

文章编号 1004-924X(2010)10-2143-07

红外热像仪外场测温的大气透过率二次标定

李云红, 张 龙, 王延年

(西安工程大学 电子信息学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 为了实现测温红外热像仪的外场精确测温, 研究了大气透过率的二次标定。建立了红外热像仪的外场远距离测温标定模型, 采用一个标准面源黑体和红外热像仪对大气透过率进行了二次标定。首先, 用标准面源黑体的设置温度标定大气透过率的二次修正系数; 然后, 在已知目标感兴趣区域发射率的情况下, 用二次修正系数对未知辐射源测量值进行修正, 实现未知辐射源目标辐射温度的准确测量。实验显示, 随黑体设置温度从 50 °C 不断升高(二次大气透过率近似为 1), 大气二次透过率修正系数在 50~100 °C 内迅速下降, 在 100~200 °C 内下降趋势减缓, 逐渐接近于约为 0.7 的常数。实验结果为测温红外热像仪外场精确测温提供了保证。

关键词: 红外热像仪; 外场测温; 面源黑体; 大气透过率; 二次标定

中图分类号: TN216 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20101810.2143

Second calibration of atmospheric transmission coefficients on temperature measurement of infrared thermal imager in fields

LI Yun-hong, ZHANG Long, WANG Yan-nian

(School of Electronics & Information, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China)

Abstract: To achieve the accurate temperature measurement in fields by infrared thermal imagers, the second calibration of atmospheric transmission was researched. A calibrating model for temperature measurement by infrared thermal imagers in a far distance was established, and an infrared thermal imager and a standard expanded area blackbody were used to do the second calibration of atmospheric transmission. Firstly, the setting temperature of the standard blackbody was used to calibrate the secondary calibration coefficient of atmospheric transmission. Then, assuming the emissivity of interested area of a object to be known, the secondary calibration coefficient was used to calibrate the measuring values of a unknown radiation object and to implement the accurate measurement of radiation temperature of the radiation object. Experiments show that as the setting temperature for the blackbody increases from 50 °C (the second atmospheric transmission is approximately equal to 1), the second calibration coefficient of the atmospheric transmission decreases rapidly in the temperature of 50~100 °C, and decreases more and more slowly in the range of 100~200 °C. Gradually, it is close to a constant value 0.7. These results can provide references for the accurate temperature measurement by in-

收稿日期: 2010-02-05; **修订日期:** 2010-05-10.

基金项目: 中国纺织工业协会科技指导性项目 (No. 2008012); 陕西省自然科学基金资助项目 (No. 2009JQ8022); 陕西省教育厅自然科学基金资助项目 (No. 09JK468; No. 10JK571); 西安工程大学 2009 年度校基础研究基金资助项目 (No. 09XG06)

frared thermal imagers in fields.

Key words: infrared thermal imager; temperature measurement in field; expanded area blackbody; atmospheric transmission coefficient; second calibration

1 引言

红外热像仪是响应红外目标辐射温度的仪器设备,除广泛应用于侦察、目标搜索、火控、航空等军事领域外,还广泛应用于电力、环境、工业、医疗等民用领域。其中,民用领域最重要的一个应用就是测量未知目标的辐射温度。利用红外测温热像仪在较远处对辐射目标进行温度测量时,其测量结果与辐射目标的辐射温度估计值会出现较大的偏差,且随着温度的升高,偏差有逐渐增大的趋势。实验分析认为其原因在于:测温热像仪在进行出厂标定时,都是在实验室和近距离条件下进行的^[1],因此其内部附带的目标辐射特性(目标辐射率)和大气(标准大气)透过率参数修正软件都仅仅适用于一些特定条件,而测温热像仪的一些使用部门往往是在复杂的气象条件和较远的距离下对复杂目标进行测量,测试结果虽经内部附带软件的修正,但其测试结果仍与真实结果之间存在极大的差距。研究认为,在对未知目标辐射源的真实温度进行标定时,必须对测温系统和待测辐射源目标在相同环境、相同距离条件下进行标定,即对大气透过率参数做二次修正,使用二次修正正常数才能得出目标的真实辐射温度。

王忆锋等用 MATLAB 对不同气象条件下我国各地区 8~12 μm 波段的 LOWTRAN 大气透过率数据进行了拟合,并给出了相应的多项式拟合系数^[2]。陈秀红等开发了一套 CART 软件,供从事大气遥感、目标辐射测量和红外工程设计与性能评估等方面的人员使用,并实验验证了该软件计算结果的可靠性^[3-4]。毛峡等建立了一种大气传输衰减简易计算模型并给出了其与 Lowtran7 的计算结果对比图^[5]。赵军等讨论了野外远场测量中红外辐射大气透过率的修正^[6]。何贤强等分析了中国第一颗海洋水色卫星(HY-1A)大气漫射透过率模型的计算精度^[7-8]。吴荣华等采用自主研发的激光遥感大气透过率测量仪并利用激光大气透过率多点断层测量技术,实测了

1 060 nm处激光的大气透过率,同步实时反演计算了临近波长红外辐射的大气透过率^[9]。周国辉等从分析红外辐射在大气中传播的影响因素出发,分别给出大气吸收、大气散射和气象衰减的衰减系数,并计算出倾斜路程的海平面水平等效路程,给出了一种计算红外大气透过率的数学模型^[10]。吴晗平进行了红外辐射大气透过率的工程理论计算方法研究^[11]。

本文对红外测温热像仪的外场远距离测温进行了研究,建立了红外热像仪外场精确测温方法,提出了大气透过率的二次标定方法,利用二次修正系数对未知辐射源测量值进行修正,便能准确测量出未知辐射源目标的辐射温度。该方法为红外热像仪的精确测温提供了理论依据。

2 测温红外热像仪标定原理

红外热像仪测温是绝对不准的,但是发现其测量相对温差的能力却是一流的,所以红外热像仪主要用于分辨目标景物温差,但民用部门则主要用来测量目标辐射绝对温度。测温红外热像仪制造部门在对出厂的测温系统进行标定时,通常在实验室或生产车间中,在理想距离下用黑体(或灰体)进行标定,其标定理论模型如式(1)所示。

$$M = \tau_a \epsilon \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \lambda T^4 d\lambda, \quad (1)$$

$$\tau_a = e^{-\sigma_0 R}, \quad (2)$$

式中, σ_0 是以 km^{-1} 为单位的整个光谱的衰减系数; R 是以 km 为单位的距离。

$$\sigma_0 = \sigma_a + \sigma_r + \sigma_s + \sigma_d, \quad (3)$$

式中, a 代表吸收(分子吸收占主要地位,包含了气体介质与气溶胶分布导致的吸收与散射); r 代表反射; s 代表散射; d 代表衍射。在实验室用标准黑体标定时, $\tau_a \approx 1$ 。

其标定过程是:首先将标定过的黑体设置在某一特定温度下,并使目标源辐射孔径和待标定系统接收孔径处在相同的水平面上。待黑体温度稳定后,对待标定测温热像系统进行聚焦,并在待

测系统中设定目标发射率、背景温度、大气温度的、大气湿度和测试距离等参数。最后,在待测系统的视窗界面上选定感兴趣的区域,此时视窗界面上显示的温度即为待测系统测定目标的真实辐射温度,将视窗界面上显示的温度与黑体设定的温度进行比较,即可完成测温红外热像仪的标定。

3 红外热像仪外场精确测温原理

影响红外热像仪测温的因素很多,对已知红外目标辐射源发射率但不能实现接触式测量且属高危的辐射目标进行温度测量时,测温红外热像仪和系统操作员必须处在安全距离范围内,而国

内外测温热像仪制造商都对软件进行了加密处理,只需要在视窗界面内输入环境参量,在软件内部用集聚法或 LOWTRAN 法计算大气透过率,并对测温系统进行聚焦即可完成自动测量,其测温原理如图 1 所示。图中假定待测辐射源辐射面积为 A_s ,辐射源与光学系统的距离为 R_1 ,红外测温系统入射孔径面积为 A_o ,光学系统到像面的距离为 R_2 ,辐射源像面积为 A_1 ,探测元面积为 A_d ,则测温系统输出的电压响应 V_{SYS} 可由式(4)所示。

$$V_{SYS} = G \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R(\lambda) \frac{\pi}{4} \frac{L_e A_d}{(f/\#)^2 (1+M)^2} \tau_{SYS}(\lambda) \tau_{ATM}(\lambda) d\lambda \quad (4)$$

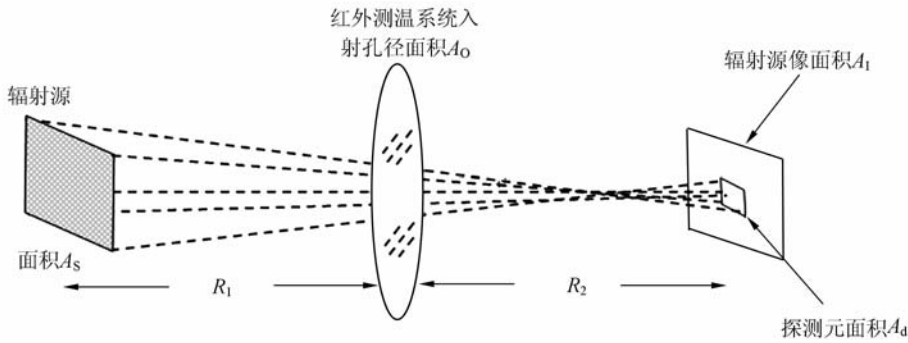


图 1 直接看红外辐射源的红外成像系统

Fig. 1 Infrared imaging system directly for viewing a source

式中, G 为系统增益设置, $R(\lambda)$ 为红外测温系统响应度, L_e 为待测目标的光谱响应度, $f/\#$ 为光学系统 F 数, τ_{SYS} 为测温系统透过率, τ_{ATM} 为大气透过率, $M=R_1/R_2$ 是放大系数,且 R_1 和 R_2 与系统焦距 f_{SYS} 相关。

$$\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} = \frac{1}{f_{SYS}} \quad (5)$$

式(4)和(5)说明,测温系统输出和辐射目标特性、测温系统本身特性和辐射源到测试系统之间的大气特性相关,若目标辐射特性和测温系统特性确定(测试和标定过程都保持同一特性),那么,得到的测温结果就仅仅和测温系统到辐射源之间介质的大气特性相关。显而易见,除大气温度、湿度、背景温度和距离影响大气透过率外,大气质量、风速、气压和大气化学组成等参量也在很大程度上影响大气透过率,因此,为了准确测量远距离目标辐射温度,必须对真实大气透过率进行准确的二

次标定。在这种情况下,依靠数学模型完成对大气透过率的模拟不是一件特别容易的事,但可设计一种简单的实验来完成大气积分透过率的二次标定,最终完成红外目标源辐射温度的测量,其温度测量原理流程如图 2 所示。

首先选择一个标定过的面源黑体(或灰体),将黑体放置在和待测目标相同的位置处,并对其温度进行设定(设定温度可由待测目标的辐射特性做出估算);然后,依靠红外测温热像仪本身的参数设置表测量出被测黑体的示值温度,调节红外热像仪参数设置表的透过率修正值栏,直至黑体的示值温度与黑体的设置温度相同,此时修正栏中的大气透过率修正值即为大气透过率的二次标定值。在和标定二次大气透过率相同距离下测量未知辐射源的辐射温度时,只需将辅助仪表的测量值(如温度、距离和大气湿度等)再次输入到测温热像仪的参数设置表中,并输入测量感兴趣

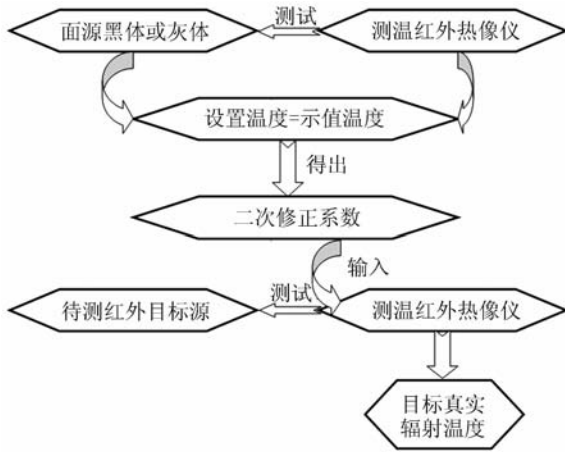


图 2 外场温度标定原理流程图

Fig. 2 Flow chart of testing temperature in field

区域的发射率系数和大气透过率的二次标定值,这时测温热像仪的输出显示视窗上显示的温度就是感兴趣区域的真实温度。

4 大气透过率二次标定系数实验分析

为了验证建立的外场精确测温方法的正确性,选取了一台经过标定的辐射口径为 $10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$,温度为 $50 \sim 600\text{ }^\circ\text{C}$,长期稳定性为 $0.1\text{ }^\circ\text{C}$,均匀性 ≥ 0.98 ,发射率为 0.93 的黑体(或灰体)作为红外目标辐射源,美国 FLIR 公司生产的 SC3000 测温红外热像仪作为标定对象进行了大气透过率二次标定系数实验,该型号热像仪安装了 2.5° 的远距离视场镜头,可测温度为 $-80 \sim 1\ 500\text{ }^\circ\text{C}$ (可根据不同的测温范围选取不同的测温档),温度灵敏度 $\leq 30\text{ mK}$ 。测试条件如表 1 所示。

表 1 测试条件

Tab. 1 Testing conditions

大气温度	背景温度	大气湿度	风
/ $^\circ\text{C}$	/ $^\circ\text{C}$	/%	
36	36	55%	微风

大气透过率二次修正实验中,分别将黑体温度设置在 $50, 100, 150$ 和 $200\text{ }^\circ\text{C}$ 4 个不同的温度下,对黑体进行了 $50, 60, 70, 80$ 和 90 m 共 5 个不同距离的移动,测试和二次修正结果如表 2 所示。

表 2 大气透过率二次修正测试结果

Tab. 2 Results of second calibration for atmospheric transmission

测试距离 /m	设置温度 / $^\circ\text{C}$	实测温度 / $^\circ\text{C}$	计算大气透过率	修正大气透过率	总修正大气透过率
50	50	49.3	0.92	0.92	0.85
	100	89.5	0.92	0.72	0.66
	150	129.8	0.92	0.69	0.63
	200	166.7	0.92	0.70	0.64
	50	50.2	0.91	0.91	0.83
60	100	85.6	0.91	0.71	0.65
	150	132.2	0.91	0.71	0.65
	200	167.0	0.91	0.68	0.62
70	50	50.4	0.90	0.90	0.81
	100	88.7	0.90	0.71	0.64
	150	129.1	0.90	0.68	0.61
80	200	166.7	0.90	0.67	0.60
	50	50.7	0.89	0.89	0.79
	100	90.0	0.89	0.71	0.63
	150	129.3	0.89	0.67	0.60
	200	167.5	0.89	0.66	0.59
90	50	50.3	0.89	0.89	0.79
	100	90.0	0.89	0.71	0.63
	150	130.7	0.89	0.68	0.61
200	170.5	0.89	0.69	0.62	

根据表 2 中的测试结果分别绘制了热像仪示值温度与黑体设置温度之间关系曲线、大气透过率二次修正系数与测试距离和黑体设置温度之间的关系曲线,如图 3, 4 和 5 所示。

从图 3 中可看出理想(LOWTRAN 模型可精确评估大气透过率)情况下,热像仪示值温度与黑体设置温度的斜率值应为 1,实际斜率值远小于 1,在 $50 \sim 90\text{ m}$ 距离下,其斜率值基本为一定值,约为 0.7 。这就说明,要想使用非接触式测温法准确测量未知目标源的辐射温度,除需精确知道待测目标发射率外,还必须在相同距离下对大气透过率做二次修正。

从图 4 可看出,黑体温度设置为 $50\text{ }^\circ\text{C}$,测试距离在 $50 \sim 90\text{ m}$ 之间,用 LOWTRAN 模型计算得来的透过率不经过修正就可使用,即测量值与

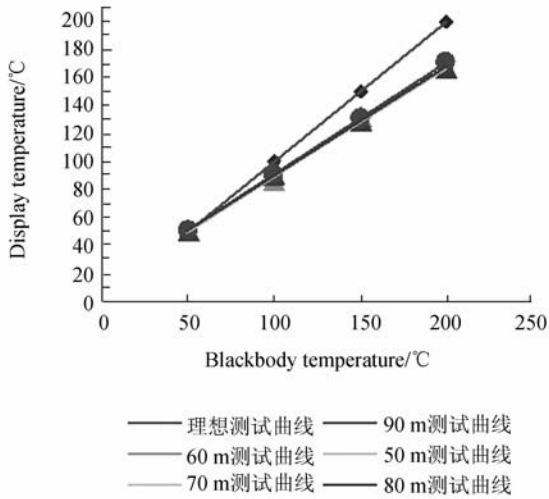


图 3 不进行二次透过率修正,热像仪示值温度与黑体设置温度关系曲线

Fig. 3 Contrastive curves between display temperature for thermal imaging system and setting temperature for blackbody before calibration of second atmospheric transmission

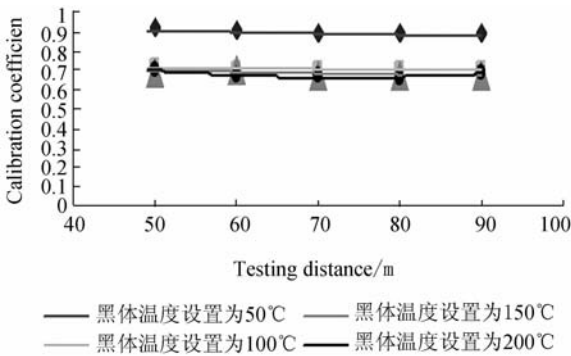


图 4 大气透过率二次修正系数与测试距离关系图

Fig. 4 Contrastive curves between second atmospheric transmission coefficient and testing distance

黑体设定值基本吻合,但随黑体设置温度的进一步升高,大气透过率必须进行二次修正;随测试距离的增大,其二次修正值的变化并不明显,仍符合用 LOWTRAN 模型模拟的变化规律,这说明对于该类测温热像仪,在被测目标温度高于 50 °C 时,要想精确知道被测目标温度,必须对测量值进行修正。

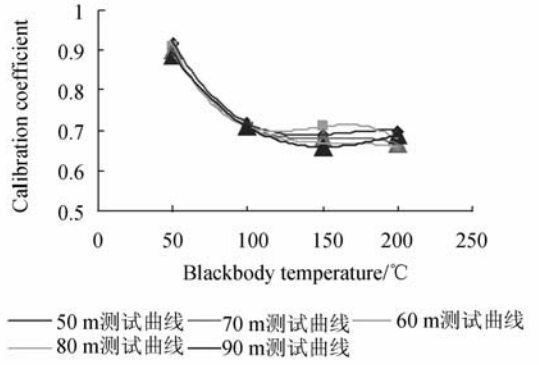


图 5 热像仪透过率修正系数与黑体设置温度间的关系曲线

Fig. 5 Contrastive curves between second atmospheric transmission coefficient and blackbody setting temperature

从图 5 中可看出,随黑体设置温度从 50 °C 不断升高(二次大气透过率近似为 1),大气二次透过率修正系数在 50~100 °C 迅速下降,在 100~200 °C 下降趋势逐渐减缓,逐渐接近于一个大概为 0.7 的常数。

5 结 论

由于在实验室环境下标定过的测温热像系统不适宜外场使用,测温系统自带软件不能很好地模拟外场复杂大气条件,要实现外场目标的准确测温,必须对测温系统和待测辐射源在目标相同环境、相同距离条件下进行标定。本文建立了红外热像仪外场精确测温方法,提出了大气透过率的二次标定方法,利用二次修正系数对未知辐射源测量值进行了修正,结果显示,随黑体设置温度从 50 °C 不断升高(二次大气透过率近似为 1),大气二次透过率修正系数在 50~100 °C 内迅速下降,在 100~200 °C 内下降趋势逐渐减缓,逐渐接近于一个大概为 0.7 的常数。这些结果可为红外热像仪精确测温提供理论依据。

参考文献:

- [1] 李云红,孙晓刚,原桂彬. 红外热像仪精确测温技术[J]. 光学精密工程, 2007, 15(9): 1336-1341.
LI Y H, SUN X G, YUAN G B. Accurate measuring temperature with infrared thermal imager[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(9): 1336-1341. (in Chinese)
- [2] 王忆锋,毛京湘. 8~12 μm 波段大气透过率的 MATLAB 多项式拟合计算[J]. 红外, 2008, 29(1): 15-19.
WANG Y F, MAO J X. Polynomial fitting calculation of atmospheric transmittance in 8~12 μm spectral band with MATLAB[J]. *Infrared*, 2008, 29(1): 15-19. (in Chinese)
- [3] 陈秀红,魏合理,吕炜煜,等. CART 软件计算的红外大气透过率和实测值比较[J]. 激光与红外, 2009, 39(4): 403-406.
CHEN X H, WEI H L, LV W Y, *et al.*. Comparison of infrared atmospheric transmittance calculated by CART software with measured values[J]. *Laser & Infrared*, 2009, 39(4): 403-406. (in Chinese)
- [4] WEI H L, CHEN X H, RAO R ZH, *et al.*. A moderate-spectral-resolution transmittance model based on fitting the line-by-line calculation[J]. *Optics Express*, 2007, 15: 8360-8370.
- [5] 毛峡,胡海勇,黄康,等. 飞机红外辐射及大气透过率计算方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2009, 35(10): 1228-1231.
MAO X, HU H Y, HUANG K. Calculation method for airplane IR radiation and atmospheric transmittance[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2009, 35(10): 1228-1231. (in Chinese).
- [6] 赵军,张建,杜翠兰. 红外辐射大气透过率修正函数[J]. 激光与红外, 2006, 36(9): 866-867.
ZHAO J, ZHANG J, DU C L. Reversible function of IR radiation atmospheric transmissivity[J]. *Laser & Infrared*, 2006, 36(9): 866-867. (in Chinese).
- [7] 何贤强,潘德炉,白雁,等. 基于辐射传输数值模型 PCOART 的大气漫射透过率精确计算[J]. 红外与毫米波学报, 2008, 27(4): 303-307.
HE X Q, PAN D L, BAI Y, *et al.*. Exact calculation of atmospheric diffuse transmittance based on radiative transfer numerical model pcoart[J]. *J. Infrared Millim. Waves*. 2008, 27(4): 303-307. (in Chinese)
- [8] HE X Q, BAI Y, PAN D, *et al.* The atmospheric correction algorithm for HY-1A/COCTS[J]. *SPIE*, 2005, 5977: 59770N1-12.
- [9] 吴荣华,王江安,任席阔,等. 空中目标红外辐射多波长大气透过率实时反演算法[J]. 强激光与粒子束, 2009, 21(11): 1650-1654.
WU R H, WANG J A, REN X CH, *et al.*. Real-time inversion algorithm of multi-wavelength atmospheric transmissivity for aerial target infrared radiation[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2009, 21(11): 1650-1654. (in Chinese).
- [10] 周国辉,刘湘伟,徐记伟. 一种计算红外辐射大气透过率的数学模型[J]. 红外技术, 2008, 30(6): 331-334.
ZHOU G H, LIU X W, XU J W. A math model of calculate the atmospheric transmittance of infrared radiation[J]. *Infrared Technology*, 2008, 30(6): 331-334. (in Chinese)
- [11] 吴晗平. 红外辐射大气透过率的工程理论计算方法研究[J]. 光学精密工程, 1998, 6(4): 35-42.
WU H P. Research into theoretical calculation method on engineering of transmittance of infrared radiation through atmosphere[J]. *Opt. Precision Eng.*, 1998, 6(4): 35-42. (in Chinese).

作者简介:



李云红(1974—),女,辽宁锦州人,博士,副教授,硕士生导师,主要从事红外热成像技术、红外热像测温技术的研究。E-mail: hitliyunhong@163.com



王延年(1963—),男,吉林东丰人,教授,硕士生导师,西安工程大学电子信息学院院长,主要从事电子信息、信号与信息处理、检测技术与自动化装置等方面的研究。E-mail: wyn11405@yahoo.com.cn



张 龙(1975—),男,陕西西安人,博士研究生,西安工程大学讲师。主要从事电子信息,信号与信息处理的研究。E-mail: zhanglong741@163.com

● 下期预告

强度调制偏振光谱仪系统设计

宋志平^{1,2},洪 津²,乔延利²

- (1. 安徽大学 物理与材料科学学院, 安徽 合肥 230039;
2. 中国科学院 通用光学定标与表征技术重点实验室, 安徽 合肥 230031)

围绕强度调制偏振光谱仪系统参数设计进行了理论分析和实验研究。介绍了强度调制偏振光谱仪的结构原理,详细分析了调制器设计、光谱仪选型与系统指标间的匹配关系。给出了一个完整的设计实例,以搭台方式建立了强度调制偏振光谱仪原理实验装置,并对典型光源进行了偏振光谱测量实验。结果表明:在有效测量波段(525~700 nm),以卤钨灯为光源的平行光管直接输出光的偏振度值小于10%;经过线偏振器起偏后,其偏振度值接近100%,与理论分析的结果一致。验证了基于强度调制技术设计偏振光谱仪方法的可行性。