

## 一种高效的舰船红外辐射特性建模方法

姜 笛, 张 科, 吕梅柏  
(西北工业大学航天学院, 西安 710072)

**摘 要:** 在传统的红外目标建模方案基础上进行创新,提出了新型舰船目标红外建模方案,使用分析几何关系,重新构造的方法即可快速高效地建立模型,并将方案进行扩展,用于红外对抗场景仿真和战局推演,在此基础上,进一步对舰船的红外隐身效果、航迹规划、规避机动进行仿真,进而对红外仿真效果进行了有效性分析。结果表明,该建模方案具有较高精度,效果良好。

**关键词:** 舰船; 辐射特性; 红外模型; 仿真分析

**中图分类号:** TP29      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1671-637X(2014)06-0094-05

## An Efficient Method for Modeling of Warship Infrared Radiation

JIANG Di, ZHANG Ke, LÜ Mei-bo  
(School of Astronautics, Northwest Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

**Abstract:** A new method for constructing infrared models of warships was proposed on the basis of traditional methods for establishing infrared models. The new method is mainly aimed at analyzing geometric relations and rebuilding models. By this method, the models can be constructed rapidly and efficiently. The method was developed further and applied in the simulation of scenes for infrared confrontation and the deduction of battle situation. Based on which, simulation was carried out on warships' infrared stealthy effectiveness, route planning and evasive maneuvering, and analysis was made on the infrared simulation effectiveness. The result showed that the model constructing method has high accuracy and fine effectiveness.

**Key words:** warship; radiation characteristic; infrared model; simulation analysis

### 0 引言

对战场目标红外辐射特性的研究及模拟,是研制、改进红外攻击武器的基础,目标的红外仿真模型是战术模拟、红外场景仿真的核心部分。其中,舰船目标作为海战中受到红外制导导弹攻击的主要目标,其红外特性的仿真尤为重要。20世纪90年代以来,对海天背景、温度、湿度、空气透明度等影响舰船红外对比度因素的研究逐渐深入。

根据近年国内外公开发表的文献报告来看,在舰船红外仿真研究方面加拿大走在了前列。在加拿大国防部支持下,W. R. Davis Engineering Ltd. 研制开发了 SHIPIR/

NTCS 系统,其中,SHIPIR 子系统可以完成在各种气象条件下对舰船的红外仿真,并拥有完整的红外热像捕捉分析模块,可以研究不同气象条件下舰船红外热像的成像规律以及气象条件对红外信号信噪比的影响<sup>[1]</sup>。而 NTCS 子系统则可以完成红外捕捉、导弹红外制导、红外诱饵弹等红外对抗功能<sup>[1]</sup>。

目前,国内进行舰船红外热像理论建模研究的主要单位是上海交通大学等<sup>[1]</sup>。上海交通大学从1993年起对舰船的红外热像理论建模问题进行了较为系统的研究工作,并已经在舰船模型舰船温度场和红外辐射场计算等方面取得了明显的进展<sup>[1]</sup>。沈国土和杨宝成研究了钢板厚度对温度场计算的影响,考虑温度、梯度和时间弛豫效应<sup>[1]</sup>,在薄壳结构的基础上建立了厚壳结构船体模型。朱文勇等在一系列研究的基础上编制了海面目标红外辐射场计算软件<sup>[1]</sup>,该软件的主要思路是舰船和海天背景分别计算然后合成,可以模拟舰船在海天背景下的红外热像。

收稿日期:2013-07-04

修回日期:2014-04-01

基金项目:西北工业大学校基础基金(GCKY1006);航空科学基金(20110153003)

作者简介:姜 笛(1990—),女,山东蓬莱人,硕士生,研究方向为导航、制导与控制。

目前已有的红外舰船目标建模方法主要是针对船体和上层建筑展开的模型,对海天背景、大气传输、烟囱和烟羽的红外辐射或者做了简化处理,或者根本没有考虑,并且主要是对目标进行网格划分,之后计算船体各部分红外辐射强度,计算量大、过程繁琐,结果与实际误差较大。本文提出的建模方案采用拼接重构的方法,在建立目标红外辐射特性模型的基础上进行创新,并对使用该方法后的仿真效果进行分析和评估,分析表明使用该方法建立模型,计算速度得到显著提高,且结果准确,符合实际情况,能够有效地应用于战场态势推演、作战评估等方面。

## 1 影响红外特性的因素分析

### 1.1 外部因素

外部因素最主要的是太阳照射对舰船温度的影响<sup>[1]</sup>。一个立体目标不同部位的表面与太阳夹角不同,因此,在同一时间,其表面的不同部位接收的太阳直接辐射是不同的。随时间变化,太阳辐射的光线与目标表面各部分的夹角也不停地变化,受太阳照射的表面的红外辐射强度将明显高于不受太阳照射的表面。影响目标物体热平衡的外部因素还有大气辐射、局部气象条件等。

### 1.2 内部因素

舰船目标的红外辐射热源<sup>[2]</sup>主要来自主机,主机的热量主要通过以下部位表现出来:1)目标物体的受热部分,如舰船机舱两侧的船体钢板;2)被机舱通风气体和上升烟道热废气所加热的烟囱部分;3)烟囱顶部的上升烟道金属<sup>[3]</sup>。影响舰船红外辐射特征的内部因素还有舰船的内部布局,舰船内部各部分功能模块由于功能不同所产生的红外辐射也是不同的。

### 1.3 区域划分

船体外表面的能流热平衡方程<sup>[4]</sup>为

$$S\varepsilon_1 T^4 - q_{\text{env}} + S(\varepsilon_2 \sigma T^4 - \varepsilon_2 \varepsilon_{\text{in}} T_{\text{in}}^4) + Sh_{\text{air-out}}(T - T_{\text{air-out}}) + Sh_{\text{air-in}}(T - T_{\text{air-in}}) = 0 \quad (1)$$

式中: $S$ 为船体表面积; $\varepsilon_1$ 为外表面红外平均发射率; $\varepsilon_2$ 为内表面红外平均发射率; $\varepsilon_{\text{in}}$ 为内舱发射率; $T_{\text{in}}$ 为内舱温度; $h_{\text{air-out}}$ 为外界空气对流换热系数; $h_{\text{air-in}}$ 为舰船内舱空气对流换热系数; $T_{\text{air-out}}$ 为外界空气温度; $T_{\text{air-in}}$ 为内舱空气温度。

影响舰船红外辐射特征的内部因素还有舰船的舱室分布,不同舱室所产生的红外辐射是不同的,舰船内部的布局划分包括动力舱<sup>[5]</sup>、液舱、航行指挥舱、烟囱、居住舱室、其他舱室等。各舱室由于不同的工作情况发热量不同,其红外辐射特征也有所差异。动力舱是驱动舰船航行的关键舱室,由于安装有高功率设备、机

箱、燃料燃烧发热等原因,动力舱周围船体的红外辐射较强。液舱包括燃油舱、滑油舱、喷气燃料舱、淡水舱和压载水舱。动力舱和液舱的整体温度较高,属于舰船各区域中红外辐射较强的区域。对于常规动力舰艇而言,在上层建筑中间设置的是烟道和烟囱,这一段通常长度约10 m<sup>[6]</sup>,烟囱、烟管等的温度较高。其他舱室包括货舱、弹药舱、医疗舱等,这些舱室产生的红外辐射较少。

根据对影响船体外表面温度的内外因素和舱室分布的分析,对表征舰船各区域红外辐射特性的舰船区域进行划分,如图1所示。

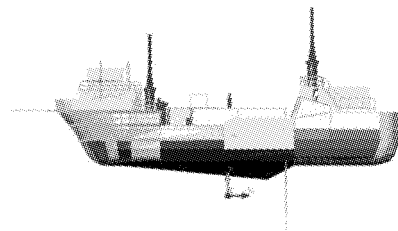


图1 舰船区域划分图

Fig. 1 Image of warship area dividing

图1中用图像不同灰度表征舰船各区域红外辐射值的不同。抑制各区域的红外辐射效果采取的方法包括水幕喷淋,在舰身采用光致变色材料,使入射光反射后变为另一波长光,并改变向外辐射的红外辐射波的偏振度,从而达到减少红外辐射的目的<sup>[7]</sup>。

## 2 红外建模方案

新型建模方案采用 Matlab 平台编制仿真程序,步骤如图2所示。

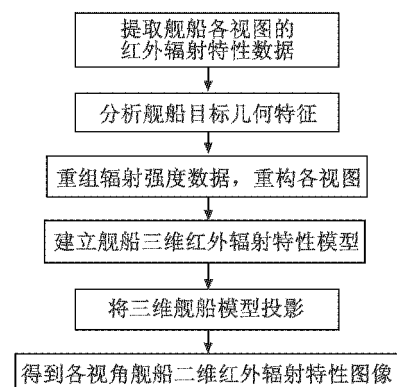


图2 新型建模方案流程图

Fig. 2 New modeling scheme procedure

为此,本文提出了新的建模方案,首先进行实测,使用红外热像仪从不同视角方向观测目标,得到目标在红外成像设备中的二维图像,同时可测出辐射亮度的大小,辐射亮度的单位为  $W/(m^2 \cdot sr)$ ,表示辐射源在某一方向的单位投影面积在单位立体角内的辐射通

量。将图像进行拼接及重建。详细分析新型建模方案,方案中通过实测得到了目标的俯视图、主视图和各角度的侧视图,在不同的天气情况下阳光强度、大气温度、湿度不同,导致实测数据产生一定的变化,变化规律如图 3 所示。

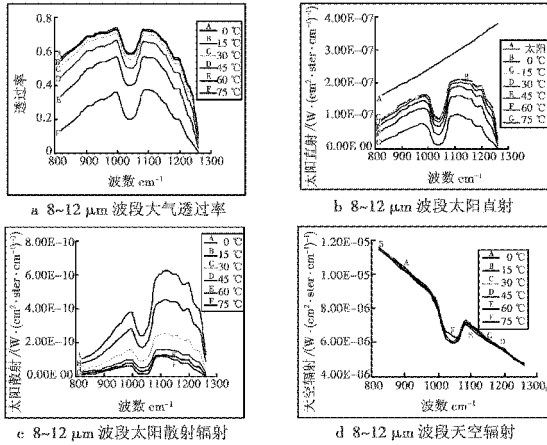


图 3 8~12 μm 波段辐射强度及透过率随气温变化规律

Fig. 3 Variation of radiation intensity and transmissivity of window 8~12 μm with temperature

由变化规律得到不同环境条件下红外建模所需要的不同角度观测结果。例如,与在 25 °C、天气晴好的条件下海天背景中舰船的红外图像相比<sup>[8]</sup>,在 19 °C、小雨的外界条件下同样观测角度的实测图中各点灰度值将成比例降低,如图 4 所示。在实测过程中,在获得各角度二维图像的同时也获得了图像中各点的坐标及亮度;将这些不同角度图像中的各点辐射强度值进行提取,拼接重构,就可以建立三维红外辐射特性模型;再将三维辐射模型按照不同视角要求进行投影,将三维模型转化为二维图像,就得出了任意视角的二维红外辐射特性图像。

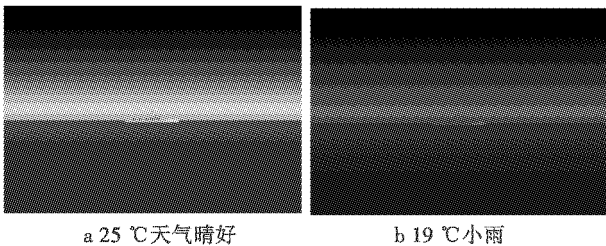


图 4 不同环境条件下目标红外特性 90°侧视图

Fig. 4 Target infrared characteristic image at 90° under different conditions

建立舰船三维红外模型需要获取舰船模型尺寸,实测获得的图片大小为 640 × 480,估计舰船所占整幅图像的比例,得到船体的大致尺寸为 200 × 60 × 60。由于在主视图、90°和 270°侧视图、俯视图中,船体位于图像的中心部分,因此,确定三维模型的尺寸后就可以确定模型的位置,用主视图、俯视图和两幅侧视图建模。

由于仿真得到的都是二维图像,所以船体上的同一个点在各个图像中是由不同的横坐标和纵坐标表示的,因此,在建立三维红外模型时需要考虑船体各面之间的几何关系。对船体上的各点进行如下处理:首先,以主视图中各点为基准,取其  $x, y$  坐标作为最终舰船三维模型所处的  $Oxyz$  坐标系中点的  $x, z$  坐标,由正视图和 270°侧视图求出船体的上表面所有点在  $Oxyz$  坐标系中的  $z$  坐标,将俯视图中可看到的点的辐射亮度赋给上表面所有点;然后由正视图求出船体的最左端和最右端表面上所有点在  $Oxyz$  坐标系中的  $x$  坐标,将 90°和 270°侧视图中可看到的点的辐射亮度分别赋给最右端表面和最左端表面上的点。至此,即可确定各坐标点的辐射亮度,完成舰船的红外辐射特性模型,三维红外辐射特性模型如图 5 所示。

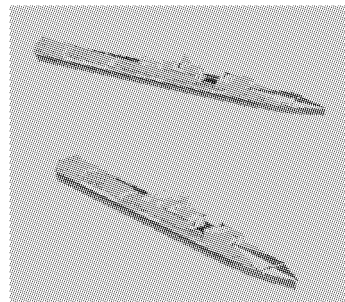


图 5 舰船三维红外辐射特性模型

Fig. 5 The 3D infrared models of warship

对舰船三维模型进行任意视角投影,即可得到红外导引头在各个时刻视场中观察到的舰船红外辐射特性二维图像,图 6 所示为舰船在几个观测视角的红外辐射特性图像。

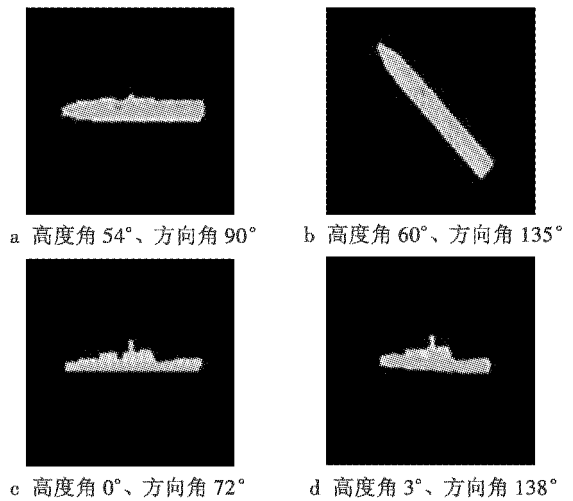


图 6 舰船在几个观测视角的红外辐射特性图像

Fig. 6 Infrared image of a warship at several observing angles

将舰船目标的红外辐射特性模型应用于仿真生成具有海天背景的红外场景,不同环境、气候条件下的仿真结果如图 7 所示。

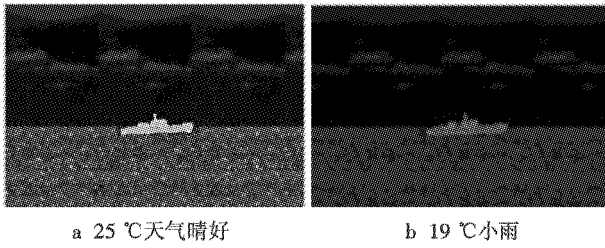


图7 仿真得到的具有海天背景  
Fig.7 Infrared scene including sea-sky  
background through simulation

### 3 仿真性能分析

本建模方案的优点在于,建模得到的灰度图像中,灰度值单位量度的变化所表示的舰船辐射强度的变化与实测得到的图像完全一致。本文所使用的建模方案中辐射亮度(单位是  $W/(m^2 \cdot sr)$ )与灰度值的对应关系如图8所示。



图8 辐射亮度与灰度值的对应关系  
Fig.8 Relation between radiation and RGB value  
此对应关系也可由式(2)表示

$$\begin{cases} R = (I - m)/(n - m) \\ G = |1 - 2|(n + m)/2 - I|/(n - m) \\ B = (n - I)/(n - m) \end{cases} \quad (2)$$

式中: $I$ 为船体各点辐射强度; $m$ 为船体各点的最大辐射强度,在给定的天气条件下,实测获得  $m = 31.3221 W/(m^2 \cdot sr)$ ;  $n$ 为船体各点的最小辐射强度,在给定的天气条件下,实测获得  $n = 37.2663 W/(m^2 \cdot sr)$ 。

已知,RGB模型转换为灰度模型,灰度  $g_s = R \times 0.299 + G \times 0.587 + B \times 0.114$ ,设船体某点辐射亮度值为  $x$ ,则  $x + 1$  为辐射亮度值量度产生单位变化后的结果,建立灰度模型,计算得到亮度为  $x$  的点在模型中的灰度为

$$g_s(x) = (x - m)/(n - m) \times 0.299 + |1 - 2|(n + m)/2 - x|/(n - m) \times 0.587 + (n - x)/(n - m) \times 0.114 \quad (3)$$

辐射亮度产生单位变化,所对应的模型灰度变化为

$$\Delta = |g_s(x + 1) - g_s(x)| = 0.185/(n - m) + 0.587 \times \left( \left| 1 - \frac{|n + m - 2(x + 1)|}{n - m} \right| - \left| 1 - \frac{|n + m - 2x|}{n - m} \right| \right) \quad (4)$$

使用建模方案对舰船目标辐射亮度不同的部位进行仿真建模<sup>[9]</sup>,分析辐射亮度产生单位变化所对应的模型灰度变化。

1) 当  $x \leq 33.2942$  时,则  $n + m \geq 2x$ ;

① 如果  $x \geq 31.3221$ ,则  $\Delta = 0.229$ ;

② 如果  $1 - \frac{n + m - 2(x + 1)}{n - m} < 0$ ,则得出  $x < m$ 。

2) 当  $33.2942 < x \leq 34.2942$  时:

① 如果  $1 - \frac{|n + m - 2(x + 1)|}{n - m} < 0$ ,与  $\frac{n + m}{2} - 1 < x \leq \frac{n + m}{2}$  不符;

② 如果  $1 - \frac{|n + m - 2(x + 1)|}{n - m} > 0$ ,则  $\Delta = -0.167 \sim 0.229, \Delta_{\max} = 0.229$ ;

③ 如果  $1 - \frac{n + m - 2x}{n - m} < 0$ ,则得出  $x < m$ 。

3) 当  $x > 34.2942$  时:

① 如果  $x \leq 36.2663$ ,则  $\Delta = -0.167$ ;

② 如果  $1 - \frac{2(x + 1) - (n + m)}{n - m} < 0$  且  $1 - \frac{2x - (n + m)}{n - m} \geq 0$ ,则与  $m \leq x + 1 \leq n$  不符;

③ 如果  $1 - \frac{2x - (n + m)}{n - m} < 0$ ,则得出  $x > n$ 。

综合以上情况分析得,采用本方案仿真得到的舰船目标红外辐射特性模型中,灰度值的单位变化对应的辐射亮度<sup>[10]</sup>变化最小为  $\frac{1}{0.229} = 4.367 W/(m^2 \cdot sr)$ ,仿真所生成的结果中灰度分辨率较高<sup>[11]</sup>。并且,由于所有观测视角、环境情况对应的二维红外海天全景图像已经事先生成并存储,只需要实时调用即可,因此改变观测高度角、方向角等参数后图像刷新耗时小于  $0.05 s$ ,而传统建模方案建立三维红外模型工作周期约是新型方案的两倍,且改变观测高度角、方向角等参数后图像刷新耗时受计算机性能影响很大,至少需要  $1 s$  左右,难以满足实时性的要求<sup>[12]</sup>。因此,对比传统方案<sup>[13]</sup>,本方案实现了更好的仿真效果。

### 参考文献

[1] 邢强. 舰船红外辐射特性三维全景仿真[D]. 上海:上海交通大学,2006.  
XING Q. The infrared simulation of the ship with background [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2006.

[2] 邢强,任海刚,陈汉平,等. 经过大气传输的红外热像仿真[J]. 红外与激光工程,2007,36(1):43-46.  
XING Q, REN H G, CHEN H P, et al. Simulation of infrared thermal image through atmospheric transmission[J]. Infrared and Laser Engineering, 2007, 36(1):43-46.

[3] 李宏宁,白廷柱,曹峰梅,等. 用于场景仿真的红外成像模型及其有效性分析[J]. 红外与毫米波学报,2010,29(1):57-62.

- LI H N, BAI T Z, CAO F M, et al. Infrared imaging model for scene simulation and its validation[J]. *Journal of Infrared & Millimeter Waves*, 2010, 29(1):57-62.
- [4] 曾一凡, 刘建平, 王元斌, 等. 海天背景下三维目标红外成像仿真方法研究[J]. *计算机与数字工程*, 2012(9):99-101.
- ZENG Y F, LIU J P, WANG Y B, et al. Target infrared imaging simulation in the sea-sky background[J]. *Computer & Digital Engineering*, 2012(9):99-101.
- [5] 季卫亚, 胡江华, 李晓光, 等. 舰船的红外辐射特性[J]. *舰船电子对抗*, 2007, 30(5):43-45.
- JI W Y, HU J H, LI X G, et al. Infrared radiation characteristics of ship[J]. *Shipboard Electronic Countermeasure*, 2007, 30(5):43-45.
- [6] 姜贵彬, 蓝天, 倪国强. 红外热成像系统评价的重要参数及测试方法[J]. *红外与激光工程*, 2008, 37:470-473.
- JIANG G B, LAN T, NI G Q. Important parameters and testing methods of performance evaluation of thermal infrared imaging system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37:470-473.
- [7] THOMPSON J, VAITEKUNAS D, BROOKING B. Signature management—the pursuit of stealth lowering warship signatures; Electromagnetic and infrared [C]//SMi “Signature Management—The Pursuit of Stealth” Conference, DAVIS W R. Engineering Limited Ottawa, Ontario, Canada, 21 & 22 February, 2000:9-18.
- [8] VAITEKUNAS D A, FRAEDRICH D S. Validation of the NATO-standard ship signature model (SHIPIR) [C]//SPIE, 1999, 3699:103-113.
- [9] 任海霞, 任海刚, 徐杲. 实时海面舰船红外热像仿真平台[J]. *红外与激光工程*, 2007, 36(2):202-206.
- REN H X, REN H G, XU G. Real-time infrared simulator of marine ship[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(2):202-206.
- [10] 杨明月, 杨卫平. 复杂海天背景下红外舰船目标的自动检测方法[J]. *红外与激光工程*, 2008, 37(4):638-641.
- YANG M Y, YANG W P. Automatic detection method of warship target in the complex sea-sky background[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(4):638-641.
- [11] 杨述华, 廖守亿, 王仕成, 等. 应用 Vega 模块的红外成像系统仿真建模方法[J]. *探测与控制学报*, 2008, 30(3):32-36.
- YANG S H, LIAO S Y, WANG S C, et al. The modeling methods of infrared imaging system simulation based on the modules of Vega software[J]. *Journal of Detection & Control*, 2008, 30(3):32-36.
- [12] 褚宏伟, 许小剑. 火箭尾喷焰红外辐射特性的理论计算[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(1):10-14.
- CHU H W, XU X J. Theoretical computation of the infrared radiation from rocket plume[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(1):10-14.
- [13] 陆志洋, 王春财, 郭刚, 等. 红外成像仿真外部渲染方法研究[J]. *计算机仿真*, 2007, 24(9):206-209.
- LU Z F, WANG C C, GUO G, et al. Research on external rendering in infrared imaging system[J]. *Computer Simulation*, 2007, 24(9):206-209.

(上接第 89 页)

- [4] 钟华飞. 平流层飞艇压力控制系统的建模与仿真[D]. 上海:上海交通大学, 2008.
- ZHONG H F. The mathematic modeling and simulation of pressure control of stratospheric airship [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2008.
- [5] MILLER C J, SULLIVAN J, MCDONALD S. High altitude airship simulation control and low altitude flight demonstration[C]//AIAA:2007-2766, 2007:1-22.
- [6] SCHMIDT D K. Dynamic modeling, control and station-keeping guidance of a large high-altitude nearspace airship [C]//AIAA 2006-6781, 2006:1-14.
- [7] MUELLER J B, PALUSZEK M A, ZHAO Y Y. Development of an aerodynamic model and control law design for a high altitude airship[C]//AIAA 2004-6479, 2004:1-17.
- [8] 陈慧, 杨新, 周江华. 高空飞艇高度保持控制器设计[J]. *航天控制*, 2009, 27(2):56-61.
- CHEN H, YANG X, ZHOU J H. The design of height-hold controller for high altitude airship[J]. *Aerospace Control*, 2009, 27(2):56-61.
- [9] 吴雷, 李勇, 李智斌. 平流层飞艇高度压差协调控制策略[J]. *中南大学学报:自然科学版*, 2011, 42:327-332.
- WU L, LI Y, LI Z B. Coord-inated control strategy of pressure difference and height of stratospheric airships[J]. *Journal of Central South University: Science and Technology*, 2011, 42:327-332.
- [10] CHEN X J, QI H, WANG X P, et al. Modeling and simulation of pressure control for stratospheric platform airship[C]//Proceedings of the 6th World Congress on Intelligent Control and Automation, 2006:6208-6212.