

## Researches on Fuzzy Compensation of creep of load cell

ZHU Zijian<sup>1,2</sup> CHEN Renwen<sup>1</sup> ZHANG Dong<sup>2</sup>

1. Smart Material & Structure Institute, Nanjing Univ. of Aeronautics & Astronautics, 210016 P. R. China

2. Mettler-Toledo (Changzhou) Scale & System Ltd. Changzhou Jiangsu 213001, P. R. China

**Abstract:** Creep is an important factor that influences the accuracy of a load cell. As one of the key specifications, it is also the most critical part for control. Based on the analysis of creep, a new compensation method—fuzzy creep compensation is presented in this paper. It firstly introduces the fuzzy recognition to determine the loading situations (i.e. the rate of output change). The rate of output change will determine the start point of a creep segment of a loading/unloading curve, therefore, the actual load value could be gotten in the weighing process. Compare to other compensation techniques, it is, a new, simple, reliable and accurate compensation that not only avoids the complicated modeling of creep performance, but prevent from environmental influence as well. It is verified through experiments in the end.

**Key words:** load cell; creep; fuzzy compensation

## 称重传感器蠕变的模糊补偿方法研究

朱子健<sup>1,2</sup> 陈仁文<sup>1</sup> 张东<sup>2</sup>

1. 南京航空航天大学智能材料与结构研究所, 南京 210016

2. 梅特勒托利多(常州)称重设备系统有限公司, 常州 江苏 213001

**摘要:** 以对传感器蠕变的一种新的补偿方法——动态模糊补偿法, 可实现蠕变实时精确补偿。引入模糊识别的方法来确定载荷的变化状况, 利用传感器的输出变化率, 判断传感器的蠕变起始点, 从而确定作用于传感器上的实际载荷。同时这种方法的精度不受传感器的载荷与环境等影响, 简单方便, 易于计算机实现及批量生产, 避免了繁琐的传感器蠕变模型的建立和实现过程, 且精度较好, 为传感器的蠕变误差补偿提供了一种崭新的方法。

**关键词:** 称重传感器; 蠕变; 模糊补偿

**中图分类号:** TP212

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1004-1699(2003)01-0054-05

作为传感器性能的一个主要技术指标, 蠕变误差一直受到人们的普遍关注。它是指由于一个快速的加载增量  $\Delta W$  引起传感器输出信号的增量为  $\Delta S$  时, 在所有的环境条件不变的情况下,  $\Delta S$  随时间发生的最大变化  $\delta S$  与  $\Delta S$  之比 ( $C_p = \delta S / \Delta S$  ( $C_p$  为蠕变误差))。显然蠕变是考核时间影响的技术指标, 即传感器的时间稳定性, 也是传感器生产中最难控制的技术指标之一。传感器蠕变是由弹性体产生的正蠕变、应变片及应变胶等产生的负蠕变综合影响而

形成的, 一般来说当弹性体设计定型后, 其蠕变值也就大致确定了。控制和调整蠕变的传统做法是选用不同蠕变补偿性能的应变片, 改变贴片位置及贴片胶固化工艺等方法来实现<sup>[1]</sup>。可见, 这些方法仅适用于一些精度要求不高的情况, 如果要生产高精度的传感器, 那么这些蠕变的控制方法在实际生产中变得非常不现实, 因为靠调节制造工艺等方法来调控蠕变, 其工艺过程繁复, 返工量大且随机性高, 难以实现, 甚至无法实现精确控制。近年来, 国外一些大

公司将数字补偿引入数字传感器中以实现蠕变控制, 取得了较好的效果。通过建立传感器蠕变的数学模型, 测试出传感器的常温蠕变, 计算并确定数学模型中的系数, 利用单片机计算蠕变补偿量并进行修正。笔者曾对这类数字补偿传感器作过很多测试, 发现这种补偿尚存在以下不足, 其一, 如果该传感器的蠕变温度性能好, 则补偿的效果不错; 若其高低温蠕变与常温蠕变不一样时, 而补偿的时候只按常温蠕变进行补偿, 则其高低温的蠕变性能反而不如不补偿。其二, 数学模型中蠕变是一个指数函数, 计算量大, 占用单片机资源太多, 从而影响传感器动态响应。其三, 在实际的生产中每个传感器都要进行半小时的蠕变测试, 尤其是传感器容量比较大的情况下, 测试成本太高。基于以上分析, 本人提出一种新的模糊蠕变补偿方法, 可实现动态蠕变实时补偿, 实验表明, 该方法是一种提高传感器精度的有效方法。

## 1 传感器的蠕变特性

称重传感器的蠕变特性曲线如图1所示<sup>[2]</sup>, 其中曲线 $L$ 为传感器的加载特性曲线, 曲线 $C$ 为传感器的卸载特性曲线。从中可以看出, 传感器的加载曲线由加载段 $L_0$ 和蠕变段 $L_1$ 组成。在加载段 $L_0$ , 传感器的输出急剧增加, 迅速达到载荷的真实值 $W_0$ 。在这个时间段, 由于时间极短, 传感器产生的蠕变较小; 进入 $L_1$ 段后, 传感器输出发生缓慢的增加并逐渐趋近不变, 这就是传感器的蠕变; 在传感器的卸载曲线 $C$ 上, 传感器的输出值以极高的速度迅速衰减到卸载曲线的 $N$ 点, 超过 $N$ 点, 传感器输出缓慢回零, 为蠕变恢复。

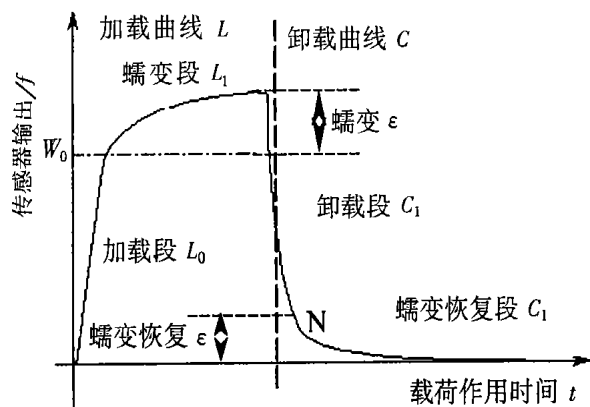


图1 传感器的蠕变特性曲线

图1描述了传感器蠕变特性曲线。实际应用过

程中, 这样的加载情况是很少存在的, 往往是要经过加/卸载的多次循环, 如图2、3、4所示。

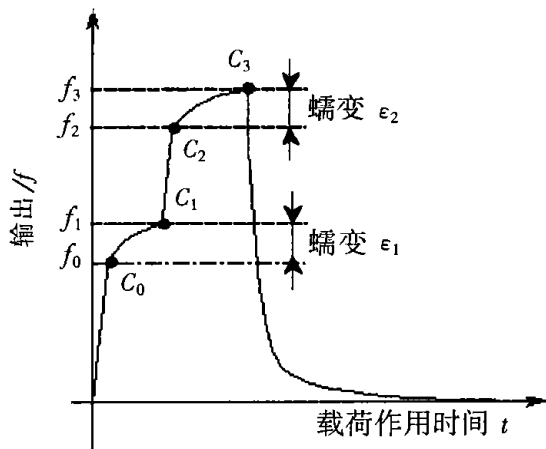


图2 传感器多次加载时的蠕变特性

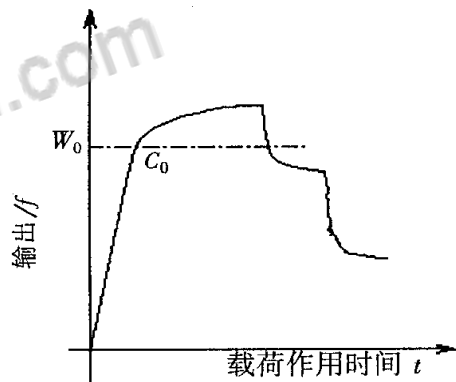


图3 加载后不完全卸载的蠕变特性

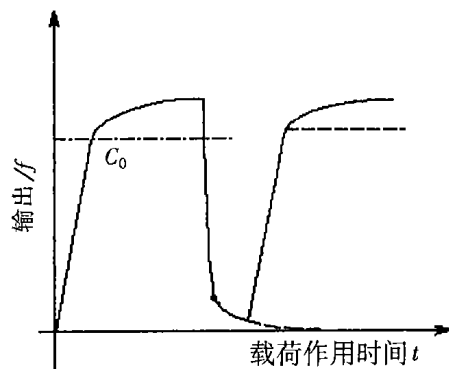


图4 含加/卸载循环时的蠕变特性

## 2 补偿原理

分析上述图1~4, 不难发现对传感器的每一个加/卸载过程, 都可以划分为两个区, 即传感器输出

的剧烈变化区与缓慢变化区。实际上传感器输出的剧烈变化区就是计量过程中传感器的加卸/载段,而传感器输出的缓慢变化区实际上是传感器的蠕变段。

在测量过程中如果传感器的加/卸载段时间很短,可以认为传感器加/卸载段的蠕变为“0”,其输出变化量就是加在传感器上载荷的变化量,即加载段末端传感器的输出为传感器上的实际载荷。下面以图2为研究对象,具体介绍传感器的蠕变补偿原理。

## 2.1 传感器工作过程分析

任取图2上一点 $C$ ,当 $C$ 点落在图2上 $C_0$ 左侧时,传感器处于初始载荷与初始蠕变均为“0”的加载段, $C$ 点的传感器载荷 $W_c$ 即是传感器在 $C$ 点的输出 $f_c$ 。随着时间的增加, $C$ 点逐渐向 $C_0$ 点靠近。当 $C$ 点到达 $C_0$ 点,传感器到达加载曲线的终点,输出 $f_0$ 为传感器实际载荷 $W_0$ ,接着开始发生蠕变;当 $C$ 点超过 $C_0$ ,传感器实际载荷不变,仍为 $W_0$ ,然而输出继续发生变化,只是变化速度大为减小,传感器产生蠕变 $\epsilon$ 。随着时间的增加, $C$ 点到达 $C_1$ 点, $\epsilon$ 也达到 $\epsilon_1$ ,此时传感器实际载荷保持为 $W_0$ ;  $C$ 点超过 $C_1$ ,传感器进入二次加载阶段。此时,初始加载条件为:传感器初始载荷 $W_0$ ,初始蠕变 $\epsilon_1$ 。传感器在该段的蠕变保持不变,实际载荷与可用下式进行计算:

$$W_c = W_0 + \Delta W = W_0 + \Delta f = W_0 + (f_c - f_1) \\ = f_c - (f_1 - W_0) = f_c - \epsilon_1 \quad (1)$$

其中:

$W_c$  为传感器在 $C$ 点的实际载荷;

$\Delta W$  为传感器在 $C$ 点载荷相对于 $C_1$ 点的载荷变化;

$\Delta f$  为传感器在 $C$ 点输出相对于 $C_1$ 点的输出变化,如在传感器加/卸载段上, $\Delta W = \Delta f$ ;

$f_1$  为传感器在 $C_1$ 点的输出,实际上它是传感器初始载荷 $W_0$ 与初始蠕变 $\epsilon_1$ 的和;

$f_c$  为传感器在 $C$ 点的输出

当图2中的任一点 $C$ 到 $C_2$ 时,传感器二次加载段结束,开始二次蠕变。 $C$ 点越过 $C_2$ ,传感器进入二次蠕变段。与上一个蠕变段相同,实际载荷保持不变,蠕变可用下式计算:

$$\epsilon_c = \epsilon_1 + \Delta f = \epsilon_1 + (f_c - f_2) \quad (2)$$

其中: $\epsilon_c$  为传感器在 $C$ 点的蠕变;

$\Delta f$  为传感器在 $C$ 点输出相对于 $C_2$ 点的输出变化;

$f_2$  为传感器在 $C_2$ 点的输出;

$f_c$  为传感器在 $C$ 点的输出

将上述过程应用于图3、4的分析,可得到相类似的结论。即在图2、3、4的第一个加载段,结论相同,在图2、3、4的第二个加/卸载段,传感器的蠕变与载荷计算公式相同,所不同的只是加载时 $\Delta W > 0$ ,卸载时 $\Delta W < 0$ 。

## 2.2 蠕变补偿原理

分析上面由图2第二次加载得到的公式(1)与公式(2),可以看出其对第一次加载即:对 $W_0 = 0$ ,  $\epsilon = 0$ 时的加/卸载曲线,曲线的加/卸载段上任一点 $C$ 的传感器载荷 $W_c$ 和蠕变段上任一点 $C$ 的传感器载荷 $\epsilon_c$ :

$$W_c = W_0 + \Delta W = \Delta W = \Delta f = f_c$$

$$\epsilon_c = \epsilon_0 + \Delta f = \Delta f = f_c - W$$

其中:

$f_c$  为传感器在 $C$ 点的输出,  $\Delta W$  为本次加/卸载曲线的实际载荷。其结果与前面2.1中分析的结果一样,由此可以看出公式(1)与公式(2)也适合于 $C_0$ 点的计算,这说明公式(1)与公式(2)具有通用性。

将公式(1)与公式(2)推广到传感器的整个工作过程,可得到传感器蠕变特性上任一点传感器实际载荷与蠕变的计算方法如下:

对传感器加/卸载曲线上任一点 $C$ ,假定其当前工作段的初始载荷与初始蠕变分别为 $W_0$ 与 $\epsilon_0$ ,

1) 位于加/卸载段时,其载荷 $W_c$ 与蠕变 $\epsilon_c$ 为:

$$W_c = f_c - \epsilon_0 \quad (3)$$

$$\epsilon_c = \epsilon_0$$

2) 位于蠕变段时,其载荷 $W_c$ 与蠕变 $\epsilon_c$ 为:

$$W_c = W_0 \quad (4)$$

$$\epsilon_c = f_c - W_0$$

其中: $f_c$  为传感器在 $C$ 点的输出

在上述公式中,要确定传感器蠕变特性曲线上一点 $C$ 的载荷与蠕变,就必须确定 $C$ 点的传感器输出状况,为此,考察图1、2、3、4中的加载段的终点 $C_0$ ,可以看出围绕 $C_0$ 传感器蠕变特性曲线的斜率发生了较为显著的变化,在 $C_0$ 点左侧,传感器蠕变特性曲线斜率的绝对值远远大于 $C_0$ 点右侧蠕变特性曲线的斜率。根据这一点可以方便的确定蠕变的起始点,从而确定当前载荷 $W$ 。

### 3 蠕变的模糊补偿方法

以上介绍了称重传感器蠕变的补偿原理。已知当前加载段的传感器载荷初值 $w_0$ 与初始蠕变 $\epsilon_0$ 时, 利用上述原理, 根据传感器输出的变化状况可以方便的确定当前加/卸载段载荷变化 $\Delta w$ , 从而确定传感器实际载荷 $w$ 。这里涉及到一个载荷剧烈变化的概念, 在实际应用中, 很难用一个明确的定义界定所谓的“剧烈变化”。为此, 本文引入模糊识别的方法来确定载荷的变化状况。

#### 3.1 模糊识别原则

目前, 模糊识别主要有两种方法: 最大隶属原则与择近原则。最大隶属原则主要用于个体的识别, 而择近原则则是用于群体模型的判别。根据具体情况, 本文采用最大隶属原则来辨识蠕变的起始点。根据最大隶属原则<sup>[3, 4]</sup>:

设 $A_i \in F(U) \quad i=1, 2, \dots, n$ , 对 $u \in U$ , 若存在 $i$ 使 $A_i(u_0) = \max\{A_1(u_0), A_2(u_0), \dots, A_n(u_0)\}$

则认为 $u_0$ 相对的属于 $A_i$

#### 3.2 传感器载荷变化状况的辨识

这里设 $f_0$ 为前一时间段传感器的输出,  $f_t$ 为当前时刻传感器的输出, 则传感器当前的输出变化量 $\Delta f$ 为:

$$\Delta f = f_t - f_0$$

其对传感器输出的相对变化量 $\eta$ 为:

$$\eta = \frac{\Delta f}{f_t}$$

从简化算法的角度出发, 本文采用传感器的相对输出变化量代替传感器的输出相对变化率, 以考察传感器输出变化的剧烈程度。

取采样时间段(或采样时间段的整数倍)内传感器的相对输出变化量 $\eta$ 为论域 $U$ ,  $A_1, A_2$ 分别为 $U$ 上的模糊集<剧烈变化> <缓慢变化>, 经行业内随机抽样调查, 其隶属函数可分别表示为:

$$A_1(\eta) = \begin{cases} 0 & \eta < 10 \\ \frac{\eta - 10}{90} & 10 \leq \eta \leq 100 \\ 1 & \eta > 100 \end{cases} \quad (5)$$

$$A_2(\eta) = \begin{cases} 1 & \eta < 10 \\ \frac{100 - \eta}{90} & 10 \leq \eta \leq 100 \\ 0 & \eta > 100 \end{cases}$$

这里,  $\eta$ 的单位为 $1/100\ 000$ 。实际计量中, 传感器利用上面各处的隶属函数分别计算某个时间段上的一点对上述两个模糊集的隶属度, 判断该点的载荷状况, 根据载荷状况的不同选用公式(3)或(4)计算该处的实际载荷与蠕变。

#### 3.3 传感器蠕变模糊补偿方法的实现

采用上述的补偿方法, 这里以图2所示的正蠕变曲线为例说明传感器蠕变的模糊补偿过程。在图2所示的加载过程中, 在 $C_0$ 左侧段, 传感器从“0”载荷“0”蠕变处开始工作, 首先经过输出急剧变化的加载段, 而后进入蠕变段, 传感器输出缓慢增大。在这一段, 传感器系统的计算机以一定的速度读取传感器输出, 计算输出变化, 求取当前的时间点对模糊集<剧烈变化>与<缓慢变化>的隶属度 $A_1(\eta)$ 和 $A_2(\eta)$ , 并比较二者大小, 而后将传感器当前的输出存储。当 $A_1(\eta) < A_2(\eta)$ 的第一个时刻 $t$ 上, 传感器认为上一时刻即为传感器的蠕变点, 将上一时刻传感器的输出减去存储器中存储的蠕变量得到传感器所承受的实际载荷。然后, 传感器将这一数值作为下一加/卸载段的初始载荷 $w_0$ 取代存储器中的 $w_0$ 旧值。进入蠕变段后, 传感器计算机继续读入传感器输出, 计算当前时刻对模糊集 $A_1$ 和 $A_2$ 的隶属度, 比较大小, 判别是否继续发生蠕变, 如是, 传感器系统计算机用传感器当前输出减去上述 $w_0$ 求传感器当前蠕变量 $\epsilon$ 并存入存储器, 代替旧蠕变值; 这样通过不断的对载荷状况的模糊识别, 对各过程内的初始载荷及蠕变值进行动态修整, 从而得到传感器的实际载荷。

上面详细介绍了称重传感器正蠕变的补偿方法, 需要明确的是, 对负蠕变, 上述方法同样适用, 只是蠕变 $\epsilon < 0$ 。

4 验证试验

采用上述的补偿方法对其进行了试验验证。

实验步骤: 对一个 30 kg 的传感器先加载 10 kg, 等 2 m in, 再加 10 kg, 等 2 m in, 卸载至零点, 等 2 m in, 再加载 30 kg, 等 5 m in。在刚加载完及下一次加载前分别读取传感器输出值。实验数据见表 1。

表 1 测试数据

实际重量/Kg		10		20		0		30	
时间/s		0	12	0	12	0	12	0	30
			0		0		0		0
补偿前	输出/kg	10 000 3	10 003 9	20 004 2	20 006 3	0 006	0 001 5	30 001 8	30 015 3
	误差(% F. S)	0 001	0 013	0 014	0 021	0 002 0	0 005	0 006	0 053
补偿后	输出/kg	10 000 3	10 000 3	20 000 9	20 000 9	0 000 6	0 000 6	30 001 5	30 001 2
	误差(% F. S)	0 001	0 001	0 003	0 003	0 002	0 002	0 005	0 005

5 结束语

蠕变补偿是目前绝大多数传感器生产厂家均未能采取的补偿方式, 一些国外公司进行蠕变补偿, 其采用建立数学模型而后根据数学模型进行数字补偿的方法。这种方法生产成本高, 运算量大且环境适应性不是很好。而以上介绍的称重传感器蠕变特性的模糊补偿方法, 通过对传感器工作状况及蠕变的分析, 利用称重传感器的蠕变特性曲线中其加/卸载变化斜率与蠕变变化的斜率不同, 用两种不同的隶属度函数对传感器的当前时刻的相对输出变化量进行计算, 并与动态的模糊识别方法相结合, 确定蠕变的起始点以及各过程的载荷状况, 通过动态的模糊识别, 根据载荷状况的不同, 利用初始蠕变值和初始载荷就能确定该过程的实际载荷或新的蠕变值, 因计算量小, 且计算简单, 不会影响传感器的动态响应性能。由于传感器能连续对不同过程中的蠕变量进行

动态的修正, 所以在测量过程中能实现对蠕变误差进行实时调控, 因此传感器能够进行高精度的蠕变补偿, 该补偿简单易行, 不必事先对传感器进行蠕变测试或调整制造工艺, 制造成本低, 易于计算机实现及批量生产。本方法由于不受传感器的载荷与温度等环境影响, 补偿精度高, 是称重传感器的蠕变误差补偿的一种全新的方法。

参 考 文 献

[1] 马良程 应变电测与传感技术[M] 北京: 中国计量出版社, 1993; 396-408

[2] 陶宝祺 电阻应变式传感器[M] 北京: 国防工业出版社, 1993; 9-64

[3] Mandni E H, Application of Fuzzy Algorithms for Control of Simple Dynamic Plant[J] Proc IEEE, 121 (1974); 12: 1585-1588

[4] Dubois D and Prade H. Fuzzy Sets and Systems: Theory and Applications[M] New York, 1980



知网查重限时 7折 最高可优惠 120元

本科定稿，硕博定稿，查重结果与学校一致

立即检测

免费论文查重: <http://www.paperyy.com>

3亿免费文献下载: <http://www.ixueshu.com>

超值论文自动降重: [http://www.paperyy.com/reduce\\_repetition](http://www.paperyy.com/reduce_repetition)

PPT免费模版下载: <http://ppt.ixueshu.com>

## 阅读此文的还阅读了:

1. [迟滞和蠕变补偿的F-P滤波器波长解调方法研究](#)
2. [三轴弱磁传感器误差补偿方法](#)
3. [称重传感器蠕变补偿的RBF网络模型](#)
4. [基于免疫RBF网络的轨道衡称重误差补偿方法研究](#)
5. [飞机称重的方法](#)
6. [基于称重传感器的木材蠕变仪的研制](#)
7. [基于BP神经网络的称重传感器蠕变补偿法](#)
8. [压电式动态称重传感器优化方法研究](#)
9. [一种气压传感器新型标定补偿方法](#)
10. [谈谈称重传感器的温度补偿](#)
11. [称重式降水传感器接入新型站方法研究](#)
12. [三轴弱磁传感器误差补偿方法](#)
13. [称重传感器受潮后的处理方法](#)
14. [压电式动态称重传感器优化方法研究](#)
15. [称重传感器的灵敏度温度补偿及其精调方法](#)
16. [模糊传感器概念生成方法的研究](#)
17. [浅谈称重传感器蠕变误差的影响因素及调整工艺](#)
18. [霍尔传感器温度补偿方法分析研究](#)
19. [实用的蠕变与滞后误差的补偿方法](#)
20. [称重系统角度自动补偿方法研究](#)
21. [基于称重传感器的钢管称重系统研究](#)
22. [称重式降水传感器接入新型站方法研究](#)
23. [Q值补偿方法研究](#)
24. [称重传感器的测试方法与误差计算](#)
25. [称重传感器的干扰来源及解决方法](#)

- [26. 称重传感器蠕变的评定与验证](#)
- [27. 称重传感器蠕变误差检测装置设计与研究](#)
- [28. 低成本称重传感器](#)
- [29. 称重传感器的一种新的滞后补偿方法](#)
- [30. 多通道称重传感器蠕变测试系统方案及应用](#)
- [31. 称重传感器的发展研究及误差浅析](#)
- [32. 称重传感器电路补偿机理及补偿电阻计算](#)
- [33. 基于模糊控制的动态称重系统的研究](#)
- [34. 配料秤称重准确度补偿算法研究](#)
- [35. 称重传感器蠕变的模糊补偿方法研究\(英文\)](#)
- [36. 称重传感器的选用原则](#)
- [37. 称重式降水传感器接入新型站方法研究](#)
- [38. 电容称重传感器的迟滞性补偿](#)
- [39. 称重传感器蠕变误差的神经网络补偿方法](#)
- [40. 基于FLANN的称重传感器动态补偿方法](#)
- [41. 压电式动态称重传感器优化方法研究](#)
- [42. 电阻应变式称重传感器蠕变补偿研究](#)
- [43. 称重传感器的蠕变模糊补偿方法](#)
- [44. 电容称重传感器](#)
- [45. 称重传感器蠕变补偿算法研究](#)
- [46. 基于模糊补偿的组合预测方法研究](#)
- [47. 称重传感器的联接形式](#)
- [48. 称重传感器——称重系统的核心](#)
- [49. 浅析称重传感器的温度自补偿](#)
- [50. 称重传感器蠕变的模糊补偿方法研究\(英文\)](#)