

电力电缆剩余寿命预测技术应用

马克马磊

中国三峡新能源（股份）有限公司建设管理分公司 宁夏 银川 750000

摘要：在保障电力系统安全稳定运行的背景下，本文针对电力电缆寿命预测问题，提出了一种结合加速湿热老化试验和 GM (1, 1) 模型的剩余寿命预测方法。通过对电缆材料在加快老化条件下的性能退化分析，获得寿命预测所需的关键参数。采用 GM (1, 1) 模型进行剩余寿命的定量分析，结合实例对模型的预测准确性和实用性进行验证。最后，通过对电缆进行剩余寿命预测试验，确立了预测方法的有效性。

关键词：电力电缆；剩余寿命预测；加速湿热老化试验

1 引言

电力电缆作为电力系统的重要组成部分，其安全稳定运行对于保障整个电力系统的可靠性至关重要。电缆故障因素复杂，服务环境恶劣，长期的负荷运行易导致电缆绝缘性能退化，进而缩短其使用寿命。电力电缆的老化是一个复杂的化学和物理过程，受多种内外因素的影响，包括电缆材料、温度、湿度、电场、机械负荷等。这些因素通过不同的作用机制影响电缆的绝缘性能，从而决定其实际的服役寿命^[1]。

2 电缆加速湿热老化试验

在本研究中，电缆加速湿热老化试验作为电力电缆剩余寿命预测的先行步骤，扮演着至关重要的角色。老化试验的目的是模拟电缆在实际使用环境中经历的各种应力条件，如温度、湿度和电场等因素的长期作用，加快其老化进程，从而在较短的时间内评估电缆材料性能的退化情况和预测其剩余寿命。

试验的设计遵循加速老化理论，该理论认为，在一定的条件下，材料的老化速率会随着温度的升高、湿度的增加或电场强度的提高而加快。试验中，电缆样品被放置在特制的环境试验箱内，通过调整箱内的温度和湿度，同时施加一个恒定的电场，来实现加速老化的效果。通常情况下，试验箱内的温度控制在比正常工作条件高出 20–30℃ 的范围，而湿度则维持在 85%–95% 之间，以确保湿热效应的显著性。电场的施加则是通过在电缆两端加上高于其额定工作电压的电压，以加速电缆绝缘材料的老化过程。

在试验的过程中，通过定期的取样分析，监测电缆绝缘材料的物理和化学特性的变化，包括材料的介电常数、介电强度、体积电阻率等指标。这些指标的变化能够反映材料老化的程度，为进一步的寿命预测提供依据。例如，一旦电缆绝缘材料的介电常数和介电强度明显降低，就可以认为材料开始进入严重老化阶段，这将直接影响其正常工作寿命。

特别值得注意的是，在加速老化试验中，电缆样品的选取至关重要。样品应代表电缆部署的全范围，包括不同制造批次、不同长度和不同安装条件下的电缆段落。这样的代表性样品选择有助于确保试验结果的广泛适用性，使得从试验中得到的数据能够更加真实地反映实际电缆的老化行为。

加速湿热老化试验所得数据不仅可以直接用于分析材料的老化特性，而且在配合数学模型进一步计算和预测电缆的剩余寿命时，也是不可或缺的输入参数。通过建立合适的预测模型，并且输入由加速湿热老化试验所得到的实验数据，可以定量评估在特定工作条件下电缆的预期使用寿命，从而为电力电缆的维护、更换计划和风险管理提供指导。

综上所述，电缆加速湿热老化试验为电力电缆的寿命评估和预测提供了实验基础。通过科学的试验设计和严格的数据分析，可以有效地揭示电缆材料在高应力条件下的老化特性，进而精准地预测电缆的剩余寿命，对确保电力系统的可靠运行和合理规划维护机制具有重大意义。

3 基于 GM (1, 1) 模型的电缆剩余寿命预测

3.1 GM (1, 1) 模型

GM (1, 1) 模型，即灰色预测模型，是灰色系统理论中的一种预测方法。灰色系统理论由中国学者邓聚龙在 1982 年提出，主要用于解决信息不完全、数据量小的不确定性问题。

GM (1, 1) 模型作为该理论体系中应用最为广泛的模型之一，通常用来预测少量数据的发展趋势。

GM (1, 1) 模型的核心思想在于将不规则的原始数据通过一次累加生成 (1-AGO) 转化成具有很强规律性的序列，通过建立微分方程式的形式描述这种规律，并进行求解，最终通过还原处理得到预测值。在电力电缆剩余寿命预测中，此模型的应用可以简化预测流程，减少所需数据量，适用于缓慢变化或者变化规律不完全明确的退化数据分析。

模型建立的主要步骤包括以下几点：

首先，收集电缆性能退化的原始数据 $\{x^{(0)}\}$ ，该数据可以是电缆绝缘电阻、介质损耗因数等与老化相关的指标随时间的变化数据。首项为原始数据的累加形成新的数据序列 $\{x^{(1)}\} = \{x^{(0)}(1), x^{(0)}(1) + x^{(0)}(2), \dots, x^{(0)}(1) + x^{(0)}(2) + \dots + x^{(0)}(n)\}$ ，其中 $x^{(1)}(k) = \sum_{i=1}^k x^{(0)}(i)$ ， $k = 1, 2, \dots, n$ 。

其次，对累加生成后的数据序列 $\{x^{(1)}\}$ ，采用最小二乘法估计模型参数 $\{a\}$ 和 $\{b\}$ ，形成 GM (1, 1) 模型的微分方程：

$$\frac{dx^{(1)}}{dt} + ax^{(1)} = b, \quad \text{其中 } \{a\} \text{ 为发展系数, } \{b\} \text{ 为灰作用量, 它们构成了响应的参数向量 } \{\hat{\beta}\} = (a, b), \text{ 可以通过建立矩阵方程来计算得到}^{[2]}.$$

然后，求解上述微分方程得到时间响应函数，即为累加生成后的数据预测模型：

$$\hat{x}^{(1)}(t) = (x^{(0)}(1) - \frac{b}{a})e^{-at} + \frac{b}{a}, \quad \text{该时间响应函数揭示了电缆性能退化指标的变化趋势。}$$

最后，利用逆累加生成 (IAGO) 得到原始数据的预测值：

$$\hat{x}^{(0)}(t) = \hat{x}^{(1)}(t) - \hat{x}^{(1)}(t-1), \quad t = 2, 3, \dots, n+1.$$

作者简介：马克（1989—），男，毕业于宁夏大学土木工程专业，大学本科，工程师，目前从事电力工程建设管理工作。

马磊（1990—），男，毕业于福州大学水利水电工程专业，大学本科，一级建造师（建筑工程、水利水电工程），一级造价工程师，工程师，目前从事电力工程建设管理工作。

通过这一系列步骤，我们可以获得原始数据的预测序列 $\{ \hat{x}^{(0)} \} = \{ \hat{x}^{(0)}(1), \hat{x}^{(0)}(2), \dots, \hat{x}^{(0)}(n) \}$ ，该序列可以用来预测电缆的剩余寿命。

为了验证模型的有效性，需要利用实际数据来进行模型的训练与测试。通常情况下，可以通过电缆的历史运行数据来建立模型，并利用最新的电缆性能数据来检验模型的预测能力。在电力电缆剩余寿命预测中，对多组数据进行建模分析，有利于提高模型的广泛性和稳健性。

通过改变模型的输入参数和初始条件，我们可以分析不同老化过程对电缆寿命预测的影响。例如，不同的温湿度条件、电压水平、负荷状态等对电缆老化速率的影响，可以通过 GM(1, 1) 模型参数的变化来体现。

总之，GM(1, 1) 模型的简化和便捷性使其在电力电缆寿命预测领域有着良好的应用前景。通过对模型进行细致的优化和参数的准确估计，可以较为准确地提前预知电缆的剩余寿命，从而对电缆的维护和更换策略提出科学的建议，确保电力系统的稳定可靠运行。

3.2 实例分析

在提出的电力电缆剩余寿命预测方法中，具体案例分析是验证模型准确性和实用性的关键步骤。本节将通过具体的电缆样本数据，演示如何应用 GM(1, 1) 模型进行剩余寿命的定量预测，并分析其结果。

首先，选取了某高压电力电缆，在加速湿热老化试验后，记录了电缆绝缘材料的性能退化数据。具体而言，监测了在加速老化条件下，电缆绝缘材料的介质损耗和绝缘电阻的变化。这些参数的变化趋势可作为判断材料老化状态从而预测剩余寿命的重要依据^[2]。

在获取电缆老化数据后，将这些数据作为 GM(1, 1) 模型的输入，进行模型构建和参数估计。根据 GM(1, 1) 模型原理，构建了一维灰色微分方程并求解，获得了电缆绝缘材料性能退化趋势的模拟表达式。在完成模型参数的估计后，利用求得的表达式对未来某个时间段内电缆绝缘材料的性能退化进行预测。

为验证模型的预测准确性，将 GM(1, 1) 模型的预测结果与实际的电缆绝缘材料退化数据进行了对比。根据对比分析，发现 GM(1, 1) 模型在电缆早期和中期的退化预测上具有较高的准确性，而在电缆接近寿命末期，模型的预测偏差略有增加。这种偏差可能是由于模型无法充分反映电缆绝缘材料在临近失效时的复杂退化行为。

进一步的分析表明，在应用 GM(1, 1) 模型时，对于电缆材料的初始老化阶段，模型能够较好地反映绝缘材料性质的微小变化。当绝缘材料的性能退化到一定程度时，模型通过对历史退化数据的灰色生成以及灰色关联分析，可以较为准确地捕捉到退化数据之间的内在联系，因而能够对未来的性能退化趋势做出合理预测。

结合实例数据分析，可以得出 GM(1, 1) 模型适用于电缆绝缘材料初期退化预测的结论。尽管模型在电缆老化末期的预测上存在一定的局限性，但在它的有效范围内，仍然能够为电力电缆的维护和更换决策提供科学的数据支持。

综上所述，通过对加速老化后的电缆样本进行 GM(1, 1) 模型分析，验证了该模型在电缆剩余寿命预测方面的适用性。该实例分析的结论表明，通过综合考虑加速湿热老化试验数据，GM(1, 1) 模型能提供一个实用且相对准确的电缆剩余寿命预测方法，对实际电力系统中电缆的维护与更换具有较高的参考价值。然而，对于模型的进一步改进和优化，以及在不同环境和不同电缆类型上的广泛应用均需要更多的实际数据和深入研究，以此来提高模型的泛化能力和预测性能。

4 电缆剩余寿命预测试验

电缆剩余寿命预测试验是验证前述理论方法及算法有效性的重要环节。本项试验的核心目的在于，通过实验室条件下的模拟运行测试，结合实际运行数据，检验和确证电缆剩余寿命预测的可行性和准确性。

定量预测电缆寿命的关键在于构建合适的数学模型。在本研究中，采用了基于 GM(1, 1) 模型来进行寿命预测。理想情况下，通过 GM(1, 1) 模型能够较为准确地反映电缆在实际运行过程中性能退化的规律，并据此预估其剩余寿命。然而，由于实验条件和现场条件存在差异，如何将试验结果与实际运行参数相融合，以获得具有现实意义的预测结果，是此次实验必须要解决的问题^[1]。为了实现这一目的，需要收集并分析电缆的历史运行数据，这包括电缆的安装环境、历史负载记录、维护和检修记录等，通过这些实际运行数据来校正模型参数，从而提高剩余寿命预测的精确度。

为了验证剩余寿命预测方法的有效性，本研究进行了具有代表性的剩余寿命预测试验。试验选取了在相同运行环境下进行了不同年限的同型号电缆样品，使用相同的测试条件对其进行实验室老化处理后，分别应用优化前后的 GM(1, 1) 模型进行剩余寿命预测，并与实际老化后的试验结果进行对比。结果显示，优化后的剩余寿命预测方法在预测精度方面有显著提高，与实际的老化情况更为接近，验证了方法的有效性和可行性。

最后，将预测模型和算法应用到实际电缆的维护和更换策略中，需要综合考虑预测结果的不确定性和运行中的风险容忍度。因此，除了要考虑预测试验的结果外，还要充分考虑电缆的重要性、故障后果以及更换所需要的时间和成本等因素。通过对这些影响因素的深入分析，可以为实际电力系统中电缆的运维管理提供更科学、更经济的决策支持。

综上所述，电缆剩余寿命预测试验不仅验证了理论预测方法的可靠性，而且为电缆的健康状态评估和寿命周期管理提供了一种新的思路和技术途径。通过将试验与实际数据结合，可以进一步优化电缆的运行与维护策略，提高电力系统的稳定性和经济性，降低突发故障的风险，确保电力系统的安全稳定运行。

5 结束语

本文成功开展了电力电缆剩余寿命的预测技术研究，提出并验证了一种结合加速湿热老化试验与 GM(1, 1) 模型的预测方法，为电力电缆维护和更换策略的制定提供了科学依据。

通过进行电缆剩余寿命预测试验，进一步确立了所提方法的有效性。预测试验结果与实际观测数据之间的良好吻合，展示了所提预测技术在实际应用中的准确性和可行性。

值得注意的是，尽管本研究取得了积极的成果，但是对于不同类型和品牌的电缆，其老化性能和退化规律可能会有所不同。因此在将本预测方法推广应用到其他类型的电缆时，需重新进行部分试验以及模型的参数校准。另外，鉴于实际应用中可能存在多种复杂的环境因素影响电缆性能，未来的工作中还需要不断完善预测模型，以适应更多样化的预测场景。

总之，本文介绍的电力电缆剩余寿命预测技术是一个创新的、实证研究支持的预测方法，对于电缆的健康评估与寿命周期管理具有重要意义。尽管需要在某些方面进一步精细化研究和优化，该预测技术已经证明了其在提高电力系统稳定性与降低维护成本方面具有极大的潜力和实用价值。

参考文献

[1] 段俊峰，李宁，唐求. 基于 CK-GPR 的多应力环境智能电表剩余寿命预测 [J]. 仪器仪表学报, 2021: 9.

[2] 刘子英，钱超，朱琛磊. 基于 IPSO-Elman 的锂电池剩余寿命预测 [J]. 现代电子技术, 2020: 6.