

铁路信号设备健康状态评估研究

武立强

通号工程局集团有限公司 北京 100070

摘要：本文聚焦铁路信号设备健康状态评估研究。先概述铁路信号设备，指出其是保障铁路运输安全与效率的核心系统。接着构建评估指标体系，明确选取原则，分析健康状态影响因素，建立指标体系并确定权重。研究评估方法，分析传统方法，探讨基于数据驱动与模型融合的方法及选择改进策略。最后进行评估系统设计与实现，涵盖需求、架构、功能模块设计及实现测试，为设备健康管理提供支持。

关键词：铁路信号设备；健康状态评估；评估指标

1 铁路信号设备概述

铁路信号设备是保障铁路运输安全、提高运输效率的核心系统，它如同铁路的“神经中枢”，精准指挥着列车运行与调度作业。铁路信号设备种类繁多、功能各异。信号机是列车运行的“眼睛”，通过不同颜色的灯光向列车司机传达行车指令，如红灯表示禁止通行、绿灯表示允许通行，确保列车在区间和站内有序行驶。轨道电路则像“感知神经”，利用钢轨作为导体，检测轨道上是否有列车占用，为信号系统提供关键信息，防止列车追尾和冲突。转辙机是控制道岔转换的关键设备，能精准改变道岔位置，引导列车驶入不同轨道，实现列车的变道和分流。应答器如同“信息驿站”，为列车提供线路参数、位置信息等，辅助列车实现精确停车和自动驾驶^[1]。另外，调度集中系统（CTC）和列车运行控制系统（CTCS）等现代化设备，实现了铁路运输的集中指挥和自动化控制，大大提升了运输组织的效率 and 安全性。随着科技的不断进步，铁路信号设备正朝着智能化、数字化、网络化的方向发展，为铁路运输的高效、安全、可持续发展提供坚实保障。

2 铁路信号设备健康状态评估指标体系构建

2.1 评估指标选取原则

评估指标的选取应遵循一定的原则，以确保评估指标的科学性、合理性和有效性。首先是全面性原则，评估指标应涵盖铁路信号设备的各个方面，包括设备的物理状态、电气性能、通信功能、环境适应性等，能够全面反映设备的健康状况。其次是客观性原则，评估指标应基于设备的实际运行数据和客观事实，避免主观因素的影响。例如，不能仅仅根据维护人员的经验来判断设备的健康状态，而应通过实际的检测数据和测试结果来评估。再次是可操作性原则，评估指标应具有可测量性和可获取性，便于实际操作和应用。最后是层次性原

则，评估指标体系应具有层次结构，不同层次的指标之间应具有逻辑关系，能够从不同层面反映设备的健康状态。

2.2 健康状态影响因素分析

铁路信号设备的健康状态受到多种因素的影响，对这些因素进行深入分析是构建评估指标体系的重要前提。设备自身的因素是影响健康状态的关键因素之一，包括设备的设计质量、制造工艺、零部件质量等。如果设备的设计存在缺陷，可能会导致设备在运行过程中容易出现故障；制造工艺不良可能会影响设备的性能和可靠性；零部件质量不过关则会缩短设备的使用寿命^[2]。运行环境因素也对设备的健康状态产生重要影响，如前面所述，自然环境中的温度、湿度、雷电、振动等以及人为环境中的电磁干扰等都会对设备造成不同程度的损害。维护管理因素同样不可忽视，合理的维护计划和有效的维护措施可以延长设备的使用寿命，提高设备的可靠性；反之，维护不当则可能导致设备故障频发。此外，设备的运行负荷和使用年限也会影响其健康状态，运行负荷越大、使用年限越长的设备，其出现故障的概率相对较高。

2.3 评估指标体系的建立

在明确评估指标选取原则和健康状态影响因素的基础上，可以建立铁路信号设备健康状态评估指标体系。该体系通常包括多个层次的指标，以信号机为例，一级指标可以包括物理状态、电气性能、通信功能等。物理状态指标下可以设置外观完整性、安装牢固性等二级指标；电气性能指标下可以设置灯光显示准确性、电路稳定性、电源质量等二级指标；通信功能指标下可以设置与控制系统的通信正常性、数据传输准确性等二级指标。对于轨道电路，一级指标可以包括轨道占用检测准确性、传输性能、绝缘性能等。轨道占用检测准确性指标下可以设置检测灵敏度、误报率等二级指标；传输性

能指标下可以设置信号衰减、传输速率等二级指标；绝缘性能指标下可以设置钢轨绝缘电阻、轨间电压等二级指标。通过这样的层次结构，将评估指标进行细化和分解，能够更全面、准确地反映设备的健康状态。同时，对于每个指标，应明确其定义、计算方法和评估标准，以便在实际评估中进行操作和应用。

2.4 评估指标权重确定方法

评估指标权重的确定是评估指标体系中的重要环节，它反映了各个指标在评估中的重要程度。常用的评估指标权重确定方法有主观赋权法和客观赋权法。主观赋权法主要依据专家的经验 and 判断来确定指标权重，如层次分析法（AHP）。层次分析法是一种将定性与定量相结合的方法，它通过构建层次结构模型，将复杂的评估问题分解为多个层次，然后通过两两比较确定各层次中指标的相对重要性，最终计算出各指标的权重。这种方法能够充分考虑专家的知识 and 经验，但主观性较强。客观赋权法则是根据指标的实际数据来确定权重，如熵权法。熵权法基于信息熵的概念，信息熵越小，说明指标的变异程度越大，提供的信息越多，在评估中的重要性也就越高，因此可以赋予较大的权重。这种方法能够避免主观因素的影响，但需要大量的实际数据支持。在实际应用中，可以根据具体情况选择合适的权重确定方法，也可以将主观赋权法和客观赋权法相结合，综合确定指标权重，以提高评估结果的准确性和可靠性。

3 铁路信号设备健康状态评估方法研究

3.1 传统评估方法分析

传统评估方法主要包括专家评估法、故障树分析法等。专家评估法是依靠专家的经验 and 知识，对设备的健康状态进行评估。专家通过对设备的外观、运行记录、检测数据等进行综合分析，结合自己的实践经验，给出设备的健康状态评估结果。这种方法简单易行，能够充分利用专家的经验，但评估结果受专家主观因素的影响较大，不同专家可能会得出不同的评估结果。故障树分析法是一种从结果到原因的分析方法，它通过构建故障树，将设备的故障事件作为顶事件，然后逐步分析导致该故障事件发生的各种中间事件和基本事件，找出设备的薄弱环节和故障原因。故障树分析法能够清晰地展示设备故障的逻辑关系，有助于深入分析设备的故障模式和影响，但构建故障树需要耗费大量的时间和精力，且对分析人员的专业素质要求较高。

3.2 基于数据驱动的评估方法

基于数据驱动的评估方法是利用设备运行过程中产生的大量数据，通过数据挖掘、机器学习等技术来评估

设备的健康状态。常见的方法包括神经网络、支持向量机、决策树等。神经网络是一种模拟人脑神经元结构的计算模型，它具有强大的非线性映射能力和自学习能力。通过输入设备的各种运行数据，如电压、电流、温度等，神经网络可以自动学习数据中的规律和特征，建立设备健康状态与运行数据之间的映射关系，从而实现了对设备健康状态的评估。支持向量机是一种基于统计学习理论的分类方法，它通过寻找一个最优的超平面来将不同健康状态的设备数据进行分类，具有较好的泛化能力和分类准确性^[3]。决策树则是一种基于树结构进行决策的模型，它通过对数据进行分析 and 划分，构建一个决策树，根据设备的运行数据在决策树中的路径来确定设备的健康状态。基于数据驱动的评估方法能够充分利用设备运行数据中的信息，评估结果客观准确，但需要大量的高质量数据进行训练和验证，且对数据处理和算法选择的要求较高。

3.3 基于模型融合的评估方法

基于模型融合的评估方法是多种评估方法进行有机结合，充分发挥各种方法的优势，提高评估的准确性和可靠性。例如，可以将传统评估方法中的专家经验与基于数据驱动的评估方法相结合，利用专家的经验对数据驱动模型的评估结果进行修正和优化。或者将不同的数据驱动模型进行融合，如将神经网络和支持向量机进行组合，通过综合分析不同模型的评估结果，得到更准确的设备健康状态评估。模型融合的方法可以克服单一评估方法的局限性，提高评估的全面性和准确性，但模型融合的算法和策略较为复杂，需要深入研究和实践。

3.4 评估方法的选择与改进

在选择铁路信号设备健康状态评估方法时，需要综合考虑设备的特点、评估需求、数据条件等因素。如果设备的历史数据较少，且专家的经验丰富，可以选择传统评估方法或基于专家经验改进的评估方法；如果设备运行过程中产生了大量的数据，且数据质量较高，可以选择基于数据驱动的评估方法；如果对评估结果的准确性要求较高，且具备相应的技术和资源条件，可以选择基于模型融合的评估方法。同时，为了提高评估方法的性能和效果，还需要对评估方法进行不断改进和优化。通过不断选择和改进评估方法，可以更好地满足铁路信号设备健康状态评估的需求。

4 铁路信号设备健康状态评估系统设计与实现

4.1 系统需求分析

系统需求分析是系统设计的基础，需要明确系统的功能和性能要求。从功能方面来看，系统应具备数据采

集功能,能够实时采集铁路信号设备的各种运行数据,如信号机的灯光显示状态、轨道电路的电流电压、应答器的通信数据等;数据存储功能,将采集到的数据进行存储和管理,以便后续的查询和分析;健康状态评估功能,根据采集到的数据和预设的评估指标体系,运用选定的评估方法对设备的健康状态进行评估;结果展示功能,将评估结果以直观的方式展示给用户,如报表、图表、图形等;预警功能,当设备的健康状态出现异常时,能够及时发出预警信息,提醒维护人员进行处理。从性能方面来看,系统应具备实时性、准确性、可靠性等特点,能够及时响应设备的状态变化,准确评估设备的健康状态,确保系统的稳定运行。

4.2 系统架构设计

系统架构设计应根据系统需求进行,采用分层架构或模块化架构等常见的设计模式。分层架构可以将系统分为数据采集层、数据存储层、评估分析层和用户界面层等。数据采集层负责与各种数据采集设备进行通信,采集设备的运行数据;数据存储层将采集到的数据进行存储和管理,可以采用数据库技术实现;评估分析层运用评估方法和算法对数据进行处理,评估设备的健康状态;用户界面层为用户提供操作界面,展示评估结果和接收用户的指令。模块化架构则是将系统划分为多个功能模块,如数据采集模块、数据存储模块、评估模块、展示模块等,每个模块具有独立的功能和接口,便于系统的开发、维护和扩展。

4.3 系统功能模块设计

根据系统架构,设计各个功能模块的具体功能。数据采集模块应具备与多种数据采集设备兼容的能力,能够按照设定的采集频率和方式采集设备的运行数据,并对采集到的数据进行初步处理和校验。数据存储模块应选择合适的数据管理系统,设计合理的数据库结构,实现数据的高效存储和管理,同时具备数据备份和恢复功能,确保数据的安全性和完整性。评估模块是系统的核心模块,应根据选定的评估方法和评估指标体系,编写相应的评估算法和程序,对采集到的数据进行处理和分析,得出设备的健康状态评估结果。展示模块应提供友好的用户界面,将评估结果以直观、易懂的方式展示给用户,如采用图表、图形等形式展示设备的健康状态

趋势、故障概率等信息,同时提供查询、统计等功能,方便用户对评估结果进行分析和决策^[4]。预警模块应根据设定的预警阈值,对设备的健康状态评估结果进行实时监测,当评估结果超过预警阈值时,及时发出预警信息,预警信息可以通过短信、邮件、声光报警等方式通知维护人员。

4.4 系统实现与测试

系统实现是根据系统设计和功能模块设计,采用合适的编程语言和开发工具进行代码编写和系统开发。在实现过程中,应遵循软件开发的规范和标准,确保代码的质量和可维护性。系统开发完成后,需要进行全面的测试,包括功能测试、性能测试、安全测试等。功能测试主要验证系统的各项功能是否能够正常实现,是否满足系统需求;性能测试主要测试系统在不同负载情况下的响应时间、吞吐量等性能指标,确保系统能够满足实时性和准确性的要求;安全测试主要检查系统的安全性,如数据加密、用户认证、访问控制等方面是否存在安全隐患。通过测试,及时发现系统存在的问题并进行修复和优化,确保系统的稳定运行和可靠性。经过严格的测试和验证后,系统可以正式上线运行,为铁路信号设备的健康状态评估和管理提供有力支持。

结束语

铁路信号设备健康状态评估研究对保障铁路运输安全高效意义重大。通过构建科学合理的评估指标体系,综合运用多种评估方法,并设计实现功能完备的评估系统,能够实时、准确掌握设备健康状况。未来,随着技术不断发展,需持续优化评估指标与方法,提升系统性能,以适应铁路运输日益增长的需求,为铁路事业的可持续发展筑牢根基。

参考文献

- [1] 窦敏.铁路信号设备状态修的探索与实践[J].中国设备工程,2020,(23):26-27.
- [2] 陈硕.基于数据挖掘的铁路信号设备故障自动诊断研究[J].电气应用,2020,39(6):85-89
- [3] 李福建,黄兆秋.关于铁路信号施工技术应用及施工要点的分析[J].价值工程,2020,39(16):173-174.
- [4] 许锦江.铁路信号设备的防雷与接地研究[J].中国设备工程,2024,(06):246-248.