

IGBT 功率模块抗振性能试验的夹具振动特性分析

尚效周^{1,2}, 薛进纬^{1,2}, 莫非^{1,2}, 祝德春^{1,2}

(1. 南瑞集团公司 国网电力科学研究院, 江苏 南京 211106;
2. 国电南瑞科技股份有限公司, 江苏 南京 211106)

摘要:为测试真实安装状态的风电变流器 IGBT 功率模块在 2~200 Hz 频率范围内的抗振性能,设计了 IGBT 功率模块的抗振性能试验夹具;基于 ANSYS 软件计算了不同材料、结构形式和加工成型方式夹具的固有频率及振型,获得了一种质量较轻、成本较低的振动试验夹具结构及其成型方案。研究成果对试验对象垂直方向偏心安装的振动试验夹具刚度设计具有一定的参考意义。

关键词:功率模块;振动试验;振动夹具;模态分析;固有频率

中图分类号:TB123 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2020)06-0052-04

Analysis of Fixture Vibration Characteristics in Test for IGBT Power Module Anti-vibration Performance

SHANG Xiaozhou^{1,2}, XUE Jinwei^{1,2}, MO Fei^{1,2}, ZHU Dechun^{1,2}

(1. State Grid Electric Power Research Institute, NARI Group corporation, Nanjing 211106, China;
2. NARI Technology Co., Ltd., Nanjing 211106, China)

Abstract: To put to a test for the anti-vibration performance of IGBT power module of the installed wind power converter within the range of 2~200 Hz frequency, the fixture for the test for the anti-vibration performance of IGBT power module is designed, based on ANSYS software, the natural frequencies and vibration modes of jigs with different materials, structures and processing modes are calculated, and a kind of low-weight and low-cost vibration test fixture structure and its forming scheme are obtained, the research results can give a reference to the design of the stiff fixture which is used to be installed eccentrically in the vertical direction.

Keywords: power module; vibration testing; vibration fixture; modal analysis; natural frequency

0 引言

近年来,电力电子设备在我国电网装备的应用中发展迅速,其中 IGBT 功率模块是电力电子设备的核心部件,是影响设备质量和寿命的关键部件。功率模块在运输过程中,会受到不同程度的振动与冲击。为了检验功率模块在振动冲击环境下的可靠性,目前通常用软件仿真分析的方法模拟真实环境工况进行验证,确保模块在真实环境下可靠、稳定地工作。振动夹具是连接模块与试验台的中间机构,能有效把振动台的载荷传递给试件,通过测试 IGBT 模块的振动响应,理论判定模块的可靠性。夹具的结构设计合理与否关系到试验的成败,关系到 IGBT 功率模块可靠性验证失真程度的大小^[1]。

本文根据 IGBT 功率模块在垂直方向上、位于安装板上、下边沿的安装孔螺栓限位、壁挂偏心安装的要求,设计了相应的夹具结构方案,通过对不同材料、不同结构形式和不同成型方式的夹具固有振动频率的仿真计算,并对夹具的质量、成本进行了分析,形成了最终的夹具设计方案。

该方案及其设计方法对类似试验对象垂直方向、偏心安装的振动试验夹具刚度设计具有一定的参考意义。

1 夹具的结构设计

功率模块的力学模拟试验环境和振动夹具的设计以及振动试验的控制方法密切相关,假设在理想状态下振动夹具的作用是能够使功率模块的力学参数准确、真实、清晰地传递到模块上,既不存在试验放大(过试验),也不存在试验考核不足(欠试验)的情况^[2]。

夹具设计的基本要求主要有以下几点^[3]:

1) 初步设计完成后,对夹具进行仿真分析,确定其应具有尽可能高的固有频率;2) 夹具的质量尽可能小;3) 夹具的可制造性尽可能简单;4) 夹具连接的 IGBT 功率模块能符合产品实际的工作状态。

夹具的结构设计需要综合考虑多方面的因素,包括与台面连接的多个状态、安装和吊装可重复性等,最重要的是要考虑夹具和试件的质心。该质心应该和振动台激振力的方向保持一致才能避免振动台受力不均或共振等问题^[4]。

基金项目:国网电力科学研究院有限公司/南瑞集团有限公司/国电南瑞科技股份有限公司科技项目(524608190075)

第一作者简介:尚效周(1982—),男,山东菏泽人,高级工程师,硕士,研究方向为电力电子设备机械结构设计。

振动试验夹具使用的材料应是比刚度大、阻尼大的材料,使得夹具具有质量轻、刚度高且在振动频率范围内无明显的谐振峰值的特点。对于大多数金属而言,它们的比刚度接近,选用不同的金属材料不会明显改变振动夹具的频率特性^[7],但当夹具所使用的材料密度相差较大时,可以明显降低夹具的质量。本文分别对比刚度大、阻尼大的 Q235 钢和铝合金 6063 的振动试验夹具振动特性进行分析,上述材料的物理力学性能参数如表 5 所示。

表 5 本文研究的振动夹具拟使用材料的物理力学参数

材料	弹性模量 E/GPa	密度 $\rho/\text{(kg/m}^3\text{)}$	比刚度 $E/\rho/\text{(m}^3\text{Pa/kg)}$	泊松比
Q235 钢	207	7 850	2.6×10^7	0.30
铝合金 6063	69	2 700	2.5×10^7	0.33

通过有限元软件计算的采用 Q235 钢和铝合金 6063 的振动试验夹具前 6 阶模态振型分别如图 3 和图 4 所示。

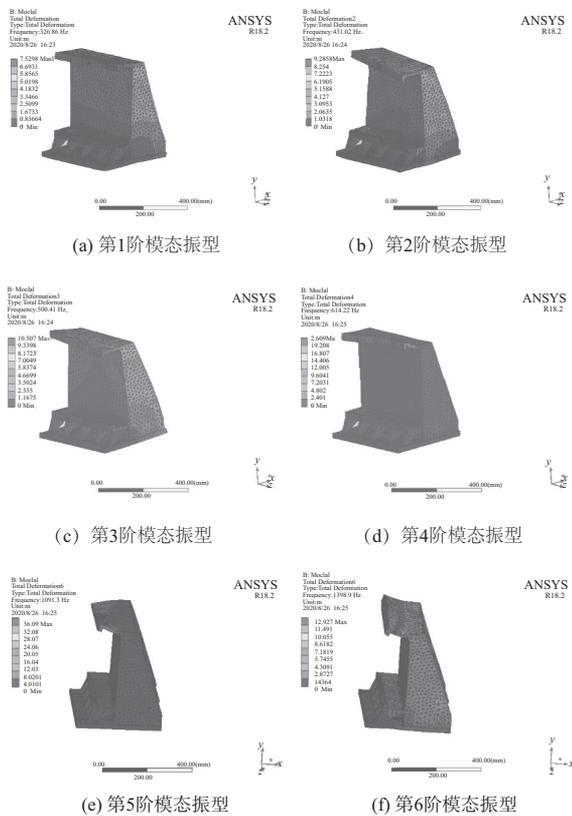


图 3 Q235 钢夹具 1-6 阶模态振型

分别采用 Q235 钢和铝合金 6063 的振动试验夹具前 6 阶模态频率如表 6 所示。

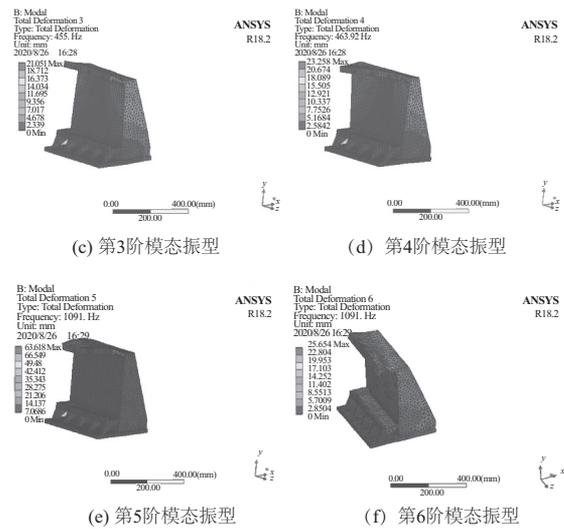
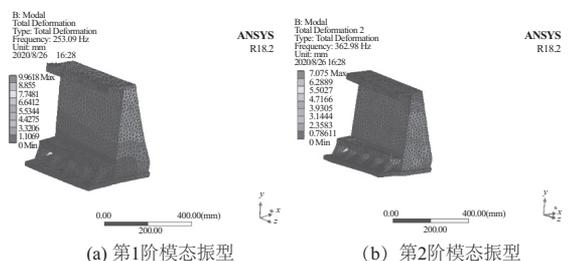


图 4 铝合金夹具 1-6 阶模态振型

表 6 不同材料振动试验夹具振动模态频率

阶次	Q235 钢材质夹具		铝合金 6063 材质夹具	
	模态频率/Hz	振型描述	模态频率/Hz	振型描述
1	326.86	夹具壁板法向 1 阶弯曲	253.09	夹具壁板法向 1 阶弯曲
2	431.02	夹具垂直方向 1 阶扭转	362.98	夹具壁板水平方向 1 阶弯曲
3	500.41	夹具垂直方向 2 阶扭转	455.00	夹具垂直方向 1 阶扭转
4	614.22	夹具顶板 1 阶弯曲	463.92	夹具顶板 1 阶弯曲
5	1 091.30	夹具顶板 2 阶弯曲	1 091.00	夹具顶板 2 阶弯曲
6	1 398.90	夹具壁板法向 2 阶弯曲	1 388.10	夹具壁板法向 2 阶弯曲

从图 3-图 4 可以看出,采用 Q235 钢和铝合金 6063 材料制成的夹具第 1 阶振型均为夹具壁板法向 1 阶弯曲,采用 Q235 钢制成的夹具第 2 阶振型为夹具垂直方向 1 阶扭转,而采用铝合金 6063 制成的夹具第 2 阶振型为夹具壁板水平方向 1 阶弯曲。这两种振型均会影响振动试验中振动台传递至被测对象的载荷幅值与载荷作用的方向。当振动试验载荷频率范围低于夹具的上述振型对应的固有频率时,不存在载荷传递放大和方向改变的情况。从表 6 亦可以看出,采用 Q235 钢和铝合金 6063 材料制成的夹具第 1 阶固有频率均 $>250 \text{ Hz}$,均能满足夹具的第 1 阶固有频率应大于最大试验频率的 1.25 倍的要求,故采用 Q235 钢和铝合金 6063 材料制成的上述夹具振动频率均满足试验要求。

3 振动试验夹具的质量优化设计

振动试验台的所需推力 F 应满足:

$$F \geq (m_1 + m_2 + m_3) a \quad (1)$$

式中: a 为振动加速度; m_1 为动圈的质量(若有滑台、扩展台面应按照三者的总质量考虑); m_2 为振动夹具的质量; m_3 为模块的质量。为了保护试验台,一般按照振动台最大推力的80%考虑^[2]。式中: $a=g$; $m_1=120\text{ kg}$; $m_3=40\text{ kg}$ 。按照以上数值计算,振动夹具 m_2 的质量应 $<3\ 040\text{ kg}$ 。

经计算,Q235 钢材料的夹具质量约为 99 kg,铝合金 6063 材料夹具的质量约为 35 kg,均小于要求的质量 3 040 kg。

本文通过对比整体机加工成型、铸造、螺接、焊接等几

种成型方式^[8],充分考虑加工成本、周期、结构稳定性等因素,基于整体机加工成型的工艺对夹具开展质量优化设计。从上述夹具振动模态振型可以看出,夹具壁板侧面的加强肋主要起减小壁板沿着壁板法向弯曲振动的作用,加强肋与壁板连接的根部区域变形量小,为非主承力区,在设计时该部分材料可以去除。为保证壁板的完整性,未对壁板进行材料去除的质量优化设计。优化设计后的夹具结构尺寸如图 5 所示。

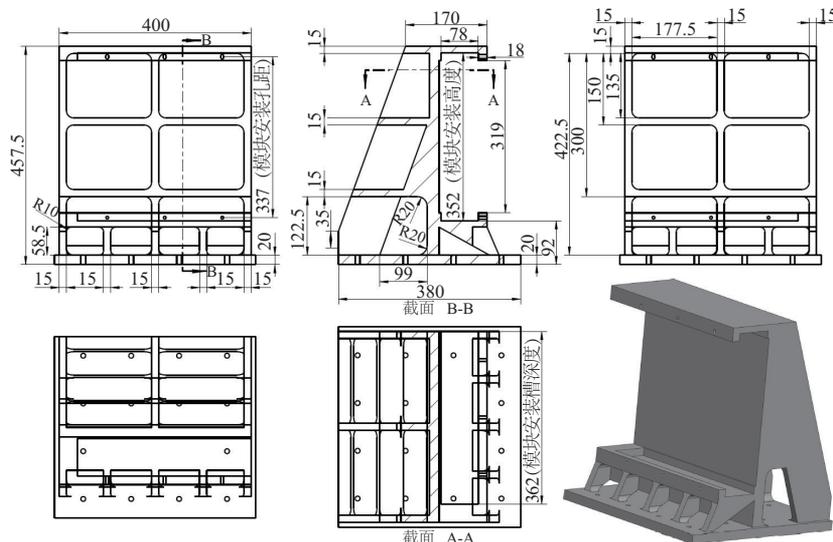


图 5 质量优化后夹具的特征尺寸图

按照上文所述的边界条件,对优化后的夹具进行动力学特性分析,夹具的前 6 阶振动模态频率和振型如表 7 所示。

表 7 质量优化后夹具的前 6 阶固有频率

阶次	频率/Hz	振型描述
1	264.80	夹具壁板法向 1 阶弯曲
2	383.11	夹具壁板水平方向 1 阶弯曲
3	510.66	夹具顶板 1 阶弯曲
4	525.95	夹具垂直方向 1 阶扭转
5	1 140.50	夹具顶板 2 阶弯曲
6	1 290.40	夹具壁板法向 2 阶弯曲

从表 7 可以看出,质量优化后的夹具第 1-2 阶模态振型分别为夹具壁板法向 1 阶弯曲、夹具壁板水平方向 1 阶弯曲,均为影响载荷传递的主要振型,但对应的模态频率均 $>250\text{ Hz}$,依然满足本文研究的试验要求。

经计算,优化后的振动试验夹具为铝合金 6063 材质,其质量为 32.66 kg,相比优化前降低了 6.8%,有效降低了振动试验台的负载,达到了减重的目标。

4 结语

本文利用有限元分析软件对 IGBT 功率模块抗振性能试验夹具进行模态分析,分别计算了采用 Q235 钢和铝合金 6063 材料制成的夹具的模态频率和模态振型,分析了振型对从振动台传递至被测对象的载荷幅值与载荷作用方向的影响,进而评估了相应振型对应的模态频率是否处于振动试验载荷频率范围,以此验证初始设计的可行性,

在此基础上提出了减重优化设计方案并进行了动力学特性分析校核,获得了质量较轻的振动试验夹具设计方案。本文的研究思路对类似较大高度尺寸夹具的垂直壁板单侧偏心安装的振动试验件,宽频率范围抗振性能试验研究中的夹具结构设计具有一定的参考价值。

参考文献:

- [1] 李金飞,戴卫东. 固体推进剂振动试验夹具设计[J]. 机械制造与自动化,2013,42(4):36-38.
- [2] 焦春旺,张杰. 电子产品大型机柜振动夹具设计及振动试验控制[J]. 电子机械工程,2016(2):35-38.
- [3] 吕召会. 电子设备机柜振动试验夹具设计与模态分析[J]. 机械设计与制造工程,2020(2):9-14.
- [4] 李红梅. 车载电源模块的振动试验分析[J]. 机电工程技术,2020,49(3):84-86.
- [5] LUO Haitao, YU Changshuai, WU Tingke, et al. Sture desing ang dynamic characteristic analysis of vibration fixture[J]. 2018 Ieee International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA), 1515-1519.
- [6] 王彬. 某舰载电子设备振动试验夹具设计及分析[J]. 南京工程学院学报(自然科学版),2020,18(1):79-82.
- [7] LAI Wenpin, FANG Weileun. Improvement of bulk acoustic wave hammer for vibration testing of microstructures using 1-3 composite transducers[J]. Sensors And Actuators A: Physical, 2002, 101(1/2):99-106.
- [8] 吴刚. 基于实测的振动夹具动态特性分析[J]. 计量与测试技术,2019,37(3):58-63.

收稿日期:2020-07-23