

# 基于 SPC 的电源故障预测系统研究

王瑞芳<sup>1</sup>, 刘林<sup>2</sup>, 邱继红<sup>3</sup>

(1. 沈阳航空工业学院, 辽宁 沈阳 110136 2. 沈阳飞机设计研究所, 辽宁 沈阳 110035 3. 中国科学院沈阳自动化研究所 辽宁 沈阳 110016)

**摘要:** 本文结合飞行器电源系统故障维护特点, 利用统计过程控制理论, 从数理统计的角度对电源系统测试数据进行分析, 设计了电源故障预测系统。文中阐述了系统的工作原理和利用 LabView 软件的实现过程。实验结果表明此预测系统可以发现故障征兆及时维护, 提高系统安全性。最后阐述了进一步研究可能会遇到的问题。

**关键词:** 故障预测; 统计过程控制; 电源; LabView

**中图分类号:** TP277, TP206

**文献标识码:** A

## Research on system of Electrical source Prognostics based on SPC

WANG Rui-fang<sup>1</sup>, Liu Lin<sup>2</sup>, Qiu Gi-hong<sup>3</sup>

(1. Shenyang Institute of Aeronautical Engineering, Liaoning Shenyang, 110136, China 2. Shenyang Aircraft Design & Research Institute, Liaoning Shenyang, 110035, China 3. Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Liaoning Shenyang 110016, China)

**Abstract:** In allusion to maintenance characters of electrical source system as an important part of aircrafts, the test data of system was analyzed by using mathematical statistics based on the theory of Statistical Process Control (SPC) and the electrical source prognostics system was designed in the paper. The working principle of prognostics system and working process based on LabView were described in this paper. Through experiments, it shows that the prognostics system may find fault omens to maintain in time. It can enhance safety of the whole system. Finally, some key issues to do of prognostics are listed with the goal of farther research.

**Keywords:** Prognostic; SPC; Electrical source; LabView

## 0.引言

在航空航天领域, 飞行器系统的集成度和复杂度越来越高, 个别部件一旦出现故障可能引起连锁反应, 造成整个系统不能正常运行。为了提高飞行器的运行安全性, 尽早发现潜在故障, 不能只依靠“事后维修”的方式进行, 应该对飞行器系统进行故障预测, 从而减少飞行器停机维修时间, 降低运载器的整个生命周期成本。电源系统是飞行器执行飞行任务最关键的分系统, 它的退化失效是造成飞行器系统安全问题的重要原因之一。目前有两种方法保证电源系统的安全性, 一是通过可靠性设计来保证系统安全性, 如利用可靠性试验确定其维修间隔<sup>[1][2]</sup>, 二是通过对严重等级较高的电源进行技术状态参数监控, 确保关键电源的安全可靠<sup>[3]</sup>。但由于飞行器所处的动力学环境、机械的复杂性等影响, 依靠传统方法及在线 BIT 来保证电源系统的安全具有一定局限性; 而且, 通过简单比较的状态检测方法也显得迟钝、被动。本文结合某飞行器的测试需求, 在飞行器运行时对电源系统参数进行状态监测和故障诊断, 利用统计过程控制理论(SPC)对测试数据进行概率分析, 设计电源故障预测系统, 依据它的状态发展趋势和可能的故障模式, 预先制定预测性维修计划。

## 1.故障预测技术的特点和研究内容

故障预测技术包括异常检测技术、特征提取技术、健康监测技术、故障诊断技术、剩余

寿命预测技术等，是多个前沿和交叉学科的统一体；它强调在故障发生之前发现早期故障征兆，跟踪故障征兆的发展情况同时评估系统、设备的剩余使用寿命，并最终为维护提供决策支持。系统健康退化过程是随着系统工作时间的推移，其健康状态表现为一个从系统正常到系统性能下降直至功能失效的过程。系统健康退化过程如图 1 所示。针对上述典型的健康退化过程，故障预测系统首先应当具备早期故障检测能力，并监测其劣化进程。通过设置适宜的特征参数检测阈值，假设在“系统异常检测点”之后的某一时刻能够检测到这种早期故障状态。故障预测技术的作用范围是从“系统异常检测点”至“系统功能失效点”这一段时间之内。

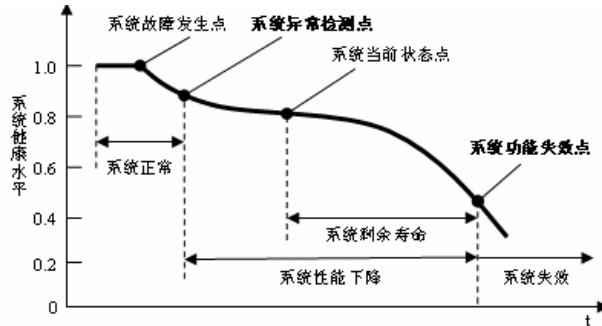


图 1 系统健康退化过程

## 2 基于 SPC 的故障预测技术

统计过程控制（SPC）是一种有效的数据统计方法，它运用休哈特(W.A.Shewhart)的过程控制理论即控制图来判断系统是否处于稳定可靠状态，根据控制图上的特征点分布状况，分析对象系统特性的趋势，并采取预防措施确保对象系统特性始终处于统计控制状态，从而达到改进与保证质量的目的。SPC技术充分体现了现代控制理论的过程预防原则，具有预防和监控能力<sup>[4,6]</sup>。当飞行器系统处于稳定的工作状态，电源系统参数的测量值服从正态分布。将SPC理论应用到电源系统的故障预测技术中，在故障发生之前，对系统进行故障预测，发现早期故障征兆，进行“事前维修”。

### 2.1 控制图的选择

SPC的控制图种类比较多，分为计量型控制图和计数型控制图。针对电源系统数据类型和数据量的大小选用计量型控制图中的均值与级差( $\bar{X}$ -R)控制图进行健康监控和预测。

### 2.2 工作原理

控制图利用样本统计量检验总体均值 $\mu$ 和标准差 $\sigma$ 是否发生显著变化的过程。若抽样得到的样本均值为 $\bar{x}$ ， $n$ 为样本大小，使得<sup>[4]</sup>：

$$P\left(\left|\frac{\bar{x} - \mu}{\sigma / \sqrt{n}}\right| < z_{\alpha/2}\right) = 1 - \alpha$$

成立，则认为当显著性水平为 $\alpha$ 时，总体均值 $\mu$ 未发生显著变化，即系统处于稳定状态。

根据质量统计的长期经验， $3\sigma$ 方式就是控制两类错误(弃真错误、取伪错误)造成的总损失较小的控制界限，即取 $Z_{\alpha/2} / \sqrt{n} = 3$ ，则 $\bar{x}$ 落在 $(\mu - 3\sigma, \mu + 3\sigma)$ 范围内的概率为99.73%，超出这个范围的概率仅为0.27%<sup>[5]</sup>。测试数据特征点落在上下界限之间，表明系统运行正常，特征点落在上下界限之外，就表明系统出现异常。

### 2.3 判断准则

休哈特控制图的判断准则是对系统进行异常判断的准则，若符合判断准则，则说明设备出现异常。休哈特控制图的设计思想是先确定弃真错误的概率 $\alpha$ ，然后再根据取伪错误的概率 $\beta$ 的大小来考虑是否需要采取必要的措施<sup>[6]</sup>。对于控制图中的特征点的判断准则如下：

1. 测试数据特征点超出上、下控制限就判定为故障；

2. 从控制图中看, 虽然特征点在控制界限内, 通过对数据图形的判断即可分析出系统的运行状况, 其中数据点排列非随机, 可预测潜在的故障, 体现了故障预测的思想。

控制界限内特征点排列非随机, 又有以下具体的判断准则:

(1) 连续 7 个或更多个特征点呈上升或下降趋势, 说明被测系统参数在缓慢漂移, 系统发生缓变型故障。即

$$P(\text{连续 7 点上升或下降}) = \frac{2}{7!} (0.9973)^7 = 0.00039$$

因此, 其显著性水平为 0.00039, 表明如果存在此类数据时, 系统故障概率为 99.97%。

(2) 被测数据特征点屡屡接近控制限, 表明系统可能受到了异常因素的影响, 工作不稳定。

(a) 若连续 3 点中至少有 2 点落在 2 倍标准差(2σ)与 3 倍标准差(3σ)控制界限之内, 即

$$P(\mu+2\sigma \leq x < \mu+3\sigma) + P(\mu-3\sigma \leq x < \mu-2\sigma) = 2[\Phi(3) - \Phi(2)] = 0.0428$$

$$P(\mu-2\sigma \leq x < \mu+2\sigma) = 2\Phi(2) - 1 = 0.9545$$

$$P\{\text{连续 3 个数据中至少有 2 个接近门限值}\} = C_3^2(0.0428)^2(0.9545) + C_3^3(0.0428)^3 = 0.0053$$

因此, 其显著性水平为 0.0053, 如果存在此类数据, 系统故障的概率为 99.47%。

(b) 若连续 7 点中至少有 3 点落在 2 倍标准差(2σ)与 3 倍标准差(3σ)控制界限之内, 即

$$P\{\text{连续 7 个数据中至少有 3 个接近门限值}\} = 0.0024$$

其显著性水平为 0.0024, 如果存在此类数据, 系统故障的概率为 99.76%。

(3) 特征点距离中心线在 1 倍标准差(1σ)以内, 连续 15 点集中在中心线附近, 可判定被测系统发生故障。即

$$P(\mu-\sigma \leq x < \mu+\sigma) = 2\Phi(1) - 1 = 0.6826$$

$$P\{\text{连续 15 个数据集中在中心线附近}\} = (0.6826)^{15} = 0.0033$$

其显著性水平为 0.0033, 如果存在此类数据, 系统故障的概率为 99.67%。

(4) 连续多个特征点在中心线的同一侧, 其均值超出额定范围, 说明被测参数已发生漂移。

(a) 若连续 7 个特征点在中心线的同一侧,

$$P\{\text{连续 7 个数据在中心线一侧}\} = 2(0.9973/2)^7 = 0.0153$$

因此, 其显著性水平为 0.0153, 表明如果存在此类数据时, 系统故障的概率为 98.47%。

(b) 若连续 11 个特征点中至少有 10 个特征点在中心线的同一侧,

$$P(\text{连续 11 个点中至少有 10 点在中心线同一侧})$$

$$= 2C_{11}^1(0.9973/2)(0.9973/2)^{10} + 2(0.9973/2)^{11} = 0.0114$$

其显著性水平为 0.0114, 表明如果存在此类数据时, 系统故障的概率为 98.86%。

(5) 测试数据的样本方差过大, 表明被测系统特性或参数的摄动强烈。如果连续 10 个数据的样本方差(S<sup>2</sup>)不在系统总体方差的额定范围(σ<sup>2</sup>-N ~ σ<sup>2</sup>+N), 利用莱因达准则确定 N 值, 可判定被测系统发生故障, 即

$$P\{\text{连续 10 个数据的样本方差不在总体方差额定范围}\} = P\{S^2 \leq \sigma^2 - N \text{ 或 } S^2 \geq \sigma^2 + N\} = 0.005$$

显著性水平取 0.005 比较合适, 若存在此类数据, 系统故障的概率为 99.5%。

假设在飞行器出厂时电源参数处于统计受控, 电源参数是随机变量。通常, 如果上述五种情况中只有一种情况偶尔发生, 但特征点在上、下控制限内, 可判定被测系统正常; 如果特征点虽然在上、下控制限内, 但出现上述五种情况中的几种, 或者某种情况频频发生, 便可预测被测系统存在潜在故障, 给出报警信号, 提示维修人员“事前维修”; 如果特征点超出上、下控制限, 同时出现过上述五种情况中的类型, 可判定系统已经出现某种故障。

### 3.故障预测系统设计

电源故障预测系统利用系统本身安装的各类传感器, 尽可能不在电源系统上额外增加设

备,进行传感器优化布局,只是在系统中嵌入故障预测系统。利用数据采集设备对系统各部件的参数进行监测和数据获取,将其传送到 SPC 计算机进行存储、分析和故障预测。操作人员可以根据故障预报系统给出的意见和工作经验,对电源系统部件进行“事前维修”。操作系统采用 Windows XP,软件开发平台采用 NI 公司的 LabView 软件。Labview 开发了 SPC 组件,例如提供了计算上、下控制限的 VI 和非随机的判断准则的各个 VI。系统软件分为数据采集部分、数据分析、预测部分和报表打印部分。软件流程图如图 2 所示。

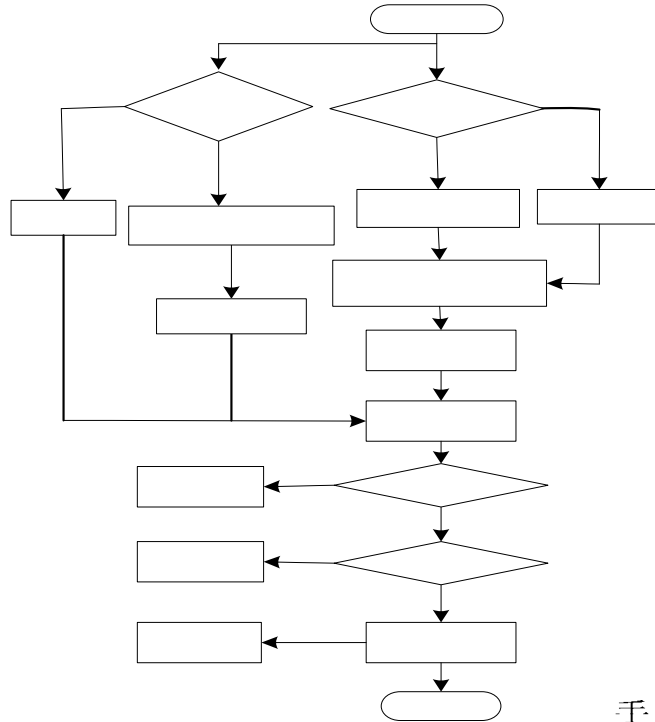


图 2 基于 SPC 故障预测系统软件流程图

#### 4 实验

本文以电源系统中的整流器作为对象进行故障预测实验,它实现供电系统内交流电输入计算控制流,以保证直流用电负载正常工作。这里,以其输出的电压信号作为监测数据,供电系统的最少样本数为 C 类时的正常工作区间是[24V, 30V],通过数据采集卡获取电压数据,进行基于 SPC 的故障预测,软件运行界面如图 3 所示。当发现异常特征点时,报警灯亮,本系统提供对测试的电压数据实时存储的功能,技术人员可打印数据报表,并结合故障报警系统的提示和故障类型进行故障“事前维修”。

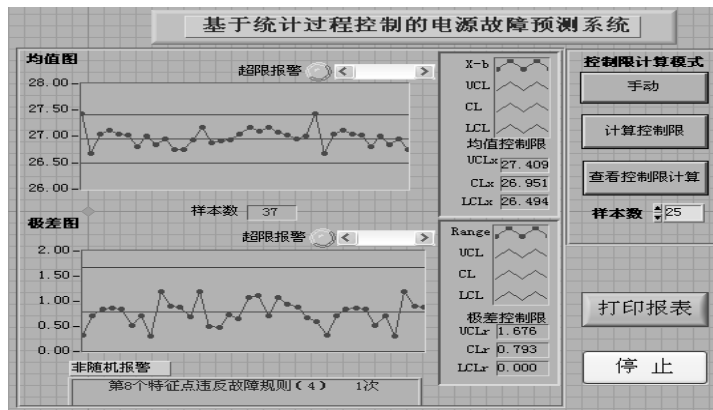


图 3 故障预测系统运行界面图

选择计算控制限的方式

手动方式

自动方式

计算控制限

报警

报警、预测

打印统计报表

## 5 结论

本文设计的电源故障预报系统,作为飞行器后勤保障的重要组成部分,可以有效地发现故障隐患,避免和降低故障所带来的损失。并且,该故障预报系统的设计思想可以应用到其它设备中。基于 SPC 的电源故障预报系统是假设在飞行器出厂时电源参数处于统计受控,电源参数是随机变量。而有些部件从最初应用到最终失效,由于受外界条件影响较大,统计特性一直在变化,不能将之作为随机变量来处理。因此进一步研究可能遇到如下问题:对非正态分布状态参数的预测,故障预测相关标准的制定等。

本文作者创新点是利用统计过程控制方法的预测及监控能力,将其应用到电源系统的故障预测中来,此故障预测系统设计思想可以运用到其他需要进行故障预测设备中来。

项目产生的经济效益:约 30 万元

## 参考文献

- [1] Dutuit Y, Rauzy. A. Approximate estimation of system reliability via fault trees[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2005, 87(2): 163-172
- [2] 郭波,武小悦.系统可靠性分析[M].长沙:国防科技大学出版社.2002:15-45
- [3] 郭明.基于数据驱动的流程工业性能监控与故障诊断研究[D].浙江杭州:浙江大学,2004.
- [4] 陈建国,周六辉.SPC 技术及应用[J] 微电子技术, 2003(6):40-43
- [5] 刘林,邱继红等.生产线监控与管理系统的的设计[J].微计算机信息,2006,2-1:113-115
- [6] 钟伦燕,韩俊,刘红.统计过程控制 (SPC) 技术原理和应用[M].北京:电子工业出版社,2000:10-45

**作者简介:** 王瑞芳,女,(1979-),汉,硕士,机械电子工程,主要研究方向为飞行器综合健康管理。刘林男,(1979-),汉,硕士,电气自动化,主要研究方向为飞机电源、电气设计。邱继红,男,(1967-),汉,博士,智能系统与模式识别,主要研究方向为工业自动化等。。

**Biography:** WANG Rui-fang, Female, (1979-), Han, Master, Mechanical and Electronic Engineering, Major subject: Prognostic and Health Management