

物理实验



基于数字示波器进行图像重建的原理和方法

黄张弛¹ 孔瑞飞¹ 翟立朋^{2,3} 常凯歌^{2,3} 张俊武^{2,3} 王小力^{2,3}(西安交通大学¹钱学森学院;²物理学院;³物理国家级实验教学示范中心,陕西 西安 710049)

摘要 数字示波器实验是大学物理实验课程中一项重要的基础实验。本文基于数字示波器中 XY 模式的工作原理,介绍了一种在数字示波器上对数字图像进行重建的原理和方法,使用数字示波器实现了图片的编码、解码和播放功能。本文所提供的方法和模型包含李萨如图形、数字图像信息处理方面的知识结构,综合性强,且实验平台所需要的耗材简单,可应用于大学物理实验项目的拓展设计。

关键词 数字示波器;李萨如图形;Matlab;数字图像

PRINCIPLE AND METHOD OF IMAGE RECONSTRUCTION BASED ON DIGITAL OSCILLOSCOPE

HUANG Zhangchi¹ KONG Ruifei¹ ZHAI Lipeng^{2,3} CHANG Kaige^{2,3} ZHANG Junwu^{2,3} WANG Xiaoli^{2,3}(¹ Qian Xuesen Honors College; ² School of Physics;³ National College Physics Experimental Teaching Demonstration Center, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi 710049)

Abstract Digital oscilloscope experiment is an important basic experiment in college physics experiment course. In this paper, we introduced the basic principle and experimental method of digital image reconstruction on digital oscilloscope in detail based on principle of XY mode in the digital oscilloscope, and built the experimental platform and successfully achieved the function to display images on digital oscilloscope. The experimental model provided in this paper includes multi-disciplinary knowledge such as Lissajous graph and digital image information processing methods, can be serving as an extension of the conventional physics experiment project.

Key words digital oscillograph; Lissajous graph; Matlab; digital image

数字示波器是一种应用非常广泛的电学测量仪表,可以将较为抽象的电信号或者能转换为电信号的其他抽象信号转化为可以被显示在显示屏上的波形图像,被称为“电子工程师的眼睛”^[1]。在大学物理实验课程中,为了锻炼学生的基础测试和应用能力,一般设计示波器实验的主要包括波形曲线观察、振幅测量、频率测量、相位差测量、

脉冲时间等方面的内容^[2-4],关于示波器的实验拓展一般主要聚焦于关于示波器在各个领域中的应用^[5,6]。

本文基于 Matlab,设计了一种利用数字示波器的 XY 模式对数字图像进行重建的物理模型,完成了对数字图像的编码,并在示波器上对数字图像信息进行了解码和复原。数字图像的编码与

收稿日期: 2023-02-07

基金项目: 2022 年西安交通大学本科实验实践与创新创业教育教学改革研究专项项目。

通信作者: 翟立朋, zhailp2018@xjtu.edu.cn。

引文格式: 黄张弛,孔瑞飞,翟立朋,等. 基于数字示波器进行图像重建的原理和方法[J]. 物理与工程, 2025, 35(3): 188-193.

Cite this article: HUANG Z C, KONG R F, ZHAI L P, et al. Principle and method of image reconstruction based on digital oscilloscope [J]. Physics and Engineering, 2025, 35(3): 188-193. (in Chinese)

重建技术主要包括算术处理、图像增强、图像复原、图像重建、图像编码、图像识别及图像理解等,在公共交通、空间探测、遥感、生物医学、安防、人工智能、工业检测等多个领域有着非常广泛的应用^[7]。本文所提出的方法和模型,一方面可以让学生对数字示波器的特性特别是其 XY 模式的工作原理以有更深刻的认识,也可以让学生对数字图像、声音等多媒体信息的组成方式和处理方式有更好的理解,进而提高物理实验项目的交叉性和高阶性和学生的综合实验能力。

1 图像重建的基本原理

1.1 数字示波器的 XY 模式

如图 1 所示,为大学物理实验室常用的 SDS 1102X-E 型数字示波器的界面。示波器一般有 X 和 Y 两个信号输入口,将两个随时间变化的信号 $x(t)$ 、 $y(t)$ 分别从 X 和 Y 两个端口输入,数字示波器可以同时显示并测量这两个信号振幅和频率等参数。

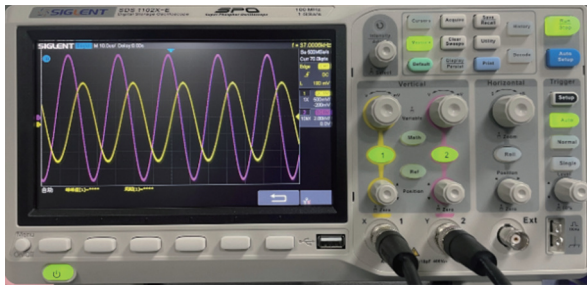


图 1 SDS 1102X-E 数字示波器界面

假设两个输入的信号 $x(t)$ 、 $y(t)$ 是标准的余弦信号:

$$x(t) = X_0 \cos(2\pi f_1 t + \varphi_1) \quad (1)$$

$$y(t) = Y_0 \cos(2\pi f_2 t + \varphi_2) \quad (2)$$

若两个信号频率的比值为整数比,即:

$$\frac{f_1}{f_2} = \frac{m}{n} (m, n = 1, 2, 3 \dots) \quad (3)$$

将式(1)和式(2)联立并消除其中的时间 t ,即可形成李萨如图形,在示波器上使用 XY 模式,即可将李萨如图形展示出来。如图 2(a)、(b)和(c)所示,分别为信号频率比为 $\frac{1}{1}$ 、 $\frac{1}{3}$ 和 $\frac{2}{3}$ 时的李萨如图形。

另外,式(1)、式(2)中的相位差可以表示为:

$$\Delta\varphi = |\varphi_1 - \varphi_2| \quad (4)$$

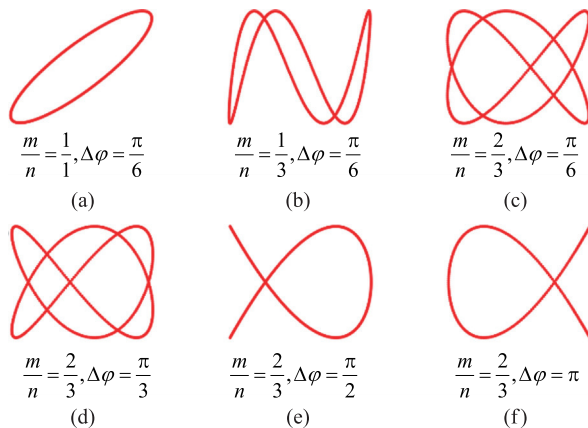


图 2 几种典型的李萨如图形

如果信号 $x(t)$ 和 $y(t)$ 的相位差固定为常数,不随时间发生变化,示波器上可以显示一个稳定的李萨如图形,此时相当于在示波器上显示了一张简单的图像。如果信号相位差 $\Delta\varphi$ 不太稳定,随时间的改变在不停的发生着改变,即:

$$\frac{d}{dt}(\Delta\varphi) \neq 0$$

则 $x(t)$ 和 $y(t)$ 形成的李萨如图形将在图 2 所示的(d)、(e)~(f)之间随时间的改变逐渐发生变化,此时相当于是在示波器上显示了一段简单的视频。

可以看出,在示波器上使用 XY 模式本质上是将 X 和 Y 两个相互独立的一维时间信号消除时间 t 后在相互垂直的方向上进行叠加形成的实时二维动态信息。示波器的 XY 模式结合李萨如图形在大学物理实验中有广泛的应用,一般可以使用李萨如图形测量未知信号的频率和相位差等信号参数^[2]。本文将基于该原理设计一种数字图像重建的原理和方法。

1.2 二值图像的重建与复原

示波器作为一种信息显示装置,其一般只用于显示信号的波形,并不用来显示灰度或者色彩,所以示波器上的信号曲线不具备 RGB 色彩显示功能,特别是在 XY 模式下只能显示二值信息,所以我们首先考虑将二值图像在 XY 模式下使用李萨如图形形成的方法在示波器上进行重建复原。

二值图像是指图像上的每一个像素只有两种可能的取值,且其在 Matlab 中以二维矩阵的形式保存。一个分辨率为 $m \times n$ 的二值图像在 Matlab 中对应一个 $m \times n$ 的矩阵,矩阵所包含的元素只

有 0 和 1 两种可能的取值。图 3 所示演示了一个简单的二值图像及其对应的数据结构,该图像所展示了一个二维椭圆曲线,图中每一个网格代表的是一个像素点,如果椭圆落在网格上,代表该网格处所对应的矩阵元素为 1,否则矩阵元素为 0。图 3 中所有“○”符号标识的位置代表此处的数据元素为 1,其他位置处的数据元素为 0。所以图 3 所示的椭圆曲线在 Matlab 中应该对应一个 11×10 的只包含元素 1 和元素 0 的数据矩阵。

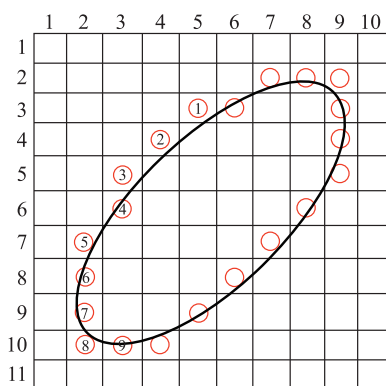


图 3 二值图像的坐标信息提取原理图

为了更方便的进行原理说明,在对椭圆曲线信息进行重构复原的过程中,将其中 9 个有“○”符号的数据点进行编号。当然,实际进行数据处理的过程中,需要对所有“○”符号对应的数据点进行编号标记,编号的先后顺序对复原结果没有影响,读者可以根据自己的喜好与习惯进行编号,但一张图片中的所有数据编号不能有重复。

随后将所有已经编号的数据点所对应的位置信息进行提取,本质上是将所有二值图像中元素为 1 的数据点对应的位置信息进行提取。图 3 中 9 个已经编号的数据点对应的行位置可以表示为:

$$Y = (3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 10) \quad (5)$$

同时其对应的列位置可以表示为:

$$X = (5, 4, 3, 3, 2, 2, 2, 2, 3) \quad (6)$$

为了更好的在示波器上进行显示,我们将提取到的 X 和 Y 数据进行对称处理,将 X 和 Y 信号均匀分布在 0 两侧:

$$Y_0 = Y - \frac{\max(Y) - \min(Y)}{2} \quad (7)$$

$$X_0 = X - \frac{\max(X) - \min(X)}{2} \quad (8)$$

将 X_0 和 Y_0 按照 $Y_0(X_0)$ 函数的方式进行作图,可得到如图 4 所示的二值图像图原图。复原后的

图像基本能够展示出原图的关键信息。如果想获得更精细的复原结果,需要将图 3 所示的网格缩小加密,网格越小代表二值图的像素越高,复原效果越好。



图 4 二值图像的坐标信息复原演示图

可以看出式(7)、式(8)所给出的 X_0 和 Y_0 相当于示波器的两个信号输入端口,按照 $Y_0(X_0)$ 的方式作图相当于在示波器上将两个信号的时间 t 做了消除,使用示波器上的 XY 模式进行显示,这样从原理上即实现了对二值图像的重构复原,即数字图像编码。

1.3 图像的二值化

如果原始图像是 RGB 彩色图像或灰度图像,想要通过上述李萨如原理在示波器上进行重现复原,则需要将 RGB 图像转换为二值图像。

本文基于 Matlab 进行图像的二值化处理。图 5 所示的 RGB 图像在 Matlab 中对应的是一个 $m \times n \times 3$ 的三维矩阵,其中 $m \times n$ 为图像的分辨率,3 个 $m \times n$ 的矩阵分别代表图像在每个像素点上的 R、G、B 分量。将每个像素点的 R、G、B 分量按照公式^[7]:

$$Gray = 0.299 \times R + 0.587 \times G + 0.114 \times B$$



图 5 原始图像

运算后可以得到一个 $m \times n$ 的矩阵 $Gray$,该矩阵即为灰度图像矩阵。 $Gray$ 矩阵中的元素介于 0~255 之间,每个元素的不同数值代表图像色彩的深浅和亮度。得到灰度图像以后,再设定一个阈

值 T , $Gray$ 矩阵中所有大于等于 T 的元素设定为 1, 所有小于 T 的元素设定为 0, 即可将图像 $Gray$ 转换成二值图。本文为了聚焦物理原理和物理模型的说明, 所选取的 RGB 图像色调相对单一。

将图 5 所示的 RGB 图像进行灰度处理以后的 $Gray$ 矩阵只有两种元素数据, 将非零元素设为 1, 可以得到需要的二值图像。对于色调较为复杂的其他 RGB 图像可以直接使用 Matlab 中的 `rgb2gray` 函数对图像进行灰度处理, 再使用 `im2bw` 函数将灰度图像进行二值化处理。如图 6 所示, 分别为图 5 所对应的灰度图像和二值图像。得到二值图像以后, 使用 1.2 节所描述的图像重建与复原的方法, 即可得到如图 7 所示的复原图。



图 6 原始图像对应的灰度图和二值图

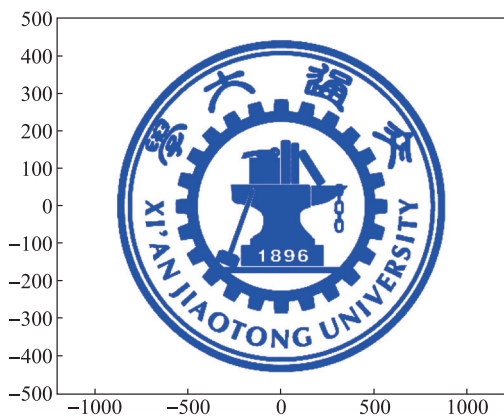


图 7 使用李萨如原理进行的理论复原图

2 实验设计与实施

2.1 图像信息的封装与传输

图像复原的关键点是将图像信息转化为类似于式(5)、式(6)两个信息列, 再将两个信息列传输给示波器, 在示波器上使用 XY 模式即可完成图像信息的重建。将式(5)、式(6)中的每个数据元

素对应到一个时间点, 即可将其行信息表示为:

$$y(t_1), y(t_2), \dots, y(t_n) \quad (9)$$

列信息可以表示为:

$$x(t_1), x(t_2), \dots, x(t_n) \quad (10)$$

可以把式(9)、式(10)行和列的信息分别表示为 $y(t)$ 和 $x(t)$ 。我们通过 Matlab 等计算机编程技术将图像信息转化为 $y(t)$ 和 $x(t)$, 但如何将两个信息 $x(t)$ 和 $y(t)$ 同时从计算机传输到示波器上是接下来需要在实验上进行设计的一个关键点。

我们关注到耳机线一般有左、右两个声道, 可以同时传输两列信息。图 8 所示为普通 3.5mm 耳机线的接口, 耳机接口上分别有左声道、右声道和地线三个接口。通过计算机将 $y(t)$ 和 $x(t)$ 信号分别封装为声音的左声道和右声道, 将耳机线的左、右声道分别连接示波器的 Y 输入和 X 输入, 再通过音频播放器将声音播放以后, 左右声道对应的 $y(t)$ 和 $x(t)$ 信号即可输入到示波器中。



图 8 音频接口示意图

上述得到的 $y(t)$ 和 $x(t)$ 是两个时间有限的信号, 经过音频播放器播放结束以后, 输入到示波器上的信号也将结束, 所以为了在示波器上得到稳定的图像信息, 需要将上述得到的 $y(t)$ 和 $x(t)$ 信号进行多次重复输出, 这样每一次信号重复相当于在示波器上播放了一帧视频。如果每一帧对应的图像都完全相同, 则可以观察到稳定的图像信息; 如果每一帧对应的图像不相同, 则可以观察到不断变化的图像, 即视频信号。

图 9 所示为 $y(t)$ 和 $x(t)$ 信息在音频输出过程中所对应的数据组装逻辑图。其中“图片 1”对

	一个视频帧				一个视频帧			
图片1	$x(1)$	$x(2)$	$\dots$	$x(n)$	$y(1)$	$y(2)$	$\dots$	$y(n)$
图片2	$x(n+1)$	$x(n+2)$	$\dots$	$x(2n)$	$y(n+1)$	$y(n+2)$	$\dots$	$y(2n)$
图片3	$x(2n+1)$	$x(2n+2)$	$\dots$	$x(3n)$	$y(2n+1)$	$y(2n+2)$	$\dots$	$y(3n)$

图 9 二值图像数据组装逻辑示意图

应的所有 x 和 y 应该在一个视频帧的时间内完成输出,第二个视频帧对应“图片 2”,依次类推。如果将帧率表示为 FPS ,则每一张图片的数据应该在 $\frac{1}{FPS}$ 秒内完成传输。音频传输过程中还有一个非常重要的参数“音频采样率”需要考虑,音频采样率指的是单位时间内的数据点个数,本文中用 f_s 表示,则每一个视频帧应该包含的数据点数量应该为:

$$n = \frac{f_s}{FPS} \quad (11)$$

如果我们在图 3 所示对数据点编号个数刚好等于 n ,此处不需要再进行特殊处理,否则我们还需要通过插值的方法将数据点的个数统一处理成 n 。是否需要插值处理取决于图像的分辨率,如果图像分辨率比较低,数据点编号的总量小于 n ,则需要我们通过插值方法将数据编号数量提高到 n ;如果图像分辨率比较高,数据点编号的总量高于 n ,则需要舍去一些数据点将数据编号数量降低到 n 。

图 10 所示为理论上设置不同音频采样率和不同视频帧率,其中图 10(a)~(d)可以看出在相同的音频采样率条件下,视频帧率越小图像的复原效果越好;图 10(e)、(f)、(d)可以看出视频帧率相同的条件下,音频采样率越高图像的复原效果

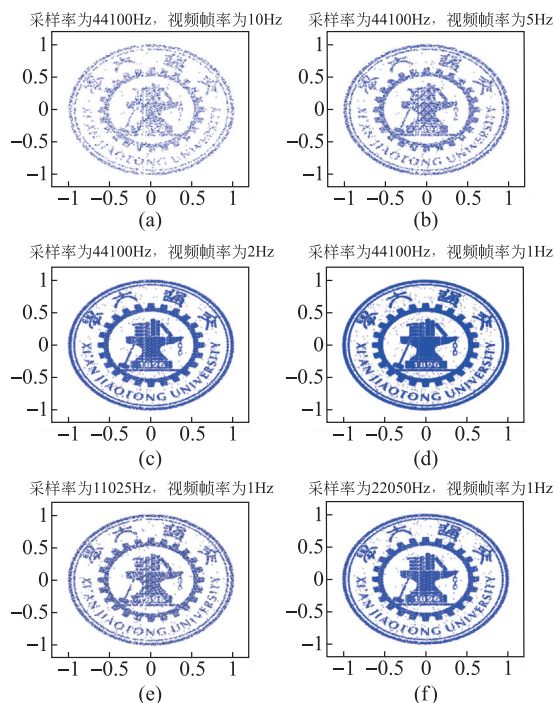


图 10 音频信号封装后不同视频帧率下的复原图

越好。本质上是公式(11)中的物理量 n 越大,代表数据点越多,图像的重构复原效果就越好。

2.2 实验平台的搭建与实施

基于上述实验原理和实验的设计思路,我们搭建了如图 11 所示的实验平台,通过实验平台我们将计算机、耳机接线与数字示波器相互连接起来,耳机线的左右声道分别连接示波器上的 X 和 Y 信号输入端口,并将示波器的显示模式设置为 XY 模式。

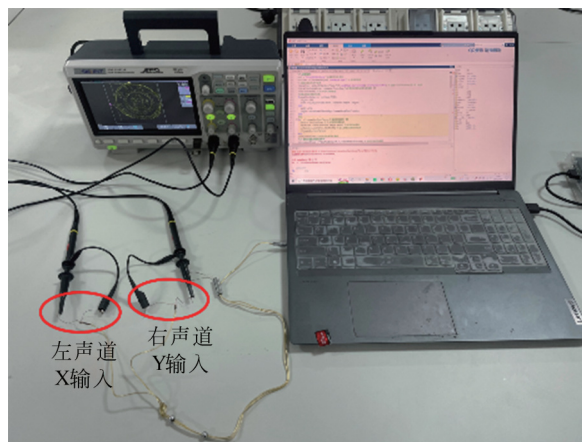


图 11 实验线路图

通过图 10 中对音频采样率和视频帧率参数的讨论,本文选择将声音采样率设置为最高 $f_s = 44100\text{Hz}$ 。同时为了避免人眼观感上的卡顿现象,视频帧率需要大于 25Hz ,所以在实验上我们设置视频帧率设置为 $FPS = 100\text{Hz}$,根据图 10 对视频帧率的讨论可以看出此时复原图清晰度不太高,所以在示波器上选择增强分辨功能。这样将封装好的音频使用音乐播放器进行单曲循环播放,缓慢调整示波器的时间扫描旋钮,当示波器的扫描时间与信息封装过程中每一帧所对应的时间 $\frac{1}{FPS} = 10\text{ms}$ 匹配时,即可得到如图 12 所示的稳

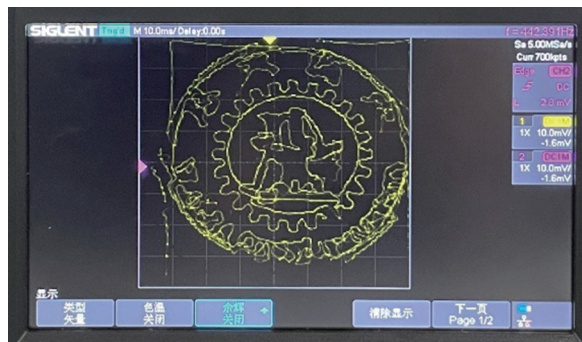


图 12 图像复原效果图

定复原图像,这样就实现了示波器播放图片的功能。

3 总结

本文详细介绍了使用数字示波器对数字图像进行复原的基本原理以及图像信息的封装原理,将转化后的图像信息通过普通音频接口从计算机传输到示波器上,最终实现了在示波器上播放图像的功能。本文从理论上探讨了声音采样率及视频帧率对图像复原效果的影响,即声音采样率越高复原效果越好,视频帧率越低图像复原效果越好,为图像复原实验的参数确定提供了理论支撑。本实验所需耗材价值极低,涉及大学物理、图像信息处理以及计算机编程等多个领域,极大地提高了大学物理实验课程与工科知识结构的交叉融合,可以为大学物理实验项目的拓展提供有效的支持。

参 考 文 献

- [1] 李林潇,江先阳. 基于 LabVIEW 的示波器控制与演示系统设计[J]. 物理实验,2018,38(增刊):103-107.
LI L X, JIANG X Y. Design of oscilloscope control and demonstration system based on LabVIEW[J]. Physics Experimentation, 2018, 38(S1): 103-107. (in Chinese)
- [2] 王红理,俞晓红,肖国宏. 大学物理实验[M]. 2版. 西安:西安交通大学出版社,2018. 08.

WANG H L, YU H, XIAO G H. University physics experiments[M]. 2nd ed. Xi'an: Xi'an JiaoTong University Press, 2018. 08. (in Chinese)

- [3] 王旗,胡广兴,杜安. 探讨数字示波器在大学物理实验教学中的应用[J]. 大学物理实验,2015,28(4):36-41.
WANG Q, HU G X, DU A. Discussion on application of digital oscilloscope in college physics experiment[J]. Physical Experiment of College, 2015, 28(4): 36-41. (in Chinese)
- [4] 吴功涛,史庆藩. 基于数字示波器的傅里叶分析实验的开发[J]. 大学物理实验,2012,25(5):44-46.
WU G T, SHI Q P. The development experiment of Fourier analysis based on the digital oscilloscope[J]. Physical Experiment of College, 2012, 25(5): 44-46. (in Chinese)
- [5] 朱江转,罗锻斌. 数字示波器实验内容的一个有趣拓展[J]. 大学物理实验,2017,30(2):86-88.
ZHU J Z, LUO D B. An interesting development of experimental content of digital oscilloscope[J]. Physical Experiment of College, 2017, 30(2): 86-88. (in Chinese)
- [6] 苗永平,王娜,孙二平,等. 应用于数字示波器实验的多功能实验仪研制[J]. 大学物理实验,2021,34(6):84-89.
MIAO Y P, WANG N, SUN E P, et al. Development of a multifunctional experimental instrument used in digital oscilloscope experiments[J]. Physical Experiment of College, 2021, 34(6): 84-89. (in Chinese)
- [7] 李峻山. 数字图像处理[M]. 4版. 北京:清华大学出版社,2021. 08.
LI J S. Digital image processing[M]. 4th ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2021. 08. (in Chinese)

(上接第 176 页)

“强基计划”班,践行了中学“英才计划”与大学“强基计划”的贯通培养。

3 结语

“中学生英才计划”以早期发现、培养青少年创新人才为初衷。本文针对新疆地区实施该计划面临的困难和挑战,以新疆大学物理学科为例,通过制订统一选拔标准、优化导师队伍、加强社会宣传、开放高校科研资源、建设数字教学平台等探索实践,有效解决了教育资源分布不均、选拔机制与培养过程不足、社会认知与支持较低等问题。在学生培养过程中,将立德树人教育理念贯穿始终,充分利用新疆大学优质科研教育资源,采用线上线下、虚拟实体平台相结合的方式,激发学生科研

志趣,着力培养自主学习、探索创新等综合能力,提升物理科学素养,对新疆地区拔尖创新后备人才培养模式进行了有意义的探索与尝试。

参 考 文 献

- [1] 叶之红. 关于拔尖创新人才早期培养的基本认识[J]. 教育研究, 2007(6):36-42.
YE Z H. Basic understandings on the early cultivation of top-notch innovative talents [J]. Educational Research, 2007(6): 36-42. (in Chinese)
- [2] 郭丛斌,曹连喆. “中学生英才计划”的推进历程与优化建议[J]. 中国基础教育,2024(6):47-50.
GUO C B, CAO L Z. The advancement process and optimization suggestions for the “Top-notch Talent Program for Middle School Students”[J]. China Basic Education, 2024(6): 47-50. (in Chinese)