

基于热网络模型的导弹贮存温度预计方法

罗成¹, 万军², 丁晨¹, 孙永生²

(1.中航工业综合技术研究所, 北京 100028; 2.中国人民解放军第 95989 部队, 北京 100076)

摘要: 目的 提供一种预计空空导弹的外场贮存温度的方法, 以确定空空导弹的环境适应性要求。方法 基于热网络模型, 预计不同环境条件下导弹的贮存温度与日高温极值。考虑各种环境因素对导弹热环境的综合影响, 建立导弹内外各节点的能量守恒方程。将实测数据代入方程, 利用最小二乘法拟合方程系数建立预计模型, 将实测结果与模型的预计结果进行对比以验证模型的准确性。结果 热网络模型预计的温度结果和实测结果较为吻合, 95%置信度下实测数据与预计的日高温极值误差均值为 0.3 °C。结论 该方法对舱内温度的预计结果较好, 可用以确定空空导弹的环境适应性要求。

关键词: 温度预计; 贮存温度; 热网络; 高温极值

DOI: 10.7643/ issn.1672-9242.2017.06.017

中图分类号: TJ760 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2017)06-0089-04

Predicting Method of Missile Storage Temperature Based on Thermal Network Model

LUO Cheng¹, WAN Jun², DING Chen¹, SUN Yong-sheng²

(1.China Aero-Polytechnology Establishment, Beijing, 100028, China; 2.Troops 96989 of PLA, Beijing 100076, China)

ABSTRACT: Objective To provide a method for predicting missile storage temperature and determine requirement on environmental suitability of air-to-air missiles. **Methods** Based on thermal network model, storage temperature and extreme high temperature of missiles under different environmental conditions were predicted. Energy conservation equation for each internal and external node of a missile was established by considering influences of different environmental factors on the thermal condition of missile. Then, the prediction model was built by applying the measured data to the equations and obtaining the coefficients using the least square method. At last, the measured result and predicted result were compared to verify the veracity of the model. **Results** The temperature result predict for the thermal network model is basically in line with the measured result. The mean error between data measured at 95% of confidence coefficient and extreme high temperature predicted is 0.3 °C. **Conclusion** This method could predict the temperature in cabin properly, and can be used to determine the environmental adaptability of air to air missiles.

KEY WORDS: temperature prediction; storage temperature; thermal network; extreme high temperature

装备所处的环境是影响装备性能的重要原因, 美国国防部在 20 世纪 60 年代进行的调查表明, 环境造成武器装备的损坏占整个使用周期中损坏的 50%以上, 超过作战损坏, 库存期环境损坏造成的比例占整个损坏的 60%^[1]。影响导弹性能的主要环境因素包括温度、湿度、振动与冲击、重力、气压和静电, 从导

弹贮存使用的情况看, 导弹在贮存或测试环境中温度、湿度的影响较大^[2]。我国幅员辽阔, 导弹部署范围广阔, 所处温度差别很大, 对装备电气性能、材料机械性能等造成严重影响^[3]。目前, 空空导弹设计定型鉴定试验使用的贮存温度通常为 60 °C, 而 GJB 150 中规定的贮存温度为 70 °C^[4]。60 °C能否充分覆盖导弹

外场各种贮存情况(如外场挂机)目前尚存在争议,研制方、使用方和承试方在确定试验条件时很难达成一致意见。由于缺乏准确预计导弹外场贮存环境数据的方法,导弹环境适应性设计、环境试验考核条件是否合理,以及对装备性能和使用维护的影响难以评估。

现有的预计装备温度与温度极值的方法主要有三种。第一种方法是环境极值法,即基于寿命期内预期经历的高低温工作环境,选取一定概率的时间风险率极值,并根据装备具体使用条件调整高低温范围^[5]。这种方法获得的温度值往往为自然环境温度值,而非导弹内部的温度值。第二种方法是统计归纳法,即采用统计学方法获得气象参数与装备环境参数之间的线性关系式^[6]。然而,统计方法并不能揭示气象参数与装备环境相互关联的机理,缺乏通用性。第三种方法是传热分析法,即分析装备内部热形成机制,结合能量守恒定律列出热平衡方程,将装备结构与内部热源对装备内部温度的影响因素分别定义为结构系数与源项,形成温度预计模型^[7]。这种方法揭示了能量传递规律,但没有考虑装备内部传热机制。

为更准确地分析、预计导弹在挂机贮存状态下内外各点温度随着大气环境变化的响应情况,摸清我国空空导弹在外场使用过程中面临的高温环境极值情况。文中首先根据能量守恒定律与传热学规律建立导弹内外温度节点的热网络模型,然后根据导弹实际挂载状态下外场使用环境(外场挂机高温环境)实测数据,求解热网络模型中的系数,建立典型导弹舱室高温环境预计模型。最后基于气象数据对舱内高温情况进行预测,验证模型准确,为后续空空导弹的研制和使用提供技术支持。

1 温度预计模型

1.1 热网络模型

从传热传质的物理过程出发,以某型导弹导引头舱为例,基于导引头舱内外节点之间的传热方程与能量守恒方程,建立热网络方程组。导引头舱剖面图及测点分布如图1所示。

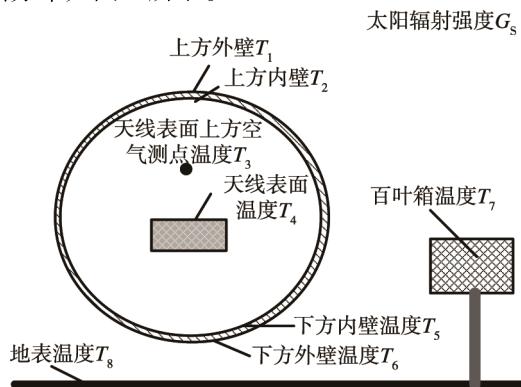


图1 某型导弹导引头舱剖面图及节点分布

图1中共涉及该舱段6个重要节点,测点1与测点6分别测量导引头舱上方与下方的外壁温度,测点2与测点5分别测量导引头舱上方与下方的内壁温度,测点4测量天线设备表面温度,测点3测量舱内空气温度,测点7测量环境温度,测点8测量地表温度。

任选一天,输出各节点的温度变化曲线如图2所示。由图2可见,测点3(天线表面上方)和测点4(天线表面)两个测点的温度曲线基本重合。结合弹体结构特点(密封性较好),内部空气与设备和内壁之间的对流换热可以忽略不计,因此舱内空气节点可以省略。根据节点分布情况及热量传递情况,可将舱体分为上下两部分,假设舱内、外壁节点总热容分别为 c_{wi} 和 c_w ,则内外壁上、下每部分的热容分别为 $\frac{c_{wi}}{2}$ 和 $\frac{c_w}{2}$ 。设舱内空气热容为 c_{16} ,设备热容为 c_{eq} ,舱壁的导热系数为 A_w ,舱外壁与环境空气的换热系数为 D 。

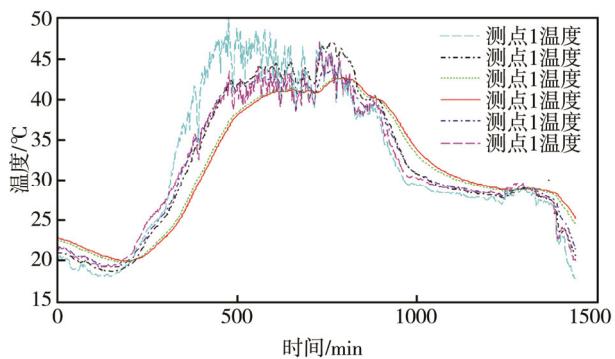


图2 导引头舱6个温度节点某日温度变化曲线

上方外壁节点的温度根据有无太阳辐射可分两种情况:有太阳辐射时主要受太阳辐射、外壁与环境空气中对流换热、内外壁之间导热、以及上下外壁之间导热等四方面影响,有太阳辐射情况上方外壁节点换热方程为:

$$\frac{C_w}{2} \cdot \frac{dT_1}{dt} = \delta \cdot A_p \cdot G_s + D(T_7 - T_1) + A_1(T_2 - T_1) + A_2(T_6 - T_1) \quad (1)$$

式中: C_w 为外壁换热热容,J/K; T 为温度,下标为测点,K; t 为时间,s; δ 为外壁表面单元朝向标识量,该段外壁可见太阳时, $\delta=1$,否则 $\delta=0$; A_p 为导弹某舱段外壁投影面积,m²; G_s 为太阳辐射的总热流,W/m²; A_1 为内外壁间导热系数,W/K; A_2 为上下壁间导热系数,W/K。

无太阳辐射时(夜间),上方外壁节点温度除受外壁与环境空气中对流换热、内外壁之间导热、以及上下外壁之间导热影响外,外壁还会向空间大气(黑体)辐射热量,因此夜间上方外壁节点的换热方程为:

$$\frac{C_w}{2} \cdot \frac{dT_1}{dt} = B(T_0^4 - T_1^4) + D(T_7 - T_1) + A_1(T_2 - T_1) + A_2(T_6 - T_1) \quad (2)$$

式中： B 为外壁与地表间辐射换热系数，W/K⁴； T_0 为宇宙空间温度，取值 279 K。

下方外壁节点的温度主要受地面辐射、外壁与环境空气间对流换热、以及内外壁之间导热三方面影响，因而下方外壁节点换热方程为：

$$\frac{C_w}{2} \cdot \frac{dT_6}{dt} = B_1(T_8^4 - T_6^4) + D(T_7 - T_6) + A_1(T_5 - T_6) + A_2(T_1 - T_6) \quad (3)$$

上方内壁节点的温度主要受内外壁面之间热传导和内壁与设备之间辐射换热两方面影响，因而列出上方内壁节点换热方程为：

$$\frac{C_{wi}}{2} \cdot \frac{dT_2}{dt} = A_1(T_1 - T_2) + B_2(T_4^4 - T_2^4) + A_2(T_5 - T_2) \quad (4)$$

同理，可列出下方内壁节点的换热方程：

$$\frac{C_{wi}}{2} \cdot \frac{dT_5}{dt} = A_1(T_6 - T_5) + A_2(T_2 - T_5) \quad (5)$$

设备节点温度则主要通过与内部辐射换热而改变，因而设备节点的换热方程为：

$$C_{eq} \cdot \frac{dT_4}{dt} = B_2(T_2^4 - T_4^4) \quad (6)$$

1.2 温度预计模型的建立与验证

式(1)—(6)为带有未知系数的微分方程，为求解方程中的系数，首先将方程离散化，然后将实测数据代入方程，利用最小二乘法拟合方程组中温度项的系数。最终推导式(1)—(4)的矩阵形式为：

$$\mathbf{Y} = \mathbf{H}_t \cdot \mathbf{X} \quad (7)$$

其中：

$$\mathbf{H}_t = \begin{pmatrix} \Delta t(T_1 - T_2) & \Delta t(T_5 - T_2) & \Delta t(T_4^4 - T_2^4) & 0 \\ \Delta t(T_6 - T_5) & \Delta t(T_2 - T_5) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \Delta t(T_2^4 - T_4^4) \end{pmatrix};$$

$$\mathbf{X} = \left(\frac{2A_1}{C_{wi}}, \frac{2A_2}{C_{wi}}, \frac{2B_2}{C_{wi}}, \frac{B_2}{C_{eq}} \right)^T;$$

$$\mathbf{Y}_t = (T_2^{t+1} - T_2^t, T_5^{t+1} - T_5^t, T_4^{t+1} - T_4^t)^T.$$

输入 2014 年 6 月 15 日测点 1 和测点 6 的实测数据，结合求得的系数及方程(7)，得到模型对当日测点 4 的温度预计结果如图 3 所示。

由图 3 可见，给定外壁测点的温度，模型能够较为准确地预计内部设备测点的温度。内部设备测点温度预计误差相对较小，小于 2.5 °C。

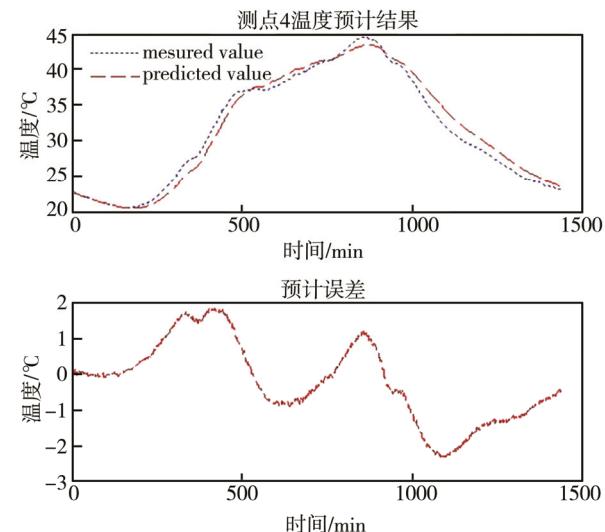


图 3 模型对 6 月 15 日内部设备测点 4 温度预计结果

2 温度预计案例

采用 2015 年 6 月 13—18 日的实测数据求解热网络模型，预计 2015 年 6—9 月某型导引头舱内设备日高温极值如图 4 所示。由图 4 可以看出，基于热网络模型预计得到的温度变化趋势和极值与实测结果较为吻合。2015 年温度实测最大值为 52.6 °C，基于热网络模型的预计结果为 51.1 °C。

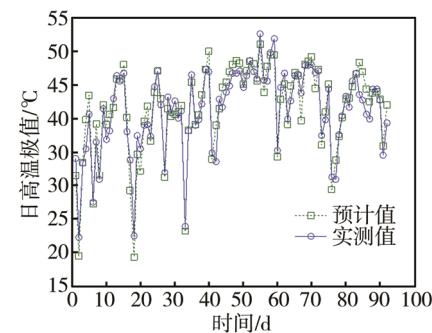


图 4 2015 年 6—9 月 90 d 内某型导弹日高温极值预计结果

按照 95% 置信度对误差进行正态拟合结果如图 5 所示，相对实测数据预计的日高温极值误差均值为 0.3 °C，方差为 1.9 °C。

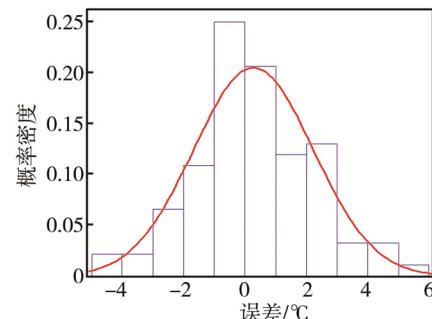


图 5 2015 年 6—9 月某型导弹日高温极值预计误差的概率密度

3 结论

基于热网络模型的温度预计方法根据导弹内外节点的换热机理预计导弹贮存温度随大气环境与太阳辐射条件的变化,对导弹贮存的日循环温度与日高温极值进行了预测。对比热网络模型的预计结果与实测数据,可以看出,热网络模型预计的温度结果与实测结果较为吻合。由于弹体结构的固定性,热网络模型中的系数值随环境变化保持不变,该方法对舱内温度的预计结果较好。

参考文献:

- [1] 文邦伟,胥泽奇.外军装备环境适应性典型案例[J].装

- 备环境工程,2005,2(3): 85—87.
[2] 张仕念,吴勋,颜诗源,等.贮存使用环境对导弹性能的影响机理[J].装备环境工程,2014,11(5): 17—22.
[3] 王威,张多林.温度因素对地空导弹武器装备的影响与相关防护研究[J].装备环境工程,2006,3(6): 41—44.
[4] 刘新佳,郭强岭.空空导弹高温试验实施研究[J].河南科技,2015,563(5): 138—140.
[5] 张艳辉,史明丽.空空导弹工作温度分析[J].装备环境工程,2015,12(2): 99—103.
[6] 赵海军,金平,陈跃良.飞机地面局部气候环境研究[J].航空学报,2006,27(5): 873—876.
[7] 傅耘,常海娟,武月琴,等.基于实测数据的飞机平台动态温度预计模型[J].航空学报,2014,35(9): 2472—2480.