

热像仪电路板螺钉紧固扭矩量化方法

代进伦，赵垒，张宏坤，李晓斌，王璨，付朝波，蔡顺文，杨社腾，王春兴，韩强
(昆明北方红外技术股份有限公司, 云南 昆明 650223)

摘要: 红外热像仪中 PCB 电路板螺钉紧固是热像仪装调的关键过程之一, 其装配质量直接影响红外热像仪中电路板性能, 从而影响成像质量。首先, 提出了红外热像仪电路板螺钉紧固扭矩量化方法; 其次, 通过量化方法计算得到电路板螺钉的紧固理论扭矩值; 最后, 结合量化方法获得的紧固理论扭矩值, 使用 ANSYS Workbench 进行有限元仿真分析, 结果验证了螺钉理论扭矩值载荷作用下电路板的安全性。本文开展红外热像仪电路板螺钉紧固扭矩量化方法研究, 可将红外热像仪 PCB 电路板装配过程中螺钉紧固扭矩值进行量化, 有效提升红外热像仪各电路组件的装配质量, 提高整机的稳定性。

关键词: 红外热像仪; PCB 电路板; 螺钉紧固扭矩; 量化方法; 有限元分析

中图分类号: TN216 文献标识码: A 文章编号: 1001-8891(2024)12-1440-08

Quantitative Method of the Tightening Torque About Circuit Board Screws in Thermal Imager

DAI Jinlun, ZHAO Lei, ZHANG Hongkun, LI Xiaobin, WANG Can, FU Chaobo, CAI Shunwen,
YANG Sheteng, WANG Chunxing, HAN Qiang
(Kunming North Infrared Technology Co. Ltd., Kunming 650223, China)

Abstract: Fastening of PCB circuit board screws is a key process in infrared thermal imager installation and adjustment. Its assembly quality directly affects the performance of the circuit board and image quality in an infrared thermal imager. First, a quantitative method for tightening the torque of the circuit board screws in an infrared thermal imager was proposed. The theoretical tightening torque of the circuit board screws was then calculated using the proposed method. Finally, combined with the tightening torque value obtained using the proposed quantitative method, ANSYS Workbench was used for the finite element simulation analysis. The results verify the safety of the circuit board under a load of the theoretical screw torque value. This study investigates a quantitative method of an infrared thermal imager circuit board, enabling the quantification of the screw tightening torque value during the assembly process of an infrared thermal imager PCB circuit board. This improved the assembly quality of each circuit component of the infrared thermal imager and the stability of the entire machine.

Key words: infrared thermal imager, PCB circuit board, tightening torque of screws, quantitative method, finite element analysis

0 引言

红外热像仪是通过对目标物的红外辐射探测, 并通过信号处理、光电转换等技术手段, 将目标物的温度分布转换成可视图像的设备。红外热像仪中包含信号处理电路、成像电路、伺服电路、电源电路等电路组件 (PCB 电路板)。PCB 电路板螺钉紧固是热像仪装调的关键过程之一, 其装配质量直接影响各电路组

件受冲击激励或随机振动时的稳定性, 从而影响红外热像仪的整机性能、成像质量。

近年来, 许多学者就 PCB 电路板紧固可靠性问题开展了相关研究, 胡超^[1]等利用 ANSYS 有限元软件对印制电路板进行有限元建模并对其进行冲击响应及随机振动仿真测试。李本^[2]等利用 ANSYS 仿真软件, 对某火控系统电路的 PCB 板进行了一系列动力学特性有限元分析, 找到了 PCB 板的共振点及易损点的位

收稿日期: 2022-08-17; 修订日期: 2022-12-23。

作者简介: 代进伦 (1994-), 男, 云南昭通人, 工程师, 硕士, 主要从事红外热像仪技术研究。E-mail: 1138895867@qq.com。

通信作者: 赵垒 (1995-), 男, 云南昭通人, 工程师, 硕士, 主要从事红外热像仪技术研究。E-mail: 1481620692@qq.com。

置。王文博^[3]等利用 ANSYS APDL 对机载 PCB 板进行建模仿真, 提出了转换约束安装方式。巫发茂^[4]等基于 ANSYS Workbench 仿真平台对某机载电子设备进行模态分析和随机振动加速度 PSD 模拟分析, 说明了建模与仿真的合理性。刘昌儒^[5]等使用 MSC. Patran 建造有限元模型并分析了印制电路板的基频以及正弦振动与随机振动的加速度和应力响应。鲍丙豪^[6]等利用 ABAQUS 软件对印制电路板进行了模态分析, 发现固定方式及芯片分布位置对 PCB 板的可靠性影响较大。王琳^[7]等对电路板进行模态分析, 通过消除结构装配间隙、增加安装螺钉, 并进行有限元分析, 结果证明该措施可提高产品的可靠性。目前, 国内外学者关于 PCB 电路板紧固问题的研究主要集中在安装方式、安装可靠性分析、易损点分析等方面, 关于 PCB 电路板螺钉紧固扭矩方面的研究较少。

PCB 电路板是电子元器件的主要载体, 结构稳定性直接影响电信号传输及电子系统的稳定性^[8]。在生产红外热像仪过程中, 热像仪的工艺文件一般只描述了 PCB 电路板紧固螺钉的简要安装过程、使用标准件型号、点胶方法等, 对于电路板螺钉紧固程度未作明确规定, 导致不同装调人员安装 PCB 电路板的紧固程度差异大, 使产品存在一定的质量隐患。因此, 有必要通过理论计算、有限元仿真分析等手段确定安装 PCB 电路板螺钉的扭矩值, 并使用预置式扭矩扳手设定相应扭矩值紧固电路板螺钉, 以避免不同装调人员螺钉紧固一致性差的问题, 形成标准化紧固扭矩值, 提升产品装调质量。

1 PCB 电路板螺钉紧固扭矩量化方法

如图 1 所示为红外热像仪 PCB 电路板螺钉紧固示意图, 主要包含螺钉、垫圈(是否使用垫圈据实际要求而定)、PCB 电路板、电路板承载体, PCB 电路板为通孔连接件, 电路板承载体为螺纹连接件, PCB 电路板通过螺钉、垫圈紧固于电路板承载体上, 电路板承载体为光机平台、电路板垫柱等机加零件。

红外热像仪中电路板的 PCB 印制板材料为覆箔板, 覆箔板由绝缘基材两面覆铜箔构成, 绝缘基材是一种环氧树脂和无碱玻璃布结合而成的电工绝缘玻璃布层压板。光机平台、电路板垫柱等机加件的材料均为铝合金, 螺钉材料为不锈钢, 垫片材料为不锈钢或铜合金。因铝合金、不锈钢、铜合金材料弹性极限均远大于覆箔板的弹性极限, 故光机平台、垫柱、螺钉、垫片的弹性极限也远大于 PCB 电路板的弹性极限。

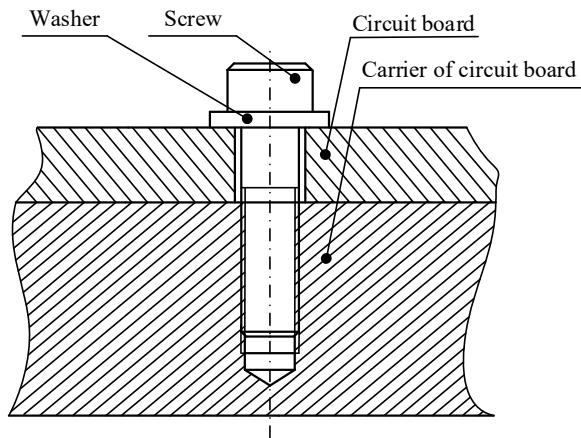


图 1 电路板螺钉紧固示意图

Fig.1 Schematic diagram of circuit board screw fastening

PCB 电路板安装应确保电路板不发生较大的塑性变形或只发生弹性变形。根据材料弹塑性理论^[9], 在电路板的安装过程中, 若电路板只发生弹性变形或仅发生较小的塑性变形, 则弹性极限更大的光机平台、垫柱、螺钉、垫片只会发生弹性变形。根据 GB/T 16823.2-1997《螺纹紧固件紧固通则》^[10], 弹性区内螺钉紧固扭矩与预紧力的关系为:

$$T_f = T_s + T_w = K F_f d \quad (1)$$

$$K = \frac{1}{2d} \left(\frac{P}{\pi} + \mu_s d_2 \sec \alpha' + \mu_w D_w \right) \quad (2)$$

$$T_s = \frac{F_f}{2} \left(\frac{P}{\pi} + \mu_s d_2 \sec \alpha' \right) \quad (3)$$

$$T_w = \frac{F_f}{2} \mu_w D_w \quad (4)$$

式中: T_f 为紧固扭矩; T_s 为螺纹扭矩; T_w 为支承面扭矩; K 为扭矩系数; F_f 为预紧力; d 为螺纹公称直径; P 为螺距; μ_s 为螺纹摩擦系数; d_2 为螺纹中径; α' 为螺纹牙测角; μ_w 为支承面摩擦系数; D_w 为支承面摩擦扭矩的等效直径。

紧固 PCB 电路板时, 接触的支承面为圆环状, 则有:

$$D_w = \frac{2}{3} \times \frac{d_w^3 - d_h^3}{d_w^2 - d_h^2} \quad (5)$$

式中: d_w 为接触的支承面外径; d_h 为接触的支承面内径。

由式(1)、(2)、(5)可得螺钉紧固扭矩 T_f 为:

$$T_f = \frac{1}{2} \left(\frac{P}{\pi} + \mu_s d_2 \sec \alpha' + \frac{2\mu_w(d_w^3 - d_h^3)}{3(d_w^2 - d_h^2)} \right) F_f \quad (6)$$

图2所示为安装某型热像仪多功能处理电路板示意图,图中标识出的6处紧固件为螺母M3、波形垫圈和平垫圈。其中安装多功能处理电路板的紧固扭矩值为55cN·m的可靠性已在批量产品上得到验证。

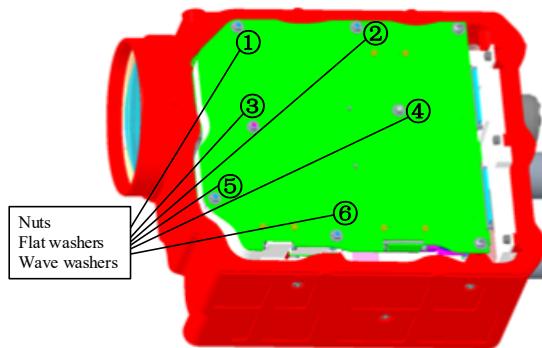


图2 红外热像仪多功能处理电路板紧固示意图

Fig.2 Multi-functional processing circuit board screw fastening diagram of infrared thermal imager

图3为电路板紧固M3螺母的示意图,红外热像仪PCB电路板材料具有一致性,图3中的电路板支承面所受的预紧压力可推广应用到其他型号热像仪的电路板紧固。若能获得在紧固扭矩55cN·m作用下,M3螺母通过平垫圈施加在图3中电路板支承面上的预紧压力值,便可计算得出适用于其他型号热像仪电路板的紧固扭矩。

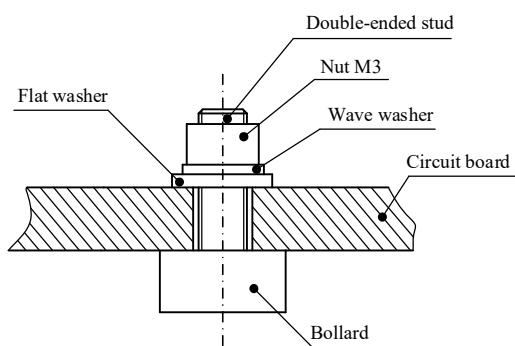


图3 PCB电路板紧固M3螺母示意图

Fig.3 Schematic diagram of M3 nut fastening for PCB board

图2中多功能处理电路板支承面的预紧压力通过压力传感器实验获得,方法如下:

如图3未紧固螺母M3前,在平垫圈与多功能处理电路板间放入压力传感器(薄片),以55cN·m的扭矩紧固双头螺柱,读取压力传感器数值M(单位,g),通过下式计算得出多功能处理电路板支承面单位面积预紧力值 P_1 , (单位, N/mm²):

$$P_1 = \frac{Mg}{1000A_1} \quad (7)$$

式中: g 为重力加速度,取9.8 m/s²; A_1 为压力传感器受力区面积(单位: mm²)。

如图4所示,将压力传感器放入平垫圈与多功能处理电路板之间,直至传感器保护环接触到双头螺柱外螺纹,平垫圈外径和电路板安装通孔构成的圆环与传感器检测区的重合区域为传感器受力区,经计算得压力传感器受力区面积 A_1 为4.21 mm²。

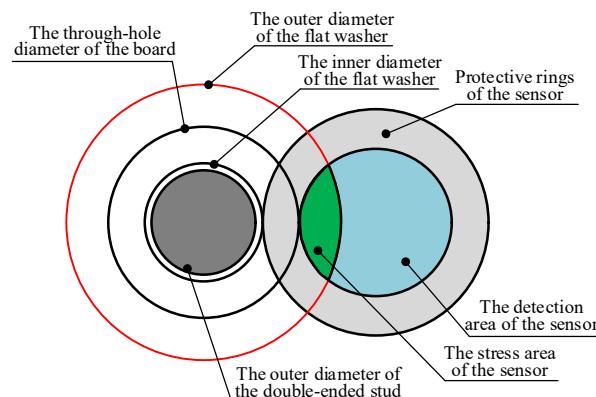


图4 压力传感器检测示意图

Fig.4 Schematic diagram of pressure sensor detection

用3个同型号的压力传感器分别测量6颗螺母M3紧固后的M值,获得18组M值见表1所示,取18组值的平均值即为M值。

表1 M值汇总

Table 1 M values

Nut no.	M value/g		
1	10780.00	10970.00	11900.00
2	11060.00	12060.00	11100.00
3	10820.00	11320.00	10600.00
4	9893.00	9627.00	10730.00
5	11010.00	10140.00	9984.00
6	10560.00	9864.00	10190.00
Average value	10687.17	10663.50	10750.67

计算M值:

$$M=10700.44(g)。$$

将M、 A_1 代入式(7)中,可得 P_1 为24.9 N/mm²。多功能处理电路板支承面预紧力 F_1 为:

$$F_1 = \frac{P_1 \pi (d_{w1}^2 - d_{h1}^2)}{4} \quad (8)$$

支承面外径 d_{w1} 为6 mm、支承面内径 d_{h1} 为4 mm、 P_1 为24.9 N/mm²,代入式(8)中得 F_1 为363.45 N;多功能处理电路板支承部分覆铜,垫片材料为铝合金,

查找材料摩擦系数表取支承面摩擦系数 μ_{W1} 为0.45, 紧固扭矩 T_f 为55 cN·m、螺距 P_0 为0.5 mm、螺纹中径 d_2 为2.68 mm、螺纹牙测角 α' 为30°, 将以上各值代入(6)中可得螺纹摩擦系数 μ_{s1} 为0.12。

紧固件、电路板承载体的材料性质是影响螺纹摩擦系数的主要因素, 应用于多功能处理电路板紧固的紧固件与应用于PCB电路板紧固的螺钉、主壳体与PCB电路板承载体的材料类型一致, 因此螺纹摩擦系数 μ_{s1} 可应用于PCB电路板的紧固扭矩计算。

综上分析可得, PCB电路板的紧固扭矩 T_f 为:

$$T_f = \frac{P_1 \pi (d_w^2 - d_h^2)}{8} \left(\frac{P}{\pi} + 0.12 d_2 \sec \alpha' + \frac{2 \mu_w (d_w^3 - d_h^3)}{3(d_w^2 - d_h^2)} \right) \quad (9)$$

式中: P_1 为24.9 N/mm²; d_w 为接触的支承面外径; d_h 为接触的支承面内径; P 为螺距; d_2 为螺纹中径; α' 为螺纹牙测角; μ_w 为支承面摩擦系数。

本文基于紧固扭矩量化方法, 还计算了PCB电路板常用螺钉M4、M3、M2.5及M2加平垫片(GB/T 848-2002)^[11]、鞍形垫片(GB/T 860-1987)^[12]及无垫片状态下的紧固扭矩值。红外热像仪PCB电路板螺钉紧固扭矩量化方法计算的扭矩值见表2所示。

表2 红外热像仪PCB电路板螺钉紧固扭矩量化方法计算的扭矩值

Table 2 The torque value of PCB board screw fastening torque calculated by quantitative method of infrared thermal

Type	Hexagonal cylindrical head screw (GB/T70.1-2008)	Contact surfaces		Designed through-hole diameter of the board d/mm	Torque value $T/(\text{cN}\cdot\text{m})$	Torque value $T/(\text{cN}\cdot\text{m})$ (Integer)
		Inner diameter d_h/mm	Outer diameter d_w/mm			
Flat washers (GB/T 848-2002)	M4	6.0	8.0	6.0	104.5875	105
	M3	3.5	6.0	3.5	63.0604	64
	M2.5	2.9	5.0	2.9	36.7825	37
	M2	2.5	4.5	2.5	27.1787	28
Saddle washers (GB/T 860)	M4	6.0	8.0	6.0	104.5875	105
	M3	3.5	6.0	3.5	63.0604	64
	M2.5	2.9	5.0	2.9	36.7825	37
	M2	2.5	4.5	2.5	27.1787	28
No washers (Screw fastening)	M4	5.0	7.0	5.0	79.1751	80
	M3	3.5	5.5	3.5	45.5325	46
	M2.5	2.9	4.5	2.9	24.7650	25
	M2	2.4	3.8	2.4	15.1614	16

本章首先介绍了PCB电路板螺钉紧固扭矩量化方法; 然后根据量化方法对不同大小螺钉使用平垫片、鞍形垫片和无垫片状态下对应的扭矩值进行了计算。

2 PCB电路板螺钉紧固扭矩有限元仿真分析

本章基于ANSYS Workbench软件对红外热像仪PCB电路板紧固扭矩进行有限元仿真分析。首先, 对有限元模型进行描述; 然后, 定义PCB电路板、螺钉、垫片、电路板支撑件的材料属性; 其次, 对PCB电路板紧固扭矩有限元模型施加理论扭矩值载荷并设置边界条件; 最后, 对PCB电路板紧固扭矩进行螺纹预紧力有限元分析。

2.1 有限元模型

模型简化是有限元分析的核心^[12], 由于红外热像仪中的信号处理电路、成像电路、伺服电路等电路组

件的电路板安装孔不一样, 为了简化模型, 本文PCB板上同一型号的螺钉、垫片等只仿真一个位置, 简化后的PCB电路板紧固几何模型建立的有限元模型如图5所示, 支撑板与PCB板的接触面如图6所示。

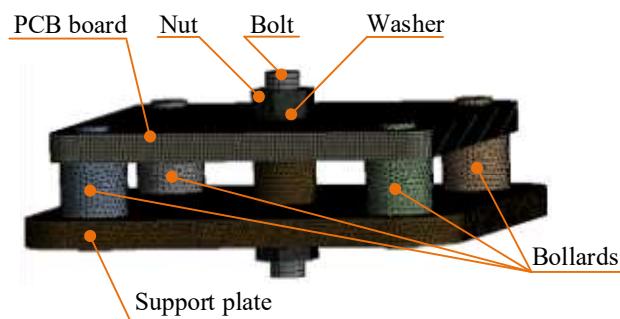


图5 简化的PCB电路板紧固有限元模型

Fig.5 Simplified PCB fastening finite element model

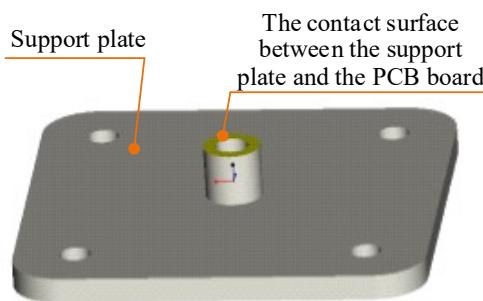


图 6 支撑板与 PCB 电路板接触面结构示意图

Fig 6 Schematic diagram of contact surface between support board and PCB board

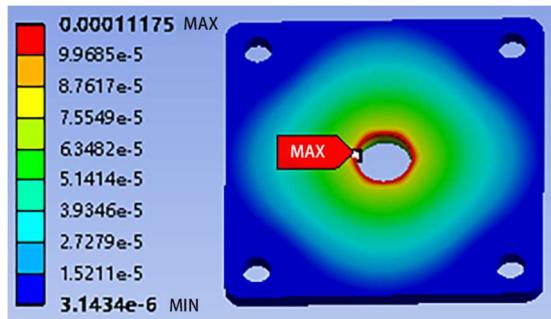
对于 PCB 电路板采用相对较细的网格划分, 单元尺寸为 0.3 mm; 对支撑板、垫柱、螺钉采用相对较粗的网格划分, 单元尺寸为 0.5 mm; 而对于尺寸较小的零件, 采用更细的网格划分方式, 单元尺寸位 0.15 mm。通过网格划分后, 平均单元质量为 0.88423, 网格划分质量较好。

2.2 材料属性

红外热像仪中使用的 PCB 电路板材料为覆箔板, 螺钉、螺母、垫片等为结构钢 (45), 垫柱材料为黄铜 (H62) 或硬铝 (LY12), 支撑板材料也为硬铝。各材料属性见表 3 所示。

表 3 材料属性
Table 3 The properties of material

Materials	Density ρ /(kg/m ³)	Elastic modulus E /MPa	Poisson's ratio μ	Tensile (break) strength σ_b /MPa
PCB	6.5	18×10^3	0.153	28~91
Structural steel	7.8	206×10^3	0.260	600
Brass	8.5	110×10^3	0.340	200
Duralumin	2.8	70.6×10^3	0.330	450



(a) M4 螺钉加垫片状态下的 PCB 变形
(a) PCB deformation in the M4 screw with washer

2.3 载荷及边界条件

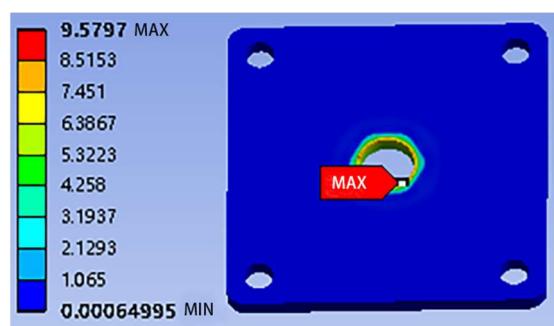
红外热像仪 PCB 电路板螺钉施加的紧固扭矩值载荷见表 2 (取整值) 所示。

3 结果与分析

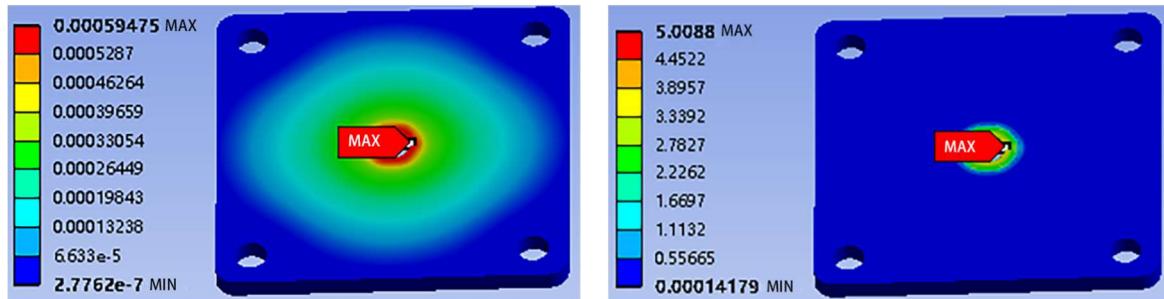
本文采用 ANSYS Workbench 有限元仿真分析软件对红外热像仪中 PCB 电路板进行有限元分析。根据表 2 中的 PCB 电路板理论紧固扭矩值施加载荷, 平垫片 (GB/T 848-2002)^[11] 和鞍形垫片 (GB/T 860-1987)^[12] 的螺钉紧固扭矩值一致, 后续有限元仿真分析只考虑有垫片 (平垫片 (GB/T 848-2002)、鞍形垫片 (GB/T 860-1987) 和无垫片两种状态。

图 7(a)~(h) 分别为 M4、M3、M2.5 及 M2 螺钉有垫片状态下 PCB 电路板有限元分析的最大变形及最大等效应力云图。其中, 最大变形及最大等效力发生位置均在 PCB 电路板通孔附近, 实验结果见表 4 所示。

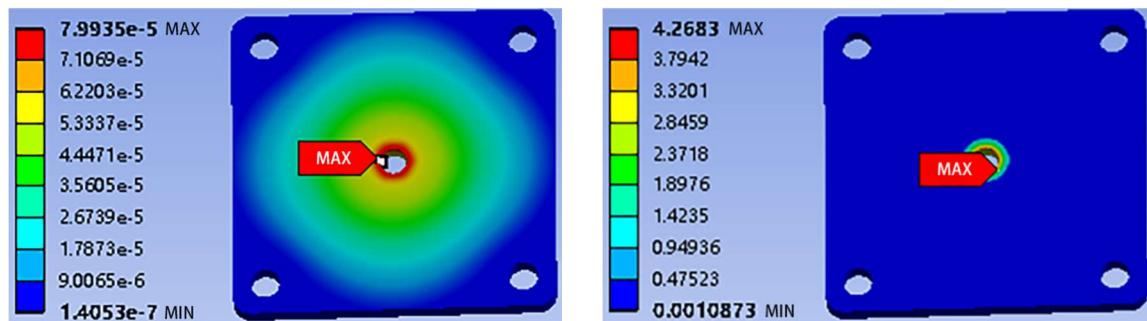
图 8(a)~(h) 分别为 M4、M3、M2.5 及 M2 螺钉无垫片状态下 PCB 电路板有限元分析的最大变形及最大等效应力云图。其中, 最大变形及最大等效力发生位置均在 PCB 电路板通孔附近, 实验结果见表 4 所示。



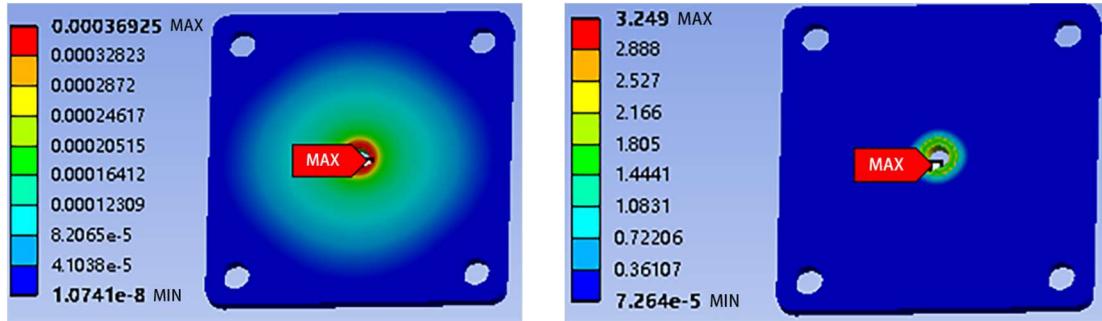
(b) M4 螺钉加垫片状态下的 PCB 等效应力
(b) Equivalent stress of a PCB in the M4 screw with washer



(c) PCB deformation in the M3 screw with washer (d) Equivalent stress of a PCB in the M3 screw with washer



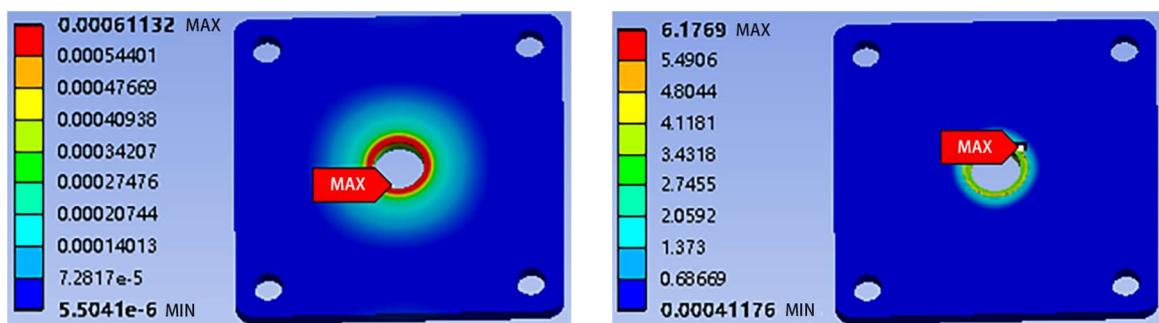
(e) PCB deformation in the M2.5 screw with washer (f) Equivalent stress of a PCB in the M2.5 screw with washer



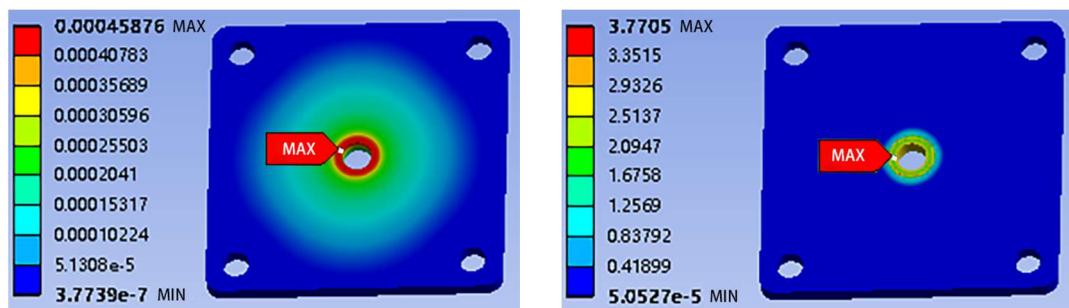
(g) PCB deformation in the M2 screw with washer (h) Equivalent stress of a PCB in the M2 screw with washer

图 7 有垫片状态 PCB 板紧固扭矩仿真云图

Fig 7 Simulation cloud pictures of tightening torque of PCB board with washer



(a) PCB deformation in the M4 screw without washer (b) Equivalent stress of a PCB in the M4 screw without washer



(c) M3 螺钉无垫片状态下的 PCB 变形
(d) M3 螺钉无垫片状态下的 PCB 等效应力
(e) PCB deformation in the M3 screw without washer
(f) Equivalent stress of a PCB in the M3 screw without washer
(c) M2.5 螺钉无垫片状态下的 PCB 变形
(d) M2.5 螺钉无垫片状态下的 PCB 等效应力
(e) PCB deformation in the M2.5 screw without washer
(f) Equivalent stress of a PCB in the M2.5 screw without washer
(g) M2 螺钉无垫片状态下的 PCB 变形
(h) M2 螺钉无垫片状态下的 PCB 等效应力
(g) PCB deformation in the M2 screw without washer
(h) Equivalent stress of a PCB in the M2 screw without washer

图 8 无垫片状态 PCB 板紧固扭矩仿真云图

Fig.8 Simulation cloud pictures of tightening torque of PCB board without washer

表 4 PCB 电路板紧固扭矩有限元仿真分析结果

Table 4 The results of finite element simulation analysis of fastening torque of PCB board

Type	Hexagonal cylindrical head screw	Torque value $T/(cN\cdot m)$	Maximum deformation (PCB) /mm	The maximum equivalent stress (PCB) /MPa
Flat washers (GB/T848-2002) /Saddle washers (GB/T860)	M4	105	1.1175E-04	9.5797
	M3	64	5.9475E-04	5.0088
	M2.5	37	7.9935E-05	4.2683
	M2	28	3.6925E-04	3.2490
No washers	M4	80	6.1132E-04	6.1769
	M3	46	4.5876E-04	3.7705
	M2.5	25	3.5864E-04	2.8658
	M2	16	3.5820E-04	2.6685

通过对常用的 M4、M3、M2.5、M2 螺钉有垫片和无垫片两种状态下电路板紧固扭矩值进行有限元分析, 得到各状态下的电路板的最大变形量和最大等效应力。仿真实验结果表明电路板发生微小形变, 对电路板性能影响几乎忽略不计; 电路板的最大等效应力均小于电路板的抗拉(断裂)强度 σ_b 。所以, 施加量化方法计算的理论扭矩值载荷情况下, 电路板不会发生应力集中导致电路板产生大变形或断裂, 由此验证了红外热像仪电路板螺钉紧固扭矩量化方法计算得到的螺钉紧固扭矩值是可行的且满足电路板安全性要求。

4 结论

本文开展红外热像仪中电路板螺钉紧固扭矩量化方法研究, 首先, 通过量化方法结合压力传感器测试实验得到电路板螺钉的理论紧固扭矩值; 然后, 基于量化方法确定的电路板螺钉紧固扭矩值, 运用 ANSYS Workbench 对电路板螺钉紧固扭矩值进行有限元分析。结果表明, 量化方法确定的电路板螺钉紧固扭矩值是可行的且满足电路板安全性要求, 该方法也可应用至相关领域的电路板螺钉紧固。

通过开展红外热像仪电路板螺钉紧固扭矩量化方法研究, 可将红外热像仪 PCB 电路板装配过程中螺钉紧固扭矩值进行量化, 避免不同装调人员螺钉紧固扭矩值一致性差的问题, 能够形成标准化电路板螺钉紧固扭矩值, 有效提升红外热像仪各电路组件的装配质量、提高整机稳定性。

参考文献

- [1] 胡超, 刘芳, 周嘉诚, 等. 基于模态分析的印制电路板力学性能研究[J]. 电子元件与材料, 2021, 40(6): 597-602.
HU Chao, LIU Fang, ZHOU Jiacheng, et al. Research on mechanical properties of printed circuit boards based on modal analysis[J]. *Electronic Components & Materials*, 2021, 40(6): 597-602.
- [2] 李本, 任国全, 李冬伟, 等. 某火控计算机印制板动力学特性仿真试验分析[J]. 火力与指挥控制, 2014(5): 168-171.
LI Ben, REN Guoquan, LI Dongwei, et al. Simulation test analysis of dynamic characteristics of a fire control computer printed board[J]. *Fire Control & Command Control*, 2014(5): 168-171.
- [3] 王文博. 机载印制电路板振动特性与优化设计研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2018.
WANG Wenbo. Research on Vibration Characteristics and Optimization Design of Airborne Printed Circuit Boards[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2018.
- [4] 巫发茂, 蒋龙, 王健, 等. 基于 ANSYS Workbench 某机载电子设备随机振动响应分析[J]. 现代电子技术, 2016, 39(10): 96-93, 103.
WU Famao, JIANG Long, WANG Jian, et al. Random vibration response analysis of an airborne electronic device based on ANSYS workbench[J]. *Modern Electronics Technique*, 2016, 39(10): 96-93, 103.
- [5] 刘昌儒, 于鹏, 贺帅, 等. 印制电路板与元器件引脚振动分析[J]. 机电工程技术, 2020, 49(5): 32-34.
LIU Changru, YU Peng, HE Shuai, et al. Pin vibration analysis of printed circuit boards and components[J]. *Mechanical & Electrical Engineering Technology*, 2020, 49(5): 32-34.
- [6] 鲍丙豪, 赵洪利, 龚勇镇, 等. 基于 ABAQUS 的印制电路板组件模态研究[J]. 机械设计与制造, 2009(4): 122-124.
BAO Binghao, ZHAO Hongli, GONG Yongzhen, et al. Modal study of printed circuit board components based on ABAQUS[J]. *Mechanical Design and Manufacturing*, 2009(4): 122-124.
- [7] 王琳, 吴高峰. 一种提高电子设备振动环境适应性的优化设计[J]. 工业控制计算机, 2018, 31(1): 134-135, 143.
WANG Lin, WU Gaofeng. An optimized design to improve the environmental adaptability of electronic equipment to vibration[J]. *Industrial Control Computer*, 2018, 31(1): 134-135, 143.
- [8] 顾清华, 马志冬, 井石滚, 等. 基于 3PGS 和 GPRS 的露天矿出入车辆运输智能管控系统[J]. 计算机应用与软件, 2015, 32(6): 72-75.
GU Qinghua, MA Zhidong, JING Shigun, et al. Intelligent management and control system for vehicle transportation in and out of open-pit mine based on 3PGS and GPRS[J]. *Computer Applications and Software*, 2015, 32(6): 72-75.
- [9] 秦飞, 吴斌. 弹性与塑性理论基础[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
QIN Fei, WU Bin. *Theoretical Foundations of Elasticity and Plasticity*[M]. Beijing: Science Press, 2011.
- [10] 国家技术监督局. 螺纹紧固件紧固通则: GB/T 16823.2-1997[S]. [1997-05-29].
State Bureau of Technical Supervision General Rules of Tightening for Threaded Fasteners: GB/T 16823.2-1997[S]. [1997-05-29].
- [11] 机械科学研究院. 小垫圈 A 级: GB/T 848-2002[S]. [2003-06-01].
China Academy of Machinery Science and Technology. Small series--Product Grade A: GB/T 848-2002[S]. [2003-06-01].
- [12] 机械委标准所. 鞍型弹性垫圈: GB/T 860-1987[S]. [1987-02-05].
Standard Institute of the Ministry of Machinery. Curved Spring Washers: GB/T 860-1987[S]. [1987-02-05].