材料、结构及工艺

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2021.01.013

空封光电耦合器内部多余物颗粒 PIND 检出概率研究

李 冰*，丁 鹏，金 晖，陈春霞，鲍 江，石云莲

（重庆光电技术研究所，重庆 400060）

摘 要： 空封光电耦合器内部残留的多余物颗粒对其可靠性有严重影响，粒子碰撞噪声检测（PIND）是多余物颗粒检测的主要手段，但是存在一定的漏检。基于 PIND 试验中的电压采样数据建立了检出概率的模型，并利用该模型研究了同等质量下典型颗粒的分布区域、试验频率与检出概率的关系，结果表明陶瓷颗粒和导电胶颗粒分别受到碰撞对象硬度和颗粒粘附性的较大影响，使其在不同区域的检出概率具有明显差异，其中导电胶颗粒的检出概率因颗粒弹性弱而整体偏小，但在试验频率上升后有明显改善，而短金丝因粘附性弱、弹性强，检出概率大且稳定。据此提出了对典型多余物颗粒的控制与检测方法，采用该方法能够有效地提高光电耦合器的可靠性。所用模型和研究方法可推广至其他空封元器件的类似研究中。

关键词： 空封光电耦合器；多余物颗粒；PIND；电压采样；检出概率

中图分类号： TN622 **文章编号：** 1001－5868(2021)01－0072－04

Research on PIND Detection Probability of Remainder Particles in Empty Sealed Optocoupler

LI Bing, DING Peng, JIN Hui, CHEN Chunxia, BAO Jiang, SHI Yunlian

(Chongqing Optoelectronics Research Institute, Chongqing 400060, CHN)

Abstract: The remainder particles in empty-sealed optocoupler will seriously affect its reliability. Particle impact noise detection (PIND) is the main method for detecting the remainder particles, but it presents an undetected error rate. Based on the voltage sampling data in PIND test, the detection probability model is established in this paper. The effects of distribution region and test frequency on the detection probability of typical kinds of particles with the same mass were studied by using the model. The results show that the detection probability of ceramic particles and conducting resin particles are greatly affected by hardness of impact object and particle adhesion, which makes the detection probability in different regions present obvious differences, and the overall detection probability of the latter is small due to the weak elasticity of particles, but will obviously improve after the test frequency rises. The results also show that the detection probability of short gold wire is large and stable due to its weak adhesion and strong elasticity. Based on this, the control and detection method for typical remainder particles is proposed, which will effectively improve the reliability level of the optocoupler. The model and research method in this paper can be extended to similar research on other empty sealed components.

Key words: empty sealed optocoupler; remainder particles; PIND; voltage sampling; detection probability

收稿日期：2020－10－24.

* **通信作者：**李 冰 **E-mail:** ufo_libing@163.com

0　引言

高可靠性光电耦合器多为金属陶瓷空封结构，但是其内部多余物颗粒残留将严重影响器件性能[1]，通常采用粒子碰撞噪声检测(PIND)试验对存在多余物颗粒的器件进行检测并加以剔除[2]。其原理是通过振动台带动粘附于上面的器件运动，器件内部的颗粒随之运动并碰撞内壁，碰撞的能量传导至振动台并被换能器转换为电压信号，从而被仪器感知并进行判别。由于颗粒特征的随机性，PIND 试验存在一定的漏检[3]，提高对每只器件的试验次数可增大检出概率，但会影响检测效率，在批量较大时难以实施，因此增大单次试验中的检出概率就很重要。颗粒特征、器件结构等均会对 PIND 试验效果产生影响[4]，为此需要研究颗粒的类型、质量、分布区域等因素与单次试验中检出概率的关系。由于需要较大的样本量，此类试验多基于实际检测中的经验进行，且受器件个体差异的影响较大，目前数字化的 PIND 试验仪器能够以微秒级间隔对换能器产生的电压进行采样并生成采样数据。已有工作研究了多余物材料、质量和试验条件与输出电压幅度的关系[5]，而近年来对此类数据的研究多集中于颗粒物种类的判别以及如何减小噪声的影响上[6]，由于采样数据的样本量巨大，从中应能获取与检出概率有关的信息。

本文建立了基于电压采样数据的 PIND 试验中检出概率的模型，并利用该模型研究了多余物颗粒的类型、分布区域及试验频率等因素对检出概率的影响，据此提出了对多余物颗粒的控制与检测方法。

1　PIND 试验中检出概率的模型

在 PIND 试验中会规定振动台运动的时长，相应地，数据采样的时长固定，由于仪器有固定的采样时间间隔，从而在单次试验中获取的电压采样数据的总点数也是固定的。在采样数据中，电压值小于 20 mV 的点一般作为噪声被忽略掉，而更高的点即为有效数据点，由于总点数固定，有效数据点数的增加以及数据点电压值的上升均可增大对残留颗粒的检出概率。用式 $\sum_i (V_i \times k)$ 表示检出概率的大小，式中 V_i 为各个有效数据点的电压值，Σ 表示对所有 V_i 求和，而 k 为比例系数。

另外，颗粒的质量对检出概率也有影响：颗粒与内壁的碰撞满足冲量定理 $Ft = m\Delta v$，其中，F 为碰撞时内壁受力，决定换能器产生的电压值，t 为碰撞时间，m 为颗粒质量，Δv 为颗粒速度的变化。m 较大的颗粒能产生更高的电压值，对应于更大的检出概率。此处消去 m 的因素，以便研究颗粒类型、分布区域等其他因素的影响，为此用 $\sum_i (V_i \times k)$ 除以 m，即等效为颗粒质量相同的情况。

在本文进行的工作中，除所研究因素之外，其余条件均相同，可视为同一对照组，从而对应 k 值相同。另外，由于比较的是检出概率的相对大小，因此可以省去对概率值的归一化运算。引入参数 P_d：

$$P_d = \frac{\sum_{i=1}^{N} V_i}{m} \tag{1}$$

式中，N 为采样数据中电压值大于等于 20 mV 的有效数据点的个数。根据上述分析，可以直接用 P_d 表示颗粒质量相同时的检出概率，并研究各因素与单次试验中检出概率的关系。

2　试验及数据分析

采用某型光电耦合器，用双列直插金属陶瓷外壳制作试验样品，外壳陶瓷部分的外尺寸为 15.00 mm×7.92 mm×2.50 mm，采用金属盖板封装，其结构见图 1，图中为 PIND 试验时的摆放方向，即金属盖板向下与振动台接触。

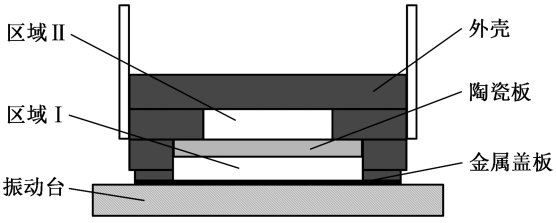


图 1　试验样品的结构

样品中装有厚度为 0.45 mm 的陶瓷板(该结构在实际器件中用于贴装芯片)，从而将器件内部空腔分成Ⅰ和Ⅱ两个区域，区域Ⅰ的高度为 0.65 mm，区域Ⅱ的高度为 0.80 mm。

选取陶瓷颗粒、导电胶颗粒和短金丝三种典型颗粒进行研究，考虑到实际器件内的颗粒可能存在于区域Ⅰ或区域Ⅱ中，因此制作了各类型颗粒分别处于两个区域中的样品，每只样品中放入一个颗粒，所用颗粒的质量见表 1。

样品在 BW-LPD-DAQ4000 型 PIND 试验仪上振动并进行电压采样，振动波形为正弦波，峰值加速度为 20 g，试验频率取为 60 Hz，采样时间间隔为

2 μs，按顺序以 50 000 个点为一组进行采样，每只样品共采 8 组数据，利用式(1)计算各组的 P_d 后取平均，作为该样品的 P_d 值，结果如图 2 所示。

表 1 各样品中颗粒的质量 单位:g

所处区域	颗粒类型		
	陶瓷颗粒（Al_2O_3 陶瓷）	导电胶颗粒（银系导电胶）	短金丝（Φ30 μm）
区域Ⅰ	3.9×10^{-6}	4.6×10^{-6}	8.2×10^{-7}（长径比 4）
区域Ⅱ	1.3×10^{-5}	5.1×10^{-6}	7.2×10^{-7}（长径比 3.5）

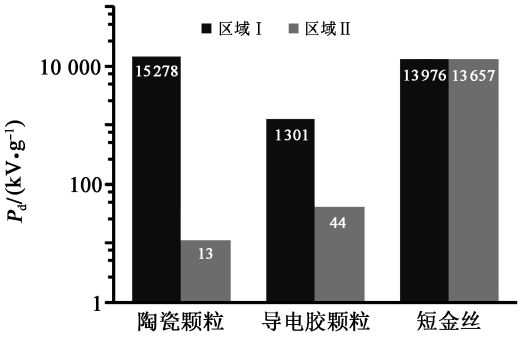


图 2 60 Hz 下各样品的 P_d 值

从图 2 中可以看出，区域Ⅰ对应的 P_d 整体上大于区域Ⅱ，对于区域Ⅱ中的颗粒，陶瓷颗粒的 P_d 最小，导电胶颗粒较其略大，而二者均远小于短金丝的 P_d。而在区域Ⅰ中，陶瓷颗粒的 P_d 最大，相比于区域Ⅱ增幅明显，导电胶颗粒的增幅则不明显，得到的 P_d 最小，而短金丝的 P_d 值大且稳定。

为分析上述 P_d 分布，表 2 中给出了各样品采样数据的 N，V_{imax} 和 V_{imax}/m，此处 N 为各组数据的有效数据点数的平均值，而 V_{imax} 为所有组数据中的峰值，将其除以 m 以等效为颗粒质量相同的情况。另外，表 2 中还给出了区域Ⅰ和区域Ⅱ中对应 N 和 V_{imax}/m 的比值。

表 2 60 Hz 下各样品的 N，V_{imax} 和 V_{imax}/m

颗粒种类	所处区域	N	V_{imax}/mV	(V_{imax}/m)/(kV·g^{-1})	N 比值	V_{imax}/m 比值
陶瓷颗粒	区域Ⅰ	1 117.5	360	92.3	162.5	36.4
	区域Ⅱ	6.9	33	2.5		
导电胶颗粒	区域Ⅰ	193	68	14.8	20.3	2.2
	区域Ⅱ	9.5	34	6.7		
短金丝	区域Ⅰ	305.9	100	122.0	1.0	1.0
	区域Ⅱ	302.1	84	116.7		

从对比数据上看，P_d 首先受到材料间相对硬度的影响：陶瓷颗粒、导电胶颗粒和短金丝的莫氏硬度分别约为 9.0，2.0 和 2.5。当颗粒分布于区域Ⅱ时，试验过程中其在莫氏硬度约为 9.0 的陶瓷板上弹跳，分布于区域Ⅰ时，则其在莫氏硬度约为 5 的 4J29 合金盖板上弹跳。

对于陶瓷颗粒，当其分布于区域Ⅱ时，因碰撞时双方硬度均很高导致形变很小，表现为 V_{imax}/m 最低，因 V_{imax} 仅 33 mV，已接近 20 mV 阈值，故采样电压信号易淹没于噪声中，从而 N 也很低，故得到的 P_d 最小；而当其分布于区域Ⅰ时，因被碰撞的盖板硬度远低于碰撞颗粒，且为薄壁结构（尺寸为 9.0 mm×7.0 mm×0.1 mm）、弹性较好，故存在较明显的变形，使各采样电压值显著上升，由此在区域Ⅱ中被噪声淹没的数据点大量显现，体现为 V_{imax}/m 和 N 均大幅度增加，故 P_d 有最明显的增幅。

对于另外两种颗粒，因硬度均远低于被碰撞物，故在各区域碰撞时，主要是颗粒自身发生形变，P_d 主要受颗粒弹性和粘附性的影响：导电胶的基体为树脂材料，粘附性较强，尤其是对较粗糙的陶瓷表面，在振动时不易脱离，故当此类颗粒分布于区域Ⅱ时，V_{imax}/m 和 N 均低，从而得到的 P_d 小，当其分布于区域Ⅰ时，因其对光滑的盖板表面的粘附性弱、更易脱离，故 N 的增加较 V_{imax}/m 更明显，但受颗粒弹性较弱的影响，整体上 P_d 较小；对于短金丝，其弹性较好且粘附性弱，故分布在不同区域时，V_{imax}/m 和 N 均较高，且受被碰撞物表面材质影响小，表现为 P_d 大且稳定。

可尝试通过改变试验条件增大检出概率，最直接的方式是提高试验频率，使相同时间内的振动次数增多，这样能更频繁地带动多余物颗粒运动与碰撞，对增大 P_d 有利。

为研究提高试验频率的影响，根据器件结构并参照 GJB548B-2005 等标准的要求，将试验频率取为 130 Hz，并利用 60 Hz 下的试验样品，在其他条件不变的情况下进行试验、采样和处理，得到的 P_d 如图 3 所示。

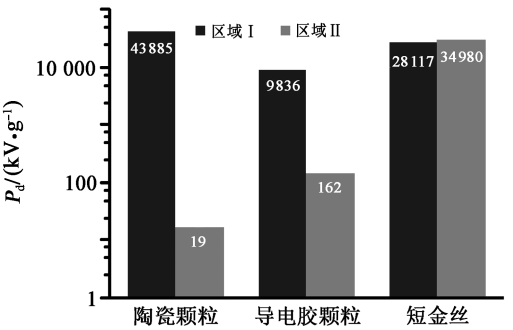


图 3 130 Hz 下各样品的 P_d 值

图 3 表明，对于区域Ⅰ或区域Ⅱ中不同类型的颗粒，其 P_d 间的相对大小与 60 Hz 时的趋势相近；而进行不同频率下的比较时，整体上 P_d 均随频率提高而上升，其中区域Ⅱ中的陶瓷颗粒 P_d 上升幅度偏低，而不同区域中，尤其是区域Ⅰ中的导电胶颗粒 P_d 上升幅度均较高。

为分析上述 P_d 分布，按照表 2 格式给出了各样品采样数据的 N，$V_{i\max}$ 和 $V_{i\max}/m$，如表 3 所示。

表 3　130 Hz 下各样品的 N，$V_{i\max}$ 和 $V_{i\max}/m$

颗粒种类	所处区域	N	$V_{i\max}$/mV	$(V_{i\max}/m)$/(kV·g^{-1})	N 比值	$V_{i\max}/m$ 比值
陶瓷颗粒	区域Ⅰ	2 586.4	576	147.7	252.3	50.5
	区域Ⅱ	10.3	38	2.9		
导电胶颗粒	区域Ⅰ	870.8	278	60.4	26.1	6.4
	区域Ⅱ	33.4	48	9.4		
短金丝	区域Ⅰ	618.6	95	115.9	0.8	0.9
	区域Ⅱ	753.8	93	129.2		

由表 3 可见，在频率提高后，不同类型颗粒的 N，$V_{i\max}$ 和 $V_{i\max}/m$ 间的相对关系与 60 Hz 时的相近，从而使 P_d 间的相对关系也相近，表明在提高频率后，P_d 仍主要受到材料间相对硬度、颗粒弹性和粘附性的影响。

再分析 P_d 随频率的变化，对于一定的采样总时长与时间间隔，从原理上，单位时间内颗粒的碰撞次数、N 值和 P_d 值上升的趋势应该与试验频率上升的趋势相近。在试验频率上升到约 2.2 倍后，参照图 2，3 和表 2，3，得到 130 Hz 与 60 Hz 两种试验频率下 P_d 和 N 的比值，如表 4 所示。

表 4　两种试验频率下 P_d 和 N 的比值

颗粒种类	所处区域	P_d 比值	N 比值
陶瓷颗粒	区域Ⅰ	2.9	2.3
	区域Ⅱ	1.5	1.5
导电胶颗粒	区域Ⅰ	7.6	4.5
	区域Ⅱ	3.7	3.5
短金丝	区域Ⅰ	2.0	2.0
	区域Ⅱ	2.6	2.5

由表 4 可见，与上述推测相比，导电胶颗粒的 N 上升的倍数明显高于 2.2 倍，在区域Ⅰ中更明显，而对于区域Ⅱ中的陶瓷颗粒，N 上升的倍数明显低于 2.2 倍。

该现象应主要与材料间相对硬度和颗粒粘附性有关：对于区域Ⅱ中的陶瓷颗粒，在试验频率上升后其硬度无变化，碰撞形变仍很小，$V_{i\max}$ 仅增至 38 mV，从而采样电压信号仍易淹没于噪声中，使 N 的上升不明显；而对于导电胶颗粒，工艺经验及部分研究工作[7-8]表明，试验中的振动与冲击有利于颗粒从所附着的内表面上脱离，考虑到此类颗粒的 N 值受粘附性影响较大，其 N 值的显著上升应该与试验频率上升后的粘附性减弱有关，当其在区域Ⅰ的光滑盖板上弹跳时，其 N 值随试验频率不同而变化更明显的现象也验证了这一点。

3　多余物颗粒的控制与检测

前述研究表明，对于质量相同的几种典型颗粒，影响其检出概率的主要因素均不相同，从而对其控制与检测措施也应各有偏重：陶瓷颗粒的检出概率主要受试验中碰撞对象硬度与弹性的影响，当其处于区域Ⅱ时，检出概率小且不能随试验频率的提高而有效改善，漏检风险大，对此应重点在器件制作时进行控制（例如利用其粘附性弱的特点，在器件倒扣的情况下加强对内表面的气流吹扫，即可有效去除）；短金丝因弹性强、粘附性弱，从而检出概率大且稳定，故通过气流吹扫即可有效去除，漏检的概率较小，因此控制与检测的难度最小；导电胶颗粒的弹性弱、粘附性强，从而检出概率偏小，尤其在区域Ⅱ时更严重，且受粘附性影响，难以通过气流吹扫将其有效地从器件内表面上去除，同样应重点在器件制作时进行控制（如避免刮擦固化后的导电胶以防产生碎屑），另外可提高试验频率以减弱其对内表面的粘附性，这对增大检出概率也有一定帮助。

此外，因颗粒的质量在实际检测时是随机的，还应考虑其对检出概率的影响：在表 1 中，所用短金丝的质量明显小于其他颗粒，但由于其直径固定为 30 μm，且长径比已较低，故实际器件中的此类颗粒质量与之接近甚至更大，从而检出概率较大；而另外两种颗粒在实际器件中的尺寸和质量可能远低于表 1 中的情况，且可能在振动时通过细小缝隙在区域Ⅰ和区域Ⅱ间游荡（本文涉及的样品中已封堵缝隙，从而将颗粒限制于某一区域，但在批量制作中因操作繁琐难以实施），因不同区域内 P_d 差异很大，将出现检出概率小且“闪烁”的情况（即 PIND 试验表明颗粒时有时无）。因此，对于陶瓷颗粒和导电胶颗粒，应着重于在器件制作时进行多余物颗粒的控制。

（下转第 99 页）

[11] Liu G, Yu Y, Funes Mora K A, et al. A differential approach for gaze estimation[J]. IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2021, 43(3): 1092-1099.

[12] 任佳丽，王文晶. 基于差分孪生卷积神经网络的大规模不平衡数据分类算法[J]. 计算机应用与软件，2019，36(11)：267-274.
Ren Jiali, Wang Wenjing. Large-scale unbalanced data classification algorithm based on differential twin convolutional neural networks[J]. Computer Applications and Software, 2019, 36(11): 267-274.

[13] Mora K A F, Monay F, Odobez J M. EYEDIAP: a database for the development and evaluation of gaze estimation algorithms from RGB and RGB-D cameras[C]// Proc. of the Symposium on Eye Tracking Research and Applications. ACM, 2014: 255-258.

[14] Luo Yuan, Chen Xuefeng, Chen Xu, et al. Visual focus of attention estimation based on improved hybrid incremental dynamic Bayesian network[J]. Optoelectron. Lett., 2020, 16(1): 45-51.

[15] Ruiz N, Chong E, Rehg J M. Fine-grained head pose estimation without keypoints[C]// Proc. of 2018 IEEE/CVF Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW), 2018: 2074-2083.

作者简介：

罗　元(1972—)，女，博士，教授，主要研究领域为数字图像处理和智能信号处理。

(上接第 75 页)

4　结论

本文基于 PIND 试验中的电压采样数据，建立了多余物颗粒检出概率的模型，利用该模型研究了空封光电耦合器内同等质量的典型颗粒的分布区域、试验频率与检出概率的关系。实验结果表明在所研究的器件结构中，陶瓷颗粒的检出概率主要受碰撞对象硬度的影响，从而在不同区域中差异很大，且与坚硬陶瓷板碰撞时的检出概率很小；导电胶的检出概率主要受粘附性的影响，在碰撞对象表面光滑、试验频率高时相对较大，但受自身弹性弱的影响，整体上检出概率仍偏小；短金丝则由于粘附性弱、弹性强，检出概率大且稳定。据此，结合颗粒质量的随机性，提出了对典型多余物颗粒的控制与检测方法，以有效地提高空封光电耦合器的可靠性水平。所用模型和研究方法可推广至其他空封元器件的多余物检出概率研究中。

参考文献：

[1] 关亚男，裴志强，刘春芝，等. 浅析封装腔体内自由粒子的产生及控制[J]. 微处理机，2008，29(1)：9-13.
Guan Yanan, Pei Zhiqiang, Liu Chunzhi, et al. An analysis of particles production and control in the package [J]. Microprocessors, 2008, 29(1): 9-13.

[2] 郭　伟，葛秋玲. 气密性陶瓷封装 PIND 失效分析及解决方案[J]. 电子与封装，2007，7(11)：1-4.
Guo Wei, Ge Qiuling. PIND failure analysis of air-tightness ceramic packaging and the solutions [J]. Electronics & Packaging, 2007, 7(11): 1-4.

[3] 吴维丽，王瑞曾，金毓铨. PIND 试验的特殊属性和适用范围研究[J]. 信息技术与标准化，2012(9)：68-70.
Wu Weili, Wang Ruizeng, Jin Yuquan. Research for particularity and applicable scope of PIND[J]. Information Technology & Standardization, 2012(9): 68-70.

[4] 陈亚兰，肖　玲. 混合集成电路 PIND 试验特征波形研究及控制方法[J]. 微电子学，2010，40(1)：153-156.
Chen Yalan, Xiao Ling. Study on PIND characteristic pulse of hybrid IC's and its control methods[J]. Microelectronics, 2010, 40(1): 153-156.

[5] 杜　迎，张国华，朱卫良，等. 可靠性试验粒子碰撞噪声检测技术研究[J]. 电子与封装，2006，6(5)：33-39.
Du Ying, Zhang Guohua, Zhu Weiliang, et al. IC failtests technical study of particle impact noise detection testing[J]. Electronics & Packaging, 2006, 6(5): 33-39.

[6] 钱　鑫，王国涛，王淑娟. 密封电子元件及设备多余物的 PIND 方法研究进展[J]. 航天制造技术，2016(6)：1-5.
Qian Xin, Wang Guotao, Wang Shujuan. Development of PIND detection methods for sealed electronic components and equipments[J]. Aerospace Manufacturing Technol., 2016(6): 1-5.

[7] 杜　迎，吕　栋，潘伟力，等. 粒子碰撞噪声检测(PIND)试验的研究[J]. 电子产品可靠性与环境试验，2005(1)：34-39.
Du Ying, Lv Dong, Pan Weili, et al. Study of particle impact noise detection (PIND)[J]. Electronic Product Reliability and Environmental Testing, 2005(1): 34-39.

[8] 李　冰，李刚华，赵瑞莲，等. PIND 波形尖峰数与多余物特性关系的研究[J]. 半导体光电，2019，40(2)：243-246.
Li Bing, Li Ganghua, Zhao Ruilian, et al. Relationship between spiking number of PIND waveform and characters of remainder[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2019, 40(2): 243-246.

作者简介：

李　冰(1982—)，男，2005 年毕业于北京工业大学微电子学与固体电子学专业，获硕士学位，高级工程师，主要从事光电器件工艺研究。