

C波段多普勒天气雷达系统故障智能诊断技术研究

闫茉 邢栋 张卉 张瑞庭 李红梅

长治市气象局，山西省长治市，046000；

摘要：本研究聚焦于C波段多普勒天气雷达系统，详细阐述了雷达系统的组成与基本原理。通过对多个雷达故障实例的深入分析，揭示了硬件故障的多样性及影响。同时，剖析了传统故障排查方法的局限性，强调了故障智能诊断技术在提高故障排查效率、保障雷达稳定运行方面的重要作用。构建了涵盖数据采集处理、特征提取、模型建立及结果验证优化的智能诊断技术思路。研究成果为提升雷达故障诊断的智能化水平提供了理论支持与实践参考，未来可在模型优化和多源数据融合等方面深入探索。

关键词：C波段多普勒天气雷达；故障智能诊断；数据处理；模型优化

DOI：10.69979/3041-0673.26.02.035

C波段多普勒天气雷达在大气探测领域发挥着关键作用，其稳定运行对于气象数据的准确获取至关重要。然而，在实际运行中，雷达系统难免会出现各种故障，影响气象观测的质量和效率。传统的故障排查方法存在效率低、准确性不足等问题，因此，开展故障智能诊断技术研究具有重要的现实意义，有助于提高雷达系统的可靠性和稳定性。

1 雷达系统的组成及基本原理

1.1 雷达系统的组成部分

C波段多普勒天气雷达系统由多个分系统构成，主要包括天馈线分系统、发射分系统、接收分系统、信号处理、伺服、监控、以及数据处理与显示分系统等。天馈线分系统负责发射和接收电磁波信号，是雷达与外界气象目标进行信息交互的重要接口。发射分系统产生高功率的射频信号，为雷达探测提供能量。接收分系统对回波信号进行放大、滤波等处理，以便后续的信号分析。信号处理分系统对接收的信号进行处理，提取气象目标的相关信息。伺服分系统控制雷达天线的转动，实现对不同方位和仰角的气象目标的探测。监控分系统实时监测雷达各部分的工作状态，确保雷达的正常运行。数据处理与显示分系统对处理后的数据进行分析和显示，为气象预报人员提供直观的气象信息。

1.2 全相参脉冲多普勒天气雷达的工作原理

CC雷达是一种全相参脉冲多普勒天气雷达，其工作原理是通过发射水平极化电磁波，并接收从气象目标散射的电磁波来发现气象目标。它能够同时测定空中气象目标的距离、方位和仰角。具体来说，雷达发射的电磁波遇到气象目标后会发生散射，其中一部分散射波会

返回雷达被接收。通过测量发射波与回波之间的时间差，可以计算出气象目标与雷达的距离。利用多普勒效应，即当气象目标相对于雷达运动时，回波信号的频率会发生变化，通过测量频率变化可以确定气象目标的径向速度。通过对天线方位和仰角的控制，可以确定气象目标的方位和仰角信息。

1.3 发射分系统的工作方式

CC雷达的发射分系统采用主振放大设计。它通过接收机提供调制后的射频信号作为激励信号，射频发射脉冲是通过调制器控制射频功率放大器（速调管）形成的。具体过程为，首先由晶体振荡器产生稳定的单频连续波，然后通过一系列的信号处理，如分频、倍频以及波形整形等，得到所需的方波脉冲。这些方波脉冲用于对连续波进行调制，形成具有特定频率和脉冲宽度的射频信号。调制后的射频信号经过射频功率放大器放大，达到足够的功率后通过天馈线分系统发射出去。

1.4 脉冲相位关系的形成机制

CC雷达是全相参体制的脉冲多普勒天气雷达设备，其各脉冲之间具有确定的相位关系。这是因为所用的方波脉冲是由晶体振荡器信号通过各种转换后得到的，例如分频、倍频以及波形整形等。晶体振荡器产生的稳定单频连续波是整个系统的基准信号，经过一系列的信号处理后，得到的方波脉冲与基准信号之间具有固定的相位关系。在调制过程中，这些具有固定相位关系的方波脉冲对连续波进行调制，使得发射的射频脉冲之间也具有确定的相位关系。这种全相参体制使得雷达能够更准确地测量气象目标的速度等信息。

2 雷达故障实例分析

2.1 硬件故障概述

在新一代多普勒天气雷达的运行过程中，硬件故障是较为常见的问题，这些故障会对雷达的正常工作以及气象数据的精准性造成影响。硬件故障可能涉及到雷达的各个分系统，如天馈线分系统、发射分系统、接收分系统等。不同的硬件故障表现出不同的症状，需要通过对故障现象的详细分析和排查来确定故障的原因。

2.2 波导开关故障实例

在一次运行中，天气雷达标准输出控制器提示水平功率过低，同时雷达终端中的雷达状态的天馈系统出现告警信息，分别是充气机压力告警、发射/天线功率比告警、接收馈线损耗告警。业务人员现场进行了排查，注意到 LS - 40C 智能馈管充气机（即波导充气机）的显示灯在负载状态，进一步排查波导切换开关，发现波导切换开关加载处于负载状态，当进行加高压调试时，波导切换开关无切换动作反应。手动调至天线状态，重启雷达终端控制软件，并设置相关参数，选择体扫模式，启动后，经过一组完整体扫后，标准输出控制器不再发出报警信息，同时雷达终端的报警信息也停止，显示回波正常，雷达运转正常。通过排查可以判定此次故障是由于波导开关故障引起的，波导切换开关无法自动完成天线/负载的切换，导致此次故障的发生，经过业务人员的维修，雷达运行恢复正常。

2.3 冷却系统工作异常实例

新一代CINRAD/CC天气雷达出现的这次典型的发射系统故障，主要表现为：雷达标准输出控制器上显示发射机和天线功率比值异常、水平相位噪声值超出阈值范围以及水平天线峰值功率超出阈值范围，此外雷达终端提示调制器中可控硅告警、KLY 温度异常、KLY 发射功率故障，综合气象观测业务运行信息化平台显示“状态告警，数据可信”，雷达终端的高压自动关闭，且无法正常加高压。业务人员首先关闭终端的低压和冷却，然后重新启动终端软件系统，同时确保高压在“准加”状态，接着查看雷达的状态，单雷达仍未显示发射功率，且无法加载高压，于是启动复位键，复位后可以正常加高压。然而，雷达正常运行时间较短，随后又会出现高压自动关闭的现象。根据雷达标准输出控制器及雷达终端的告警提示，可能是由于散热问题导致的。到雷达现场查看后，发现冷却系统无法正常工作，对冷却装置进行了清洁和维护。重启雷达终端软件，可正常加载高压，将相关参数等设置好后，雷达能够正常运转，再未出现过高压自动关闭的情况。因此，可以确定此次

故障是由冷却系统引发的。经过这些处理步骤，系统恢复正常运行。

2.4 汇流环故障实例

在雷达运行期间，CINRAD/CC 雷达的伺服系统出现了问题，故障表现为天线停止扫描，终端显示异常。经过检查，发现是由汇流环故障引起的。汇流环是连接伺服机柜中驱动器和俯仰 R/D 变换板与天线转台中的俯仰电机及旋转变压器的特殊器件，此次故障中，伺服驱动器的数码管上显示“Err - 21”错误代码，意味着电机与驱动器通信故障。业务人员确定了故障的原因后，决定更换汇流环。更换完成后，对伺服系统进行了测试，天线能够正常运行，终端显示恢复正常，故障得以解决。通过此次故障案例可以看出，汇流环作为伺服系统中的重要组件，其稳定性和可靠性对雷达的正常运转有着至关重要的作用。

2.5 监控面板故障实例

在日常的雷达维护后，业务人员远程控制时发现远程控制功能失效，当发出调整雷达扫描范围或切换工作模式的指令时，雷达没有任何反应。但是雷达相关的状态指示灯显示正常。经全面排查网络连接、雷达设备本身等环节，均未发现异常，最终确定问题可能出在监控面板的控制电路或软件设置上。对监控面板进行了详细的检查和调试，发现是软件参数设置出现了错误。重新设置参数后，远程控制功能恢复正常，雷达可以正常接收和执行远程指令。

3 故障智能诊断技术需求分析

3.1 传统故障排查方法的局限性

传统的雷达故障排查方法主要依赖人工经验和简单的测试设备，存在诸多局限性。首先，人工排查效率低下，需要技术人员花费大量的时间和精力对雷达的各个部件进行逐一检查，尤其是在面对复杂故障时，排查过程可能会非常漫长。其次，人工排查的准确性受技术人员的经验和技能水平影响较大，不同的技术人员可能会得出不同的排查结果，导致故障诊断的可靠性不高。

3.2 智能诊断技术对提高故障排查效率的作用

故障智能诊断技术能够显著提高故障排查效率。通过数据采集系统实时采集雷达各部分的运行数据，利用数据分析算法对这些数据进行处理和分析，可以快速准确地定位故障点。智能诊断系统可以自动对采集到的数据进行比对和分析，与预先设定的正常运行参数进行比较，一旦发现数据异常，就可以及时发出预警，并提供

可能的故障原因和解决方案。这样，技术人员可以直接根据智能诊断系统的提示进行维修，大大缩短了故障排查的时间。

3.3 智能诊断技术对保障雷达稳定运行的意义

智能诊断技术对于保障雷达稳定运行具有重要意义。它可以实时监测雷达的运行状态，及时发现潜在的故障隐患，并提前采取措施进行处理，避免故障的发生和扩大。通过对雷达运行数据的长期分析，智能诊断系统还可以预测雷达部件的使用寿命，为设备的维护和更换提供科学依据。

4 故障智能诊断技术的构建思路

4.1 数据采集与处理

数据采集是故障智能诊断的基础。需要在雷达的各个关键部位安装传感器，实时采集雷达的运行数据，如温度、压力、功率、电流、电压等。采集到的数据可能存在噪声和误差，需要进行预处理。预处理包括数据清洗、滤波、归一化等操作，以去除噪声和异常值，提高数据的质量。同时，还可以对数据进行特征提取，提取出能够反映雷达运行状态的特征参数，如均值、方差、峰值等，为后续的故障诊断提供更有效的数据支持。

4.2 故障特征提取方法

故障特征提取是故障诊断的关键环节。可以采用多种方法进行故障特征提取，如时域分析、频域分析、时频分析等。时域分析方法主要通过分析信号在时间域上的特征，如均值、方差、峰值等，来判断雷达的运行状态。频域分析方法则将信号转换到频域，分析信号的频率成分，找出与故障相关的频率特征。时频分析方法结合了时域和频域的特点，能够更全面地分析信号的特征，适用于处理非平稳信号。此外，还可以采用机器学习算法进行特征提取，如主成分分析（PCA）、独立成分分析（ICA）等，这些算法可以自动提取数据中的主要特征，减少数据的维度，提高故障诊断的效率。

4.3 智能诊断模型的选择与建立

智能诊断模型的选择和建立是故障智能诊断的核心。可以选择多种智能诊断模型，如神经网络、支持向量机、决策树等。神经网络具有强大的非线性映射能力和自学习能力，能够处理复杂的故障模式。支持向量机在处理小样本数据时具有较好的性能，能够有效地避免过拟合问题。决策树模型具有直观、易于理解的特点，能够快速地对故障进行分类和诊断。在建立智能诊断模

型时，需要使用大量的历史故障数据进行训练，调整模型的参数，使模型能够准确地识别不同类型的故障。同时，还需要对模型进行评估和验证，确保模型的可靠性和准确性。

4.4 诊断结果的验证与优化

诊断结果的验证与优化是确保故障智能诊断技术有效性的重要步骤。在得到诊断结果后，需要对其进行验证，可以通过实际的故障案例对诊断结果进行检验，看诊断结果是否准确。如果诊断结果不准确，需要对智能诊断模型进行优化。优化的方法包括调整模型的参数、增加训练数据、改进特征提取方法等。通过不断地验证和优化，提高智能诊断模型的性能和可靠性，使其能够更好地应用于雷达故障诊断。

5 结语

本研究对C波段多普勒天气雷达系统的组成、原理、故障实例进行了详细分析，并深入探讨了故障智能诊断技术的需求和构建思路。研究结果表明，智能诊断技术能够有效提高雷达故障排查效率，保障雷达的稳定运行。通过数据采集与处理、故障特征提取、智能诊断模型的建立和优化等步骤，可以构建出高效、准确的故障智能诊断系统。未来的研究可以进一步优化智能诊断模型，提高其对复杂故障的诊断能力。同时，可以探索多源数据融合的方法，结合气象数据、环境数据等，提高故障诊断的准确性和可靠性。此外，还可以加强智能诊断技术与雷达系统的集成，实现故障诊断的自动化和智能化，为大气探测提供更有力的技术支持。

参考文献

- [1] 金毅仁, 陈锴, 金山, 等. 某型C波段多普勒天气雷达频率源设计[J]. 长江信息通信, 2023, 36(01): 12-15.
- [2] 寇蕾蕾, 李应超, 楚志刚, 等. C波段双偏振多普勒天气雷达资料分析及在定量估计降水中的应用研究[J]. 热带气象学报, 2018, 34(04): 460-471.
- [3] 赵利明, 罗斌, 张杰丹, 等. 气象多普勒天气雷达保障中小型机场飞行安全可行性分析[J]. 科学技术创新, 2018, (15): 59-60.
- [4] 李屾. 基于C波段雷达发射机刚、软管调制器的研究与应用[D]. 安徽大学, 2012.
- [5] 高仲辉, 新一代C波段多普勒天气雷达CINRAD/CC. 安徽省, 中国电子科技集团公司第三十八研究所, 2004-01-01.