

doi: 10.7690/bgzdh.2025.03.012

基于数字孪生的机场消防保障孪生体模型构建方法

王海涛¹, 胡嘉旭^{1,2}, 张海涛², 刘尧锋², 徐显海²

(1. 陆军工程大学野战工程学院, 南京 210007; 2. 中国人民解放军 95979 部队, 山东 泰安 271200)

摘要: 为提升机场消防保障能力, 提出基于数字孪生技术研究机场消防保障数字孪生体的构建方法。根据物理机场的实际保障要素, 建立机场主要消防装备设备 3 维模型、气象模型、地理环境模型和火场模型; 通过消防装备作业特点构建装备运动学仿真模型, 实现对机场消防保障的数字孪生体模型构建。结果表明, 该方法可为构建机场消防保障的数字孪生系统奠定基础。

关键词: 数字孪生; 机场消防保障; 模型构建

中图分类号: TU248.6 **文献标志码:** A

Construction Method of Twin Model for Airport Fire Protection Based on Digital Twin

Wang Haitao¹, Hu Jiayu^{1,2}, Zhang Haitao², Liu Yaofeng², Xu Xianhai²

(1. Field Engineering College, Army Engineering University, Nanjing 210007, China;

2. No. 95979 Unit of PLA, Taian 271200, China)

Abstract: In order to improve the ability of airport fire protection, the construction method of airport fire protection digital twin based on digital twin technology was proposed. According to the actual support elements of the physical airport, the three-dimensional model, meteorological model, geographical environment model and fire scene model of the main fire-fighting equipment in the airport were established. According to the operation characteristics of the fire-fighting equipment, the kinematics simulation model of the equipment was constructed, and the digital twin model of the airport fire-fighting support was constructed. The results show that this method can lay a foundation for building the digital twin system of airport fire protection.

Keywords: digital twin; airport fire protection; model construction

0 引言

数字孪生技术将物理实体和系统的属性、结构、状态、性能、功能和行为映射到虚拟世界^[1], 为实现虚实之间动态交互、双向映射、实时连接提供了方法途径, 为观察、控制和改造物理世界提供有效手段^[2]。构建机场消防保障数字孪生体是实现机场消防保障数字孪生模型驱动的基础。数字孪生模型的构建是在数字空间实现物理实体及过程属性、方法、行为等特性的数字化建模。根据机场消防保障对人、装、环境的结合和应用要求, 所构建的孪生体模型是“人一机—环境”^[3]多角度的, 实现对人机结合的监控、优化、预测、控制, 以及与火场环境的更好契合, 做出最快的反应, 采取最有效的方案。

1 机场消防保障几何模型构建

几何模型是机场消防保障过程中所涉及保障资源的几何信息, 是根据其几何形状和外观以及数据

结构来描述物理实体。

1.1 机场消防保障几何模型分析

结合前面对空军机场消防保障资源的分析, 从人、机、环境 3 方面对几何模型进行刻画, 如图 1 所示。几何模型的构建需要与机场消防保障资源对应, 并能够描述物理实体的几何信息以及相应状态^[4]。

1) 机场环境模型。

机场环境模型要能反映机场的道路交通、地形地物、雨雪天气等要素。地形应结合数字地图和北斗卫星定位数据, 精确地描述相应的地理坐标; 地质应结合机场的实际构造进行定义, 区分机场不同地域的路面等级, 便于模拟和设定装备最佳通行路线; 地形的高低起伏应与实际一致; 机场环境模型同时赋予与北斗定位相一致的绝对坐标, 以及便于判断的机场环境中人员装备位置的相对坐标。

2) 消防装备模型。

收稿日期: 2024-07-13; 修回日期: 2024-08-21

第一作者: 王海涛(1978—), 男, 江苏人, 硕士。

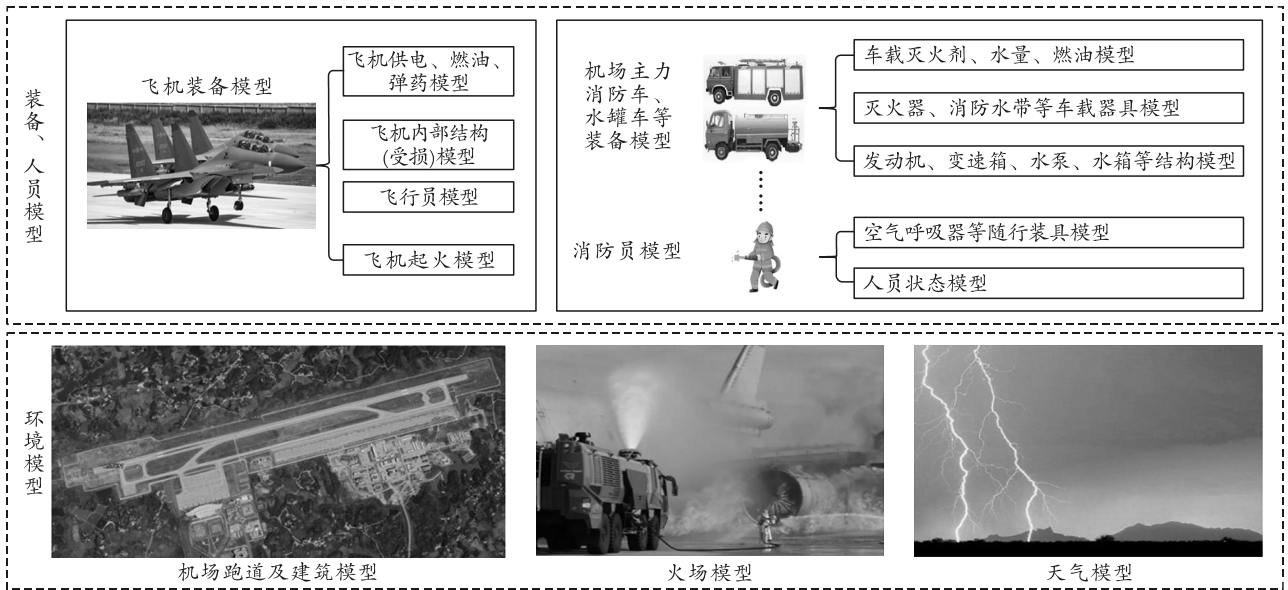


图 1 人-机-环境模型

消防装备模型主要包括构成机场消防保障行动的典型装备模型，包括机场主力消防车、水罐车、车载器材等。机场主力消防车作为机场消防保障行动的主要力量，是可视化控制和显示的主要装备，因此要高质量地对装备模型进行构建，需具备以下要求：

① 宏观性。消防装备模型的外观、结构、材质等需与实际装备相一致，能够准确描绘实体的几何特性，便于通过模型掌握实体装备的宏观情况，监控装备的行动、路线、位置，为整体的指挥调度提供基础。

② 精细化。模型除包含外观的几何特征，还应包括消防水炮、破拆设备、车载装具等工作装置的体现，以及车辆内部的发动机、变速箱、水罐、水泵等结构的精细刻画，以实现通过模型对消防装备动作的指挥、控制和对消防装备状态的实时监控。

③ 适用性。消防装备模型的构建应在能有效描述装备几何形态的基础上，尽可能压缩优化，提高系统的加载速度，减少资源占用，并能够输出多种常见模型格式，能更好地适应平台导入。

3) 人员模型。人员模型包括现场施救人员、被救对象以及指挥人员等。消防员在消防保障中起到主要作用；因此，对消防员的模型构建更为重要，除了对消防员进行几何建模，还要对其所携带空气呼吸器等装具进行几何建模，通过虚拟模型对消防员在火场的行动进行指挥和监控，并对人员的状态和装具的消耗进行监控。

1.2 机场环境模型构建

机场环境模型主要包括地理场景模型、气象环境模型以及起火后的火场模型，主要为消防保障提供虚拟环境。

1) 机场地理场景模型构建。

机场地理场景模型主要由地形模型和地物模型构成，其构建方法通常运用倾斜摄影技术，该技术近年来在开阔地域场景模型的构建中得到广泛应用，是一项通过摄影来实现 3 维建模的技术，可以得到较清晰的纹理影像，用来进行机场地理环境模型的构建，并且可以运用定位技术，在模型中嵌入准确的地理信息，能较真实地反映机场物体真实情况，提高模型的构建速率。机场除了机场跑道、塔台等主要设施外，还拥有大量通信导航类、观测类、防护类设施，这些设施的外观形状和结构往往比较复杂，具有一定专业性和特殊性。笔者采取无人机倾斜摄影技术，运用 Smart3D 软件，结合数字地图对机场地理场景 3 维模型进行构建。个别典型、复杂的地物可结合现有 3D 模型调用，通过建模软件在场景中编辑添加。

① 低空无人机倾斜摄影。

选择大疆 PHANTOM 无人机作为平台进行高空拍摄，无人机从 1 个垂直正向和 4 个斜侧 45° 方向拍摄，可同时对同一地物或特征点在一次飞行过程中完成 3 张以上不同角度拍摄。由于覆盖度和重叠度越高，其解算的模型精度就越高，因此在飞行中尽量增加影像的重叠度，以获取真实的 3 维建模资料。同时也要考虑到叠加程度越高，工作量越大；

因此，一般把航线设置为航向重叠超过 80%，旁向重叠超过 60%，这是考虑到效率和飞行器在飞行中的倾斜等问题。

② RTK 技术。

载波相位差分技术 (real-time kinematic, RTK)，采用差分方法对 2 个测量站载波相位进行实时处理，将基准站采集的载波相位数据传给接收机，对坐标进行求差解算。机场地势平坦，无大型遮挡物，适合使用 RTK 技术，且能在短时间内获得厘米级的定位精度^[5]。RTK 操作流程如图 2 所示。

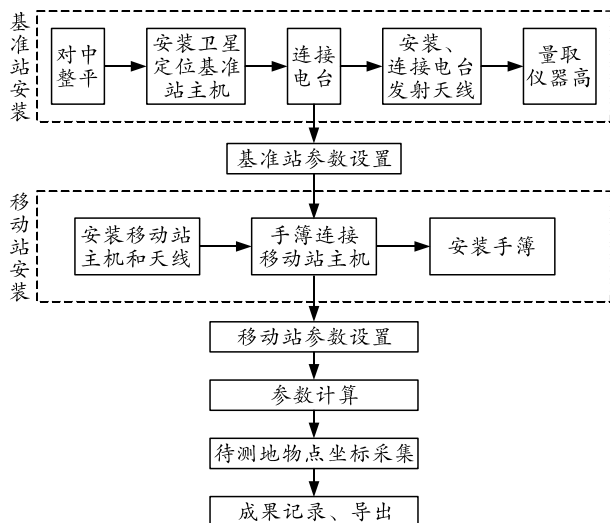


图 2 RTX 操作流程

③ 机场地理场景模型构建流程。

在将数据导入 Smart3D 进行处理之前，需按规定的格式将获取的数据进行预处理，从而保证正确的数据格式和资料的完整^[6]，建模流程如图 3 所示。

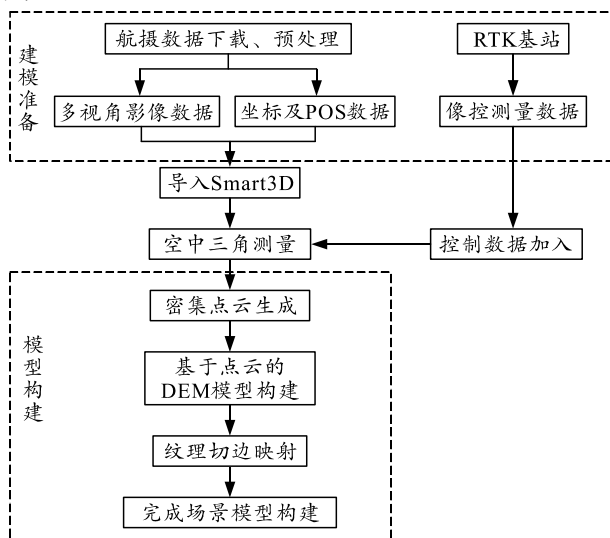


图 3 倾斜摄影建模流程

机场地理场景模型涉及物体类型多、结构复杂，

还需要对无人机倾斜摄影技术构建的场景模型进行完善和优化，这里使用 3DMax 和 Unity3D 软件对构建的模型进行贴图 and 渲染，过程如图 4 所示。

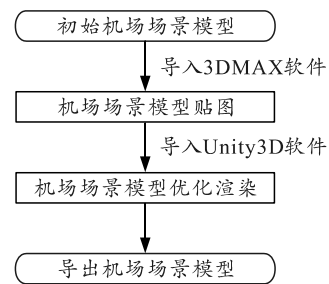


图 4 基于 3DMax 和 Unity3D 软件对模型进行完善和优化过程

2) 气象环境模型构建。

机场的气象环境对飞机的起降和消防保障具有十分重要的影响，构建气象环境模型，实时监控机场的气象变化对于机场消防保障具有重要意义。气象环境模型主要反映虚拟世界机场的气候情况，为机场消防行动提供参考依据。在机场环境的 3 维仿真建模中，为更清晰地描绘机场气象环境，根据由天空向地表渐变时的不同类型效果可分为对天空背景、云景以及雨雪天气的模拟仿真^[7] 3 方面。

天空背景模拟是视点进入大气层时所看到的天空景象，是一种曲面背景，并具有雾化效果；云景模拟是模拟机场上空的云层效果；雨雪天气模拟是视点在地表所看到的天气现象。3 种效果的模拟可以通过图像绘制、粒子系统等方法来实现，最后再根据视点变化将视景层融合起来，从而实现各个视景层之间平滑的过渡^[8]。

① 天空背景模拟仿真^[9]。模拟天空背景可以分为 2 个步骤：a) 绘制天空背景曲面，并添加对应的天空纹理；b) 添加雾化、光照等效果，从而模拟出天空的阴晴、明暗。论文采用网格控制点，生成一个四边在地平线以下的贝塞尔曲面，并通过添加天空纹理和调整雾化参数来实现天空远近的色彩渐变效果。霞光效果则采用带颜色的雾进行模拟，并通过调整渐变浓度来模拟不同时间的霞光效果。

② 云景模拟仿真。当视点进入对流层后就会出现云景，可将云景分为远景云和近景云。可以通过实时生成平面云图对远景云进行模拟，笔者采用 Perlin Noise 纹理来模拟背景云图的生成；而对于近景云的模拟，须要模拟出云的体积效果，这里通过粒子系统结合纹理映射的方式来实现。

③ 雨雪模拟仿真。雨雪天气是对机场消防保障和飞机起降影响比较大的气象现象，这里采用粒

子系统来对雨雪天气进行模拟，在对雨雪效果进行模拟时，仅需在视点范围内绘制雨雪粒子即可实现视觉效果。

3) 火场模型构建。

火场模型是飞机起火后所产生的火焰视觉效果，这里采用粒子系统结合纹理映射技术对火焰效果进行模拟仿真。空气受热后会产生复杂的运动，火焰粒子受热浮力、风力、重力等运动场的影响会产生运动，从而产生视觉上的动态变化。在灭火过程中，模拟火焰从增加到减少的过程实际上是火焰粒子的生成和消亡过程，当粒子全部消亡，则火焰熄灭。火焰的运动是由粒子构成的粒子群的运动来实现的，模拟流程如图 5 所示。

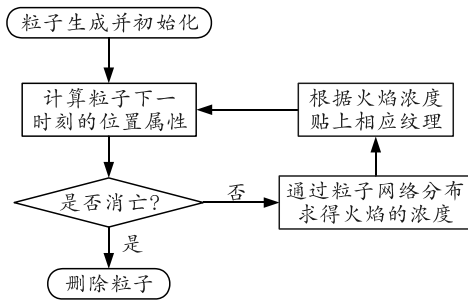


图 5 烟火的模拟流程

对火焰的模拟是对火焰粒子的生成、运动、消亡的建模过程^[10]，主要可分为 5 个步骤：①通过粒子系统生成火焰粒子；②对新粒子属性进行初始化，包括粒子的位置、速度、颜色、透明度等；③对系统中寿命结束的粒子进行删除，从而控制火焰的衰减；④根据火焰粒子在受热空气中的运动场规律，运用 N-S 方程对火焰的运动过程进行计算，从而更新粒子的位置和状态；⑤对存在的有效粒子组成的图像进行显示。

1.3 装备 3 维模型构建

根据机场消防保障装备配备情况，笔者选取某型机场主力消防车作为论文研究的模型构建对象。消防车模型主要选用 Solidworks 和 3DMax 软件进行构建^[11-12]。消防车的外形和具体结构使用 Solidworks 进行建模，具体的材质、纹理等效果的贴图渲染则使用 3DMax 进行编辑。

基本建模过程及方法如下：

1) 确定消防车几何参数。对消防车的主要结构尺寸进行测量，获取消防车的基本几何参数。

2) 拆分建模。按照原车尺寸比例，根据消防车的具体构成，对消防车进行拆分建模，最后对拆分部件模型进行装配，构成整个消防车的 3 维模型，

如图 6 所示。

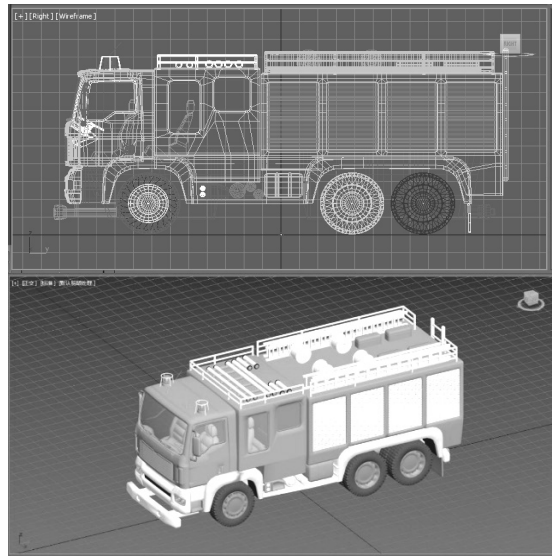


图 6 机场主力消防车 3 维模型

3) 添加材质与贴图。由上述步骤建模得到的模型与现实车辆相比缺少真实效果，要结合真实车辆的具体颜色、材质，对模型的颜色、材质以及纹理进行添加和编辑。

4) 消防车模型烘焙。消防车在真实环境中具有视觉光影效果，为了增强模型的真实感，还需要对消防车模型进行烘焙，增强其光影效果。

2 装备运动学模型构建

机场消防保障行为建模，是对消防保障行动过程的一种抽象表示，描述的是机场消防保障力量从出动-抵达-灭火的整个行为过程，装备的行为包括出动、抵达(停止)和作业(灭火)，如图 7 所示。

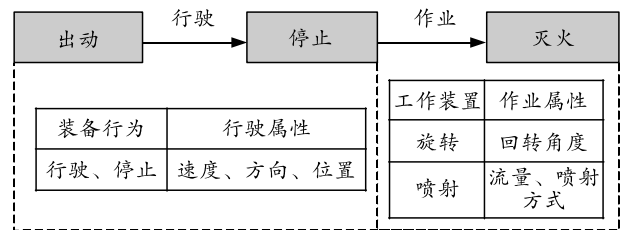


图 7 机场消防灭火行为过程

整车的行驶运动主要靠车轮的转动来实现，以及行驶过程中运动部件的相互配合运动与发生变形。如消防车在转向时，转向传动机构会发生动作，轮胎会发生形状的变化，车辆的总体移动方向会发生改变；作业运动主要是指工作装置发生动作，并配合车辆的运动。在机场消防保障中，所动用装备以消防车为主，消防车载水炮是作业运动的主要工作装置。

机场行驶环境平坦开阔，范围相对固定，高差

基本可以忽略，装备在机场道面行驶仅考虑平面运动，不考虑 Z 方向上的影响。这里采用车辆运动学模型中的单车模型(bicycle model)描述消防车的运动状态^[12]。单车模型是将车辆前后轮胎进行了简化，将每组 2 个轮胎简化成 1 个轮胎，在实际情况中，车辆前面 2 个转向轮的转角是不同的，从整体车辆在场景中的运动来看，转角的偏差对整车运动的影响不大，可将转向轮的偏角看作同一角度，如图 8 所示。

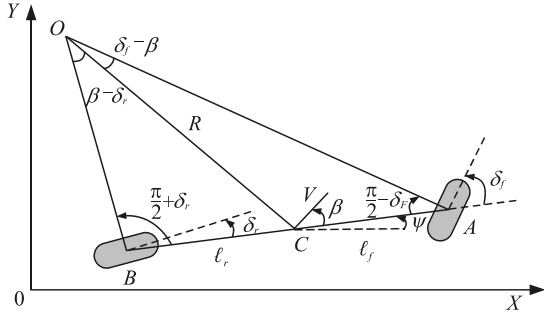


图 8 装备单车模型

单车模型是对车辆运动模型进行的简化，假设车辆只有 A 和 B 前后 2 个车轮。 δ_f 和 δ_r 分别表示前后轮相对车辆纵轴的转角，由方向盘控制决定。C 为车辆质心位置，到前后轮胎 A 和 B 的距离为 l_f 和 l_r ，质心 C 的线速度矢量表示为 V ，方向 β 表示与车身纵轴的夹角，即滑移角，低速情况下通常 β 值很小，也可以忽略为 0， ψ 表示车身纵轴与 X 轴的夹角。X 轴指的是假设的正前方向；O 为 A、B、C 3 点(也就是车体)的瞬时旋转中心。消防车是前轮转向，因此在实际的计算中 $\delta_r=0$ 。

针对质心 C 进行数学模型推导：

由正弦定理可得：

$$\left. \begin{aligned} \sin(\delta_f - \beta)/l_f &= \sin(\pi/2 - \delta_f)/R \\ \sin(\beta - \delta_r)/l_r &= \sin(\pi/2 + \delta_r)/R \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

二者联立可得：

$$\left. \begin{aligned} (\tan \delta_f - \tan \delta_r) \cos(\beta) &= (l_f + l_r)/R \\ \beta &= \tan^{-1}((l_f \tan \delta_r + l_r \tan \delta_f)/(l_f + l_r)) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

根据 $V=R\dot{\psi}$ 可得质心 C(装备车体)的角速度：

$$\dot{\psi} = V \cos(\beta)(\tan \delta_f - \tan \delta_r)/(l_f + l_r) \quad (3)$$

得到装备车辆的运动状态方程：

$$\left. \begin{aligned} \dot{X} &= V \cos(\psi + \beta) \\ \dot{Y} &= V \sin(\psi + \beta) \\ \dot{\psi} &= V \cos(\beta)(\tan \delta_f - \tan \delta_r)/(l_f + l_r) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

消防车辆由于在作业过程中需要对火点进行射

水，随着水量的消耗，车辆的质心会向下并向前移动， l_r 增大， l_f 减小。

作业运动主要是工作装置的运动，同时配合整车的运动，在行驶中进行灭火还会与行驶运动构成复合运动。对于机场主力消防车，主要工作装置为消防车载水炮，其运动包括水炮的旋转和射水。通过对机械动作设备加装传感器，进行机械姿态数据采集，采集后的数据上传至系统平台，平台根据传感器采集的数据，对消防装备指定动作进行驱动，并在虚拟环境中通过孪生体进行动作还原。

3 虚拟环境构建

机场虚拟环境是数字孪生体运动、实现可视化指挥的载体，将几何模型导入 Unity3D 虚拟仿真引擎中进行编辑，设置坐标系，对虚拟环境进行构建，并进行模型的行为仿真。

3.1 虚拟坐标系变换

虚拟物体自身具有世界坐标系，在相同的虚拟世界中，需要对虚拟物体的相对位置重新计算来实现坐标系变换，主要包括 2 方面：

1) 对坐标系进行校准。将机场环境模型的世界坐标系与大地坐标系进行校准匹配。由于研究的是机场区域内的消防保障，坐标系的校准以北斗差分定位获得的坐标为参照。

2) 对坐标系进行转换。机场环境模型中的消防装备等资源模型与北斗卫星定位坐标进行匹配，结合系统运行过程中的校准和动态更新，形成新的相对坐标系。同时，消防装备模型也要从观察坐标系到世界坐标系的转换，以方便指挥员观察和指挥。这样做是为了让装备能够以指挥员为参照物进行相对运动，符合人们对物体运动的认知。

3.2 虚拟物体碰撞检测

当物体产生相对运动时，虚拟机场环境中的物体之间、或物体本身的不同部位之间可能发生交叉重叠，导致模型失真报错。例如，在虚拟机场环境中，消防车遇到障碍物，若不设置碰撞检测，则车辆直接进入障碍物，而不会随着障碍物将整个车身抬高产生颠簸，在现实中这种情况是不可能存在的，因此，必须根据实际情况合理地设置碰撞检测，以保证仿真效果的真实性。

Unity3D 具有专门的碰撞检测功能，可用于检测虚拟物体间碰撞关系，从而阻挡物体之间的交叉

重叠和相互穿越。碰撞检测可通过多种方式来实
现，这里主要采用碰撞信息检测和触发信息检测 2
种方法。

① 碰撞信息检测。碰撞信息检测主要对相互
运动的虚拟物体进行检测，包括一个物体进入另一
一个物体、一个物体离开另一个物体和一个物体留在
另一个物体里面 3 种情况，可采用函数调用的方式
对这 3 种情况进行运算和判断。目标物体的碰撞位
置以及碰撞速度等信息，都可以通过调用碰撞检测
函数计算来获得。

② 触发信息检测。其主要是针对非实体的碰
撞进行检测，也可以用来对范围进行检测。系统会
在触发信息检测时取消阻挡功能，将碰撞检测功能
保留。也可以解释为触发信息检测只进行检测并不
进行阻挡。例如，消防员在对飞机实施破拆时，
仅探测到飞机机体发生碰撞，并不阻拦破拆工具在
机体内不间断地运动，而是计算其运动路径，并以

此为依据，从触发碰撞开始计算破拆深度，直至触
发碰撞结束。

3.3 动态编辑区域定义

执行机场消防保障任务的消防装备通常不能
在机场随意行驶，需要考虑机场实际环境影响，同
时还要考虑到消防保障任务的作业地点，才能保证
消防保障任务的顺利进行。在虚拟环境下，须按照
已经测量并进行过坐标修正的机场消防保障任务平
面配置图，对行动环境区域进行定义，将平面配置
图的区域设定为可动态编辑区域，对于不可活动的
区域或超出平面配置图的范围，设定为不可动态编
辑区域，图 9 为某机场平面配置。当消防车进入平
面配置的区域时，会触发信息检测，系统对车辆
的行驶路线、运动轨迹及工作情况进行记录，实现
对虚拟物体的监控与显示，进而反映物理实体的
运动情况。

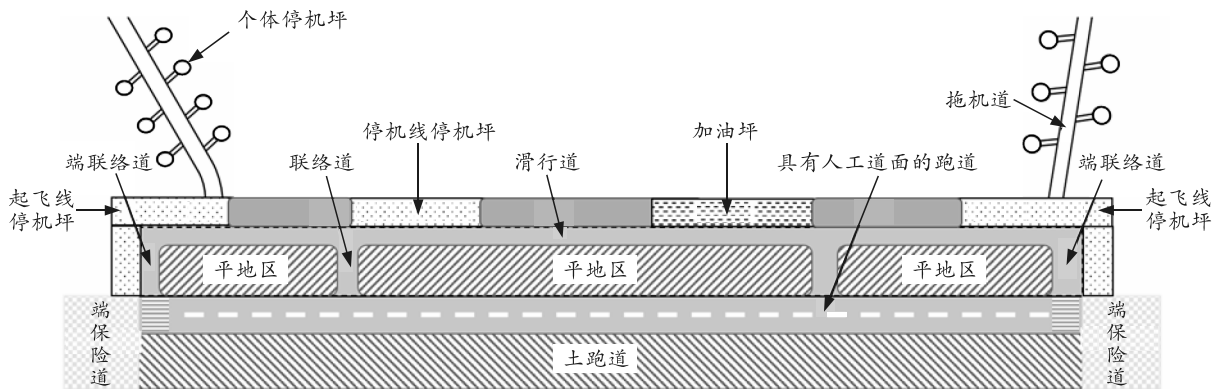


图 9 机场平面配置

4 结束语

构建机场消防保障的数字孪生系统对于提升机
场消防保障能力具有推进作用。笔者以构建机场消
防保障数字孪生体为研究对象，重点对模型的构建
方法进行研究，为构建机场消防保障的数字孪生奠
定基础。

参考文献:

[1] 陶飞, 张贺, 戚庆林, 等. 数字孪生十问: 分析与思考[J]. 计算机集成制造系统, 2020, 26(1): 117.
[2] 陶飞, 刘蔚然, 刘检华, 等. 数字孪生及其应用探索[J]. 计算机集成制造系统, 2018, 24: 1-18.
[3] 侯学隆, 张海峰, 罗木生. 空海一体虚拟战场环境构建技术[J]. 兵工自动化, 2015, 34(7): 37-43.
[4] 姜珊, 王仲奇, 夏松, 等. 飞机柔性工装数字孪生几何模型构建方法[J]. 航空制造技术, 2022, 65(12): 86-

91, 111.
[5] 潘卫军, 张子亚. 基于倾斜摄影的机场导航设施快速三维建模[J]. 航空计算技术, 2021, 51(6): 27-31.
[6] 范攀峰, 李露露. 基于 Smart3D 的低空无人机倾斜摄影实景三维建模研究[J]. 测绘通报, 2017(S2): 77-81.
[7] 李锋, 万刚, 曹雪峰, 等. 近地空间大气环境可视化技术研究[J]. 系统仿真学报, 2013, 25(S1): 35-37, 42.
[8] 刘喆玥. WebGIS 技术在交互式天气预报三维可视化系统中的应用[D]. 南昌: 南昌大学, 2018.
[9] 米剑, 刘鹏远, 张锡恩, 等. 视景仿真中天空背景的真实感改进[J]. 系统仿真学报, 2001, 12(2): 92-96.
[10] 邹宁, 周飞, 韩庆阳. 基于室内环境下火焰烟雾扩散和仿真模拟研究[J]. 无线互联科技, 2018, 15(9): 111-112.
[11] 王志强. 车辆模拟器中的动力学仿真[D]. 成都: 西南交通大学, 2019.
[12] 严永俊. 基于运动学车辆模型的人-车-路系统建模和轨迹规划研究[D]. 南京: 东南大学, 2020.