

文章编号: 2095-4980(2015)06-0995-05

高性能三分幅相机的研制及应用

江孝国, 王 远, 李 洪, 石金水

(中国工程物理研究院 流体物理研究所, 四川 绵阳 621999)

摘 要: 高性能的分幅相机是强流脉冲电子束束参数测量及加速器调试中必不可少的一部分, 为了满足这种要求, 研制了一种新的高性能超高速的三分幅相机。该分幅相机采用一种成像质量较好的会聚光成像的全口径分光原理, 由高速快门、科学电子耦合组件(CCD)相机及高速的控制器等组成, 具有快门时间和幅间时间独立控制的能力, 灵活的控制方式很好地满足了各种测试要求, 并且在有效像面面积达到 $\phi 25\text{ mm}$ 的情况下可以获得约 3 ns 的最高快门速度和高于 30 lp/mm 的像面空间分辨力。

关键词: 分幅相机; 门控型图像增强器; 科学 CCD 相机; 分光棱镜

中图分类号: TN15

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA201506.0995

Development and application study for the 3-framing camera with high performance

JIANG Xiaoguo, WANG Yuan, LI Hong, SHI Jinshui

(Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621999, China)

Abstract: One kind of 3-frames framing camera with ultra high-speed and high performance is developed for beam parameters measurement. The optical principle of the framing camera is basing on splitting the focused imaging light beam in the field of image space. It features good imaging quality and high optic efficiency. It consists of high speed shutter, scientific Charged Coupled Device(CCD) camera and the high speed controller. The shutter time and the frame interval time can be set independently. The effective image size is 25 mm in diameter. The highest shutter time is about 2 ns . The spatial resolution is about 30 lp/mm in image space.

Key words: framing camera; gated image intensifier; scientific Charged Coupled Device camera; splitting prism

在时间分辨测量技术的研究及应用中, 高速分幅相机或扫描相机具有极其重要的作用。分幅相机可以获得测量对象的空间二维信息, 但在时间上却不能满足连续的要求; 而扫描相机可以获得测量对象在时间上连续的信息, 但在空间上只能获得对象上某一横线上的信息; 根据测量目的可以选择合适的测量方式实现对应要求。对于一次实验而言, 获得的信息越多、越丰富, 越能全面了解研究对象的性质, 减少各种离散因素的影响, 这就是时间分辨测量的一个重要意义。时间分辨测量技术涉及 2 个主要方面: 高速测量设备、实验技术(如测量原理、测量系统的构建)。因此, 高速测量设备的研制对实现测量目的具有决定性的作用。由于高速相机本身是一项极为复杂的工程成果, 涉及多学科的技术研究及高性能元件的研制, 研制难度较大, 一直被外国控制, 国内长期处于较低水平。目前, 在超高速的分幅相机研制方面, 国际上比较有代表意义的是 DRS 公司的 Ultra4 及 Ultra8、imacon 200 系列、德国 PCO 公司的 hsfcc 等, 曝光时间达到 10 ns 甚至 3 ns (可选配)的水平, 幅面一般为 $\phi 18\text{ mm}$, 一次可以拍摄 4, 8, 16 等多幅图像。但由于其重要的作用及同时代表了在高速摄影技术领域的地位, 也是重点研究的一个方向。由于直线感应加速器的调试需要, 中国工程物理研究院流体物理研究所在研制的多种具有针对性的高速分幅测量系统的基础上^[1-2], 针对最新调试要求, 通过完善系统结构及参数设计, 进一步研制了一种超高速的高性能的三分幅相机^[3]。其主要特点是: a) 快门时间与幅间间隔时间的调节是独立的, 并且连续可调, 步进小于

收稿日期: 2014-10-15; 修回日期: 2014-12-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目

0.1 ns; b) 最小快门时间可以达到约 2 ns; c) 具有非常好的线性响应及较高的动态范围; d) 具有非常实用化的每一路快门开启的指示信号; e) 具有较高抗干扰能力的光纤接口。该高性能分幅相机的成功研制, 提高了在时间分辨测量领域的研究能力, 其在加速器调试中的成功应用, 不仅提高了调试的效率, 也促进了对束物理的研究工作, 本文将对其结构原理、在加速器的调试中的应用研究作详细的阐述。

1 三分幅相机的光学系统原理及结构

研制的三分幅相机采用了大口径的有限远成像光束分光原理, 如图 1(a)所示。这种分光原理相对简单, 其特点是利用了口径内全部的成像光线束, 具有光能量利用率高、成像质量好的优势。三分幅相机的实际的结构如图 1(b)所示。

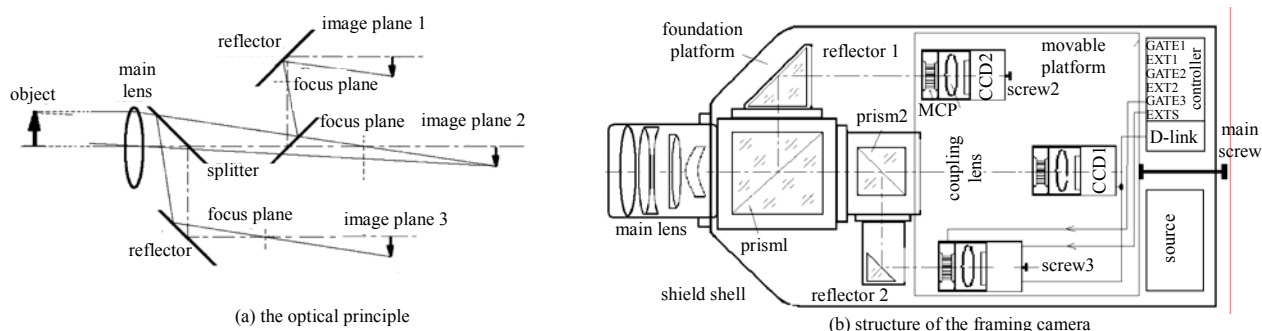


Fig.1 Optical principle and structure of the three framing camera
图 1 三分幅相机的分光原理及系统结构

该高性能三分幅相机的主要性能如表 1 所示。

为了便于监测每一路的快门实际开启时刻, 在分幅相机中还研制了一套相应的快门开启时刻的精密监测系统, 其原理如图 2 所示。它主要通过对施加在微通道板上的脉冲信号进行微分而获得其前沿及后沿的尖脉冲信号, 该尖脉冲信号对应快门的开启时刻。因此, 在具有强大电磁干扰的环境里使用时即使受到干扰导致快门开启出现较大抖动时, 也可以了解实际的快门打开时刻, 有助于提高用户对所获取数据与实验时刻间的关系, 尽量确保实验的可靠性及效率。经大量测量实验考核, 该功能具有相当好的实用性。

分幅相机的另一个特点是三路图像捕获的参数设置是完全独立的, 相互没有影响, 这意味分幅相机的使用具有相当大的灵活性, 可以满足各种使用要求, 不会受到标准分幅相机的曝光时间、幅间间隔时间相互有限制的要求的影响。例如, 在同时需要研究一个脉冲的前沿、全脉冲、后沿的特性或作用时, 可以使用这种控制模式。分幅相机所有的输入输出信号采用光信号, 以解决分幅相机应用时的干扰问题。

2 在加速器调试中的应用研究

在加速器的调试工作中开展了大量的高性能三分幅相机的应用研究, 也进行了加速器的束包络、能量、发射度的测量, 获得了成功的应用。

由于束包络的测量系统是加速器调试中最重要的一个方面, 首先进行的就是束包络的测量研究, 其布局原理如图 3(a)所示, 这是一种利用前向光学渡越辐射(Optical Transition Radiation, OTR)原理进行测量的布局; 当分幅相机成像面调节在光学渡越辐射(OTR)靶表面时, 获得的是束包络的剖面图像。图 3(b)是在某一种配置磁场下拍摄到的电子束脉冲的前沿上的 3 个时刻的束包络变化的图像, 快门时间为 5 ns, 间隔 5 ns, 该图像主要用于研究配置磁场对不同发射状态下的电子束束性能(前沿、后沿的束

表 1 三分幅相机典型主要性能

specification	min	max	step	note
exposure time	2	~1s	<0.5	ns
interval time	~0	~1s	<0.5	ns
spatial resolution	>30	~39.5		mm ⁻¹
response uniformity		2		%
response nonlinearity		1		%
frames		3		
inherent insert delay	36.8	37.3		ns

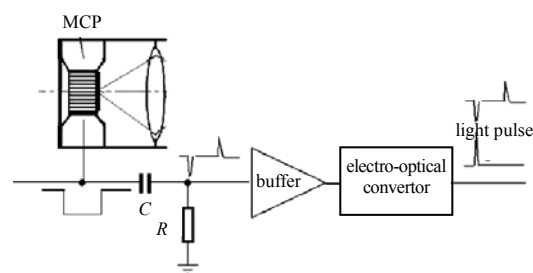


Fig.2 Principle of real time shutter monitoring
图 2 快门的精密实时监测原理

包络振荡、主束、束晕)的影响。利用这种方式完成了对束的各种研究,例如前沿中低能电子与高能电子的不同影响效果、不同磁场条件下束平顶的变化状况、束晕碰壁丢失的影响等,获得了大量翔实的测量数据,使得加速器的调试方向较为明确,并大幅度提高了调试效率。

电子束发射度的测量工作是另一个重要的研究方向,利用研制的分幅相机完成了准时间分辨的发射度测量工作。图4(a)是基于修正三梯度法的一种发射度测量布局原理,其具体做法是^[4]:先通过实验测出不同磁场下的电子束束斑,得到一组束半径、励磁电流的测量数据点对;然后求解不同励磁电流下的电子束束包络方程,又可以得到一条束半径、励磁电流的理论计算曲线,该曲线依赖于3个未知参数(位于束管道上游、远离螺线管的初始平面内的束半径和束散角 R_0, R_0' 、发射度 ε_n);若用理论计算的曲线去拟合实验测量的数据点对,就可以求出包括束流发射度 ε_n 在内的3个未知参数的拟合解。由此可见,需要对励磁电流、束斑半径及束斑的测量位置进行拟合。为了减少拟合参数数量以提高拟合的精确度及便利性,设计了图4(a)所示的测量装置;在该装置中,转换靶是可移动的,可以在保持真空及励磁电流不变的情况下测量不同位置处的束斑半径,这样就只需对束半径及位置进行拟合,算法相对要简单一些。在测量中需要注意的另一个问题是转换靶的移动过程中应该测量到电子束束斑的束腰附近的半径才能使拟合结果更精确。

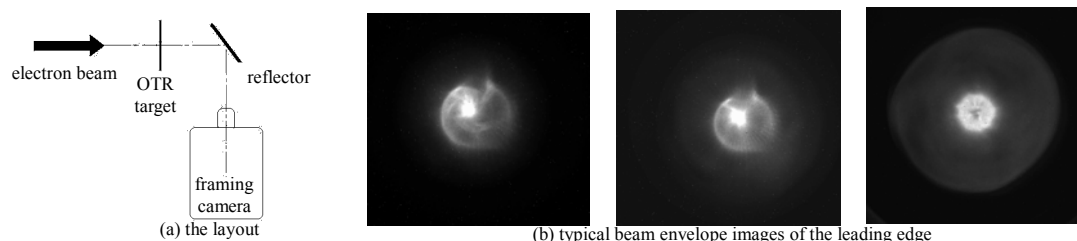


Fig.3 Beam envelope measurement research

图3 束包络测量研究

在固定磁场条件下,拍摄每一个电子束脉冲平顶中间10 ns的束包络图像,并通过图像处理技术获取其束包络的半径或直径;通过调节OTR靶的位置可以获得同一磁场条件下一系列不同位置处的束包络半径,如图4(b)中的左图所示,通过上述处理方法就可以获得电子束的发射度数据,由于采用了10 ns的快门速度,其测量结果反映了电子束瞬态的一个性能;如果进行多次测量拼接,则可以获得电子束一个准时间分辨的测量结果。图4(b)是神龙一号电子束发射度测量的电子束束包络变化图像(左图)及发射度数据拟合过程的束包络拟合曲线结果(右图,其中横坐标为测量位置离阴极面的距离,单位为m,纵坐标为束的半径,单位为mm),最终拟合得到的电子束归一化边发射度约为 $1\,140\,\pi\cdot\text{mm}\cdot\text{mrad}$ 。

另一项比较有意义的测量研究工作是电子束的能量及能散测量。在此将要介绍的是基于螺旋管磁场旋转束流的方法进行电子束能量的测量原理^[5],这是一种新的测量方法。电子束在螺旋管磁场中除了受到聚焦作用外,还受到旋转作用,束流总的旋转角度为:

$$\varphi = \frac{e}{2m_0c\sqrt{\gamma^2-1}} \int_{l_1}^{l_2} B(z)dz \quad (1)$$

式中: e 为电子电量; m_0 为电子静止质量; c 为光速; γ 为电子的洛伦兹因子;有效螺旋管磁场 B 为对束流起旋转作用的积分磁场区域。由式(1)可知,电子束能量不同,其旋转的角度也不同。通过测量电子束在荧光屏上的束流旋转角度及角度展宽,可以计算出束流对应的电子束能谱。

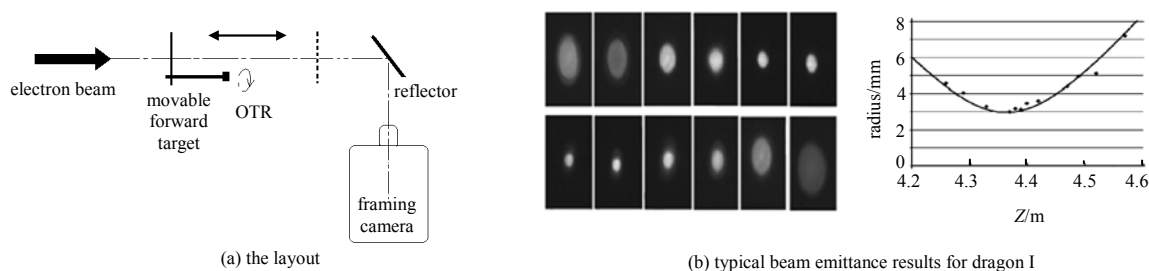


Fig.4 Beam emittance measurement for dragon I

图4 神龙I号电子束发射度测量研究

图 5(a)是其测量布局原理。电子束先经过用铜制作的细长深狭缝进行准直,这样仅有很薄的一层电子束进入线圈产生的旋转磁场,电子束薄片(扁平电子束)在旋转磁场的作用下,一边前进一边旋转,最后轰击到靶上产生可见光图像,其旋转角度代表了电子束的能量,其扩展宽度基本代表其能散。典型的测量结果如图 5(b)所示,这是采用 10 ns 快门时间获得的电子束脉冲平顶部分约 60 ns 的前、中、后阶段的测量结果,对应的测量系统延迟时间分别为 120 ns,150 ns 及 175 ns,计算测得对应旋转角度为 152.7° , 151.2° 及 152.1° ,则由式(1)可得对应的束流中心能量为 18.25 MeV,18.45 MeV 及 18.37 MeV,并且从图中可得旋转角度展宽均不大于 3° ,即能散小于 2%。

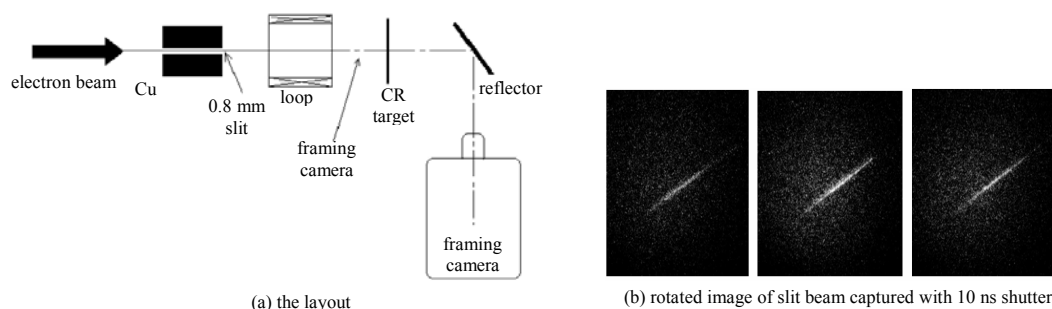


Fig.5 Beam energy measurement basing on the method of rotating beam

图 5 基于旋转束流法的能量测量布局原理及典型结果

高性能三分幅相机承担了大量的实验研究的测量工作,圆满地满足了测量要求,提供了大量的实验数据,同时在测量工作中展现的高性能是过往分幅相机不具备的^[6],提供的数据细节为束物理的研究打下了坚实的基础,图 6 显示了这样的一种情况,该束斑是在过聚焦后电子束内部状态的一个剧烈变化情况,与汇聚过程的情况完全不同,采用的快门时间 5 ns。利用该高速分幅相机还对电子束在聚焦过程中、聚焦后反弹崩溃的演变过程进行了大量的研究,获得了较多新的认识和丰富的调试经验。

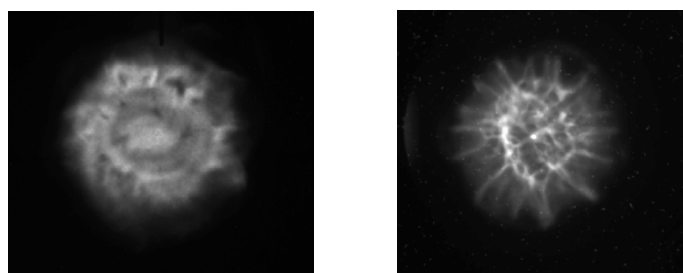


Fig.6 Typical results of beam under over focusing

图 6 电子束过聚焦状态研究的典型结果

3 结论

已完成研制的超高速高性能的三分幅相机,采用了全口径的有限远成像的光束分光的原理,具有成像质量好、效率高的特点,分幅相机的空间分辨率达到了高于 30 lp/mm 的水平;较高的灵敏度、较低的噪声水平使分幅相机具有了较好的弱光拍摄能力;最高高达 2 ns 的曝光时间使其具有了在超高速分幅摄影领域内获得广泛应用的能力;结合先进的大规模可编程集成电路的应用,分幅相机获得了在曝光时间、幅间间隔时间很好的可以独立进行控制的性能,满足了目前各种复杂的应用控制要求,并在实际中获得了成功的应用,达到了超高速高性能分幅相机研制的目的。

参考文献:

- [1] 江孝国,王远,张开志,等. 用于神龙一号参数测量的高速两分幅相机研制[J]. 强激光与粒子束, 2012,24(5):1146-1150. (JIANG Xiaoguo,WANG Yuan,ZHAN Kaizhi,et al. The development of high speed two frame gated camera for parameters measurement of Dragon I LIA[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2012,24(5):1146-1150.)
- [2] 江孝国,董晓娜,王远,等. 瞬态光学渡越辐射测量系统的设计[J]. 强激光与粒子束, 2010,22(9):2147-2150. (JIANG Xiaoguo,DONG Xiaona,WANG Yuan,et al. Design of the instantaneous measurement system based on optical transition radiation[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2010,22(9):2147-2150)
- [3] 江孝国,王远,金光,等. 超高速高性能门控型三分幅相机[J]. 光子学报, 2013,42(9):1065-1070. (JIANG Xiaoguo,WANG Yuan,JIN Guang,et al. The development of 3-frames framing camera with ultra high-speed and high performance[J]. Acta Photonica Sinica, 2013,42(9):1065-1070.)

- [4] 张卓,杨国君,陈思富,等. 用修正三梯度法测量束流发射度[J]. 强激光与粒子束, 2004,16(11):1489-1492. (ZHANG Zhuo,YANG Guojun,CHEN Sifu,et al. Beam emittance measurement with modified three gradient method[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2004,16(11):1489-1492.)
- [5] 廖树清,张开志,石金水. “神龙一号”电子束时间分辨能谱测量新方案[J]. 强激光与粒子束, 2010,22(3):639-641. (LIAO Shuqing,ZHANG Kaizhi,SHI Jinshui. New layout of time resolved beam energy spectrum measurement for Dragon I [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2010,22(3) :639-641.)
- [6] 江孝国,郭宝平,邓建军,等. 用于电子束参数测量的高速分幅相机[J]. 光电工程, 2006,33(5):99-103. (JIANG Xiaoguo, GUO Baoping,DENG Jianjun,et al. High speed multi-frame gated camera for electron beam parameters measurement[J]. Opto-Electronic Engineering, 2006,33(5):99-103.)

作者简介:



江孝国(1968-),男,四川省泸州市人,研究员,主要研究方向为 CCD 测量系统及数据采集系统设计、图像处理、超高速图像捕获系统及其时间分辨测量系统 .email:j_xg_caep@sina.com.

王 远(1965-),男,江苏省无锡市人,高级工程师,主要从事加速器束参数测量及测控技术研究.

李 洪(1969-),男,四川省绵阳市人,副研究员,主要研究方向为精密机械设计.

石金水(1964-),男,安徽省安庆市人,研究员,主要研究方向为核技术及应用.

(上接第 994 页)

- [12] 袁国玉. 可调谐射频磁探针的研究[D]. 大连:大连理工大学, 2008:16-31. (YUAN Guoyu. Study on RF tuning magnetic probe[D]. Dalian,Liaoning,China:Dalian University of Technology, 2008:16-31.)
- [13] Richard P Guiford,John R Rosborough. Monitoring transients in low inductance circuits:United States,4716364[P]. 1987.
- [14] Technologies-and-solutions-catalog of Kansas City Plant[R]. Report of Nuclear Weapons Association of USA. Kansas City:[s.n.], 2011.

作者简介:



谭榕容(1988-),女,重庆市人,硕士,工程师,主要研究方向为高压脉冲功率技术及脉冲功率测控技术.email:tiffisher@126.com.

冉汉政(1972-),男,四川省绵阳市人,博士,副研究员,主要研究方向为高压脉冲功率技术.

程 刚(1970-),男,四川省绵阳市人,硕士,高级工程师,主要研究方向为测控技术.