

一种高精度连续可调光衰减器的设计

肖伟

蚌埠学院数理学院, 安徽 蚌埠

收稿日期: 2026年2月13日; 录用日期: 2026年4月16日; 发布日期: 2026年4月23日

摘要

随着光衰减器在光通信领域的广泛应用, 可调光衰减器由于其精度高、衰减可调等优点备受关注。针对可调光衰减器存在测量范围有限、价格高昂的不足, 设计了一款测量范围宽、制造成本低的可调光衰减器。低插入损耗装配技术和自动校准技术, 降低了衰减器的插入损耗, 提高了生产效率。电机驱动技术使控制方案开环设计成为了可能, 大大降低了制造成本。与现有光衰减器相比, 其衰减准确度 ≤ 0.1 dB、衰减重复率 ≤ 0.01 dB、插入损耗 ≤ 1 dB, 均有不同程度的提高。相比传统闭环设计方案, 其开环设计减少了相应反馈环节, 制造成本更加低廉, 在光衰减器市场中具有广阔的前景。

关键词

光衰减器, 插入损耗, 自动校准, 电机驱动

Design of High-Precision Continuously Adjustable Optical Attenuator

Wei Xiao

School of Mathematics and Physics, Bengbu University, Bengbu Anhui

Received: February 13, 2026; accepted: April 16, 2026; published: April 23, 2026

Abstract

With the wide application of optical attenuators in the field of optical communication, optical attenuators attract much attention due to their high accuracy and adjustable attenuation. In view of the shortage of limited measurement range and high price, a continuous attenuator with wide measurement range and low manufacturing cost is designed. Low insertion loss assembly technology and automatic calibration technology reduce the insertion loss of attenuator and improve production efficiency. Motor-driven technology makes open-loop design of control scheme possible and greatly reduces manufacturing costs. Compared with the existing optical attenuators, the attenuation

accuracy ≤ 0.1 dB, attenuation repetition rate ≤ 0.01 dB, insertion loss ≤ 1 dB are improved in varying degrees. Compared with the traditional closed-loop design, its open-loop design reduces the corresponding feedback link, makes the manufacturing cost cheaper and has broad prospects in the optical attenuator market.

Keywords

Light Attenuator, Insertion Loss, Automatic Calibration, Motor Drive

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 概述

光衰减器通过透射或反射实现光能量的衰减, 是重要的无源光学器件之一[1]。光衰减器常用于系统损耗评估及各种测试中, 已在光通信领域中广泛应用。光衰减器一般可分为固定型衰减器、分级可调型衰减器、连续可调型衰减器等。固定型衰减器一般采用机械方式实现, 该方式发展时间长技术成熟, 但是其体积大, 操作不便。分级可调衰减器调节范围广, 但在分级点附近存在衰减跳变。连续可调衰减器精度高, 但测量范围有限, 响应速度低于分级可调衰减器。热光可调衰减器控制简单, 结构简易, 成本低廉[2], 精度受温度影响大, 热干扰严重。连续可调衰减器中流体压力型衰减范围大、响应速度快, 精度受温度影响大[3], 电路设计复杂。

在光纤网络和光纤通信中, 可调光衰减器的作用愈加重要, 在航天、军工、5G 网络中广泛使用, 在密集广播复用(DWDM)系统和光纤放大器系统中各传输信道上的功率平衡、动态增益平衡方面起了重要的作用[4]。

在光网络中各通道信号功率不均衡会影响整个光网络的性能指标。比如, 通道能量因为不均衡超出接收端范围; 各通道间信号互相干扰导致信号误码率高等[5]。连续可调光衰减器能够有效的解决上述困扰, 在飞速发展的光通信时代, 研制高精度的连续可调光衰减器具有广阔的市场前景和实际意义。

2. 技术方案

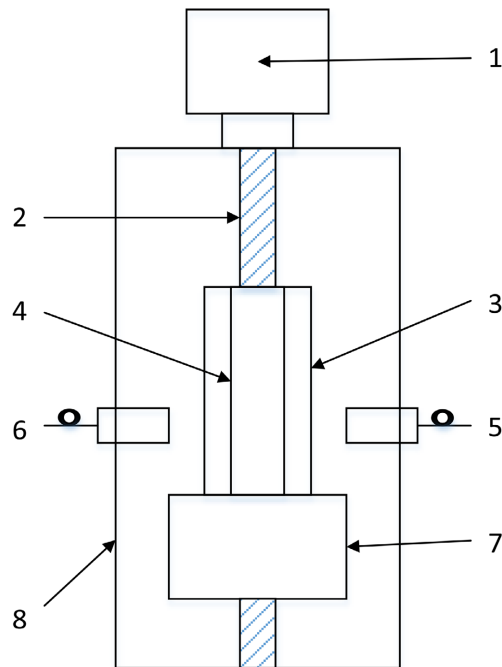
2.1. 硬件技术方案

连续可调光衰减器硬件由光路衰减单元和硬件电路组成。

2.1.1. 光路衰减单元

光路衰减单元是连续可调光衰减器的核心组件[6], 由条形滤光片、自聚焦准直器、高精度丝杠、两相 1.8° 步进电机组成, 具体见图 1。入射光信号通过自聚焦准直器准直后, 经过条形滤光片进行光功率衰减, 在通过输出自聚焦准直器将光信号耦合进输出光纤。自聚焦准直器安装后采用 UV 光固化胶固定, 条形滤光片固定于高精度丝杠之上, 两相 1.8° 步进电机拖动丝杠运动, 条形滤光片两侧涂覆膜厚度线性增加, 其光吸收能力成比例增加, 从而实现光功率的连续衰减。

1) 条形滤光片: 条形滤光片是光路衰减单元的核心器件, 是实现宽测量范围、衰减连续可调的保证。条形滤光片通过沉积法在高透条形玻璃上涂镀 NiCr 合金制作。其衰减量与镀膜厚度成比例关系, 相比圆形滤光片的有限面积, 其条形滤光片可涂镀面积大, 镀膜厚度更加均匀可控, 相比圆形滤光片, 条形



1-两相 1.8°步进电机；2-高精度丝杠；3-安装支架；4-条形滤光片；5/6-自聚焦准直器；7-挡块；8-外壳。

Figure 1. Block diagram of optical path attenuation principle

图 1. 光路衰减原理框图

滤光片具有更加优良的线性特性，采用双侧涂镀的方式，减小了条形滤光片的长度，高透玻璃受环境温度和工作波长影响更小。

2) 自聚焦准直器：自聚焦准直器将光纤中的光束转换为平行光发出，或者将接收的平行光耦合汇聚到光纤中。设计的光衰减器采用球端面的 C-lens 准直器[7]。

3) 高精度丝杠：丝杠是光路衰减单元的执行机构，有效量程 40 mm，定位精度 0.02 mm，有效满足了衰减器的精度要求。

4) 两相 1.8°步进电机：两相 1.8°步进电机采用步距角 1.8 度的常规两相式两相 1.8°步进电机，采用细分方式，实际步进角为 0.45 度，既提高了控制精度又降低了成本[8]。

2.1.2. 硬件电路

衰减器硬件见图 2 所示，由 CPU 主控模块电路、步进电机驱动及控制模块电路、衰减校准数据存储模块电路、电源整流滤波模块电路、按键及液晶显示模块电路、USB 驱动模块电路、WIFI 驱动电路模块组成。

工作原理：主控 CPU 接收按键电路/USB 接口电路/WIFI 接口电路发送来的指令信息，根据指令设定光衰减器的工作波长和目标衰减值，并从数据存储电路中取出光衰减器修正数据，计算出两相 1.8°步进电机的行进步数，控制两相 1.8°步进电机带动高精度丝杠到达设定位置，实现指定衰减。在工作过程中，主控 CPU 控制显示电路，实时显示可调光衰减器当前的工作状态和设置参数。

1) 主控 CPU：CPU 采用新一代嵌入式 ARM 处理器，其工作频率 72 MHz，内置 Flash 存储器和 SRAM，具有丰富的通用 IO 端口，并提供了强大的中断响应系统。

2) 显示及按键电路：光衰减器状态参数相对简单，采用点阵式 LCD 显示屏，功耗低、亮度大，价格低廉。按键电路采用行列扫描式方法，实现按键编码。

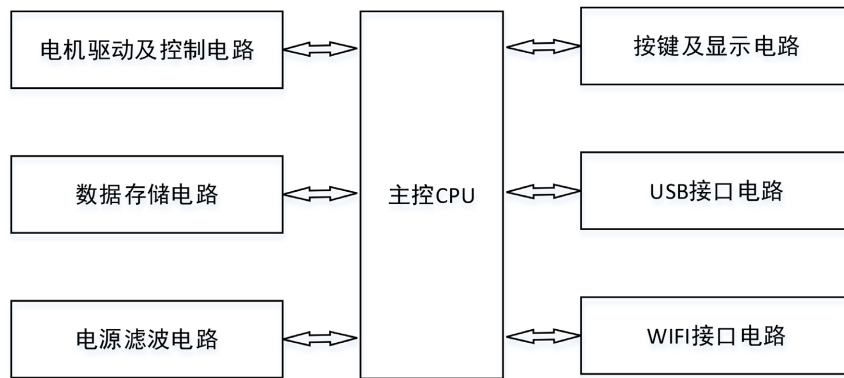


Figure 2. Overall hardware circuit block diagram
图 2. 硬件整体电路框图

- 3) USB 及 WIFI 接口电路：为适应系统集成通讯需求，系统中增加了 USB 及 WIFI 硬件电路，实现指令及数据多种形式收发。
- 4) 电机驱动及控制电路：控制两相 1.8°步进电机的转动方向和速度，带动条形滤光片移动到设定位置，完成光信号能量的精确衰减。
- 5) 数据存储电路：用于衰减值修正数据的存储。

2.2. 软件方案

衰减器软件由控制单元程序和校准程序组成，具体见图 3 所示。控制单元程序由主控程序、校准数据修正子程序、USB 收发驱动子程序、WIFI 收发驱动子程序、人机交互子程序、步进电机控制子程序组成，程序流程见图 4 所示。

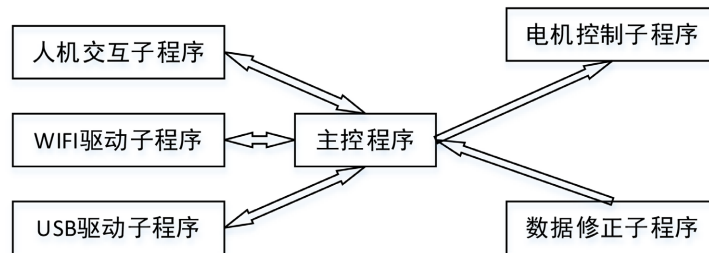


Figure 3. System software block diagram
图 3. 系统软件框图

- 主控程序：协调各子程序工作逻辑，完成各子程序及参数的初始化，实现光衰减器的整体控制。
- 人机交互子程序：实现用户与衰减器之间的信息交互，通过按键/USB/WIFI 接收用户的操作指令，并将仪器状态实时的进行展示。
- WIFI 驱动子程序：用于驱动 WIFI 硬件电路，完成 WIFI 数据的收发，实现仪器的远程控制。
- USB 驱动子程序：用于驱动 USB 硬件电路，完成 USB 数据的收发，实现仪器的远程控制。
- 数据修正子程序：用于存储上位校准程序对衰减值的修正值，以实现对对应衰减值的正确衰减。
- 电机控制子程序：控制两相 1.8°步进电机的转动方向和速度，计算两相 1.8°步进电机的行进步数，驱动两相 1.8°步进电机带动条形滤光片移动至指定位置，实现光功率的精确衰减。

校准程序利用 LabWindows 设计，Labwindows 开发环境集成了源码编辑、ANSI C 编译、调试，程序采用事件驱动方式进行调用，初学者也可以迅速的进行开发、调试和修改程序。

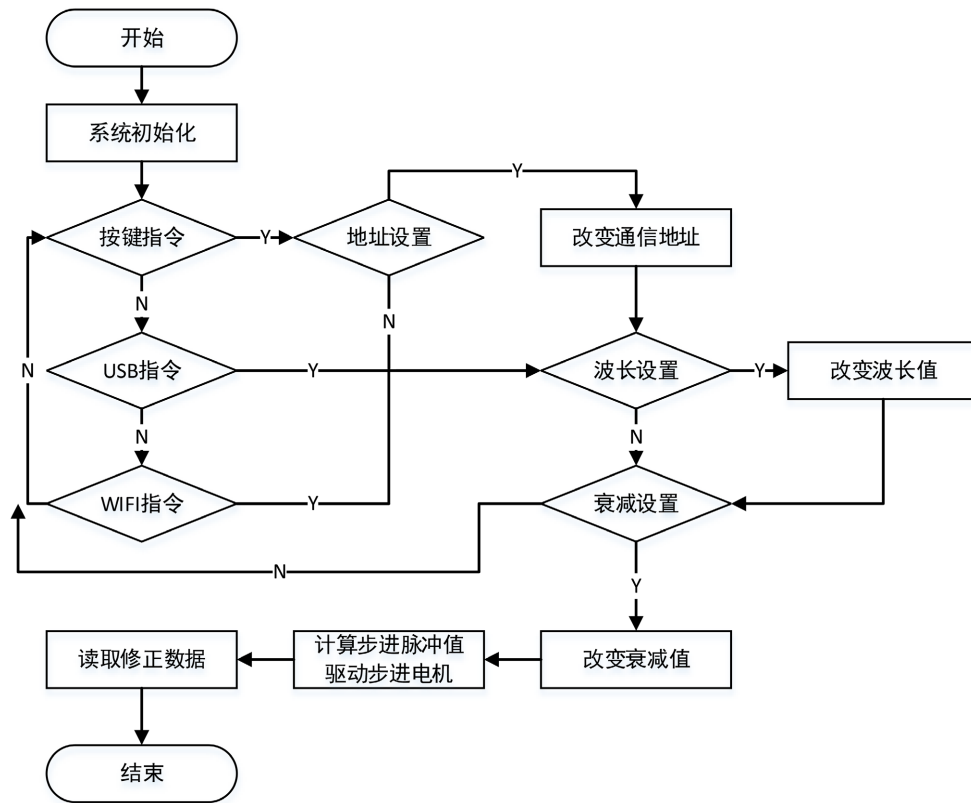


Figure 4. Software flow block diagram of main control CPU
图 4. 主控 CPU 软件流程框图

3. 关键技术

3.1. 低插入损耗装配技术

自聚焦准直器属于无源器件，由前端的自聚焦透镜和后端的光纤连接头组成。光波在自聚焦透镜中以周期性的发散和聚焦方式传播。当自聚焦透镜的长度设计为四分之一节距 P ，发射端将出射光转换为平行光，接收端将平行光汇聚耦合进光纤，自聚焦准直器的对准损耗最小。

自聚焦准直器耦合损耗：自聚焦准直器安装准时，准直器的耦合失配会使光纤间产生附加损耗。自聚焦准直器之间的插入损耗主要来源于离轴失配、偏角失配和间距失配[9]，见图 5 所示。

$$\text{离轴损失: } \eta_a = -10 \lg \left[\exp \left(- \left(\frac{n_0 \sqrt{A} \omega_0 y}{\lambda} \right)^2 \right) \right] \quad (1)$$

$$\text{偏角损失: } \eta_b = -10 \lg \exp \left(- \left(\frac{\pi \sqrt{A} \omega_0 \theta}{\lambda} \right)^2 \right) \quad (2)$$

$$\text{间距损失: } \eta_c = -10 \lg \left(\frac{4(1 + \varepsilon^2)}{2 + \varepsilon^2} \right) \quad (3)$$

$$\text{公式(6)中, } \varepsilon = \frac{n_0^2 A d \omega_0^2}{\lambda} \quad (4)$$

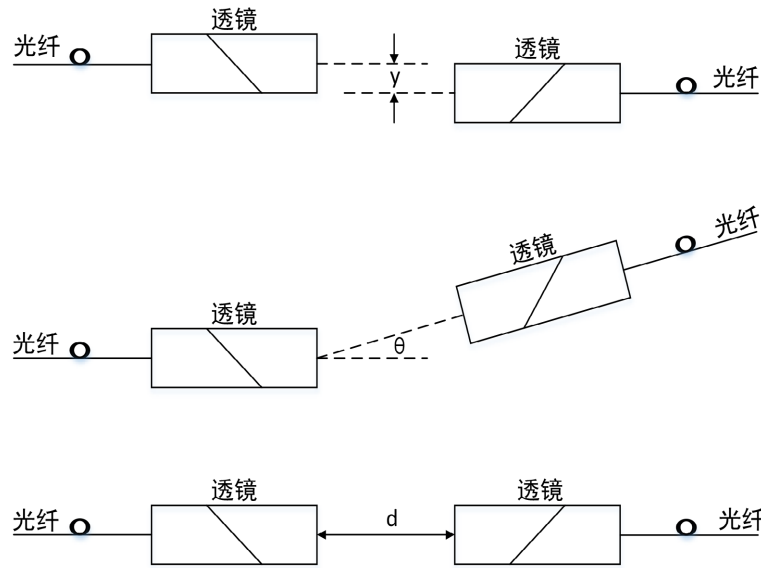


Figure 5. Three influencing factors of insertion loss in self-focusing collimator
图 5. 自聚焦准直器插入损耗三种影响方式

其中 $\lambda = 1310 \text{ nm}$, $n_0 = 1.594$, $\sqrt{A} = 0.329 \text{ mm}^{-1}$, $\omega_0 = 5.2 \text{ }\mu\text{m}$, ω_0 , λ 分别为高斯光束的模场半径和波长, d 为自聚焦准直器的间距。

自聚焦准直器离轴损失、偏角损失、间距损失的理论计算曲线[10], 见图 6~8 所示。在图 6 中, 当准直器间距增大时, 离轴损失也随之增加。离轴损失 3 db 时, 准直器间距约为 0.15 mm。在图 7 中, 可发现准直器存在偏角时, 其插入损耗会产生指数级变化。当准直器偏角为 0.08° 时, 其偏角损失已达 3 db。在图 8 中, 轴向间距在一定范围内, 其插入损耗变化不大, 超过后, 损耗值随轴向间距增加。

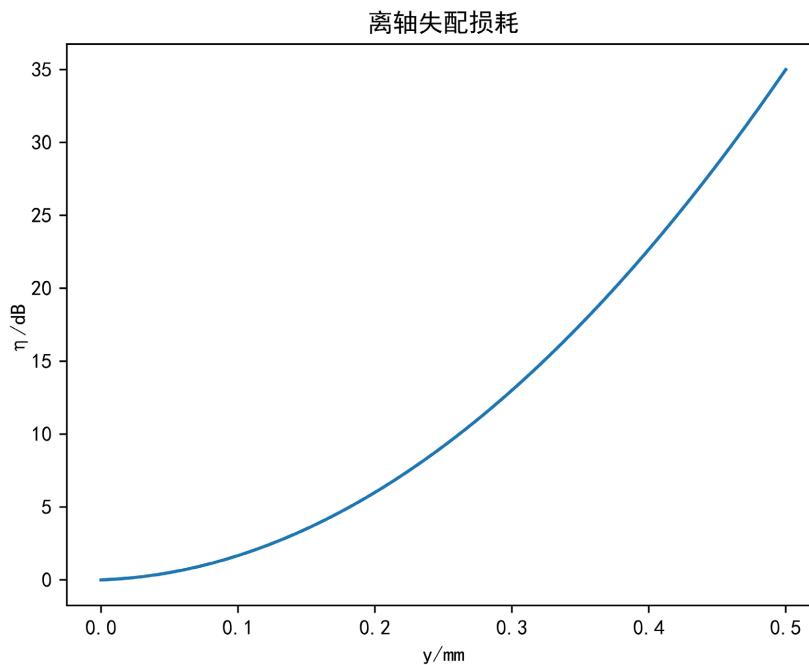


Figure 6. Off-axis misalignment loss
图 6. 离轴失配损耗

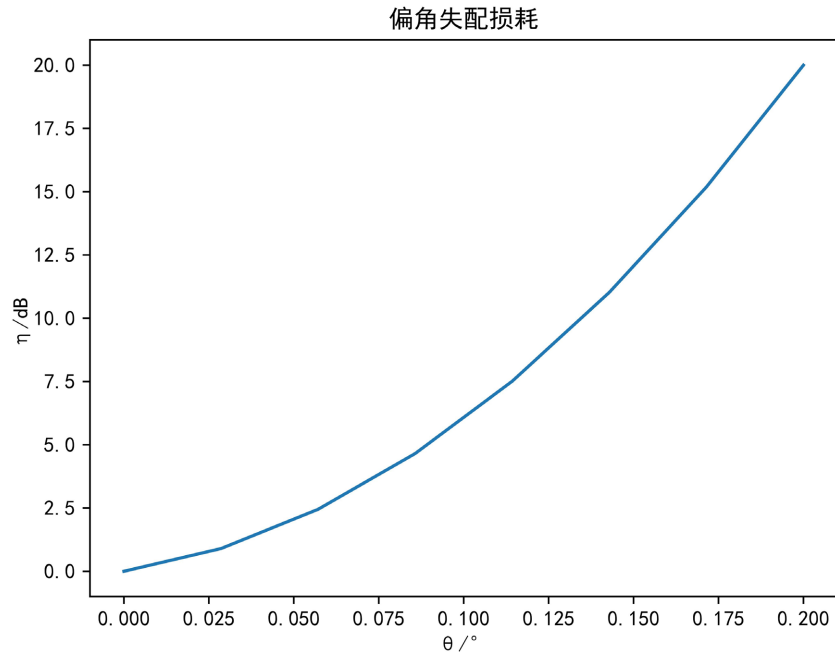


Figure 7. Angular misalignment loss
图 7. 偏角失配损耗

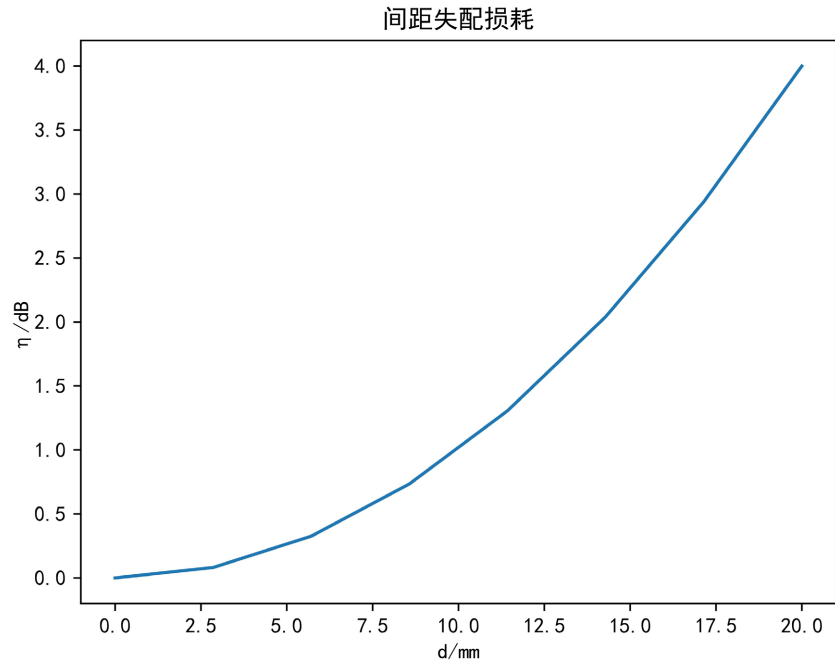


Figure 8. Gap misalignment loss
图 8. 间距失配损耗

为解决自聚焦准直器的耦合损耗这一难题，在光路设计安装过程中，采用位移精度为 0.5 μm ，角度精度为 30"的精密多维度调节支架，搭建自聚焦准直器安装系统，其指标参数见表 1 所示，结构见图 9 所示。自聚焦准直器的耦合损耗主要来源于偏角和离轴失配，通过调整支架，使准直器安装时，离轴失配损耗 0.1 db，偏角失配 0.2 db，间距失配 0.05 db，总损耗控制在 0.4 db 内。光衰减单元装配如图 1 所示。在条

形滤光片的两侧，将自聚焦准直器 5 固定，另一准直器 6 固定于多维度调节支架上，通过调整支架，使入射光通过准直器 6、条形滤光片 4、准直器 5 的光路衰减最小，保证总损耗在 0.4 dB 内。当准直器位置调整完毕后，用 UV 光固化胶固定，热膨胀系数小，粘合力强，提高了光路的适应性和可靠性。

Table 1. Parameters of precision multi-dimensional adjustment bracket

表 1. 精密多维调整架参数

支架参数	指标
行程	粗调: ± 6.5 mm 微调: ± 0.3 mm
倾斜角度	行程: $\pm 3^\circ$, 精度: $30''$
圆弧摆角	行程: $\pm 7^\circ$, 精度: $30''$
精度	粗调: 10 μ m 微调: 0.5 μ m

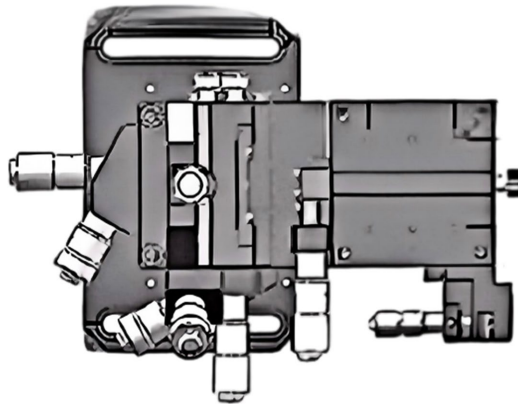


Figure 9. High-precision multi-dimensional adjustment bracket

图 9. 高精度多维调整支架

3.2. 电机驱动控制技术

为了防止光衰减器滤光片制造误差造成衰减值抖动，利用两相 1.8° 步进电机来实现滤光片的精确定位，具体控制过程如下。

控制程序根据设置的工作波长和衰减设定值，结合数据修正子程序中的数据修正值，计算出两相 1.8° 步进电机的方向和行进步数，通过电机驱动芯片控制两相 1.8° 步进电机按照不同的速度和方向进行转动，从而带动条形滤光片转动。在电机运行过程中，对电机的速度控制采用曲线控制，见图 10 所示，避免了两相 1.8° 步进电机速度过快引起电机抖动造成的误差[11]。

本文设计的可调光衰减器采用开环形式实现对电机控制，由于机械结构回程误差，会造成电机在反向运动时，实际位置与控制位置存在偏差。本文经过对电机实际运动位置的测量，结合位置补偿算法，在保证控制精度的同时降低了系统成本。重复不同次数衰减误差测试数据，见表 2 所示。通过表格数据，我们可以看出，经过位置补偿后，系统误差在 0.1 dB 以内，丝杠的机械回程误差对系统误差的影响，在整个寿命周期内几乎可以忽略。

3.3. 自动校准技术

要实现对波长 1000~1700 nm 范围内的精确衰减，除了需要滤光片镀膜均匀线性外，还需要对条形滤光片对不同波长的衰减值精确校准[12]。每个波长点的衰减准确度，需采用精密仪器对衰减器进行校准

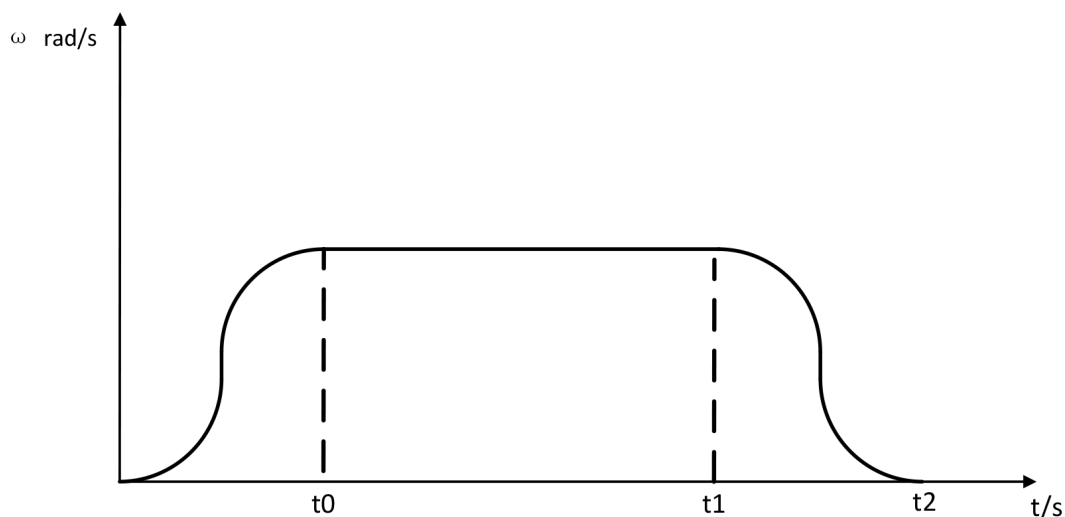


Figure 10. Motor speed control curve

图 10. 电机速度控制曲线

Table 2. Repeat error values at different attenuation times

表 2. 不同衰减次数重复误差值

衰减次数	20 万次	40 万次	60 万次	80 万次	100 万次
常规开环误差值	0.19 dB	0.11 dB	0.13 dB	0.15 dB	0.24 dB
补偿后误差值	0.07 dB	0.03	0.04	0.05	0.1 dB

测量。选取典型波长，对条形衰减片进行全量程范围内校准。对非校准波长点，采用波长特性曲线拟合，既可以保证衰减精度又节约了校准时间。为了保证衰减精度，我们衰减范围内对不同波长的衰减值进行校准，其校准数据多达近两万，必须采用自动校准的方式来完成。

自动校准系统由计算机、可调光源[13]、分光束、待校准衰减器、功率计组成，具体结构见图 11 所示。计算机与可调光源间通过 USB 电缆连接，计算机发送光源波长和功率设定指令，设定校准光源的波长和功率。通过 50/50 分光束将可调输出光源分为两束，一束直接进入功率计作为功率基准，另一束经过衰减器后进入功率计另一通道，获得衰减后的功率值[14]。功率计通过 USB 电缆与计算机相连，将上述通道测量得到的功率值送入计算机，得到当前衰减器的衰减值；计算机发出指令，两相 1.8° 步进电机带动衰减片到达下一位置，重复进行测量，直到全量程范围测试完毕。

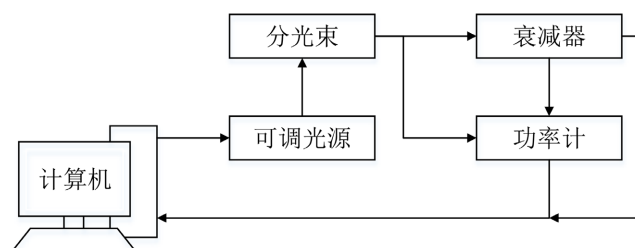


Figure 11. Automatic calibration system connection diagram

图 11. 自动校准系统连接图

对同一波长的衰减，条形滤光片随镀膜位置的变化成线性关系，见图 12 所示。衰减片同一位置随光

源波长增加, 衰减值成下降趋势, 见图 13, 图 14 所示, 选取衰减片典型位置进行光源波长测试, 记录下数值。所以, 对条形滤光片全量程范围内选取不同波长值进行校准。在衰减波长范围内, 选择 1050, 1260, 1310, 1460, 1550, 1650 nm 作为校准波长[15], 进行数据校准。

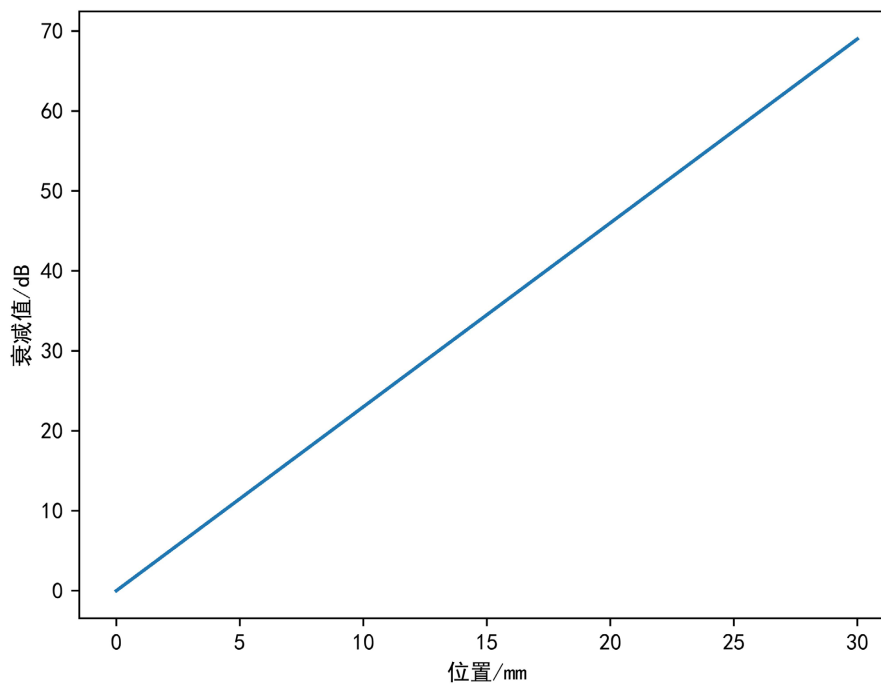


Figure 12. Relationship between attenuator and attenuation at the same wavelength
图 12. 衰减片与同一波长衰减量关系

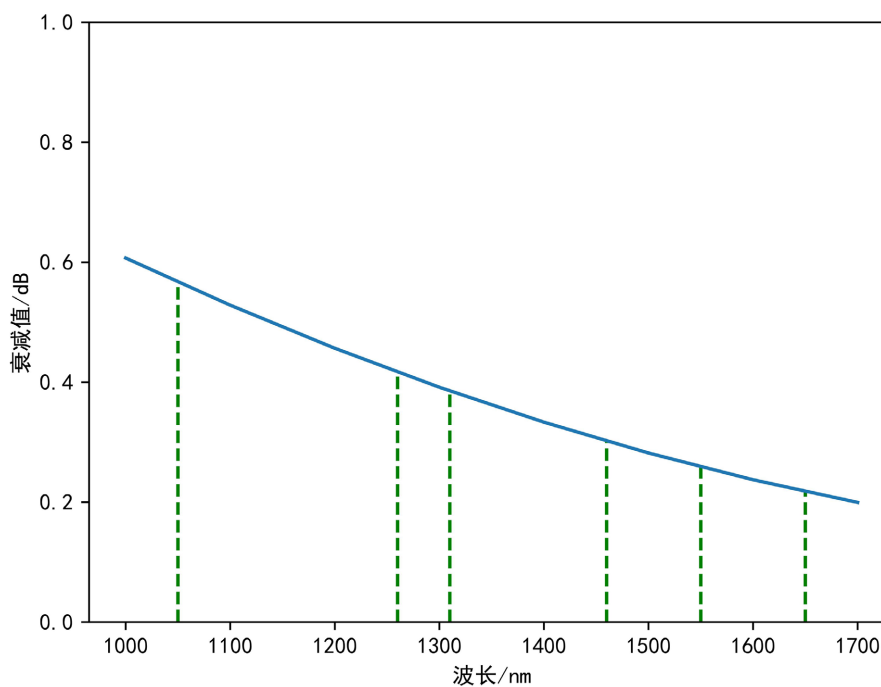


Figure 13. Relationship between wavelength and fixed position of attenuator (minimum end)
图 13. 波长与衰减片同一位置关系(最小端)

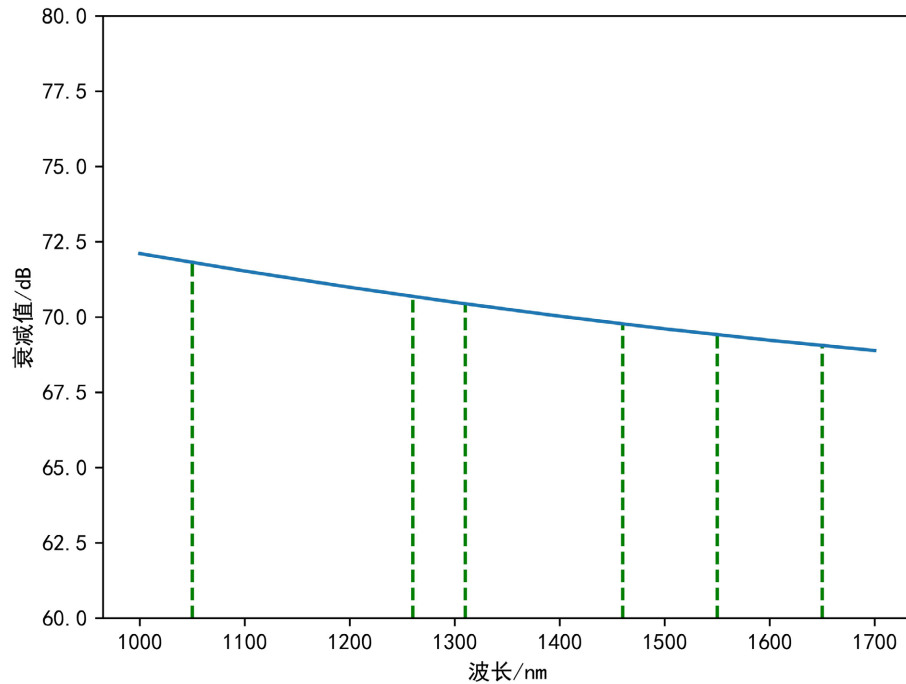


Figure 14. Relationship between wavelength and fixed position of attenuator (maximum end)

图 14. 波长与衰减片同一位置关系(最大端)

4. 结论

研制出的衰减连续可调光衰减器与当前国外进口产品及国内产品综合比较(见表 3 所示), 具有测量范围宽, 衰减准确度高 < 0.1 dB、重复性好 ≤ 0.01 dB、插入损耗低 ≤ 1 dB, 见图 15, 图 16 所示, 且具有操作简单、界面友好、成本低等特点, 其性能指标接近国外先进仪器指标, 具有广阔的市场前景, 见图 17 所示。

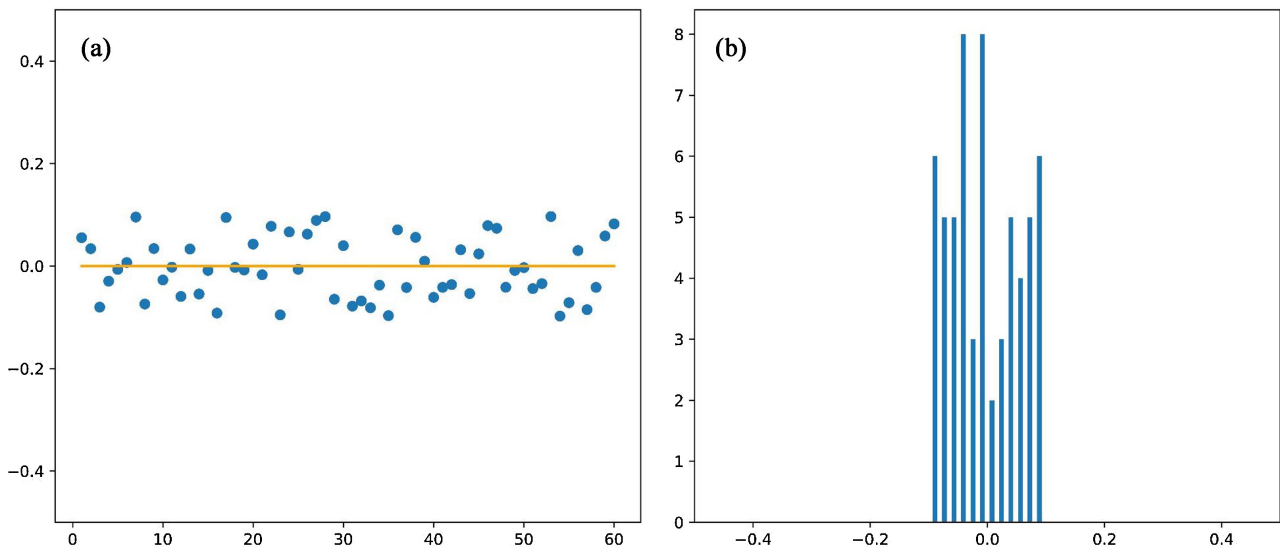


Figure 15. (a) Scatter plot of attenuation accuracy; (b) Histogram of attenuation accuracy

图 15. (a) 衰减准确度散点图; (b) 衰减准确度直方图

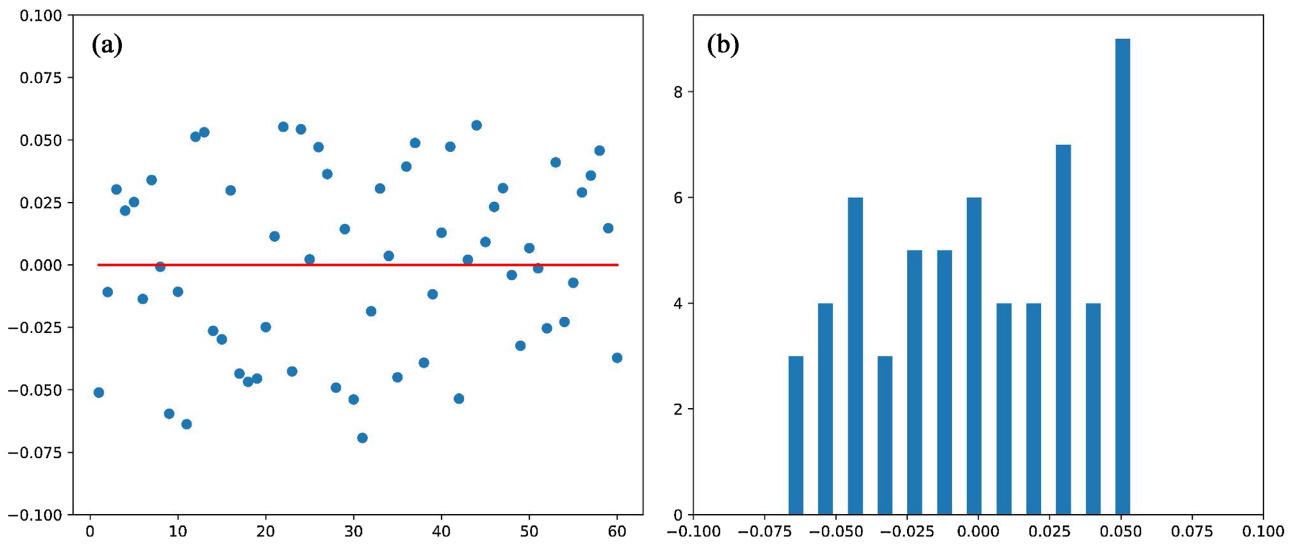


Figure 16. (a) Scatter plot of attenuation repeatability; (b) Histogram of attenuation repeatability

图 16. (a) 衰减重复率散点图; (b) 衰减重复率直方图

Table 3. Comparison of current product performance advantages and disadvantages

表 3. 当前产品性能优劣比较

	关键指标参数	特点
MEMS 衰减器(进口)	波长: 1200~1700 nm 准确性: 0.1 dB 重复性: 0.01 dB 插入损耗: 1.5 dB 测量范围: 100 dB	测量范围宽, 测量精度高, 重复性好, 价格高
MEMS 衰减器(国产)	波长: 1260~1650 nm 准确性: 0.5 dB 重复性: 0.2 dB 插入损耗: 2.5 dB 测量范围: 60 dB	测量范围窄, 测量精度低, 重复性一般, 价格低
本设计产品	波长: 1200~1700 nm 准确性: 0.1 dB 重复性: 0.01 dB 插入损耗: 1 dB 测量范围: 60 dB	测量精度、重复性与进口产品一致, 测量范围低于进口产品, 价格处于国产与进口之间, 综合性价比高



Figure 17. Attenuator prototype

图 17. 衰减器样机

基金项目

校级质量工程项目基层教学组织《大学物理教研室》(2023jcjxzz4)。

参考文献

- [1] 万静, 俞廷杰, 陈建松, 周瑞, 万洪丹. 试论液晶可变光衰减器器件的制作技术[J]. 红外与毫米波学报, 2023(2): 72-74.
- [2] 代红庆, 安俊明, 王玥, 等. 低功耗热光可调光衰减器的设计与制备[J]. 半导体技术, 2014, 39(8): 584-588.
- [3] 魏硕. 基于流体压力驱动的可变光衰减器[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京邮电大学, 2024.
- [4] 蒙梁, 钟昌锦, 周贤, 余志强, 李流超. 折射遮挡原理光衰减器[J]. 广西通信技术, 2017(4): 53-54.
- [5] 朱芸. 试论液晶可变光衰减器器件的制作技术[J]. 产业科技创新, 2023, 5(2): 72-74.
- [6] 刘斌, 雷静, 钟昌锦, 等. 基于 STM32 的可变光衰减器的设计[J]. 广东通信技术, 2020, 40(10): 48-52.
- [7] 陕振添. 多模可调光衰减器及光开关研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 华中科技大学, 2022.
- [8] 程木海, 高枫. 一种连续可调台式光衰减器的制作[J]. 通讯世界, 2022(11): 190-192.
- [9] 朱芸. 挡光型可变光衰减器的衰减量构成研究[J]. 产业科技创新, 2023, 5(1): 55-58.
- [10] 温丹昊. 光衰减测试中的误差分析[J]. 科学技术创新, 2021(36): 194-196.
- [11] 魏硕, 陈陶, 谌静, 孔梅梅, 关建飞. 调节精度可配置的可变光衰减器研究[J]. 光学学报, 2023, 43(2): 9-15.
- [12] 贺沁涵, 何立军, 周广飞. 一种具备测试诊断能力的光通道集成测试平台[J]. 山西电子技术, 2024(6): 62-65.
- [13] 刘天宇. 光纤光功率计校准系统的建立[J]. 计量与测试技术, 2023, 50(9): 26-28.
- [14] 李超. 基于 MEMS 的可调光衰减器的设计与制造研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 中南大学, 2024.
- [15] 严康. 多模光纤可调光衰减器研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 华中科技大学, 2022.