

# 基于实测数据的偏态分布环境温度模型

朱熙桐<sup>1a</sup>, 原渭兰<sup>1b</sup>, 刘将辉<sup>2</sup>

(1. 海军航空工程学院 a. 研究生管理大队; b. 飞行器工程系, 山东 烟台 264001; 2. 91395 部队, 北京 102443)

**摘要:**介绍了目前普遍应用的几种环境温度模型,在分析实测环境温度变化规律的基础上,提出了基于实测数据的偏态分布环境温度模型,给出了模型数学表达式及相关计算参数。与实测数据进行对比,分析了偏态分布温度模型与 Heller 模型的不同。分析结果表明,偏态分布模型可以用于研究固体火箭发动机使用过程中由外界环境引起的热应力应变。

**关键词:**固体火箭发动机;自然贮存;温度模型;偏态分布

**中图分类号:**V435

**文献标识码:**A

**文章编号:**1006-0707(2012)11-0073-02

舰载导弹固体火箭发动机在贮存和使用过程中长期受环境温度载荷的作用,特别是导弹随舰航行期间,发动机受温度载荷的影响较为突出,温度升高会使推进剂分子热运动加速,从而加速推进剂降解及组分迁移,同时,推进剂药柱的实际温度与其固化零应力温度不同以及发动机不同结构材料的热膨胀系数存在较大差异,使壳体粘接药柱长期承受热应力作用,这些因素都将对发动机产生较大的影响,导致损伤累积,进而影响固体火箭发动机的内弹道性能<sup>[1-5]</sup>。

固体火箭发动机经受环境热载荷作用而产生热应力的问题,首先是由 Heller 和 Thangjithem 提出,并力图建立一种基于概率的方法来分析固体火箭发动机在自然温度环境下的贮存寿命<sup>[6]</sup>。在气象领域,对于环境温度变化规律的研究重点是各种数据的统计分析,没有给出能用于发动机环境模拟计算的温度模型。由于目前无法做到对舰载导弹固体火箭发动机所处的环境温度进行全程监测,不能为判断发动机可靠性提供参考数据,因此,通过分析实测发动机贮航期间环境温度数据,建立一个合适的环境温度模型,并用于研究其对发动机性能的影响具有重要的现实意义。

## 1 发动机温度环境数学模型

发动机温度环境数学模型是固体火箭发动机在寿命周期内温度历程的数学表达,与发动机贮存环境有关<sup>[7]</sup>。平时舰载导弹贮存于洞库时,在温控系统作用下,发动机所处环境温度恒定,当舰载导弹执行任务时,固体火箭发动机暴露于外界自然环境中,其内部温度场随外界温度变化,具有周期性。目前普遍应用的是 Heller 模型,Heller 和 Thangjitham 收集了美国亚利桑纳州费尼克斯城 25 年间每小时环境温度数据,经过统计分析建立了温度模型<sup>[6]</sup>

$$T_a(t) = D_m + \sum_{k=1}^k D_k \cos(\omega_k t - \varphi_k) \quad (1)$$

式中: $T_a(t)$ 为环境温度随时间变化的函数; $D_m$ 为该地区长期环境平均温度; $D_k$ 和 $\varphi_k$ 分别为相应于角频率为 $\omega_k$ 的幅值和相位角; $k$ 为谐波数。

## 2 基于实测数据建立的温度模型

选用某次在天气晴朗的条件下,连续 24 小时内测得的环境温度数据如表 1 所示。

表 1 试验测量数据

			℃		
序号	时刻	温度	序号	时刻	温度
1	6:00	28.5	13	18:00	30.5
2	7:00	29.0	14	19:00	30.0
3	8:00	30.0	15	20:00	29.5
4	9:00	31.5	16	21:00	29.0
5	10:00	32.5	17	22:00	28.5
6	11:00	33.0	18	23:00	28.5
7	12:00	34.0	19	0:00	28.5
8	13:00	35.0	20	1:00	28.5
9	14:00	34.0	21	2:00	28.0
10	15:00	33.5	22	3:00	28.0
11	16:00	32.5	23	4:00	28.0
12	17:00	31.5	24	5:00	28.0

利用表 1 中实测温度数据绘制一个周期内的温度变化曲线如图 1 所示。

收稿日期:2012-08-19

作者简介:朱熙桐(1987—),男,硕士研究生,主要从事发动机使用寿命预估研究。

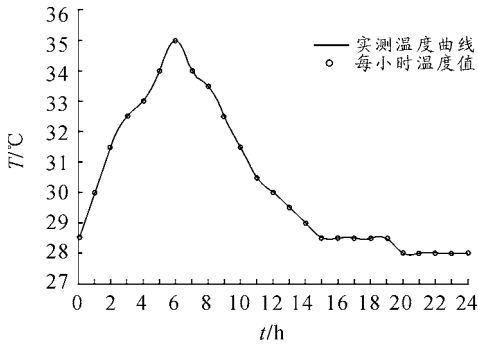


图1 一个周期内实测环境温度变化曲线

由图1可以看出,在一个温度变化周期内环境温度分为2个阶段:升温阶段和降温阶段。对照表1中测量数据可以发现早上6:00日出后实测温度迅速上升,日最高温度出现在13:00滞后于日照强度最大时刻12:00,在日照强度最大时刻与日最高温度时刻之间的时段内温度上升速度明显放缓,日落时环境温度先迅速下降,在进入夜间后下降十分缓慢,趋于稳定。降温阶段明显长于升温阶段。周期内温度变化曲线符合偏态分布,峰值偏左,长尾向右延伸。

针对目前使用的温度模型的限制性,依据实测环境温度变化曲线建立偏态分布温度模型为

$$T(t) = \sum_{m=1}^M \Delta T_m \cdot \frac{x_m^{a-1} (1-x_m)^{b-1}}{2 \int_0^1 x^{a-1} (1-x)^{b-1} dx} + K \quad (2)$$

式中: $T(t)$ 是温度随时间变化的函数; $x = (\frac{t}{24 \times 60} - \text{floor} \frac{t}{24 \times 60})$ ,  $t \in N$ , 单位 min;  $x \in [0, 1)$ ;  $a_m$ 、 $b_m$ 、 $K$ 为状态参数; $\Delta T_m$ 为温度幅值; $a_m$ 、 $b_m$ 、 $K$ 及 $\Delta T$ 与地域有关。

### 3 模型对比验证

分别将偏态分布模型和 Heller 模型与实测温度变化曲线进行对比如图2、3所示。

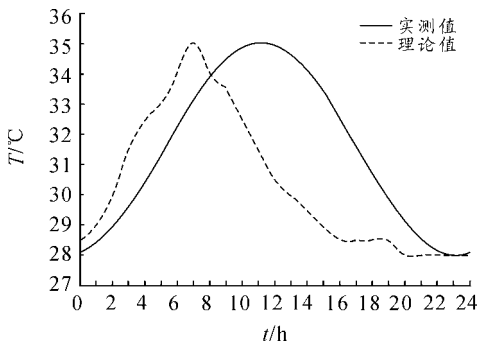


图2 一个周期内实测值与 Heller 模型理论值对比

图2中模型  $T_a(t) = D_m + \sum_{k=1}^k D_k \cos(\omega_k t - \varphi_k)$  ( $0 < t/60 < 24$ ), 具体参数如表2所示。

表2 Heller 模型参数取值

参数	$\omega_k$	$\varphi$	$k$	$D_k$	$D_m$
取值	0.043 6	6.5	1	3.5	28

通过对比发现,Heller 模型虽然可以表现出温度变化的周期性特点,但是与实测数据曲线存在较大的偏差。Heller 模型一个周期内升温阶段和降温阶段完全对称,而实际情况并非如此,降温阶段持续时间明显长于升温阶段,在升温阶段升温速度先快后慢,降温阶段降温速度是先快后慢。

将某日测得的温度数据与偏态分布温度模型曲线进行对比如图3所示。

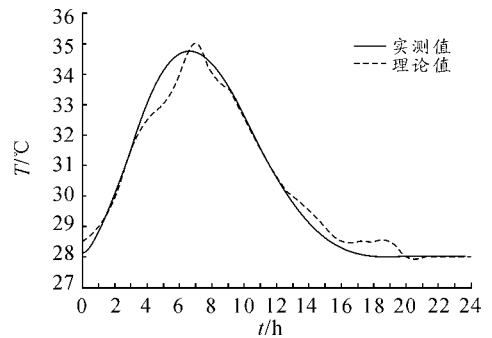


图3 一个周期内实测值与偏态分布温度模型理论值对比

图3中模型  $T_d(t) = \Delta T \cdot \frac{x^{a-1} (1-x)^{b-1}}{2 \int_0^1 x^{a-1} (1-x)^{b-1} dx} + K$ , 具体

参数如表3所示。

表3 偏态分布模型参数取值

参数	$a$	$b$	$\Delta T$	$K$
取值	5.3	7.6	5.6	28

通过对比发现温度模型的理论值与实测环境温度有很好的 consistency,模型曲线体现了一个周期内温度变化曲线呈现出偏态分布的特性,从图3中可以看出,升温阶段与降温阶段的温度曲线不对称,降温阶段持续的时间明显长于升温阶段,反映了升温阶段与降温阶段中不同的温度变化速度。

### 4 建立全年温度模型

计算舰载固体火箭发动机累积损伤通常需要得到发动机所处环境全年温度变化规律。目前普遍应用的年温度模型是将 Heller 模型简化,取谐波数  $k=2$ ,建立年/季/日模型,使其在傅立叶级数中只包含温度季节循环和日循环的频率<sup>[8]</sup>。模型数学表达式为

$$T = T_{ym} - \Delta T_y \cos(\omega_y t + \phi_y) - \Delta T_d \cos(\omega_d t + \phi_d) \quad (3)$$

式中: $T_{ym}$ 为年平均温度; $\Delta T_y$ 为季温度幅值; $\Delta T_d$ 为日温度幅值; $\omega_y$ 为季频率,值为  $2\pi/365 \times 24 \times 60$ ; (下转第79页)