



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 109506676 A  
(43)申请公布日 2019.03.22

(21)申请号 201811372050.7

(22)申请日 2018.11.16

(71)申请人 中国西安卫星测控中心  
地址 710043 陕西省西安市咸宁东路462号

(72)发明人 李建成 李赣华 曹亚妮 魏峻  
陈剑平 夏克强 刘海鹏 徐敏强  
邢猛 孔博 高亚瑞玺 董黎  
任域

(74)专利代理机构 西安弘理专利事务所 61214  
代理人 涂秀清

(51)Int.Cl.  
G01C 25/00(2006.01)

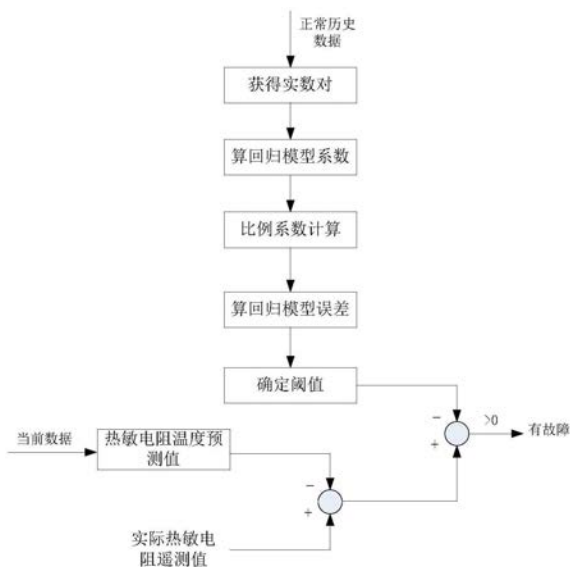
权利要求书1页 说明书4页 附图5页

(54)发明名称

基于回归建模的地球敏感器故障诊断方法

(57)摘要

本发明公开的基于回归建模的地球敏感器故障诊断方法,适用于航天工程技术领域。首先,采用回归分析的方法对地球敏感器热敏电阻温度与地球敏感器温度进行建模,获得表征两者关系的统计模型,通过计算建模误差值计算检测阈值,利用该统计模型对地球敏感器当前值进行预测,若预测值与实测值差值大于阈值,则表明敏感器故障发生。本发明公开的方法通过建立地球敏感器热敏电阻温度与地球敏感器温度间的关联关系模型,进行敏感器的故障诊断,能够检测地球敏感器的微小故障和早期故障。



1. 基于回归建模的地球敏感器故障诊断方法,其特征在于,具体按照如下步骤进行:

步骤1. 采集一段时期内的地球敏感器温度遥测数据和热敏电阻温度遥测数据,按照采样时刻进行匹配,得到第*i*采样时刻的热敏电阻温度值 $y_i$ 和地球敏感器温度值 $x_i$ ,作为二维空间内的实数对 $(x_i, y_i)$ , $i=1, 2, 3, \dots, n$ ;  $n$ 为总采样时刻;

步骤2. 建立回归模型 $y=ax^2+bx+c$ ;

步骤3. 计算在第*i*点处,回归模型建模误差 $e_i$ ,结合步骤2的回归模型得到:

$$e_i = y_i - (ax_i^2 + bx_i + c);$$

步骤4. 计算最大建模误差 $g$ ,如公式5所示:

$$g = \max |y_i - (ax_i^2 + bx_i + c)|, i = 1, \dots, n \quad (5)$$

则检测阈值为:

$$th = r * g \quad (6)$$

其中, $r > 1$ 为保险系数,选取 $r = 2$ ;

步骤5. 依据检测阈值对地球敏感器进行故障检测时,首先根据当前遥测时刻的地球敏感器温度值 $x_0$ 代入步骤2建立的回归模型中,计算得到热敏电阻温度的预测值,即

$$\hat{y} = ax_0^2 + bx_0 + c;$$

步骤6. 计算热敏电阻预测值 $\hat{y}$ 与实际遥测值 $y$ 的偏差 $e_0$ ,即 $e_0 = y - \hat{y}$ ;若 $|e_0| < th$ ,则地球敏感器无故障,若 $|e_0| > th$ ,则地球敏感器有故障。

2. 如权利要求1所示的基于回归建模的地球敏感器故障诊断方法,其特征在于,所述步骤2中建立回归模型的具体过程如下:

以地球敏感器温度为自变量 $x$ ,以热敏电阻温度为因变量 $y$ ,满足如公式1所示的统计模型:

$$y = f(x) + \varepsilon \quad (1)$$

其中, $\varepsilon$ 为建模误差, $f(x)$ 为建立的回归模型,如公式2所示:

$$f(x) = ax^2 + bx + c \quad (2)$$

其中, $a, b, c$ 均为固定但未知的参数,反映了热敏电阻温度和地球敏感器温度之间的关联性;

将 $n$ 个正常历史点集 $(x_i, y_i)$ 代入公式1中得到:

$$Y = Xz + e \quad (3)$$

$$\text{其中, } Y = \begin{bmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix}, \quad z = \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix}, \quad e = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \vdots \\ \varepsilon_n \end{bmatrix}, \quad X = \begin{bmatrix} x_1^2 & x_1 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_n^2 & x_n & 1 \end{bmatrix};$$

由此,正则方程为:

$$Az = B \quad (4)$$

其中, $A = X'X, B = X'Y$ ,即 $z = A^{-1}B = (X'X)^{-1}X'Y$ ,则得到回归系数 $a, b, c$ 的值。

## 基于回归建模的地球敏感器故障诊断方法

### 技术领域

[0001] 本发明属于地球敏感器故障诊断技术领域,涉及一种基于回归建模的地球敏感器故障诊断方法。

### 背景技术

[0002] 卫星是一类极其重要的航天器,长期在恶劣的太空环境中运行。地球敏感器是很多卫星的必备姿态测量机构,直接关系到卫星的安全稳定运行,若发生故障将导致严重的后果。对地球敏感器进行故障诊断方面的研究是十分必要的。

[0003] 当前对于地球敏感器故障的检测,大多从敏感器的单个测量变量出发,没有有效利用敏感器测量量间的关联关系。因此,不能很好的完成检测任务。本发明从地球敏感器的温度和其热敏电阻温度两个遥测变量为着眼点,采用回归分析的建模方法建立两者的关联性。从而完成对于地球敏感器微小故障和早期故障的检测。

### 发明内容

[0004] 本发明的目的是提供一种基于回归建模的地球敏感器故障诊断方法,解决了传统的故障诊断方法仅仅利用了地球敏感器单个遥测变量,通过限值检测来表明敏感器的工作状态,没有充分利用敏感器多遥测变量间的关联关系导致无法检测地球敏感器微小故障的问题。

[0005] 本发明所采用的技术方案是,基于回归建模的地球敏感器故障诊断方法,具体按照如下步骤进行:

[0006] 步骤1.采集一段时期内的地球敏感器温度遥测数据和热敏电阻温度遥测数据,按照采样时刻进行匹配,得到第*i*采样时刻的热敏电阻温度值 $y_i$ 和地球敏感器温度值 $x_i$ ,作为二维空间内的实数对 $(x_i, y_i)$ , $i=1,2,3,\dots,n$ ;  $n$ 为总采样时刻;

[0007] 步骤2.建立回归模型 $y=ax^2+bx+c$ ;

[0008] 步骤3.计算在第*i*点处,回归模型建模误差 $e_i$ ,结合步骤2的回归模型得到:

$$e_i = y_i - (ax_i^2 + bx_i + c);$$

[0009] 步骤4.计算最大建模误差 $g$ ,如公式5所示:

$$g = \max |y_i - (ax_i^2 + bx_i + c)|, i = 1, \dots, n \quad (5)$$

[0011] 则检测阈值为:

$$th = r * g \quad (6)$$

[0013] 其中, $r > 1$ 为保险系数,选取 $r = 2$ ;

[0014] 步骤5.依据检测阈值对地球敏感器进行故障检测时,首先根据当前遥测时刻的地球敏感器温度值 $x_0$ 代入步骤2建立的回归模型中,计算得到热敏电阻温度的预测值,即

$$\hat{y} = ax_0^2 + bx_0 + c;$$

[0015] 步骤6. 计算热敏电阻预测值  $\hat{y}$  与实际遥测值  $y$  的偏差  $e_0$ , 即  $e_0 = y - \hat{y}$ , 若  $|e_0| < th$ , 则地球敏感器无故障, 若  $|e_0| > th$ , 则地球敏感器有故障。

[0016] 本发明的其他特点还在于,

[0017] 步骤2中建立回归模型的具体过程如下:

[0018] 以地球敏感器温度为自变量  $x$ , 以热敏电阻温度为因变量  $y$ , 满足如公式1所示的统计模型:

$$[0019] \quad y = f(x) + \varepsilon \quad (1)$$

[0020] 其中,  $\varepsilon$  为建模误差,  $f(x)$  为建立的回归模型, 如公式2所示:

$$[0021] \quad f(x) = ax^2 + bx + c \quad (2)$$

[0022] 其中,  $a, b, c$  均为固定但未知的参数, 反映了热敏电阻温度和地球敏感器温度之间的关联性;

[0023] 将  $n$  个正常历史点集  $(x_i, y_i)$  代入公式1中得到:

$$[0024] \quad Y = Xz + e \quad (3)$$

$$[0025] \quad \text{其中, } Y = \begin{bmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix}, \quad z = \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix}, \quad e = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \vdots \\ \varepsilon_n \end{bmatrix}, \quad X = \begin{bmatrix} x_1^2 & x_1 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_n^2 & x_n & 1 \end{bmatrix};$$

[0026] 由此, 正则方程为:

$$[0027] \quad Az = B \quad (4)$$

[0028] 其中,  $A = X'X, B = X'Y$ , 即  $z = A^{-1}B = (X'X)^{-1}X'Y$ , 则得到回归系数  $a, b, c$  的值。

[0029] 本发明的有益效果是, 基于回归建模的地球敏感器故障诊断方法, 解决了传统的故障诊断方法仅仅利用了地球敏感器单个遥测变量, 通过限值检测来表明传感器的工作状态, 没有充分利用传感器多遥测变量间的关联关系导致无法检测地球敏感器微小故障的问题。通过将球敏感器温度遥测量和热敏电阻温度遥测量建立回归模型进行故障检测, 能够有效的检测到地球敏感器的微小故障, 确保地球敏感器很好的完成测量任务。

## 附图说明

[0030] 图1是本发明的基于回归建模的地球敏感器故障诊断示意图;

[0031] 图2是本发明的实施例中用到的红外地球敏感器温度正常数据;

[0032] 图3是本发明的实施例中热敏电阻温度正常数据;

[0033] 图4是本发明的实施例中地球敏感器温度与热敏电阻温度的回归拟合模型;

[0034] 图5是本发明的实施例中红外地球敏感器故障时的温度数据;

[0035] 图6是本发明的实施例中地球敏感器故障时的热敏电阻温度数据;

[0036] 图7是本发明的实施例中基于回归模型的地球敏感器检测结果图。

## 具体实施方式

[0037] 下面结合附图和具体实施方式对本发明进行详细说明。

[0038] 本发明的基于回归建模的地球敏感器故障诊断方法, 如图1所示, 具体按照如下步

骤进行:

[0039] 步骤1.采集一段时期内的地球敏感器温度遥测数据和热敏电阻温度遥测数据,按照采样时刻进行匹配,得到第*i*采样时刻的热敏电阻温度值 $y_i$ 和地球敏感器温度值 $x_i$ ,作为二维空间内的实数对 $(x_i, y_i)$ , $i=1,2,3,\dots,n$ ;n为总采样时刻;

[0040] 步骤2.红外地球敏感器热敏电阻温度为红外地球敏感器的直接测量值,它决定了红外地球敏感器测量的准确性,而红外地球敏感器温度表征的是红外地球敏感器本身的温度。通过对长期数据进行分析我们发现,正常情况下红外地球敏感器温度的变化与红外地球敏感器热敏电阻温度有很强的相关性:当红外地球敏感器热敏电阻测量值分别具有增加和减少的趋势变化时,地球敏感器温度同样具有类似的关系。当有故障发生时,该相关性被破坏。因此,首先以回归分析的方法建立热敏电阻测量值与地球敏感器温度值的相关性。建立回归模型 $y=ax^2+bx+c$ ,具体过程如下:

[0041] 以地球敏感器温度为自变量 $x$ ,以热敏电阻温度为因变量 $y$ ,满足如公式1所示的统计模型:

$$[0042] \quad y=f(x)+\varepsilon \quad (1)$$

[0043] 其中, $\varepsilon$ 为建模误差, $f(x)$ 为建立的回归模型,如公式2所示:

$$[0044] \quad f(x)=ax^2+bx+c \quad (2)$$

[0045] 其中, $a,b,c$ 均为固定但未知的参数,反映了热敏电阻温度和地球敏感器温度之间的关联性,则需要利用历史遥测数据获取未知参数 $a,b,c$ 的最优估计值,以建立回归模型;

[0046] 将*n*个历史正常点集 $(x_i, y_i)$ 代入公式1中得到:

$$[0047] \quad Y=Xz+e \quad (3)$$

$$[0048] \quad \text{其中, } Y = \begin{bmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix}, \quad z = \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix}, \quad e = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \vdots \\ \varepsilon_n \end{bmatrix}, \quad X = \begin{bmatrix} x_1^2 & x_1 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_n^2 & x_n & 1 \end{bmatrix};$$

[0049] 由此,正则方程为:

$$[0050] \quad Az=B \quad (4)$$

[0051] 其中, $A=X'X$ , $B=X'Y$ ,即 $z=A^{-1}B=(X'X)^{-1}X'Y$ ,则得到回归系数 $a,b,c$ 的值。

[0052] 步骤3.计算在第*i*点处,回归模型建模误差 $e_i$ ,结合公式1-3得到:

$$e_i = y_i - (ax_i^2 + bx_i + c);$$

[0053] 步骤4.为了利用所建立的模型进行红外地球敏感器的故障检测,需要设定用于预测值和测量值一致性检测的阈值,该阈值的确定需要考虑正常情况下,由于回归模型建模误差所带来的不确定影响,以免引起误报,因此,首先对于回归模型的误差进行分析,计算最大建模误差 $g$ ,如公式5所示:

$$[0054] \quad g = \max |y_i - (ax_i^2 + bx_i + c)|, i = 1, \dots, n \quad (5)$$

[0055] 则检测阈值为:

$$[0056] \quad th=r*g \quad (6)$$

[0057] 其中, $r>1$ 为保险系数,选取 $r=2$ ;

[0058] 步骤5. 依据检测阈值对地球敏感器进行故障检测时, 首先根据当前遥测时刻的地球敏感器温度值 $x_0$ 代入步骤2建立的回归模型中, 计算得到热敏电阻温度的预测值, 即 $\hat{y} = ax_0^2 + bx_0 + c$ ;

[0059] 步骤6. 计算热敏电阻预测值 $\hat{y}$ 与实际遥测值 $y$ 的偏差 $e_0$ , 即 $e_0 = y - \hat{y}$ 。若 $|e_0| < th$ , 则地球敏感器无故障, 若 $|e_0| > th$ , 则地球敏感器有故障。

[0060] 本发明的方法设计思路如下: 以地球敏感器的温度和其热敏电阻温度的遥测值为基础建立回归模型, 利用所建立的回归模型对敏感器当前值进行预测。无故障情况下, 由于建模误差的影响, 测量值和预测值之差在一定范围波动; 当有故障发生的情况下, 测量值与预测值将超出统计阈值, 表明有敏感器异常;

[0061] (1) 回归模型的建立: 对于红外地球敏感器, 采用其温度遥测值和热敏电阻温度遥测值作为分析量。建立表征两测量相关性的回归模型。当利用所建立的回归模型得到的预测值与当前实际测量值不一致时, 表明当前地球敏感器有故障发生。

[0062] (2) 基于最大建模误差的方法确定预测值和测量值在正常工作情况下的波动范围, 计算相应检测阈值。并建立了相应的检测逻辑, 以实现地球敏感器故障。

[0063] 结合本发明的方法具体的实施例如下:

[0064] 如图2和图3所示, 分别为地球敏感器温度遥测数据和热敏电阻温度遥测数据; 按步骤1和2, 将相同采样时刻的实数对在平面坐标系内作出散点图, 如图3所示, 并计算得到回归模型的系数为 $a = -0.0514$ ,  $b = 3.7023$ ,  $c = -26.2515$ , 即所确定的回归模型为 $f(x) = -0.0541x^2 + 3.7023x - 26.2515$ ; 按照步骤3和4可以计算得到最大建模误差为 $g = 0.7037$ , 并可以得到阈值为 $th = 1.4075$ 。

[0065] 根据所建立的回归模型和阈值, 则用于地球敏感器的故障检测。如图4和5所示的当前地球敏感器温度和热敏电阻温度遥测数据, 按照步骤5和6, 可以计算得到根据回归模型预测的热敏电阻值, 以及由此计算的热敏电阻预测值与实际遥测值的偏差, 根据其偏差与阈值的大小关系, 可以进行故障的检测, 从图7可见, 偏差值大于阈值, 表明当前地球敏感器有故障。

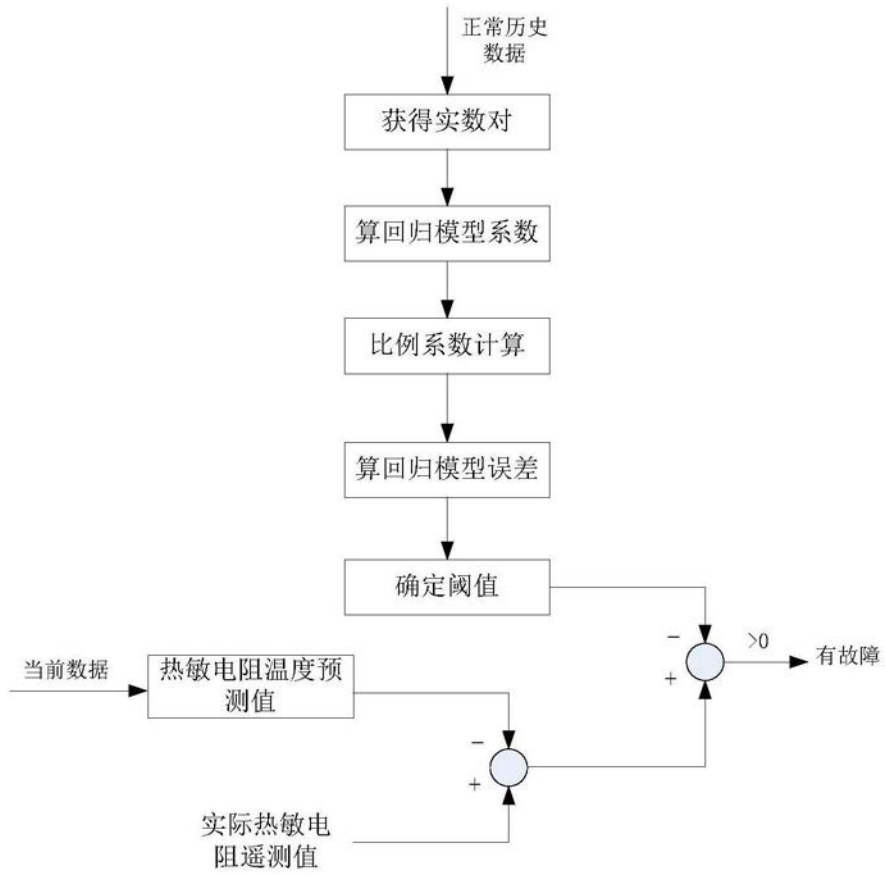


图1

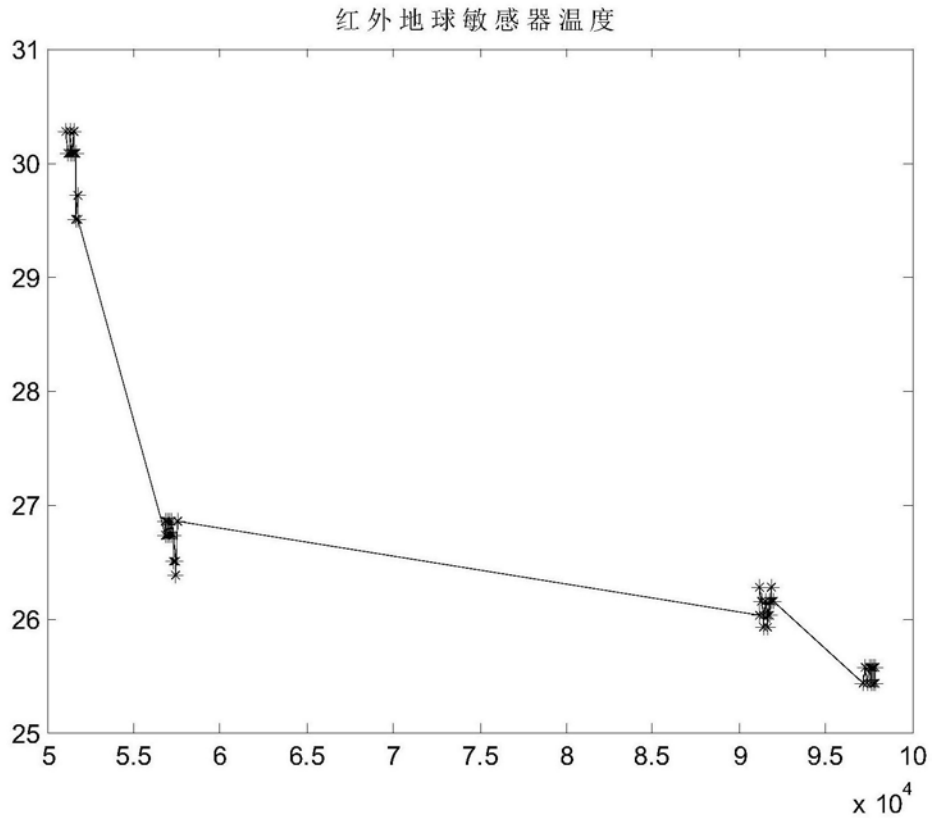


图2



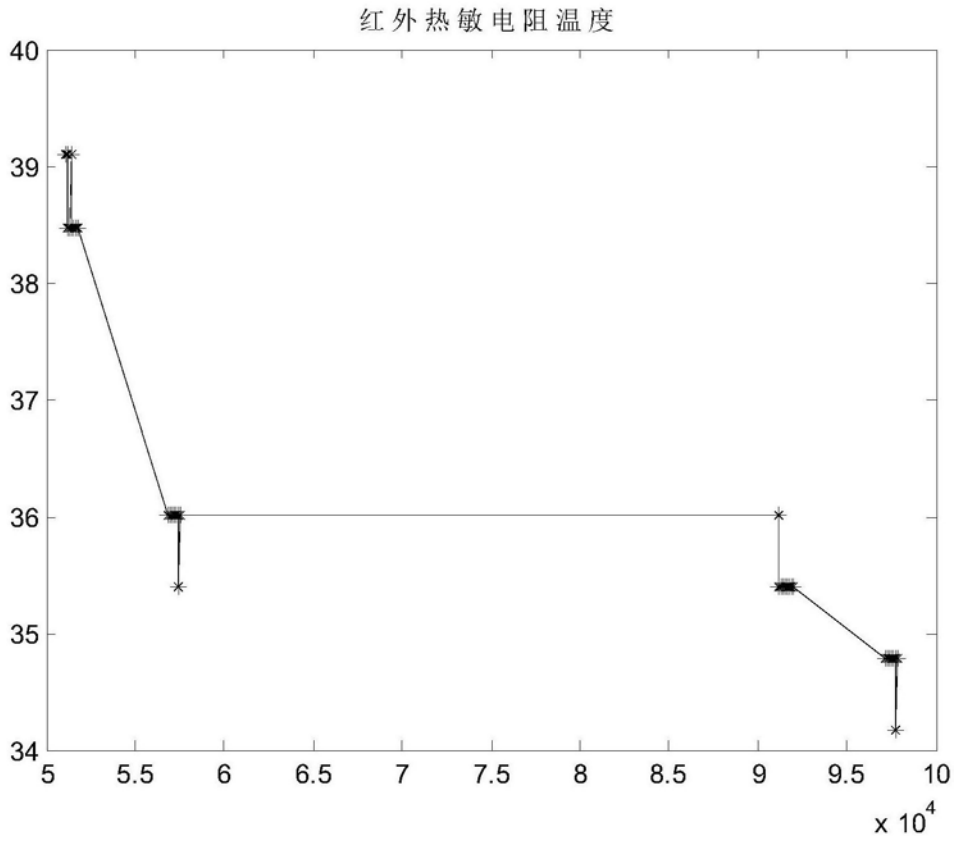


图3

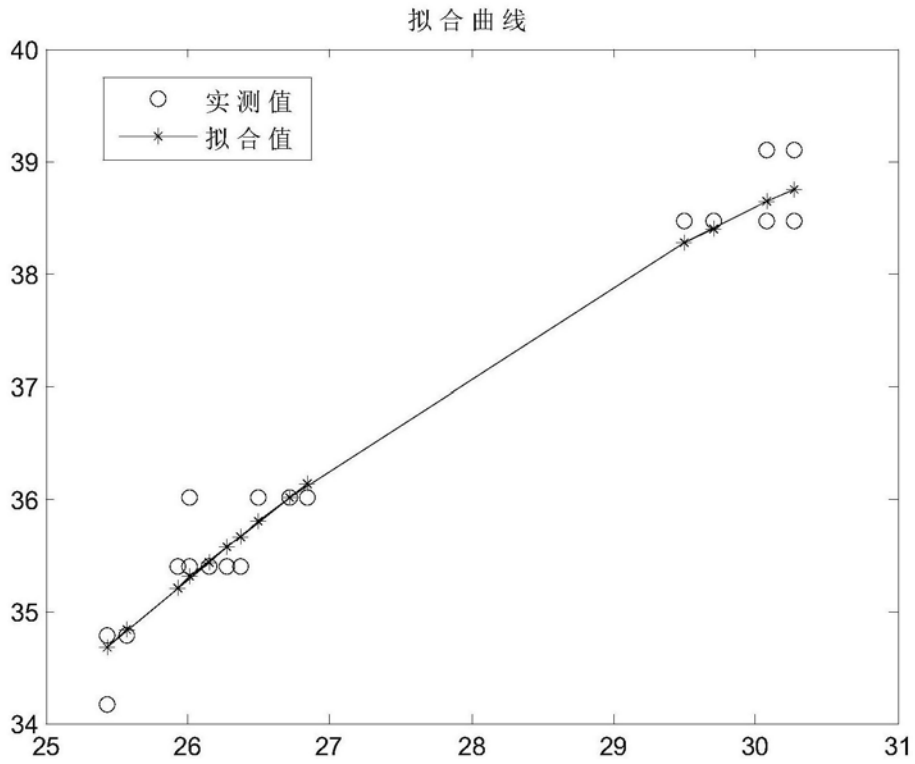


图4

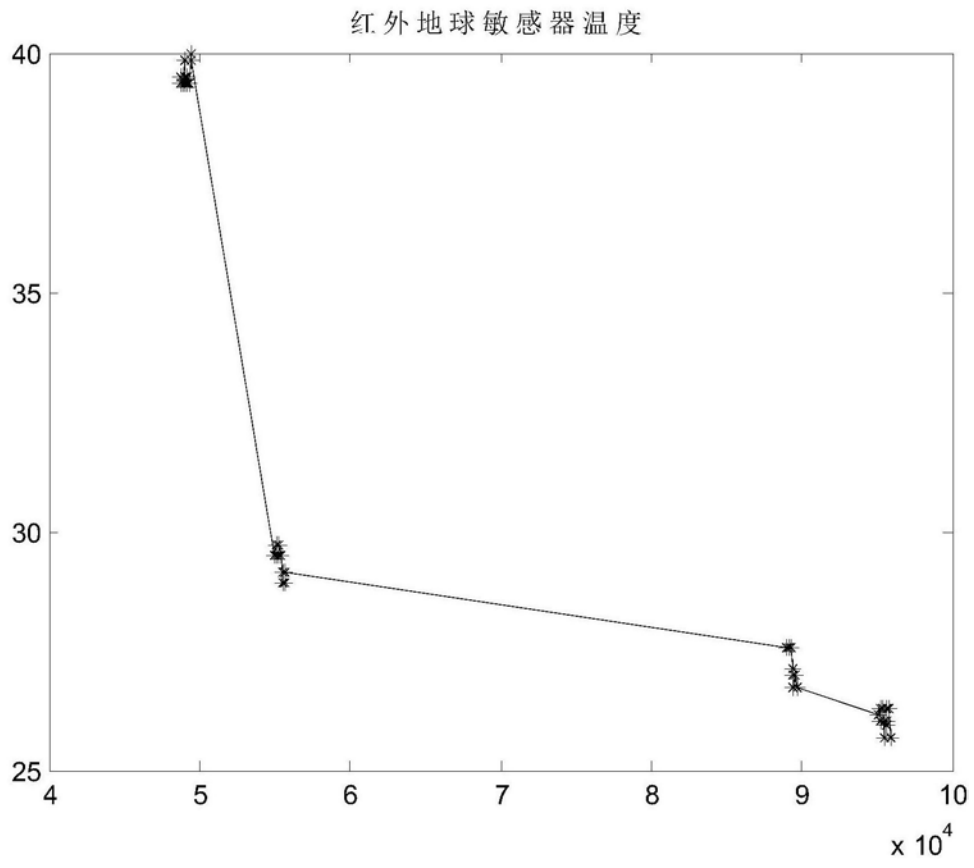


图5

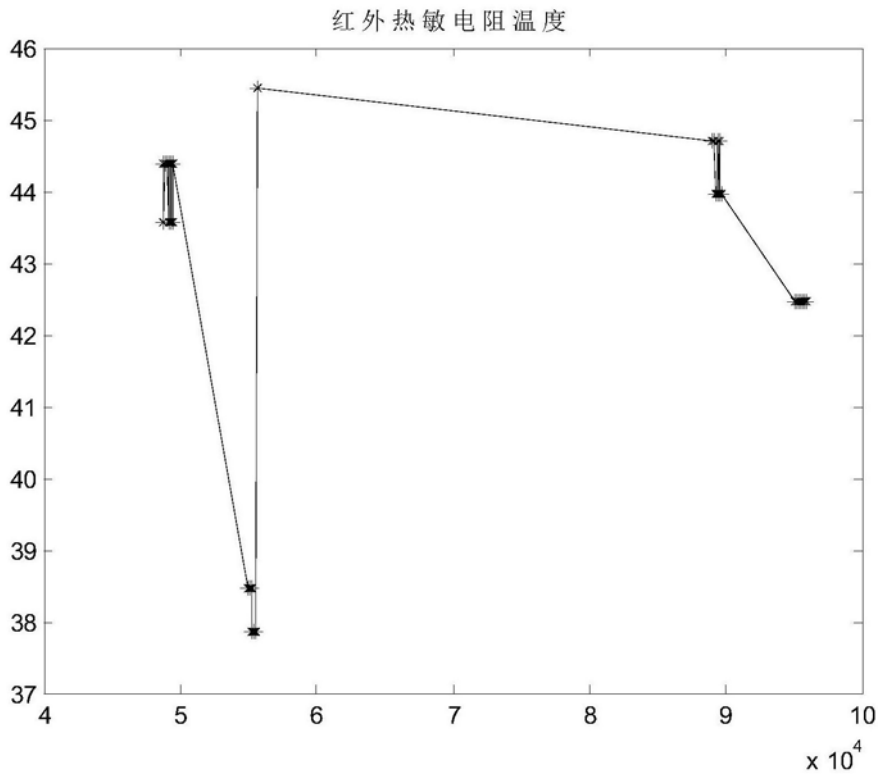


图6

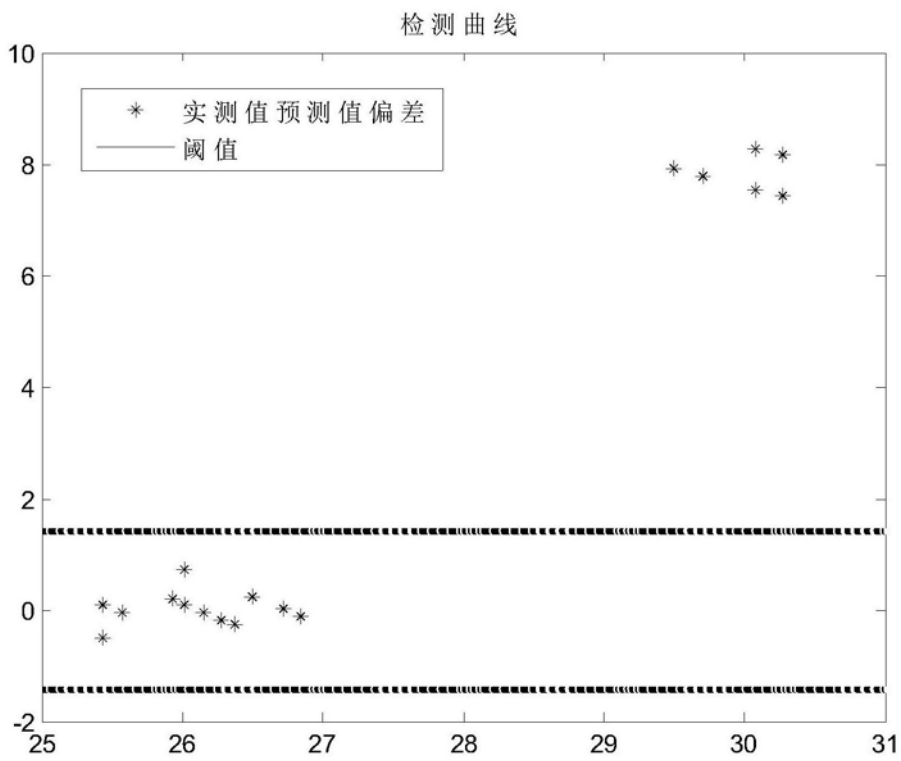


图7