

# 电子产品野外环境下温循加速载荷谱编制方法

吴一乔<sup>1</sup>, 韩建立<sup>1</sup>, 刘晓娣<sup>1</sup>, 贺振光<sup>2</sup>, 李冠辰<sup>3</sup>, 于楷泽<sup>4</sup>

(1.海军航空大学, 山东 烟台 264001; 2.91599部队, 山东 莱阳 265200;  
3.中国人民解放军陆军参谋部, 北京 100000; 4.91423部队, 山东 莱阳 265200)

**摘要:** 目的 将电子产品在野外环境下日变化波动与季节差异明显的温度载荷编制成温循载荷谱和转换为加速载荷谱。方法 通过四点雨流计数法提取原谱中的载荷循环信息, 对提取的循环信息进行分布拟合、相关性检验等统计分析, 进而构建循环均值与范围值的联合概率密度函数, 再运用概率密度法, 编制出 8×8 二维环境载荷谱。在二维载荷谱基础上, 编制出温循载荷谱, 使用针对电子部件参数修正的加速方程转化为加速载荷谱。结果 利用野外作业现场 1 个作业周期内的气温纪录, 提供了一套编制温循载荷谱和转换加速载荷谱的合理化流程和解决方案。结论 该制谱方法可以利用原始环境谱中绝大部分有效信息, 较好地还原电子部件野外作业阶段经历的温度变化过程, 为电子产品的加速寿命试验和使用寿命预测奠定基础。

**关键词:** 载荷谱; 二维载荷谱; 温度载荷; 温度循环; 加速寿命试验; 雨流计数法; 概率密度; 电子产品  
**中图分类号:** TJ760.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-9242(2024)04-0068-14

**DOI:** 10.7643/issn.1672-9242.2024.04.009

## Method for Compiling Temperature Cycling Acceleration Load Spectra of Electronic Products in the Field Environment

WU Yiqiao<sup>1</sup>, HAN Jianli<sup>1</sup>, LIU Xiaodi<sup>1</sup>, HE Zhenguang<sup>2</sup>, LI Guanchen<sup>3</sup>, YU Kaize<sup>4</sup>

(1. Naval Aviation University, Shandong Yantai 264001, China; 2. Unit 91599, Shandong Laiyang 265200, China; 3. Army Staff Department of the PLA, Beijing 100000, China; 4. Unit 91423, Shandong Laiyang 265200, China)

**ABSTRACT:** The work aims to compile the temperature load of electronic products with obvious daily fluctuation and seasonal difference in field environment into temperature cycle load spectrum and convert it into the acceleration load spectrum. The load cycle information in the original spectrum was extracted by the four-point rain flow counting method. The extracted cycle information was subject to statistical analysis such as distribution fitting and correlation testing, and a joint probability density function of cycle mean and range value was constructed. Then, the probability density method was used to compile 8 × 8 two-dimensional environmental load spectrum. On the basis of the two-dimensional load spectrum, a temperature cycle load spectrum was simultaneously developed and transformed into an acceleration load spectrum by an acceleration equation for electronic component parameter correction. Through the temperature record in a field operation cycle, a set of reasonable processes and solutions for compiling the temperature cycle load spectrum and converting it into the acceleration load spectrum were provided. This compiling method can utilize the vast majority of effective information from the original environmental spectrum to better reproduce the temperature changes experienced by electronic components during field operations, laying the foundation

收稿日期: 2024-02-02; 修订日期: 2024-02-27

Received: 2024-02-02; Revised: 2024-02-27

引文格式: 吴一乔, 韩建立, 刘晓娣, 等. 电子产品野外环境下温循加速载荷谱编制方法[J]. 装备环境工程, 2024, 21(4): 68-80.

WU Yiqiao, HAN Jianli, LIU Xiaodi, et al. Method for Compiling Temperature Cycling Acceleration Load Spectra of Electronic Products in the Field Environment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2024, 21(4): 68-80.

\*通信作者 (Corresponding author)

for accelerated life testing and service life prediction of electronic products.

**KEY WORDS:** load spectrum; two-dimensional load spectrum; temperature load; temperature cycle; accelerated life test; rain flow counting method; probability density; electronic products

某型装备高度数字化、信息化,其电子化程度高,电子部件在该型装备中占相当大的比重,并且发挥着重要作用。某型装备在贮存、运输、值班等任务剖面中总会受到气象、机械、生物、电磁等 1 种或几种环境因素的影响。在环境应力的作用下,随着时间的积累,某型装备的电子部件会发生性能退化、疲劳损伤直至失效,进而导致某型装备不能完成作战任务,甚至在使用过程中还会出现安全性问题<sup>[1]</sup>。某型装备服役历史记录显示,因为电子部件退化失效、疲劳失效导致该种装备发生故障的问题十分明显<sup>[2]</sup>,所以对该型装备组成中电子部件使用寿命的预测与验证就成了亟待研究的热点问题<sup>[3]</sup>。

随着战备形势的需要,某型装备野外作业占总任务剖面的比重越来越大,合理编制载荷谱的重要性越发凸显。在野外作业阶段,其环境载荷往往是随机变量,随着不同时刻、不同季节、不同地点存在差异与波动<sup>[4]</sup>。直接测量获取随机载荷谱持续时间长,载荷波动频繁,现有试验设备难以直接使用。将随机载荷谱编制成还原度高、形式简单、可操作的载荷谱,使得某型装备电子部件的寿命预测与验证具备可操作性,并可节约大量的时间和费用<sup>[5]</sup>。

现阶段对于野外环境下载荷谱编制以温循载荷谱设计为主。文献[6]直接采用 GJB 150.5A—2009<sup>[7]</sup>温循载荷谱模拟了在工作条件下所受到周期性变化的温度。文献[8]按照 GJB 548B—2005《微电子部件试验方法和程序》<sup>[9]</sup>中的温循试验谱设计了四边扁平封装(Quad Flat Package, QFP)部件在工况下的温循载荷谱。文献[10]则选择 MIL-STD-883C 的温循载荷谱作为工作温度载荷加载到球栅阵列部件上。各种标准规定的温循载荷谱是基于一定种类环境下采集的数据统计设计出的,代表了一般情形下的环境载荷历程,但对于具体环境的适用性、还原程度还是有待商榷。基于标准规定的载荷谱所预测或验证的使用寿命仅代表在标准环境下的使用寿命,并不能代表实际环境下的使用寿命。

文献[11]选取了研究地域近 5 年来的极端最高温度与极端最低温度作为构建温循载荷谱的高温温度与低温温度,再根据自然环境谱中各个温度区段的作用时间比例,确定温循载荷谱 1 个循环周期内的高温作用时间和低温作用时间。该设计方案虽然能最大限度地考虑极端温度应力的影响,但超过了温度载荷日变化、季节变化下的平均温度应力水平,导致温循载荷谱所设计的温度应力比实际自然环境谱的温度应力要高,基于该温循载荷谱所推测与验证的使用寿命

势必过于保守。

文献[12]将舰载装备战备值班期间的最高、最低温度分别平均到每天的平均值作为温循载荷谱的最高值与最低值。这种设计方案虽然能考虑到大部分时间内原始谱温循应力作用的影响,但在时序上忽略了季节的变化,且严重弱化了极端温度应力作用的影响。

文献[13-14]根据温度载荷日变化的特点,利用正弦函数刻画温循载荷谱,该温循载荷谱的最高温度为产品在 1 个任务周期内的最高温度,温循载荷谱的最低温度可由温度差或者任务周期内的最低温度确定。该设计方案虽然十分贴合自然环境下温度载荷的日变化历程,但每个循环的最高温度值都达到原始谱的最大值,就会存在和文献[11-12]相同的问题。

文献[15]利用 Arrhenius 模型对以天为周期的实测温度数据进行寿命损伤等效,得到每日温度等效值。以任务周期内等效温度的中位数为基准温度,当日等效温度高于基准温度的划归为热天,低于基准温度的划归为冷天。再分别计算所有热天、冷天的等效温度,作为温循载荷谱的高温值与低温值。统计冷天与热天比例,以该比例作为温循载荷谱 1 个循环内高温保温时间与低温保温时间的比例。运用 Miner 线性累积损伤理论求得等效循环次数,最终设计出原始载荷谱等效温度循环载荷谱。该方案围绕寿命损伤等效与线性累积损伤理论很好地解决了温循载荷谱还原性的问题,但该方法需要利用原始谱全部信息,计算量较大。

综上所述,现阶段野外工作环境下,产品使用寿命评估与验证所使用的环境温度载荷谱设计研究,主要集中在标准载荷谱的使用与改造,以及温度循环最高温和最低温水平的设定。这些研究提供了 2 种主要的环境温度载荷谱设计思路,并证明了其可行性。因这 2 种环境温度载荷谱设计思路简单,操作相对简易,评估与验证结果具有一定的参考价值,得到后继研究者的青睐。由于这 2 种设计思路普遍都具有循环幅值固定的特点,因此存在最高最低温度选取过于极端或平均、完全等效计算量大的缺陷,进而导致原谱信息损失严重,不能有效还原环境温度载荷日变化与季节变化特征。

针对上述问题,本文运用基于四点雨流计数法的 8×8 二维环境载荷谱制谱方法,将某型装备中的电子部件 1 个野外作业周期内的温度载荷编制成了 8×8 二维环境载荷谱,并在此基础之上编排成温循载荷谱,同时通过加速方程转化为加速载荷谱。提出根据实际温度载荷修正累积频率,使得编制出的 8×8 二维载荷谱载荷范围更加合理,创新编排了变幅、变均值温度

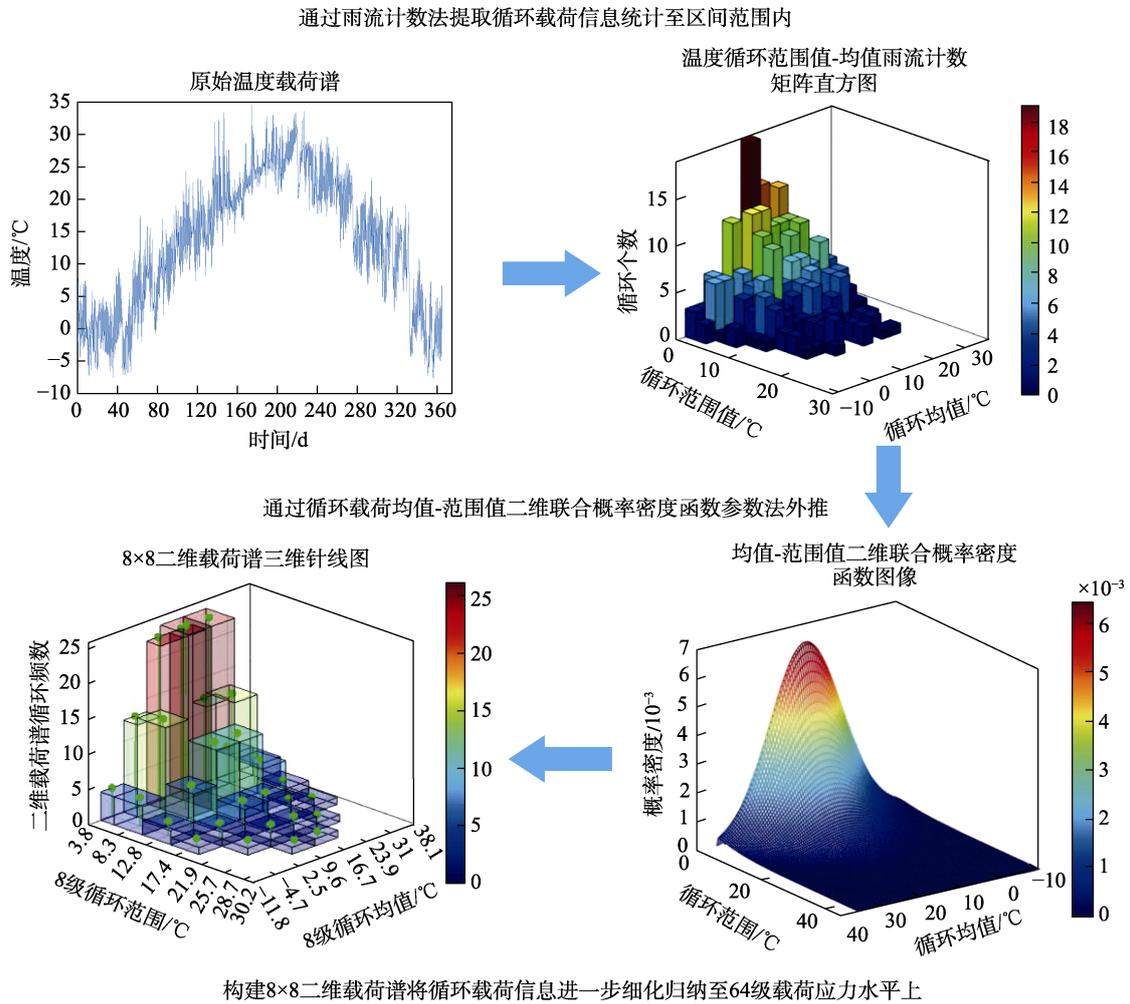
循环载荷谱和将二维载荷谱转化为加速载荷谱。本文给出的制谱方法高效利用原始谱中绝大部分有效信息,编排设计的变幅、变均值温度循环载荷谱,在较好地还原实际温度环境载荷谱日变化、季节变化特征的同时,也保证了制谱和加载使用谱的可行性,为电子产品在复杂野外环境下编制温循加速载荷谱提供了一种很好的参考方法。

# 1 基于雨流计数法的 8×8 二维载荷谱制谱方法

通过雨流计数法对原始谱进行循环计数,提取温度载荷中造成疲劳损伤的温度循环,获得循环载荷的

统计特征。但雨流计数法提取的循环载荷统计到相应的均值-范围值区间当中,并没有统一到具体的循环均值、范围值信息,不足以支撑构建温循载荷谱。因此,构建温循载荷谱需要将雨流矩阵运用概率统计方法转换为 8×8 二维载荷谱,从而实现循环载荷信息的进一步细化,获取具体的循环均值、范围值信息,为温循载荷谱编排做准备。

8×8 二维载荷谱是载荷循环均值-范围值联合概率分布下,载荷均值在等间距法分级处、载荷范围值在不等间距法分级处外推的累积频次。其实质是利用载荷均值-范围值二维概率密度函数进行外推,用外推的 64 级应力水平下的循环载荷分布近似整体循环载荷分布,如图 1 所示。



构建8×8二维载荷谱将循环载荷信息进一步细化归纳至64级载荷应力水平上

图 1 基于雨流计数法的 8×8 二维载荷谱制谱方法原理

Fig.1 Principal diagram of compiling method of 8 × 8 two-dimensional load spectrum based on rain flow counting method

## 2 野外作业环境下环境载荷统计分析

### 2.1 环境载荷种类的选择

某型装备电子部件在其任务剖面内受到多种环境因素的影响<sup>[16]</sup>。在任务剖面的具体某个阶段内,仅

有少数环境因素对电子部件寿命产生主要影响。因此,在构建环境载荷谱之前,首先需要分析评估任务剖面各阶段内的环境因素对电子部件寿命的影响,选择对电子部件寿命产生主要影响的敏感环境载荷编制成环境载荷谱。

在野外作业阶段,某型装备处于静止状态,振动

环境因素对电子部件的影响可以忽略不计。电子部件在防湿防潮的密封包装内长期保持低湿度状态, 所以湿度因素对电子部件的影响可以不考虑。

电子部件对温度循环应力的影响很敏感, 这是由于电子部件中的焊点、镀通孔等电连接部位的热膨胀系数不同, 会在温度循环中产生内应力, 使得其在变化的温度环境下出现裂纹, 致使电阻上升, 反复的热疲劳催生裂纹不断生长, 直至发生断裂, 导致电子产品失效<sup>[17]</sup>。温度因素对电子部件的影响贯穿某型装备的全寿命周期, 密封包装内并不是保温或者绝热环境, 而野外环境下昼夜温差明显, 所以野外环境温度波动造成的热疲劳损伤是影响电子部件使用寿命的主要因素, 选择温度环境载荷作为敏感环境载荷编制环境载荷谱。

### 2.2 温度载荷数据压缩预处理

通过当地气象部门获取了某型装备在野外作业现场 1 个野外作业周期内的气温记录。该记录每 3 h 记录 1 个气温数据, 每天记录 8 次温度数据, 在 1 个野外作业周期 (1 a) 内, 共收集有 2 920 个温度记录。将获取的气温记录数据绘制成原始温度载荷谱, 如图 2 所示。

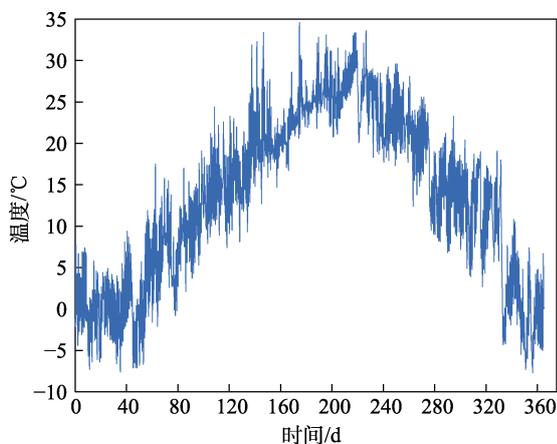


图 2 原始温度载荷谱  
Fig.2 Original temperature load spectrum

从原始温度载荷谱中可以看出, 野外作业环境下, 1 个野外作业周期内, 温度载荷有显著的日变化波动和季节差异。日变化波动范围主要在 5~10 °C, 季节变化差异的最高温度为 34.6 °C, 最低温度为 -7.7 °C。可以将原始温度载荷看作一种带有季节趋势的随机信号。

在处理分析不确定性的随机信号提取其统计特征时, 雨流计数法是国内外广泛使用的有力工具。雨流计数法的主要功能是把实测载荷历程提取成若干个载荷循环, 并基于循环的均值和范围值来对提取的循环分组计数, 得到实测载荷所构成的载荷循环统计特征信息。

雨流计数法以双参数法为基础, 考虑了动强度 (范围值) 和静强度 (均值) 2 个变量, 符合疲劳载荷本身固有的特性。从雨流计数法得到的载荷循环统计特征信息经过概率统计理论分析处理后的二维载荷谱即可供疲劳寿命估算和编制疲劳试验载荷谱使用。

使用雨流计数法提取温度载荷的统计特征, 首先需要对温度载荷进行数据压缩预处理, 目的是将原始的数据进行过滤, 筛选掉大量对电子部件热疲劳损伤没有贡献或贡献很小的数据, 使其只包含波峰波谷值, 大大缩短数据处理的时间。数据压缩预处理主要包括相邻等值数据压缩、峰谷值提取、无效范围值载荷去除。相邻等值数据压缩即在相邻数据点值相同时仅保留一个数据点, 剔除其他数据点。峰谷值提取即将载荷序列中的峰谷值提取出来作为下一步处理的数据, 如图 3 所示。

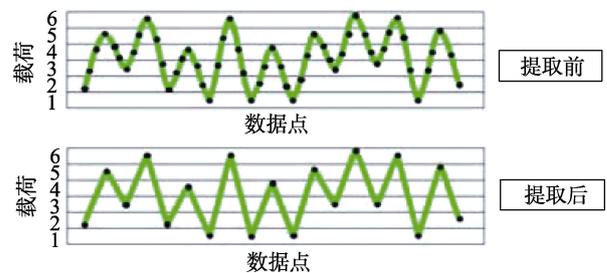


图 3 峰谷值提取示意图  
Fig.3 Schematic diagram for extraction of peak and valley values

无效范围值载荷去除是指通过定义一个范围值阈值, 将载荷序列中范围值小于该阈值的载荷作为无效范围值载荷, 从载荷序列中去除, 如图 4 所示。无效范围值载荷去除的物理模型很多, 可以根据所处理数据的性质和所研究对象的循环波形特点来选取。对于野外环境温度这种高均值偏态波形, 采用变程阈值公式去除无效范围值载荷, 变程阈值为载荷最大值与最小值之差和  $\Delta$  的乘积。 $\Delta$  是变程阈值的精度, 可根据不同参数性质的处理精度要求, 一般控制在 4%~15%<sup>[18]</sup>。

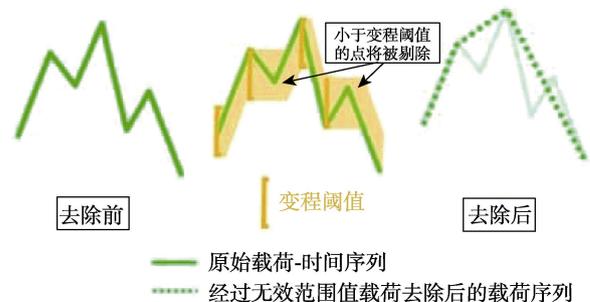


图 4 无效范围值载荷去除示意图  
Fig.4 Schematic diagram for load removal of invalid range

对原始温度载荷谱进行相邻等值数据压缩、峰谷值检测、无效范围值剔除预处理后, 将原始谱数据压

缩至 876 个数据点。其中无效范围值载荷去除使用的变程阈值精度  $\Delta$  为载荷极差的 4%，即与前后相邻数据点相比，变化幅度小于 1.692 °C 的所有数据点都将被剔除掉。预处理后的温度载荷序列如图 5 所示，其波动特征已经非常显著了。

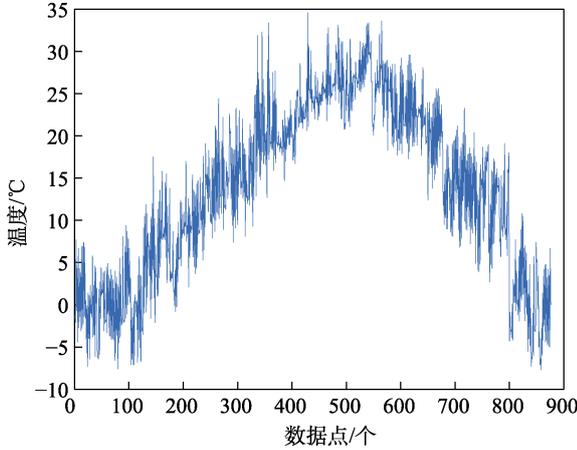


图 5 经过数据压缩预处理后的温度载荷序列  
Fig.5 Temperature load sequence after data compression preprocessing

### 2.3 四点雨流计数法统计计数

运用四点雨流计数法<sup>[19]</sup>对数据压缩预处理后的温度载荷序列进行统计计数，在经过一次雨流计数和二次雨流计数后，可以从中提取 437 个温度循环，并采用循环均值和范围值二维表述。

循环波动所围绕的中轴线为循环的均值，它等于循环峰值与谷值之和的 1/2。循环波动的范围即循环峰值与谷值之间的垂直距离为循环的范围值，它等于峰值减去谷值。根据这 437 个循环的均值与范围值，MATLAB 四点雨流计数法程序自行对循环均值以 3 为间隔，对循环范围值以 2 为间隔，分别划分成 15 个循环均值区间和 23 个范围值区间。在此基础上，对提取的循环进行频数统计，结果如图 6 所示。

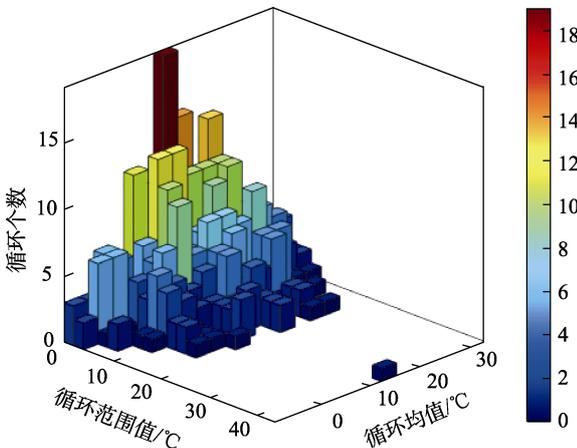


图 6 温度循环均值-范围值三维柱状统计图  
Fig.6 Three-dimensional histogram of temperature cycle means and ranges

### 2.4 分布拟合与检验

分别对四点雨流计数法统计结果（见图 6）中的范围值与均值求和，即可得到循环均值统计直方图和循环范围值统计直方图，如图 7 和图 8 所示。

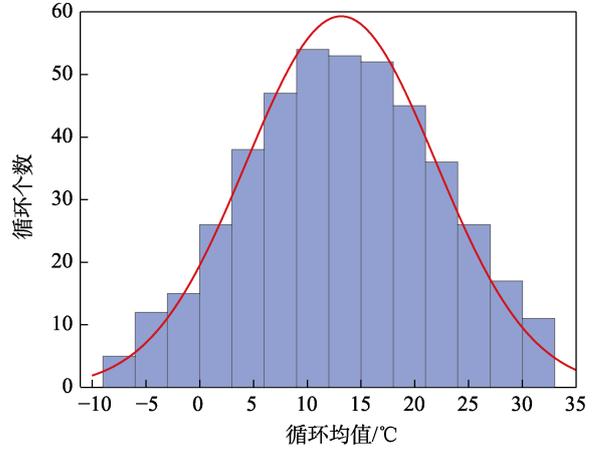


图 7 循环均值统计  
Fig.7 Histogram of cycle means

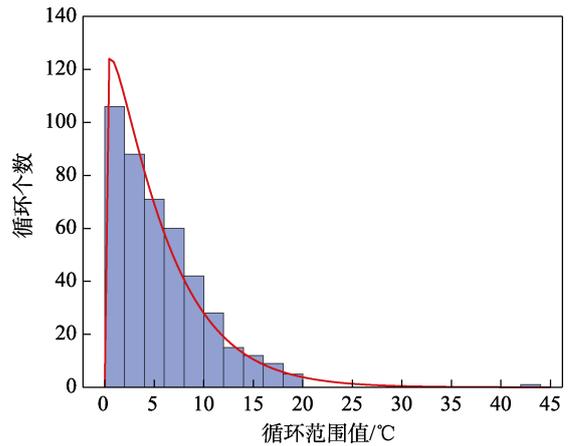


图 8 循环范围值统计  
Fig.8 Histogram of cycle ranges

将循环均值与范围值看作二元随机变量，文献[20-21]认为载荷的范围值服从威布尔分布，均值服从正态分布。对提取循环的均值与范围值分别进行正态分布拟合与威布尔分布拟合，循环均值拟合的正态分布记为  $w(x)$ ：

$$w(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (1)$$

式中： $\mu$  为正态分布的均值； $\sigma$  正态分布的标准差。循环范围值拟合的威布尔分布记为  $h(y)$ ：

$$h(y) = \frac{m}{\eta} \left(\frac{y}{\eta}\right)^{m-1} \exp\left[-\left(\frac{y}{\eta}\right)^m\right] \quad (2)$$

式中： $m$  为威布尔分布的形状参数； $\eta$  为威布尔分布的尺度参数。

运用 MATLAB 工具对上述分布的参数进行估

计, 结果见表 1。将拟合分布的概率密度曲线叠加至统计直方图上, 曲线与直方图的贴合程度较好, 但循环均值和范围值是否服从各自拟合的分布, 还需要通过概率图法和 K-S 检验验证。

表 1 拟合分布的参数估计结果

Tab.1 Estimation results of parameters in fitted distribution

温度均值 $x$ 拟合的正态分布估计参数		温度范围值 $y$ 拟合的威布尔分布估计参数	
均值 $\mu$	标准差 $\sigma$	形状参数 $m$	尺度参数 $\eta$
13.152 7	8.815 7	1.088 2	5.754 2

概率图法是通过对比样本数据和理想分布下两者累积概率的近似程度, 来判断样本数据是否服从理想分布的方法。正态分布概率、威布尔分布概率分别如图 9 和图 10 所示。

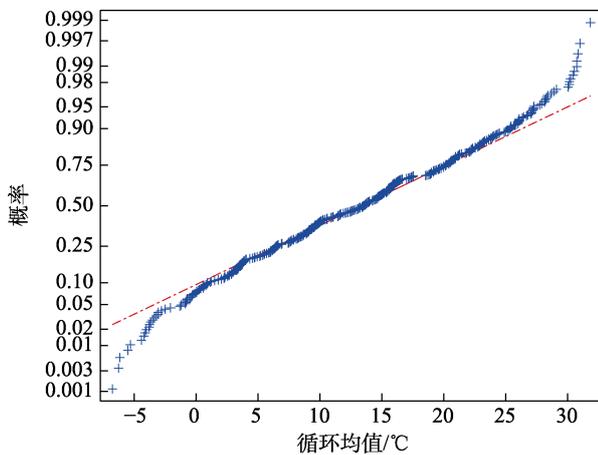


图 9 正态分布概率

Fig.9 Normal distribution probability plot

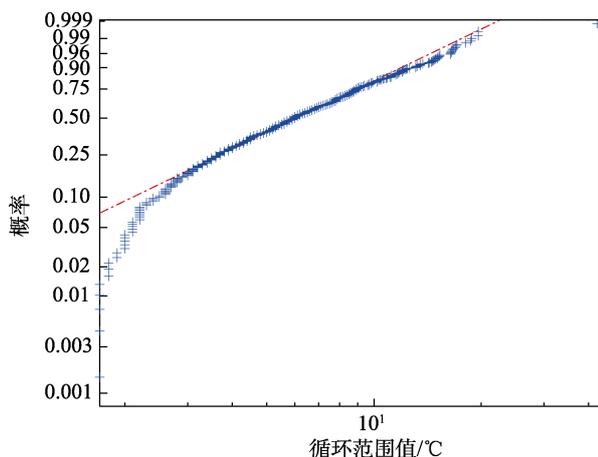


图 10 威布尔分布概率

Fig.10 Weibull distribution probability plot

图 9 和图 10 中的加号数据点为循环均值和范围的累积概率, 直线为理想分布的累积概率。可以看出, 绝大多数加号数据点都贴合在理想分布的概率线周围, 因此雨流计数法所提取的循环的均值和范围值

都能较好地服从各自的理想分布。

调用 MATLAB 内嵌的 K-S 检验函数 kstest 对均值拟合正态分布以及范围值拟合和威布尔分布进行 K-S 检验。在显著性水平  $\alpha=0.05$  时, K-S 检验结果均为通过, 再次印证了提取的循环均值和范围值样本服从正态分布和威布尔分布。

## 2.5 均值-范围值联合概率密度函数的建立

在确定均值-范围值二维联合概率密度函数前, 应对循环均值和范围值进行独立性检验, 计算均值和范围值 2 个随机变量之间的相关系数, 见式 (3)。

$$\rho = \frac{\text{cov}(X,Y)}{\sqrt{D(X)D(Y)}} \quad (3)$$

式中:  $\text{cov}(X,Y)$  为循环均值  $X$  与循环范围值  $Y$  的协方差;  $D(X)$  和  $D(Y)$  分别是  $X$  和  $Y$  的方差。

通过式 (3) 求得温度均值和温度范围值之间的相关系数为  $-0.321 1$ , 属于弱相关范畴。当循环均值和范围值两变量弱相关或不相关时, 温度循环均值-范围值二维联合概率密度函数为<sup>[22]</sup>:

$$f(x,y) = w(x)h(y) \quad (4)$$

绘制的二维概率密度图像如图 11 所示。

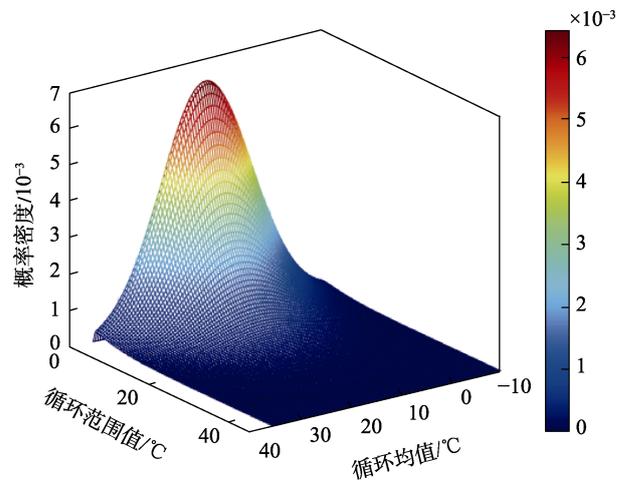


图 11 温度循环均值-范围值二维联合概率密度

Fig.11 Two-dimensional joint probability density of temperature cycle means and ranges

## 3 载荷谱的编制与加速谱的转化

### 3.1 累积频率下均值与范围值的最大值计算

雨流计数法统计计数的循环信息仅包含范围值 (或幅值)、均值二维分级区间内循环次数, 并没有统一为具体的循环均值、范围值信息, 这些信息不足以编制温度循环载荷谱。因此, 需要将雨流计数法的统计结果运用概率统计方法转换为  $8 \times 8$  二维载荷谱, 从而获取具体的温循载荷均值、范围值信息。

编制  $8 \times 8$  二维载荷谱, 首先需要在均值-范围值二维联合概率密度函数基础上, 采用概率密度法<sup>[23]</sup>

计算给定外推累积频率下的均值和范围值的最大值。设外推累积频率为  $P$ ，计算均值与范围值最大值公式为：

$$\int_{x_{\max}}^{+\infty} \int_{y_{\max}}^{+\infty} f(x, y) dx dy - P = 0 \quad (5)$$

由于循环均值和循环范围值相互独立，因此可以分别转化为求均值的最大值和范围值的最大值，即：

$$\int_{x_{\max}}^{+\infty} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right] dx - P = 0 \quad (6)$$

$$\int_{y_{\max}}^{+\infty} \frac{m}{\eta} \left(\frac{y}{\eta}\right)^{m-1} \exp\left[-\left(\frac{y}{\eta}\right)^m\right] dy - P = 0 \quad (7)$$

### 3.1.1 累积频率下循环均值最大值计算

式(6)可转化为：

$$P = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right] dx - \int_{-\infty}^{x_{\max}} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right] dx \quad (8)$$

对式(8)中的概率密度函数进行积分可得：

$$P = 1 - F(x_{\max}) \quad (9)$$

其中， $F(x_{\max})$ 为均值最大值处的正态分布函数。

$$F(x_{\max}) = \int_{-\infty}^{x_{\max}} w(x) dx = \int_{-\infty}^{x_{\max}} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} dx \quad (10)$$

令  $u = \frac{x-\mu}{\sigma}$ ，则  $dx = \sigma du$ ， $x_{\max} = \sigma U_P + \mu$ ，代入式(10)得：

$$F(x_{\max}) = \Phi(U_P) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{U_P} e^{-\frac{u^2}{2}} du \quad (11)$$

式中： $\Phi(\cdot)$ 为标准正态分布函数； $U_P$ 为标准正态分布在累积频率  $P$  处的上分位数。

将式(11)代入式(9)可得：

$$P = 1 - F(x_{\max}) = 1 - \Phi(u_P) \quad (12)$$

当已知累积频率  $P$  时，查标准正态分布表可得  $u_P$ ，进而可求得  $x_{\max}$ ，如图12所示。因此，均值的最大值为：

$$x_{\max} = \sigma u_P + \mu \quad (13)$$

### 3.1.2 累积频率下循环范围值最大值计算

式(7)可转化为：

$$P = \int_0^{+\infty} \frac{m}{\eta} \left(\frac{y}{\eta}\right)^{m-1} \exp\left[-\left(\frac{y}{\eta}\right)^m\right] dy - \int_0^{y_{\max}} \frac{m}{\eta} \left(\frac{y}{\eta}\right)^{m-1} \exp\left[-\left(\frac{y}{\eta}\right)^m\right] dy \quad (14)$$

式(14)中的概率密度函数进行积分可得：

$$P = 1 - F(y_{\max}) \quad (15)$$

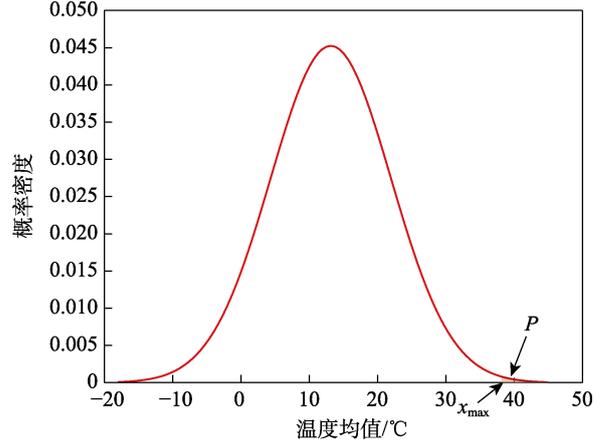


图12 累积频率  $P$  下的均值最大值  $x_{\max}$   
Fig.12 Maximum mean value  $x_{\max}$  under cumulative frequency  $P$

式中： $F(y_{\max})$ 为范围值最大值处的威布尔分布函数，如式(16)所示。

$$F(y_{\max}) = \int_0^{y_{\max}} \frac{m}{\eta} \left(\frac{y}{\eta}\right)^{m-1} e^{-\left(\frac{y}{\eta}\right)^m} dy = 1 - e^{-\left(\frac{y_{\max}}{\eta}\right)^m} \quad (16)$$

将式(16)代入式(15)可得：

$$P = 1 - F(y_{\max}) = e^{-\left(\frac{y_{\max}}{\eta}\right)^m} \quad (17)$$

对式(17)两边取自然对数  $\ln$ ，最终求解出累积频率  $P$  下范围值的最大值  $y_{\max}$ ：

$$y_{\max} = \eta \cdot \sqrt[m]{-\ln P} \quad (18)$$

### 3.1.3 累积频率的确定与载荷最大值计算

目前，在振动、结构力学领域内，一般认为在累积频次  $N=1/P=10^6$  循环内出现1次最大值载荷，在外推累积频次扩展到  $10^6$  次时，载荷循环的总频次为  $10^6$  可以涵盖周期内绝大部分随机载荷在工况中出现的应力水平<sup>[24]</sup>。但  $10^6$  是振动、结构力学等领域统计意义上的扩展累积频次，对于温度这种低频信号， $10^6$  的累计频次会将循环均值与范围值的最大值外推至严重偏离实际工况的极端温度，并且在此累积频次下，所编制二维载荷谱的温度循环次数严重过多，这明显不合理。因此，根据当地的极值实际情况，将累积频次应调整为437次。即在1个野外作业周期内，循环载荷最大值每437次循环中出现1次，累积频率  $P=1/437$ 。在累积频率  $P$  取  $1/437$  时，可求得标准正态分布  $P=1/437$  的上分位点  $U_P \approx 2.8354$ ，循环均值最大值  $x_{\max}=38.15^\circ\text{C}$ ，循环范围值的最大值  $y_{\max}=30.22^\circ\text{C}$ ，如图13所示。

## 3.2 8×8 二维载荷谱的编制

### 3.2.1 二维载荷谱均值与范围值的分级

由文献[25]可知，二维载荷谱的最大均值和最大范围值分别取累积频率下计算得到循环均值与范围

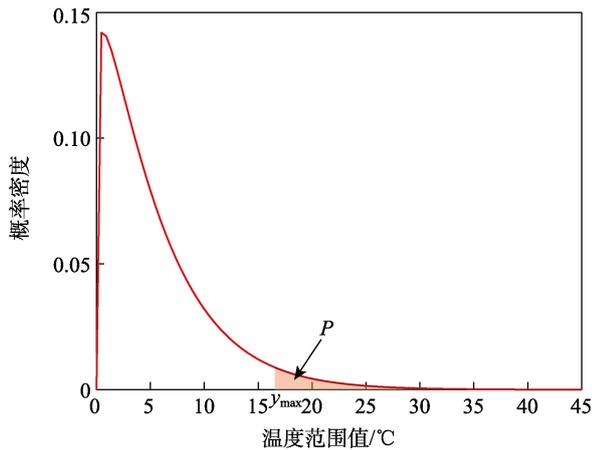


图 13 累积频率  $P$  下的范围值最大值  $y_{\max}$   
Fig.13 Maximum range value  $y_{\max}$  under cumulative frequency  $P$

值的最大值。现已求得均值最大值  $x_{\max}=38.15\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 范围值最大值  $y_{\max}=30.22\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。二维载荷谱一般将均值与范围值分为 8 级, 均值按照等间距法进行分级。

等间距法分级是将载荷均值在载荷谱最大均值和最小均值之间等分成 7 份, 为求得载荷谱最小均值, 首先求得载荷均值的波动中心  $\bar{x}_m$ :

$$\bar{x}_m = \frac{\sum_{j=1}^n N_j \bar{x}_j}{\sum_{j=1}^n N_j} \quad (19)$$

式中:  $N_j$  为经过雨流计法统计得到的第  $j$  级温循载荷均值水平的循环次数;  $\bar{x}_j$  为经过雨流计法统计得到的第  $j$  级温循载荷均值水平;  $n$  为循环载荷均值水平级数为 2.3 节中提到的 15 级。

由式 (19) 求得的波动中心  $\bar{x}_m=13.17\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 则载荷均值的最小值为  $x_{\min}=2\bar{x}_m-x_{\max}=-11.82\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

温度均值采用等间距法分为 8 级, 级间距为:  
 $\Delta S=(x_{\max}-x_{\min})/7$  (20)

则载荷均值  $x$  的各级划分为  $x_{\min}, x_{\min}+\Delta S, x_{\min}+2\Delta S, \dots, x_{\min}+6\Delta S, x_{\max}$ 。

范围值采用 Conover 比值系数不等间距法分为 8 级, 各级温循载荷范围值水平为:

$$y=\beta y_{\max} \quad (21)$$

式中:  $\beta$  为 Conover 比值系数,  $\beta=[0.125, 0.275, 0.425, 0.575, 0.725, 0.85, 0.95, 1]$ 。

最后得到  $8\times 8$  二维载荷谱均值和范围值的 8 级分级见表 2。

### 3.2.2 二维载荷谱各级应力水平循环次数计算

二维载荷谱将温度循环载荷的应力水平分成标准 8 级, 各级应力水平的循环次数  $N_{ij}$  可以通过二维联合概率密度函数的积分并乘积累频次得到:

$$N_{ij} = N \int_{a_i}^{a_{i+1}} \int_{b_j}^{b_{j+1}} f(x, y) dx dy \quad (22)$$

表 2 温循载荷均值、范围值分级  
Tab.2 Classification of temperature cycle load means and ranges

分级等级	载荷均值/ $^{\circ}\text{C}$	载荷范围值/ $^{\circ}\text{C}$
1	-11.82	3.78
2	-4.68	8.31
3	2.46	12.84
4	9.6	17.38
5	16.74	21.91
6	23.87	25.69
7	31.01	28.71
8	38.15	30.22

式中:  $N$  为累计频次,  $N=1/P$ ;  $a_i, a_{i+1}$  分别表示载荷范围值积分上、下限;  $b_j, b_{j+1}$  为载荷均值积分上、下限;  $a_i=(y_{i-1}+y_i)/2, a_1=y_{\min}=0.125y_{\max}, a_9=y_{\max}; b_i=(x_{i-1}+x_i)/2, b_1=x_{\min}, b_9=x_{\max}, i=2, 3, \dots, 8$

由式 (22) 计算得到  $8\times 8$  二维载荷谱对应各级载荷的循环次数  $N_{ij}$ , 共计 227 个循环, 见表 3。至此  $8\times 8$  二维载荷谱编制完成, 而后即可基于此谱构建温度循环载荷和转化加速载荷谱。

## 3.3 温度循环载荷谱的构建与加速载荷谱的转化

### 3.3.1 温度循环载荷谱的构建

$8\times 8$  二维载荷谱只反映了各级温循应力水平下的循环次数, 需要将  $8\times 8$  二维载荷谱中由同一级载荷范围值和载荷均值的单个周期常幅载荷循环所构成的“程序块”为基本单位, 在荷载-时间历程中重新编排, 构成可以供载荷加载使用的温度循环载荷谱。温循载荷谱的编制基本原则就是要确保依据载荷谱施加的载荷要尽量还原真实载荷过程, 因此将相同载荷均值的“程序块”以载荷范围值“中间高、两边低”的形式编排, 即同一级载荷均值的“程序块”中, 低载荷范围值“程序块”关于最高载荷范围值循环对称排列, “程序块”的载荷范围值越小, 越远离最高载荷范围值的“程序块”, 构成同级载荷均值的“程序块组”。同时, 不同载荷均值的“程序块组”也按照“中间高、两边低”的规则编排。

“程序块”中常幅循环的保温时间和温变率应根据实际载荷变化、载荷加载设备条件、载荷加载对象特性、载荷加载试验目的等具体设计确定。在本例中, 设定 1 个“程序块”内 1 个循环所需时间为 6 h (采样间隔 3 h), 高温保温时间与低温保温时间均为 2 h。将二维载荷谱中的所有“程序块”按照“中间高、两边低”形式编排成的温循载荷谱如图 14 所示。可以看出, 基于四点雨流计数法的  $8\times 8$  二维载荷谱制谱方法编排成的温循载荷谱具有显著的日变化特征和季节变化特征, 较好地还原了野外作业环境下温度载荷作用历程。

表3 某型电子部件1个野外作业周期下温度循环二维载荷谱  
Tab.3 Two-dimensional load spectrum of temperature cycle for a certain type of electronic component during one field operation cycle

载荷范围值/℃	-11.82 ℃	-4.68 ℃	2.46 ℃	9.60 ℃	16.74 ℃	23.87 ℃	31.01 ℃	38.15 ℃
3.78	0	4	13	23	23	12	4	0
8.31	0	4	14	26	26	14	4	0
12.84	0	2	6	11	11	6	2	0
17.38	0	1	2	4	4	2	1	0
21.91	0	0	1	2	2	1	0	0
25.69	0	0	0	1	1	0	0	0
28.71	0	0	0	0	0	0	0	0
30.22	0	0	0	0	0	0	0	0

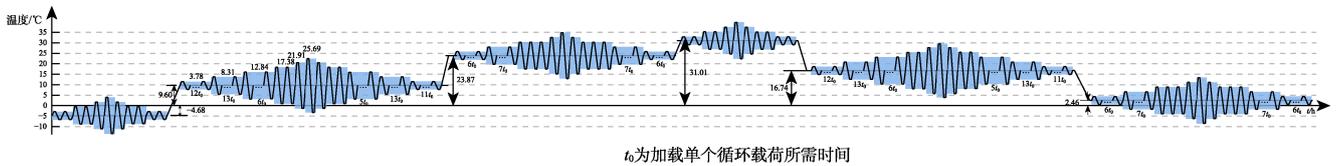


图14 基于二维载荷谱编排的温循载荷谱

Fig.14 Temperature cycle load spectrum based on two-dimensional load spectrum arrangement

### 3.3.2 加速载荷谱的转化

考虑到某型装备中的电子部件使用寿命预测与验证的时间与费用成本问题,还需要将温循载荷谱通过加速因子进行等效和压缩,转化为加速载荷谱。将温循载荷谱转化为加速载荷谱使用的是基于温度循环参数的疲劳寿命模型——Norris-Landzberg 模型<sup>[26]</sup>的加速因子公式:

$$\eta_{AF} = \frac{N_{\text{field}}(f_{\text{field}}, \Delta T_{\text{field}}, T_{\text{max, field}})}{N_{\text{test}}(f_{\text{test}}, \Delta T_{\text{test}}, T_{\text{max, test}})} = \left(\frac{f_{\text{field}}}{f_{\text{test}}}\right)^m \left(\frac{\Delta T_{\text{field}}}{\Delta T_{\text{test}}}\right)^{-n} \exp\left[\frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{T_{\text{max, field}}} - \frac{1}{T_{\text{max, test}}}\right)\right] \quad (23)$$

式中: field 代表工况环境; test 代表加速试验环境;  $N$  为循环次数;  $f$  为温度循环频率;  $\Delta T$  为温度循环变化的范围,  $T_{\text{max}}$  为温度循环内的最高温度;  $m$  为温循频率项系数;  $n$  为温循范围项系数;  $E_a$  为活化能;  $k$  为玻尔兹曼常数,  $k=8.623 \times 10^{-5}$  eV/K。

某型装备中的电子部件使用的是锡铅 (Sn-Pb) 焊料焊接,根据文献<sup>[27]</sup>,此时  $E_a$  取 1.22 eV,  $m$  取 1/3,  $n$  取 1.9,  $E_a/k \approx 1414$  K。文献<sup>[28]</sup>指出,参数  $n$  取 1.9 更适用于单一元部件,对于复杂电子产品,使用该参数值进行寿命评估偏差很大,需要利用自然使用寿命评估结果对模型的经验参数进行适应性修正来减小评估偏差。在对其进行反复修正后,取  $n=0.9$  时,其评估结果与实际使用到寿结果偏差缩小到合理水平。

某型装备中的电子部件,其工作极限为 -55~125 ℃,按工作极限的 80% 选取应力水平,不会使其失效机理发生改变<sup>[29]</sup>,则加速载荷谱的应力水平为

-44~100 ℃。本例中,设定加速载荷谱 1 个循环周期为 45 min,则温循载荷谱与加速载荷谱的循环频率比为各自在 1 d 内的循环次数之比为 1/8。将 8×8 二维载荷谱和加速载荷谱的循环应力信息代入式 (23) 可得:

$$\eta_{AF,ij} = \frac{N_{ij}}{M_{ij}} = \left(\frac{f_{\text{field}}}{f_{\text{test}}}\right)^m \left(\frac{\Delta T_i}{\Delta T_{\text{test}}}\right)^{-n} \exp\left[\frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{T_{\text{max,ij}}} - \frac{1}{T_{\text{max, test}}}\right)\right] \quad (24)$$

式中:  $N_{ij}$  为 8×8 二维载荷谱第  $i$  级范围值、第  $j$  级均值应力水平下的循环次数;  $M_{ij}$  是  $N_{ij}$  折合为加速载荷谱后的循环次数;  $\Delta T_i$  为 8×8 二维载荷谱第  $i$  级范围值的温度循环的变化范围;  $T_{\text{max,ij}}$  为 8×8 二维载荷谱第  $i$  级范围值、第  $j$  级均值应力水平下的最高温度。各级应力水平下的加速因子见表 4。

由式 (24) 可知,8×8 二维载荷谱各级应力等效折合为加速载荷谱循环次数可由二维载荷谱的循环次数除以相应应力水平的加速因子求得,如式 (25) 所示。

$$M_{ij} = N_{ij} / \eta_{AF,ij} \quad (25)$$

二维载荷谱各级应力循环次数等效折合为加速应力水平 (最高温度 100 ℃,最低温度 -44 ℃) 的循环次数见表 5。

将各级应力水平折合成加速应力水平的所有温度循环次数求和,最终等效为 12.35 个加速循环。设定加速载荷谱的初始温度为 20 ℃,单个循环周期为 45 min。电子部件在热疲劳试验中,温度循环最高温度保温时间在 10~12 min 时,试验效率最高<sup>[30]</sup>。某电

表 4 不同温循应力水平下的加速因子  
Tab.4 Acceleration factors under different temperature cycling stress levels

载荷范围值/°C	-11.82 °C	-4.68 °C	2.46 °C	9.60 °C	16.74 °C	23.87 °C	31.01 °C	38.15 °C
3.78	64.56	56.01	48.95	43.08	38.14	33.97	30.42	27.37
8.31	30.33	26.37	23.10	20.37	18.07	16.12	14.46	13.03
12.84	19.59	17.08	14.99	13.24	11.77	10.52	9.45	8.53
17.38	14.28	12.47	10.97	9.71	8.65	7.74	6.97	6.30
21.91	11.09	9.71	8.56	7.59	6.77	6.07	5.47	4.95
25.69	9.28	8.14	7.18	6.38	5.70	5.12	4.62	4.19
28.71	8.16	7.17	6.34	5.63	5.04	4.53	4.09	3.71
30.22	7.68	6.75	5.97	5.32	4.76	4.28	3.87	3.51

表 5 不同温循应力水平下二维载荷谱折合成加速应力水平的循环次数  
Tab.5 Number of cycles for converting two-dimensional load spectra into accelerated stress levels under different temperature cycling stress levels

载荷范围值/°C	-11.82 °C	-4.68 °C	2.46 °C	9.60 °C	16.74 °C	23.87 °C	31.01 °C	38.15 °C
3.78	0	0.07	0.27	0.53	0.60	0.35	0.13	0
8.31	0	0.15	0.61	1.28	1.44	0.87	0.28	0
12.84	0	0.12	0.40	0.83	0.93	0.57	0.21	0
17.38	0	0.08	0.18	0.41	0.46	0.26	0.14	0
21.91	0	0	0.12	0.26	0.30	0.16	0	0
25.69	0	0	0	0.16	0.18	0	0	0
28.71	0	0	0	0	0	0	0	0
30.22	0	0	0	0	0	0	0	0

电子产品温变试验规范要求温变速率绝对值一般在 10~60 °C/min 内<sup>[31]</sup>。文献[32]指出, 电子设备热循环加速可靠性试验中, 温度循环的温变率应低于 20 °C/min, 并推荐温度保持时间至少 15 min, 以避免热冲击。因此, 设定最高温保持时间和低温保持时间均为 15 min, 升温与降温时间为 7.5 min, 升温速率与降温速率均为 19.2 °C/min, 编排成的加速载荷谱如图 15 所示。至此为电子部件在野外作业环境下, 1 个作业周期内的温循载荷谱的编制提供了一套合理化的流程和解决方案。

### 4 试验验证

为验证图 15 所示的温循加速载荷谱的准确性, 需要按照此谱对某型装备中的电子部件开展加速寿

命试验, 将试验结果换算成正常应力水平下寿命, 与电子部件的平均使用寿命相比较, 计算之间的误差。电子部件如图 16 所示, 加速寿命试验设备如图 17 所示。

#### 4.1 失效判定

根据某型电子部件的维修记录显示, 某型电子部件主要的失效模式为电阻阻值增大、开路。因此, 采用精密电阻测试仪对电子部件进行电阻检测来判断是否失效。根据部件产品说明, 额定阻值为 45~50 Ω, 当阻值不在此范围内, 则电子部件判定为失效。

#### 4.2 试验方案

按照某型装备的总体数量, 按照 10% 的比例抽取 4 个试件进行加速寿命试验。设置温度循环试验设备加载载荷范围为 -44~100 °C, 1 个温度循环由 1 个升

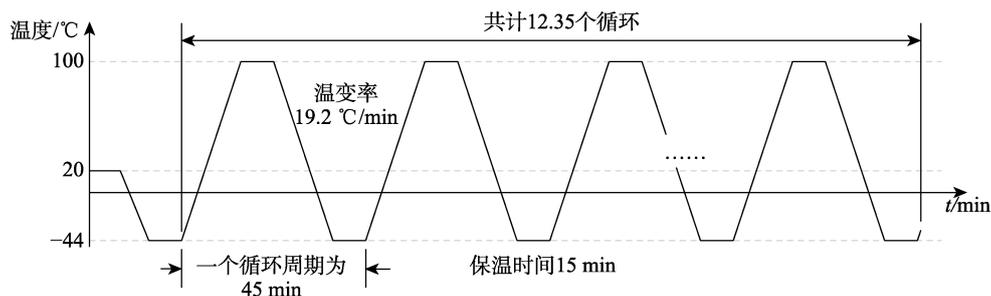


图 15 基于二维载荷谱转化的加速载荷谱

Fig.15 Acceleration load spectrum based on two-dimensional load spectrum conversion



图 16 某型装备中的某型电子部件  
Fig.16 A certain type of electronic components carried by a certain type of equipment



图 17 加速寿命试验设备  
Fig.17 Accelerated life test equipment

温阶段、1 个降温阶段、2 个保温阶段构成，保温时间设定为 15 min，单次温变时长为 7.5 min，温变率为 19.2 °C/min，循环周期为 45 min。在开始循环前和循环结束后，温度都恢复到 20 °C。

由于某型装备的电子部件平均寿命长达 10 a 左右，说明电子部件在发生疲劳失效前，在常规应力水平下经历了上千次温度循环。因此，为节约试验时间，采取渐进加密的方式进行检测：最大总循环数为 149 个循环，若 4 个试件提前全部失效，则试验提前结束；在经历第 85 个温度循环之前，每经历 12 个温度循环（9 h），从试验设备中取出电子部件恢复至 20 °C 进行阻值检测；第 85~108 个循环，每 4 个循环（3 h）进行 1 次阻值检测；第 109~132 个循环每 2 个循环

（1.5 h）进行 1 次阻值检测；第 133~149 个循环每 1 个循环（45 min）进行 1 次阻值检测。

为了以最保守水平估计寿命，若电子部件在某次检测中被判定为失效，则失效时间记为上一次检测未失效时间，失效后该试件不再进行加速寿命试验<sup>[33]</sup>。

### 4.3 试验结果

某型电子部件加速寿命试验阻值测试曲线如图 18 所示。试件 2、3、4 在前 84 温度循环周期内，测试阻值结果非常稳定，试件 1 在前 120 个周期内，测试阻值都相当稳定。试件 1 在第 130 周期后，测试阻值开始迅速上升；试件 2 在第 110 周期后，测试阻值明显上升；试件 3 在第 84 周期后，测试阻值逐步上升，最终在第 112 周期后，阻值发生突变，然后失效；试件 4 在第 100 周期后，测试阻值开始发生显著上升。最终试件 1~4 分别在第 140、136、112、116 次循环后的下次阻值检测中检测出测试阻值超额，被判定为失效。试验结果统计见表 6。

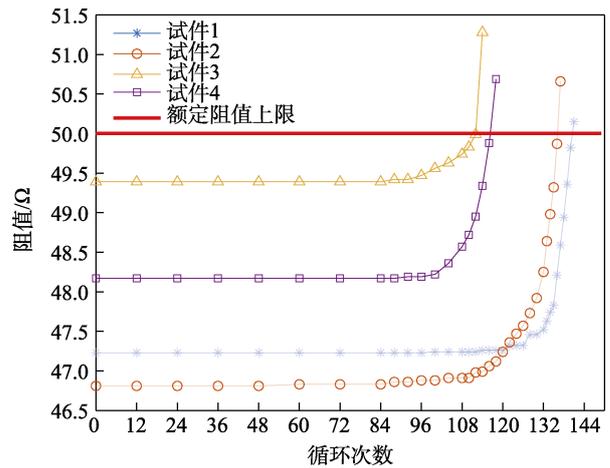


图 18 某型电子部件加速寿命试验阻值测试曲线  
Fig.18 Resistance test curve of an electronic component accelerated life test

表 6 加速寿命试验结果统计  
Tab.6 Accelerated life test results statistics

试件	最后一次检测通过的循环数	试验时间/h	等效寿命/a	误差/%
1	140	105	11.34	13.36
2	136	102	11.01	10.12
3	112	84	9.07	9.31
4	116	87	9.39	6.07

根据加速寿命试验结果统计分析可知，某型装备中的某型电子部件试件在温度循环加速寿命试验下的平均等效寿命为 10.2 a，试件个体完成试验的等效寿命与真实平均寿命相比误差范围为 6.07%~13.36%。结果证明，使用该加速试验谱进行试验估计出的等效寿命具有实际参考价值，也印证了基于四点雨流计数法

的 8×8 二维环境载荷谱制谱方法编制的温循环境载荷谱与加速试验谱对真实环境载荷的近似等效性。

## 5 结语

1) 本文研究给出的基于四点雨流计数法的 8×8 二维环境载荷谱制谱方法可以有效解决野外环境下温度载荷日变化与季节变化复杂, 野外作业周期内温度记录多, 波动明显且频繁, 难以制谱的问题, 特别适用于载荷记录多、波动特征明显、记录周期内趋势特征明显的环境载荷的载荷谱编制。

2) 相较标准载荷谱的使用和设计常幅温度循环近似模拟真实载荷过程 2 种主流设计方案, 本文提出的设计方案可以克服前者循环幅值固定特性所具有的最高最低温度选取过于极端或平均、完全等效计算量大、导致原谱信息损失严重的缺点。

3) 本文仅对某型装备的电子部件以及其所处环境进行研究, 编制二维载荷谱的累计概率以及转化为加速谱的加速模型的参数修正还具有一定的局限性, 验证还不充分, 后续仍需对不同类型的电子产品和野外环境开展更多的研究工作, 以提高模型参数评估的准确性。

### 参考文献:

- [1] 吴一乔, 周刚, 韩建立, 等. 综合环境下舰载导弹弹上计算机加速寿命试验研究[J]. 装备环境工程, 2022, 19(8): 27-35.  
WU Y Q, ZHOU G, HAN J L, et al. Accelerated Life Test Research for Shipborne Missile Board Computer under Comprehensive Environmental Conditions[J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19(8): 27-35.
- [2] 杨立峰, 吕卫民, 肖阳. 基于故障机理和伪失效寿命的电子产品剩余寿命预测[J]. 海军航空工程学院学报, 2017, 32(2): 246-250.  
YANG L F, LYU W M, XIAO Y. Residual Life Prediction for Electronic Products Based on Fault Mechanism and Pseudo-Failure Data[J]. Journal of Naval Aeronautical and Astronautical University, 2017, 32(2): 246-250.
- [3] MEEKER W Q, NELSON W. Accelerated Testing: Statistical Models, Test Plans, and Data Analyses[J]. Technometrics, 1991, 33(2): 236.
- [4] 易当祥, 李祥臣, 田春祥, 等. 导弹产品湿热载荷统计分析与其谱设计[J]. 强度与环境, 2013, 40(1): 50-53.  
YI D X, LI X C, TIAN C X, et al. Storage Environment Load Statistical Analysis and Load Spectrum Design for the Missile Production[J]. Structure & Environment Engineering, 2013, 40(1): 50-53.
- [5] 朱雪冰, 魏志刚, 张李侠. 汽车控制臂路试载荷谱的编制与转化[J]. 安徽工业大学学报(自然科学版), 2016, 33(1): 58-63.  
ZHU X B, WEI Z G, ZHANG L X. Preparation and Transformation of the Road Test Load Spectrum of Automobile Control Arm[J]. Journal of Anhui University of Technology (Natural Science), 2016, 33(1): 58-63.
- [6] 刘佳豪. 焊点的多应力耦合模拟及可靠性分析[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2020.  
LIU J H. Multi-Stress Coupling Simulation and Reliability Analysis of Solder Joint[D]. Xi'an: Xidian University, 2020.
- [7] GJB150.16A, 军用装备实验室环境试验方法第 16 部分: 振动试验[S].  
GJB 150.16A, Military Equipment Laboratory Environmental Test Methods-Part 16: Vibration Test[S].
- [8] 江颖, 丁晓杰, 郭啸峰. 不同锡膏量对 QFP 焊点热循环的可靠性分析[J]. 电子工艺技术, 2023, 44(5): 15-19.  
JIANG Y, DING X J, GUO X F. Reliability Analysis of Thermal Cycle of QFP Solder Joint with Different Solder Paste Amounts[J]. Electronics Process Technology, 2023, 44(5): 15-19.
- [9] GJB 548B—2005, 微电子部件试验方法和程序[S].  
GJB 548B—2005, Test Methods and Procedures for Microelectronic Components[S].
- [10] 李茂林. 基于热与随机振动加载的叠层焊点可靠性研究[D]. 桂林: 桂林电子科技大学, 2023.  
LI M L. Study on Reliability of Laminated Solder Joints under Thermal-Random Vibration Composite Loading Conditions[D]. Guilin: Guilin University of Electronic Technology, 2023.
- [11] 王艳艳, 舒畅, 李超. 自然环境谱转化为加速试验环境谱的方法[J]. 装备环境工程, 2014, 11(1): 34-38.  
WANG Y Y, SHU C, LI C. Method for Conversion of Natural Environmental Spectra to Accelerated Test Environmental Spectra[J]. Equipment Environmental Engineering, 2014, 11(1): 34-38.
- [12] 滕飞, 王浩伟, 滕克难. 面向导弹延寿的冲压发动机加速贮存试验方法[J]. 装备环境工程, 2019, 16(3): 37-42.  
TENG F, WANG H W, TENG K N. Accelerated Storage Test Method of Ramjet for Life Extension of Missile[J]. Equipment Environmental Engineering, 2019, 16(3): 37-42.
- [13] 李迪凡, 李泽华, 李景育, 等. 一种综合加速试验谱构建方法研究[J]. 环境技术, 2021, 39(4): 206-211.  
LI D F, LI Z H, LI J Y, et al. Research on a Method of Constructing Comprehensive Accelerated Test Spectrum [J]. Environmental Technology, 2021, 39(4): 206-211.
- [14] 魏小琴, 李晗, 赵阳, 等. 复合固体推进剂定应变-温度循环加速试验方法研究[J]. 装备环境工程, 2022, 19(5): 65-72.  
WEI X Q, LI H, ZHAO Y, et al. Accelerated Test Method of Composite Solid Propellant with Constant Strain-Temperature Cycle[J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19(5): 65-72.
- [15] 陈新, 王鹏. 基于实测温度数据的热疲劳机理与试验剖面构建方法研究[J]. 控制与信息技术, 2022(6): 109-114.  
CHEN X, WANG P. Research on Thermal Fatigue

- Mechanism and Test Profile Construction Method Based on Measured Temperature Data[J]. *Control and Information Technology*, 2022(6): 109-114.
- [16] 秦强, 张生鹏. 综合环境条件下电子装备贮存寿命加速试验方法研究[J]. *装备环境工程*, 2019, 16(3): 81-87.  
QIN Q, ZHANG S P. Accelerated Storage Test of Electric Equipment under Integrated Environmental Stresses[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2019, 16(3): 81-87.
- [17] 张卫. 考虑多失效机理耦合的电子产品寿命预测方法研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2014.  
ZHANG W. Research on Life Prediction Method of Electronic Products Considering Coupling of Multiple Failure Mechanisms[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2014.
- [18] 孟涛. 导弹贮存延寿技术概论[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2013: 96.  
MENG T. Introduction to Missile Storage Life Extension Technology[M]. Beijing: China Aerospace Press, 2013: 96.
- [19] 董乐义, 罗俊, 程礼. 雨流计数法及其在程序中的具体实现[J]. *航空计测技术*, 2004, 24(3): 38-40.  
DONG L Y, LUO J, CHENG L. Rain Flow Count Method and Its Realization in Programming[J]. *Aviation Metrology & Measurement Technology*, 2004, 24(3): 38-40.
- [20] 贾海波. 轮式装载机传动系统载荷谱测试与编制方法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2009.  
JIA H B. Study on the Test and Generation Methods about Load Spectrum of Wheel Loader Driveline[D]. Changchun: Jilin University, 2009.
- [21] 高云凯, 徐成民, 方剑光. 车身台架疲劳试验程序载荷谱研究[J]. *机械工程学报*, 2014, 50(4): 92-98.  
GAO Y K, XU C M, FANG J G. Study on the Programmed Load Spectrum of the Body Fatigue Bench Test[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2014, 50(4): 92-98.
- [22] 陈源, 朱蕾, 朱启举, 等. 惯性器件加速试验环境谱编制与数据处理方法研究[J]. *装备环境工程*, 2016, 13(1): 86-90.  
CHEN Y, ZHU L, ZHU Q J, et al. Accelerated Test Environmental Spectra and Data Processing Method of Inertial Components[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2016, 13(1): 86-90.
- [23] 易当祥, 吕国志, 周雄伟. 用概率推断法确定多工况二维疲劳设计谱的载荷最大值[J]. *应用力学学报*, 2006, 23(3): 484-487.  
YI D X, LV G Z, ZHOU X W. Maximal Loading Calculation for Two Dimensional Fatigue Design Spectrum under Multiple Working Conditions with Probability Extrapolation Method[J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 2006, 23(3): 484-487.
- [24] 张英爽, 王国强, 王继新, 等. 工程车辆传动系载荷谱编制方法[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(4): 179-183.  
ZHANG Y S, WANG G Q, WANG J X, et al. Compilation Method of Power Train Load Spectrum of Engineering Vehicle[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 27(4): 179-183.
- [25] 汤清洪, 马吉胜, 贾长治. 扭力轴多工况二维随机疲劳载荷谱的编制[J]. *振动与冲击*, 2007, 26(2): 105-106.  
TANG Q H, MA J S, JIA C Z. Establishment of two-Dimensional Stochastic Fatigue Load Spectrum in multiple-Loading Case for Torsion Shaft[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2007, 26(2): 105-106.
- [26] NORRIS K C, LANDZBERG A H. Reliability of Controlled Collapse Interconnections[J]. *IBM Journal of Research and Development*, 1969, 13(3): 266-271.
- [27] SU S N, AKKARA F J, THAPER R, et al. A State-of-the-Art Review of Fatigue Life Prediction Models for Solder Joint[J]. *Journal of Electronic Packaging*, 2019, 141(4): 040802.
- [28] 童雨, 孔令磊, 李嘉. Norris-Landzberg 模型在电子产品贮存寿命评估中的应用[J]. *质量与可靠性*, 2022(5): 23-27.  
TONG Y, KONG L L, LI J. Norris-Landzberg Model Application in Storage Life Evaluation of Electronic Products[J]. *Quality and Reliability*, 2022(5): 23-27.
- [29] 张鑫, 韩建立, 张崇会, 等. 弹载二次电源加速寿命试验试验谱研究[J]. *兵器装备工程学报*, 2021, 42(5): 54-59.  
ZHANG X, HAN J L, ZHANG C H, et al. Study on Accelerated Life Test Spectrum of Bomb Secondary Power Supply[J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2021, 42(5): 54-59.
- [30] 褚卫华. 模块级电子产品可靠性强化试验方法研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2003.  
CHU W H. Test Method Research on Reliability Enhancement Testing for Module-Level Electronic Products[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2003.
- [31] 温熙森. 可靠性强化试验理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2007.  
WEN X S. Theory and Application of Reliability Strengthening Test[M]. Beijing: Science Press, 2007.
- [32] 周天朋, 刘向勃, 祝济之. 电子设备热循环加速可靠性试验研究与应用[J]. *环境技术*, 2021, 39(2): 67-71.  
ZHOU T P, LIU X B, ZHU J Z. Research and Application of Electronic Equipment Thermal Cycle Accelerated Reliability Test[J]. *Environmental Technology*, 2021, 39(2): 67-71.
- [33] 肖怀根. 基于热机耦合作用车灯结构疲劳寿命预测与实验分析[D]. 广州: 广东工业大学, 2019.  
XIAO H G. Fatigue Life Prediction and Experimental Analysis of Vehicle Lamp Structure Based on Thermal-Mechanical Coupling[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2019.