

基于机器学习的储能电池安全预警技术研究与应用

左涛 陈亮 燕宁江 王力平

国家电投集团重庆合川发电有限公司 重庆 400000

摘要: 随着可再生能源的快速发展, 储能电池在能源转换和供应中扮演着越来越重要的角色。然而, 电池安全问题如热失控、过充和内部短路等, 严重威胁着用户安全并限制了储能技术的广泛应用。机器学习作为一项先进的数据分析技术, 在电池安全预警领域展现出巨大潜力。本文综合研究了基于机器学习的储能电池安全预警技术, 通过分析电池关键运行参数, 构建了能够预测潜在故障和安全隐患的智能预警模型。研究表明, 这些模型能够有效提高电池的安全性能, 减少事故发生风险, 为储能电池的管理和运营提供强有力的技术支持。

关键词: 机器学习; 储能电池; 安全预警技术; 应用

一、储能电池工作原理

储能电池工作原理基于能量转换和储存的基本原理, 通过化学反应或物理变化将电能转化为化学能或物理能进行储存, 在需要时再将储存的能量转化为电能释放出来。储能电池的核心组成部分包括正极、负极、电解质和隔膜。具体来说, 电池储能系统的工作过程可以分为两个阶段: 储能阶段和放能阶段。在储能阶段, 电池通过连接到电源(如电网、太阳能板或其他发电设备)的充电过程中, 电能被转化为化学能并储存在电池中。在这个过程中, 电池的正极和负极之间会发生化学反应, 电解质则帮助这些化学反应顺利进行, 而隔膜的作用是防止正负极直接接触, 确保电池内部电流的合理流动。在放能阶段, 当电网或设备需要电能时, 电池会将其储存的化学能转换回电能, 通过放电过程释放出来。这时, 电池管理系统(BMS)会对电池组进行管理和控制, 包括电池的充电、放电、温度控制和安全保护等功能。同时, 储能变流器作为实现电池储能系统与电网之间能量交换的关键设备, 能够实现电能的双向流动^[1]。

二、储能电池常见的安全隐患

1. 热失控

热失控是储能电池, 尤其是锂离子电池最严重且常见的安全隐患之一。当电池内部温度迅速升高而无法通过电池的热管理系统进行有效控制时, 就会发生热失控。这种温度的急速上升通常是由于电池内部的化学反应失控导致的, 比如电池过充或内部短路。热失控的后果极为严重, 可能导致电池爆炸、起火, 甚至产生有毒气体, 对环境造成污染和对人体健康构成威胁。此外, 一旦一

个电池单元发生热失控, 它可能会触发相邻单元相同的反应, 形成链式反应, 导致整个电池组损坏。因此, 防止热失控对于确保电池安全性至关重要。

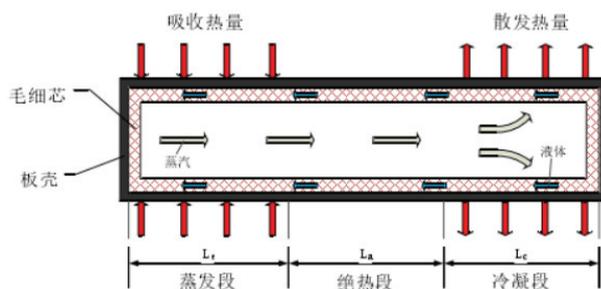


图1 热管工作原理的示意图

2. 电池系统缺陷

电池系统缺陷也是储能电池的一大安全隐患。这些缺陷可能来源于设计不当、材料缺陷、制造过程中的质量控制失效或者使用过程中的老化与磨损。例如, 电池的隔膜如果质量不达标, 可能会在使用过程中造成短路; 电池管理系统(BMS)的设计或软件编程错误可能导致电池过度充放电。此类缺陷会降低电池的性能, 缩短其使用寿命, 并有可能引发更严重的安全事故, 如热失控或电池爆炸。定期对电池进行容量测试、内阻测量以及电子组件检查是预防此类隐患的重要措施^[2]。

3. 电气故障

电气故障是储能电池系统中另一种常见的安全隐患, 它可能由外部电路问题或电池自身的问题引起。外部电路故障可能包括不恰当的电线连接、电气元件损坏、绝缘材料老化等。而电池自身的电气故障通常与电池单元的不一致、BMS故障或者传感器失效有关。这些问题可

能导致电流异常、电压波动、局部过热等问题，进一步可能引发火灾或电击事故。为了防止电气故障，必须在设计和安装电池系统时严格遵守电气安全标准，并在运行过程中进行定期维护和检查。

三、机器学习在电池安全预警中的潜力分析

机器学习在电池安全预警中的潜力分析涉及到数据驱动的决策过程，通过从大量的电池运行数据中学习与挖掘，可以有效地预测和识别潜在的故障和安全问题。随着电池技术的广泛应用，如电动汽车和大规模储能系统，对电池安全性的关注日益增加。而机器学习提供了一种强有力的工具来处理复杂的电池数据，并从中发现有用的信息和模式。首先，机器学习能够分析和处理庞大的数据集，包括电压、电流、温度等参数，这些数据对于理解电池的行为至关重要。通过对这些数据的持续监测和实时分析，机器学习模型能够提前发现可能导致性能下降或安全隐患的趋势和模式。例如，机器学习模型可以通过分析电池的充电和放电曲线来预测电池的健康状态，从而预警可能的故障。其次，机器学习算法还可以用于优化电池管理系统中的决策过程，提高电池的使用效率和寿命。通过预测电池的未来状态，机器学习模型可以帮助制定更加精确的充放电策略，从而延长电池的使用寿命并减少维护成本。最后，机器学习在电池安全预警中的应用还有助于减少对昂贵和耗时的实验测试的依赖。通过构建准确的预测模型，可以在不实际进行潜在危险实验的情况下，评估电池在各种条件下的行为，这对于提高电池设计的安全性和可靠性具有重要意义。

四、基于机器学习的储能电池安全预警模型构建

1. 数据收集与预处理

构建一个基于机器学习的储能电池安全预警模型的第一步是数据收集与预处理。这一阶段，需要收集能够代表电池状态和行为的广泛数据，包括电压、电流、温度、内阻以及充放电循环次数等参数。除了这些直接测量得到的数值，还需要记录环境条件、电池历史维护记录和使用日志等信息。一旦收集到数据，接下来的任务是进行数据清洗，这包括去除噪声、填补缺失值、识别和剔除异常值等工作。数据预处理的目的是确保输入机器学习模型的数据是干净、一致且准确的，为后续分析打下坚实基础^[3]。

2. 特征选择与提取

在机器学习中，特征选择与提取对于建立有效的预

测模型至关重要。特征选择涉及从原始数据中挑选出对预测电池安全性最有帮助的特征，以减少模型复杂性并提高其性能。而特征提取则是将原始数据转换成更加抽象的形式，以便捕捉到更多潜在的、不容易直接观察到的模式和关联。好的特征选择与提取不仅能够增强模型的预测能力，还能帮助解释模型的决策过程，从而为电池安全管理提供更深刻的洞见。

3. 机器学习模型的选择与优化

选择合适的机器学习模型对于建立一个准确的安全预警系统至关重要。不同的算法有不同的假设、优势和局限性，因此选择最适合特定数据集和问题的模型是关键。常用的模型包括决策树、支持向量机、神经网络和深度学习等。一旦选择了模型，就需要对其进行调参优化，这个过程称为超参数优化。通过调整学习率、层数、迭代次数等参数，可以显著提升模型的性能表现。此外，采用交叉验证和网格搜索等技术可以系统地进行模型选择和超参数优化^[4]。

4. 安全预警模型的训练与验证

最后阶段是使用经过预处理的数据和选定的特征来训练机器学习模型。这一过程中，模型将学习如何根据输入的电池参数预测潜在的安全风险。训练完成后，需要在独立的测试集上验证模型的性能，以评估其泛化能力。常见的性能指标包括准确率、召回率、精确度和接收者操作特性曲线（ROC）下的面积（AUC）。如果模型的表现令人满意，它就可以部署到实际的电池管理系统中去实时预警潜在的安全问题。

五、基于机器学习的储能电池安全预警技术应用

1. 故障预测与健康监测

基于机器学习的储能电池故障预测与健康监测技术，致力于通过实时监测和数据分析来提前发现电池潜在的故障和性能衰退。这一领域利用各种机器学习模型，例如深度学习网络、决策树、随机森林和梯度增强机等，对电池的关键性能指标（如电压、电流、温度、内阻等）进行监控和分析。通过对这些参数的连续跟踪，机器学习模型能够识别出与正常电池行为偏差的异常模式，从而预测故障发生的可能性，并提前发出警告。这不仅可以帮助操作人员及时采取措施预防故障发生，还能指导电池的维护和更换计划，显著提高电池系统的运营效率和安全性^[5]。

2. 热失控预警

热失控是储能电池最严重的安全隐患之一，它往往

导致电池起火甚至爆炸。为了有效预防热失控事件的发生，研发了基于机器学习的热失控预警系统。这些系统通过监测电池在充放电过程中的多项关键指标，包括温度、电压和电流等，使用机器学习算法对这些数据进行分析，以便实时识别可能导致热失控的行为模式。当检测到风险时，系统会立即发出警报，允许采取紧急措施以减轻或避免灾难。这种预警技术对于确保电池的安全运行至关重要，尤其是在大规模电池储能系统中，可以有效地减少安全事故和财产损失。

3. 寿命预测

电池的寿命预测对于储能系统的维护和替换计划至关重要。机器学习提供了一个有效的方法来预测电池的循环寿命和日历寿命。通过收集大量的历史充放电数据，以及相关的环境条件和操作习惯等信息，机器学习模型能够学习电池性能退化的趋势和模式。这可以用于建立一个准确的寿命预测模型，帮助用户了解电池何时将达到其性能极限，从而制定更加精确的维护策略。此外，这种预测还可以为用户的投资决策提供支持，优化电池的使用成本和价值。通过机器学习技术的辅助，电池寿命预测变得更加科学和可靠，为储能电池的安全和经济运行提供了有力保障^[6]。

4. 异常行为检测

在储能电池的运行过程中，异常行为可能预示着潜在的故障或安全问题。这些异常行为包括电流泄漏、电压突波、温度异常升高等，它们可能是由于设备缺陷、环境因素或操作失误造成的。机器学习提供了一种有效的方法来识别和处理这些异常行为。通过训练算法识别正常的电池操作行为，机器学习模型能够实时监控电池的性能，并在检测到与正常行为模式不符的数据时发出警告。这种异常检测系统可以快速识别出可能导致电池性能下降或安全隐患的操作条件，从而允许运营人员及时采取措施防止故障发生或扩散。此外，通过对大量历史数据的深入分析，机器学习模型可以帮助改进电池的设计和制造过程，从而提高未来产品的质量和可靠性。

5. 电池组均衡控制

在电池组中，各个电池单元的状态可能会有所不同，这可能会导致电池组整体性能的下降和使用寿命的缩短。为了解决这个问题，可以采用基于机器学习的均衡控制

技术。该技术利用机器学习模型对每个电池单元的性能进行实时监控和分析，以识别出那些需要充电或放电的单元。然后，通过调整充放电过程，确保所有单元都在同一状态下工作，从而最大化整个电池组的性能和寿命。这种均衡控制不仅有助于提高电池的使用效率，还可以防止因个别单元过充或过放而导致的安全问题。通过机器学习算法的优化，均衡控制可以更加精确和高效，为电池管理系统带来显著的改进。

结语

总体而言，机器学习在储能电池安全预警技术方面的应用前景广阔。通过深入分析和研究电池的运行数据，我们不仅能够提前识别出可能导致安全事故的异常行为，还能够优化电池的维护和运营策略，延长其使用寿命。尽管存在一些技术和实践上的挑战，但随着算法的不断进步和数据处理能力的提升，基于机器学习的安全预警系统有望成为保障储能电池安全运行的关键技术。未来的工作应聚焦于提高预警模型的准确性、实时性和可靠性，同时，加强多学科领域的合作，推动从实验室到实际应用的转化。通过持续的研究和技术创新，我们有望在储能电池领域实现更高的安全性能和经济效益。

参考文献

- [1] 钱广俊, 王鲁彦, 欧阳明高, 等. 基于降维机理模型的储能电池安全充电在线控制技术[J]. 电力工程技术, 2024, 43(01): 2-10.
- [2] 储能电池系统热失控安全监测传感器解决方案[J]. 世界电子元器件, 2024, (01): 41-43.
- [3] 李云松, 蔡天亮, 崔健, 等. 电化学储能电站安全风险及防控措施[J]. 电力安全技术, 2023, 25(12): 1-3+16.
- [4] 熊铭辉, 王琳, 何根泉, 等. 锂电池电化学储能电站安全监测智慧系统研究[J]. 机电信息, 2023, (16): 1-5.
- [5] 刘家亮, 郭翠静, 汪奕伶. 基于火灾事故树模型的储能锂离子电池安全性检测方法 with 验证[J]. 储能科学与技术, 2023, 12(05): 1695-1704.
- [6] 郑志坤. 磷酸铁锂储能电池过充热失控及气体探测安全预警研究[D]. 郑州大学, 2020.