

基于 LSI 模型的品检机走纸系统稳定性分析

辛剑峰¹, 茹秋生¹, 郭强²

(1.上海市工程技术大学, 上海 200437; 2.北京印刷学院, 北京 102600)

摘要:目的 提高品检机整机走纸系统的稳定性。方法 采用 LSI 强度干涉模型对单元进行理论建模, 对比分析高速单张品检机整机串联系统单元独立失效和单元共载荷失效等 2 种不同失效形式下的系统可靠度。对系统进行定数截尾实验, 测量参与单元数目发生变化时, 系统 2 次故障间连续工作时间的变化, 对整个串联系统的平均故障发生时间与理论值进行比较, 绘制样条拟合曲线。结果 单元共载荷失效模型样条曲线拟合度更高。结论 对于服从指数分布的品检机串联系统, 单元共载荷失效模型更能准确地评估整机的可靠度和稳定性。

关键词: 品检机; LSI 模型; 串联系统

中图分类号: TS803.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2016)19-0168-05

Stability Analysis of Quality Inspection Machine Feeding System Based on LSI

XIN Jian-feng¹, RU Qiu-sheng¹, GUO Qiang²

(1.Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 200437, China;

2.Beijing Institute of Graphic Communication, Beijing 102600, China)

ABSTRACT: The work aims to improve the stability of the whole paper feeding system on quality inspection machine. The reliability of the high-speed single sheet paper feeding system was analyzed under unit independent failure and element total load failure modes through the LSI intensity interference model. Destiny truncation experiment was carried out for the system. Change in continuous working hours between two faults was measured when the amount of concerned units was changing. The failure mean time of the whole system was compared with the theoretical value. Spline fitting curve was drawn. Spline fitting curve of unit load total failure model had higher degree of fitting. In conclusion, for the series system of quality inspection machine that is in compliance with the exponential distribution, the unit total load failure model can assess the reliability and stability of the series system more accurately.

KEY WORDS: quality inspection machine; LSI model; series system

随着包装产业高速发展, 产品包装优劣直接影响产品自身等级, 因此, 产品外包装检验变得十分关键。高速单张品检机是一种针对印品质量、QR 二维码(一种矩阵二维码)和条形码的检测设备, 它既能提高生产效率, 还能在很大程度上降低生产成本, 为企业带来了巨大的经济效益和社

会效益。目前市场的设备普遍存在着走纸稳定性差的问题, 这些问题会造成资源浪费, 正确率低等现象, 给现有品检产品市场的推广带来不利影响。因此, 文中基于 LSI 模型, 对品检机走纸系统的稳定性进行分析, 为提高品检机走纸系统稳定性提供理论依据。

收稿日期: 2016-01-11

作者简介: 辛剑峰(1989—), 男, 山东烟台人, 硕士, 上海市工程技术大学助教, 主要研究方向为包装机械的稳定性和结构设计。

1 基于 LSI 模型串联系统稳定性分析

从高速品检设备工作流程可以看出整机走纸系统是由各部分串联起来的, 因此, 任何一部分走纸出现问题都将影响整机走纸系统的稳定性。如果把整机系统视作串联系统, 则各个单元为该串联系统的子系统, 各个子系统的稳定性直接影响整个串联系统的稳定性^[1]。

LSI 模型即通过独立性假设条件基于载荷-强度干涉模型^[2]。该模型中把单元未产生故障的工作时间作为强度, 把单元在运行过程中所承受载荷称为虚拟载荷。虚拟载荷并没有实际物理意义, 其自身也是时间的量纲, 通过时间上的干涉来替代实际载荷的干涉, 用来表征单元发生故障的概率。

高速单张小盒品检机走纸系统可以通过分页部走纸、定位部走纸、检测部走纸串联起来进行模拟。串联模型见图 1。整个串联系统用 S 表示, 其中包含 m 个单元, 每个单元中但包含有 $S(i, j)$ 元件^[3]。

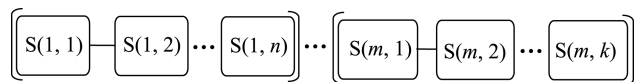


图 1 整机串联体系 $S(i, j)$ 模型

Fig.1 Sketch map of $S(i, j)$ model of whole series system

假设单元发生故障前工作时间服从指数分布, 则对于服从指数分布的串联系统, 单元在发生故障前的工作时间 ε_T 服从参数为 α 的指数分布, 对应的概率密度函数为 $f_{\varepsilon_T}(\varepsilon_T)$, 分布函数为 $F_{\varepsilon_T}(\varepsilon_T)$ ^[4]。在针对某一时刻 τ , 单元所加载的虚拟载荷 β 服从参数为 $\alpha_0(\tau)$ 的指数分布, 根据 LSI 理论可知^[5], 单元可靠度 R 为:

$$R = \int_0^{+\infty} f_{\beta_T}(\beta_T) \int_{\beta}^{+\infty} f_{\varepsilon_T}(\varepsilon_T) d\varepsilon_T d\beta_T = \int_0^{+\infty} f_{\beta_T}(\beta_T) [1 - F_{\varepsilon_T}(\beta_T)] d\beta_T = \frac{\alpha_0(\tau)}{\alpha_0(\tau) + \alpha} \quad (1)$$

1.1 基于单元相互独立的失效模型

假设单元各失效因素相互独立, 组成系统的单元用 $X_i (i=1, 2, 3, \dots, n)$ 表示, 则在某一时刻 τ 下系统的可靠度 R 表示为^[6-7]:

$$R = R_{X_1} R_{X_2} \cdots R_{X_n} = \prod_{i=1}^n R_{X_i} \quad (2)$$

式中: R_{X_i} 为串联系统中某个单元的可靠度, 假设影响单元 X_i 的可靠性共有 s 个因素组成, 则 R_{X_i} 可表示为^[8]:

$$R_{X_i} = R_{X(i,1)} R_{X(i,2)} \cdots R_{X(i,s)} = \prod_{j=1}^s R_{X(i,j)} \quad (3)$$

当组成串联系统的 n 个单元在发生故障前工作时间都服从参数为 α 的指数分布, 则系统的可靠度 R 可表示为^[9]:

$$R = R_{X_1} R_{X_2} \cdots R_{X_n} = \prod_{i=1}^n R_{X_i} = \frac{\alpha_0(\tau)^n}{(\alpha_0(\tau) + \alpha)^n} \quad (4)$$

1.2 基于各单元共载荷的失效模型

实际生产中, 整机串联系统的各部分之间并不是完全相互独立的。多数情况下, 系统中多个单元会由于共同的原因而产生失效现象。在各个单元载荷都一致的情况下, 串联系统的强度即工作时间取决于承受载荷最小的单元。系统工作时间 ε_T 取最小, 即 $\varepsilon_T = \min(\varepsilon_{T1}, \varepsilon_{T2}, \dots, \varepsilon_{Tn})$ 。则串联系统的可靠度可表示为^[10]:

$$R' = \int_0^{+\infty} f_{\beta_T}(\beta_T) \prod_{i=1}^n [1 - F_{\varepsilon_{T_i}}(\beta_T)] d\beta_T \quad (5)$$

同理, 对于文中设定的服从指数分布的串联系统模型来说, 由共同因素引起系统失效的可靠度 R' 可表示为^[11]:

$$R' = \int_0^{+\infty} f_{\beta_T}(\beta_T) \prod_{i=1}^n [1 - F_{\varepsilon_{T_i}}(\beta_T)] d\beta_T = \frac{\alpha_0(\tau)}{\alpha_0(\tau) + n\alpha} \quad (6)$$

由于将高速品检机的串联系统假定为指数分布, 式(4)可以化简为:

$$R = \frac{\alpha_0(\tau)^n}{(\alpha_0(\tau) + \alpha)^n} = \exp(-n\alpha\tau) \quad (7)$$

则可以得到:

$$\alpha_0(\tau) = \frac{\alpha}{\exp(\alpha\tau) - 1} \quad (8)$$

带入到式(6)可以得到共载荷下串联系统的可靠度 R' :

$$R' = \frac{\alpha_0(\tau)}{\alpha_0(\tau) + n\alpha} = \frac{1}{n \exp(\alpha\tau) - n + 1} \quad (9)$$

可靠度函数是关于时间的函数, 则 2 种失效形式下系统的平均故障间隔时间为^[12]:

$$t_R = \int_0^{+\infty} R(t) dt = \frac{1}{n\alpha} \quad (10)$$

$$t_{R'} = \int_0^{+\infty} R'(t) dt = \frac{\ln n}{(n-1)\alpha} \quad (11)$$

由式(10)和式(11)可以看出, 要想确定高速品检机串联系统的可靠度以及平均故障发生时间, 就必须确定参数 α , 确定 α 的值一般通过试验获得, 目前应用最多的是定数截尾法^[13]。单元 X_i 的失效因素个数为 m_i , 在试验时间 T_i 内失效个数为 s_i , 已失效的因素的失效时间为 t_i , 按照先后失效顺序, 失效因素的失效时间依次为 $t_{i1} \leq t_{i2} \leq t_{i3} \dots \leq t_{is}$ ^[14], 根据实验参数 α 的点估计值 $\hat{\alpha}$ 为:

$$\hat{\alpha} = \frac{s_i}{T_i} \quad (12)$$

式中: T_i 为试验的时间, $T_i = \sum_{j=1}^s t_{ij} + (m_i - s_i)t_{is}$ 。

整个串联系统的试验条件和试验时间都一致, 将式(12)带入到式(7)和式(9)可得串联系统可靠度的点估计值:

$$R = \exp(-n\hat{\alpha}\tau) = \exp\left(-\frac{n s \tau}{T}\right) \quad (13)$$

$$R' = \frac{1}{n \exp(\hat{\alpha}\tau) - n + 1} = \frac{1}{n \exp\left(\frac{s\tau}{T}\right) - n + 1} \quad (14)$$

2 整机串联系统稳定性测试

把高速单张品检设备当作串联系统, 则整个系统包括分页单元、定位单元、除尘单元、检测单元、一次剔除单元、二次剔除单元、收纸单元等 7 个主要单元^[15]。每个单元都包含 3 种以上失效形式, 在各单元失效因素个数和整个试验的累计时间都一致的前提下, 对整机进行测试。对该设备进行 1 个月不停机测试, 在测试过程中统计出现失效个数。整个串联系统试运行 72 h, 对串联系统进行稳定性测试, 并计算可靠度的点估计值。

整个串联系统由 7 个单元组成, 每个单元都有各自的失效形式, 在测试的过程中截取各单元出现的前 2 个失效类型位为止, 保证各个单元的试验时间和失效样本数都一致。整个系统的测试情况为: 分页部表现为纸张表面划伤、走纸出现双涨; 定位部表现为压轮表面磨损、托辊径向跳动大; 检测部表现为吸风皮带磨损、吸风皮带自动纠偏波动过大; 剔除部表现为气量不足、纸张输送歪斜导致卡纸; 手纸部表现为收纸歪斜、收纸皮带出现跑偏。单元失效

样本数为 3, 单元失效时间为 $T_i = \sum_{j=1}^s t_{ij} + (m_i - s_i)t_{is}$ = 960 h。

由测试结果可以看出失效样本数 $m=3$, 失效数 $r=2$, 试验总时间为 960 h, 带入到式(10)、(11)、(13)和(14)可得到 2 种不同失效模式下系统的可靠度和系统平均发生故障时间。

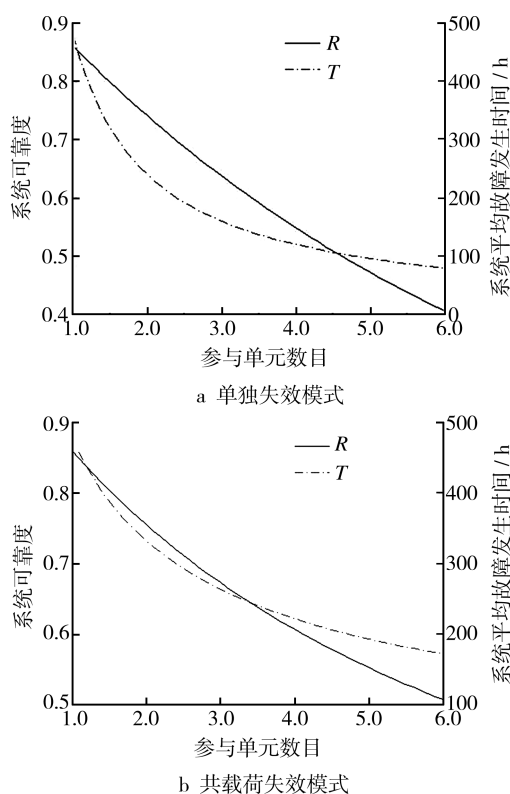


图2 2种不同失效模式下系统的可靠度和系统平均发生故障时间

Fig.2 Reliability and average failure time of two failure modes systems

该串联系统总共存在 7 个单元, 当单元数从 1 增加到 6 时, 整个系统平均发生故障的时间会发生相应的变化。当参与单元数增加到 4 时, 共存在 3 种情况: 如果印品合格, 直接进入收纸部; 如果印品出现缺陷, 并且属于印品质量缺陷, 进入一次剔除单元; 印品出现第 2 类缺陷, 即条码出现缺陷, 进行二次剔除。每组进行多次测量结果见表 1。

表中 1 中, 发生 5 个单元失效存在 3 种情况, 发生 6 个单元失效存在 2 种情况, 因此, 串联系统平均发生故障时间会有 6 种不同的情况。通过对所测数据进行曲线拟合, 并与 2 种失效模式下的故障平均发生时间进行对比。从图 3 可以看出, 与实际测量相比, 共载荷失效情况下串联系统平均故障发

表 1 系统 2 次故障间持续工作时间测试
Tab.1 Continuous working time between two failures

参与单元	单元数目	2 次故障间系统连续工作时间/h			
		测量次数			均值
		1	2	3	
分页部	1	460	469	473	467.33
分页部、定位部	2	347	334	341	340.67
分页部、定位部、除尘部	3	246	259	251	252.00
分页部、定位部、除尘部、检测部	4	204	211	217	210.67
分页部、定位部、除尘部、检测部、剔废部-1	5	175	166	172	171.00
分页部、定位部、除尘部、检测部、剔废部-2	5	169	173	167	169.67
分页部、定位部、除尘部、检测部、成品收纸部	5	181	174	171	175.33
分页部、定位部、除尘部、检测部、剔废部-1、废品收纸部	6	149	151	144	148.00
分页部、定位部、除尘部、检测部、剔废部-2、废品收纸部	6	142	139	137	139.33

生时间与单独失效情况更接近真实值,同时也说明了单元独立失效模式对于评估串联系统可靠度具有一定的保守性。基于指数分布的共载荷失效模式更能准确地评估串联系统的工作可靠度和稳定性。

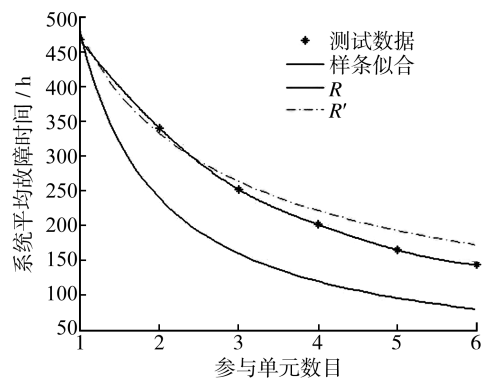


图 3 系统可靠度理论值与实测值对比曲线
Fig.3 Comparison of theoretical value and measured reliability

3 结语

采用 LSI 强度干涉模型对单元进行理论建模,分别采用基于指数分布的单元独立失效模型和单元共载荷失效模型对高速单张品检机串联系统可靠度和系统平均故障发生时间进行理论分析。同时对系统进行定数截尾实验,测量参与单元数目发生变化时,系统 2 次故障间连续工作时间变化。最后对测得的数据进行样条曲线拟合,并与 2 种失效模式下系统的平均故障发生时间进行对比,结果表明基于指数分布的单元共载荷失效模型更能准确地

评估串联系统的可靠度,独立单元失效模型对实际串联系统的评估存在一定局限性和保守性。若串联系统服从其他分布,可以将其等效为指数分布进行评估以减小评估难度,为提高整机走纸的稳定性提供了理论依据。

参考文献:

[1] 熊英. 机电产品可靠性研究与探讨[J]. 环境技术, 2009, 27(3): 32—37.
XIONG Ying. Research and Discussion of Reliability on Mechanical and Electrical Products[J]. Environmental Technology, 2009, 27(3): 32—37.

[2] TSAO T F, CHANG H C. Composite Reliability Evaluation Model for Different Types of Distribution Systems[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2013, 1(2): 924—930.

[3] 孙雅因. 具有相关元件的串联系统的可靠性分析[J]. 舰船电子工程, 2008, 28(3): 167—170.
SUN Ya-nan. Reliability Analysis of Series-wound System with Correlative Elements[J]. Ship Electronic Engineering, 2008, 28(3): 167—170.

[4] 李海泉, 李刚. 系统可靠性分析与设计[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
LI Hai-quan, LI Gang. System Reliability Analysis and Design[M]. Beijing: Science Press, 2013.

[5] 唐家银. 应力-强度相关性干涉的静态和动态可靠度计算模型[J]. 西南交通大学学报, 2010, 45(3): 384—388.
TANG Jia-yin. Static and Dynamic Models for Reliability Calculation of Stress-Strength Interference[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2010, 45(3): 384—388.

[6] 王家序, 周青华, 肖科. 不完全共因失效系统动态故障树模型分析方法[J]. 系统工程与电子技术, 2012, 34(5): 1062—1067.

- WANG Jia-xu, ZHOU Qing-hua, XIAO Ke. Dynamic Fault Tree Model Analysis of Systems Subjected to Incomplete Common-cause Failure[J]. Systems Engineering and Electronics, 2012, 34(5): 1062—1067.
- [7] 印明昂. 有备件串联系统的可靠性分析模型[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2012, 33(10): 1461—1464.
- YIN Ming-ang. Reliability Analysis Model of Spare Series System[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2012, 33(10): 1461—1464.
- [8] LEVITIN G, XING L D. Reliability and Performance of Multi-state System with Propagated Failures Having Selective Effect[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2010, 95(6): 655—661.
- [9] 马小兵, 谷若星. 指数分布单元共载荷失效串联系统可靠性分析与评估模型[J]. 系统工程与电子技术, 2014, 36(3): 608—611.
- MA Xiao-bing, GU Ruo-xing. Analysis and Evaluation Model of Reliability for Common-load-failure Series System Composed of Exponential Distribution Units[J]. Systems Engineering and Electronics, 2014, 36(3): 608—611.
- [10] 孙权, 赵建印, 周经纶. 复合应力作用下强度退化的应力强度干涉模型可靠性统计分析[J]. 计算力学学报, 2012, 24(3): 358—361.
- SUN Quan, ZHAO Jian-yin, ZHOU Jing-lun. Stress-strength Interference Reliability Analysis Considering Stochastic Multi-stress and Strength Aging Degradation[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2012, 24(3): 358—361.
- [11] RAMIREZ-MARQUEZ J E, COIT D W. Optimization of System Reliability in the Presence of Common Cause Failure[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2011, 92(10): 1421—1434.
- [12] GNEDENKO B, USHAKOV I A, FALK J A. Probabilistic Reliability Evaluation[M]. New York: Wiley, 2011: 85—121.
- [13] 邢云燕, 武小悦. 指数分布下可靠性指标验证的截尾 SPOT 方法[J]. 系统工程与电子技术, 2006, 28(8): 1282—1284.
- XING Yun-yan, WU Xiao-yue. Censored SPOT Method for Reliability Index Verification under Exponential Distribution[J]. Systems Engineering and Electronics, 2006, 28(8): 1282—1284.
- [14] 周金字, 谢里阳, 钱文学. 载荷相关结构系统的可靠性分析[J]. 机械工程学报, 2013, 44(6): 45—50.
- ZHOU Jin-yu, XIE Li-yang, QIAN Wen-xue. Reliability Analysis on Structural Systems with Load Dependency [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2013, 44(6): 45—50.
- [15] 王薇. 复卷检品机控制系统的设计与实现[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2014.
- WANG Wei. Design and Implementation of Control System on Rewinding Inspection Machine[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2014.