

引用格式: 冯晴晨, 李晓燕. 南极天文光学望远镜智能化除霜方法[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(24): 132-138

Feng Qingchen, Li Xiaoyan. Intelligent defrosting method for Antarctic astronomical optical telescope[J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(24): 132-138

南极天文光学望远镜智能化除霜方法

冯晴晨^{1,2,3} 李晓燕^{1,2*}

(中国科学院国家天文台南京天文光学技术研究所¹, 中国科学院天文光学技术重点实验室², 南京 210042; 中国科学院大学³, 北京 100049)

摘要 南极 Dome A(冰穹 A) 因其优良的观测条件被誉为地球上最好的天文观测台址之一。Dome A 温度常年处于 -30 ~ -80 °C 相对湿度 40% ~ 80% 温度起伏大 望远镜镜面易结霜 影响天文观测的效率和质量。为实现无人值守的智能化镜面除霜、减少除霜对观测时间的占用、降低除霜对镜面视宁度的影响、减少除霜对能源的消耗, 提出了智能化除霜方法。首先, 分析环境、科学数据、仪器三者的关系, 利用外部输入非线性自回归 (nonlinear auto regressive models with exogenous input, NARX) 时间序列神经网络构建望远镜镜面状态的预测模型; 其次, 设计南极望远镜智能化除霜仿真系统, 实时预测镜面情况, 根据预测结果模拟采取相应的应对措施。结果表明该方法能有效实现智能化除霜, 减少了人为干预, 节约了观测时间, 提高了望远镜运行的可靠性。

关键词 南极天文光学望远镜 镜面除霜 智能预测 非线性自回归 (NARX) 神经网络

中图分类号 TH751; **文献标志码** A

在南极架设的光学望远镜^[1] 进行天文观测时有一块或以上的光学镜面暴露在外部环境中, 镜面附着的霜或雪影响镜面的透光率或反射率, 大大降低了望远镜的分辨率和成像质量。Dome A(冰穹 A) 晴天多, 温度起伏大, 镜面的结霜情况普遍, 如不进行除霜, 仅能在数小时内保持镜面无霜。而大风及降雪天气在夜天文观测季的 6 个月左右时间内, 所占时间不足 15%, 且在该气象条件下, 望远镜通常会暂停观测。因此, 南极望远镜的除霜问题变得非常重要。

由于南极环境的特殊性, 无人值守的运行条件无法实现人在现场处理镜面的霜。南京天光所研制了多种除霜方法, 效果显著。但目前仍存在以下问题: ① 镜面加热膜除霜法会破坏镜面视宁度, 开启加热膜的时机及加热功率缺乏科学有效的方法; ② 目前的技术条件未能找到合适的传感器检测霜, 且在不影响天文观测的前提下安装在光学镜面上, 因此不能形成可以实时监测结霜情况的闭环控制; ③ 除霜设备缺乏智能化的管理, 还依赖人工进行远程监控和操作, 效率低下。目前的除霜方法并不能达到理想效果, 实现智能化除霜是迫切需要的。

为实现无人值守的智能化镜面除霜、减少除霜对观测时间的占用、降低除霜对镜面视宁度的影响、

减少除霜对能源的消耗, 现进行关于南极望远镜的智能化除霜方法的研究, 通过对运行数据、环境数据等的分析, 构建镜面状态预测模型, 实现对镜面结霜的智能化预测, 辅助除霜决策, 同时设计智能化除霜仿真系统, 包括望远镜镜面状态预测界面和模拟除霜界面, 根据预测模型的预测结果作出应对策略。智能化除霜方法将为镜面结霜的应对策略提供依据, 有利于望远镜运行维护的效率和运行的可靠性。

1 南极望远镜智能化除霜分析

1.1 智能预测及智能预测算法

构建望远镜镜面状态预测模型是南极望远镜智能化除霜方法的重要组成部分, 有效的镜面状态预测能够提高除霜决策的效率。近年来, 预测的研究和发展已经突破了早期研究的框架, 形成了自适应预测、鲁棒预测和智能预测等先进预测方法^[2]。智能预测主要针对一些传统预测方法难以预测的复杂对象^[3], 采用某种智能算法与相应的预测模型相结合构成的一类智能预测方法, 它可以处理非线性、多目标、约束条件等异常情况, 提高了预测效果^[2]。利用智能算法进行预测的核心是建立有效的预测模型, 其基础是分析归纳相关数据和预测目标的隐含关联, 这一过程被称为数据挖掘, 其常用的方法有传统的数理统计工具、模糊理论、神经网络、遗传算法等。

在参考文献 [4] 中给出了现有预测方法的优缺点对比, 表 1 对其中典型的预测方法做了简单概括。

2019年2月25日收到 国家自然科学基金项目(11403065, 11373052, 11190013)及973计划(CB834901)资助

第一作者简介: 冯晴晨, 硕士研究生。E-mail: 275318017@qq.com。

* 通信作者简介: 李晓燕, 博士, 副研究员。E-mail: xyli@niaot.ac.cn。

表 1 预测方法对比
Table 1 Comparison of prediction methods

序号	名称	概述	优点	缺点
1	传统数理统计工具	通过处理、分析历史数据,发现数据间相关性和变化规律,获得因变量与自变量之间的关联模型,进而建立预测模型	发展成熟、预测过程相对简单、便于使用	误差较大、对数据本身的规律性要求高、预测结果的准确度低
2	模糊理论	有效解决只有模糊概念没有确定性语义的模糊性问题	提高预测的确定性、精确度。能够处理复杂系统的时滞、时变及非线性问题	知识表达中不具有时间参数,使整个预测模型不具有实时控制的特性
3	神经网络	选取若干历史数据作为训练样本,构建适当的网络结构,利用训练函数训练样本,进而进行预测	动态自适应能力强、非线性映射能力强、鲁棒性强、预测精度高	网络结构构建较难、训练时间较长
4	遗传算法	检索最佳特征参数,转化信号特征参数的公式,将其变为遗传子,把特征参数及其组合方式用树图的方式展示,获得优化后的故障特征参数表达式,进而实现预测	预测精度较高、算法简单、鲁棒性强	局部搜索能力较弱、容易陷于局部最优、参数常以经验判断确定、难以找到最佳参数

通过对比以上预测方法之后发现,神经网络由于具有大规模并行处理、分布式存储等特点,使其具有较强的非线性映射能力,任意非线性函数都能逼近,现已成为预测方法中的主流方法。因此选取神经网络的预测方法来构建望远镜镜面状态的预测模型。

1.2 智能化除霜的研究基础

南极天文望远镜在数年的观测运行中,积累的数据有 3 类:天文图像的质量,包括半高全宽、椭率、消光、极限星;望远镜运行数据,包括跟踪精度、设备状态等;环境数据,包括气象数据及监测图像等。目前,这 3 方面数据仍是数据孤岛、分而治之,并未被有效整合和利用。望远镜运行的最终判别标准就是科学数据的产生及数据质量,它必然是环境与望远镜及终端仪器共同作用的结果,并且这些因素互相耦合。

神经网络方法对于处理非线性的问题具有一定的优势,将神经网络方法与南极天文望远镜智能化除霜方法相结合,能够更科学地归纳分析环境、科学数据、仪器三者的关系,进而实现镜面结霜状态的有效预测,将大大提高南极望远镜运行的可靠性,并减少远程监控工作人员的工作量,对于后续南极望远镜镜面结霜的应对策略的研究具有重要的意义。

1.3 智能化除霜技术路线

在图像质量的指标中,消光反映了天体发射的光线被途中的物质吸收和散射的状态。南极巡天望远镜 AST3 天文数据的消光主要贡献是大气消光和镜面结霜。参考文献 [5] 给出了大气消光的计算公式。因此,可先通过比对摄像头照片及气象信息,人工将晴夜数据挑选出来,则消光值基本可反映镜面结霜情况(消光越大,结霜越厚)。

图 1 和图 2 所示为某一天 24 h 内除霜后缓慢结霜引起的消光增长的过程及相应温度数据,反映了温度上升时,镜面结霜情况的变化过程。

由霜的形成机理可知,霜的形成决定于气象条件^[6]。因此,通过气象数据与消光等像质数据,建立气象信息与结霜的关系模型,结合摄像头监测图像的认识,进行结霜的预测和已结霜情况的判断。继而根据科学目标对极限星等、镜面视宁度等的需求,提供最经济最快速除霜方案的决策。

因此,智能化除霜方法将以气象环境数据为输入,预测消光值为输出,构建镜面状态的预测模型,同时设计南极望远镜智能化除霜仿真系统,实时预测镜面状态(消光值),根据预测结果采取相应的应对措施。

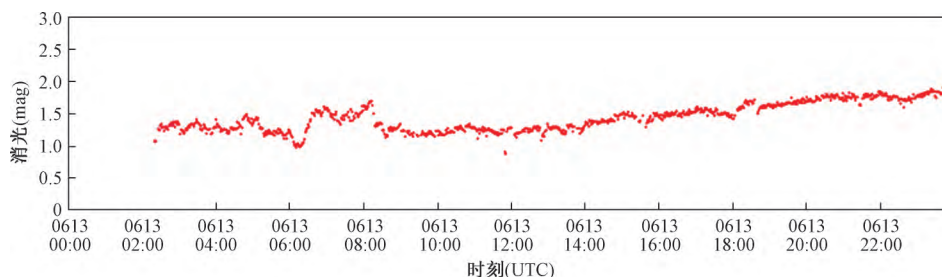


图 1 结霜引起的消光值增长过程

Fig. 1 Extinction value growth process caused by frosting

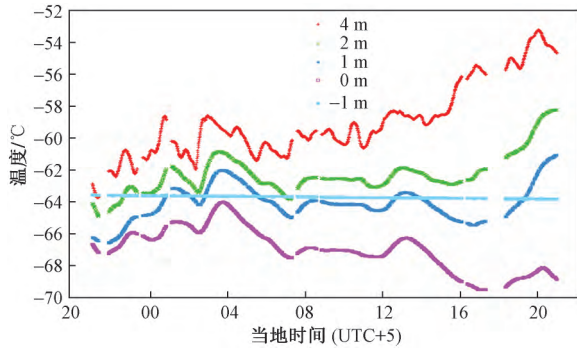


图2 温度数据

Fig. 2 Temperature data

2 智能化除霜预测模型

2.1 预测模型的选择及分析

常见的 MATLAB 动态神经网络时间序列预测模型有两种: 外部输入非线性自回归 (nonlinear auto regressive models with exogenous input, NARX) 时间序列预测模型和非线性自回归 (nonlinear auto regressive, NAR) 时间序列预测模型。它们都通过引入延迟模块及输出反馈建立模型的动态回归网络^[7] 将输出向量延时反馈引入网络训练中, 形成新的输入向量, 相较于 NAR 时间序列预测模型, NARX 模型的输入不仅包括前时刻的输出数据, 还包括前时刻的输入变量。图3给出了NARX神经网络的结构图^[8]。其中 $u(t)$ 为输入向量 $y(t)$ 为目标向量。训练后的输出数据又作为网络的输入数据, 使网络的泛化能力得到提高^[8]。

南极望远镜的镜面结霜过程在时间上是一个渐进的过程, 没有准确的描述模型, 具有非线性时间序列的特征。在选择预测模型时应考虑前时刻气象信息与镜面状态对当前镜面状态的影响, 因此, 选取 NARX 时间序列预测模型对镜面结霜状态进行预测。

2.2 数据样本的选择及分析

输入、输出数据的选择直接决定了预测模型的科学性和适用性^[8]。望远镜的运行状态是环境与望

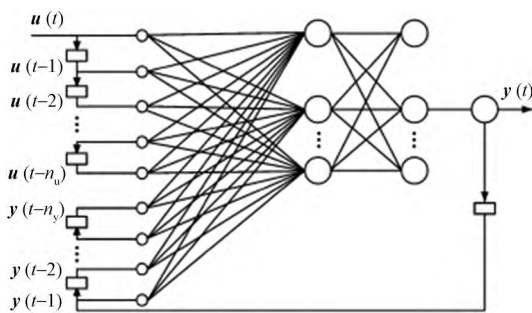


图3 NARX神经网络模型结构图

Fig. 3 NARX neural network model structure

远镜及终端仪器共同作用的结果, 结合南极光学望远镜镜面结霜现象的实际情况, 认为气象信息数据是影响镜面结霜的直接因素, 图像质量数据中的消光值基本可反映镜面情况。因此, 在南极望远镜镜面结霜预测模型中, 将气象信息数据作为输入参数, 将预测消光值作为输出目标。

目前, 南极天文望远镜积累的气象数据、图像质量数据和望远镜运行数据并没有得到有效的整合和利用。因此, 首先要将气象数据与消光等像质数据进行整合, 建立气象信息数据与结霜的关系模型, 通过整合 2016 年和 2017 年的气象数据和像质数据得到反映镜面状态的数据样本。根据积累的数据建立气象信息和对应消光值的关联数据模型, 数据形式如图4所示, 各数据说明如表2所示。

tempsub	temp00	temp02	temp04	ws02	ws04	rh	extinction
-59.4	-56.56	-56.32	-55.82	5.38	5.54	0.51	1.1
-59.4	-56.53	-56.32	-55.82	5.22	5.42	0.51	1.1

图4 关联数据

Fig. 4 Linked data

表2 关联模型数据说明

Table 2 Association model data description

数据名称	数据含义
time	时间
tempsub	温度(-1 m)
temp00	温度(0 m)
temp02	温度(2 m)
temp04	温度(4 m)
ws02	风速(2 m)
ws04	风速(4 m)
rh	相对湿度
extinction	消光值

2.3 预测模型的建立

利用 NARX 神经网络方法实现望远镜镜面状态的预测, 根据预测模型的目标要求, 设置神经网络的输入节点数为 8, 分别为 7 个气象信息特征量 $x(t)$ (温度、风速、湿度) 和 1 个消光值 y , 输出节点数为 1, 代表预测消光值输出量。结合经验选取延迟变量为 1:5, 神经网络的隐含层为 4, 因此神经网络的结构为 7 个气象信息特征量和 1 个消光值输出量作为输入层, 1 个预测消光值输出量作为输出层。具体神经网络结构如图5所示。

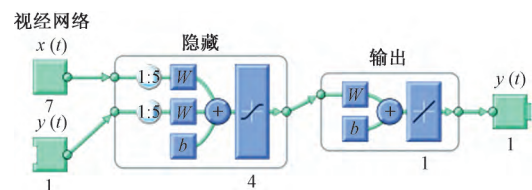


图5 预测模型神经网络结构

Fig. 5 Prediction model neural network structure

在神经网络的训练中,由于贝叶斯正则化算法具有良好的泛化性能、较高的网络拟合精度,因此选取训练函数为 trainbr 函数^[9]。利用整合得到的气象信息数据和图像质量数据中的消光值作为训练样本对神经网络进行训练,训练时把数据划分为训练数据、验证数据、测试数据 3 类,其数据比例分别为 80%、10%、10%。不断对神经网络进行训练、验证,直至得到较优的预测模型。

2.4 预测模型的测试和评价

2.4.1 预测模型的测试

为了评估镜面状态预测模型的性能,利用训练完成的预测模型对 2016 年某天的南极望远镜观测数据样本进行测试。图 6 为其预测结果和实际结果的对比图,图 7 为预测结果和实际结果之间的误差变化图。不难看出,预测结果和实际结果的数值非常接近,二者误差较小,因此,预测模型的预测准确度较高。

均方误差用来衡量预测数据和目标数据之间的偏离程度,其值越小,代表神经网络预测的精确度越高。均方误差的公式为

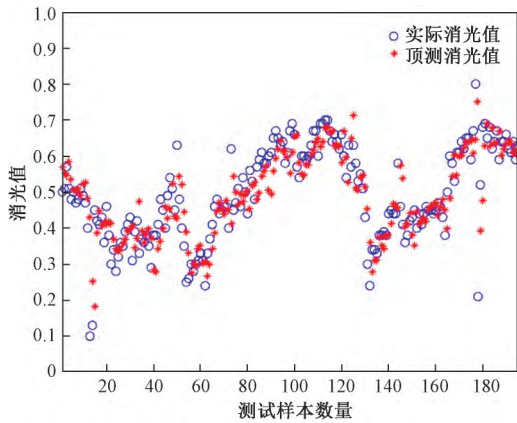


图 6 测试结果对比

Fig. 6 Test result comparison

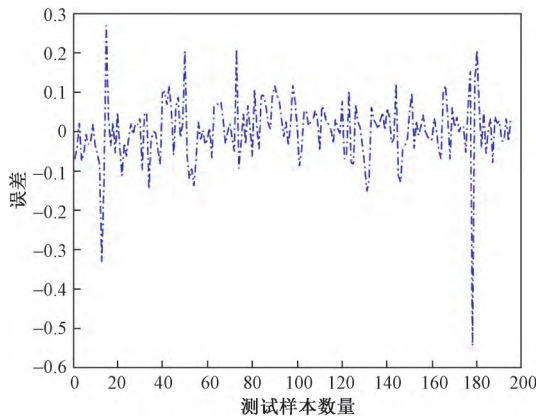


图 7 测试结果误差变化

Fig. 7 Error in test results

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N [y(t) - y'(t)]^2 \quad (1)$$

式(1)中: N 为样本数据总数; $y(t)$ 为第 t 组期望输出值; $y'(t)$ 为第 t 组网络实际输出值^[10]。

对上述测试样本的测试结果中预测消光值和实际消光值作 MSE 运算。其运行结果如图 8 所示。已知 MSE 越小,代表预测数据和实际数据的偏差越小,该预测模型测试结果的 $MSE = 0.0066$,说明该预测模型的预测精度较高。



图 8 测试结果 MSE 运算值

Fig. 8 Test result MSE operation value

2.4.2 预测模型的评价

在神经网络的训练过程中,有两个评价预测神经网络预测性能的重要指标:误差自相关和输入误差互相关。误差自相关用来描述时间序列上预测数据与目标数据的误差之间的关联程度,它能够表示出不同时延下的误差自相关度,相关度值落在置信限内越多则说明预测效果越好。输入误差互相关以输入时间序列和误差时间序列表示出不同时延下的输入和误差之间的关联程度,同样,其相关度值落在置信限内越多则说明预测效果越好^[10]。

图 9、图 10 分别为该预测模型中神经网络的误差自相关图和输入误差互相关图,可见其相关度基本都落在置信区间内,说明该预测模型的神经网络是满足预测要求的。

通过对预测模型的测试结果和神经网络训练情况进行评价发现,基于 NARX 时间序列预测模型的镜面情况预测具有一定的可行性和可靠性。在后续关于镜面除霜应对策略的研究中可以对镜面结霜状态进行有效的预测。

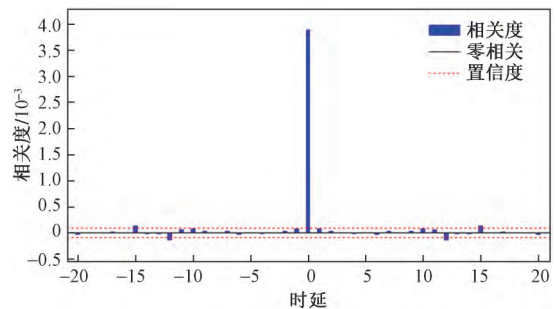


图 9 预测模型的误差自相关图

Fig. 9 Error autocorrelation plot of prediction model

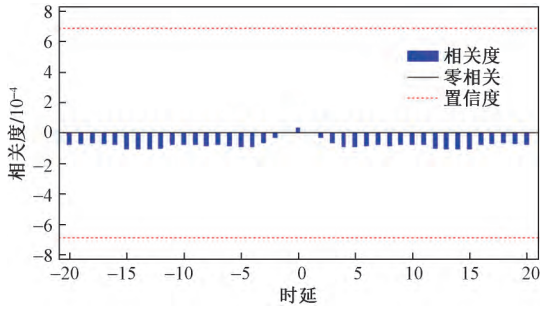


图 10 预测模型的输入误差互相关图

Fig. 10 Input error cross-correlation plot of prediction model

3 智能化除霜方法的应用

3.1 智能化除霜仿真系统

智能化除霜方法首先利用预测模型进行镜面结霜情况的预测,其次根据预测结果做出除霜应对策略。现在第2节镜面状态预测模型的基础上设计了智能化除霜仿真系统,其主要由镜面状态实时预测界面和除霜界面两个部分组成。

镜面状态实时预测界面包括输入模块、气象参数实时显示模块、预测结果显示模块。输入模块可以选择仿真的开始时间,实时显示当前时间下的气象信息数值;气象参数实时显示模块用于实时显示当前时间段的各项气象信息指标(温度、风速、湿度);预测结果显示模块包括当前镜面状态显示及状态指示灯、消光值预测值和实际值实时变化过程。图11为实时预测界面图。

目前有效的镜面除霜解决方案是在镜面镀铟锡氧化物(indium tin oxide, ITO)膜并加电。ITO是一种半导体透明导电膜,有电阻特性,通电后产生的热效应可有效消除霜及阻碍霜的形成。但加热会在镜面形成大气湍流,使得镜面的视宁度变差。且加热功率越大,对镜面视宁度的负面影响越大。辅助的除霜方法有吹风法,即通过启动吹风机装置,增加镜

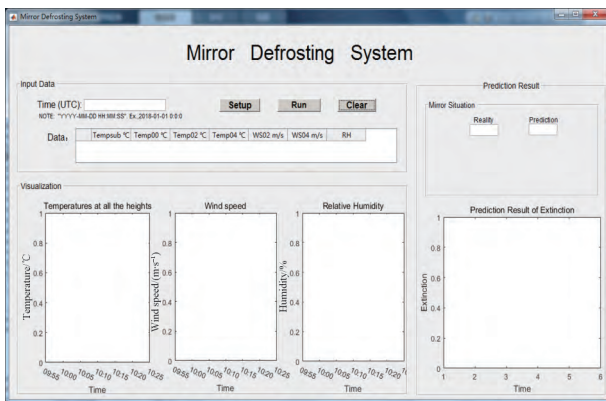


图 11 实时预测界面

Fig. 11 Real-time prediction interface

面表面的热对流交换系数,从而减小镜面和环境温度之间的温差,并增强升华效应。除霜界面是模拟吹风装置除霜的过程,包括除霜过程模块和除霜结果模块,除霜过程模块将实时显示当前镜面温度及消光值的变化情况,除霜结果模块显示除霜完成后的镜面温度及消光值大小。图12为除霜界面。

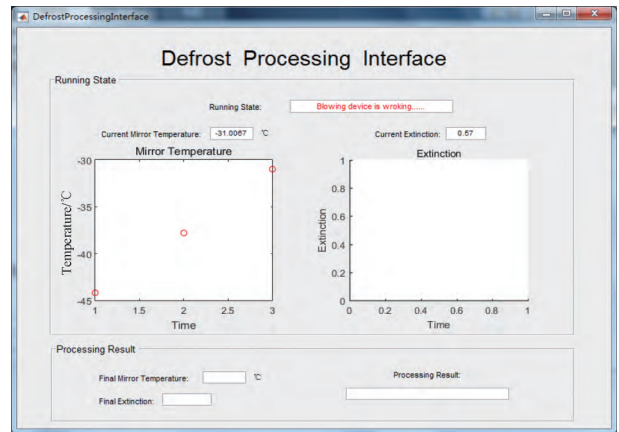


图 12 除霜界面

Fig. 12 Defrost interface

3.2 智能化除霜仿真应用

利用南极天文望远镜已有的某运行案例,在智能化除霜仿真系统的预测界面中输入该案例对应的开始时间,预测界面将实时显示当前的气象信息数值和镜面状态。同时,镜面状态预测模型将对下一时刻的镜面状态(消光值)进行预测,如果预测消光值较小则代表镜面干净,未结霜,此时预测结果模块指示灯为正常“safety”。图13为预测结果的正常界面。

当消光值预测值大于设定的异常情况阈值时,表明镜面可能存在结霜的情况,此时预测结果模块的指示灯为异常“alarm”,仿真系统将弹出提示窗口确认是否要进行除霜操作,图14为预测结果为预测结果异常时的界面及提示。

工作人员收到异常提示后选择进入除霜过程界

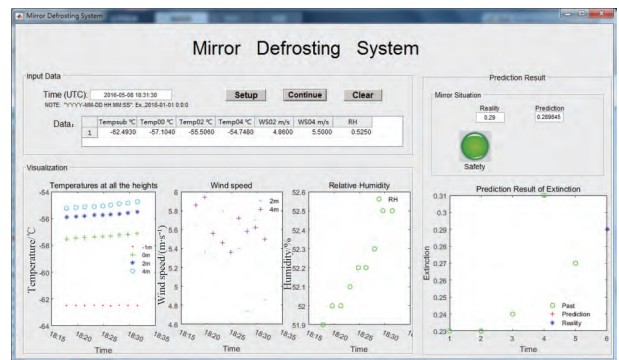


图 13 预测结果正常界面

Fig. 13 Safety interface of prediction result

面 除霜过程为模拟吹风装置对望远镜镜面吹风 将镜面上的霜吹落 使消光值逐渐降低 当消光值降低到设定阈值以下结束吹风操作 回到预测界面继续进行实时预测。图 15 为除霜过程界面。

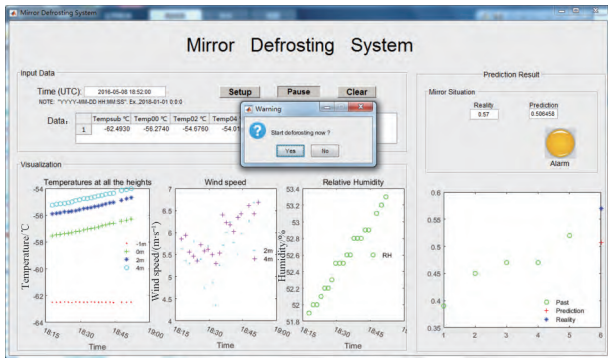


图 14 预测结果异常界面
Fig. 14 Alarm interface of prediction result

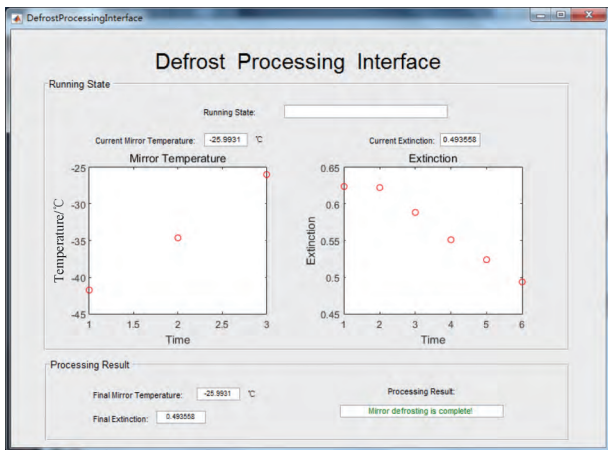


图 15 除霜过程界面
Fig. 15 Defrost processing interface

4 结论

针对南极望远镜镜面结霜问题,为克服目前的除霜方法依赖于人工、效率较低、智能化程度较低等局限性,提出了南极望远镜智能化除霜方法。首先,通过分析南极望远镜镜面结霜的形成机理和其影响因素,镜面状态基本可由消光值大小所反映,建立了基于 NARX 时间序列神经网络的南极望远镜镜面状态预测模型,以气象信息参数为输入,预测消光值为输出,实现对镜面状态的预测,并通过预测某一天的镜面状态验证了预测模型的可靠性。其次,设计智能化除霜仿真系统,实时预测镜面情况,并对预测结果作出合理的应对措施。结果表明,南极望远镜智能化除霜方法能够大大减少远程监控工作人员的

工作量,节约宝贵的观测时间,提高南极望远镜运行的可靠性。

参 考 文 献

- 1 王晋峰,王焯儒,田 杰. 南极大型天文望远镜主镜膜层防霜方法[J]. 光学学报, 2017, 37(4): 0431002-1-0431002-6
Wang Jinfeng, Wang Yeru, Tian Jie. Anti-frosting method for primary mirror film coating of large astronomical telescope in antarctica[J]. Acta Optic Sinica, 2017, 37(4): 0431002-1-0431002-6
- 2 高 琳. 基于神经网络和遗传算法的预测控制[D]. 北京: 华北电力大学, 2009
Gao Lin. Predictive control based on neural network and genetic algorithm[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2009
- 3 姚利哲. 智能预测控制策略研究及应用[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2011
Yao Lizhe. Research and application of intelligent predictive control strategy[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2011
- 4 陈 哲. 基于 BP 神经网络的配网设备故障预测[D]. 广州: 广东工业大学, 2017
Chen Zhe. Fault prediction of distribution equipment based on BP neural network[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2017
- 5 张记成. 兴隆观测基地天文观测条件分析及性能提升研究[D]. 济南: 山东大学, 2016
Zhang Jicheng. Astronomical observing conditions of Xinglong observatory and performance enhancement[D]. Jinan: Shandong University, 2016
- 6 吴晓敏,戴万田,王维城. 霜晶生长的界面演变及机制分析[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2007, 47(8): 1352-1355
Wu Xiaomin, Dai Wantian, Wang Weicheng. Theoretical analysis of interface transformation during frost crystal growth[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2007, 47 (8): 1352-1355
- 7 王 楠. 基于 NDF 与 NARX 网络的人民币汇率预测研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2013
Wang Nan. Research of RMB exchange rate forecasting based on NDF and NARX network [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013
- 8 范莹莹,余思勤. 基于 NARX 神经网络的港口集装箱吞吐量预测[J]. 上海海事大学学报, 2015, 36(4): 1-5
Fan Yingying, Yu Siqin. Port container throughput forecast based on NARX neural network[J]. Journal of Shanghai Maritime University, 2015, 36(4): 1-5
- 9 潘丽莎,程晓卿,秦 勇,等. 基于 NARX 神经网络的轮重减载率预测[J]. 铁道车辆, 2012, 50(9): 4-7
Pan Lisha, Cheng Xiaoqing, Qin Yong, et al. Prediction of reduction rate of wheel load based on NARX network [J]. Rolling Stock, 2012, 50(9): 4-7
- 10 付 青,单英浩,朱昌亚. 基于 NARX 神经网络的光伏发电功率预测研究[J]. 电气传动, 2016, 46(4): 42-45
Fu Qing, Shan Yinghao, Zhu Changya. Generated power forecasting for panelization system based on NARX neural network[J]. Electric Drive, 2016, 46(4): 42-45

Intelligent Defrosting Method for Antarctic Astronomical Optical Telescope

FENG Qing-chen^{1 2 3}, LI Xiao-yan^{1 2*}

(Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology, National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences¹, Key Laboratory of Astronomical Optics & Technology, Chinese Academy of Sciences², Nanjing 210042, China; University of Chinese Academy of Sciences³, Beijing 100049, China)

[Abstract] The Antarctic Dome A is known as one of the best astronomical observatories on the planet for its excellent observational conditions. The temperature in Dome A is $-30 \sim -80$ °C all year round, and the relative humidity is 40% ~ 80%. The temperature in the Dome A fluctuated greatly so much so that mirror surface of the telescope was easy to frost. Mirror frosting reduced the efficiency and quality of astronomical observations. An intelligent defrosting method was proposed to realize unattended intelligent mirror defrosting, the occupation of defrosting time and the influence of defrosting on mirror surface contrast were reduced, the energy consumption of defrosting was reduced. Firstly, the relationship between the environment, scientific data, and instruments were analyzed, and a predictive model of the mirror state of a telescope was constructed by using nonlinear autoregressive models with exogenous input (NARX) time series neural network. Secondly, the intelligent defrost simulation system of the Antarctic telescope was designed to predict the mirror condition in real time, and corresponding countermeasures were taken according to the prediction results. The results show that the method can effectively realize intelligent defrosting, reduce human intervention, save observation time and improve the reliability of telescope operation.

[Key words] Antarctic astronomical optical telescope mirror defrost intelligent prediction nonlinear autoregressive models with exogenous input (NARX) neural network