

VR 立体视觉硬件技术及 AI 空间智能展望

张燕, 苏强, 严勇
(北京航天发射技术研究所, 北京, 100076)

摘要: 总结 VR 立体视觉系统硬件建设的创新技术, 提出了人工智能 (Artificial Intelligence, AI) 生成基于模型系统工程 (Model-Based Systems Engineering, MBSE) 数字模型 VR 视觉的创新方法。通过优选大屏幕式、小间距 LED 显示屏、主动立体显示硬件, 创新实现了集科研演示验证、会议讨论功能于一体的高分辨率、多通道立体同步、多通道立体拼接的 VR 视觉硬件系统, 并通过数据驱动的 AI 算法, 准确高效地生成 MBSE 系统工程各类数字模型的 VR 视觉, 为 VR 系统的软、硬件建设提供技术借鉴。

关键词: VR; 立体视觉; 硬件; AI; MBSE

中图分类号: TJ768.2; V19 文献标识码: A

VR Stereoscopic Vision Hardware Technology and Prospects for AI Spatial Intelligence

ZHANG Yan, SU Qiang, YAN Yong
(Beijing Institute of Space Launch Technology, Beijing, 100076)

Abstract: The innovative technologies for the hardware construction of VR stereo vision systems are summarized and an innovative method for AI-generated VR vision of digital models in MBSE system engineering is proposed. By carefully selecting hardware such as large-screen displays, small-pitch LED displays, and active stereo display devices, the study innovatively realizes a VR visual hardware system that integrates high-resolution, multi-channel stereo synchronization, and multi-channel stereo stitching, all while incorporating functions for scientific research demonstrations, validation, and conference discussions. Furthermore, through data-driven AI algorithms, it accurately and efficiently generates VR vision for various types of digital models in MBSE system engineering. Technical references for the software and hardware construction of VR systems for other users are provided.

Keywords: VR; stereo vision; hardware; AI; MBSE

0 引言

当今计算机信息技术日新月异, 全球以人工智能 (Artificial Intelligence, AI) 为代表的第四次工业革命风起云涌。随着 OpenAI-Sora “视频”生成模型、GPT-4o 视觉全能大模型的算法出现, 显卡 GPU 对 AI 算力的架构性变革迅猛提升, Vision Pro 立体眼镜的发布、脑电图帽非侵入性脑机接口视觉技术的成功, 均不断向世人阐述着 AI 时代下的计算机视觉的大发展趋势。

1 数字产品视觉思维的价值

据研究资料表明, 人类 83% 对外部信息的感受、领悟、学习和记忆来源于视觉。其他五感接收外部信

息的比例分别为: 听觉 11%、嗅觉 3.5%、触觉 1.5%、味觉 1%。视觉是从“眼睛”采集信息开始, 通过“视觉脑”呈现其真正意义。大自然经过了 5 亿 4 千万年进化了视觉处理的器官——“视觉脑” (又称“大脑皮层系统”或“智能脑”)。“视觉脑”占据了人类整个脑容量的 2/3, 分为左右脑半球, 拥有 16 万亿个神经元。“视觉脑”喜欢图像, 能够“看”到事物的空间多维度, 并具有创造性的智慧。这是当今 AI 计算机视觉领域蓬勃发展的价值根源。

若能让科技人员生动地看到虚拟创造出来的基于模型系统工程 (Model-Based Systems Engineering, MBSE) 全生命周期的各类数字产品, 包括: 设计要求模型、功能模型、性能模型、物理模型、制造模

型、数字孪生模型等,将会极大地提升设计师队伍及产品用户通过“视觉脑”对数字模型产品的理解及沟通效率,从而进一步提高产品创新研制、演示验证、训练使用及运维保障的质量和效益。

2 优选VR立体视觉的硬件显示环境

虚拟现实(Virtual Reality, VR)是当今AI空间智能时代生成数字产品立体视觉方法中的一种。

VR涉及计算机图形学、立体显示、软件工程、电子信息、网络通信、空间定位与交互、人机接口、多媒体和AI算法等多种技术。

VR能对工程产品数字模型实现1:1全尺寸、高分辨率图像质量、最佳现场感的3D立体视觉效果展示,令人产生一种沉浸于等同真实环境的感受和体验。VR扩展了设计师队伍及产品用户的思维方式,把抽象、复杂的数据、模型转化为人们直观、熟悉的视觉立体空间事物,从而迅速地理解其研究创意及物理性能特点^[1]。

国际上,供多个设计师共同观看的VR立体视觉硬件显示环境一直采用的是CAVE式^[2]沉浸。随着科技进步,大屏幕式^[3]显示环境已具有了更好的沉浸效果。

CAVE式与大屏幕式在VR立体视觉硬件显示环境的特点对比如下。

2.1 CAVE洞穴式

由正、左、右、上、下侧面的五面体屏幕组成一个洞穴,形成立体沉浸感视觉。

a) CAVE式优点。

通过五面体屏幕的物理空间,将人置身于驾驶舱类产品的内部视角观看四周,以营造沉浸感,实现了同时几个人共享的大视角立体视觉虚拟环境。

b) CAVE式缺点。

1) 不适合从外部视角观看产品,此时左、右、上、下侧屏幕的存在均无意义;

2) 不适合漫游进入产品内部,此时左、右、上、下侧屏幕显示的图像并不是正面显示图像物体对应的真实四周,仅仅是正面显示模型图像的折弯,造成了立体视觉对理解物体真实状态的干扰;

3) 在一个狭小空间的洞穴内,不能同时观看到大尺寸产品全貌的动静态性能;

4) 在设计上仅限几个人同时沉浸观看;

5) 洞穴的屏幕多,需要至少五个通道的软硬件配置,价格昂贵。

2.2 大屏幕式

由正面的一个大幅面屏幕形成立体沉浸感视觉。

a) 大屏幕式优点。

1) 现在的立体视觉成像技术已经足够利用平面图像形成强烈的沉浸式立体视觉感受,无需依靠传统的物理空间包裹方式去营造沉浸感;

2) 可以从外部漫游至内部的任何视角去观看产品,立体沉浸式地看到产品内、外部的真实物理空间状态;

3) 空间大,能同时观看到大尺寸产品全貌的动静态性能;

4) 可同时实现几十人共享的大视角立体视觉虚拟环境;

5) 一字形设计简洁、可靠性高;

6) 一个大屏幕通道数少,软硬件配置少,价格低;

7) 能高效利用场地和硬件资源,还可兼顾培训及异地视频等多功能会议讨论的视觉需求。

b) 大屏幕式缺点。

大屏幕是一个完整面,其立体图像有任何的拼接、边缘融合瑕疵,立体视觉感受都会有明显影响。

2.3 显示环境优选结论

综上所述,大屏幕式的观看效果及性能配置等方面均优于CAVE式,所以VR立体视觉的硬件显示环境创新优选了大屏幕式。

3 优选VR立体视觉的硬件显示设备

国际上,供多个设计师共同观看的VR立体视觉硬件显示设备一直采用的是立体投影机^[2]。随着科技进步,小间距LED^[4]显示屏已具有了更好的立体显示效果。

立体投影机与小间距LED显示屏在VR立体视觉显示设备的特点对比如下。

3.1 立体投影机

立体投影机均是进口产品,有如下特点:

a) 分辨率(清晰度)不高,最高4K,且有散斑“毛玻璃”现象;色彩饱和度、对比度、亮度均偏低;刷新速率中等,为毫秒级;可视角偏低,为135°。

b) 购货周期长,单台费用高。多通道投影机融合区的边缘效应极为严重,损失比大,需要一次性购置多台。

c) 硬幕布难以通过狭窄通道运输,软幕布经长期存放后会产生皱褶和变形。安装空间需求大,需背光源投射。

d) 使用功耗高, 且需在暗光环境下使用。

e) 维护繁琐, 多通道投影机之间融合区会有变形, 日常需要几何光学校准, 更换易耗品的费用较高。

f) 寿命短, 典型寿命值为2万小时。寿命半周期后亮度迅速衰减, 直接影响画面效果。

3.2 小间距LED显示屏

小间距LED显示屏是自主可控产品, 特点如下:

a) 分辨率(清晰度)高, 可达到4K以上; 色彩饱和度、对比度、亮度均高, 且亮度可32级自主调节; 刷新速率快, 为纳秒级; 可视角高, 达到160°。

b) 费用低廉, 购货周期短。

c) 屏幕为单元块, 运输安装便捷, 屏幕自发光, 无需占用太多空间。

d) 使用功耗低, 可在任意光强环境下使用。

e) 无需维护, 拼接区无时效变形。无定期需更换的易耗品, 且坏品率极低。

f) 寿命长, 典型寿命值10万小时。亮度无衰减。

3.3 显示设备优选结论

综上所述, 小间距LED显示屏在清晰度、性价比等方面均优于立体投影机, VR立体视觉的硬件显示设备创新优选了小间距LED显示屏。

4 VR立体视觉的硬件技术及面临难题

LED大屏幕的立体显示技术主要分为两大类: 主动立体、被动立体。被动立体显示的图像不够清晰, 且对观看角度有要求。主动立体显示的图像加倍清晰、亮度和色彩饱和度更高、视角范围大、立体感更强。因此, VR立体视觉的硬件显示技术优选了主动立体。

为满足主动立体显示时人左、右眼各自获得连续流畅画面视觉感受的每秒60帧换帧频率要求, VR立体视觉必须达到每秒120帧的高换帧频率。

VR立体视觉的硬件创新优选了大屏幕式、小间距LED显示屏、主动立体显示硬件技术, 在高换帧频率立体视频的高分辨率、多通道立体视频的左右眼帧同步、多通道立体视频拼接后的画面完整方面面临着一些难题。

4.1 创新实现高分辨率主动立体视频传输

VR立体视觉的场地环境决定LED大屏幕的尺寸为: 长9.6 m、高2.7 m。LED像素点间距是1.667 mm, 即LED大屏幕共计有5 760×1 620个像素点。当LED大屏幕每一个像素点对点均收到视频数据时, VR立体视觉可呈现主动立体的6 K@120 Hz分辨

率的高清晰视觉效果。

VR立体视觉呈现于LED大屏幕的视频源头是图形工作站。其主要配置如表1所示。

表1 图形工作站的主要配置

Tab.1 The main configuration of a graphics workstation

序号	名称	主要配置	配置目的
1	显卡	NVIDIA QUADRO M6000, 显存24GB及以上	处理较大规模数字模型的视频数据
2	CPU	主频3.4G及以上	提高数字模型BOM多层级遍历速度
3	内存	64GB及以上	支持打开较大规模数字模型

VR立体视觉将一个完整画面分为左、中、右3部分, 由3台图形工作站从节点显卡各自负责提供2 K@120 Hz的渲染视频源, 分别经3个通道同时输出, 通过拼接控制器后传输至LED大屏幕, 最终呈现一幅完整的6 K@120 Hz高分辨率主动立体视频, 如图1所示。

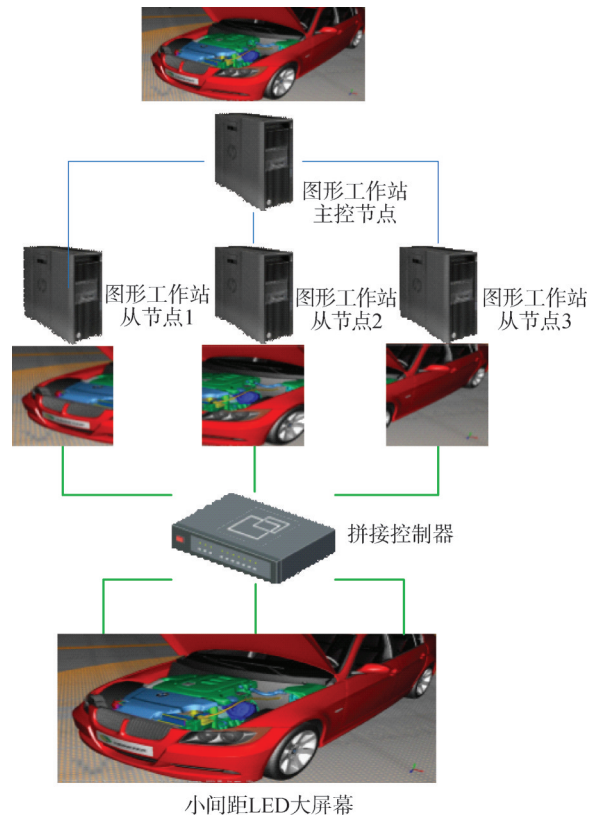


图1 三通道渲染视频源

Fig.1 The three-channel rendered video source

VR立体视觉的分辨率及换帧频率越高, 需传输的视频量越大, 相应需有足够高的视频传输带宽及其配套视频接口。VR立体视觉因拼接控制器、LED控

制器等主要元器件均采用了DVI视频接口，故VR全系统采用DVI视频接口。

在每秒120帧高换帧频率下，每路DVI视频线只传输2K分辨率数据。故VR立体视觉图形工作站从节点的显卡均连接了2路DVI，3台图形工作站从节点共计连接6路DVI，才能实现将6K@120Hz高分辨率的渲染视频源信息全部传输至拼接控制器。

传输至拼接控制器后，拼接控制器将6K@120Hz的渲染视频源信息再分为6路输出至6个DVI分配器，而后分18个LED控制器传输至LED大屏幕。每个LED控制器根据视频信号的拆分情况，显示渲染视频信号源的不同部分。最终在大屏幕上形成6K@120Hz主动立体的高分辨率视频，如图2所示。

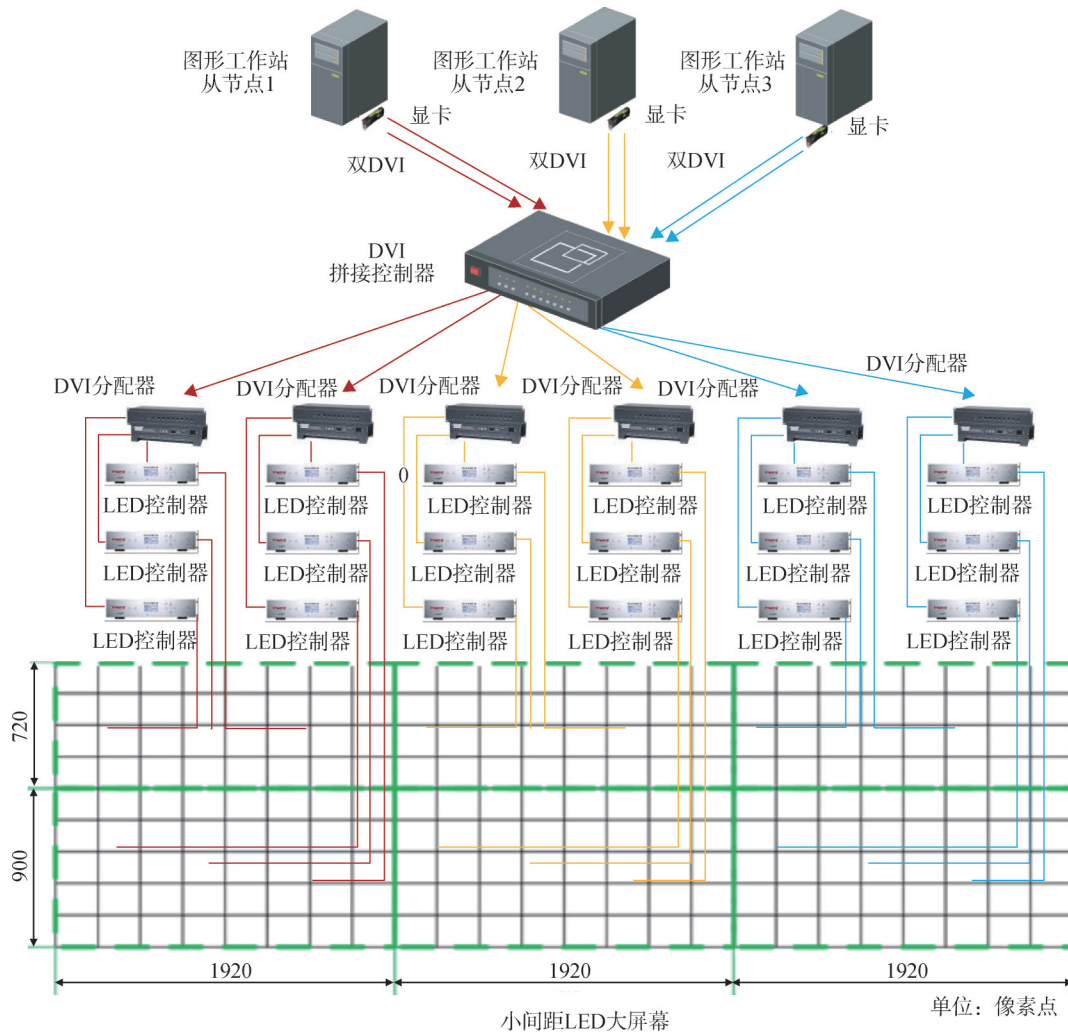


图2 6K@120Hz的视频传输
Fig.2 The video transmission for 6K@120Hz

4.2 创新实现多通道立体同步

立体同步信号应实现图形工作站显卡输出的渲染视频换帧频率与观众主动立体眼镜的切换频率及左右眼帧完全同步。

VR立体视觉理想的立体同步信号传输链路应为：3台图形工作站从节点视频源、拼接控制器、LED大屏幕、主动立体眼镜。

4.2.1 立体信号同步

3台图形工作站从节点均安装有立体信号同步卡，需要从节点2的同步卡外端口同时与从节点1及从节点3的同步卡外端口用网线连接，从而实现三通道视频源主动立体信号的完全同步。

接着再完全同步至拼接控制器，中间图形工作站从节点2的同步卡外端口与拼接控制器的入口端用网线连接，通过星形网线连接法，实现三通道视频源与

拼接控制器主动立体同步信号的完全同步。

4.2.2 LED大屏幕及立体眼镜的换帧频率同步

VR立体视觉共有18个LED控制器输出渲染视频至LED大屏幕，将18个LED控制器用网线首尾串联，从而实现整个LED大屏幕的换帧频率同步。

再将LED大屏幕的任意一个LED控制器与立体同步射频发射器用网线连接，主动立体眼镜接收到LED大屏幕发射的立体同步信号，从而实现立体眼镜左右眼的切换频率与LED大屏幕的换帧频率同步。

4.2.3 立体同步信号的传输

小间距LED显示屏配套的拼接控制器，只有接收主动立体同步信号的入口端，没有同步信号的出口端。其出口端仅有DVI视频接口，无法将三通道视频源的主动立体同步信号传至LED大屏幕。立体同步信号传输链路出现了断点。

当左眼看到渲染视频的右帧画面、右眼看到渲染视频的左帧画面，“视觉脑”不会生成凸出的身临其境的沉浸式立体画面，而会生成凹陷进平面内的反深度画面。每次VR立体视觉启动时，LED大屏幕三通道的左右眼帧随机。有的通道是正确的凸出立体沉浸感画面，有的通道则是错误的凹陷反深度画面，产生视觉混乱。

通过中控系统编写软件控制程序，打通拼接控制器与LED大屏幕之间的主动立体同步信号传输链路，从而实现三通道渲染视频与眼镜的主动立体信号完全同步，见图3。

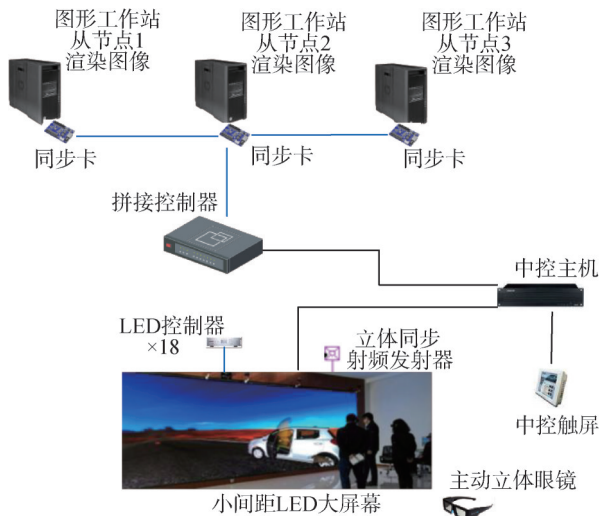


图3 主动立体同步信号的传输链路

Fig.3 The transmission link for the active stereo synchronization signal

4.3 创新实现多通道拼接

4.3.1 多通道主动立体视频源的设置

VR立体视觉的图形工作站集群由1台主控节点及3台从节点通过网络连接组成。

集群中的4台图形工作站都必须同时安装VR_x工程软件及其管理多通道任务的进程控制服务。通过图形工作站集群之间的通信，进程控制服务可实现主控节点对从节点VR_x工程软件任务进程管理。

在主控节点上可完成对VR_x工程软件单机版的全部功能操作和显示，如：导入模型、设置边界条件、仿真求解、查看仿真结果等。

3台从节点只负责向LED大屏幕输出多通道的视频源。3台从节点均需在显卡中设置本通道输出的立体视频分辨率1920×1620@120 Hz，并在本通道的VR_x工程软件拼接配置文件中设置本通道1/3主动立体视频源画面拼接的起始和终止像素点坐标位置。

当主控节点启动VR_x工程软件的大屏幕VR立体视觉任务指令后，通过进程控制服务将指令发送至3台从节点。当3台从节点进程控制服务的监听端口收到主控节点指令，即刻按照本通道的设置渲染输出规定的1/3主动立体视频源。

4.3.2 多通道的VR立体视觉大屏幕“白道”

拼接控制器接收到3台从节点的主动立体视频源后，应按照预先设置，在内部完成对3路主动立体视频的拼接，再输出给LED大屏幕。拼接控制器的VR立体视觉主动立体视频的拼接设置如图4所示。

1920×1620 @120Hz	1920×1620 @120Hz	1920×1620 @120Hz
---------------------	---------------------	---------------------

图4 拼接控制器的VR主动立体拼接设置

Fig.4 The VR active stereo stitching settings for the stitching controller

理论上，拼接控制器应输出给LED大屏幕一个5760×1620@120 Hz像素值的完整立体视频大画面。但事实上，LED大屏幕呈现的VR画面并不完整，在三通道的两处主动立体视频拼接位置有明显的纵向贯穿“白道”，见图5。“白道”的宽度约有4@120 Hz个像素值。

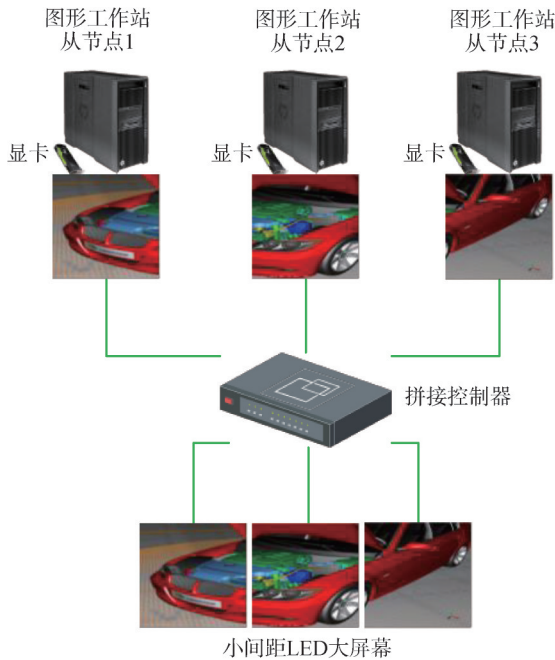


图5 主动立体视频的三通道拼接“白道”

Fig.5 The "white line" for the 3-channel stitching of active stereo video

经机理分析，拼接控制器对多通道主动立体视频画面拼接时是有边缘损耗的，每个立体视频画面的左右两侧均会被裁剪掉约 $2@120\text{ Hz}$ 个像素值。即拼接时每通道仅有中间约 $1\ 916@120\text{ Hz}$ 个像素值的主动立体视频。但拼接控制器给LED大屏幕输出时，仍是按照拼接设置横向输出 $3\times 1\ 920@120\text{ Hz}$ 个像素值，造成三通道主动立体视频的边缘处无数据，只能留“白道”。

传统多通道立体投影机在边缘融合时，相邻立体投影机的投影画面需要有部分重合，重合宽度应不低于单台立体投影机投影宽度的20%，即立体投影机多通道的重合宽度需在 $384@120\text{ Hz}$ 个像素值以上。

VR立体视觉硬件的创新实践证明，虽然LED大屏幕的多通道主动立体拼接区极小，且避免了立体投影机的多通道融合区变形、几何光学校准的维护繁琐问题，但仍面临着多通道拼接的技术难题。

4.3.3 增加主动立体视频源的横向输出量

为了弥补拼接控制器拼接主动立体视频时的边缘损耗，特调整3个图形工作站从节点的显卡分辨率。横向像素值从 $1\ 920@120\text{ Hz}$ 增加到 $1\ 932@120\text{ Hz}$ 。即每个通道渲染的主动立体视频源均横向左右两侧各充分预留了 $6@120\text{ Hz}$ 个像素数据，用于拼接控制器立体拼接时的损耗。

为保证呈现在LED大屏幕的横向 $3\times 1\ 920@120\text{ Hz}$ 主动立体视频正确拼接，还需更改3台图形工作站从节点在VR_x工程软件的拼接配置文件。调整本通道拼接1/3主动立体视频的起始和终止像素点坐标位置。理论上，起始点从原来的第1个像素点改为第7个像素点，如图6所示。

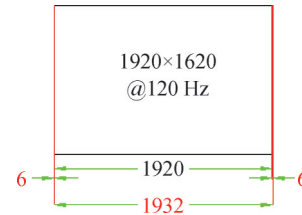


图6 1/3主动立体视频的理论拼接坐标位置

Fig.6 The theoretical stitching coordinate position for 1/3 active stereo video

拼接控制器VR立体视觉的拼接设置不变，仍是横向输出拼接后的 $3\times 1\ 920@120\text{ Hz}$ 个像素值主动立体视频至LED大屏幕。

4.3.4 调试渲染主动立体视频源的输出设置

工程实践证明，按理论值修改各通道图形工作站从节点VR_x工程软件拼接配置文件中的主动立体视频拼接坐标位置后，LED大屏幕虽然不再有“白道”，但会出现三通道主动立体视频拼接处的画面纵向上下错位，不连贯现象。

经现场反复调试，对VR_{x1}工程软件三通道图形工作站从节点拼接配置文件中的主动立体视频拼接坐标位置进行调整，如图7所示，能实现主动立体视频的完美拼接。

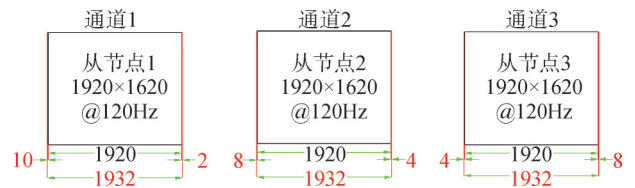


图7 VR_{x1}工程软件的三通道主动立体视频拼接坐标位置

Fig.7 The coordinate position for the 3-channel active stereo video stitching of the VR_{x1} engineering software

实践证明，此拼接坐标配置的调试结果仅适用于VR_{x1}工程软件。基于相同的VR立体视觉硬件、相同的多通道图形工作站从节点显卡设置，部署不同的VR_x工程软件，其实际的多通道主动立体视频拼接坐标位置并不相同，还需以图7的理论坐标位置为基础进行调试。

实际VR_x工程软件配置文件中的拼接坐标位置误

差是VR立体视觉的工程累计误差，包括：小间距LED屏施工模块间点位误差、视频线路误差以及各VR_x工程软件多通道实现方法不同等工程因素产生的。

5 VR硬件系统全功能

5.1 会议讨论的多画面2D视觉

VR硬件系统除了具有数字模型3D立体沉浸式显示功能，还应兼顾工程产品多功能会议讨论的多画面

2D视觉显示功能。

VR硬件系统还需接入会议电脑、左右侧墙插笔记本、视频会议机、会议前后摄像头、DVD蓝光机、会议监控显示器等视频设备。另外，主控节点直接向拼接控制器传输视频源，增加了主控节点在大屏幕的多画面2D视觉，实现了VR_x等工程软件的培训等功能。VR硬件系统的全DVI视频信号通路如图8所示。

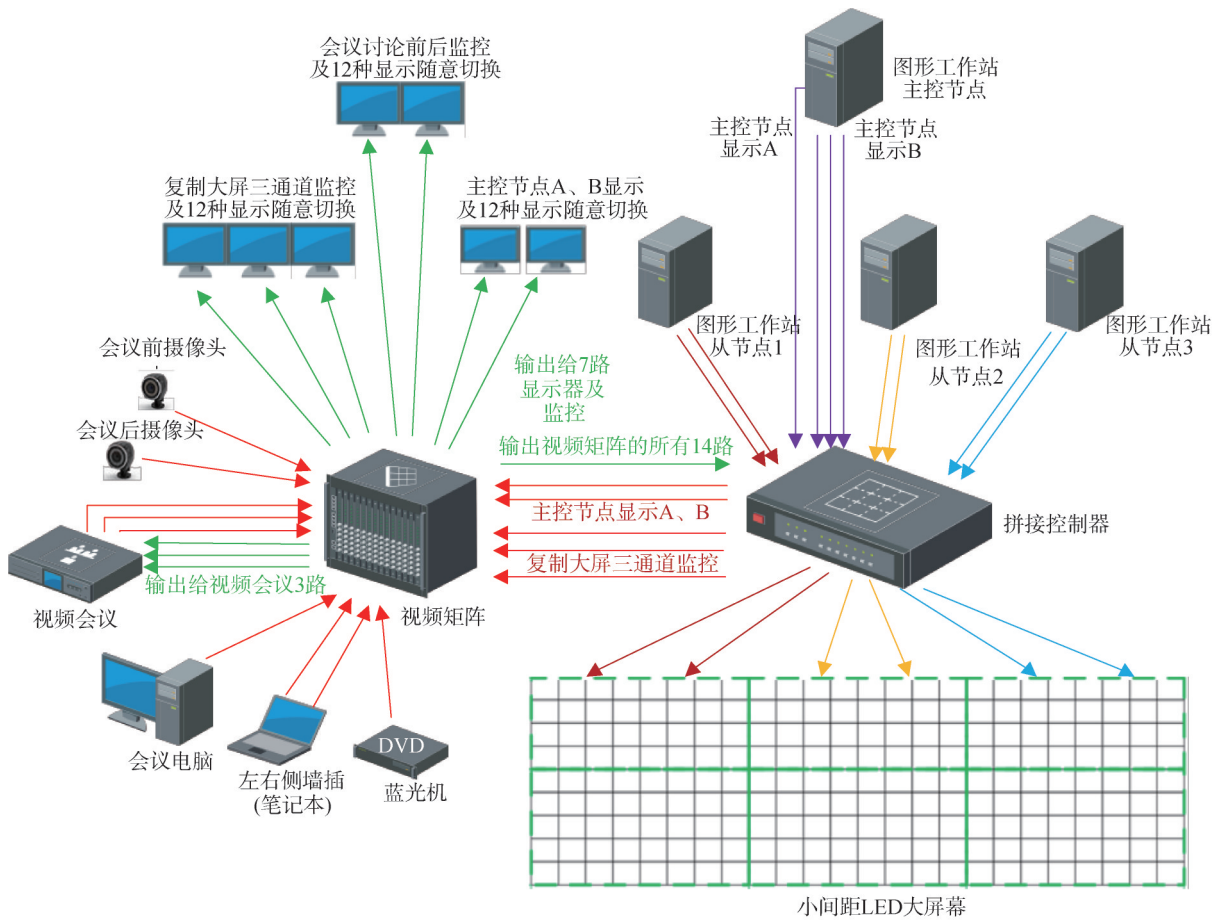


图8 VR硬件系统的全DVI视频信号通路

Fig.8 The full DVI video signal pathway of the VR hardware system

5.2 人机交互等功能

VR硬件系统除了视觉功能外，还需要具有多种操控数字模型的人机交互功能及立体音响的声音功能。

VR硬件系统全功能拓扑如图9所示，包含3D高分辨率的视频信号、多通道立体同步的控制信

号、多通道集群的网络信号以及立体环绕声的音频信号。

VR硬件系统还必须完成设备启动及峰值的总电源功率计算、LED显示屏钢结构对建筑体的强度受力分析、空调散热分析以及安全、消防、检修通道等功能设计。

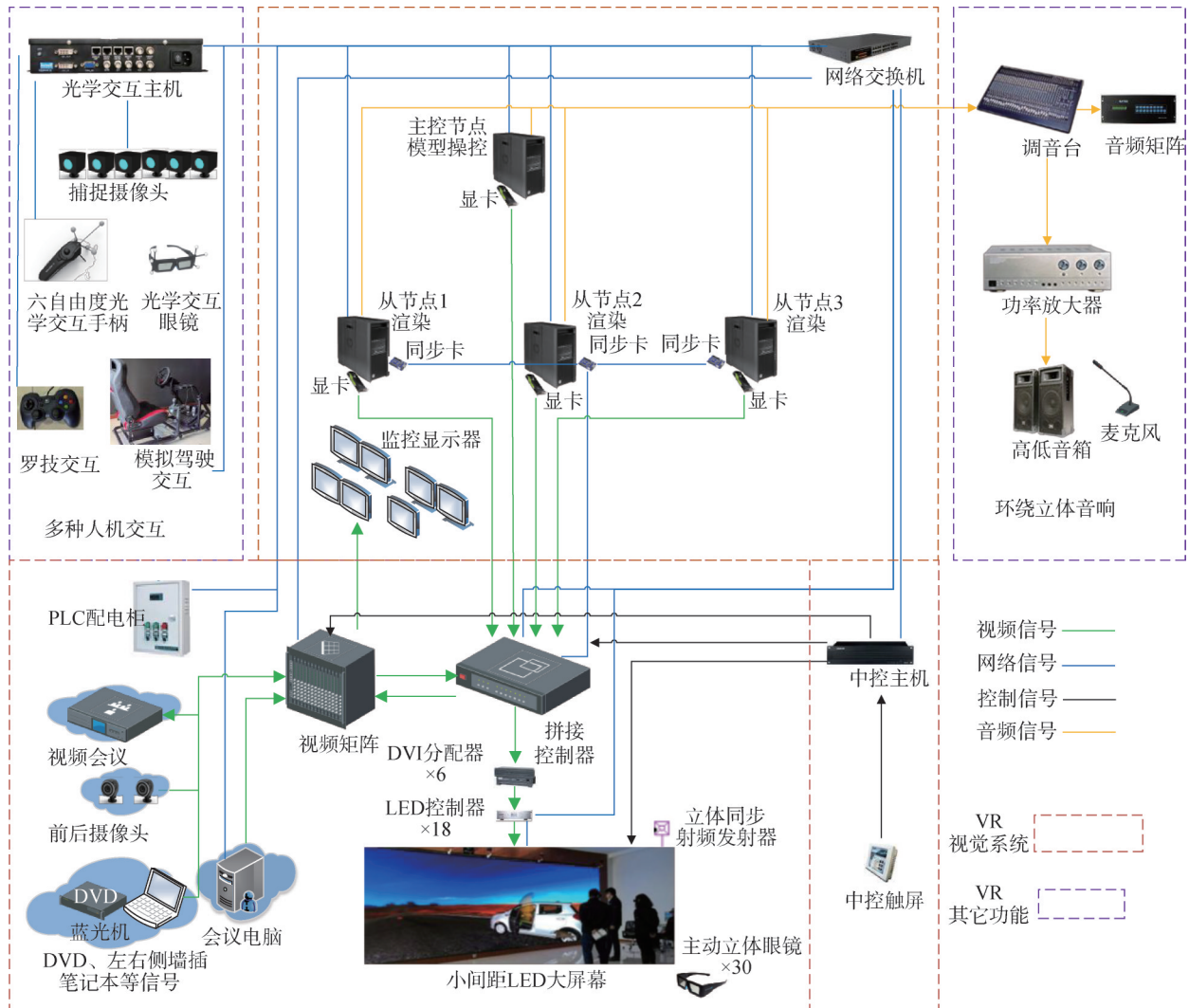


图9 VR硬件系统全功能拓扑

Fig.9 The full-feature topology diagram of the VR hardware system

6 AI生成MBSE系统工程数字模型的VR视觉

6.1 AI生成MBSE设计要求模型

设计人员通过自然语言输入设计要求，经AI设计经验训练，生成结构化的设计要求模型。

识别设计要求模型后，经AI设计经验训练、需求捕获转换，生成包括系统架构、功能组成、功能描述的功能模型逻辑视图，并可调用“AI数据驱动法”准确高效性能模型对功能模型进行验证和VR视觉展示。

6.2 AI生成MBSE性能模型的VR视觉

6.2.1 “AI数据驱动法”准确高效性能模型

“AI数据驱动法”准确高效性能模型（以下简称“AI性能模型”）是将机、液、电、磁、声、光、热等多种学科的1D、2D、3D各维度、各阶数的原始性能仿真模型（包括：单学科仿真模型、多学科联合仿

真模型和通用质量特性分析模型）用已确认的仿真数据或试验数据驱动，AI算法生成满足准确性要求且能快速求解的性能模型。

6.2.2 “AI性能模型”的生成及封装入库

a) “AI性能模型”的算法。

“AI性能模型”的生成是以AI算法为核心。识别设计要求模型、分析功能模型后，从生成模型的复杂度、训练难度和预测性能需求等角度智能选择相应的AI算法，如：K近邻KNN、决策树DT、支持向量机SVM、支持向量回归SVR、高斯过程回归GPR^[5]、多层前馈神经网络MLP、全连接神经网络FCNN、自编码器AE^[6-7]、卷积神经网络CNN、长短时记忆神经网络LSTM^[8]、知识图谱KAN网络。

b) 敏感度分析。

智能调用敏感度分析方法，如：Delta法、Sobol

法和高维模型回归法,对训练集的设计变量与目标函数的敏感系数进行计算,以过滤掉低敏感系数的设计变量。

c) 构建原始仿真模型的样本空间^[9]。

智能确定数据样本空间的采样方法,如:最优拉丁超立方、哈尔顿序列、哈默斯利序列、蒙特卡洛、伪随机等。

利用大量经过准确性评估的原始CAE仿真模型历史数据,或者大量经过确认的结构化或非结构化物理性能试验历史数据,并适当补充数据,构建高质量的样本空间数据,智能划分训练集、验证集。

d) 训练并验证“AI性能模型”。

依据AI算法,学习训练集样本数据的特征和模式,最小化损失函数,生成从输入到输出映射关系的训练集“AI性能模型”。

通过验证集样本数据来验证训练集“AI性能模型”的泛化能力。智能调优“AI性能模型”的超参数,如学习率、动量、正则化参数等,避免过拟合。

e) 评估“AI性能模型”准确性。

用经过确认的物理试验数据测试集来评估“AI性能模型”的准确性。

f) “AI性能模型”封装入库。

将通过评估的不断沉淀累计全级次产品的多种类型、多种物理场、多种应用场景下的“AI性能模型”封装入库,为后续的保真、高效应用建立基础。

6.2.3 “AI性能模型”的优点

a) 灵活通用,准确完整。

对于不同类型的性能模型具有高度灵活的适应性和通用性。对整个事件的历程输出,包含标量和矢量,是物理域分解,不是响应面类的简单拟合^[10]。

b) 节省资源,高效省时。

面对显式动力学和CFD仿真,非线性复杂仿真,体积大、部组件多、全节点数仿真,多物理场耦合仿真,多学科、多种维度联合仿真,通用质量特性大量仿真,复杂系统多方案论证优化仿真等长时昂贵求解过程,均可通过“AI性能模型”在保证仿真准确性基础上,实现数量级^[11]的效率提升。

c) 封装入库,应用广泛。

封装入库,低内存、低CPU、低存储。可挖掘历史积累的大量仿真数据、试验数据的使用价值,对新产品的性能仿真建模发挥作用。库内模型可被调用、共享,无专业仿真知识人员也能快速准确地完成性能预测,还广泛应用于验证功能模型、优化设计生成物

理模型、实时求解生成数字孪生模型。

6.2.4 AI生成性能模型的VR视觉

设计师在图形工作站主节点通过自然语言输入设计要求、需求捕获转换后,从云端部署、在线联动的“AI性能模型”库中智能调用相应的“AI性能模型”,对产品内部场域详细性能的实现进行快速求解。

再通过3台图形工作站从节点,将单机或系统级产品的单学科或多学科、1D或3D、稳态或瞬态、线性或非线性,以3D全节点的“AI性能模型”数据(云图、流线等),用VR立体视觉呈现给设计师。

6.3 AI生成MBSE物理模型的VR视觉

a) AI优化设计。

设计要求捕获转换后,从云端部署、在线联动的“AI性能模型”库中智能调用相应的“AI性能模型”。

定义目标函数及约束,智能选择与该“AI性能模型”优化目标相匹配的优化算法,如:第一代经典的最小二乘法、梯度下降;第二代元启发式优化算法,如遗传算法、粒子群算法、模拟退火算法、模式搜索算法、差分进化法^[12]等,进行快速有效的优化设计、鲁棒性分析。

b) 生成物理模型的VR视觉。

由“AI性能模型”快速优化得到的设计参数驱动,生成3D几何设计的物理模型,并通过VR立体视觉呈现给设计师。

6.4 AI生成MBSE制造模型的VR视觉

通过VR视觉支撑产品虚拟加工、虚拟装配,通过MES/MOM获取末端采集数据,AI生成实做产品3D几何模型。

6.5 AI生成MBSE数字孪生模型的VR视觉

6.5.1 创建数字孪生用数据库

a) 创建3D几何模型库。

去除实做产品制造模型3D几何中不必要的部分细节,增加场景3D模型化处理。

b) 创建原始数据库。

实时传输末端采集实测数据,入原始数据库。

c) 创建解析数据库。

对原始数据库的数据实时清洗、变换,异构数据融合、解析,入解析数据库。

6.5.2 AI数字孪生模型

通过接口将“解析数据库”关键数据实时输入,从云端部署、在线联动的“AI性能模型”库中智能调用匹配的“AI性能模型”,实时求解多物理场,准确高效地生成AI数字孪生模型。

6.5.3 AI数字孪生模型功能

a) 评估产品实物实时运行状态。

通过AI数字孪生模型实现对设备和系统实物实时性的全局状态感知、全方位精细监测,弥补实体传感器限制。

b) 在线故障诊断。

AI数字孪生模型批量化故障虚拟试验,提供丰富的案例样本,故障工况建模,故障条件映射,创建故障诊断库,实现在线故障诊断、快速归零。

c) 预测产品实物未来运行状态。

AI数字孪生模型可对运维策略快速推演和验证,预测实物产品未来状态,智能决策。

6.5.4 AI数字孪生模型的VR视觉

AI数字孪生模型提供VR视觉感知的在线评估、诊断、预警、决策。

a) 3D数字孪生模型及场景的VR视觉。

AI数字孪生模型提供VR视觉的内部剖切、视角切换、几何爆炸。

b) 实物全局、全方位实时运行状态的VR视觉。

AI数字孪生模型提供VR视觉的全节点物理场渲染,实时状态监控。

c) 故障诊断的VR视觉。

AI数字孪生模型提供VR视觉的故障分析、故障定位。

d) 虚实互动的VR视觉。

AI数字孪生模型提供VR视觉虚实互动的模拟、推演、预测、预警。

7 AI空间智能展望

人类已经能够通过自然语言让计算机生成高清晰的数字视频模型——由数据驱动的生成式物理引擎。随着多模态、通用人工智能AGI时代的来临,创新的算法与算力会不断加持迭代,将会越来越容易且快速地将MBSE全生命周期中各类数字模型数据生成与之对应的具有丰富意义和细微差别的数字空间模型。

展望未来,VR立体视觉仅是开始。AI空间智能将通过对MBSE数字空间模型的不断学习推理,实现加速进步。由AI空间智能驱动的计算机将对3D世界工程产品的理解更加敏锐、具有洞察力、拥有空间意识和立体视觉智慧。AI空间智能将会更好地辅助我们探索创新研制最优的工程产品。

参 考 文 献

[1] LANZAGORTO M, ROSENBERG R. Rapid prototyping of virtual

environments[J]. *Computing in Science & Engineering*, 2000, 2(3): 68-73.

[2] 郭胤. 紧凑式CAVE虚拟制造平台系统设计与开发[J]. *机械*, 2019, 46(1): 49-55.

GUO Yin. Design and development of a compact CAVE virtual manufacturing platform system[J]. *Mechanical*, 2019, 46(1): 49-55.

[3] 张敏, 文福安, 刘俊波. 高校虚拟仿真教学环境构建逻辑探讨[J]. *实验技术与管理*, 2023, 40(3): 1-6.

ZHANG Min, WEN Fuan, LIU Junbo. Discussion on logic of constructing virtual simulation learning environment in colleges and universities[J]. *Experimental Technology and Management*, 2023, 40(3): 1-6.

[4] 张洋, 陶涛, 刘斌. Micro-LED: 下一代VR/AR技术候选者[J]. *微纳电子与智能制造*, 2021, 3(3): 23-42.

ZHANG Yang, TAO Tao, LIU Bin. Micro-LED: Next-generation VR/AR technology contenders[J]. *Micro/nano Electronics and Intelligent Manufacturing*, 2021, 3(3): 23-42.

[5] EB DEN M. Gaussian: A quick introduction[EB/OL]. (2015-08-29) [2022-02-24]. <https://arxiv.org/abs/1505.02965>.

[6] 肖若治, 于剑, 马正宵. 卷积自编码器在非定常可压缩流动降阶模型中的适用性[J]. *北京航空航天大学学报*, 2023, 49(12): 3445-3455.

XIAO Ruoye, YU Jian, MA Zhengxiao. Applicability of convolutional autoencoder in reduced-order model of unsteady compressible flows[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2023, 49(12): 3445-3455.

[7] DEMERS D, COTTRELL G W. Non-linear dimensionality reduction [C]. New York: *Advances in Neural Information Processing Systems*, 1992.

[8] HOCHREITER S, SCHMIDHUBER J. Long short-term memory[J]. *Neural Computation*, 1997, 9(8): 1735-1780.

[9] YONDO R, ANDRÉS E, VALERO E. A review on design of experiments and surrogate models in aircraft real-time and manyquery aerodynamic analyses[J]. *Progress in Aerospace Sciences*, 2018(96): 23-61.

[10] MAULIK R, LUSCH B, BALAPRAKASH P. Reduced-order modeling of advection-dominated systems with recurrent neural networks and convolutional autoencoders[J]. *Physics of Fluids*, 2021, 33(3): 037106.

[11] BENNER P, GUGERCIN S, WILLCOX K. A survey of projection-based model reduction methods for parametric dynamical systems[J]. *SIAM Review*, 2015, 57(4): 483-531.

[12] 尹明朗, 寇家庆, 张伟伟. 一种高泛化能力的神经网络气动降阶模型[J]. *空气动力学学报*, 2017, 35(2): 205-213.

YIN Minglang, KOU Jiaqing, ZHANG Weiwei. A reduced-order aerodynamic model with high generalization capability based on neural network[J]. *Acta Aerodynamica Sinica*, 2017, 35(2): 205-213.

作 者 简 介

张 燕 (1973—), 女, 高级工程师, 主要研究方向为数字化建设。

苏 强 (1980—), 男, 工程师, 主要研究方向为数字化运维。

严 勇 (1970—), 男, 高级工程师, 主要研究方向为数字化建设。