

doi: 10.7690/bgzd.2023.06.014

基于相对误差分段的剂量率拟合转换方法

韩强, 高震, 侯鑫, 任永, 曹舟, 牛德青

(中国兵器装备集团自动化研究所有限公司智能测控事业部, 四川 绵阳 621000)

摘要: 针对计数与剂量率数据拟合过程中低剂量率误差偏大问题, 提出一种基于相对误差分段的剂量率拟合方法。以相对误差为判断依据, 依次从高剂量率区域往低剂量率区域开展剂量率数值拟合, 使拟合剂量率值中, 高剂量率段相对误差均非常贴近于真值, 同时低剂量率区域通过分段方式亦贴近于真值。结果表明, 该剂量率拟合转换方法结果更贴近真值。

关键词: 剂量率拟合; 相对误差; 剂量率标定

中图分类号: TP301.6 **文献标志码:** A

Dose Rate Fitting Conversion Method Based on Relative Error Segmentation

Han Qiang, Gao Zhen, Hou Xin, Ren Yong, Cao Zhou, Niu Deqing

(Department of Intelligent Measurement & Control, Automation Research Institute Co., Ltd. of China South Industries, Mianyang 621000, China)

Abstract: A dose rate fitting method based on relative error segmentation is proposed to solve the problem of low dose rate error in the process of counting and dose rate data fitting. Taking the relative error as the judgment basis, the dose rate value fitting is carried out from the high dose rate area to the low dose rate area in turn, so that the relative error of the high dose rate section in the fitted dose rate value is very close to the true value, and the low dose rate area is also close to the true value in a subsection mode. The results show that the dose rate fitting conversion method is closer to the true value.

Keywords: dose rate fitting; relative error; dose rate calibration

0 引言

在核辐射剂量测量过程中, 通常采用半导体探测器、GM管、电离室等作为辐射探测传感器, GM管输出信号幅度高, 灵敏度高、环境适应性强、体积小、重量轻且电路简单可靠^[1-3], 半导体分辨率高、体积小、重量轻, 电离室测量精度高、体积偏大。该类探测器在测量剂量率时, 多采用脉冲计数方式, 通过计数与剂量率转换完成剂量测量。

在计数与剂量率转换过程中, 多采用最小二乘法进行曲线拟合, 由于最小二乘法以最小方差进行数据拟合, 其拟合结果在高剂量率区域, 相对误差较小; 在低剂量率区域, 部分区间的相对误差会非常大。

笔者以能量补偿型GM管为例, 通过剂量率标定试验, 获取GM管计数与剂量率值, 并通过对数据拟合方法的研究, 提出采用相对误差分段的剂量率拟合方法, 让低剂量率区域拟合的数值相对误差均在一个合理范围。

1 基于相对误差分段的拟合方法

1.1 最小二乘法拟合原理

最小二乘法, 是一种通过最小化误差的平方和寻找数据的最佳函数匹配的方法。利用最小二乘法, 可以简便地求得未知的数据, 并使这些求得的数据与实际数据之间误差的平方和为最小。即

$$f(x) = a_1\varphi_1(x) + a_2\varphi_2(x) + \dots + a_m\varphi_m(x) \quad (1)$$

式中: $\varphi_k(x)$ 是事先选定的一组线性无关的函数; a_k 是待定系数($k=1, 2, \dots, m, n$), 拟合准则是使 y_i ($y=1, 2, \dots, n$)与 $f(x_i)$ 的距离 δ_i 的平方和最小。

1.2 剂量率的数据拟合

剂量率的拟合从 $\mu\text{Sv/h}$ 到 mSv/h 甚至到 Sv/h , 跨度大, 探测器的计数率从 0 到数千; 在采用最小二乘法拟合时, 由于最小二乘法拟合并不是每个数据拟合点的权重均相同, 而是值越大的数据点占的权重越大^[3], 这就导致数据拟合过程中高剂量率区间误差小, 低剂量率区间误差偏大, 如图 1 和 2 所示。

收稿日期: 2023-03-26; 修回日期: 2023-04-15

作者简介: 韩强(1986—), 男, 四川人, 硕士, 高级工程师, 从事核辐射监测应用技术研究。E-mail: hanqiang20044708@126.com。

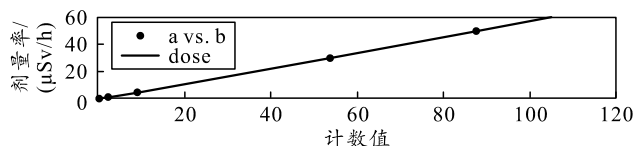


图 1 计数与剂量率拟合曲线

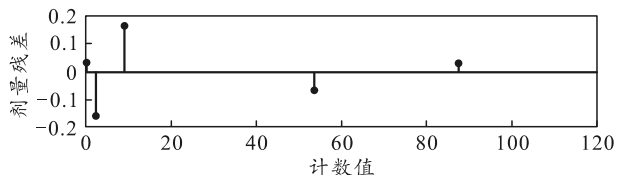


图 2 拟合曲线残差

为解决数据拟合过程中低剂量率误差偏大问题，通常采用：1) 预分段方式进行数据拟合，将拟合区域进行分段，分段后开展剂量率拟合，拟合结果的相对误差大小与拟合区域分段的大小和经验有关；2) 基于相对误差的拟合，该方法对于 2 阶以上的函数拟合非常复杂，且会造成高剂量率区域的相对误差较大。

经过对剂量率拟合特点的分析，笔者提出一种基于相对误差分段的剂量率拟合方法，以相对误差为判断依据，可自动对拟合曲线的各区间合理性进行判断，对不合理区间重新进行再次拟合，该分段拟合后的剂量率值在整个剂量率区间与真值的相对误差均较小。依次从高剂量率区域往低剂量率区域开展剂量率数值拟合，充分利用了最小二乘法在拟合区域内相对高剂量率点相对误差小的前提，使拟合剂量率值中，高剂量率段相对误差均非常贴于真值。

其具体的拟合过程如下：

- 1) 采集在不同剂量率条件下的探测器计数值，取一个相对较大的样本；
- 2) 统计在不同剂量率条件下采集到的计数平均值；
- 3) 以不同剂量率点平均值与剂量率值进行数据拟合^[3]；
- 4) 可设定相对误差判断阈值；
- 5) 计算拟合曲线的残差^[4]与相对误差；
- 6) 计算得出拟合数据相对误差超过判断阈值的拟合点和区间段；
- 7) 以相对误差较大拟合数据点至最小剂量率点(计数平均值、剂量率)，再次进行数据拟合；
- 8) 数据拟合后，再次计算拟合曲线的残差与相对误差；
- 9) 相对误差满足要求，停止分段；还有不满足要求区域，再次确认区间进行数据拟合。

2 数据验证

笔者以 GM 管 ZP1202 为例，剂量率从 0.1 $\mu\text{Sv/h}$ 到 4 mSv/h 开展计数与剂量率曲线的拟合。经过预处理后的试验数据如表 1 所示。

表 1 剂量率与计数对照

剂量率/ ($\mu\text{Sv/h}$)	平均计数值	剂量率/ ($\mu\text{Sv/h}$)	平均计数值
0.1	0.380 0	300.0	326.789 0
1.0	2.250 0	500.0	525.560 0
5.0	8.810 0	800.0	898.437 6
30.0	53.630 0	3 000.0	3 805.208 0
50.0	87.470 0	4 000.0	4 604.680 0
100.0	173.900 0		

以 4 次多项式拟合^[5]为例，开展计数与剂量率数据拟合。拟合出的曲线为：

$$f(x)=p_1 \times x^4 + p_2 \times x^3 + p_3 \times x^2 + p_4 \times x + p_5. \quad (2)$$

拟合结果为：

$$P_1=6.978e-12; P_2=-2.816e-08; P_3=-3.421e-05;$$

$$P_4=0.942 8; P_5=-3.529.$$

依据图 3 和 4 第 1 次拟合残差图，确定 2 次拟合区间为[0.38, 326.789]，进行拟合：

$$f(x)=p_1 \times x^4 + p_2 \times x^3 + p_3 \times x^2 + p_4 \times x + p_5. \quad (3)$$

拟合结果为：

$$P_1=3.951e-08; P_2=-1.408e-05; P_3=0.001 631;$$

$$P_4=0.509 5; P_5=-0.019 91.$$

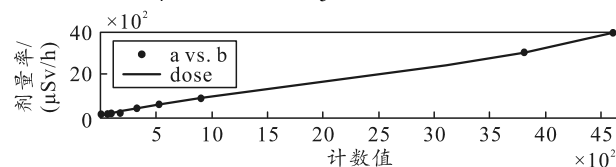


图 3 第 1 次拟合曲线

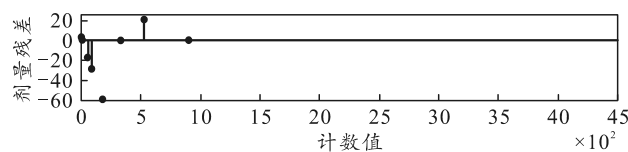


图 4 第 1 次拟合残差

依据图 5 和 6 第 2 次拟合残差图，确定第 3 次拟合区间为[0.38, 87.47]，进行拟合：

$$f(x)=p_1 \times x^4 + p_2 \times x^3 + p_3 \times x^2 + p_4 \times x + p_5. \quad (4)$$

拟合结果为：

$$P_1=2.899e-06; P_2=-0.000 431; P_3=0.017 05;$$

$$P_4=0.439; P_5=-0.069 27.$$

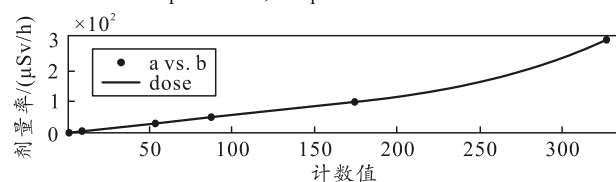


图 5 第 2 次拟合曲线

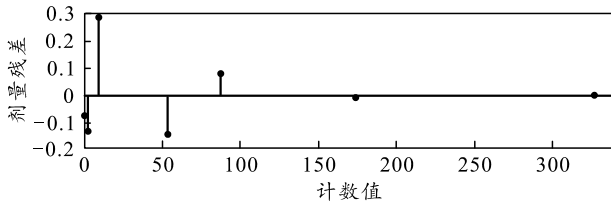


图 6 第 2 次拟合残差

第 3 次拟合曲线和残差如图 7 和 8 所示，从图 8 可以看出第 3 次拟合后的残差已经可以忽略不计，其相对误差也是非常小也可以忽略不计，因此拟合完成。最终，该拟合过程由 3 段数据拟合构成，分别是：[0.38, 87.47], [87.47, 326.789], [326.789, 4 604.68]。由拟合残差图可看出，经过按照笔者所述方法经过 3 段拟合后其观察值与拟合值非常接近。

3 结束语

笔者提出一种基于相对误差分段的剂量率拟合方法，以相对误差为判断依据，依次从高剂量率区域往低剂量率区域开展剂量率数值拟合，充分利用了最小二乘法在拟合区域内相对高剂量率点相对误差小的前提，使得拟合剂量率值中，高剂量率段相对误差均非常贴近于真值；同时，低剂量率区域通过分段方式亦可贴近于真值，较传统的分段方式更为合理，残差值更小。

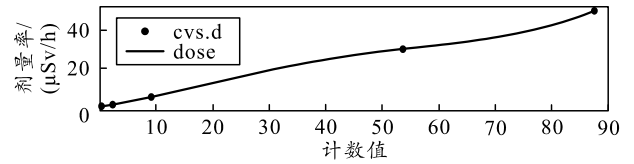


图 7 第 3 次拟合曲线

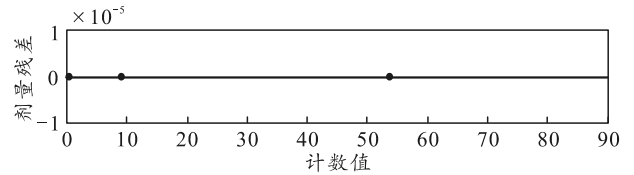


图 8 第 3 次拟合残差

参考文献:

[1] 李继源, 来永芳, 邹本日, 等. G-M 计数器的可靠性[J]. 核电子学与探测技术, 2001, 21(2): 89-93.

[2] 岳清宇, 王薇, 盛沛茹. G-M 计数管在环境 γ 辐射连续监测中的应用[J]. 辐射防护, 2005, 25(4): 227-230.

[3] 韩强, 任永, 侯鑫, 等. 基于探测器相邻位置关系的联合测量和沾染区域划分[J]. 兵工自动化, 2023, 42(2): 32-34.

[4] 杨团伟, 邵晖, 樊海军, 等. GM 计数管的信号采集与处理[J]. 核电子学与探测技术, 2014, 34(6): 720-723.

[5] 藤素珍, 冯敬海. 数理统计学[M]. 4 版. 大连: 大连理工大学出版社, 2005: 179-181.

[6] 周建兴. Matlab 从入门到精通[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2008: 187-237.

[3] 夏侃, 李小平. 创新大数据军事训练思维[N]. 解放军报, 2017-8-29(3).

[4] 尹承督, 贾红丽, 李卫东. 大数据在部队信息资源管理中的应用[J]. 兵器装备工程学报, 2016(8): 118-121.

[5] 唐志军, 方晨, 汪跃, 等. 基于数据仓库的情报数据分析系统设计[J]. 现代电子工程, 2015, 124(3): 10-15.

[6] 刘丙杰, 杨继锋, 冀海燕. 基于大数据分析的潜射武器作战运用[J]. 兵工自动化, 2019, 38(3): 1-5.

[7] 郭锐. 基于数据仓库的人口数据分析系统的设计及实现[D]. 北京: 中国科学院大学, 2015.

[8] 刘帅, 杨松, 常歌, 等. 海军观察预警系统演习评估数据分析系统需求分析[J]. 网络安全技术与应用, 2017(6): 139-140.

[9] 王元卓, 靳小龙, 程学旗. 大数据分析系统创新平台与生态建设[J]. 大数据, 2017(1): 92-99.

[10] 程学旗, 靳小龙, 王元卓. 大数据系统和分析技术综述[J]. 软件学报, 2014, 25(9): 1889-1908.

(上接第 43 页)

5 结束语

系统应用结果显示：该系统通过大数据进行多维智能分析，盘活了作战训练数据资源，在提高部队军事训练管理工作效率、支撑上级机关掌握部队军事训练态势、辅助各级加强对军事训练的指导、组织和管理等方面效益明显，实现了数据促管、数据促训、数据促建，为抓好练兵备战提供了宏观辅助决策，推进了军事训练向精细化管理变革。

参考文献:

[1] 杜伟, 张成举. 陆军演训数据分析系统建设[J]. 兵工自动化, 2020, 39(5): 15-18.

[2] 孙钦, 张宏军, 刘耀勋, 等. 军事训练演习数据汇集与融合系统的设计与实现[J]. 指挥控制与仿真, 2012, 34(3): 72-76.