

# 基于自适应 LS-SVM 的雷达 T/R 组件 热管冷却故障诊断系统设计

吴国秋

(中国人民解放军 77156 部队 技术维护室, 宁夏回族自治区 吴忠 751102)

**摘要:** 传统雷达 T/R 组件热管冷却故障诊断系统受到表面振动信号干扰, 存在诊断精度较差的问题, 针对该问题, 提出了基于自适应 LS-SVM 的雷达 T/R 组件热管冷却故障诊断系统设计; 根据雷达 T/R 组件热管冷却工作原理, 设计该故障检测系统的结构和功能, 其中系统设备是由数字化收发芯片、VXI 总线多 DSP 并行处理模块、控制电路和故障诊断电路构成的, 通过数字化收发芯片, 产生相应脉冲压缩雷达信号, 采用 TMS302VC5409 型号芯片设计的 DSP 并行处理模型, 对缺少上拉电阻的中断输入口设置多个引脚, 将信号由电缆传送到驱动电路中, 达到雷达波束控制目的; 采用霍尔元件对电路进行诊断, 经过故障样本特征提取, 引用自适应加权 LS-SVM, 确定故障类型, 根据诊断流程, 完成故障诊断系统设计; 通过实验结果可知, 该系统最低诊断精度也可达到 92% 以上, 为雷达稳定运行提供支持。

**关键词:** 自适应 LS-SVM; 雷达 T/R 组件; 热管冷却; 故障诊断; 驱动电路

## Design of Fault Diagnosis System for Heat Pipe Cooling of Radar T/R Module Based on Adaptive LS-SVM

Guoqiu Wu

(Unit 77156, Technical maintenance department, Wuzhong 751102, China)

**Abstract:** The traditional radar T/R component heat pipe cooling fault diagnosis system is disturbed by surface vibration signals, and there is a problem of poor diagnostic accuracy. Aiming at this problem, the design of radar T/R component heat pipe cooling fault diagnosis system based on adaptive LS-SVM is proposed. According to the working principle of heat pipe cooling of radar T/R components, the structure and function of the fault detection system are designed. The system equipment is composed of digital transceiver chip, VXI bus multi-DSP parallel processing module, control circuit and fault diagnosis circuit. The chip generates the corresponding pulse compression radar signal, adopts the DSP parallel processing model designed by the TMS302VC5409 model chip, sets multiple pins for the interrupt input port lacking the pull-up resistor, and transmits the signal from the cable to the drive circuit to achieve the purpose of radar beam control. The Hall element is used to diagnose the circuit. After the fault sample feature extraction, the adaptive weighted LS-SVM is used to determine the fault type, and the fault diagnosis system is designed according to the diagnostic process. The experimental results show that the minimum diagnostic accuracy of the system can reach more than 92%, which provides support for stable operation of the radar.

**Keywords:** adaptive LS-SVM; radar T/R module; heat pipe cooling; fault diagnosis; driving circuit

## 0 引言

现代雷达技术快速发展, 设备综合战术性也不断提高, 系统也越来越复杂, 随之产生的故障概率也不断增加, 许多故障问题仅凭工作人员经验检测已经不能完成。雷达 T/R 组件在获取高发射率同时产生大量热损耗, 因此, 组件热管冷却故障诊断系统设计是雷达稳定运行的关键步骤<sup>[1]</sup>。目前雷达 T/R 组件热管是一种体积小、高效率传热的元件, 而冷却方法主要有强迫风冷、液冷和蒸发冷等, 由于雷达使用功率逐渐增大, 其发热密度也大大增加, 因此, T/R 组件冷却方式选择效率高的方向发展。随着雷达向高精度数控方向发展, 对于组件运行提出了越来越高的要求。影

响雷达 T/R 组件热管冷却故障因素较多, 如主轴系统热变形使主轴发热更为严重, 导致组件热管冷却效果较差。采用传统故障诊断系统能逐步引导用户对组件进行测试, 但执行效率较低, 为此设计了基于自适应 LS-SVM 的雷达 T/R 组件热管冷却故障诊断系统, 是一种比较理想的经济节能型诊断系统。

## 1 雷达 T/R 组件热管冷却工作原理

雷达 T/R 组件热管冷却是一种高效工作组件, 主要是由输液芯片和重力热管组成<sup>[2]</sup>。重力热管是由导热率较高的金属制作而成, 将其内部热管抽成真空, 并注入适量工作液, 再密封, 将其从下至上的加热, 内部工作液汽化, 形成蒸汽。蒸汽受到压力差影响, 向上端流动, 在上端受到冷却影响, 使蒸汽冷凝为液体形式, 经过重力作用再次流回加热端<sup>[3]</sup>。如此往复, 管内封存的工作液会经过加热

收稿日期:2019-01-28; 修回日期:2019-02-18。

作者简介:吴国秋(1982-),男,辽宁复县人,工程师,主要从事野战雷达方向的研究。

转化为气体，再经过冷却转换为液体进行相变循环。根据该工作原理，可设计成如图 1 所示的热管冷却系统。

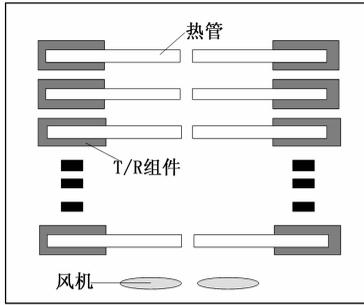


图 1 T/R 组件热管冷却系统

将加热阶段和冷却阶段设计成标准化形状和尺寸，使雷达 T/R 组件热管冷却系统内部的相变循环在温差较小的情况下，快速将热量从热管内传送到冷却阶段，进而得到冷却与温度均一化的效果<sup>[4]</sup>。

目前，最常用的雷达 T/R 组件功率放大器是由半导体器件实现的，将晶体管视为主要发热元件，可使单个脉冲能耗散功率达到 300W<sup>[5]</sup>。在雷达结构中，一旦该组件出现问题，那么每当晶体管温度上升 10 摄氏度时，可靠性就会降低 50%，因此对其进行故障诊断是具有必要性的。

## 2 基于自适应 LS-SVM 故障诊断系统设计

将系统分解成三个相对独立的层面，通过网络发布数据构建网络联系平面，系统总体架构是由故障数据采集处理层、诊断层和发布层组成的，其中故障数据采集处理层主要负责多数字信号处理器采集和特征提取总线嵌入式网络模块之间的数据通信，供故障诊断系统中硬件和软件的选择，能够保证整个系统更加可靠；诊断层是由远程监测和诊断为核心，在可视化操作平台上进行的，在远程设备监测神经中枢内分析软件包，通过图形化软件环境为信息集成提供环境。根据设备状态信息，按照不同用户个性化需求，动态显示设备运行状态；发布层是将现场采集到的设备数据实时、动态发布到网络上，用户可直接通过浏览器进行访问<sup>[6]</sup>。经过身份验证登录系统，并根据不同身份划分不同访问权限，对数据库进行修改与编辑<sup>[7]</sup>。

根据层次划分结果，充分考虑实际运行环境的便携性要求，使硬件结构设计能即插即用，实现数据高速传输。软件程序是在 Win8 系统平台上建立的，采用模块化设计理念，针对某个位置故障研发相应程序集。

### 2.1 故障诊断系统设备结构设计

故障诊断系统设备结构是由两部分组成的，分别是前端设备和后端设备<sup>[8]</sup>。其中前端设备是经过前置处理，再经过数字信号处理器将消息转换为模拟信号形式，再经过 A/D 转换，可从大量信号中快速提取故障特征；而后端设备主要负责内部模块与外部的通信，设备结构图设计如图 2 所示。

针对故障诊断系统各部件不同，采用基于自适应 LS-SVM

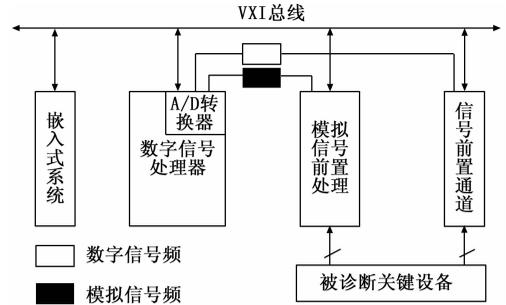


图 2 设备结构示意图

SVM 技术能够完成对大多数组件的诊断工作，内部设置 AC/DC 电压、电流以及二极管诊断功能，可在电路板卡部分使用具有 150 KHz 采样频率、32 K 字的 FIFO 存储器，通过 USB 缆线，可直接与计算机相连接，实现对整个电路的故障诊断<sup>[9]</sup>。

#### 2.1.1 数字化收发芯片设计

数字化收发芯片是由单片微波集成电路 MMIC 驱动、限幅器、射频收发和模数转换芯片组成的，为了提高芯片通用性，将链路滤波器外置，提高集成度<sup>[10]</sup>。采用有源变频方式对链路进行上下变频，并分别对雷达回波信号进行低噪放和一中下变频，而对二次激励信号进行一中上变频。接收中频输入的模数混合信号，同时根据信号带宽要求，产生相应脉冲压缩雷达信号。

#### 2.1.2 VXI 总线多 DSP 并行处理模块设计

VXI 总线具有即插即用功能，是实现网络接入的总线控制，主要由嵌入式硬件驱动、WINDOWS 操作系统、实时数据库组成的。多 DSP 器件中并行处理部分是由计算模块、VXI 总线模块和局部数据模块组成的，负责完成故障位置计算任务，该模块中包含多个 DSP 芯片电路，不同电路之间使用数据总线相连接，实现 DSP 模块和 VXI 总线间的时序转换。该模块结构框图如图 3 所示。

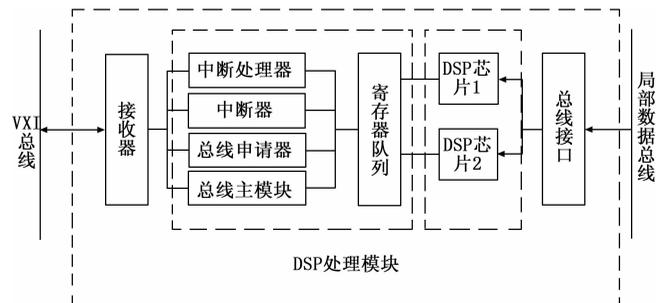


图 3 并行处理模块结构框图

采用 TMS302VC5409 型芯片设计的 DSP 并行处理模型，具有 64K 静态存储器供程序使用，内部设置的加载程序能够应用不同场合。对缺少上拉电阻的中断输入口设置 8 个引脚，分别是 INT1 外部中断 1 引脚、INT2 外部中断 2 引脚、INT3 外部中断 3 引脚、数据输入准备引脚、保持输入引脚、不可屏蔽中断引脚，防止干扰因素导致并行处理意外中断现象发生。

### 2.1.3 控制电路设计

在实际使用过程中,一旦雷达 T/R 组件出现故障,无需更换组件即可对故障进行检测,在不拆除 T/R 组件情况下隔离出故障组件,进而实现快速诊断。TR 组件一般是由供电电路、视频电路和控制电路组成的,信号在馈线网络端口集中发射,经过天线单元辐射到空间中;阵面所有 TR 组件处于接收状态,经过控制移相器移相,传送至馈线网络端口。

由于每个 TR 组件受限于系统控制,波控组合接收雷达传送过来波束,并指向代码、频率点和定时信号,先将数据指令转换成波控协议同步数据,再将该数据和定时信号通过电缆传送至阵面上波控组合中。通过计算移相控制码传送至驱动电路中,由驱动电路完成组合控制,最终实现雷达波束控制,为故障诊断提供约束环境。

### 2.1.4 故障诊断电路设计

故障诊断是对雷达 T/R 组件热管冷却异常情况作出判断,将诊断结果作为系统故障恢复的依据。在系统电路正常运行条件下,采用霍尔元件对电路进行诊断,如图 4 所示。

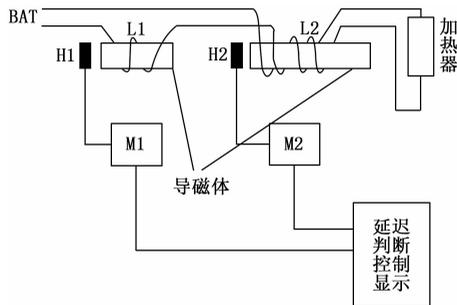


图 4 故障诊断电路设计

通过 L1 导磁体诊断雷达 T/R 组件热管冷却电流大小,能够实现过流和短路诊断;L2 导磁体在正常状态时,磁通量为 0,霍尔开关元件无输出,此时可以诊断单端对地短路和漏电所引发的冷却功能失效故障;L1 和 L2 导磁体不需要绕成线圈,因为霍尔开关元件输出属于自动输出,不适合使用模拟量进行诊断,通过调整两个导磁体不之间距离,实现灵敏度诊断。为了避免动作错误,需加入延迟滤波电路,由此完成故障诊断系统设备结构设计。

## 2.2 系统功能设计

系统功能设计是由 I/O 接口、驱动软件和开发环境这三个部分组成的,其中 I/O 接口和驱动软件是整个系统的低层软件,能够实现硬件之间的通信与控制;应用开发环境是用户自定义的开发工具,通过分层次模块化理念,可设计出不同功能子程序,进而完成大型复杂诊断任务。

由于雷达表面存在振动信号,在对其进行特征提取之前需先进行降噪预处理,去除部分噪声信号,以此提高 T/R 组件热管冷却信号的信噪比。采用自适应 LS-SVM 童趣故障特征向量:(1)对降噪后信号进行分解,并从低频到高频频率成分中提取信号特征;(2)对分解系数重构,提

取各个频带范围信号;(3)求解频带信号总耗能;(4)构造新能量,以此作为故障样本特征。

根据故障样本特征构建故障诊断模型,在非线性情况下建立回归函数,用回归函数来估计训练样本集。将原始空间映射到一个高维 Hilbert 特征空间,引用自适应加权 LS-SVM,根据该误差变量,选择权系数,以此权衡训练误差变量。

引入拉格朗日函数,求解该问题:

$$R(w, s, k) = J(w, k) - \sum_{i=1}^n \lambda_i \{w^T \beta(x_i) + s + k_i - y_i\} \quad (1)$$

公式(1)中: $w, s, k$  分别表示权向量、偏差量、误差变量; $J(w, k)$  表示函数泛化能力; $x_i, y_i$  表示训练样本集; $\beta_i$  表示格朗日乘子。

为了达到最优解,需在极值点对  $w, s, k, \beta_i$  求偏导并令其等于零,如果矩阵是可逆的,可求出偏差量和格朗日乘子,由此得到加权 LS-SVM 回归函数。

根据加权 LS-SVM 回归函数,对故障类型进行分类,具体步骤如下所示。

步骤一:采集雷达信号,并输入待测电路之中,提取相关数据,建立样本集;

步骤二:确定雷达 T/R 组件故障诊断模型,求解拉格朗日乘子,在加权自适应 LS-SVM 回归函数中,训练多个样本,并按照大小进行排列,将较小的训练样本去除,再次使用 LS-SVM 进行训练,并排列,直到用泛化能力达到最低为止;

步骤三:训练样本,并得到拉格朗日乘子,构建最优决策超平面,求出样本决策输出值,并进行判断分类,确定故障类型。

经过两个周期数据采样,可将差分传输线正负端交换,这样两次周期采样方向是完全相反的,如果相反,则说明数据接收正常,T/R 组件无故障问题出现;反之,则说明 T/R 组件异常。根据故障类型,设计故障诊断具体实现流程,如下所示:

- ①系统初始化;
  - ②电压与射频信号检测;
  - ③验证信号是否正常?如果是,则需自行检查命令。如果不是,则说明诊断不通过显示故障代码;
  - ④验证 ID 号是否显示?如果显示,则需控制线测试命令。如果不是,则说明诊断不通过显示故障代码;
  - ⑤根据步骤④,录取交叉前后控制字;
  - ⑥查看控制字是否反相?如果是,则诊断通过组件的功能是否正常。如果不是,则说明诊断不通过显示故障代码;
  - ⑦继续工作,重复上述步骤。
- 依据该流程,实现雷达 T/R 组件热管冷却故障诊断。

## 3 测试验证

为验证基于自适应 LS-SVM 的雷达 T/R 组件热管冷却故障诊断系统设计的有效性,通过 MATLAB 软件仿真模

拟各种故障类型，对比分析提出的自适应 LS-SVM 系统与传统系统性能。

### 3.1 数据说明

T/R 组件热管冷却最常出现的故障是射频信号无输出或有输出，但输出结果不正确，表 1 所示 T/R 组件信号输入输出说明。

表 1 振动加速度传感器的主要参数

名称	输入输出种类	信号特征
激励信号	输入	激励信号组件发射大功率辐射信号
接收信号	输入	接收回波信号
发送信号	输出	对外发送辐射信号
控制信号	输入	时序控制信号
电源信号	输入/输出	异步串口

通过分析 T/R 组件输入输出信号判断热管冷却是否出现故障。

### 3.2 测试结果与分析

为了验证故障诊断系统设计有效性，需先对雷达 T/R 组件热管冷却情况进行分析。

#### 3.2.1 冷却效果测试与分析

在不同风速下，对热源温度随功率变化情况展开分析，结果如图 5 所示。

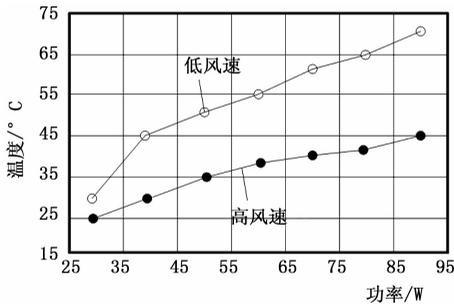


图 5 不同风速下热源温度随功率变化情况

由图 5 可知：在不同功率下，热管具有不同温度控制效果，在风速较强情况下，热源温度控制效果明显好于低风速下控制效果。

#### 3.2.2 导热系数变化规律

根据晶体管的耗散功率范围，模拟 T/R 组件功率，在风速较强情况下，对热源、蒸发段、冷凝段温度进行分析，结果如图 6 所示。

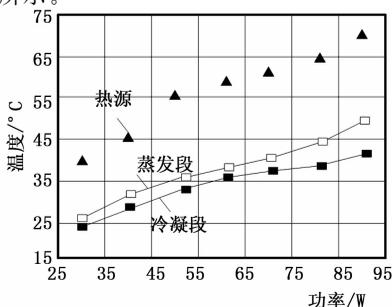


图 6 热源、蒸发段、冷凝段温度

随着加热功率不断增加，热源、蒸发段、冷凝段温度也在不断升高，但由于风速较大，蒸发段和冷凝段温度出现差异。

在该数据支持下，将自适应 LS-SVM 系统与传统系统对雷达 T/R 组件热管冷却故障诊断精度进行对比分析，结果如表 2 所示。

表 2 2 种系统故障诊断精度

样本	传统系统			传统系统		
	位置 1	位置 2	位置 3	位置 1	位置 2	位置 3
1	0.4582	0.4321	0.5529	0.9542	0.9217	0.9673
2	0.4152	0.3987	0.5541	0.9637	0.9820	0.9579
3	0.4578	0.3857	0.5238	0.9524	0.9719	0.9421
4	0.4612	0.3564	0.4982	0.9617	0.9358	0.9358
5	0.4005	0.3218	0.4853	0.9523	0.9489	0.9541

由表 2 可知：2 种系统故障诊断精度差别较大，在风速较强情况下，T/R 组件热管冷却蒸发段和冷凝段温度出现差异，采用传统故障诊断系统对该故障情况诊断精度较差，而自适应 LS-SVM 系统对该故障情况诊断较好。在 1 样本下，自适应 LS-SVM 系统位置 1 比传统系统位置 1 的故障诊断精度高出 0.4960；自适应 LS-SVM 系统位置 2 比传统系统位置 2 故障诊断精度高 0.4896；自适应 LS-SVM 系统位置 3 比传统系统位置 3 故障诊断精度高 0.4144。同样，在 2 样本下，自适应 LS-SVM 系统位置 1、2、3 比传统系统位置 1、2、3 故障诊断精度依次高 0.5485、0.5833、0.4038；在 3 样本下，自适应 LS-SVM 系统位置 1、2、3 比传统系统位置 1、2、3 故障诊断精度依次高 0.4946、0.5865、0.4183；在 4 样本下，自适应 LS-SVM 系统位置 1、2、3 比传统系统位置 1、2、3 故障诊断精度依次高 0.5005、0.4746、0.4376；在 5 样本下，自适应 LS-SVM 系统位置 1、2、3 比传统系统位置 1、2、3 故障诊断精度依次高 0.5518、0.6271、0.4688。

### 3.3 实验结论

通过实验数据分析可知，T/R 组件热管冷却容易出现故障是在风速较强情况下，蒸发段和冷凝段温度出现较大差异导致的，将 2 种系统对此情况进行诊断，由对比结果可知，自适应 LS-SVM 系统比传统系统诊断精度要好，且最高诊断精度可达到 0.9820，最低也可达到 0.9217，因此，基于自适应 LS-SVM 的雷达 T/R 组件热管冷却故障诊断系统设计是有效的。

## 4 结束语

设计的自适应 LS-SVM 的雷达 T/R 组件热管冷却故障诊断系统具有通用性强、使用方便、安全性高特点，不同功能下的适配器能够与测试模块相结合，使故障、隔离检测能够在同一平台上实现。而所有功能模块在安装过程中，可借助辅助拔插结构完成，设计有导向孔避免装置误配，使操作者方便拔插。设计高效诊断系统不仅可以用于雷