第 50 卷 第 11 期：5014-5021 高电压技术 Vol.50, No.11: 5014-5021
2024 年 11 月 30 日 High Voltage Engineering November 30, 2024
**DOI**: 10.13336/j.1003-6520.hve.20231420

# 脉宽调制电压下频率对电动汽车驱动电机绝缘耐电晕寿命影响

彭 增[1]，王 鹏[1]，朱英伟[1]，于超凡[1]，赵安然[2]，林熙云[3]
（1. 四川大学电气工程学院，成都 610065；2. 中车株洲电力机车研究所有限公司，株洲 410002；
3. 先登高科电气股份有限公司，湖州 313000）

**摘 要**：采用脉宽调制技术驱动的电动汽车绝缘系统将承受严酷的高频脉宽调制电压。基波频率和载波频率是脉宽调制电压的关键参数。该文搭建了高频耐电晕测试平台，研究了不同基波频率和载波频率对电动汽车驱动电机电磁线的局部放电分布特性和绝缘耐电晕寿命的影响。测试结果及分析表明：在脉宽调制电压下，局部放电主要集中在基波极性翻转处，且呈不对称分布；采用频率-寿命反幂模型对绝缘耐电晕寿命进行拟合，得到不同基波/载波频率与寿命拟合曲线预测模型，结果表明试样的耐电晕寿命随基波频率和载波频率的增加均呈幂指数下降；在基波频率一定时，不同载波频率下的电压耐电晕寿命曲线经反幂变换后呈现平行趋势，因此基波频率与载波频率的耦合交互作用可考虑为频率-寿命反幂模型垂直移动常数因子。该研究有望为电动汽车电机绝缘耐电晕寿命测试提供试验与理论依据。

**关键词**：脉宽调制；电动汽车；耐电晕寿命；基波频率；载波频率

## Impact of Frequency on the Endurance Lifetime of Electric Vehicle Drive Motor Insulation with Pulse Width Modulation Voltage

PENG Zeng[1], WANG Peng[1], ZHU Yingwei[1], YU Chaofan[1], ZHAO Anran[2], LIN Xiyun[3]
(1. College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China;
2. CRRC Zhuzhou Electric Locomotive Research Institute Co., Ltd., Zhuzhou 410002, China;
3. Xiandeng High-Tech Electric Co., Ltd., Huzhou 313000, China)

**Abstract**: The insulation systems of electric vehicles driven by pulse width modulation (PWM) technology are subjected to severe high-frequency PWM voltages. The fundamental frequency and carrier frequency are critical parameters of the PWM voltage. This paper establishes a high-frequency endurance testing platform to investigate the effects of varying fundamental and carrier frequencies on the partial discharge distribution characteristics and insulation endurance lifetime of the magnet wire in electric vehicle drive motors. The test results and analysis indicate that, under PWM voltage, partial discharges are primarily concentrated at the points of fundamental polarity reversal, exhibiting an asymmetric distribution. A frequency-lifetime inverse power model was used to fit the endurance lifetime so as to obtain the predictive models of different fundamental frequencies and carrier frequencies with endurance lifetime. The results show that the endurance lifetime of the samples decreases exponentially with increasing fundamental and carrier frequencies. When the fundamental frequency is constant, the voltage endurance lifetime curves at different carrier frequencies exhibit a parallel trend after inverse power transformation. Thus, the coupling interaction between the fundamental frequency and carrier frequency can be considered as a vertical shifting constant factor in the frequency-lifetime inverse power model. This research is expected to provide both experimental and theoretical supports for testing the endurance lifetime of electric vehicle motor insulation.

**Key words**: pulse width modulation; electric vehicle; endurance lifetime; fundamental frequency; carrier frequency

**基金资助项目**：国家自然科学基金 (51977134)；四川省科技计划项目 (2021YFG0351)。
Project supported by National Natural Science Foundation of China (51977134), Science and Technology Program of Sichuan Province (2021YFG0351).

## 0　引言

电动汽车因其效率高、污染低、噪声小等特点，成为新能源行业的重点研发领域[1]。近年来，SiC等第三代宽禁带半导体器件逐步应用在电动汽车驱动系统中，在提高驱动电机的开关频率和载流能力、降低谐波损耗、提高电机效率的同时，也为驱动电机绝缘带来了新的挑战[2-3]。

电动汽车由 SiC 器件产生的高频脉宽调制(pulse width modulation, PWM)电压驱动，PWM 电压具有快速的上升下降沿[4]，同时受到馈电电缆、变频器阻抗不匹配等因素影响，因此电机端部电压可能达到直流母线电压的 2 倍[5]，当电机承受电应力超过电机局部放电起始电压(partial discharge inception voltage, PDIV)时，局部放电将以较高概率出现，放电会导致材料的破坏和降解，表面容易产生裂隙和发生氧化作用，同时产生局部高温，会降低材料的机械强度，从而降低耐电强度，加速材料的老化进程，导致电机绝缘早期失效，严重制约了电动汽车的进一步发展[6-7]。

针对频率对电机绝缘寿命的影响，国内外学者进行了大量研究，文献[8]得出频率升高使得电机绝缘的服役周期大幅下降，严重威胁电机绝缘的安全性。文献[9]研究了不同频率下 PDIV 变化趋势与放电特性变化。文献[10]研究发现，对于简单试样，频率几乎不会影响 PDIV，介电常数在脉冲电压较广的频率范围内不变。文献[11]研究了频率 5~200 kHz 时，虽然 PDIV 不会发生变化，但由于空间电荷的积累，重复局部放电起始电压(repetitive partial discharge inception voltage, RPDIV)会下降。文献[12]研究了不同频率下电机绝缘的耐久性能。文献[13]研究了在不同频率重复脉冲下，绝缘内部电树枝的生长特性。文献[14]研究了电力电子设备在脉冲电压下电荷行为对电力电子装备绝缘的劣化作用。上述研究主要探讨了频率变化对于电机绝缘 PDIV 及耐电晕寿命的影响，然而上述试验仅采用简单的重复脉冲波形，与电动汽车驱动电机实际承受 PWM 驱动波形不一致，难以直观、有效地评估频率变化对电机绝缘的影响。此外，文献[15]研究了电机定子绕组电压分布，指出电机定子绕组中相间绝缘、相-地(主绝缘)和匝间绝缘 3 种结构中，相间绝缘承受的电应力最大，对于电机绝缘系统需首先考虑相间绝缘。

综上所述，本文依据 GB/T4074.5—2008[16]将 2 根直径 0.7 mm、绝缘厚度 28 μm、绝缘等级 F 级的聚酰亚胺漆包线绕制成长约 12.5 cm，夹角约 60°的绞线对。在脉宽调制电压下，试样的特征 PDIV 为 1.68 kV。搭建高频耐电晕老化平台，产生电动汽车驱动电机相间实际承受的高频脉宽调制电压波形，改变不同基波/载波频率进行耐电晕寿命测试，并采用频率-寿命反幂模型对绝缘耐电晕寿命进行拟合，得到不同基波/载波频率与寿命拟合曲线预测模型；进一步，为探究基波频率和载波频率的耦合交互作用，采用电压-寿命反幂模型，得到在基波频率一定时，不同载波频率下寿命拟合曲线预测模型。该研究有望为电动汽车电机绝缘耐电晕寿命测试提供试验与理论依据。

## 1　试验测试平台

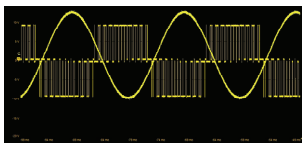
### 1.1　脉宽调制波形产生

为模拟电动汽车驱动电机相间实际运行时承受的脉宽调制电压波形，本文采用现场可编程逻辑门阵列(field programmable gate array，FPGA)产生脉宽调制波形，作为高压固态开关的触发信号。产生脉宽调制波形的基本原理是比较三角载波和正弦调制波的幅值大小，若三角波幅值大于正弦波，则输出低电平；反之输出高电平[17]。FPGA 中的正弦波和三角波离散数据的比较通过以下方式实现：将一个周期的正弦波和三角波进行数字化离散，并存入 FPGA 的只读存储器中(read-only memory, ROM)，工作时将三角波和正弦波离散数据以不同速率从 ROM 中循环取出进行比较，输出相应的脉宽调制波形。不同基波频率和载波频率的脉宽调制波形见图 1。

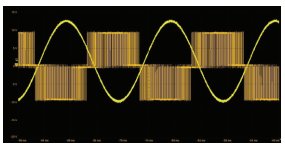
### 1.2　耐电晕寿命测试平台及参数

试验测试平台如图 2 所示。该平台包括：正负高压直流电源、高频脉冲发生器、恒温恒湿控制箱、五路计时装置(击穿自动停止计时)、高速示波器(带宽为 2.5 GHz)、特高频天线(能耗低于 10%，驻波比(voltage standing wave ratio, VSWR))<2[18]和 FPGA 控制板等器件组成。

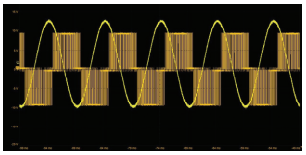
高压直流电源通过高频脉冲发生器进行斩波，脉宽调制波形的基波频率和载波频率由 FPGA 控制板控制，每组试验采用 5 个试样，试样击穿之后，五路计时装置切断对应高压继电器并分别记录老化寿命时长，试样两端的电压波形由高压差分探头接入高速示波器上显示。



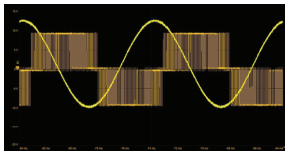
(a) 基波频率 50 Hz/载波频率 1 kHz



(b) 基波频率 50 Hz/载波频率 5 kHz



(c) 基波频率 100 Hz/载波频率 5 kHz



(d) 基波频率 100 Hz/载波频率 10 kHz

图 1 不同频率下脉宽调制波形

Fig.1 Pulse width modulation waveforms at different frequencies

为了解决局部放电信号和电力电子器件开断产生的干扰信号重叠问题，本文采用工作频带在 0.5~2 GHz 范围内的特高频天线，结合高频滤波器可有效滤除干扰信号，得到准确的局部放电信号[19]，用于绘制不同基波/载波频率下局部放电相位谱图(phase resolved partial discharge, PRPD)。

试验在恒温恒湿箱(120 ℃、相对湿度 40%)中进行，以减小环境湿度和温度的干扰，测试前使用无水酒精对试样表面进行清洗，并提前在 40 ℃温度箱中干燥 24 h，以清除试样表面的水分。耐电晕寿命测试试验参数如表 1 所示。

## 2 试验测试结果

### 2.1 不同频率下局部放电分布特性

在耐电晕试验测试过程中记录局部放电信号，不同基波频率和载波频率下的局部放电分布特性如图 3 所示。

由图 3 可见，局部放电发生的位置与基波频率和载波频率无关，总是发生在基波极性翻转处，这是因为试样施加的单极性电压峰峰值并未超过试样的 PDIV，仅在基波极性翻转处峰峰值电压超过试样的 PDIV；在基波频率为 500 Hz 时，随着载波频率逐渐升高，局部放电逐渐集中，且在非极性翻转处也出现了局部放电，这是由于载波频率的提高不会降低试样的 PDIV，但是由于空间电荷的积累，会降低试样的 RPDIV，在载波频率为 10 kHz 下，局部放电几乎全部集中在基波极性翻转处，且随着基波频率的提高，局部放电数量明显增加。

值得注意的是：与漆包扁线和单点交叉试样的

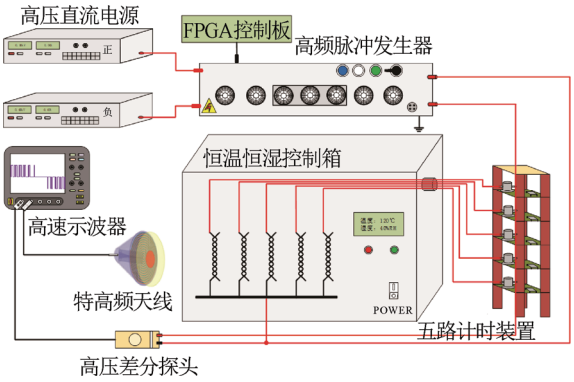



图 2 耐电晕寿命测试平台

Fig.2 Endurance lifetime test platform

表 1 耐电晕寿命测试参数

Table 1 Endurance lifetime test parameters

| 参数 | 数值 |
|---|---|
| 上升时间/ns | 100 |
| 基波频率/Hz | 50、200、266.67、500 |
| 载波频率/kHz | 5、10、15、20 |
| 老化电压/kV | 2.15、2.55、2.95、3.35 |
| 温度/℃ | 120 |
| 相对湿度/% | 40 |

高度对称不同，在圆线绕制过程中，由于采用手工绕制的方式，绞线对难以做到完全对称，因而测试所得局部放电统计特性呈现非对称状，而这种不对称在圆线绕制成电机(尤其是手工松散绕制)后会更明显，此类现象的出现缘于绝缘结构的不对称性。

为解释不同频率下放电特征参数的变化趋势，设两次局部放电间隔时间为 $t_{\text{inter}}$，脉宽调制电压基波频率为 $f$，则有如下表达式：

$$t_{\text{inter}} = \frac{1}{2f} \tag{1}$$

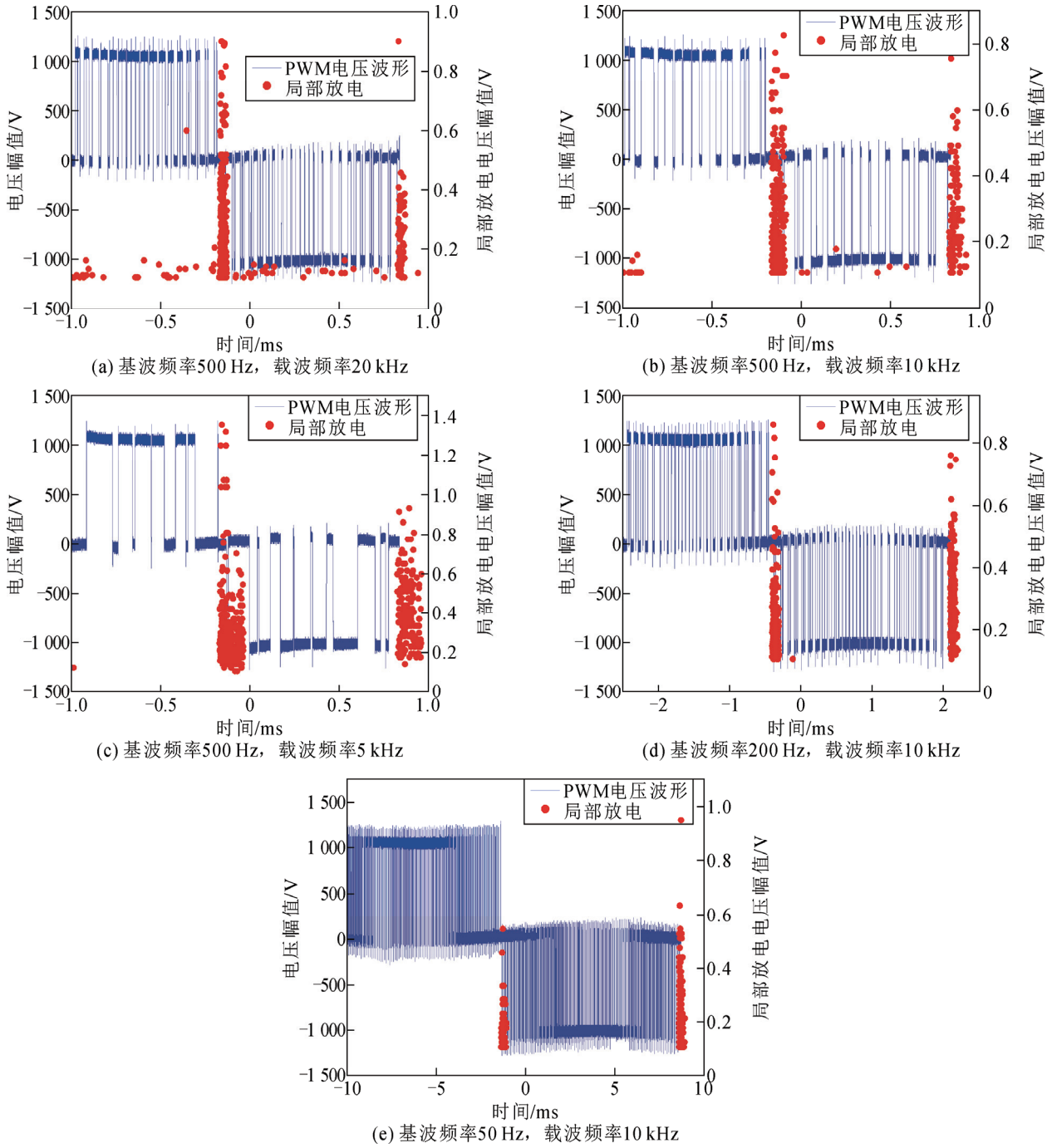
故而两次局部放电间表面电荷 $N_{\text{sc}}$ 衰减为：

$$N_{\text{sc}} = N_{\text{sc0}} \mathrm{e}^{-\frac{1}{2\tau f}} \tag{2}$$

式中：$N_{\text{sc0}}$ 为上一次局部放电时所产生的表面电荷总量；$\tau$ 为松弛时间常数，用于衡量表面电荷衰减，因此两次局部放电的表面电荷衰减比 $\lambda$ 可描述为：

$$\lambda = \mathrm{e}^{-\frac{1}{2\tau f}} \tag{3}$$

由图 4 可知，随着频率的增加，表面电荷衰减减少，因此在较高频率下，由于表面电荷衰减少，电压极性翻转时，在外部电场和表面电荷作用下，仅需在很小的外加电压下就能够引发局部放电，同时根据局部放电初始电子产生概率，表面电荷的积聚更容易产生局部放电初始电荷，从而引发放电。




(a) 基波频率500 Hz，载波频率20 kHz

(b) 基波频率500 Hz，载波频率10 kHz

(c) 基波频率500 Hz，载波频率5 kHz

(d) 基波频率200 Hz，载波频率10 kHz

(e) 基波频率50 Hz，载波频率10 kHz

图 3　不同频率下局部放电分布特性

Fig.3　Distribution characteristics of partial discharge at different frequencies

### 2.2　不同频率下绝缘耐电晕寿命测试结果

采用图 2 所示高频耐电晕测试平台，选取载波频率为 10 kHz，基波频率分别选取 50、200、266.67、500 Hz，峰峰值电压 2.55 kV、上升时间 100 ns 条件下，进行耐电晕老化试验，相同载波频率、不同基波频率下，绝缘耐电晕寿命测试结果如图 5 所示。

同样，采用图 2 所示高频耐电晕测试平台，选取基波频率为 500 Hz，载波频率分别选取 5、10、15、20 kHz，得到相同基波频率不同载波频率下耐电晕测试结果如图 6 所示。

### 2.3　不同电压等级下绝缘耐电晕寿命

采用图 2 所示高频耐电晕测试平台，选取载波频率为 500 Hz，分别选取基波频率 5、10、20 kHz，峰峰值电压 2.55、2.95、3.35 kV，上升时间 100 ns 条件下进行耐电晕老化试验，相同基波频率不同载波频率下绝缘耐电晕测试结果如图 7 所示。

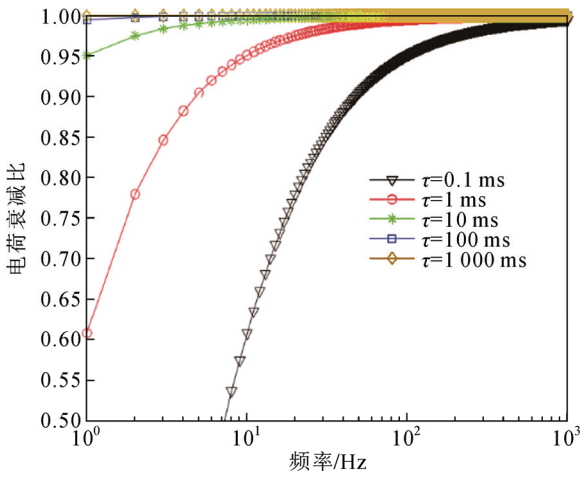



图 4 表面电荷衰减率随频率的变化

Fig.4 Variation of surface charge decay rate with frequency

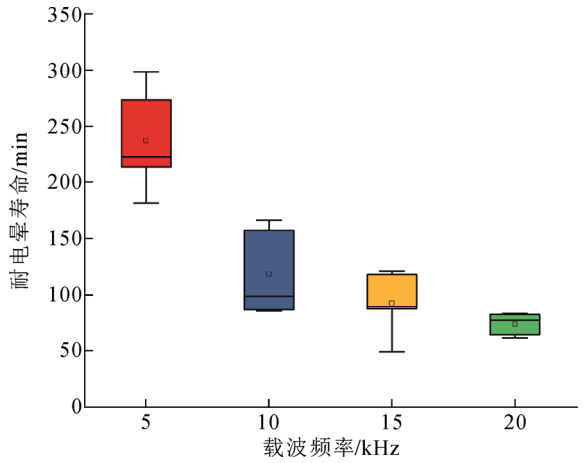



图 5 不同载波频率下绝缘耐电晕寿命测试结果

Fig.5 Insulation endurance lifetime test results at different carrier frequencies

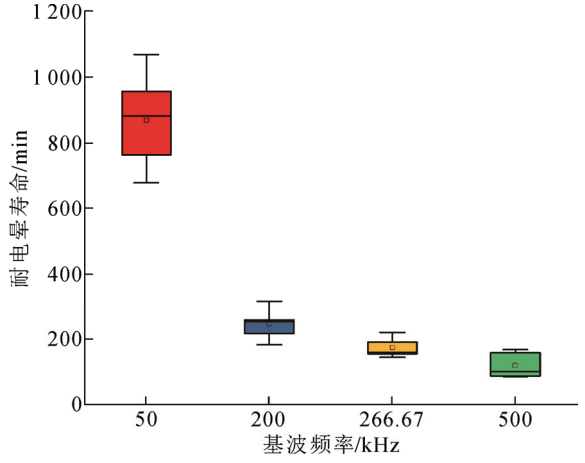



图 6 不同基波频率下绝缘耐电晕寿命测试结果

Fig.6 Insulation endurance lifetime test results at different fundamental frequencies

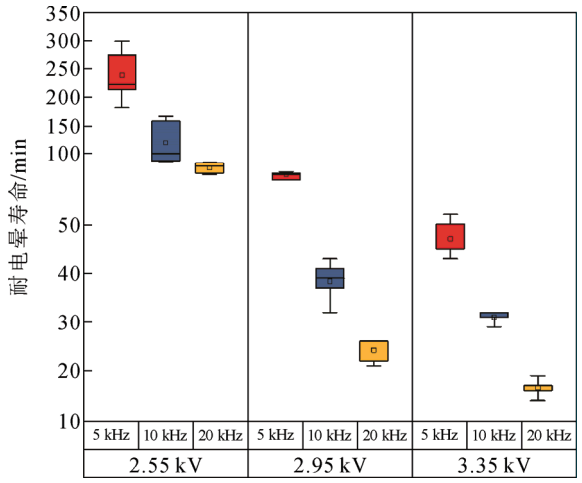



图 7 不同电压等级下绝缘耐电晕寿命测试结果

Fig.7 Insulation endurance lifetime test results at different voltage levels

## 3 绝缘耐电晕寿命预测模型

### 3.1 绝缘耐电晕寿命模型介绍

双参数威布尔分布是一种常用的对加速寿命试验数据进行后处理的统计工具，工业上常采用威布尔分布对一批试样的特征值寿命进行统计，认为该特征寿命能够很好地反应同一批材料的绝缘耐电晕寿命。本文采用威布尔分布对 5 个寿命值进行分析，选取一组试验样本的特征寿命值进行定量分析。威布尔可靠性函数[20]可表示为：

$$R(t)=1-\mathrm{e}^{-(\frac{t}{\alpha})^{\beta}} \tag{4}$$

式中：$\alpha$ 为尺度参数(即故障时间的 63.2%)；$\beta$ 为形状参数；$t$ 为故障发生时间。同时选取 95%置信区间对其准确性进行描述。

对于不同频率下，频率-耐电晕寿命($f$–$L$)具有老化寿命模型[21]。即：

$$L=C_0 f^{m} \tag{5}$$

式中：$C_0$ 为常值系数；$f$ 为脉宽调制电压频率；$m$ 为与材料和试验条件相关的系数。

对于不同直流母线电压水平下，IEC-60034-42[22]提出了一种常见的不同电压等级下耐电晕寿命的反幂模型，可以很好地拟合不同电压等级下的绝缘寿命，如式(6)所示。

$$L=kU^{-n} \tag{6}$$

式中：$n$ 为耐久系数为常值；$U$ 为所施加与试样两端的电压峰峰值；$k$ 为常值系数。

综上所述，电压幅值-频率-耐电晕寿命模型如式(7)所示。

$$L = CU^{-n} f^{m} \tag{7}$$

式中：$C$ 为常值系数。

### 3.2　不同频率下绝缘耐电晕寿命模型

为得到不同基波/载波频率下绝缘耐电晕寿命模型，根据 2.2 节不同基波/载波频率下的绝缘耐电晕寿命测试结果，利用威布尔分布统计不同基波/载波频率下绝缘耐电晕寿命特征值如表 2 所示。

采用式(5)所述模型对耐电晕特征寿命进行拟合，得到基波频率/载波频率绝缘寿命模型，如图 8 和图 9 所示。

基波频率绝缘寿命的数学模型为：

$$L = 29\,940 f_{\mathrm{r}}^{-0.888} \tag{8}$$

载波频率绝缘寿命的数学模型为：

$$L = 1\,085 f_{\mathrm{c}}^{-0.902\,7} \tag{9}$$

式中：$f_{\mathrm{r}}$ 为基波频率；$f_{\mathrm{c}}$ 为基波频率。

图 8 和图 9 两拟合曲线拟合效果较好，拟合优度 $R^2$>0.99，说明此模型对于脉宽调制电压下基波/载波频率绝缘寿命模型具有良好的拟合度。

由图 8、图 9 可见，在固定基波频率 500 Hz 下，随着载波频率的增加，绝缘寿命呈幂指数减少；在相同基波频率下，局部放电集中在基波极性翻转处，但随着载波频率的增加，试样的重复局部放电起始电压降低，局部放电更易发生，从而增加局部放电数量，导致绝缘寿命显著减少。

绝缘材料破坏主要由局部放电形成的击穿通道造成的。局部放电产生的高能粒子轰击绝缘表面，同时向绝缘介质内部注入电子，形成空间电荷。空间电荷脱陷会造成分子键断裂，促使放电通道向前延伸，频率越高这种作用就越强，绝缘击穿时间就越短。

### 3.3　不同电压等级下绝缘耐电晕寿命老化模型

为探究实际情况下，基波频率和载波频率的耦合关系，采用式(6)电压老化寿命模型，在相同基波频率、不同载波频率下，得到不同电压等级绝缘寿命模型，对结果进行反幂变换，得到不同载波频率下，电压绝缘耐电晕寿命曲线，如图 10 所示。由图 10 可见，在不同载波频率下，电压绝缘寿命反幂曲线几乎呈现平行趋势，相同基波频率下、载波频率的改变带来的耦合效应在数学模型上经反幂变换后，表征为垂直移动因子项，同时可以认为电压和频率对于试样耐电晕寿命的影响是相互独立的。

对于试样电压绝缘耐电晕寿命模型，在不同频率和电压下，采用红外温度测量仪，测试试样的表面温升，结果如表 3 所示。可看到 30 ℃(室温)下，基波频率 500 Hz、载波频率 20 kHz、电压 3.35 kV 的参数条件下，温升最高，为 19.5 ℃，其余电压/频率条件下温升小于 10 ℃；相同电压下，频率的改变对于温升影响不大；相同频率下，电压对于温升影响较大。

表 2　不同频率下绝缘耐电晕寿命特征值

Table 2　Characteristic values of insulation endurance lifetime at different frequencies

| 基波频率/Hz | 载波频率/kHz | 电压/kV | 特征寿命值/min |
|---|---|---|---|
| 500 | 5 | 2.55 | 255 |
| 500 | 10 | 2.55 | 131 |
| 500 | 20 | 2.55 | 77 |
| 50 | 10 | 2.55 | 929 |
| 200 | 10 | 2.55 | 263 |
| 500 | 10 | 2.55 | 131 |

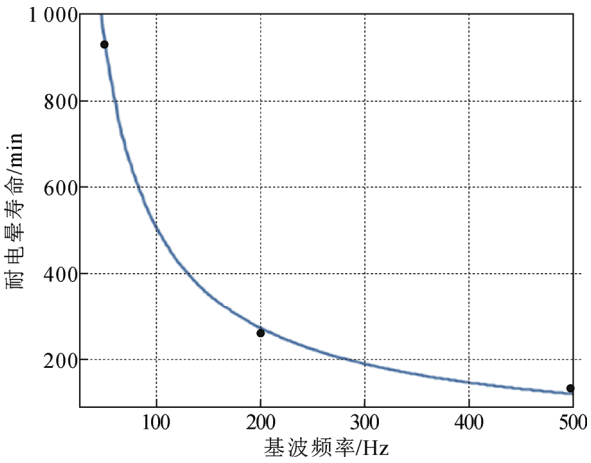



图 8　基波频率绝缘耐电晕寿命模型

Fig.8　Insulation endurance lifetime model of fundamental frequency

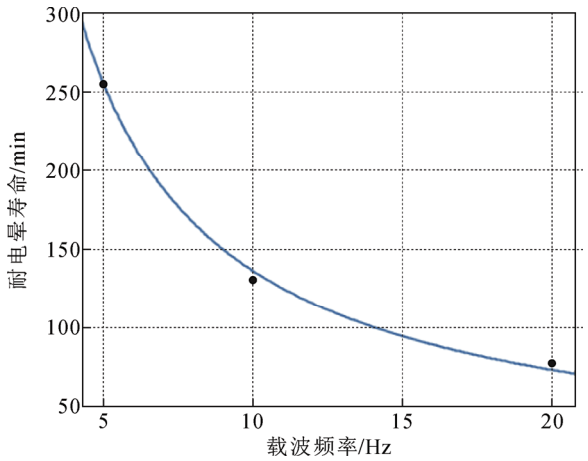



图 9　载波频率绝缘耐电晕寿命模型

Fig.9　Insulation endurance lifetime model of carrier frequency

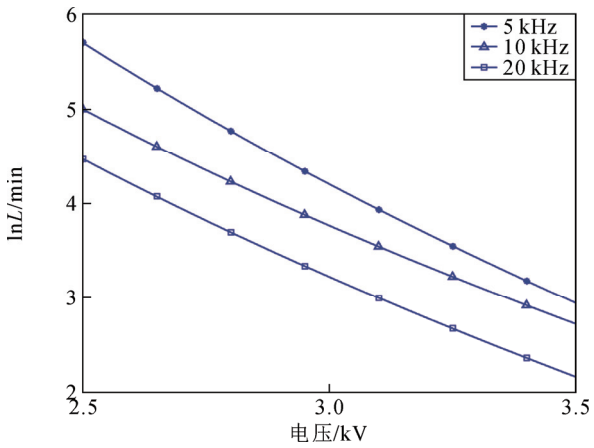



图 10 电压绝缘耐电晕寿命曲线

Fig.10 Insulation endurance lifetime curve of voltage

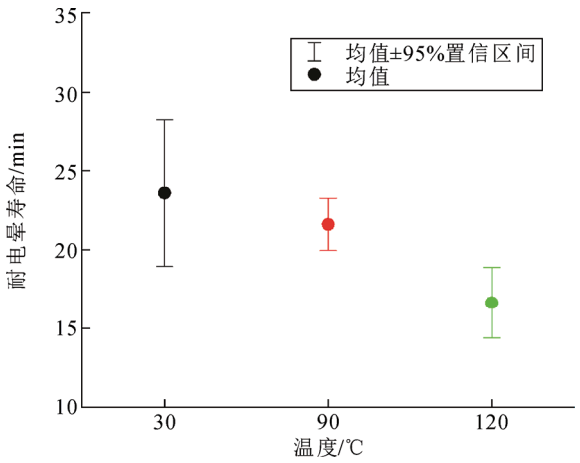



图 11 不同温度下绝缘耐电晕寿命

Fig.11 Insulation endurance lifetime at different temperatures

表 3 不同电压频率下试样表面温升

Table 3 Temperature rise of specimen surface under different voltages and frequencies

| 电压/kV | 试样表面温升/℃ | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | 50 Hz/10 kHz | 200 Hz/10 kHz | 500 Hz/5 kHz | 500 Hz/10 kHz | 500 Hz/20 kHz |
| 2.55 | 1.8 | 3.0 | 4.1 | 3.5 | 4.4 |
| 2.95 | 2.6 | 5.4 | 5.7 | 9.0 | 8.2 |
| 3.35 | 6.7 | 15.6 | 11.1 | 18.6 | 19.5 |

注：50 Hz/10 kHz 表示基波频率/载波频率；后同。

采用基波频率 500 Hz、载波频率 20 kHz、电压峰峰值 3.35 kV，在不同温度条件下进行耐电晕寿命试验，对结果取平均值，并考虑 95%置信区间，如图 11 所示，可以看出在 3.35 kV 电压条件下，温度变化对试样耐电晕寿命影响不大。这是因为在剧烈放电的情况下，局部放电对于耐电晕寿命结果的影响远远大于温度。

本文对于电压绝缘耐电晕寿命模型，采用 IEC 60034-18-42 标准提出了电压老化寿命模型，该模型将高压剧烈局部放电情况下温升进行了统筹考虑，故不需要单独考虑温度，实际上温度对于电老化寿命的影响表现为斜率极缓的反幂直线，对于绝缘耐电晕寿命而言，起决定性作用的为局部放电。

## 4 结论

1）在脉宽调制电压下，与基波/载波频率无关，局部放电主要集中在基波的极性翻转处；且由于绞线对试样难于形成完全对称状，故局部放电统计分布特性呈稍不对称性。

2）在相同载波频率下，耐电晕寿命随基波频率的增加而下降；在相同基波频率下，虽然在基波非极性翻转处无明显放电，绝缘耐电晕寿命仍随载波频率的增加显著而下降。试样绝缘耐电晕寿命随基波/载波频率的增加，均呈现幂指数下降趋势。

3）基波频率一定时，不同载波频率下电压寿命曲线经反幂变换后呈现平行趋势，表明脉宽调制电压下，频率与电压对于耐电晕寿命的影响是独立的，且基波频率与载波频率的耦合交互作用可考虑为频率-寿命反幂模型垂直移动的常数因子。

## 参考文献 References

[1] 陶大军，潘 博，戈宝军，等. 电动汽车驱动电机冷却技术研究发展综述[J]. 电机与控制学报，2023，27(4)：75-85.
TAO Dajun, PAN Bo, GE Baojun, et al. Research and development of key technologies of electric vehicle drive motor[J]. Electric Machines and Control, 2023, 27(4): 75-85.

[2] LI C Y, YANG Y, XU G Q, et al. Insulating materials for realising carbon neutrality: opportunities, remaining issues and challenges[J]. High Voltage, 2022, 7(4): 610-632.

[3] 鞠孝伟，程 远，杨明亮，等. SiC 逆变器高频脉冲电压对 Hairpin 绕组绝缘安全的影响分析[J]. 电工技术学报，2021，36(24)：5115-5124.
JU Xiaowei, CHENG Yuan, YANG Mingliang, et al. Influence analysis of high frequency pulse voltage of SiC inverter on insulation safety of hairpin winding[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(24): 5115-5124.

[4] 孙 浩，王亚林，范 路，等. 低气压方波电压下多电飞机电机绝缘局部放电研究[J]. 高电压技术，2023，49(2)：565-576.
SUN Hao, WANG Yalin, FAN Lu, et al. Research on partial discharge of more electric aircraft propulsion motor insulation under low pressure and square wave voltage[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(2): 565-576.

[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] 尚星宇，庞　磊，卜钦浩，等. 温度对方波电压下环氧树脂局部放电及击穿特性的影响[J]. 高电压技术，2023，49(8)：3286-3295.
SHANG Xingyu, PANG Lei, BU Qinhao, et al. Effect of temperature on partial discharge and breakdown characteristics of epoxy resin under square wave voltage[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(8): 3286-3295.

[7] 张　跃，苏淮北，何明鹏，等. 双极性方波场下电晕老化对环氧树脂空间电荷特性的影响[J]. 高电压技术，2022，48(12)：4731-4738.
ZHANG Yue, SU Huaibei, HE Mingpeng, et al. Effect of corona aging on space charge characteristics of epoxy resin under bipolar square wave electric field[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(12): 4731-4738.

[8] RUMI A, CAVALLINI A. Aircraft insulation design for the more electrical aircraft: challenges and solutions[C]// Proceedings of 2020 International Symposium on Electrical Insulating Materials. Tokyo, Japan: IEEE, 2020: 120-123.

[9] SERI P, BERARDI G, ALBERTINI M, et al. Partial discharge inception voltage in cables: influence of type of defect, supply frequency and voltage waveshape[C]// Proceedings of 2022 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. Denver, USA: IEEE, 2022: 49-52.

[10] RUMI A, CAVALLINI A, LUSUARDI L. Impact of WBG converter voltage rise-time and switching frequency on the PDIV of twisted pairs[C]//Proceedings of 2020 IEEE 3rd International Conference on Dielectrics. Valencia, Spain: IEEE, 2020: 902-905.

[11] MEYER D R, CAVALLINI A, LUSUARDI L, et al. Influence of impulse voltage repetition frequency on RPDIV in partial vacuum[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2018, 25(3): 873-882.

[12] JARRAR I M, CHERNEY E A, JAYARAM S H. Switching wave characteristics affecting the life of type II machine turn insulation[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2022, 29(5): 2000-2007.

[13] 唐艳霞，刘学忠，王景娜，等. 重复脉冲电压下变频牵引电机绕组绝缘的电树枝特性[J]. 高电压技术，2023，49(6)：2625-2633.
TANG Yanxia, LIU Xuezhong, WANG Jingna, et al. Electrical tree characteristics in winding insulation for inverter-fed traction motor under repetitive impulse voltages[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(6): 2625-2633.

[14] 何东欣，张　涛，陈晓光，等. 脉冲电压下电力电子装备绝缘电荷特性研究综述[J]. 电工技术学报，2021，36(22)：4795-4808.
HE Dongxin, ZHANG Tao, CHEN Xiaoguang, et al. Research overview on charge characteristics of power electronic equipment insulation under the pulse voltage[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(22): 4795-4808.

[15] 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.

[16] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局，中国国家标准化管理委员会. 绕组线试验方法　第 5 部分：电性能：GB/T 4074.5—2008[S]. 北京：中国标准出版社，2008：2-3.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Winding wires-test methods-part 5: electrical properties: GB/T 4074.5—2008[S]. Beijing, China: Standards Press of China, 2008: 2-3.

[17] 王兆安，刘进军. 电力电子技术[M]. 5 版. 北京：机械工业出版社，2021.
WANG Zhaoan, LIU Jinjun. Power electronics[M]. 5th ed. Beijing, China: China Machine Press, 2021.

[18] 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 al. 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.

[19] 李佩宜，王　鹏，马世金，等. 重复脉冲参数对变频电机绝缘 PDIV 测试信噪比影响研究[J]. 高电压技术，2021，47(8)：2981-2990.
LI Peiyi, WANG Peng, MA Shijin, et al. Influence of repetitive impulse voltage parameters on the signal-to-noise ratio of PDIV test for inverter-fed motor[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(8): 2981-2990.

[20] 冉慧娟，张金梁，耿召阳，等. 真空中光敏树脂的沿面闪络和放电老化特性[J]. 高电压技术，2020，46(10)：3583-3590.
RAN Huijuan, ZHANG Jinliang, GENG Zhaoyang, et al. Photosensitive resin surface flashover and discharge aging characteristics in vacuum[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(10): 3583-3590.

[21] STONE G C, VAN HEESWIJK R G, BARTNIKAS R. Electrical aging and electroluminescence in epoxy under repetitive voltage surges[J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1992, 27(2): 233-244.

[22] IEC. Rotating electrical machines-part 18-42: Qualification and acceptance tests for partial discharge resistant electrical insulation systems (type II) used in rotating electrical machines fed from voltage converters: IEC/TS 60034—18—42[S]. Geneva, Switzerland: IEC, 2008.



**彭　增**
1998—，男，硕士
主要从事电气设备绝缘检测和故障诊断研究
E-mail: 1379572282@qq.com

PENG Zeng



**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评估研究
E-mail: pwang@scu.edu.cn

WANG Peng
Ph.D.
Associate professor
Corresponding author

收稿日期　2023-08-02　修回日期　2023-09-28　　编辑　卫李静