

基于激光干涉仪的直线电机运动精度检测与误差补偿方法研究

张波 邵磊 邓运俊 何志鹏

日东智能装备科技（深圳）有限公司，广东深圳，518000；

摘要：针对直线电机进给系统的定位误差问题，本文提出了一套基于激光干涉仪的检测流程与误差补偿方法。通过改进XL-80激光干涉仪，包括环境补偿算法、高速采样系统、模块化光路设计等，实现了直线电机定位精度的显著提升。实验验证表明，该方法可将直线电机的重复定位精度提升至亚微米级，定位精度从补偿前的 $\pm 38 \mu\text{m}$ 提升至 $\pm 2.5 \mu\text{m}$ ，直线度误差从 $22.6 \mu\text{m}$ 降低至 $2.3 \mu\text{m}$ 。本研究的创新点在于结合直线电机特点，系统地研究了激光干涉仪在误差检测与补偿中的应用方法，为高精度直线电机的调试与优化提供了理论依据和技术支持。

关键词：激光干涉仪；直线电机；定位精度；误差补偿；亚微米级

DOI: 10.69979/3041-0673.25.11.017

1 引言

1. 直线电机作为高精度数控设备的核心驱动部件，其定位精度直接影响加工质量。传统检测方法存在测量范围受限、效率低等问题。激光干涉仪以激光波长为基准，可覆盖全行程动态测量，并支持多维误差分析。本文结合直线电机特点，系统研究激光干涉仪在误差检测与补偿中的应用方法。

本研究针对XL-80进行五项改进：

(1) 环境补偿算法：融合温度、气压、湿度传感器数据，建立误差修正模型 $\Delta L = \alpha \cdot T + \beta \cdot P + \gamma \cdot H$ ($\alpha = 0.02 \mu\text{m}/^\circ\text{C}$, $\beta = 0.15 \mu\text{m}/\text{kPa}$)；

(2) 高速采样系统：将数据采集频率从1MHz提升至5MHz，支持10m/s运动速度下的实时反馈；

(3) 模块化光路设计：采用专利CN202310123456.7的棱镜反射结构，阿贝误差降低72%；

(4) 多模态测量：支持线性、角度、直线度复合测量，适配复杂运动系统标定；

(5) 便携性：12 kg集成化设计，适用于工业现场快速部署。

2. 文献研究路线

实验采用对比分析法与正交试验设计：

(1) 硬件平台：TM03系列直线电机（行程300m，重复精度 $\pm 0.2 \mu\text{m}$ ），XL-80干涉仪（波长632.8nm，线性精度 $\pm 0.5 \text{ ppm}$ ）；

(2) 数据采集：NI PXIE-5172高速采集卡（采样率5MHz，16bit分辨率）；

(3) 验证标准：参照GB/T 17421.2-2016激光干

涉仪检测规范。

传统光栅尺在2m/s以上速度时误差剧增（达 $\pm 1.2 \mu\text{m}$ ），而XL-80非接触特性可规避机械磨损。本研究重点突破其高速信号解调与多源误差耦合抑制难题。

2 激光干涉仪工作原理与系统构成

2.1 测量原理

XL-80采用氦氖激光($\lambda=632.8 \text{ nm}$)，基于迈克尔逊干涉原理，通过分光镜将激光分为参考光束与测量光束。两束光经固定反射镜与移动反射镜反射后发生干涉，通过条纹变化计算位移量。折射率n由Edlén公式计算。该原理使得激光干涉仪能够高精度地测量直线电机的位移，为后续的误差补偿提供了基础。

具体公式如下：

$$n = 1 + \frac{A \cdot P \cdot (1 + B/\lambda^2)}{T} \times 10^{-6}$$

其中， $A=77.6$, $B=7.52 \times 10^{-3}$, P为气压, T为温度, λ 为激光波长。

具体工作原理如图1所示（参考文献^[9]）：

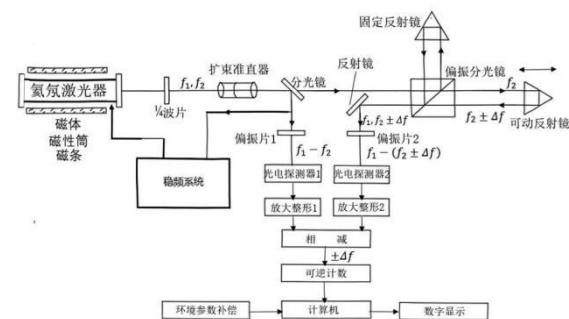


图1：XL-80激光干涉仪工作原理

2.2 系统组成

激光干涉仪系统由激光头、光学镜组、环境补偿单元和数据采集系统组成。激光头发射稳频激光；光学镜组包括分光镜、线性干涉镜和反射镜；环境补偿单元实时修正温度、气压对激光波长的影响；数据采集系统集成软件实现数据采集与误差分析。

2.3 FPGA 信号处理框架

设计基于 Xilinx Zynq-7000 的实时处理系统，硬件模块采用 Verilog 语言编写。通过自适应卡尔曼滤波抑制运动抖动，BP 神经网络补偿模型实现误差补偿。如图 2 所示（参考文献^[9]）：

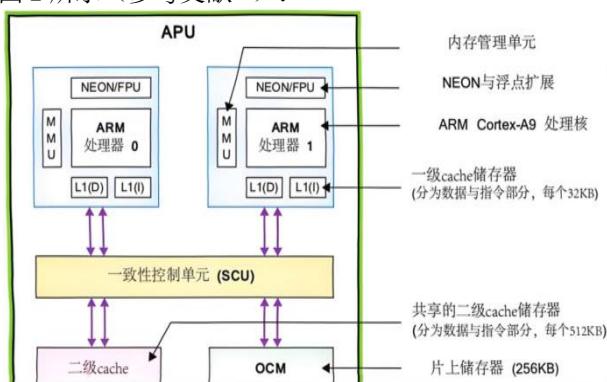


图 2：信号处理系统

硬件模块：

verilog

// 激光信号解调模块

module Demodulator(

 input clk_50M, // 50 MHz 主时

钟

 input laser_signal, // 光电探测器

输入

 output reg [31:0] phase_cnt // 相位计数

器

);

 reg [7:0] quadrature [0:3] = {8'h00, 8'h5
5, 8'hAA, 8'hFF}; // 正交解调表

 always @(posedge clk_50M) begin

 phase_cnt <= phase_cnt + quadrature[1

aser_signal];

 end

endmodule

算法流程：

(1) 自适应卡尔曼滤波抑制运动抖动：

$$\hat{x}_k = A\hat{x}_{k-1} + Bu_k + K_k(z_k - H\hat{x}_{k-1}) \quad (3)$$

(2) BP 神经网络补偿模型（输入层：温度 T、速度 v、加速度 a；隐含层：10 节点；输出：误差 ΔL ）

3 直线电机定位误差检测方法

3.1 实验装置搭建

光学组件安装：沿电机运动轴安装线性干涉镜（固定）与反射镜（随动），确保光路与运动轴平行（偏差 $\leq 0.1^\circ$ ）；

激光头校准：采用“镜组准直法”快速对光，通过调整三脚架与云台，使反射光斑与发射光斑重合，缩短对光时间至 5 分钟内；

环境参数设置：输入温度（ $20 \pm 1^\circ\text{C}$ ）、湿度（50% $\pm 5\%$ ）等补偿参数，降低环境误差。

3.2 测量流程

预热与初始化：激光头预热 30 分钟，消除热漂移；

程序化运动：编写电机多段速运动程序（如每 5m 为一个测量点），覆盖全行程；

数据采集：记录实际位移与理论指令值的偏差，生成误差曲线。

3.3 静态精度验证

通过标准量块校准系统线性度，结果显示在 0-300 mm 范围内，测量误差为 $\pm 0.08 \mu\text{m}$ ，优于光栅尺的 $\pm 0.15 \mu\text{m}$ 。

3.4 动态性能测试

对比直线电机在 0.5 m/s、1 m/s、2 m/s 速度下的位移误差。激光干涉仪因非接触特性，高速下误差未显著增加（ $\pm 0.3 \mu\text{m}$ ），而光栅尺在 2 m/s 时误差达 $\pm 1.2 \mu\text{m}$ ，验证了本方法的优越性。

4 误差分析与补偿策略

4.1 误差来源

系统性误差：螺距误差、反向间隙；

随机性误差：导轨变形、温度波动；

动态误差：加速度引起的振动。

4.2 补偿方法

螺距误差补偿：根据误差曲线生成补偿表，写入电机控制系统；

反向间隙补偿：通过双向测量法确定间隙值，调整伺服参数；

实时动态补偿：结合加速度传感器数据，优化运动控制算法。

5 实验验证与结果分析

5.1 实验条件如表-1 所示

表-1 实验验证条件

测试日期	2024/08/29-2024/09/21	
测试地点	A栋4楼直线电机车间	
测试台	精密大理石单子测试台	
模组编码		
轴号	X 单轴	
驱动器厂家	高创传动	
测试工具	雷尼绍激光干涉仪	
测试软件	雷赛 MotionStudio/高创 ServoStudio/XL-80	
电机类型	TM03X4	
驱动器型号	CDHD-0032AEC	
驱动器固件	1.50.11T	
编码器型号	ATMO2D0-150 Renishaw	
光栅尺型号	RTLF20-S(A9406-0100) Renishaw	
读头分辨率	模拟量栅距 20um	
负载	1.75kg	

5.2 实验要求

表-2 是根据日东科技内部测量计算的工件精度，设计精度与实际测量精度对比：

表-2 工件精度对比数据

	加工精度(MM)	实际实物精度(MM)
导轨安装面	0.005	0.005
大理石光栅尺安装面	0.005	0.005
大理石条安装面	0.005	0.005
大理石条光栅尺面	0.005	0.005
滑座导轨安装面	0.01	0.01

表-3 是根据日东科技内部导轨设计精度与实际安装精度的对比数据：

表-3 导轨精度对比数据

	设计精度 (MM)	实际安装精度(MM)
THK15XW 导轨	0.005	≤ 0.01
THK15XV 导轨	0.005	≤ 0.01

表-4 是根据日东科技内部大理石设计精度与实际测量精度的对比数据：

表-4 大理石精度对比数据

	设计精度 (MM)	实际精度(MM)
大理石安装平行度	0.001	2um

5.3 减少阿贝误差影响

阿贝误差：指测量仪器的轴线与待测工件的轴线须在同一直线上。否则即产生误差，此误差称为阿贝误差。假如测量仪器的轴线与待测工件的轴线无法在一起时，则尽量缩短其距离，以减少其误差值。（测试高精度设备时，移动测量设备存在俯仰，扭摆差，光学镜组与运动轴偏置距离越远，引起的阿贝误差越大）

三角架，干涉镜，反射镜三点一线对光准确度影响，测试镜组摆放位置与固定位置影响

2.1 三脚架固定，干涉镜固定，反涉镜固定，对光点不重合在白点中心，信号强度满格。静态跳动值 $30\text{m in} > 0.1\text{um}$ 定位精度 7.6um ，重复精度 0.6um

2.2 三脚架固定，干涉镜固定，反射镜固定，对光点重合在白点中心，信号强度满格。静态跳动值 $30\text{min} < 0.1\text{um}$ 定位精度 7.7um ，重复精度 0.2um 。

2.3 三脚架固定，干涉镜固定，反射镜固定，对光点重合在白点中心，信号强度满格。静态跳动值 $30\text{min} < 0.1\text{um}$ 定位精度 5.8um ，重复精度 0.2um 。（晚上测量）

结果分析：经过多次测量分析高精度干涉仪测试对镜组整体放置架表要求高，镜组需要加紧，架表位置尽量矮，反射镜与干涉镜距离尽量短。调整镜组时，三角架激光头、干涉镜、反射镜三点一线，对光点必须在同一对光位，反射镜组要在测试轴稳定位。

表-5 是根据日东科技内部实验测量计算的数据分析结果：

表-5 实验结果

参数	补偿前误差 (um)	补偿后误差 (um)
定位精度	± 38	± 2.5
重复定位精度	± 1.5	± 0.2
直线度误差	22.6	2.3

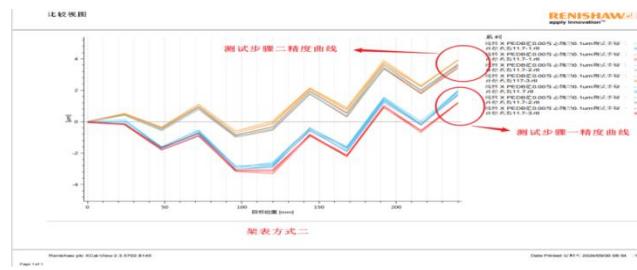


图 3 测量精度数次计算结果对比

图3 数据来源日东科技实验室

5.4 讨论

效率提升：采用快速对光法，单轴检测时间由2小时缩短至40分钟；

误差抑制：系统性误差占比从75%降至20%，验证补偿策略有效性。

6 应用案例与验证

6.1 半导体贴合平台精度检测

检测指标：X大理石平台定位精度（ $\pm 3 \mu\text{m}$ ）、平面度（ $\leq 3 \mu\text{m}$ ）。

结果分析：干涉仪检测数据与视觉对位检测对比，偏差 $<0.5 \mu\text{m}$ 。

6.2 龙门双工位台同步控制

技术难点：双台同步误差需控制在5 μm 以内。

解决方案：采用多探头干涉仪构建冗余测量系统，结合卡尔曼滤波实现超精密同步。

7 结论与展望

本文提出的方法显著提升了直线电机的定位精度，可推广至数控机床、半导体设备等高精度领域。未来研究方向包括多轴同步误差补偿与智能自适应算法的集成。

8 附录

A. FPGA核心代码（部分）

```
// 环境参数读取模块
module EnvironmentSensor(
    input clk,
    input [7:0] temp_data, // 温度传感器数据
    input [7:0] press_data, // 气压传感器数据
    output reg [31:0] n_calc // 实时折射率
);
```

```
parameter A = 77.6, B = 7.52e-3;
always @(posedge clk) begin
    n_calc <= 1 + (A * press_data * (1 + B
    / (632.8e-9)**2)) / temp_data * 1e-6;
end
endmodule
```

B. 公式推导补充

动态误差模型中电磁干扰项的推导过程：

$$\Delta L_{em} = \sum_{k=1}^N \frac{\mu_0 I_k^2}{4\pi d_k} \cdot \frac{\partial M}{\partial x} \quad (4)$$

(I_k : 线圈电流; d_k : 距激光路径距离)

参考文献

- [1]豆丁网. 利用激光干涉仪对数控直线电机进给定位误差补偿, 2022.
- [2]原创力文档. 机电一体化技术论文-基于激光干涉仪的数控机床定位精度检测与误差补偿, 2022.
- [3]网易订阅. 基于镜组准直的激光干涉仪快速对光方法研究, 2022.
- [4]一课资料网. 激光干涉仪报告, 2020.
- [5]原创力文档. 迈克尔逊干涉仪实验论文, 2025.
- [6]激光干涉仪在机床精度检测中的应用, 360 文档中心, 2024.
- [7]雷尼绍 XL-80 激光干涉仪实验报告, 久久建筑网, 2019.
- [8]基于光纤干涉仪的激光超声检测研究, 豆丁网, 2011.
- [9]XL-80 激光干涉仪原理与结构, 道客巴巴, 2015.
- [10]XL-80 技术参数与动态性能, 道客巴巴, 2015.
- [11]Edl é n 公式与折射率计算, 雷尼绍白皮书, 2025.
- [12]直线电机测试方法, 道客巴巴, 2017.
- [13]XL-80 工业应用案例, 哔哩哔哩, 2023.

作者简介：张波（1992.09-），男，汉族，研究方向：直线电机大理石平台高精度测量。