

# 基于回归分析的热量表使用寿命预测方法研究

李 锋,周秉直,张俊亮,韩婉婷,周 彬

(陕西省计量科学研究院,陕西 西安 710100)

**摘要:**针对热量表使用寿命只能粗略判断(通过耐久性试验,估算使用寿命为 5 年)的问题,提出一种基于回归分析的热量表使用寿命预测模型建立方法,利用灰色关联分析法确定各因素与使用寿命的关联度大小,通过一元多项式回归分析和多元非线性回归分析,多方向获取各个影响因素与其使用寿命的变化关系,采用残差分析、拟合优度检验和置信区间检验验证了模型的准确性。结果表明,基于回归分析的热量表使用寿命预测方法与试验数据契合度高,为其型式评价、质量分析等奠定了基础。

**关键词:**耐久性试验;寿命预测;灰色关联分析;回归分析

中图分类号:TH71

文章编号:1000-0682(2024)05-0122-07

文献标识码:A

DOI:10.19950/j.cnki.CN61-1121/TH.2024.05.023

## Research on the service life prediction method of heat meter based on regression analysis

LI Feng, ZHOU Bingzhi, ZHANG Junliang, HAN Wanting, ZHOU Bin

(Shaanxi Institute of Metrology Science, Shaanxi Xi'an 710100, China)

**Abstract:** Aiming at the problem that the service life of heat meters can only be roughly judged (through the durability test, the service life is 5 years), a method of predicting the service life of heat meters based on regression analysis is proposed. Grey relational degree analysis was used to determine the degree of correlation between each factor and its service life. The variable relationship between each influencing factor and its service life was obtained in multiple directions by one-element polynomial regression analysis and multiple nonlinear regression analysis. The accuracy of the model was verified by residual analysis, goodness of fit test and confidence interval test. The results show that the method based on regression analysis is accurate and reliable, which lays a foundation for its type evaluation and quality analysis.

**Keywords:** durability test; service life prediction; grey relational analysis; regression analysis

## 0 引言

随着科学技术的高速发展和供热计量的改革,在日常实际应用中热量表的性能及质量提出了更高的要求,因此热量表使用寿命也受到了更多的重视。耐久性试验作为国家标准 GB/T 32224—2020《热量表》<sup>[1]</sup>中评价热量表使用寿命的主要手段,其装置研制、数据分析及质量研究等,也被更多地

深入探索。

热量表的耐久性试验是利用热量表耐久性试验装置对热量表及其组件进行加速磨损试验,以确定产品受磨损部件、使用材料及生产工艺经过磨损后的计量特性或产品性能是否满足要求。

当前,热量表耐久性试验的研究工作主要集中在热量表耐久性试验装置的研制<sup>[2-4]</sup>及耐久性试验结果分析标准说明<sup>[5-7]</sup>等,而对于热量表在耐久性试验过程中的数据分析、性能状态变化分析以及使用寿命预测等研究开展较少;其次,对于热量表使用寿命评估也仅限于按照国家标准计算(通过耐久性试验,则热量表的估算使用寿命为 5 年),并没有对耐久性试验结果进行更加详细精确的判断。再

收稿日期:2024-07-02

第一作者:李锋(1967—),男,陕西西安人,本科,高级工程师,主要从事流量、热能计量研究。E-mail:2822576689@qq.com

通信作者:周秉直(1965—),男,陕西西安人,本科,正高级工程师,主要从事流量、热能计量研究。E-mail:bingzhi06@126.com

次,缺乏热量表使用寿命周期内多次耐久性试验数据,也没有针对热量表数据的可靠性评估。因此,如何对耐久性试验过程中的热量表的可靠性状态进行分析,如何进行热量表耐久性试验结果分析,如何利用状态监测数据和示值误差检定数据进行热量表使用寿命分析是该文研究的重点。

## 1 加速耐久性试验

### 1.1 试验原理

4000次冷热循环冲击试验时,整个过程热量表在常用流量 $q_p$ 条件下,温度从(15~20)℃开始运行2.5min,然后将温度转换至(80~85)℃,在(80~85)℃下运行2.5min,温度变化切换时间不超过1min。此过程为5分钟一个周期,运行4000个周期。其运行示意图如图1所示。

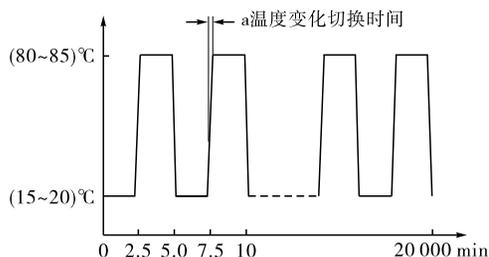


图1 4000次冷热冲击耐久性试验温度随时间变化示意图

### 1.2 试验概述

对9块使用了5年的某厂家热量表进行了加速耐久性试验,直至所有热量表出现误差超差或者显示故障,历时11个月共计13轮,试验用表型号规格:DN15,准确度等级:2级。

(1)初始误差的确定。耐久性试验前确定初始误差,其为该表出厂后首次检定时的示值误差。

(2)试验后误差的确定。

①试验用热量表为旧表,需确定并记录该热量表第一次耐久性试验前的误差;

②每次耐久性试验后应确定误差,即测量参考值条件下测出的热量表误差,并记录偏差。

(3)异常情况的确定。耐久性试验过程中,确保试验条件,观察并记录试验用热量表的异常情况(显示不清、断码、不显示、流量传感器泄漏、渗漏、外壳破裂损坏等)。

### 1.3 评价准则

根据GB/T 32224—2020《热量表》,当前对热量表耐久性的评估主要是以其使用寿命为指标,主要通过耐久性试验的异常检查和误差检查来进行。通

常认为,基本耐久性100个试验周期估算的使用寿命为5年,附加试验估算的附加使用寿命为5年,加速耐久性试验4000个试验周期估算的使用寿命为5年。具体检查要求如下:

#### 1.3.1 外观及密封性检查(异常检查)

外观:显示不清、断码、不显示;流量传感器密封性:试验过程中或示值检测时泄漏、渗漏或损坏。

#### 1.3.2 耐久性试验后误差

试验用热量表采用使用了5年的旧表,根据JJG 225—2001中第5.3条“使用中检验的热能表的误差限为最大允许误差的2倍”,因此,使用热量表检定装置,进行耐久性试验后流量传感器的示值误差测试,计算各测试流量点的耐久性试验后误差,其应不超过最大允许误差的2倍。

### 1.4 试验数据

在每轮耐久性试验后,应根据计量检定规程进行热量表检定。由热量表工作原理可进行分量检定(流量示值误差检定和温差示值误差检定)。

#### 1.4.1 三个流量点下的耐久性试验误差

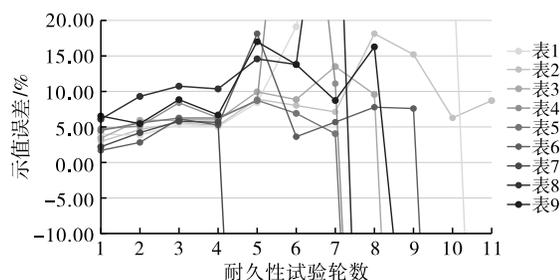
检定流量传感器时,应在下列每个流量范围内选一流速点并在(50±5)℃的水温下进行检定。

(1) $q_i \leq q \leq 1.1q_i$ (小点)

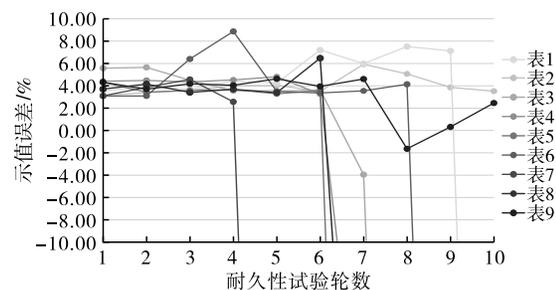
(2) $0.1q_p \leq q \leq 0.11q_p$ (中点)

(3) $0.9q_p \leq q \leq 1.0q_p$ (大点)

具体检定数据(9块表的误差)如图2所示。



(a)小流量点下的示值误差



(b)中流量点下的示值误差

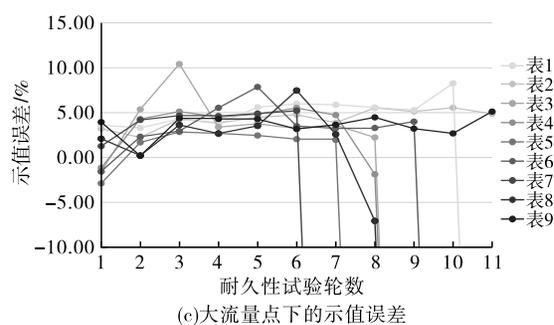


图2 耐久性试验流量传感器示值误差

### 1.4.2 三个温差点下的耐久性试验误差

配对温度传感器的两个温度传感器,应在温度不同的两个恒温槽内,在下列每个温差范围内选一个温差点进行检定。

- (1)  $\Delta\theta_{\min} \leq \Delta\theta \leq 1.2\Delta\theta_{\min}$
- (2)  $10\text{ }^{\circ}\text{C} \leq \Delta\theta \leq 20\text{ }^{\circ}\text{C}$
- (3)  $(\Delta\theta_{\max} - 5)\text{ }^{\circ}\text{C} \leq \Delta\theta \leq \Delta\theta_{\max}$

注: $\Delta\theta$ 选择 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时候,配对温度传感器的2个温度传感器可以选择 $(50\sim 30)\text{ }^{\circ}\text{C}$ 或 $(70\sim 50)\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。具体检定数据(9块表的误差)如图3所示。

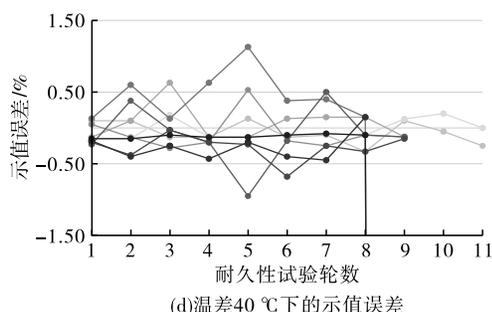
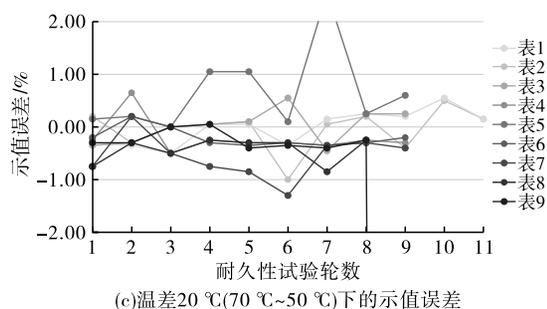
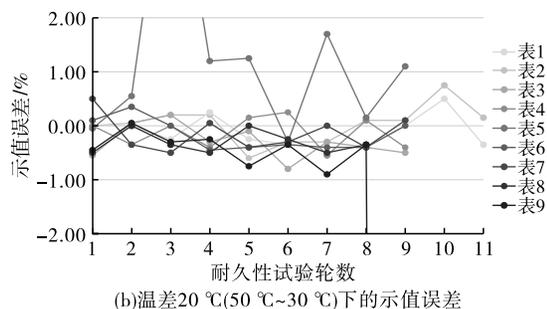
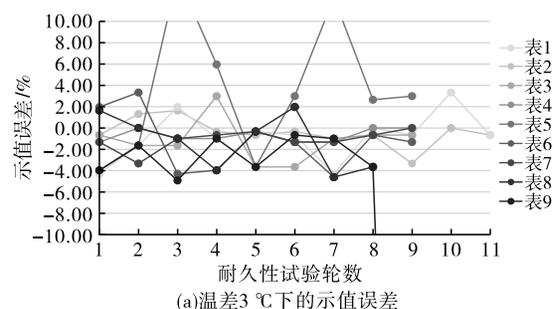


图3 耐久性试验配对温度传感器示值误差

### 1.4.3 耐久性试验运行过程中的异常检查

对9块实际使用了5年的某厂家热量表进行了13轮加速耐久性试验,试验运行过程中具体异常(瞬时流量为零、累计流量无变化、电池没电不显示等)及出现时间如表1所示。

表1 耐久性试验运行过程中的异常检查

表号	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8	#9
第1-1轮	--	--	--	--	--	--	--	--	--
第1-2轮	--	--	--	--	--	--	--	--	--
第1-3轮	--	--	--	--	--	--	--	--	--
第1-4轮	--	--	--	--	--	--	--	--	--
第1-5轮	--	--	--	--	--	--	--	--	--
第1-6轮	--	--	--	--	--	--	--	&	--
第1-7轮	--	&	--	--	--	--	--	χ	--
第1-8轮	&	χ	--	--	&	&	--	χ	--
第1-9轮	χ	χ	--	&	χ	χ	--	χ	--
第1-10轮	χ	χ	&	χ	χ	χ	&	χ	--
第1-11轮	χ	χ	χ	--	χ	χ	χ	χ	--
第1-12轮	χ	* *	--	χ	χ	* *	χ	χ	--
第1-13轮	χ	* *	--	χ	χ	* *	χ	χ	--

注:&表明累积流量在这一轮发生故障停止不走;χ:表明瞬时流量为零;--:表明瞬时流量运行正常;\* \*表明该表没有显示,电池没电。

## 2 热量表使用寿命分析及预测方法

### 2.1 试验及误差数据预处理

将 9 块热量表的耐久性试验前后检定数据、异常信息等集成合并为一个表格,经过去除重复数据、数据转化、数据规约后,形成耐久性试验数据库,以便数据分析和模型预测。

对示值误差归一化处理,在最大允许误差范围内的误差定义为 1,不在范围内误差的定义为 0;记录每轮耐久性试验中异常表数量和耐久性试验后检定示值误差超差的热量表的数量,转化为第  $i$  轮耐久性试验后异常热量表占比和检定示值误差超差热量表占比,达到数据标准化。

热量表性能退化状态评估是开展热量表的使用寿命研究的主要手段。热量表的使用寿命是指,新的热量表从正常使用到完全失效的时间,这是一个渐变的过程,其性能会随着使用时间而发生变化。以耐久性试验积累的数据为基础,探索热量表的性能随时间(试验次数)的变化关系,建立“热量表的性能异常占比  $Y$ ”回归模型,实现热量表的使用寿命的预测,可以对热量表质量等级进行更为精确的划分:相同试验条件下,热量表退化程度越严重质量等级越低。

依据评价准则,影响热量表使用寿命的因素有误差和试验过程异常情况。误差分为流量示值误差及温差示值误差,检定过程应至少选取 3 个点进行示值误差检定,所以自变量选取“小流量点下示值误差超差占比  $X_1$ ”、“中流量点下示值误差超差占比  $X_2$ ”、“大流量点下示值误差超差占比  $X_3$ ”、“小温差

点下示值误差超差占比  $X_4$ ”、“中温差点下示值误差超差占比  $X_5$ ”、“大温差点下示值误差超差占比  $X_6$ ”和“耐久性试验过程异常占比  $X_7$ ”。

### 2.2 灰色关联分析

灰色关联分析<sup>[8-9]</sup>(Grey Relational Analysis,简称 GRA)是一种用于研究具有不完全信息或不确定性的系统的方法。灰色关联分析方法,是根据因素之间发展趋势的相似或相异程度,亦即“灰色关联度”,作为衡量因素间关联程度的一种方法。

设参考数列(又称母序列)为  $Y = \{Y(k) | k = 1, 2, \dots, n\}$ ,比较数列(又称子序列)为  $X_i = \{X_i(k) | k = 1, 2, \dots, n\}$ 。对参考数列和比较数列进行无量纲化处理,得到  $y(k)$  和  $x_i(k)$ 。

$y(k)$  和  $x_i(k)$  的关联系数  $\xi_i(k)$ :

$$\xi_i(k) = \frac{\min_i \min_k |y(k) - x_i(k)| + \rho \max_i \max_k |y(k) - x_i(k)|}{|y(k) - x_i(k)| + \rho \max_i \max_k |y(k) - x_i(k)|} \quad (1)$$

其中: $\rho$  为分辨系数, $\rho$  越小,分辨率越大。一般取值区间为(0,1),通常取 0.5。

计算各类关联系数的平均值  $r_i$ ,其为  $y(k)$  和  $x_i(k)$  的关联:

$$r_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \xi_i(k), k = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

选取“热量表性能异常占比”为因变量  $Y$ ,考虑热量表分检法中示值误差影响因素:流量、温差及异常因素,选取  $X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_6, X_7$  为自变量  $X$ ,如表 2 所示。

表 2 耐久性试验不同自变量在试验轮数下的异常占比

轮数 变量	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$X_1$	0.000 0	0.111 1	0.111 1	0.444 4	0.666 7	0.777 8	1.000 0	1.000 0	1.000 0
$X_2$	0.000 0	0.000 0	0.111 1	0.222 2	0.333 3	0.666 7	0.666 7	0.777 8	0.777 8
$X_3$	0.000 0	0.111 1	0.111 1	0.222 2	0.333 3	0.444 4	0.555 6	0.666 7	0.777 8
$X_4$	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.111 1	0.111 1	0.222 2	0.222 2
$X_5$	0.000 0	0.111 1	0.111 1	0.111 1	0.111 1	0.111 1	0.111 1	0.222 2	0.222 2
$X_6$	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.222 2	0.222 2
$X_7$	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.111 1	0.222 2	0.555 6	0.666 7	0.888 9
$Y$	0.000 0	0.333 3	0.444 4	0.666 7	0.888 9	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0

利用灰色关联分析理论,分别对  $X_1 \sim X_7$  等影响因素进行灰色关联分析,从而得到各影响因素与因变量的灰色关联度及关联序。

利用 MATLAB 软件,通过公式(1)和(2),可以得到自变量的关联度及关联序,如表 3 所示。

表 3 自变量的关联度及关联序

变量	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$X_6$	$X_7$
关联度	0.836 9	0.678 9	0.659 1	0.542 1	0.566 0	0.536 70	0.628 9
关联序	1	2	3	6	5	7	4

### 2.3 一元多项式回归分析

从表 3 中关联度和关联序可以看出,“热量表性能异常占比 Y”与“小流量点下示值误差超差占比 X<sub>1</sub>”关联最高,且遥遥领先其他变量。因此选取“小流量点下示值误差超差占比 X<sub>1</sub>”变量,建立“耐久性试验中热量表性能异常占比 Y”的一元多项式回归模型。

#### 2.3.1 一元多项式回归模型及系数估计

一元多项式回归模型是一种常用的机器学习方法,用于分析数据集中的非线性关系。

一元多项式回归可以表示为如下形式:

$$\hat{y} = b_0 + b_1x + b_2x^2 + \dots + b_mx^m + \varepsilon \quad (3)$$

其中:  $b_0, b_1, \dots, b_m$  是多项式的系数。

残差  $e_i$  是实际观测值与模型预测值之间的差异:

$$e_i = y_i - \hat{y} \quad (4)$$

采用最小二乘法进行多项式回归分析的目的就是寻找一组最佳的多项式系数使得残差的整个点集的总误差最小,而求总误差最小的问题可以转化为求误差平方和最小。

应用 MATLAB 中 polyfit 和 polyval 函数进行回归分析预测,通过公式(3)可得待估参数  $b$ , 根据经验和对比一元三次、一元四次、一元五次多项式曲线平滑度(如图 4 所示)和回归残差,从而确定一元四次多项式回归方程最优,其预测公式:

$$y = -10.2303 + 21.5080x - 15.1944x^2 + 4.9158x^3 + 7.0907 \times 10^{-4}x^4 \quad (5)$$

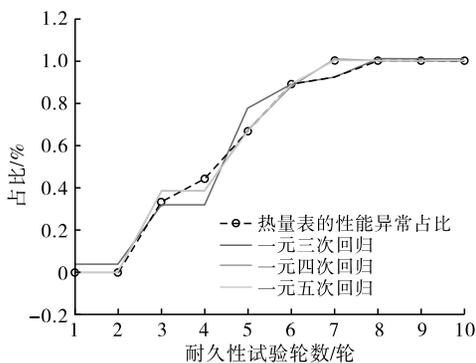


图 4 一元多项式回归曲线

#### 2.3.2 一元多项式回归模型检验

##### (1) 残差分析

通过残差图发现,0 值附近未呈现出特殊的变化规律及趋势,且均匀落位于 0 值附近。

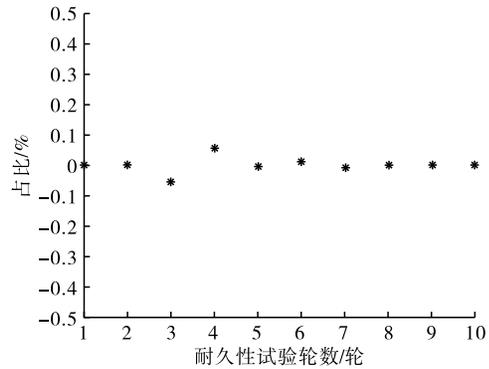


图 5 一元四次回归分析残差检验

##### (2) 拟合优度检验

决定系数  $R^2 = 0.9958, 0.90 \leq R^2 \leq 1.00$  时,拟合程度非常高。

##### (3) 置信区间检验

采用 MATLAB 对模型做 95% 的置信区间,可以看出,所有数据点均落在置信区间内,结合残差图分析和决定系数分析,可验证公式(5)的预测模型准确性和可靠性。

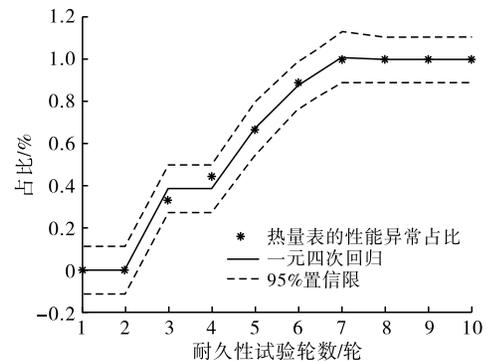


图 6 一元四次回归分析置信区间检验

### 2.4 多元非线性回归分析

从热量表的工作原理来看,实际与流量、温差等息息相关,若仅考虑小流量点下的示值误差因素,不能完全分析及预测热量表的使用寿命。从表 3 中关联度和关联序可以看出,“热量表性能异常占比 Y”与“小流量点下示值误差超差占比 X<sub>1</sub>”、“中流量点下示值误差超差占比 X<sub>2</sub>”和“大流量点下示值误差超差占比 X<sub>3</sub>”关联较高。因此选取这三个变量,建立“热量表性能异常占比 Y”的多元非线性回归模型<sup>[10]</sup>,多方面分析预测热量表的使用寿命。

#### 2.4.1 多元非线性回归模型及参数估计

多元非线性回归分析是指在相关变量中将一个变量视为因变量,其他多个变量视为自变量,建立多个变量之间非线性数学模型数量关系式,并利用样本数据进行分析的统计分析方法。

多元非线性回归模型常用非线性函数形式来描述因变量与自变量之间的关系。根据灰色关联分析,建立三元非线性回归方程模型:

$$Y = \beta_1 + \beta_2 X_1 + \beta_3 X_2 + \beta_4 X_3 + \beta_5 X_1^2 + \beta_6 X_2^2 + \beta_7 X_3^2 + \varepsilon \quad (6)$$

其中:  $Y$  为因变量,  $X_1, X_2, X_3$  为自变量;  $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_7$  为待估参数。

多元非线性回归模型的参数估计通常采用非线性最小二乘法,选择合适的初始值,通过迭代运算,不断调整参数估计值使残差平方和最小化,以此求得准确的参数估计值,从而得到多元非线性回归函数。

应用 MATLAB 中 `nlinfit` 和 `nlpredci` 函数进行回归分析预测,通过公式(6)可得待估参数  $\beta$ ,从而确定多元非线性回归方程,即预测公式:

$$Y = -0.0014 - 0.5053X_1 + 1.1549X_2 + 3.8033X_3 - 0.0203X_1^2 - 1.1973X_2^2 - 2.6554X_3^2 \quad (7)$$

#### 2.4.2 多元非线性回归模型检验

##### (1) 残差分析

通过残差图发现,0 值附近未呈现出特殊的规律及趋势,且均匀落位于 0 值附近。

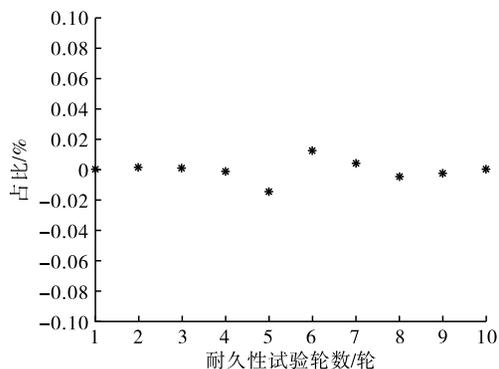


图7 多元非线性回归分析残差检验

##### (2) 拟合优度检验

决定系数  $R^2 = 0.9997$ ,  $0.90 \leq R^2 \leq 1.00$  时,拟合程度非常高。

##### (3) 置信区间检验

采用 MATLAB 对模型做非线性回归分析,得到三元二次回归曲线,再做 95% 的置信区间,可以看出,所有数据点均落在置信区间内,结合残差图分析和决定系数分析,可验证公式(7)的预测模型准确性和可靠性。

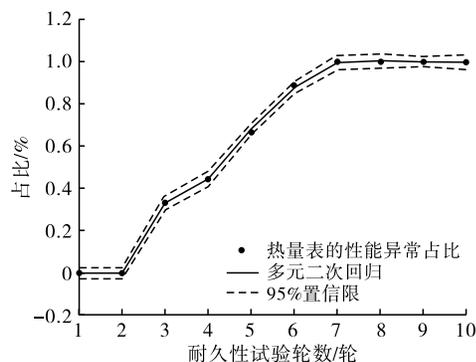


图8 多元非线性回归分析置信区间检验

### 3 结论

该文以热量表耐久性试验为对象,深入研究了基于回归分析的热量表使用寿命分析及预测,其方法有以下特点:

(1) 对耐久性试验状态监测数据和误差数据进行数据预处理,通过去除重复数据、数据转化、数据规约及归一化处理,形成耐久性试验数据库;

(2) 列举影响热量表使用寿命的影响量,通过灰色关联分析,计算关联度和关联序,确定了影响量对使用寿命的影响程度;

(3) 通过一元多项式回归分析和多元非线性回归分析,建立回归模型,可推算关联度最大的影响量对使用寿命的预测值和关联度较大的几个影响量对使用寿命的预测方程,经过残差分析、拟合优度检验和置信区间检验,说明了回归预测模型的准确性和可靠性;

(4) 通过多方向预测模型的建立,可直观地定量分析各因素对使用寿命影响权重,为型式评价、质量分析等奠定了数据基础,为热量表质量提升提供了分析依据。

#### 参考文献:

- [1] 热量表: GB/T 32224—2020[S]. 北京:中国标准出版社, 2021.
- [2] 周秉直,王慧元,李锋,等. 热量表耐久性自动检测及质量分析平台研究[J]. 工业仪表与自动化装置, 2017(03): 37-41.
- [3] 李晓鹏,吴波,孟涛. 一种多功能热量表耐久性试验装置的设计与实现[J]. 中国测试, 2020, 46(01): 93-98.
- [4] 高进胜,赵玉敏,王天宇. 热量表耐久性试验装置[J]. 计量技术, 2018(07): 29-31.
- [5] 赵玉敏,金志军,谷祖康,等. 我国热量表产品耐久性试验研究[J]. 计量技术, 2016(06): 67-69.
- [6] 樊家成,张柯,段云,等. 户用超声热量表 4000 次耐久

