

文章编号 1004-924X(2007)09-1311-06

用于三轴光电跟踪系统的神经网络误差修正法

刘兴法, 马佳光

(中国科学院 光电技术研究所, 四川 成都 610209)

摘要: 系统误差的存在严重影响了光电跟踪系统的引导精度和测量精度, 现阶段用于三轴光电跟踪系统的最小二乘系统误差修正法精度较低, 球谐函数系统误差修正法亦不适用于 Z 轴连续转动时的系统误差修正。三轴光电跟踪系统的系统误差是以前三个角度测量值为参数的曲面, 而神经网络可以精确拟合复杂的曲线或曲面。分析和仿真证明, 基于 BP 神经网络的系统误差修正法可用于 Z 轴连续转动的三轴光电跟踪系统, 而且可把系统误差修正到约为原来的 28%。

关键词: 三轴跟踪架; 光电跟踪; 系统误差; 神经网络

中图分类号: V556.5 **文献标识码:** A

Neural network error modification method for three-axis photoelectric tracking system

LIU Xing-fa, MA Jia-guang

(*Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China*)

Abstract: System errors seriously influence on the leading and measuring precisions of a three-axis photoelectric tracking system. As least square method has lower precision, and global-function system error modification method could not properly be used in three-axis photoelectric tracking system when azimuth axis runs continuously, a novel neural network error modification method is presented in this paper. The system errors of three-axis photoelectric tracking system locate on a curve composed of three angle values, and the neural network can fit precisely complicated curves or curved faces. Analysis and simulation prove that BP neural network system error modification method can be used in three-axis photoelectric tracking system when azimuth axis runs continuously and can reduce system errors by 72%.

Key words: three-axis gimbal; photoelectric tracking; system error; neural network

1 引言

三轴光电跟踪系统可以实现无盲区跟踪, 但跟踪策略具有多样性和复杂性^[1]。为了提高系统

的引导精度和测量精度, 需要修正系统误差。最小二乘系统误差修正法修正精度较低, 球谐函数的系统误差修正法具有较高的修正精度但不太适合于三轴光电跟踪系统, 所以寻求修正精度较高且适用于三轴光电跟踪系统的系统误差修正方法

是更好地应用三轴光电跟踪系统的前提条件。

2 球谐函数系统误差修正法的不足

球谐函数系统误差修正法能够应用于光电跟踪系统的前提条件是可以建立与光电跟踪系统测

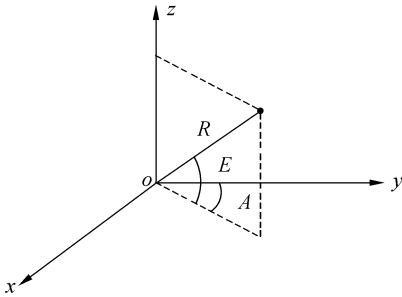


图 1 与地平式跟踪架对应的球坐标系

Fig. 1 Global reference frame for horizontal gimbal

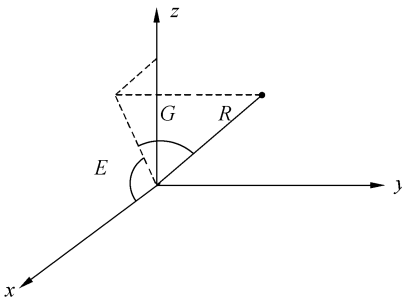


图 2 与 X-Y 式跟踪架对应的球坐标系

Fig. 2 Global reference frame for X-Y gimbal

量值对应的球坐标系^[2]。如与地平式光电跟踪系统对应的球坐标系图 1 和与 X-Y 式光电跟踪系统对应的球坐标系图 2, 因此可以得出与两者相对应的球谐函数分别为式(1)^[3]和式(2)^[2]:

$$f(E, A) = \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=0}^l [C_l^m \cos(mA) + D_l^m \sin(mA)] P_l^m(\sin E), \quad (1)$$

$$f(G, E) = \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=0}^l [C_l^m \cos(mE) + D_l^m \sin(mE)] P_l^m(\sin G). \quad (2)$$

三轴光电跟踪系统有四个测量值且有三个量是相互独立的^[1], 无法建立与三轴光电跟踪系统测量值对应的球坐标系, 因此, 基于球谐函数的系统误差修正法不能直接应用于三轴光电跟踪系统。

3 神经网络系统误差修正原理

设三轴光电跟踪系统(图 3) Z 轴、Y 轴、X 轴

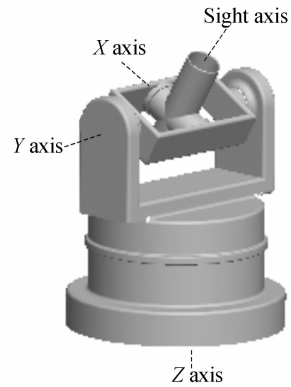


图 3 三轴跟踪架示意图

Fig. 3 Illustration of three-axis gimbal

方向上测量值分别为 A、E、G, 对应的理论值为 A₀'、E₀'、G₀', Z 轴、Y 轴、X 轴方向上的引导误差分别为 ΔA、ΔE、ΔG, 测量误差分别为 ΔA'、ΔE'、ΔG'。有:

$$\begin{cases} A = A_0' + \Delta A \\ E = E_0' + \Delta E \\ G = G_0' + \Delta G \end{cases}, \quad (3)$$

$$\begin{cases} A_0' = A + \Delta A' \\ E_0' = E + \Delta E' \\ G_0' = G + \Delta G' \end{cases}. \quad (4)$$

图 4(A₀、E₀ 分别为地平面坐标系中目标的方位角和俯仰角)所示的 Z 轴坐标系(Z 轴坐标系的 z' 轴和原点与地面坐标系的 z 轴和原点重合)中, 由几何关系可得:

$$\begin{cases} x' = R \sin G \\ y' = R \cos G \cos E \\ z' = R \cos G \sin E \end{cases}, \quad (5)$$

其中, x', y', z' 为目标在 Z 轴坐标系中的位置坐标; R 为目标斜距; G 为 X 轴对应的测量值(X 轴与 Y 轴垂直时处于零位); E 为 Y 轴对应的测量值(视轴指向水平面时处于零位)。

在图 5 所示的地面坐标系和图 4 所示的 Z 轴坐标系中, 由坐标转换可得:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos A & -\sin A & 0 \\ \sin A & \cos A & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}, \quad (6)$$

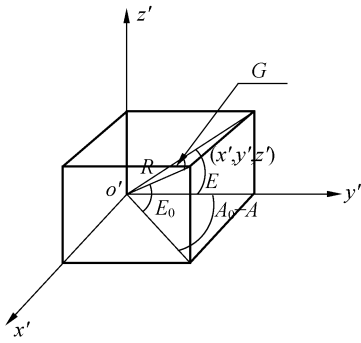


图 4 A_0 、 E_0 、 G 示意图

Fig. 4 Sketch map of A_0 、 E_0 、 G

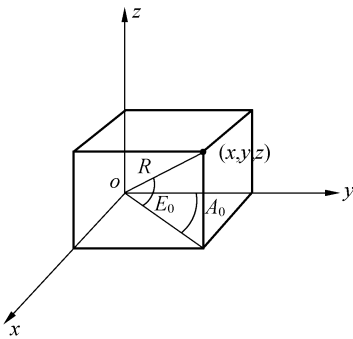


图 5 地平式光电跟踪系统中目标位置示意图

Fig. 5 Sketch map of object place in horizontal gimbal

其中, x, y, z 为目标在地面坐标系中的位置坐标; A 为 Z 轴坐标系相对地面坐标系的方位角。

由式(5)与式(6)可知,对于空间某一目标, E, G 是 A 的函数,即:

$$E = F_E(A), G = F_G(A), \quad (7)$$

当 A 存在系统误差 $\Delta A'$ 时,有:

$$\begin{aligned} E + \Delta E_{A'} &= F_E(A + \Delta A') \\ G + \Delta G_{A'} &= F_G(A + \Delta A'), \end{aligned} \quad (8)$$

在地平式光电跟踪系统的球谐函数系统误差修正方法中有^[3]:

$$\begin{aligned} \Delta A' \cos E &= a_0' + a_1' \sin E + a_2' \cos A \cos E + a_3' \sin A \cos E + a_4' \sin^2 E + a_5' \cos A \sin E \cos E + \\ &+ a_6' \sin A \sin E \cos E + a_7' \cos(2A) \cos^2 E + \\ &+ a_8' \sin(2A) \cos^2 E + a_9' \sin^3 E + \\ &+ a_{10}' \cos A \sin^2 E \cos E + a_{11}' \sin A \sin^2 E \cos E + \\ &+ a_{12}' \cos(2A) \cos^2 E \sin E, \end{aligned} \quad (9)$$

当式(9)取 $E=0$ 时, $\Delta A'$ 是 A 的函数。由式(8)可知, $\Delta E_{A'}$ 和 $\Delta G_{A'}$ 也是 A 的函数。因此有:

$$\begin{aligned} E + \Delta E_{A'} &= F_E(A + \Delta A') = \\ &= F_E(A_0') = F_E'(A), \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} G + \Delta G_{A'} &= F_G(A + \Delta A') = \\ &= F_G(A_0') = F_G'(A), \end{aligned} \quad (11)$$

同理, $\Delta E_{A'}$ 和 $\Delta G_{A'}$ 也是 A 的函数。即:

$$\Delta E' = F_{\Delta E'}(A, E, G), \quad (12)$$

$$\Delta G' = F_{\Delta G'}(A, E, G), \quad (13)$$

$$\Delta E = F_{\Delta E}(A, E, G), \quad (14)$$

$$\Delta G = F_{\Delta G}(A, E, G). \quad (15)$$

三轴光电跟踪系统的引导过程为:

$$\begin{cases} A = A \\ E = E_0'(A) + \Delta E = F_{EE}(A, A_0, E_0) \\ G = G_0'(A) + \Delta G = F_{GG}(A, A_0, E_0), \end{cases} \quad (16)$$

轨道测量过程为:

$$\begin{cases} A_0 = F_{A_0}(A, E, G) \\ E_0 = F_{E_0}(A, E, G). \end{cases} \quad (17)$$

由式(16)、(17)可得偏三轴光电跟踪系统神经网络修正系统误差的原理,如图 6、7 所示。

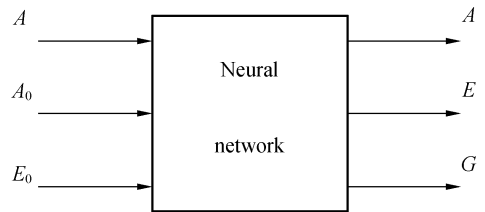


图 6 神经网络在引导中修正系统误差的原理

Fig. 6 Principle of neural network system error modification during instruction

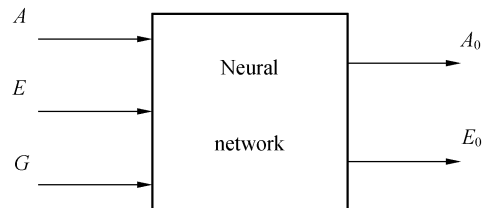


图 7 神经网络在轨道测量中修正系统误差的原理
Fig. 7 Principle of neural network system error modification during measurement

4 引导过程中系统误差修正仿真^[4]

用第一组测星数据(包括 A、E、G,在方位方向比较均匀地取四个方位值)训练网络,用第二组测星数据进行验证。

仿真表明:采用 16 个隐层神经元、训练 2 000 次、训练指标为 3×10^{-6} 的 BP 神经网络,对该系统的系统误差有较高的修正精度。

验证时,当 $Z=140^\circ$ 时,修正前后的误差曲线如图 8 所示,修正前后误差的均方差为:

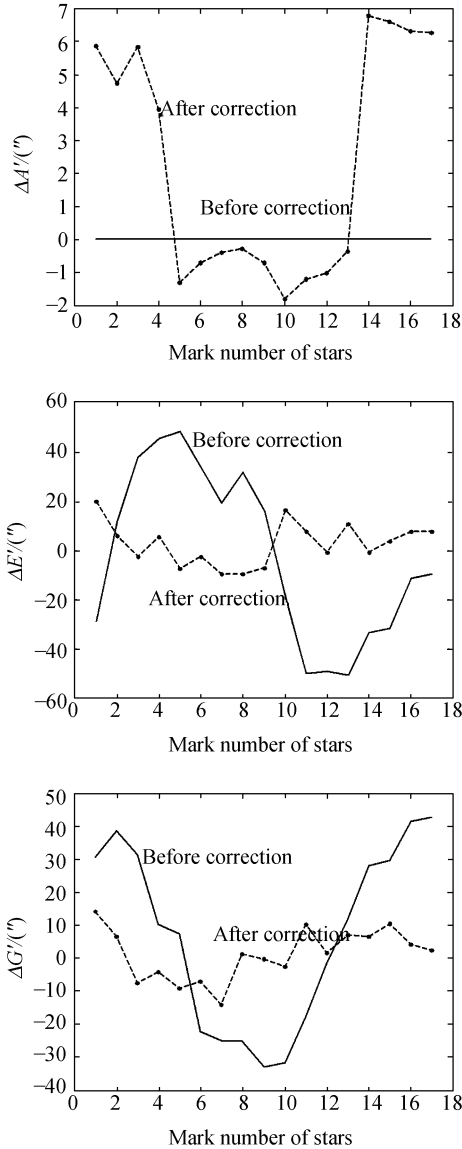


图 8 神经网络法修正系统误差($A=140^\circ$)

Fig. 8 System errors modified by neural network method ($A=140^\circ$)

$$\delta_{\Delta A'}=0'', \delta_{\Delta E'}=34.146'', \delta_{\Delta G'}=27.269'', V_{\Delta A'}=4.078'', V_{\Delta E'}=8.871'', V_{\Delta G'}=7.650'', \delta_{\text{总}}=44.029'', V_{\text{总}}=12.403''.$$

当 $Z=150^\circ$ 时,修正前后的误差曲线如图 9 所示,修正前后误差的均方差为:

$$\delta_{\Delta A'}=0'', \delta_{\Delta E'}=34.921'', \delta_{\Delta G'}=27.344'', V_{\Delta A'}=3.692'', V_{\Delta E'}=8.155'', V_{\Delta G'}=8.438'', \delta_{\text{总}}=44.386'', V_{\text{总}}=12.385''.$$

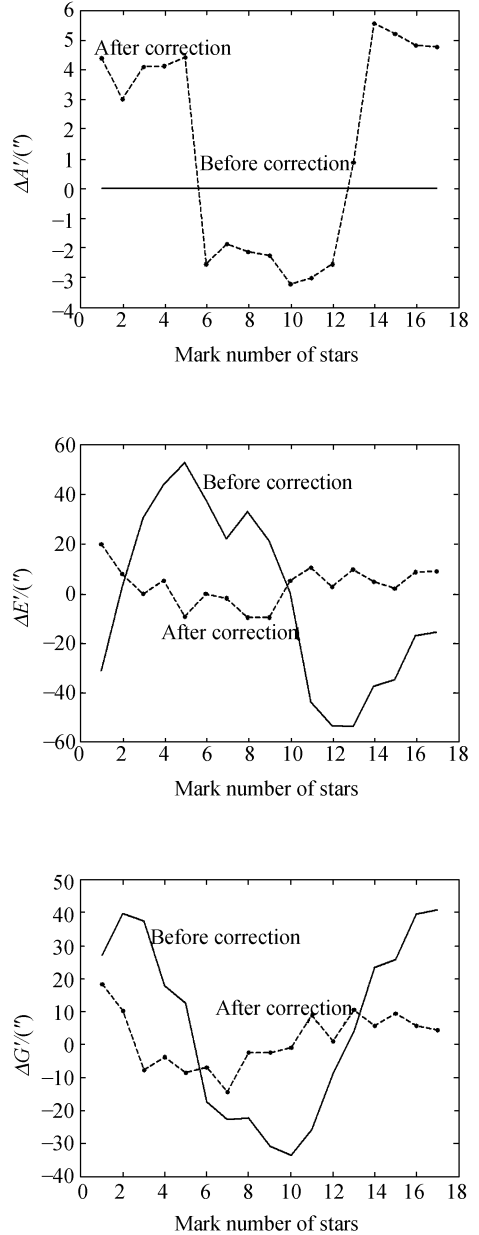


图 9 神经网络法修正系统误差($A=150^\circ$)

Fig. 9 System errors modified by neural network method ($A=150^\circ$)

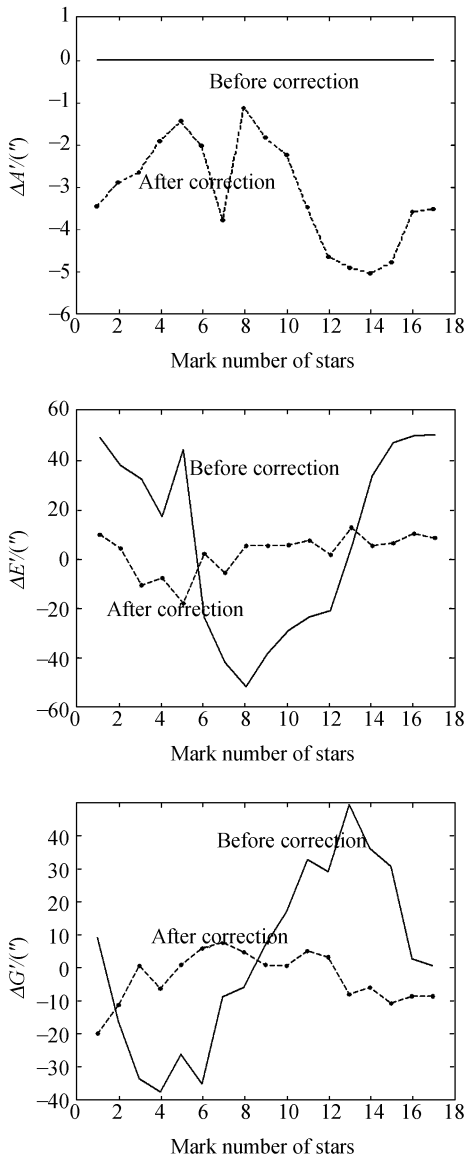


图 10 神经网络法修正系统误差(A=50°)

Fig. 10 System errors modified by neural network method (A=50°)

当 Z=50°时,修正前后的误差曲线如图 10 所示,修正前后误差的均方差为:

$$\delta_{\Delta A'} = 0'', \delta_{\Delta E'} = 37.083'', \delta_{\Delta G'} = 26.376'', V_{\Delta A'} = 3.367'', V_{\Delta E'} = 8.218'', V_{\Delta G'} = 8.060'', \delta_{\Delta_{\text{总}}} = 45.257'', V_{\Delta_{\text{总}}} = 11.993''.$$

由表 1 可以看出:在不同方位测量多组(A, E,G)作为神经网络的训练样本时,训练好的神经网络可以实现三轴光电跟踪系统在任意方位方向上较高精度的系统误差修正,在训练样本足够且均匀分布在空间时,神经网络系统误差修正方法可实现对偏三轴光电跟踪系统的连续修正。

由于神经网络学习的过程也是寻优的过程,所以同样的神经网络结构用同样的学习样本存在收敛和不收敛的情况,每次收敛时与所拟合曲面的逼近程度也有所不同。本文仿真中,为了保证每次学习训练后神经网络的系统误差修正精度不 < 25%,要求在样本点网络输出的均方根 < 5 × 10⁻⁶。由图 6 和式(16)可以看出,理论上可以看作 Z 轴不存在系统误差,实际中 Z 轴的系统误差可归结为 X 轴与 Y 轴的系统误差,所以不必修正 Z 轴的测量值 A,只要修正 X 轴与 Y 轴的 E 与 G 即可,但由于拟合误差的存在,同时为了保证学习时网络的收敛性能,神经网络输出的 A 值与输入的 A 值之间不是相等而是存在很小的差值,即需要同时对 Z 轴、X 轴与 Y 轴进行修正。

表 1 神经网络法修正系统误差

Tab. 1 System errors modified by neural network method

Z 轴方位角	50°		140°		150°	
神经网络法	修正前	修正后	修正前	修正后	修正前	修正后
多组方位值/(")	45.257	11.993	44.029	12.403	44.386	12.385
修正后占修正前百分比	26.5%		28.2%		27.9%	

5 结 论

以上分析和仿真表明:具有较高修正精度的球谐函数系统误差修正法不能应用于 Z 轴连续转动的三轴光电跟踪系统;由于最小二乘系统误

差修正法与球谐函数系统误差修正法或神经网络系统误差修正法相比精度较差^[3,5],因此到目前为止,神经网络系统误差修正法是对三轴光电跟踪系统具有较高修正精度的系统误差修正方法的唯一选择。

参考文献:

- [1] 刘兴法,马佳光,刘顺发,等. 视轴偏角对三轴光电跟踪系统跟踪过程的影响[J]. 光电工程,2005,32(5):4-9.
LIU X F, MA J G, LIU SH F, *et al.*. Effect of declination angle of sight axis on three-axis photoelectric tracking system[J]. *Opto-Electronic Eng.*, 2005, 32(5):4-9. (in Chinese)
- [2] 潘忠诚. 数学物理方法教程[M]. 国防工业出版社,1993.
PAN ZH CH. *Math and Physics Methods Tutorial*[M]. National Defence Industry Press, 1993. (in Chinese)
- [3] 刘兴法,马佳光,徐智勇,等. 神经网络在光电跟踪系统引导中的应用[J]. 光电工程,2006,33(8):1-4.
LIU X F, MA J G, XU ZH Y, *et al.*. Application of neural network in leading of photoelectric tracking system [J]. *Opto-Electronic Eng.*, 2006, 33(8):1-4. (in Chinese)
- [4] 许东,吴铮. 基于 MATLAB6. x 的系统分析与设计[M]. 西安电子科技大学出版社,1998.
XU D, WU ZH. *System Analysis and Design from MATLAB 6. x*[M]. Xi'an Xi Dian Press, 1998.
- [5] 徐智勇,袁家虎,黄祖华,等. 精确修正光电经纬仪中的系统误差方法研究[J]. 光电工程,1998,25:55-58.
XU ZH Y, YUAN J H, HUANG Z H, *et al.*. Method study on accurately correction of the system errors of the photoelectric theodolite[J]. *Opto-Electronic Eng.*, 1998, 25:55-58. (in Chinese)

作者简介:刘兴法(1975—),男,山东聊城人,中国科学院光电技术研究所博士,主要从事光电跟踪技术的研究。E-mail: lxffxl666@126.com

马佳光(1941—),男,辽宁沈阳人,中国科学院光电技术研究所研究员,博士生导师,主要从事光电跟踪技术的研究。E-mail: majiaguang@ioe.ac.cn