文章编号 1004-924X(2021)07-1511-07

空间目标光度测量的消光修正拟合

满 意^{1,2},杨轻云^{1*},陈 涛¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:为了提高光度测量的精度进而提高反演空间目标的姿态、形状等特性的准确率,提出了消光修正拟合的光度测量 方法。传统的光度测量是利用一些已知星等恒星的灰度值计算零等星灰度值,然后再通过待测目标的灰度值计算出待 测目标的星等值,在此过程中加入经典大气消光模型所带来的影响。先是利用实测数据对光度测量计算过程中的消光 修正进行拟合,充分考虑实际测量时大气消光所带来的影响,获取更符合实际情况的光度测量数据。然后,在零等星灰 度标定的过程中采取迭代的方法计算零等星灰度的均值,降低大气不稳定所带来的异常数据对于测量结果的影响。实 验结果表明:改进优化后光度测量方法的精度可以达到0.11个星等。相对于以往的光度测量方法测量精度更高,测量 结果可以更好地应用于后续的反演工作。

关 键 词:光度测量;空间目标;大气消光;迭代均值法 **中图分类号:**V556;TP391.41 **文献标识码:**A **doi**:10.37188/OPE.20212907.1511

Extinction correction fitting for photometric measurement of space targets

MAN Yi^{1,2}, YANG Qing-yun^{1*}, CHEN Tao¹

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

* Corresponding author, E-mail: yangqingyun@ciomp. ac. cn

Abstract: To improve the accuracy of photometric measurements and the attitude and shape inversion of space targets, a photometric measurement method entailing extinction coefficient fitting was proposed based on existing measurement methods. In conventional photometric measurement methods, the gray value corresponding to a "0" magnitude was calculated using the gray values of stars whose magnitude was known; then, the magnitude of targets was calculated using their gray values while considering the effect of atmospheric extinction. In this study, more accurate photometric measurement data was obtained using the extinction-correction fitting method, based on actual measured data. Then, to reduce the impact of anomalous data due to atmospheric instabilities, the method of obtaining the iteration mean was used for calibrating the gray value corresponding to 0 magnitude. Experimental results indicate that the error of the improved photometric measurement method is approximately 0.11 magnitude. Compared with previous

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金资助项目(No.11703026)

收稿日期:2020-11-23;修订日期:2021-02-01.

photometric measurement methods, this improved photometric measurement method has a higher degree of precision, and the measured results can be better applied to subsequent inversion work.

Key words: photometric measurement; space objective; atmospheric extinction; iteration mean method

1引言

随着航空航天技术的飞速发展,大量的航天 设备被送上太空,用于通信、遥感、导航等方 面^[1-5]。与此同时,空间碎片等太空垃圾的数量也 随之急剧增加,它们可能会对在轨航天器造成不 可估量的影响,因此空间目标的监测及管理对于 太空安全非常重要,成为了目前的研究热点^[6]。 在监管监测过程中,空间目标探测系统可以确定 目标的尺寸和形状等目标特性,并对空间目标进 行分类^[7]。然而,对于中高轨目标,难以直接通过 高分辨率成像获取目标信息,这时可以通过地基 光学系统追踪中高轨道目标,从而获取其光度信 息^[8]。通过光度测量得到基于时间序列和基于相 位角序列的光度曲线,用于反演目标的形状和 姿态^[9-10]。

目前,CCD是获取空间目标光度信息的主要 手段。基于CCD测量星等的方法主要有对比法 和标定法^[11-12]。对比法是将在同一高角、背景以 及仰角下获取的待测目标的图像和已知星等目 标的图像进行灰度级对比,从而获取待测目标的 星等。此方法每次测量都需要一个对比目标,计 算复杂且无法同时测量多个目标。标定法是利 用多颗不同方位和仰角的已知星等的恒星标定 出标准零等星的灰度值,再将待测目标的灰度值 与标准零等星的灰度值进行对比,从而获取待测 目标的星等。此方法无需对比目标,可以同时测 量多个目标,是目前常用的方法。

起初的光度测量方法没有考虑大气消光所 产生的影响,最终计算结果的测量误差相对较 大。后来考虑大气消光的影响,利用经典的大气 透过率公式计算大气消光的星等,采用修正后的 星等数据进行计算,得到的测量精度较之前有了 一定的提高^[13]。但经典的大气透过率公式是在 一个理想环境下得到的公式,并不能很好地体现 实际的大气环境状况,大气透过率会受海拔等各 方面因素的影响^[14]。同时,上述方法在计算标准 零等星灰度值时都是采用算术平均值的方法,无 法有效地降低大气不稳定所带来的异常数据对最终计算结果的影响。

本文基于以往的CCD光度测量方法,利用 实际测量数据对计算过程中的消光修正进行拟 合,同时改进计算标准零等星灰度值的方法,采 用迭代求均值的方法替换算术平均值的方法^[15]。 改进后的算法提高了测量精度,计算结果更适用 于反演目标的形状和姿态。

2 测量原理

2.1 空间目标星等测量

空间目标反射太阳光产生亮度值,在天文学 上用星等衡量空间目标的光度,规定1等星的亮 度是6等星的100倍^[16]。当参考星为零等星时, 未知星等的星A的星等值*m*。可以表示为:

$$m_a = \sqrt[5]{100} \times \lg(G_0/G_a),$$
 (1)

式中:G₀为零等星的灰度值,G_a为未知星等星A的灰度值。

由式(1)可知,在已知星A灰度值的情况下, 只需知道零等星的灰度值就可以计算得到星A 的星等值。计算零等星灰度值的公式为:

$$G_0 = G_a \times 10^{m_a/\sqrt[8]{100}}.$$
 (2)

选取已知星等和灰度值的星即可通过式(2) 计算出其相应的零等星的灰度值,选取多颗不同 方位和不同仰角的恒星即可标定出标准零等星 的灰度值。

2.2 经典大气消光模型

大气消光是指大气对辐射能量产生了折射、 吸收和散射,导致光辐射强度衰减,因此在空间 目标的光度测量过程中会产生误差。天顶角越 大,辐射穿过的大气层越厚,大气消光所带来的 影响就越大,经典的大气透过率公式为^[13]:

$$\tau_z = \tau_0^{[\cos z + 0.150(93.885 - z)^{-1.253}]^{-1}}, \qquad (3)$$

其中: τ_0 = 0.7355,为在可见光范围内的垂直大 气透过率,z 为取弧度值的天顶角。消光星等 x_g 的计算公式为:

$$x_{g} = -\sqrt[5]{100} \times \log(\tau_{z}/\tau_{0}).$$
 (4)

因此在考虑经典大气消光后,计算星A的星等值*m*_a的公式可以改进为:

$$m_a = \sqrt[5]{100} \times \lg \frac{G_0 \tau_0}{G_a \tau_z}.$$
 (5)

计算零等星灰度值G。的公式改进为:

$$G_0 = G_a \times 10^{m_a/\sqrt[5]{100}} \times \frac{\tau_z}{\tau_0}.$$
 (6)

将 τ_z/τ₀记为消光修正系数 τ,其计算公式为:

$$\tau = \frac{G_0}{G_a \times 10^{m_a/\sqrt[6]{100}}}.$$
(7)

3 迭代法标定标准零等星灰度值

在测量空间目标星等的过程中,标准零等星 灰度值是否准确很大程度上决定最终结果是否 准确。标定标准零等星灰度值通常采取的方法 为多次选取不同仰角不同方位的已知星等和灰 度值的星,计算出它们各自所对应的零等星的灰度 值。然而,取算术平均值作为标准零等星的灰度 值。然而,取算术平均值的方法受不稳定大气的 影响较大,当测量的恒星的灰度值出现异常时,





标准零等星的灰度值会出现比较大的偏差。因此为了获取更加准确的标准零等星的灰度值,本 文对此过程进行改进,利用迭代法获取均值^[15]。 迭代均值法计算标准零等星灰度值的流程如图1 所示。具体步骤如下:

(1)计算零等星的灰度算术平均值X₁,同时 找到数据中的最大值X_{max},将X_{max}替换为X₁;

 (2)计算更新后的零等星的灰度算术平均值
 X₂,同时找到数据中的最小值X_{min},将X_{min}替换 为X₂;

(3)再次计算更新后的零等星的灰度值平均 值*X*₃,并转到(1)进行迭代计算,直到数据的方差 收敛为0。

4 消光修正拟合

在采用经典的大气消光公式进行计算时,由 于没有充分考虑实际环境中消光的影响,最终的 测量误差较大。本文利用实测数据拟合光度测 量过程中的消光修正系数 r,从而得到更符合实 际情况的测量数据,具体步骤如下:

(1)建立自变量为仰角E、因变量为消光修 正系数τ、多项式次数为N的拟合公式:

$$\tau = \sum_{i=0}^{N} a_i E^i. \tag{8}$$

多项式拟合次数通常不高于5,根据以往的 经验及数据验证,N=3时拟合效果最佳,因此:

 $\tau = a_0 E^3 + a_1 E^2 + a_2 E^1 + a_3. \tag{9}$

(2)选取多颗不同高角和方位、仰角为*E*、星 等为*m*_a、灰度值为*G*_a的星,利用式(2)计算出对 应的零等星的灰度值。

(3)计算步骤(2)得到的零等星的灰度平均 值,将它作为消光后的标准零等星的灰度值G₀, 然后将G₀以及步骤(2)选取的星的星等m_a和灰 度值G_a带入式(7),计算τ的值。

 (4)将选取的星的仰角 *E* 和对应计算得到的 τ值进行最小二乘拟合,从而得到多项式(9)的系数*a*₀,*a*₁,*a*₂,*a*₃,以及最终的拟合公式。

(5)将待测星的仰角带入拟合公式(9)计算 对应的r值,再通过公式(5)计算出其星等值。

5 测量结果

测量条件如表1所示。首先选取30颗不同 方位和仰角的恒星,分别采取不加消光、经典大 气消光和消光修正拟合3种消光处理方法计算出 相应零等星的灰度值,具体数据及计算结果如表 2所示。

在不同消光方法下分别采用求算术平均值 和迭代均值两种方法计算最终的标准零等星的 灰度值,计算结果如表3所示。

	从1 生 守网里示厅
Tab. 1	Magnitude measuring condition
项目	测量条件
口径/mm	300
相机	Andor DV888
波段/μm	0.4~0.8
环境	无月测光夜

耒1 昆笙测景冬件

再选取10颗不同方位和仰角的待测恒星进 行光度测量,通过式(5)计算测量星等,计算时采 用表3中的标准零等星灰度值。然后与10颗恒

消光方法的零等星灰度值计算	值计算结果
消光方法的零等星灰度值计算	值计算结

Tab. 2 Calculation result of zero magnitude's gray value with different extinction methods

序号	E/(°)	灰度值	理论星等	不加消光	经典大气消光	消光修正拟合
1	10.767 617	15 957.782 0	5.13	$1\ 798\ 757.\ 134\ 0$	6 818 904.918 1	3 107 408. 753 4
2	14.693705	7 863.919 2	5.67	1 457 602. 302 9	3 590 389.882 8	2 233 274. 134 9
3	15.947 339	9 657.880 7	5.83	2 074 349.061 8	4 657 409.599 7	$3\ 063\ 396.\ 056\ 1$
4	21.858246	$17\ 062.\ 837\ 4$	5.24	2 128 390. 208 8	3 568 519. 323 4	2 691 710.863 3
5	23.459954	499 855.758 3	1.77	2 551 788.638 7	4 056 238. 382 6	3 153 036. 318 8
6	24.755341	103 703. 570 8	3.53	2 677 896.025 6	4 098 250. 322 6	3 187 459.718 1
7	25.951428	31 029. 041 1	4.71	2 375 572.862 3	3 522 664. 311 3	2 740 492.278 4
8	28.645497	33 205. 337 2	4.61	$2\ 318\ 504.\ 245\ 1$	3 234 445.027 9	2 534 890. 911 0
9	29.020 570	75 227. 530 6	3.82	2 537 329. 135 9	3 513 061.954 0	2 764 379.681 2
10	30.615426	21 426. 631 9	5.17	$2\ 505\ 843.\ 306\ 4$	3 367 043. 394 1	2 638 278. 629 8
11	31.042 643	107 957.798 7	3.55	2 839 579.424 6	3 787 063. 647 0	2 989 577.183 3
12	34.739431	35 538. 271 7	4.75	2 822 905. 268 0	3 557 930.818 8	2 799 840. 762 9
13	36.799437	$10\ 271.\ 979\ 4$	5.97	2 509 886.853 2	3 081 583. 501 0	2 416 185. 704 9
14	37.348241	26 842.769 4	5.56	4 496 010. 552 8	5 484 615. 112 8	4 310 791.447 5
15	38.196 864	333 195. 638 3	2.37	2 955 965. 137 3	3 571 588. 249 6	2 850 089. 242 3
16	40.233728	187 884.893 4	3.23	3 680 373. 227 3	4 353 804.168 4	3 473 753. 943 4
17	42.830363	40 933. 325 1	4.60	2 831 894. 209 1	3 271 621. 287 6	$2\ 612\ 067.\ 700\ 4$
18	44.902531	$76\ 774.\ 170\ 4$	3.91	2 813 294.080 7	3 196 415. 944 5	2 577 896. 976 7
19	45.146 341	7 998.847 7	6.31	2 673 175. 246 6	3 031 620. 835 3	2 421 549. 302 7
20	47.046 556	45 528. 203 2	4.54	2 980 440. 876 2	3 334 440. 768 1	2 705 453.869 2
21	48.007714	107 577.211 3	3.60	2 962 922. 432 5	3 293 733. 864 4	2 695 301.239 1
22	50.458 926	$105\ 917.\ 237\ 1$	3.58	2 863 957. 987 8	3 136 472. 478 7	2 598 444. 513 0
23	51.006 941	49 149. 195 7	4.35	2 700 949. 195 7	2 948 801.186 4	2 441 796.828 0
24	55.258105	$106\ 564.\ 365\ 7$	3.95	$4\;051\;464.\;185\;2$	4 329 680.771 0	3 678 281. 353 7
25	57.981 523	55 177. 224 1	4.54	3 612 100. 688 4	3 815 948.037 1	3 284 170. 918 0
26	58.190744	39 579.062 3	4.65	$2\ 867\ 249.\ 604\ 4$	3 026 572.618 7	$2\ 606\ 602.\ 772\ 4$
27	63.843414	60 870. 565 3	4.28	3 136 225. 889 5	3 247 467.068 9	2 882 956. 341 0
28	68.171 524	106 885.262 8	3.60	2 943 864. 586 9	3 014 003. 740 1	2 723 872. 179 5
29	71.897251	686 285. 516 9	1.65	3 136 930.044 7	3 186 968. 362 1	2 919 125.738 1
30	72.615060	11 140. 170 6	6.05	2 930 163. 432 2	2 973 060. 833 8	2 670 653. 370 3

星的理论星等进行比较得出测量误差。利用算

表3 标准零等星灰度值计算结果

Tab. 3 Calculation result of standard "0" magnitude's gray value

0	2		
方法	不加消光	经典消光	消光修正拟合
算术均值	2 807 846.194 8	3 669 010. 680 3	2 859 091.291 0
迭代均值	2 776 688. 776 4	3 485 967.841 4	2 783 895. 783 8

术平均值计算的测量星等及误差如表4所示,利 用迭代均值计算的测量星等及误差如表5所示。

测量精度 σ为:

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} \Delta m_i^2 / (n-1)}, \qquad (10)$$

其中: Δm_i 为不同恒星对应的测量误差,n为恒星数量,计算结果如表6所示。

表4 取算术平均值时不同消光方法的光度测量结果

|--|

序号	$E/(\circ)$	灰度值	理论 星等	不加消光	测量误差	经典消光	测量误差	消光修正 拟合	测量误差
1	15.548016	4 638. 753 58	6.43	6.9549	0.524 9	6.3369	-0.0931	6.5110	0.0810
2	22.978480	11 072. 870 82	5.72	6.0102	0.2902	5.7810	0.0610	5.7794	0.0594
3	24.413441	76 425. 844 65	3.65	3.9128	0.2628	3.7308	0.0808	3.7181	0.0681
4	27.397022	51 407. 923 17	4.29	4.3433	0.0533	4.2433	-0.0467	4.2178	-0.0722
5	30.067796	19 425. 217 07	5.26	5.4000	0.1400	5.3590	0.0990	5.3288	0.0688
6	35.225329	267 977.244 1	2.65	2.5506	-0.099	2.5969	-0.0531	2.5632	-0.0868
7	41.706 191	7 788.866 093	6.32	6.3922	0.0722	6.5153	0.1953	6.4704	0.1504
8	52.568009	58 907.671 03	4.26	4.1955	-0.0645	4.3997	0.1397	4.3037	0.0437
9	56.638610	408 897.634 6	1.92	2.0918	0.1718	2.3168	0.3968	2.1955	0.2755
10	63.843414	60 870. 565 38	4.28	4.1599	-0.1201	4.4125	0.1325	4.2505	-0.0295

表5 取迭代均值时不同方法下的光度测量结果

Tab. 5 Photometric measurement result of different extinction methods using iteration mean

序号	E/(°)	灰度值	理论 星等	不加消光	测量误差	经典消光	测量误差	消光修正 拟合	测量误差
1	15.548016	4 638.753 58	6.43	6.9428	0.5128	6.2814	-0.1486	6.4821	0.0521
2	22.978480	11 072.870 82	5.72	5.9982	0.2782	5.7254	0.0054	5.7505	0.0305
3	24.413441	76 425. 844 65	3.65	3.9007	0.2507	3.6753	0.0253	3.6892	0.0392
4	27.397022	$51\ 407.\ 923\ 17$	4.29	4.3312	0.0412	4.1877	-0.1023	4.1888	-0.1012
5	30.067796	19 425. 217 07	5.26	5.3879	0.1279	5.3034	0.0434	5.2999	0.0399
6	35. 225 329	$267\ 977.\ 244\ 1$	2.65	2.5386	-0.1114	2.5413	-0.1087	2.5343	-0.1157
7	41.706191	7 788.866 093	6.32	6.3801	0.0601	6.4597	0.1397	6.4415	0.1215
8	52.568 009	58 907.671 03	4.26	4.1834	-0.0766	4.3442	0.0842	4.2748	0.0148
9	56.638610	408 897.634 6	1.92	2.0798	0.1598	2.2612	0.3412	2.166 6	0.246 6
10	63.843414	60 870. 565 38	4.28	4.1478	-0.1322	4.3569	0.0769	4.2216	-0.0584

表6 测量精度计算结

Tab.6 Ca	lculation resul	t of measurer	nent accuracy
方 法	不加消光	经典消光	消光修正拟合
算术平均值	0.2391	0.1720	0.1218
迭代均值	0.2324	0.1475	0.1103

由表6可以看出,在相同的计算均值方法下, 消光修正拟合方法的测量误差最小,精度最高; 在相同的消光处理方法下,迭代均值方法的测量 误差更小,精度更高;改进后的方法的测量精度 可以达到0.11个星等。

6 结 论

本文研究了基于 CCD 的空间目标光度测量 的方法,针对空间目标监测中的光度测量算法进 行改进和优化。首先介绍了光度测量的基本原 理以及经典大气消光模型,然后分析了传统方法 存在的问题并提出了消光修正拟合方法。同时,

参考文献:

- [1] 宋奕辰,徐小涛,宋文婷.国内外卫星移动通信系 统发展现状综述[J]. 电信快报,2019(8):37-41.
 SONG Y CH, XU X T, SONG W T. Overview of the development of satellite mobile communication systems at home and abroad [J]. *Telecommunications Information*, 2019(8): 37-41. (in Chinese)
- [2] 田大鵰, 邵晓鹏. 航空光学成像与测量技术新进展
 [J]. 光学 精密工程, 2020, 28(6): 1221-1225.
 TIAN D P, SHAO X P. New emerging technologies in airborne optical imaging and measurement
 [J]. Optics and Precision Engineering, 2020, 28
 (6): 1221-1225. (in Chinese)
- [3] 刘艳亮,张海平,徐彦田,等.全球卫星导航系统的现状与进展[J].导航定位学报,2019,7(1):18-21,27.

LIU Y L, ZHANG H P, XU Y T, *et al.* Development status and trend of global navigation satellite system[J]. *Journal of Navigation and Positioning*, 2019, 7(1): 18-21, 27. (in Chinese)

- [4] WANG Y, DU X P. Big data analysis of the relevance of shape and function of global geostationary satellites [C]. Proceedings of 2017 IEEE 8th International Conference on Software Engineering and Service Science, IEEE, 2017:183-186
- [5] 高世杰,吴佳彬,刘永凯,等.微小卫星激光通信
 系统发展现状与趋势[J].中国光学,2020,13
 (6):1171-1181.

GAO SH J, WU J B, LIU Y K, *et al.* Development status and trend of micro-satellite laser communication systems[J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(6): 1171-1181. (in Chinese)

 [6] 李宗凌,汪路元,禹霁阳,等.空间碎片目标在轨 实时监测处理方法[J]. 航天器工程,2019,28
 (6):58-64.

LIZL, WANGLY, YUJY, *et al.* On-orbit real time monitoring and processing method for space de-

采用迭代法替代算术平均法计算标准零等星的 灰度值。最后,选取30颗不同方位和仰角的恒星 计算标准零等星的灰度值,再选取10颗不同方位 和仰角的恒星计算测量精度。实验结果表明:优 化后的光度测量算法的精度可以达到0.11个星 等,与之前算法相比测量精度更高,可为后续的 姿态形状反演提供更准确的数据。

bris target [J]. *Spacecraft Engineering*, 2019, 28 (6): 58-64. (in Chinese)

- [7] LINARES R, FURFARO R, REDDY V. Space objects classification via light-curve measurements using deep convolutional neural networks [J]. *The Journal of the Astronautical Sciences*, 2020, 67(3): 1063-1091.
- [8] 高扬,赵金宇,刘俊池,等.中高轨道目标的地基 光电监视[J]. 光学精密工程,2017,25(10): 2584-2590.
 GAO Y, ZHAO J Y, LIU J CH, et al. Groundbased photoelectric surveillance for mid-high orbit target[J]. Optics and Precision Engineering, 2017, 25(10): 2584-2590. (in Chinese)
- [9] 荆楠,李创,钟培峰,等.光度数据反演临近空间 低速点目标形状尺寸信息[J].光学精密工程, 2017,25(7):1738-1747.
 JING N, LI CH, ZHONG P F, et al. Inversion of low dynamic vehicle shape and dimension information using non-resolved photometric data in near space[J]. Optics and Precision Engineering, 2017, 25(7):1738-1747. (in Chinese)
- [10] CAPUANO V, KIM K, HARVARD A, et al. Monocular-based pose determination of uncooperative space objects [J]. Acta Astronautica, 2020, 166: 493-506.
- [11] 续敏, 王建立, 王建军. 实时比对法用于卫星星
 等测量及其精度评估[J]. 光学技术, 2007, 33
 (3): 473-475.
 XU M, WANG J L, WANG J J. Application of

real time comparison to measuring satellite magnitude and it's precision evaluating[J]. *Optical Technique*, 2007, 33(3): 473-475. (in Chinese)

[12] 魏敏,陈海宁,叶斌,等.用CCD进行空间目标 光度测量方法的研究[C].第十九届测控、计量、 仪器仪表学术年会(MCMI'2009)论文集.桂林, 2009:429-431.
WEIM, CHENHN, YEB, et al. Photometric measurement methods of space targets use CCD [C]. Proceedings of the 19th Annual Conference on Measurement and Control, Measurement, Instrumentation, MCMI, 2009: 424-426. (in Chinese)

- [13] 魏敏,魏维.基于 CCD 的空间目标光度测量方法 研究[J].半导体光电,2012,33(5):752-755.
 WEI M, WEI W. Research on photometric measurement of space targets using CCD[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2012, 33(5):752-755. (in Chinese)
- [14] 王飞翔,郭杰,许方字,等.不同海拔地区红外大 气透过率的计算和测量[J].中国光学,2019,12
 (4):844-853.
 WANG F X, GUO J, XU F Y, et al. Calculation and measurement of infrared atmospheric transmittance at different altitudes [J]. Chinese Optics,

作者简介:



満 意(1993-),男,吉林龙井人,博 士研究生,2016年于吉林大学获得学 士学位,主要从事红外图像处理及目 标检测与跟踪方面的研究。E-mail: manyi18@mails.ucas.ac.cn 2019, 12(4): 844-853. (in Chinese)

 [15] 马昌,李密,薛文鹏.基于均值迭代法的稳态数据处理方法[J].航空科学技术,2016,27(7): 48-52.
 MA CH, LI M, XUE W P. Method of steady

MA CH, LI M, XOE W P. Method of steady state data processing based on mean iteration [J]. *Aeronautical Science & Technology*, 2016, 27 (7): 48-52. (in Chinese)

[16] 董振铭.恒星视星等的影响因素分析和其在天文 仪器上的应用[J].内蒙古科技与经济,2019 (24):74-76.

> DONG ZH M. Analysis of the influencing factors of stellar apparent magnitude and its application in astronomical instruments [J]. *Inner Mongolia Science Technology & Economy*, 2019(24): 74-76. (in Chinese)

通讯作者:



杨轻云(1977一),男,湖南邵东人,博 士,研究员,2000年于南方冶金学院获 得学士学位,2003年、2006年于吉林 大学分别获得硕士、博士学位,主要从 事大型望远镜设备控制软件设计、图 像处理及数据分析等工作。E-mail: yangqingyun@ciomp.ac.cn