

核电站三维设计验证平台的开发^①



张琳

(上海核工程研究设计院有限公司 信息文档管理中心, 上海 200233)

通讯作者: 张琳, E-mail: zhangl@snerdi.com.cn

摘要: 本文利用虚拟现实技术开发三维设计验证平台, 从而优化设计, 直观地分析设备的可达性、可拆卸性和可维护性, 为现场施工、调试、运维等提供虚拟仿真平台进行方案预演和反馈. 其中结合核电站三维模型的特点, 重点分析虚拟现实软件与三维设计软件之间的接口转换问题, 核电站庞大的三维模型轻量化问题.

关键词: 三维设计; 虚拟现实; 验证

引用格式: 张琳. 核电站三维设计验证平台的开发. 计算机系统应用, 2019, 28(12): 99-104. <http://www.c-s-a.org.cn/1003-3254/7200.html>

Development of Nuclear Power Plant 3D Visual Design and Verification Platform

ZHANG Lin

(Department of IT & Document Management Center, Shanghai Nuclear Engineering Research & Design Institute Co. Ltd., Shanghai 200233, China)

Abstract: This study develops 3D visualization design verification platform by virtual reality technology, to optimize the design, intuitively analyze of product manufacturability, accessibility, disassembly and maintenance, provides a visualized platform for construction, commissioning, operation and maintenance to rehearsal and feedback. The study focuses on the selection method of the virtual reality software, and solves the problem of interface transformation between virtual reality software and 3D design software.

Key words: 3D design; visual reality; verification

随着计算机应用水平的不断提高, 在核电设计领域中, 计算机辅助设计的潮流早已从传统的二维设计手段发展到了人机交互式的、高度集成化的、智能化的三维设计阶段. 通过三代核电的引进消化吸收, 我们发现国外业主对设计过程、设计文件等工程和设计的全生命周期内容均有远远超出国内建设的需求, 国内外很多竞争对手都在纷纷搭建或已经搭建好适合自身需求的三维数字化协同设计系统.

据调研了解, 美国、西欧等发达国家早在 80 年代中后期就相继研究开发了以计算机辅助三维设计技术为核心的适用于核电站全寿期的综合协同设计平台, 并将其应用于各类核电工程. 例如美国 ABB-CE 公

司、西屋公司的三代核电站, 法马通公司的 N4 反应堆, GE 公司的 ABWR 都是在整合信息化资源的基础上, 大量重复地借鉴工程模型库、标准库和数据库, 而缩短了设计建造周期, 降低了造价, 直接提高了商用核电站的竞争力. 另外, 三维设计技术还广泛应用于核工程规划、厂址选择、项目前期研究、核设施设计、核安全分析、工程建设管理、事故分析和事故应急方案设计等领域. 发达国家核工程建设和核工程设计的高效率和高质量, 是与他们拥有先进、适用的核工程综合设计平台分不开的.

目前, 国内设计院早已在三代非能动系列核电设计中实现了三维数字化, 在此基础上利用三维仿真技

① 基金项目: 国家科技重大专项 (2017ZX06002001)

Foundation item: National Science and Technology Major Program (2017ZX06002001)

收稿时间: 2019-04-01; 修改时间: 2019-04-26, 2019-06-04; 采用时间: 2019-06-19; csa 在线出版时间: 2019-12-10

术,可以对核电站建造、调试、运行以及退役阶段各类工程进行模拟和预演,从而验证设计方案的可行性并优化,有效地控制风险、降低实施成本。

1 技术发展现状和存在问题

经过多年的努力和应用,设计院已形成了三维设计平台,覆盖各工种专业。见图1。

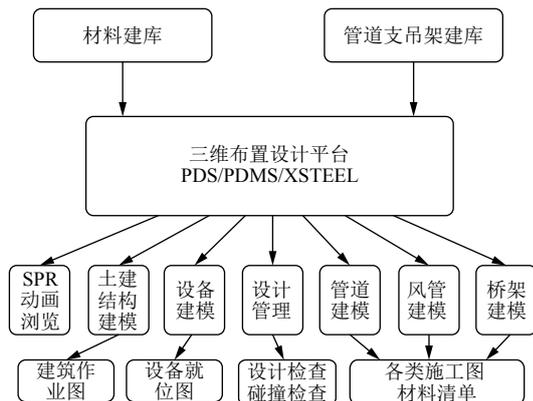


图1 三维布置设计平台构架

三维技术是信息数据交互的必要方法,是智能化分析的重要手段,是核电站数字化的基础。但仅有三维布置设计技术,仍存在的主要问题有以下几个方面:

1) 各专业开展布置设计时是否严格遵循设计准则难以判断,人因工程学与布置的融合没有合适的方法,仅有管理规定。

2) 采用三维设计后施工现场仍存在碰撞干涉等问题,三维设计还处于静态数据层面,三维模型没有最大化发挥价值。

3) 工厂三维设计与设备设计、力学分析、人因、施工运维等方面相对孤立,其内涵与价值需要挖掘利用。

4) 设计方案缺乏有效的验证手段,设计应为建造、运行等阶段提供更好的服务。

5) 施工方案验证模拟造价昂贵,尤其是放射区域难以测试演练。

开发三维工程设计验证平台的目的是,就是在非能动自主核电项目中,利用虚拟现实技术实现从设计、设备制造到施工建造等项目生命周期各阶段,工艺流程仿真、地理信息系统分析与建造等方面的应用,优化设计。并采用虚拟仿真平台的人机工程模块,与三维工厂模型结合,利用模拟操作员体型的人体模型对大型设备、模块及主要工艺流程进行可拆性、可达性

和可维护性方面的分析评估,为现场施工、调试、运维等提供虚拟现实平台进行方案预演和反馈,为项目全生命周期各阶段相关单位提供技术支持服务,比如为业主在运维阶段制定施工方案进行辅助决策支持。

2 三维设计验证平台的技术方案

虚拟现实(virtual reality)技术是指利用计算机等硬件设备,以及各种配套软件来进行情景的综合模拟,使得体验人员可以在视觉、听觉、触觉等感觉上有一种逼真的虚拟体验和感受^[1]。虚拟现实系统主要包括外在虚构模拟的场景、人体大脑、五官和四肢接受和发出的感觉信号、人体做出的反应行为动作,以及头盔、手套、眼镜等人体穿戴设备等^[2]。虚拟场景背后潜藏着大量逻辑关联、对象属性、技术规则和物理定律,对发生的事件无需全部做事先定义,物项具备自主动作的特点^[3]。虚拟现实技术的发展经历了3个阶段,从19世纪60年代开发的可以三维显示的摩托车仿真器,到“图形学之父”Ivan Suntherlan开发的头盔显示器,可以称之为对虚拟现实技术的探索阶段^[4]。接下来在80年代提出了虚拟现实VR技术的基本概念,如今随着互联网及计算机技术的蓬勃发展,VR技术已经在多个领域开始应用,比如教学、医学、培训、娱乐、汽车设计航空航天等行业^[5],可以节省成本,变革设计方式。

随着虚拟现实技术的不断发展,未来将会在越来越多的行业领域中得到挖掘应用。核电行业也在探索如何应用这一技术,由于核电站场景较大且模型数量较多,针对核电站进行虚拟现实的研究一直以来受到计算机及图形硬件的限制。同时,对于虚拟现实引擎的执行效率也要求较高。

当前,对于第三代核电站,设计方基本都采用了三维设计工具完成核电站的三维布置工作。核电厂中大多数设备、管道、风管、桥架、混凝土等都建立了相应的三维模型。这些三维设计模型为核电站虚拟现实的研究提供了便利。另一方面,近年来虚拟现实引擎的发展以及计算机硬件的不断升级,针对整个核电站进行虚拟现实的研究有了更高的可操作性。

通过建设三维可视化图形引擎、数据总线 and 平台接口、设计可视化验证原理、全厂数字地图、地理信息系统和评估模型等开发可视化虚拟工程平台和三维分析验证技术。

作为一项尖端科技,虚拟现实集成了计算机图形

技术、计算机仿真技术、人工智能、传感技术、显示技术、网络、并行处理等技术的最新发展成果,是一种由计算机生成的高技术模拟系统.随着计算机软硬件的发展,应用成本不断的下降,虚拟现实的应用范围也在逐步扩大.对于核电项目,虚拟现实技术可以在各个环节发挥作用.结合虚拟现实技术,可以将传统的实物仿真实验转变成半实物乃至全数字化仿真实验,大大减少实验投入,缩短实验周期;通过虚拟现实技术,可将人因工程学与电厂各阶段相结合,全面提升设计、制造、施工和运维的质量;虚拟现实技术与电厂各类静态及动态数据结合,可以实现可视化工程数字建安研究,可视化数字维修规划,可视化调试和运行,升级核电厂数字化服务手段,提升整体服务能力.

作为3D全数字工厂的技术基础,必须要建立一套覆盖电厂全工种、全生命周期的三维虚拟技术平台,保证各个工种相关虚拟仿真研究的开展.但由于目前市场上各类商用的虚拟仿真系统,都不能完全满足核电厂全工种全生命周期的虚拟仿真研究需求.因此,本专题的研究就是要建立一套基于成熟的、国际通用的图形平台,针对核电工程的需求,满足核电厂各专业、各学科、各阶段需求的虚拟仿真平台.经过调研比较,达索公司的DELMIA既能支持精确三维模型也能支持轻量化面片模型,且提供了人体模型,省去了利用3dsMAX或者Maya等工具制作人体模型的过程.因此最终选定了DELMIA作为三维工程设计验证平台的主要软件.

为了实现3D全数字电厂,除了需要建立一套支持虚拟仿真技术的现实系统外,还需要其他一系列相关系统作为支持.必须建立一套集成的数据体系,容纳虚拟仿真系统后台的大量静态以及动态参数,并能被虚拟电厂快速调用.需要建立一整套的数据接口,以获得各个专业平台上形成的设计以及分析数据,也包括电厂的实时运行数据.打通虚拟仿真平台与动态性能运算平台的接口,形成双向控制,实现设计验证、运行维护等功能.只有将这一系列系统完成并整合,最终形成的虚拟电厂可以为各个专业提供强大的虚拟仿真功能,满足电厂全工种、全寿期虚拟仿真需求.

开发出的核电站三维设计验证平台创新点如下:

(1) 自主开发三维设计平台与虚拟现实平台的接口:由于三维工厂设计软件PDS与虚拟现实软件DELMIA之间模型交换存在缺失,所以针对此问题本

文开发了模型转换接口.针对设计方案验证需求开发的高精度模型转换程序,该程序能够将PDS模型的几何数据进行解析,然后在CAA环境下重构成DELMIA格式的参数模型,极大的保证了模型的精度与完整性.

(2) 解决核电模型轻量化的问题:核电站模型与其他行业不同,设计复杂,模型精细化程度高,模型体量巨大,如何便捷、高效的使用模型一直是令核电行业棘手的问题.市场上能买到的轻量化模型处理软件仅解决了模型体量问题,最关键的数据参数缺失.本文针对模型浏览、查询及辅助评审等需求开发的轻量化面片模型转换程序不但解决了此问题,该程序相对于软件自带的转换插件还保留了原模型中的数据结构,开发的成果可用于各类应用场景.

3 关键技术与难点

准确、完整的三维模型是三维工程设计验证平台及数字电厂的基础,设计院投入大量人力积累了各专业三维数据模型,且经过严格的质量控制流程,奠定下坚实可靠的数据基础.而当前设计院三维设计软件如PDS的模型格式与DELMIA不兼容.达索公司设计软件输出的模型格式为.CATPart,轻量化模型格式为.cgr.达索公司虚拟仿真软件DELMIA能够完美兼容.CATPart、.cgr等达索公司自有三维模型格式,也能够兼容.wrl、.stp、.iges等常见格式.PDS模型不能直接为三维工程设计验证平台及数字电厂直接所使用,为满足三维工程设计验证平台及未来数字电厂对三维模型数据的需求,需要对PDS模型进行格式转换.PDS的文件格式为.dgn, Microstation虽然提供了将.dgn文件转化为.wrl、.stp、.iges等通用格式的插件^[6],但是经过实际测试发现在转换过程中存在以下问题:

1) 模型文件几何信息有缺失,如管道阀门的模型残缺不全.如图2所示.

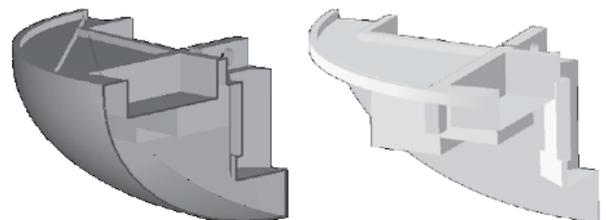


图2 使用自带插件转换效果

2) 无法将模型的属性信息如编号,物理参数等导入到转换后的文件中.

3) 转换后的模型为非参数化的面片模型, 面片数目较大, 占用内存较多.

3.1 参数模型接口开发

为解决上述问题需要开发专门的三维模型转换程序, 该程序应包含两个模块: 模型解析模块与模型重构模块.

模型解析模块使用 Microstation 二次开发工具 MDL (Microstation Development Language) 以 Visual Studio 2005 为开发环境, 在 Visual Studio 2005 中进行模型解析, 具体过程如下:

载入 DGN 文件, 扫描文件中的所有三维元素, 获取三维元素的元素描述符, 逐一对元素描述符进行分析, 判断其几何体类型、获取其 Linkage (含有模型的编码)、模型的颜色、材质等参数信息和决定几何体的关键参数的全局坐标, 然后将每个三维元素的信息作为一条信息写入中间文件.

模型重构模块先读取中间文件的文件名并创建根节点, 以文件名作为根节点名称, 然后读取每个元素描述符对应的 Linkage, 以 Linkage 为子节点名创建子节点, 再将元素描述符关联的所有几何体逐一重构创建几何体, 并将每个几何体作为叶节点插入子节点下面.

在进行模型解析之前, 应定义基本几何体库, 该库包含了多种基本几何体, 任何 PDS 模型都可以由几何体库中的一个或多个基本几何体组合而成, 该基本几何体库可以进行扩展, 即在解析 PDS 模型几何信息时, 若在基本几何体库中找不到对应的基本几何体或者将模型分解后分解的模型仍然在基本几何体库中找不到对应的基本几何体. 这说明库中的基本几何体无法表达该模型, 这时可将其加入基本几何体库.

通过模型转换接口之后, PDS 模型与 DELMIA 模型的数据结构对应关系如图 3 所示.

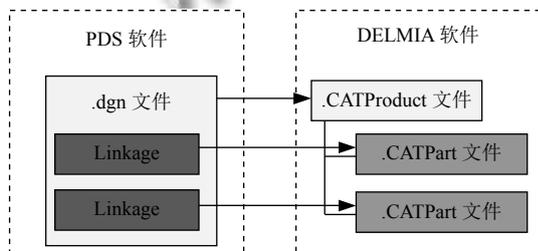


图 3 数据结构对应关系图

利用参数化模型接口对 DGN 文件进行转换的效果如图 4 所示.

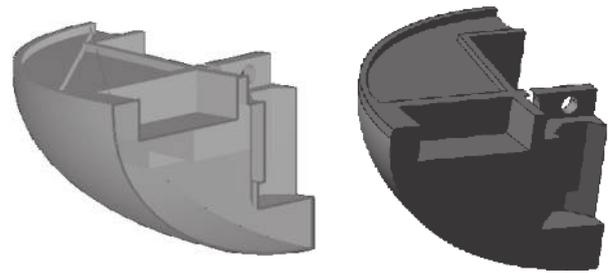


图 4 模型转换接口程序效果

3.2 轻量化模型接口开发

核电站模型具有工艺复杂、大型设备居多、精细化程度高、体量巨大的特点. 参数模型是一种无损模型, 在进行设计验证时是必要的, 但是其数据占用内存大. 特别是当大量模型位于同一场景时, 会拖累软件性能^[7]. 对于属性查询、浏览等功能需求来说, 其侧重速度, 要求模型占用内存小, 所以参数化模型不是很适合, 只有轻量化的模型能满足这一需求.

目前利用一些软件自带的转换插件虽然能将 DGN 模型转化成面片模型, 但是这些插件只使用了一些通用的、简单的算法对模型整体进行面片化, 转换出来的模型存在占用内存较大; 包含大量无用信息; 属性信息丢失; 模型是一个整体, 三维软件无法对文件中特定的几何体进行操作等问题. 这给对模型的操作如移动、属性查询等造成了很大的不便.

为克服目前模型转化插件存在的问题, 为三维可视化工程设计验证平台提供一种轻量化的核电站模型, 本文研究了将 DGN 模型转化成轻量化模型的方法, 思路是: 对 DGN 文件中的几何模型进行拆解并单独轻量化, 导出时再重新合并; 并将每个几何体的编码、材质、颜色等属性取出, 然后将其写入到轻量化模型文件中. 这个方法转化的轻量化模型包含了原 DGN 文件中所有几何体的编号、属性等信息, 为三维可视化工程设计验证平台进行查询、漫游等操作提供支持.

程序具体思路为: 对一个 DGN 文件, 首先获取其所有模型描述算子, 然后从模型描述算子中获取模型的类型, 将独立的点、线段等不是三维几何体的元素滤除. 获取模型描述算子中几何体的编码即 Linkage、颜色、材质等属性信息, 若模型描述算子关联的模型其类型为 CELL_HEADER_ELM, 则须进入到模型描述算子的下一层级, 然后再逐个分析其子模型描述算子对应的每个模型, 直至子模型描述算子对应的模型

其类型为诸如 CONE_ELM、SOLID_ELM、SURFACE_ELM、B-SPLINE SURFACE_ELM 等几何体类型. 将每种几何体 (包含三维几何实体、曲面) 进行面片化, 每种几何体面片化的方式有所不同, 面片化的原则是将构成几何体的所有曲面 (包含平面) 抽取出来, 然后将该曲面面片化, 再将其合并成原来的几何体. 得到几何体面片化数据后将其按 obj、vrl 或者其他的语法格式写入到文本文件中, 每个几何体包含了编码、颜色、材质等信息. 这样就得到了一个轻量化的 wrl 或者 obj 模型文件, 也可以按照其他文件格式的语法写成所需要的格式.

轻量化程序流程如图 5 所示.

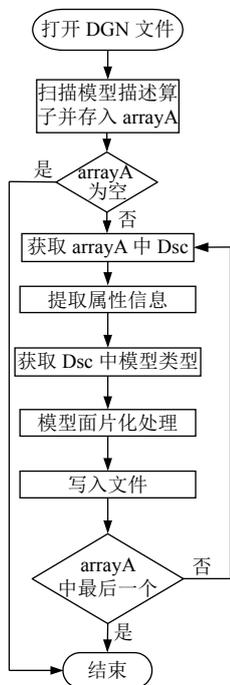


图 5 轻量化程序流程

其中获取 Dsc 中模型的类型具体过程如图 6 所示. 元素面片化处理的具体过程描述如下:

曲面 (包括平面) 的面片化数据存储两个数组中, 第一个数组 PointArray 存放构成曲面的所有点的三维坐标; 第二个数组 IndexArray 存放构成面片的点在 PointArray 中的索引号, 每个面片的索引号之间用数字“-1”隔开.

对于只包含一个曲面即无须“爆炸”的几何体可直接面片化得到其数据. 对于可“爆炸”成多个曲面的几何体或者曲面则先进行“爆炸”, 获取每个曲面的面片化

数据, 依次存放在 IndexArray1、PointArray1; IndexArray2, PointArray2, ..., IndexArrayN, PointArrayN 中. 然后拼接成一个曲面, 拼接方式为: 新建一个数据数组 PointArray, 大小为 PointArray1, PointArray2, ..., PointArrayN 中元素数目之和, 将每个子曲面的数据数组中的元素按顺序存放到 PointArray 中; 新建一个索引数组 IndexArray, 大小为 IndexArray1, IndexArray2, ..., IndexArrayN 之和, 第一个子曲面索引数组所有元素原样依次放入 IndexArray, 第二个子曲面索引数组中所有的索引值加上第一个子曲面数据数组元素个数后存入新的索引数组, 以此类推将其他子曲面的索引数组元素存入新的索引数组. 这样拼接好的几何体或曲面的面片化数据存放到了两个数组 PointArray 与 IndexArray 中.

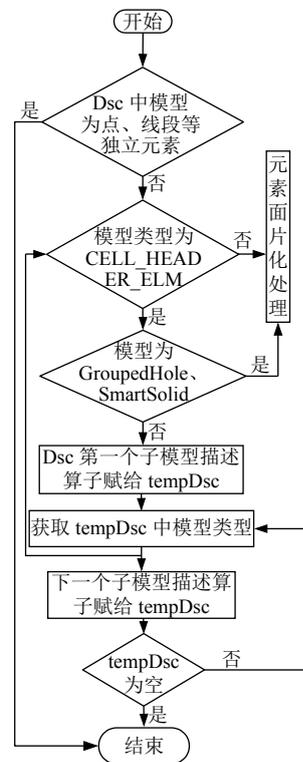


图 6 获取 Dsc 中模型类型的过程

轻量化文件格式可以按照需要写成 obj、wrl 或者其他格式. DGN 文件对应的轻量化模型文件的结构树如图 7 所示: 第 1 层为文件层级, 一个 DGN 文件对应一个轻量化文件; 第 2 层为编码层级即 Linkage 层级, 模型的颜色、材质等属性信息位于该层级, 在三维软件中能对该层级的某个几何体进行平移、旋转等单独操作; 第 3 层为模型描述算子层级, 若模型描述算子无

子描述算子, 则该层级只有一个几何体, 若有子描述算子则可能是多个该层级的结合体组成一个编码级别的几何模型; 第4层级为最底层, 描述的是“爆炸”后的曲面数据, 不过由于“爆炸”后的曲面进行了合并, 在轻量化文件中体现不出这一层。

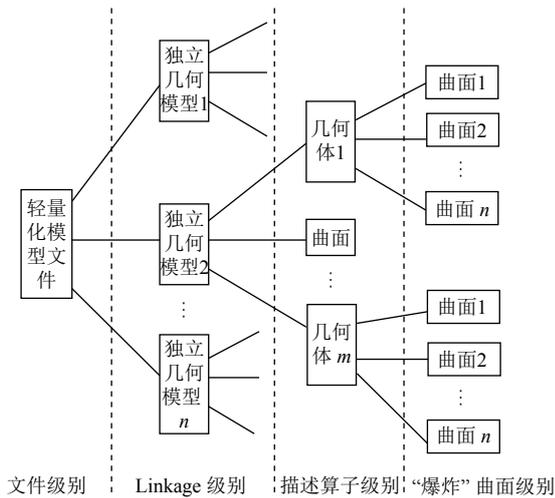


图7 轻量化模型文件结构树

轻量化模型转换程序转换的模型实例效果如图8。



图8 轻量化模型转换程序实例效果

4 结论与展望

目前三代非能动系列核电项目全部基于PDS等三维设计平台进行设计, 成品文件包括布置图、管道

立体图、设备安装图、支架图、材料清单等。通过直接三维建模可使设计更加直观, 避免二维设计中常遇到的碰撞问题, 减少设计返工。但采用三维设计后施工现场仍存在碰撞干涉等问题, 因为三维设计还处于静态数据层面, 三维模型没有最大化发挥价值。在工程实施过程中还需对安装、调试、运行、维护等方面的一些技术细节进行预先的分析和评价。

本论文利用虚拟现实技术开发三维设计验证平台, 通过仿真模拟验证优化设计方案, 为现场施工、调试、运维等提供虚拟现实平台进行方案预演和反馈。研究的难点是如何利用设计院投入大量精力积累的三维设计模型数据, 避免虚拟现实技术平台中的二次建模投入。

目前此论文研究成果已成功运用在多个核电工程项目中, 大幅提高设计质量, 并拓展了核电业务市场。

参考文献

- 李沅粟. 虚拟数字图书馆的浏览设计探讨. 兰台世界, 2014, (8): 40-41. [doi: 10.3969/j.issn.1006-7744.2014.08.025]
- 李杰. 虚拟现实技术的历史和未来. 黑龙江科技信息, 2009, (26): 87. [doi: 10.3969/j.issn.1673-1328.2009.26.092]
- 刘鹏飞, 杨燕华, 杨永木, 等. 虚拟现实技术在核电厂仿真中的应用. 原子能科学技术, 2008, 42(S1): 169-175.
- 王梅艳. 虚拟现实技术的历史与未来. 中国现代教育装备, 2007, (1): 108-110. [doi: 10.3969/j.issn.1672-1438.2007.01.050]
- 姚熊华, 李磊, 张杰. 虚拟现实技术在飞机设计中的应用. 航空制造技术, 2013, (3): 67-70. [doi: 10.3969/j.issn.1671-833X.2013.03.014]
- 匡卫军, 于潇. 基于虚拟仿真的核电站虚拟维修研究. 核工业勘察设计, 2016, (1): 77-83.
- Kuang WJ, Yu X, Zhang L. Research of nuclear power plant in-service maintenance based on virtual reality. Journal of Nuclear Engineering and Radiation Science, 2016, 2(4): 044507. [doi: 10.1115/1.4032598]