MTTFF

首次故障时间是产品首次进入可用状态直至首次故障发生的总持续工作时间。平均首次故障时间是描述可修系统首次故障状况的一个可靠性特征量,它相当于不可修产品的寿命问题^[7]。平均首次故障时间(即首次故障前时间的期望值),常用 MTTFF(Mean time to first failure)表示。

本次研究的两种加工中心(01型9台,02型10台)首次故障时间数据见表1。

表1 某系列加工中心首次故障时间

Table 1 MTTFF of a certain series of machining center

型号	首次故障时间/h				
01	776.09	143.31	513.90	157.39	1007.25
	346.31	272.90	475.92	9.36	
02	176	0.5	209.33	510	224
	478	353	50	32	398

假设首次故障时间数据服从二参数威布尔分布,采用最小二乘法进行参数估计,线性相关系数进行检验,经分析发现数据服从指数分布,即

$$f_1(t) = 0.0028\exp(-0.0028t), t \geq 0$$

$$f_2(t) = 0.0041\exp(-0.0041t), t \geq 0$$

可得首次故障时间的点估计值为

$$\text{MTTFF}_1 = 442.49 \text{ h}, \text{MTTFF}_2 = 243.08 \text{ h}.$$

1.2 平均故障间隔时间 MTBF

平均故障间隔时间 MTBF (Mean time between failures),是当前国内外公认的评价数控机床可靠性的特征量。两类加工中心平均故障间隔时间数据见表2。

与首次故障时间分析方法类似,经分析发现数据服从二参数威布尔分布,进而得出平均故障间隔时间的点估计值分别为

$$\text{MTBF}_1 = 359.45 \text{ h}, \text{MTBF}_2 = 346.15 \text{ h}.$$

1.3 当量故障率 D

在评价数控机床的可靠性时,需要考虑不同级别故障发生的次数^[8],轻微故障一般情况下不影响机床运行,但仍需要维修,在可靠性评价中,

表2 某系列加工中心平均故障间隔时间/h

Table 2 MTBF table of a certain series of machining center/h

型号	故障间隔时间/h						
01	776.09	114.93	145.95	1058.38	513.90	482.00	
	363.90	336.04	337.64	251.38	457.58	596.92	
	1.75	104.37	143.31	554.34	639.31	346.31	
	219.80	448.78	793.57	332.55	1007.25	134.15	
	85.90	389.28	65.43	249.78	59.39	592.12	
	964.43	752.49	475.92	212.65	759.03	289.36	
	127.02	41.73	52.07	94.24	272.90	741.86	
	657.01	18.64	113.62	105.28	359.97	218.97	
	335.24	250.72	45.16	314.41	196.28	16.10	
	13.99	242.81	102.14	99.69	60.81	870.35	
	524.40	157.39	20.90				
02	176.0	248.00	10.50	472.00	45.00	39.00	
	209.33	261.25	510.00	120.00	224.00	348.00	
	267.50	32.00	50.00	138.50	398.00	353.00	
	478.00	137.06					

也需要给予考虑。基于上述原因,引入“当量故障数”和“当量故障率”的概念。

按照表3中所介绍的当量故障系数的概念,将一般故障的当量故障系数定为1,据此定出其他级别故障的当量故障系数。

表3 当量故障系数

Table 3 Coefficient of equivalent failure

j	故障类别	当量故障系数 ϵ_j
1	致命故障	100
2	严重故障	10
3	一般故障	1
4	轻微故障	0.2

把按当量故障系数将其他各级故障系数折算到一般故障的次数,称为当量故障数;而把平均每1000 h 每台加工中心的当量故障数称为当量故障率。

当量故障率计算公式为

$$D = \frac{1000}{nt} \sum_{j=1}^4 \epsilon_j r_j \quad (1)$$

式中:n为加工中心的台数;t为试验时间; ϵ_j 为第j类故障的当量故障系数; r_j 为第j类故障发生的累积次数; $\sum_{j=1}^4 \epsilon_j r_j$ 为当量故障数。

根据故障分类和式(1)确定出加工中心故障情况,以01型加工中心为例,故障统计如表4所示。

表4 故障次数统计表

Table 4 Statistical table of failure times

机床 编号	故障原因	故障	故障
		类别	次数
001	X轴端轴承损坏	2	1
	A轴回零开关松动	3	1
	机床门滑道移出	3	1
	冷却水管损坏	3	1
002	手摇脉冲发生器内线断	3	1
	排屑器紧固螺母松动	4	1
	压缩空气质量差	4	1
	尾座顶针液压阀失电	4	1
	主轴轴承损坏	2	1
	A1轴涡轮间隙较大	3	1
003	机床侧玻璃胶老化脱落	4	1
	电源风扇报警	2	1
	Z轴链条损坏	2	1
	A轴回零开关松动	3	1
004	压缩空气质量差	4	1
	气源压力不足	4	1
	X轴端轴承损坏	2	1
005	开关把手断	3	1
	灯泡烧坏	3	2
	灯头接触不良	3	1
	接触不良,开关信号错误	4	1
	阀上密封圈破损	3	1
	电机失电	4	1
	三位五通阀损坏	3	1
	刀库三位五通换向阀损坏	3	1
	尘土阻塞	4	1
	卡阻导致跳闸	4	1
006	灯泡烧坏	3	1
	接触不良导致接近开关信号错误	4	2
	参数故障	4	1
	气阀损坏	3	1
	换向阀坏	3	1
	少一相电	3	2
007	开关把手断	3	1
	灯泡烧坏	3	2
	接触不良导致接近开关信号错误	4	1
	接触不良导致接近开关信号错误	4	1
	电机不旋转	4	1
	电机不平衡	4	1
008	灯泡烧坏	3	1
	指示灯烧坏	3	1
	焊点断开	3	1
	参数设定出错	4	1
	弹簧力设置过大,导致旋转阻力过大	4	1
	出口节流阀损坏	3	1
	X轴端轴承损坏	2	1
	空气开关跳闸	3	1
009	参数设定出错	4	1
	刀库参数出错	4	1
	出口节流阀损坏	3	1
	刀库换向阀坏	3	1
	换向阀坏	3	2
	弹簧力设置过大,导致旋转阻力过大	4	1
	回零时X轴冲走硬限位	4	1
	尘土阻塞	4	1
	跳闸	4	1
	空气开关跳闸	3	1
	水泵缺相	3	1

01型系列加工中心的当量故障率为

$$D_1 = 1000 \times \frac{6 \times 10 + 32 \times 1 + 25 \times 0.2}{9 \times 2691} =$$

4.01次/1000 h

同理可得

$$D_2 = 1000 \times \frac{9 \times 10 + 11 \times 1}{10 \times 756} =$$

13.36次/1000 h

2 基于熵值法的可靠性综合评价

2.1 熵的概念

信息是系统有序程度的一个度量;而熵则是系统无序程度的一个度量,两者绝对值相等,但符号相反^[9-11]。根据信息论的基本原理,如果系统可能处于不同状态,且每种状态出现的概率为 p_i ($i=1,2,3,\dots,m$),则该系统的熵就定义为

$$E = -k \sum_{i=1}^m p_i \ln p_i$$

设有 m 个待评项目, n 个评价指标, 形成原始指标数据矩阵 $\mathbf{R}=(r_{ij})_{m \times n}$, 由于本文所采用的数据来源于数控机床厂家可靠性考核的第一阶段, 属于可靠性水平评估阶段, 没有前期的数据进行分析, 因此本文用两种型号加工中心生产厂家的数据进行可靠性水平对比分析。其中, m 代表本次待评价加工中心产品, 即 $m=2$, n 表示平均首次故障间隔时间、平均故障间隔时间和当量故障率 3 个指标, $n=3$, 则原始数据是一个 2×3 阶的矩阵, 即

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 442.49 & 359.45 & 4.01 \\ 243.08 & 346.15 & 13.36 \end{bmatrix}$$

2.2 指标权重计算

对于某个指标 r_j 有信息熵为

$$E_j = -k \sum_{i=1}^m p_{ij} \ln p_{ij} \quad (2)$$

式中: p_{ij} 为第 j 项指标下第 i 种状态指标值的比重, 即 $p_{ij} = r_{ij} / \sum_{i=1}^m r_{ij}$; k 为系数, 取 $k=1/\ln n=1/\ln 3=0.910$ 。

根据式(2)可得各个指标的信息熵为

$$p_{ij} = \begin{bmatrix} 0.645 & 0.509 & 0.230 \\ 0.355 & 0.491 & 0.770 \end{bmatrix}$$

$$E_1 = -0.91 \times (0.645 \times \ln 0.645 + 0.355 \times \ln 0.355) = 0.592$$

同理, $E_2 = 0.631$, $E_3 = 0.492$ 。

权重的计算为

$$w_j = (1 - E_j) / \sum_{j=1}^3 (1 - E_j) \quad (3)$$

$$w_1 = 0.318, w_2 = 0.287, w_3 = 0.395$$

2.3 可靠性综合评价

在此引用汽车、货车、汽油机、柴油机等综合评价的计算方法,以100分为满分,可靠性得分值Q的计算式为

$$Q = w_1 \frac{MTBF}{MTBF_m} + w_2 \frac{MTTFF}{MTTFF_m} + w_3 e^{-\frac{D}{D_0}} \quad (4)$$

式中:当 $MTBF > MTBF_m$ 时,取 $MTBF = MTBF_m$;当 $MTTFF > MTTFF_m$ 时,取 $MTTFF = MTTFF_m$

根据不同的产品不同时期的要求,给出以上这些系数和指标值。加工中心属于机电产品,参考文献[12],国内引进国外加工中心的可靠性指标为800~1000 h,国内攻关产品的MTBF只有500~600 h。所以,本文确定产品的可靠性满分值为 $MTBF_m = 600$ h; $MTTFF_m = 400$ h; $D_0 = 8.19$ 次/1000 h。

将上述指标代入式(4)得

$$Q_1 = 0.318 \times \frac{442.49}{400} + 0.287 \times \frac{359.45}{600} + 0.395 \times e^{-\frac{4.01}{8.19}} = 0.765$$

$$Q_2 = 0.318 \times \frac{243.08}{400} + 0.287 \times \frac{346.15}{600} + 0.395 \times e^{-\frac{13.36}{8.19}} = 0.44$$

从上述计算结果可以看出,第一种型号加工中心的可靠性高于第二种型号的加工中心。

3 结束语

将熵权法的基本原理应用于加工中心可靠性综合评价,不仅可以看出平均首次故障间隔时间、平均故障间隔时间和当量故障率3个指标对加工中心可靠性的重要程度,而且可以通过计算综合评价值来分析两种型号加工中心的可靠性水平。显然,这种基于加工中心生产厂家提供的指标数据的客观赋权法是一种切实可行的数控机床可靠性评价方法。在实际工作中可根据实际情况对评价指标加以调整,使评价结果更符合实际。

参考文献:

[1]《数控装备及系统质量控制》编委会.数控装备及系

统质量控制[M].北京:机械工业出版社,1997.

[2]苗春亮,廖志浓,吴陆恒.顾客满意度测量是企业长期生存和发展的可靠保障[J].江西冶金,2002(4):45-47.

Miao Chun-liang, Liao Zhi-nong, Wu Lu-heng. Customer satisfaction measurement is reliable security of development and subsistence for the enterprise [J]. Jiangxi Metallurgy, 2002(4):45-47.

[3]王秉刚.汽车可靠性工程方法[M].北京:机械工业出版社,1991.

[4]中国汽车工业总公司.汽车产品质量检验评定[M].北京:机械工业出版社,1991.

[5]郭东强.利用熵权系数法评价企业信息化建设项目[J].运筹与管理,2003(3):76-79.

Guo Dong-qiang. Application of entropy weight coefficient method to the evaluation of enterprise informatization[J]. Operations Research and Management Science, 2003(3):76-79.

[6]王彬.熵与信息[M].陕西:西北工业大学出版社,1994.

[7]敖长林,乔金友,戴有忠.威布尔过程场合下现场可靠性试验的统计分析[J].东北农业大学学报,2000,31(3):303-306.

Ao Chang-lin, Qiao Jin-you, Dai You-zhong. Statistical analysis of the field credibility test under the situation of weibull process[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2000,31(3):303-306.

[8]刘裕源.汽车可靠性试验[J].汽车技术,2000(4):402-424.

Liu Yu-yuan. Automobile reliability test[J]. Automotive Engineering, 2000,(4):402-424.

[9]刘树林,邱莞华.多属性决策基础理论研究[J].系统工程与电子技术,1998,20(7):24-26.

Liu Shu-lin, Qiu Wan-hua. Studies on the basic theories for MADM[J]. Systems Engineering and Electronic Technology, 1998,20(7):24-26.

[10]邱莞华.管理决策与应用熵学[M].北京:机械工业出版社,2001.

[11]陈斑.决策分析[M].北京:科学出版社,1987.

[12]贾亚洲.提高数控机床可靠性加快振兴装备制造业的关键[J].中国制造业信息化,2006(6):42-43.

Jia Ya-zhou. The key of advancing numerically-controlled machine reliability to expedite revival equipment manufacturing[J]. China Manufacturing Informationization,2006(6):42-43.