

文章编号: 1672-8785(2008)12-0018-06

坦克动力舱体温度场数值仿真与实验验证

黄小辉 毕小平 王普凯

(装甲兵工程学院机械工程系, 北京 100072)

摘 要: 建立了坦克动力舱体温度场数值计算模型。采用流固耦合的计算方法计算车体壁面的温度场, 应用壁面函数法修正处于流场内部的固壁, 通过固体和流体双向耦合换热计算, 并考虑太阳辐射对车体温度场的影响, 得出了车体壁面温度场的分布。并将计算结果与测试结果进行了对比。研究结果表明, 动力舱体温度场的计算结果与测试结果的相对误差小于 9.034%, 所使用的数值计算方法可用于动力舱体温度场的数值计算及分析, 基本满足工程设计的需要。

关键词: 动力舱; 温度场; 流固耦合; 数值计算

中图分类号: TJ811.92 **文献标识码:** A

Numerical Simulation and Experimental Validation of Temperature Field of Tank Power Train Compartment Body

HUANG Xiao-hui, BI Xiao-ping, WANG Pu-kai

(Department of Mechanical Engineering, Academy of Armored Force Engineering, Beijing 100072, China)

Abstract: A numerical analysis model for calculating the temperature field of a tank power train compartment is established. A liquid-solid coupling calculating method is used to calculate the temperature field of the tank wall surface and a wall function method is used to modify the internal flow field of the solid wall. Through heat exchange calculation of solid-liquid two-way coupling and consideration of the effect of sun irradiation on body temperature field, the temperature field distribution on the wall surface of the tank body is derived. The calculation result is compared with the measurement result. The research result shows that the relative error between the calculation result and the measurement result is less than 9.034%. This numerical calculation method can be used to calculate and analyze the temperature field of the power train compartment body and can meet the needs of engineering applications basically.

Key words: power train compartment; temperature field; liquid-solid coupling; numerical analysis

1 引言

坦克动力舱空间狭小, 内置动力装置、冷却系统和传动装置等, 高温热源多, 除冷却系统进出口外, 其它地方基本上是封闭的, 内外空气不对流, 内部空气流动差; 舱壁由金属材料构成, 甲板较厚, 动力舱与乘员舱之间有隔热层, 四周散热很差, 使得舱内环境温度远高于车外温度。

尤其在夏季, 当装甲车辆高速行驶时, 动力舱内环境温度高达 90 ℃ 以上。动力舱体发出的红外辐射, 使车辆易于被装有红外探测器的各种装置探测到。而动力舱体温度场的计算是完成红外仿真的关键。

在实际情况下, 动力舱体温度场主要受动力舱内热源加热以及太阳辐射的影响。因此, 欲

收稿日期: 2008-07-21

作者简介: 黄小辉 (1976 —), 男, 陕西宝鸡人, 博士研究生, 研究方向为军用车辆红外仿真计算。

得到动力舱体温度场的有效算法, 必须建立适当的动力舱体温度场模型, 模型建立的准确性对动力舱体温度场的计算有着重要的影响。由于技术保密, 从国外无法获得可供直接参考的有实际价值的资料。国内文献 [1] 建立了确定动力舱内主要产热装置表面温度和舱内气体温度的简化模型, 并进行了计算。此方法虽然简单, 但带有很大的为人因素, 不可避免地会有计算误差。文献 [2-4] 应用计算流体力学 (CFD) 方法对坦克动力舱的空气流场与温度场进行了数值分析, 认为将动力舱体作为绝热壁面处理, 无法得到动力舱体的温度场分布。

本文在文献 [2-4] 的基础上, 利用流固耦合的数值计算方法将流、固接触面上难以确定的外部条件转化为系统内部的内边界, 通过对两个面的耦合, 实现固体传热与流体传热的耦合, 并由此计算得到所需的温度场计算结果。避免了传统做法中依靠经验公式, 单方面先计算流场再计算壁面温度的做法, 进一步提高了计算精度。本文的研究对坦克红外相关技术的发展有重要意义。

2 动力舱体的温度场计算

2.1 计算区域的确定

动力舱空气流场的计算区域由三部分组成, 即动力舱内的冷却风道、车体计算区域和动力舱外计算区域。

2.1.1 冷却风道计算区域

空气从外界环境经进气百叶窗进入动力舱到从排气百叶窗排出动力舱所掠过的全部腔道, 称为装甲车辆动力舱冷却风道, 简称风道。

冷却风道的形状对空气流场的分布具有关键性的影响。装甲车辆动力舱结构紧凑, 安装的部件多, 而且尺寸不规则。冷却风道的几何结构主要受到动力舱内各实体部件的形状、位置、尺寸等参数的约束, 因此需要建立各部件的几何实体模型。本文对动力舱内的实体部件进行了适当的简化, 只考虑对空气流动与传热具有重要影响的部件。图 1 是坦克动力舱内影响空气流场的主要部件示意图。外界环境空气经进气

百叶窗流入动力舱, 流过换热器组件、发动机和传动装置, 经冷却风扇, 通过排气百叶窗流出动力舱。

应用 Gambit 软件, 按照图 1 中实体部件的几何尺寸, 建立了各部件的三维实体模型。从动力舱总容积尺寸中减去实体模型尺寸可得到冷却风道计算区域。

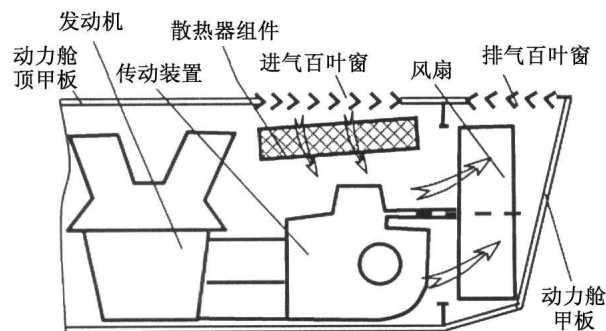


图 1 动力舱内主要部件示意图

2.1.2 车体计算区域

应用 Gambit 软件, 按照图 1 中动力舱甲板以及进排气百叶窗的几何尺寸, 建立三维实体模型, 作为车体计算区域。

2.1.3 动力舱外计算区域

动力舱外计算区域的确定原则是在其表面上可以方便地设置空气流入、流出的计算边界条件, 计算区域尺寸对冷却风道流场与温度场的计算结果不产生影响; 同时要尽可能地节约计算资源。最终满足上述要求的计算区域是通过多次数值计算得到的。通过分析, 取高于发动机装甲板上和进、排气百叶窗上方 2.5m, 取左右方向分别宽于进排气百叶窗左右边缘 1.5m 的区域, 后侧取距离车体后甲板 1.5m 的区域作为空气流动计算区域。

2.2 网格划分

采用分区结构化和非结构化网格方案进行网格划分, 先对计算区域进行适当分区域处理, 再对各子区域用非结构化四面体网格单元进行剖分。估计在不同区域的空气流动和传热情况, 根据初步的分析把整个计算区域分为若干子区域, 对结构简单的区域用结构化网格离散每个子区域, 对结构复杂的区域用非结构化网格离

散每个子区域。在空气流动变化不剧烈的区域划较为稀疏的计算网格,在空气流动变化较为剧烈或部件外形较为复杂的区域划加密网格。作者对车体计算区域采用结构化网格划分,对其它计算区域采用非结构化网格划分。图 2 为计算网格示意图。

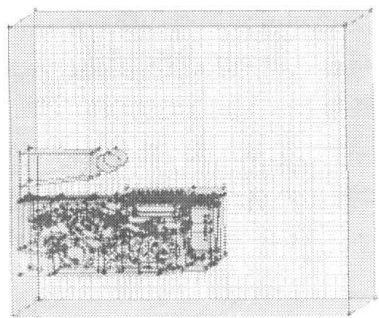


图 2 计算网格示意图

2.2.1 网格无关性检查

计算区域取 4 种网格尺寸,长度范围为 22mm ~ 28mm。对外界大气压为 89.4kPa、环境温度为 27℃、柴油机转速为 2000r/min、排挡为 5 挡时的计算区域空气流场进行数值计算。图 3 是计算得到的流过排气百叶窗的空气质量流量随网格尺寸的变化曲线。

可以看出,随着网格尺寸的减小,排气百叶窗质量流量呈下降趋势,当网格尺寸达到 26mm 时,再减小网格尺寸,质量流量的相对变化仅为 0.008%,可以认为网格尺寸的变化对计算结果基本不再产生影响,因此,计算中选择的网格尺寸为 26mm。

2.2.2 壁面邻近单元网格尺寸的确定

应用壁面函数法作为边界条件时,壁面邻近单元网格尺寸的确定必须考虑壁面函数公式的有效范围,即需要将距离壁面最近的内节点

布置在湍流充分发展的区域。这个距离通常用壁面单位 $y^+ (\equiv \rho u_\tau y / \mu)$ 来度量。 y^+ 的值在接近下边界 ($y^+ \approx 30$) 时是最好的 [5]。

针对计算区域网格尺寸为 26mm、虚拟空间高度为 2.5m、虚拟空间宽度为 1.5m、虚拟空间长度为 1.5m 的网格模型,进行数值计算,然后对 y^+ 值进行检验,对不合格的壁面邻近网格尺寸进行调整,直到获得满意的 y^+ 值为止。表 1 是各壁面邻近网格尺寸调整前后的 y^+ 值对比。图 4 显示了调整前后气缸盖壁面邻近网格尺寸的变化。

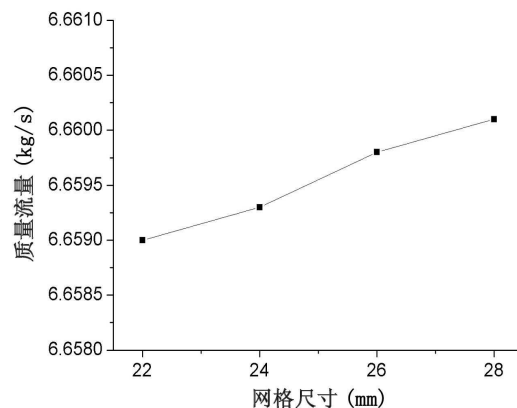


图 3 排气百叶窗空气质量流量随网格尺寸的变化

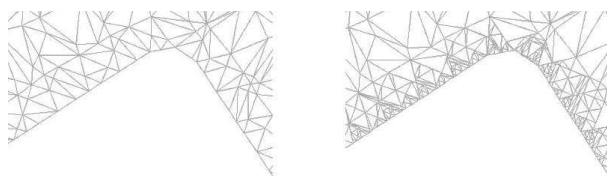


图 4 气缸盖邻近壁面单元网格尺寸的调整

2.3 求解方法

应用三维湍流可压缩空气流动与传热控制方程组描述计算区域的空气流场,该方程组由质量守恒方程、动量守恒方程、能量守恒方程、

表 1 壁面邻近单元网格尺寸调整前后的 y^+ 值

壁面名称		上曲轴箱	下曲轴箱	气缸体	气缸盖	排气管
y^+ 值	调整前	82.304	53.473	34.140	35.248	41.322
	调整后	42.101	34.328	33.601	35.050	40.893
壁面名称		进气管	涡轮	压气机	变速箱	顶装甲
y^+ 值	调整前	30.805	38.410	38.410	94.972	41.254
	调整后	30.929	38.477	38.477	49.911	32.256

标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型以及完全气体状态方程组成^[6]。

动力舱空气与动力舱体流固耦合的数值求解方法是整场离散、整场求解^[7]。把不同区域中的热传递过程组合起来作为一个统一的换热过程求解, 不同的区域采用通用控制方程, 耦合界面成了计算区域的内部。

动力舱体温度场计算中的流固耦合区域为动力舱风道内空气、动力舱外部空气和动力舱体。计算区域中的流固耦合边界被视为内部边界, 耦合后全部定义为 wall 边界, 在计算中 wall 边界可以自动在相耦合的两个体之间传递热交换条件, 无需再进行单独定义。

对于形成冷却风道的动力传动装置部件的壁面, 应用壁面函数法边界条件, 壁面温度由动力装置和传动装置的传热模型计算得到^[2]。

对于风扇边界, 将已知的实验特性曲线作为边界输入。换热器边界输入已知的实验特性曲线。

辐射边界条件输入地理位置、日期、时间和方位朝向, 选择 DO 辐射模型, 并在材料面板中输入相应材料的吸收系数。

控制方程的离散采用一阶迎风差分格式, 选择非耦合求解器和 Coupled 求解算法。

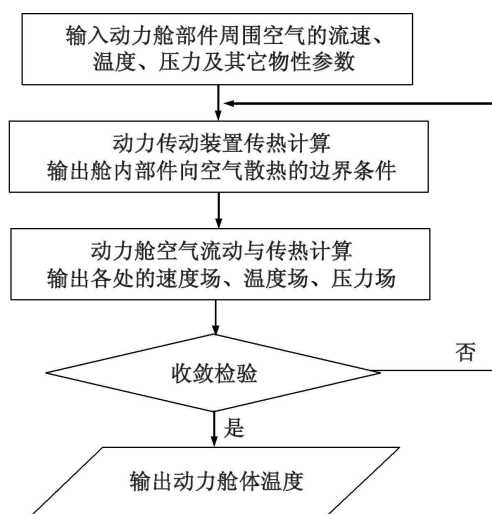


图 5 动力舱体温度场求解流程图

图 5 是本文数值计算的流程图: 输入舱内各部件周围空气的流速、温度、压力及其它物

性参数; 动力传动装置传热模拟, 根据模拟的工况, 以舱内部件周围空气的流速和温度状况为边界, 计算出舱内部件向舱内空气散热的温度; 舱内空气流动与传热模拟以动力传动装置传热计算中提供的边界计算舱内各处的速度场、温度场、压力场和其它空气物性参数在舱内的分布; 将模拟结果与上一次的模拟结果对比, 如果达到收敛标准则结束计算, 输出结果, 否则返回到动力传动装置传热计算, 以更新的动力舱内空气流速和温度继续迭代。动力传动装置传热计算方法参见文献 [8]。

3 实验测试

测试坦克动力舱在热动态状态下的温度场分布情况, 研究动力舱达到热平衡状态时的各测点的温度变化趋势, 为动力舱表面温度场数值计算提供对比数据。

3.1 实验装置

传感器采用北京中环时空传感与控制中心生产的铜-康铜热电偶, 测温范围为 $-40\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 350\text{ }^{\circ}\text{C}$, 测量精度为 $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, 补偿导线的耐温能力为 $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

二次仪表采用 16 路智能巡检仪, 输入信号为热电偶, 冷端补偿精度为 $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。采用两个 12V 蓄电池串联供电。

3.2 传感器的布置

实验中共布置温度传感器 8 个, 主要布点原则是, 既要照顾到关键热源点的温度变化, 又要考虑到热源影响区 (比如动力舱顶装甲板)。图 6 为动力舱顶装甲板传感器的布点示意图。

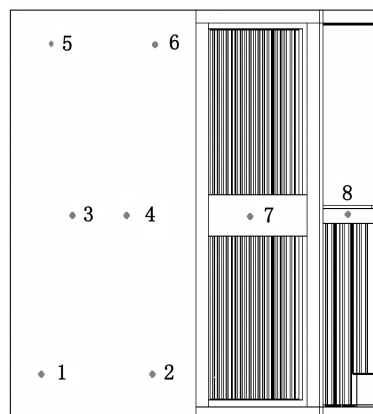


图 6 装甲板上表面温度传感器的布点示意图

3.3 实验规范

(1) 稳态试验是针对坦克在水泥高速跑道直驶条件下, 坦克挂 4 挡, 在不同发动机油门开度、不同档位下进行试验。

(2) 各测点达到平衡的标志是: 水散热器和油散热器进口处的水温 and 油温保持在 $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右, 温度变化为 $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

(3) 每个测点记录三组数据, 将三次的值求平均后为该测点的温度试验值。

(4) 记录发动机不同排挡所对应的油门开度、发动机转速、环境温度和環境压力。

(5) 进排气百叶窗全开。

4 计算结果分析及与实验对比

对某型坦克进行了实例计算, 实验时间为 9 月 24 日上午 11:00, 北京地区, 工况是: 无风天气下坦克以 4 挡、100% 油门、柴油机转速为 2000r/min 由北向南向行驶, 进排气百叶窗全开, 环境大气温度为 $23\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、压力为 99150Pa 。将部分计算结果与实验值进行了对比, 表 2 是动力舱体表面温度场计算值与实验值的对比。表中的计算值为 fluent 软件计算结果中相应测点位置的值。最大相对误差为 9.034% , 计算值与实验值基本符合。误差的原因有两方面: 一是计算中没有考虑发动机排烟管及烟气的影响; 二是内热源边界条件与坦克测试状况有偏差。

表 2 动力舱体表面温度计算值与实验值的对比

测点	实验值 ($^{\circ}\text{C}$)	计算值 ($^{\circ}\text{C}$)	相对误差 (%)
1	24.2	25.101	3.723
2	25.7	25.157	2.113
3	24.3	25.712	5.811
4	27.6	26.050	5.616
5	29.8	27.912	6.336
6	26.2	28.317	8.080
7	24.5	24.600	0.408
8	32.1	35.000	9.034

图 7 是动力舱顶表面温度场的等值线示意图。从图中可以看出, 排气百叶窗和排气管附近的顶甲板表面温度较高, 最高达到 $64\text{ }^{\circ}\text{C}$, 特征极其明显, 面积较大, 是隐身工作的重点。

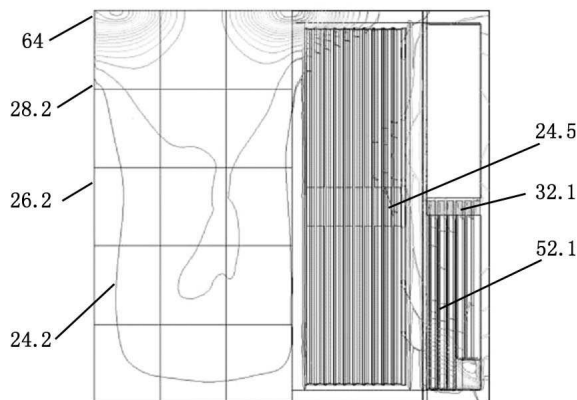


图 7 动力舱顶表面温度场的等值线图 ($^{\circ}\text{C}$)

图 8 至图 10 分别为动力舱尾甲板、左侧甲板和右侧甲板的温度场云图。从图中可以看出, 尾甲板的最高温度为 $40.4\text{ }^{\circ}\text{C}$, 这是由于风扇位于尾甲板内侧, 动力舱内的冷却空气由风扇排出舱外, 高温冷却空气与尾甲板换热导致尾甲板温度较高。左侧甲板的最高温度达到 $26.8\text{ }^{\circ}\text{C}$, 这是由于其内侧热源为传动装置。右侧甲板最高温度达到 $150\text{ }^{\circ}\text{C}$, 显然是由于发动机排气管传热的缘故。

5 结论

(1) 动力舱体的温度场计算值与实验值对比

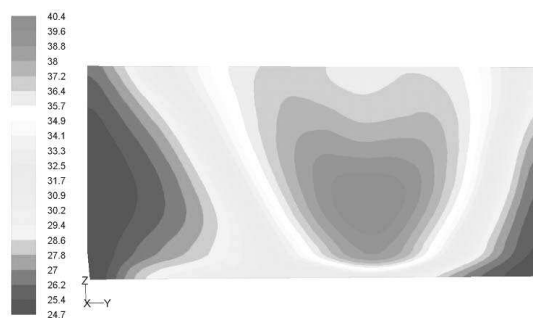


图 8 动力舱尾甲板的表面温度场云图 ($^{\circ}\text{C}$)

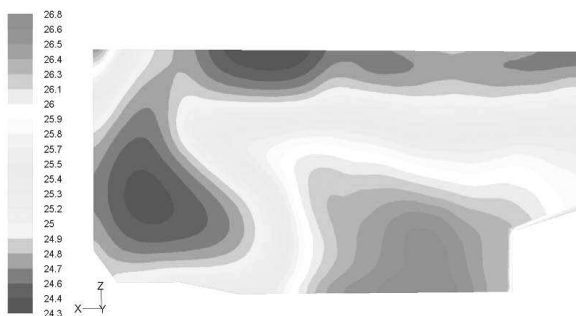


图 9 动力舱左侧甲板的表面温度场云图 ($^{\circ}\text{C}$)

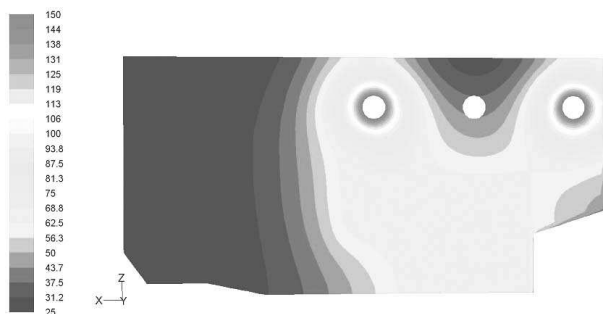


图 10 动力舱右侧甲板的表面温度场云图(℃)

的最大相对误差为 9.034%，表明本文提出的动力舱体温度场的计算方法是可行的。

(2) 利用本文提出的方法可以得到动力舱体温度场分布的详细情况, 从计算结果可以看出: 排气百叶窗、排气管附近的顶甲板和动力舱右甲板的表面温度较高。所有这些区域都是坦克的红外辐射特征明显的区域, 是红外制导武器的红外导引头的探测敏感区域, 也是坦克红外隐身设计和红外抑制技术予以重点关注的区域。

参考文献

- [1] 韩玉阁, 宣宜民. 坦克动力舱内的热特性 [J]. 红外技术, 2000, 22(3): 23-27.
- [2] 毕小平, 赵以贤, 等. 坦克装甲车辆冷却性能的集成化预测模型 [J]. 兵工学报, 2006, 27(4): 578-580.
- [3] 毕小平, 王普凯, 等. 环境温度和压力对坦克柴油机冷却空气影响的 CFD 仿真研究 [J]. 内燃机工程, 2006, 27(4): 43-47.
- [4] 毕小平, 刘西峡, 等. 坦克动力舱内三维空气流动数值模拟 [J]. 内燃机工程, 2003, 24(3): 12-16.
- [5] Fluent Inc. FLUENT User's Guide [Z]. Fluent Inc., 2006.
- [6] 李万平. 计算流体力学 [M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2004: 53-59.
- [7] 陶文铨. 数值传热学 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2004: 485-488.
- [8] 王普凯, 毕小平, 黄小辉. 装甲车辆动力装置部件温度的网络化预测方法 [J]. 兵工学报, 2008, 29(1): 101-106.

国外专利介绍

采用原位微真空传感器的微测辐射热计红外焦平面阵列

美国专利 US7385199

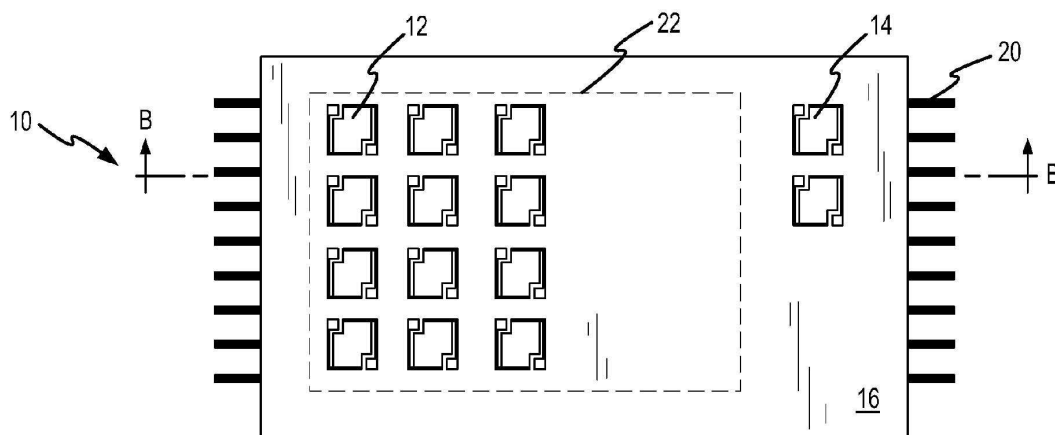
(2008 年 7 月 10 日授权)

微测辐射热计红外探测器一旦被确定用于某一项具体应用, 它们就要用芯片级或晶片级技术以真空方式封装在非常小的封壳内。但是, 目前在市场上还买不到用于监测已封装好的微测辐射热计红外探测器的真空

度的仪器。因此, 器件的可靠性就不能完全得到保证。

本发明提供一种具有原位真空敏感能力的微测辐射热计红外焦平面阵列。当电信号被施加于其测辐射热计材料时, 该材料会被加热, 从而产生与真空度有关的可变电阻。一种给定材料的变率取决于从该材料到周围环境的热传递效率。在良好的真空中, 热传递较差, 因此热量会保留在材料中, 温度上升就较快, 而电阻的变率就会变得较大, 反之亦然。通过读出这种可变电阻的幅值, 便可以确定其真度。

本专利说明书共 17 页, 其中有 10 张插图。



高 编译