

doi: 10.7690/bgzd.2019.02.010

# 海上靶场内外场联合试验系统时空一致性研究

张 伟

(中国人民解放军 92941 部队 41 分队, 辽宁 葫芦岛 125001)

**摘要:** 从海上靶场内外场联合试验系统的构成及运行特点出发, 建立时间和空间描述一致的仿真任务空间是内外场联合试验环境构建的基础。分析时空不一致对试验结果的影响, 设计系统时空一致性指标, 并从空间一致性、时间一致性、时空一致性和因果关系一致性 4 个方面给出时空一致性解决方案。该方案已在某型舰空导弹武器系统内外场联合试验中得到应用, 取得了良好效果。

**关键词:** 内外场; 联合试验; 时空一致性; 时间一致性; 空间一致性

**中图分类号:** TP391.9 **文献标志码:** A

## Study on Spatiotemporal Consistency of Internal and External Field Joint Test System in Maritime Range

Zhang Wei

(No. 41 Team, No. 92941 Unit of PLA, Huludao 125001, China)

**Abstract:** Based on the composition and operation characteristics of the joint test system in maritime range, it is the foundation of constructing the joint test environment of internal and external field to establish the simulation mission space which is consistent with the description of time and space. The influence of space-time inconsistency on the test results is analyzed, and the index of space-time consistency of the system is designed. The solution of spatiotemporal consistency is given from the space consistency, time consistency, spatiotemporal consistency and causality consistency. This scheme is successfully applied in the internal and external joint test system of certain type anti-air missile.

**Keywords:** internal and external field; joint test; spatiotemporal consistency; time consistency; space consistency

### 0 引言

海上靶场内外场联合试验系统综合集成海上真实舰船、外场目标模拟系统、内场半实物仿真系统及内场数字仿真系统开展联合试验, 对武器装备的技战术性能进行试验鉴定。该系统是一个地理位置分散的分布式实时仿真系统, 旨在对真实舰艇形成一个较为逼真的威胁环境, 综合检验导弹武器系统在真实作战背景条件下的作战适应性。系统中的仿真实体、模拟器和真实武器装备实时运行分布在不同位置的各个节点上(包括仿真节点、系统网关、实装代理等)。各节点对运行其上的实体具有自身局部的时间和空间描述方法, 节点之间的描述方法有可能不同, 这是由分布式系统自身特点造成的; 另一方面, 联合试验环境又要求基于局部时间和空间描述的各类实体在一个公共的仿真任务空间中彼此互操作; 此外, 由于网络传输固有的延迟, 各节点彼此收到的交互数据永远是历史数据。上述因素相互作用就产生了时空一致性<sup>[1]</sup>问题。节点之间超出一

定限度的时空不一致, 将严重影响内外场联合试验的逼真度和试验结果的可信度; 因此, 建立时间和空间描述一致的仿真任务空间是内外场联合试验环境构建的基础<sup>[2]</sup>。笔者从海上靶场内外场联合试验系统的构成及运行特点出发, 分析了其时空一致性要求, 并设计了时空一致性解决方案。

### 1 内外场联合试验系统的构成及运行特点

#### 1.1 系统构成

试验目的和任务不同, 海上靶场内外场联合试验系统的构成也不相同。一般来说, 内外场联合试验系统由内场调度管理系统和仿真试验系统、外场实装、外场模拟器等构成。调度管理系统完成整个试验系统的调度和管理, 实现试验的准备和试验的运行控制; 内场仿真试验系统可以是导弹数学仿真系统, 也可以是导弹半实物仿真试验系统, 或者两者兼有, 一般用来完成一枚或多枚导弹的飞行仿真; 外场实装主要是指实装舰船, 包括其导航、警戒探测、指挥控制、武器控制等分系统; 外场模拟器作

收稿日期: 2018-10-31; 修回日期: 2018-11-20

作者简介: 张 伟(1968—), 男, 山东人, 学士, 高级工程师, 从事仿真试验技术、试验总体研究。

为试验配套设备使用,如导弹模拟器,雷达目标模拟器等。图1为某型舰空导弹内外场联合试验的系统组成。

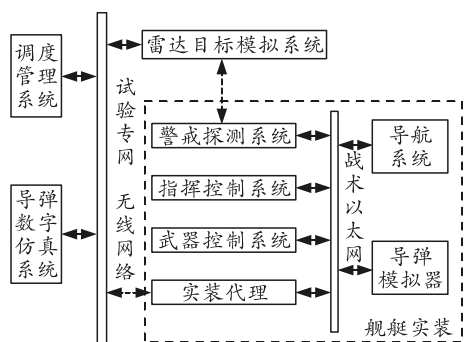


图1 某型舰空导弹内外场联合试验系统组成

该系统主要用来检验舰空导弹武器系统的多目标拦截能力。通过雷达目标模拟系统产生多批虚拟空中威胁目标,舰载警戒探测系统发现目标后将目标发送给指控系统,指控系统根据指挥员的指挥决策,向武器控制系统发送目标指示,武器控制系统实时解算导弹发射参数,当满足发射条件后,自动或人工下达发射指令。实装代理接收武器控制系统的发射指令及发射参数,通过无线网络发送给导弹数字仿真系统,导弹数字仿真系统模拟导弹对空中威胁目标进行拦截。

## 1.2 系统运行特点

海上靶场内外场联合试验系统的特点包括:

### 1) 地域分布,虚实结合。

内外场联合试验系统是分布在不同地域的系统相互联合而构成的一个试验系统,既包含内场仿真试验系统,又包含外场模拟系统及外场实装。对于海上靶场而言,该分布特性不仅是地理位置上的分布,而且外场实装舰船一般在海上,处于锚泊或航行状态,不可能通过有线网络与内场系统进行互连,这就增加了联合试验系统互连的复杂度。另外,由于试验系统中既有外场真实实体又有内场仿真实体,所以试验过程中既有外场真实空间,又有内场虚拟空间。如何完成真实空间到虚拟空间的映射或者虚拟空间到真实空间的映射,也是时空一致性所需要解决的关键问题。

### 2) 实时推进。

由于有外场实装的接入,该系统必然是一个实时推进的分布式系统。这就要求系统推进时间与自然时间保持一致。

### 3) 互操作特性。

互操作特性是指一个节点对另一个节点的事件

(指令)作出响应。海上靶场内外场联合试验系统的互操作,不仅体现在管理控制节点对其他各节点的控制操作,而且体现在外场实装舰艇发射内场的数字导弹、数字导弹摧毁目标时,目标模拟器撤销目标等;因此,互操作特性是内外场联合试验系统的重要特性之一。

## 2 时空一致性指标

### 2.1 时空不一致对试验结果的影响分析

海上靶场内外场联合试验是对武器装备的技战术性能进行试验鉴定,这就要求试验结果明确无误。外场飞行试验因为是真实的导弹打击真实的靶标,所以命中和毁伤结果明确。但在内外场联合试验环境下,一般用虚拟的导弹打击虚拟或者真实的靶标,由于时空不一致,不可能做到完全明确无误,只能尽可能地逼近这一要求。例如,对于一个雷达目标模拟器产生的虚拟电子靶标,在同一时刻,由于时间同步误差、坐标转换误差及信息传输延时等的存在,目标模拟系统、内场导弹数字仿真系统和外场实装舰艇对于其位置的理解必然存在偏差,当这种偏差大到一定程度后,对试验结果的影响将是灾难性的。时空不一致带来的影响主要体现在以下方面:1) 实体位置理解偏差带来的影响;2) 实体姿态理解偏差带来的影响;3) 时间不一致对因果关系的影响。

#### 2.1.1 实体位置理解偏差带来的影响

在内外场联合试验过程中,观测者(警戒雷达、导引头、引信等设备)观测被测对象时,其观测误差主要来自2方面:1) 观测者自身的测量误差;2) 观测者理解的被测对象位置与被测对象真实位置的偏差,后者即为时空不一致带来的位置误差。实体位置理解偏差对试验系统的影响十分广泛,主要表现在警戒探测、制导控制、目标搜捕、命中判定、引战解算和毁伤解算等方面。对于警戒探测系统来说,其作用距离一般为几十公里至几百公里,如果时空不一致带来的误差在米级范围内,则对其影响很小,可以忽略不计。但对于导弹的命中判定来说,由于其本身的脱靶量就在米级范围内,时空不一致带来的位置偏差将会对试验结果产生较大影响。笔者以某型防空导弹的命中判定为例,对这种影响进行仿真分析。

假设某型导弹的脱靶量  $E \sim N(0, \sigma)$ , 其战斗部威力半径为  $R_0$ , 其制导命中概率为  $P_0$ , 即导弹以概

率  $P_0$  落入以目标为圆心、以  $R_0$  为半径的圆内。通过查标准正态分布分位数表可得  $\phi(z_\alpha) = \int_0^{z_\alpha} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2}} dx = P_0 / 2$  的  $z_\alpha$ ，则  $\sigma = R_0 / z_\alpha$ 。假设时空不一致带来的位置理解偏差  $E_p$  服从  $[-M, +M]$  上的均匀分布。对于第  $i$  次的内外场试验脱靶量  $E_i$ ，可能出现以下几种情况：

- 1)  $E_i \leq R_0 - M$  时，试验结果与真实结果一致；
- 2)  $R_0 - M < E_i \leq R_0$  时，试验结果为导弹命中目标，若  $E_i - E_p \leq R_0$ ，则真实结果为导弹命中目标，两者一致；若  $E_i - E_p > R_0$ ，则真实结果为导弹未命中目标，产生取伪；
- 3)  $R_0 < E_i \leq R_0 + M$  时，试验结果为导弹未命中目标，若  $E_i - E_p > R_0$ ，则真实结果为导弹未命中目标，两者一致；若  $E_i - E_p \leq R_0$ ，则真实结果为导弹命中目标，产生弃真；
- 4)  $E_i > R_0 + M$  时，试验结果与真实结果均为未命中目标，两者一致。

根据以上分析，编制随机模拟程序，在  $R_0=30, 20, 10$ ， $P_0=0.85, 0.75, 0.65$  条件下，针对  $M=3, 6, 8, 10$  进行了仿真计算，位置偏差对试验结果的影响结果见表 1—9。

表 1  $R_0=30, P_0=0.85$  时的计算结果 %

| M  | 一致概率  | 弃真概率 | 取伪概率 |
|----|-------|------|------|
| 3  | 97.92 | 1.10 | 0.98 |
| 6  | 95.80 | 2.38 | 1.82 |
| 8  | 94.37 | 3.30 | 2.33 |
| 10 | 92.88 | 4.35 | 2.77 |

表 2  $R_0=30, P_0=0.75$  时的计算结果 %

| M  | 一致概率  | 弃真概率 | 取伪概率 |
|----|-------|------|------|
| 3  | 97.61 | 1.25 | 1.14 |
| 6  | 95.20 | 2.60 | 2.20 |
| 8  | 93.55 | 3.59 | 2.86 |
| 10 | 91.99 | 4.57 | 3.44 |

表 3  $R_0=30, P_0=0.65$  时的计算结果 %

| M  | 一致概率  | 弃真概率 | 取伪概率 |
|----|-------|------|------|
| 3  | 97.59 | 1.22 | 1.19 |
| 6  | 95.20 | 2.53 | 2.27 |
| 8  | 93.59 | 3.44 | 2.97 |
| 10 | 91.94 | 4.42 | 3.64 |

表 4  $R_0=20, P_0=0.85$  时的计算结果 %

| M  | 一致概率  | 弃真概率 | 取伪概率 |
|----|-------|------|------|
| 3  | 96.87 | 1.72 | 1.41 |
| 6  | 93.66 | 3.79 | 2.55 |
| 8  | 91.48 | 5.34 | 3.18 |
| 10 | 89.25 | 7.06 | 3.69 |

表 5  $R_0=20, P_0=0.75$  时的计算结果 %

| M  | 一致概率  | 弃真概率 | 取伪概率 |
|----|-------|------|------|
| 3  | 96.40 | 1.92 | 1.68 |
| 6  | 92.79 | 4.05 | 3.16 |
| 8  | 90.38 | 5.63 | 3.99 |
| 10 | 87.95 | 7.28 | 4.77 |

表 6  $R_0=20, P_0=0.65$  时的计算结果 %

| M  | 一致概率  | 弃真概率 | 取伪概率 |
|----|-------|------|------|
| 3  | 96.38 | 1.90 | 1.72 |
| 6  | 92.73 | 3.93 | 3.34 |
| 8  | 90.35 | 5.36 | 4.29 |
| 10 | 87.93 | 6.87 | 5.20 |

表 7  $R_0=10, P_0=0.85$  时的计算结果 %

| M  | 一致概率  | 弃真概率  | 取伪概率 |
|----|-------|-------|------|
| 3  | 93.67 | 3.80  | 2.53 |
| 6  | 86.84 | 9.05  | 4.11 |
| 8  | 81.92 | 13.28 | 4.80 |
| 10 | 76.70 | 17.96 | 5.34 |

表 8  $R_0=10, P_0=0.75$  时的计算结果 %

| M  | 一致概率  | 弃真概率  | 取伪概率 |
|----|-------|-------|------|
| 3  | 92.78 | 4.08  | 3.14 |
| 6  | 85.43 | 9.03  | 5.54 |
| 8  | 80.56 | 12.77 | 6.67 |
| 10 | 75.58 | 16.82 | 7.60 |

表 9  $R_0=10, P_0=0.65$  时的计算结果 %

| M  | 一致概率  | 弃真概率  | 取伪概率 |
|----|-------|-------|------|
| 3  | 92.73 | 3.92  | 3.35 |
| 6  | 85.47 | 8.45  | 6.08 |
| 8  | 80.76 | 11.72 | 7.52 |
| 10 | 76.07 | 15.12 | 8.81 |

根据仿真结果可以看出：时空不一致带来的位置理解误差对导弹命中概率的影响，与导弹自身的命中概率、威力半径、误差的大小均有关系，在导弹各项指标固定的条件下，位置理解误差越小，试验结果的可信度越高。

### 2.1.2 实体姿态理解偏差带来的影响

实体姿态理解偏差是实验过程中观测者观测被测对象时，所观测到的目标姿态与目标真实姿态之间的偏差。

在海上靶场内外场联合试验中，大部分实体都以质点形式存在，所以姿态理解偏差对这类实体并无影响。对于导弹的导引头来说，目标的姿态变化会带来目标雷达散射截面积 (radar-cross section, RCS) 的变化，若角度变化较小时，这部分变化可以忽略，而且，在大部分的内外场联合试验中，导引头一般为功能级模型，目标 RCS 的变化对导引头的搜索、捕获、跟踪并无影响；对于引信和战斗部来说，目标姿态的变化会引起引信起爆时间的变化，但大量的仿真试验表明，当姿态变化较小 (小于  $1^\circ$ ) 时，这种变化对战斗部毁伤的影响可以忽略。总之，在目前的内外场联合试验条件下，当实体姿态理解

偏差较小(小于 $1^\circ$ )时,其对试验结果的影响可以忽略不计。

### 2.1.3 时间不一致对因果关系的影响

在内外场联合试验中,事件以不同的网络传输延时到达其他节点。设事件 $E$ 为 $t$ 时刻在节点 $N$ 上发生的事件,由于从节点 $N$ 传输事件 $E$ 到其他节点有传输延时,且不同的节点传输延时不同,导致事件 $E$ 在 $t_1$ 时刻到达节点 $N_1$ 而在 $t_2$ 时刻到达节点 $N_2$ 。另外,事件还可能以非正常的顺序到达某节点。设 $E_1$ 为节点 $N_1$ 上发生的事件, $E_2$ 为节点 $N_2$ 上发生的事件, $E_1$ 发生在 $E_2$ 之前,由于从 $N_1$ 到节点 $N_3$ 的传输时延比从 $N_2$ 到 $N_3$ 的传输时延长,导致 $N_3$ 上先收到 $E_2$ 事件,后收到 $E_1$ 事件。在 $N_3$ 看来, $E_2$ 发生在 $E_1$ 之前,若 $E_1$ 与 $E_2$ 有因果关系,则在 $N_3$ 看来,因果关系发生了倒置<sup>[3]</sup>。

## 2.2 时空一致性指标设计

根据以上分析,内外场联合试验时空一致性指标包括以下方面:

1) 时间同步误差。时间同步误差是指各节点时间与标准时间之间的误差,是时空一致性的重要指标。它的大小直接影响其他指标的精度。对于海上靶场内外场联合试验系统来说,最大允许的时间同步误差取决于系统中实体的最大相对速度及要求的实体位置理解偏差。设 $v_c$ 为试验中实体最大相对速度, $P_e$ 为最大位置理解偏差,则最大允许的时间同步误差 $t_c < \frac{P_e}{v_c}$ 。例如,当 $v_c < 8 \text{ Ma}$ , $P_e < 3 \text{ m}$ 时, $t_c < 1.1 \text{ ms}$ 。

2) 实体位置理解偏差。该项指标对试验结果影响较大,也是时空一致性的重要指标之一。根据2.1.1节的分析,对于命中概率不小于0.65,威力半径不小于10 m的导弹,在位置理解误差不大于3 m的情况下,仿真试验结果与实际结果的一致概率不小于0.927 3,而且弃真概率和取伪概率相当;因此,可以认为:当目标实体位置理解误差不大于3 m时,试验结果的可信度可以接受。

3) 实体姿态理解偏差。根据2.1.1节的分析,可以认为,实体姿态理解偏差小于 $1^\circ$ 时,试验结果的可信度可以接受。

4) 因果关系一致性。系统分布和网络传输延时不能造成因果关系的倒置。

## 3 时空一致性解决方案

海上靶场内外场联合试验系统采用系统分层技

术,将系统垂直划分为功能相对独立的若干层,相应的交互信息也是分层的。系统顶层是一个基于广域网的弱实时系统,主要完成试验资源的调度管理、试验系统的构建和试验态势的显示等功能,所以其推进周期可以在百毫秒级。各层根据各自分系统的需要,其实时性各不相同,有的可能需要毫秒级的推进周期。

### 3.1 空间一致性

外场实装感知真实空间中的真实或虚拟实体,通过实装代理进行坐标转换后映射到内外场联合试验系统所建立的虚拟空间中。目标模拟系统则相反,通过电子靶标的形式将虚拟空间中的目标实体映射到真实空间中,让实装舰艇的探测系统感知。

这里所说的空间一致性是指在不考虑时间不一致的情况下,系统中各节点对实体空间位置和姿态理解的一致性,以及虚拟空间与真实空间之间相互映射的一致性。为了实现这种一致性,所有参与试验的各节点必须采用相同的坐标系对实体进行其位置、姿态、速度等描述。各节点进行开发或研制时,为方便起见,都会有一套独立的坐标系统,所有节点的坐标系统不可能完全相同,这就要求内外场联合试验系统提供一套坐标转换方法供各个节点使用,并要求各节点发布数据前,将实体的空间位置、速度和姿态等转换到统一的坐标系下。

### 3.2 时间一致性

系统时间一致性要求参与试验的各节点的时间保持同步,同时,由于海上靶场内外场联合试验的实时性特点,要求各节点的时间与自然时间保持同步。

海上靶场内外场联合试验系统要求各节点时间自治,而且各系统的时间同步到GPS/北斗时间,这样既保证了系统之间的时间同步,又保证了各系统时间与自然时间的同步。

由于Windows操作系统本身的实时性限制,无法达到较高的实时精度,对于实时性要求比较高的节点,如实装仿真代理、目标模拟系统、导弹数字仿真系统等,Windows系统不能满足实时性要求,这时就需要对Windows系统进行实时性扩展。采用Windows+RTX<sup>[4-5]</sup>的方法,可以使系统的时间精度达到0.1 ms,因而在内外场联合试验系统中广泛使用。

### 3.3 时空一致性

时空一致性指由于时间同步误差及网络传输延时造成实体空间位置、姿态理解的不一致。

为了解决此类问题,海上靶场内外场联合试验系统要求各节点在发布数据时必须打上数据产生时刻的时间戳,在数据接收节点要对接收到的数据进行航位推测(dead reckoning, DR)<sup>[6-8]</sup>,将实体的位置、姿态等推算到当前时刻。

假设  $P(t)$  表示远程实体在  $t$  时刻的位置。在  $t_1, t_2, \dots$  时刻接收到  $P(t_1), P(t_2)$  等位置更新。DR 模型在  $t$  时刻产生一个估计值  $D(t)$ 。设  $t_i$  表示比  $t$  早的最近状态更新时间,位置更新为  $P(t_i)$ ,  $\Delta t$  等于  $t - t_i$ 。根据可用的远程实体信息的不同,具有 3 种 DR 模型(dead reckoning model, DRM)<sup>[9]</sup>:

1) 零阶 DRM:  $D(t) = P(t_i)$ 。缺乏额外信息时,没有基础作其他选择。

2) 1 阶 DRM:  $D(t) = P(t_i) + v(t_i)\Delta t$ , 其中  $v(t_i)$  是在  $t_i$  时刻的更新中报告的远程实体的速度矢量。

3) 2 阶 DRM:  $D(t) = P(t_i) + v(t_i)\Delta t + 1/2 * a(t_i)(\Delta t)^2$ , 其中  $v(t_i)$  是速度矢量,  $a(t_i)$  是在  $t_i$  时刻更新的加速度矢量。

### 3.4 因果关系的一致性

因果关系的一致性要求内外场联合试验系统中事件发生的顺序和真实世界中事件发生的顺序一致,保证各成员节点能以同样的顺序观察到事件的产生,不产生事件顺序错乱或因果倒置等现象;同时,系统互操作特性要求事件及时响应,不会因为事件响应延迟而导致试验结果失真。

通过对海上靶场内外场联合试验过程中的事件进行分析,可以得到以下结论:各事件从发生到产生结果需要一个过程,而这个过程需要一定时间来完成,即各事件可以提前预知。例如,导弹发射事件,从操作人员按下发射按钮到导弹弹动,大约需要几百毫秒的时间;导弹与目标的碰撞事件,在导弹与目标接近的过程中,碰撞事件的发生时间也可以提前预知。

基于以上分析,可以采用时间前瞻量(lookahead)的方式进行试验过程中事件的时间同步。即事件发布节点提前预知事件的发生并发布事件,在发布事件的参数中加入事件发生的准确时刻。设节点  $N$  在  $t$  时刻预知到事件  $E$  将于  $\Delta t$ (前瞻量)时间后发生,则发布该事件,其参数中包含  $t$  和  $\Delta t$ ;节点  $N_1$  于  $t_1$  时接收到该事件,一般地,  $t_1 < t + \Delta t$ 。节点  $N_1$  在后续的第  $i$  个推进周期( $T_1$ )内检测是否满足  $t_1 + i * T_1 < t + \Delta t < t_1 + (i + 1) * T_1$ ,若满足,则响应该

事件;否,则在下一周期继续检测,直到满足为止。

采用该方法,只要前瞻量设计合适,事件总是在其应发生的时间内发生,有效避免了由于网络传输延迟所造成的事件顺序错乱或因果序倒置。另外,采用该方法,还可以在连续几个周期内多次发布同一事件,只是发布事件时的时间戳及事件前瞻量不同。这对于采用 UDP 传输协议的试验系统具有重要意义,可以有效避免因 UDP 传输丢包所造成的事件丢失。

由于各个事件从发生到产生结果所需的时间不同,前瞻量不可能相同。根据笔者在开展内外场联合试验过程中的经验,在进行试验系统设计时,前瞻量一般应满足以下要求:

1) 前瞻量必须大于系统推进步长加网络传输延时,否则事件有可能无法及时响应。

2) 前瞻量不能过大,否则会增加系统开销,同时也会影响事件处理的时间裕度。一般地,前瞻量小于 10 个系统推进步长。

## 4 结束语

笔者从海上靶场内外场联合试验系统的组成及运行特点出发,分析了时空不一致对试验结果的影响,据此设计了系统时空一致性指标,并给出了时空一致性解决方案。该方案在某型舰空导弹武器系统内外场联合试验中得到应用,取得了良好效果。

### 参考文献:

- [1] 范林军,凌云翔,王涛,等.探索分布仿真应用中广义时空域层级一致性[J].软件学报,2013,24(2):317-330.
- [2] 赵永铁,王永杰.基于 C++ builder 的靶场试验相对坐标转换[J].兵工自动化,2017,36(8):88-90.
- [3] 彭宇行,张拥军,李思昆.分布式虚拟环境的时空一致性研究[J].电子学报,2005,33(2):313-316.
- [4] 袁刚,许文腾.武器平台级仿真中多帧速混合时间推进方法[J].系统仿真技术,2015,11(2):172-175.
- [5] 王伟志,袁著有,王赞.基于 RTX 实时仿真系统的设计与实现[J].电子设计工程,2013,21(12):24-27.
- [6] 余学锋,杨标,张开维.靶场时统装置同步误差实时校准方法与分析[J].兵器装备工程学报,2017(3):22-26.
- [7] 张浩旻,管雪元.航位推算算法在导航定位中的仿真研究[J].电子测量技术,2017,40(6):85-88.
- [8] 张冰,杨明,王子才.分布交互仿真中的 DR 技术实现方案[J].系统仿真学报,2000,12(1):75-79.
- [9] 杨红雨,游志胜,张建伟,等.空地协同分布交互仿真中 DR 算法研究[J].计算机研究与发展,2000,37(8):954-961.