

铝电解电容器不同安装方式下振动应力分析★

李胜^{1,2}, 谢玉婷¹, 黄远彬¹, 王志超¹, 彭金霖², 曹艳青², 蒋冬初²

(1. 湖南艾华集团股份有限公司, 湖南 益阳 413000;

2. 湖南城市学院 全固态储能材料与器件湖南省重点实验室, 湖南 益阳 413000)

摘要: 在车载电源及工业振动环境中, 铝电解电容器引脚易因惯性载荷作用产生应力集中并发生断裂。为分析不同安装方式对振动结构响应的影响, 采用等效加速度法建立铝电解电容器—印刷电路板组合结构三维有限元模型, 在X、Y、Z方向分别施加10g等效加速度, 研究铝电解电容器直插竖放与卧式横放2种安装形式在打胶与未打胶条件下的引脚应力分布特征。结果表明, 2种安装方式均存在明显方向敏感性, 且主导受力方向不同: 未打胶条件下, 卧式结构整体应力水平高于直插结构, 引脚根部及弯折过渡区域为主要高应力部位; 使用电子白胶固定后, 各工况下最大等效应力均出现数量级下降, 应力集中显著减弱。研究表明, 通过改变力臂长度及载荷传递路径的安装方式, 能显著影响铝电解电容器的振动结构风险。

关键词: 铝电解电容器; 振动应力; 等效加速度; 有限元分析

中图分类号: TN 603

文献标志码: A

文章编号: 1672-5468 (XXXX) XX-0001-07 doi:10.3969/j.issn.1672-5468.XXXX.XX.001

Analysis of Vibration Stress in Aluminum Electrolytic Capacitors Under Different Mounting Configurations

LI Sheng^{1,2}, XIE Yuting¹, HUANG Yuanbin¹, WANG Zhichao¹, PENG Jinlin², CAO Yanqing²,
JIANG Dongchu²

(1. Hunan Aihua Group Co., Ltd., Yiyang 413000, China;

2. All-Solid-State Energy Storage Materials and Devices Key Laboratory of Hunan Province, Hunan City University, Yiyang 413000, China)

Abstract: Aluminum electrolytic capacitors used in vehicle and industrial equipment often suffer from mechanical vibration. The vibration can cause bending stress at the capacitor leads and may finally lead to fracture. In this paper, a three-dimensional finite element model of a capacitor with printed circuit board assembly was built to study the influence of different mounting configurations. The vibration load was simplified as equivalent acceleration. A value of 10g was applied in the X, Y, and Z directions. Two mounting types were considered, including vertical through-hole installation and horizontal installation. The cases with and without adhesive fixation were also compared. The simulation shows that both mounting types are sensitive to vibration direction, but the main stress direction is different. Without adhesive support, the horizontal type has higher stress level. Stress concentration mainly appears at the lead root and bending region. After applying

★基金项目: 国家自然科学基金 (12202140); 2025年益阳市“小荷”人才项目 (YYKXXH2025C0016) 资助。

收稿日期: 2025-03-27 修回日期: 2025-05-20

作者简介: 李胜 (1985—), 男, 湖南益阳人, 湖南艾华集团股份有限公司工程师, 从事电容器开发设计方向的工作。

通信作者: 彭金霖 (1987—), 男, 湖南益阳人, 湖南城市学院讲师, 博士, 从事有限元模拟仿真方面的研究工作。

adhesive, the maximum equivalent stress decreases greatly and the stress concentration becomes weaker. This research results suggest that mounting configuration changes the lever arm length and load transfer path, which directly affects vibration reliability.

Keywords: aluminum electrolytic capacitor; vibration stress; equivalent acceleration method; finite element analysis

0 引言

铝电解电容器因其容量大、价格低、工艺成熟及适用电压范围宽等优点,被广泛应用于各类电源系统、工业控制设备及新能源汽车电子模块中。随着新能源汽车及高功率密度电源技术的快速发展,车载充电机、直流-直流转换器等模块对铝电解电容器的可靠性提出了更高要求。在实际运行过程中,整机除承受热、电等多物理场作用外,还不可避免地受到持续或间歇性的机械振动影响。振动载荷通过印制电路板(PCB: Printed Circuit Board)传递至元器件,引起铝电解电容器引脚及焊点部位产生交变弯曲应力,易在结构薄弱区域形成应力集中,最终导致引脚断裂或焊点失效^[1,2]。因此,在满足电参数特性指标的同时,提升铝电解电容器的结构抗振动能力,已成为电子产品设计与整机布局中需要关注的重大难题^[3]。

目前,铝电解电容器抗振动能力的评价主要依赖振动试验方法。常规振动试验通常在X、Y、Z 3个互相垂直方向施加一定频率与振幅的激励,汽车电子领域则多参照AEC-Q200-Rev E等标准进行更为严苛的加速度与频率扫描测试^[4]。该类试验能够较为真实地反映产品在实际工况下的可靠性水平,但存在试验周期长、资源投入大、人员要求高、样品消耗多等不足。同时,单纯依赖试验难以直观获取铝电解电容器内部各结构部位的应力分布情况,也不利于在设计阶段对不同安装方案进行快速对比分析。随着计算机辅助工程技术的发展,基于有限元方法的结构仿真已成为电子元器件可靠性研究的重要手段^[5]。通过建立铝电解电容器-PCB组合结构的三维模型并施加振动载荷,可以获得铝电解电容器引脚及焊点区域的应力分布特征,识别潜在失效位置,为结构优化与安装

方式选择提供定量依据。

在整机装配过程中,铝电解电容器常见的安装方式包括直插竖放与卧式横放2种形式,同时为提高抗振能力,工程上常采用打胶固定等措施以增强结构约束^[6-7]。然而,不同安装方式及固定方式对振动应力传递路径的影响规律尚需系统分析。基于此,本文构建了铝电解电容器及其与PCB连接结构的有限元模型,在X、Y、Z振动方向下施加等效加速度载荷,对直插与卧式2种安装形式及打胶与否条件下的引脚应力分布进行对比研究。通过分析最大等效应力及应力集中区域的变化规律,揭示安装方式与结构约束对振动响应的影响机制,为铝电解电容器在振动敏感环境中的合理布局与结构优化设计提供理论参考。

1 等效振动载荷与受力分析

1.1 振动载荷的等效处理方法

铝电解电容器引脚在振动条件下的受力属于动力响应问题,理论上可通过频率响应或瞬态动力学方法分析其时域或频域特征,并结合循环应力幅值评估疲劳寿命。引脚振动失效主要由交变应力引起,其寿命通常依据应力-寿命(S-N: Stress-Number)曲线进行评价^[8]。由于S-N关系表明应力幅值决定疲劳寿命水平,因此通过识别结构中的应力集中区域并比较不同方案下的应力大小,即可对其循环寿命风险进行评估。基于此,本文采用等效加速度法,将振动峰值加速度转化为等效惯性载荷,在静力分析框架下比较不同安装方式下引脚的应力分布特征^[9],而不对具体疲劳寿命进行数值预测。

当铝电解电容器随PCB产生振动时,其质量 m 在加速度 $\vec{a}$ 作用下产生惯性力 $\vec{F}$,其表达

式为：

$$\vec{F} = m \cdot \vec{a} \quad (1)$$

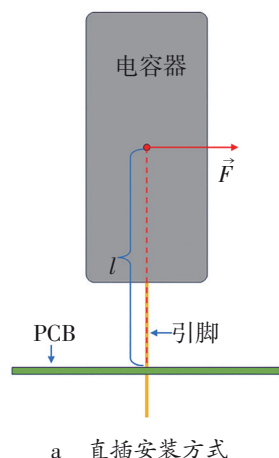
该惯性力通过引脚传递至焊点与PCB板面，引脚根部因此承受弯曲载荷并形成应力集中。若将振动过程中某一方向的峰值加速度视为等效静载荷，则振动问题可转化为结构在等效惯性力作用下的静力响应问题。本研究在X、Y、Z方向分别施加10g等效加速度，以比较不同振动方向对应力分布的影响差异^[10]。尽管该方法未对振动频率响应进行求解，但对于不同结构方案之间的相对风险评估具有明确的工程意义。

1.2 不同安装方式下的受力机理分析

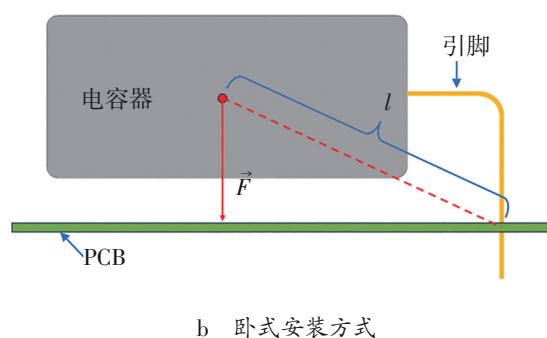
在等效加速度作用下，铝电解电容器可近似视为固定端约束的悬臂结构。铝电解电容器本体质量集中于引脚上方或侧方，在横向加速度作用下会在引脚根部形成弯矩 $\vec{M}$ ，大小与惯性力及质心至焊点的等效力臂长度 l 有关：

$$\vec{M} = \vec{F} \cdot l \quad (2)$$

不同安装方式将改变质量分布与力臂长度，从而影响弯矩大小与应力水平，如图1所示。直插竖放安装时，铝电解电容器质量主要位于焊点正上方，质心至焊点的等效力臂随着铝电解电容器下端靠近PCB而变小。在横向加速度作用下，产生弯矩，应力集中区域主要位于引脚根部。卧式横放安装时，铝电解电容器本体相对于焊点存在明显的质心偏移，质心至焊点的等效力臂增大。在纵向加速度作用下，将产生更大的弯矩效应。应力集中区域除了出现在引脚根部外，还可能分布于引脚弯曲过渡区域。



a 直插安装方式



b 卧式安装方式

图1 等效加速度作用下,电容器受力示意图

1.3 基于最大等效应力的失效风险判定

在循环振动环境中，金属引脚的断裂通常源于应力集中区域的反复弯曲作用^[11]。铝电解电容器引脚材料一般为镀锡铜或镀锡钢丝，属于延性金属材料，其屈服与失效行为可采用 von Mises 等效应力准则进行表征。根据第四强度理论，当等效应力达到材料屈服强度时，材料进入塑性阶段；在交变载荷长期作用下，高应力区域更易发生疲劳损伤并逐渐扩展为宏观裂纹^[12]。

尽管振动问题本质上属于动力学问题，但在等效加速度法框架下，将峰值加速度等效为惯性静载后，可通过分析结构在极限惯性载荷作用下的最大等效应力分布，识别潜在的高风险区域。在材料参数与几何条件一致的前提下，最大等效应力越高，结构发生疲劳断裂的概率越大。因此，本文以引脚区域的最大等效应力作为不同安装方式及固定条件下振动结构风险的相对评价指标。该判定方法能够在设计阶段快速筛选不利结构方案，并为后续振动可靠性优化提供定量依据。

2 有限元模型建立与结果分析

为分析直插和卧式安装条件下铝电解电容器在振动环境中的受力特征，建立铝电解电容器—PCB组合结构三维有限元模型。模型包括铝电解电容器本体、引脚及PCB：电容器本体简化为高度40 mm、直径18 mm的圆柱体，并假定质量均匀分布，总质量取该规格的典型值16 g；引脚简化为直径0.8 mm的钢丝；PCB为1 mm厚度的环氧玻璃纤维层板，同样简化为均质材料。在未打胶工况下，仅由引脚连接PCB与电容器本体，PCB设置固定约束；在打胶工况下，除了引脚连接PCB与电容器

本体以外，于铝电解电容器本体与PCB之间增加固定胶结构以模拟附加支撑作用。

2.1 直插安装振动应力分析

基于第1章所述等效加速度理论，针对直插铝电解电容器—PCB三维有限元模型，分别在X、Y、Z方向施加10g等效加速度载荷，以模拟振动方向变化对结构响应的影响。不同振动方向及是否打胶条件下引脚区域的应力分布结果如图2所示。结果表明，在未打胶条件下，当模拟振动方向为Y方向时，引脚根部出现最明显的弯曲变形和应力集中，最大等效应力显著高于X方向与Z方向工况；X方向次之，而Z方向整体应力水平相对较低。应力集中位置主要位于引脚与焊点过渡区域，符合悬臂受弯结构的受力特征。使用电子白胶固定后，引脚处最大等效应力明显降低，尤其在Y方向振动时下降幅度最为显著，说明固定胶体增强了结构整体刚度，改变了惯性载荷的传递路径，使部分载荷通过胶体分担，从而减小引脚根部的弯曲应力。结果表明，直插安装结构在Y方向振动条件下最易产生应力集中，引脚根部为主要高风险区域；打胶固定后，结构应力水平明显降低。

2.2 卧式安装振动应力分析

在完成直插安装结构分析的基础上，为进一步比较不同安装方式对振动响应的影响，在保持材料参数与边界条件一致的前提下，建立卧式横放安装形式的铝电解电容器—PCB组合结构有限元模型。与直插安装类似，引脚与PCB连接区域设置固定约束；在打胶工况下，于铝电解电容器本体与PCB之间设置固体支撑结构以模拟附加约束作用。基于等效加速度法，分别在X、Y、Z方向施加10g等效加速度载荷，用以模拟不同振动方向对卧式安装结构响应的影响。图3给出了不同振动方向及是否打胶条件下引脚区域的应力分布结果。

分析结果表明，在未打胶条件下，当模拟振动方向为X、Z方向时，引脚根部出现最为显著的弯曲变形与应力集中，最大等效应力明显高于Y方向工况；Y方向整体应力水平虽相对较低，但整体应力幅值均高于直插安装形式。该现象与第1.2节所述力臂效应相一致，即卧式安装时铝电解电容器本体质心相对于焊点存在偏移，在X、Z方向加速度作用下形成更大的等效弯矩，从而导致引脚根部应力水平提升。加入电子白胶固定后，引脚

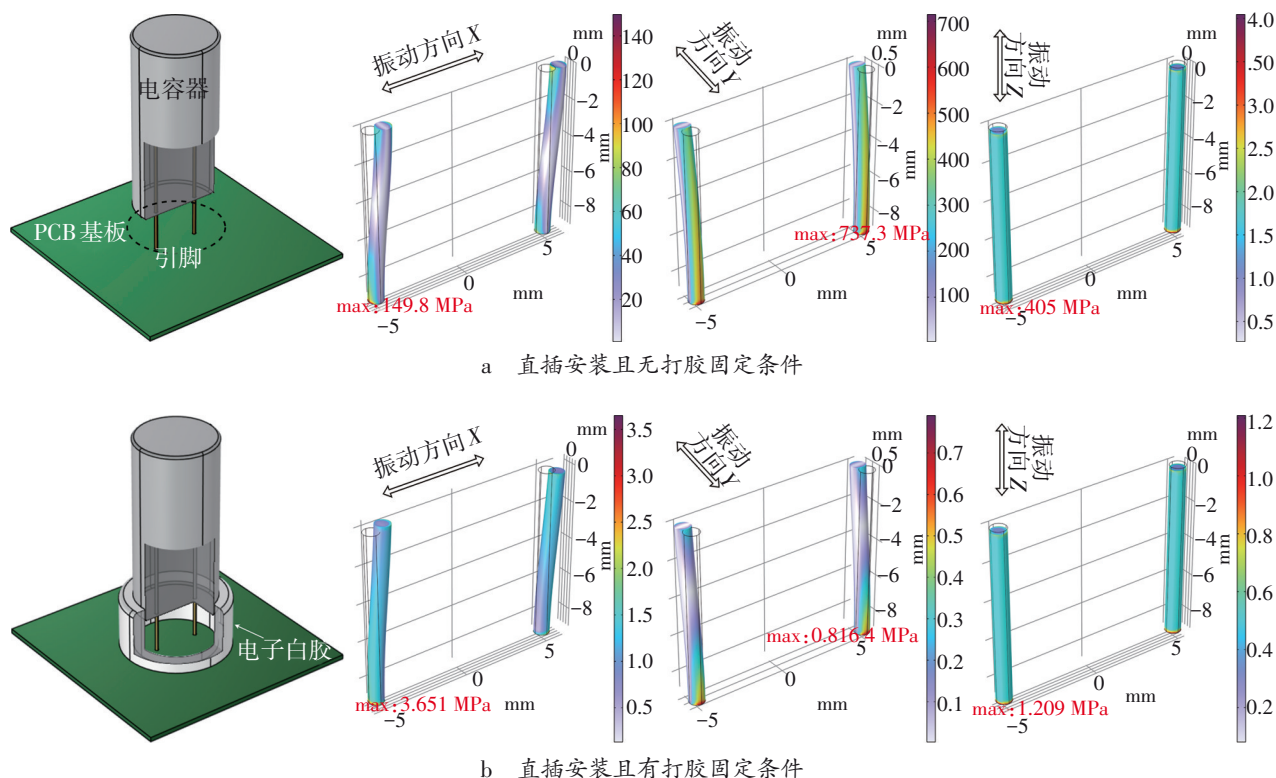


图2 直插竖放铝电解电容器在X、Y、Z振动方向时引脚的应力分布

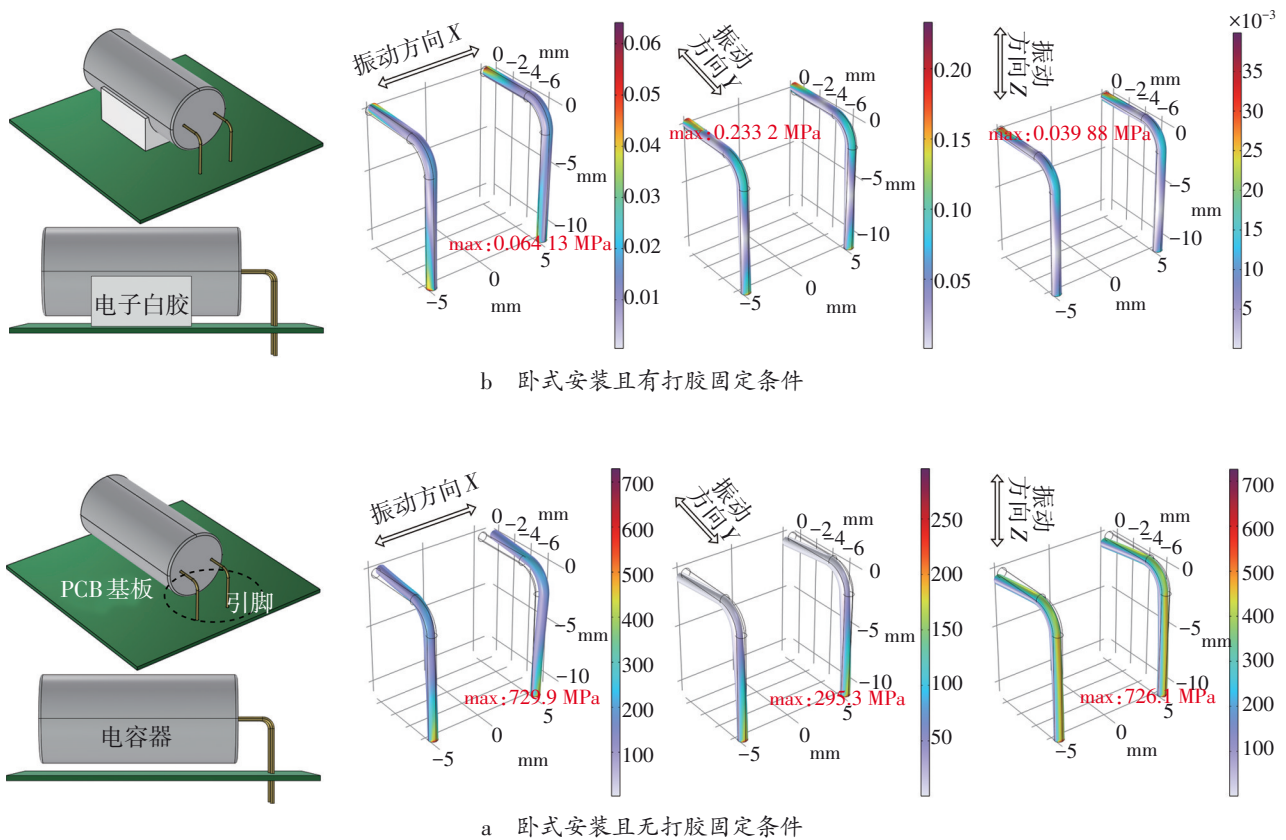


图3 卧式横放铝电解电容器在X、Y、Z振动方向时引脚的应力分布

区域最大等效应力呈数量级降低，应力集中的范围与程度均显著减小，说明附加支撑结构能够分担部分惯性载荷，减弱弯曲效应。与直插安装相比，卧式安装在未打胶固定时相同工况下的应力水平整体偏高，表明其振动结构风险相对更大；而在打胶固定时，相同工况下的应力水平整体大幅降低，此时振动结构更安全。

2.3 不同条件下最大应力对比

在前述不同安装方式振动应力分析基础上，为进一步比较不同安装方式及固定条件对振动结构响应的影响，对各工况下引脚区域的最大等效应力进行综合对比，如图4所示。由于不同工况下的应力峰值差异较大，最大值与最小值之间相差达4~5个数量级，图中纵轴采用断点模式进行分割，以便同时呈现高、低应力水平的变化趋势。整体来看，在未打胶条件下，2种安装方式均表现出明显的方向敏感性，但其主导受力方向存在差异。直插安装在侧向振动作用下应力显著升高，而卧式安装在其质心偏移方向相关的振动工况下产生更强的弯曲响应，整体应力水平普遍高于

直插结构。相比之下，直插结构在实际焊接过程中还可通过缩短引脚外露长度、靠近PCB板安装等方式进一步减小力臂，从而降低弯矩；而卧式结构在未采取附加固定措施时更易形成较大的等效弯矩，引脚根部成为潜在的高风险区域。

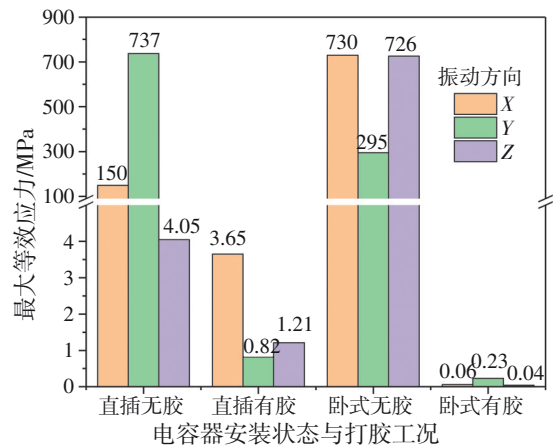


图4 各工况下引脚区域的最大等效应力对比

在打胶固定条件下，各工况下的最大等效应力均出现明显的数量级下降，应力集中程度显著减弱。胶体结构增强了电容器本体与PCB之间的

连接刚度，提高了整体约束能力。振动惯性载荷由原本集中于引脚根部的单一承载形式转变为引脚与胶体协同受力，从而降低了局部弯曲应力与应力集中程度。相关研究与专利表明，通过增加结构支撑或胶体加固措施可优化振动载荷分布并降低引脚应力水平^[13]，与本文仿真结果相一致。综合比较可知，未打胶时卧式安装结构的振动风险相对更高，而在打胶固定后，2种安装方式的应力水平均明显降低，振动可靠性得到显著改善。对于振动环境中的铝电解电容器，宜优先采用靠近PCB的直插安装形式，并适当缩短引脚外露长度；对于必须使用卧式安装的结构，则建议增加胶体支撑或附加固定措施，以降低弯曲应力集中并提高结构抗振可靠性。

2.4 无打胶固定时引脚断裂实测分析

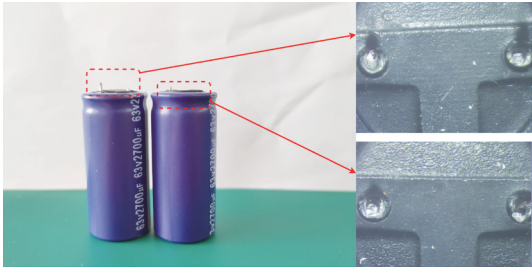
为验证有限元分析结果的合理性，对不同安装方式且无打胶固定条件下的铝电解电容器样品基于AEC-Q200-RevE试验标准进行了测试，各参数如表1所示。

表1 振动试验条件

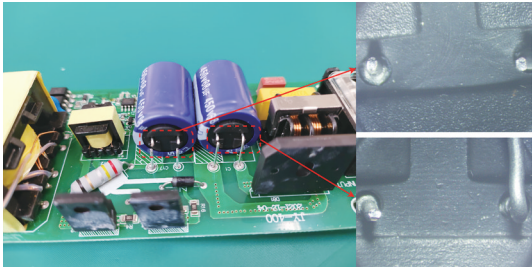
项目	条件
振动测试设备	电磁振动试验系统 苏试DC-2200-26
频率范围	10~2 000 Hz
加速度幅值	10g
振动方向	X、Y、Z
断裂观察设备	光学显微镜 Nikon SMZ745T

在振动试验设备上对电容器进行循环加载直至引脚断裂失效，并对失效样品的断裂位置进行观察，引脚断裂位置与局部放大图如图5所示。直插安装条件下，在X、Y方向振动作用时，断裂主要位于引脚与PCB连接处及靠近电容器密封胶塞的区域，如图5a所示，与有限元分析所得高应力集中区域具有一致性。卧式安装铝电解电容器在Z方向振动条件下，引脚与PCB连接处磨损严重，断裂多出现在引脚弯折过渡位置，即引脚由垂直段向水平段转折的部位，如图5b所示。尽管弯折过渡区域并非绝对应力峰值位置，但由于几何不连续性与力臂效应共同作用，该区域仍易形成局部应力集中，成为潜在薄弱部位。上述断裂位置分布特征与有限元分析所得高应力集中区域具有

良好空间对应关系，进一步验证了等效加速度分析方法在识别振动薄弱部位方面的工程适用性。



a 直插安装铝电解电容器样品引脚断裂位置与局部放大图



b 卧式安装铝电解电容器样品引脚断裂位置与局部放大图
图5 直插与卧式安装条件下，铝电解电容器样品引脚断裂位置对比

3 结束语

基于等效加速度法对直插与卧式2种安装形式铝电解电容器的振动响应进行了有限元分析。结果表明，未打胶条件下两种结构均具有明显方向敏感性，直插结构在侧向振动时应力升高明显，而卧式结构受质心偏移影响整体应力水平更高，引脚根部为主要风险区域。引入胶体固定后，各工况下应力均出现数量级下降，应力集中显著减弱，说明附加支撑可有效分担弯曲载荷、提升结构稳定性。综合来看，减小引脚等效力臂并增加合理结构支撑，可有效降低振动应力集中，提高铝电解电容器的抗振可靠性。

参考文献：

[1] 郝树福, 胡勇, 唐仁杰. 铝电解电容器振动失效机理分析和改进措施研究 [J]. 电子制作, 2022, 30 (16): 92-94.
[2] 孙旭松. 电子元器件的失效机理分析 [J]. 仪表技术, 2012 (5): 49-50; 54.
[3] 李洪伟, 王家乐, 郭子如, 等. 冲击载荷下液态铝电解电容失效规律研究 [J]. 安徽理工大学学报 (自然科学版), 2024, 44 (2): 36-41.
[4] AEC-Q200-RevE Stress test qualification for passive com-

- ponents [S].
- [5] 胡彬, 孙韵韵, 巫世晶. 随机载荷下电路板振动特性与引脚应力优化方法研究 [J]. 强度与环境, 2025, 52 (1): 17-25.
- [6] 王海超, 文奕格, 费义鹏, 等. 航天电子产品 CQFP 封装器件加固工艺可靠性研究 [J]. 宇航材料工艺, 2025, 55 (4): 81-86.
- [7] 尹泉雄, 朱昭君, 聂磊, 等. CAK45 型片式钽电容力学加固工艺可靠性研究 [J/OL]. 电子与封装, 2025-12-12. <https://link.cnki.net/doi/10.16257/j.cnki.1681-1070.2026.0061>.
- [8] 张金豹, 胡铮, 张金乐, 等. 疲劳 S-N 曲线预测模型进展综述 [J]. 科学技术与工程, 2023, 23 (13): 5390-5411.
- [9] 孙炜. 插装型电子元器件强化振动试验疲劳仿真研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2003.
- [10] 刘昌儒, 于鹏, 贺帅, 等. 印制电路板及元器件引脚振动分析 [J]. 机电工程技术, 2020, 49 (5): 32-34.
- [11] 朱秋菊, 张开创, 潘自民, 等. 宇航单机元器件随机振动疲劳失效分析 [J]. 数字技术与应用, 2019, 37 (12): 202-203.
- [12] 于海生. 多轴低周疲劳载荷下应用 von Mises 及 Tresca 准则的寿命预测研究 [J]. 机械强度, 2000 (4): 253-255.
- [13] 李胜, 彭金霖, 谢玉婷, 等. 一种铝电解电容器抗振动性能的仿真方法: 202410823658.6 [P/OL]. 2024-10-15 [2026-02-18]. <https://d.wanfangdata.com.cn/patent/CN202410823658.6>.