

# 新工科背景下基于多普勒效应速度测量虚拟实验研究

杜正婷 黄嘉译 孟娜 方晨雅 吴锦春

合肥师范学院物理与材料工程学院 安徽 合肥 230601

**【摘要】**：为解决传统激光多普勒测速实验中设备成本高、操作门槛高、环境要求严苛等问题，本文结合新工科建设对实践教学的创新需求，本文设计并开发了基于自混合干涉的多普勒效应测速虚拟实验系统。该系统以 MATLAB GUI 为开发工具构建仿真模型，通过精准调控激光波长、光反馈因子等核心参数，模拟待测物体运动速度变化过程，利用快速傅里叶变换（FFT）算法提取多普勒频移信息，实现速度的高精度测量。仿真结果表明，自混合干涉的多普勒频移与物体运动速度均呈严格线性关系，与理论保持一致。该虚拟实验无需昂贵精密设备，硬件成本降低 90%以上，可突破时空限制，将抽象物理原理可视化，不仅有助于学生构建系统化的知识体系、提升工程实践与问题解决能力，又能为科研前期参数优化提供高效验证工具，显著提升实验教学效果与可及性。

**【关键词】**：多普勒效应；速度测量；自混合干涉；虚拟实验教学

DOI:10.12417/3041-0630.26.08.028

## 1 引言

在当前大学实验教学中，诸多现实困境制约着实验教学质量的提升。一方面，实验设备数量严重不足，难以满足大规模学生群体的实践需求，尤其是基于激光技术的测量实验，往往需要配置激光器、声光调制器、防震平台等精密设备，单套设备投入高达数十万元，高昂的成本使得多数高校难以批量购置，导致学生人均实操机会匮乏<sup>[1]</sup>。其次，实际实验操作门槛极高，不仅需要进行复杂的光路校准、环境降噪等前期准备工作，对实验环境的稳定性要求也极为严苛，微小的环境扰动或操作失误就可能导致实验失败，而器件老化、环境干扰等问题还会造成实验结果不稳定，严重影响教学效果。此外，精密设备的维护成本高昂，且操作过程中存在实验安全的问题，也存在设备损坏风险，这些进一步加剧了实验教学的开展难度。

在这样的现状下，虚拟仿真实验的开展具有极强的必要性。它能够有效突破传统实验在设备数量、成本投入和操作环境上的限制，通过数字化手段构建高度仿真的实验场景，让学生无需依赖昂贵的实体设备即可开展实验<sup>[2]</sup>。虚拟仿真实验可以规避实际实验中硬件成本高、设备维护难、环境要求严等痛点，同时打破时间和空间的束缚，使学生能够随时随地进行实验操作，大幅提升实验教学的可

及性。对于抽象复杂的激光干涉测速原理而言，虚拟仿真还能将难以理解的物理现象可视化，帮助学生更直观地理解理论知识与实验现象之间的关联。

本文采用 MATLAB GUI 开发工具，聚焦自混合干涉效应<sup>[3]</sup>，实现多普勒效应测速虚拟实验。实验教学过程中，通过讲

解实验原理，有助于学生理解多普勒测试的原理；通过控制变量法设置待测速度，获得相应的激光干涉频谱图和示波器波形，让抽象的干涉信号转化为可观测的物理量，将理论与实践相结合方式，能够为学生的后续科研和工作打下坚实的基础。同时，该虚拟实验仅需通用计算机与 MATLAB 软件<sup>[4]</sup>即可运行，硬件成本较实际实验降低 90%以上，且无需复杂的前期准备操作，能确保数据的重复性与可靠性，既适合教学场景快速演示核心原理，也可为科研前期参数优化提供高效验证工具。

## 2 多普勒频移测速原理

自混合干涉无需参考光路，仅依赖激光器内部的光反馈效应。如图 1 所示，激光器输出的激光被外部待测物体反射或散射后，部分光返回到激光器腔中，与腔内原光场发生干涉<sup>[6]</sup>，回馈光会因多普勒效应而产生频率偏移，而自混合干涉信号的波动频率即为激光与物体相互作用后的多普勒频移，利用自混合干涉与多普勒频移之间的关系，以及多普勒频移与物体的运动速度之间的关系，由此可以用来测速<sup>[7]</sup>。

当形成自混合干涉时激光器的输出功率  $P(t)=P_0[1+m\cos(\phi_F(\tau))]$ ，式中：

$P_0$ ---无光反馈时的光功率；

$m$ ---调制因子；

$\phi_F(\tau)$ ---有光反馈时的外腔相位。

当外部物体以速度  $v$  靠近或远离激光器时，外腔相位会发生变化，即有  $\phi_F(\tau)=2\pi f \cdot \frac{2(vt+L_0)}{c} = \frac{4\pi(vt+L_0)}{\lambda}$ ，将其代入输出功率公

作者简介：杜正婷（1990.01—），女，汉，皖五河县，讲师，博士，合肥师范学院，激光器、激光干涉传感、智能感知。

式得

$$P(t)=P_0\left\{1+m\cos\left[\frac{4\pi(vt+L_0)}{\lambda}\right]\right\} \quad (1)$$

由此可以得出，外部物体运动会导致激光器输出功率发生波动，且波动频率为 $\Delta f = \frac{2v}{\lambda}$ 。

可以发现自混合干涉后信号的波动频率就是激光与物体相互作用后形成的多普勒频移 $f_D$ 。

因此，物体的运动速度可以通过测量得到自混合信号的频率，用多普勒频移公式倒推得到。

光反馈因子：

$$C=\kappa\sqrt{1+\alpha^2}\frac{\tau}{\tau_{in}} \quad (2)$$

其中 $\kappa$ 为耦合系数， $\alpha$ 为线宽展宽因子。

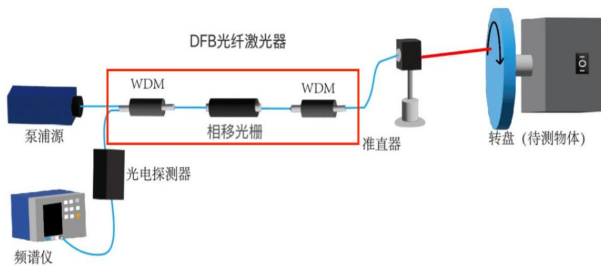


图1 自混合干涉光路图

Figure 1.Optical diagram of Self-mixing Interferometric

### 3 自混合干涉多普勒测速仿真模型构建

自混合干涉多普勒测速仿真虚拟实验要将线宽展宽因子控制在一定范围内变化，减少因条纹倾斜引起信号强度出现波动造成的影响，选择适度反馈水平中的光反馈因子 $C < 4.6$ 来进行仿真<sup>[8]</sup>，避免干涉信号波动大，条纹消失的情况并且忽略了光路衰减、环境扰动等次要因素。如图3所示，在控制混合参数 $C$ 、非线性系数 $\alpha$ 、总时间 $T$ 、采样点数 $N$ 、激光波长 $\lambda$ 、初始外腔长度 $L_0$ 的情况下改变目标运动速度 $v$ ，功率会发生改变，生成功率随时间的变化曲线。

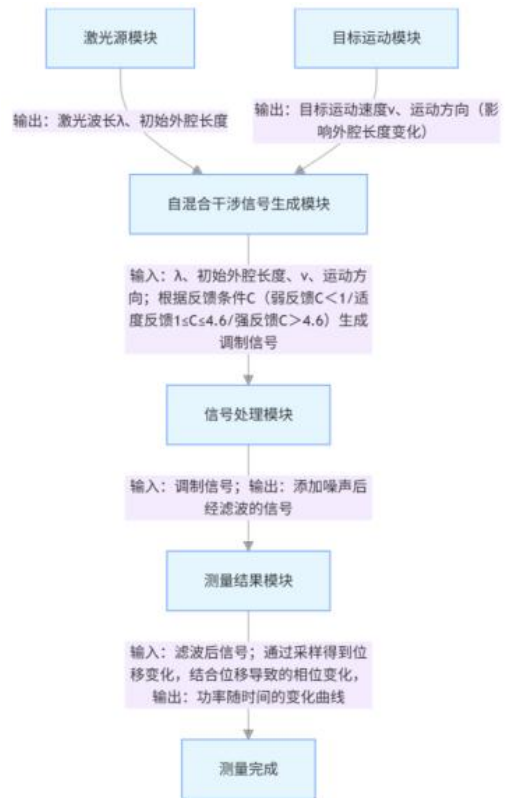


图2 自混合干涉测速仿真模型构建

Figure 2.Flow diagram of Self-mixing Interferometry Velocity Measurement Simulation Experiment

## 4 仿真虚拟实验

### 4.1 自混合干涉多普勒测速仿真

自混合干涉多普勒测速仿真的核心参数设置如表1所示，该参数组合经过多次优化，可保证干涉信号的稳定性与测量精度。

表1 自混合干涉测速仿真参数

Table 1.Simulation parameters of self-mixing interferometry for velocity measurement

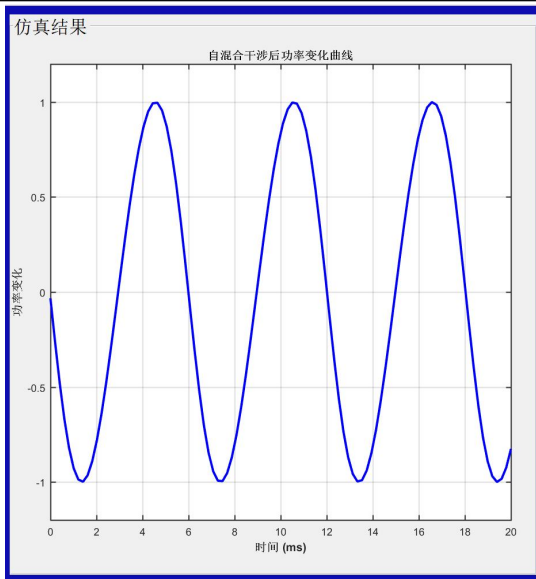
| 参数名称      | 设置数据   | 含义说明   |
|-----------|--------|--------|
| $\lambda$ | 1550nm | 激光波长   |
| $C$       | 0.1    | 光反馈因子  |
| $\alpha$  | 4.6    | 线宽展宽因子 |
| $T$       | 20ms   | 总时间    |
| $N$       | 100    | 采样点数   |
| $L_0$     | 0.1m   | 初始外腔长度 |

选取 0.05m/s、0.10m/s、0.15m/s、0.20m/s 四个目标速度进行仿真测试，实验数据记录如表 2 所示，对应的功率变化曲线如图 4 所示。

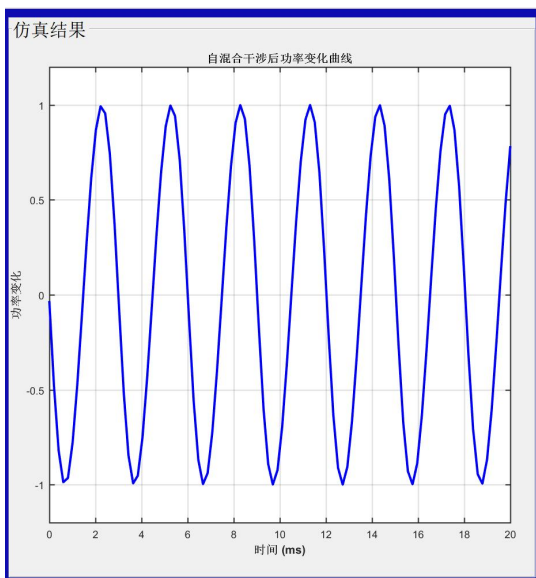
表 2 自混合干涉后数据记录

Table 2.Data recording after self-mixing interference

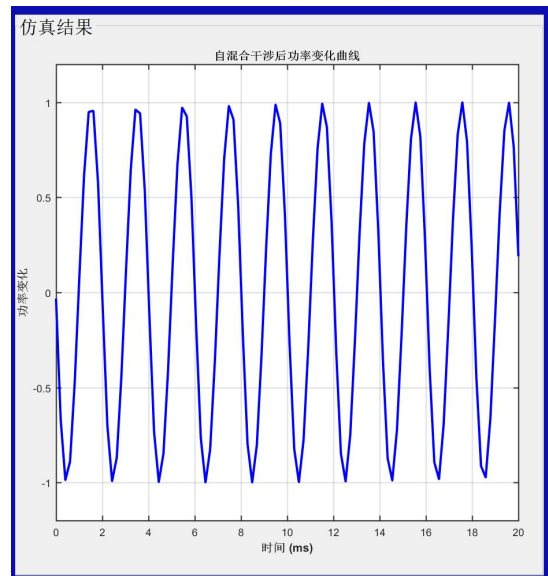
| 速度 V (m/s) | 测量频率 (Hz) |
|------------|-----------|
| 0.05       | 64516.13  |
| 0.10       | 129032.26 |
| 0.15       | 193548.39 |
| 0.20       | 258064.52 |



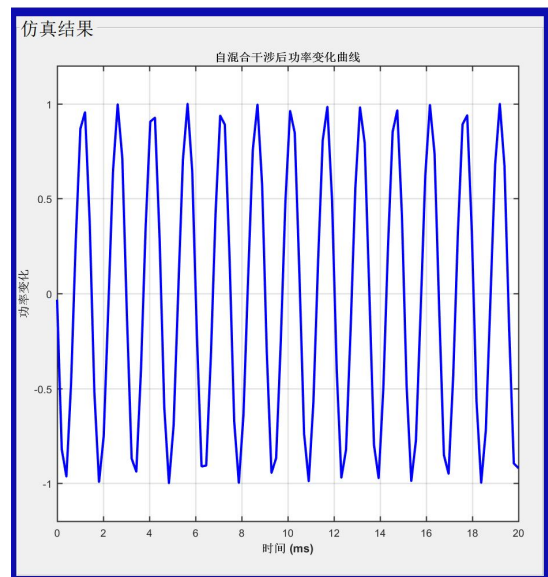
(a) v=0.05m/s



(b) v=0.1m/s



(c)v=1.0m/s



(d)v=2.0m/s

图 3 自混合干涉测速模拟

Figure 3.Simulation of Self-Mixing Interferometry Velocity Measurement

#### 4.2 配置要求

##### 4.2.1 硬件要求

- (1) CPU: Intel i5/Ryzen 5 64 位或更高 (4 核以上, 如 i5-12400)。
- (2) 内存: 16GB (处理 100MB 以上数据时建议 32GB)。
- (3) 显卡: 独立显卡 (如 NVIDIA GTX 1650 或 AMD RX 6400, 4GB 显存)。

#### 4.2.2 软件要求

(1) 操作系统: Windows10/11 64 位或 macOS 12+ 或 Ubuntu 20.04+

(2) MATLAB 版本:R2023b 及以上

#### 4.3 自混合干涉仿真结论

自混合干涉多普勒测速的结构中无需独立参考光路,仅依赖激光腔内光反馈效应,减少分束器、环形器等光路器件,硬件成本更低、体积更紧凑;物体运动方向改变时,功率变化曲线仅发生反褶(波形沿时间轴翻转),周期、振幅等核心特征不变,可稳定实现双向速度测量;通过调节光反馈因子( $C < 4.6$ )、线宽展宽因子( $\alpha$ ),可避免条纹倾斜、信号波动,确保干涉信号连续性(仿真中测量频率与理论频率完全一致)。

基于上述优势该方法适用于对硬件体积、成本敏感的场景,如小型设备的速度检测;需监测物体往返运动速度的场景,

如机械部件的往复位移测速;适合展示“光反馈-相位调制-功率变化”逻辑的教学。

从仿真实验数据与理论验证结果来看,自混合干涉多普勒测速技术能实现速度的高精度测量<sup>[9]</sup>。仿真数据显示,测量值与理论值完全吻合。自混合干涉的功率变化曲线遵循余弦规律,波动频率(即多普勒频移)与速度的线性关系符合理论推导( $\Delta f = 2v/\lambda$ ),无显著偏差。

#### 5 小结

本文基于多普勒效应进行了测速虚拟实验教学平台开发。该平台在实际教学中展现出显著优势。学生可以直观掌握自混合干涉的核心原理,深入理解多普勒频移与速度的线性关系。在实验中,支持速度、光反馈因子等关键参数的动态调节,提供采样时间与点数自定义功能,满足不同精度需求,学生可以通过该设计提升数据处理能力,同时规避实体实验的成本和环境干扰问题,显著增强抽象理论具体化与创新思维培养,为工科人才解决复杂光学测速问题奠定基础<sup>[10]</sup>。

#### 参考文献:

- [1] 顾婉莹.基于激光自混合干涉的速度测量及其应用[D].东北石油大学,2018.
- [2] 应筱艳.基于虚拟仿真平台开展初中信息技术实验教学的实践探索——以“声控灯的设计制作”为例[J].中国信息技术教育,2025,(13):66-69.
- [3] 安甲林.基于激光自混合干涉的速度与距离测量研究[D].西安电子科技大学,2024.
- [4] 郭明磊,韩易霖,葛念博.基于 MATLAB 交互式绘图的傅氏频谱分析[J].兴义民族师范学院学报,2025,(01):114-118.
- [5] 钱嘉炜.激光多普勒测速系统设计及数据处理技术研究[D].电子科技大学,2025.
- [6] 张思妍.全光纤非相干多普勒测风激光雷达鉴频系统对比分析及频率校正方法[D].西安理工大学,2024.
- [7] 袁锦源.基于激光自混合干涉的速度和距离同步测量研究[D].湘潭大学,2024.
- [8] 闫艳霞,任景英.光反馈水平因子的测量方法研究[J].郑州轻工业学院学报(自然科学版),2011,26(05):38-40.
- [9] 张海彤.基于激光自混合干涉的综合参数测量方法研究[D].天津理工大学,2020.
- [10] 孟宪乐,白文昊.虚拟仿真实验教学评价的指向、现实隐忧与规制之道[J].洛阳师范学院学报,2025,44(03):87-91.