TAN Xiao,ZHU Qing,ZHAO Junjiao,et al. Dynamic 3D Representation Model of Complex Air-ground Environment for Visual Aircraft Navigation[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica,2012,41(2):177-183,204.(谭笑,朱庆,赵君峤,等. 面向飞行器可视导航的复 杂空地环境动态三维表示模型[J]. 测绘学报,2012,41(2):177-183,204.)

## 面向飞行器可视导航的复杂空地环境动态三维表示模型

## 谭 笑<sup>1,2</sup>,朱 庆<sup>2</sup>,赵君峤<sup>2</sup>,许伟平<sup>2</sup>,张叶廷<sup>2</sup>,杜志强<sup>2</sup>

1. 海军工程大学 管理工程系,湖北 武汉 430033; 2. 武汉大学 测绘遥感信息工程国家重点实验室,湖北 武汉 430079

# Dynamic 3D Representation Model of Complex Air-ground Environment for Visual Aircraft Navigation

TAN Xiao1,2, ZHU Qing2, ZHAO Junjiao2, XU Weiping2, ZHANG Yeting2, DU Zhiqiang2

1. Department of Management Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China; 2. State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079, China

Abstract: Aiming at a unified, accurate and efficient presentation of the complex air-ground environment for visual aircraft navigation, a dynamic 3D GIS data model and related spatio-temporal data structures are proposed using UML. Taking into account the multi-dimensional, dynamical characteristics and fuzzy boundary of environmental elements, this model systematically depicts the geometric, temporal, scale and semantic features of the complex air-ground environment and their relationships. Simulation experiments illustrate the usefulness and validity of the proposed data model, this model facilitates comprehensive spatio-temporal data analysis for the optimal flight path planning.

Key words: visual aircraft navigation; airport terminal area; dynamic 3D representation; spatio-temporal data model

摘 要:针对飞行器可视导航中复杂空地环境时空要素统一、精准和高效表示的难题,提出面向飞行器可视导航的复杂 空地环境动态三维表示的 GIS 数据模型和相应的时空数据存储结构,并用 UML 图进行描述。该模型综合考虑了复杂 空地环境要素多维、动态、边界模糊等特点,刻画多维动态时空数据在空间、时间、尺度和语义 4 个方面的特征及其相互 关系,有利于复杂机场环境时空数据的综合分析,支撑飞行路径的动态优化选择。以某机场空地环境的模拟数据为例, 仿真验证该模型的实用性与有效性。

关键词:飞行器可视导航;机场终端区;动态三维表示;时空数据模型
 中图分类号:P208
 文献标识码:A
 文章编号:1001-1595(2012)02-0177-07
 基金项目:国家 973 计划(2010CB731801;2011CB302306);国家自然科学基金(41021061)

#### 1 概 述

飞行器可视导航是一种将综合视觉、飞行和 空管技术有机结合的新型导航方法,需要综合考 虑复杂地形、气象和电磁环境,融合实时的飞行器 导航传感器数据、多谱段环境传感器数据和地形 地物等信息,实现终端区环境信息精准的统一表 示。影响可视导航的环境要素包括地形、建筑物、 植被等地面要素以及气温场、气压场、湿度场、风 场、云、雷暴、气团等大气环境要素和电磁场,这些 环境要素具有不同的物理性质,其空间尺度和时 间变化尺度跨度大并且相互影响。要规避各种危 险,必须要透彻感知飞行器周围环境。因此机场 终端区环境高效高精度的动态三维表示成为飞行 器可视导航的重要前提。

在 GIS 领域,气象和电磁场等多维时空现象 主要当做场景特效,重可视化效果而轻高精度的 分析应用。在气象和电磁环境各专业领域内,以 大气运动<sup>[1-2]</sup>、天气现象<sup>[3-8]</sup>以及自然景观<sup>[9-10]</sup>等 为研究对象,主要研究宏观和微观的大气运动模 拟及其可视化。

在电磁波、信号仿真等领域,以局部有限边界 的电磁场为主要对象,研究电磁环境的拟合、仿 真、数值计算和可视化等。在电磁环境三维网格 消隐、实体显示、三维场等值着色等表现方面研究 较多<sup>[11-19]</sup>。但仅有少数对电磁传播有明显影响 的环境要素被建模和表达,缺乏对机场终端区这 一特殊区域电磁场的大范围集成表示研究。 在飞行器安全进近环境可视导航领域<sup>[20-21]</sup>, 也还缺乏对机场终端区空地环境数字化表达的系 统研究。国际上,美国 NASA 从 20 世纪 70 年代 就开始发展 SVS,工业界例如 Rockwell-Collins 公司已经推出了一些投入使用的商业产品。但 是,目前的研究成果仍然是以地形模拟叠加抽象 符号为主,还没有气象、电磁环境要素的一体化表 示成果<sup>[22]</sup>。

综上所述,现有研究分散在不同的学科领域、 孤立地开展,还缺乏对机场终端区环境统一表示 的系统研究。而空地环境信息分散应用使得导航 决策等需要的信息繁杂、尤其是位置信息和情景 意识很弱、决策时间很长,因此急需关于复杂大气 和电磁等多维连续分布现象及其与地形地貌集成 的系统研究。

# 2 复杂空地环境动态三维表示的概念 模型

针对飞行导航决策对复杂空地环境数据高效 组织管理和高性能多维可视化分析的需求,首先 要建立机场终端区复杂环境要素的几何模型、物 理模型和过程模型的集成表示,将多源异构信息 有机融合到统一的时空框架内,并提供高效精准 的时空分析,其概念模型如图1所示。



Fig. 1 Conceptual model of unified airport environment

复杂空地环境的动态三维表示模型是在统一 的时空框架下,一种可计算、可推理和可全息感知 的机场终端区复杂空地环境信息模型。从图1中 可见,复杂空地环境动态三维表示模型包含四个 方面的内容:空地一体化的时空数据模型;多源异 构信息融合;复杂时空现象耦合;复杂空地环境信 息可视化表达,相互关系如图2所示。



图 2 研究内容及其关系 Fig. 2 Research contents and relationship

## 2.1 空地一体化的时空数据模型

机场终端区空地环境要素包括地形地物、气象环境、电磁环境和危险目标。针对这些环境要 素种类众多、分布范围广且动态变化的特点,一体 化的时空数据模型包括这些对象的几何模型、物 理模型以及反映其演变规律的过程模型。与传统 三维 GIS 数据模型相比,需要发展矢量与标量结 合、表面与实体结合、动态与静态结合、离散与连 续结合的一体化数据模型和数据结构。

### 2.2 多源异构信息融合

机场终端区复杂地空环境下的多平台多传感 器数据在表示方法、时空基准、精度、时空尺度等 方面存在差异,导致多源信息的有机融合与无缝 集成成为关键问题之一。多源异构信息融合包含 两个方面的含义:语法上,多源信息统一的时空基 准、尺度转换、配准,以及误差传播规律等;语义 上,多源数据专题语义分类众多,不同语义细节层 次尺度不一,各种动态现象时空过程语义及其关 系语义复杂,对多分辨率语义、过程语义、关系语 义的统一描述。

### 2.3 复杂时空现象耦合

本文的时空现象耦合是指机场终端区的气 象、电磁、地形地物等要素之间相互影响的状态和 过程,主要指要素间的相互影响使其中一种要素的强弱、方向、分布等发生了改变,如复杂地形与低空风场的耦合,机场建筑与电磁场的耦合等。 2.4 复杂空地环境信息的可视化表达

机场终端区环境的可视化表达包含 3 个层 次:① 对直观可见、边界明确的环境要素的可视 化表达,如机场周边地形、建筑、跑道等;② 对时 空连续分布、不可见但对飞行器安全导航有直接 或间接影响的环境要素的可视化表达,如气温、风 场、电磁场等;③ 对时空分布连续且渐变、具有生 命周期过程的环境要素的可视化表达,如积雨云、 风切变、沙尘暴等,需要着重表达其生命周期的过 程语义。特别是空地环境要素信息量大且动态演 变,需要考虑在有限载荷条件下保证关键信息的 清晰、可信表达,实现空地一体化、要素综合化、表 现直观化的自适应多维动态可视化。

# 3 复杂空地环境动态三维表示的 GIS 数 据模型

根据机场终端区复杂空地环境统一表示的概 念模型,面向飞行器导航需要解决不同专题要素 的精准的空间位置、专业的物理模型、连续的时空 变化3个层次的统一表达问题。本文建立如图3 所示的动态三维 GIS 数据模型。



图 3 机场终端区空地环境统一表示的动态三维 GIS 数据模型 Fig. 3 Dynamic 3D GIS model of airport environment

## 3.1 几何层

几何层界定了空地环境要素的空间界限和精 确位置,是多维时空信息集成的基础。空间对象 抽象为点、线、面、体4大类,并根据不同要素的分 布、形态等特征将这四类对象分为若干子类<sup>[23]</sup>。 如图4所示,复杂空地环境中的点、线、面要素与 静态三维场景中的点、线、面要素的几何形态和空 间分布类似,其特别之处在于大气、电磁等可进 入、可剖分的动态场的存在,因此体对象不仅能够 描述参数曲面、简单面等面对象所构成的三维实体及其复合体,还要包括不同体素所组成的对象。 体素由四面体对象(C3DTetrahedron)、立方体对象(C3DCube)组成,支持空地环境中形状不规则、边界模糊的场要素的任意剖分和可视化分析。 动态对象变化过程的几何描述是确定其动态几何 边界(C3DDynamaticBoundary)以及边界内每个 点的空间轨迹(C3DDynamaticTrack)。



图 4 复杂空地环境几何数据模型的 UML 结构



#### 3.2 物理层

针对复杂空地环境中连续动态变化的大气和 电磁环境要素的物理性质不同,可分为标量属性、 矢量属性和张量属性,分别对应于标量场、矢量场 和张量场<sup>[24]</sup>。

3.3 时态层

环境要素的离散时态特征决定于其几何属性 和物理属性,其中既包括了离散的、具有明确边界 的单个实体,如地形、地物等,也包括了空间连续 变化的、边界不明晰的对象,如气温、电磁场等。 本文将连续动态变化对象的时态特征归纳为状态 和过程。时间的密度特征体现为3种模型:离散 模型、紧凑模型和连续模型<sup>[23]</sup>,针对复杂空地环 境中动态对象连续渐变的特点,本文所研究的时 间域属于连续模型,即时间与实数同构,每个实数 对应时间上的一个点。状态和过程是时间域中的 一对基本概念,一个动态对象在其生命周期里的 某个时间切片称为状态,整个生命周期或其中的 任意一段称为过程。

定义 1: 动态对象的生命周期  $T = [t_0, t_n]$ ,  $T \subseteq R$ 是场的时间域,对于任意一个时刻  $t_i \in T$  的 三元函数  $F = f(x, y, z, t_i)$ ,称为动态对象在  $t_i$ 时刻的状态。

定义 2: 动态对象的生命周期  $T = [t_0, t_n],$  $T \subseteq R$ 是场的时间域,对于任意一个时间域 $[t_i, t_j]$   $\subseteq T$ 的四元函数 $F = f(x, y, z, t)(t \in [t_i, t_j]),$ 称 为动态对象在时间域[ $t_i, t_i$ ]内的过程。

从以上两个定义可以看出动态对象的状态和 过程分别是关于空间位置、时间的三元函数和四 元函数。由于观测数据和预报数据的时空分辨率 的限制,要得到生命周期内任意时刻的状态或任 意时间域的过程,则需要通过函数拟合和内插来 实现。

空地环境中动态对象采用如图 5 所示的存储 结构。在该结构中,动态对象由几何对象(GeometryObject)和状态对象(StateObject)聚合而成, 状态对象通过过程 ID(ProcessID)和所属过程对 象(ProcessObject)相关联。几何对象存储动态 对象的空间位置和几何形态。状态对象通过顶点 索引和几何对象关联,存储物理场的类型、数值、 语义等信息,其中 CausalStateID、SequentStateID 和 RelatedStateID 分别表示与该状态对象存在因 果关系和关联关系的状态对象 ID 数组。过程对 象存储当前状态所属的过程信息和过程语义。这 个存储结构中,空间、时间和场语义决定唯一状态 对象,一个状态对象就是过程对象中的一个时间 切片,过程对象则是相同语义、不同时间的状态对 象的集合。图 6 为一个生命周期中过程对象的 UML 模型,过程对象由状态对象聚合而成,并与 变化驱动对象(ChangeDriver)和关系准则对象

(RelationRule)来表示过程对象的变化特征和耦合特征。



#### 图 5 动态对象存储结构

Fig. 5 Storage structure of dynamic objects



图 6 过程对象 UML 模型 Fig. 6 UML diagram of process objects

## 3.4 语义层

复杂空地环境统一表示的概念模型中的语义 层包括专题语义、空间语义和时间过程语义。专 题语义涵盖了空地环境中地形地物(如机场建筑、 地形等)、大气环境(如风场、气压场、积雨云等)、 电磁环境(如场强、频率的分布等)和威胁目标(如 地面入侵物、飞行器、鸟群等)及其相互关系等方 面的语义。空间语义主要包括空间的结构、拓扑、 方向和度量等,是描述各专题语义之间或专题语 义内部的空间关系和进行空间分析的主要手段。 对于大气、电磁等专题语义中的动态环境要素,则 将其生命周期的时间过程语义划分为产生、扩展、 稳定、削弱、消亡5个阶段,即5个子过程。过程 语义与专题语义通过事件关联。事件是引起时空 对象状态发生变化的原因,时空对象在其生命周 期内的变化正是在事件的驱动下由一个状态变化 到另一个状态。时空对象生命周期的过程语义只 有通过事件的抽象描述与表达,并且与专题语义 相关联,才能够反映出动态环境要素变化过程背 后的物理本质及其对飞行器可视导航的影响。

#### 4 试验分析与结论

本文以 NetCDF 数据为大气环境数据源,以 模拟的雷达电磁波和机场中尺度的电磁数据为电 磁环境数据源,描述机场动态三维空地环境的可 视化模型。试验的设计围绕本文提出的机场终端 区空地环境模型的 4 个层次展开,即几何、物理、 时态和语义。

如图 7 所示。该试验场景包括 4 大类几何对 象:点对象(电磁场分布)、线对象(参与构建面对 象)、面对象(地形、雷达波球面)、体对象(云体)。 以试验场景中的积雨云模型中的云量模型和动力 学为例,云量的大小、分布是标量场模型,通过对 大气环境数据的分析来建立。因为云不仅由水蒸 气组成,还有云水、雨水、冰晶、霰、雹等,对应着 NetCDF 数据中的 Qcloud、Qgraup、Qice、Qrain、 Qsnow 等各项数据,进而得到云量值。云的动态 变化是矢量场模型,通过计算流体力学中的 Navier-Stokes 方程计算得到(如表 1 所示)。



图 7 空地环境一体化几何模型 Fig. 7 Geometric model

2011-04-21T12:00 这 18 h 内三维动态云数据为 例,时间分辨率为 1 h,网格为 25×25×40,图 8 中 显示的是其中 3 个时刻的三维云动态变化结果。

表 1 物理模型 Tab. 1 Physical model

	模型名称	模型类型	输入参数	输出参数
云模型	云量模型	标量场	Qcloud,Qgraup, Qice,Qrain,Qsnow	Qcloudiness (云量)
	云的动力 学模型	矢量场	p(压力)、ρ(密度)、V(速度矢量)、F(外力矢量)	<i>u、v、w</i> (速度场)

如图 8 所描述的是积雨云生命周期中的 3 个 状态,这 3 个状态处于过程语义中的"扩展阶段" 和"稳定阶段"。空间语义的表达依赖于空间尺 度,以电磁环境为例,在进近的初始阶段,飞行器 高度较高,离机场和地面较远,电磁环境不如低空 复杂,在此大尺度下更加关注宏观的电磁环境(如 机载雷达波、地面雷达波)建模及其对飞行器导 航、通信的影响(图 9(a))。而在进近着陆阶段, 离机场、地面的距离更近,各种介质散射体更加复 杂多样,在此小尺度下则更加关注机场终端区的电 磁场的分布和传播,图 9(b)中电磁场信息表现为 离散格网点上的 3 个量:频率、场强的大小和场强 的方向,分别用箭头的灰度、长度和方向来表示。



图 8 动态对象的时态模型 Fig. 8 Temporal model



(a)



**图** 9 不同尺度下的语义模型 Fig. 9 Multiscale semantics model

复杂空地环境模型的可计算与可推理特点体 现在为飞行路径的自主优化决策服务。如图 10 所示,通过实时集成飞行器雷达探测到航路前方 的积雨云信息(图 10(a)),根据云的动力学模型 和热力学模型模拟计算出它的移动路径、扩散范 围和云体内部环境参数,并结合航路信息对三维 云体进行多维剖分,可计算出飞行器航路上经过 的三维云体的体素(图 10(b)),根据图 5 动态对 象的数据结构,每个体素对应于一个动态对象存 储结构表(表 2)。通过对表中的存储信息进行综 合分析计算,进而判断飞行器在云中飞行是否会遇 到积冰等威胁,以便及时调整航线,保障飞行安全。

表 2 三维动态云的体素信息存储表 Tab. 2 Voxel information of dynamic 3D cloud

-	•	
Object ID	22 469	
State ID	3	
Process ID	2	
Current Time	18:00	
Position	(3898, 3940, 6712)	
Height	6712	
Temperature	3.183	
Qcloudiness	0.771	
Qliquidwater	259.447	

复杂空地环境统一表示模型作为机场终端区 物理环境在计算机中的一种数值映射,是飞行器 可视导航的基础,本文将地形地物、电磁、气象环 航的复杂空地环境动态三维表示模型,准确刻画 了空地环境要素的时空变化及其相互影响,进一 步研究将基于此模型,发展高效的数据组织管理 与可视化分析方法,支持多源多尺度景象鲁棒匹 配与可信导航视场下的进近优化。







(b)

图 10 基于专题语义分析的导航决策 Fig. 10 Navigation analysis

# 参考文献:

- [1] ZHAO Wei, LIN Baojia, WU Lun. Studies on Integration of GIS with Air Quality Models[J]. Environmental Science and Technology, 2003,26(5):27-29.(赵伟,林报嘉,邬伦. GIS 与大气环境模型集成研究与实践[J].环境科学与技 术,2003,26(5):27-29.)
- [2] WANG Peng, XU Qing, LI Jiansheng. 3D Modeling and Visualization Simulation of Near-earth Space Environment Elements[J]. Journal of System Simulation, 2005, 17 (12): 2957-2960. (王鹏,徐青,李建胜. 近地空间环境要素 三维建模与可视化仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2005, 17 (12): 2957-2960.)
- [3] LIU S G, WANG Z Y, GONG Z, et al. Real Time Simulation of a Tornado [J]. The Visual Computer, 2007, 23(8):559-567.
- [4] DOBASHI Y, YAMAMOTO T, NISHITA T. A Controllable Method for Animation of Earth-scale Clouds [C] // Proceedings of Computer Animation and Social Agents. Geneva: [s. n.], 2006: 43-52.

- [5] SHEN Zhenyu, FAN Yin, TAO Lijun. Visualization Method on Meteorological Data Analysis [J]. Journal of System Simulation,2006,18(Suppl. 1):328-332. (沈震宇, 范茵,陶俐君. 可视化技术在气象数据场分析中的运用 [J].系统仿真学报,2006,18(Suppl. 1):328-332.)
- [6] PETER K. Large-Scale 3D Visualization of Doppler Reflectivity Data [D]. West Lafayette : Purdue University, 2010.
- [7] LI Xudong, SUN Jizhou, ZHANG Kai. Meteorological Data Visualization System Using AVS/Express[J]. Journal of Tianjin University, 2009, 42(4):357-361. (李旭东,孙济 洲,张凯.基于 AVS/Express 的气象数据可视化系统[J]. 天津大学学报,2009,42(4):357-361.)
- [8] XUE Cunjin, ZHOU Chenghu, SU Fenzhen, et al. Research on Process-oriented Spatio-temporal Data Model [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2010, 39(1),95-101.
  (薛存金,周成虎,苏奋振,等.面向过程的时空数据模型研 究[J].测绘学报,2010, 39(1),95-101.)
- [9] WANG Changbo. Physically Based Rendering of Natural Phenomena [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006.
  (王长波.基于物理模型的自然景物真实感绘制[D]. 杭州:浙江大学, 2006.)
- [10] LIU Shiguang. Modeling and Rendering of Natural Phenomena[D]. Hangzhou: Zhejiang University,2007.(刘世光.大气现象的真实感建模及绘制技术研究[D].杭州:浙 江大学,2007.)
- [11] XIAO He, HE Mingyun, BAI Zhongjian, et al. 3D Visualization of Electromagnetic Field Based on Visualization Toolkit[J]. Computer Applications, 2007, 27(11): 2773-2775. (肖何,何明耘,白忠建,等.基于 VTK 的电磁场三维可视化研究及实现[J]. 计算机应用, 2007, 27(11): 2773-2775.)
- [12] ZHOU Qiao, CHEN Jingwei, LI Jiansheng, et al. 3D Visualization Technology of Electromagnetic Environment
  [J]. Computer Engineering, 2008, 34(9):248-250. (周桥,陈景伟,李建胜,等. 电磁环境三维可视化技术[J]. 计算机工程,2008, 34(9):248-250.)
- [13] TENG Yunfei. Investigation on Visualization System of Electromagnetic Data in War-field [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2006.(滕云 飞.战场环境电磁场数据可视化系统研究[D].武汉:华中 科技大学,2006.)
- [14] WANG Yongqing, DAI Chuanjin, ZHAO Xiubin, et al. Modeling and Simulation for Electromagnetic Environment of the Approaching Landing System for Aeroplane[J]. Aeronautical Computing Technique, 2007, 37(2): 20-22. (王永庆,戴传金,赵修斌,等.飞机进近着陆系统电磁环境 建模与仿真[J]. 航空计算技术, 2007, 37(2): 20-22.)
- SHIRAI H, SATO R, OTOI K, et al. Electromagnetic
   Wave Propagation Estimation by 3D SBR Method [C] //
   Proceedings of International Conference on Electromagnetic in
   Advanced Applications. Torino: IEEE, 2007:129–132.

(下转第 204 页)

- [15] SUN Mingwei. Research on Key Technology of Automatic and Fast DOM Generation [D]. Wuhan: Wuhan University, 2009. (孙明伟.正射影像全自动快速制作关键技术研究 [D]. 武汉:武汉大学, 2009.)
- [16] ZHU Zhanli. Data Structure: Using C Language [M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2004. (朱战力. 数据结构:使用 C 语言[M]. 西安:西安交通大学出版 社, 2004.)

(责任编辑:宋启凡)

### **收稿日期**:2011-02-18

修回日期: 2011-06-12

第一作者简介:袁修孝(1963—),男,博士,教授,博士生 导师,主要从事航空航天遥感高精度对地目标定位理论 与方法、高分辨率卫星遥感影像几何处理。

First author: YUAN Xiuxiao (1963—), male, PhD, Professor, PhD supervisor, majors in theory and method for high precision airborne and spaceborne photogrammetric positioning and geometric processing of high-resolution satellite remote sensing imagery.

E-mail: yuanxx@whu.edu.cn

#### (上接第183页)

- [16] BARTSCH M, CLEMENS M, HIPPLER T, et al. Advanced Electromagnetic Field Visualization Using the Virtual Reality Modeling Language Standard [J]. IEEE Transactions on Magnetics (S0018-9464), 2001, 37(5): 3604-3607.
- [17] QIU Hang, CHEN Leiting, JIM X C. Method for 3D Modeling of Radar Coverage Based on Hybrid Sampling[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2010, 24(1): 10-16. (邱航,陈雷霆, JIM X C. 一种基于混合采样的雷达 作用范围三维建模方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2010, 24(1):10-16.)
- [18] WU Lingda, CHEN Peng, YANG Chao. 3D Representation of Radar Coverage in Complicated Environment [J]. Systems Engineering and Electronics, 2008, 30(8): 1448-1453.
  (吴玲达,陈鹏,杨超.复杂环境影响下三维雷达作用范围 表现[J]. 系统工程与电子技术, 2008, 30(8): 1448 -1453.)
- [19] WU Yingnian, ZHANG Lin, ZHANG Lifang, et al. Survey on Electromagnetic Environment Simulation and Visualization [J]. Journal of System Simulation, 2009, 21 (20): 6332-6338. (吴迎年,张霖,张利芳,等. 电磁环境仿真与可 视化研究综述[J]. 系统仿真学报, 2009, 21 (20): 6332-6338.)
- [20] ZOU Xinsheng, LI Chunwen. Controller Design and Simulation of Aircraft's Automatic Landing under Complex Atmospheric Conditions[J]. Journal of System Simulation,2006,18(5): 1286-1288.(邹新生,李春文.在复杂 大气条件下的飞机自动着陆控制器设计与仿真[J].系统 仿真学报,2006, 2006,18(5):1286-1288.)
- [21] LEI Lixing, FAN Xiande, XU Zhenzhong. Real Time Rendering of Atmospheric Effects for Flight Simulators

[J]. Journal of Tsinghua University (Sci&Tech),2009, 49(7):1019-1022.(雷励星,范贤德,徐振中.面向飞行模 拟的大气效果实时绘制技术[J].清华大学学报:自然科 学版,2009,49(7):1019-1022.)

- [22] PRINZEL L J, KRAMER L J. Synthetic Vision Systems [C] // Proceedings of International Encyclopedia of Ergonomics and Human Factors. Philadelphia: Taylor & Francis, 2009.
- [23] ZHU Qing, LI Xiaoming, ZHANG Yeting, et al. Design and Implementation of a High-performance 3D GIS Database Engine[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2011, 36(2): 127-132. (朱庆,李晓 明,张叶廷,等.一种高效的三维 GIS 数据库引擎设计与实 现[J]. 武汉大学学报:信息科学版, 2011, 36(2): 127-132.)
- [24] WANG Yingjie, YUAN Kansheng, YU Zhuoyuan.
   Visualization of Temporal Multi-dimensional Geo-Information [M]. Beijing: Science Press, 2003. (王英杰,袁勘省,余卓渊.多维动态地学信息可视化[M].北京:科学出版社,2003.)

#### (责任编辑:宋启凡)

收稿日期: 2011-06-20 修回日期: 2011-12-10

第一作者简介:谭笑(1980—),男,博士生,主要从事虚拟 地理环境,海洋 GIS 研究。

First author: TAN Xiao(1980—), male, PhD candidate, majors in virtual geographic environments and marine GIS.

E-mail: talklaugh@163.com