

基于径向基函数网络的光学测量系统误差修正算法

薛萍**, 何海*, 王宏民

哈尔滨理工大学自动化学院, 黑龙江 哈尔滨 150080

摘要 针对光学测量系统杂散光限制后, 残留杂散光的固有误差以及系统老化所带来的时变误差的问题, 提出一种基于径向基函数(RBF)网络的光度测量系统误差修正算法, 以进一步提高光学测量系统的测量精度。利用点源透射率(PST)的方法对光度测量系统的测量误差分布情况进行分析; 在杂散光分布影响近似估计的基础上, 设计并改进一种基于 RBF 网络的光度测量系统误差修正算法。采用 TracePro 进行仿真对比试验, 结果表明, 通过误差补偿网络的修正, 可将发光强度的测量误差降低至 0.24% 以下; 而且此算法与一般 RBF 算法相比, 其收敛速度和逼近能力有了明显的提高, 为系统杂散光限制后衍生问题的解决提供了更为快速有效的修正工具。

关键词 测量; 光度测量系统; 杂散光; 点源透射率; 径向基函数网络; 误差修正

中图分类号 O432.2

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.0212004

Error Correction Algorithm for Optical Measurement System Based on Radial Basis Function Network

Xue Ping**, He Hai*, Wang Hongmin

School of Automation, Harbin University of Science and Technology, Harbin, Heilongjiang 150080, China

Abstract To solve the problems of inherent errors caused by the residual stray light after the stray light limitation of the optical systems as well as time-varying errors caused by system aging and improve the accuracy of the optical measurement system, an error correction algorithm is proposed for a photometric measurement system based on the radial basis function (RBF) network. In this study, the point source transmittivity is used to analyze the measurement error distribution of the photometric measurement system. Further, the error correction algorithm is designed and improved based on the RBF network in accordance with the approximate estimation of stray light distribution. TracePro software is employed for comparative simulations. The results demonstrate that the photometric measurement error can be reduced to less than 0.24% by correcting the error compensation network. Compared with the general RBF network, the convergence speed and approximation ability of the proposed algorithm are obviously improved, providing a more rapid and effective tool for solving the problems entailed by the stray light limitation.

Key words measurement; photometric measurement system; stray light; point source transmittivity; radial basis function network; error correction

OCIS codes 120.5240; 290.2648; 150.1135; 150.1488

1 引 言

杂散光常常是光学系统产生系统误差的主要原因之一, 对于光度测量系统而言, 杂散光会降低环境信噪比, 影响系统测量精度, 严重时会导致测量系统无法正常使用^[1-3]。目前, 针对杂散光对光学系统稳定性和准确性的影响, 国内外学者展开了大量的研究。2010 年, 美国的 Ball Aerospace 公司提出点源

遮挡比的概念^[4], 并以此对美国国家航空航天局(NASA)开发的陆地成像仪(OLI)进行杂散光分析; 2015 年, 李婷等^[5]从能量传输的角度出发, 给出各类杂散光的分析方法; 2016 年, 宋延嵩等^[6]针对激光准直系统中杂散光的问题, 设计了 3 种不同结构的消光环来消除准直系统中的杂散光; 2017 年, 周昭等^[7]对微型拉曼光谱仪中的光学陷阱进行详细分析和设计改进, 改进后的光学陷阱使得杂散光线

收稿日期: 2019-07-23; 修回日期: 2019-08-27; 录用日期: 2019-09-19

基金项目: 黑龙江省自然科学基金(F201310)、哈尔滨市科技创新人才项目(2016RAQXJ037)

* E-mail: hai123193@163.com; ** E-mail: 1043854913@qq.com

的数量减少了 50%；2018 年，朱德燕等^[8]为解决激光惯性约束聚变系统中屏蔽罩引起的杂散光问题，建立了屏蔽罩的三维蜂窝结构模型，并根据不同角度下的反射光能量的变化，提出屏蔽罩的杂散光分析方法。上述研究方法主要是通过对杂散光进行分析，并根据杂散光的分布情况，设计相应的物理消杂结构来降低杂散光的影响，以提高系统的稳定性和测量精度；虽然采用物理消光的方式可以降低杂散光的影响，但是对于易受杂散光影响的测量系统，杂散光限制后的衍生误差明显增大，而且随着系统及消光元件的老化，杂散光的抑制能力随之减弱，系统的时延误差也会明显增大。

本文在有限空间、材料有限吸收率和有限杂散光抑制结构的条件下，不对系统的物理结构进一步优化，而是采用点源透射率(PST)杂散光分析方法^[9-10]来预测杂散光所引起的系统误差的分布特征^[11]，利用人工神经网络技术(RBF)^[12-13]模拟并学习发光强度测量时的误差分布，以寻求合适的误差补偿方法。径向基神经(RBF)网络可以根据全局杂散光分布特性无限逼近非线性误差函数，并且该网络结构简单、训练快速，适用于数据误差的修正。本文基于光度测量系统的分布测量特性，改进了 RBF 的模型结构，利用不同角度下的误差分布来训练

RBF 模型，并以此来构建系统误差补偿曲面，实现对实测结果的补偿修正。

2 光度测量系统误差分析方法

2.1 基于点源透射率的杂散光特性分析

点源透射率是评价不同离轴角度下光学系统对杂散光抑制能力的主要指标之一^[14-15]，定义为基于离轴角为 θ 的光源(点源或者平行光源)经光学系统抵达探测器的辐照度 $E_d(\theta)$ 和点光源在光学系统入口处的辐照度 $E_i(\theta)$ 之比。其表达式为

$$P_{\text{PST}}(\theta) = \frac{E_d(\theta)}{E_i(\theta)} \quad (1)$$

分别计算视场外不同离轴角下的 $P_{\text{PST}}(\theta)$ ，可以获知光学系统发光强度测试的误差分布情况。点源透射率也称消光比， $P_{\text{PST}}(\theta)$ 的值越小，表明杂散光的抑制能力越强，系统性能越好。

理想状态下的光度测量系统在对光源进行测量时，是将被测光源置于一个无穷大的测量空间中，如图 1(a) 所示，光源所发出的光线，除光度中心的光线能够被光度探测器接收到，其他偏离光度中心的光线将射向无穷远处，不会对光度探测器产生影响，此时基于光度学距离法所测的光源分布数据为理想状态下的理论值。

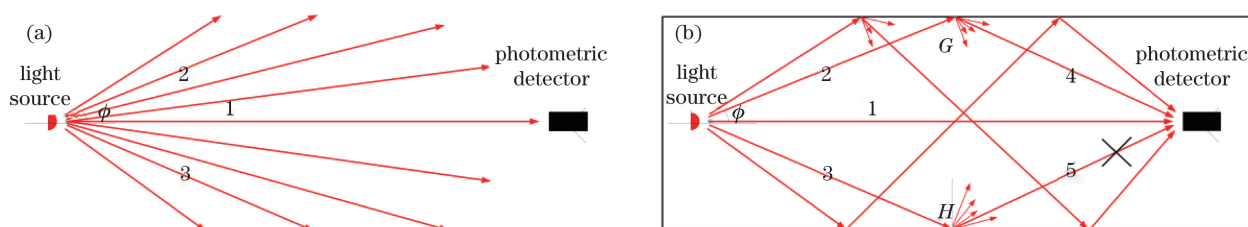


图 1 光度测量系统杂散光影响的追迹分析。(a) 理想光度测量系统的光线；(b) 一般光度测量系统的光线
Fig. 1 Tracing analysis of stray light effect in photometric measurement system. (a) Optical ray in ideal photometric measurement system; (b) optical ray in general photometric measurement system

在实际应用过程中，采用光度测量系统对光源进行测量是在一个有限的空间下，如图 1(b) 所示，此时偏离光度中心的光线，将会打在系统的内壁上，由于光的漫反射及散射现象，产生的杂散光线将影响光度探测器所接收数据的准确性。基于点源透射率原理，分别计算不同离轴角度以及同一离轴角度下的点源透射率，如图 2 所示。

由图 2 可知，不同离轴角度下环境对杂散光的抑制是不同的，点源透射率随离轴角度的变化而变化；在相同的离轴角度下，不同入射辐照度 E_i 的点源透射率趋于稳定。

2.2 发光强度测量数据误差修正理论

在光度测量应用中，被测对象的辐射强度常常是随离轴角变化的。根据 PST 方法所得出的光度测量系统的误差效应，以及根据不同出射角度 θ 下的出射光线，在测试角度 α 下的理论值 E_{ra} ，可近似估计系统对被测对象的实测值 E_{ca} (带有杂散光误差)。

由图 3 可知，某一测试角度 α 下的 E_{ca} 的计算公式为

$$E_{ca} = \mu E_{ra} + c\epsilon_{\alpha} = \mu E_{ra} + c \sum_{\theta} P_{\text{PST}\alpha} E_i(\theta) \quad (2)$$

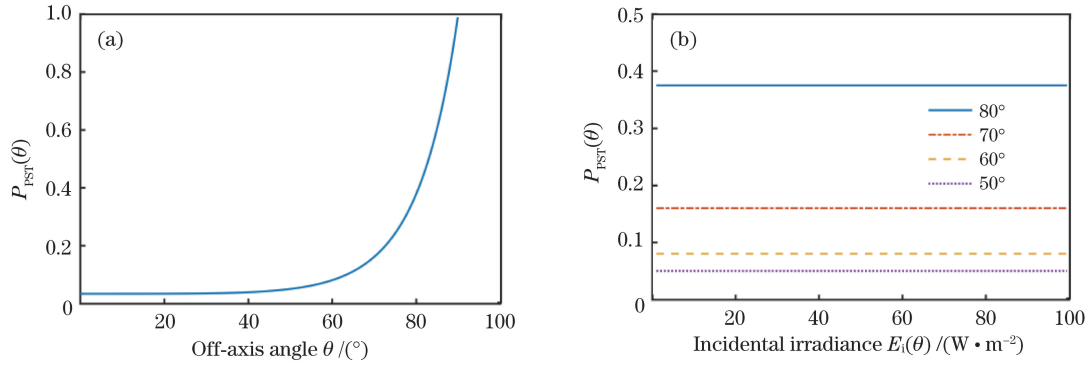


图 2 不同条件下 PST 值的变化曲线。(a) PST 值随离轴角度变化的曲线;(b) PST 值随出射辐照度变化的曲线

Fig. 2 Varying curves of PST values under different conditions. (a) PST value as a function of off-axis angle;

(b) PST value as a function of irradiance

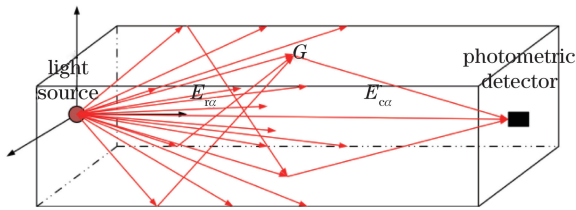


图 3 光度测量系统三维光线追迹分析原理

Fig. 3 Principle of three-dimensional ray tracing analysis for photometric measurement system

对光学系统进行光线反向追迹分析,将输入视为输出,输出视为输入,根据(2)式转换可得

$$E_{ra} = \frac{1}{\mu} E_{ca} - \frac{c}{\mu} \varepsilon_a = \beta_a E_{ca} + \eta_a \sum_{\theta} \frac{E_d(\theta)}{P_{\text{PST}_a}(\theta)}. \quad (3)$$

不同测量角度下的实测值 E_{ca} 构成一个 $n \times 1$ 的一维向量 $\mathbf{E}_c = \{E_{c1}, E_{c2}, \dots, E_{cn}\}$; 不同测量角度下的理论值 E_{ra} 构成 $n \times 1$ 的一维向量 $\mathbf{E}_r = \{E_{r1}, E_{r2}, \dots, E_{rn}\}$; $E_d(\theta)$ 为不同入射角度下的光辐射。由光度测量系统可知,不同入射角度下的光辐射可近似为不同测量角度下的实测值,故 $E_d(\theta) \approx E_{ca}$ 。根据上述参数并结合(3)式可得矩阵方程,即

$$\begin{bmatrix} E_{r1} \\ E_{r2} \\ \vdots \\ E_{rn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \beta_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \beta_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \beta_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{c1} \\ E_{c2} \\ \vdots \\ E_{cn} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \eta_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \eta_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \eta_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & \cdots & P_{1n} \\ P_{21} & P_{22} & \cdots & P_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{n1} & P_{n2} & \cdots & P_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{c1} \\ E_{c2} \\ \vdots \\ E_{cn} \end{bmatrix}. \quad (4)$$

由(4)式可得不同测试角度下真实值与实测值之间的线性近似关系。光学系统在对光源进行发光

强度测试时,考虑到真实值与实测值的线性近似关系、系统的 PST 值随离轴角非线性变化的情况(即 P_m 系数的非线性变化),以及时间变化系统老化所带来的不确定时延误差,可将每一个测量的理论值视为不同出射角度下实测值的高维映射与相应权重乘积的求和运算,以此来作为修正系统测量误差的主要着力点,这样可以构建系统误差补偿曲面,通过实测值来逼近测量的理论值。因此,引入了 RBF,根据不同角度下误差分布的近似分析,并结合 RBF 结构简单、训练快速、适用于数据误差修正的网络特性,设计相应的网络模型来训练得出系统误差补偿曲面。

3 基于 RBF 网络的发光强度测量误差修正模型

3.1 RBF 网络模型

光度测量系统 RBF 网络误差修正模型,由输入层、隐含层和输出层组成。RBF 网络的隐含层是非线性层,采用径向基函数作为基函数^[16-17],从而将输入向量空间转换到隐含层空间,使原来线性不可分的问题变得线性可分,输出层则变为线性层,如图 4 所示。

图 4 中 $\mathbf{E}_c = \{E_{c1}, E_{c2}, \dots, E_{cn}\}$ 表示不同光线出射角度下的实测值,即包含杂散光所引起的系统误差与角度所引起的系统偏差的光源分布数据测量值, $\mathbf{E}_r = \{E_{r1}, E_{r2}, \dots, E_{rn}\}$ 表示不同光线出射角度下的理论值。本文校正的是光度测量系统的测量误差,利用神经网络进行系统误差修正。输入向量为 $\mathbf{x} = \{E_{c1}, E_{c2}, \dots, E_{cn}\}$, 对应的输出值为 $\mathbf{y} = \{E_{r1}, E_{r2}, \dots, E_{rn}\}$, 则输入与输出之间的映射关系为

$$y_j = \sum_{i=1}^h \omega_{ij} R_i(\mathbf{x}_p - \mathbf{c}_i), \quad j = 1, 2, \dots, n, \quad (5)$$

式中: ω_{ij} 为隐含层到输出层的权值; h 为隐含层神

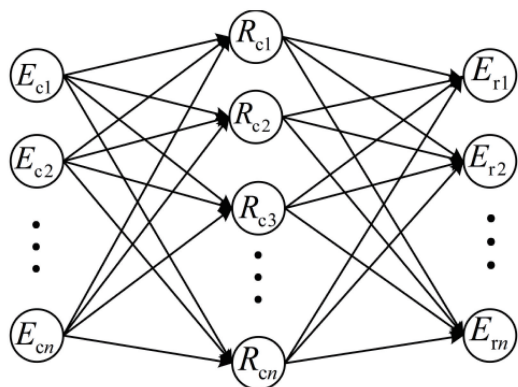


图 4 光度测量误差修正的 RBF 网络模型
Fig. 4 RBF network model for error correction of photometric measurement

经元的个数; $R_i(x_p - c_i)$ 为基函数, 也就是输入向量的高维映射关系。本文选用基本的高斯函数作为基函数, 即

$$R_i(x_p - c_i) = \exp\left(-\frac{1}{2\sigma_i^2} \|x_p - c_i\|^2\right), \quad i = 1, 2, \dots, h, \quad (6)$$

式中: x_p 为输入向量; c_i 为第 i 个高斯核函数的中心; $\|x_p - c_i\|$ 为输入向量到 c_i 的欧氏距离, $R_i(x)$ 在 c_i 处服从高斯分布; σ_i 为第 i 个基函数中心的宽度。 σ_i 采用最小二乘损失函数表示为

$$\sigma_i = \frac{1}{p} \sum_{j=1}^n \|d_j - y_j c_i\|^2, \quad i = 1, 2, \dots, h. \quad (7)$$

3.2 适用于光度测量系统的 RBF 网络改进

基于一般 RBF 网络模型, 在训练测试的过程中, 当被测光线出射角度较小时, 网络修正效果比较好, 当被测光线出射角度较大时, 网络修正效果较差。针对这一问题, 结合(5)式发光强度测试时理论值与实测值之间的关系, 对(5)式进行变换, 即

$$y_j = \sum_{i=1}^h \omega_{ij} R_i(x_p - c_i) + u_j x_j, \quad j = 1, 2, \dots, n, \quad (8)$$

式中: u_j 为输入层与输出层直接连接时的权重; n 为输入向量元素的个数

(8)式在(5)式的基础上, 增加了输入值与输出值之间的线性直连关系, 从而体现出分布光度测量系统在对光源进行测量时的近似高维映射关系。根据(8)式, 对 RBF 网络模型进行了改进, 如图 5 所示。

从(8)式和图 5 可以看出, 增加了输入层对输出层的直接作用, 即在原有的 RBF 网络的基础上又进行了一次输入与输出的逼近。因此相对于传统的

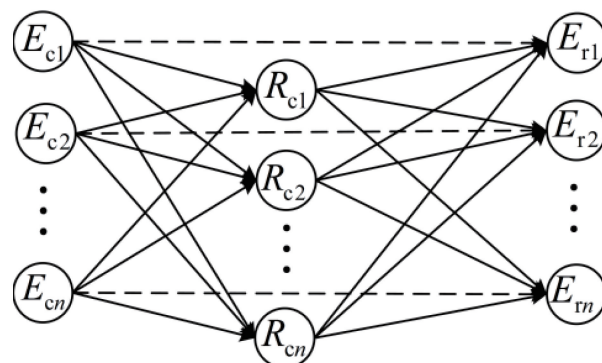


图 5 改进的 RBF 网络误差修正模型

Fig. 5 Improved error correction model for RBF network

RBF 网络, 改进的 RBF 网络不仅能够体现出分布光度测量系统的近似光学特性, 而且能够有效提高网络的收敛速度和逼近能力。

3.3 改进前后 RBF 性能比较验证

采用发光强度测量数据分别对一般 RBF 模型和改进的 RBF 模型进行性能对比, 结果如图 6 所示。

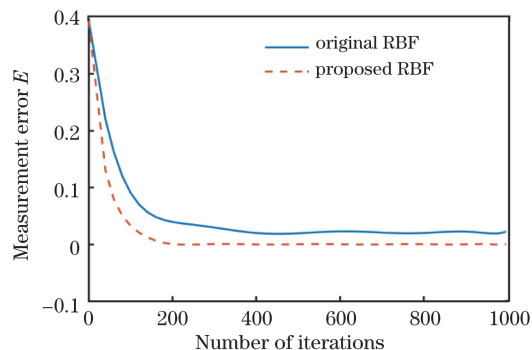


图 6 改进前后 RBF 训练过程对比

Fig. 6 Comparison of RBF training processes before and after improvement

图 6 横坐标代表迭代次数, 纵坐标代表每次迭代后的测量误差 E 。分析可得, 进行 1000 次迭代训练, 改进的 RBF 算法相对于一般 RBF 算法在训练过程中有较快的收敛速度, 而且随着迭代次数的增加, 改进的 RBF 算法的最终收敛值低于一般 RBF 算法, 有较强的误差逼近能力。

4 光度测量系统误差修正结果分析

4.1 仿真模型搭建及原始发光强度数据分析

卧式分布光度系统主要由光学暗室、旋转主机、光源和光度探测器组成。光学暗室为光源光度测试提供测试环境, 旋转主机用来改变被测光源的测试姿态, 光度探测器采集被测光源每个测试姿态下的发光强度数值。每一部分的基本参数如表 1 所示。

表 1 光源测量环境基本信息

Table 1 Basic information of light source measurement environment

Model object	Model parameter
Darkroom length /m	10
Darkroom width /m	4
Darkroom height /m	3
Darkroom material	Acrylic board
Surface material	Matte black paint
Absorption rate	0.85

一般光学暗室的内壁采用光阑结构,通过增大内壁的粗糙程度来对杂散光进行一定程度的消杂处理。通过 TracePro 仿真软件搭建内壁光阑结构,如

图 7 所示。

根据表 1 的基本参数并结合 TracePro 中 ABg 模型,设置对象表面散射属性参数。对内壁及内壁光阑结构喷涂光学消光漆,吸收率设为 0.85, $A = 0.05252, B = 0.1, g = 0$ 。仿真模型如图 8 所示。

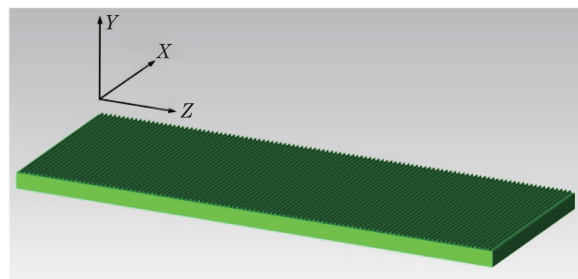


图 7 光学暗室的内壁光阑结构

Fig. 7 Aperture structure of inner wall of optical darkroom

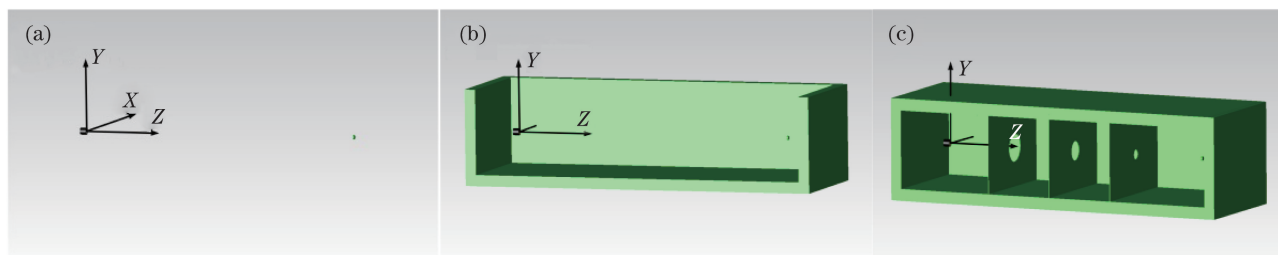


图 8 分布光度测量平台仿真模型。(a) 无限大空间;(b) 一般光度测量系统;(c) 三重光阑消杂结构测量系统

Fig. 8 Simulation model of distributed photometric measurement platform. (a) Infinite space; (b) general photometric measurement system; (c) photometric measurement system with triple aperture denoising structure

如图 8(a)所示,采用 TracePro 仿真软件模拟理想无穷大测量空间来对被测光源进行测量,测量结果近似为理论值。根据表 1 的参数和图 7 的内壁粗糙结构,采用仿真软件对一般光度测量平台模拟复现,测量结果记为一般模型实测值,如图 8(b)所示。图 8(c)为带有三重光阑消杂结构的光度测量系统的仿真模型,其中光学暗室长为 $L = 10$ m,被测光源到光度探测器的距离为 $\Delta L = 9$ m,被测光源到最近光阑的距离为 $L_1 = 2.5$ m,最大的被测光源尺寸为 $P = 1.2$ m,光阑的间隔记为 L_2 ,在图 8(c)中从左到右三重光阑的开孔孔径分别记为 D 、 F 和 K 。根据光度测量系统光学暗室光阑搭建规则,即 $L_2 = (\Delta L - L_1) / 3, K = P \times L_2 / (L_1 + 3 \times L_2), D = 3 \times K, F = 2 \times K$,并结合表 1 的基本参数,可求得 $L_2 = 2.167$ m, $K = 0.289$ m, $D = 0.867$ m, $F = 0.578$ m。采用 TracePro 仿真软件对带有三重光阑消杂结构的光学测量系统模拟复现,其对光源的测量结果记为三重光阑模型实测值。在图 8(a)~(c)测量系统模型的基础上,对相同的待测光源(由仿真软件设置为朗伯发光体)进行仿真测试,测试数据如

图 9 所示。

理论数据是在无限大空间仿真模型下对被测光源的测量结果,其结果避免了杂散光的干扰,符合被测光源的发光强度分布情况。一般仿真模型的实测值是在图 8(b)仿真模型下的测量结果,此模型通过对系统内壁粗糙化以及喷涂光学黑漆来简单抑制系统的杂散光,由图 9 可知,其测量结果与无限大空间测量模型相比存在较大的测量误差。三重光阑模型

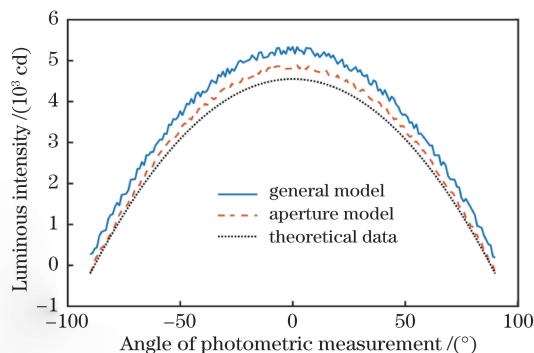


图 9 发光强度的理论值与实测值的对比

Fig. 9 Comparison of theoretical and measured values of luminous intensity

的实测值是在图 8(c) 仿真模型下的测量结果, 此模型在光度测量系统中增加了三重光阑来进行结构消杂, 但由于残留杂散光的存在, 此模型的测量结果与无限大空间测量模型相比仍存在较大的误差。

4.2 误差修正模型修正效果的仿真验证

基于仿真模型进行不同发射角度下的发光强度的采集, 在每一条环带发光强度数据仿真采集过程中, 采集步长设置为 1° , 每一条环带共采集 180 个发光强度数据; 设置相邻环带之间的步长为 0.5° , 共采集 360 条环带; 随机将采集到的 360 条环带按 7:3 分成训练集与测试集, 来对 RBF 网络模型加以训练。

本文的 RBF 网络, 根据每一条环带所采集的数

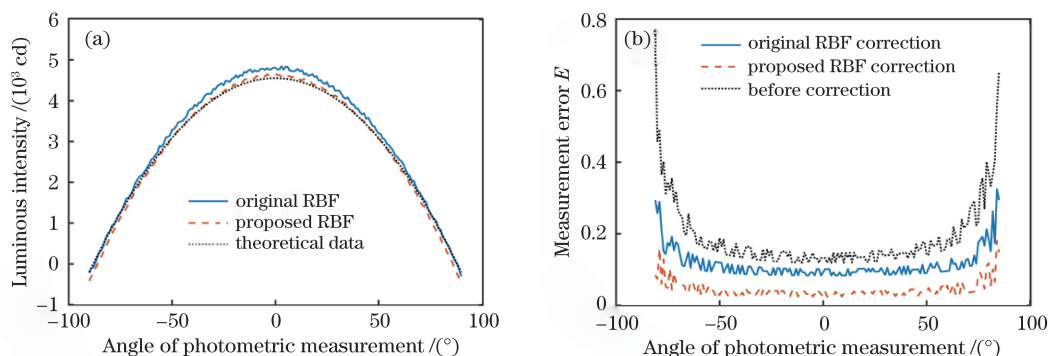


图 10 RBF 网络修正结果分析图。(a) 校正前后的发光强度输出结果;(b) 校正前后的误差分布情况

Fig. 10 Analysis charts of correction results of RBF network. (a) Outputs of photometric data before and after correction; (b) distributions of errors before and after correction

本文采用改进前后的 RBF 网络模型对一般光度测量系统仿真模型和三重光阑消杂结构测量系统仿真模型分别进行误差修正。修正结果表明改进的 RBF 网络模型对系统误差修正后, 平均测量误差均降至 0.24% 以下。由于一般光度测量系统杂散光影响比较大, 对其杂散光误差的修正更为明显, 故以一般光度测量系统仿真模型的修正结果为例, 对改进前后的 RBF 网络模型性能展开分析。从测试的环带中任选一条环带, 对其校正前后的发光强度数据输出结果进行分析, 如图 10(a) 所示, 其余测试环带类似, 改进后的 RBF 网络与普通的 RBF 网络相比, 对发光强度数据修正的结果更加逼近发光强度数据的理论值, 故其对光学系统的误差修正能力更强。图 10(b) 所示为校正前后所有测试环带的误差均值分布情况, 普通 RBF 网络可以起到对光学系统进行误差校正作用, 但是校正之后仍存在误差波动较大的问题; 基于分布光度测量系统的特性改进的 RBF 网络, 其不仅误差的校正能力相对普通的 RBF 网络较高, 而且也能解决校正之后测量误差波动较大的

问题。综合图 10 的测试结果, 改进的 RBF 网络对光度测量系统修正后, 其平均测量误差小于 0.24%, 降低了光学测量系统的测量误差。

据的维度, 设计输入层与输出层的神经元个数都为 180; 根据样本总数设计隐含层神经元个数为 360。训练算法的具体过程如下: 1) 初始化整个网络的权值阈值; 2) 输入训练样本, 并计算隐含层各神经元的输入输出以及输出层神经元的输入输出; 3) 计算输出层误差及隐含层误差; 4) 修正输出层、隐含层的权值阈值, 并判断样本的全部数据是否训练完成, 如果没有训练完成, 返回 2) 开始新一步的训练, 如训练完成, 则进行下一步; 5) 判断总体的方均误差是否满足预设要求, 如果不满足, 则更新训练总步数返回 2), 开始新一轮训练, 如果满足要求, 则表示本轮训练结束。网络训练完成后, 采用测试集来对此网络模型加以验证, 其验证结果如图 10 所示。

5 结 论

在光度测量系统有限空间和有限吸收率的条件下, 利用 PST 杂散光分析的方法对测量误差分布情况进行分析; 在固有的物理消杂结构前提下, 引入 RBF 网络误差修正模型的数学方法对系统进行测量误差修正; 通过 TracePro 仿真软件基于现场模型进行光学仿真数据采集验证, 从仿真上验证了 RBF 网络误差修正模型的可行性; 基于一般 RBF 网络对部分测试数据修正仍存在的不足, 对 RBF 网络进行了改进, 增加了输入层与输出层的直连关系。采用改进的 RBF 网络模型作为发光强度测量数据误差修正模型, 修正后的发光强度测量数据平均误差小于 0.24%, 但是对于其他高精度的光学测量系统, 其修正精度仍存在着不足, 因此, 适用于不同光学测量系统的误差修正建模方法是本课题组后续研究的内容。

参 考 文 献

- [1] General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Photometry and goniophotometry of luminaries: GB/T 22907—2008[S]. Beijing: Standards Press of China, 2009.
中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 灯具的光度测试和分布光度学: GB/T 22907—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- [2] Illuminating engineering society. Electrical and photometric measurements of solid-state lighting products: IES LM-79-08[S]. New York: Illuminating Engineering Society, 2008.
- [3] International commission on illuminating commission internationale de l' Eclairage. Test method for LED lamps, LED luminaires and LED modules: CIE S 025/E: 2015 [S]. Vienna: CIE Central Bureau, 2015.
- [4] Grochocki F, Fleming J. Stray light testing of the OLI telescope[J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7794: 77940W.
- [5] Li T, Ma X L, Li F, et al. Stray light analysis and test of cassegrain optical antenna[J]. Acta Photonica Sinica, 2015, 44(8): 0806002.
李婷, 马小龙, 李福, 等. 卡塞格伦光学天线杂散光分析与测试[J]. 光子学报, 2015, 44(8): 0806002.
- [6] Song Y S, An Y, Li X H, et al. Analyzing and suppressing of stray light in laser collimating system [J]. Chinese Optics, 2016, 9(6): 663-670.
宋延嵩, 安岩, 李欣航, 等. 激光准直系统中的杂散光分析与抑制[J]. 中国光学, 2016, 9(6): 663-670.
- [7] Zhou Z, Chen H, Zhang Y C, et al. The improved suppression and analysis of stray light in the miniature Raman spectrometer[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2017, 37(3): 772-777.
周昭, 陈和, 张寅超, 等. 微型拉曼光谱仪杂散光分析及抑制方法的改进[J]. 光谱学与光谱分析, 2017, 37(3): 772-777.
- [8] Zhu D Y, Peng Z T. Optimized design and strayed light analysis of shield[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(1): 0101010.
朱德燕, 彭志涛. 屏蔽罩的优化设计与杂散光分析[J]. 中国激光, 2018, 45(1): 0101010.
- [9] Li Z H, Zhao J K, Xu L, et al. Analysis and calibration of precision for point source transmittance system [J]. Acta Physica Sinica, 2016, 65(11): 114206.
李朝辉, 赵建科, 徐亮, 等. 点源透过率测试系统精度标定与分析[J]. 物理学报, 2016, 65(11): 114206.
- [10] Xu L, Zhao J K, Xue X, et al. PST research and measurement of lunar-based optical telescope stray light[J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(4): 1289-1295.
徐亮, 赵建科, 薛勋, 等. 月基望远镜杂散光 PST 研究与测试[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(4): 1289-1295.
- [11] Li Z F, Wang S R, Huang Y, et al. Spectral stray light correction of forward limb imaging spectrometer for atmospheric exploration[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(11): 1101001.
李占峰, 王淑荣, 黄煜, 等. 前向临边大气探测成像光谱仪光谱杂散光修正 [J]. 光学学报, 2018, 38(11): 1101001.
- [12] Zhou N, Luo L G, Gao Z L, et al. Error correction algorithm of ultra high frequency partial discharge time delay localization based on multiple neural networks[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(11): 3641-3648.
周南, 罗林根, 高兆丽, 等. 基于多神经网络的局部放电特高频时延定位误差修正算法[J]. 高电压技术, 2018, 44(11): 3641-3648.
- [13] Xi Y H, Peng H, Mo H. Parameter estimation of RBF-AR model based on the EM-EKF algorithm[J]. Acta Automatica Sinica, 2017, 43(9): 1636-1643.
- [14] Pei L L, Xiangli B, Lü Q B, et al. Research on the stray light suppression for super-resolution optical system[J]. Acta Photonica Sinica, 2017, 46(11): 1122002.
裴琳琳, 相里斌, 吕群波, 等. 超分辨卫星载荷光学系统杂散光抑制[J]. 光子学报, 2017, 46(11): 1122002.
- [15] Wang Y F, Li L Y. Stray light suppression of star photoelectric detection system for space target in daytime[J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(12): 2854-2861.
王一凡, 李零印. 白天观测空间目标的恒星光电探测系统的杂散光抑制[J]. 光学精密工程, 2011, 19(12): 2854-2861.
- [16] Meng X, Rozycki P, Qiao J F, et al. Nonlinear system modeling using RBF networks for industrial application[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2018, 14(3): 931-940.
- [17] Li Y, Liu M Y, Zhang X J, et al. Global approximation based adaptive RBF neural network control for supercavitating vehicles[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2018, 29(4): 797-804.