

装甲车辆与地面背景的热交互作用及红外仿真

韩玉阁, 成志铎, 任登凤, 宣益民

(南京理工大学 能源与动力工程学院, 江苏 南京 210094)

摘要: 为了全面揭示装甲车辆与地面背景之间热交互作用对地面背景温度以及红外辐射特性的影响, 建立了装甲车辆和地面背景的温度和红外辐射特性的模型, 重点考虑了装甲车辆与地面之间的传热。通过对地面和履带相关力学关系的引入, 建立运动车辆和地面之间热学以及力学的模型, 采用了动网格方法对车辆目标在运动后对地面所产生的沉陷现象及在地面上留下的热痕迹进行模拟仿真。基于红外辐射理论, 综合考虑自身辐射、反射辐射以及大气传输特性, 计算了车辆在 3 种不同状态下与地面背景之间的热交互作用及红外辐射特征分布, 并比较了模拟温度与实验测量温度的误差, 验证了模型的精度。仿真结果表明: 该方法对地面目标的隐身设计和隐身技术评估具有十分重要的意义。

关键词: 装甲车辆; 地面背景; 热交互作用; 红外仿真

中图分类号: TN211 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)01-0020-06

Thermal interactions and infrared simulation of armored vehicles and ground background

Han Yuge, Cheng Zhiduo, Ren Dengfeng, Xuan Yimin

(School of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: In order to fully reveal the influence of thermal interactions between the armored vehicles and ground background on ground background temperature and infrared radiation characteristics, the temperature and infrared signature model of armored vehicles and ground background were established, with focus on heat transfer between armored vehicles and ground. By introducing mechanical relationship between the road and the track, thermal and mechanical models between the moving vehicle and the road were established. Using method of the moving mesh, the subsidence phenomenon and thermal trace on the road after target vehicle moving were simulated. Based on the infrared radiation theory, considering the radiation, reflective radiation and atmospheric transmission characteristic, the thermal interactions and infrared radiation characteristics distribution of armored vehicles and terrain background under three different conditions were calculated. The simulated temperature and measured temperature in the experiment were compared. The model's precision was validated. The simulation results show that this method is crucial to the stealth design and stealth technology assessment of ground target.

Key words: armored vehicles; ground background; thermal interactions; infrared simulation

收稿日期: 2012-05-05; 修订日期: 2012-06-03

基金项目: 总装预研项目

作者简介: 韩玉阁(1967-), 男, 教授, 博士, 主要从事目标红外辐射特性的模拟与仿真方面的研究。Email: yugehan1111@sina.com

0 引言

随着红外制导技术的发展, 红外制导和红外成像制导武器发现、识别和跟踪目标的能力越来越强, 为了提高车辆在战场上的生存力和战斗力, 在车辆红外隐身技术的研究和隐身效果评估上进行大量的研究^[1-3], 取得了很大的成就, 因此在这些隐身措施实施后, 如何去发现、探测识别车辆又提出了新的要求。目前在车辆隐身方面, 大多是对车辆本体采取隐身措施, 对其与背景环境之间的交互作用并没有太多的研究, 例如是否可以通过车辆在地面上运动留下的热痕迹去发现识别车辆。

实际战场环境中, 车辆要在各种路面上进行行驶, 包括: 泥泞地、砂石地、沙地、雪地等。不同的地面上车辆对地面产生的沉陷是不同的, 同时地面沉陷使土壤的很多物性参数产生变化, 如热物性参数。不同地面类型, 地面表面及土壤各种参数是不同的。其中包括地面力学参数, 例如: 地面变形阻力系数、地面转向系数、地面附着系数以及和内摩擦的土壤变形模量和内聚的土壤变形模量等; 土壤热物性参数, 例如: 导热率、比热容等; 不同地面表面的发射率、反射率、太阳吸收率也是不同的。车辆履带会改变地面表面结构, 因此地面的发射率、反射率、太阳吸收率也随之改变, 而这些参数的改变以及地面结构的沉陷, 使得在红外图像中车辆运动痕迹将会比较明显。

以坦克在地面上的 3 种状态(冷静态、热静态以及热动态)为例进行研究, 利用动网格方法对上面提出的战车热痕迹问题进行模拟, 通过对地面和履带相关力学关系的引入, 研究运动车辆和地面之间热学以及力学的模型, 计算出坦克与地面背景存在热交互作用时的温度场分布和红外辐射特征分布, 为地面装甲车辆在红外识别和跟踪试验仿真提供了依据, 对车辆隐身设计和隐身技术评估具有十分重要的意义。

1 装甲车辆温度及红外辐射计算模型

1.1 车辆几何模型的简化

以坦克为例, 对地面装甲车辆及地面背景进行几何建模。实际坦克的结构非常复杂, 对坦克进行建模时, 根据大量公开的坦克图片为参考, 简化了一辆

虚拟坦克, 具体几何结构如图 1 所示, 炮管朝向为正西方向。

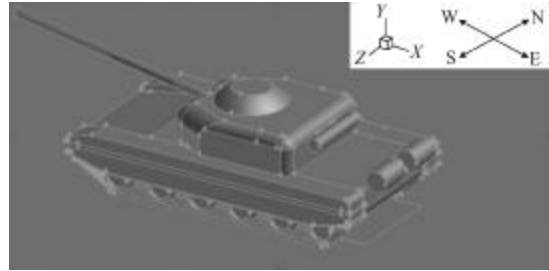


图 1 车辆几何模型

Fig.1 Geometric model of a vehicle

1.2 地面模型的简化

真实环境中地面表面及土壤结构是非常复杂的, 地势是有起伏的, 厚度是非常大的。针对研究装甲车辆与地面背景之间热交互作用以及动态车辆对地面热痕迹问题的特殊性, 建模时对地面进行了一些合理的简化, 假设地面表面是平整的; 地面的厚度有限; 土壤的各项参数是均匀的, 各向同性的。文中所建立地面土壤的各项主要参数如表 1 所示^[2]。

表 1 地面土壤参数表

Tab.1 Parameters of roads

Serial number	Parameters	Flexible road 1	Flexible road 2
1	k_c	5.27	0.95
2	k_f	1 515.04	1 528.43
3	n	0.7	1.1
4	f	0.015	0.031

表 1 中 k_c 为内聚的土壤变形模量, kN/m^{n+1} ; k_f 为内摩擦的土壤变形模量, kN/m^{n+2} ; n 为土壤变形指数; f 为地面变形阻力系数。

1.3 装甲车辆与地面背景的热交互作用模型

1.3.1 热模型

装甲车辆与地面背景之间的传热包括: 车辆与地面之间的辐射、动态车辆履带与地面之间的摩擦热及导热和车辆挡住地面的太阳辐射 3 个部分。

(1) 履带与地面之间的摩擦热

车辆以一定的速度在运动时, 履带和地面由于接触产生摩擦热, 所产生的热量用下面的公式计算得到^[3]:

$$Q=f \cdot P \cdot V \quad (1)$$

式中: f 为地面变形阻力系数; P 为接地压力, N/m^2 ; V 为履带接地段的绝对速度, m/s 。

(2) 履带与地面之间的导热

假设车辆是直线行驶, 在地面和车辆履带着地段接触的这段时间里, 履带和地面之间既有摩擦热也有由于温差引起的导热。

车轮与履带接触面之间的边界条件为^[3]:

$$\frac{\Delta T}{R} = Q_2 \frac{k_1}{k_1 + k_2} + Q_1 \frac{k_2}{k_1 + k_2}$$

$$Q_1 + Q_2 = Q_2 \quad (2)$$

式中: Q_1 和 Q_2 分别为传向履带与地面的热流密度; ΔT 为两侧的温差, K ; R 为履带和地面之间的接触热阻, $m^2 \cdot K/W$; k_1 和 k_2 分别为履带与地面的导热系数, $W/(m \cdot K)$ 。

(3) 车辆与地面的太阳辐射热

考虑太阳辐射对坦克及地面温度分布的影响。采用射线跟踪技术计算每个时刻太阳的辐射热量, 采用了表面间的辐射模型模拟坦克各个部件之间的辐射热传递。设置方位、经纬度、时区和具体计算时间(月、日、时、分)以及天气状况等来确定此时此地的太阳辐射大小。

车辆本体在运动时所产生的热包括履带与轮子之间的摩擦热、轮缘所产生的变形能以及发动机散发的热量等。

(1) 轮缘所产生的变形能

为了减小坦克轮子的振动, 轮缘部分一般都采用橡胶材料。而变形能是由于橡胶应力应变的不同步而导致机械功的损失, 转化为热能。变形能的大小根据参考文献^[4]确定。

(2) 履带与轮子之间的摩擦热

车辆运动时, 轮子与履带之间也有强烈的接触, 产生摩擦热, 所产生的热量用下面的公式计算得到:

$$Q' = f' \cdot P' \cdot V' \quad (3)$$

式中: f' 为内滚动阻力系数; P' 为法向载荷, N/m^2 ; V' 为履带与轮子之间的相对滑动速度, m/s 。

其他未说明的热模型都是根据相关文献进行设置^[5-6], 这里不进行详细说明。

1.3.2 力学模型

参考 ATV(ADAMS tracked vehicle)将路面分为 3 种类型: 硬质地面、弹塑性地面和软性地面。文中主要针对软性地面进行分析, 模拟计算履带车辆在

通过软性地面时土壤表面的下陷情况。

软性地面上, 履带车辆对地面的正压力是基于美国学者 M·G·贝克提出的压力-沉陷关系式^[7], 即:

$$p = (k_c/b + k_\phi) z^n \quad (4)$$

式中: p 为土壤法向载荷, kN/m^2 ; b 为履带板的宽度, m ; z 为沉陷量, m 。

1.3.3 动网格方法

车辆在战场中是不断运动的, 且运动的轨迹非常复杂, 真实地模拟此动态过程比较困难, 文中假定车辆以匀速直线运动进行模拟。利用动网格方法实现车辆的移动和地面受到车辆压力后的沉陷。

选用动态层法^[7], 即根据紧邻运动边界的网格层高度的变化, 添加或者减少网格层, 即在边界发生运动时, 如果紧邻边界的网格层高度增大到一定程度, 就将其划分为两个网格层; 如果动边界网格层高度降低到一定程度, 就将紧邻边界的两层网格合并为一个层, 如图 2 所示。

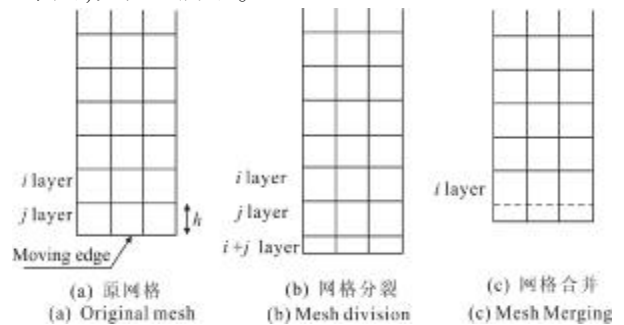


图 2 动态层法示意图

Fig.2 Schematic diagram of layering method

网格高度有一最大临界值 h_{max} , 定义为:

$$h_{max} > (1 + \alpha_s)h \quad (5)$$

式中: α_s 为分割因子。如果第 j 层网格高度增大到满足公式(5)的情况下, 在第 j 层中的单元将分裂成一个具有理想高度 h 的单元层和一个高度为 $(h_{max} - h)$ 的单元层, 即第 $j+1$ 层。

网格高度有一最小临界值 h_{min} , 定义为:

$$h_{min} < \alpha_s h \quad (6)$$

式中: α_s 为合并因子。如果第 j 层网格高度减小到满足公式(6)的情况下, 就对该层网格与临近单元网格进行合并, 生成新的第 i 层网格。

2 坦克温度模型的校验结果分析

影响车辆温度分布的因素很多, 如太阳辐射、天

空背景辐射、气象条件、云层分布,周围地物背景等外部因素,以及车辆内热源(发动机、散热器等)、动力舱和乘员舱内的对流换热、车轮与履带以及履带与地面之间的摩擦产热、车辆各部分之间的热传导和辐射换热等因素。文中仅针对地面和冷静态坦克车辆上一些具有代表性位置将实验测量温度数据与对应边界条件下此模型仿真计算的温度结果进行对比,具体如图3(a)~(d)所示,分别为地面、前上装甲、工具箱、右侧裙板这4个位置的对比。

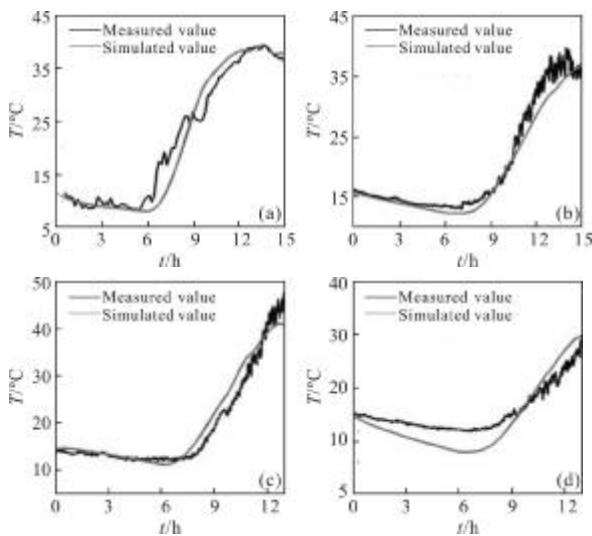


图3 坦克表面实验与数值模拟结果对比

Fig.3 Numerical simulation results of tank surface compared with experiment data

从图中可以看出,测点计算值与实验值之间存在一定的误差,但温度误差基本都在10%左右,甚至更小,满足数值模拟在工程上的要求。产生误差的原因有很多,如坦克材料的物性参数、结构的几何参数(对热容影响很大)、表面涂层发射率和太阳吸收率以及边界条件的设定可能和实际情况有一定差距等,同时实验中也存在热电偶及其他测试仪表引起的误差。

3 车辆在不同地面上行驶时塌陷深度及热痕迹计算结果

计算条件为地理位置:东经 120° ,北纬 32° ;时间:4月21日;天气条件:空气温度 20°C ,无风,天空晴朗无云;坦克状态:假设坦克全重为 52t ,履带宽为 0.5m ,履带着地长度 5.4m ,坦克一直处于自然环

境中,坦克炮口朝向为正西方。选择 $10:30$ 和 $17:30$ 两个时刻,两种不同的地面类型,模拟坦克以 36km/h 的速度匀速直线运行相同时间段后,计算得到地面沉陷及热痕迹的温度分布结果如图4、图5所示。

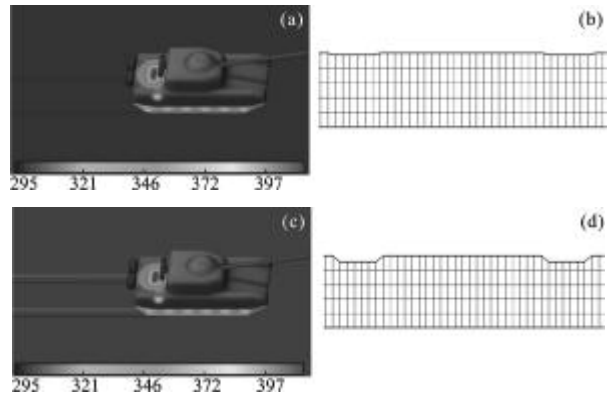


图4 不同地面类型坦克运动所引起的地面沉陷

Fig.4 Ground subsidence caused by tank moving on different types of roads

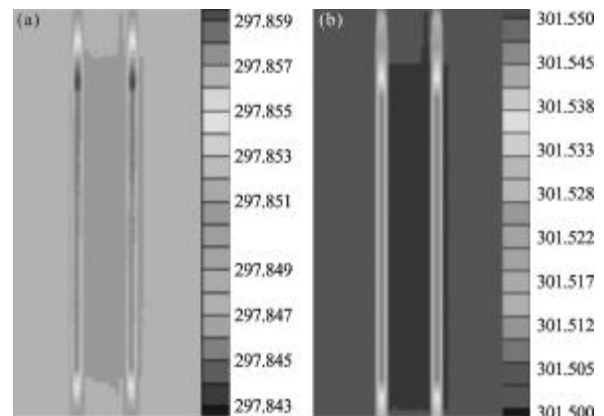


图5 不同地面类型坦克运动所留下的热痕迹

Fig.5 Thermal traces caused by moving on different types of roads

图4(a)与4(c)显示了同一时刻相同坦克运行状态在不同地面类型上所引起地面沉陷。由于两种不同的地面类型的 n 、 k_c 、 k_f 、 f 等参数是不相同,根据土壤力学模型可以计算得到不同地面类型的沉陷深度,具体可以从沉陷处的截面图看出,如图4(b)与4(d)所示。地面的沉陷深度不同,会使此处的地面表面及土壤的物性参数将和周围的地面及土壤有所区别,将对长时间此处的热分布有较大的影响。

图5(a)与5(b)显示了同一时刻相同坦克运行状态在不同地面类型上所留下的热痕迹。由于两种不同类型地面的密度、比热容以及导热系数等物性参数不同导致同一时刻地面表面的温度不同,同时在

相同坦克运行状态在地面上所留下的热痕迹也不同。从热痕迹上可以看到由于坦克履带摩擦等因素所留下的履带热痕迹比较明显,而坦克运行过程中挡住太阳对地面辐射热所留下的热痕迹比较小。图5(a)与5(b)对比可以看出软性地面2上所留的热痕迹对比度更明显一些,这与其地面类型的密度、比热容以及导热率等物性参数相关。

4 不同状态坦克的红外辐射仿真结果分析

空气温度、风速及湿度均采用实验实测值,其他计算条件同前。计算车辆在3种不同状态下与地面背景之间的热交互作用及红外辐射特征分布。

4.1 冷静态

从图6中可以看到一天不同时间,坦克表面在3~5 μm 波段内的红外辐射特征变化,图像中明亮的地方表示温度高,红外辐射强度大,能够明显分辨出

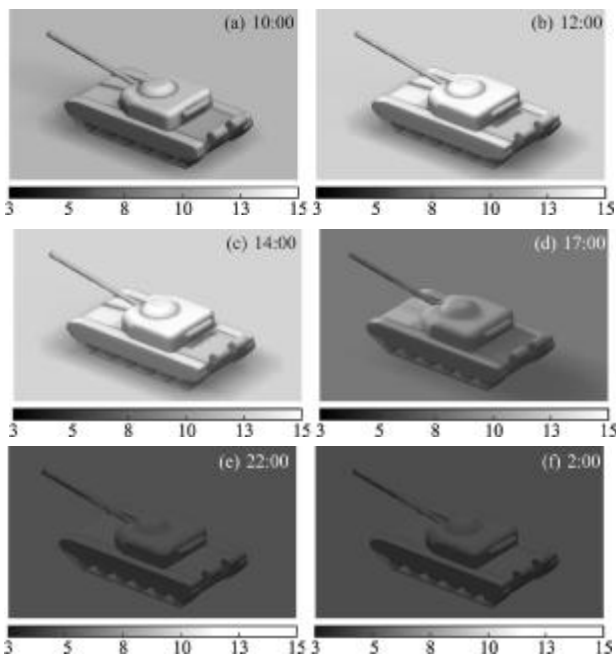


图6 不同时刻3~5 μm 波段内冷静态坦克表面的红外辐射特征对比(单位: W/m^2)

Fig.6 3-5 μm band infrared radiation characteristics of tank surface under cold static conditions at different times(unit: W/m^2)

温度较高区域。随着时间的变化,如图6中图(a)、(b)、(c)坦克表面温度和太阳辐射值慢慢增加,红外辐射通量开始增大,随后由于太阳辐射以及坦克表面温度的降低,红外辐射通量逐渐减小,到晚上降到最低,如图6中图(d)、(e)、(f)所示。由于3~5 μm 波

段内的太阳的红外辐射与坦克表面自身的红外辐射相比,数值大小在同一个量级上,因此太阳辐射对此时的坦克表面的红外辐射特征有较大的影响,可以看出在14:00时候坦克的潜渡装置、炮管以及车体在地面上有明显的红外阴影,与实际情况非常吻合,说明文中所建立的红外仿真模块是正确的。

4.2 热静态

选取两个时间点比较坦克在晚上和白天热静态运行状态下的表面红外辐射特征分布,如图7所示。

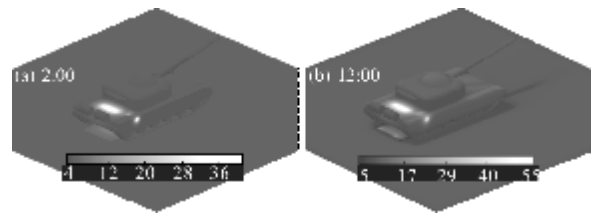


图7 不同时刻3~5 μm 波段内热静态坦克表面的红外辐射特征对比(单位: W/m^2)

Fig.7 3-5 μm band infrared radiation characteristics of tank surface under thermal static conditions at different times(unit: W/m^2)

由图7可以看出,在热静态的工作状态下,坦克的红外辐射特征主要是由坦克发动机以及排烟管引起的。在发动机上方的装甲以及排烟管附近的工具箱以及裙板表面的红外辐射强度明显高于坦克其他地方的红外辐射强度。因此,在热静态时红外探测器主要探测发动机散热部分以及排气管高温烟气引起的热扩散就能容易地发现识别目标,因而如何对坦克发动机进行散热以及高温排气,就显得格外重要。同时由于发动机散热使得底装甲对地面的辐射增加,尤其在晚上底装甲下部的地面温度将与周围地面存在明显的温差,即使坦克运动离开,此处的温度也会与周围有所差异,可以根据留下的“红外阴影”^[1]来反推坦克的相关信息,这是值得关注的研究方向。

4.3 热动态

由图8和图7可发现热动态与热静态相比,坦克运动使得负重轮与履带摩擦产生热量以及轮缘产生的变形能使履带和负重轮的温度都比较高。在地面背景温度较低时(夜晚),坦克履带负重轮也成为了红外探测器识别坦克目标的重要依据,目前很多研究单位为了屏蔽轮胎带来的红外辐射都将坦克的裙板加长,这样虽然一定程度屏蔽了轮胎的红外辐

射,但使得坦克在复杂地形上运动的灵活性受到一定限制,而且此方法只是简单的遮蔽并未真正地消除这种红外辐射,因此如何降低轮的红外辐射特征将成为研究的重点。同时,发动机上部装甲和排烟管附近仍然是具有明显红外辐射特征的部件,易被发现识别。

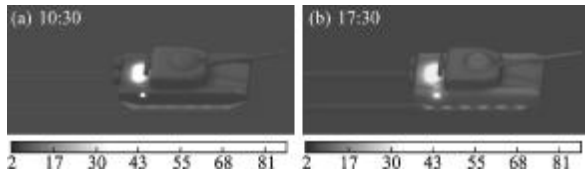


图8 不同时刻3~5 μm 波段内热动态坦克表面的红外辐射特征对比(单位: W/m^2)

Fig.8 3-5 μm band infrared radiation characteristics of tank surface under thermal dynamic conditions at different times(unit: W/m^2)

5 结论

考虑装甲车辆与地面背景之间热交互作用以及车辆行驶时由于地面变形而留下的热痕迹对地面背景温度以及红外辐射特性的影响,完善了原有的目标与背景相互作用的建模方法。计算得到了不同时刻、3种不同运动状态下坦克及地面背景的红外分布特征。模拟结果直观地显示出了坦克目标在不同运动状态下,坦克不同部件的辐射特性及对地面背景的红外辐射特征影响,很好的模拟了目标与背景间的热交互作用。模拟结果表明,该方法对地面装甲车辆的隐身设计和隐身技术评估具有十分重要的意义。

通过对坦克在地面上行驶进行建模仿真,初步得到了坦克通过地面时地面产生的沉陷以及由于摩擦等因素在地面上留下的热痕迹。由模拟结果可以看出:相同的坦克运行状态地面类型对地面沉陷深度影响比较大,而不同地面、时间及车辆速度的状态下坦克运动瞬间所引起的地面热痕迹变化比较小,因此通过车辆运动瞬间地面上留下的热痕迹对车辆目标进行红外发现、识别和跟踪是比较困难的。但地面受到碾压后,此处的土壤与其他地方土壤热物性和表面辐射参数产生了很大变化,经过较长时间后

温度分布和红外辐射特征会比较明显,将在后续工作中重点研究。

参考文献:

- [1] Min Jun, Deng Xiao. Infrared characterizations about targets and backgrounds[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(S): 385-388. (in Chinese)
闵君, 邓晓. 目标与背景的红外特征研究综述 [J]. *红外与激光工程*, 2006, 35(S): 385-388.
- [2] Luo Laike, Xuan Yimin, Han Yuge. Study on infrared radiation characteristics of amphibious tank [J]. *Infrared Technology*, 2009, 31(1): 18-22. (in Chinese)
罗来科, 宣益民, 韩玉阁. 水陆坦克红外辐射特性仿真研究[J]. *红外技术*, 2009, 31(1): 18-22.
- [3] Xuan Yimin, Han Yuge. *Infrared Characterizations of Ground Targets and Backgrounds* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2004. (in Chinese)
宣益民, 韩玉阁. 地面目标于背景的红外特征 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2004.
- [4] Ma Weibiao, Wang Hongyan, Cheng Junwei. Simulation on factors of soft soil trafficability of tracked vehicles [J]. *Computer Aided Engineering*, 2006, 15: 257-259. (in Chinese)
马伟标, 王红岩, 程军伟. 履带车辆软土通过性能影响因素仿真[J]. *计算机辅助工程*, 2006, 15: 257-259.
- [5] Jiang Lude, Bi Xiaoping, Zhang Zhiquan. Calculation research of road wheel 3D temperature field of tank with FEA [J]. *Journal of Academy of Armored Force Engineering*, 2007, 21(4): 36-41. (in Chinese)
蒋陆德, 毕小平, 张智诠. 坦克负重轮三维温度场有限元计算研究[J]. *装甲兵工程学院学报*, 2007, 21(4): 36-41.
- [6] Bekker M G. *Ground Vehicle System Introduction* [M]. Beijing: China Machine Press, 1978. (in Chinese)
[美]贝克 M G. 地面-车辆系统导论[M]. 北京: 机械工业出版社, 1978.
- [7] Yang Jianhua. *Small Air-Cooled Diesel Engine Design* [M]. Beijing: China Machine Press, 1991. (in Chinese)
杨建华. 小型风冷柴油机设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 1991.