

文章编号 1004-924X(2010)09-1936-07

激光告警内场仿真试验系统的设计

王建军¹, 张沛露², 李 岩¹, 崔 爽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. 吉林建筑工程学院, 吉林长春 130033)

摘要:针对内场仿真试验系统的研制, 讨论了激光告警内场仿真试验的实现方法及关键技术。通过对外场试验环境进行等效模拟, 在内场构造了一个对激光告警装备进行检测的仿真试验系统。首先, 介绍了仿真试验系统的设备组成; 然后, 以内场激光编码识别能力测试为例, 对以激光漫反射信号方式进行激光告警试验的方法进行探讨, 并对完成激光告警内场仿真试验所需的激光能量等效计算、漫反射屏的位置标定以及漫反射屏最低入射能量分析等关键技术进行详细阐述; 最后, 使用单脉冲能量 10 mJ 的激光信号源, 以漫反射方式进行了激光编码识别能力测试, 结果表明探测概率达到 100%, 证明了本文试验方法的可行性。

关键词:激光告警; 光电对抗; 仿真试验

中图分类号: TJ95 文献标识码: A doi:10.3788/OPE.20101809.1936

Design of indoor simulation test system for laser warning

WANG Jian-jun¹, ZHANG Pei-lu², LI Yan¹, CUI Shuang¹

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

2. *Jilin Institute of Architecture and Civil Engineering, Changchun 130033, China*)

Abstract: Indoor simulation test systems and their key technologies used in laser warning were investigated. After simulating the actual environment, a simulation test system was established for laser-guided weapons. Firstly, the composition of the simulation test system was introduced, then, by taking the case of laser coding recognition test for an example, the simulation test methods based on receiving diffuse reflection were discussed and the key factors in the simulation test were specially studied, such as the calculation of laser energy, and the position calibration and energy analysis of diffused screen. Finally, a recognition test of laser pulse code was performed by the diffused laser signal with a pulse energy of 10 mJ. Obtained results show that the detection probability reaches 100%, which proves the feasibility of the simulation test system.

Key words: laser warning; optoelectronic countermeasure; simulation test

收稿日期: 2009-06-04; 修订日期: 2009-09-07.

基金项目: 中国科学院知识创新工程领域前沿资助项目

1 引言

仿真技术作为一门新兴的边缘学科,经过四十年的发展已日渐成熟,其应用贯穿于武器系统研制、试验和鉴定的始终,在国防现代化建设中发挥着越来越重要的作用。

西方国家非常重视仿真技术在武器系统研制与试验鉴定中的作用,美国、俄罗斯等军事强国都建立了仿真试验系统。在光电对抗仿真领域,美国发展得较快,也较全面,代表了光电仿真技术的潮流。其中有代表性的系统有空军电子战评估系统(AFEWS)的光电仿真试验系统、埃格林空军基地光电仿真试验系统、陆军导弹司令部先进仿真中心光电仿真试验系统和海军半实物仿真导弹试验室的光电仿真试验系统。与外场实验相比,内场仿真试验具有灵活性高、可控性好,效费比高,重复性好等优势,为解决外场试验不能鉴定和评估的问题提供了有效的方法,并且可以克服外场试验的一些制约条件,生成外场试验难以获得的可修改的信号条件。

激光告警设备是一种用于截获、测量、识别敌方激光威胁信号并实时告警的光电对抗侦察设备,可用于对激光测距机、激光雷达、激光制导武器及激光致盲设备的激光信号进行实时探测、识别和告警,以便载体适时地规避机动或释放干扰

等对抗。激光告警内场仿真试验主要是在室内仿真环境下,通过仿真设备对外场测试环境进行仿真,在室内完成激光告警设备鉴定试验。由于室内仿真环境的可控性和可重复性,激光告警内场仿真试验可以降低鉴定试验成本,利于发现告警设备研制过程中的缺陷,缩短研制周期。

本文针对激光告警设备进行了内场仿真试验系统的研究,讨论了激光告警内场仿真试验的实现方法及关键技术。通过对外场试验环境进行等效模拟,在内场构造了一个对激光告警装备进行检测的仿真试验系统。最后,通过内场激光编码识别能力测试的仿真结果,证明了试验系统的可行性。

2 系统组成及功能

根据激光告警设备鉴定试验要求以及仿真室内条件的约束,激光告警内场仿真试验主要完成激光编码识别能力测试、激光告警设备角分辨率测试、告警空域测试、多目标告警测试、告警概率测试和抗光干扰能力测试等项目。

要完成上述测试项目,激光告警内场仿真试验设备主要由 $1.06\ \mu\text{m}$ 激光信号模拟器系统、导轨平台激光器系统、背景光信号模拟系统、控制计算机系统、仿真试验控制系统、以及进行位置标定工作的全站仪和激光测距机、能量检测系统、漫反

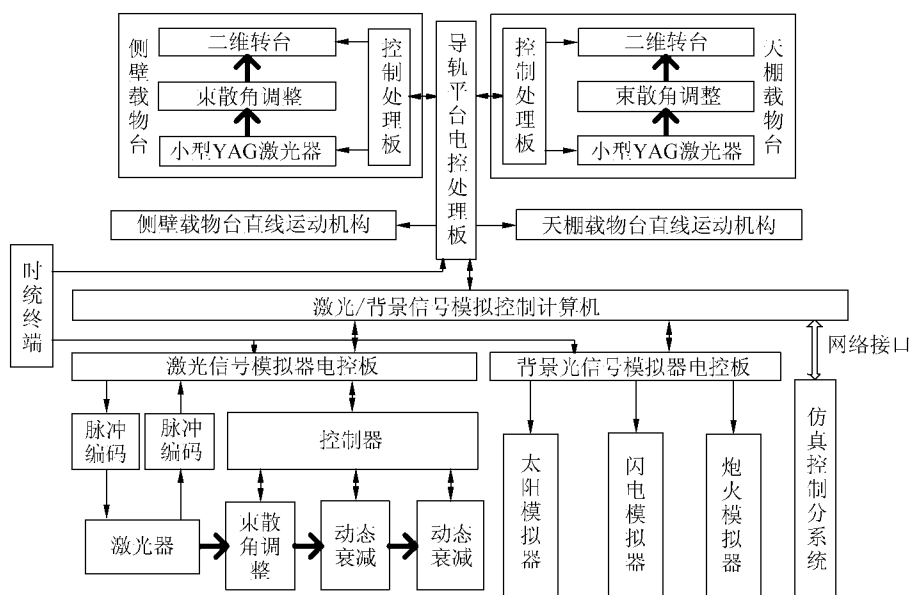


图1 激光告警内场仿真设备组成

Fig. 1 Members of simulation test for laser warning

射屏组成。其中,导轨平台系统由天棚导轨和侧壁导轨两部分组成,主要包括导轨载物台、小型 YAG 激光器。1.06 μm 激光信号模拟器主要由激光器、动态衰减装置、束散角调整装置、精密二维转镜、激光信号编码器和脉冲累加器组成。导轨平台激光器和 1.06 μm 激光信号模拟器共同组成试验中的激光信号源。背景光信号模拟系统主要由太阳模拟器、闪电和炮火模拟器组成,用于对背景环境进行模拟。控制计算机是控制各设备工作的控制核心。仿真试验控制系统负责试验进程的控制和事后数据的处理评估。全站仪、测距机以及能量检测系统主要完成对参试设备以及被试设备的位置标定和能量检测。时统终端为全部设备提供时间基准。控制计算机与仿真试验控制系统通过 RTI 网络连接,与参试设备通过串行通讯口连接。激光告警内场仿真设备组成如图 1 所示。

3 仿真系统工作原理

激光告警内场仿真试验系统用于在室内环境下仿真外场激光告警设备检测的试验条件,完成在室内仿真条件下对激光告警装备的技术指标检测。

激光告警内场仿真试验采用 1.06 μm 激光器作为主要信号源,激光告警装备接收照射到漫反射屏形成的激光漫反射信号;导轨平台激光器作为辅助激光信号源完成告警范围、角分辨率以及多目标告警能力测试。通过动态衰减机构对激光信号的衰减,模拟外场激光信号源能量变化特征;通过束散角调整机构对激光信号进行激光发散角的调整,模拟外场激光信号源光斑尺寸变化特征;通过精密二维转镜完成对激光信号源方向的调整。通过背景光信号模拟装置,实现对外场太阳背景光、闪电和炮火干扰光的模拟。激光信号编码器具有掩码屏蔽功能,方便对云层及烟雾遮蔽激光信号源的情况进行模拟。B 码时统为全系统提供时间同步基准。在激光告警仿真试验中,对编码识别能力的测试试验过程主要包括如下步骤:

(1) 参试设备(包括激光信号源、漫反射屏)及被试设备位置的标定。位置标定通过对参试设备及被试设备间的几何位置关系的解算,确定参试设备的运动范围。同时通过能量测量装置完成对

被试设备接收能量标定,确定激光信号源激光能量变化的范围;

(2) 仿真试验控制系统制订试验流程,下发试验数据;

(3) 控制计算机根据下发试验数据控制动态衰减机构及束散角调整机构,根据外场激光源与被试设备的距离信息,将激光编码器激光信号衰减至与外场激光信号环境一致的状态;

(4) 根据标定数据控制精密二维转镜,使激光投射到漫反射屏上;

(5) 控制计算机根据试验数据信息,控制激光编码器按指定的编码体制发射编码激光;

(6) 多次发射激光脉冲,使得告警设备满足一定的探测概率要求,完成指定测试任务。试验过程中根据仿真试验控制系统的设计,可对太阳背景光、闪电和炮火进行模拟;

(7) 试验结束后,收集试验数据,通过比对告警设备告警输出的激光编码特征与仿真试验设定的激光编码特征,对试验进行评估。

4 关键技术

仿真试验模拟分析表明,激光告警内场仿真试验系统实现过程中,对激光能量动态衰减以及对激光漫反射屏能量、位置标定是影响试验效果的主要因素。具体实现方法如下:

4.1 外场环境散射分析

激光指示信号在外场的作用距离一般为 1~5 km,其在传输过程中会受到大气散射、漂移等因素的影响。其中,对大气散射在传输过程中的影响分析如下:

激光接收系统视场内接收到的激光散射辐照能量密度计算模型如下式:

$$E_r = E_s \cdot \beta_{\text{sca}} \cdot V \cdot \frac{P(\psi)}{4\pi \cdot R^2}, \quad (1)$$

其中, E_s 为激光照射截面的辐照度 (mJ/m^2), E_r 为接收器处接收到的激光辐照度 (mJ/m^2), R 为散射体与接收系统间的距离 (m), ψ 为接收系统与激光出射方向的夹角, A_r 为接收系统入瞳面积 (mm^2), V 为散射体体积, β_{sca} 为散射截面 (km^{-1}), $P(\psi)$ 为散射相位函数。由于,

$$P(\psi) \cdot \beta_{\text{sca}} = \frac{4\pi \cdot S_{11}(\psi)}{k^2}, \quad (2)$$

故

$$E_r=E_s \cdot V \cdot \frac{S_{11}(\psi)}{k^2 \cdot R^2}, \tag{3}$$

设激光能量为 100 mJ,气溶胶尺寸为 0.5

μm,复折射率为 1.560+0.089i,激光束散角为 1 mrad,通过理论计算可得到结果如表 1。

由计算结果可知,外场气溶胶前向散射对于告警器的影响较小,可以忽略不计。

表 1 散射计算结果
Tab.1 Results of scattering calculation

序号	激光器与目标距离 /km	告警器与目标距离 /m	S ₁₁	告警设备处的激光 辐照度(fJ/cm ²)
1	1	1	0.17	813
2	1	50	0.17	2
3	5	5	0.17	162
4	5	50	0.17	1.6
5	10	10	0.17	81
6	10	50	0.17	3

4.2 内场激光能量等效分析

在内场仿真试验中,激光告警装备通过漫反射板的漫反射照射告警器,模拟外场激光辐照环境。

激光漫反射辐照度为:

$$E_r=\frac{P_s \cdot \tau(R_1) \cdot \tau(R_2) \cdot \rho \cdot \cos \alpha \cdot \cos \beta}{\pi \cdot R_2^2}, \tag{4}$$

假定大气透过率 $\tau(R)=1$,内场激光信号源为 50 mJ,漫反射屏宽度为 9 m。告警设备位于漫反射屏中心垂线上,与漫反射屏距离 H 为 12 m,激光器与告警设备所在位置与漫反射屏平行,激光器与告警设备距离为 d ,告警设备灵敏度 Err 为 1 pJ/cm²。

内场激光告警器位置的激光辐照度为:

$$E_r=\frac{P_s \cdot \rho \cdot \cos \alpha \cdot \cos \beta}{\pi \cdot R_2^2}, \tag{5}$$

式中 P_s 为激光器发出的激光能量(mJ), E_r 为接收器处接收到的激光辐照度(mJ/cm²), $\tau(R)$ 为大气透过率, R_1 为发射系统与漫反射屏光斑间的距离(cm), R_2 为漫反射屏光斑与告警器间的距离(cm), ρ 为激光漫反射屏的漫反射率, α 为漫反射屏激光入射夹角, β 为激光告警器漫反射夹角。

对激光出射能量的要求为:

$$P_s=\frac{\pi \cdot R_2^2 \cdot E_r}{\rho \cdot \cos \alpha \cdot \cos \beta}. \tag{6}$$

激光信号源出射后,首先经过 40 dB 的固定

衰减片衰减,因此,可以获得如表 2 所示的动态衰减量。

表 2 激光数据分析
Tab.2 Analysis of laser energy

序号	H/m	d/m	$\alpha/ (^{\circ})$	激光出射能 量 $P_s/\mu J$	衰减倍率 /dB
1			2.4	6.13	39.11
2			—5	5.51	39.58
3		4	—15	5.24	39.80
4			—25	5.69	39.44
5	12		—35.3	7.50	38.24
6			11.8	6.26	39.02
7			0	5.24	39.80
8		2	—10	5.10	39.91
9			—20	5.66	39.46
10			—28.4	6.95	38.57

设 $\rho=0.9, E_r=1 \text{ pJ/cm}^2, D=9 \text{ m}$

4.3 内场环境散射分析

在激光告警内场仿真试验中,激光散射可能会给试验装备带来虚警。激光散射主要是由气溶胶引起的,其影响远大于由气体分子引起的瑞利散射,这里主要关注气溶胶引起的米散射。假设激光告警器单视场范围为 67.5°,探测器光学系统入瞳直径为 1 mm,激光发射装置采用最小散射角工作(1 mrad),内场设备按前述方式布设。

通过计算可知,告警设备处的辐照度 <3 fJ/cm²,散射对于告警器的影响极其微弱,远

小于告警器的最低灵敏度,不会对试验过程和结果产生影响,可以忽略不计。

4.4 光束能量控制精度分析

激光信号模拟器动态衰减机构采用两块 30 dB 变密度盘实现,根据两块转动方向相反的 30 dB 的中性可变密度盘的解析表达式:

$$y = \frac{2}{11}(x - 30^\circ), \quad (7)$$

对变量 x 求偏导,可知变密度盘单位($^\circ$)的衰减变化量为 $2/11$ dB。

动态衰减机构设计要达到开环精度 0.02° ,则电机转动一步,带来的误差为:

$$\left(\frac{2}{11}\right) \times 0.02^\circ = 0.0036(\text{dB}), \quad (8)$$

由于光源还存在 3% 的稳定性,即存在约 0.13 dB 的变化范围,因此实际上电机转动一步,带来的误差为:

$$\sqrt{0.0036^2 + 0.13^2} \approx 0.13 \text{ dB}. \quad (9)$$

动态衰减机构能满足能量误差不大于 0.2 dB 的要求,可以保证衰减精度。

4.5 漫反射屏位置标定方法

漫反射屏位置标定主要用于确定漫反射屏上激光光斑位置与二维摆镜转动角度关系。

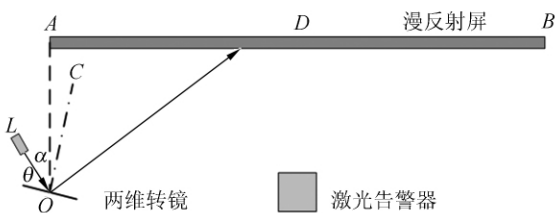


图 2 位置标定

Fig. 2 Calculation of device positions

如图 2 所示,假定激光告警器位于漫反射屏的中央位置,二维摆镜中心位于漫反射屏的一侧,其中激光器发出的激光与摆镜中心 O 及漫反射屏一端 A 的夹角 α 与 OA 的长度均可以作为已知条件,要求激光光斑在漫反射屏上的位置为 D ,则二维摆镜与入射激光所成的角度可以通过下式计算得到:

$$\angle LOC = \frac{\alpha + \arctan \frac{AD}{OA}}{2}, \quad (10)$$

$$\theta = 90^\circ - \angle LOC. \quad (11)$$

在已知初始入射激光与二维摆镜夹角的情况下,当前摆镜所需摆动的角度也随之得到。

上述方法是标定二维摆镜方位方向运动的方法,该方法同样可用于标定二维摆镜俯仰方向运动。

4.6 仿真测试结果

应用本文提到的试验方法,模拟外场波长为 $1.06 \mu\text{m}$,单脉冲能量为 10 mJ 的激光信号源,以漫反射方式进行精确频率码试验。按内场仿真大厅试验布局布设各仿真设备,告警头布设在距漫反射屏 12 m 处,激光器与告警头构成的连线与漫反射屏平行,两者相距 4 m 以确保激光后向散射对告警头无影响。采用动态衰减至约 19.1 dB,试验连续多次发射激光通过漫反射屏对告警设备进行照射,实时测量告警设备接收到的能量密度约 $24 \text{ pJ}/\text{cm}^2$,该能量密度远大于激光告警设备的探测灵敏度。通过多次试验,事后统计告警概率达到 100%。试验统计如表 3 所示。

表 3 激光告警试验结果

Tab. 3 Results of indoor simulation test for laser warning

序号	R/m	衰减倍率/dB	激光出射能量 $E_r/(\text{pJ}/\text{cm}^2)$
1	12	19.1	25.54
2		19.1	25.07
3		19.1	25.09
4		19.1	24.85
5		19.1	24.97
6		19.1	24.88
7		19.1	25.11
8		19.1	24.86

上述试验方法具备较好的可行性,能够较好地完成内场条件下对激光告警试验的仿真,为激光告警装备的内场鉴定提供了有效手段。

5 结 论

本文讨论了激光告警内场仿真试验的实现方法及关键技术。通过对外场试验环境进行等效模拟,在内场构造了一个对激光告警装备进行检测的仿真试验系统。以内场激光编码识别能力测试

为例,对以激光漫反射信号方式进行激光告警试验的方法进行探讨,完成了激光告警内场仿真试验所需的激光能量等效、漫反射屏的位置标定以及漫反射屏最低入射能量分析等关键技术。使用单脉冲能量 10 mJ 的激光信号源进行激光编码识别能力测试,探测概率达到 100%。结果表明,激

光告警内场仿真试验系统的应用为激光侦察告警装备鉴定工作提供了有效手段,节约了鉴定成本,提高了工作效率。激光告警内场仿真试验系统是光电对抗内场仿真试验系统的组成部分,下一步工作将要进行激光角度欺骗干扰试验,主要是根据弹道数据在内场对激光信号环境进行模拟。

参考文献:

- [1] 杨在富,钱焕文,高光煌. 激光告警技术发展现状[J]. 激光技术,2004,28(1):99-101.
YANG Z F, QIAN H W, GAO G H. Development of laser warning technology[J]. *Laser Technology*, 2004,28(1):99-101.
- [2] 孙少军. 光电对抗仿真试验系统综述[J]. 红外与激光工程 2003,32(6):552-555.
SUN S J, ZHANG J Y, LI J L, et al.. Overview of simulation test system used for photoelectronic countermeasure[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2004,32(6):552-555.
- [3] 邓方林,刘志国,王仕成. 激光导引头半实物仿真系统的设计与研制[J]. 系统仿真学报 2004,16(2):255-257.
DENG F L, LIU Z G, WANG S C. Design and development of the hardware-in-the-loop simulation system for laser seeker[J]. *Journal of System Simulation*, 2004,16(2):255-257.
- [4] 张金生,王仕成. 激光制导武器仿真系统设计与研制[J]. 电光与控制 2005,12(2):56-59.
ZHANG J S, WANG S C. Design of a simulation system for laser guided weapons [J]. *Electronics Optics & Control*, 2005,12(2):56-59.
- [5] 李华,赵宏鹏. 暗室消光性对激光侦察告警辐射仿真测试的影响[J]. 激光与红外,2006,36(8):683-686.
LI H, ZHAO H P. The influence of laser extinctive chamber extinction performance on laser reconnaissance and warning radiation simulation test[J]. *Laser & Infrared*, 2006,36(8):683-686.
- [6] 厉明,等. 基于快速仿真原型的飞行器半物理仿真系统[J]. 光学 精密工程,2008,16(10):1949-1955.
LI M, JI Y, JIA H G. Hardware-in-closed-loop simulation system for aircraft based on rapid simulation prototype[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008,16(10):1949-1955. (in Chinese)
- [7] 李艳峰,刘延斌,金光. 机载光电平台地面测试系统目标模拟分系统的建模与半物理仿真实现[J]. 光学精密工程,2004,增(2):193-196.
LI Y F, LIU Y B, JIN G. Founding Simulated mathematical model of airborne photoelectric platform environment simulation system and half-entity achieving [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004,supp(2):193-196. (in Chinese)
- [8] 吴晗平. 掠海红外动态点目标图像仿真系统[J]. 光学 精密工程. 2007,15(8):1275-1279.
WU H P. Image simulation system of dynamic infrared point targets sweeping on sea surface[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007,15(8):1275-1279. (in Chinese)
- [9] 刘志国,等. 激光制导炸弹数字仿真研究[J]. 系统仿真学报 2005,17(7):1759-1759.
LIU Z G, ZHANG J S, WANG S C. Research of digital simulation of laser-guided bomb[J]. *Journal of System Simulation*, 2005,17(7):1759-1759.
- [10] 赵炜渝. 光电对抗仿真试验技术[J]. 红外与激光工程,2001,30(3):171-175.
ZHAO W Y. Simulation test technology of electro-optical countermeasures [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2001,30(3):171-175. (in Chinese)
- [11] 周彦,戴剑伟. HLA 仿真程序设计[M]. 北京:电子工业出版社,2002.
ZHOU Y, DAI J W. *Programming Design for HLA Simulation* [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002. (in Chinese)

作者简介:



王建军(1977—)男,河北唐山人,助理研究员,2005 年于西安电子科技大学获得硕士学位,主要从事光电对抗仿真技术的研究。E-mail: xdwjj@163.com



李 岩(1970—)男,吉林舒兰人,研究员,主要从事光电对抗 C3I 系统的建模、仿真与算法研究。E-mail: Liyan@ciomp.ac.cn



张沛露(1977—)女,吉林人,讲师,博士研究生,2004 年于长春工业大学获得硕士学位,主要从事软件工程专业的教学工作。E-mail: peilu_100@sina.com



崔 爽(1982—)男,吉林辉南人,研究实习员,主要从事光电对抗仿真技术的研究。E-mail: csh0908@gmail.com

● 下期预告

中阶梯光栅光谱仪谱图还原与波长标定

唐玉国¹,陈少杰^{1,2},巴音贺希格¹,崔继承^{1,2},陈今涌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 研究生院,北京 100039)

中阶梯光栅光谱仪通过交叉色散在成像面上形成二维重叠光谱,将此二维谱图还原为一维光谱信息,并实现全谱快速分析与波长自动标定是中阶梯光栅光谱仪的关键技术之一。基于分光系统主色散及横向色散规律以及相互间的关系,建立了 3 个变换矩阵 M_1 、 M_2 和 M_3 ,由此给出了中阶梯光栅光谱仪面阵 CCD 上所有接收点处空间坐标与波长关系的表征,二维重叠光谱的矩阵 $M_{\lambda-xy}$,利用中心波长与自由光谱区特性获得了理想的无重叠谱图数据模型。提出了信号光斑识别方法,并对信号光斑位置坐标予以准确定位,结合所建立的谱图数据模型,实现了对二维重叠谱图的快速还原与标定。实验结果表明:该方法在中阶梯光栅光谱仪谱图分析中不仅实时性强,而且波长精度可达 0.01 nm,满足中阶梯光栅光谱仪高分辨率、全谱瞬态直读等要求。