文章编号:1000-582X(2012)01-007-04

数控机床最佳预防维修间隔时间的确定

申桂香,谷东伟,张英芝,王志琼,郑 珊
(吉林大学 机械科学与工程学院,长春 130022)

摘 要:以采集的 5 台国产某型号数控机床 1 a 的现场故障数据为基础,通过参数估计、线性相关性检验和假设检验确定故障过程服从二参数威布尔分布;在有效性最大原则的基础上,提出一种在修复型维修状态下的最佳预防维修间隔时间模型,并求得此型号数控机床的最佳预防维修间隔时间;最后根据机床的最佳预防维修间隔时间建立相应的维修计划,最大限度保证了机床的使用性能并减少企业维修费用。

关键词:可靠性;威布尔分布;预防维修;有效度

中图分类号:TB114.3 **文献标志码**:A

Optimal preventive maintenance interval period of CNC

SHEN Gui-xiang, GU Dong-wei, ZHANG Ying-zhi, WANG Zhi-qiong, ZHENG Shan
(College of Mechanical Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130022, P. R. China)

Abstract: On the basis of failure data gathered from 5 NC machine tools of one type in one year, a two-parameter Weibull distribution model is established, and this model has passed linear correlation test and hypothesis testing. On the principle of the most effectiveness, the best preventive maintenance intervals model on the state of reparative maintenance is brought forward, and the best preventive maintenance intervals of this type have been calculated. In the end, an appropriate maintenance plan is brought forward according to the best preventive maintenance intervals, and the maintenance cost is greatly reduced and the availability of this type of NC machine tool are kept at the same time.

Key words: reliability; Weibull distribution; preventive maintenance; validity

数控机床因其稳定的加工精度、较高的生产率和良好的柔性,成为现代企业不可或缺的重要基础装备之一。但任何设备在使用中都不可避免地会出现故障,打乱生产计划,影响生产活动,据统计,数控机床维修费用占其整个生命周期费用的 20%～30%[1-2]。因此,进行机床维修方式研究,制定合理的机床维修制度,对于有效预防故障发生,提高维修保养效率,进而提高机床的使用率和减少企业经济损失具有重要意义[3]。

通常机床的维修分为预防维修和事后维修。由于预防维修可以尽量安排在非生产时间内进行,能使停机造成的损失减到最小,所以到目前为止,在机械系统中还是广泛采用这种维修方式[4-5]。预防维修是通过建立一套适合企业自己的数控机床维修与保养管理制度,实现对数控机床实施定期不同等级的维护和保养措施,从而最大程度保证数控机床始终处于最佳工作状态。通常情况下它包括预防维修计划、保养实施范围、保养人及维修间隔时间。通过预防维修能够减少和避免恶性事件的发生。预防维

收稿日期:2011-08-10
基金项目:“高档数控机床与基础制造装备”科技重大专项(2010ZX04014-011);吉林大学科学前沿与交叉学科创新项目(200903165)
作者简介:申桂香(1957-),女,吉林大学教授,博士生导师,研究方向为面向生命周期的数控装备可靠性,(E-mail)shengx@jlu.edu.cn。

修进行得频繁不仅会影响企业的生产效率，还会使维修费用明显增加。因此预防维修的首要问题是如何确定最佳预防维修间隔时间。对于生产企业来说如何确定数控机床的预防维修间隔时间，最大限度地保证机床的使用性能并减少维修费用就显得尤为重要[6-7]。笔者在现场采集故障数据的基础上，建立一种在维修状态下最佳预防维修间隔时间的数学模型，求得此型号机床的最佳预防维修间隔时间，制定相应的预防维修计划，保证企业生产并降低维修费用。

1 故障率模型

本次可靠性试验是针对 5 台某型号国产数控机床进行 1 a 的现场考核，共计得到 24 个故障数据，见表 1，其中 t 表示故障间隔时间(h)，m 表示维修时间(h)。

表 1 数控机床的故障数据表

机床编号	A01				A02					
t/h	901	300	2 462	361	601	120	90	1 141	961	
m/h	4	3	6	2	3	8	1	12	5	
机床编号	A03				A04					
t/h	901	631	90	1 221	1 351	180	170	180	581	971
m/h	3	5	1	4	3	4	8	8	5	3
机床编号	A05									
t/h	601	100	631	661	511					
m/h	3	5	2	4	6					

1.1 故障间隔时间分布模型的参数估计

系统故障间隔时间的分布模型包括指数分布、对数正太分布和威布尔分布等多种，对于机械系统首先考虑服从威布尔分布。这里假设故障间隔时间服从二参数威布尔分布。

两参数威布尔分布的概率密度函数、分布函数和故障率函数分别为

$$f(t)=\frac{\beta}{\alpha}\left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta-1}\exp\left[-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta}\right], t\geqslant 0; \quad (1)$$

$$F(t)=\int_0^t f(t)\mathrm{d}t=1-\exp\left[-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta}\right], t\geqslant 0; \quad (2)$$

$$\lambda(t)=\frac{\beta}{\alpha}\left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta-1}, t\geqslant 0。 \quad (3)$$

采用文献[8]中最小二乘法对威布尔分布进行参数估计得到

$$\beta=1.13, \alpha=698,$$

则故障率函数可表示为

$$\lambda(t)=\frac{1.13}{698}\left(\frac{t}{698}\right)^{0.13}, t\geqslant 0。 \quad (4)$$

故障率函数如图 1 所示，从图上可以看出此数控机床的故障率函数是随时间逐渐增加的。

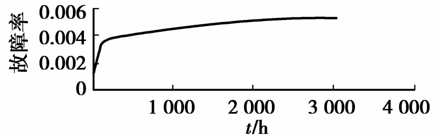

图 1 故障率曲线

1.2 威布尔分布的线性相关性检验

对于威布尔分布的拟合效果，笔者采用相关系数法进行检验。相关系数为

$$\hat{\rho}=\frac{\sum_{i=1}^{n}x_i y_i-n\bar{x}\bar{y}}{\left[\left(\sum_{i=1}^{n}x_i^2-n\bar{x}^2\right)\left(\sum_{i=1}^{n}y_i^2-n\bar{y}^2\right)\right]^{\frac{1}{2}}}。 \quad (5)$$

当 $\hat{\rho}>\rho_{(n-2v)}$ 时，认为 x 与 y 之间的线性相关性显著。其中，$\rho_{(n-2v)}$ 为相关系数 ρ 的临界值，可查表求出，亦可用近似公式计算。笔者采用近似公式[9]，取显著性水平 $\alpha=0.1$，则

$$\rho_{(n-2,\alpha)}=\frac{1.645}{\sqrt{\upsilon+1}}, \quad (6)$$

式中 $\upsilon=n-2$，n 为故障数据个数。

下面通过相关系数法对威布尔分布进行假设检验。由式(5)得，$\hat{\rho}=0.984\ 2$。因为 $n=24$，所以由式(6)得，$\rho_{(n-2v)}=0.343$。由此得出：$\hat{\rho}>\rho_{(n-2v)}$，认为 y 与 x 的线性相关性显著，此型号数控机床的故障间隔时间服从威布尔分布。

1.3 威布尔分布的假设检验

常用假设检验法有 d 检验法和 χ^2 检验法，但 d 检验法比 χ^2 检验法精细，而且还适用于小样本的情况[10]。此处对上文所推导的数控机床故障间隔时间分布函数进行 d 检验(柯尔莫哥洛夫-斯米尔诺夫检验，或 k-s 检验)。

d 检验法是将 n 个试验数据按由小到大的次序排列，根据假设的分布，计算每个数据对应的

$F_0(t_i)$,将其与经验分布函数 $F_n(t_i)$ 进行比较,其中差值的最大绝对值即检验统计量 D_n 的观察值。将 D_n 与临界值 $D_{n,\alpha}$ 进行比较。满足下列条件,则接受原假设,否则拒绝原假设。

$$D_n = \sup_{-\infty<x<+\infty} |F_n(t_i) - F_0(t_i)| = \max\{d_i\} < D_{n,\alpha}, \tag{7}$$

式中:$F_0(t_i)$ 为原假设分布函数,即

$$F_0(t) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t}{698}\right)^{1.13}\right];$$

$F_n(t)$ 为样本大小为 n 的经验分布函数,即

$$F_n(t) = \begin{cases} 0, t < t_i; \\ \dfrac{i}{n}, t_i < t < t_{i+1}, (t_1 < t_2 < \cdots < t_n); \\ 1, t \geqslant t_n; \end{cases}$$

$D_{n,\alpha}$ 为临界值。

通过计算得到 D_n 的观察值为0.2,取显著性水平 $\alpha=0.1$,则查表[11]得

$$D_{n,\alpha} = 0.242。$$

由于 $D_n < D_{n,\alpha}$,因此接收原假设,即认为该产品平均故障间隔时间服从威布尔分布。

2　最佳预防维修间隔时间确定

定期预防维修不能保证未到维修期而绝对不发生故障,若发生故障要对其进行事后维修,这时的事后维修又有两种情况,分为修复型维修和更新型维修[12-13],在定期预防维修条件下,有些机床在未达到维修期限时也会发生偶然故障或某些性能参数下降到某一限定值的时候应立即进行维修,此时的维修假设只修复更换故障部位,对其他部分不作更换,即此情况下的机床维修属于修复型维修[14-15]。在修复型维修方式下最佳预防维修间隔时间的确定有3种方式[16]:1)有效度最大原则;2)最小维修费用原则;3)达到要求的可靠性和安全性水平。对于数控机床来说为保证企业的生产不停滞,应该按照有效度最大的原则来确定。

2.1　按工作有效度最大确定最佳维修时间

对于数控机床,假设预防维修间隔时间为 T,机床工作 T 小时后进行预防性维修,平均预防性维修时间为 $\bar{\tau}_p$,修复后机床继续工作,但未到工作时间 T,而是在 T_1 时刻发生故障,立即对机床进行事后维修,平均事后维修时间为 $\bar{\tau}_c$,修复后工作到 T_2,则 $T = T_1 + T_2$。之后进行预防性维修,维修间隔周期如图2所示。

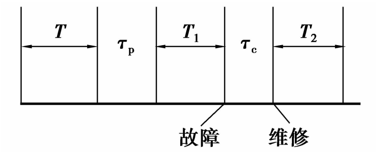

图2　修复型维修间隔周期

从图2可以看出 T 就是平均工作时间 MUT(Mean Up Time),平均不可工作时间 MDT(Mean Down Time)可以表示为

$$\mathrm{MDT} = \bar{\tau}_p + \bar{\tau}_c \int_0^T \lambda(t)\mathrm{d}t, \tag{8}$$

式中:$\lambda(t)$ 为产品故障率;$\int_0^T \lambda(t)\mathrm{d}t$ 为一个间隔时间内故障发生的比例。

机床的工作有效度为

$$A = \frac{\mathrm{MUT}}{\mathrm{MUT}+\mathrm{MDT}} = \frac{T}{T + \bar{\tau}_p + \bar{\tau}_c \int_0^T \lambda(t)\mathrm{d}t}, \tag{9}$$

对式(9)求导并使 $\frac{\mathrm{d}A}{\mathrm{d}T}=0$,可得机床的最佳维修间隔时间需满足

$$T\lambda(T) - \int_0^T \lambda(T)\mathrm{d}t = \frac{\bar{\tau}_p}{\bar{\tau}_c}。 \tag{10}$$

故障率函数 $\lambda(t)$ 对于不同分布,有不同的形式,所以通过式(10)得到的结果也不尽相同。

对于早期故障期,系统正随着时间进展而改善,故障率函数 $\lambda(t)$ 为减函数,则 $T\lambda(T) < \int_0^T \lambda(T)\mathrm{d}t$,即 $\frac{\bar{\tau}_p}{\bar{\tau}_c} < 0$,为负,$T$ 无合理解。在此种情况下,预防性维修实际上有害无益,不可取。

对于偶然故障期,$\lambda(t)=\lambda$ 为常数,即其故障函数服从指数分布,此时 $\bar{\tau}_p=0$。表明在产品整个寿命期间,下一个时间增量的失效率保持不变,维修后系统像"新的一样好",与它工作多长时间无关。说明在此情况下进行定期预防维修是无效的。维修将不影响失效率。

对于耗损故障期,故障率函数 $\lambda(t)$ 为增函数,则 $T\lambda(T) > \int_0^T \lambda(T)\mathrm{d}t$,即 $\frac{\bar{\tau}_p}{\bar{\tau}_c} > 0$,说明计划的任何时刻的维修将改善系统的可靠性。如图3所示,在此情况下的预防性维修才是有益的。

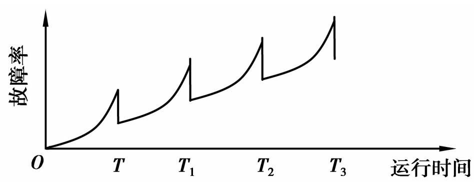

图3　预防维修与故障率关系

对处于耗损期的系统，由式(10)可以得到合理的最佳维修间隔时间为

$$T=\frac{1}{\lambda(T)}\left[\frac{\bar{\tau}_p}{\bar{\tau}_c}+\int_0^T\lambda(t)\mathrm{d}t\right]。\tag{11}$$

如果系统故障率函数符合二参数威布尔分布，即故障率如式(3)所表示，则系统的最佳预防维修间隔时间可表示为

$$T=\alpha\left[\frac{\bar{\tau}_p}{(\beta-1)\bar{\tau}_c}\right]^{\frac{1}{\beta}}。\tag{12}$$

2.2 实例计算

根据以上的计算可知，数控机床的故障间隔时间服从两参数威布尔分布，其中形状参数 $\beta=1.13$，尺度参数 $\alpha=698$，根据企业的预防维修时间的记录，可得平均预防性维修时间为 $\bar{\tau}_p=0.5$ h，平均事后维修时间由表 1 可得：$\bar{\tau}_c=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}m_i=4.5$ h。

代入式(12)可以确定此数控机床的预防维修时间

$$T=\alpha\left[\frac{\bar{\tau}_p}{(\beta-1)\bar{\tau}_c}\right]^{\frac{1}{\beta}}=607\ \text{h},$$

T 时间间隔内数控机床的失效率为

$$\lambda(T)=0.001\,58。$$

3 结 论

笔者基于数控机床的现场故障数据建立某型号机床的故障率模型。在维修型模式下采用工作有效度最大原则建立求解预防性最佳维修间隔时间的数学模型，得到数控机床的最佳预防维修间隔时间。排除人为因素干扰，避免生产部门对机床的维修过剩和不足，在保证机床最大限度运行的条件下节约企业成本，提高企业的生产效率。通过对故障数据的实时采集与更新，建立不同时期数控机床的故障率模型，实时更新机床的预防维修时间，修改企业的维修计划，实现企业对生产设备的“动态”管理，为进一步研究机床的维修提供了参考。

参考文献：

[1] MAO Z Y, SONG B W, PAN G, et al. Optimal policy of preventive maintenance period to series systems[J]. Fire Control & Command Control, 2009, 34(4): 63-66.

[2] ETI M C, OGAJI S O T, PROBERT S D. Reducing the cost of preventive maintenance(PM) through adopting a proactive reliability-focused culture [J]. Applied Energy, 2006, 83: 1235-1248.

[3] DAS K, LASHKARI R S, SENGUPTA. S. Machine reliability and preventive maintenance planning for cellular manufacturing systems[J]. European Journal of Operational Research, 2007, 183(1): 162-180.

[4] 杜清玲，李美芳，刘家科. 机械设备预防维修周期的确定[J]. 机床与液压，2000(6)：92-93.
DU QING-LING, LI MEI-FANG, LIU JIA-KE. How to decide the preventive maintenance period of machinery[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2000(6): 92-93.

[5] SUN Y, MA L, MATHEW J. Failure analysis of engineering systems with preventive maintenance and failure interactions [J]. Computers & Industrial Engineering, 2009, 57(2): 539-549.

[6] SONG D P. Production and preventive maintenance control in a stochastic manufacturing system[J]. International Journal of Production Economics, 2009, 119(1): 101-111.

[7] RADHOUI M, REZG N, CHELBI A. Integrated maintenance and control policy based on quality control[J]. Computers & Industrial Engineering, 2010, 58(3): 443-451.

[8] 李研. 国内外数控车床可靠性对比分析[D]. 长春：吉林大学，2006.

[9] 王超，王金. 机械可靠性工程[M]. 北京：冶金工业出版社，1992.

[10] 唐珂. 数控冲床可靠性关键技术研究[D]. 长春：吉林大学，2007.

[11] 贺国芳. 可靠性数据的收集与分析[M]. 北京：国防工业出版社，1995.

[12] 何庆. 预防维修周期的数学模型[J]. 农业机械学报，2005，36(2)：153-154.
HE QING. Mathematical model of preventive maintenance period [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2005, 36(2): 153-154.

[13] RACHANIOTIS N P, PAPPIS C P. Preventive maintenance and upgrade system: optimizingthe whole performance system by components' replacement or rearrangement[J]. International Journal of Production Economics, 2008, 112(1): 236-244.

[14] MOGHADDAM K S, USHER J S. Preventive maintenance and replacement scheduling for repairable and maintainable systems using dynamic programming[J]. Computers & Industrial Engineering, 2011, 60(4): 654-665.

[15] BIGGS M B, ZUO M J, LI X H. Modelling and optimizing sequential imperfect preventive maintenance[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2009, 94(1): 53-62.

[16] KUMAR U D. 可靠性、维修与后勤保障：寿命周期方法[M]. 刘庆华，宋宁哲，译. 北京：电子工业出版社，2010.

（编辑 张 苹）