

新能源汽车专用漆包线特殊性能测试要求探讨

江丽娇 牟宏杰 叶贤刚

常州威远电工器材有限公司

前言

新能源电动汽车目前正处于高速发展时期，使用者期待其在性能和质量方面不断提升，整车生产厂正努力在整车技术方面有所突破。众所周知，新能源电动汽车的心脏是电机，要提高其性能就需提升电机的质量。在纯电动汽车中，电机是唯一的动力源。漆包线作为电机的电~机功能转换的核心部件，承受着复杂的运行环境和工况，这导致了漆包线的技术性能指标不同于一般的工业电机的要求，由此也会导致原有的性能测试方法需要改进和新的性能项目测试评估的建立。

新能源汽车驱动电机使用的漆包线既有圆线也有扁线，由于扁线在电机效率和轻量化上占有优势，导致了扁线使用量大幅增加，大有取代之势。

除 2018 年出台了 GB/T 4074.21 绕组线耐高频脉冲电压性能试验方法标准以外，截止目前我国的漆包线产品及试验方法标准仍停留在 2008 版，尚未与 IEC 系列标准同步更新，也未根据现有市场需求新增检验项目。对于新能源电动汽车用绕组线的性能检测，当下仍采用以几大新能源汽车电机制造厂联合漆包线生产龙头企业共同探索检测需求为主、检测设备制造商配合研发制造为辅的手段对产品的性能进行检验。

目前我司已经陆续推出了一批超出现有标准 GB/T4074 范围的检测设备和试验方法，下文将着重对新能源电动汽车用绕组线的结构尺寸、机械性能、化学性能、电性能和化学性能等方面的性能测试和使用的检测设备展开介绍。

1、结构尺寸

汽车驱动电机漆包线，除导体尺寸公差、不圆度、圆角半径，最大外径，最小漆层等几何尺寸要求外，扁线还增加了：漆层均匀性（偏心度），漆层结构比例的要求。（如图 1 所示）。

目前较为广泛运用的偏心度检测试样制备手段是使用环氧树脂进行冷镶嵌或热镶嵌，制样时长约需 15-30 分钟。工厂每天所需检测的样品多达几十个，制样检测与生产速度无法很好的匹配，若需调整生产工艺时无法及时发现问题。而采用放射源检测的进口设备进行检测时虽能与生产无缝衔接，但其成本较为高昂，且长期接触放射性物质会对检验人员的身体会造成明显的危害。

在此背景下，我司研制出了漆包线自动磨切一体机（如图 2 所示），整套系统由自动切割、研磨设备，漆包线截面图片测量分析系统等单元组成，制样操作更加方便、快捷。不需要镶嵌、不需要树脂凝固，制作一个样品 < 2 分钟。可在 3-5 分钟内完成一个样品的处理分析，极大地提高了扁线 R 角、漆层截面形态及尺寸测量、漆层结构组成等检验的速度。软件系统功能除了应有的一般功能以外，特别为扁线研制了图像拼接功能：可以实现大规格线样测量后，快速自动拼接整合成一张完整的截面图片；扁线的偏心率检测功能：可实现测量采样数据的多样化对比，任意数据统计计算和报告的输出。

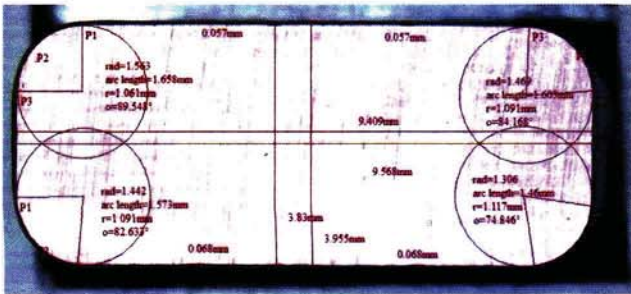


图 1 漆包扁线偏心度的截面测量法



图 2 自动磨切一体机

2、机械性能

漆包线的机械性能包括：伸长率、回弹性、耐刮、柔软性和附着性，应用在汽车电机上的漆包圆线机械性能测试没有变化，而扁线变化非常大：新增了单向刮漆、往复刮漆和静摩擦（个别客户还要求动摩擦）的宽边、窄边和 R 角的试验要求，不同的客户要求单刮或往复刮试验加载的负荷不同（刮破力）、刮针的直径不同（往复刮针 0.23-0.45mm）、刮破次数也不同（如 4 个 R 角平均 > 200 次）。

扁线静摩擦试验对于宽边、窄边及 R 角加载的负荷 500 克或 1000 克两种。新增窄边螺旋式卷绕测试要求，窄边螺旋式卷绕装置是模拟漆包扁线使用工况、把扁线的宽边垂直于螺旋轴线，对漆包扁线的窄边螺旋立式绕制。该仪器由减速电机、传动系统、绕线模具、压紧气缸、控制系统及附件构成。可根据线规定制适配的模芯和模套，确保绕制后的漆膜不受损；绕棒的倍径和绕制的速度、圈数各家需求不一，目前尚无统一的规范。

这是由于电机的扁线绕组成型工艺与传统的电器绕组工艺不同。汽车电机绕组需要弯折成发卡或波形件，再嵌入电机槽中。成型过程除发生弯折外，还有扭转成型。这既发生宽边弯曲，也发生窄边弯曲。另外线圈进入电机槽摩擦阻力大。因此增加了适合扁线的单刮、往复刮、静摩擦和窄边弯曲的试验仪器。

3、耐含水ATF油试验

新能源驱动电机用漆包线应满足耐含水的 ATF 油的要求。T/CEEIA 415《新能源汽车驱动电机绝缘结构技术规范》和正在制定的机械行业 JB/T XXXXX—XXXX《油冷型电机用耐电晕漆包铜圆线》中均规定了新能源漆包线的高低温冲击耐油性技术要求，标准要求将规定数量的试样装入具有变速箱油或变速箱油和去离子水混合液体的密封管中，试验期间应保证密封管完全密封。试验后漆包线外观不应有明显损伤，耐高频脉冲电压性能、绝缘电阻、PDIV 和击穿电压不应低于初始值的 75%（T415 要求不低于 70%）。标准还规定在一个完整的试验循环过程中同一密封管取出并打开取样后不能再次密封后进行试验，如需要多次取出建议同时采用多个平行的密封管试样进行试验。因此，我司制造的冷热冲击试验仪从第一代的内箱尺寸：400×400×500mm，到现在已经做到 600×600×500mm，冲击温度范围从-40℃——150℃，做到现在-50~210℃。随着客户要求已连续升级了 3 版，而且试验条件还在不断变化：

A、标准要求的试验条件如图 3 所示：高温 155℃，40h；低温-45℃，8h；高低温冲击 8 次循环试验。

B、客户要求的试验条件：高温 180℃，5min；低温-40℃，5min；高低温冲击 1000 次循环试验。

C、客户要求的试验条件：高温 210℃，20min；低温-40℃，20min；高低温冲

击 450 次循环试验。

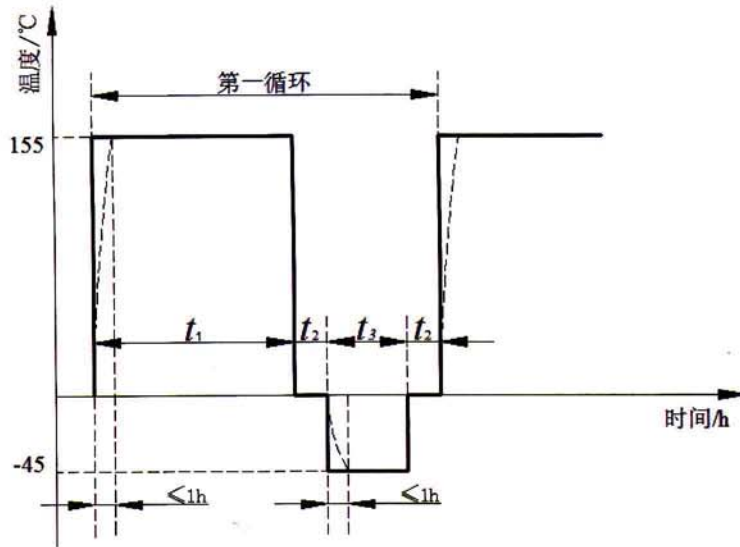


图 3 T/CEEIA 415-2019 耐高低温冲击试验要求

冷热冲击试验仪内腔容积越大、冲击温度的温差越大，则要求设备所采用的加热系统的功率和压缩机的功率也得越大。当测试腔容积固定时，冷热冲击系数将取决于所放置的钢瓶数量的多少，目前我司设备支持最多可放置 4 个钢瓶在测试腔内，单机功率最大为 23KW，但由于设备散热需求高，必须确保使用环境温度在 $10^{\circ}\text{C}\sim 28^{\circ}\text{C}$ 内才能稳定运行，同时设备尺寸也越做越大，这也导致了目前大部分客户现有的实验室不能满足使用要求，因此实验室需要进行改造以及升级。

4、电性能

4.1 击穿电压

汽车驱动电机用漆包线的击穿电压试验方法没有改变，仍然使用 GB/T4074.5 的规定。但因漆包线漆层结构及使用工艺特殊性存在以下差异：

1) 漆层加厚，导致击穿电压值很高，原来设备的量程不足，电压过高产生气体击穿和爬电；

2) 试验试样导电接触面的增加：钢珠直径改小，盐水或甘油接触介质，铝箔电极等，提高试验准确性。

测试评价不但有原始态样品，还有形变加工的样品，有时重点测试评价特殊形变部位的击穿电压。

为了满足以上的客户要求，我们开发了量程到 30KV 的击穿电压仪，这个电压仪特别采用 5 路独立同时升压的方式，5 路可独立设置报警电流、 $5\sim 30\text{mA}$ 可调。

考虑电机试验要求，增加了任意电压恒压耐压试验。并且提供了加压电极多种样式选择：小直径钢珠，甘油或盐水电极，铝箔电极选择。

4.2 高频耐电晕

高频耐电晕是快速评估绝缘结构在脉冲放电的环境下的寿命。评估已经从漆包线原始态评估，扩转到加工样评估，再延伸到电机绕组的复合绝缘结构评估。这个试验方法和试验仪器的开发已经经历了十几年，应用的经验积累也越来越多，基本满足了制造、使用和运行的需求。正是这个测试的有效性和实用性，因而得到了漆包线和电机厂家广泛的采用。但由于实际工程遇到新问题待解决，以及新的产品发展需要（如800V驱动电机），也提出了新的需要。

4.2.1 漆包线试验

GB/T 4074.21 高频脉冲耐电晕试验方法规定的测试电压最高 $V_{pp}3000v$ （根据供需双方协商可用 $V_{pp}4000v$ 测试），上升时间 100ns, 频率 20KHz, 方波；经 STIEE（上海电科所）公开会议资料显示，该测试条件下，新能源汽车额定工作电源 800V 电机用小扁线普遍耐电晕寿命均已 >200 小时（见图 5）

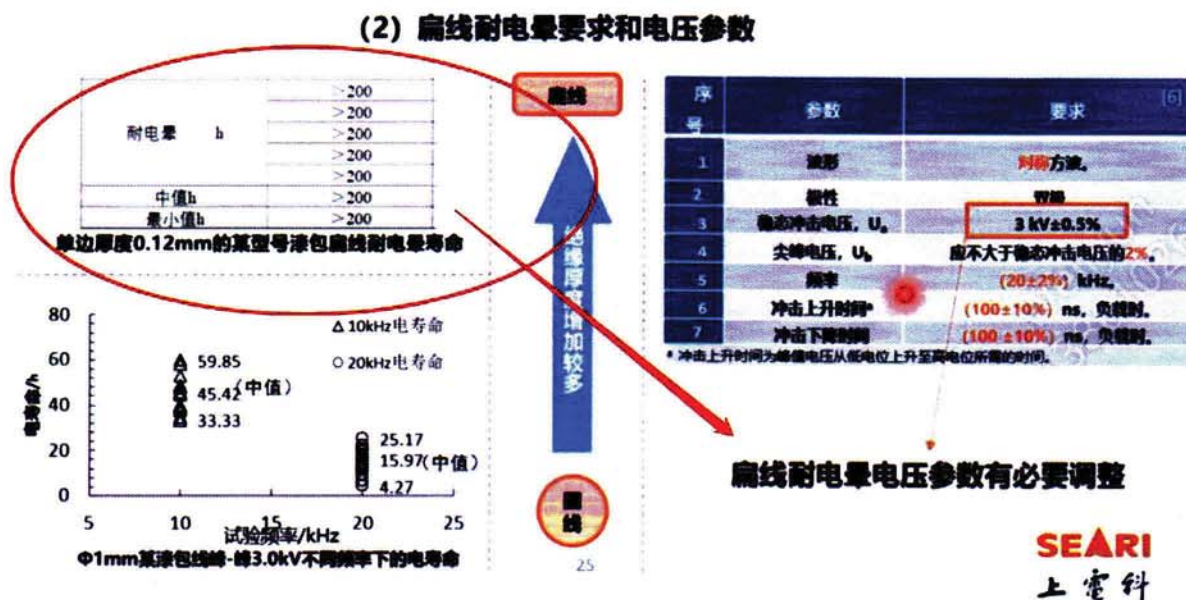


图 5 STIEE 提供的扁线耐电晕寿命实验数据

T/CEEIA 415《新能源汽车驱动电机绝缘结构技术规范》2019 年制定颁布，目前正在修订中。为了缩短产品测试周期，快速得到测试结果，在第一次工作组

会议中已明确提出高频脉冲耐电晕测试电压必须大幅度提升（很有可能是 5000 甚至 6000V）。但根据我司多年来的大量测试经验，发现漆包线在大于一定的测试条件范围时，其结果的分散性受外界因素影响的程度亦大幅增加，例如：当电压 $\geq V_{pp}4000v$ 时，样品是否做预热处理（除湿）、预热温度的高低、预热时间的长短、测试腔的风扇是否开启、开启后的排风量的大小，测试腔是否有换气、换气量的大小等等这些因素都有可能导导致测试结果的差异。而对于这些试验因素现有的标准中没有进行针对性的规定或要求并不明确详细，因此该问题值得标委会或相关权威机构以及更多的业内企业共同关注、参与来抓紧解决。另外，现有的耐电晕国标要求上升时间为 50-100ns，已取消了 200-400ns。但我司关注到欧美客户和印度客户普遍要求上升时间却为 200-400ns，这一现象（或区别）是否与不同市场对新能源汽车电机使用工况特性的要求不同有关？应值得大家的交流和探讨。

4.2.2 模型线圈或定子及整机试样

目前，业内正逐渐将线材或单个绝缘材料的耐电晕测试项目应用于模型线圈和定子甚至整机的测试（见图 6），具体试样的电容值如表 1 所示。

表 1 新能源汽车用漆包线及相关绕组试样的电容值

样品类型	实测电容值范围 (pF)	备注
圆线类（漆包或膜包烧结等）	5-50	扭绞对
扁线类（漆包或膜包烧结等）	50-300	背靠背
模型线圈	300-2000	小型
定子匝间	2000-10000	相对相或相对地
定子总成	10000-60000	三相对地

耐电晕测试样品通常为容性负载，测试所输出的脉冲波形的电压、频率和上升时间都与负载的容量大小密切相关，而且彼此之间是互相制约的关系。模型线圈或定子及整机试样自身负载电流跟设计工艺和质量有关，测试过程中负载自身泄漏电流必须 $<$ 报警阈值电流。部分客户要求高电压，部分客户要求高频率，检测设备为了兼顾各方要求只能将功率越做越大，致使技术成本越来越高。但是由于目前仍没有相关的测试方法标准，所以测试方式存在较大的差异。例如，有的要求用独立电源负载单个样品，有的要求用一个电源负载串联的 2 个样品，因此

即使采用相同的高压电源，不同测试方法所得出的结果差异亦很大，这导致各个实验室的测试结果不具备任何可比性。同样，对于样品的预热处理（除湿）方法、测试腔的排风、换气等因素也尚未制定严格的规范，因此需要标委会或相关权威第三方测试机构以及更多的业内企业共同关注，参与研究，以期早日建立测试规范和标准，引领行业上下游相关企业统一测试方法和评价尺度，促进行业共同进步。



(a) 模型线圈

(b) 圆线定子

(c) 扁线定子

图6 模型线圈及定子试样

现有的模型线圈和定子的耐电晕试验参数如下表所示。

表2 模型线圈和定子的耐电晕试验参数

参数	单位	技术指标	备注
输出电压	V _{p-p}	0-3kv 可调	5-7kv 可定制（峰峰值）
报警阈值电流	mA	500	>500mA 可定制
波形	--	方波或正弦波	
频率	Khz	1-100	根据客户需求定制
空载上升时间	ns	70-100	
负载上升时间	ns	≤350ns	负载≤15nF
最大输入功率	KVA	1	根据客户需求定制
测试温度	℃	室温--300	±3℃

4.3 电压耐久性V-t

目前国内及欧美市场基本采用方波进行耐电晕测试，而日系车企则主要采用正弦波脉冲进行耐电晕测试。在2019年GB/T4074.21开始转化IEC标准（该工作目前还在进行中）时，5个IEC国际成员国（美国、意大利、德国、日本、中国）

中日本专家极力推荐高频正弦波的耐电晕测试方法，并建议增加到该标准中，但由于其他成员国对于正弦波耐电晕研究甚少，甚至都没有积累到相关测试数据，所以都投了反对意见。随着日系车企在新能源汽车市场的地位不断巩固，漆包线制造企业为了跟客户的测试方法对标，正弦波耐久性试验方法也逐步得到更多的应用。

方波高压电晕试验是快速寿命试验，以极限试验（一直放电）的形式评估绝缘层的耐电晕能力，而正弦波高频耐压试验，在高压 3KV 以上类似方波高压电晕，在 3KV 以下则是放电电晕和电应力疲劳冲击相结合的试验。试验电压越低，电应力疲劳占得比例越大。在电机运行实际工况，方波高压状态是极少的，多数是高频正弦波低压状态（多数处在 PDIV 以下的电压，少数发生在 PDIV 和 3KV 之间），所以高频正弦波的试验更加符合驱动电机运行工况。

我司在客户的推动下研制出了高频正弦波耐久性测试仪（V-t），频率 100KHz，输出最高电压 0~7000V。

高频正弦波耐久性测试仪（V-t）试验参数如下表所示。

表 3 高频正弦波耐久性测试仪（V-t）试验参数

参数	单位	技术指标	备注
输出电压	V _{p-p}	0-5kv	连续可调（>5kv 可定制）
波形	--	正弦波	
频率	KhZ	20-100	连续可调
最大输入功率	KVA	1	根据客户需求定制
测试温度	°C	室温--300	±2°C

此仪器的试验设计依据是 GB22566. 1/IEC62086-1。根据 GB22566. 1/IEC62086-1，试验电压应在 PDIV 之上，电压变化范围设定为 10%，以保证失效机理的相同，在 GB22566. 1/IEC62068-1 中，还给出了寿命模型，施加的电压幅值的高低将直接影响脉冲时效寿命（图 7）。

4 通用试验规程

4.1 概述

本章描述了评定 EIS 耐重复冲击电压老化能力的通用规程，有两种方法，视预期结果而定：
 a) 一种是筛选试验，对几种待选的 EIM 或不同物理结构进行单一电压试验，以确定耐久性较好的 EIM(或系统)。另外，使 EIS 在单一试验电压下评定耐能耐受试验条件下，如不同的湿度、不同的冲击重复率等，以确定各种变量的影响。

注：GB/Z 22730.2—2013 给出了关于定了额定电压耐受性试验的示例。

b) 一种是耐久性试验，以确定待评 EIS 的冲击电压与寿命之间的关系。通常在其他条件不变的情况下，在几个电压水平下对 EIS 进行评定。电压耐久性与电压幅值之间的关系可通过反幂数定律表示，如式(1)：

$$L = kU^{-n} \dots\dots\dots (1)$$

式中：

L —— 试品失效时间和等效冲击次数(在给定的概率下)；

U —— 施加的冲击电压；

n —— 电压耐久性系数(VEC)；

k —— 常数。

也可以是其他关系。如式(2)所示的指数模型：

$$L = Ae^{-hU} \dots\dots\dots (2)$$

式中：

A —— 常数；

h —— 常数。

筛选试验或冲击电气耐久性试验的结果取决于除 EIS 固有特性外的许多因子。在任一冲击电压老化试验中应规定并控制这些因子。附录 A 列出了这些因子。

图 7 GB22566.1/IEC62086-1 规定的冲击电压失效寿命模型

为了能够分析(比较)绝缘材料或结构的性能差异，GB22566.1/IEC62068-1 规定了试验电压信号特性参数(方波或正弦波根据客户要求，见图8)，该特性是电机实际运行可能出现的工况。

4.4.2 比较试验

在得到基准 EIS 的寿命曲线后，可使用相同的试验规程和试验电压对另一待评 EIS 进行评定。对比待评 EIS 的与基准 EIS 的 VEC，可表明冲击电压引起的相对老化。此外，在给定的概率下对比最低试验电压下的失效时间或失效冲击数，待评系统与基准系统差别越大，待评 EIM 或 EIS 在实际运行条件下预期耐久性越好，认为待评 EIM 或 EIS 需承受更多的冲击才会失效。IEC 62539 中给出的统计方法可用于评估显著差异。若确实存在差异，建议对足够的试品进行比较试验以检测在 10% 显著水平下的差异。

5 试验冲击电压特性

表 1 给出了冲击电压特性参数的列表。对于任何特定试验，其试验频率应与电器设备使用的环境相符。冲击电压测试系统应具有至少 10 MHz 的带宽，以精确记录 40 ns 的冲击上升时间。

表 1 试验冲击电压特性

特性	范围
上升时间	(0.04 ~ 3) ns
重复率	≤ 10 Hz
冲击持续时间	(0.08 ~ 25) ns
波形	方波或三角波
极性	双极(极性)或单极

图 8 GB22566.1/IEC62068-1 所规定的冲击电压特性

根据倒幂函数模型绘制曲线 $V-t$ ，利用这样的模型可以外推得到在设计寿命下、绝缘材料还具有多高的绝缘强度，或在给定的最高工作电压下试样的设计寿命值（见图 9）。

此外，还可以利用这个试验筛选绝缘结构和绝缘材料，建立基准绝缘材料及结构组成，若进行改善，可以评估改善的状态，也可以评估漆层变化及外界因素变化对时效寿命的影响。

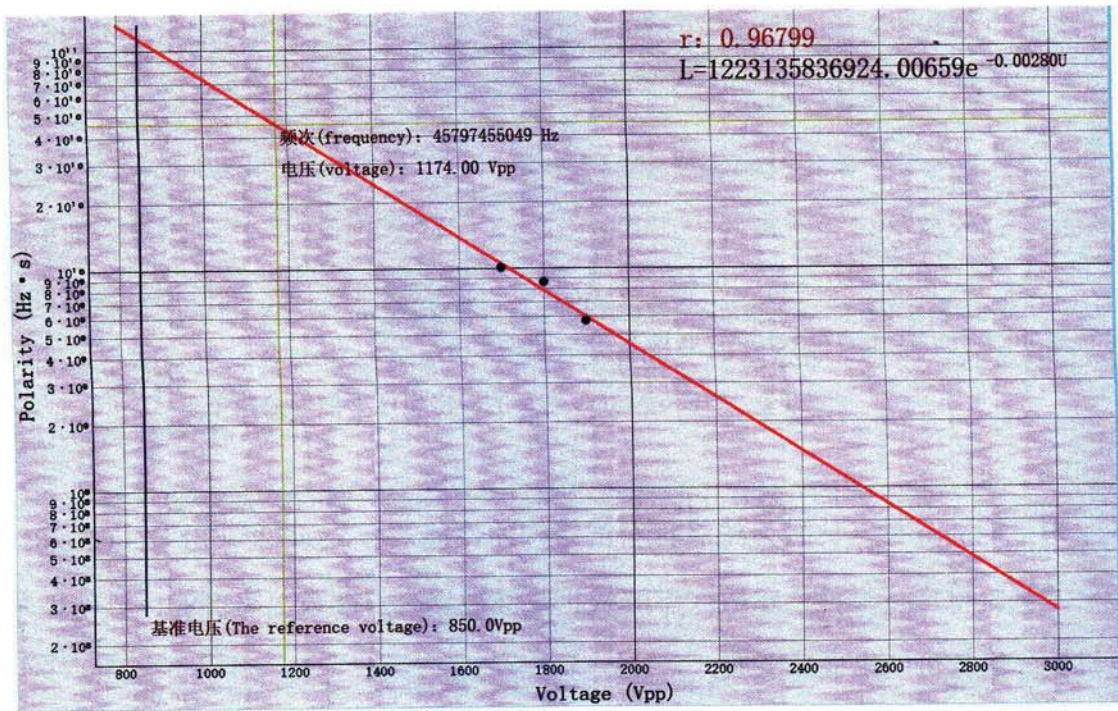


图 9 时效寿命模型

4.4 起晕电压和局部放电 (PDIV)

正弦波高压或脉冲方波高压下都可能产生局部放电，局部放电起始电压即为 PDIV。当达到一定的放电量，绝缘层开始起晕，此时的电压即为起晕电压，目前所有的耐电晕标准对于起晕电压均没有规定，但越来越多的客户已经明确提出这方面的测试要求。我司在 2022 年 8 月份以后出厂的耐电晕仪器上可以升级自动测量起晕电压，此前出厂的只能通过人工暗室法测得起晕电压。

高电压、高频率、短脉冲的电信号持续施加在绝缘层上形成了电晕或放电，反复的疲劳时效最终导致击穿。所以，耐电晕测试是对材料抵抗电晕放电的性能的评价。目前新能源汽车电机线圈设计主要走两个路线：一个是抗电晕（I 型绝缘

结构), 另一个是耐电晕 (II 型绝缘结构)。电晕放电是变频电源产生的主要劣化因素, 耐电晕是允许放电, 但采取能减缓放电导致的漆膜劣化速度的材料和工艺措施来延长绝缘的寿命, 这个要用放电的时间来评估。而抗电晕是不允许放电。没有放电, 自然就不会发生电晕放电失效。这个用最低放电电压评估, 即 PDIV; 但目前不少新能源电机厂对漆包线既要求高耐电晕寿命又要求高 PDIV, 制造出能同时符合上述条件的漆包线成本昂贵, 建议确定绝缘结构后, 针对性地进行相关试验测试。

目前局部放电测试依据的标准是 GB/T7354/IEC60270, 该标准用于对电压型变频器供电的旋转电机局部放电 I 型和 II 型电气绝缘结构的鉴别和认可, 要求在 50Hz/60Hz 下每 nF 电容性负载时最低灵敏度为 1pC, 而漆包扁线的电容 50-150pF (换算为 0.05-0.15nF), 这就要求局放检测仪 PD 分辨率至少为 0.01pC, 否则根本检测不出来, 目前国内尚未找到成熟的适合漆包线这种放电量很小的样品的局放测试仪, 因此我们为国内市场引进了日本 SOKEN 型号为 PD-7 的局放检测仪, 供业内企业选用, 具体参数如下表所述。

表 3 局放测试仪技术参数表:

参数	单位	技术指标	备注
输出电压	kv	0-3kv 可调	5kv 可定制 (有效值)
升压速率	v/s	10、25、50、100	软件自动控制
波形	--	正弦波	
频率	hz	50-60	
PD 分辨率	pC	0.01	AC3kv 时, 设备局放量小于 1PC
最大负载电流	mA	10	
最大电容负载	pF	5000	
电压波动	--	<1%	
波形失真	--	<3%	
测试温度	°C	室温--300	±3°C

5、软化击穿

驱动电机用的漆包线需要测试软化击穿性能。适用于漆包扁线的软化击穿试验仪目前有两款: 一款根据国标 GB/T4074.6 设计而成, 满足定温和升温两种测试方法, 一次只能测试一根样品, 圆扁线均可测试; 另一款是参照 JIS/C 3202 标准专为升温法测试设计, 同时可测试 5 根线样以提升测试效率 (1-10°C/分钟可调),

符合 NEMA 和 JIS 标准中所规定的漆包圆线、漆包扁线的热性能试验，两款软化击穿试验仪的最高测试温度均达 600℃，其中，圆线试样采用十字交叉法，扁线为钢珠法（钢珠直径 1.6mm）。

6、外观、表面缺陷：视觉 & HVC 监测系统

新能源汽车电机专用漆包线对于表面缺陷控制要求比普通漆包线要高得多，尤其是漆包扁线。我司根据漆包线行业生产现状和需求，结合多年的行业检测经验，利用视觉成像技术、四个相机分别检测扁线上下左右四个面及四个 R 角的所有缺陷，360° 无死角。根据扁线 4 个面，可分别设置报警阈值，可分别统计缺陷类型。 $\leq \pm 5\text{mm}$ 的线抖动或换规系统自动适配校正，不需要人工干预。历史数据导出显示缺陷图像并自动标示缺陷面积、长、宽、高尺寸。集成在线高压针孔检测单元（HVC）+自动喷码机，可一机完成表面缺陷与在线针孔的检测。根据 IEC60851-6:2012 标准要求，在线 HVC（高压连续性）试验电压为 350~3000v，但目前已经有客户要求 5000v 的非标定制产品。其具体性能如下：

（1）系统架构

设备系统架构如图 10 所示。

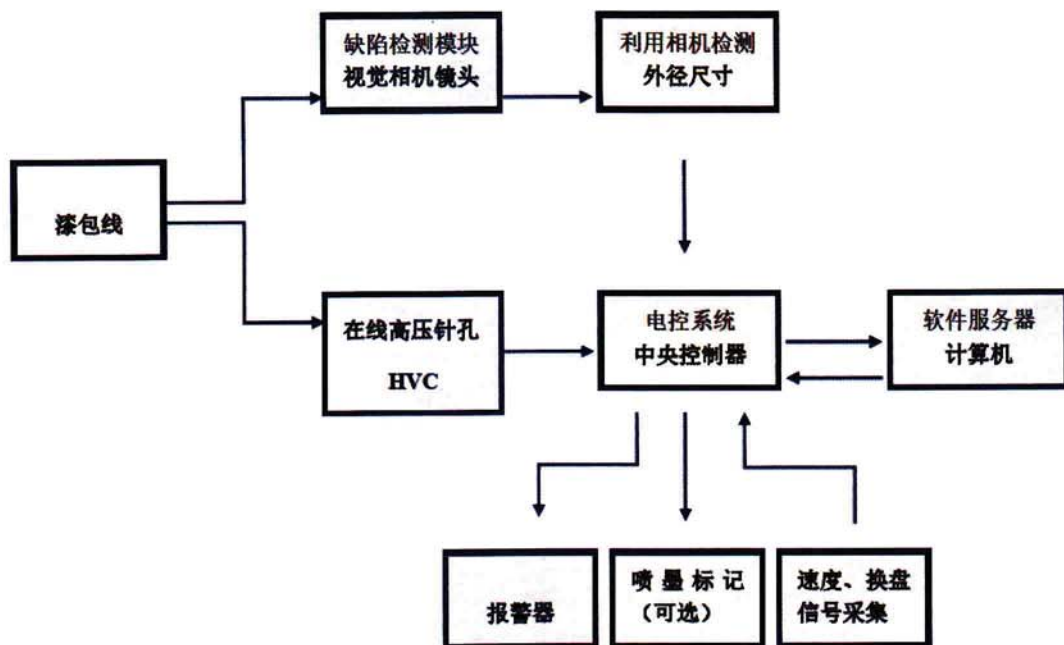


图 10 设备系统架构

(2) 技术参数表

视觉 & HVC 监测系统的技术参数如下表所示。

项目类型		技术参数			
1	服务器带载能力	扁线：一台主机标配搭载4根扁线HVC及各种表面缺陷检测； 圆线：一台主机最多搭载72根圆线HVC，表面缺陷需集中排线、上下2面各用1台相机检测表面缺陷、相机视场宽度≤100mm。			
2	软件系统功能	a. 线缆实时表面图像显示，瑕疵缺陷信息记录保存（大小、类型、位置）； b. 搭载高压在线针孔HVC（可选项） c. 搭载自动喷码装置（可选项） d. 生产过程尺寸在线控制（附送） e. 根据缺陷尺寸、数量设置标准阈值，自动声光报警； f. 数据库记录检索、查询、打印、联网等功能			
3	线缆形状	圆扁线均可检测			
4	相机数量配置	扁线：一根扁线配置4台相机，分别检测2个宽边、2个窄边 圆线：一组圆线配置2台相机，分别检测上下2个面（视场范围≤100mm）			
5	检测速度	扁线：≤100m/min 圆线：300m/min			
6	表面缺陷	检测类型	各种斑点、色差、气泡、凹凸异物等，可标注缺陷长宽高尺寸		
		检测精度	18 μm		
7	尺寸	检测精度	±0.02mm（利用相机在线连续测径）		
8	HVC	试验电压	0-3000V 连续可调（直流，可定制5000v）		
		规格	圆线	0.02-8.0mm	
			扁线	≥0.2mm	
		报警输出	总	2-4路	
			分	4-24-36-48-72路	
		计数输入	4-24-36-48-72 路		
		换盘输入	4-24-36-48-72 路		
		采样频率	100000/秒		
		稳态电流	任何电压下 25uA±5uA		
		短路电流	9、10、14、18uA，4 档		
速度输入	1 路（采样速度±10 米/分钟）				
9	功耗	<200W			
10	电源	220V			

(3) 缺陷类型图片分析功能
色差分析示例见图 11。



图 11 色差分析示例

色斑示例见图12.

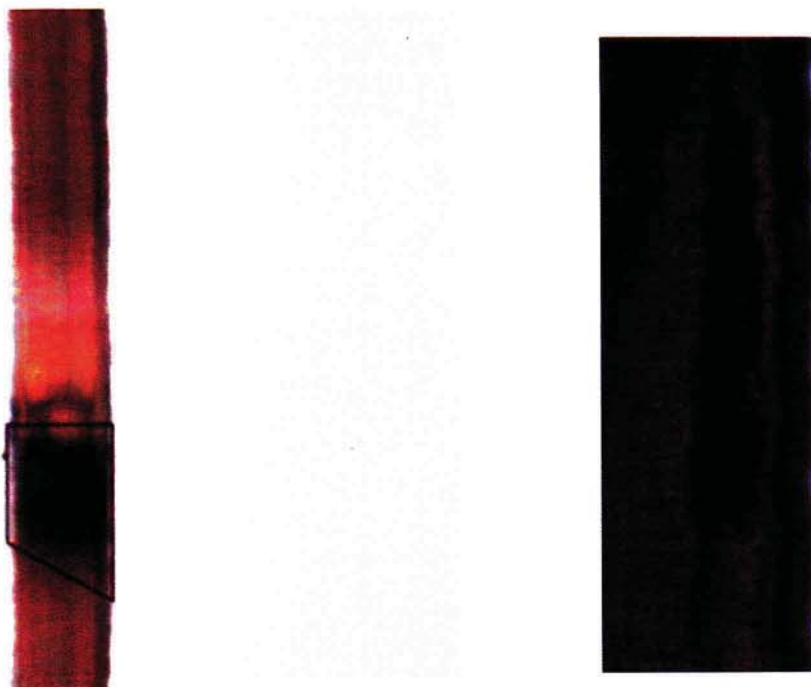


图12 色斑分析示例

气泡粒子分析见图13。



图13 气泡粒子分析示例

凹坑图片分析见 14。

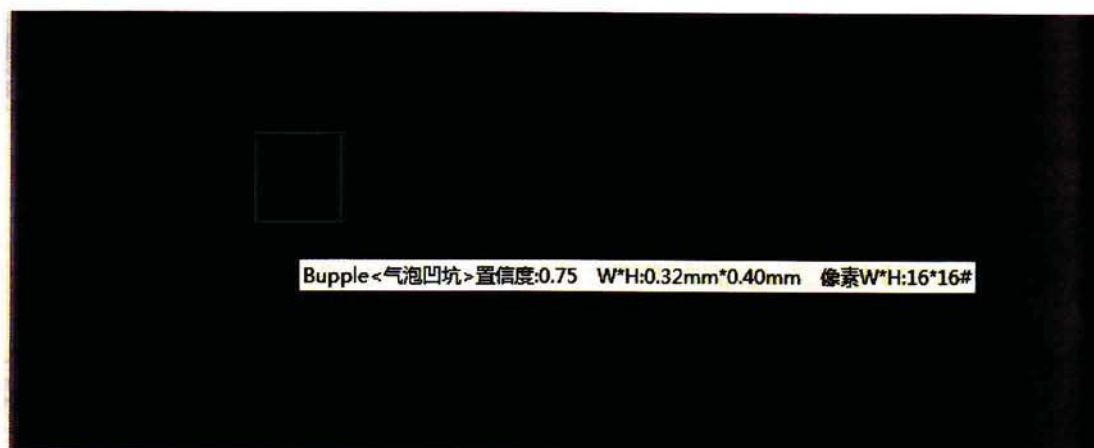


图14 表面凹坑缺陷分析示例

划痕图片分析见 15。

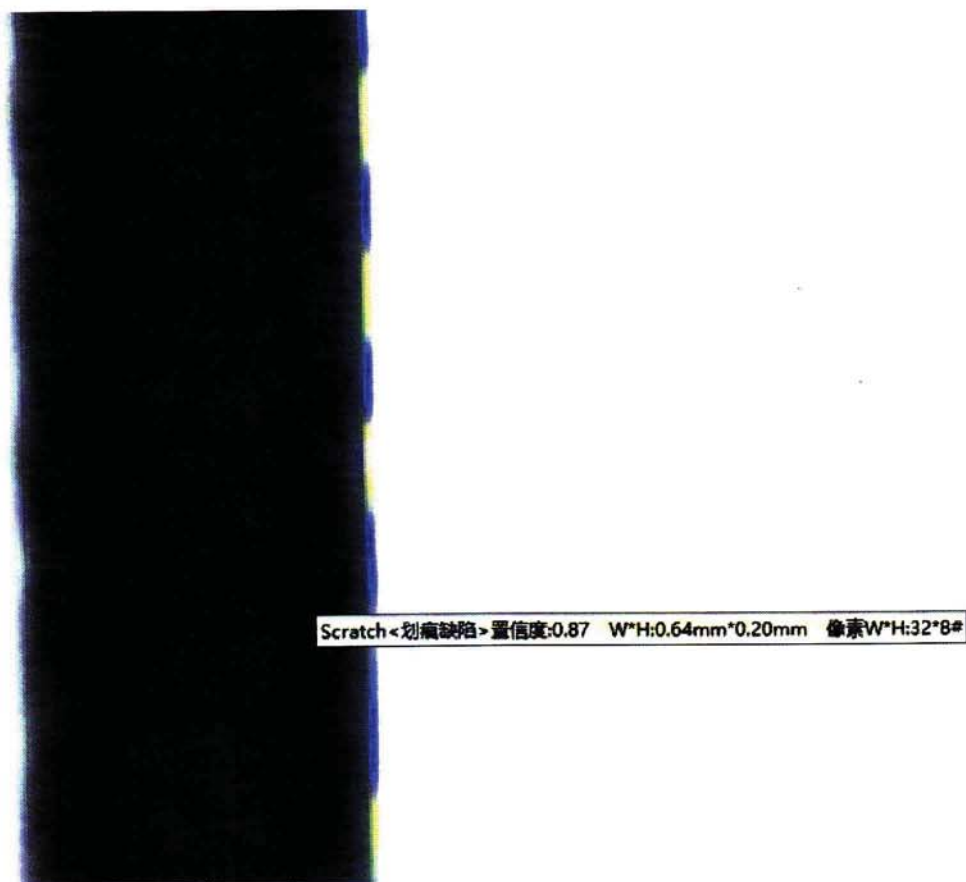


图15 划痕分析示例

结束语

新能源汽车电机制造有着多种技术路线，各大电机厂家对漆包线的质量要求不尽相同；随着新能源专用漆包线的市场需求越来越大，应用越来越广，参与其中的企业也将越来越多，对漆包线的性能要求可能还会更加严苛，只有测试方法和检测手段统一、规范，检测出来的结果才有可比性，才有意义。新能源漆包线、特别的漆包扁线相关的技术标准必将不断完善，我们也确信新能源专用的漆包线检测要求还会不断更新，期待行业协会联合上下游企业开展紧密合作，为国家新能源汽车行业的发展不懈努力。