

文章编号: 1671-6612 (2019) 05-457-05

机载制冷系统故障诊断及可视化软件的研究

刘湘婉¹ 孙程斌¹ 蒋彦龙¹ 郑文远² 高赞军²

(1. 南京航空航天大学航空宇航学院 南京 210016;

2. 航空机电系统综合航空科技重点实验室 南京 211106)

【摘要】 目前,在机载蒸发循环制冷系统故障诊断的可视化软件方面,国内外相关的研究较少。建立了一种基于 PSO-SVM 的机载蒸发循环制冷系统故障诊断模型,利用 PSO 算法对 SVM 模型的参数进行优化,以提高模型的诊断精度。为了便于机组人员实时监测系统的运行状况,使用 MATLAB 中的 GUI 模块对所构建的故障诊断模型进行了可视化界面设计。该软件可用于训练和测试故障诊断模型,并诊断用户输入的系统运行数据。经过验证表明,该软件运行可靠、诊断结果准确。

【关键词】 MATLAB GUI; 制冷系统故障诊断; PSO-SVM; 可视化; 界面设计

中图分类号 TP391.5 文献标识码 A

Research on Fault Diagnosis and Visualization Software of Airborne Refrigeration System

Liu Xiangwan¹ Sun Chengbin¹ Jiang Yanlong¹ Zheng Wenyan² Gao Zhanjun²

(1. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, 210016;

2. Aviation Key Laboratory of Science and Technology on Aero Electromechanical System Integration, Nanjing, 211106)

【Abstract】 At present, there are few related researches at home and abroad on the visualization software for fault diagnosis of airborne evaporation cycle refrigeration systems. In this paper, a fault diagnosis model of airborne evaporative cycle refrigeration system based on PSO-SVM is established. The PSO algorithm is used to optimize the parameters of SVM model to improve the diagnostic accuracy. In order to help the crew to monitor the operation conditions of the system in real time, we use the GUI module in MATLAB to design the visualized interface of the fault diagnosis model in this paper. The software can be used to train and test fault diagnosis models and to diagnose operational data entered by users. The verification results indicates that the software runs reliably and the diagnosis results are accurate.

【Keywords】 MATLAB GUI; Fault diagnosis of refrigeration systems; PSO-SVM; Visualization; Interface design

0 引言

随着航空工业技术的发展和民航客机的现代化、大型化,飞机环境控制系统的地位逐渐提升,飞机环境控制系统的设备更加完善。大功率高集成电子电器设备的增加在提高了飞机的整体性和作战能力的同时,也给飞机带来了巨大的热负荷^[1]。因此,飞行器的环境控制要求也在不断增加。然而,

在机载蒸发循环制冷系统的运行期间,系统难免会产生一些故障。若不能及时发现并消除这些故障,势必会导致严重的后果。因此,机载蒸发循环制冷系统的故障诊断和排查直接影响着系统的可靠性和安全性。MATLAB 软件具有强大的计算功能和可视化的 GUI 模块。利用 MATLAB 中的 GUI 模块可以简单、便捷地设计出美观、方便的菜单化和控

基金项目: 南京航空航天大学航空科学基金 (20162852026)

作者简介: 刘湘婉 (1994-), 女, 在读硕士研究生, E-mail: liuxiangwan@163.com

通讯作者: 蒋彦龙 (1977-), 男, 教授, 博士生导师, E-mail: jiang-yanlong@nuaa.edu.cn

收稿日期: 2018-12-03

件式的人机交互界面。

本研究旨在设计出能够直观地显示出机载蒸发循环制冷系统故障类型的软件,为机组相关工作人员提供清晰、明确的参考依据。

1 机载蒸发循环制冷系统故障诊断模型的构建

支持向量机 (support vector machines, SVM) 基于结构风险最小化原则和统计学习的相关理论,由 Vapnik 在上个世纪六十年代首次提出,并且在近些年成为一个广受关注和研究的领域。SVM 在解决以非线性、高维度、局部最小以及小样本为特征的复杂实际问题有着很大的优势^[2]。但是对于 SVM 模型的参数的选择问题,仍然缺乏足够的理论指导。在样本分类的过程中,人为确定的 SVM 参数不一定是最优参数,并且人工选择效率较低。而参数的选择将对 SVM 模型的泛化能力和分类精度产生直接的影响。粒子群算法 (particle swarm optimization, PSO) 是由 Etherhart 和 Kennedy 从鸟群觅食这一现象得到灵感,从而提出的一种优化算法。该算法在分类精度、参数选取等方面有着很大的优势^[3]。

为了提高故障诊断的精度,本文提出了一种基于 PSO-SVM 算法的机载蒸发循环制冷系统故障诊断模型。

1.1 SVM 原理^[4-7]

SVM 的原理是寻找一个能够达到分类要求的最优分类超平面,使得该超平面能够最大化两侧的间隔,同时保证分类精度。间隔最大化的含义是:超平面距离两侧数据点的“间隔”越大,分类效果越好。这样的超平面具有良好的泛化能力,不仅可以划分样本点,而且可以尽可能地将最接近超平面的点分开。

以二级分类为例,对于特定的训练样本集 (x_i, y_i) , $i=1, 2, \dots, m$, $x \in R^n$, $y \in \pm 1$, 最优超平面由 $(w \cdot x) + b = 0$ 确定。为了使超平面能准确分类所有样本,并且具有一定的分类间隔,需要满足以下条件: $y_i(w \cdot x) + b \geq 1$, $i=1, 2, \dots, L$ 。由此即可得出分类间隔为 $2/\|w\|$ 。因此,最优超平面的选择问题转化为了求约束式:

$$\min \varphi(w) = \frac{1}{2} \|w\|^2 = \frac{1}{2} \|w', w\| \quad (1)$$

为了解决该约束最优化的问题,引入 Lagrange 函数:

$$L(w, a, b) = \frac{1}{2} \|w\|^2 - a(y((w \cdot x) + b) - 1), 0 \leq a \leq C \quad (2)$$

式 (2) 中, a 为 Lagrange 乘数, C 为惩罚系数。经过对偶求解后,可以获得最优分类函数,如式 (3) 所示:

$$f(x) = \text{sgn}\{(w^* \cdot x) + b^*\} = \text{sgn} \sum_{j=1}^l [a_j^* y_j (x_i x_j) + b^*], x \in R^n \quad (3)$$

SVM 的核心步骤为:利用核函数将非线性不可分类的样本向量映射到一个高维特征空间中,将其转变为线性可分的向量,然后在该高维特征空间中找到最优分类超平面。因此,我们只需要用映射函数 $K(x)$ 替换 x , 即可得到新的最优分类函数。

1.2 PSO 优化 SVM 的方法^[8-10]

PSO 算法的本质是通过群体中最优个体间的信息传递和信息共享来寻求最优解。粒子更新公式如下:

$$v_{ij}(t+1) = \omega v_{ij}(t) + c_1 r_{1j}(t)(p_{ij}(t) - X_{ij}(t)) + c_2 r_{2j}(t)(p_{gj}(t) - X_{ij}(t)) \quad (4)$$

$$X_{ij}(t+1) = X_{ij}(t) + v_{ij}(t+1) \quad (5)$$

式中, $i=1, 2, \dots, m$, m 是该群体中粒子的总数; ω 为惯性权重; t 是算法当前迭代次数; $v_{ij}(t)$ 表示第 t 次迭代后粒子 i 在 j 维的空间速度; c_1 和 c_2 为学习因子; r_{1j} 和 r_{2j} 是 $[0, 1]$ 之间任意变化的随机函数; $p_{ij}(t)$ 为粒子 i 的历史最优解的 j 维值; $p_{gj}(t)$ 是所有粒子在第 t 次迭代后的历史最优解 (群体最优) 的 j 维值; $X_{ij}(t)$ 为第 t 次迭代后粒子 i 在 j 维空间的位置。

本文利用粒子群优化算法局部和全局的搜索能力,对 SVM 模型的参数 (误差惩罚参数 C 和高斯核参数 σ) 来进行优化,并且以训练集的分类精度为适应度函数来进行 PSO 参数调整。选取两个粒子定义为 C 和 σ , 具体优化步骤如下:

(1) 初始化粒子群,随机生成粒子的位置和速度。初始化 SVM 模型的参数;

(2) 采用交叉验证 (Cross Validation, CV) 的方法,结合系统故障样本,训练 SVM 分类器并计算适应度值;

(3) 根据适应度值更新 P_{best} 和 G_{best} ;

(4) 根据公式 (4)、(5) 更新当前粒子的位置和速度;

(5) 当满足适应度值条件或达到迭代次数时, 终止迭代; 否则返回步骤 (2) 继续进行优化。

PSO 优化 SVM 的流程如图 1 所示。

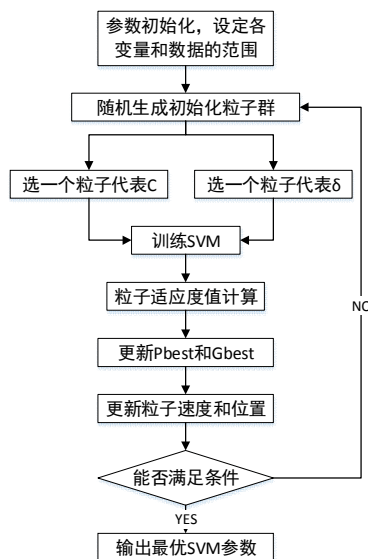


图 1 PSO 优化 SVM 流程

Fig.1 Process of optimizing SVM by PSO

2 机载蒸发循环制冷系统可视化软件的设计

2.1 设计原则

作为一款应用于机载设备的人机交互软件, 最重要的一点就是要便于使用。因此, 所设计的界面应该符合以下要求: 简洁性, 可靠性, 交互性^[1]。

(1) 简洁性

软件界面应当争取做到简单明了, 使用户能快速了解使用方法, 无需太多的学习时间成本。软件设计应旨在提高工作效率并降低用户输入频率。

(2) 可靠性

可靠性意为软件应在用户使用期间保持稳定。因此在设计软件时, 应采用各种方法和技术, 使软件在满足用户需求的同时, 保证运行的稳定性。

(3) 交互性

交互性是指软件界面处处体现为用户考虑的主旨。在设计软件时应当充分考虑用户的操作感受, 并不断思考怎样才能更好地服务用户。

2.2 设计思路

(1) 确定软件需要实现的具体功能, 并整理

相应的模块。

(2) 根据确定好的模块, 绘制用户界面草图, 并对其进行调整和修改以确定最终方案。

(3) 根据最终方案, 使用 MATLAB GUI 为每个模块创建人机交互界面和回调程序, 并依次进行功能检测。

2.3 窗口界面的实现

在 MATLAB 中点击新建, 选择图形用户界面, 即可新建 GUI 或选择现有 GUI。新建 GUI 界面可以选择空白界面 (Blank GUI)、包含有控件的模板界面 (GUI with Uicontrols)、包含有轴对象和菜单的模板界面 (GUI with Axes and Menu)、标准询问窗口 (Modal Question Dialog) 等选项。

打开 GUI Design Workbench, 可以在此设计或修改界面的静态组件。设计界面如图 2 所示。

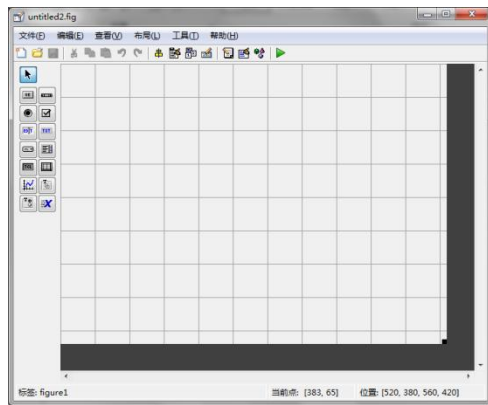


图 2 设计界面

Fig.2 Interface for design

2.4 主要模块设计

本文所设计的软件主要分成两大模块: 模型训练模块和故障诊断模块。软件的用户界面如图 3 所示。



图 3 用户界面

Fig.3 User interface

(1) 模型训练模块

该模块用于训练和测试两种分类模型。其中,“训练”按钮用于对分类模型进行训练,“测试”按钮用于测试训练后模型的分类正确率。右侧列表框用于显示模型训练进程以及测试结果。

(2) 故障诊断模块

该模块用于诊断用户输入的系统运行数据。其下设 5 个子模块:蒸发温度输入模块,冷凝温度输入模块,压缩机吸气温度输入模块,压缩机排气温度输入模块,制冷剂过冷度输入模块。“诊断”按钮用于启动诊断程序,列表框用于显示诊断结果。“退出”按钮用于清空软件运行参数并关闭软件界面。

3 机载蒸发循环制冷系统可视化软件的应用

软件的主要使用步骤为:第一步,用户选择对模型的训练方式;第二步,点击“训练”按钮,对所选模型进行训练;第三步,待右侧列表框显示该模型训练结束后,点击“测试”按钮,对训练完成的模型进行测试,训练后模型的分类正确率将显示在列表框中;第四步,用户输入待诊断的运行数据;第五步,点击“诊断”按钮,软件将使用用户选择的训练方式进行故障诊断,诊断结束后按钮下方列表框显示诊断结果。用户使用结束后,点击“退出”按钮,即可退出软件。

例如,选择 SVM 的训练方式,训练结束之后点击“测试”按钮,右侧列表框显示模型分类正确率为 86.5%。而在 PSO-SVM 模型下训练后,测试结果表明模型分类精度为 93.5%。两种模型测试结

果如图 4 所示。由此结果可以看出,使用 PSO 优化 SVM 模型可以大大提高模型分类的正确率。

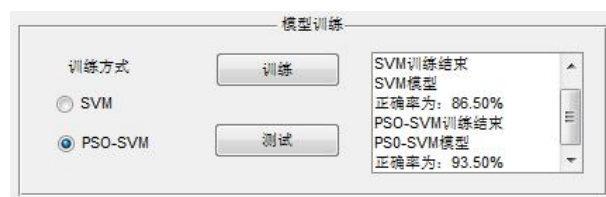


图 4 模型测试结果

Fig.4 Results of model test

在 PSO-SVM 模型下,依次输入系统运行某一时刻的蒸发温度,冷凝温度,压缩机吸气温度,压缩机排气温度,制冷剂过冷度数据,点击“诊断”按钮即可诊断出系统此时的运行状态。例如,当输入蒸发温度 -14.3°C ,冷凝温度 24.6°C ,压缩机吸气温度 -17.4°C ,压缩机排气温度 58.7°C ,制冷剂过冷度 1.48°C 时,软件判断故障类型为冷凝器结垢,导致系统性能下降。诊断结果界面如图 5 所示。

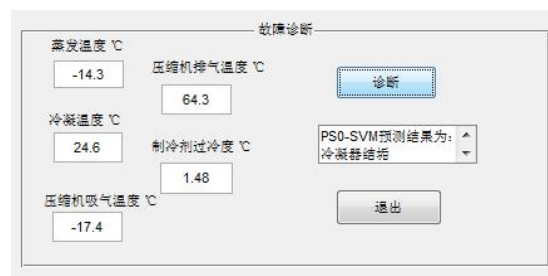


图 5 诊断结果界面

Fig.5 Interface of diagnostic result

随机抽取 10 组运行数据对软件进行验证。验证结果如表 1 所示。

表 1 10 组随机数据诊断结果验证

Table 1 Verification for the diagnostic results of 10 sets of random data

蒸发温度 $^{\circ}\text{C}$	冷凝温度 $^{\circ}\text{C}$	压缩机吸气温度 $^{\circ}\text{C}$	压缩机排气温度 $^{\circ}\text{C}$	制冷剂过冷度 $^{\circ}\text{C}$	实际故障类型	软件诊断结果
-14.3	25.3	-11.3	62.9	1.12	载冷水量不足	载冷水量不足
-19.8	24	-7.6	68	1.23	蒸发器结垢	蒸发器结垢
-14.7	24.6	-18.2	64.4	1.82	冷凝器结垢	冷凝器结垢
-14.4	25.6	-8.8	61	1.5	冷却水量不足	冷却水量不足
-14.6	25.2	-8.4	61.9	1.12	正常	正常
-13.6	27.4	-13.9	63.1	2.73	冷却塔风机故障	冷却塔风机故障
-13.5	25.2	-15.9	58.5	1.51	制冷剂泄漏	制冷剂泄漏
-14.3	25.1	-9.1	63.9	1.71	载冷水量不足	载冷水量不足
-14.3	25.2	-10.4	61.9	1.37	存在不凝气体	存在不凝气体
-14.4	25.6	-8.6	61	1.4	冷却水量不足	冷却水量不足

经过多组运行数据的验证,该软件基本能准确无误地诊断出系统的故障情况。同时,软件还能在用户操作不当时给出相应的提示。例如,若用户点击训练按钮时没有选择训练方式,则列表框提示“未选择训练方式”,如图 6 所示。若用户选择训练方式后直接点击测试按钮,则列表框提示“未训练”,如图 7 所示。若用户没有完整地输入运行数据就点击诊断按钮,则列表框提示“诊断条件不足”,如图 8 所示。这些设计使用户可以准确发现操作上的问题,并及时予以调整,大大提升了用户的使用感。



图 6 未选择训练方式

Fig.6 No training method selected

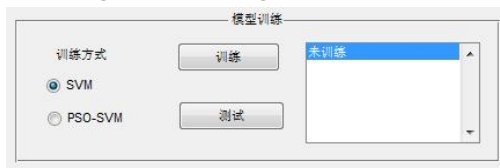


图 7 未训练

Fig.7 No training

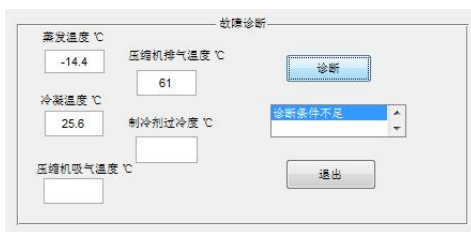


图 8 诊断条件不足

Fig.8 Insufficient precondition for diagnosis

4 结论

本文通过构建 PSO-SVM 模型对机载蒸发循环制冷系统进行故障诊断。研究表明, PSO 算法计算简单, 且能达到相当高的分类精度。利用 PSO 算法对 SVM 模型的参数进行优化后, 模型的故障诊断正确率可达到 93.5%, 相比 SVM 模型得到了显著的提升。在此基础上利用 MATLAB GUI 模块设计出了一款能够准确诊断系统故障类型的软件。该

软件可以对比 PSO 优化前后 SVM 模型的分类精度, 并对用户输入的工况数据进行故障诊断。经过多组运行数据的验证, 该软件基本能准确无误地诊断出系统的故障情况。这对机载蒸发循环制冷系统的故障诊断和排查有着十分重要的理论与实践意义。并且该软件的构建平台 MATLAB 在国内应用范围较广, 依据该平台编写的软件易学易用, 更便于对机载蒸发循环制冷系统的运行状况进行实时监测, 具有很强的应用前景。

参考文献:

- [1] 赵俊茹. 飞机环境控制系统的故障诊断研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2005.
- [2] Li H, Braun J. A Methodology for Diagnosing Multiple Simultaneous Faults in Vapor-Compression Air Conditioners[J]. HVAC&R Research, 2007,13(2):369-395.
- [3] ŠTIMAC Goranka BRAUT Sanjin ŽIGULIĆ Roberto. Comparative Analysis of PSO Algo-Rithms for PID Controller Tuning[J]. CHINESE JOURNAL OF MECHANICAL ENGINEERING, 2014,27(5):928-936.
- [4] 孙楷政, 胡云鹏, 陈焕新, 等. 基于 SVM 的不同故障程度下冷水机组故障诊断[J]. 制冷与空调, 2016,30(4): 377-381.
- [5] 丁世飞, 齐丙娟, 谭红艳. 支持向量机理论与算法研究综述[J]. 电子科技大学学报, 2011,(1):2-10.
- [6] 肖健华, 樊可清, 吴今培, 等. 应用于故障诊断的 SVM 理论研究[J]. 振动、测试与诊断, 2001,21(4):258-262.
- [7] 王红军, 徐小力, 张建民. 设备状态趋势的 SVM 预示技术研究[J]. 机械科学与技术, 2006,25(4):379-381.
- [8] 何园园, 张超, 朱腾飞. ELMD 熵特征融合与 PSO-SVM 在齿轮故障诊断中的应用[J/OL]. 机械科学与技术:1-6[2018-11-11]. <https://doi.org/10.13433/j.cnki.1003-8728.20180171>.
- [9] 邵信光, 杨慧中, 陈刚. 基于粒子群优化算法的支持向量机参数选择及其应用[J]. 控制理论与应用, 2006, (5):740-743.
- [10] 郑皓文, 赵根, 胡英国, 等. 基于 ACOR-LSSVM 算法的爆破振动速度预测[J]. 爆破, 2018,35(3):154-158.
- [11] 杨红刚, 郑敬霖, 梁开水, 等. 基于 Matlab GUI 的爆破粉尘可视化软件设计与实现[J]. 爆破, 2015,32(1):146-150.