

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2005471

牵引系统支撑电容 PHM 技术研究

侯飞¹ 张金城¹ 刘强² 李旭² 李华² 曹虎²

(1. 济南轨道交通集团建设投资有限公司 济南 250014; 2. 中车青岛四方车辆研究所有限公司技术中心 青岛 266033)

摘要: 支撑电容作为轨道车辆牵引系统的核心部件之一,支撑电容发生故障将严重影响着列车安全稳定运行,因此研究支撑电容故障预测及健康管理(PHM)技术,实现支撑电容健康状态在线预测具有十分重要的意义。首先对支撑电容结构设计、工作特性及老化机理进行了深入的研究,将容值和 ESR 值退化率作为支撑电容失效判据,然后提出了基于数理统计+多项式回归算法,构建电容容值和 ESR 值软测量模型,利用大量试验数据进行模型训练及模型优化,最后从软测量误差和数理统计分布一致性两个角度对模型软测量结果准确度进行了评估,试验结果表明数理统计+多项式回归软测量模型在不同样本集和不同工况下,能够对支撑电容容值和 ESR 值进行有效软测量,验证了该模型的可行性和准确性。

关键词: 支撑电容;故障预测及健康管理;多项式回归;软测量

中图分类号: TM531;O212.1 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.4030

Research on PHM technology of traction system support capacitor

Hou Fei¹ Zhang Jincheng¹ Liu Qiang² Li Xu² Li Hua² Cao Hu²(1. Jinan Rail Transit Group Construction Investment Co., Ltd., Jinan 250014, China;
2. CRRC Qingdao Sifang Rolling Stock Research Institute Co., Ltd., Qingdao 266033, China)

Abstract: As one of the core components of the traction system of rail vehicles, the failure of the supporting capacitor will seriously affect the safe and stable operation of the train. Therefore, it is of great significance to study the fault prognostics and health management (PHM) technology of the support capacitor and realize the online health state prediction of the support capacitor. Firstly, the structure design, working characteristics and aging mechanism of the supporting capacitor are deeply studied, and the degradation rate of capacitance value and ESR value is taken as the failure criterion of the support capacitor. Then, a soft sensing model of capacitance value and ESR value is constructed based on mathematical statistics and polynomial regression algorithm. A large number of test data are used to train and optimize the model. Finally, the accuracy of the soft sensing results is evaluated from two aspects of the soft sensing error and the consistency of mathematical statistics distribution. The experimental results show that the mathematical statistics + polynomial regression soft sensing model can effectively soft sensing the support capacitance and ESR values in different sample sets and different working conditions, which verifies the feasibility and accuracy of the model.

Keywords: support capacitor; prognostics and health management; polynomial regression; soft sensing

0 引 言

牵引变流器是列车关键核心系统,通过调压调频控制算法实现对交流感应电动机的牵引、制动控制^[1-2]。近年来,城轨列车牵引系统产品不断更新换代,同时各大城市地铁线上产品已运行多年,面临大量的检修工作,针对列车牵引系统的故障预测与健康管理(prognostics and health management, PHM)技术已成为轨道交通领域的研究热

点^[3-4],开展牵引变流器的 PHM 技术与产品开发,一方面关注产品设计、生产、试验等数据,分析早期失效期的产品故障,不断优化产品的设计开发水平;另一方面研究产品的老化机理,收集产品的运行数据,对损耗失效期的产品进行健康管理。支撑电容作为牵引变流器的关键部件之一,具有稳压、滤波以及为负载提供能量等重要作用^[5-6]。由于结构设计及材料特性等原因,牵引系统支撑电容随着其使用时间的增长,往往会出现老化失效现象,因此,如何

收稿日期:2020-12-02

• 132 •

在支撑电容失效前及时准确的做出判断成最近年来困扰相关设计人员的一大难题^[7-8]。

在列车的日常维保工作中,若要直接测量支撑电容的电容值、ESR 参数,不仅需要专业的设备、耗时长、过程复杂,而且无法实现在列车运行过程中进行测量^[9-10]。因此,需要一种基于数据分析方法的电容参数软测量模型,实现对支撑电容值、ESR 参数快速、准确的软测量。

多项式回归作为机器学习算法之一,通过数据挖掘的方式建立数据特征与目标值之间的映射,实现目标值的预测,因此多项式回归有着广泛应用^[11-12]。本文基于多项式回归算法构建容值和 ESR 值软测量模型,输入数据为支撑电容在预充电过程中的相关电压和电流曲线,采集预充电过程中的 30 组电压电流数据,选择 20 组作为训练和测试集,剩余的数据作为验证集验证软测量结果的精度,并通过不同工况下软测量结果分布的一致性对软测量模型进行分析和验证。

1 支撑电容工作特性

牵引系统中使用的直流支撑电容类型为金属薄膜电容,目前国内外生产厂家包括法拉、铜峰、指月、威世电容等。金属薄膜电容是将双面金属化聚丙烯膜和非金属化聚丙烯膜进行卷取或者叠层所组成的电容器。填充方式主要包括干式和油浸式,油浸式相比干式具备更好的灭弧能力,因此油浸式适用于高压电容器(通常 DC4000V 以上);干式相比油浸式具有更高的阻燃特性;从轨道交通安全性考虑,目前主要采用干式电容。与电解电容相比,金属薄膜电容具有使用寿命长(预期寿命 10 年以上)、安装简单、发热较低等优势,因此被轨道交通广泛使用^[13-14]。

1.1 阻抗特性

如图 1 所示,支撑电容的等效物理模型为 ESR、ESL 与 C 的串联。



图 1 简化电容模型

C 表示主电容值,ESL 是由于连接和绕组产生的等效电感,ESR 是元件内部的总损耗(电极、连接等造成的)。根据电容的物理模型,可知电容的阻抗表达式为:

$$Z_C(s) = \frac{1}{sC} + R_{ESR} + sL_{ESL} \quad (1)$$

由此得到电容的阻抗特性曲线如图 2 所示。

对于直流母线电容,因为其工作频率较低,因此其 ESL 可忽略不计(通常为 nH 级)。

1.2 电容的频率特性

牵引系统中使用的电容主要为薄膜电容,薄膜电容的电介质为金属薄膜,对温度不敏感,但对频率比较敏感,利用电容的 RLC 等效电路模型,ESR 的计算模型如下:

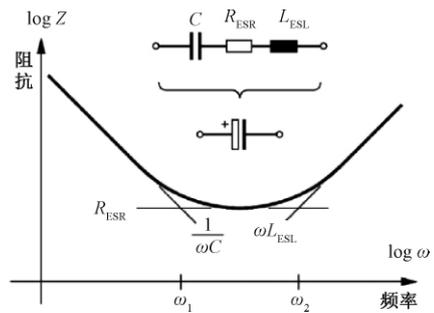


图 2 电容的阻抗特性曲线

$$ESR(f) = (R_s - A_s) + K(f) \cdot A_s \quad (2)$$

式中: R_s 是薄膜电容的基础电阻; f 代表电容的工作频率; A_s 是电容厂家数据中给出的参数,与电容尺寸有关;函数 $K(f)$ 是预设的与频率相关的函数,代表频率效应,通常是一个 f 的三次方或二次方函数,与计算时的拟合函数有关。

电容的等效串联阻抗 ESR 是表征电容的另外一个重要参数,它反映电容工作中的实际的损耗,即单位时间因发热而消耗的能量,通常用损耗角正切值来表征。损耗是电容发热的根源,是加速电容老化的主要因素,损耗角正切值越小,损耗越小,电容的性能越好。

2 支撑电容失效机理

在金属化膜电容器的寿命试验中,其失效和老化遵循如图 3 所示的“浴盆曲线”,电容器失效分为 3 个不同的阶段。

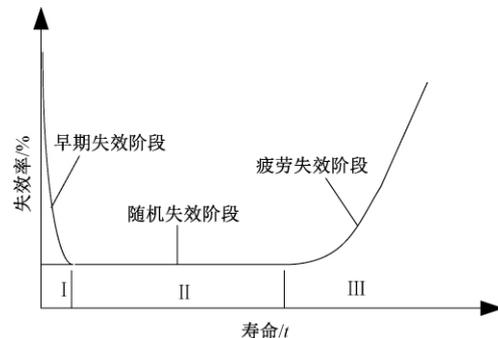


图 3 电容失效浴盆曲线

早期失效阶段 I: 这个阶段的失效与电容器内部固有缺陷相关,这些缺陷通常是在生产过程中产生或由质量差的介质材料引起。

随机失效阶段 II: 在此阶段的失效没有任何明确的失效模式,也不能反应电容器的寿命,是由电容器在工作时随机发生的状况引起。

疲劳性失效阶段 III: 这种失效是在温度和电应力的作用下,绝缘介质疲劳受损而导致的结果,通常会引起整个介质系统的劣化,通常以这个阶段作为电容器工作寿命终结

的标志。

金属化膜电容器在工作时其失效模式主要有以下3种:介质薄膜的击穿引起的短路失效、端部喷金层脱落造成的开路失效和电容量损失过多引起的失效。这些失效模式通常都属于阶段Ⅱ和阶段Ⅲ。

2.1 短路失效

运行中的薄膜电容的金属化膜的电极电阻较大,当金属化薄膜发生局部击穿后,流经击穿区域的自愈电流产生焦耳热,当注入到击穿区域的能量大于自愈所需能量时,积聚在薄膜电容器内部的热量以热能的形式释放,熔化多层介质薄膜,使电容器介质薄膜绝缘无法恢复,进而造成薄膜电容的电极短路。电容发生短路之前,会产生大量的气体,导致电容内部气压增大。一般来说,薄膜电容的电极越薄,电容的散热能力越差,单位面积电极电阻越大,自愈能量越低。金属化薄膜电容的短路失效可能发生在整个芯子,在外层芯子发生的短路一般由局部放电或喷金层的接触损坏引起的。但大部分的短路失效发生在芯子的内部,因为内部的芯子压力较高,阻碍了电弧的发展,破坏了临近介质层,使自愈失效,引起薄膜电容的最终失效。

2.2 开路失效

金属化薄膜电容的电极通过端部喷金层引出,且电容的端部喷金层与电极间的接触电阻较大,导致其端部通流能力较差。除此之外,金属化膜的电流在工作中分布存在差异,使得端部所受的电场力不均匀,进而引起机端部承受机械力的变化。在薄膜电容的实际运行中,作用在薄膜电容上的电应力以及电应力引起的机械应力和热应力的综合因素,导致端部喷金层与电容电极之间接触区域逐渐老化,慢慢使端部喷金层逐渐脱落,直至电容开路失效。研究表明,如果薄膜电容的运行环境的湿度较大,会加快电极的腐蚀和端部喷金层的脱落,使薄膜电容的电极和端部喷金层的有效面积减少。

2.3 电容量损失失效

薄膜电容在工作时受电应力和热应力的影响,引起电容的电极腐蚀和喷金层的脱落导致电极有效面积减少,进而导致电容量下降。除了影响电容在运行过程中承受的电应力和热应力会影响其可靠性外,环境湿度也会加速薄膜电容的失效。当薄膜电容在潮湿环境下运行时,水气渗透到薄膜电容介质材料内部或者以水膜的形式附在器件表面,使薄膜电容的电性能急剧劣化,如介质损耗增加和电容量减少。

综上所述,电容在运行过程中受电应力(工作电压、充放电次数、纹波电流)和热应力(环境温度、热点温度)等综合因素的影响,产生多种失效模式。针对以上失效模式,工业界总结的薄膜电容的失效标准为:

- 1) 电容量 C : 减少 5%;
- 2) 等效串联电阻 ESR: 增大 1 倍。

• 134 •

3 支撑电容参数预测

通过支撑电容失效机理研究可以得出,实现电容 PHM 技术研究的关键在于如何在线快速准确预测电容量值及 ESR 参数。

3.1 多项式回归

传统的直流支撑电容容值和 ESR 测量需要专业的设备,如 LCR 测量仪,检测耗时长,过程冗杂,测量工作必须在牵引系统停止运行时进行,频繁对直流支撑电容进行检测不具备可行性,无法实现对支撑电容状态的实时监测。

一般地,在数据挖掘中,建立数据特征与目标对象(特别是数值)之间的映射关系,即数值回归问题,通过机器学习算法,可对样本数据进行模型训练,可以实现对支撑电容容值和 ESR 的在线监测。

线性回归是常见的回归算法,具体可用如下公式描述:

$$T(X) = a_1X_1 + a_2X_2 + \dots + a_nX_n \quad (3)$$

即所求容值(目标函数 $T(X)$)与主频率分量(数据特征量 X)之间关系可用线性运算描述。另外,若将数据特征量 X 升至更高的维度或用特殊的核(Kernel)函数替代,如高斯核,则线性回归就会相应地转变为多项式回归(polynomial regression)函数。

多项式回归分析方法是研究一个因变量与一个或多个自变量间的多项式,当自变量只有一个时,称为一元多项式回归;当自变量有多个时,称为多元多项式回归。二元二次多项式回归方程为:

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_1^2 + a_4x_2^2 + a_5x_1x_2 \quad (4)$$

多项式回归方法最大优点是可以增加的高次项对目标进行逼近,理论上,任意一个函数都可以以多项式来逼近。本文以数据中电压值和电流值的某些统计量为自变量,以电压和电流对应的电容量值、ESR 参数为因变量,基于多项式回归方法,通过调节多项式最高次数,求得最优情况下的各个多项式系数。

3.2 模型训练

分别设置支撑电容容值和 ESR 值作为单一变量,以 100 kHz 频率采集牵引变流器预充电过程中的电网电压、电网电流、支撑电容电压、支撑电容电流以及 U 、 V 、 W 三相交流电流数据。共采集 30 组试验数据。30 组试验数据分别标号 1~30,前 15 组数据作为建立模型用训练数据集,16~20 组为测试集,21~30 组为验证集。其中 1~20 组数据对应的支撑电容容值和 ESR 已知,作为验证集的支撑电容容值和 ESR 未知。

数理统计(mathematical statistics)方法以概率论为基础,目的是研究大量随机现象的统计规律性^[15]。利用数理统计的思想对大量试验数据进行计算处理,提取数据中的特征规律(如参数、分布、相关性等)。数理统计可以揭示数据的分布特征及数据结构之间的内在联系。

因此针对所有试验数据,采用数理统计的方法进行特

征提取,得出每组数据中电压和电流的方差、标准差、众数、25%分位数、50%分位数、75%分位数。以预充电过程中采集到的支撑电容电压、电流信号的统计量分别如表 1、2 所示。

表 1 电压值数理统计

序号	众数	方差	标准差	25% 分位数	50% 分位数	75% 分位数
1	1 388	180 079	400	772	1 156	1 324
2	1 388	180 785	425	708	1 124	1 316
3	1 388	182 879	403	764	1 156	1 324
4	1 388	172 237	415	740	1 140	1 324
5	1 380	175 503	406	756	1 148	1 324
6	1 388	182 847	432	692	1 116	1 308
7	1 380	177 623	403	764	1 156	1 324
8	1 388	179 188	411	748	1 148	1 324
9	1 388	185 195	430	692	1 124	1 316
10	1 388	185 195	398	780	1 156	1 324

表 2 电流值数理统计表

序号	众数	方差	标准差	25% 分位数	50% 分位数	75% 分位数
1	0.018	0.005 3	0.073	0.028	0.06	0.13
2	0.018	0.005 4	0.074	0.028	0.06	0.13
3	0.013	0.005 4	0.074	0.028	0.06	0.13
4	0.018	0.005 5	0.075	0.028	0.06	0.132
5	0.018	0.005 5	0.074	0.028	0.06	0.13
6	0.010	0.005 6	0.075	0.028	0.06	0.132
7	0.018	0.005 5	0.074	0.028	0.06	0.132
8	0.018	0.005 6	0.075	0.028	0.06	0.132
9	0.018	0.005 6	0.075	0.028	0.06	0.132
10	0.018	0.005 6	0.075	0.028	0.06	0.132

依据表 1、2 得到的统计量,对采集到的预充电过程中的电网电压、电网电流、支撑电容电压、支撑电容电流以及 U、V、W 三相交流电流数据,电压电流数据的各 6 项统计量作为自变量,分别以电容值和 ESR 值作为因变量,使用多项式回归算法进行模型训练,模型参数可调整的参数为多项式的次数 n 。

将 21~30 组验证数据集的模型软测量结果与电容和 ESR 实测值作比较,并计算相对误差,结果如表 3 和 4 所示。

根据表 3、4 可知,支撑电容容值和 ESR 值的软测量结果较理想,其中容值软测量计算误差大多在 1% 以内,少数几组误差超过 1%,最大误差为 1.566%,最小误差为 0.224%;ESR 值软测量计算误差大多在 1.5% 以内,少数几组误差超过 1.5%,最大误差为 1.579%,最小误差为 0.794%。

表 3 电容值软测量结果对比

序号	软测量值/F	实测值/F	软测量误差/%
21	0.004 023 422	0.004 014 43	0.224
22	0.003 988 169	0.004 014 43	-0.654
23	0.003 988 757	0.004 014 43	-0.640
24	0.004 039 611	0.004 014 43	0.627
25	0.004 181 467	0.004 142 62	0.938
26	0.004 161 662	0.004 142 62	0.460
27	0.004 153 006	0.004 142 62	0.251
28	0.004 183 635	0.004 142 62	0.990
29	0.004 138 081	0.004 110 00	0.683
30	0.417 435 900	0.004 110 00	1.566

表 4 ESR 值软测量结果对比

序号	软测量值/ Ω	实际值/ Ω	软测量误差/%
21	1.230 408 0	1.212 253 4	1.497
22	1.222 327 2	1.212 253 4	0.831
23	1.233 405 3	1.231 405 3	1.579
24	1.223 297 0	1.212 253 4	0.911
25	1.349 110 6	1.332 863 0	1.219
26	1.351 789 6	1.332 863 0	1.420
27	1.347 597 2	1.332 863 0	1.105
28	1.428 690 3	1.417 435 9	0.794
29	1.434 267 7	1.433 667 7	1.145
30	1.431 560 8	1.417 435 9	0.996

3.3 模型评估

为进一步验证多项式回归容值软测量模型的准确性,以支撑电容容值为例,对其软测量结果进行统计分析。

数理统计中的 3σ 原则,在数据一致性识别中具有广泛应用^[16-17],通过对含有随机误差的具有正态分布特性的信号进行计算处理得到标准偏差,通过确定数据分布的概率空间识别出异常值。

基于数理统计中的 3σ 原则,对测量到的大量原始容值软测量结果进行计算处理得到标准差。将同一容值在 5 种不同工况下的试验数据分别进行软测量。将软测量结果分别进行 1sigma 和 2sigma 统计,如表 5 所示。

通过标准差分析电容软测量结果均值加减 2 个标准差即可包含全部组数,对于同一电容的多次软测量结果比较集中。支撑电容 ESR 值软测量结果与支撑电容软测量结果一致。

通过对软测量模型在不同工况下的软测量结果进行检验,基于“数理统计+多项式回归”的软测量模型在容值和 ESR 值预测的准确度符合 3σ 原则,验证了软测量模型具

有较好的软测量结果。

表 5 电容值软测量结果统计分析

实测值/ mF	软测量值/ mF	标准差	包含组数	
			均值 $\pm \sigma$	均值 $\pm 2\sigma$
4.014 43	4.032 68	0.007 218	4	4
	4.041 85			
	4.031 32			
	4.032 46			
4.142 62	4.149 64	0.007 345	4	4
	4.162 37			
	4.162 58			
	4.148 97			
4.110 00	4.126 83	0.003 546	3	4
	4.125 53			
	4.120 40			
	4.128 68			
4.095 00	4.115 70	0.005 280	4	4
	4.119 57			
	4.125 95			
	4.114 05			
4.075 00	4.115 14	0.005 440	3	4
	4.114 19			
	4.107 39			
	4.103 81			

4 结 论

本文对应用于列车牵引系统的支撑电容工作特性和老化机理进行了深入分析,明确了电容失效判定依据。针对电容失效判定依据,基于机器学习在数据挖掘和数据分析方面的优势,提出了“数理统计+多项式回归”的算法构建电容容值和 ESR 值软测量模型,利用现有大量试验数据进行模型训练及模型优化,实现牵引变流器支撑电容的电容值和 ESR 值在线软测量功能。并通过模型评估验证了多项式回归算法的准确性,模型应用在测试数据集时相对误差远小于 5%,表明该模型可以对电容容值和 ESR 值进行准确软测量,满足工程需求。

参考文献

- [1] 孟苓辉.牵引变流器的故障预测与健康(PHM)及可靠性评估技术研究[D].北京:北京交通大学,2017.
- [2] 李敏华,郭昆丽,王鹏宇,等.基于 MATLAB 的地铁牵引控制系统仿真研究[J].国外电子测量技术,2020,39(3):35-39.
- [3] 贾春园.PHM 技术在牵引供电系统中的应用研究[J].智能城市,2020(4):1-4.
- [4] 马新娜,施文锐.高速列车状态监测大数据的预警可视化分析研究[J].电子测量与仪器学报,2019,33(7):

- 21-17.
- [5] 王娜,宋文胜,冯晓云.基于载波移相控制的脉冲整流器直流侧支撑电容电压谐波抑制研究[J].机车电传动,2012(2):34-39.
- [6] 唐海燕,唐洲.功率变换器中直流支撑电容器的选择和应用[J].大功率变流技术,2011(6):27-30.
- [7] WANG H, BLAABJERG F. Reliability of capacitors for de-link applications in power electronic converters—an overview[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2014, 50(5): 3569-3578.
- [8] 时清华.电容器故障在线监测及剩余寿命预测系统设计[D].青岛:山东科技大学,2017.
- [9] 江剑峰,朱彬若,卢广震,等.单相 AC-DC 变换器直流回路电容 ESR 损耗分析[J].变频器世界,2018(11):67-71.
- [10] HASEGAWA K, NISHIZAWA S, OMURA I. ESR and capacitance monitoring of a dc-link capacitor used in a three-phase PWM inverter with a front-end diode rectifier [J]. Microelectronics Reliability, 2018, 88-90: 433-437.
- [11] 马志华,陈光慧.基于局部多项式回归的模型校准抽样估计研究[J].数理统计与管理,2016,35(1):47-56.
- [12] 吴婕,吕永乐.基于多项式系数自回归模型的雷达性能参数最优组合预测[J].计算机应用,2019(4):1117-1121.
- [13] 潘启军,黄垂兵,邓晨,等.电解电容与薄膜电容的对比分析[J].海军工程大学学报,2014(2):5-9.
- [14] 彭波.金属化膜电容器自愈关键参数研究[D].武汉:华中科技大学,2010.
- [15] 何志刚,魏涛,盘朝奉,等.一种基于粒子滤波和多项式回归的锂离子电池剩余寿命间接预测方法[J].重庆理工大学学报(自然科学),2020,34(11):27-33.
- [16] 左建勇,冯富人,丁景贤.基于 Super smoother 和 3σ 原理的列车动态测试趋势性异常数据清洗方法与分析[J].仪器仪表学报,2020,41(10):65-73.
- [17] 李剑焘,汪悦,张松,等.基于概率分布的元器件质量一致性控制[J].中国航天,2020(S1):93-98.

作者简介

- 侯飞,硕士研究生,工程师,主要研究方向为车辆工程。
E-mail: 15153129396@163.com
- 张金城,工程师,主要研究方向为车辆工程。
E-mail: 710371944@163.com
- 刘强,硕士研究生,工程师,主要研究方向为轨道牵引系统 PHM。
E-mail: 18366115399@163.com
- 李旭,本科,工程师,主要研究方向为轨道牵引系统 PHM。
E-mail: 15165940331@163.com
- 李华,硕士研究生,工程师,主要研究方向为轨道牵引系统 PHM。
E-mail: lihua_lomo@163.com
- 曹虎,硕士研究生,工程师,主要研究方向为轨道牵引系统 PHM。
E-mail: cao_hu123@126.com