

X 线球管阳极热容量曲线拟合算法

王 艳

上海医疗器械高等专科学校医学电子与信息工程系, 上海 200093

【摘要】目的: 阳极热容量作为 X 线球管的重要参数之一, 代表了球管的热承受能力, 一旦超过其极限值, 易造成球管的损坏, 故在影像装置工作时需实时检测与控制。球管的数据手册中一般都有热容量曲线图, 却不会有曲线方程式, 无法直接用于影像设备的实时热容量计算。本文设计了一个系统, 能够对散热曲线的电子图片进行样点的选取, 然后进行曲线拟合, 得出近似方程, 用于工作过程中热容量的实时计算。**方法:** 选取样点时, 先设定曲线边界, 输入边界值, 变换系统坐标为实际曲线坐标, 再在曲线上选取样点, 计算出其实际坐标数值; 曲线拟合采用线性最小二乘法的多项式拟合; 同一曲线上选取 2 组各 10 个数据分别进行 2~9 次的多项式拟合。**结果:** 同一曲线上不同的样点选取, 在 2~7 次多项式拟合时曲线基本一致; 3~7 次多项式拟合均能满足要求, 8~9 次多项式易造成边界振荡; 根据多项式的运算时间, 3~5 次适合单片机系统, 5~7 次适合 PC 机系统。**结论:** 本文设计的系统能有效实现 X 线球管阳极热容量散热曲线的拟合, 操作简便, 自动化程度高。

【关键词】 阳极热容量; 最小二乘法; 散热曲线; 多项式拟合

【DOI 编码】 doi:10.3969/j.issn.1005-202X.2015.02.014

【中图分类号】 R318.6

【文献标识码】 B

【文章编号】 1005-202X(2015)02-0214-04

Study on Anode Heat Capacity Curve Fitting Algorithm of X-ray Tube

WANG Yan

Medical Electronic Information Department, Shanghai Medical Instrumentation College, Shanghai 200093, China

Abstract: Objective As one of the important parameters of X-ray tube, anode heat capacity represents the thermal capacity of tube. Once exceeded its limit, the tube is easily be damaged. It's the reason that we need a real-time monitoring and control in-gof heat capacity, when the medical imaging equipment works. There are heat capacity graphs in the data sheet of tube, without the curve equations, which can be directly used for real-time calculation of the heat capacity. In this paper, we designed a system which is able to choose sample points of cooling curve, and curve fitting to the approximate equation for real-time heat capacity calculation. **Methods** When selecting samples, firstly, the boundary of curve was set, and the boundary values was input, and the actual coordinates of selected samples from coordinate transformation was obtained, and then, the sample points on the curve was selected, and their actual coordinate values was calculated. As a special case of the linear least-squares method, polynomial fitting was used for curve fitting. 2 sets of data in the same curve for 2-9 order polynomial fitting was selected. **Results** The results of 2 sets of data are basically same with 2-7 order polynomial fitting. 3-7 order polynomial fitting can meet the requirements, while 8-9 order is easy to cause the boundary oscillation. According to the computation time, 3-5 order is better for SCM system, and 5-7 order for PC system. **Conclusion** The curve fitting of X-ray tube anode heat capacity is effective, and has the advantages of simple operation, high degree of automation.

Key words: anode heat capacity; the least squares; cooling curve; polynomial fitting

前言

X 线球管作为 X 线的产生装置, 在 X 线机和 CT 等设备的工作过程中起着关键的作用。球管工作时,

阴极灯丝在高压下释放电子流轰击阳极靶, 并发生能量转换^[1], 仅有约 1% 的能量转换成 X 线被利用, 99% 转换成热能被阳极吸收^[2-4]。

阳极热容量作为球管的重要参数之一, 是指阳极热负荷, 单位为 J(焦耳)或 HU(热单位, Heat Unit), 1 HU=0.77 J^[2]; 其最大热容量代表了球管的热承受能力^[5]。该热容量是 X 线影像中特有的, 与热力学中的热容量或热量并不是同一个概念。

在 X 线影像装置工作时, 若球管阳极热容量超过

【收稿日期】 2015-01-05

【基金项目】 上海市科委科技攻关项目 (05DZ19507); 上海医疗器械高等专科学校科研启动基金

【作者简介】 王 艳 (1981-), 女, 从事单片机、数字化医疗仪器的教学与开发。E-mail: wangy_194@smic.edu.cn。

其极限值,易造成阳极靶面过热而融化损坏^[4],故需要显示当前的热容量,对其超限进行及时的报警与曝光限制,每次曝光增加的热容量可由曝光的 KV、MA 和时间计算得到,故只需根据球管散热曲线来实时计算当前热容量值。

本文设计了一个系统,能够方便地对散热曲线的电子图片进行样点的选取,然后利用最小二乘原理对所选样点进行曲线拟合,从而得出散热曲线的近似方程,便于热容量的计算。

1 选取样点

本系统是在 VB6.0 平台上进行开发的。图 1 所示为热容量散热曲线的样点选取界面。左侧为一系列操作面板,右侧则显示当前球管的热容量曲线,该曲线可由球管手册扫描后导入。曲线打开后,首先设置其坐标轴,即图中操作面板的第二部分,在曲线上分别用鼠标十字选定左上角、左下角和右下角,同时输入实际对应的 X 或 Y 值,即可把默认坐标系统转换成曲线实际坐标系统,而“曲线坐标”面板上的 X 和 Y 显示的分别是实际坐标(加粗)和系统默认坐标。最后在图中的散热曲线(冷却)上用鼠标点选一定数量的点(10 个),每选一个点,进行一下“样点记录”,即可将所选点的坐标存入数据库,供曲线拟合时调用。

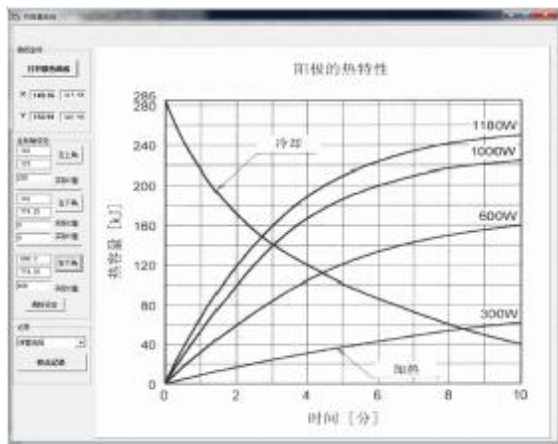


图 1 热容量曲线样点选取界面

Fig.1 The Point Selection Interface of Heat Capacity Curve

2 曲线拟合

曲线拟合就是从一组已知的数据 $(x_i, y_i) (i = 1, 2, 3, \dots, m)$,去求出自变量 x 和因变量 y 之间的近似函数关系: $y = p(x)$ ^[6]。在图形上,就是由几个已知的点去求出曲线函数,在实际的工程中应用非常广泛。这里不要求曲线 $p(x)$ 过每一个数据点,只要能尽量反应数据点的变化趋势^[7]。

2.1 最小二乘原理

曲线拟合的算法有很多种,常用的是最小二乘法;最小二乘的数据拟合中,最简单也是最常用的数学模型是多项式拟合^[7]。

最小二乘法由勒让德和高斯分别在 18 世纪初期分别创立^[8],其基本原理是:根据给定的 $[a, b]$ 区间上的 m 个数据点 (x_i, y_i) ,找到一个多项式:

$$p_n(x) = \sum_{k=0}^n a_k x^k$$

其中 $m > n$,使得其误差平方和:

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

最小^[6-9],这时的 $p_n(x)$ 称为最小二乘拟合多项式,对应的曲线为拟合曲线^[7]。

2.2 曲线拟合的具体实现

进行曲线拟合时,首先确定多项式次数,根据已知数据点构造多项式方程,从而解出多项式系数^[9-11]。

系统中建立一个类模块,用于拟合实现。主要步骤如下:

(1) 首先确定拟合多项式的次数 n , n 必须小于数据点数 m 。

(2) 计算并建立两个数组 SumX(0 To 2*n) 和 SumYX(0 To n); 其中 $\text{SumX}(i) = \sum_{k=1}^m x_k^i$, 即 $\text{SumX}() = m, \sum x, \sum x^2, \sum x^3, \dots, \sum x^{2n}$; $\text{SumYX}(i) = \sum_{k=1}^m x_k^i \times y_i$, 即 $\text{SumYX}() = \sum y, \sum xy, \sum x^2y, \dots, \sum x^ny$ 。

(3) 构造矩阵(二维数组)Matrix(0 To n, 0 To n+1), 其值为:

$$\begin{bmatrix} \text{SumX}(0) & \text{SumX}(1) & \dots & \text{SumX}(n) & \text{SumYX}(0) \\ \text{SumX}(1) & \text{SumX}(2) & \dots & \text{SumX}(n+1) & \text{SumYX}(1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \text{SumX}(n) & \text{SumX}(n+1) & \dots & \text{SumX}(2n) & \text{SumYX}(n) \end{bmatrix}$$

(4) 根据矩阵求解方程组,获得一组最终系数,部分代码如下:

'变换方程组,使其下三角为 0

For i = 0 To n 'n 为多项式次数

iMax = i '当前列(第 i 列)内最大值的行号

T = Abs(Matrix(iMax, i))

For j = i + 1 To n '求出第 i 列中的最大值

If T < Abs(Matrix(j, i)) Then iMax = j: T = Abs

(Matrix(j, i))

next j

If i < iMax Then '找到最大值所在行,与当前行(第 i 行)交换位置

For k = i To n + 1

T = Matrix(i, k)

Matrix(i, k) = Matrix(iMax, k)

Matrix(iMax, k) = T

Next k

End If

For j = i + 1 To n '下三角变 0

T = Matrix(j, i) / Matrix(i, i) '计算第 j 行的

```

                    变换系数
Matrix(j, i) = 0#    '变 0
For k = i + 1 To n + 1 '按系数计算该行其
                    他值
    Matrix(j, k)=Matrix(j, k)-Matrix(i, k) * T
Next k
Next j
Next i
'方程组求解
For j=n To 0 Step-1 '从最后一行开始往前计算系数
    T = Matrix(j, n + 1)
    For k = j + 1 To n
        T = T - Matrix(j, k) * Coef(k)
    Next k
    Coef(j) = T / Matrix(j, j)    '系数数组
Next j
```

3 结果与讨论

以图 1 所显示的球管阳极热容量曲线为例,其热容量上限为 285 kJ,时间范围是 0~ 10 min,即 600 s。为确定曲线次数以及数据样点选取的影响,本文选取了两组数据,每组 10 个样点,样点数据保留 5 位有效数据,然后设计 2~9 次的多项式进行拟合。具体数据见表 1,拟合曲线见图 2。

由图 2 的拟合曲线可以看出,对于选取的两组不同的样点,在拟合多项式次数偏低时曲线都基本一致,仅在 8 次和 9 次多项式曲线时,显示出较明显的差异,而且这个差异仅体现在边界。而对于多项式的次数,2 次的抛物线拟合误差较大,3 次曲线也存在一定量的误差,而从 4 次开始,拟合误差很小,曲线基本都能经过样点,到了 8 次和 9 次,曲线边界开始振荡,不再符合散热曲线单调递减的特征。由于球管的阳极热容量值并不要求非常精确,只要不超过其热负荷的最大值,不过载即可^[2],故 3~7 次多项式曲线都能满足应用要求。

多项式次数的选择还与多项式计算的执行时间有关。很明显,多项式次数越高,执行时间越长。若热容量的多项式计算是在单片机系统中完成的,一般建

表 1 数据样点
Tab.1 The Data Point

No.	Data 1		Data 2	
	Time/s	Heat Capacity/kJ	Time/s	Heat Capacity/kJ
1	0	285	0	285
2	20.933	256.83	18.253	259.53
3	60.093	216.19	55.650	219.99
4	127.45	166.88	106.68	179.35
5	298.64	101.32	162.29	147.91
6	353.28	87.224	224.33	124.61
7	412.44	74.209	300.02	100.78
8	473.47	61.216	388.45	79.637
9	536.31	49.858	479.63	60.147
10	595.47	40.636	599.06	40.091

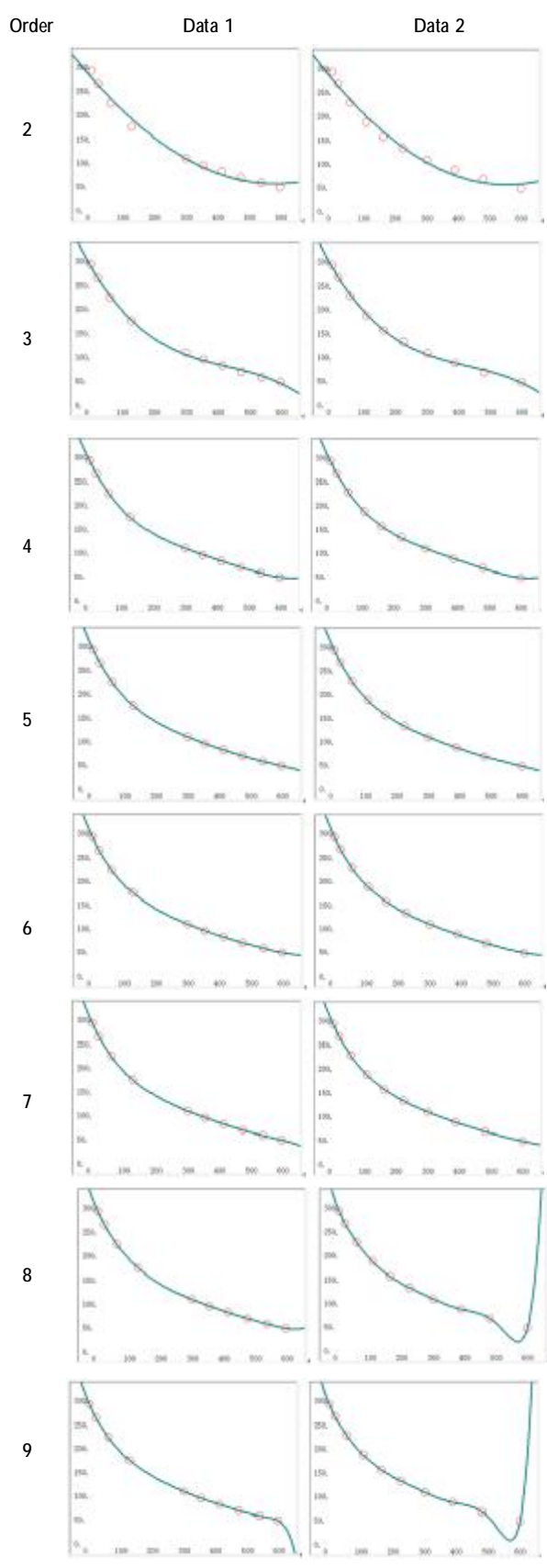


图 2 2~9 次多项式拟合曲线
Fig.2 2~9 Order Polynomial Fitting Curve

议采用低次多项式,这是由于单片机的时钟和浮点计算的能力限制;若由 PC 机完成热容量的计算,则运

算速度较快,可选用较高次多项式。本文分别在单片机和 PC 机对相同的系数组进行多项式运算,单片机的运算时间见表 2。

表 2 单片机系统 3~7 次多项式运算时间
Tab.2 Computation Time of 3~7 Polynomial in
Microcomputer System

Order	3	4	5	6	7
Time/ms	0.928	1.185	1.447	1.714	1.985

表 2 中的单片机选用 Microchip 的 PIC18F 系列 8 位单片机,系统晶振 32 MHz,机器周期频率为 8 MHz,运算时间在 1 ms~2 ms。若系统对运算速度要求比较高,则可选取 3 次多项式拟合曲线;否则,可选取 4 或 5 次曲线,精度更高些。

PC 机系统的测试条件为:CPU 为 Intel i7 系列,主频 3.4 GHz,32 位 Win7 操作系统,在 VB6.0 平台上运行。由于 Windows 不是实时操作系统,其他任务或中断请求会导致运行时间的不精确,但 5~7 次多项式的运算时间基本都在 1 μ s 左右,变化范围不大,故都能满足要求。

此外,由于球管手册并未给出 10 min 后的散热曲线,而根据实际经验可以判断,热容量应持续降低,直至温度达到室温,此时可认为热容量为 0。由于受环境影响,具体热容量降为 0 的时间,没有固定的算法,主要由经验得来,一般认为需要 8 h~10 h^[12]。在这段时间内,可以看作线性关系,便于计算。

除了曲线拟合外,还可采用样点间线性插值的方法。线性插值最突出的优点就是运算速度高,所以非常适合单片机系统;但是为了达到一定的精度,选取的样点数也须较多,造成手工操作的繁琐,同时还需占用的 ROM 存储空间较大。

球管手册所给出的热容量曲线只是作为一个参考值,在 X 线影像装置出厂前,还需对各项参数进行校准。热容量散热曲线的校准就是重新实测若干个值(时间和热容量值),将实测样点存入数据库,重新进行曲线拟合,从而获得实际的曲线系数。在这方面,本系统仍然适用。

4 结论

本文设计了一个软件系统,能够实现对 X 线球管的热容量散热曲线进行样点选取,然后利用最小二乘原理对所选样点进行曲线拟合,从而得出散热曲线的近似方程,便于热容量的计算。根据实验数据,可以得出如下结论:

(1)不同的样点选取对拟合结果基本无影响;

(2)基于最小二乘原理的 3~7 次多项式拟合曲线基本满足热容量散热计算的精度要求;

(3)多项式次数可根据硬件系统需求进行选择;

(4)本系统操作简便,自动化程度高,减轻了调试人员的繁琐工作。

本系统还存在进一步优化的地方,如导入曲线图片的旋转、放大等,以提高系统的人性化操作。

【参考文献】

- [1] 王保华. 生物医学测量与仪器 [M]. 第 2 版. 上海: 复旦大学出版社, 2009: 356-357.
Wang BH. Biometric and instrument[M]. 2nd ed. Shanghai: Fudan University Press, 2009: 356-357.
- [2] Stolyarov IN. Reduction of the working temperature of X-ray tube bearings[J]. Biomed Eng, 2013, 46 (5): 206-208.
- [3] 于清林. CT(X 线)球管的原理、使用和养护探究[J]. 中国医学装备, 2009, 6(3): 49-51.
Yu QL. Mechanism, application and maintenance of CT globe tube[J]. China Medical Equipment, 2009, 6(3): 49-51.
- [4] 徐跃, 梁碧玲. 医学影像设备学 [M]. 第 2 版. 北京: 人民卫生出版社, 2009: 27-29.
Xu Y, Liang BL. Medical imaging equipment [M]. 2nd ed. Beijing: People's Medical Publishing House, 2009: 27-29.
- [5] 李效银, 钱学江, 明爱莲. CT 球管智能闭环回路冷却控制系统的研制[J]. 中国医学装备, 2014, 11(5): 43-45.
Li XY, Qian XJ, Ming AL. The study of cooling control system of the CT bulb tube intelligent closed loop [J]. China Medical Equipment, 2014, 11(5): 43-45.
- [6] Varah JM. Least squares data fitting with implicit functions[J]. BIT Numerical Mathematics, 1996, 36(4): 842-854.
- [7] 施妙根, 顾丽珍. 科学和工程计算基础 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1999: 146-147.
Shi MG, Gu LZ. Science and Engineering Computing [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1999: 146-147.
- [8] 李蓓蕾. 多次自适应最小二乘曲线拟合方法及其应用 [D]. 武汉: 长江大学, 2014.
Li BL. Multiple adaptive least square curve fitting algorithm and applications[D]. Wahan: Yangtze University, 2014.
- [9] Soley VN. The accuracy of the method of least squares[J]. J Mathemat Sci, 1999, 93 (3): 443-446.
- [10] 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.
- [11] 蔡山, 张浩, 陈洪辉, 等. 基于最小二乘法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.
- [12] Pankratov EL, Chkhalo NI. Thermal loads of X-ray tubes with a fixed anode under long-duration exposure [J]. High Temp, 2006, 44(5): 766-772.