doi:10.3772/j.issn.1002-0470.2017.04.009

基于故障数据的设备运行可靠性分析与评估①

赵金萍②* 熊君星③** 刘建胜**

(* 南昌大学科学技术学院 南昌 330029)

(** 南昌大学机电工程学院 南昌 330031)

摘 要 基于故障数据,对设备运行可靠性进行了分析与评估。对某汽车制造企业的一台卧式加工中心的故障数据进行了统计与分析,形成观测样本,并拟合出了设备故障间隔时间的概率密度分布函数和累计分布函数曲线,从而推断得出其分布规律可能服从威布尔分布。然后通过对威布尔分布函数相关性进行检验,验证了该设备的故障间隔时间分布服从威布尔分布。最后根据统计结果计算得出了该设备的各项可靠性评估指标。

关键词 故障数据, 运行可靠性, 可靠性评估

0 引 言

设备作为实际的制造资源,是生产任务的具体执行者,其技术状态的好坏,直接影响制造企业生产产品的数量与质量的高低,决定制造企业的服务水平和竞争实力的高低,因此,设备在制造企业中占有十分重要的地位。当前越来越多的制造企业因为产品生产的需求,加大了对先进设备的购置和先进技术的应用。随之而来的是这些设备的维护成了一大难题,随着制造设备复杂化和自动化程度的不断提高,设备零部件众多且紧密耦合,增加了发生故障的可能性,零部件故障会降低设备的运行可靠性[1],设备故障所造成的安全性损失和经济性损失巨大,所以提高设备运行可靠性极为重要。运行可靠性评估是企业开展可靠性工作的重要内容之一,正确地评估设备的可靠性水平,有助于了解设备的故障发生规律,是企业设备管理人员制定维护计划的重要依据。目前国内外许多学者对设备可靠性进行了研究。文献[2,3]都对设备可靠性进行了评估,并得出设备故障时间概率分布服从威布尔分布,但都没有对设备故障数据进行跟踪采集,样本含量不足以至评估结果不够准确。文献[4]提出了一种电子设备贝叶斯可靠性评估的运算简化方法,这种方法简化了评估中后验参数运算的时间,从而提高评估效率,但其对复杂系统的多级综合问题显然无效。文献[5]提出了一种基于比例故障模型的设备可靠度评估改进方法,作者认为设备状态转移可能发生在任何时刻,而不仅仅是状态监测点,但是这种方法只适用于电网设备。

针对前人研究的不足,本文对某汽车制造企业的设备运行情况进行在线跟踪,在对故障数据进行分析的基础上,按照可靠性评估流程对其运行可靠性进行了分析与评估,从而为企业改善设备可靠性管理工作提供参考。可靠性评估流程为通过对故障数据进行分析处理,建立故障时间概率分布模型,然后估计分布参数并对分布模型进行检验,最后计算出各项可靠性评价指标[3]。

1 故障时间概率分布模型

本研究以某汽车制造企业的某台卧式加工中心

① 国家自然科学基金(51565036),江西省科技厅科技支撑项目(20123BBE50083)和江西省教育厅科学技术研究项目(GJJ150069)资助。
② 女,1978 年生,硕士,副教授;研究方向:计算机模拟仿真;E-mail: 350181911@qq.com
③ 通讯作者,E-mail: jx811217@126.com
(收稿日期:2016-11-28)

为例，开发了设备资源管理系统对该设备的运行情况进行在线跟踪抽样，通过对该设备的故障数据进行采集，形成分析样本，建立其故障间隔时间概率分布模型，并详细讨论该设备的故障时间的两项概率分布。

1.1 故障间隔时间概率密度分布函数

根据该设备的故障间隔时间数据，拟合出其故障间隔的概率密度分布函数。首先对该设备的故障间隔时间按相同的间隔进行分组，可以参考 Sturges[6] 提出的经验公式来确定分组数目，如下式所示：

$$K \geqslant 1 + 3.322 \times \lg(n) \quad (1)$$

其中 n 为故障总次数。

通过统计，该观测样本 $n = 48$，代入式(1)，可取 $K = 16$。

通过统计，该设备最小故障间隔时间为20.67h，最大故障间隔时间为2255.50h。将故障时间范围[20.67,2255.50]分为16组，如表1所示。

表1 故障间隔时间观测样本

组号	区间上	区间下	组均值	频次	频率	累计
1	20.67	160.35	80.18	11	0.2292	0.2292
2	160.35	300.03	219.86	6	0.1250	0.3542
3	300.03	439.71	359.54	7	0.1458	0.5000
4	439.71	579.39	499.22	4	0.0833	0.5833
5	579.39	719.07	638.9	4	0.0833	0.6666
6	719.07	858.75	778.58	3	0.0625	0.7291
7	858.75	998.43	918.26	2	0.0417	0.7708
8	998.43	1138.11	1057.94	1	0.0208	0.7916
9	1138.11	1277.79	1197.62	1	0.0208	0.8124
10	1277.79	1417.47	1337.3	1	0.0208	0.8332
11	1417.47	1557.15	1476.98	2	0.0417	0.8749
12	1557.15	1696.83	1616.66	1	0.0208	0.8957
13	1696.83	1836.51	1756.34	1	0.0208	0.9165
14	1836.51	1976.19	1896.02	1	0.0208	0.9373
15	1976.19	2115.87	2035.7	1	0.0208	0.9581
16	2115.87	2255.50	2175.38	2	0.0417	1

以每组间隔时间的均值为横坐标，其概率密度分布函数的观测值 $f(t)$ 为纵坐标，$f(t)$ 的计算公式如下：

$$f(t) = \frac{n_i}{n\Delta t_i} \quad (2)$$

其中 n_i 为第 i 个故障间隔时间组中的故障频次，n 为总故障次数，Δt_i 为组距。

由总故障次数 $n = 48$，组距 $\Delta t_i = 139.68$h，可拟合得到的概率密度分布函数曲线如图1所示。

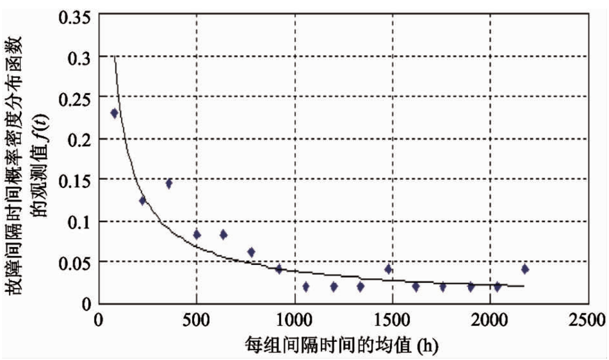

图1 故障概率密度拟合曲线

1.2 故障间隔时间累计分布函数

将故障间隔时间的累计分布函数定义为

$$F(t)=P\{T<t\} \tag{3}$$

其中,T 为故障间隔时间的观测值总体,t 为某给定的故障间隔时间。

由 Glivenko 定理[7-9]可知,当故障间隔时间观测样本容量 n 足够大时,可以用样本观测值所拟合的故障间隔时间的经验分布函数 $F_n(t)$ 来估计故障间隔时间的累计分布函数 $F(t)$。

下面对 $F_n(t)$ 进行拟合。以表 1 中的每组的均值为横坐标,每组的累计频率为纵坐标,拟合出故障间隔时间的累计频率曲线,如图 2 所示。

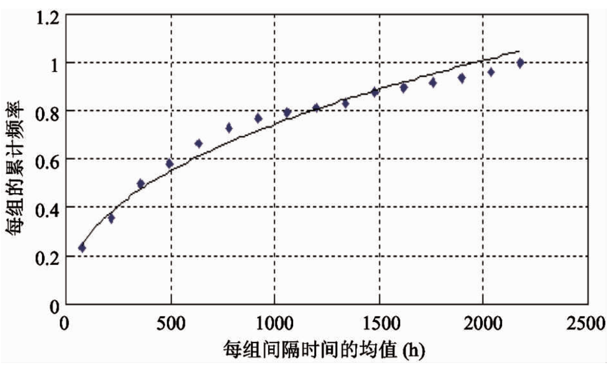

图 2 故障累计频率拟合曲线

从图 2 可以看出,故障累计频率拟合曲线为外凸且无拐点。由此可知,该设备的故障间隔时间不服从正态分布,可能服从威布尔分布或指数分布。

2 故障间隔时间分布模型的确定

假设该设备的故障间隔时间服从威布尔分布,通过最小二乘法进行参数估计,并对结果进行检验,确定该设备的故障间隔时间是否服从威布尔分布[3]。

威布尔分布函数方程变成两个参数的概率分布,如下式所示:

$$F(t)=1-\exp\left[-\left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta}\right] \tag{4}$$

其概率密度分布函数为

$$f(t)=\frac{\beta}{\eta}\left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1}\exp\left[-\left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta}\right] \tag{5}$$

假设一元线性回归方程为

$$y=Bx+A \tag{6}$$

对两参数威布尔分布函数公式进行线性变换可得

$$y_i=\ln\left(\ln\frac{1}{1-F(t_i)}\right) \tag{7}$$

$$F(t_i)\approx\frac{i-0.3}{n+0.4} \tag{8}$$

$$x_i=\ln t_i \tag{9}$$

$$\beta=B \tag{10}$$

$$\eta=\exp\left(-\frac{A}{B}\right) \tag{11}$$

通过式(7)(8)(9),可将该设备的故障间隔时间数据重新进行整理计算,结果如表 2 所示。

表 2 整理后的设备故障间隔时间

序号	故障间隔时间(h)	x_i	$F(t_i)$	y_i
1	20.67	3.0287	0.0145	-4.2263
2	41.33	3.7216	0.0351	-3.3317
3	43.5	3.7728	0.0558	-2.8574
4	48.33	3.8781	0.0764	-2.5323
5	67.67	4.2146	0.0971	-2.2814
6	89	4.4886	0.1178	-2.0768
7	94.83	4.5521	0.1384	-1.9040
8	96	4.5643	0.1591	-1.7528
9	118	4.7707	0.1798	-1.6184
10	120	4.7875	0.2004	-1.4977
11	121	4.7958	0.2211	-1.3868
12	164.33	5.1019	0.2417	-1.2849
13	168.5	5.1269	0.2624	-1.1896
14	220.67	5.3967	0.2831	-1.1002
15	233	5.4510	0.3037	-1.0162
16	239.83	5.4799	0.3244	-0.9361
17	279.67	5.6336	0.3450	-0.8601
18	302.83	5.7132	0.3657	-0.7869
19	310	5.7366	0.3864	-0.7166
20	316	5.7557	0.4070	-0.6490
21	331.33	5.8031	0.4277	-0.5832
22	334	5.8111	0.4483	-0.5196
23	335.17	5.8146	0.4690	-0.4573
24	341	5.8319	0.4897	-0.3964
25	440.17	6.0872	0.5103	-0.3369
26	460	6.1312	0.5310	-0.2782
27	480.37	6.1746	0.5517	-0.2203
28	497.33	6.2093	0.5723	-0.1633
29	595.08	6.3887	0.5930	-0.1065
30	624.83	6.4375	0.6136	-0.0504

续表2

31	628.83	6.4439	0.6343	0.0059
32	633.83	6.4518	0.6550	0.0622
33	721.5	6.5813	0.6756	0.1185
34	724	6.5848	0.6963	0.1754
35	843.67	6.7378	0.7169	0.2327
36	900.92	6.8034	0.7376	0.2911
37	937	6.8427	0.7583	0.3507
38	1000	6.9078	0.7789	0.4115
39	1177.3	7.0710	0.7996	0.4746
40	1319.67	7.1851	0.8202	0.5399
41	1420.47	7.2587	0.8409	0.6088
42	1540.15	7.3396	0.8616	0.6819
43	1660	7.4146	0.8822	0.7602
44	1700	7.4384	0.9029	0.8467
45	1884	7.5412	0.9236	0.9446
46	2018.33	7.6100	0.9442	1.0599
47	2200.47	7.6964	0.9649	1.2088
48	2255.5	7.7211	0.9855	1.4431

由表2中的数据得到威布尔分布模型一元线性回归方程为

$$y = 1.0232x - 6.6205$$

$$A = -6.6205,\ B = 1.0232$$

$$\beta = 1.0232,\ \eta = 645.48$$

下面对威布尔分布进行假设性检验。

在样本容量足够的情况下，将实验数据按照升序排序，将每个数据的经验分布函数 $F_n(t_i)$ 和每个时间间隔对应的计算值 $F_0(t_i)$ 做差值，获取所有数据中差值绝对值的最大值，此最大值就是观察值 D_n，将其与临界值 $D_{n,\eta}$ 进行比较，如果满足下列条件：

$$D_n = \sup_{-\infty < t < +\infty} | F_n(t) - F_0(t) | = \max\{d_i\} \leqslant D_{n,\eta}$$

其中 $F_n(t) = 1 - \exp[-(\frac{t}{645.48})^{1.0232}]$

经计算 $D_n = 0.0839$。

根据经验 $D_{n,\eta} = \frac{1.22}{\sqrt{n}} = 0.1761$。

则表示接受原假设，否则表示不接受原假设。

显然，$D_n < D_{n,\eta}$，因此接受原假设，即可以确定该设备的故障间隔时间分布服从威布尔分布。

3 设备运行可靠性技术指标

3.1 平均故障间隔时间 MTBF

平均故障间隔时间(mean time between failure, MTBF)是设备故障间隔时间的平均值，若该设备故障总次数为 n 次，故障间隔时间依次为 $t_1, t_2, \cdots, t_n$，则其平均故障间隔时间为

$$MTBF = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} t_i \tag{12}$$

由式(12)，可得到该设备的平均故障间隔时间 $MTBF = 31100.08/48 = 647.92$(h)。

3.2 平均维修时间

平均维修时间(mean time to repair restoration, MTTR)由维修概率密度确定。MTTR是一个至关重要的技术指标。MTTR是设备在故障时完成维修所需时间 $t_1, t_2, \cdots, t_n$ 之和的平均值，它必须包括等待备件的时间、维修小组的响应时间，还有将设备重新投入使用的时间。若该设备共发生 n 次故障，则其平均维修时间为

$$MTTR = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} t_i \tag{13}$$

由式(13)，可得到该设备的平均维修时间 $MTTR = 6816/48 = 2.37$(h)。

3.3 固有可用度 A

固有可用度是用来衡量设备正常工作的时间有多少，即衡量设备的充分利用程度。目前用来计算固有可用度的方法中使用最广泛的是用设备的平均故障间隔时间与设备的平均故障间隔时间和平均维修时间之和的比值：

$$A = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \tag{14}$$

由式(14)得，该设备的固有可用度 $A = 647.92/(647.92 + 2.37) = 0.9964$。

3.4 运行可靠度

设备运行可靠度是设备在规定条件下和规定时间内保持工作能力的概率，即可靠性的概率度量。

前面已确定该设备的故障间隔时间分布函数服从威布尔分布，因此其运行可靠度函数为

$$R(t) = \exp[-(\frac{t}{\eta})^{\beta}] = \exp[-(\frac{t}{645.48})^{1.0232}]$$

设备运行可靠度函数曲线如图 3 所示。

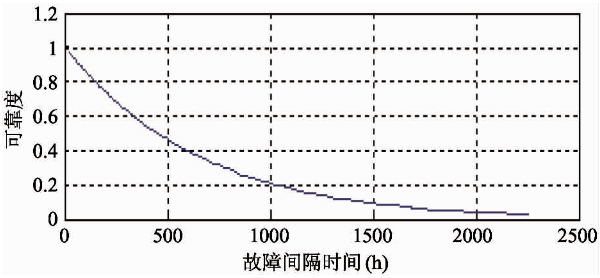

图 3　设备运行可靠度函数曲线

以上评价设备运行可靠性的指标中,平均故障间隔时间 *MTBF* 越大表示可靠性越高、设备正确工作能力越强;平均故障维修时间 *MTTR* 越小表示设备易恢复性越好;固有可用度 *A* 越大表明设备有更多的时间可用于正常工作。

4　结　论

本文在对某卧式加工中心故障数据进行分析和统计的基础上,完成了设备运行可靠性的分析与评估,这项研究为今后企业改善设备可靠性管理工作提供了参考。然而,研究过程中也存在一些不足之处。基于故障数据的设备运行可靠性评估模型都是事后统计其故障分布规律,难以获得设备故障前的运行可靠性的变化规律, 因此难以实现预知维修。在今后的研究工作中,可以利用设备运行状态信息,建立设备运行可靠性预测模型,从而实现设备的预知维修。

参考文献

［1］何正嘉,曹宏瑞,訾艳阳等. 机械设备运行可靠性评估的发展与思考. 机械工程学报,2014,50(2):171-186

［2］邬明鸣. 以可靠性为中心的设备管理系统的研究与开发:［硕士学位论文］. 南昌:南昌大学机电工程学院,2012. 15-25

［3］崔欣哲. 发动机缸盖生产线设备可靠性分析与评估:［硕士学位论文］. 大连:大连理工大学机械工程学院,2013. 36-56

［4］尹宗润,李俊山,苏东. 一种电子设备贝叶斯可靠性评估的新方法. 微电子学与计算机,2014,31(6):107-110

［5］暴英凯,王逸飞,文云峰等. 考虑人为因素的设备可靠度评估及定检周期决策. 电网技术,2015,39(9):2546-2552

［6］杜栋,庞庆华. 现代综合评价方法与案例精选. 北京:清华大学出版社,2005

［7］武春燕. 设备运行可靠性评估与维修优化方法研究:［硕士学位论文］. 长沙:湖南大学机械与运载工程学院, 2011. 1-10

［8］宋保维. 系统可靠性设计与分析. 西安: 西北工业大学出版社,2008

［9］吴波,丁毓峰,黎明发. 机械系统可靠性维修及决策模型. 北京:化学工业出版社,2007

Equipment's operation reliability analysis and assessment based on failure data

Zhao Jinping[*], Xiong Junxing[**], Liu Jiansheng[**]
([*] College of Science and Technology, Nanchang University, Nanchang 330029)
([**] School of Mechanical and Electronic Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031)

Abstract

The study focused on equipment's operating reliability analysis and assessment based on equipment's failure data. The failure data of an automobile manufacturing enterprise's horizontal machining center were statistically analyzed to form the observed sample data, and the curves of the probability density distribution function and the cumulative distribution function of the equipment's failure interval are fitted out, so the failure distribution law was deduced that it maybe obey a Weibull distribution. Then through the test of the correlation of the Weibull distribution function, it was confirmed that the fault interval distribution of the equipment obeys the Weibull distribution. Finally, according to the statistical results, the reliability assessment indexes of the equipment were obtained.

Key words: failure data, operational reliability, reliability assessment