

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2514503

基于电涡流传感与峰值检测的补偿链在线测长方法*

邢 强¹, 宋 坤¹, 王泽斌¹, 张小萍¹, 王周义²

(1. 南通大学机械工程学院 南通 226019; 2. 南京航空航天大学深圳研究院 深圳 518000)

摘要:针对电梯补偿链定长生产过程中传统接触式测长方法测量时存在打滑导致精度不足,以及现有线链材料的非接触式测长方法因补偿链外部包塑层平整度与反射率低、特征少而难以适用等问题,研制了一种基于电涡流传感与峰值检测的补偿链在线测长装置。首先,根据补偿链链接结构得到长度公式并进行不确定度计算,分析了通过统计补偿链环个数进行间接测长的测量方法的可行性。其次,根据补偿链内部铁环的交叉链接的特性,利用当铁环移动经过电涡流位移传感器时与传感器探头间距离变化而形成类正弦信号的特点,建立信号中波峰数量与实际链环个数的对应关系。然后,构建了采集信号的一维卡尔曼滤波模型,并提出了基于滑动窗口的在线峰值检测算法,在有限硬件资源下实现了对链环信号中波峰数量的准确在线检测。最后,搭建补偿链测长装置,并利用双气缸压紧机构和滚轮传送装置等方式降低了机械振动对采集信号的干扰,实现了对多类型和尺寸补偿链的稳定测长。基于所研电梯补偿链在线测长装置开展实验,结果表明:在实际产线中,当链条以0.5~1.0 m/s的速度运行时,测长装置可适配多种类型和尺寸的补偿链的长度测量且最大相对误差不超过5‰,验证了测长方法的可行性以及装置具有良好的测量稳定性和准确性。

关键词: 峰值检测法; 非接触式测长; 嵌入式系统; 电梯补偿链

中图分类号: TP273 TH711 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510.40

Online length measurement method for compensation chains via eddy current sensing and peak detection

Xing Qiang¹, Song Kun¹, Wang Zebin¹, Zhang Xiaopin¹, Wang Zhouyi²

(1. School of Mechanical Engineering, Nantong University, Nantong 226019, China; 2. Shenzhen Research Institute, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Shenzhen 518000, China)

Abstract: Traditional contact-based length measurement methods for elevator compensation chains suffer from inaccuracies caused by slippage during fixed-length production. Furthermore, existing non-contact methods are unsuitable for these chains due to the low flatness, poor reflectivity, and lack of distinctive features on their plastic coating. To solve these problems, this study developed a non-contact online length measurement device for compensation chains based on eddy current sensing and a sliding-window peak detection algorithm. First, the length calculation formula was derived from the chain's link structure, and its measurement uncertainty was analyzed to confirm the feasibility of the indirect measurement method based on counting links. Second, based on the cross-linked structure of the internal iron rings, a quasi-sinusoidal signal is formed by the variation in distance between the iron rings and the sensor probe as the rings pass an eddy current displacement sensor. The correspondence was established between the number of peaks in this signal and the actual number of chain links. Third, a one-dimensional Kalman filter was used to process the acquired signal. An online peak detection algorithm based on a sliding window was proposed, which accurately identifies the number of peaks in real-time under limited hardware resources. Finally, the measurement device was constructed. It employs a dual-cylinder clamping mechanism and a roller conveyor to reduce the interference of mechanical vibration on the acquired signal, achieving stable length measurement for various types and sizes of compensation chains. Experiments conducted on an actual production line showed that when the chain speed is between 0.5 and 1.0 m/s, the device can measure different types and sizes of chains with a maximum relative error not exceeding 5‰. This result verifies the feasibility of the method and the good stability and accuracy of the device.

Keywords: peak detection method; non-contact length measurement; embedded system; elevator compensation

0 引言

电梯补偿链是一种在电焊锚链上包裹聚氯乙烯(polyvinyl chloride, PVC)或橡胶材料的链条^[1], 用于补偿高层电梯运行过程中轿厢侧或对重侧钢丝绳的重量^[2], 保证运行过程平稳安全, 常用的有包塑型和全塑型两种。电梯补偿链主要根据客户需求进行长度定制生产, 因此, 在连续生产环节中实现电梯补偿链的高精度测长裁剪, 既能满足客户需求, 又能降低成本, 对企业生产具有重要意义。

目前, 针对线型材料(如电缆、补偿链等)的长度测量有两类方法: 接触式测量法和非接触式测量法。接触式测量法通常通过机械传感器与物体表面直接或间接接触来获取长度数据, 而非接触式测量法则利用光学或电磁原理对物体进行测量。

在接触式测量方面, 通过机械装置接触被测物, 并借助编码器的脉冲信号进行测量, 具有结构简单、成本低等优点^[3], 例如, 轮式计米器和履带式计米器^[4]; 但这类计米器在测长过程中与补偿链之间易发生打滑, 易产生测量误差。为提高测量精度, 研究人员对这类计米器进行了改进, 如史先传等^[5]设计的用于电梯补偿链的履带式计米器, 装置采用编码器计米并结合PLC(programmable logic controller)控制机械补偿装置, 通过伺服电机调整主动轮输出转矩, 在测量过程中有效减少了补偿链与同步带之间相对滑动, 降低了误差, 但接触式测量法仍难以完全消除滑动误差。

非接触式测量法主要采用激光、视觉、时域脉冲等技术进行测长: 如黄琳瑾等^[6]设计了一种基于激光多普勒技术的地下管线类仪器线缆计米校准装置, 通过激光多普勒测速仪配合线缆稳定装置, 实现了对线缆长度的高精度测量, 相对误差<0.05%; 李森等^[7]使用ZLS-Pa传感器设计了非接触电缆长度测量系统, 该传感器内嵌高分辨率数字相机通过图像相位差分析和增量信号处理实现了在线电缆长度的实时测量, 测量误差<0.74%; 陈伟等^[8]设计了一种基于时域脉冲反射法并结合现场波速标定的高压电缆测长装置, 通过在电缆一端发射高频脉冲并测量末端反射信号的时间差来推算长度, 测量误差可保持在0.5%以内。这些研究拓展了非接触测量在线性材料中的应用。

因电梯补偿链表面不平整(包塑型补偿链)、反射率低、表面无明显特征(全塑型补偿链)等特点, 使得常见的非接触式测量方法不适用: 诸如, 基于多普勒原理的激光测长传感器在测量表面平整度低的包塑补偿链时难以获得稳定的反射信号; 基于视觉的测量方法需被测对象表面具有一定纹理或标记, 而全塑补偿链表面特征相似度极高, 会导致视觉检测特征匹配失效, 无法实现准确测

长; 基于时域脉冲反射的测长方法为离线处理方式不能满足在线检测需求。针对上述问题, 提出一种可适配多种类型和尺寸补偿链链环结构的电梯补偿链非接触式在线测长法。该方法基于电梯补偿链内部结构, 利用电涡流传感器获取反映补偿链链条轮廓特征的连续变化信号; 根据信号特征, 提出基于滑动窗口的在线峰值检测算法, 实现对应链环的峰值位置的在线检测; 同时设计补偿链压紧和导向的机构, 减少传送过程中的摆动, 保证测长过程的稳定; 最后, 利用实验测试分析测长系统精度与稳定性, 验证测长系统的可行性与有效性。

1 基本原理

1.1 电梯补偿链的长度计算原理与不确定度分析

要实现电梯补偿链的高精度测量, 则需要具备可靠的测量原理。电涡流法测量获取补偿链的连续长度属于间接测量, 最终通过公式转换得到长度; 因此, 需要对补偿链长度计算公式的间接测长原理进行不确定度分析。因电梯补偿链基本单元为链环, 且链环间呈显著的周期特性分布; 两种补偿链内部结构均为链环结构, 实物与内部结构示意如图1(a)和(b)所示, 尺寸分布如图1(c)所示。那么, 补偿链的总长度即可由链环的几何参数推算而得, 推导过程见下文。

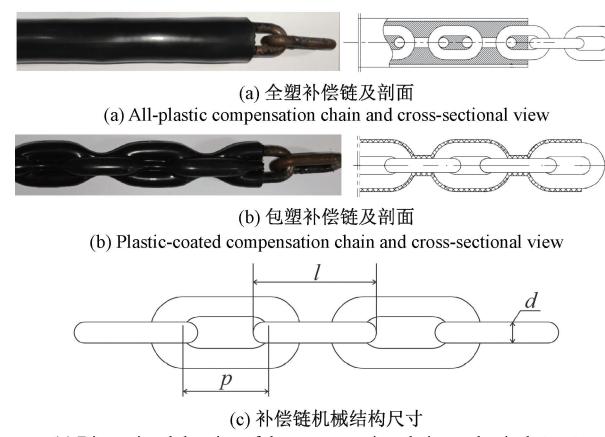


图 1 补偿链内部剖面结构及尺寸

Fig. 1 Internal structure and dimensions of compensation chain

设测量的补偿链总长度为 L , 单个补偿链链环的长度为 l , 直边直径为 d , 节距为 p , 其中 $l=p+2d$, 推导公式为:

$$L = Np + 2d \quad (1)$$

$$L = N(l - 2d) + 2d \quad (2)$$

式中: N 为补偿链的链环个数。

如式(2)所示, 理论上只需获得准确的 N 的个数即可得到准确的测长结果。

但链环在制造时都存在一定的误差,要验证通过统计链环数量进行补偿链计长这一方法的可行性,需对链长计算公式(2)中总测量值 L 进行不确定度分析。使用游标卡尺测量某补偿链中 60 组链环的长度和直径尺寸数据并处理得到表 1 中的结果。

表 1 补偿链链环长度 l 和直径 d 的数据统计分析结果

Table 1 Statistical analysis results of the length l and diameter d of compensation chain links

参数	样本均值 /mm	残差平方和 /mm ²	单次测量 标准差/mm	平均值的 标准差/mm
长度	56.60	9.5127	0.4015	0.0518
直径	9.71	3.4530	0.2419	0.0312

根据表 1 数据,参照测量不确定度表示指南(guide to the expression of uncertainty in measurement, GUM)^[9]进行不确定度评价。对于 l 和 d 引起的不确定度分量 u_1 和 u_2 采用 A 类评定方法,而游标卡尺示值误差引起的总长度 L 不确定度分量 u_3 采用 B 类评定方法。各不确定度分量计算如式(3)和(4)所示。

$$u_1 = \left| \frac{\partial L}{\partial l} \right| u_l = N u_l \quad (3)$$

$$u_2 = \left| \frac{\partial L}{\partial d} \right| u_d = 2(N-1) u_d \quad (4)$$

式中: u_l 为 l 的测量不确定度; u_d 为 d 的测量不确定度。根据 A 类评定方法,其测量不确定度等于平均值的标准差,即 $u_l = s_{\bar{l}} = 0.0518$, $u_d = s_{\bar{d}} = 0.0312$ 。

游标卡尺的示值误差为 ± 0.02 mm,取均匀分布,则其示值标准不确定为 $u_{\text{仪}} = 0.02/\sqrt{3} = 0.0115$ mm,由此对应于长度 l 和直径 d 测量的标准不确定度分量分别为:

$$u_{3l} = \left| \frac{\partial L}{\partial l} \right| u_{\text{仪}} = N u_{\text{仪}} \quad (5)$$

$$u_{3d} = \left| \frac{\partial L}{\partial d} \right| u_{\text{仪}} = 2(N-1) u_{\text{仪}} \quad (6)$$

则游标卡尺的示值引起的总长度不确定分量为:

$$u_3 = \sqrt{(u_{3l})^2 + (u_{3d})^2} \quad (7)$$

由于不确定分量 u_1 、 u_2 、 u_3 相互独立,即任意两个测量值不确定度系数为 0,即 $\rho_{ij} = 0$;那么,总长度的合成标准不确定度为:

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2} \quad (8)$$

则其自由度为:

$$v = \sum_{i=1}^3 \frac{u_i^4}{v_i} = \frac{u_c^4}{v_1} + \frac{u_1^4}{v_2} + \frac{u_2^4}{v_3} \quad (9)$$

式中: u_i 表示不确定度 u 对应的第 i 个分量; v_i 表示自由

度 v 对应的第 i 个分量;其中 $v_1 = v_2 = 60 - 1 = 59$, 取相对差 $\sigma_{u_3}/u_3 = 35\%$, σ_{u_3} 为评定 u_3 标准差, 则对应的自由度 $v_3 = 1/(2 \times 0.35^2) = 4$ 。

即可得到展伸不确定度为:

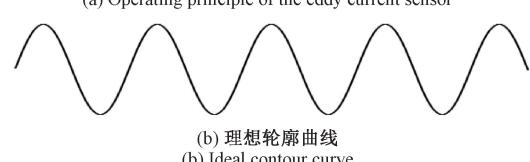
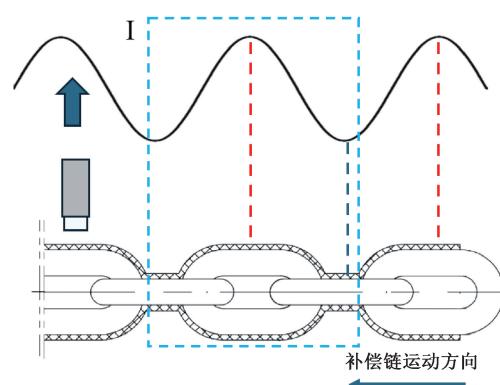
$$U = k u_c \quad (10)$$

式中: k 为包含因子,由自由度 v 与包含概率即置信概率 P 确定。根据式(9)可知, v 的等式结果中含有变量 N , 而实际测量时链环个数 N 的值一定 > 3 , 则当 $N \in [3, +\infty)$ 且 N 为整数时, $v_{\min} = 112.777$, $v_{\max} = 118.09$, 取置信概率 $P = 95\%$, 查 t 分布的 $t_p(v)$ 表得: $t_{0.95}(v) = 1.98$, v 为 112~118 之间的任意整数, 则包含因子 $k = 1.98$ 。

根据上述推导,可得展伸不确定度与链环个数 N 、链环长度 l 和直径 d 相关。依据 GUM 框架评定, 在 $k = 1.98$ 下展伸不确定度 U , 对测量结果有 $|L_b - L| \leq U$, 则测量结果与参考值相容, 利用式(2)进行补偿链长度测量具有可行性^[10]。

1.2 基于电涡流传感的电梯补偿链链环信号特征分析

当补偿链被拖动经过电涡流位移传感器时,传感器探头的高频交变磁场使铁环表面感生涡流,涡流的反作用磁场会改变探头线圈的等效阻抗^[11],该阻抗变化与探头到铁环之间的距离呈线性比例,经电路转换为电压信号,该电压信号的采样示意如图 2(a)所示。以图 2(a)中 I 区域(即虚线方框框选的区域)为例,传感器探头距离铁环越近,电压信号就越高,反之则越低。由于补偿链为横竖链环交叉链接的规律性组合,距离传感器探头的位置呈周期性变化,在检测过程中产生类正弦分布的信号,具体如图 2(b)所示。又因为传感器的测量输出存在线性区,所以测量范围超过线性区时就会出现部分信号饱和的现象,如图 2(c)和(d)所示。



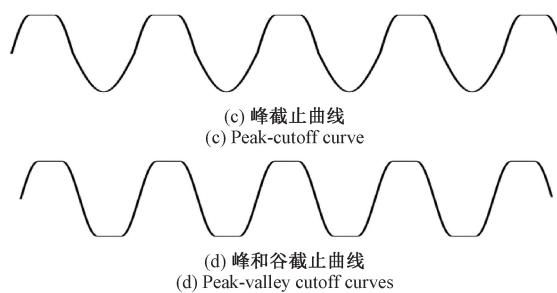


图 2 补偿链轮廓信号示意图

Fig. 2 Diagram of compensation chain contour signals

在实际信号采集过程中,设备运行及补偿链的晃动,都会引入噪声,实际采样结果如图 3 所示,这给后续的信号处理带来了困难。为获得更平滑、准确的补偿链特征信号,需对原始信号进行滤波处理,以降低干扰影响。经分析链环个数与轮廓信号中峰值个数有对应关系,当链环个数为 N 时, $N/2$ 是轮廓信号中峰值的个数,再通过式(2)计算得到总长度。由图 3 可知,采集信号中存在饱和现象以及大量噪声,不同类型和尺寸的补偿链轮廓信号的峰值间隔也有所不同,因此若简单设置阈值直接计数,将带来较大的不确定性,而最优方案是基于波峰数量统计链环个数。

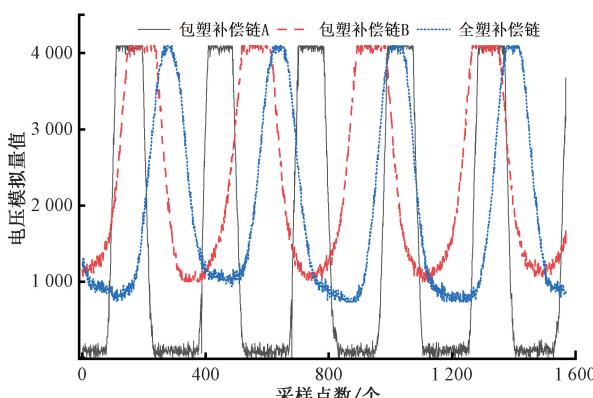


图 3 补偿链轮廓信号采样结果

Fig. 3 Sampling results of the compensation chain's contour signals

1.3 基于滑动窗口的在线峰值检测算法

波峰数量统计的关键就是峰值检测,峰值检测是一种在信号处理领域中常见的技术,其核心目标是从复杂的信号中准确识别出峰值^[12]。常见峰值检测算法有窗口检测法和阈值检测法^[13]、小波变换法^[14]、自动多尺度峰值查找法 (automatic multiscale-based peak detection, AMPD)^[15]、人工神经网络^[16]等。其中,窗口检测法和阈值检测法应用较广泛,其他算法由于时间或者算法复杂度高,占用计算资源较多,不易满足嵌入式系统检测的实时性需求。

峰值检测的准确性与信号的平滑度密切相关^[17],如果原始信号包含过多噪声,可能导致上升段或下降段的识别错误,从而忽略峰值位置的检测。因此,在峰值检测前,需要对信号进行预处理,以减少噪声干扰。由于信号中噪声较为单一,可采用时域滤波方法对原始信号进行处理。传统的滑动平均滤波法和中值滤波法在一定程度上能够抑制随机噪声,但依赖固定窗口,易带来时间延迟^[18],且窗口过小难以有效去噪,窗口过大则可能丢失信号特征,在资源受限的嵌入式系统中增加运算负担。为保证有限硬件资源下滤波处理的实时性,选用计算量小、实时性强的卡尔曼滤波^[19],实现更高效、稳定的信号滤波。

卡尔曼滤波算法是以最小均方根误差为最佳估计准则^[20],通过动态调整过程噪声协方差 \mathbf{Q} 和测量噪声协方差 \mathbf{R} ,适应不同程度的噪声干扰,实现高精度的信号实时优化,其标准滤波算法方程如式(11)所示。

$$\begin{cases} \hat{x}_k^- = \hat{A}\hat{x}_{k-1} + \mathbf{B}u_{k-1} \\ \mathbf{P}_k^- = \mathbf{A}\mathbf{P}_{k-1}\mathbf{A}^T + \mathbf{Q} \\ \mathbf{K}_k = \mathbf{P}_k^- \mathbf{H}^T (\mathbf{H}\mathbf{P}_k^- \mathbf{H}^T + \mathbf{R})^{-1} \\ \hat{x}_k = \hat{x}_k^- + \mathbf{K}_k(\mathbf{Z}_k - \mathbf{H}\hat{x}_k^-) \\ \mathbf{P}_k = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{H})\mathbf{P}_k^- \end{cases} \quad (11)$$

式中: \hat{x}_k^- 表示 k 时刻的先验状态估计值; \hat{x}_k 表示 k 时刻的后验状态估计值; u_{k-1} 表示控制输入; \mathbf{P}_k 表示 k 时刻的后验协方差; \mathbf{P}_k^- 表示 k 时刻的先验协方差; \mathbf{H} 表示为状态变量到观测的转换矩阵; \mathbf{Z}_k 表示观测值; \mathbf{K}_k 表示卡尔曼增益; \mathbf{A} 表示状态转移矩阵; \mathbf{B} 表示将输入转换为状态的矩阵; \mathbf{Q} 表示过程激励噪声协方差; \mathbf{R} 表示测量噪声协方差。

由于采集的模拟量信号是电涡流位移传感器输出的一维信号,根据卡尔曼滤波一维信号的特征,构建补偿链信号的状态方程与测量方程,其中观测方程表达式为:

$$\mathbf{M}_k = \mathbf{x}_k + v_k \quad (12)$$

式中: \mathbf{M}_k 表示第 k 时刻的观测值,即单片机采集到的含噪声的补偿链长度特征号; \mathbf{x}_k 表示第 k 时刻的状态变量,即传感器 k 时刻采集的补偿链长度特征理想信号; v_k 表示测量噪声,是服从零均值、协方差为 \mathbf{R} 的高斯白噪声。

基于上述标准卡尔曼算法方程组,并结合一维系统,令方程组中参数 $\mathbf{A}=1$, $\mathbf{B}=0$, $\mathbf{H}=1$,得到系统的状态方程和观测方程,如式(13)所示。

$$\begin{cases} \mathbf{x}_k = \mathbf{x}_{k-1} \\ \mathbf{M}_k = \mathbf{x}_k + v_k \end{cases} \quad (13)$$

针对一维系统状态变量 x ,其预测阶段的更新过程如式(14)和(15)所示。

$$\hat{x}_k^- = \hat{x}_{k-1} \quad (14)$$

$$\mathbf{P}_k^- = \mathbf{P}_{k-1}^- + \mathbf{Q} \quad (15)$$

式中:过程激励噪声协方差 \mathbf{Q} 取值为 0.1。

校正阶段的更新过程如式(16)~(18)所示。

$$\mathbf{K}_k = \mathbf{P}_k^- / (\mathbf{P}_k^- + \mathbf{R}) \quad (16)$$

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + \mathbf{K}_k (M_k - \hat{x}_k^-) \quad (17)$$

$$\mathbf{P}_k = (1 - \mathbf{K}_k) \mathbf{P}_k^- \quad (18)$$

式中:测量噪声协方差 \mathbf{R} 的取值为 0.5。

每次根据更新后的 k 时刻的传感器输出值 \hat{x}_k ,再利用式(2)计算出 k 时刻单片机的采集值。

由以上的卡尔曼滤波算法可知,滤波方程递推公式的计算过程是一个连续的估计和修正过程^[21],其递推过程如图 4 所示。

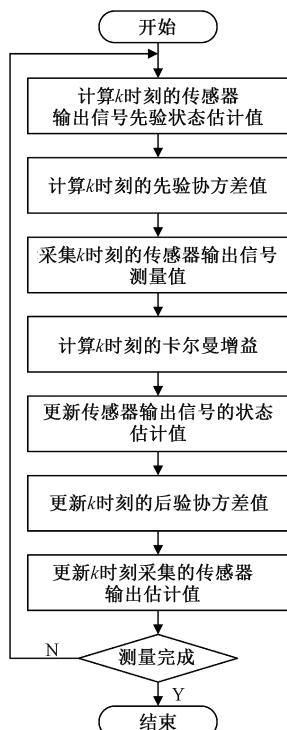


图 4 滤波计算过程

Fig. 4 Filtering computation process

基于一维卡尔曼滤波模型,提出了一种能满足补偿链测长系统实时性和宽适应性需求的峰值检测算法——基于滑动窗口的在线峰值检测算法,其方法流程如图 5 所示。

该方法的核心在于:通过滑动窗口实时判断信号的变化趋势,利用标志位更新检测趋势区间,并在上升和下降趋势间使用局部峰值法检测峰值,以此来统计波峰个数。大致步骤为:

1) 峰值检测信号经过滤波处理,设定一个滑动窗口 W ,长度为 I 且为奇数, $W = \{w_1, w_2, \dots, w_I\}$ 、趋势标志位 U_f 、连续上升次数 C_r 、连续下降次数 C_d 、连续上升或

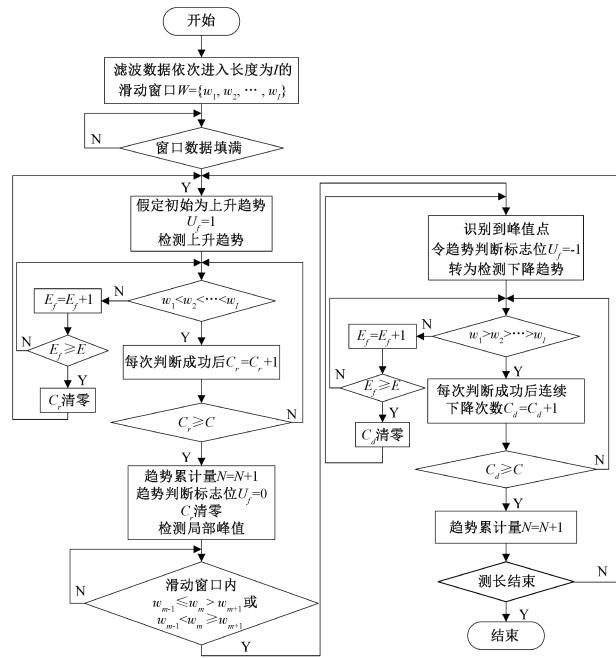


图 5 基于滑动窗口的峰值检测算法流程

Fig. 5 Flowchart of a sliding window-based peak detection algorithm

下降阈值 C 、错误趋势次数 E_c 、错误趋势次数阈值 E 和趋势累计量 N ,其中滑动窗口长度 I 、错误趋势次数 C_f 、错误趋势次数阈值 E 、连续上升或下降阈值 C 一般根据经验设置。

2) 经过滤波的数据在窗口中从 w_1 到 w_I 依次填充,接着遍历整个滑动窗口进行比较;若检测到滑动窗口中的数据处于上升波形段内,即满足 $w_1 < w_2 < \dots < w_I$,则 C_r 自增 1,不断重复检测直到 $C_r \geq C$,对 C_r 清零,趋势标志位 U_f 置零,趋势累计量 N 进行自加 1 操作;当 $C_r < C$ 时,若检测到窗口内数据不满足 $w_1 < w_2 < \dots < w_I$,则 E_c 自增 1,当 $E_c \geq E$ 时,则为趋势不明显,对 C_r 清零,重新检测直到 $C_r \geq C$ 。

3) 接着使用局部极值法检测峰值,由于检测的并非是严格意义上的峰值而是峰值部位的极值,因此只需满足 $w_{m-1} \leq w_m > w_{m+1}$ 或 $w_{m-1} < w_m \geq w_{m+1}$,就确定检测到峰值部位,其中 w_m 为滑动窗口中间的数,此时趋势标志位 U_f 置为 -1;

4) 开始检测下降趋势段,窗口滑动接收新数据并进行判断,在未检测到下降趋势段前,上升趋势标志位与趋势变化计数器的值保持不变;若检测到滑动窗口中的数据处于下降波形段内即满足 $w_1 > w_2 > \dots > w_I$,则 C_d 自增 1,不断重复检测直到 $C_d \geq C$,对 C_d 清零,则将趋势标志位 U_f 置位为 1,趋势变化计数器 N 进行自加 1 操作;当 $C_d < C$ 时,若检测到窗口内数据不满足 $w_1 > w_2 > \dots > w_I$,同样执行步骤 1)最后的处理过程直至满足 $C_d \geq C$;滑动窗口再

次更新数据，并准备进入下次上升趋势判断，如此循环运行，期间不断更新趋势累计量 N 的值。

2 实验装置与方法

2.1 在线非接触式测长系统设计

补偿链的非接触式在线测长系统设计需在复杂工业环境下兼顾测量精度、系统稳定性和多类型和尺寸适应性。系统整体架构主要由测长机械装置和嵌入式控制平台两部分组成，并以人机交互屏幕进行显示和控制。

测长机械装置包含直线位移传感器、二轴滑台、导向轮组、双气缸压紧机构、滚轮传送装置和支撑框架等关键部件，具体如图 6 所示。

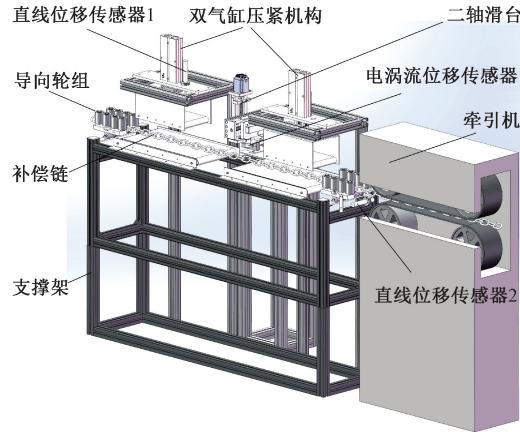


图 6 补偿链稳定装置结构

Fig. 6 Structure of the compensation chain stabilizing device

其中，直线位移传感器用于测量气缸下降高度及两侧导向轮组间距，间接确定电涡流位移传感器探头与补偿链的测量距离；二轴滑台为电涡流位移传感器提供水平方向与垂直方向的精准调节能力，以适应不同类型和尺寸的补偿链；导向轮组确保补偿链不偏离测量路径，双气缸压紧机构可在补偿链运行时施加压力，滚轮传送装置在底部提供支撑，有效避免因振动和晃动对测量过程造成干扰，确保测量对象的稳定性。在实际生产测长过程中，生产的补偿链由牵引机牵引，在生产过程中，补偿链经过测长装置，即可进行测长。

测长系统嵌入式控制平台如图 7 所示，以 STM32F407VET6 芯片为控制核心，配合多个功能接口模块实现测长系统的数据采集、实时控制与信息交互。其中，串口屏作为人机交互部分，提供实时测量结果显示、参数设置与滑台定位控制，便于用户快速准确地调整测量过程参数。测长模块用于实时采集补偿链环特征信号并处理，在测量长度达到设定值时控制声光报警灯工作；步进电机、闭环驱动器、限位开关和直线位移传感器

组成传感器定位模块，系统根据读取到的直线位移传感器数据，控制二轴滑台实现电涡流位移传感器的精准定位；气路控制模块则控制气缸的抬升与下压，该模块还接入了喷墨装置，用于在测量开始点及达到预定测量长度位置时，对补偿链进行实时喷墨标记，以精确指示裁剪位置，提升生产裁剪作业的准确性与效率。

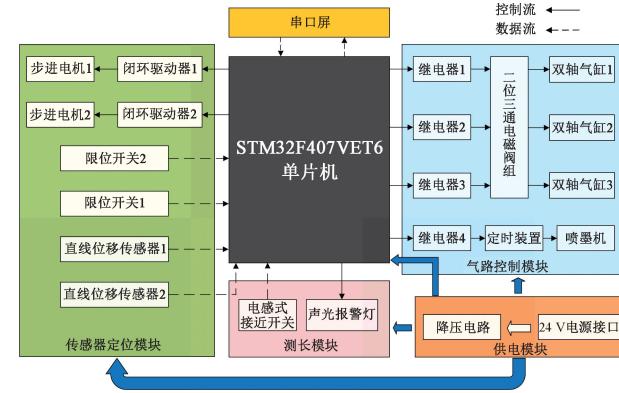


图 7 测长系统嵌入式控制框图

Fig. 7 Functional block diagram of the embedded control system for length measurement

2.2 系统控制流程

根据整体结构设计，提出并设计了软件总体控制流程，包括 3 个关键步骤：补偿链初始参数设定及类型与尺寸的选择、传感器定位及轮廓信号采集与处理，总体流程如图 8 所示。

具体过程为：

1) 系统启动，在串口屏中选择需要测量的补偿链的类型及尺寸，若数据库中无对应类型，则手动录入并保存。

2) 进入电机气缸控制界面，选择气缸下压和推出，系统控制双气缸压紧装置下压，气缸下方连接的环形传送带压紧补偿链，确保其能稳定运行，与气缸平行一侧安装的直线位移传感器 1 测量气缸的下降高度。同时，通过调节导向轮组之间的距离以适应不同规格的补偿链正常通过并正确导向。导向轮组之间同样安装了直线位移传感器，用来测量导向轮组之间的距离。系统通过读取气缸下降高度和导向轮组间距，经过系统处理，得到滑台需要移动的距离，将电涡流位移传感器移动到测量位置。

3) 设定测量长度后开始测长，电涡流位移传感器实时采集补偿链环轮廓特征信号，嵌入式系统对原始信号进行滤波去噪与特征识别处理。具体而言，首先通过卡尔曼滤波算法动态抑制外界干扰噪声，提升信号平滑性与稳定性；随后，利用所提出的基于滑动窗口的在线峰值检测算法，准确提取链环特征信号中的波峰数量，系统

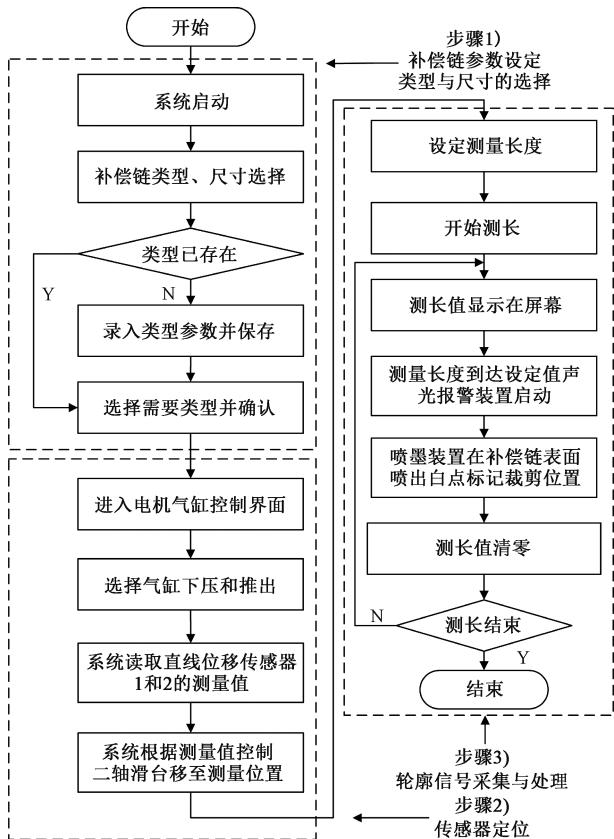


图 8 测长系统软件控制流程

Fig. 8 Adaptive control flow for multi-sensor length metrology

依据映射公式计算得到补偿链的实际长度；当系统检测到测量值到达设定值时，触发继电器，控制喷墨装置在补偿链表面喷出标记点，用来标明裁剪位置，系统将测长值清零并重新计长。

3 实验结果与分析

为验证测长装置功能的可行性，针对卡尔曼滤波算法的噪声抑制效果、峰值检测算法的准确性及测长系统测量精度等关键参数进行验证。实验中使用以 STM32F407VET6 为核心设计的工控板进行控制和数据处理，数据采样频率为 1 kHz，电梯补偿链牵拉的平均移动速度约为 0.5 m/s。

3.1 电涡流传感检测信号的卡尔曼滤波结果对比

为验证卡尔曼滤波的信号跟踪能力与噪声抑制效果，本实验采集了实际生产过程中两种不同类型补偿链的轮廓信号：分别为链环长度 52 mm、链环直径 15 mm 的包塑补偿链和链环长度 42.5 mm、链环直径 9 mm 的全塑补偿链。其中：设置中值滤波和滑动平均滤波窗口大小设置为 5，卡尔曼滤波参数中过程激励噪声协方差 Q 取值 0.1，测量噪声协方差 R 取值 0.5。滤

波结果如图 9(a) 和 (c) 所示，由图 9(b) 和 (d) 两幅细节放大图可知：针对同一补偿链的轮廓信号进行滤波时，相比于中值滤波和滑动平均滤波，卡尔曼滤波在信号噪声较强的峰/谷处仍可较好地跟踪信号并抑制噪声；针对不同类型的补偿链轮廓信号进行滤波时，卡尔曼滤波在信号各部位也能有较好的滤波表现；相较于对数据进行单点处理的卡尔曼滤波，中值滤波与滑动平均滤波的结果出现了明显的相位滞后，不利于后续的峰值检测，也不满足系统高实时性的需求。因此卡尔曼滤波法能够在设计的嵌入式系统实现对在线轮廓信号的跟踪和噪声抑制。

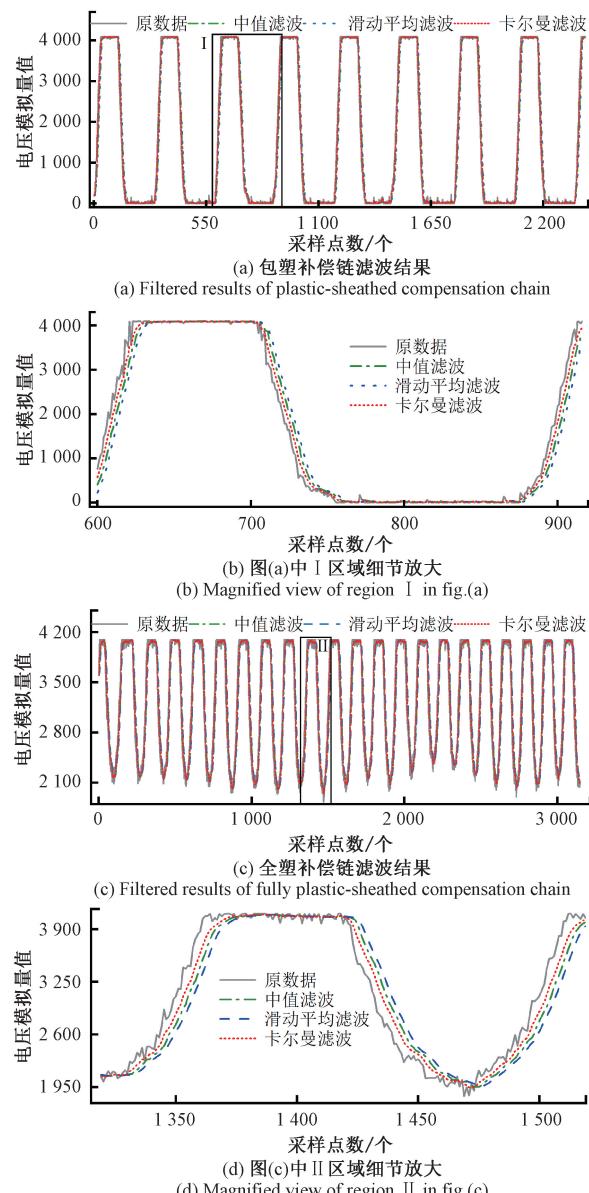


图 9 滤波结果对比

Fig. 9 Comparison of filtering results

3.2 峰值检测结果与分析

为验证基于滑动窗口的峰值检测算法的准确性,实验采集大量数据进行处理,并通过实际趋势段数量与算法识别趋势段数量进行对比验证算法的准确性,如图 10 和 11 所示,其中短点线为识别上升趋势段,圆点标记是峰值点,点划线则为识别到的下降趋势段。最终结果为图 10 检测出上升趋势段 309 个、峰值点数 308 个和下降趋势段 308 个,图 11 检测出上升趋势段 133 个、峰值点数 133 个和下降趋势段 132 个,检测结果与实际一致。如图 10(b)~(d) 和图 11(b)~(d) 的细节放大所示,即使在滤波后信号中仍存在着局部噪声,但峰值检测算法依然可以识别出补偿轮廓中趋势段与峰值位置。实验结果表明,在两种不同类型补偿链轮廓信号下,一种较为稳定,另一种波形峰峰值存在较大波动,检测结果依然准确,体现了该算法具有较高的检测准确性和较强的抗干扰能力。

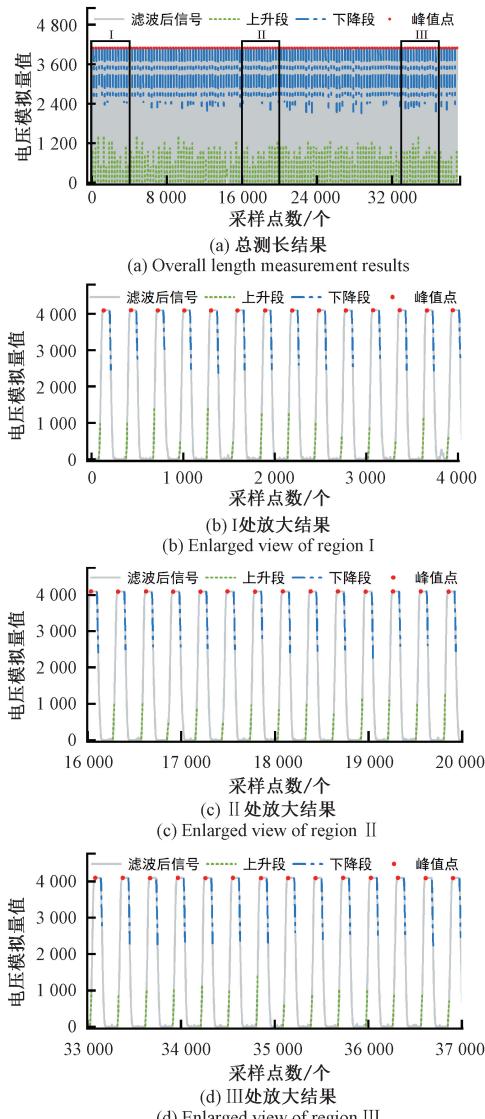


图 10 包塑型补偿链峰值检测结果

Fig. 10 Peak detection results for plastic-coated compensation chain

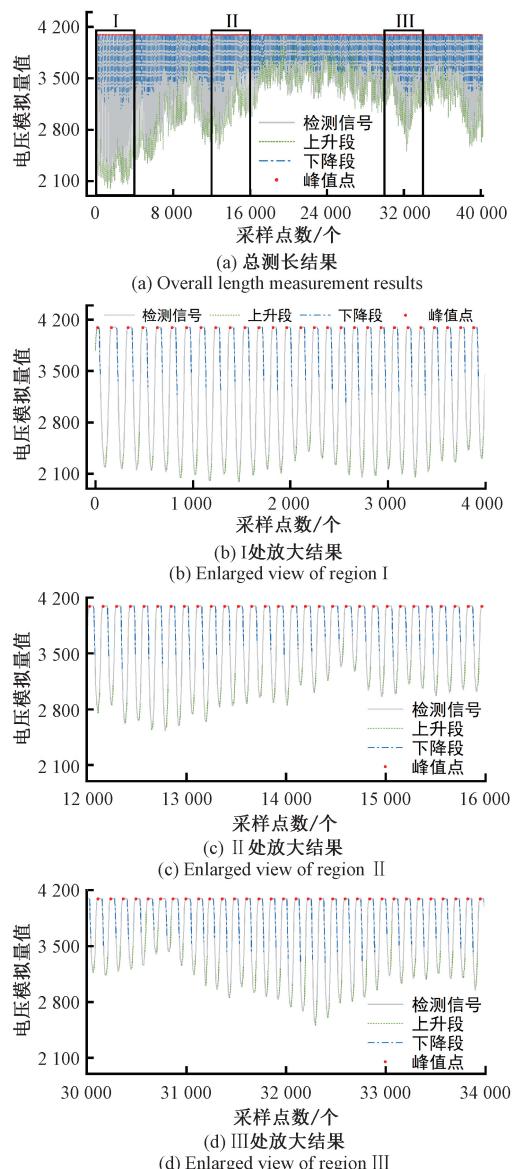


图 11 全塑型补偿链峰值检测结果

Fig. 11 Peak detection results for all-plastic compensation chain

3.3 补偿链测长结果对比与分析

为验证整个补偿链测长系统的测量精度,将设计的测长装置布置于实际生产线上,并与现有的计米轮测长方式进行对比。在牵引机拖动补偿链以 0.5 m/s 的速度移动的条件下对多个类型和尺寸的补偿链进行多个长度的测量对比,验证了测长系统适应性。所测包塑型补偿链包括 A 型(链环长度 52 mm, 链环直径 15 mm)与 B 型(链环长 39 mm, 链环直径 5 mm)。全塑补偿链包括 C 型(链环长度 42.5 mm, 链环直径 9 mm)与 D 型(链环长度 30.2 mm, 链环直径 12 mm)。具体类型、尺寸、长度以及测量结果如表 2 所示。在 0.5、0.6、0.8、1.0 m/s 这 4 个不同速度下,对两种类型下相同尺寸的补偿链进行测量

对比,验证了测长系统的速度适应性,测量结果的误差与误差标准差如表 3 所示。

表 2 不同装置测长结果
Table 2 Measurement results of different devices

型号	实际长度/m	原装置测量均值/m	原装置相对测量误差/%	原装置相对误差标准差/%	设计装置测量均值/m	设计装置相对测量误差/%	设计装置相对误差标准差/%
A	20.9	20.81	4.31	0.38	20.95	2.39	0.19
	52.1	51.39	13.63	0.60	52.21	2.11	0.14
	116.5	112.20	36.74	1.09	116.93	3.69	0.20
B	15.4	15.33	4.55	0.44	15.43	1.95	0.13
	49.9	49.30	12.02	0.75	50.02	2.40	0.11
	65.2	63.87	20.40	0.82	65.40	3.07	0.14
C	19.5	19.42	4.10	0.42	19.54	2.05	0.16
	41.1	40.58	12.65	0.84	41.22	2.92	0.15
	88.9	86.60	25.87	1.21	89.25	3.26	0.13
D	21.2	21.09	5.19	0.31	21.26	2.83	0.14
	55.6	54.65	17.09	0.81	55.78	3.24	0.12
	98.4	96.07	23.68	1.30	98.81	4.17	0.16

表 3 不同速度下测长结果
Table 3 Measurement results at different speeds

型号	运行基本速度/(m·s ⁻¹)	实际长度/m	原装置测量均值/m	原装置相对测量误差/%	原装置相对误差标准差/%	设计装置测量均值/m	设计装置相对测量误差/%	设计装置相对误差标准差/%
A	0.5	20.9	20.81	4.31	0.227	20.98	3.83	0.169
	0.6	20.9	20.79	5.26	0.237	20.95	2.39	0.176
	0.8	20.9	20.75	7.18	0.246	20.96	2.87	0.112
	1.0	20.9	20.72	8.61	0.239	20.94	1.91	0.117
D	0.5	21.2	21.10	4.72	0.211	21.27	3.30	0.111
	0.6	21.2	21.06	6.60	0.284	21.28	3.77	0.160
	0.8	21.2	21.01	8.96	0.313	21.25	2.36	0.189
	1.0	21.2	20.93	12.74	0.325	21.29	4.25	0.181

同时根据式(10)计算了不同尺寸的补偿链总长度的扩展不确定度,补偿链长度对应的实际链环数与扩展不确定计算结果如表 4 所示,证明了测长原理的可行性。

实验测试结果表明:针对相同类型和尺寸的补偿链,本装置的测量误差和测量误差标准差均小于原有装置;在对多类型和尺寸补偿链测量时,本装置测量误差小和测量误差标准差更加稳定,具体见表 2。当补偿链在

0.5~1.0 m/s 速度范围拖动时,随补偿链的产线速度变快,原装置测量过程中因补偿链的结构特性出现打滑现象加剧,使得测量误差增大,测量稳定性降低;而本装置采用非接触式测量,在该速度变化范围内测量误差始终控制在 5% 以内并有较好的测量稳定性,结果见表 3。根据表 4 结果可知,本装置在实际测长过程中测量结果的相对误差在补偿链总长度的扩展不确定的误差范围内,因此通过统计链环个数的间接测长方式是可行的。

表 4 各类型和尺寸补偿链对应长度的不确定度分析结果

Table 4 Uncertainty analysis results for the lengths corresponding to various types and sizes of compensation chains

型号	实际长度/m	对应链环数/个	展伸不确定度/mm	相对伸展不确定度/%
A	20.9	949	150.761 4	7.213
	52.1	2 367	376.170 3	7.220
	116.5	5 295	841.061 2	7.224
B	15.4	531	84.315 1	5.475
	49.9	1 721	273.480 5	5.481
	65.2	2 248	357.253 8	5.479
C	19.5	796	126.440 1	6.484
	41.1	1 677	266.486 2	6.484
	88.9	3 628	576.622 2	6.486
D	21.2	954	151.556 2	7.149
	55.6	2 504	397.948 2	7.157
	98.4	4 432	704.428 1	7.159

综上:本装置具有测量精度和重复精度高、鲁棒性强等特点,能够适应多类型和尺寸的补偿链的测长。

4 结 论

本研究提出了一种基于电涡流传感与峰值检测的电梯补偿链在线测长方法,克服了传统接触式测长方法因打滑导致的精度不足问题,实现了对表面不平整、反射率低及特征相似度高的补偿链的稳定在线测长。

在系统实现方面,提出了基于滑动窗口的在线峰值检测算法并结合卡尔曼滤波对补偿链轮廓信号进行处理,有效抑制了噪声并实现了链环特征的准确识别;在机械结构上,设计了双气缸压紧与导向轮辅助机构,确保补偿链在传送过程中的稳定性;在硬件与软件设计方面,构建了嵌入式控制平台,实现了传感器定位、信号处理与人机交互等功能的整体集成。实验结果表明,该测长装置在约 0.5~1.0 m/s 的实际产线速度下,能够对多种类型与尺寸的补偿链测量实现稳定测长,测量的相对误差在 5% 以内,且误差不随测量长度增加而累积。与传统计米轮方式相比,本装置在测量精度与重复性上均表现出明显优势。

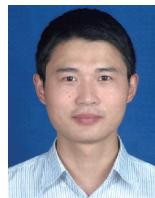
综上所述,所提出的非接触式在线测长系统有效解决了传统方法存在的滑动误差与现有非接触式测量方法存在的适应性不足的问题,满足了工业生产对高精度和高实时性的需求,并为电梯补偿链制造工艺的自动化升级提供了可行的方法。

参考文献

- [1] 刘立新,陈汉.论补偿装置在电梯系统中的重要性[J].中国电梯,2022,33(10):29-31.
- [2] LIU L X, CHEN H. On the importance of compensation device in elevator system [J]. China Elevator, 2022, 33(10): 29-31.
- [3] 王尚,史鹏博,孙南,等.浅析补偿链对电梯运行抖动的影响[J].特种设备安全技术,2022(5):38-40.
- [4] WANG SH, SHI P B, SUN N, et al. Analysis of the influence of compensation chain on elevator running jitter[J]. Safety Technology for Special Equipment, 2022(5): 38-40.
- [5] 范乃胤,尚银霞,李博.标准线缆计米器的研究[J].计量与测试技术,2020,47(4):6-8.
- [6] FAN N Y, SHANG Y X, LI B. Research on standard cable length meter[J]. Metrology & Measurement Technique, 2020, 47(4): 6-8.
- [7] 李凌梅,张欣,常颖,等.浅析线缆计米器的检定[J].国外电子测量技术,2020,39(6):144-147.
- [8] LI L M, ZHANG X, CHANG Y, et al. Analysis of verification for cable length meter[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2020, 39(6):144-147.
- [9] 史先传,陈炜俊,连赛,等.电梯补偿链自动化测长装置的设计[J].制造业自动化,2017,39(10):68-71.
- [10] SHI X CH, CHEN W J, LIAN S, et al. Design of automatic length measuring device for elevator compensation chain [J]. Manufacturing Automation, 2017, 39(10):68-71.
- [11] 黄琳瑾,戴双建,刘震.地下管线类仪器线缆计米功能校准装置的研制[J].农业装备与智能技术,2025(2):20-25.
- [12] HUANG L J, DAI SH J, LIU ZH. Development of a calibration device for cable length measurement function of underground pipeline instruments [J]. Agricultural Equipment and Intelligent Technology, 2025(2): 20-25.
- [13] 李森,冷小冰,鲍继强.基于 LabVIEW 非接触电缆长度测量系统设计[J].湖南师范大学自然科学学报,2011,34(5):37-40.
- [14] LI S, LENG X B, BAO J Q. Design of non-contact cable length measurement system based on LabVIEW [J]. Journal of Natural Science of Hunan Normal University, 2011, 34(5): 37-40.
- [15] 陈伟,王谦,吴高林,等.基于时域脉冲反射的高压电

- 力电缆测长技术研究[J]. 中国仪器仪表, 2020(8): 83-87.
- CHEN W, WANG Q, WU G L, et al. Research on length measurement technology of high-voltage power cable based on time-domain pulse reflection[J]. China Instrumentation, 2020(8):83-87.
- [9] 梅现均, 谭晏殊, 于海洋, 等. GUM法高效评定测量不确定度[J]. 中国测试, 2024, 50(S2):65-68, 108.
- MEI X J, TAN Y SH, YU H Y, et al. Efficient evaluation of measurement uncertainty using GUM method[J]. China Measurement & Test, 2024, 50(S2):65-68, 108.
- [10] CARULLO A, MANTA F, MUGNO R, et al. Fundamentals in measurement: The role of measurement uncertainty in conformity assessment: Some examples [J]. IEEE Instrumentation & Measurement Magazine, 2024, 27(4):5-12.
- [11] 瞿金晨, 郭赫男, 李杰, 等. 基于电涡流的多周期双极直线位移传感器[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(5): 260-266.
- QU J CH, GUO H N, LI J, et al. Multi-period bipolar linear displacement sensor based on eddy current [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(5): 260-266.
- [12] 徐帅, 杨晓芳, 毛雷, 等. 基于峰值检测的便携式钢筘测量仪研发[J]. 毛纺科技, 2025, 53(1):97-103.
- XU SH, YANG X F, MAO L, et al. Development of portable reed measuring instrument based on peak detection[J]. Wool Textile Journal, 2025, 53(1): 97-103.
- [13] 张康, 姜海明, 谢康. 基于多窗口识别的多波长光信号峰值实时检测系统[J]. 红外与激光工程, 2024, 53(5): 206-215.
- ZHANG K, JIANG H M, XIE K. Real-time peak detection system for multi-wavelength optical signals based on multi-window recognition [J]. Infrared and Laser Engineering, 2024, 53(5): 206-215.
- [14] CHIN C H, ABDULLAH S, ARIFFIN A K, et al. A review of the wavelet transform for durability and structural health monitoring in automotive applications[J]. Alexandria Engineering Journal, 2024, 99: 204-216.
- [15] CHEN J M, LIAO J J, WANG CH. Improved lake level estimation from radar altimeter using an automatic multiscale-based peak detection retracker [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2021, 14:1246-1259.
- [16] GABBOUJ M, KIRANYAZ S, MALIK J, et al. Robust peak detection for holter ECGs by self-organized operational neural networks [J]. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2022, 34(11): 9363-9374.
- [17] 刘宇, 李汪润, 陈燕萍. 基于自适应峰值检测的PDR算法研究[J]. 电子测量技术, 2023, 46(17): 37-42.
- LIU Y, LI W R, CHEN Y P. Research on PDR algorithm based on adaptive peak detection [J]. Electronic Measurement Technology, 2023, 46(17): 37-42.
- [18] 张博, 张杰, 骆伟, 等. 基于指针排序的快速中值滤波算法研究[J]. 机械制造与自动化, 2024, 53(2): 175-178, 242.
- ZHANG B, ZHANG J, LUO W, et al. Research on fast median filter algorithm based on pointer sorting [J]. Machinery Manufacturing & Automation, 2024, 53(2): 175-178, 242.
- [19] 刘浩, 魏立鑫, 尤立春. Kalman滤波算法在海洋钻机中控制信号的优化[J]. 电气传动, 2023, 53(11): 19-24, 30.
- LIU H, WEI L X, YOU L CH. Optimization of control signals in marine drilling rig using Kalman filtering algorithm[J]. Electric Drive, 2023, 53(11): 19- 24, 30.
- [20] KHODARAHMI M, MAIHAMI V. A review on Kalman filter models[J]. Archives of Computational Methods in Engineering, 2023, 30(1): 727-747.
- [21] 万俊豪, 左建勇, 丁景贤, 等. 基于新息自适应卡尔曼滤波地铁测速定位方法[J]. 仪器仪表学报, 2025, 46(1): 236-246.
- WAN J H, ZUO J Y, DING J X, et al. Metro speed measurement and positioning method based on innovation adaptive Kalman filter[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2025, 46(1): 236-246.

作者简介



邢强, 2007年于南京航空航天大学获得学士学位, 2010年于南京航空航天大学获得硕士学位, 2014年于南京航空航天大学获得博士学位。现为南通大学机械工程学院副教授。主要研究方向为仿生视觉感知与智能系统研究。

E-mail: meexq@ntu.edu.cn

Xing Qiang received his B. Sc. degree from Nanjing University of Aeronautics and Astronautics in 2007, received his M. Sc. degree from Nanjing University of Aeronautics and Astronautics in 2010, and his Ph. D. degree from Nanjing University of Aeronautics and Astronautics in 2014. He is currently an associate professor in the School of Mechanical Engineering at Nantong University. His main research interests include bionic visual perception and intelligent system research.



张小萍(通信作者),1995 年于南通纺织工学院获得学士学位,2022 年于南京理工大学获得硕士学位,现为南通大学教授,主要研究方向为数字化设计技术与应用。

E-mail:zhang_xp@ntu.edu.cn.

Zhang Xiaoping (Corresponding author) received her B. Sc. degree from Nantong Institute of Textile Technology in 1995, received her M. Sc. degree from Nanjing University of Science

and Technology in 2022. She is currently a professor in Nantong University. Her main research interests include digital design technology and applications.



王周义,2005 年于江南大学获得学士学位,2009 年于南京航空航天大学获得硕士学位,2015 年于南京航空航天大学获得博士学位,现为南京航空航天大学副研究员,主要研究方向为运动力学和仿生黏附。

E-mail:wzyxml@nuaa.edu.cn

Wang Zhouyi received his B. Sc. degree from Jiangnan University in 2005, received his M. Sc. degree from Nanjing University of Aeronautics and Astronautics in 2009, and his Ph. D. degree from Nanjing University of Aeronautics and Astronautics in 2015. He is currently an associate research fellow at Nanjing University of Aeronautics and Astronautics. His main research interests include motion mechanics and the bionic adhesion.