引文格式：张恒，赵文，贾丰品，等. 基于虚拟地理环境的施工机械动态可视化仿真方法[J]. 地理空间信息，2023，21(4)：10-15. doi:10.3969/j.issn. 1672-4623.2023.04.003

基于虚拟地理环境的施工机械动态可视化仿真方法

张　恒[1,2]，赵　文[1,2]，贾丰品[3]，范登科[1,2]，马婷婷[4]，张　丽[1,5]
（1. 中国铁路设计集团有限公司，天津 300308；2. 城市轨道交通数字化建设与测评技术国家工程研究中心，天津 300308；
3. 北京品源专利代理有限公司，天津 300000；4. 成都市规划编制研究和应用技术中心，四川 成都 610000；
5. 中国铁路设计集团有限公司生产经营中心，天津 300308）

摘　要：施工机械野外作业过程动态多变、工况复杂，为了预演施工方案、减少空间碰撞等安全隐患，以吊装作业为例提出一种虚拟地理环境下的施工机械动态作业可视化仿真方法。通过对施工机械模型进行构件级分解，建立各构件之间的语义关系，实现虚拟地理环境中的模型重装配；然后建立施工机械作业时各关节模型之间动态联动的约束关系，实现关节联动的施工机械作业可视化仿真。通过搭建施工点处虚拟地理环境开展仿真实验表明，该方法可实现施工机械作业过程的动态控制、预演展示，科学指导施工方案确立与隐患排查；仿真过程的参数化存储能够指导实际施工操作，并实现仿真场景的动态编辑与实时重现。

关键词：虚拟地理环境；关节联动；可视化仿真；动态控制；参数化存储
中图分类号：P208　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2023）04-0010-06

Dynamic Visual Simulation Method of Construction Machinery Based on Virtual Geographical Environment

ZHANG Heng[1,2], ZHAO Wen[1,2], JIA Fengpin[3], FAN Dengke[1,2], MA Tingting[4], ZHANG Li[1,5]
(1. China Railway Design Corporation, Tianjin 300308, China;
2. National-Local Joint Engineering Laboratory of Rail Transit Survey & Design, Tianjin 300308, China;
3. Beyond Attorneys At Law, Tianjin 300000, China;
4. Chengdu Planning Research and Application Technology Center, Chengdu 610000, China;
5. China Railway Design Corporation Business Operation Center, Tianjin 300308, China)

Abstract: The field operation process of construction machinery is dynamic and complex, and the working conditions are complicated. In order to preview the construction plan and reduce space collision, taking the lifting operation for example, we proposed a visual simulation method for the dynamic operation of construction machinery in a virtual geographical environment. We decomposed the construction machinery model at the component level, established the semantic relationship between the components, and implemented the reassembly of model in the virtual geographical environment. Then, we established the constraint relationship of dynamic linkage between the joint models during the operation of construction machinery, and realized the joint linkage construction machinery operation visual simulation. We set up a virtual geographical environment at the work site and carried out simulation experiments. The results show that the method in this paper realizes the dynamic control and rehearsal display of construction machinery operation process, and scientifically guides the establishment of construction plan and the investigation of hidden dangers. The parameterized storage of simulation process can guide the actual construction operation, and realize the dynamic editing and real-time reproduction of simulation scene.

Key words: virtual geographical environment, joint linkage, visual simulation, dynamic control, parameterized storage

铁路工程施工常需借助施工机械完成，而施工机械野外作业时工况复杂、流动性大，施工机械与周围环境之间的关系动态多变，造成巨大的安全风险。虚拟地理环境以虚拟现实技术为核心，能够支持在虚拟地理空间中开展复杂性大系统科学实验和管理分析[1,2]。在虚拟地理环境中对施工机械作业进行仿真，通过预演作业过程来预判风险和事前控制，有助于提高施工过程的安全性[3-5]。

目前，基于虚拟地理环境的可视化仿真步骤为：通过模型装配等方式生成主体工程模型，并将其与地形、影像等地理空间数据进行融合，生成虚拟地理环境[6-8]。然后，通过对模型构件赋色[9]、显隐控制[10]等

收稿日期：2021-12-20；修回日期：2023-01-04。
项目来源：国家自然科学基金资助项目（U2034202）；中国铁路设计集团有限公司重点课题（2022A02538002、2022A02538013、2020YY241011、2020YY241001）；天津市科技计划项目（20YFZCGX00710）。
第一作者简介：张恒（1989—），博士，高级工程师，主要研究方向为虚拟地理环境与三维地理信息技术，E-mail：zhangheng3s@163.com。

操作实现对施工进度的仿真；通过进行参数化建模，并与地形数据进行求交运算，实现基于地形的施工方案仿真[11]。然而，这些研究都是基于静态模型的可视化展示，不能满足施工机械动态作业仿真的需求。部分研究使用3ds Max、CATIA、C4D、Bentley等建模软件，通过在建模软件中编辑每一帧时模型的作业状态，经过后续的渲染和烘焙，最终完成施工仿真[12-15]。这种方法能够实现复杂的工艺动画模拟，侧重于在视觉层面形成逼真的可视化效果，然而，这种方法无法实时地对施工机械作业进行动态模拟，施工过程的控制需要事先在建模软件中对关键帧进行手动更改，不支持交互性操作与修改，存在成本高、成果固化、效率低等问题。因此，如何能够实时对施工机械进行动态控制，在虚拟地理环境中预演施工方案，对施工方案的可行性进行科学分析，便成为研究的关键。

本文以铁路工程施工中常用的吊装施工为例，并基于虚拟地理环境，提出一种参数驱动下关节联动的起重机动态作业仿真方法。首先，对起重机进行分解，根据分解后各子关节之间的联动关系，抽取关节活动参数，用于对起重机作业动作进行实时计算。由于关节活动参数不利于用户的控制，因此，在抽取了关节活动参数之后，又根据用户的使用和认知习惯，抽取了动画控制参数，便于用户对起重机的控制。其次，建立动画控制参数到关节活动参数的映射关系，实现从用户操作到起重机运转的实时转换。然后，通过对起吊物进行附着联动，建立起重机附着起吊物的数学模型，实现起重机作业过程的模拟。最后，记录并导出起重机作业过程中每一帧的关键参数，实现吊装过程的存储，并对关键帧信息进行内插，对作业过程进行重现。

1　基于虚拟地理环境的施工机械动态作业可视化仿真方法

施工机械模拟涉及到较为复杂的机械关节控制和各关节的联动、机械与物料之间的传送关系。关节联动是指两个或两个以上的独立关节同时在不同平面内进行活动，共同完成一个动作。通过模型与母体附着并进行相对定位，经多级坐标系转换，得到构件模型在三维场景中的位置和姿态参数，实现构件定位与装配。由于关节之间彼此相邻，因此在研究关节动画时，可用相对定位的方法，只需考虑构件与母体之间的相对关系。本文方法包括关节活动参数抽取、动画控制参数抽取、参数间的映射关系建立、附着物联动模型建立、作业动画参数存储等步骤，具体技术路线如图1所示。

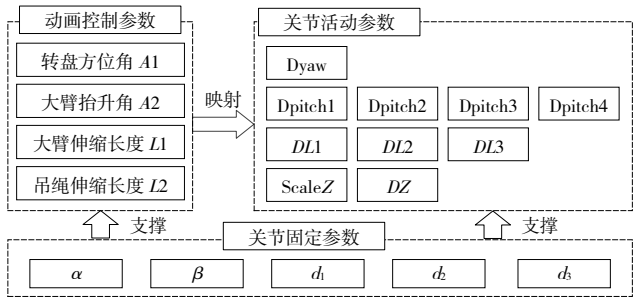


图1　论文总体框架

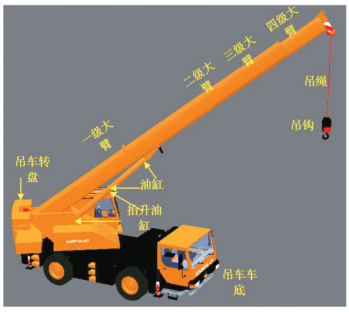
1.1　施工机械模型分解与施工过程参数化描述

虽然施工机械作业方式多样化，但施工机械中各关节的运动方式却是固定的。可以根据施工机械的作业动作，按关节对施工机械模型进行分解，并确定每个关节的动作，从而为机械作业参数的抽取奠定基础。

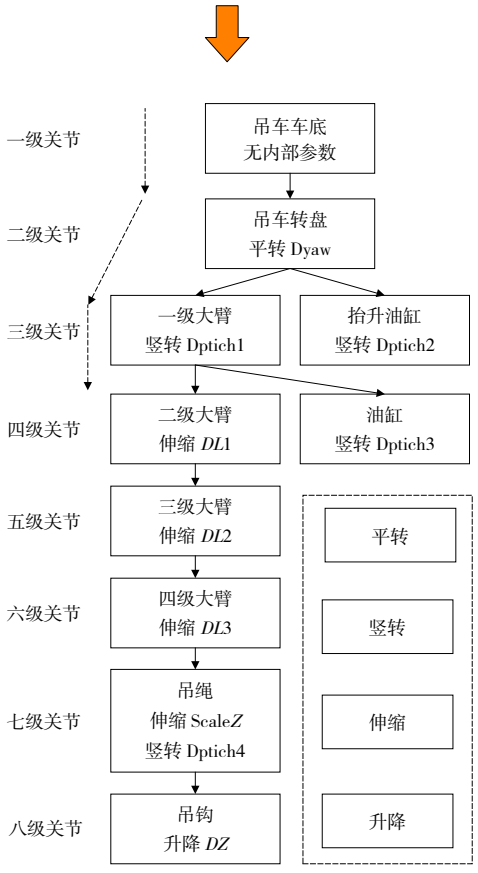
以起重机为例，将起重机的关节拆分为：起重机车底、起重机转盘、一级大臂、二级大臂、三级大臂、四级大臂、吊绳、吊钩、油缸、抬升油缸。各关节的关节活动参数为：起重机转盘平转 Dyaw 、一级大臂竖转 Dpitch1 、二级大臂平移 *DL*1 、三级大臂平移 *DL*2 、四级大臂平移 *DL*3 、吊绳 *Z* 方向缩放 ScaleZ 、吊绳竖转 Dpitch4 、吊钩升降 *DZ* 、油缸竖转 Dpitch3 、抬升油缸竖转 Dpitch2 。其中，起重机车底无内部活动参数。

对模型关节进行分解之后，还需根据模型的联动关系确定各关节的级别，即模型之间的相互附着关系。由于其他关节都以起重机车底为最终参照，因此起重机车底为一级关节；起重机转盘附着于起重机车底，为二级关节；一级大臂、抬升油缸均附着于起重机转盘，为三级关节；二级大臂、油缸为附着于一级大臂之下的四级关节；三级大臂为附着于二级大臂的五级关节；四级大臂为附着于三级大臂的六级关节；吊绳为附着于四级大臂的七级关节；吊钩为附着于吊绳的八级关节。

模型关节的分解、各关节的动作以及关节之间的附着联动关系如图2所示。其中，图2（a）为起重机各关节名称，图2（b）为关节的活动参数和关节之间的附着联动关系。图2（b）中虚线表示联动关系的传递，即，子关节会随着父关节的运动而运动，运动的形式主要包括平转、竖转、伸缩、升降。



（a）起重机模型关节分解



（b）起重机模型关节联动关系

图2　起重机模型各关节之间的联动关系

关节活动参数侧重描述各关节的几何信息，如旋转角度、长度缩放等。虽然关节活动参数便于直接计算各关节的形态，但对用户而言并不够直观。因此，还需要面向用户封装一套便于用户操作的动画控制参数。

面向用户操作的动画控制参数有4个，包括起重机转盘相对于起重机车底的旋转角，即起重机转盘方位角 *A*1，该参数影响了起重机转盘的平转参数Dyaw；起重机大臂的抬升角度 *A*2，该参数描述了抬升大臂的角度信息，*A*2 影响了一级大臂、抬升油缸、油缸、吊绳的竖转角，即 Dpitch1、Diptch2、Diptch3、Diptch4；吊臂伸缩长度 *L*1，由于二级与三级大臂附着于一级大臂上，因此二三级大臂的竖转角与一级大臂保持一致，而 *L*1 直接影响了二、三、四级大臂的伸缩长度 *DL*1、*DL*2、*DL*3；吊钩提放长度 *L*2，该参数直接影响吊绳沿竖直方向的伸缩参数 Scale*Z* 和吊钩的升降高度 *DZ*。

1.2　关节联动的施工机械作业仿真方法

本部分面向施工过程的动态性和复杂性，提出使用参数化建模方式对施工过程进行描述。动画控制参数面向用户，用于对虚拟施工的控制。而在施工仿真中，则是使用关节活动参数计算各关节位置和姿态。因此，需要建立动画控制参数到关节活动参数的映射关系，以便能够根据关节参数实时进行构件模型的重定位和装配，实现基于封装参数的机械动画任意控制。

图3展示了在关节固定参数的支撑下，动画控制参数到关节活动参数的映射关系。下面分别根据起重机作业过程中的作业动作，详细说明动画控制参数到关节活动参数的映射方法。

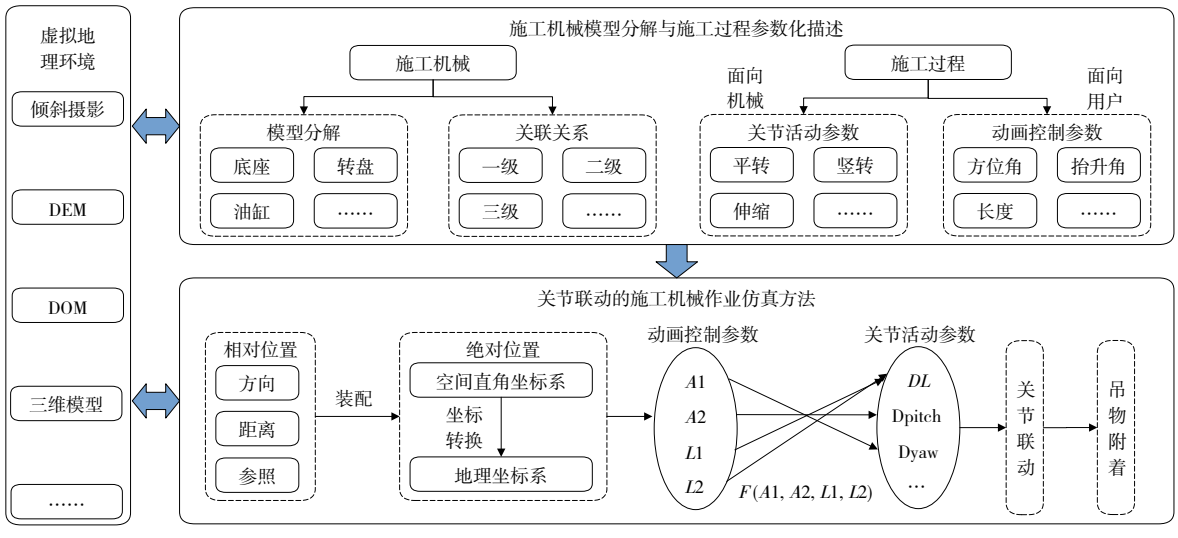


图3　面向动态施工过程的参数化建模方法

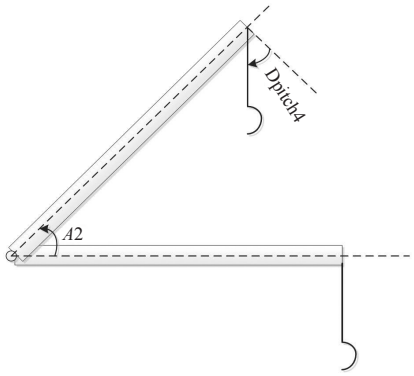


图4　大臂抬升对吊绳的影响

1）转盘平转：起重机转盘方位角为 $A1$，关联关节参数Dyaw，两个参数均记录了起重机转盘相对于起重机底座转动的角度，故而两者相等，如式（1）所示。

$$\mathrm{Dyaw}=A1 \tag{1}$$

式中，$A1$ 为起重机转盘方位角；Dyaw 为起重机转盘平转的角度。

2）大臂抬升：大臂抬升时，能引起大臂竖转、吊绳竖转，以及油缸与抬升油缸的竖转。

①大臂竖转角：大臂在竖直方向转动时，大臂的抬升角应与大臂竖转角相等，如式（2）所示。

$$\mathrm{Dpitch1}=A2 \tag{2}$$

式中，$A2$ 为大臂抬升角；Dpitch1 为大臂竖转角。

②吊绳竖转角：大臂抬升对吊绳的影响如图4所示。由于吊绳竖转的方向与大臂抬升的方向相反，因此吊绳竖转角与大臂抬升角互为相反数，如式（3）所示。

$$\mathrm{Dpitch4}=-A2 \tag{3}$$

式中，Dpitch4 为吊绳的竖转角。

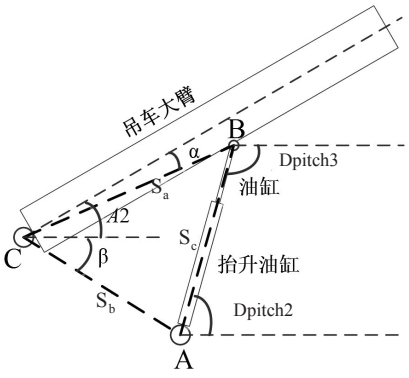


图5　大臂抬升时油缸与抬升油缸的竖转关系

③油缸与抬升油缸的输转角：在大臂抬升时，油缸与抬升油缸也随之而变动，如图5所示。其中，A点为抬升油缸的旋转基点，B为油缸的旋转基点，C点为大臂的旋转基点，A、B、C三点位置均固定。a为BC连线，表示抬升油缸旋转基点与油缸旋转基点之间的连线；b为AC连线，表示大臂旋转基点与抬升油缸旋转基点之间的连线；c 为AB连线，表示大臂旋转基点与油缸旋转基点之间的连线。在ΔABC中，可通过余弦定理求得 Dpitch2 和 Dpitch3 的值，如式（4）所示。

$$\begin{cases}\mathrm{Dpitch2}=180°-\beta-\angle\mathrm{CAB}\\ \mathrm{Dpitch3}=\mathrm{Dpitch2}-180°\\ \angle\mathrm{CAB}=\arccos\dfrac{S_c^2+\mathrm{S_b^2}-\mathrm{S_a^2}}{2\mathrm{S_b}S_c}\\ S_c=\sqrt{\mathrm{S_a^2}+\mathrm{S_b^2}-2\mathrm{S_a}\mathrm{S_b}\cos(A2-\alpha+\beta)}\end{cases} \tag{4}$$

式中，$\mathrm{S_a}$、$\mathrm{S_b}$ 为固定值（常量），分别表示a、b的长度；α为固定值（常量），表示a与大臂中心线之间的夹角；β为固定值（常量），表示b与水平线之间的夹角；S_c 为 c 的长度，会随着大臂的抬升而变化；∠CAB 为b与c之间的夹角；Dpitch2 为抬升油缸底部与水平线之间的夹角；Dpitch3 为抬升油缸顶部与水平线之间的夹角，即为 Dpitch2 的补角。



图6　大臂关节结构

3）大臂伸缩：图6展示了起重机大臂的构造，大臂包括一、二、三、四级关节。其中，一级大臂只能竖转，不能伸缩，当一级大臂竖转时带动其他大臂关节竖转。当大臂伸缩时，将伸缩长度平均分配到二、三、四级大臂中，因此，大臂伸缩时，各大臂节段的公式如式（5）所示：

$$\begin{cases}DL1=d_1+L1/3\\ DL2=d_2+L1/3\\ DL3=d_3+L1/3\end{cases} \tag{5}$$

式中，$DL1$、$DL2$、$DL3$ 分别为二、三、四级大臂的伸缩长度；d_1、d_2、d_3 分别为二级大臂距离一级大臂、三级大臂距离二级大臂、四级大臂距离三级大臂的距离；$L1$ 为大臂的伸缩量。

4）吊绳伸缩：吊绳在伸缩时，主要影响到吊绳自身长度和吊钩的相对高度。吊绳伸缩尺寸与自身长度相等，如式（6）所示：

$$\mathrm{Scale}Z=L2 \tag{6}$$

式中，$L2$ 为吊绳伸缩长度；Scale$Z$ 为吊绳自身长度。

当吊绳伸缩时，吊钩相对于吊绳顶部的高程差如式（7）所示：

$$DZ=-L2 \tag{7}$$

式中，DZ 为吊钩相对于吊绳顶部的高程差。

在对施工机械本身的关节动作进行模拟之后，还需要模拟施工机械起吊建筑部件时的动作，即，起吊物需要跟随施工机械的运动而运动，例如随大臂的旋转而旋转。因此，起吊物需要附着在施工机械上。在分析起重机本身的关节联动关系时，吊绳属于七级关节。在起重机进行起吊时，起吊物则需附着在吊绳上，成为八级关节。

在吊钩附着起吊物之前，需要记录吊钩与起吊物之间的相对关系，包括相对位置和相对姿态，以便在起吊过程中起吊物与吊钩之间保持相对静止的状态。由于要保证起吊物与吊钩之间相对静止，因此，起吊物与吊钩之间的相对关系需要在吊钩的模型坐标系中进行计算，而非世界坐标系。如图7所示，设吊钩处的模型坐标系为xOy，世界坐标系为XOY，吊钩处于 $p1$ 点，坐标为 (x_1, y_1, z_1)，起吊物处于 $p2$ 点，坐标为 (x_2, y_2, z_2)。起吊物与吊钩之间的相对姿态关系如式（8）所示。

$$\begin{cases}\Delta\text{yaw}=\text{yaw}(p2)-\text{yaw}(p1)\\ \Delta\text{pitch}=\text{pitch}(p2)-\text{pitch}(p1)\\ \Delta\text{roll}=\text{roll}(p2)-\text{roll}(p1)\end{cases}\tag{8}$$

式中，Δyaw、Δpitch、Δroll 分别为起吊物相对于吊钩的方位角、俯仰角、侧滚角；yaw($p2$)、pitch($p2$)、roll($p2$) 分别为起吊物的方位角、俯仰角、侧滚角，yaw($p1$)、pitch($p1$)、roll($p1$) 分别为吊钩的方位角、俯仰角、侧滚角。

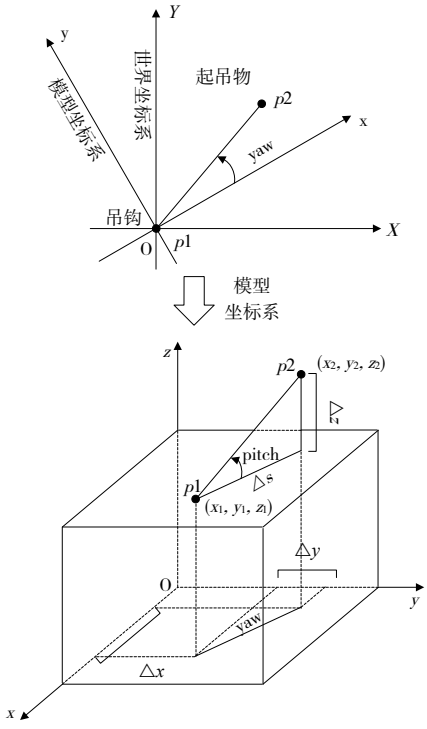


图7 起吊物与吊钩之间的相对关系

在吊钩的模型坐标系下，起吊物与吊钩之间的相对位置关系如式（9）所示。

$$\begin{cases}\Delta x=\Delta S\times\cos(\text{yaw})\\ \Delta y=\Delta S\times\sin(\text{yaw})\\ \Delta z=z_2-z_1\\ \Delta S=\cos(\text{pitch})\times\sqrt{(x_2-x_1)^2+(y_2-y_1)^2+(z_2-z_1)^2}\\ \text{yaw}=\text{yaw}(p1p2)-\text{yaw}(p1)\end{cases}\tag{9}$$

式中，Δx、Δy、Δz 分别为起吊物相对于吊钩在模型坐标系 x、y、z 方向上的差值；ΔS 为起吊物与吊钩之间的距离在xOy平面上的投影；yaw 为 $p1p2$ 连线与模型坐标系x轴方向的夹角；pitch 为 $p1p2$ 连线与水平面的夹角；yaw($p1p2$) 为 $p1p2$ 连线与世界坐标系X轴方向的夹角；yaw($p1$) 为模型坐标系x轴与世界坐标系X轴之间的夹角。

2 实验与分析

本文以某条跨既有线大桥的钢横梁吊装施工为例，验证本方法的有效性。该大桥横跨既有铁路线路，其中钢横梁在厂内进行集中加工，分为4个节段运输至现场，最大节段长7.2 m，采用两台QAY800型全地面起重机联合起吊钢箱梁到既有线上方墩台。根据平面设计图上起重机的平面位置和距离，初步判断两台起重机协同作业会在平面范围内发生机械臂碰撞的风险（如图8所示），因此需要采用三维虚拟施工的方式精确模拟吊装方案，以确保两台起重机协同作业方案的可行性。

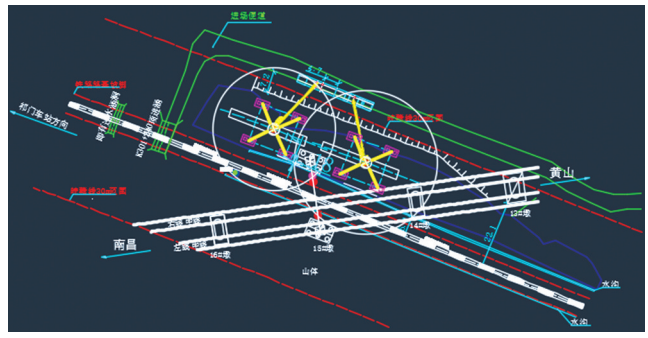


图8 两台起重机协同作业风险分析

本文以skyline平台为基础进行二次开发，开展施工仿真实验。首先，本文将倾斜摄影、DEM、DOM、施工工点处三维模型等数据进行融合，建立虚拟地理环境。然后，将QAY800型全地面起重机进行关节分解，并抽取关节活动参数，用于施工机械作业仿真，抽取动画控制参数，用于控制起重机的作业方式。最后，建立动画控制参数到关节活动参数的映射关系，并建立起吊物的附着模型。基于参

数驱动机械动画的原理和相关计算工具，可通过记录机械的状态参数来编辑连续作业的动画脚本，状态之间通过参数的平滑过渡实现机械作业复杂动画的编辑和播放。

起重机作业仿真涉及到较为复杂的机械关节控制和各关节的联动、机械与物料之间的传送关系。通过控制转盘方位角、大臂抬升角、大臂伸缩长度、吊绳提放长度等参数，实现施工机械的灵活作业。通过将起吊物与吊绳进行附着，实现起吊物与吊绳之间的联动，从而灵活模拟施工机械作业过程。同时，为保证跟随吊钩与钢梁位置拟合准确，吊装旋转角度要小，一般小于10°。图9展示钢梁起吊、角度调整、进入既有线、落梁到墩台等过程，验证了起重机协同作业方案的可行性。同时，将仿真参数进行导出，有助于指导实际的施工过程。

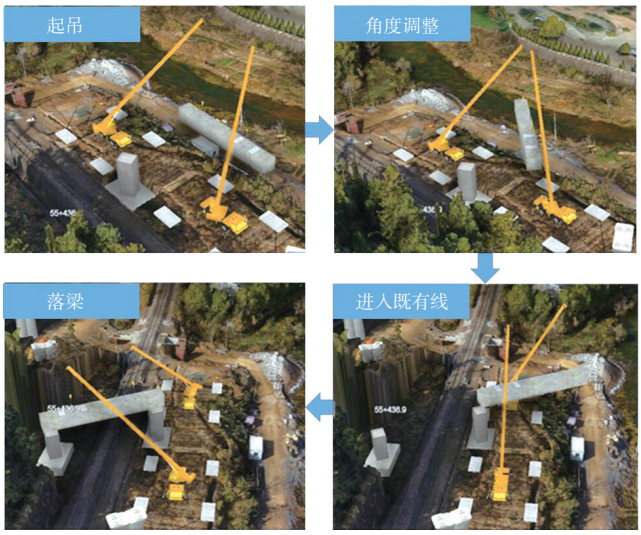


图9　基于虚拟地理环境的起重机协同作业方案仿真分析

3　结　语

为了对施工过程中的安全隐患进行预演排查，确保安全施工，本文基于虚拟地理环境实现施工机械作业仿真的实时交互与动态操控。本文研究子关节与母体之间的附着联动关系进行相对定位，经多级坐标系转换，得到各关节在三维场景中的位置和姿态参数，使得各独立关节能够同时在不同平面内活动，从而完成吊装施工过程的动态仿真。

在下一步的工作中，将引入更多的机械模型形成机械库，实现多机械之间的协同作业。同时，将机械作业动画抽取为工法库，实现不同位置、不同线路中的施工工法智能重用。

参考文献

[1] Lin H, Chen M, Lu G, et al. Virtual Geographic Environments (VGES): A New Generation of Geographic Analysis Tool[J]. Earth-Science Reviews, 2013, 126:74-84

[2] Chen M, Lin H, Kolditz O, et al. Developing Dynamic Virtual Geographic Environments (VGES) for Geographic Research[J]. Environmental Earth Sciences, 2015, 74(10): 6 975-6 980

[3] 吴曦, 马骏. 虚实共生复杂体系仿真实验支撑技术研究[J]. 系统仿真学报, 2021, 33(7):1 722

[4] 朱庆, 朱军, 黄华平, 等. 实景三维空间信息平台与数字孪生川藏铁路[J]. 高速铁路技术, 2020, 11(2):46-53

[5] 乔天荣, 马培果, 刘平利, 等. 新一代三维GIS技术在交通行业的创新应用[J]. 地理空间信息, 2021, 19(10):30-32

[6] Zhang H, Zhu J, Xu Z, et al. A Rule-based Parametric Modeling Method of Generating Virtual Environments for Coupled Systems in High-speed Trains[J]. Computers, Environment and Urban Systems, 2016, 56:1-13

[7] Zhu J, Zhang H, Chen M, et al. A Procedural Modelling Method for Virtual High-speed Railway Scenes Based on Model Combination and Spatial Semantic Constraint[J]. International Journal of Geographical Information Science, 2015, 29(6):1 059-1 080

[8] 张恒. 多层次空间语义约束的高速铁路场景自动建模方法[J]. 测绘学报, 2017, 46(4):534

[9] 宁新稳, 朱庆, 任晓春, 等. 高速铁路施工进度数据图形化处理方法[J]. 西南交通大学学报, 2018, 53(2):414-419

[10] Ning X, Zhu Q, Zhang H, et al. Dynamic Simulation Method of High-Speed Railway Engineering Construction Processes Based on Virtual Geographic Environment[J]. ISPRS International Journal of Geo-Information, 2020, 9(5):292

[11] 韩祖杰. 地理坐标系下施工便道三维快速设计技术[J]. 铁道工程学报, 2019, 36(12):5-10

[12] 乔天荣, 刘平利, 刘家橘, 等. 基于BIM+GIS融合的技术应用分析[J]. 地理空间信息, 2021, 19(1):68-70

[13] Boton C. Supporting Constructability Analysis Meetings with Immersive Virtual Reality-based Collaborative BIM 4D Simulation[J]. Automation in Construction, 2018, 96:1-15

[14] Wang W, Weng S, Wang S, et al. Integrating Building Information Models with Construction Process Simulations for Project Scheduling Support[J]. Automation in Construction, 2014, 37:68-80

[15] 邓珑. 大型起重机吊装仿真技术研究[D]. 南京:东南大学, 2015