

沉浸式数字地球人机交互参数优化技术

魏嘉焜, 王家润

(华北计算技术研究所, 北京 100083)

摘要: 数字地球应用广泛, 沉浸式人机交互成为其中研究热点之一, 设计实现一种沉浸式交互方案, 通过佩戴虚拟现实头戴显示器实现数字地球跟随头部运动; 但交互显示过程中存在数字地球漫游响应与用户动作不同步、显示不稳定等问题; 针对上述问题提出二分法与正交实验法融合的参数优化算法: 对影响交互效果的数据接收时间间隔、状态判别阈值、头部运动速率等影响因素采用二分法确定不同因素水平进行正交实验, 通过人员实际测试筛选出最优参数; 将最优参数应用到三维电子沙盘系统中, 数字地球响应与用户动作匹配、显示流畅, 验证算法有效性。

关键词: 沉浸式人机交互; 正交实验法; 二分法; 三维电子沙盘系统; 数字地球

Parameters Optimisation Techniques for Immersive Digital Earth Human-Computer Interaction

WEI Jiakun, WANG Jiarun

(North China Institute of Computing Technology, Beijing 100083, China)

Abstract: Due to the widespread application of digital Earth, immersive human-computer interaction has become one of the research hotspots. This paper designs an immersive interaction scheme, and achieves the digital Earth following the movement of the head by wearing a virtual reality head-mounted display. However, during the interactive display process, there are problems such as asynchronous response to the digital earth roaming response and user actions, unstable display, etc. To address the above problems, a parameter optimization algorithm integrating dichotomous method and orthogonal experiment method is proposed, the dichotomous method is used to determine the levels of different factors in the orthogonal experiments for the influencing interaction factors such as data reception time interval, state discrimination threshold, and head movement rate. Afterwards, the optimal parameters are screened out through actual personnel testing, and these parameters are applied to the three-dimensional electronic sand table system, the results show that the response of the digital Earth response matches user operation and displays smoothly, thereby verifying the effectiveness of the algorithm.

Keywords: immersive human-computer interaction; orthogonal experiment method; dichotomy method; three-dimensional electronic sand table system; digital earth

0 引言

三维电子沙盘系统作为重要的数据模拟与场景呈现系统被广泛应用在地物布局、建筑设计、策略推演等众多领域^[1-3]。该系统融合了计算机技术、地理信息系统和虚拟现实“virtual reality (VR)”技术作为背后的技术支撑, 如图1所示, 该融合技术不仅可以提供丰富的视觉效果, 还能够通过各类人机交互方式, 让用户进行数据分析和查询等操作^[4-5]。目前, 三维电子沙盘系统的人机交互方式主要以基于鼠标、键盘等传统交互方式为主, 存在交互手段薄弱、交互过程迟滞、缺乏沉浸式交互体验等问题, 难以满足现代化操作部署与人机交互

的需求。

为了扩展用户在人机交互中的交互能力, 提升用户与三维电子沙盘系统交互时的交互体验感, 研究者们于上个世纪展开研究, 多项工作成果^[6-7]中均提出了融合应用手势与语音的人机交互方法。此后, 文献[8]提出基于多点触摸的双手手势和语音两个通道实现态势和情报分析任务, 文献[9]设计实现了融合语音与手势的多模态标绘方法, 在军事应用领域提高了标绘交互自然性, 文献[10]提出利用语音、手势、指挥官经验协同控制人机作战的交互系统。文献[11]提出一种基于语音与手势交互的船舶航行系统智能化方案。如今, 基

收稿日期: 2024-09-18; 修回日期: 2024-10-29。

作者简介: 魏嘉焜(1996-), 男, 硕士研究生。

引用格式: 魏嘉焜, 王家润. 沉浸式数字地球人机交互参数优化技术[J]. 计算机测量与控制, 2025, 33(1): 301-310.

于手势与语音的交互技术因其应用频繁、表达含义丰富的特点仍然是各领域多模态人机交互技术的首选方案，多模态人机交互策略有待进一步拓展。

近几年，沉浸式可视化的出现为人机交互提供了一个融合了视觉、听觉和触觉等多个感知通道的新多模态交互界面。例如文献 [12] 提出了一种通过上肢可穿戴外骨骼和 Myo 手环检测操作者手臂和手部的运动状态来操控水下机器人的多模态人机交互控制方案。文献 [13] 开展了基于多种 VR 设备的多模态人机交互研究。文献 [14] 基于虚拟现实技术实现对心理沙盘功能特征的真实模拟，并采用相关技术增强用户的交互式视觉反馈，促进心理沙盘的开发和使用。

上述人机交互方案仍有提升空间，诸如缺乏沉浸感，交互体验感有待进步等。为了获得更加自然化、具备沉浸感的和谐人机交互环境，设计实现了一种佩戴 VR 头戴显示器与三维电子沙盘系统的虚拟现实交互方法，支持数字地球根据头部运动情况同步转动，但在实际的人机交互过程中，三维电子沙盘系统的数字地球跟随头部运动的可视化效果存在地图漫游响应与用户动作不同步、显示不平稳等问题。

为了解决上述问题，提升交互体验感与舒适度，需要对自主研发的 VR 头戴显示器数据驱动模型内部数据驱动解算与指令处理过程中产生主要影响的相关参数通过实验进行分析与探究，进而确定相关参数，以获得较理想的沉浸式人机交互效果。

第一章中，描述虚拟现实交互的基本流程。第二章中，提出参数优化算法改进交互效果的方法用以解决交互过程中出现的问题。第三章中，进行正交实验并得出结论。第四章中，通过实际应用验证算法有效性，并进行研究总结。

1 虚拟现实交互基本流程

如图 1 所示，用户可通过控制三维电子沙盘系统中的数字地球实现场景漫游功能。传统驱动场景漫游的方法不符合人机交互自然化理念，缺乏便捷性与沉浸感，用户的交互体验感亟待优化。

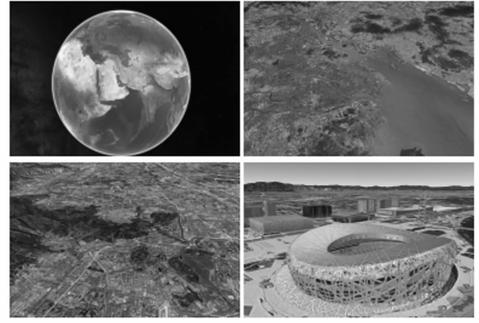


图 1 三维电子沙盘不同精细程度场景示意图

基于现代化人机交互的应用背景，结合用户获得具备沉浸感体验能力系统的期待，现采用具备实时位姿传感能力的 VR 头戴显示器作为人机交互显示设备与头部运动信息捕获设备，实现虚拟现实交互。当前各销售渠道中的主流 VR 头戴显示器参数对比见表 1。

表 1 主流 VR 头显参数对比表

	Arpara 5K	Pico 4	DPVR E4
分辨率/ppi	2 * 2 560 * 2 160	2 * 2 160 * 2 160	3 664 * 1 920
刷新率/Hz	120	90	120
重量/g	200	295	280
麦克	✓	×	✓

相比于 Pico 4、DPVR E4，Arpara 5K 设备以同时具备高分辨率、高刷新率、低重量、配有内置麦克风的优势被选用作为沉浸显示硬件资源。此外，由于 Arpara 5K 设备使用了双 Micro-OLED 5K 显示屏，且存在画面的合理畸变，产生一种类似电影巨幕在眼前的环绕感；屏幕中心画质最清晰，四周清晰度下降，便于将注意力集中在屏幕中央。基于以上优点，Arpara 5K 设备可以较好呈现三维电子沙盘系统中的各类场景可视化信息。

用户采用 Arpara 5K 头戴显示器作为 VR 交互设备与三维电子沙盘系统进行交互的交互流程示意图如图 2 所示。

首先，用户将 VR 头戴显示器的显示数据线与数据

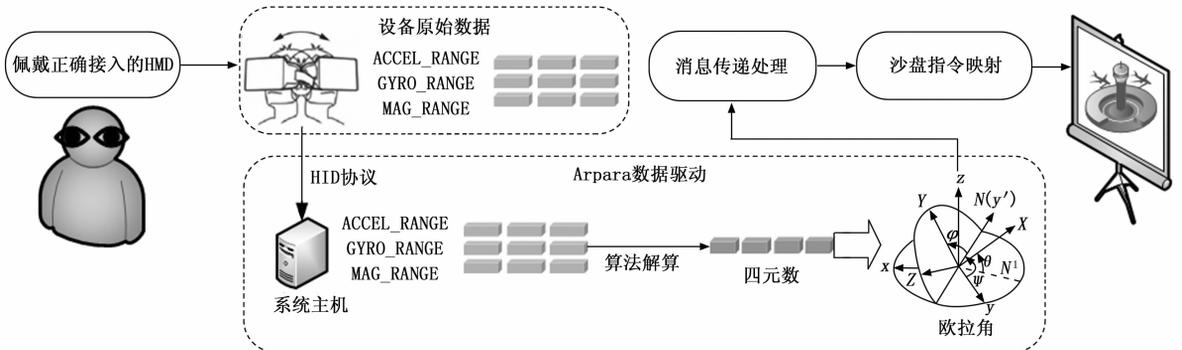


图 2 虚拟现实交互技术路线示意图

传输线接入计算机主机的对应接口中并佩戴好 VR 头戴显示器, 打开三维电子沙盘系统, 此时转动头部, VR 头戴显示器内置的惯性测量单元 “Inertial Measurement Unit (IMU)” 会产生对应的原始运动数据, 包括加速度计的三轴加速度数据、陀螺仪的三轴角速度数据与磁力计的三轴数据共计 9 组数据, 这些数据通过 usb 接口的 HID 协议发送给计算机。

其次, 为了让支持虚拟现实交互的三维电子沙盘系统在包括麒麟操作系统的多个操作平台上运行, 实现交互, 需要基于 openHmd 框架自主构建 Arpara 头部运动位姿解算数据驱动, 完成数据接收, 数据解算以及消息发送的工作。根据 HID 协议内容, 在接收数据中的第 3 个字节是 0x0A 时, 随后 9 个字节数据即为所需的 IMU 生成的数据。在得到 9 组原始位姿数据之后, 采用业界公认效果较好的 Madgwick 算法^[16], 将 IMU 传入的 9 组原始数据解算为一组四元数 $q = q_0 + iq_1 + jq_2 + kq_3$, 其中 i 等为虚数单位, q_0 、 q_1 、 q_2 、 q_3 为实数, 将此四元数进一步加以解算, 转换为大众熟知的欧拉角数据, 转换规则如公式 (1) 所示。在得到欧拉角之后, 就等同于得到了当前的运动方向与运动角度大小, 构建结构体类型消息, 向上层应用发送:

$$\begin{aligned} \varphi &= \arctan \frac{2(q_0 q_1 + q_2 q_3)}{1 - 2(q_1^2 + q_2^2)} \\ \theta &= \arcsin(2q_0 q_2 - 2q_1 q_3) \\ \psi &= \arctan \frac{2(q_0 q_3 + q_1 q_2)}{1 - 2(q_2^2 + q_3^2)} \end{aligned} \quad (1)$$

最后, 三维电子沙盘系统的指令处理模块会接收到运动位姿消息, 将该消息映射为对应的数字地球漫游指令, 驱动数字地球执行对应漫游操作。

2 算法分析

目前已经走通技术路线, 能令三维电子沙盘系统中的数字地球按照 VR 头戴显示器的运动位姿同步漫游, 实现了虚拟现实交互的基本功能, 但可视化效果并不理想, 存在较大的提升空间。

传统技术路线直接将解算得出的欧拉角作为消息向上层应用发送, 缺乏消息纠错, 发送频率控制等环节, 易与后续处理模块产生时间与空间上的冲突, 表现为交互显示过程中存在地图漫游响应与用户动作不同步、显示效果不平稳等问题。

为了解决此问题, 以获得更好的人机交互效果, 需要优化消息传递处理的过程。如图 3 所示, 提出一种沉浸式数字地球人机交互参数优化算法, 针对在消息传递处理过程中涉及头部运动情况、三维电子沙盘系统接收 IMU 数据情况、数据解算情况、消息发送情况等各方面可能影响人机交互效果的影响因素水平进行实验探究

与验证, 避免直接将一组连续运动的 IMU 原始数据解算后的位姿数据作为消息向指令处理层传递产生的问题。该算法将根据设定的最佳参数阈值判定规则, 通过正交实验得出最优参数, 优化位姿消息传递处理的过程, 获得更为理想的人机交互效果。

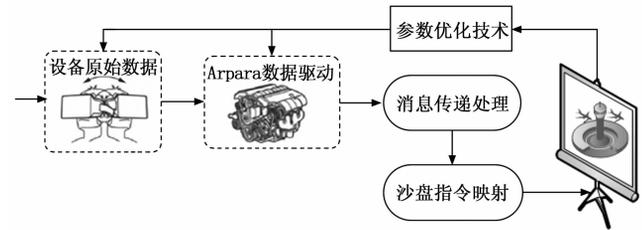


图 3 改进后的部分技术路线示意图

2.1 影响因素筛选

1) 接收 IMU 运动数据的时间间隔: VR 头戴显示器设备产生数据的时间间隔与系统运行中数据传递与算法执行的时间消耗存在矛盾。VR 设备中 IMU 生成原始运动数据的频率较高, 产生数据的时间间隔为 20 ms, 系统运行中数据传递与算法执行的时间消耗因软硬件环境问题无法确定, 若将每组产生的数据均进行解算, 转换成位姿消息向外发送的话, 可视化效果较差, 缺乏实际的应用价值, 将接收 IMU 原始运动位姿数据的时间间隔 “TimeInterval” 作为一个影响因素, 通过实验, 选择实际应用价值最高的因素水平。

2) 判断静止/运动状态的阈值: 本研究发现在佩戴 VR 头戴显示器设备在与三维电子沙盘系统进行交互时, 虚拟场景会不断出现小幅度的颤动, 这是由于人头部难以静止导致画面抖动剧烈, 影响用户正常观测场景。同时, 即便是应用领域更加广泛的 HOLOLENS, 在成功与虚幻引擎 “Unreal Engine, UE” 连接, 并安装 UE 中适配 HOLOLENS 的插件之后, 在进行位姿跟踪时仍然会出现相同的问题, 故可以确定需要进行优化的研究点, 提出设定判断稳定静止状态与运动状态的阈值 “MotionThreshold”。若阈值设定数值太大, 系统识别运动位姿变化不敏感, 用户小范围的位姿运动便不会被捕捉到, 容易让用户感受到的情况可能是延迟高, 不准确, 难以观察到合适位置。如果数值太小甚至于没有数值, 那么情况将和上述提到的 HOLOLENS 在 UE 中的增强现实交互可视化效果类似, 屏幕视野不断抖动, 可视化效果不好, 容易导致眩晕, 此因素的参数阈值还应该联合接收消息时间间隔, 进行联合调整。

3) 头部运动速率: 头部运动的速率在人机交互过程中影响 IMU 获取数据值大小的根本影响因素, 是需要考虑的试验因素之一, 通常情况下, 人们转动头部的速率虽存在一定的差异, 但因为人类的生理学构造与生

物学特征基本相同，所以头部运动的速率在相同测试要求下大致相同。

4) 运动方向轴差异：基于人体工学的原因，pitch 轴向与 yaw 轴向的运动幅度存在明显的大小区别，因为生理问题或坐姿与生活习惯等问题，部分人在仰头至面部与地面水平时，存在颈椎疾病引起的大脑缺血缺氧、大脑供血不足、前庭功能不佳等问题，从而导致头晕。同时，基于人体物理结构的原因，在直立情况下低头至面部与地面水平存在困难。因此人们通常在垂直角度（点头，仰头）的运动幅度（小于 180°）小于水平转动头部的运动幅度（约为 180°），但该因素并不会对人机交互效果产生重要影响，无论头部运动幅度大小，系统均可识别，不存在系统对头部水平转动的响应比对头部垂直运动的响应更敏感的情况，因此该因素不能作为正交实验的影响因素。

2.2 算法流程概述

通过判断可以得出：接收 IMU 运动数据的时间间隔、判断静止/运动状态的阈值、头部运动速率 3 个因素之间存在相互影响、相互作用的关系，故上述 3 个因素可以被称为影响因素。

为了确定这 3 个影响因素的最佳参数，提出沉浸式数字地球人机交互参数优化算法，算法主要步骤流程图如图 4 所示。算法开始，首先，应用二分法生成 TI、MT 这两个影响因素的参数阈值线段树，截取所需节点进行正交实验，根据提前设计的计算方案处理实验人员得出的原始实验数据，经过进一步计算得出实验结论，并给出评价，再判断线段树是否需要剪枝，若需要则进行剪枝，在得到经过剪枝的线段树后重复正交实验与评价的步骤，若无需进一步剪枝，则可以确定影响因素的合理参数阈值，算法结束。

3 二分法与正交实验法融合实验

3.1 各参数区间二分法划分阈值

基于理论依据与实际应用需要，为了尽快探究出最

佳因素的合理水平，令最佳区间尽快收敛在一个合理的范围，需通过二分法确定区间待测值大小，并依据二分法将此范围逐层拆解为线段树（一种二叉搜索树的分支），如图 5 所示，具体细分程度以叶子节点范围无法继续拆分为两个节点范围均大于等于 2 个数值的范围为准。

考虑到未来应用场景改变、用户二次开发可能性与用户使用的便捷性，在交互功能开发的最初阶段，将“MotionThreshold”定义为整形（int）变量，后续实际应用或者二次开发均更加方便，因此在二叉树划分的整个区间范围内不包含小数，若将区间划分为 [0°, 9°]、[9°, 18°]，那么“9°”将同时出现在两个不同的区间中产生重复，故采用文中不连续分段的方法，其他的树亦同理。

选用的 VR 头戴显示器型号为 Arpara 5K，其内置 9 轴传感器支持的最大采样频率为 50 赫兹（默认的

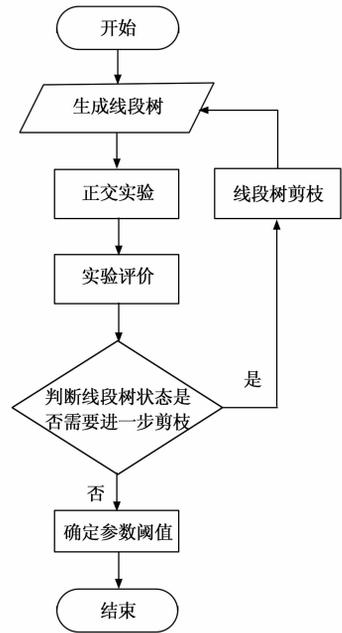


图 4 参数优化算法流程图

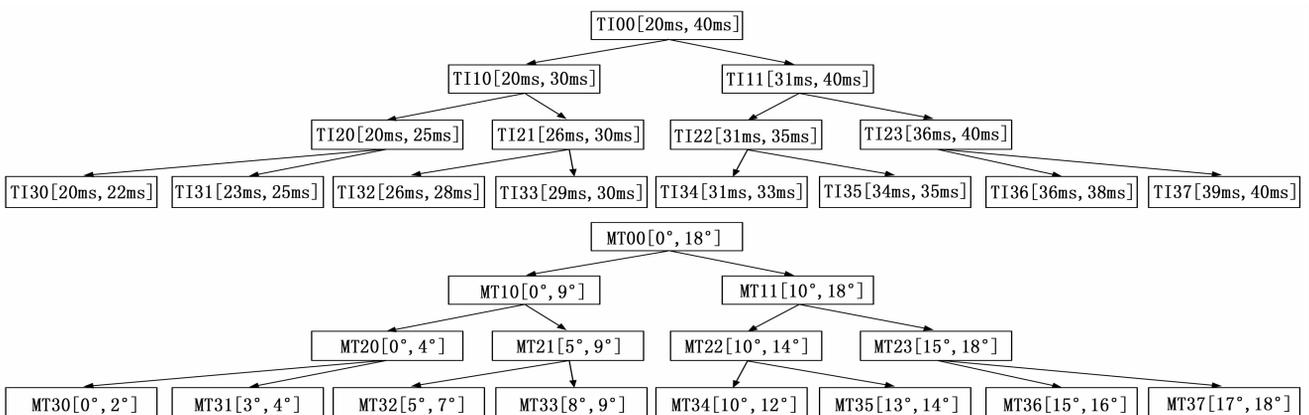


图 5 经二分法分解的影响因素线段树

IMU 数据采集频率)。同时, 考虑到人眼视觉暂留的生理学特性, 能感受到连续运动的场景变化的最低频率是 25 Hz, 因此在接收 IMU 原始运动位姿数据的时间间隔这一影响因素上, 确定参数阈值的区间范围为 [20 ms, 40 ms]。

判断稳定静止状态与运动状态的阈值 “Motion-Threshold” 是一个角度阈值, 角度标准角度区间为 [0°, 360°]。文献 [17] 的实验内容表明, 通常人自主转动头部的极限转动速率约为 410°/s。考虑误差的基础上, 以文献 [17] 为依据, 本研究将人头部极限转动速率设为一个运动区间, 本研究取区间 [400°, 450°], 包含文献 [17] 中的数据。已知最低的接收 IMU 原始运动位姿数据的频率 25 Hz, 在头部极限转动速率阈值最大时, 计算每次识别 IMU 运动位姿数据时刻可获得平均最大改变角度约为 18° (450°/25=18°), 确定阈值区间为 [0°, 18°], 以此来研究不同阈值对交互效果的影响。

构建两个线段树中每个区间节点的命名规则以影响因素英文关键字缩写与行号列号相结合的方式命名, 以数字 “0” 为开始, 例如 “TI00” 为获取 IMU 原始运动位姿数据时间间隔 TI 线段树的根节点, “MT21” 为判断稳定静止状态与运动状态的阈值 MT 线段树第三层的第二个节点。在试验阶段遴选数据时, 每个关键字代表区间的中间值。

将用户佩戴 VR 头戴显示器进行人机交互时头部运动的具体速率 “Rate” 分为 “慢 (RateSlow, RS)”, “适中 (RateMedium, RM)”, “快 (RateFast, RF)” 3 个级别, 各运动速度级别通过公式 (2) 确定:

$$Rate = \frac{RotationAngle_{total}}{TimeSegment} \quad (2)$$

式中, $TimeSegment$ 为统计时间段, $RotationAngle_{total}$ 为统计时间段内的运动角度之和, 通过计算二者的商得出平均运动速度大小, 并根据速度大小将 “Rate” 分为 3 个级别作为该影响因素的 3 个水平。每种级别对应的具体运动速度见表 2。

表 2 运动速率分级范围示意图

速度级别	平均速度值/ (°/10 s)
RateSlow	<2 000°/10 s
RateMedium	2 000°~2 500°/10 s
RateFast	>2 500°/10 s

3.2 正交实验设计

沉浸式数字地球人机交互参数优化正交实验的三因素为:

1) 接收 IMU 运动数据的时间间隔 TI ;

2) 判断静止/运动状态的阈值 MT ;

3) 头部运动速率 R 。

对应各影响因素的因素水平均通过计算各个区间范围的中间值得出, 实验表格各影响因素的数字即代表对应线段树节点的中间值。正交试验法利用规格化的正交表设计试验方案和分析试验结果, 能够在众多试验条件中, 以多维度立体交叉方法选取代表性强的试验条件, 并通过不同实验条件下的试验数据, 分析各因素对试验结果影响的大小, 从而抓住主要因素, 并求解出符合期望的适宜方案, 因此, 本研究采用正交实验法针对 TI 、 MT 、 R 这 3 个影响因素的各因素水平采用层次化方法进行试验, 筛选出能带来舒适人机交互体验的因素影响水平。

3.3 首次正交实验与实验评价

首次选取的线段树如图 6 所示, 以 (TI00, TI10, TI11)、(MT00, MT10, MT11)、(RS, RM, RF) 构建三因素三水平的正交实验表格, 如表 5 所示。

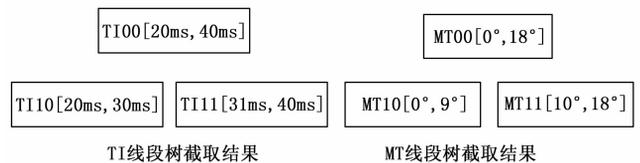


图 6 部分线段树截取结果图

选择两名实验人员 (开发人员与实验人员各一位) 在相同环境下分别对编号为 1~9 的实验项开展实验, 实验表格中的评分项为两名实验人员根据交互显示稳定性、摇摆程度、稳定性、场景变化程度与真实头部位姿运动幅度的差异性等多方面因素综合评价, 评分表细则如表 3 所示。在设计实验过程中, 对 V_1 、 V_2 、 V_3 、 V_4 这四个因素分别做了影响力量化评估。其中 V_3 取决于用户参与实验过程中对自身的控制, 评估结果表明, 影响力较小; 而 V_1 、 V_2 、 V_4 对实验结果的影响力相同, 分别指的是从沉浸式人机交互过程的流畅性、稳定性与

表 3 沉浸式数字地球人机交互参数优化正交

实验人员评价打分表

序号	评价项	分数
1	头戴显示器视野中显示流畅性如何?	V_1
2	头戴显示器视野稳定性 (存在摇摆晃动的程度) 如何?	V_2
3	头戴显示器视野显示漂移误差 (实验人员尽量控制头部定住不动时场景的变化幅度) 如何?	V_3
4	感知到头戴显示器视野漫游的幅度与真实头部运动幅度差异的大小 (场景漫游准确性) 如何?	V_4
备注	分值范围为 0~10 分, 对应评价项内容符合程度 (0 为最小, 10 为最大)	

准确性方面对实验结果产生的影响。如公式 (3) 所示, 加权平均公式对不同参数的加权处理, 可以提高评估准确性和可靠性。经实际验证证明, 该公式计算方案具备合理性, 符合实际:

$$\bar{V} = 0.3 \times [V_1 + (10 - V_2) + (10 - V_4)] + 0.1 \times V_3 \quad (3)$$

两位实验人员在完成实验后, 根据表 3 细则进行评分, 首次正交实验原始数据表如表 4 所示, 表 4 中的“均值 1”、“均值 2”通过加权平均值计算方案计算得出。

表 4 首次正交实验原始数据表

实验号	项号	分值 1	分值 2	均值 1	均值 2
1	1	8	6	6.2	6.0
	2	4	4		
	3	8	9		
	4	6	5		
2	1	9	8	6.9	7.2
	2	2	3		
	3	3	6		
	4	5	3		
3	1	6	7	4.1	6.2
	2	4	3		
	3	2	8		
	4	9	6		
4	1	7	7	5.4	6.0
	2	4	5		
	3	6	6		
	4	7	4		
5	1	8	6	6.5	6.3
	2	3	3		
	3	5	6		
	4	5	4		
6	1	7	8	4.4	7.0
	2	5	3		
	3	2	7		
	4	8	4		
7	1	7	7	5.6	6.0
	2	4	4		
	3	2	3		
	4	5	4		
8	1	7	7	5.5	5.6
	2	5	5		
	3	4	5		
	4	5	5		
9	1	7	7	5.0	5.5
	2	5	4		
	3	5	4		
	4	7	6		

极差 $EP = \text{评分最大值} - \text{评分最小值}$ 。用同一因素各个水平下极差大小可表达各因素自身因素水平变化对实验结果产生影响的大小, 极差大则表示该因素的水平

变化对实验结果产生较大影响, 反之则说明产生的影响较小。

表 5 中 $K1, K2, K3$ 分别表示在各因素各水平下佩戴 VR 头戴显示器与三维电子沙盘系统进行交互的可视化反馈效果得分, $A1, A2, A3$ 分别表示在各因素各水平下佩戴 VR 头戴显示器与三维电子沙盘系统进行交互的可视化反馈效果得分的平均值, 本研究实验中一般用评分的平均值大小来反映同一个因素的各个不同水平对实验结果的影响的大小, 并以此确定该因素应取的最佳水平。

表 5 三因素正交实验数据统计表

因素 实验号	TI	MT	R	评分
1	00	00	RS	$6.2 + 6.0 = 12.2$
2	00	10	RF	$6.9 + 7.2 = 14.1$
3	00	11	RM	$4.1 + 6.2 = 10.3$
4	10	00	RF	$5.4 + 6.0 = 11.4$
5	10	10	RM	$6.5 + 6.3 = 12.8$
6	10	11	RS	$4.4 + 7.0 = 11.4$
7	11	00	RM	$5.6 + 6.0 = 11.6$
8	11	10	RS	$5.5 + 5.6 = 11.1$
9	11	11	RF	$5.0 + 5.5 = 10.5$
$K1$	36.6	35.2	34.7	
$K2$	35.6	38.0	34.7	
$K3$	33.2	32.2	36.0	
$A1 = K1/6$	6.1	5.9	5.8	
$A2 = K2/6$	5.9	6.3	5.8	
$A3 = K3/6$	5.5	5.3	6.0	
极差 EP	0.6	1.0	0.2	
最优方案	$TI00$	$MT10$	RF	

本次正交实验结论表明:

①各因素对实验的影响程度按由大到小排序分别为: 判断静止/运动状态的门槛阈值 $MT >$ 接收 IMU 运动数据的时间间隔 $TI >$ 头部运动速率 R 。

②主要因素应取最佳水平, 即本实验中的“判断静止/运动状态的门槛阈值 $MT = 4^\circ$ ”。

③次要因素应根据软硬件水平、设备使用舒适度等因素综合考虑选取适当水平。

④本实验中可选择较好的“接收 IMU 运动数据的时间间隔 TI ”为 $TI = 30 \text{ ms}$ 。

⑤本实验中与头部运动速率因素相关的得分极差 $EP = 0.2$, 在 3 个影响因素的极差数值中最小, 可表示该影响因素的不同水平对实验结果带来的影响较小。

在后续实验过程中为了减少实验的次数以提高实验效率, 可忽略对实验结果影响最小的次要因素—头部运动速率 R , 从而突出另两个因素的水平给实验带来的影

响, 进而更加精确地选择出主要因素与次要因素的水平。

3.4 线段树剪枝

如图 7 所示, 根据首次正交实验得出的实验结论, 对相关影响因素线段树执行剪枝操作, 缩小实验范围。

3.5 二次正交实验与实验评价

二次正交实验应用第一次正交实验后对两个线段树剪枝的结果作为依据, 以 (TI00, TI10, TI20, TI21), (MT20, MT21) 构建双因素正交实验表格, 如表 7 所示。二次正交实验原始数据表见如表 6 所示。

本次正交实验结果表明: 主要因素应取最佳影响水平, 即接收 IMU 运动数据的时间间隔 $TI=30\text{ ms}$, 判断静止/运动状态的阈值 $MT=7^\circ$ 。

基于上述两次正交实验得出的实验结论, 认为当接收 IMU 运动数据时间间隔 $TI=30\text{ ms}$ 是该影响因素的最佳影响水平。

3.6 补充实验与实验评价

针对判断静止/运动状态的阈值 MT 这一影响水平, 在两次正交实验中均被评价为主要影响因素, 因此应选择实验中评分最高值对应的影响水平作为影响因

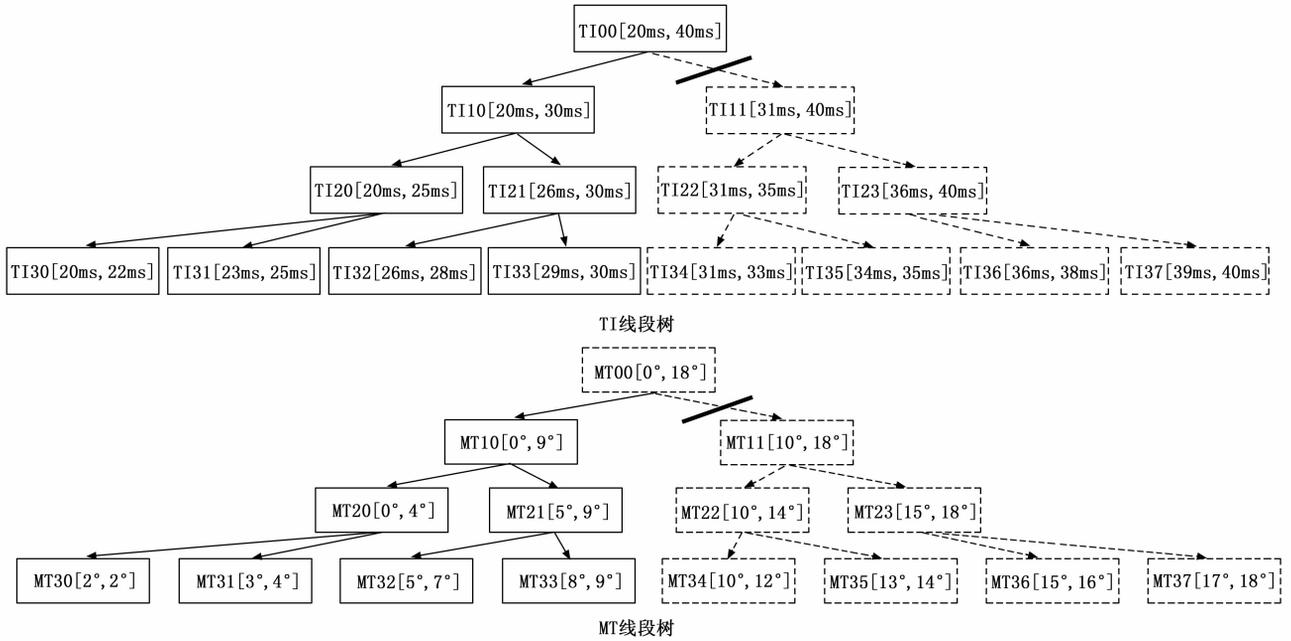


图 7 剪枝后的影响因素线段树示意图

表 6 二次正交实验原始数据表

实验号	项号	分值 1	分值 2	均值 1	均值 2	实验号	项号	分值 1	分值 2	均值 1	均值 2
1	1	6	8	6.0	6.2	5	1	5	6	5.4	5.9
	2	5	6				2	4	5		
	3	6	8				3	3	5		
	4	3	4				4	4	3		
2	1	8	9	7.3	8.3	6	1	7	6	6.3	6.2
	2	3	2				2	3	3		
	3	7	8				3	6	8		
	4	3	2				4	5	5		
3	1	7	8	6.1	6.4	7	1	7	8	6.4	7.1
	2	4	4				2	4	2		
	3	7	7				3	4	8		
	4	5	5				4	3	5		
4	1	7	8	6.0	6.8	8	1	7	7	6.0	6.8
	2	4	3				2	5	2		
	3	6	8				3	9	8		
	4	5	5				4	5	5		

表 7 双因素正交实验数据表

因素 实验号	TI	MT	评分
1	00	20	6.0+6.2=12.2
2	00	21	7.3+8.3=15.6
3	10	20	6.1+6.4=12.5
4	10	21	6.0+6.8=12.8
5	20	20	5.4+5.9=11.3
6	20	21	6.3+6.2=12.5
7	21	20	6.4+7.1=13.5
8	21	21	6.0+6.8=12.8
K1	27.8	49.5	
K2	25.3	53.7	
K3	23.8		
K4	26.3		
A1=K1/4&K1/8	7.0	6.2	
A2=K2/4&K2/8	6.3	6.7	
A3=K3/4	6.0		
A4=K4/4	6.6		
极差 EP	1.0	0.5	
最优化方案	TI00	MT21	

素的最佳影响水平，考虑到线段树每段都为一段数据区域，基于上述两次正交实验得出的实验结论将本研究中判断静止/运动状态的门槛值 MT 的合理范围为 [4°, 7°]，并采用控制变量法针对 MT 值进行实验，即在 TI = 30 ms 的条件下，仅改变 MT 的值，验证当 MT = 5° 或 MT = 6° 时的沉浸式人机交互效果，给出评分，补充实验数据表如表 8 所示。

表 8 补充实验数据表

因素 实验号	MT	评分
1	5°	6.3+7.5=13.8
2	6°	6.5+6.7=13.2

3.7 参数优化结论

综合两次正交实验与一次控制变量实验得出参数优化结论，在理想人机交互可视化效果下：

- 1) 接收 IMU 运动数据的时间间隔 TI = 30 ms；
- 2) 判断静止/运动状态的门槛值 MT = 7°；
- 3) 人机交互的可视化反馈效果对头部运动速率 R 相比另外两个影响因素不敏感，但在以较快速率转动头部时，可视化反馈更迅速。

4 综合应用验证

沉浸式人机交互实现需要软硬件同步支撑，包括国产台式机、VR 头戴显示器设备、操作杆等设备，主要硬件环境配置见表 9，主要软件环境配置见表 10。

表 9 硬件环境配置表

设备名称	配置
国产台式机	处理器:腾锐 2 000.8 核,2.3 GHz 操作系统:银河 Kylin V10 固件:昆仑固件 V4.0 内存:DDR4,2 * 8 GB 硬盘:固态硬盘,512 GB 显存:2 GB 及以上
VR 设备	视场角:95 度 双目分辨率:2 * 2 160 * 2 160 支持连接方式:有线 USB,Type-C 品牌型号:Apara 5K

表 10 软件环境配置表

类型	分类	操作语义
基础环境	操作系统	银河麒麟桌面操作系统(国防版)V10
	数据库软件	国产数据库管理系统(金仓数据库管理系统 V8.0.1)
	开发调试工具	VS2010/VS2015、Qt Creator
	编译器	gcc9.3
在研软件	应用软件	三维电子沙盘系统

经过参数优化后的 VR 交互功能以组件挂载的形式应用于某三维电子沙盘系统项目中。用户点击运行三维电子沙盘系统软件程序，将 VR 设备，操纵杆等设备接入台式机后，三维电子沙盘系统可识别出接入设备的设备信息。此时可直接通过操纵杆控制三维电子沙盘系统中的数字地球，实现人机交互。若要令三维电子沙盘系统的场景可跟随 VR 设备的运动位姿变化而变化，需要先佩戴好设备并开启位姿监控功能，并将 VR 设备放置在一水平位置一定时间进行校准后，即可实现具备沉浸感的多模态智能交互。

用户在佩戴好 VR 头戴显示器后可通过转动头部实现漫游功能，观察三维电子沙盘上不同区域内的场景信息。图 8 中展示的交互情况是佩戴 Arpara 5k 头戴显示器后与三维电子沙盘系统进行虚拟现实人机交互的过程，用户在 pitch 轴做俯仰偏转，可驱动三维电子沙盘系统中的数字地球随之在俯仰角度上发生改变，实现驱动场景响应用户动作的目标。交互过程中三维电子沙盘系统运行状态平稳，交互过程自然，相关功能执行正常，验证了经参数优化算法处理的虚拟现实人机交互方法的有效性。

5 结束语

通过自主构建的 Arpara 5K 数据驱动模型，结合后续的指令驱动映射模块，可实现佩戴 Arpara 5K 头戴显示器时，通过转动头部驱动三维电子沙盘系统中的数字地球场景跟随运动，实现具备沉浸感的人机交互。在此基础上，提出一种沉浸式数字地球人机交互参数优化方

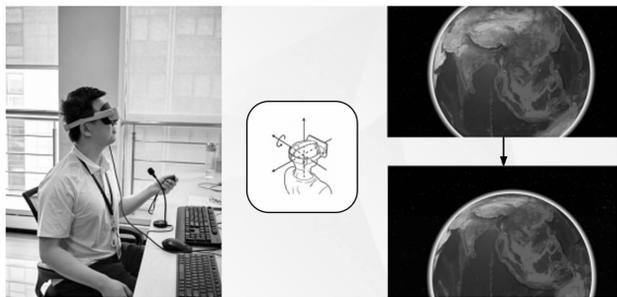


图 8 佩戴 Arpara 5K 设备实现虚拟现实交互实况图

法, 针对二分法处理得到的各因素水平采用正交实验方法对各个影响因素进行正交化组合实验, 以正交实验科学合理、高效准确地确定支持上述功能实现需要设置的参数, 经过参数算法优化过的相关参数可从显示流畅性、稳定性、准确性等多方面综合提升虚拟环境中数字地球人机交互的效果, 增强了用户的交互体验感。

为了进一步扩大交互自由度, 提升交互沉浸感与体验感, 同时考虑到多模态交互技术一直是人机交互领域的重点研究方向, 可计划增加其他模态的交互通道, 以多模态人机交互策略实现用户与三维电子沙盘系统的人机交互。可采用操纵杆实现场景平移漫游等交互操作扩展交互自由度, 进一步提升交互体验感。有关 Dof 的概念示意图如图 9 所示, 等同于将 Arpara 5K 头戴显示器这一 3Dof 设备直接扩展为当下硬件发展水平中先进的 6Dof 设备, 弥补硬件设备不足条件的同时, 创造更加自然化交互环境。另外, 随着计算机相关技术发展迅速, 有研究者已经开始增强现实电子沙盘的相关研究^[18], 取得了具备现实应用意义的部分成果。

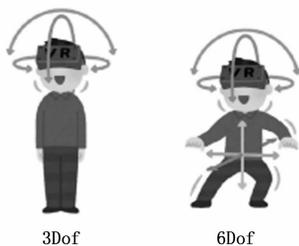


图 9 交互自由度示意图

如今, 全球环境正向着数智化发展, 结合虚拟现实、混合现实等新型技术, 可立足于多模态人机交互技术^[19], 研究全空间^[20]人机自然化交互策略, 扩展人机交互方案, 聚合感知控制等工具, 优化人机交互算法, 构建全空间、多维度、人机交互效果理想的电子沙盘系统。

参考文献:

[1] 钟庆华, 刘德军, 伍思同, 等. 基于 BIM 与 GIS 融合技

术的铁路三维电子沙盘系统设计研究 [J]. 铁道技术标准, 2024, 6 (5): 13-20.

[2] 苏向明, 彭贵旭, 李民生, 等. 三维电子沙盘交互展示应用设计与实现 [J]. 地理空间信息, 2023, 21 (4): 123-125.

[3] 王黎明, 文辉, 王英. 重庆市区域规划电子沙盘系统的设计与实现 [J]. 地理研究, 2005, 24 (2): 304-310.

[4] 滕绍江, 李振飞, 丰国炳, 等. 消防灭火救援电子沙盘系统 [J]. 消防技术与产品信息, 2003 (4): 22-23.

[5] 孟繁超, 季民, 孙勇, 等. 基于 Skyline 的人工影响天气电子沙盘设计与实现 [J]. 地理空间信息, 2020, 18 (5): 90-92.

[6] PAVLOVIC V I, BERRY G A, HUANG T S. Integration of audio/visual information for use in human-computer intelligent interaction [J]. IEEE Computer Soc International Conference on Image Processing, 1997, 1 (1): 121-124.

[7] CASSELL J, PELACHAUD C, BADLER N, et al. Animated conversation: rule-based generation of facial expression, gesture & spoken intonation for multiple conversational agents [C] //New York: Conference on Computer Graphics & Interactive Techniques, 2019, 413-420.

[8] 张国华, 老松杨, 凌云翔, 叶挺. 指挥控制中的多人多通道人机交互研究 [J]. 国防科技大学学报, 2010, 32 (5): 153-159.

[9] 朱鸿展. 融合手势与语音的多通道标绘交互技术研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2014.

[10] 李政通. 基于多通道人机交互的空战指挥发控制方法研究 [D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2023.

[11] 王卉, 高家骥, 曹福存. 多模态人机交互系统在船舶航行中的应用 [J]. 舰船科学技术, 2024, 46 (3): 157-160.

[12] 张学志, 谷亚伦, 林高, 等. 面向水下机器人的多模态人机交互控制 [J]. 自动化与仪表, 2023, 38 (10): 48-51.

[13] 郭洁畅. 多种 VR 设备下的三维模型交互技术研究 [D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2018.

[14] CAPECE N, ERRA U, MALANDRINO D, et al. Evaluation of virtual reality interaction techniques: the case of 3D graph [J]. ArXiv Preprint, 2023, 4 (11): 1-22.

[15] XIE S, LIU Z, TANG C, et al. Simulation and evaluation of mental sand table based on virtual reality [C] // China: International Conference on Consumer Electronics and Computer Engineering, 2023: 783-787.

[16] MADGWICK S O H, HARRISON A J L, VAIDY-

ANATHAN R. Estimation of IMU and MARG orientation using a gradient descent algorithm [C] // Switzerland: IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics, 2011: 1 - 7.

[17] WEI Q, LIU Z M. Head pose prediction method for immersive virtual reality systems [J]. Information and Control, 2019, 48 (1): 50 - 56, 64.

[18] 贺媛媛, 何欢, 窦雪倩, 等. 基于图像识别跟踪的增强现实电子沙盘电磁态势展示技术 [J]. 航天电子对抗, 2024, 40 (1): 12 - 17.

[19] 舒妍瑜, 李化东. 多模式人机交互技术在数智经营领域的应用 [J]. 中国金融, 2022 (s1): 102 - 104.

[20] 李争粉. 地理信息产业正在奔赴“三全”时代 [N]. 中国高新技术产业导报, 2024 - 09 - 09 (011).

激光切割玻璃片用线形激光束激光切割玻璃片 [J]. Optics & Laser Technology, 2007, 39: 892 - 899.

(上接第 186 页)

参考文献:

[1] 陈彦超, 冯永革, 张献兵. 用于半导体激光器的大电流纳秒窄脉冲驱动电路 [J]. 光学精密工作, 2014, 22 (11): 3145 - 3151.

[2] ZHOU Q, ZHOU C H, YU N. Narrow-spectral-span spectral beam combining with a nonparallel double-grating structure [J]. CHINESE OPTICS LETTERS, 2017, 15 (9): 091403.

[3] 韩鹏程, 赵长明, 纪荣祎, 等. 用于脉冲激光精密测距的半导体激光光源 [J]. 光学技术, 2010, 36 (2): 252 - 255.

[4] WANG Y Y, NIE G, HU C H, et al. High-sensitive terahertz detection by parametric up-conversion using nanosecond pulsed laser [J]. Chin. Phys. B, 2022, 31 (2): 024204.

[5] 陈晓, 谢小兵, 谢伟. 单频纳秒激光中心频率实时监测技术 [J]. 中国激光, 2017, 44 (11): 1101003.

[6] LI S G, LI H H. High-efficiency nanosecond optical parametric oscillator with the stable ring configuration [J]. Laser Physics, 2012, 22 (10): 1610 - 1614.

[7] DU J, SUN Y G, CHEN D J, et al. Frequency-stabilized laser system at 1572 nm for space-borne CO₂ detection LIDAR [J]. Chinese Optics Letters, 2017, 15 (3): 031401.

[8] ZHOU W, BAI S, MA Y, et al. Laser direct writing of silver metal electrodes on transparent flexible substrates with high bonding strength [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2016, 8 (37): 24887 - 24892.

[9] 张云飞, 李军. 激光加工技术在城市轨道交通车辆制造中的应用 [J]. 金属世界, 2017 (3): 19 - 22.

[10] 黄福民, 谢小柱, 魏昕, 等. 半导体晶圆激光切割新技术 [J]. 激光技术, 2012, 36 (3): 293 - 296.

[11] 王扬, 李春奇, 杨立军, 等. 非常规激光加工技术的研究 [J]. 红外与激光工程, 2011, 40 (3): 448 - 454.

[12] NISAR S, SHEIKH M A, LI L, et al. Effect of thermal stresses on chip-free diode laser cutting of glass [J]. Optics & Laser Technology, 2009, 41: 318 - 327.

[13] WANG Y Z, LIN JEHNMING. Characterization of the

laser cleaving on glass sheets with a line-shape laser beam [J]. Optics & Laser Technology, 2007, 39: 892 - 899.

[14] 杨依光, 周君玮, 徐立伟, 等. 用于管道焊缝检测的激光超声系统 [J]. 南通大学学报 (自然科学版), 2014, 13 (4): 17 - 21.

[15] 卢立斌, 王海鹏, 管迎春, 等. 激光微加工技术制备生物医用器械的现状与进展 [J]. 中国激光, 2017, 44 (1): 0102005.

[16] 张昭, 肖迎春, 李闵行, 等. 激光超声技术在航空碳纤维复合材料无损检测中的应用 [J]. 航空工程进展, 2014, 5 (3): 269 - 274.

[17] LENG J F, HAOS Q. Performance study of optical wireless communication system based on LDPC code and BP-PM [J]. Laser Technology, 2012, 36 (3): 334 - 337.

[18] 李怡勇, 王建华, 李智. 高能激光武器发展态势 [J]. 兵器装备工程学报, 2017, 38 (6): 1 - 6.

[19] 陈军燕, 杨春才, 张夏彬. 美军高能激光武器发展前景综述 [J]. 飞航导弹, 2016 (9): 16 - 20.

[20] ZERVAS M N, CODEMARD C A. High power fiber lasers; a review [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2014, 20 (5): 1 - 23.

[21] 王小林, 周朴, 粟荣涛, 等. 高功率光纤激光相干合成的现状、趋势与挑战 [J]. 中国激光, 2017, 44 (2): 0201001.

[22] HAYMAN C A, WEGNER P J, AUERBACH J M, et al. National ignition facility laser performance status [J]. Applied Optics, 2007, 46 (16): 3276 - 3303.

[23] JOLLY A, GLEYZE J F. Fiber lasers integration for LMJ [J]. Comptes Rendus Physique, 2006, 7 (2): 198 - 212.

[24] 宗兆玉, 许党朋, 田小程, 等. 高精度整形激光脉冲产生技术研究 [J]. 中国激光, 2017, 44 (1): 0105001.

[25] 许源, 王武, 倪小龙, 等. 一种 GaN FET 的窄脉冲激光器驱动电源系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2022, 30 (9): 272 - 279.

[26] 赵鑫, 李渊骥. 高峰值功率窄脉宽单纵模脉冲激光器的实验研究 [J]. 中国激光, 2017, 44 (5): 0501006.

[27] 高敏杰, 卜雄洙. 基于 FPGA 的可调谐半导体激光器驱动电路设计 [J]. 激光杂志, 2019, 40 (1): 115 - 119.