

文章编号: 1000-8055(2010)07-1640-06

基于可靠性指标的测试系统校准周期优化

韩旭¹, 祖先锋², 蔡迎波³

- (1. 南京理工大学 自动化学院, 南京 210094;
2. 中国人民解放军 空军第一航空学院, 信阳 464000;
3. 中国人民解放军 92941 部队, 葫芦岛 125001)

摘 要: 通过对测试系统校准周期的直接反应法(SRM)和威布尔(Weibull)可靠性模型法的分析、改进, 以及对校准过程中误判率的分析测算, 解决了测试系统检定决策的风险问题。首先介绍了测试系统可靠性指标的相关计量技术规范, 然后通过对常用的校准周期确定方法的介绍与分析, 进一步给出了测量可靠性观测值的可靠性概率函数描述方法, 并利用主元分析法来综合评价不同测量参数的影响, 修正了最佳校准周期的计算。通过对自动测试系统 DMM(数字万用表)测量通道的检定, 表明这些优化措施是可行的。

关 键 词: 校准周期; 可靠性指标; 威布尔模型; 误判率; 主元分析

中图分类号: TP227

文献标识码: A

Optimal calibration interval of test system based on reliability index

HAN Xu¹, ZU Xianfeng², CAI Yingbo³

- (1. School of Automation,
Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;
2. The First Aviation College of the Air Force,
The Chinese People's Liberation Army, Xinyang 464000, China;
3. Unit 92941, The Chinese People's Liberation Army,
Huludao 125001, China)

Abstract: Based on analysis and improvement of simple response method (SRM) and Weibull reliability method for calibration intervals of test system, and by taking into account fault decisions on the calibration process, the decision risks on verification of test system were resolved. In this paper, related national measurement standards on reliability index of test system were firstly introduced, then some usual calibration interval determination methods were also discussed, and furthermore the reliability probability functions for observational value of test reliability were given. By synthesizing different parameters with principal component analysis (PCA) method, the estimation values of the optimal calibration interval were corrected. Lastly, the results of verification on digital multimeter (DMM) measurement channel in automatic test system (ATS) show that the calibration intervals optimization methods are feasible.

Key words: calibration interval; reliability index; Weibull model;
fault decision probability; principal component analysis

收稿日期: 2009-09-21; 修订日期: 2010-05-19

基金项目: 国家自然科学基金(60904085)

作者简介: 韩旭(1975-), 男, 辽宁开原人, 博士生, 主要从事信息系统工程, 嵌入式系统研究。

通常, 测量仪器或测试系统长期使用后都会出现测量特性退化、老化、误操作及不确定性增加等问题, 而进行周期性的仪器校准则是解决以上问题的一个常规方法^[1-2]. 为了加强法定(含授权)计量检定机构调整强制检定工作计量器具检定周期的管理, 国家质量技术监督局在“关于加强调整强制检定工作计量器具检定周期管理工作的通知”(质技监局量发[2000]182 号)^[3]中给出了较详细的要求规范.

一般来说, 测量仪器或测试系统连续两次校准之间的时间间隔称为校准周期(calibration interval)^[4]. 根据“中华人民共和国国家计量技术规范 JJF 1139—2005”^[5]中的有关规定, 可靠性指标是指其保持在所期望的合格范围内的概率, 测量可靠性指标随时间变化的曲线如图 1 所示, 通常要求其不小于 90%. 有鉴于此, 本文中取 90% 作为可靠性度量的参考值.

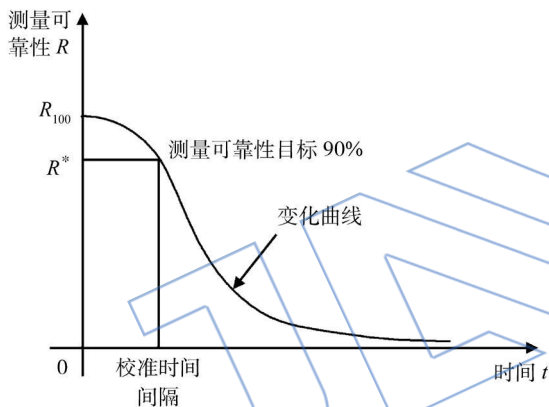


图 1 测量可靠性 $R(t)$ 变化示意图

Fig. 1 Variation graph of measure reliability $R(t)$

1 基于可靠性指标的校准周期确定方法

确定校准周期的常用的方法有两种: 直接反应法和可靠性模型法.

1.1 直接反应法

一般地, 直接反应法(simple response method, 简称 SRM) 都参照上一次校准的结果来调整校准周期. 如果被校准对象在正常的误差范围内, 则下一次的校准时间间隔可通过增量系数 $a(a > 0)$ 延长; 反之, 若被校准对象超出正常误差范围, 则校准时间间隔应通过减量系数 $b(0 < b < 1)$ 缩短. 假设第 $n+1$ 次校准的时间间隔为 I_{n+1} , 则按照 SRM 确定的迭代关系可以表示为

$$I_{n+1} = I_n(1 + a)y_n + I_n(1 - b)\bar{y}_n$$
$$n = 0, 1, \dots \tag{1}$$

式中 y_n 为布尔变量, 若第 n 次校准的结果在允差内, 则取 1; 反之则取 0. 因此, 有 $y_n + \bar{y}_n = 1$.

根据文献[6], 随着测试系统校准次数或校准时间间隔的增加, 可靠性指标的收敛值将仅与增/减量系数 a 和 b 有关, 它们与可靠性指标 R^* 的关系如下:

$$R^* = \ln(1 - b) \left/ \ln \left[\frac{1 - b}{1 + a} \right] \right. \tag{2}$$

1.2 可靠性模型法

可靠性模型法是依据典型的可靠性函数模型来拟合校准历史数据, 通过曲线拟合的方式确定各个参数, 并最终获得拟合函数模型. 而失效分布则由于产品失效机理或失效模式的不同也会存在差异. 常用的函数模型包括指数分布、对数正态分布及威布尔分布等, 这里选用威布尔(Weibull)分布模型来描述测量可靠性 $R(t)$.

威布尔分布是瑞典科学家威布尔(Weibull W)提出的一种概率分布函数, 它适用性广、覆盖性强^[7], 是可靠性工程中最广泛应用的寿命分布之一. 通常, 三参数是威布尔分布最一般的表达形式, 而这里则采用二参数形式的威布尔分布来描述测试系统的时效, 这样得出的概率密度函数和分布函数如下:

$$\begin{cases} f(t) = \frac{\beta \cdot t^{\beta-1}}{\eta^\beta} \cdot \exp\left[-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta\right] \\ F(t) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta\right] \end{cases}$$
$$\beta, \eta, t \geq 0 \tag{3}$$

式(3)中 η 为尺度参数, β 为形状参数, t 为使用时间.

因此, 采用威布尔分布表示测量可靠性的时效特性, 相应的表达式为

$$R(t) = R_0 e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta}, \quad t \geq 0 \tag{4}$$

假设 R^* 为既定的可靠性指标, 则依据公式(4)可得出最佳校准周期

$$t^* = \eta \sqrt[\beta]{\ln \left[\frac{R_0}{R^*} \right]} \tag{5}$$

需要说明, 为了获取有意义的时间值, 要求 R_0 值大于 R^* 值, 一般取 R^* 为 90%.

2 测量可靠性观测值的确定

测量可靠性的测算最简单的方式就是通过计算单位时间内允差事件数目与总校准数目的比值来取得. 这里, 为了更准确的测算出测试系统的测量可靠性, 利用可靠性概率函数的方式来描述被校系统的允差状态. 通过对被校参数概率密度函数的计算来确定其在允差范围内的概率. 假设被测量值服从高斯分布, δ 为最大允许的测量不确定度, x_m 为测量期望值, 则在预定的置信水平下, 测量值的置信区间为 $[x_m - \delta, x_m + \delta]$. 从而特定参数的测量可靠性可表示为

$$R(t) = \int_{x_m - \delta}^{x_m + \delta} f_t(x) dx \tag{6}$$

考虑实际中参数的 PDF (probability density function) 分布形状与类型随着时间都会发生变化, 设某时刻参数测量值的扩展不确定度的置信概率为 95%, 则式(6)可变换为

$$R(t) = \int_{x_m - \delta}^{x_m + \delta} f(x) dx = \frac{\int_{x_m - \delta}^{x_m + \delta} f(x) dx}{95\%} \times 0.95 = \frac{0.95\delta}{U_{95}} = \begin{cases} 1, & \text{当 } 0.95\delta \geq U_{95} \text{ 时} \\ \frac{0.95\delta}{U_{95}}, & \text{当 } 0.95\delta < U_{95} \text{ 时} \end{cases} \tag{7}$$

标准不确定度可根据检定所得的参数测量值计算得出, 结合相应的包含因子后, 即可计算得出 95% 置信概率情况下的扩展不确定度 U_{95} . 然后再利用公式(7)即可计算出特定时刻的测量可靠性观测值. 同理, 也可以测算出其他置信水平下的可靠度表达式. 由此可见, 近似计算时并不需要对复杂的概率分布进行积分运算.

3 主元分析法

对于多参数、多通道或多功能的测试系统来说, 依据单一的参数或测量质量来判断其性能状态, 并最终确定校准周期显然是不可取的. 例如, 当校准数字万用表(DMM)时, 不仅需要考虑直流电压(DCV)、交流电压(ACV)、直流电流(DCA)、交流电流(ACA)以及直流电阻(DCR)等多个性能指标, 而且还要考虑到各个指标之间的相关性. 在综合评价多校准参数测试系统方面, 主元分析(principal component analysis, 简称 PCA)

法能够有效消除变量间相关性^[8], 将多指标问题转化为少量综合指标的问题, 从而更合理科学地确定测试系统的最佳校准周期.

PCA 消除变量间相关性的原理是利用线性变换将原始数据映射到一个新的正交子空间中, 从而找出占据主要地位的特征(即“主元”), 达到矩阵降维、以及减弱或消除数据相关性的目的. 例如, 设 $X = (x_{ij})_{N \times M}$ 为 $N \times M$ 大小的矩阵, N 为样本数, M 为测量变量的个数. 则按照主元分析法可得出如下 PCA 模型:

$$X = TP^T + E = t_1p_1^T + t_2p_2^T + \dots + t_kp_k^T + E \tag{8}$$

其中 $t_i \in \mathbf{R}^N$ 为主元得分向量, $p_i \in \mathbf{R}^M$ 为负载向量, E 为残差项.

4 自动测试系统校准周期确定

某型导弹装备的自动测试系统(ATS)校准周期的调整及确定是以其各个测量通道的校准结果为基础的. 测试系统通过设置溯源接口被上级计量标准量值溯源, 量值溯源的精度按照逐级标准增加 3~10 倍的方式确定^[9-11]. 下面以 DMM 的测量通道校准为例, 对基于测量可靠性的测试系统校准周期确定方法予以介绍.

4.1 检定方法

根据“标准源发生器法”, 检定数字万用表时, 选用了美国的 FLUKE 多功能校准器 5720A. 该校准器可以提供直流电压、交流电压、直流电流、交流电流以及电阻等五种校准功能, 其各项技术指标均能满足既定的检定要求, 并且具备合法的、尚在有效使用期的系列检定证书. 这样, 由具有多年检定经验的检定员对待检定 DMM 通道的直流电压、交流电压、直流电流、交流电流、直流电阻五项参数实施了检定.

4.2 检定数据

该套 ATS 系统自 2005 年 3 月交付使用后, 一直没有检定和校准. 为了判断其 DMM 通道测量性能并获取时效特性, 从 2006 年 3 月起, 每隔 2 个月就对其进行一次检定. 主要检定项目设置如下:

- 直流电压(DCV): 10V;
- 交流电压(ACV): 10 V (100 Hz);
- 直流电流(DCA): 20mA;
- 交流电流(ACA): 200mA (100Hz);
- 直流电阻(DCR): 10k Ω.

每次检定中, 每个检定项目取 30 个样本数据. 则得出的数字万用表通道检定数据如表 1 所示.

4.3 测量可靠性计算

根据表 2 中给出的被校准 DMM 通道各项目的最大允差指标, 将由表 1 中检定数据计算得出的扩展不确定度 U_{95} 代入公式(7), 即可计

算出各个检定项目在相应时间点下的测量可靠性. 如果假设初始时刻的测量可靠性指标为 99%, 并按序列对每 2 个月检定一次的时间点进行排列, 假设交付使用初始时刻定义为 $t=0$, 则表 1 中所列时间点可分别对应于表 2 中的 $t=6, 7, 8, 9$, 其计算得出的各个时间点测量可靠性如表 2 所示.

表 1 数字万用表通道检定数据
Table 1 Channel calibration results of DMM

项目	2006 年 3 月	2006 年 5 月	2006 年 7 月	2006 年 9 月
直流电压(DCV)/V	10.0024±0.0129	10.0030±0.0134	10.0039±0.0144	10.0051±0.0176
交流电压(ACV)/V	9.9996±0.0134	9.9993±0.0142	9.9988±0.0147	9.9991±0.0178
直流电流(DCA)/mA	19.76±0.26	19.79±0.29	19.83±0.31	19.86±0.35
交流电流(ACA)/mA	200.2±5.4	200.3±5.7	200.3±6.4	200.4±6.9
直流电阻(DCR)/kΩ	9.9998±0.0668	9.9998±0.0701	9.9998±0.0781	9.9998±0.0850

表 2 各个时间点测量可靠性数值
Table 2 Measure reliability results at each test time

项目	$t=0$	$t=6$	$t=7$	$t=8$	$t=9$	最大允差
直流电压(DCV)	0.99	0.76744	0.73881	0.6875	0.5625	10mV
交流电压(ACV)	0.99	0.73881	0.69718	0.67347	0.55618	10mV
直流电流(DCA)	0.99	0.76154	0.68276	0.63871	0.56571	0.2mA
交流电流(ACA)	0.99	0.73333	0.69474	0.61875	0.57391	4mA
直流电阻(DCR)	0.99	0.74102	0.70613	0.6338	0.58235	50Ω

为了进一步评价出影响 DMM 通道测量可靠性的主元, 根据主元分析法, 通过对检定数据进行 PCA 运算, 得出了 DMM 通道 5 个检定项目的降序排列的特征值

$\lambda = [4.9262 \ 0.0608 \ 0.0088 \ 0.0042 \ 0]$
分别累积计算各主元的贡献率后, 发现第 1 主元的贡献率达到了 98.523%, 因此, 这里取第 1

主元作为新的测量变量, 根据公式(8) 计算得出

$$t_1 = 0.4449x_1 + 0.4471x_2 + 0.4489x_3 + 0.4469x_4 + 0.4482x_5$$

然后, 取表 2 中各个时间点测量可靠度的最小值作为主元分析回归模型样本数据, 向原始数据回归映射, 即可得出相应的模型参数

$$A = [0.00644 \ 0.00647 \ 0.00650 \ 0.00647 \ 0.00649]^T$$

最后, 基于得到的主元回归模型, 即可计算取得 PCA 综合后的测量可靠性

$$R(t) = X \cdot A = [0.827 \ 0.738 \ 0.672 \ 0.640 \ 0.481]^T$$

4.4 威布尔模型拟合

以检定时间间隔(60 天为一个刻度单位)为

横坐标, 以 DMM 通道测量可靠性为纵坐标, 根据表 2 中各检定项目不同时间点的可靠性的观测值以及 PCA 综合计算得出的测量可靠性, 可绘制出 DMM 五个单项的拟合曲线以及 PCA 综合计算后的威布尔拟合曲线, 如图 2 所示. 并可得出各单项及 PCA 综合的威布尔模型拟合参数, 如表 3 所示.

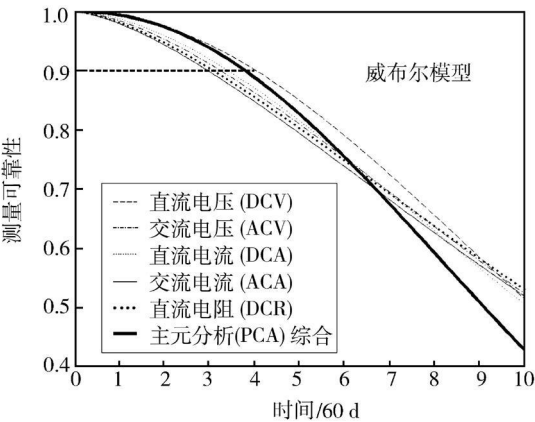


图 2 威布尔模型下的拟合曲线
Fig. 2 Fitting curves with Weibull model

表 3 威布尔模型拟合参数
Table 3 Fitting parameters of Weibull model

项目	η	β	均方差/ 10^{-5}
直流电压(DCV)	12.24	2.04	46.7
交流电压(ACV)	13.09	1.62	43.8
直流电流(DCA)	12.47	1.75	6.44
交流电流(ACA)	13.25	1.51	6.91
直流电阻(DCR)	13.48	1.53	6.90
主元分析(PCA)综合	10.81	2.16	665

4.5 最佳校准周期的确定

校准过程中首先要考虑的就是误判率可能对测量可靠性的影响,通过近似计算得 $P_{fr}=0.8\%$, $P_{fa}=1.2\%$.

假设可靠性指标 R^* 取 90%,则根据 PCA 综合得到的威布尔可靠性模型,利用公式(5)可计算出经过修正后的最佳校准周期

$$t^* = \eta \sqrt[\beta]{\ln \left[\frac{R_0}{R^* \cdot (1 + P_{fr})} \right]} =$$
$$60 \times 10.81 \times \sqrt[2.16]{\ln \left[\frac{1}{0.95 \cdot (1 + 0.008)} \right]} =$$
$$151.65 \text{ (天)}$$

相比之下,如果采用直接反应法(SRM)进行调整校准,为保证 90% 的预定可靠性指标,则根据公式(2)中增/减量系数与可靠性指标之间的关系,如果取增/减量系数: $(a, b) = (0.1, 0.55)$,则利用公式(1)计算得出的修正后校准周期为

$$I_{n+1} = I_n(1 - b)(1 + P_{fr}) =$$
$$365 \times (1 - 0.55) \times (1 + 0.8\%) = 165.6 \text{ (天)}$$

5 结 论

在测试系统最佳校准周期确定的常用方法中,应根据实际情况选用最适合的方法^[12].

当测试系统的使用寿命较短时,推荐使用直接反应法,利用最后一次的校准结果来调整校准时间,因为该方法简单易行,且无需大量的数据分析.但需要注意的是,测试系统的校准周期不应设定过长.

当测试系统寿命较长,且已积累了大量测试数据时,推荐使用威布尔可靠性模型法,根据预置的测量可靠性指标来确定最佳的校准周期.因为该方法是以大量的校准历史数据来拟合测量时效性的,所以相对直接反应法而言要更为科学,能够有效优化、延长测试系统的校准周期.

当校准过程中需要考虑不确定度的影响时,认为在直接反应法和威布尔可靠性模型法中引入误判率指标来进一步修正校准周期的方式要更为合理.

另外,在优化测试系统校准周期的研究方面,也有学者提出可在测试系统的研制过程中就采取适当措施^[13].但实践中往往检定方法越精细,其复杂性就会越大.对此,测试系统研制与检定人员应根据实际情况去具体判定选择.

本文对直接反应法和威布尔可靠性模型法的适应性进行了论述,着重论述了采用主元分析法来综合评价不同测量参数的影响来确定可靠性指标,再利用威布尔可靠性模型法来修正最佳校准周期的计算方法,并以 DMM 为例说明了具体实现过程,得到了相应的结论.该结论同样适用于其他测试系统标校周期的优化.

参考文献:

[1] Panfilo G, T avella P, Nunzi E, et al. Optimal calibration interval determination techniques: the example of a rubidium frequency standard[J]. IEEE transactions on Instrumentation and Measurement, 2006, 55(5): 1713-1719.

[2] De Capua C, De Falco S, Liccardo A, et al. A virtual instrument for estimation of optimal calibration intervals by a decision reliability approach[C] // 2005 IEEE Symposium on Virtual Environments, Human Computer Interfaces and Measurement Systems. Italy: IEEE, 2005.

[3] 国家质量技术监督局. 关于加强调整强制检定工作计量器具检定周期管理工作的通知(质技监局量发[2000] 182

- 号)[EB/OL]. 北京: 国家质量技术监督局, 2000[2009-12-02]. <http://law.148com.com/html/1253/274781.html>.
- [4] Bobbio A, Tavella P, Montefusco A, et al. Monitoring the calibration status of a measuring instrument by a stochastic model[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 1997, 46(4): 747-751.
- [5] 国家质量监督检验检疫总局. JJF 1139-2005 计量器具检定周期确定原则和方法[S]. 北京: 国家质量监督检验检疫总局, 2005.
- [6] Carbone P. Performance of simple response method for the establishment and adjustment of calibration intervals[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2004, 53(3): 730-735.
- [7] 骆红云, 邢波, 王宏伟. Weibull 分析及工程应用[J]. 机械与电子, 2006(5): 74-76.
LUO Hongyun, XING Bo, WANG Hongwei. Weibull analysis and its application in project[J]. Machinery and Electronics, 2006(5): 74-76. (in Chinese)
- [8] 杨宾峰. 脉冲涡流无损检测若干关键技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2006.
YANG Bin Feng. Research on several key techniques of pulsed eddy current nondestructive testing[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2006. (in Chinese)
- [9] Stuckman B E, Perttunen C D, Usher J S, et al. Stochastic modeling of calibration drift in electrical meters[C] // Instrumentation and Measurement Technology Conference, IMTG 91. Atlanta, Georgia: IEEE, 1991: 530-536.
- [10] 朱立锋. 基于田口方法的数字信号源校准及其测量不确定度研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2005.
ZHU Lifeng. Research for the calibration and the measurement uncertainty of digital signal generator based on taguchi method[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2005. (in Chinese)
- [11] LIN Kuohuang, LIU Binda. A gray system modeling approach to the prediction of calibration intervals[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2005, 54(1): 297-304.
- [12] 爻伟群. 测量不确定度比和单台仪器检定结论的风险关系研究[J]. 计量学报, 2007, 28(1): 93-96.
SHU Weiqun. A study on relationships between the test uncertainty ratio and the risks of the certification result of one measuring instrument[J]. Acta Metrologica Sinica, 2007, 28(1): 93-96. (in Chinese)
- [13] Max S. Extending calibration intervals[C] // The 1996 IEEE International Test Conference. Washington, DC, USA: IEEE, 1996: 118-126.