

文章编号: 1672-8785(2017)10-0031-06

地雷对土壤表面红外辐射的影响

郝争辉^{1,2} 王 高^{1,2} 褚星明^{1,2} 原东方^{1,2} 蔚 旋^{1,2} 邓芳芳^{1,2} 武慧敏^{1,2}

(1. 中北大学仪器科学与动态测试教育部重点实验室, 山西太原 030051;

2. 中北大学电子测试技术国家重点实验室, 山西太原 030051)

摘 要: 地雷排除一直是较难解决的问题。利用红外系统对地雷进行探测, 主要取决于地雷与背景间的红外辐射差异。首先通过热平衡方程分析了影响地表温度的主要因素, 以一维热传导方程为模型分析了埋设地雷对地表温度的影响。计算了地雷上方土壤与周围土壤的表面温度在一天中随时间的变化, 并且与实际测量值进行了比较。在此基础上, 利用高斯模型对实验数据进行了拟合分析, 通过拟合模型可得到地表温度随时间的变化关系。结果表明, 仿真地雷会使土壤层之间正常的热传导被阻断, 造成地雷上方的土壤与周围土壤之间存在一定的温度差异; 这种温度差异可以通过红外技术进行分辨。

关键词: 热传导; 地雷; 红外辐射; 地表

中图分类号: TN **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2017.10.006

Influence of Landmines on Infrared Radiation of Soil Surface

HAO Zheng-hui^{1,2}, WANG Gao^{1,2}, CHU Xing-ming^{1,2}, YUAN Dong-fang^{1,2},
WEI Xuan^{1,2}, DENG Fang-fang^{1,2}, WU Hui-min^{1,2}

(1. Key Laboratory of Instrument Science and Dynamic Measurement, North University of China, Taiyuan 030051, China; 2. National Key Laboratory of Electronic Measurement Technology, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: Landmine exclusion has always been a difficult problem. The detection of landmines by an infrared system mainly depends on the infrared radiation difference between the landmine and the background. Firstly, the main factors affecting ground surface temperature are analyzed according to the heat balance equation. Taking the one-dimensional heat conduction equation as a model, the influence of buried landmines on ground surface temperature is analyzed. The variation of the surface temperature of the soil above a landmine and its surrounding soil with time in a day is calculated and compared with the actual measured values. On this basis, fitting analysis is carried out on the experimental data by using the Gaussian model. With a fitting model, the variation relationship between the ground surface temperature and the time can be obtained. The results show that the simulated landmine can block the normal thermal conduction between the soil above it and its surrounding soil and hence result in the temperature difference between the soil above it and its surrounding soil. This temperature difference can be detected by infrared technology.

Key words: thermal conductivity; landmine; infrared radiation; soil surface

收稿日期: 2017-07-04

作者简介: 郝争辉(1989-), 男, 山西文水人, 硕士, 主要从事红外图像处理研究。

E-mail: 260073964@qq.com

0 引言

成功有效地排除地雷一直是世界公认的较难解决的问题。利用红外热像仪探雷是该领域内十分有潜力的技术。热像仪能够检测出目标体表面温度场的分布情况,再经电路将热红外辐射数据转换成可见光图像^[1]。近几年来,运用红外热像仪对探测范围内的物体进行无损检测的技术已经在消防安保、机电设备、空间遥感等相关领域得到了应用^[2]。红外热成像技术在穿透烟、雾等方面具有一定的优势。红外成像系统的特性以及红外探测器的快速发展都为红外技术在地雷探测方面的应用提供了条件^[3]。

本文在分析外界影响因素的基础上,通过土壤的热传导方程建立探测红外地雷的理论模型,根据实际情况对所建立的理论模型的边界条件进行分析,从而得到完整的带有边界条件的热传导模型。结果为红外探雷提供了理论基础。根据理论基础,利用不同条件下的实验数据来对红外探雷进行验证。

1 地表的热模型

红外热像仪能够远距离对地雷进行探测的主要原因是所观察的目标物与背景之间存在热学差异。在土壤、太阳、大气等条件的相互作用下,地雷上方的土壤与背景之间形成了明显的热辐射差异。掩埋在土壤下的仿真地雷由于材质原因,阻断了其上方土壤与下层土壤之间热量与水分的传导,使得地雷上方的土壤与周围土壤之间存在红外辐射差异,从而导致温度有所不同。

1.1 地表热能量平衡方程

地表的热平衡方程为^[4]

$$E_{sun} + E_{sky} + M + H + EL + G = 0 \quad (1)$$

式中, E_{sun} 为地表所吸收的太阳辐射; E_{sky} 为地表所吸收的大气长波辐射; M 为地表的自身辐射; H 为地表与环境间的显热交换; EL 为两者之间的潜热交换; G 为由地表传向内部的导热率。

如图 1 所示,在立方体区域的边界建立正交直角坐标系, Γ_3^1 对应土壤的表层,即通过热像仪唯一可以测量的区域,实验所测的数据变化均在这部分体现; Γ_3^2 对应区域底层。热传导方程为^[5,6]

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \sum_{i=1}^3 \frac{\partial}{\partial x_i} (\alpha(x) \frac{\partial T}{\partial x_i}) \quad (2)$$

式中, $T(K)$ 为绝对温度, $t(s)$ 是时间, $\alpha(x)(m^2/s)$ 为热扩散系数。

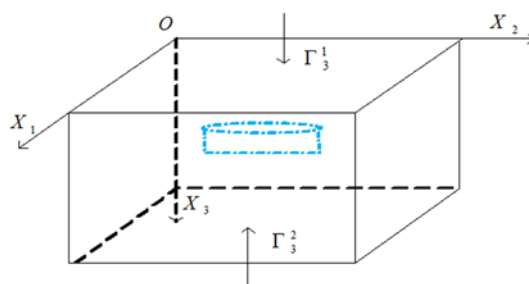


图 1 埋设地雷的土壤区域

1.2 初始条件

要解决上述模型,需对热传导方程的边界条件进行分析。该模型的区域边界条件如下:

在所研究的区域 Ω 内, $t = 0$ 时,该热传导方程在初始条件下的温度分布为

$$T(x, 0) = g(x), x \in \Omega \quad (3)$$

式中, $g(x)$ 在给定时间与位置的情况下为常数;实际中,在初始时刻 $g(x)$ 在不同位置的温度一般是通过插值法估计的。

在一定深度下,昼夜热传递对土壤温度的高低影响不明显,即可近似认为在一定深度下土壤的温度不会随热传递而改变。所以,在模型区域 Ω 底层 Γ_3^2 的温度为

$$T(x, t) = T_{\infty}, (x, t) \in S_{3,t_e}^2 \quad (4)$$

1.3 边界条件

土壤的热通量由其表面的热通量 q_{net} 决定,即由界面 Γ_3^1 上的通量结果决定。

$$-\kappa \frac{\partial T}{\partial x_3}(x, t) = q_{net}(x, t), (x, t) \in S_{3,t_e}^1 \quad (5)$$

式中, $\kappa(W/m \cdot K)$ 为土壤的传热系数。

所研究的土壤区域一般较大且均匀。这种条件下, 土壤区域的垂直边界所达到的热平衡关系为

$$\frac{\partial T}{\partial n}(x, t) = 0, (x, t) \in S_{te}^{1,2} \quad (6)$$

式中, n 为面 Γ 的法向量。

土壤表层的热通量 q_{net} 为

$$q_{net}(x, t) = q_{sun}(t) + q_{sky}(t) + q_{conv}(x, t) - q_{emis}(x, t) \quad (7)$$

本文中, 设定此模型仅用于弱风(或无风)条件下, 因此对流换热系数可视为常数。

假定当热模型应用于大范围均匀的裸土区域时, 短时间内埋设物体对区域的垂直边界和底层边界的影响可忽略, 将三维模型简化为一维模型, 如式(2), 化简后更有利于模型仿真。

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, 0 < x < l, 0 < t \leq t_e \quad (8)$$

在确定模型及边界条件后, 需考虑以下几个因素^[7]:

(1) 太阳辐射: 是影响地表温度场的主要因素, 可定量表示为

$$q_{sun} = \alpha_{sun} r E_{sun} p^m F_{sun} \quad (9)$$

式中, α_{sun} 为地表对太阳辐射的吸收系数; r 为日地间距离引起的修正值; $E_{sun} = 1353 \text{ W/m}^2$, 是太阳辐射常数; p 为大气透过率; F_{sun} 为地表对太阳直接辐射的角系数。

(2) 大气辐射: 大气层会向地面辐射, 其辐射度可简化为

$$q_{sky} = \varepsilon \varepsilon_{sky} \sigma T_{sky}^4 \quad (10)$$

式中, T_{sky} 为大气的温度; F_{sky} 为表面对大气等效灰体平面辐射的角系数; ε 为地表的表面发射率; ε_{sky} 为大气的等效发射率, 它的值常用 Brunt 方程式计算获得: $\varepsilon_{sky} = 0.51 + 0.208 \sqrt{e_a}$, e_a 为空气中水蒸气的分压力, 单位为 kPa。

(3) 地表的自身辐射: 地表向外部空间辐射损失的热能可由 Stefan-Boltzmann 定律得到:

$$q_{emis} = \varepsilon \sigma T^4 \quad (11)$$

(4) 显热交换: 由地表与周围空气之间的对流换热引起。其强度为

$$q_{conv} = h(T - T_{air}) \quad (12)$$

式中, T 为外表面的温度, h 为外表面的换热系数。 T_{air} 为空气温度。假设一天内的最高与最低气温分别是 T_{max} 与 T_{min} , 那么 $\Delta T = T_{max} - T_{min}$, 平均气温为 $T_{aver} = T_{max} - 0.522 \Delta T$, 则一天内任意时刻的气温可表示为

$$T_{air}(t) = T_{aver} + 0.489 \Delta T \cdot \cos \frac{\pi}{12}(t - 15.05) + 0.062 \Delta T \cdot \cos \frac{\pi}{6}(t - 1.17) \quad (13)$$

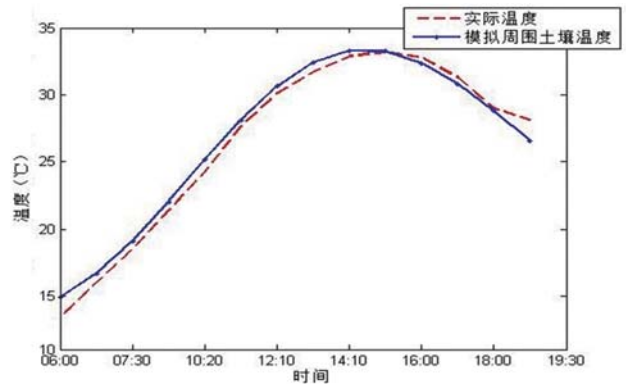


图 2 气温随时间的变化情况

利用红外热像仪对地雷进行探测时, 只能探测出土壤表层的温度。土壤表层以下的温度无法进行探测。地雷会隔离土壤中的热传导, 使得地雷上方的土壤无法像其周边的土壤一样进行热传递, 因而地雷上下方的土壤在短时间内产生温度差。据此建立模型, 实现红外探雷。

2 实验方法

实验采用埋设仿真地雷的形式模拟地雷场。运用红外热像仪探测模拟雷场表面的温度变化。试验采用外壳为塑料的模型地雷。测试装置采用 VarioCAM[®]hr 型测温红外热像仪, 其温度测量范围为 $-40 \sim 1200 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 温度分辨率优于 0.05 K , 测量精度为 $\pm 1.5 \text{ K}$ 。为了更接近实际环境, 实验场地选在野外。

3 实验结果分析

实验中利用红外热像仪对地雷上方及周围土壤表面的温度进行监测。根据上述理论模型对实验数据进行分析。

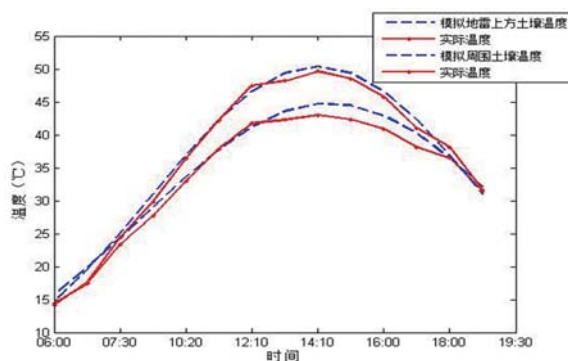


图3 土壤表面温度随时间的变化

由于仿真地雷的材质(塑料)是热的不良导体,地雷上方的土壤成为阻断热传导的介质。在同样的光照条件下,地雷上方的土壤要比周围的温度高。土壤温度的升高会使内部的湿度降低,导热率下降。由于空气的导热性较差,所以土壤吸收的太阳热辐射使得自身温度较快上升。而周边土壤的热传导没有被阻断,有相当一部分来自太阳热辐射的能量向更深层的土壤传导。所以在土壤的表层会产生不同的温度场。运用红外热像仪可以对其进行区分。图3中采用文献[8]的参数进行计算,其理论计算值与实际测量值之间存在一定的偏差,主要是因为理论计算所采用的参数与实际参数之间存在偏差。另外,部分影响参数为经验估计值,这也会使理论计算与实际情况存在一定误差。

在上述研究的基础上,对地雷上方及其周围土壤的热辐射模型进行数据拟合,结果如图4所示。

表1中,数据1、2分别表示地雷上方土壤所测温度的均值与周围土壤所测温度的均值。可以看出,运用高斯模型对数据进行拟合时,虽然确定系数 R-square 之间的差别不大,但误差平方和 (Square Sum of Error, SSE) 与标准差 (Root Mean Squared Error, RMSE) 要比运用二次多项式

小得多。当选用双高斯模型对数据进行拟合时,其 SSE 与 RMSE 的值比较小,但拟合系数的置信区间通过零点。综合上述情况,本文选用单个高斯模型进行拟合。

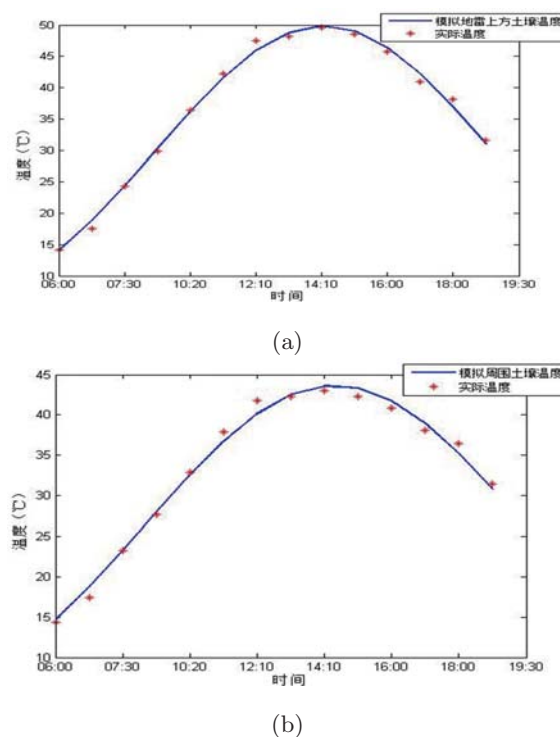


图4 拟合量与实际温度值

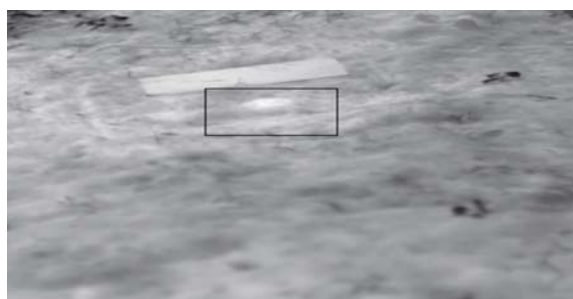
表1 不同情况下的拟合参数

	数据	SSE	R	RMSE
二次多项式	1	22.97	0.9806	1.445
	2	51.69	0.9711	2.168
单高斯模型	1	10.72	0.9909	0.9874
	2	8.866	0.995	0.8978
双高斯模型	1	2.76	0.9977	0.5874
	2	4.181	0.9977	0.723

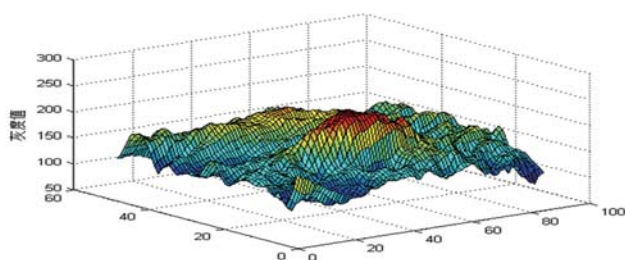
土壤表层的热辐射模型为

$$T(0, t) = a * e^{-(t-b/c)^2} \quad (0 \leq t < 24) \quad (14)$$

图5为热像仪所采集的埋雷区域的红外图像。因为地雷阻断正常的热传导,它上方的土壤温度要比周围的温度高。所获取的红外图像中,温度由低到高对应的灰度值由0到255,可以明显观察出地雷所在的位置。



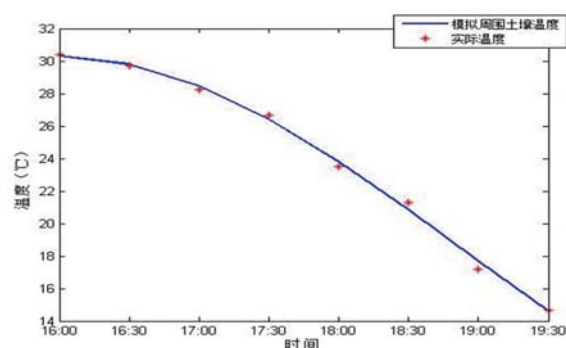
(a)



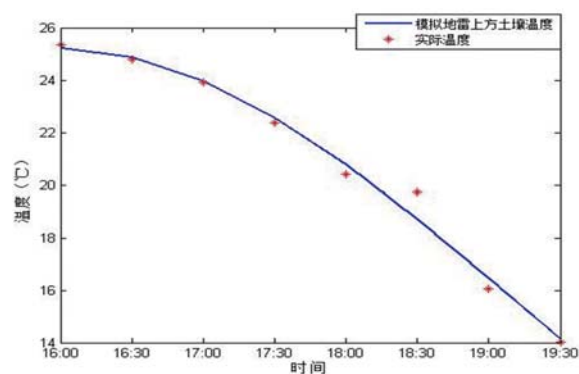
(b)

图 5 土壤表面的红外图像及区域内的灰度值三维图

从图 6 可以看出, 雨后周围土壤的温度要比地雷上方的温度高。因为在下雨之后, 地雷阻断了土壤中水分的渗透, 地雷上方土壤的水分含量较大。所以在相同的阳光照射下, 温度上升较慢。而周围土壤因为没有被阻断, 雨水可以很快深入下层土壤中, 土壤中的水分含量比有地雷阻断的情况下低。可以看出, 雨后利用该模型依然可以达到良好的拟合效果。



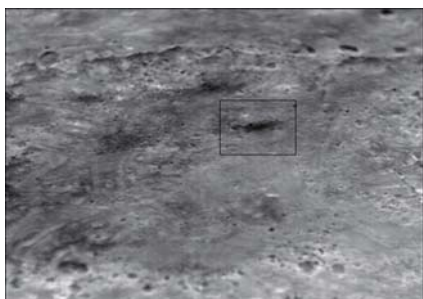
(a)



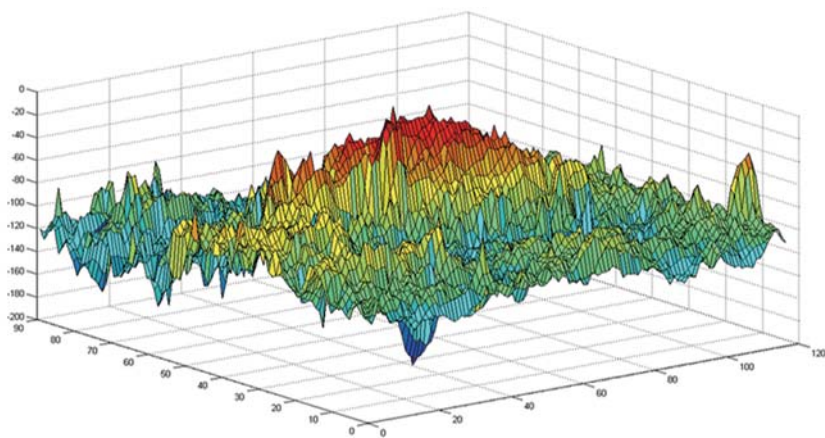
(b)

图 6 雨后土壤表面的温度拟合量与实际温度值

图 7 为雨后所采集的红外图像。地雷上方土壤与周围土壤存在一定温差, 短时间内地雷上方的土壤温度较低, 所以呈现的灰度值较小。



(a)



(b)

图 7 土壤表面的红外图像与区域内的灰度值三维图

将仿真地雷分别埋在土壤深处进行实验。随着地雷深度的增加,土壤表面的温度变化比较缓慢。地雷上方的土壤温度受太阳照射的影响较大。随着地雷埋设深度的增加,其上方土壤表面与周围土壤的温度差会越来越小。利用高斯模型对不同埋设条件下地雷上方土壤的温度数据进行模拟,可以获得良好的拟合效果。

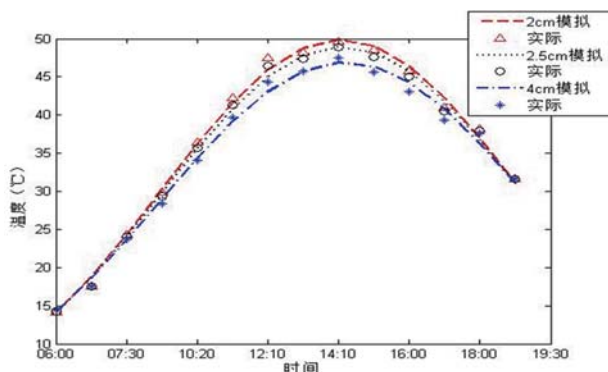


图 8 埋设不同深度时地雷上方土壤表面的温度变化

4 结论

首先利用热传导模型对地雷进行模拟分析。仿真地雷会阻断土壤层之间正常的热传导,造成地雷上方土壤与周围土壤之间存在一定的温度差异。红外热像仪能够将这种温度差异转换为灰度差异,并通过图像的形式体现出来。通过数据拟合的方式得出,高斯模型可以很好地表示出时间与土壤表面温度变化之间的关系。通

过拟合模型与数据分析可以得出,14:00 到 15:00 时地表温度达到一天中的最大值。由于实际情况中土壤热传导要比理论模型复杂,本文利用多组实验进行拟合,得出了一般情况下土壤表面温度随时间变化的模型。通过不同埋雷深度下对模型的分析,可以得出该模型的变化趋势。

参考文献

- [1] 姜和利,吕相银,周园璞,等.地面目标与背景的红外辐射对比度特性[J].*红外与激光工程*,2012,41(8): 2002-2007.
- [2] 陈西平,张龙,刘斌,等.基于地下电缆表面温度的土壤热参数评估及载流量预测[J].*中国电力*,2014,47(9): 83-87.
- [3] 苗青.红外热成像在地雷探测中的应用研究[D].太原:中北大学,2016.
- [4] 吕相银,凌永顺,黄超超.地面目标表面温度及红外辐射的计算[J].*红外与激光工程*,2006,35(5): 563-567.
- [5] Nguyen T T, Hichem S, Dinh N H. Finite-Difference Methods and Validity of a Thermal Model for Landmine Detection With Soil Property Estimation [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2007, 45(30): 656-673.
- [6] Nguyen T T, Hichem S, Dinh N H. Detection and Characterization of Buried Landmines Using Infrared Thermography [J]. *Inverse Problem in Science and Engineering*, 2011, 19(3): 281-307.
- [7] 路远,吴丹,金伟,等.地表红外辐射建模研究[J].*红外技术*,2008,30(2): 75-78.
- [8] 陈翀,杨立,谢骏.地面目标动态红外特征模拟[J].*光电工程*,2007,34(1): 32-36.

新闻动态 News

法国 Pléiades Neo 卫星群将重塑全球对地观测市场

据 www.airbus.com 网站报道,由 4 颗新的甚高分辨率 (0.3 m) 光学对地观测卫星构成的法国 Pléiades Neo 卫星群将采用欧洲数据中继系统 (EDRS) 即 SpaceDataHighway 技术,从而在很长一段时间内为用户提供业内最快的系统响应速度、最低的数据延迟以及大容量数据传输能力。

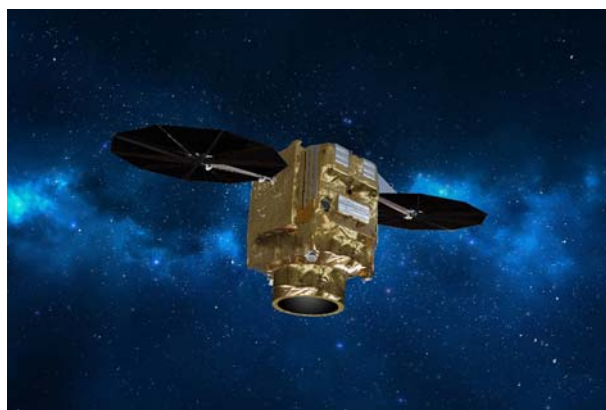


图 1 Pléiades Neo 卫星 (最早 2020 年发射) 的概念图

□ 岳柄干