第 50 卷 第 11 期：5115-5124　　高电压技术　　Vol.50, No.11: 5115-5124
2024 年 11 月 30 日　　High Voltage Engineering　　November 30, 2024
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20232048

重复脉冲下多电飞机驱动电机相间绝缘测试改进方法

程驰宙，王　鹏，黄文冬，马世金，赵文焕，朱英伟
（四川大学电气工程学院，成都 610065）

摘　要：低气压条件下阻挡和电弧放电是制约多电飞机驱动电机绝缘可靠性的潜在隐患。根据现有绝缘标准，模拟实际电控应力进行局部放电起始电压(partial discharge inception voltage, PDIV)测试是评估航空驱动电机绝缘性能的重要手段。国际电工委员会发布的 IEC 相关标准在指导电机绝缘性能评估方面得到了一定应用。然而，研究表明，按照 IEC 标准测试流程通过测试的电机在实际运行中仍有可能出现绝缘过早失效问题。对此，文章首先分析了 IEC 标准中采用的测试方法，指出在局部放电起始电压测试环节应用了不恰当的波形和接线方式是 PDIV 测试结果不准确的主要原因。通过实验论证了测试使用的电压波形和接线方式对 PDIV 测试结果真实性的影响，并提出了改进的测试方法；然后，使用有限元仿真分析了多种测试方式下电机内部的电压分布状态，从理论层面解释了改进后测试方法的科学性；最后，使用改进后的方法研究了低气压环境下驱动电机的 PDIV 特性，验证了改进的测试方法的有效性。结果表明：改进后的测试方法可以克服 IEC 相关标准中测试的缺陷，应用改进后的测试方法可以有效降低绝缘测试误判的可能性。该研究有望对全电和多电飞机驱动电机绝缘系统评估提供理论和实验参考。
关键词：驱动电机；绝缘系统；重复脉冲；局部放电；多电飞机

Insulation Test Improved Method of More-electric Aircraft Drive Motor Hairpin Winding Motor Under Repeated Pulse

CHENG Chizhou, WANG Peng, HUANG Wendong, MA Shijin, ZHAO Wenhuan, ZHU Yingwei
(College of Electricwsal Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract：Dielectric barrier and arc discharge under low pressures are potential risks that restrict the insulation reliability of multi-electric aircraft drive motors. partial discharge inception voltage (PDIV) test by simulating the actual electronic control stress of automobile is an important way to evaluate the insulation performance of the drive motor. The IEC standards have been applied to guide the insulation performance assessment of motors. Previous study shows that the motor that has passed the IEC standard test process may still have premature insulation failure in actual operation. First, the paper analyzes the test method used in IEC standard, and points out that the inappropriate waveform and wiring mode applied in the PDIV testing session are the main reasons for the inaccurate PDIV results. Then, the influence of the voltage waveform and wiring mode used in the test on the authenticity of PDIV test results is proved, and the improved test method is proposed. Finally, the scientific nature and effectiveness of the improved method are proved by combining the actual and simulated measurements. The results show that the improved test method can compensate the test defects in the IEC related standards, and effectively reduce the possibility of test miscalculation. This research is expected to provide practical reference for the revision of the evaluation standards of drive motor insulation system.
Key words：drive motor; insulated system; repeated pulses; partial discharge; multi-electric-aircraft

0　引言

在多电飞机上使用基于宽禁带器件(碳化硅、碳化硅和氮化镓、氮化镓)的驱动设备具有多种优势。与传统硅器件相比，碳化硅器件制作的逆变器可以工作在更高温度和电压下，其频率可以达到 100 kHz 级别，这些特性可以实现较大的功率密度和更高的工作电压[1]。然而，低气压下更高等级逆变器电压下驱动电机绝缘系统失效风险的增加将会是未来多电飞机发展的隐患。研究指出，重复脉冲下定子绝缘系统缺陷处出现的局部放电(partial discharge，PD)引起的加速电老化是电机绝缘失效的主要原因[2]。在电机投入运行之前，需要在模拟实际电控产生的重复脉冲电压下进行电机局部放电起始电压(partial discharge inception voltage，PDIV)检

基金资助项目：国家自然科学基金(51977134)。
Project supported by National Natural Science Foundation of China (51977134).

测，确保电机投入运行后，PDIV 大于预期的工作电压，以保证电机在全寿命周期内不出现局部放电从而导致绝缘过早失效。同时利用 PDIV 检测数据评估驱动电机绝缘性能，优化绝缘系统设计。

国际电工委员会(International Electrotechnical Commission，IEC)发布了 IEC 60034-18-41 和 IEC 61934 标准以指导驱动电机绝缘性能评估[3-4]，标准介绍了电机 PDIV 测试中推荐应用的波形和接线方式，对测试方法和具体流程有具体阐述，该标准在生产实践中得到了一定采纳和应用，对电机投运前的绝缘性能评估和优化绝缘设计具有指导作用。

然而，在上述 IEC 标准的应用过程中仍有报道显示，即使遵循 IEC 标准推荐的测试方法和流程进行测试，结果仍出现了“伪通过”案例，即在测试中显示 PDIV 满足设计要求的电机在投入运行时出现了电机绝缘的过早失效问题[5-6]，实际使用寿命远低于预期设计寿命。表明现行的 IEC 标准中对电机绝缘系统进行 PDIV 测试的方法上尚存在误判的可能性。

针对上述问题，本文以报道中的“伪通过”案例作为样本，搭建了驱动电机电应力测试平台，对比分析了单极性脉冲激励下电机主绝缘与相间绝缘电压的定量关系，并指出了单极性脉冲在测试电机绝缘 PDIV 时的不足。分析了变频驱动下主绝缘与相间绝缘的实际电应力状态，并提出了双极性脉冲 PDIV 测试方法，结合电机外壳接地与悬空 2 种状态，对比分析了 4 种测试波形与接线方式的组合各自对电机主绝缘和相间绝缘应力的定量关系，利用 ANASY 有限元仿真，对 4 种组合下电机内部的电应力分布进行了仿真测量，与实测结果对比论证了改进后测试方法的科学性，最后使用改进后的测试方法研究了低气压条件下多电飞机驱动电机的 PDIV 特性，再次论证了改进后测试方法的有效性。

实验结果表明：对于电机定子试样，单极性脉冲下主绝缘与相间绝缘电应力的重合将导致 PD 发生在主绝缘而非需要考察的相间绝缘，造成测量结果出现较大偏差。文章提出的双极性脉冲波形能更真实模拟实际运行中电机承受的电应力波形，能够比较准确地测量电机绝缘的 PDIV 水平；2 种不同形式的双极性脉冲和定子外壳接地与悬空等 4 种模式下的电应力分布状态及对应的有限元仿真从机理上解释了双极性差分脉冲在测量 PDIV 上的优越性。对低气压环境下多电飞机驱动电机 PDIV 特性研究证明了改进后方案的有效性，结果表明多电飞机驱动电机的 PDIV 随着气压降低而显著减小。上述结论有望为实际电机工程测试和相关标准的优化提供参考。

1 实验测试系统设计

测试系统的核心斩波器基于直流斩波原理，使用 MOSFET 固态开关对输入的直流按照一定频率进行斩波形成脉冲电压，输出至电机绕组。电机在高压脉冲下的局部放电信号由阿基米德螺旋天线[7-8]采集后经过 500 MHz 的高通滤波器过滤干扰后输入示波器，天线距离电机试样端部 10~15 cm。示波器采样频率为 10 GHz，带宽为 2.5 GHz，天线频带为 0.5~3 GHz。测试平台如图 1 所示。

使用 2 台斩波器分别输出高压脉冲，根据输出波形需求，选择使用正高压直流电源与负高压直流电源。输出至电机样品的高压脉冲使用高压探头以 1 000:1 分压比来采集，反馈至示波器。电机定子外壳使用铜带编织线缠绕后接地，保证可靠接地；电压电流保护装置基于霍尔传感器，如果检测到测试回路中电流超过实验预期值后将自动断开断路器来切断输出，保证人员和设备安全[9]。

实验需要发生单极性和双极性 2 种波形，单极性脉冲波形可以直接使用上述半桥电路产生，直流电源负极接地即可实现。对于双极性脉冲，需要 2 套上述电路产生相位或极性不同的脉冲，两脉冲在试样上进行差分，即可输出双极性脉冲。图 2 示意了 2 种波形的产生原理。

2 测试接线和测试结果

集中对比分析了单极性脉冲与双极性脉冲下外壳接地与悬空等共 6 种组合形式的测试方法，试样为 Hairpin 绕组驱动电机定子，额定电压为 800 V。

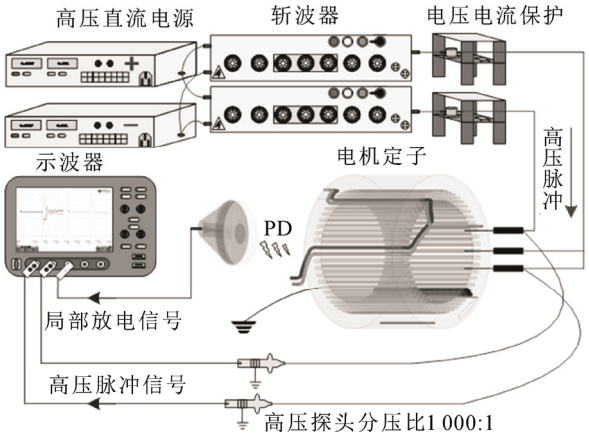
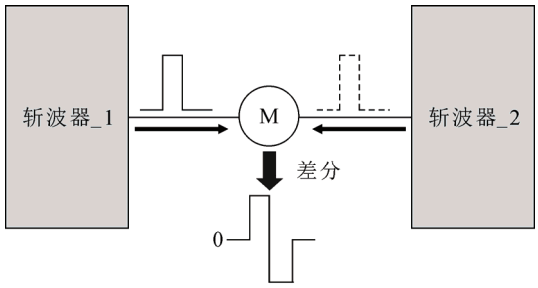
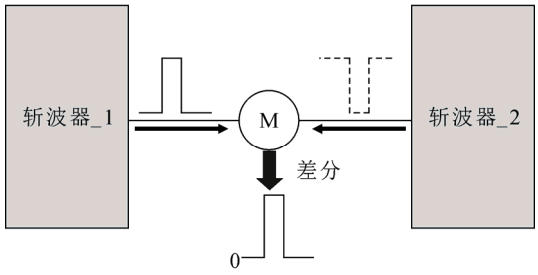


图 1 电机电应力测试平台示意图

Fig.1 Diagram of the PDIV test platform



(a) 两正极性差分示意图



(b) 正负极性差分示意图

图 2　双极性脉冲发生原理示意图

Fig.2　Diagram of the bipolar pulse occurrence principle

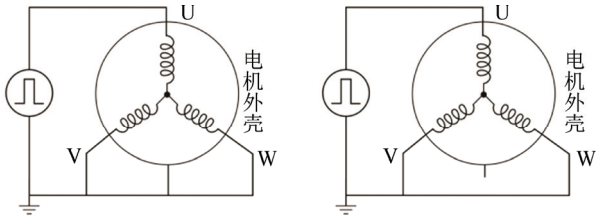
2.1　单极性脉冲测试

图 3 展示了 2 种常见单极性脉冲测试接线，其中 U、V、W 分别表示待测电机三相绕组出线端，这也是 IEC 标准推荐的测试相间绝缘 PDIV 的接线方式[3-4]。文章在上述接线方式下测量了单极性下相间绝缘与主绝缘的电应力水平。研究表明，不恰当的波形与接线方式会造成主绝缘承担过大的电应力，会促使较为薄弱的主绝缘先一步发生局部放电，导致测量相间绝缘 PDIV 出现困难。

以 20 V/s 的升压速率提升电压，为保证测试一致性，2 种单极性脉冲接线方式下统一输出直流母线电压为 2 kV。测试结果如表 1 所示。

图 4 展示了 Hairpin 绕组电机的绝缘结构，其中主绝缘结构为铜芯-漆膜-槽间纸-浸渍-定子铁芯，相间绝缘绝缘结构为铜芯-漆膜-浸渍-槽间纸-漆膜-铜芯，显然在使用相同材料的情况下，相间绝缘的强度要高于主绝缘。因此，采用单极性脉冲且外壳接地的方式测试 PDIV，在测试升压过程中较为薄弱的主绝缘首先会出现放电，即使升压直至相间绝缘出现放电，相间绝缘放电信号也会被早已出现的主绝缘放电信号所淹没，相间绝缘的 PDIV 测量也就难以进行[10]，图 5 示意了这一过程。

图 6 展示了在样品电机上的实际测试结果，当施加 3.47 kV 电压时检测到 PD 信号，此时主绝缘与相间绝缘承受几乎相同的电应力，根据上述分析可



(a) 单极性脉冲、外壳接地　(b) 单极性脉冲、外壳悬空

图 3　单极性脉冲测试接线

Fig.3　Unipolar pulse test wiring

表 1　单极性接线方式下电压定量关系

Table 1　Voltage distribution of the unipolar wiring mode

方案	主绝缘电压/kV	相间绝缘电压/kV
外壳接地	3.42	3.34
外壳悬空	3.38	5.16

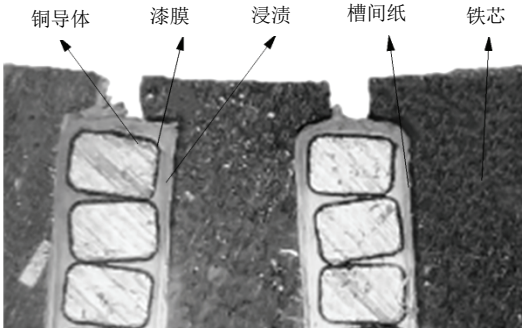
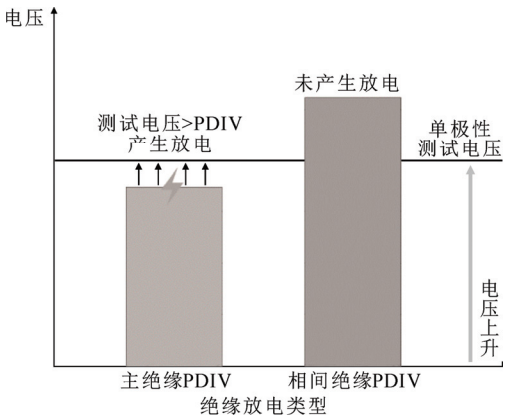


图 4　Hairpin 绕组电机绝缘结构示意图

Fig.4　Schematic diagram of the insulation structure of the Hairpin winding motor



绝缘放电类型

图 5　主绝缘先放电对测试的干扰示意图

Fig.5　Schematic diagram of interference caused by premature discharge of phase-to-ground insulation during testing

以判断是较为薄弱的主绝缘放电[11]。所以采用单极性脉冲外壳接地测试相间绝缘 PDIV 具有很大的局

限性，仅适用于主绝缘强度高于相间绝缘或少部分无相间纸的圆线散绕电机。对于电机定子，单极性脉冲下的 PDIV 测试具有较高的误判风险。

对于外壳悬空的接线方式，在相间绝缘承受高压脉冲时外壳上会感应出悬浮电位，悬浮电位可以一定程度上减轻主绝缘上承受的电应力[10]，但是这种悬浮电位受电机自身主绝缘的电容影响较大。类型多样的电机主绝缘电容不尽相同，所以在实际测试时会引入不可量化的因素，难以推广到类型多样的电机测试上。此外，实际使用单脉冲脉冲外壳悬空方式对电机进行测试，实际测试显示悬浮电位的大小有限，因而对主绝缘电应力水平的改善效果并不显著。表 2 统计了 3 台 Hairpin 绕组电机在多次测量后各位置平均电压之间的定量关系。

结果表明，相较于接地情况，单极性脉冲悬空对主绝缘上电应力状况会有所改善，这意味着在某些主绝缘与相间绝缘水平相近的电机上，采用单极性脉冲外壳悬空测试仍然可行。外壳悬空的方式是对外壳接地的改进，但是仍不能显著改善主绝缘上电应力过大的问题。当在相间绝缘水平和主绝缘水平相差较大时采用该接线方式，主绝缘先出现放电的可能性依然很高。这也是在文献[5-6]中的案例出现绝缘过早失效的原因。

综上所述，无论外壳接地与否，采用单极性脉冲测试电机定子相间绝缘都有可能受到主绝缘放电的干扰，提高 PDIV 误判的可能性，甚至完全无法考察待测位置的绝缘状况，因此相关 IEC 标准推荐的测试方法需要改进以避免上述情况的发生。

文章在 2.2 节提出了双极性脉冲的测试方法，分析对比了多种形式的双极性脉冲下外壳接地和悬空等 4 种组合测试方法

2.2 双极性脉冲方波测试

电机实际运行下承受的脉宽调制电压(pulse width modulation，PWM)在极性转换时电压波形呈现双极性特征[12]，如图 7 所示，图 7(b)为 PWM 波和极性转换瞬间的波形形状。因此，基于模拟相似的波形提出了双极性脉冲下的电机绝缘 PDIV 测试方法，能更准确地评估电机绝缘状态。

如图 8 所示，在双极性脉冲下有 4 种常用的测试接线方式。其中双正脉冲差分是模拟电机实际运行条件下承受的电压提出的测试方式，正负脉冲差分方式是另 1 种可以减少电机 PDIV 测试时主绝缘电应力水平的测试方式[13]。

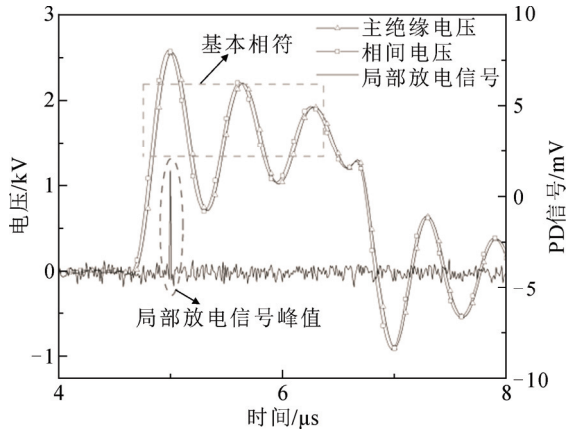


图 6 单极性脉冲下主绝缘与相间绝缘实际测试波形

Fig.6 Actual waveforms of phase-to-ground and phase-to-phase insulation under unipolar pulse

表 2 相间、主绝缘电压与悬浮电位数量关系

Table 2 Relationship between phase-to-phase and phase-to-ground insulation voltage and suspension potential

直流母线电压/kV	相间电压/kV	主绝缘电压/kV	悬浮电位/kV
2	2.83	1.83	1
2	2.97	2.09	0.88
2	3.05	1.94	1.11

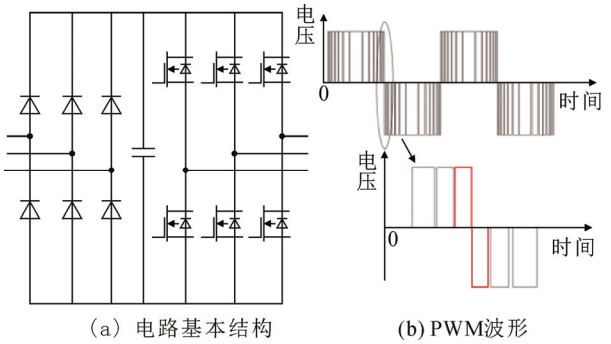
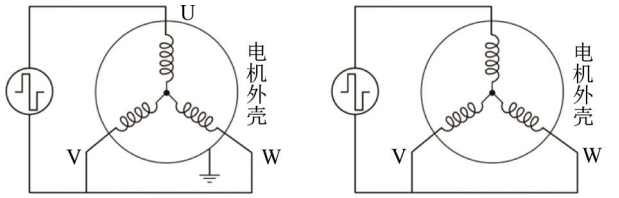


图 7 电机驱动条件及输入波形

Fig.7 Motor driving conditions and the input waveform

在上述 4 种接线方式下测试电机相间绝缘 PDIV，结果表明采用双极性脉冲且外壳接地条件下进行测试可以将被测相和电机外壳之间的电应力(主绝缘电压)降至约相间电应力的一半，有效避免单极性脉冲测试时主绝缘出现放电的情况。对图 8 所示的 4 种接线方式进行电应力测试，测试结果如图 9 所示，其中定义比例系数 K 表示主绝缘电压 U_{GW} 与相间电压 U_{PP} 的比值。图 10 展示了 4 种接线方式下的实际测试电压波形，途中 U-GND 与 VW-GND 分别表示 U 相对地电压与 VW 相对地电



(a) 两正脉冲差分双极性、外壳接地　(b) 两正脉冲差分双极性、外壳悬空

(c) 正负脉冲差分双极性、外壳接地　(d) 正负脉冲差分双极性、外壳悬空

图 8　双极性脉冲测试时的 4 种接线方式

Fig.8　Four wiring modes under bipolar pulse test

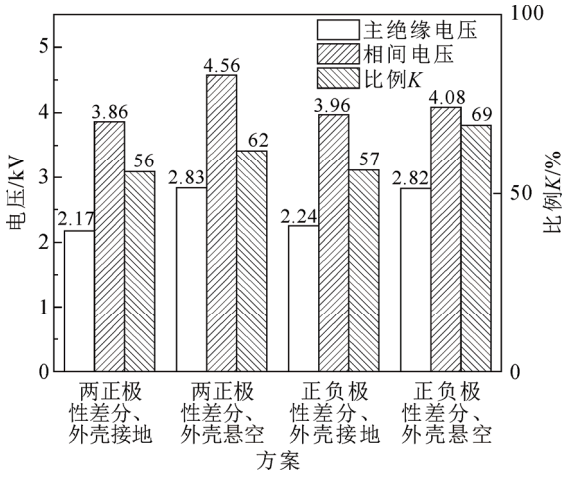
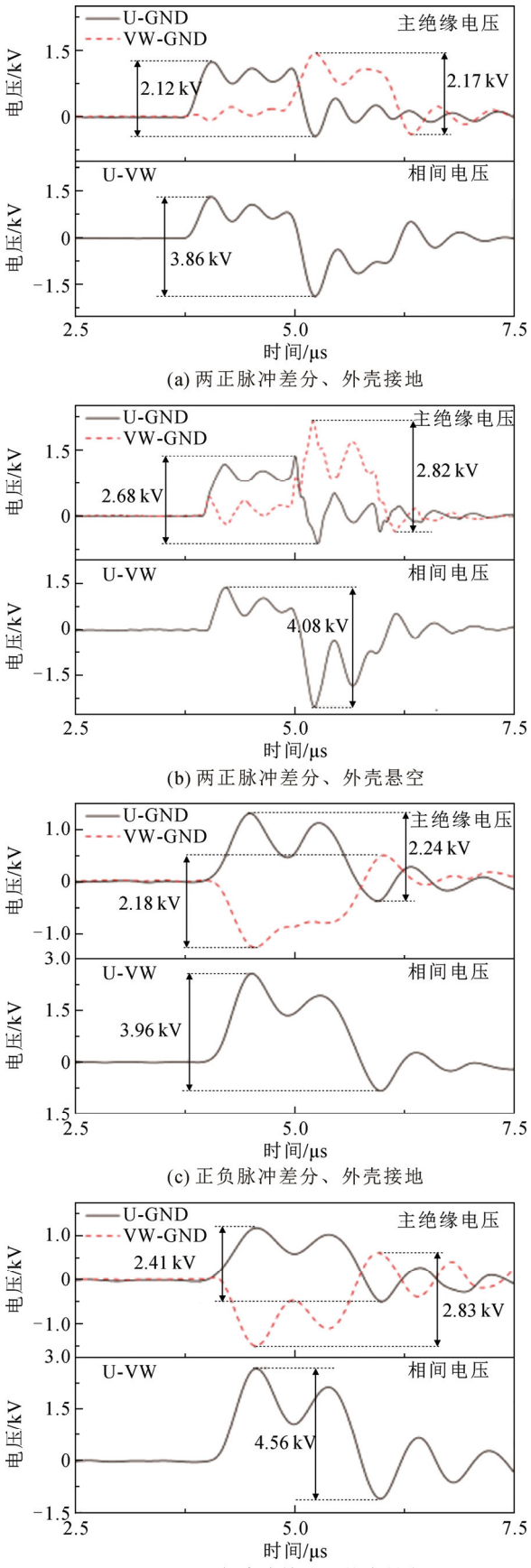


图 9　不同接线方式的主绝缘与相间电压定量关系

Fig.9　Quantitative voltage relationship between-phase-to-ground and phase-to -phase for different wiring modes

压。为保持测试的一致性，设置直流母线电压均为 2 kV，测试波形的参数统一设置为脉宽 2 μs，脉冲频率 50 Hz，上升时间 100~200 ns。

图 9 结果表明，相较于单极性脉冲主绝缘电压与相间绝缘电压几乎相等的情况(见表 1)，使用双极性脉冲进行 PDIV 测试可以有效减少主绝缘承受的电应力，更进一步，在外壳接地的条件下，主绝缘承受的电应力会降至接近相间绝缘的一半附近。这是因为双极性条件下在极性翻转瞬间，位于两相的 2 股电磁线之间电压差会增加至母线电压的 2 倍，但是外壳接地时，相与外壳之间的主绝缘电压仍然是直流母线电压，在上述的电应力条件下，在很大程度上保证了相间承受较大的电应力测试 PDIV



(a) 两正脉冲差分、外壳接地

(b) 两正脉冲差分、外壳悬空

(c) 正负脉冲差分、外壳接地

(d) 正负脉冲差分、外壳悬空

图 10　不同接线方式的主绝缘与相间电压波形

Fig.10　Phase-to-ground and phase-to -phase voltage waveforms of different connection modes

时，主绝缘上的电应力不足以引发主绝缘局部放电，也就避免了主绝缘放电对相间绝缘 PDIV 测试的影响。所以在以电机作为测试对象时，使用双极性脉冲波形且外壳接地的测试方法是更合理和准确的选择。

2.3 应用新测试方法的低气压下 PDIV 实测

小型商用飞机的起飞、爬升和巡航 3 个典型过程对应不同高度，本文对应选取 3 个过程对应高度的气压——常压、70 kPa 和 50 kPa 3 个气压条件，利用双正极性差分脉冲下外壳接地的测试方案研究了低气压条件下多电飞机驱动电机 PDIV 特性。验证改进后测试方案的有效性。研究采用 3 台 Hairpin 绕组扁线电机作为试样，电机额定电压为 800 V，编号为 1、2、3。实验波形参数测试波形的参数统一设置为脉宽 2 μs、脉冲频率 50 Hz、上升时间 100~200 ns、升压速率 20 V/s。实验测量了试样在 3 种气压状态下的 PDIV，实验结果如图 11 所示。

实验结果表明，随着实验气压逐步降低，电机绝缘 PDIV 逐渐下降，PDIV 对气压的变化较为敏感，在 50 kPa 气压下，PDIV 最大可降低 29.7%，显然这对多电飞机驱动电机绝缘系统是潜在的威胁，需要重点关注。PDIV 与气压的相关性可以用汤逊理论进行分析，理想气体状态方程(式(1))表述了气压 p(单位 Pa)，体积 V(单位 m^3)，温度 T(单位 K)，气体物质的量 n(单位 mol)，摩尔气体常数 R 之间的关系。

$$PV = nRT \tag{1}$$

在电机缺陷处出现局部放电时，假设温度 K 与体积 V 均不变，则环境气压 p 减小时，单位体积内气体分子减少，气体分子间的距离增大，根据汤逊理论 γ 过程，更大的分子距离将使激发的电子获得更多的动能，碰撞时电子具有的能量更高，所以低气压环境下较低的场强也能使电子具有足够的能量诱发局部放电，宏观上表现为更低的局部放电起始电压。

3 接线方式对电应力分布影响的仿真及验证

采用 ANSYS 有限元仿真，定子绕组可以视为由多个 Hairpin 单元连接而成[14]，通过有限元方法分析可以计算每个单元对应的电容电阻电感参数，根据“Π”形等效电路模型将每个 Hairpin 单元视为如图 12 所示的电路单元。实验仿真采用的电机模型为短距电机，此类电机可以有效减少绕组谐波，其绝缘结构特点是：在电机定子槽内含有不同相，其中更是存在绕组首段和末端相邻的极端情况[15]，此种情况下两线圈之间电应力差最大，也是绝缘的薄弱点，仿真也针对上述薄弱点进行重点分析。此外，该部分主要讨论图 8 所示的不同模式的双极性脉冲下的绝缘电应力分布状态，对单极性脉冲不再赘述。

整体的定子绕组电路可以视为若干个如图 12 所示的电路单元的串联，电机整体可以等效为如图 13 所示的 1 个集中参数模型[16]，从模型出线端输入脉冲后可以观察内部相与外壳之间的电压和相间电压的分布状况，从而对比相间电压与主绝缘电压的定量关系。

仿真结果展示了电机三相中的不同位置上的电应力分布状态，仿真结果与第 2 章实测结果对比

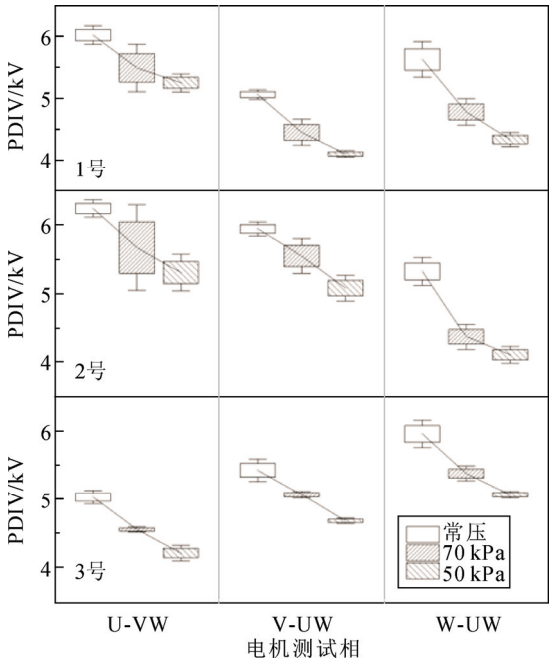


图 11 不同气压下 3 台电机的 PDIV 特性

Fig.11 PDIV characteristics of the three motors at different air pressures

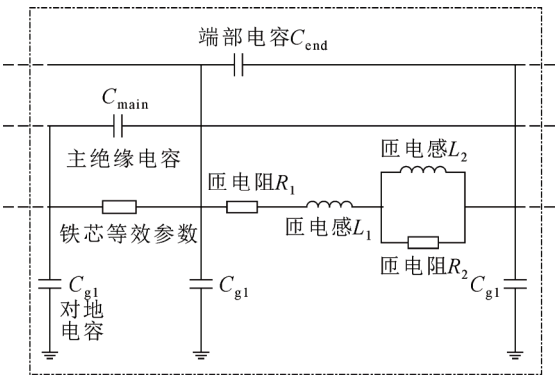


图 12 仿真使用的等效电路单元

Fig.12 Equivalent circuit unit used in the simulation

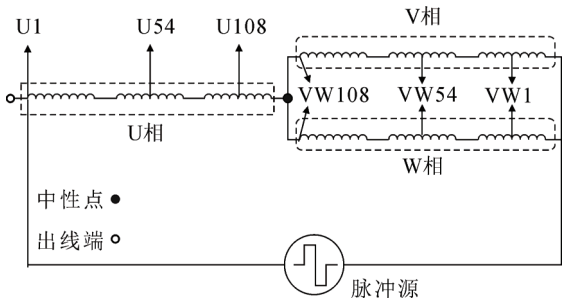


图 13　定子绕组仿真集总参数模型及电压测量节点

Fig.13　Lumped parameter model of stator winding simulation and voltage measurement node

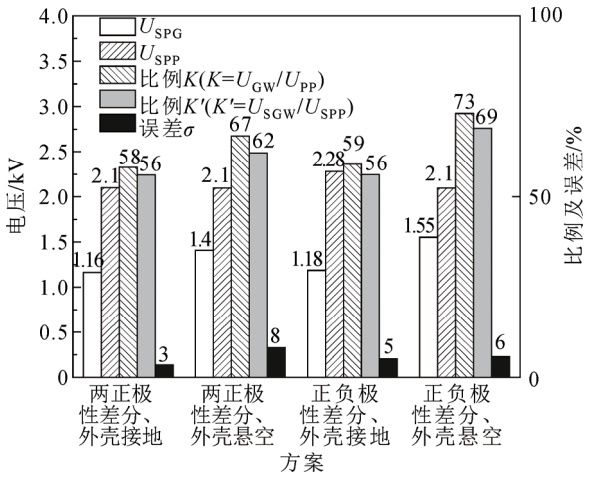


图 14　仿真结果与实际测试对比

Fig.14　Comparison between simulation and actual tests

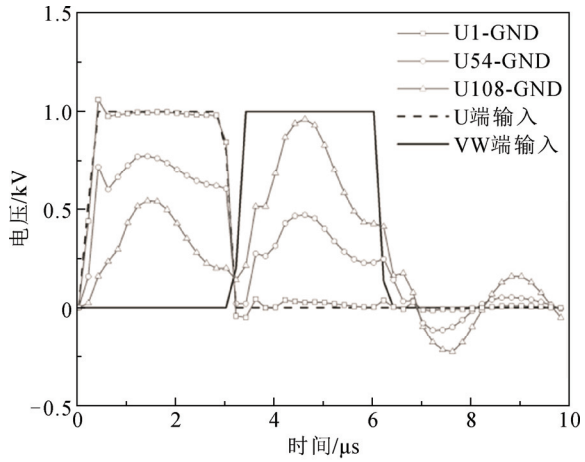
如图 14 所示，其中定义比例系数 K'表示仿真主绝缘电压 U_{SPG} 与相间电压 U_{SPP} 的比值，式(2)为仿真与实测的误差 σ 的计算式。

$$\sigma=\left|\frac{K'-K}{K}\right|\times 100\% \tag{2}$$

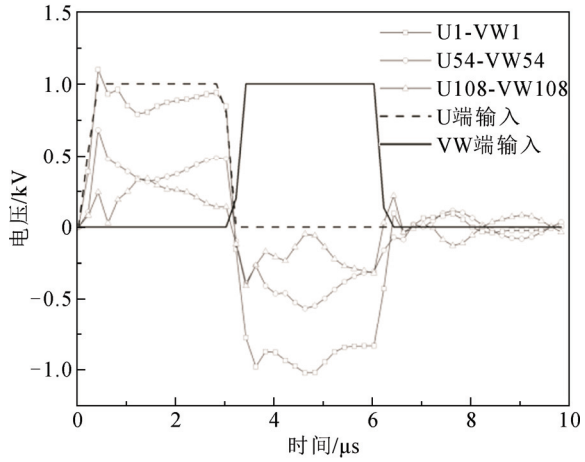
1）两正极性差分、外壳接地的接线方式的主绝缘电压以及相间电压的仿真结果如图 15 所示，由于外壳接地其电位为 0，U 相对定子外壳之间的主绝缘电压始终为正值，主绝缘电压约为 1.16 kV，而相间电压约为 2.1 kV，比值 K'(58%)与实测值 K(56%)相近，证明了仿真的准确性。

图 15(a)中曲线为 U 相对外壳的电压，实质上也是电机内部主绝缘承受的电压，与第 2 章实测分析一致，此时主绝缘电压最大值与直流母线电压相同(忽略过电压)。对应地，相间电压最大值则约为直流母线电压的 2 倍(忽略过电压)，该接线方式下可以区分相间绝缘电应力与主绝缘电应力。在实际应用测试 PDIV 中可以保证测量相间 PDIV 过程中主绝缘不放电。

2）两正极性差分、外壳悬空的接线方式的主绝缘电压以及相间电压的仿真结果如图 16 所示。U1 位置电压提升，中性点附近的 U108 位置电压则有显著下降，这表明其相间电压分布不均匀性增强，主绝缘电压约为 1.4 kV；相间绝缘电压为 2.1 kV。比例 K'(67%)与图 9 中的主绝缘电压和相间电压的比值 K(62%)相近。相较于 1）的接地状态，相间绝缘电压基本一致，但是主绝缘电压有显著提升，其原因在于：第 1 个 U 相脉冲结束时，外壳上将感应出一定大小的正悬浮电位，小于第 2 个脉冲幅值，其将在 VW 相与外壳之间形成负电位，输入的正脉冲与该负电位差分将提高主绝缘实际承受电压，与单极性不同，双极性时悬空外壳对测试是不利的。



(a) U相对外壳电压

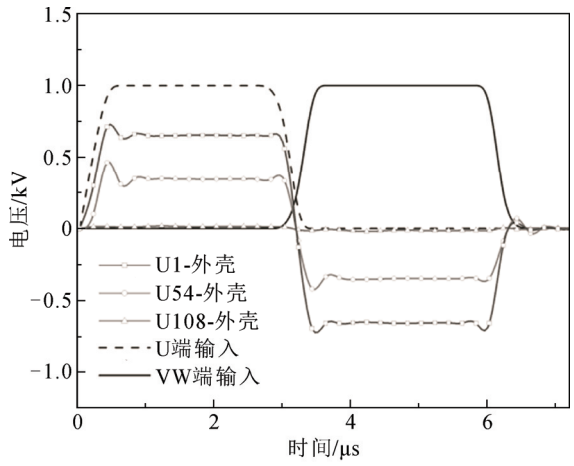


(b) 相间电压

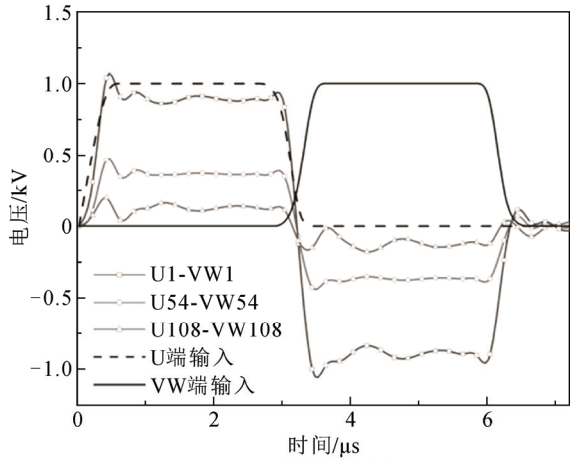
图 15　两正极性差分、外壳接地时的电压分布仿真

Fig.15　Simulation of voltage distribution of two positive polarity difference and grounding shell

3）正负极性差分、外壳接地的接线方式的主绝缘电压以及相间电压的仿真结果如图 17 所示。仿真中主绝缘电压为 1.18 kV，相间绝缘电压为



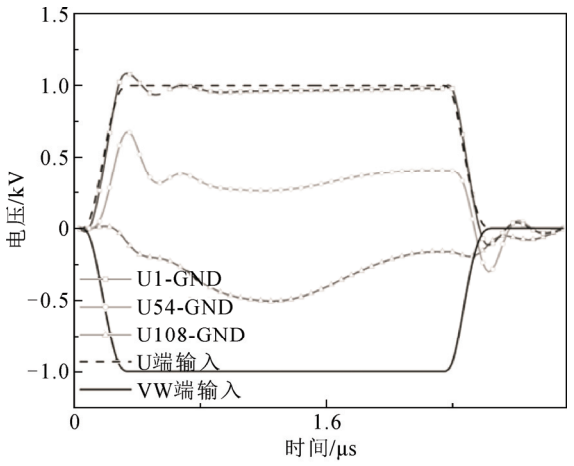
(a) U相对定子外壳电压



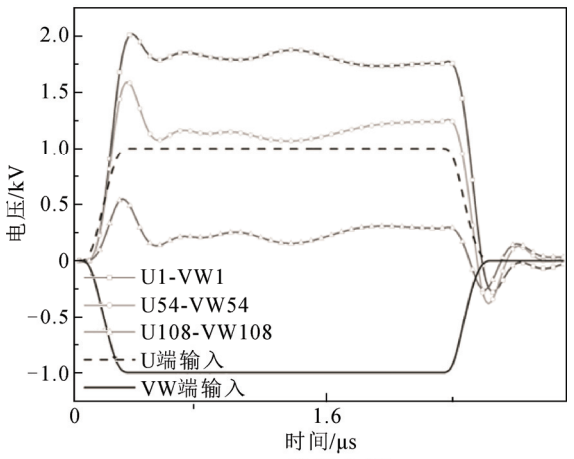
(b) 相间电压

图 16 两正极性差分、外壳悬空时的电压分布仿真

Fig.16 Simulation of voltage distribution of two positive polarity difference and suspended shell



(a) U相电压



(b) 相间电压

图 17 正负极性差分、外壳接地时的电压分布仿真

Fig.17 Simulation of voltage distribution between positive and negative polarity difference and grounding shell

2.28 kV。比例 K'(59%)与图 9 中的实测比值 K(56%)接近。可以看出，与两正极性差分双极性脉冲一样，正负极性差分的双极性脉冲也可以有效将主绝缘电压降低。其原因与 1)分析一致，不再赘述。

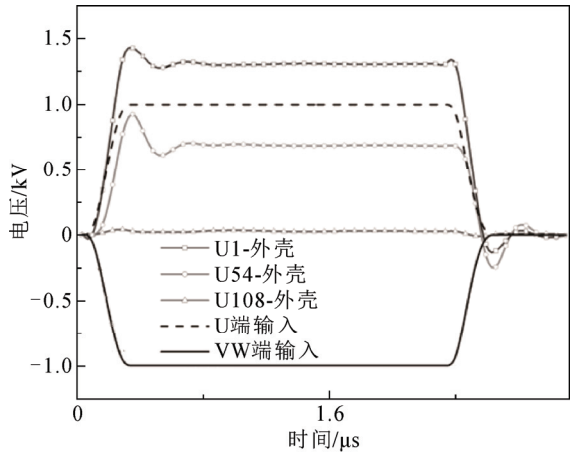
4）正负极性差分、外壳悬空电压分布仿真结果如图 18 所示。主绝缘电压峰峰值为 1.55 kV，相间电压为 2.1 kV。主绝缘电压与相间电压比值 K'(73%)与图 9 中实测比值 K(69%)误差约为 5.7%；显然 K 与 K'都有显著增大。其原因在于，正负极性差分时，尽管正负直流母线电压一致，但是由于电路结构并不对称，U 与 VW 相的脉冲响应不完全相同，导致外壳上会出现类似于直流偏置的悬浮电位[16]，该电位无论正负，都会和相反极性的输入脉冲差分出更大的主绝缘电压，表现为其主绝缘电压比例相较于悬空状态有显著增大，这对于测试显然是不利的，所以该方法不推荐。

对比外壳接地与悬空，从实测与仿真两方面都显示，接地时比例 K(56%)小于悬空时的比例 K'(62%、65%)，这意味着同等相间电压水平下相较于外壳悬空的状态，外壳接地时主绝缘上将承受更小的电应力，在测试升压过程中不容易发生放电。综合对比单极性测试结果，采用双极性脉冲同时外壳接地可以显著降低主绝缘上的电应力水平。因此使用双极性脉冲且外壳接地是脉冲下测试电机定子绝缘较好的方式。

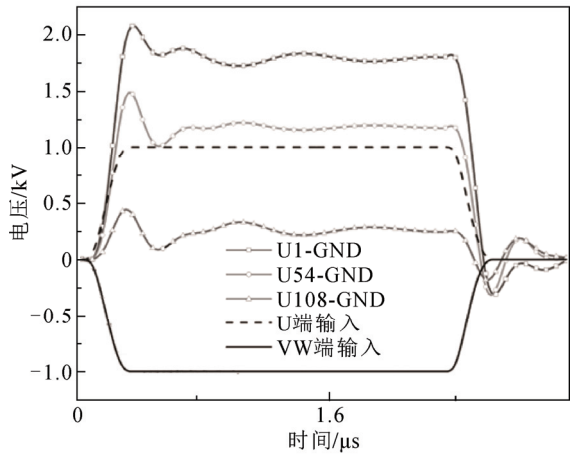
4 结论

本文基于对驱动电机 PDIV 测试过程中的“伪通过”案例的分析，指出了 IEC 电机测试标准在实际应用中的一些盲区，并结合有限元仿真结果提出了新的测试方案及接线方式。主要有以下结论。

1）单极性脉冲电压对测试电机定子试样较为



(a) U相对定子外壳电压



(b) 相间电压

图 18　正负极性差分、外壳悬空时的电压分布的仿真

Fig.18　Simulation of voltage distribution between positive and negative polarity difference and suspended shell

困难，原因在于在对相间施加电应力过程中，主绝缘与相间绝缘会承受相同或相近的电应力水平，相对薄弱的主绝缘会先出现放电，后续即使相间绝缘出现放电，放电信号也会被淹没，导致相间绝缘 PDIV 无法测量。

2）应用双极性脉冲波形进行电机相间绝缘 PDIV 测试时，可以显著降低主绝缘上的电应力。测试时电机外壳接地更可使主绝缘上的电应力进一步降至相间电压的 56%。在此条件下进行相间绝缘 PDIV 测试可以有效避免主绝缘承受过大的电应力出现放电。

3）低气压环境下驱动电机 PDIV 与气压呈现正相关，PDIV 随气压的降低而降低，在 50 kPa 大气压下，PDIV 较常压下最多下降 29.7%。考虑多电飞机驱动环境，低气压下飞机的绝缘性能需要重点关注。

4）搭建了定子绕组电压分布的仿真模型，对双极性脉冲下的 4 种接线方式的内部电应力分布进行仿真，与实测的电压分布进行对比，验证了双极性脉冲下外壳接地的接线方式的合理性和准确性，可以为电机设计与绝缘优化提供一定参考。

参考文献　References

[1] FORNASARI L, CAPRARA A, MONTANARI G C. Partial discharge measurements in electrical machines controlled by variable speed drives: from design validation to permanent PD monitoring[C]// 2013 9th IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED). Valencia, Spain: IEEE, 2013: 384-390.

[2] WANG P, GU Y H, WU Q, et al. Influence of ambient humidity on PDIV and endurance of inverter-fed motor insulation[C]// 2019 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC). Calgary, Canada: IEEE, 2019: 201-204.

[3] IEC. Rotating electrical machines-part 18-41: partial discharge free electrical insulation systems (type I) used in rotating electrical machines fed from voltage converters-qualification and quality control tests: BS-EN 60034-18-41—2014[S]. New Delhi, India: BIS, 2014.

[4] IEC. Electrical insulating materials and systems-electrical measurement of partial discharges (PD) under short rise time and repetitive voltage impulses: IEC/TS 61934—2011[S]. Geneva, Switzerland: IEC, 2011.

[5] TOZZI M, CAVALLINI A, MONTANARI G C. Monitoring off-line and on-line PD under impulsive voltage on induction motors, part 1: standard procedure[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2010, 26(4): 16-26.

[6] CAVALLINI A, LINDELL E, MONTANARI G C, et al. Off-line PD testing of converter-fed wire-wound motors: when IEC TS 60034-18-41 may fail[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2010, 17(5): 1385-1395.

[7] 马世金，王　鹏，董　涵，等. 用于高频脉冲电压下变频电机绝缘放电检测的特高频天线设计[J]. 高电压技术，2020，46(10)：3451-3459.
MA Shijin, WANG Peng, DONG Han, et at. Design of ultra-high frequency antenna for discharge detection under high frequency impulsive voltage conditions for inverter-fed motors insulation[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(10): 3451-3459.

[8] WANG P, MA S J, AKRAM S, et al. Design of an effective antenna for partial discharge detection in insulation systems of inverter-fed motors[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69(12): 13727-13735.

[9] AKRAM S, LIU X T, WANG P, et al. Design of a rectangular wave high voltage generator for the evaluation of inverter-fed motor insulation[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2023, 70(5): 4485-4493.

[10] TOZZI M, CAVALLINI A, MONTANARI G C. Monitoring off-line and on-line PD under impulsive voltage on induction motors-part 3: criticality[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2011, 27(4): 26-33.

[11] 郭厚霖，王　鹏，林　海，等. 低压散绕变频电机绝缘薄弱点定位方法研究[J]. 仪器仪表学报，2021，42(11)：140-149.
GUO Houlin, WANG Peng, LIN Hai, et al. Study on the location method of insulation weak point for low-voltage random-wound inverter-fed motor[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(11): 140-149.

[12] 李　丹，刘冠芳，吉永红，等. PWM 脉冲波对电机绕组时变特性影响研究[J]. 电机与控制应用，2021，48(12)：37-42，53.
LI Dan, LIU Guanfang, JI Yonghong, et al. Research on influence of PWM pulse wave on time-varying characteristics of motor windings[J]. Electric Machines & Control Application, 2021, 48(12): 37-42, 53.
[13] LEE S B, NAEINI A, JAYARAM S, et al. Surge test-based identification of stator insulation component with partial discharge activity for low voltage AC motors[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2020, 56(3): 2541-2549.
[14] 黄文冬，王　鹏，朱英伟，等. Hairpin 绕组电机电压分布仿真计算与绝缘优化[J]. 高电压技术，2023，49(6)：2458-2465.
HUANG Wendong, WANG Peng, ZHU Yingwei, et al. Voltage distribution simulation and insulation optimization of hairpin winding motor[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(6): 2458-2465.
[15] SOUSA FERREIRA R, FERREIRA A C. Analysis of end-windings influence on the transient voltage distribution in machine stator windings by a three phase model[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2021, 36(3): 2110-2119.
[16] FERREIRA R S, FERREIRA A C. Analysis of end-windings influence on the transient voltage distribution in machine stator windings by a three phase model[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2021, 36(3): 2110-2119.



程驰宙
2000—，男，硕士生
主要从事变频电机绝缘测试技术与绝缘性能的评估工作
E-mail: ccz@scu.stu.edu.cn

CHENG Chizhou



王　鹏(通信作者)
1982—，男，博士，副教授，博导
主要从事新能源、电力电子装备中的绝缘系统性能等方面的评估研究
E-mail: pwang@scu.edu.cn

WANG Peng
Ph.D.
Associate professor
Corresponding author

收稿日期　2023-11-20　修回日期　2024-02-19　　编辑　曾文君