材料、结构及工艺

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2021120701

基于速度空间内泊松过程的 PIND 采样值统计规律研究

李　冰*，金　晖，丁　鹏，鲍　江，石云莲

（重庆光电技术研究所，重庆 400060）

摘　要： 对粒子碰撞噪声检测(PIND)试验中的颗粒碰撞电压信号采样后，研究了采样数据所对应的参数在样本量增加后的变化趋势，结果表明 20 mV 以上采样值的平均值趋稳，表现出某种统计规律。考虑颗粒碰撞过程的随机性和速度衰减趋势后，提出了将速度变化过程视为速度空间内的泊松过程的假设，并由此推测 20 mV 以上采样值符合指数分布，对于多种颗粒类型、颗粒位置及试验频率等因素的组合，由该推测得到的指数分布概率密度与采样数据对应的概率密度均相符，表明假设及其推测成立，并探讨了指数分布的 λ 与各因素的关系。得到的统计模型及所用方法对颗粒碰撞过程、多余物特征等方面的研究具有启发意义。

关键词： 速度空间；泊松过程；粒子碰撞噪声检测；指数分布；概率密度

中图分类号： TN622；TM58　**文章编号：** 1001－5868(2022)05－0918－05

Research on Statistical Law of PIND Sampling Value Based on Poisson Process in Velocity Space

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

(Chongqing Optoelectronics Research Institute, Chongqing 400060, CHN)

Abstract: After sampling the particle collision voltage signal in particle impact noise detection (PIND) test, the change trend of the parameters corresponding to the sampled data after the sample size increased was studied. It shows that the average value of >20 mV sampling values tends to be stable, reflecting a certain statistical law. Considering the randomness of the particle collision process and the velocity attenuation trend, the hypothesis that the velocity change process can be regarded as a Poisson process in the velocity space was proposed, and the conjecture that the sampling value > 20 mV conforms to the exponential distribution was reached. For the combination of multiple particle types, particle positions and test frequencies, the probability density of exponential distribution obtained from this conjecture is consistent with the probability density obtained from sampled data, indicating that the hypothesis and its conjecture are valid, and the relationship between λ of exponential distribution and various factors is discussed. The obtained statistical model and the method used are instructive for the study of particle collision process and the characteristics of remainder.

Key words: velocity space; poisson process; PIND; exponential distribution; probability density

0　引言

高可靠等级的器件多采用空封结构[1]，对于内部残留有多余物颗粒的器件，主要采用粒子碰撞噪声检测(PIND)的方法加以剔除[2]。其原理是由仪器驱动待检器件振动，多余物颗粒从振动中获取动量后在器件内腔壁间弹跳，颗粒与腔壁碰撞时部分动量转化为作用于器件的力并传递到仪器的换能器后，变换为电压信号以供判别。现代 PIND 试验仪

收稿日期：2021－12－07.

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

能够以极短的周期对电压信号进行采样并获取大量数据，通过观察采样数据的波形可分析多余物特征，但准确度受经验的限制，已有大量工作利用特定算法对采样数据进行处理以获取多余物相关的信息[3-5]。考虑到单次试验的采样点数可达百万以上，如果能够发现其中的统计规律并进行研究，有望获取颗粒运动特征等方面的信息。

1　试验及统计规律

首先制作样品以采集颗粒碰撞电压数据。样品采用外尺寸为 15.00 mm×7.92 mm×2.50 mm 的金属陶瓷外壳制作，并使用 0.10 mm 厚的金属盖板封装，参照实际器件结构，使用 0.45 mm 厚的陶瓷板将外壳内部分为 a 和 b 两个独立空腔区域，其中 a 区高度为 0.65 mm，b 区高度为 0.80 mm。其结构见图 1。

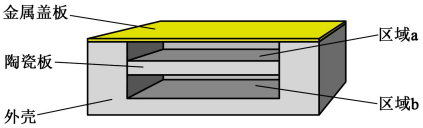


图 1　试验样品的结构示意图

所研究的颗粒类型包括 Al_2O_3 陶瓷、银系导电胶、金球和 Φ30 μm 短金丝等 4 种，制作的样品包含 4 种颗粒分布于各个独立空腔内的情况，每个样品内各有 1 个颗粒，各颗粒的质量如表 1 所示。

表 1　各样品中颗粒的质量　　**单位：g**

颗粒类型	颗粒位置	
	a 区	b 区
陶瓷	3.94×10^{-6}	1.28×10^{-5}
导电胶	4.59×10^{-6}	5.09×10^{-6}
金球	7.25×10^{-6}	1.12×10^{-5}
短金丝	8.19×10^{-7}	7.16×10^{-7}

在 BW-LPD-DAQ4000 型 PIND 试验仪上进行颗粒碰撞电压的采样，采样周期为 2 μs，每 0.1 s 内采集的数据保存为一个 Group，对应 50 000 个采样点。因仪器在监测到一定程度的碰撞电压信号后会自动停机，各样品采集到的 Group 数量在 23～35 之间不等，但对应的采样点总数均在百万以上，可以满足研究统计规律的需要。参照 GJB548B-2005 的要求，PIND 试验中按照正弦波进行振动，峰值加速度为 20 g，试验分别在 60 和 130 Hz 下进行，以比较试验频率的影响。

如采样值所对应的参数体现了某种统计规律，则该参数在样本量增加后可能会趋于稳定，因此通过观察各参数在采样值对应的 Group 数 N_g 增大后的变化趋势，有可能找到统计规律。

首先观察各情况（颗粒类型、颗粒位置、试验频率的组合）下，所有采样值的平均值 U_a 随 N_g 的变化趋势，如图 2 所示，可见 N_g 增大后各情况下的 U_a 并未一致趋于稳定，存在变化幅度增加的现象。

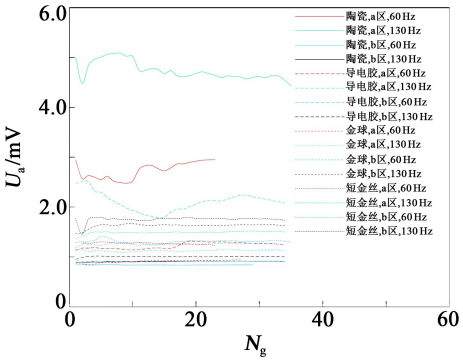


图 2　所有采样值的平均值 U_a 与 N_g 的关系

在 PIND 试验过程中，颗粒每次获取动量后，在弹跳过程中动量（速度）不断衰减并最终停止，之后直至下次振动到来前，仪器采集到的为噪声电压。按照 GJB548B-2005 的要求，PIND 试验中仅判别 20 mV 以上的电压信号，而图 2 中的 U_a 明显低于该值，由此认为 U_a 变化幅度的增加可能与噪声电压有关。为此从所有采样值中筛选出大于一定阈值（此处取为 20 mV）的点，其平均值 U_{am} 与 N_g 的关系如图 3 所示。

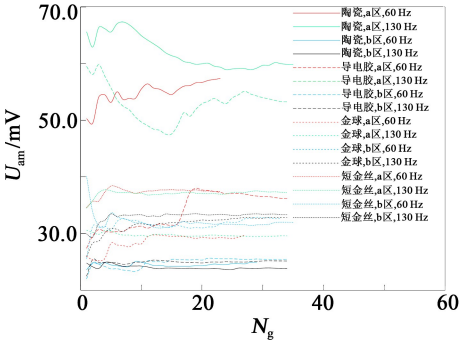


图 3　20 mV 以上采样值的平均值 U_{am} 与 N_g 的关系

可见 N_g 增大后，各情况下的 U_{am} 均趋于稳定，表明 U_{am} 体现了某种统计规律。另外还可以观察 20 mV 以上采样点在所有采样点中的占比 P_{rm} 与 N_g 的关系，如图 4 所示。

可见 N_g 增大后，各情况下的 P_{rm} 同样未一致趋于稳定，存在变化幅度增加的现象。另外图 4 中各 P_{rm} 的变化趋势与图 2 中的 U_a 相近，这表明 U_a 的变化幅度增加主要由 P_{rm} 导致：在 U_{am} 趋于稳定

的情况下，因噪声电压明显小于 U_{am}，U_a 就取决于 20 mV 以上采样点的占比 P_{rm}，其变化幅度的增加导致了 U_a 具有相近的变化趋势。

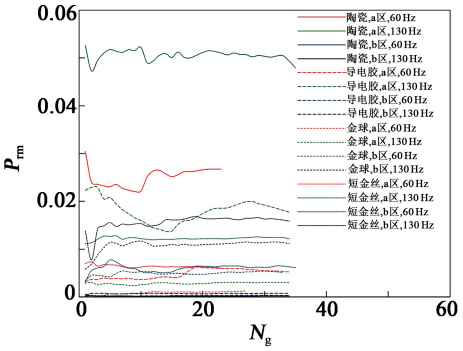


图 4　20 mV 以上采样点的占比 P_{rm} 与 N_g 的关系

从采样值中还可能发掘出其他的统计规律，此处主要从 U_{am} 在样本量增加后趋稳的现象出发，研究 20 mV 以上采样值所体现的统计规律。

2　统计模型及验证分析

对于颗粒在腔壁间反复弹跳的过程，考虑到颗粒运动轨迹以及各次碰撞受力的随机性，难以用精确的动力学模型进行描述[6]，但考虑到其速度的衰减趋势，当样本量足够大时，可视为速度空间中参数集在最大速度与 0 之间的随机过程：颗粒的速度在不断地衰减中作为随机过程中的一系列质点（速度值）依次出现，在不同的速度区间上质点均有一定的出现概率且互不影响，从而可以假设，该随机过程为速度空间内的泊松过程。基于该假设，某个速度区间 R_v 内出现 k 个质点的概率为

$$P\{N(R_v)=k\}=\frac{(\lambda_v R_v)^k}{k!}e^{-\lambda_v R_v} \tag{1}$$

式中，λ_v 为该泊松过程的强度。根据泊松过程的特征，此时相邻质点的间距 Δv，即颗粒与腔壁的单次碰撞过程中的速度变化量，作为随机变量服从参数为 λ_v 的指数分布，其概率密度为

$$p_{\Delta v}(\Delta v)=\begin{cases}\lambda_v e^{-\lambda_v \Delta v}, & \Delta v>0\\ 0, & \Delta v\leqslant 0\end{cases} \tag{2}$$

Δv 与颗粒碰撞过程中受力大小 F（等于外壳受力大小）之间满足动量定理的要求：

$$m\Delta v=F\Delta t \tag{3}$$

式中，m 为颗粒质量，Δt 为碰撞过程用时。将颗粒碰撞过程中换能器转换后的电压信号记为 U，则：

$$U=kF \tag{4}$$

k 为比例系数。综合(3)，(4)两式，有：

$$U=\frac{km}{\Delta t}\Delta v \tag{5}$$

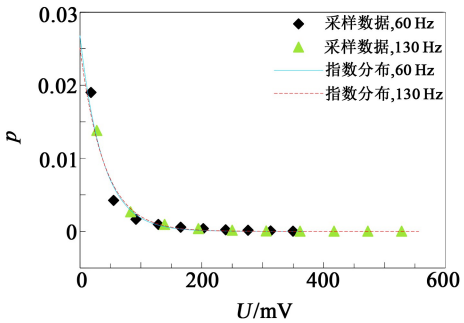
对于一定的颗粒类型、颗粒位置和试验频率，取 Δt 为定值，则 U 和 Δv 呈线性关系，从而推测 U 也符合指数分布，设其参数为 λ，则概率密度为

$$p_U(u)=\begin{cases}\lambda e^{-\lambda u}, & u>0\\ 0, & u\leqslant 0\end{cases} \tag{6}$$

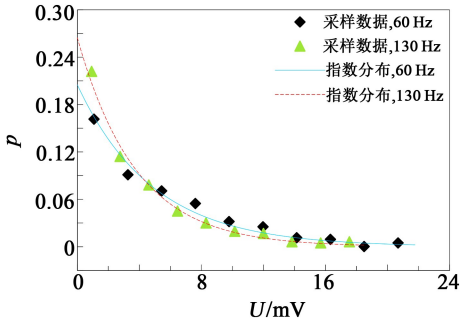
20 mV 以上的采样值均由颗粒碰撞产生，验证其是否符合指数分布，即可判断前述假设及其推测是否成立。考虑到指数分布的特点，在验证前将所有 20 mV 以上采样值均减去 20 mV，使最小值接近于 0，这样不会改变分布类型。在 U 符合指数分布的前提下，20 mV 以上采样值的平均值 $E(U)=\lambda^{-1}$ 为定值，这也与 U_{am} 在样本量增加后趋稳的现象相一致，从而可以由 $E(U)$ 得到 λ，再由式(6)得到指数分布的概率密度，将其与相同情况下采样数据对应的概率密度进行对比，通过二者的符合性即可验证 20 mV 以上采样值是否符合指数分布。这里采样数据对应的概率密度通过以下方式获得：在数据的最大值与最小值之间划分出 N 个区间（此处考虑精度后，将 N 取为 10），根据各区间的宽度以及处于区间内的采样点数与采样点总数的比值，即可得到与区间中点相对应的概率密度值。

首先选取一种颗粒的采样数据进行对比，结果如图 5 所示。可见对于陶瓷颗粒，在相同情况下采样数据对应的概率密度与推测得到的指数分布概率密度相符，表明该颗粒 20 mV 以上的采样值符合指数分布。

将对比延伸到另外三种颗粒的情况，结果如图 6～8 所示。可见对于另外三种颗粒，在相同情况下采样数据对应的概率密度与推测得到的指数分布概率密度同样相符，表明其 20 mV 以上的采样值也符合指数分布，由此认为颗粒在各次碰撞中的速度变



(a)　颗粒处于 a 区时

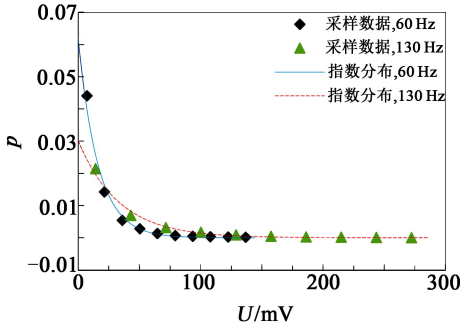


（b）　颗粒处于 b 区时

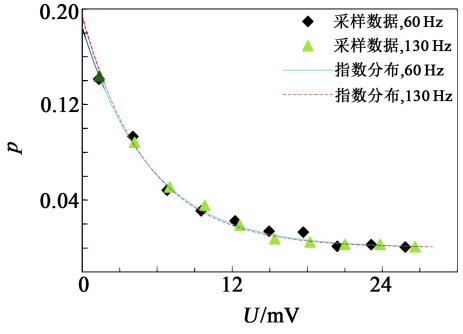
图 5　陶瓷颗粒的概率密度对比

化过程为速度空间内的泊松过程的假设和 U 符合指数分布的推测成立。

图 5～8 还表明 20 mV 以上采样值的指数分布概率密度曲线的形状与颗粒类型、颗粒位置、试验频率均有关，因曲线形状由 λ 决定，为此比较各情况下

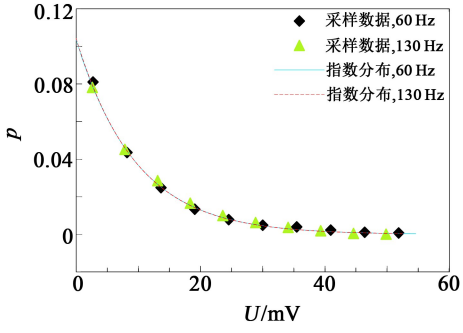


（a）　颗粒处于 a 区时

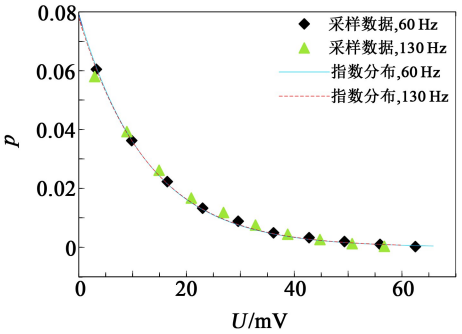


（b）　颗粒处于 b 区时

图 6　导电胶颗粒的概率密度对比

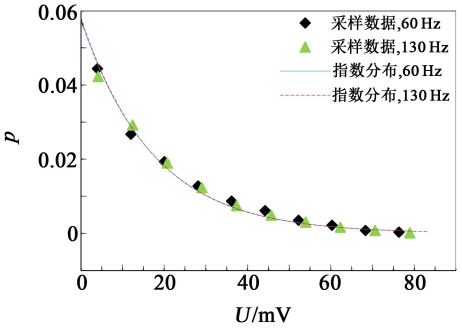


（a）　颗粒处于 a 区时

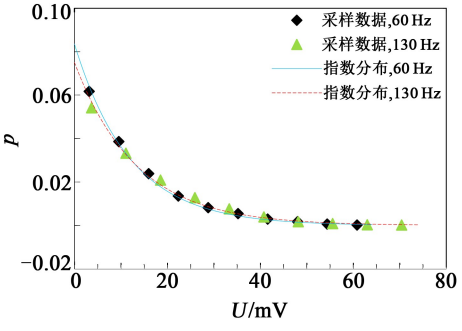


（b）　颗粒处于 b 区时

图 7　金球的概率密度对比



（a）　颗粒处于 a 区时



（b）　颗粒处于 b 区时

图 8　短金丝的概率密度对比

的 λ 值，如表 2 所示。

表 2　各情况下的 λ 值　　单位：mV^{-1}

颗粒类型及位置		试验频率/Hz	
		60	130
陶瓷	a 区	0.027	0.025
	b 区	0.205	0.265
导电胶	a 区	0.062	0.030
	b 区	0.185	0.194
金球	a 区	0.104	0.104
	b 区	0.079	0.078
短金丝	a 区	0.057	0.058
	b 区	0.084	0.075

可见 λ 值主要取决于颗粒类型和颗粒位置，对于导电胶颗粒处于 a 区等少数情况，λ 值受试验频率的影响较大。

试验频率的增加可以使颗粒在同样的时间内更

多次地从振动中获取动量,引起采样数据中 20 mV 以上的点数增加、与噪声电压对应的点数减少,但图 4 表明在 130 Hz 下绝大部分采样点仍对应于噪声电压,即相邻两次振动引起的颗粒运动仍可视为相互独立的,从而试验频率的增加主要引起泊松过程的样本函数增多,对泊松过程自身的影响有限。

考虑到 λ 反映 U 的指数分布特征,而 U 和 ΔV 间有式(5)所示的关系,导电胶颗粒处于 a 区时 λ 的改变可能与式(5)中 Δt 等参数随试验频率的变化有关:导电胶颗粒的树脂基体有较强的粘附性,而 PIND 试验中的振动有助于降低颗粒对内壁的粘附性[7],因处于 a 区的导电胶颗粒会接触光滑的金属盖板,在试验频率增加后上述效应会更明显,有可能使 Δt 等发生较为显著的变化,并导致 λ 改变。

3 结论

本文的研究表明,在 PIND 试验中 20 mV 以上的颗粒碰撞电压采样值对应的平均值在样本量增加后趋稳,表现出某种统计规律。提出了将速度变化过程视为速度空间内的泊松过程的假设,并由此推测 20 mV 以上的采样值符合指数分布,由该推测得到的指数分布概率密度与采样数据对应的概率密度相符,表明假设及其推测成立。进一步分析表明该指数分布的 λ 主要受颗粒类型和颗粒位置的影响,而部分情况下 λ 随试验频率的变化可能与 Δt 等的改变有关。得到的统计模型及所用方法有助于开展颗粒在 PIND 试验中的运动与碰撞过程、多余物颗粒特征等方面的研究。

参考文献:

[1] 欧 熠, 马思华, 徐道润, 等. 一种四通道贴片式高速光电耦合器[J]. 半导体光电, 2013, 34(1): 30-33.
Ou Yi, Ma Sihua, Xu Daorun, et al. Four-channel surface mount high speed optocoupler [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2013, 34(1): 30-33.

[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] Gao Hongliang, Zhang Hui, Wang Shujuan. Research on auto-detection for remainder particles of aerospace relay based on wavelet analysis[J]. Chinese J. of Aeronautics, 2007, 20(2): 75-80.

[4] 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.

[5] Wang Shujuan, Chen Rui, Zhang Long, et al. Detection and material identification of loose particles inside the aerospace power supply via stochastic resonance and LVQ network[J]. Trans. of the Institute of Measurement and Control, 2012, 34(8): 947-955.

[6] 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.

[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.

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,现主要从事光电器件工艺研究工作。