

doi: 10.7690/bgzd.2016.04.018

高斯光束对光电电池输出影响的实验研究

崔晓阳, 洪延姬, 金星

(中国人民解放军装备学院激光推进及其应用国家重点实验室, 北京 101416)

摘要: 为了研究激光功率密度分布特点对光电电池的输出产生较大影响的问题, 对高斯光束对光电电池输出的影响进行了实验研究。建立激光辐照光电电池输出特性的实验测试系统, 介绍测试方法和测试流程, 研究位于高斯光束不同位置的光电电池输出特性, 得到了高斯光束下光电电池排列方式对输出的 $I-V$ 曲线、 $P-V$ 曲线、光电转换效率等的影响。实验结果表明: 辐射形状的排列可以获得更好的输出效果, 可为激光输能的应用提供参考。

关键词: 激光推进; 光电电池; 高斯光束; 输出特性

中图分类号: TJ06 **文献标志码:** A

Experimental Study on Influence of Gaussian beam Irradiation on Photoelectric Cell

Cui Xiaoyang, Hong Yanji, Jin Xing

(State Key Laboratory of Laser Propulsion & Application, Equipment Academy, Beijing 101416, China)

Abstract: The influence of Gaussian beam on photovoltaic cells output is researched for researching big influence of laser power density distribution feature on photovoltaic cells output. Establish laser radiation photovoltaic cells output feature test system, introduce test method and test process, research photovoltaic cells output feature in different Gaussian beam position, acquire influence of photovoltaic cells distribution mode on output $I-V$ curve, $P-V$ curve, photovoltaic conversion efficiency and so on in Gaussian beam. The test results show that: radiation shape distribution can acquire better output efficiency, and conclusions can be applied to the laser output can provide a reference.

Keywords: laser propulsion; photovoltaic cells; Gaussian beam; output characteristics

0 引言

利用激光为空中的飞行器充电是一种新型的激光推进技术。不同于烧蚀式激光推进^[1-2], 其原理是利用半导体的光电效应将激光能量转换为电能^[1]。这种技术使能量供应系统与飞行器系统分离, 从而增大飞行器的有效载荷比, 使临近空间飞行器得到源源不断的能量, 大大提高飞行器系统的工作时间和使用寿命。

用激光为无人机充电是激光供电技术的一个可行的应用方向^[3]。与太阳能无人机比较, 激光的单色性好以及能量密度高的特点可以获得更高的光电转换效率, 因而可以获得更高的飞行高度、更长的续航时间, 携带更大的有效载荷, 用于高空监视和通信中继等任务, 具有良好的高空观察能力和广阔的军事应用前景^[4]。2003年 NASA 的 Dryden 飞行研究中心和马歇尔空间飞行中心, 完成了激光传输能量到无人机的小型演示实验^[5]。2009年, 美国激光动力公司完成激光输能 PELICAN 四旋翼直升机飞行试验, 创造了持续悬停飞行 12.5 h 的记录^[6-8]。2012年, 该公司与洛克希德·马丁公司合作, 在美

军特种作战部队装备的小型无人机“阔步者 (Stalker)”加装激光输能系统, 完成了室内和野外激光输能飞行试验, 取得了里程碑成果^[9]。

许多学者针对激光辐照光电电池的输出特性开展了一系列的实验和理论研究^[10-12]。这些研究主要集中在激光输能系统的搭建, 效率的理论分析等。结果均表明: 在激光辐照条件下, 光电电池获得的效率比太阳光下大得多^[13]; 然而, 针对高斯分布的激光辐照光电电池的输出特性研究还未见详细报道。笔者在建立完善的实验测试系统的基础上, 研究了位于高斯光束不同位置的光电电池输出特性, 以及高斯光束下光电电池排列方式对输出的影响。

1 实验测试系统与原理

为了测试激光辐照条件下的光电电池输出特性, 设计了如图 1 所示的测试系统, 包括激光器和发射镜部分、激光接收部分、外电路部分、信号采集部分和上位微机。

激光器和发射镜部分, 发射一定功率的激光以准直模式垂直辐照到激光接收部件。激光接收部分由光电池和温控平台组成; 温控平台由铜质热沉和

收稿日期: 2015-12-18; 修回日期: 2016-01-19

作者简介: 崔晓阳(1987—), 女, 山东人, 博士, 从事激光输能及其应用研究。

水冷部件组成。温控平台有加热和冷却 2 种模式，通过 PID 控制实现对温控平台温度的控制，当温度低于设定值时，自动开启加热模式，当温度高于设定值时自动开启冷却模式。光电池用导热胶粘贴到温控平台上，用 3 个 $\phi 1\text{ mm}$ 的 K 型热电偶测量背面温度。光电池与 $0.2\ \Omega$ 精密电阻、电子负载仪串联构成回路。采用 NI 公司的 9207 采集卡采集电子负载仪 (R) 电压信号 U_R 和精密电阻 (r) 电压信号，那么光电池输出电流、电压如下式：

$$I = \frac{U_c}{0.2}, U_p = U_c + U_h. \quad (1)$$

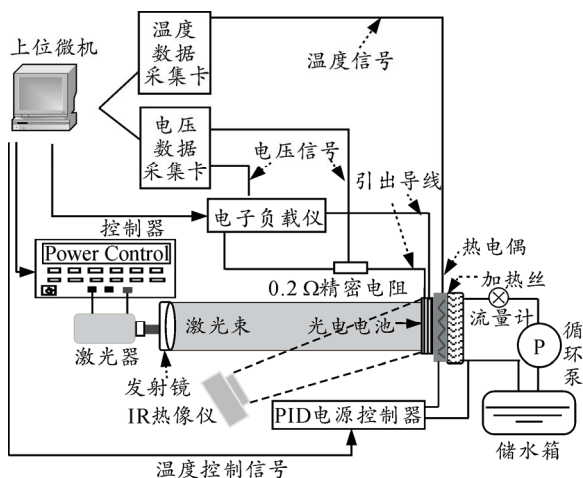


图 1 激光输能光电电池输出性能测试系统示意图

用 NI 公司的 9214 温度数据采集卡采集光电电池的温度信号，上位微机控制测试系统中所有信号，并对数据进行后处理。

本实验系统可测试的内容包括一定波长和温度条件下，光电电池的输出 $I-V$ 曲线、输出功率、短路电流、开路电压、最大功率、转换效率、填充因子、匹配负载等。

2 测试方法

实验中的光电电池采用中国电子科技集团 18 所研制的空间用单结 Si 电池，电池的面积为 $2\text{ cm} \times 2\text{ cm}$ ，实验中，激光为高斯光束、光斑呈圆形。发射镜可调整激光光斑大小。实验中保持光斑与接收部件中轴线重合，且垂直辐照到光电电池上，激光波长 980 nm 。

实验中采用热像仪检测了电池表面温度分布，由于电池面积较小，电池表面温度分布较为均匀，电池中心处温度略高于边缘温度，两者相差最多不超过 2 K ；因此，研究中采用电池中心处温度表征电池温度。

测试中，设定温度后要经过一定时间使温控平台和光电电池温度达到平衡状态，待温度信号稳定后再开始后续操作。调节电子负载仪阻值，使其在短时间内完成阻值从 $0 \sim \infty$ 的扫描，以此减小测量期间的温度误差。整个测试过程的流程如图 2 所示。

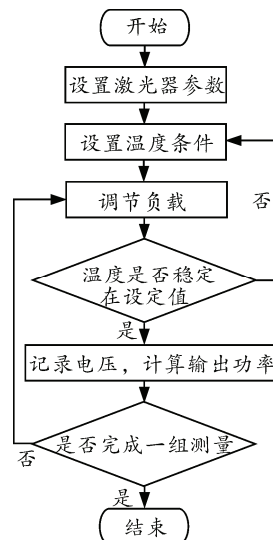


图 2 测试流程

测试中的测量有短路电流、开路电压、转换效率、填充因子。短路电流是指电路负载为零时的输出电流，电流值与电池的串联电阻有密切关系。开路电压是指电路负载无穷大时的输出电压，其大小与电池的并联电阻有密切关系。

转换效率是指电池的最大输出功率与入射激光功率之比，如下式所示：

$$\eta = P_{\max}/P_{\text{in}} \times 100\%。 \quad (2)$$

其中 P_{in} 指入射激光功率。转换效率反映了光电池将激光转换成电的能力，是表征光电池性能的最重要的参数之一。

填充因子是指最大功率与短路电流和开路电压的乘积之比，如下式：

$$FF = P_{\max}/U_{\text{oc}}I_{\text{sc}}。 \quad (3)$$

填充因子是表征光电池优劣的一个重要指标。填充因子越大，表明光电池输出功率越接近其极限功率，填充因子与光电池的材料和制作工艺等都有密切关系。

3 实验结果与分析

3.1 方阵排列输出结果

通常情况下，光电电池以方形方式整齐排列。实验中首先设计了 3×3 的方阵排列的电池阵列，如图 3 所示，9 片电池以并联方式连接。实验中调

节激光器与电池接收部件位置，使其中轴线重合，激光波长为 980 nm，功率为 4.8 W，控制电池温度为 50 °C。

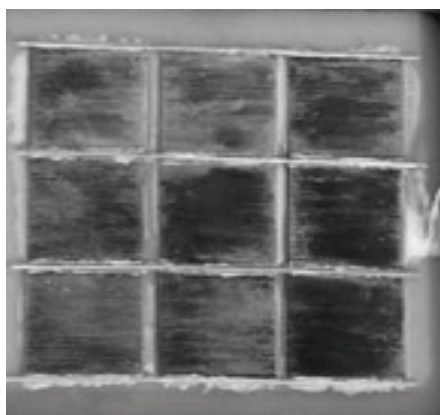


图 3 3×3 方形排列实物图

测试方形排列的阵列的输出电压、电流、功率，如图 4 所示。电池阵列输出短路电流为 1.25 A，开路电压为 0.6 V，最大输出功率为 0.466 W。测试结果将作为基准与下文中放射形排列的输出结果进行对比。

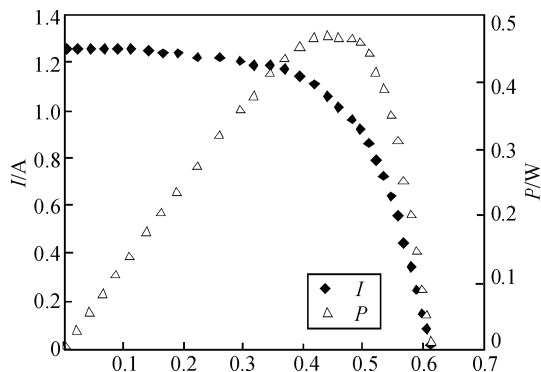


图 4 方形排列的输出曲线

3.2 放射状排列输出结果

将 9 块电池呈放射状排列，其 CAD 设计如图 5 所示。9 块电池中 5 块电池在中间呈十字形排列，其余 4 块分别布设在对角线的位置上。每块电池都有独立的一对引线将电流引出，便于测试每块电池的输出特性。

首先考察中间十字排列的 5 块电池的输出特性。图 6 所示为位于光斑不同位置的光电电池的输出特性。图中显示了电池相对光斑的位置，并绘制了输出 $I-V$ 曲线和功率曲线，由于位于上下左右 4 个方位的电池对称；因此，用上方的电池即可代表其余 3 块电池的输出特性。图 6(a)表示外围电池的输出，短路电流为 0.33 A，开路电压为 0.6 V，最大输出功率为 0.165 W。图 6(b)表示中心电池的输出，

短路电流为 0.4 A，开路电压为 0.6 V，最大输出功率为 0.147 W。值得注意的是，相对于外围电池，中心电池的短路电流明显增加，开路电压不变，但是输出最大功率降低。从接收到的激光能量来说，中心电池显然更多，这是短路电流增大的原因。输出功率降低，这是因为中心电池的 pn 结不能有效地将能量转化成电能，同时，中心温度升高也是使输出功率下降的原因。

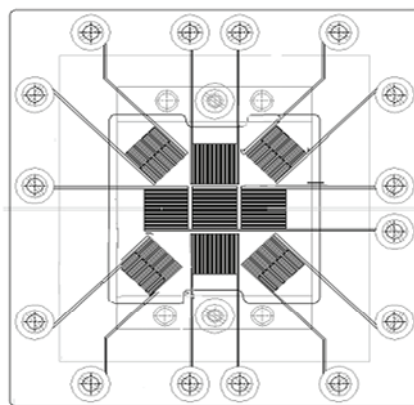
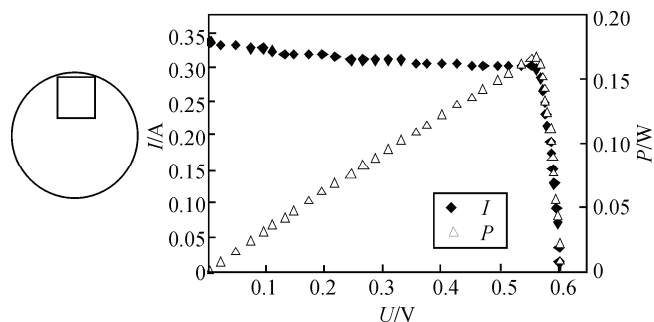
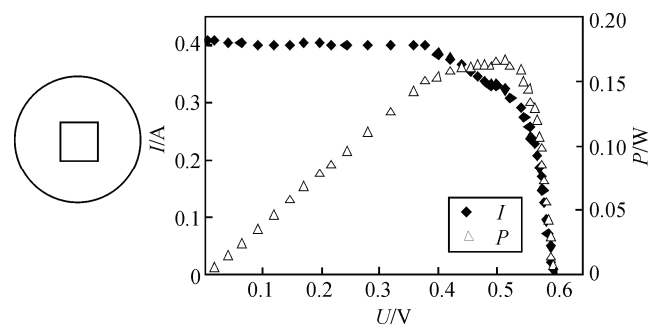


图 5 放射形电池排列 CAD 图



(a) 正上方电池输出 $I-V$ 曲线和 $P-V$ 曲线

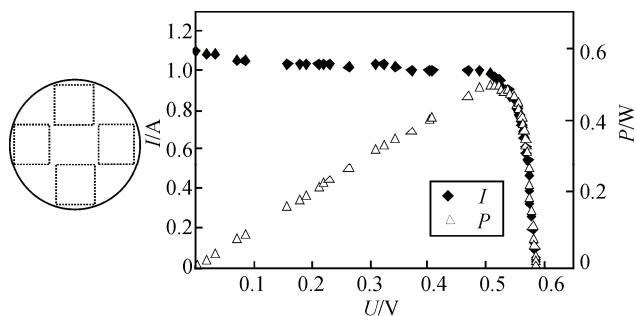


(b) 中心电池输出 $I-V$ 和 $P-V$ 曲线

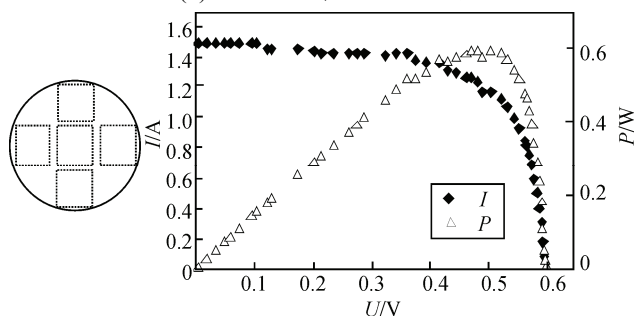
图 6 不同位置电池输出特性

下面测量中心电池周围的 4 颗电池并联和 5 颗电池并联时的输出。图 7 所示为 2 种情况下电池的输出 $I-V$ 、 $P-V$ 曲线，图中左侧显示的是实验中电池相对光斑位置。图 7(a)是周围 4 颗电池的输出曲线，短路电流为 1.1 A，输出最大功率为 0.486 W。

图 7 (b) 是 5 颗电池并联后的输出曲线，短路电流为 1.5 A，最大输出功率为 0.591 W。比较后发现，周围 4 颗电池对总输出贡献最多，在此验证了中心处电池与高斯光束的不匹配。5 颗电池光电转换效率为 22.75%。对比方形排列的 9 颗电池的输出与发现放射状排列的 5 颗电池的输出相当。实际上，放射状排列的电池接受到的激光能量少于方形排列的 9 颗电池。

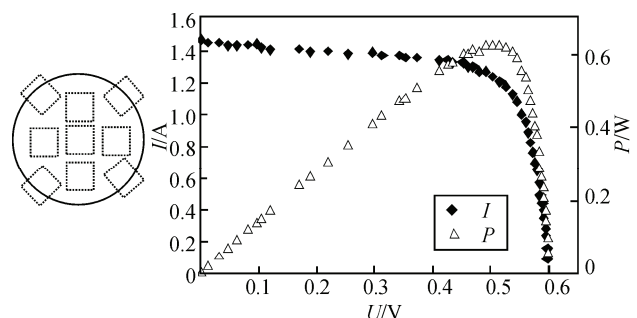


(a) 4 颗电池并联输出曲线

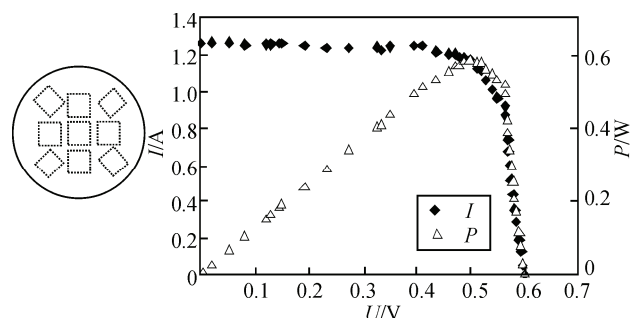


(b) 5 颗电池并联输出曲线

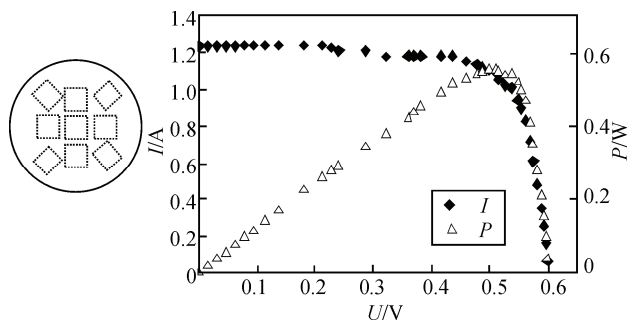
图 7 电池并联时的输出 I-V、P-V 曲线



(a) 小光斑辐照下光电电池输出特性



(b) 小光斑辐照下光电电池输出特性



(c) 小光斑辐照下光电电池输出特性

图 8 不同光斑大小辐照下光电电池的输出曲线

测试放射状排列下 9 颗电池的输出情况。为便于比较，测试时使用的激光功率均为 4.8 W，温度控制在 50°左右。图 8 所示为 3 种不同辐照状态下光电电池的输出曲线。图 8(a)~(c) 分别表示光斑覆盖不同程度时的电池输出，分别记为大、中、小。根据激光参数和光斑高斯分布可计算出电池接受到的激光功率密度，具体计算方法参考文献[14]。比较 3 种条件下的输出情况，光斑面积最小图 8(a) 的输出功率最大为 0.625 W (光斑覆盖率 48%)，光电转换效率为 26.04%；光斑大小居中的图 8(b) 的输出功率为 0.586 W (光斑覆盖率 37.72%)，光电转换效率为 32.81%；光斑最大的图 8(c) 的输出功率为 0.55 W (光斑覆盖率 25.24%)，光电转换效率为 45.39%。

4 结束语

笔者在激光辐照下光电电池输出测试系统的基础上，研究了高斯光束不同位置上的光电电池输出特性、不同排列方式 (正方形和辐射形) 下，电池阵列的输出特性，得出结论：同等功率密度的激光辐照 Si 光电电池可得到比太阳光照大得多的电能和转换效率，证明激光输能的巨大应用前景；位于高斯光斑中心处的电池的输出功率比位于周围的小，说明将电池排列在高斯光外侧可以得到更好的输出效果；笔者设计了 2 种不同的电池并联排列方式，通过比较辐射形状的排列可以获得更好的输出效果；同样激光功率下高斯光斑越大，获得的转换效率越高，但光斑小的情况下能得到更大的输出功率。

参考文献:

[1] 李倩, 洪延姬, 杨鹏涛, 等. 基于准静态波的吸气式高重频脉冲激光推进性能数值研究[J]. 强激光与粒子束, 2011, 23(9): 2282-2286.
 [2] 程富强, 窦志国, 李倩. 带延长圆柱形喷管激光推力器推进性能数值研究[J]. 强激光与粒子束, 2011, 23(9): 2341-2345.

- [3] Williams M D, Conway E J. Space laser power transmission system studies[R]. Langley: NASA Research Center, 1981.
- [4] 金星, 常昊, 崔晓阳. 激光输能无人机的概念研究[J]. 航空学报, 2013, 34(9): 2074-2080.
- [5] Mason R. Feasibility of Laser Power Transmission to a High-Altitude Unmanned Aerial Vehicle[R]. RAND978-0-8330-5135-6.
- [6] NASA Dryden Flight Research Center. Laser powered model airplane[EB/OL]. <http://www.nasa.gov/-centers/dryden/news/FactSheets/FS-087-DFRC.html>.
- [7] NASA. Power Beaming Competition[EB/OL]. http://www.nasa.gov/offices/oct/early_stage_innovation/centennial_challenges/beaming_tether/index.html.
- [8] Laser Motive. Video of the 12.5 hour demonstration compressed into 3 minutes[EB/OL]. <http://lasermotive.com/2010/11/12/video-of-laser-powered-quadcopter-endurance-flight/>.

- [9] Laser Motive. UAV Demonstrates Utility Of Laser Power[EB/OL]. http://www.aviationweek.com/Article.aspx?id=/article-xml/AW_09_03_2012_p64-486128.xml.
- [10] 乔良, 杨雁南. 激光无线能量传输效率的实验研究[J]. 激光技术, 2014, 38(5): 590-594.
- [11] Luce R C. Spacecraft power beaming and solar cell annealing using high-energy lasers[R]. Naval Postgraduate School, 2002.
- [12] 张建德, 郭春辉, 于闯飞. 激光无线能量传输接收装置研究[J]. 航天器工程, 2015, 24(1): 13-17.
- [13] 杨鹏, 杨雁南. 激光辐照单晶硅电池转换效率的研究[J]. 激光技术, 2012, 36(5): 696-699.
- [14] 熊小华. 双透镜聚焦系统对高斯激光束的聚焦[J]. 江西师范大学(自然科学版), 2000, 24(4): 358-361.

(上接第 66 页)

3.1 长度检测

选定 X 型号长度为 18.31 mm 的小口径枪弹弹头长度标准样, 先后放入 12 工位检测, 每个工位连续检测 3 次。将检测节拍设定为 240 发/min 时的试验结果如图 10 所示。

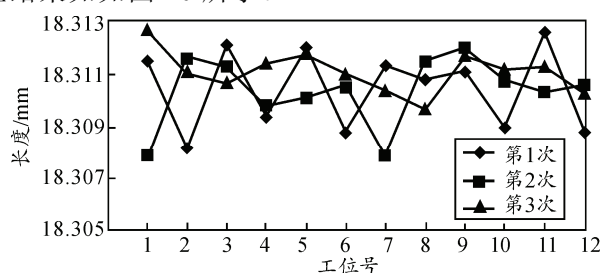


图 10 弹头长度检测值分布

由上图可知：同一工位重复检测的最大差值不超过 0.005 mm，通过不同工位弹头长度检测的结果差值也小于 0.005 mm；因此，该系统对弹头的长度检测精度达到 5×10^{-6} m。

3.2 质量检测

选定 X 型号质量为 7.98 g 的小口径枪弹弹头质量标准样放入自动上料系统中, 按照正常检测流程, 连续检测 10 次, 得到的弹头质量检测结果分布规律如图 11 所示。

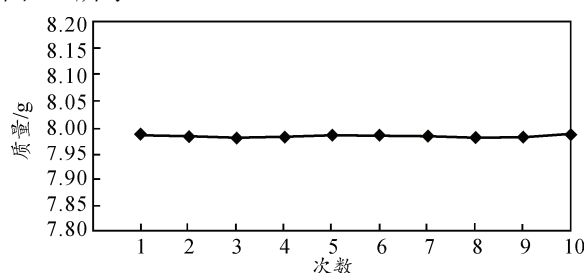


图 11 弹头质量检测值分布

由图中可见：10 次检测同一发弹头的质量, 其检测值较多分布于 7.98 g 数值线附近, 最大检测值和最小检测值相差 0.006 g, 故对弹头的质量检测精度可以达到 0.01 g。

4 结论

笔者针对目前小口径枪弹弹头生产线中弹头长度和质量检测的精度和效率过低的问题, 设计了一种转子式弹头长度及质量在线快速检测分选系统, 并对系统进行了样机试制和关键参数测试。该系统检测节拍可以达到 240 发/min, 弹头的在线长度检测精度为 5×10^{-6} m, 弹头的在线质量检测精度为 0.01 g。测试结果表明, 该系统能大幅提升对小口径枪弹弹头在线检测的效率和检测检测精度。

参考文献:

- [1] 余海勇, 王璐, 黄权. 一种药量在线快速检测的方法[J]. 兵工自动化, 2011, 30(4): 81-82.
- [2] 晏希, 余海勇. 发射药的高速高精度转子式装药及药量控制技术[J]. 兵工自动化, 2013, 32(5): 82-84.
- [3] 彭旭, 孔淼, 林虎成. 基于转子式的高速连续弹头供料控制系统[J]. 兵工自动化, 2010, 29(7): 74-77.
- [4] 周森, 郭永彩, 高潮, 等. 基于三维激光扫描的移动大尺寸圆柱体工件长度快速检测系统[J]. 光学精密工程, 2014, 22(6): 1524-1529.
- [5] 裘祖荣, 石照耀, 李岩. 机械制造领域测量技术的发展研究[J]. 机械工程学报, 2010, 46(14): 1-11.
- [6] 孔淼, 彭旭, 晏希. 高速动态称重技术在小口径枪弹自动生产中的应用[J]. 四川兵工学报, 2015, 36(5): 106-108.
- [7] 罗伏隆, 褚冬军. 模块式计量托辊在电子皮带秤的应用研制[J]. 衡器, 2013, 42(10): 22-26.
- [8] 陈以振, 张培培, 李双. 如何保证动态检重秤的计量精度[J]. 衡器, 2012, 41(5): 37-39.