

滑动窗口数据累加算法在提高核仪器安全性中的应用

李正平,冉天纲

(安徽大学电子信息工程学院,安徽合肥 230601)

摘要:在保证测量精度的前提下,提高核仪器仪表的系统安全性是一个重要课题,但提高系统安全性往往导致系统测量精度与响应速度的下降以及成本的提高,于是提出了一种基于滑动窗口累加的数据处理算法,在保持测量精度、响应速度和成本基本不变的前提下,可有效提高基于射线强度测量的核仪器仪表的安全性.该算法利用历史测量数据参与计算,降低了对放射源强度的要求,同时保证了统计误差基本不变.此外,利用 Monte Carlo 等方法重点分析了影响算法适用的各种因素,给出了算法的适用范围.

关键词:数据累加算法;射线强度;相对误差;响应速度;系统安全性

中图分类号:TP301,TL81 **文献标识码:**A **doi:**10.3969/j.issn.0253-2778.2015.01.009

引用格式:Li Zhengping, RAN Tiangang. Application of a sliding-window data accumulation algorithm for improving security in radiant intensity detection systems[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2015,45(1):56-60.

李正平,冉天纲. 滑动窗口数据累加算法在提高核仪器安全性中的应用[J]. 中国科学技术大学学报, 2015,45(1):56-60.

Application of a sliding-window data accumulation algorithm for improving security in radiant intensity detection systems

LI Zhengping, RAN Tiangang

(School of Electronic Information & Engineering, Anhui University, Hefei 230601, China)

Abstract: Improving measure accuracy and system security of nuclear instruments is of great importance. In general, improving accuracy will cause a decrease in system security and response speed. So a new sliding-window accumulation algorithm was given, which could improve measurement accuracy in radiant intensity detection, and the system security and response speed remain largely unchanged at the same time. A detailed algorithm analysis based on Monte Carlo method was presented, which indicated the scope of application of the algorithm.

Key words: data accumulation algorithm; relative error; response speed; system security; Monte Carlo method

0 引言

近年来,随着核技术的应用发展,以利用元素放

射性原理,对物质进行放射性种类和含量进行检测的核辐射式检测仪器(即核仪器)已广泛应用于医疗、工业等多个领域.鉴于核技术的特殊性,对于任

收稿日期:2014-01-11;修回日期:2014-08-05

作者简介:李正平(通讯作者),男,1979年生,博士/副教授.研究方向:嵌入式系统、电路与系统. E-mail: bluefeynman@gmail.com

何利用 γ 射线吸收原理进行测量的核仪器仪表, 安全性都是需要重点考虑的问题. 安全性与系统成本, 测量精度和响应速度均有密切关系, 提高安全性需要综合考虑这些因素.

提高系统安全性的基本方法是加强辐射防护和降低放射源活度. 梁石强根据核仪器在土建工程中的应用提出了外照射防护方法, 即时间防护(严格控制人员在有源处的停留)、距离防护(利用可靠工具增加离源距离)、屏蔽防护(利用有机玻璃等屏蔽相关粒子)等, 并从源的选择和仪器结构方面严格要求^[1]; 杨值宗等在外照射防护的基础上又提出了内照射防护, 即通过穿戴防护衣、防护面具等来提高安全性^[2]; 陈桂明等^[3]和 Bedogni 等^[4]根据不同粒子的特性从研究新的核辐射防护材料的角度来提高安全性. 上述工作都是从加强辐射防护的角度提出一系列方案, 但是这样会直接导致成本的上升.

根据误差分析理论^[5-6], 影响测量精度的探测器计数相对统计误差 δ 满足:

$$\delta = 1/\sqrt{I} = 1/\sqrt{n\Delta t} \propto 1/\sqrt{A\Delta t} \quad (1)$$

式中, I 为探测器计数, n 为探测器计数率, Δt 为采样周期, A 为放射源活度. 为提高系统安全性而简单地降低 A , 会影响系统的测量精度; 若保证测量精度不受影响, 可能的方法是在降低 A 的同时增大 Δt , 然而这样会影响系统的响应速度.

为了在既不牺牲系统响应速度和测量精度, 又不增加成本的前提下, 提高系统的安全性, 我们提出了一种基于滑动窗口数据累加的处理算法. 该算法通过降低活度 A , 有效地提高系统安全性, 同时保持采样周期 Δt 和辐射防护不变化, 避免了对响应速度和系统成本的影响; 通过适当的数据处理算法保证测量精度基本不受影响.

1 算法的基本思想

根据式(1), 为提高系统安全性, 我们保持采样周期 Δt 不变, 将放射源活度 A 降低 m 倍, 即相应的探测器计数率 n 也相应降低 m 倍, 为避免测量精度下降, 算法取长度为 m 的滑动窗口, 其中包含最近 m 个周期的采样值, 每个采样周期, 将该次采样值插入窗口, 同时将最早一次的采样值从窗口中删除. 在计算该采样周期的被测物理量(如质量、密度等)时, 我们用窗口中 m 次采样计数的累加值代替单次采样值参与计算. 这样, 每次计算使用的计数仍然为 $n\Delta t$, 从而保证了测量的精度.

2 算法适用范围分析

上述的讨论基于计数率 n 是常数(即被测量保持不变的假设, 在这种情况下, 该算法对测量精度和响应速度没有任何影响. 实际情况下, 被测量往往是动态变化的, 计数率随之动态变化, 此时会对算法测量精度和系统响应速度产生不利影响, 限制其适用范围.

我们将被测量的动态变化分为两类: 一是在某时刻的阶跃, 即从 $x \rightarrow x + \Delta x$; 二是围绕一相对稳定数值的随机涨落. 这两种变化可能叠加在一起.

γ 射线穿过物质后强度的衰减满足^[5]:

$$I = I_0 e^{-\mu_M \rho d} = kA\Delta t e^{-\mu_M \rho d} \quad (2)$$

式中, I_0 、 I 分别是穿过物质前后射线的强度, k 为与放射源准直特性有关的参数, A 为源强, Δt 是采样周期, μ_M 为吸收系数, ρ 、 d 分别是物质密度和厚度. 令 $x = \mu_M \rho d$, 则

$$x = \ln kA\Delta t - \ln I \quad (3)$$

设在第 w 个采样周期 t_w 时被测量 x_w 有一个突变, 即: $x_w = x_0 + \Delta x = x_0(1 + \sigma)$, 其中 x_0 是 t_w 时刻突变前被测量的值, σ 为被测量 x 的相对变化. 那么根据上述算法以及式(2)和(3), 在第 $w+i$ 个采样周期, x 的测量值为:

$$\begin{aligned} x_c &= \ln kAm\Delta t - \ln I = \\ &= \ln kAm\Delta t - \ln[kA\Delta t i e^{-(x_0 + \Delta x)} + kA\Delta t(m-i)e^{-x_0}] = \\ &= \ln kAm\Delta t - \ln[kA\Delta t e^{-x_0}(m-i + i e^{-\Delta x})] = \\ &= x_0 - \ln\left[1 - \frac{i}{m} + \frac{i}{m} e^{-\Delta x}\right] \end{aligned} \quad (4)$$

则由该算法导致的额外相对误差为:

$$\delta = \frac{x_w - x_c}{x_w} = \frac{\Delta x + \ln\left[1 - \frac{i}{m} + \frac{i}{m} e^{-\Delta x}\right]}{x_0 + \Delta x} \quad (5)$$

式中, m 为窗口尺寸, 即累加计数的项数.

除了阶跃变化外, 测量值还可能围绕一期望值随机涨落. 设探测器计数率为 $n(t)$, 待测量为 $x(t)$, 二者均是时间的测量函数, 采样周期为 Δt , 算法中窗口尺寸(累加的项数)为 m . 则对某一采样周期 w ($w > m$), 根据式(2)和(3)可得出被测量的测量值为:

$$\begin{aligned} x_c &= \ln(kAm\Delta t) - \ln\left(\sum_{i=w-m+1}^w n_i \Delta t\right) = \\ &= \ln(kAm\Delta t) - \ln\left(\sum_{i=w-m+1}^w kA\Delta t e^{-x_i}\right) = \\ &= -\ln\left[\frac{1}{m} \sum_{i=w-m+1}^w e^{-x_i}\right] \end{aligned} \quad (6)$$

式中, x_c 为被测量在第 w 个采样周期的测量值, n_i 和 x_i 分别为第 i 个周期的计数率和被测量的实际值.

那么, 该测量值的相对误差为:

$$\delta = \left| \frac{x_w - x_c}{x_w} \right| = \frac{x_w + \ln \left(\frac{1}{m} \sum_{i=w-m+1}^w e^{-x_i} \right)}{x_w} \quad (7)$$

若 $x(t)$ 是围绕一期期望值上下随机涨落的变量, 即 $x(t) = x_0 + \Delta x(t)$, 其中 x_0 为期望值, 则式(7)可改写为:

$$\delta = \frac{\Delta x_w + \ln \left(\frac{1}{m} \sum_{i=w-m+1}^w e^{-\Delta x_i} \right)}{x_0 + \Delta x_w} \quad (8)$$

式中, Δx_i 为第 i 个采样周期被测量的涨落.

下面我们分析该算法在测量对象动态变化时对测量精度和响应速度的影响, 并最终给出算法的适用范围.

2.1 对系统响应速度的影响

系统响应速度即实时性反映了当测量对象发生变化时, 系统跟随的快慢程度. 响应速度越快, 则当测量对象变化时, 式(5)的 δ 趋向于零的速度越快. 下面我们根据式(5)研究影响系统响应速度的因素.

图 1 是 x_0 与响应速度的关系曲线. 我们假设测量对象 x 的相对变化为 $\sigma = 10\%$, 由图可见, 如当 $m=2$, 在 x 突变后的第一个采样周期 ($i=1, i/m=0.5$), 对 $x_0=50$ 的相对误差 δ 为 7.8%, 而对 $x_0=5$ 时, δ 则为 5.1%, 即 x_0 越大, 系统响应速度受算法的影响越大.

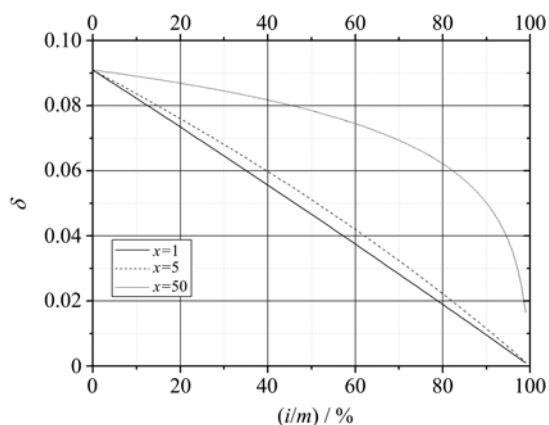


图 1 X_0 与响应速度的关系

Fig. 1 Relationship between X_0 and response speed

图 2 为 x 的相对变化量 σ 对系统响应速度的影响, 显然相对变化量越大, 系统响应速度越慢.

影响响应速度的另一个因素是算法中的窗口尺

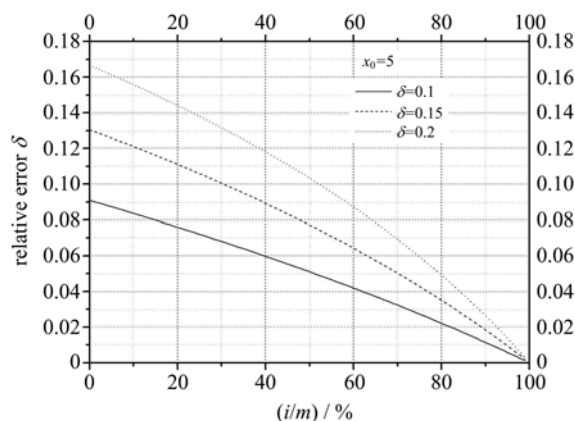


图 2 σ 与响应速度的关系

Fig. 2 Relationship between σ and response speed

寸 m , 由于该算法实际上执行了某种意义上的平均, 所以 m 越大系统的响应速度越慢.

2.2 对测量误差的影响

对于阶跃变化, 测量的相对误差由式(5)给出. 根据上面对系统响应速度的分析, 我们知道影响误差的主要因素有:

(I) 测量的误差直接受被测量 x 阶跃的幅度 Δx 影响, 两者成正比. 比如, 当 $x_0=5, \Delta x=0.25, m=2$ 时, 在 x 阶跃后的第一个采样周期 ($i=1$), 误差 $\delta=2.5\%$, 而当 Δx 上升到 0.5 (其他条件不变) 时, $\delta=5.1\%$.

(II) 测量误差受窗口尺寸 m 的影响, m 越大, 当采样次数小于窗口尺寸 ($i < m$) 时测量误差也越大. 分析结果见表 1 所示.

表 1 m 对 δ 的影响

Tab. 1 m 's influence on the δ

m	i	x_0	Δx	δ
2	1	5	0.5	5.1%
2	2	5	0.5	0
3	1	5	0.5	6.5%
3	2	5	0.5	3.6%
3	3	5	0.5	0
4	1	5	0.5	7.2%
4	2	5	0.5	5.1%
4	3	5	0.5	2.7%
4	4	5	0.5	0
10	1	5	0.5	8.4%
10	2	5	0.5	7.6%

表 1 中, 对于 $x_0=5, \Delta x=0.5, m=2$ 的情况, 在 x 阶跃后的第一个采样周期 ($i=1$), 误差 $\delta=5.1\%$, 在第 2 个采样周期 ($i=2, i=m$) 时 $\delta=0$. 对于 $m=$

10, x 的第一个采样周期 ($i=1$, 其他条件不变) 时 $\delta=8.4\%$, 第 2 个周期 ($i=2$) 则为 7.6% .

(III) 测量误差还受 x_0 的影响, 同等条件下 x_0 越大, 则误差也越大.

由于核辐射的随机性, 不同的测量目标其分布规律也不尽相同, 甚至没有明显规律, 一般通过测量目标数据的直方图和理论分布比较得出一个感性认识, 然后从概率意义上比较两者之间的差异是否明显, 即判断它的特性接近于或类似于哪一种分布. 为简单起见, 我们的分析选取被测量的分布为比较糟糕的均匀分布的假设. 实际情况下, 测量对象更可能是一种类 Gauss 分布或泊松分布^[7]. 很容易看出, 这两种分布导致的误差要比均匀分布小, 因为对于 Gauss 分布和泊松分布, 随机涨落落入靠近期望值附近区域的几率更大, 因此, 我们由均匀分布得出的结论同样适用于这两种分布, 并且效果更好.

基于上述分析, 假设 Δx_i 为 $[-\Delta x_{max}, \Delta x_{max}]$ 范围内的均匀分布, 下面我们利用 Monte Carlo 方法来分析被测量随机变化时影响测量误差的因素^[8-11]. 该方法是利用计算机模拟生成服从各种分布规律的随机数并进行统计分析处理, 可以比较逼真地描述出具有随机性的事物的特点及其物理实验过程, 能够解决很多数值方法难以解决的问题, 因此被广泛应用于核技术应用研究中^[12-13].

首先我们研究自变量 Δx_{max} 对因变量 δ 的影响, 模拟中固定 $x_0=10$, 结果如图 3 所示. 图中横轴 σ_{max} 取 Δx_{max} 与 x_0 的比值. 由图 3 可见随着 Δx_{max} 的增大, 相对误差 δ 迅速增大. 如当 $m=2, \sigma_{max}=10\%$ 时, δ 约为 0.5% , 而当 σ_{max} 上升到 20% 时, δ 上升到约 1.6% , 远超过 σ_{max} 增大的幅度.

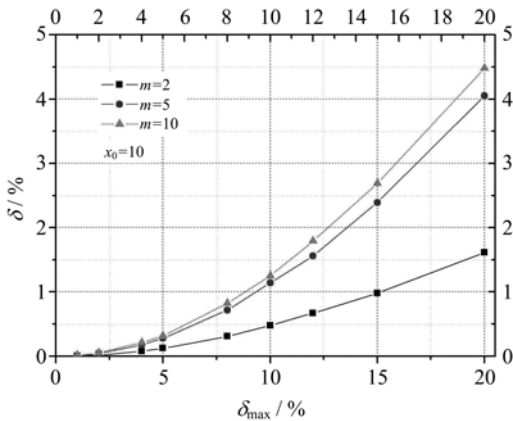


图 3 σ_{max} 与相对误差的关系

Fig. 3 Relationship between σ_{max} and relative error

影响测量误差的另一个重要因素是 m 的取值. Monte Carlo 分析的结果如图 4 所示, 图中分别为 $\sigma_{max}=10\%, x_0=5$; $\sigma_{max}=10\%, x_0=10$; $\sigma_{max}=2\%, x_0=5$ 三种情况下自变量 m 与因变量 δ 的关系曲线. 由图 4 可见, 当 $m<8$ 时, 随着 m 的增大, δ 也随之增大. 当 $m>8$ 后, m 的进一步增大基本不影响误差. 如在 $\sigma_{max}=10\%, x_0=5$ 这种情况下, $m=2$ 时的 δ 约为 0.2% , $m=8$ 时 δ 上升到 0.5% , 而 $m=20$, δ 值基本保持在 0.5% 不变.

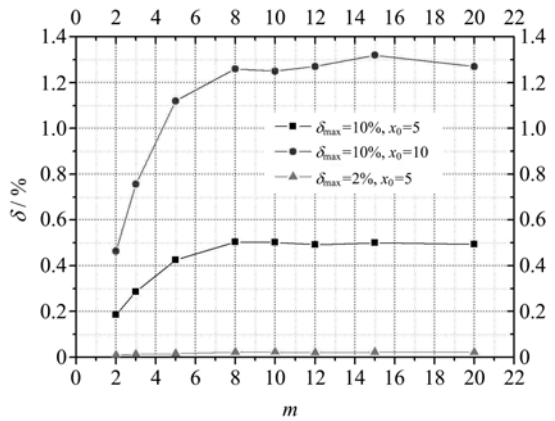


图 4 m 与相对误差的关系

Fig. 4 Relationship between m and relative error

此外, x_0 也是影响测量精度的可能因素. 我们在固定 $\sigma_{max}=10\%$ 的前提下, 分别对 $m=2, 5, 10$ 三种情况下, 因变量 δ 与自变量 x_0 的关系进行了模拟, 结果见图 5 所示.

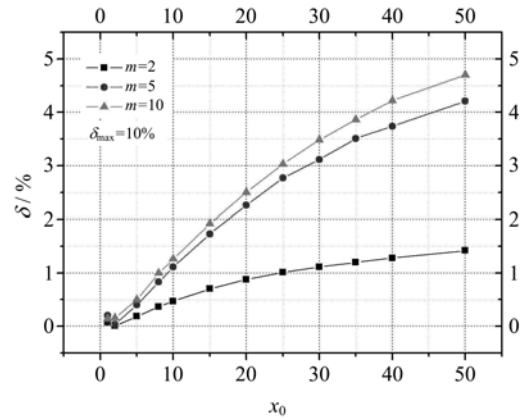


图 5 x_0 与相对误差的关系

Fig. 5 Relationship between x_0 and relative error

由图 5 可见, x_0 越大, 导致的误差 δ 也越大. 如对 $m=2, \sigma_{max}=10\%$ 来说, $x_0=10$ 时, $\delta=0.5\%$, 而当 $x_0=50$ 时, δ 上升到约 1.5% . 显然, x_0 也是影响测量精度的重要因素之一.

2.3 算法的适用性分析

根据上面的分析,该算法适用于对物理量进行长时间连续监测,且被测量变化幅度较小,突变较少的场合.

当被测量发生变化时,如果只是作短时间的一次性测量,该算法将可能导致很大的误差,并且由于算法在每个采样周期计算被测量时,都利用了前 $m-1$ 个周期的计数,因此如果只是短时间内的一次性测量,算法本身已经失去意义.

此外,该算法的有效性取决于被测量 x 的大小和变化情况.如果被测量的平均值 x_0 很大,或者其变化的幅度过大或突变较多,都将导致较大的误差,同时也将影响系统的响应速度.在实际应用中需要根据可接受的精度和响应速度,被测量的平均值大小,变化的幅度以及满足的随机分布规律做出具体的分析,确定 m 的数值,分析采用该算法的可行性.

3 应用验证

算法已经成功应用于我们开发的大中型挖泥船产量测试系统^[14-15].该系统通过测量 γ 射线穿过泥浆的衰减来计算泥浆密度,并配合电磁流量计测量泥浆流速,从而实现对挖泥船产量的实时连续测量.根据实际经验,挖泥船工作状态下,所挖泥浆的密度一般在 $1.15 \sim 1.20 \text{g/cm}^3$,上下变化最大不超过 10%.被测量的期望值(即式(8)中的 x_0)约为 6.5.除非工况发生明显变化,泥浆密度基本不发生突变(即前面提到的阶跃变化).此外,泥浆密度的变化大致满足 Gauss 分布,从长期的效果看,由被测量变化导致的测量误差趋向于 0.鉴于这样的情况,我们取 $m=2$,同时将放射源活度降低一半,最后实测的结果表明系统的实时性基本没有下降,系统测量精度从原先的 0.90% 变为约 0.95%,也没有明显影响,但由于放射源活度减小了一半,系统的安全性得到了成倍提高,明显减少了辐射污染.

4 结论

提高核仪器仪表的安全性是核检测技术领域的重要课题.本文提出了一种基于滑动窗口数据累加的处理算法,以有效提高系统安全性,并分析了被测量动态变化时该算法对测量精度和实时性带来的影响.在此基础上,对算法的适用性进行了分析;最后我们介绍了该算法在大中型挖泥船产量测试系统中的应用,实践表明,该算法可以在保持测量精度、响

应速度和系统成本基本不变的前提下,有效提高系统安全性.

参考文献(References)

- [1] 梁石强.核仪器在土建工程中应用的辐射防护和安全管理[J].核电子学与探测技术,1992,12(3):167-172.
 - [2] 杨植宗,邓磊,喻莉,等.核辐射及其安全防护[J].物理通报,2012,(2):117-120.
 - [3] 陈桂明,阳能军,董振旗,等.一种新型核辐射防护材料的设计与应用研究[J].核技术,2003,26(10):783-788.
 - [4] Bedogni R, Esposito A, Angelone M, et al. Determination of the response to photons and thermal neutrons of new LiF based TL materials for radiation protection purposes [C]// Proceeding of the International Conference on Nuclear Science Symposium Conference Record. Fajardo, Puerto Rico: IEEE Press, 2005: 478-481.
 - [5] 徐克尊.粒子探测技术[M].上海:上海科学技术出版社,1981.
 - [6] 吴治华,赵国庆等.原子核物理实验方法[M].北京:原子能出版社,1997.
 - [7] 李国梁.核放射强度分布的在线测量[J].电子测量技术,2012,35(10):50-58.
 - [8] Kolmogorov A N. On tables of random numbers[J]. Theoretical Computer Science, 1998, 207(2): 387-395.
 - [9] Atanassov E, Dimov I T. What Monte Carlo models can do and cannot do efficiently [J]. Applied Mathematical Modelling, 2008, 32(8): 1477-1500.
 - [10] Dunn W L, Shultis J K. Monte Carlo methods for design and analysis of radiation detectors[J]. Radiation Physics and Chemistry, 2009, 78: 852-858.
 - [11] Proykova A. How to improve a random Number generator[J]. computer physics communication, 2000, 124(2-3): 125-131.
 - [12] 陈松涛. Monte-Carlo 法在测量不确定度评定中的应用[J].仪器仪表学报,2004,25(4):501-504.
 - [13] 许淑艳,刘保杰, Li Qin. 核技术应用研究中的蒙特卡罗计算问题[J].核技术,2007,30(7):597-600.
 - [14] 吴瑞生,周中平,任枕海. KD-421 γ 射线微机产量计工作原理[J].核电子学与探测技术,2000,20(2):96-98,111.
 - [15] Li Zhengping, Wu Ruisheng, Yin Zejie, et al. Design of mud density meter using Monte Carlo method[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2005,35(5): 639-644.
- 李正平,吴瑞生,阴泽杰,等. Monte Carlo 方法设计的泥浆密度测试系统[J].中国科学技术大学学报,2005,35(5):639-644.