DOI:10.3969/j.issn.1005-202X.2023.04.010

医学信号处理与医学仪器

基于最小二乘法的X线球管管电流校准优化方法

杜凡宇，蒋曦贤，邓岚之，冯小洁
川北医学院医学影像学院，四川 南充 637000

【摘要】医疗X线类设备球管中电流漂移问题会影响影像构建质量和患者检查的准确性，工程中一般采用人为多次测量校准，准确度低且成本花费巨大。本研究提出通过控制变量的方法测绘出新、旧球管的灯丝特性曲线，根据管电流多项式的变化规律，采用Matlab最小二乘法多项式拟合方法，利用实测的少数点值和多项式分段平移方法对球管所有曝光点的灯丝电流以及灯丝曲线多项式进行推算校准，减少了人为测量次数，降低了人工成本和人为测量平均误差。通过康达C臂X线光机KD-C5000实验验证表明，此方法可节约75%的管电流校准时间，能将原来20%的平均误差降低到2%左右。

【关键词】最小二乘法；X线球管；管电流；多项式拟合；分段平移
【中图分类号】R318；TP 211.7 【文献标志码】A 【文章编号】1005-202X(2023)04-0456-07

Optimization method of X-ray bulb tube current calibration based on least square fitting

DU Fanyu, JIANG Xixian, DENG Lanzhi, FENG Xiaojie
School of Medical Imaging, North Sichuan Medical College, Nanchong 637000, China

Abstract: The problem of tube current drift in the bulb of medical X-ray equipment affects the quality of image construction and the accuracy of patient examinations, and is generally calibrated by multiple human measurements in engineering, which is low in accuracy and high cost. Herein, it is proposed to map the filament characteristic curves of the new and old tubes by controlling variables. According to the change law of tube current polynomials, the Matlab least square polynomial fitting approach is adopted, and the filament current of all exposure points of the spherical tube and the polynomials are calculated and calibrated using the measured tube current of a few exposure points of the spherical tube and the polynomial piecewise translation method, which reduces the frequency of human measurements, labor costs and the average error of human measurements. Through the experimental verification of KD-C5000 of Kangda C-arm, it is showed that the method can save about 75% of the tube current calibration time, and can effectively reduce the average error from the original 20% to about 2%.

Keywords: least square method; X-ray bulb tube; tube current; polynomial fitting; piecewise translation

前 言

目前市面上主流的医疗器械诊断和治疗设备包括超声、CT、能谱CT、C型臂X线光机、DR、MRI等，其中运用X线类设备进行诊断和治疗操作的医疗器械占据了医疗器械行业的半壁江山。X线类设备的技术相对成熟，如今X线球管管电流校准还停留在人工示波器测量校准阶段，仍然无法做到自动校准，且误差标准宽容度竟高达20%。

市面上主流的管电流校准手段大部分采用手动示波器调试校准，且使用时采用查表填入的方法。林燕霞等[1]通过设定曝光档位预先设定上下限值，比较反馈管电流，确定误差范围后再更新设定上下限值；黄炜钦等[2]通过多次进行曝光取管电流的平均值，当灯丝电流不满足要求时再对其进行自增自减操作，合适时进行保存；Myler等[3]采用从硬件上对相关校准数据进行存储校准；邱攀勇等[4]设计闭环灯丝电流采样电路和X射线高频高压发生器，间接提高闭环增益控制精度、管电流精度以及设备成像清晰度；董斌等[5]设计了一种球管灯丝电流输出控制系统，使得灯丝电流输出值和反馈值都是数字信号的转化，避免了ADC、DAC转换上的误差，提高了灯丝电流输出精度。以上主流的球管校准和相关研究都存在需进行大量曝光的弊端，虽然提高了管电流精确度但并未减少曝光次数，有的甚至增加了曝光次数。文献[3-5]从新硬件和提高灯丝电流控制方面进行设

【收稿日期】2022-10-26
【基金项目】南充市市校科技战略合作项目(20SXQT0139)；川北医学院校级科研发展青年项目(CBY20QAY04)
【作者简介】杜凡宇，讲师，博士研究生，主要研究方向为医疗设备、医学人工智能，E-mail: fydu@nsmc.edu.cn

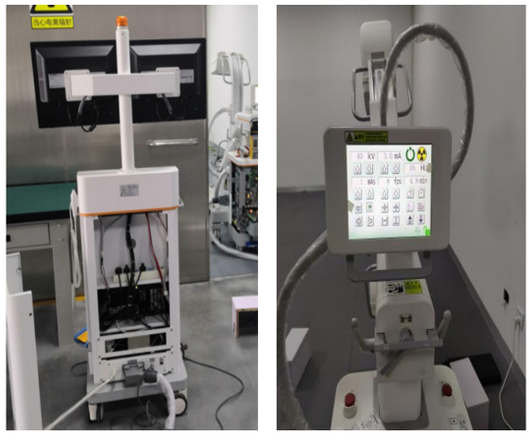
计，间接提高了管电流的输出精度，但并未指出是否能减少曝光次数。

本研究设计了一种能够减少管电流校准期间曝光次数并且提高校准后管电流精度的方法，这种方法在缩短管电流校准时间的同时还能节省售买双方后期成本。

1 验证基础介绍

1.1 KD-C5000简介

KD-C5000为上海康达洲际医疗器械有限公司历时10年自主研发设计的一款应用于常规骨科及疼痛介入治疗领域的C型臂，如图1所示。C型臂的X线球管采用意大利IMD公司产品，该产品具有较好的稳定性和较长的使用寿命，DAC转换器采用的是TI(美国德州仪器)公司生产的TLV5618型号DAC转换器，它支持双路12位电压输出数/模转换，可通过SIP总线结构与单片机相连，它的球管组件主要参数如表1所示。



a：C型臂后端　　b：C型臂前端

图1 KD-C5000 C型臂

Figure 1 KD-C5000 C-arm

1.2 测试电路原理分析

根据控制产生管电流的原理，利用线球管灯丝电压控制加热灯丝电流可实现控制线球管管电流的目的。在此期间可能会因线球管管电压不同或一些其它因素综合影响到管电流的输出。本研究主要从灯丝电流在不同管电压下对管电流输出的影响角度进行探究。利用KD-C5000主控板控制各个曝光模式下管电流的主要电路模块，将单片机产生的数字信号先通过DAC转换为不同的灯丝电流设定值，然后配合不同的曝光模式和管电压值进行曝光，进而产生对应的灯丝电流值。其中，DAC和ADC芯片转换器配合数个TL084运算放大器芯片共同为X线球管写入灯丝电流设定值和读出管电流值。

表1 KD-C5000球管部分参数

Table 1 Some parameters of KD-C5000 bulb

参数名称	参数详情
型号	E-40R HF IMD/XR05
焦点大小	小：0.3 mm，大：0.6 mm
阳极转速	3 000 r/min(f=50 Hz)
标称阳极输入功率	小焦：5 kW，大焦：17 kW
标称输出功率	5 kW
管电压调节范围	40~120 kV，步进1 kV/5 kV，偏差不大于10%
管电流调节范围	连续透视：0.5~5 mA，步进0.1 mA/1 mA； 脉冲透视：1~10 mA 点片摄影：(40 kV，90 mA)，…，(120 kV，40 mA)
管电流时间积	1~250 mAs内按R20优先数系选取， 其偏差≤选取值的10%±0.2 mAs
热容量	600 kJ
热保护机制	(57±3) ℃
连续散热率	600 W
灯丝最大输入电流	900 mA

1.3 调试软件界面

KD-C5000上位机可视化调试界面软件是在一款由Borland公司在C++ Builder上开发实现的可视化集成开发工具，调试界面如图2所示。图中右侧界面可以显示输入和读出的数模转换器的数模信号值；图中左下角界面可以显示不同模式、不同管电压下设定调节的管电流值。

2 曲线分段平移拟合方法

2.1 最小二乘法

最小二乘法拟合算法是目前常用的拟合算法，它有简单可行、运算效率高等诸多优点，其作用是在不知道自变量与因变量的对应关系时，或者很难用一个简易的解析函数式对其关系进行描述时，用一个具有“普适性”的函数对目标函数进行逼近性解释[6-7]。本研究中处理数据的原理主要采用最小二乘法对实测量的数据进行曲线拟合，从而得到对应实测量阶数下的多项式。最小二乘法公式如式(1)和式(2)所示，利用多项式与实测量数据点的因变量在纵轴方向上距离平方误差和最小的原理可得到对应拟合曲线的多项式，同时可通过所拟合的曲线反向求出曲线函数定义域内的任意一点函数值，在一定程度上不仅能预测曲线的变化趋势，而且还能更直观、准确地得到任意灯丝电流下对应的管电流值。

$$p_{n(x)} = \sum_{k=0}^{n} a_k x^k \tag{1}$$

$$\sum_{i=1}^{m} \left[p_n\left(x_i\right) - y_i \right]^2 \tag{2}$$

图2 KD-C5000调试界面

Figure 2 Debugging interface of KD-C5000

2.2 曲线分段平移变换

最小二乘法拟合多项式的阶数越高，所需要的数据量就越多，结果也越精确。当数据量一定的情况下，取到不合理的阶数多项式时，拟合曲线两端常出现明显震荡情况的龙格现象[8]，这可能导致拟合数据偏离真实模型。为了避免这种龙格现象发生，可利用Matlab对所求多项式进行平移和转变解析式的方法来处理。本研究综合了学者们的工程实践经验[9-15]，选取四阶拟合的方法对灯丝特性曲线进行多项式拟合。根据确定的四阶阶数对多项式(2)进行二项式展开得到式(3)：

$$(x+y)^n=\sum_{k=0}^{n}\binom{n}{k}x^{n-k}y^k=\sum_{k=0}^{n}\binom{n}{k}x^k y^{n-k} \tag{3}$$

四阶多项式每个次数项系数进行展开结果如下所示：

$$f_0=p_4(a+b)^4+p_3(a+b)^3+p_2(a+b)^2+p_1(a+b)+p_0 \tag{4}$$

$$p_4'=p_4C_4^0a^4b^0 \tag{5}$$

$$p_3'=p_4C_4^1a^3b^1+p_3C_3^0a^3b^0 \tag{6}$$

$$p_2'=p_4C_4^2a^2b^2+p_3C_3^1a^2b^1+p_2C_2^0a^2b^0 \tag{7}$$

$$p_1'=p_4C_4^3a^1b^3+p_3C_3^2a^1b^2+p_2C_2^1a^1b^1+p_1a^1b^0 \tag{8}$$

$$p_0'=p_4C_4^4a^0b^4+p_3C_3^3a^0b^3+p_2C_2^2a^0b^2+p_1a^0b^1+p_0 \tag{9}$$

其中，f_0为拟合四阶多项式的通式，a为自变量，b为偏移量，p_0、p_1、p_2、p_3、p_4均为常数项。对式(4)二项式展开得到新的多项式系数，p_0'、p_1'、p_2'、p_3'、p_4'为平移后的多项式系数。

3 实 验

3.1 实验设计与数据处理

KD-C5000 C型臂具有不同的工作模式(连续透视模式、脉冲透视模式和点片摄影模式)和不同工作模式下的管电压。在不同管电压下探索灯丝电流，需要在所设定的管电压和管电流不同组合内测量对应的灯丝电流和数字模拟转换器的数模信号值，并收集数据为后续拟合灯丝特性曲线做准备。

第一次实验记为实验一，实验一中管电压和管电流间隔点的设置是基于康达洲际公司现有调试表格进行的。实验在管电压40~120 kV下分别测量连续透视模式(管电流为1~5 mA)、脉冲透视模式(管电流为5~13 mA)和几个固定点片摄影模式下曝光点的灯丝电流(因临床对应管电压下只有一个对应管电流测量点)。3种模式下每个点曝光3次取平均值，每次曝光间隔为3 min。实验反馈管电压、反馈管电流、灯丝电流和实测曝光间隔时间等4个测量值均由示波器在对应量程的最小分度值下测得。经测量发现，连续透视模式的测量值在相同管电流和不同管电压下测得的灯丝电流没有明显规律，且与欧姆定律计算结果匹配度较小；其次，从选定的一列实验测量数据中分析得出，相同管电压条件下，最小刻度量程的相邻灯丝电流变化差值(以电压方式表示)小于示波器所能测量的最小误差0.02 V，说明测量仪器不

可用。出现这种情况的主要原因是灯丝电流和反馈管电压测量的接地点在控制主板，反馈管电流测量的接地点在逆变器主板，因两主板不同导致两个接地电位不同，所以不能用示波器同时测量两者电压，实验一数据应舍弃。

在实验一问题的基础上改进实验方法并进行了实验二。为能够有效提高测量灯丝电流的精度，本研究结合KD-C5000主控板的控制电路图，采用数模转换器转换位数算出相应的输出灯丝电流，即灯丝电流等于基准静态电流加上数模信号转换输出值，见式(10)。其中，灯丝电流用setmA表示，基准静态电流用$setmA_0$表示，数模信号值用DA表示。

$$setmA = setmA_0 + \left(\frac{DA}{4095}\right) \times 10 \tag{10}$$

根据上述改进实验思路重新设计了实验，实验中的管电流和管电压仍然采用示波器测量的方法得到，灯丝电流通过数模信号值进行计算得出，并记录实验期间的温湿度，且保证曝光时间尽量接近100 ms，其余要求与实验一完全一致。进行实验二，分别得到了管电压在40~120 kV条件下连续透视模式(管电流1~5 mA)、脉冲透视模式(管电流5~13 mA)和点片摄影模式(管电流20~100 mA)下曝光点对应灯丝电流和数模信号值。其中，实验二在点片摄影模式下，一次实验只能测量一个曝光点的数模信号值，且通过记录的实验数据发现部分管电流下并没有对应的灯丝电流和数模信号值，原因是由于线球管的标称输出功率为5 kW，而管电压和管电流的乘积不能超过球管标称输出功率。将实验二的旧球管更换为新球管后，保证实验方法和实验条件与实验二完全一致，并进行下一步实验(实验三和实验四)，记录实验数据，其中实验四的球管为与实验三球管参数完全一致的另一新球管，存储其数据便于后续实验验证。

3.2 灯丝特性曲线的拟合及平移变换

对照实验目的，先将收集的灯丝电流对管电流影响的数据进行处理，然后从理论上分析能否达到预期实验效果。采用Matlab工具和曲线分段平移变换的方法进行曲线拟合操作，得到灯丝特性曲线图，再利用灯丝特性曲线图探究不同球管的灯丝特性曲线是否存在变化规律，通过规律进行曲线预测。

利用新球管灯丝特性曲线对旧球管灯丝特性曲线分段平移的思想，将灯丝特性曲线分3段进行平移。在平移过程中每段取中间点对应的曝光点进行平移变换，得到它的球管灯丝特性曲线及平移后的多项式，再通过平移后的多项式得到对应设定管电流下的灯丝电流值。通过这种方法只需测量待求球管的少数几个曝光点，且能通过对一个球管的测量得到另一个球管的灯丝特性曲线及多项式，图3为连续透视模式下新、旧球管在无平移量输入的情况下M_0、M_1、M_2 3段平移曲线图，图4为点片摄影模式下新、旧球管在无平移量输入的情况下M_0、M_1、M_2 3段平移曲线图。脉冲透视模式数据处理原则与连续透视模式相似，其对应的Matlab平移灯丝特性曲线及多项式变换原理与连续透视模式相同，这里只取连续透视模式数据做代表性分析。

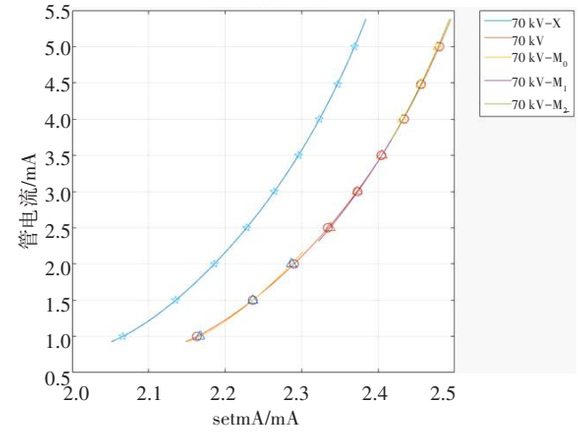


图3　连续透视模式下新、旧球管在管电压为70 kV无平移量输入时多项式分段平移曲线

Figure 3 Polynomial piecewise translation curves of new and old bulbs at 70 kV and in continuous perspective mode without translation input

70 kV-X：新球管曲线；70 kV：旧球管曲线

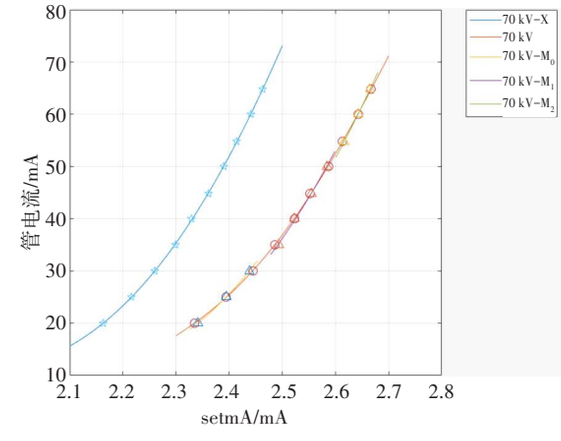


图4　点片摄影模式下新、旧球管管电压为70 kV无平移量输入时多项式分段平移曲线

Figure 4 Polynomial piecewise translation curves of new and old bulbs at 70 kV and in spot photography mode

3.3 基于Visual Studio和C++ Builder的算法实现

本部分主要基于数据处理结果与实验原理在Visual Studio(VS)上通过代码实现，先通过C++

Builder进行可视化界面设计，最后实验得到结果。先按连续透视思路输入管电压40~120 kV下待求参考X线球管管电流为1.0~5.0 mA时输出的数模信号值。读出每隔0.5 mA管电流对应的数模信号值，对应输出管电压40~120 kV时连续透视模式下所有管电流的数模信号值。

将X线新球管作为参考球管，首先求出连续透视模式下旧球管管电压在40~120 kV下，对应管电流在1.0~5.0 mA下（管电压步长取10 kV，管电流步长取0.1 mA）共410（410×41）个数模信号预测值，具体流程图见图5。

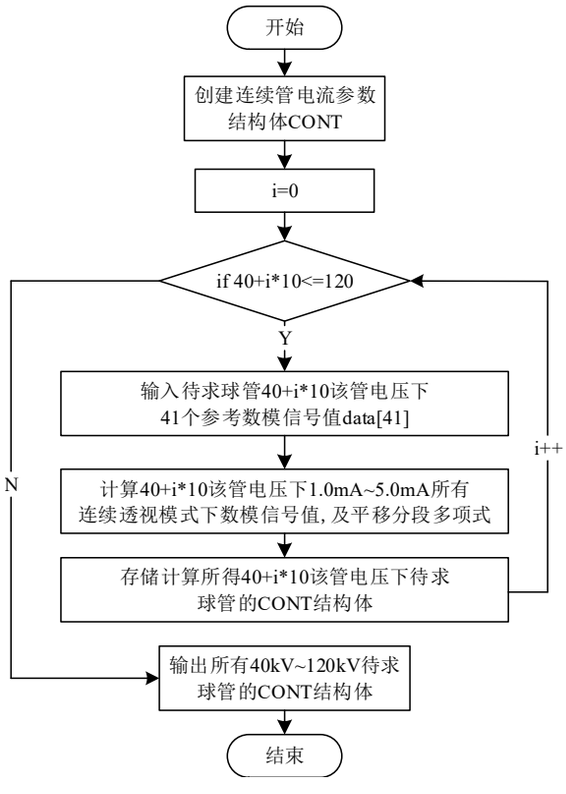


图5 Visual Studio 连续透视代码流程图

Figure 5 Flowchart of Visual Studio continuous perspective mode

实验将代码中的参考球管参数和待求球管的参数均存放于自定义结构体数组中，结构体包括连续透视模式数模信号值数组、多项式系数数组和灯丝电流数组。以上数据是连续透视模式管电流校准所需的全部信息，将其全部存于结构体中便于程序结果的查询和检查。

表2中数据输入值1~4分别是连续透视模式下新球管管电流为1.5、2.5、3.5、4.5 mA时实测的数模信号值。通过表2的数据产生的拟合曲线，对旧球管在管电压为40~120 kV、管电流为1.0~5.0 mA下预测对应输出的410个数模信号值。表3为选取的部分数据展示。通过表3预测旧球管在70 kV管电压与每个管电流点（1.0、2.0、3.0、4.0、5.0 mA）条件下，旧球管预测数模信号值与旧球管真实数模信号值的对比结果，可以看出预测效果的误差在2个数模信号值以内，说明实验可以达到很好的效果。

表2 管电压40~120 kV连续透视模式下4个输入值对应的数模信号值

Table 2 DA signal values corresponding to 4 points in 40−120 kV continuous perspective mode

待测条件下管电压/kV	输入值1（1.5 mA）	输入值2（2.5 mA）	输入值3（3.5 mA）	输入值4（4.5 mA）
40	296	338	367	388
50	292	333	362	383
60	288	329	358	379
70	285	325	354	375
80	282	322	351	372
90	280	320	349	370
100	279	318	347	368
110	277	317	345	366
120	275	315	343	364

表3 管电压为70 kV时管电流对比预测结果

Table 3 Prediction results of 70 kV integer tube current

设定管电流值/mA	旧球管实测数模信号值	旧球管预测数模信号值	预测绝对差值
1.0	255	257	2
2.0	307	308	1
3.0	341	341	0
4.0	366	365	1
5.0	385	384	1

当70 kV管电压分别代替40~120 kV管电压时对相应的数模信号数据进行收集和分析，发现管电压为40和120 kV时平均误差最大，分别达到了14.6%和13.9%，见表4和表5。而采用本实验提出的拟合方法后，平均误差分别降到了0.8%和1.0%，见表6和表7。同理，实验采用了同样的方法分别对其余的50~110 kV管电压数模信号值平均误差进行计算。最后，计算得旧球管在70 kV管电压下的数模信号值代替40~120 kV管电压对应数模信号值，总的平均误差为8.0%；而采用本实验方法得到的总平均误差仅为0.7%。实验验证了在Matlab上预测模型到VS上进行算法的实现，以及再移植到KD-C5000C臂上的C++Builder上位机中进行实验，均证明实验在连续透

表4 旧球管管电压70 kV代替40 kV后灯丝电流对应的管电流误差

Table 4 Errors of tube current corresponding to filament current after replacing 40 kV with 70 kV for the old bulb

设定管电流/mA	管电压70 kV数模信号值	对应40 kV时灯丝电流/mA	误差/%	平均误差/%
1.0	257	0.78	22.0	
1.5	285	1.31	12.7	
2.0	307	1.72	14.0	
2.5	325	2.14	14.4	
3.0	341	2.59	13.7	14.6
3.5	354	3.03	13.4	
4.0	366	3.48	13.0	
4.5	375	3.86	14.2	
5.0	385	4.32	13.6	

表5 旧球管管电压70 kV代替120 kV后灯丝电流对应的管电流误差

Table 5 Errors of tube current corresponding to filament current after replacing 120 kV with 70 kV for the old bulb

设定管电流/mA	管电压70 kV时数模信号值	对应120 kV时灯丝电流/mA	误差/%	平均误差/%
1.0	255	1.15	15.0	
1.5	285	1.71	14.0	
2.0	307	2.27	13.5	
2.5	325	2.84	13.6	
3.0	341	3.44	14.7	13.9
3.5	354	4.00	14.3	
4.0	366	4.58	14.5	
4.5	375	5.06	12.4	
5.0	385	5.64	12.8	

表6 本文方法预测旧球管管电压40 kV灯丝电流对应的管电流误差

Table 6 The proposed method predicts the tube current errors corresponding to the filament current at 40 kV for the old bulb

设定管电流/mA	预测40 kV时数模信号值	对应预测40 kV时灯丝电流/mA	误差/%	平均误差/%
1.0	266	0.98	2.0	
1.5	296	1.51	0.7	
2.0	320	2.02	1.0	
2.5	338	2.50	0.0	
3.0	354	3.03	1.0	0.8
3.5	367	3.53	0.9	
4.0	378	4.00	0.0	
4.5	388	4.46	0.9	
5.0	398	4.96	0.8	

表7 本文方法预测旧球管120 kV时灯丝电流对应的管电流误差

Table 7 The proposed method predicts the tube current errors corresponding to the filament current at 120 kV for the old bulb

设定管电流/mA	预测120 kV时数模信号值	对应预测120 kV时灯丝电流/mA	误差/%	平均误差/%
1.0	247	1.03	3.0	
1.5	275	1.50	0.0	
2.0	298	2.03	1.5	
2.5	315	2.51	0.4	
3.0	331	3.05	1.7	1.0
3.5	343	3.52	0.6	
4.0	354	4.00	0.0	
4.5	364	4.48	0.4	
5.0	373	4.95	1.0	

视模式和脉冲透视模式的数据下运行效果较好，所有预测数模信号误差值在4个数模信号值以内。将现有误差金标准由20%降低到了2%左右，验证了实验的可行性；对于待测点的现场调测次数也大量减少，调测时间从以前的1.5 h降低到了现在的15 min左右，节省75%左右的实测时间。

4 结 论

本研究针对医用X线类影像设备球管管电流校准中存在管电流校准曝光次数多、校准精度低、调试时间长等问题提出通过控制变量的方法研究X线球管的管电流主要影响因素，对其进行数据采集和标准优化设计，在连续透视模式和脉冲透视模式下将现有误差金标准20%降低到2%左右，且每个管电压值下仅需测量4个曝光点便可求出其它曝光点数据，将调试完成时间由1.5 h降低到现在15 min左右，达到减少曝光次数和提高球管校准精度的目的，不仅大大节省球管调试时间还降低了售买双方维护成本。对于管电流校准技术因灯丝激发预热等特性存在的校准滞后问题和利用全自动的方法实现优化管电流校准等方面的问题是今后仍需研究的问题。

【参考文献】

[1] 林燕霞，马培威，潘英昂. X射线管透视灯丝电流上下限值自校准方法: ZL201711431967.5[P]. 2019.
Lin YX, Ma PW, Pan YA. Self calibration method for upper and lower limits of X-ray tube perspective filament current: ZL201711431967.5[P]. 2019.

[2] 黄炜钦，饶玉明，郑伟斌，等. 一种X射线管灯丝电流的校准方法及系统: CN106645227A[P]. 2017.
Huang WQ, Rao YM, Zheng WB, et al. A calibration method and system for filament current of X-ray tube: CN106645227A[P]. 2017.

[3] M·迈勒，尹仁宇，C·路易斯. 成像系统的X射线管设备和方法:

CN107845556A[P]. 2018.
Myler M, Yin RY, Louis C. X-ray tube equipment and method of imaging system: CN107845556A[P]. 2018.
[4] 邱攀勇, 沈江, 戴斌. 一种灯丝电流闭环采样电路以及X射线高频高压发生器: CN108834294A[P]. 2018.
Qiu PY, Shen J, Dai B. A Closed-loop sampling circuit for filament current and an X-ray high frequency and high voltage generator: CN108834294A [P]. 2018.
[5] 董斌, 舒志辉, 祝国平. 球管灯丝电流输出控制系统: CN110505743A [P]. 2019.
Dong B, Shu ZH, Zhu GP. Bulb filament current output control system: CN110505743A[P]. 2019.
[6] 朱保林, 陈明阳, 刘烨轩, 等. 一种基于最小二乘法分段拟合的列车加速度在线估计算法[J]. 机车电传动, 2022(1): 20-24.
Zhu BL, Chen MY, Liu YX, et al. Real-time train acceleration estimation method based on least-square piecewise linear fitting[J]. Electric Drive for Locomotives, 2022(1): 20-24.
[7] 陈昊, 鞠昱, 韩立, 等. 相对误差最小二乘法的TDLAS气体浓度标定曲线拟合[J]. 光谱学与光谱分析, 2021, 41(5): 1580-1585.
Chen H, Ju Y, Han L, et al. Curve fitting of TDLAS gas concentration calibration based on relative error least square method [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2021, 41(5): 1580-1585.
[8] 王道文, 于燕. 基于Matlab的最小二乘法在X射线机曝光曲线制作中的应用[J]. 中国特种设备安全, 2012, 28(5): 35-36.
Wang DW, Yu Y. Application of least square method based on Matlab in making exposure curve of X-ray machine [J]. China Special Equipment Safety, 2012, 28(5): 35-36.
[9] 王艳. X线球管阳极热容量曲线拟合算法[J]. 中国医学物理学杂志, 2015, 32(2): 214-217.
Wang Y. Study on anode heat capacity curve fitting algorithm of X-ray tube[J]. Chinese Journal of Medical Physics, 2015, 32(2): 214-217.
[10] 李蓓蕾. 多次自适应最小二乘曲线拟合方法及其应用[D]. 荆州: 长江大学, 2014.
Li BL. Multiple adaptive least square curve fitting algorithm and applications[D]. Jingzhou: Yangtze University, 2014.
[11] 陈岚峰, 杨静瑜, 崔崧, 等. 基于Matlab的最小二乘曲线拟合仿真研究[J]. 沈阳师范大学学报(自然科学版), 2014, 32(1): 75-79.
Chen LF, Yang JY, Cui S, et al. Matlab simulation of curve fitting based on least-squares[J]. Journal of Shenyang Normal University (Natural Science Edition), 2014, 32(1): 75-79.
[12] 蔡山, 张浩, 陈洪辉, 等. 基于最小二乘法的分段三次曲线拟合方法研究[J]. 科学技术与工程, 2007, 7(3): 352-355.
Cai S, Zhang H, Chen HH, et al. Research of piecewise cubic curve fitting method based on least square principle[J]. Science Technology and Engineering, 2007, 7(3): 352-355.
[13] Stolyarov IN. Reduction of the working temperature of X-ray tube bearings[J]. Biomed Eng, 2013, 46(5): 206-208.
[14] 高秋英, 王丽丽, 王荣忠. 最小二乘法曲线拟合及优化算法研究[J]. 工业控制计算机, 2021, 34(11): 100-101.
Gao QY, Wang LL, Wang RZ. Research on least square curve fitting and optimization algorithm[J]. Industrial Control Computer, 2021, 34 (11): 100-101.
[15] 张永涛, 贾延明. 最小二乘法中代数多项式曲线拟合的分析及实现[J]. 计算机与数字工程, 2017, 45(4): 637-639.
Zhang YT, Jia YM. Analysis and program implementation of least squares polynomial curve fitting [J]. Computer and Digital Engineering, 2017, 45(4): 637-639

（编辑：薛泽玲）