

图形引擎与物理引擎结合的研究与实现

牛红攀, 高 勇, 侯忠明

(总后建筑工程研究所, 陕西 西安 710032)

摘要:由于具有物理特性的三维虚拟场景更具有真实感,用户更易于沉浸到场景中,因此物理引擎在虚拟仿真中的作用日益重要。首先采用了 OGRE 图形引擎和 PhysX 物理引擎,设计了图形引擎与物理引擎结合后的主体框架,对框架的核心部分进行了分析。然后在物理引擎中创建模型和用 OGRE 模型转换为 PhysX 模型,以及利用关节实现复杂模型。结果实现了两个具有物理特性的虚拟场景,为建立真实的虚拟仿真环境打下基础,并将促进物理引擎的应用。

关键词:虚拟仿真;图形渲染引擎;物理引擎;结合;模型转换

中图分类号:TP311.52 **文献标识码:**A

Research and Implementation on Bonding of Graphic Engine and Physics Engine

NIU Hong - pan, GAO Yong, HOU Zhong - ming

(Architectural Engineering Research Institute of General Logistics Department, Xi'an, 710032, China)

ABSTRACT: The 3D virtual environment with physical characteristics has more realistic sensation for users, thus the physics engine has been getting more importance in the virtual simulation. This paper describes the OGRE graphics engine and the PhysX physics engine, and then designs the main framework for the bonding of graphic engine and physics engine. The core part of the process has been analyzed in detail, and the creating of model has been studied. Finally, two virtual scenes with physical characteristics are given. The research has established the foundation of the virtual simulation environment, and will promote the application of the physics engine.

KEYWORDS: Virtual simulation; OGRE graphics engine; PhysX physics engine; Bonding; Model transformation

1 引言

随着科学技术的发展和社会生产力的提高,虚拟仿真技术得到人们的日益重视,并逐渐成为一个新的科学技术领域^[1-2]。目前虚拟仿真系统大多以图形引擎为基础,再封装构建上层应用系统^[3-4]。图形引擎中比较出色的有 OGRE、OpenGVS、Vtree、OSG 等,其中 OGRE 是一款典型的跨平台开源图形引擎,功能完善,可移植性强,可以显示精美的三维几何模型,可以控制物体的位置方向,可以检测边界碰撞^[5-8]。但是物体之间缺乏互动性,物体难以按照现实世界的方式运动,运动的场景缺乏真实感,因此引入物理引擎十分必要。物理引擎利用物理运动定律,实时计算每帧画面物体的姿态,使物体与场景间的交互性大为增强^[9-11]。目前出色的物理引擎有 PhysX、Havok、ODE、Newton 等,其中 PhysX 是一款可免费使用的跨平台商业物理引擎,可模拟刚体、柔性体、

流体、布料等等,功能强大,执行效率高,应用广泛^[12-16]。

如何将物理引擎与图形引擎结合,同时保持图形引擎的强大的渲染能力和物理引擎精确的计算能力是一个问题,本文将研究 OGRE 图形引擎与 PhysX 物理引擎结合的相关问题,对结合中的模型创建、数据转换等关键技术进行分析,并实现两个具有物理特性的虚拟场景。

2 OGRE 图形引擎

OGRE 是用 C++ 开发的面向对象且使用灵活的 3D 图形引擎,对底层 Direct3D 和 OpenGL 系统库的全部使用细节进行了抽象,并提供了基于现实世界对象的接口,使用少量代码就能构建一个完整的三维场景,使开发人员更方便、更直接地开发基于三维硬件设备的应用程序。

OGRE 引擎采用可扩展的程序框架,拥有高效率和高度的可配置的资源管理器,支持多种场景类型,支持高效的插件体系结构,采用高效的网格资料格式储存模型数据,并且具有清晰、整洁的设计以及全面的文档支持。而且 OGRE 是一

款开源引擎,更新迅速,功能日益强大,采用 MIT 授权,使用时不会产生授权费用,OGRE 引擎在涉及到三维图形绘制的仿真、游戏等方面有着极为广泛的应用前景。

OGRE 引擎的场景管理结构如图 1 所示,根节点(Root)是整个三维场景的入口点,用于配置系统内的其它对象,必须最先创建和最后释放。渲染系统(Render System)设置场景的渲染属性并执行渲染操作。场景管理器(Scene Manager)负责组织场景,生成并管理灯光、摄像机、场景节点、实体、材料等元素。灯光(Light)为场景提供照明,有点光源、聚光源和有向光源三种类型。摄像机(Camera)用来观察所创建的场景,通过视口可将渲染后场景输出到屏幕。实体(Entity)为场景中的几何体,一般通过网格(Mesh)创建。材质(Material)为场景中几何体的表面属性,支持从多种格式的图片文件加载纹理(Texture),并可拥有足够多的纹理层,每层纹理支持各种渲染特效,支持动画纹理。场景管理器通过场景节点(Scene Node)来确定实体、摄像机、灯光等元素的位置和方向。OGRE 场景组织原理是将场景划分成抽象的多个空间,这些空间还可以划分成多个子空间,每个空间由一个场景节点来管理,实体、灯光等场景元素本身并不负责与空间位置相关的行为,全部交给场景节点来做。OGRE 将大量场景节点按照空间的划分层次组织成树状结构,从而完成对整个场景的有序组织。

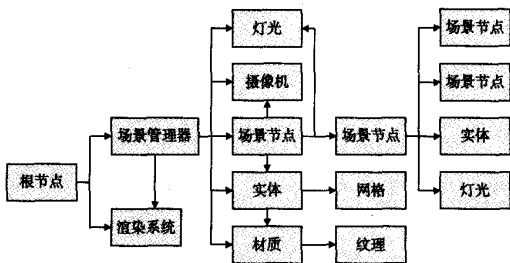


图 1 OGRE 引擎场景管理结构图

在利用 OGRE 引擎创建三维图形系统时,首先需要创建根节点,然后对系统进行初始化并创建场景,之后处理输入响应,进行帧循环更新图形。主程序可见图 2 所示,其中帧循环更新图形一般由 OGRE 引擎自动完成,开发人员需要处理主要有创建场景和处理输入响应两部分。

```
// 主程序伪代码
setup() //初始化并创建场景
{
    创建根节点;
    载入系统资源;
    创建场景管理器;
    创建摄像机、视口;
    创建需要显示的实体、灯光、地形、天空盒等;
    创建帧监听器;
};
```

```
frameStarted() //在每个帧循环开始前进行设置
{
    处理鼠标键盘等输入响应;
    更新场景节点的空间坐标;
    设置摄像机、灯光等元素的新状态;
}

帧循环
{
    更新三维图形的显示;
}
```

图 2 OGRE 应用程序主程序伪代码

3 PhysX 物理引擎

PhysX 是一款由 NVIDIA(英伟达)公司设计的跨平台功能强大的物理引擎,可在仿真、游戏中实现实时的物理效果。PhysX 引擎可以对刚体之间的相互作用进行精确计算,可实现物体之间多种连接形式,可以模拟柔软物体、布料、流体,可完成爆炸、力场、粒子等多种特效。同时 PhysX 引擎可运用数百个独立的浮点处理器进行硬件加速,减轻 CPU 的计算负担,提升系统的处理能力,为用户呈现栩栩如生、身临其境的物理学环境。

PhysX 引擎的场景结构如图 3 所示。所有的物理模拟都在场景(Scene)中进行,一个虚拟环境允许同时存在多个场景,场景各自进行模拟运算,通常之间的对象没有联系。场景中可包含角色、关节等多个对象,角色(Actor)为场景中参与运算具有形状、实体的对象,形状(Collision Shape)用于描述角色的外形,PhysX 引擎中提供六种基本形状:盒子(Box)、球体(Sphere)、胶囊(Capsule)、凸状网格(ConvexMesh)、三角网格(TriangleMesh)和平面(Plane)。实体(Body)用于描述角色的物理参数,比如密度、质量、重心、惯性张量等。两个角色可以通过关节(Joint)连接,常用的关节有固定关节(Fixed Joint)、旋转关节(Revolute Joint)、球状关节(Spherical Joint)、六自由度关节(6 DOF Joint)等多种形式,可根据需要选择关节使物体的连接符合真实情景。此外场景中还可创建流体、布料、粒子等其他可描述现实世界的对象。

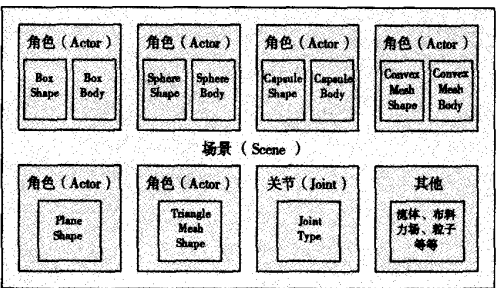


图 3 PhysX 场景结构图

场景中的角色对象分为静态角色 (Static Actor)、动态角色 (Dynamic Actor) 和运动角色 (Kinematic Actor), 这三种类型角色的区别如表 1 所示。静态角色对象主要用于碰撞检测, 必须有形状属性而无实体属性, 静态角色一旦被创建, 就不能对它进行任何操作。动态角色是符合物理学定律的普通刚体, 比如移动的汽车、可推动的箱子都属于动态角色。运动角色是一种特殊的动态角色, 不接受外力作用, 只能由用户操作从一个位置移动到另一个位置。在场景中运动角色会与动态角色发生碰撞, 而不会与静态角色发生作用。

表 1 三种类型角色特性对比

特性	静态角色	动态角色	运动角色
包含形状	是	可选	是
包含实体	否	是	是
可移动	否	是	是
碰撞检测	是	是	是
接受外力	否	是	否

在进行仿真运算时, 首先需要创建一个 PhysX 环境并进行仿真环境参数设置, 之后根据重力加速度、仿真类型等场景描述创建一个场景。PhysX 引擎中的材质是指物体的表面属性和碰撞属性, 可设定反弹系数和摩擦系数。开发人员将各个角色对象的位置、速度等参数进行初始化, 然后交由引擎进行仿真运算。一个时间步运算结束后, 获取各角色新的状态, 处理用户输入, 更新参数进行下一时间步的仿真。利用物理引擎创建虚拟场景进行模拟计算时, 各参数的设置如重力、摩擦系数、空气阻力等都要符合现实世界真实的参数, 这样获得的仿真效果才会更加真实。

4 图形引擎与物理引擎的结合

利用 OGRE 引擎强大的图形处理能力, 可建立丰富多彩的三维虚拟场景, 有了物理引擎的支持, 虚拟场景中的模型有了实体, 就有了质量, 就可以与其他物体发生作用。形象的说, 将物理引擎与图形引擎结合, 虚拟场景中的几何体就有了“生命”, 世界就可以“动”起来。

4.1 主体框架

将 PhysX 物理引擎引入图形引擎, 主体框架采用了 OGRE 引擎的初始化、输入处理、帧循环更新图形的流程, 再将 PhysX 引擎的相关部分融入其中, 其主要流程如图 4 所示。

首先对 OGRE 引擎进行初始化, 创建需要在三维场景中显示的对象、地形、灯光等元素, 完成渲染之前的所有准备; 然后进行 PhysX 引擎的初始化, 建立物理环境设置相关参数; 再根据 OGRE 场景中的几何体创建用于模拟计算的动态、静态或运动角色, 将 OGRE 中的几何体和 PhysX 中的角色一一对应进行关联, 并对各角色的位置、速度、受力等状态参数进行设定, 完成模拟计算前的所有准备; 之后创建帧监听器, 进行帧循环更新图形显示, 同时调用 PhysX 引擎中的运算函数, 对场景中物体与物体之间的相互作用进行模拟运

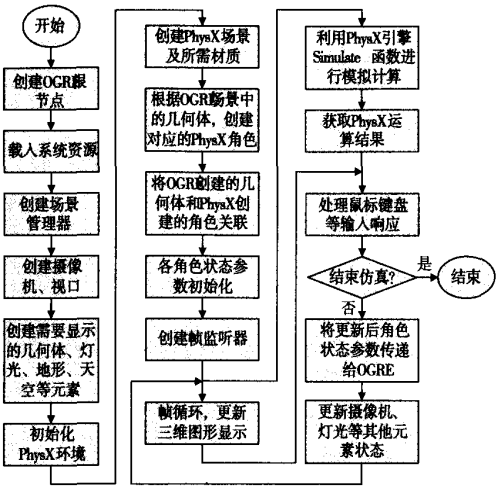


图 4 物理引擎与图形引擎结合程序主流程

算。由于 PhysX 引擎的模拟计算线程是独立的, 与 OGRE 帧循环线程分开, 因此物理引擎的计算过程与图形引擎的显示渲染过程同时进行。根据物理引擎计算的结果, 更新场景内物体的位置、方向、速度等参数, 将更新后的参数传递给 OGRE 更新图形显示, 循环进行下一步模拟计算。

4.2 程序实现

由上节设计的程序主体框架可知, 需将 PhysX 引擎的初始化、模拟计算、获取结果等部分, 放入 OGRE 框架中实现。

PhysX 引擎在模拟计算前的准备工作都可放到 OGRE 程序中 CreateScene() 函数下实现, 包括初始化环境、创建场景、创建角色、与 OGRE 关联以及参数初始化。PhysX 引擎初始化环境通常采用 NxCreatePhysicsSDK() 函数创建一个物理学环境, 采用 setParameter() 对环境进行设置。由于 PhysX 采用数值算法, 物体碰撞时总会发生侵入对方的现象, 设置皮肤厚度 (NX_SKIN_WIDTH) 可控制侵入的大小, 默认为 0.025。创建场景时需要设置重力加速度, PhysX 的坐标系与 OGRE 一样都采用右手坐标系, y 轴指向为竖直向上方向, 因此重力加速度一般设为 (0.0, -9.8, 0.0), 典型的仿真环境初始化代码如图 5 所示。PhysX 角色与 OGRE 中几何体相关联可通过 NxActor::userData 设定, 如 pActor -> userData = pNode, 可将 pActor 角色和 pNode 场景节点对应起来, 也就是和 pNode 场景节点上的几何体相关联。

```
//创建 PhysX 的 SDK 和 Scene, 对仿真环境进行设置
/* 创建 PhysX 环境, 设置仿真参数 */
gPhysicsSDK = NxCreatePhysicsSDK(NX_PHYSICS_SDK_VERSION);
gPhysicsSDK -> setParameter(NX_SKIN_WIDTH, 0.01);
/* 定义重力加速度, 创建 PhysX 场景 */
NxSceneDesc sceneDesc;
sceneDesc.gravity = NxVec3(0.0, -9.8, 0.0);
gScene = gPhysicsSDK -> createScene(sceneDesc);
```

图 5 PhysX 引擎初始化典型代码

利用 PhysX 引擎进行模拟计算可利用函数 `NxScene::simulate(NxReal elapsedTime)`, 其中 `elapsedTime` 为仿真时间步长, 这里可采用固定步长, 如 `gScene -> simulate(1.0f/60.0f)` 表示采用 1/60 秒的固定步长进行仿真, 也可采用变步长, 如 `gScene -> simulate(evt.timeSinceLastFrame)` 表示采用 OGRE 引擎每帧的间隔时间进行仿真。此模拟计算函数一般放在帧循环前的 `frameStarted()` 函数下实现。获取计算结果用 `NxScene::fetchResults()` 函数, 由于 PhysX 引擎采用状态缓冲机制, 模拟计算采用独立的线程, 采用如图 6 所示代码可使模拟计算过程和图形渲染过程同时进行, 提高虚拟环境的处理能力, 保证画面的流畅性。

```
// 此代码用于进行模拟计算, 获取计算结果
/* 获取计算结果, 直到成功为止 */
while(! gScene -> fetchResults(NX_RIGID_BODY_FINISHED, false));
/* 设定时间步长, 调用 PhysX 函数开始执行仿真计算 */
gScene -> simulate(evt.timeSinceLastFrame);
gScene -> flushStream();
```

图 6 模拟计算及获取结果核心代码

在获取计算结果后, 需将结果传递给 OGRE 场景中的几何体, 更新几何体的位置和方向。首先遍历场景找出需要传递参数的角色, 静态角色和处于休眠的动态角色由于姿态不改变, 没有必要传递参数。之后获取角色对应的场景节点及角色的姿态参数, 将位置和方向赋值给场景节点, 具体实现如图 7 代码所示。这里要特别注意整体坐标和局部坐标的关系, 如果在获取的 PhysX 角色姿态是整体坐标, 在设置 OGRE 场景节点时也要采用整体坐标, 否则将出现“形实分离”的问题。

```
// 将 PhysX 角色的位置方向传递给 OGRE 相应场景节点
NxU32 nb = gScene -> getNbActors(); // 得到场景中角色个数
NxActor** actors = gScene -> getActors(); // 获取角色链表指针
while(nb--) // 遍历场景中的角色
{
    NxActor* actor = *actors++; // 获得角色指针
    if(! actor -> isDynamic()) continue; // 如果静态角色, 跳过
    if(actor -> isSleeping()) continue; // 如果角色未激活, 跳过
    if(! actor -> userData) continue; // 如果没有关联图形, 跳过
    Ogre::SceneNode* node = (Ogre::SceneNode*) actor -> userData; // 获取角色关联 OGRE 场景节点的指针
    NxMat34 nm = actor -> getGlobalPose(); // 获取角色姿态
    node -> _setDerivedPosition(Vector3(pos.x, pos.y, pos.z)); // 将位置赋给对应场景节点
    node -> _setDerivedOrientation(Quaternion(quat.w, quat.x, quat.y, quat.z)); // 将方向赋给对应场景节点
}
```

图 7 角色姿态参数传递核心代码

退出系统时必须释放 PhysX 资源, 可在主程序类的析构函数中采用 `releaseScene()` 与 `NxReleasePhysicsSDK()` 函数释放场景及物理学环境。

4.3 模型创建

在物理引擎中, 创建与三维图形对应的模型至关重要。利用 PhysX 引擎创建、OGRE 模型转换以及多种类型关节的连接, 可创建各种可反映真实物体的模型。

4.3.1 基本模型创建

利用 PhysX 引擎提供的函数, 可创建平面、盒子、球体、胶囊等基本形状的模型。下面以创建一个立方体盒子为例, 首先定义角色描述、盒子形状描述 (`NxBoxShapeDesc`) 和实体描述, 在形状描述中设定盒子的长宽高, 之后将形状描述和实体描述放入角色描述中, 并设定实体的密度、位置等参数。最后利用 `NxScene::createActor()` 函数创建角色。如果是静态角色, 将实体描述设为空 (`NULL`) 或将密度设为负值即可。

模型创建的一个原则是尽量使用基本的形状, 如盒子、球、胶囊。如果物体较复杂, 可考虑使用多个基本形状的组合。利用 PhysX 直接创建模型适用于形状简单、规则的物体, 或不需要精确模拟的物体。

4.3.2 OGRE 模型转换

OGRE 引擎本身不提供三维图形的创建, 它通过读取 mesh 格式文件, 将几何体绘制到屏幕上。由于 mesh 文件可采用 3ds max、maya 等专业三维作图软件制作, OGRE 引擎可显示出精致、复杂的三维模型。如果可把 mesh 文件直接转换成 PhysX 的模型, 将保证模型与 OGRE 中的几何体完全一致, 因此将 OGRE 模型直接转换是一种快速、准确、适合复杂物体模型创建的方法。

Mesh 文件保存的是物体的网格数据, 将数据读取后放入凸状网格或三角网格的描述中, 再根据需要创建静态、动态或运动角色, 其流程见图 8。应注意凸状网格适用于三种角色的创建, 但模型顶点数目最多为 256 个, 三角网格只支持静态角色的创建, 但顶点数目没有限制, 适合复杂的静态模型创建, 如固定的建筑物、地形等。

4.3.3 利用关节实现复杂模型

OGRE 图形引擎是采用挂载场景节点的方式, 实现场景对象的组合, PhysX 引擎是采用关节来实现多个角色的连接, 引擎有固定关节、旋转关节、球状关节、棱柱关节等多种连接方式。固定关节模拟铆接、焊接、螺钉固定等连接方式, 可将两个角色固定在一起; 旋转关节模拟铰接连接方式, 可使两个角色围绕一条轴线发生转动, 如合页、门柱; 球状关节用来模拟肩关节、球铰等连接方式, 可使两个角色围绕一个点发生自由转动; 棱柱关节模拟滑动连接方式, 可使两个角色沿一条轴线运动, 如吸振器; 此外还有圆柱关节、滑轮关节、点线关节、点面关节、六自由度关节等多种连接方式, 开发人员可根据需要, 将单个角色利用关节进行组合, 实现人物、机器、汽车等复杂物体的模型创建。

```

//将 OGRE 模型转换 PhysX 模型
ConvertMeshtoPhysX()
{
    确定 PhysX 模型的保存文件名称;
    读取 mesh 文件网格数据;
    if (采用凸状网格)
    {
        创建凸状网格描述;
        将读取后的 mesh 网格数据存入凸状网格描述;
        根据描述创建凸状网格外形;
        if(动态角色或运动角色)
            将实体描述放入角色描述,并设定密度;
        if(运动角色)
            设置运动角色标签;
    }
    if(采用三角网格)
        ...;
    根据角色描述创建角色;
}

```

图 8 OGRE 模型转换程序伪代码

5 实例实现

通过上文的分析,本文将 PhysX 物理引擎与 OGRE 图形引擎结合,实现了一个如图 9 所示包含多种角色的三维场景,其中圆柱体和圆锥体为静态角色,地面、围墙为静态角色,18 个球体为动态角色,红色方块为运动角色。用户可控制红色方块推动球体,使球体之间或球体与边界之间发生碰撞运动。同时本文实现了一个挖掘机模型的创建,其效果如图 10 所示。挖掘机由下车体、上车体、驾驶室、大臂、斗杆、铲斗等多个部件组成,每个部件可分别建模,最后利用 PhysX 引擎的关节,将部件组装成一个整体。由于上车体可以绕回转滚盘进行 360° 旋转,上车体和下车体通过旋转关节(Revolute Joint)连接;驾驶室固定于上车体,因此驾驶室与上车体通过固定关节(Fixed Joint)连接;大臂与上车体、斗杆与大臂、铲斗与斗杆之间均采用旋转关节;大臂油缸与大臂油缸杆、斗油缸与斗杆油缸杆、铲斗油缸与铲斗油缸杆之间均采用棱柱关节(Prismatic Joint)进行连接。通过各种关节,将简单的部件组装成一个复杂的挖掘机模型,并为用户控制挖掘机实现各种动作打下基础。

6 结论

本文对开源图形引擎 OGRE 和专业物理引擎 PhysX 的基本内容和框架结构进行了分析和研究,利用 OGRE 和 PhysX 的良好扩展性,实现了物理引擎与图形引擎的结合。

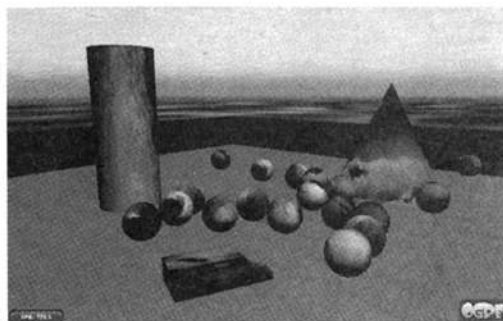


图 9 包含多种角色的三维场景

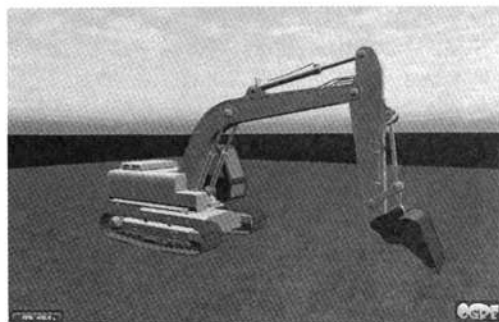


图 10 利用关节创建的挖掘机模型

通过对结合后主体框架的详细设计,将物理模拟计算融入了图形渲染流程之中,并给出了主框架的核心程序实现方法,详细讨论了结合后的模型创建问题。在此基础上实现了两个具有物理特性的虚拟场景实例。

一套功能完整的虚拟仿真平台不仅需要图形引擎和物理引擎,还需要用户界面、三维声音、人工智能、网络通信等多个模块,把其他模块加入虚拟仿真平台将是今后研究的重点和方向。

参考文献:

- [1] M Gibber, R Kaye, M Fried. Virtual Simulation in the Surgical World[J]. Otolaryngologic Clinics of North America, 2009, 42 (5): 891-900.
- [2] 严雁云,施光林. 基于多软件平台虚拟仿真方法及其应用研究[J]. 计算机仿真, 2006, (3): 180-182, 304.
- [3] 龙玉国,赵红武. 门式起重机虚拟仿真培训系统研究[J]. 计算机仿真, 2003, 20(5): 120-122.
- [4] 戴唐云. 基于 3DSMAX/OGRE 的火箭视景仿真系统的研究与实现[D]. 电子科技大学, 2007.
- [5] G Junker. Pro OGRE 3D programming[M]. Apress, 2006.
- [6] 李刚,苏丽君,张军令. OGRE 技术在三维仿真场景中的应用研究[J]. 舰船电子工程, 2009, 29(3): 92-95.

(下转第 325 页)

5 结论

通过数值仿真,得到了原车座舱内的流场的分布,并从给风口布置、回风形式以及给分口的方向几方面,进行了改进,得到如下结论:

1) 采用前-中给风的布置效果要好于前给风的形式,可以提高车内乘员的热舒适性;

2) 采用前进风-后回风的形式要好于前进风-前回风的形式,可以提高车内乘员的热舒适性;

3) 上攻角给风口设计优于水平给风口设计,可以使前后排的温度差异更小些,有利于提高车内乘员的热舒适性;

4) 车内乘员的存在对座舱内气流组织与温度场的分布有显著影响,不利于提高车内的热舒适性;

5) 通过 CFD 计算,对座舱内空气流动和温度分布进行分析,可以建立反映座舱流场分布和温度场分布的数据库,同时结合试验,可以缩短设计周期,为设计师进行优化工作提供了数据支持和理论指导。

6) 通过对轿车室内流场的仿真,可以进一步得到车内环境舒适性的评价指标如:能量利用系数、不均匀系数、空气分布特性指标等,也就是说轿车室内流场的数值模拟为轿车室内环境空气品质及舒适性评价提供了基础。

参考文献:

- [1] J Currie. Numerical Simulation of the flow in a passenger compartment and evaluation of the thermal comfort of the occupants[C]. New York: SAE paper 970529, 1997.
- [2] T Kataoka and Y Nakamura. Prediction of Thermal Sensation Based on Simulation of Temperature Distribution in a Vehicle Cabin [J]. Heat Transfer - Asian Research, 2001, 30(3): 195-212.
- [3] 连之伟, 张桂荣, 叶晓江. 铁路空调客车气流组织评价[J]. 上

海交通大学学报, 2004, 38(6): 961-966.

- [4] A Mezhab, M Bouzidi. Computation of thermal comfort inside a passenger car compartment [J]. Applied Thermal Engineering, 2006, 26: 1697-1704.
- [5] J M Jalil and H Q Alwan. CFD Simulation for a Road Vehicle Cabin [J]. Eng. Sci., 2007, 18(2): 123-142.
- [6] H J Zhang, L Dai, G G Xu, Y Li, W Chen and W Q Tao. Studies of air-flow and temperature fields inside a passenger compartment for improving thermal comfort and saving energy [J]. Part I: Test/numerical model and validation, Applied Thermal Engineering, 2009, 29: 2022-2027.
- [7] 傅立敏, 等. 汽车超车过程的空气动力特性研究 [J]. 空气动力学学报, 2007, 25(3).
- [8] 韩占忠, 等. FLUENT 流体工程仿真计算实例与应用 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2004.
- [9] 傅德薰, 马延文. 计算流体力学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2004. 196.
- [10] 陈孟湘. 汽车空调 [M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1991. 74.

作者简介



肖红林(1978-), 男(汉族), 辽宁沈阳人, 博士后, 主要研究领域为湍流、大涡模拟、并行计算、汽车空气动力学。

李洪亮(1974-), 男(汉族), 河南登封人, 博士, 高级工程师, 主要研究领域为机电产品动态分析与优化控制、汽车 NVH 控制新技术。

王远(1984-), 女(汉族), 河南禹州人, 硕士, 助理工程师, 主要研究领域为机动车尾气催化净化。

王务林(1966-), 男(汉族), 安徽六安人, 博士, 研高, 主要研究领域为汽车排放控制、汽车振动控制。

(上接第 303 页)

- [7] P Sampaio, R de Freitas, C Cardoso. OGRE - Multimedia: An API for the Design of Multimedia and Virtual Reality Applications [C]. Springer, 2008. 465-472.
- [8] 舒畅, 梁英伦, 王大为. 基于 3Dmax 和 OGRE 的某型装备视景仿真研究 [J]. 指挥控制与仿真, 2009, 31(5): 78-80.
- [9] 有人, 陈定方. 虚拟现实环境中的物理模拟及物理引擎应用的研究 [J]. 湖北工业大学学报, 2008, 23(2): 7-9.
- [10] 王树军. 三维游戏引擎中物理引擎关键技术的研究 [D]. 天津大学, 2007.
- [11] M Joselli, et al. A new physics engine with automatic process distribution between CPU-GPU [C]. ACM, 2008. 149-156.
- [12] 魏立新. 浅谈物理引擎 PhysX SDK 的使用 [J]. 电脑知识与技术, 2009, 5(20): 5561-5562.
- [13] 高嵩, 陈先桥, 杨菊. 基于 OGRE 和 ODE 的驾驶模拟系统的设计与实现 [J]. 交通与计算机, 2006, 24(1): 101-104.
- [14] A Maciel, et al. Using the PhysX engine for physics-based vir-

tual surgery with force feedback [J]. The International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery, 2009, 5(3): 341-353.

[15] 欧阳慧琴, 陈福民. 物理引擎与图形渲染引擎绑定的研究与实现 [J]. 计算机工程与设计, 2008, 29(21): 5580-5582.

[16] 苏新新, 李学庆, 祁斌. 基于 PhysX 物理引擎的布料仿真技术的研究与实现 [J]. 计算机应用, 2009, 29(12): 3445-3448.

作者简介



牛红隼(1981-), 男(汉族), 河北石家庄人, 博士, 工程师, 主要研究领域为抢修抢建装备与技术、工程机械模拟训练、虚拟现实应用。

高勇(1977-), 男(汉族), 湖南长沙人, 硕士, 工程师, 主要研究领域为抢修抢建装备与技术、工程机械模拟训练平台、虚拟现实应用。

侯忠明(1962-), 男(汉族), 陕西西安人, 硕士, 高级工程师, 主要研究领域为军事工程抢修抢建装备与技术。

作者: [牛红攀](#), [高勇](#), [侯志明](#), [NIU Hong-pan](#), [GAO Yong](#), [HOU Zhong-ming](#)
作者单位: [总后建筑工程研究所, 陕西, 西安, 710032](#)
刊名: [计算机仿真](#) [ISTIC](#) [PKU](#)
英文刊名: [COMPUTER SIMULATION](#)
年, 卷(期): 2011, 28 (6)
被引用次数: 20次

参考文献(16条)

1. [M Gibber;R Kaye;M Fried](#) [Virtual Simulation in the Surgical World](#) 2009 (05)
2. [严雁云, 施光林](#) [基于多软件平台虚拟仿真方法及其应用研究](#) [期刊论文] - [计算机仿真](#) 2006 (3)
3. [龙玉国, 赵红武](#) [门式起重机虚拟仿真培训系统研究](#) [期刊论文] - [计算机仿真](#) 2003 (5)
4. [戴唐云](#) [基于3DSMAX/OGRE的火箭视景仿真系统的研究与实现](#) [学位论文] 2007
5. [G Junker](#) [Pro OGRE 3 D programming](#) 2006
6. [李刚, 苏丽君, 张军令](#) [OGRE技术在三维仿真场景中的应用研究](#) [期刊论文] - [舰船电子工程](#) 2009 (3)
7. [P Sampaio;R de Freitas;G Cardoso](#) [OGRE-Multimedia:An API for the Design of Multimedia and Virtual Reality Applications](#) 2008
8. [舒畅, 梁英伦, 王大为](#) [基于3Dmax和OGRE的某型装备视景仿真研究](#) [期刊论文] - [指挥控制与仿真](#) 2009 (5)
9. [有人, 陈定方](#) [虚拟现实环境中的物理模拟及物理引擎应用的研究](#) [期刊论文] - [湖北工业大学学报](#) 2008 (2)
10. [王树军](#) [三维游戏引擎中物理引擎关键技术的研究](#) [学位论文] 2007
11. [M Joselli](#) [A new physics engine with automatic process distribution between CPU-GPU](#) 2008
12. [魏立新](#) [浅谈物理引擎PhysX SDK的使用](#) [期刊论文] - [电脑知识与技术](#) 2009 (20)
13. [高嵩, 陈先桥, 杨菊](#) [基于OGRE和ODE的驾驶模拟系统的设计与实现](#) [期刊论文] - [交通与计算机](#) 2006 (1)
14. [A Maciel](#) [Using the PhysX engine for physics-based virtual surgery with force feedback](#) 2009 (03)
15. [欧阳慧琴, 陈福民](#) [物理引擎与图形渲染引擎绑定的研究与实现](#) [期刊论文] - [计算机工程与设计](#) 2008 (21)
16. [苏新新, 李学庆, 祁斌](#) [基于PhysX物理引擎的布料仿真技术的研究与实现](#) [期刊论文] - [计算机应用](#) 2009 (12)

本文读者也读过(10条)

1. [马新文](#), [宋明涛](#), [朱小龙](#), [刘惠萍](#), [孙良亭](#), [肖国青](#), [赵红卫](#), [蔡晓红](#), [王志光](#), [李文健](#), [刘振源](#), [高大庆](#), [马力祯](#), [满开弟](#), [沙杉](#), [冯文天](#), [詹文龙](#) [高压原子物理实验平台和物理研究规划](#) [期刊论文] - [原子与分子物理学报](#) 2004, 21 (z1)
2. [李群](#), [熊惠芳](#), [刘秋香](#), [唐新桂](#), [陈王丽华](#) [纳米晶\(Ba, Ca\)\(Zr, Ti\)O₃外延膜的微波介电性能](#) [会议论文] - 2008
3. [林建泉](#) [全面认知3D视频——从3D拍摄、监视到测量](#) [期刊论文] - [影视制作](#) 2011, 17 (9)
4. [王少梅](#), [甘瑞容](#) [腹腔镜与传统开腹手术治疗上消化道溃疡穿孔的护理体会](#) [期刊论文] - [当代护士 \(学术版\)](#) 2011 (11)
5. [陈涛](#) [护理干预对宫颈癌根治术患者术中体温的影响](#) [期刊论文] - [当代护士 \(学术版\)](#) 2011 (11)
6. [陈慧豪](#), [蔡春芳](#) [改良侧卧位在全髋置换术中的应用](#) [期刊论文] - [当代护士 \(学术版\)](#) 2011 (11)
7. [卢少丽](#), [李小兰](#) [新侧卧位安置法在肾癌根治术中的应用](#) [期刊论文] - [国际护理学杂志](#) 2011, 30 (8)
8. [嵇秀明](#), [夏珊敏](#), [JI Xiu-ming](#), [XIA Shan-min](#) [情景剧表演在产科临床护理教学中的应用](#) [期刊论文] - [国际护理学杂志](#) 2011, 30 (8)
9. [廖承红](#), [章志红](#), [兰华](#) [背景音乐在护理教学中的应用](#) [期刊论文] - [当代护士 \(学术版\)](#) 2011 (11)
10. [黄瑜](#), [谢月霞](#), [杨颖](#), [龚树飞](#), [HUANG Yu](#), [XIE Yue-xia](#), [YANG Ying](#), [GONG Shu-fei](#) [腹腔镜手术治疗异位妊娠的临床观察及护理](#) [期刊论文] - [国际护理学杂志](#) 2011, 30 (8)

引证文献(8条)

1. 陈浩, 张桂香, 张庆洪 基于Virtools的机械装备虚拟拆卸系统研究[期刊论文]-现代制造工程 2015(01)
2. 朱永松, 陈方, 魏建军, 奚雯倩 后勤智能化管理平台在医院安全管理中的应用[期刊论文]-中国卫生资源 2014(05)
3. 李力 技术增长下企业资产贬值的现状与对策[期刊论文]-重庆电子工程职业学院学报 2013(05)
4. 王华, 刘沛 桥式起重机仿真训练系统研究[期刊论文]-电脑开发与应用 2013(05)
5. 贾庆轩, 廖裕宁 OSG与Bullet的结合研究与实现[期刊论文]-计算机仿真 2014(08)
6. 平淑文, 潘珏羽, 张学金, 杜晓荣 基于HTML5和JavaScript轻量型动画框架开发[期刊论文]-计算机技术与发展 2013(12)
7. 梅玉龙 应急演练计算机三维模拟系统研究[期刊论文]-中国安全生产科学技术 2012(04)
8. 王飞 面向数字家庭网络的可视化框架开发[学位论文]硕士 2013

本文链接: http://d.wanfangdata.com.cn/Periodical_jsjtz201106074.aspx