

同步辐射照相与凝聚炸药爆轰研究*

孔令海[†] 许海波 胡晓棉

(北京应用物理与计算数学研究所 北京 100094)

2014-10-09收到

[†] email:kong_linghai@iapcm.ac.cn

DOI: 10.7693/wl20150703

Radiographic measurements based on synchrotron radiation for studying the detonation of condensed high explosives

KONG Ling-Hai[†] XU Hai-Bo HU Xiao-Mian

(Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100094, China)

摘要 高能凝聚炸药的爆轰传播规律是爆轰物理学的重要研究内容,它在武器设计与研制中具有重要的应用价值。该文介绍了近年来基于同步辐射X射线照相装置的凝聚炸药爆轰实验无损观测与诊断技术的研究动态,主要内容包括炸药爆轰波阵面及爆轰波后流场实验测试及其诊断技术等。

关键词 同步辐射, X射线照相, 凝聚炸药, 密度重建

Abstract Understanding the detonation process of condensed high explosives is most important for the field of detonation physics, which plays a vital role in the design and simulation of various kinds of warhead. In this paper, we review the nondestructive measurement techniques and diagnosis approaches based on X-ray synchrotron radiation for the study of detonation waves and their subsequent expansion products.

Keywords synchrotron radiation, X-ray radiography, condensed high explosive, density reconstruction

1 引言

截止到本文投稿之日,利用互联网百度搜索“同步辐射”(SR)网页,我们看到相关结果已近400万条。根据百度“同步辐射”新闻搜索,我国的第三代同步辐射光源——上海光源(SSRF)已运行5年,并具备年供5千多小时的同步辐射光能力,而引自中国网的消息“俄罗斯政府于2013年底批准科学界参与欧洲同步辐射加速器项目”

也尤为引人注目。同步辐射光源是继电、激光与X射线之后最先进的新型人工光源,迄今已经历了3次升级换代。它具有宽频谱(涵盖远红外线到硬X射线)、高稳定性、高准直性(电子束发射度仅为4—12 nm·rad,几乎是平行光)、高亮度(光源亮度可达 10^{18} — 10^{21} 光子数/(s·mm²·mrad²·10⁻³ BW))以及优异的脉冲时间结构(脉冲宽度从几十ps到几百ns内可变,相邻脉冲间隔可从ns变到μs量级)和相干性等优势,被广泛应用于材料科学、生物与医药学、化学、天体物理学等研究领域^[1-3]。通过互联网检索可知,俄罗斯科学院的同步辐射团队从20世纪末期开始探索第一代同步辐射光源在凝

*国家自然科学基金委员会—中国工程物理研究院NSAF联合基金(批准号:11176001)、中国工程物理研究院科技发展基金(批准号:Y12B12)资助项目

聚炸药爆轰实验研究中的应用,同步辐射照相诊断技术与爆轰物理学也已跨界牵手,“喜结连理”^[4-11]。

什么是炸药?什么是凝聚炸药?爆轰和爆炸有什么区别?苦味酸(PA)、梯恩梯(TNT)和硝酸铵等问世后曾长期用作工业染料和化肥,但它们现在却是基本的重要烈性炸药,被广泛应用于军事和工程爆破领域。炸药和非爆炸物原则上没有明确的界限。所谓凝聚炸药是指液态和固态两类炸药,它是一种相对的不稳定体系,在不同温度条件和环境条件下能产生不同的化学(放热)反应过程。根据其反应速度和传播性质,这一过程呈缓慢化学变化、燃烧和爆轰三种形式。爆轰是一种伴有高速能量释放的化学反应输运过程,爆炸是爆轰的一种特殊现象,称为不稳定爆轰,而恒速爆轰称为稳态爆轰。按Zel'dovich—Neumann—Döring (ZND)理论^[8, 12, 13],稳态爆轰是一种自持的波传播过程,爆轰波由激发化学反应的冲击波(又称波阵面)和紧随其后维持先导激波的放热反应带组成。在反应末端面,即Chapman—Jouguet(CJ)面,化学反应达到平衡态,反应介质转变为高温高压气态产物。

凝聚炸药稳态爆轰研究不仅对国民经济建设、生产安全和防护等具有重要的实用价值,而且对常规武器、导弹和反导弹的弹头乃至核武器重要部件的设计都有重要的实际意义^[12-14]。由于爆轰化学反应带厚度小($<2\text{ mm}$),反应时刻短($<0.3\text{ }\mu\text{s}$),在该区域发生错综复杂的化学动力学和流体动力学相互作用,还伴有复杂的光热和电磁效应,导致爆轰波与波后流场很难在替代环境下实现。这些特点决定了爆轰动力学理论与实验测量诊断技术一直是应用物理研究的重要分支。

近几十年来,爆轰动力学界在爆轰机制、化学反应区结构、爆轰波阵面曲率、爆轰产物状态的理论研究和实验观测等方面已提出了许多经典的模型和测量技术,但仍然面临许多难题亟待解决^[8, 10, 13-19]。在爆轰波阵面研究方面,描述气体爆轰波参数的Michelson—Chapman—Jouguet (MCJ)模型和ZND模型对凝聚炸药研究的适用性尚存争论,ZND模型也并未完全反映出化学反应

区内的实际情况,尽管大量的实验观测结果已表明它的有效性,但在其可靠性评估和解释实验数据方面仍有一定的不确定度。在炸药爆轰产物状态研究方面,由于很难用实验方法直接确定其状态方程,目前主要使用经验或半经验状态方程,其中一些参数要由实验确定,这类状态方程应用于理论计算得到的结果和实验数据也不完全符合。迄今已有大量的基于不同物理原理的实验技术用于平面一维爆轰波测量诊断^[8, 13],例如媒介法、电探针法(光电法)、激光法、X射线法等。除X射线法外,其他方法大多是利用介质间接测量实验数据,反推炸药爆速和爆压等物理量。X射线法很早就被用于爆轰观测诊断研究,确定爆轰波传播速度及波后流场中产物密度空间分布是其主要目标。但其成像系统的曝光时间偏长,一般不低于 25 ns ,成像空间分辨率不超过亚毫米量级,而且辐照透过剂量偏低,使得密度测量误差偏高,X射线点光源的发散性也为成像数据诊断带来了困难^[16-18]。

上述问题和困难对爆轰物理实验测量与诊断技术提出了更高要求。同步辐射新型光源的出现,为爆轰物理学研究提供了崭新的机遇。下面仅就俄罗斯凝聚炸药爆轰过程研究团队近年来利用同步辐射X射线光源所取得的部分进展加以阐述和分析,为感兴趣的读者提供有益的参考。主要包括:爆轰研究同步辐射照相系统参数与布局,同步辐射照相系统在爆轰研究中的应用,以及爆轰过程同步辐射照相实验数据诊断技术等。

2 同步辐射照相实验系统参数与实验布局

俄罗斯的第一代同步辐射光源VEPP-3(单束电子能量为 2 GeV ,扭摆器磁场强度为 2 T)装置为激波和爆轰过程观测实验提供具有高时间分辨率的线聚焦同步辐射X射线束,脉冲光子能量为 $10\text{—}30\text{ keV}$ (平均光子能量为 20 keV),单脉冲宽度为 1 ns ,脉冲间隔 $\leq 125\text{ ns}$,单次曝光光子通量为 10^6 光子数/mm^2 ,适用于对面密度为 $0.5\text{—}3\text{ g/cm}^2$ 的材料进行辐照成像^[10, 19, 20]。爆轰过程同步辐射照相实验系统如图1所示。

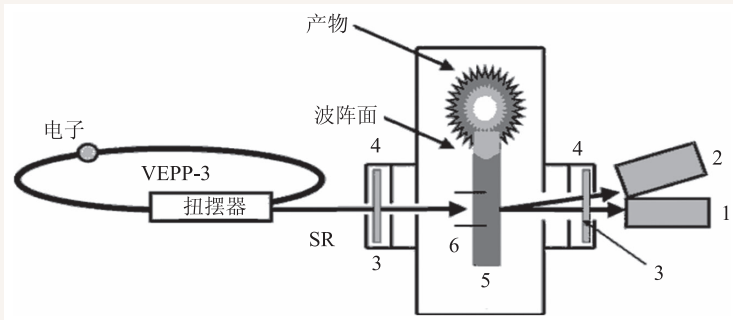


图1 爆轰过程同步辐射照相实验系统示意图(1, 2, 3分别是透过面光束探测器、小角散射探测器和铍保护窗, 4为激波减压器, 5为实验客体, 6为爆轰波阵面感应元件, SR为同步辐射光束)^[21]

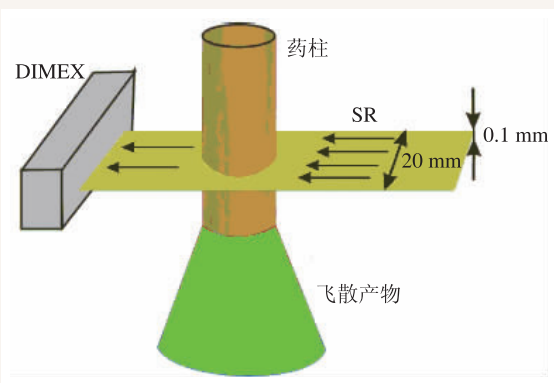


图2 爆轰产物层析成像实验布局示意图^[6, 7]

数据接收系统采用线性微带型 DIMEX 探测器^[18-20, 5], 它在 30 keV 能量条件下量子探测效率 (DQE) $\geq 50\%$, 空间分辨率(FWHM)约为 210 μm 。探测器的动态量程范围约为 100, 使得信号测量精度约为 1%, 满足 15—70 keV 能量范围内同步辐射 X 射线束成像需求。改进型 DIMEX 探测器由间隔为 0.1 mm 的 512 个 CCD 感应元件组成, 具有按时间间隔 0.5 μs 顺序接收 32 帧 1 ns 宽度单脉冲成像的能力。利用它能获得持续时间为 16 μs , 实验观测视场宽度为 5.1 cm, 高度为 2 mm 的“动画”。

3 同步辐射照相实验系统在爆轰过程研究中的应用

3.1 实验客体设计

由于爆轰过程同步辐射 X 射线照相实验系统目前仅能实现单轴成像, 根据 X 射线辐照成像原

理(见文献[6, 7, 21]), 实验药柱(如 TNT, RDX, 50/50TNT/RDX, TATB, BTF 等)的初始状态满足轴旋转对称性, 药柱的直径与高度等满足稳态爆轰需求。

爆轰实验通常采用单点标准起爆方式或平面波生成器 PWG 起爆方式。理想状态下炸药爆轰过程仍满足轴旋转对称假设。

3.2 爆轰波后产物层析成像

在爆轰波后产物测量实验中, 药柱竖直放置, 线聚焦同步辐射光束(SR)与药柱对称轴垂直, 实验布局如图 2 所示。层析成像数据能够刻画不同时刻射线透过的爆轰波后产物横截面上质量分布的变化。在炸药稳态爆轰假设下, 利用它可以完整地重建产物密度空间分布。

层析成像数据可记录线聚焦同步辐射光束在不同时刻穿透客体后由接收系统测得的径向强度分布。一般而言, 强度衰减由 X 射线束与物质的多种相互作用确定, 即依赖于能量的吸收系数、弹性或非弹性散射、离子能量损失、药柱—空气界面与药柱内密度梯度剧烈变化区域发生的 X 射线束折射等, 另外, 探测器灰度响应的非线性和谱敏感性也会影响强度衰减记录。若只考虑 X 射线光源、成像探测器和介于光源与探测器之间的客体, 则探测器记录的透过客体的射束 1 的强度可表示为

$$J_1 = \int_E D(E) J_{01}(E) \exp\left(-\int_1 \mu(r, E) dr\right) dE, \quad (1)$$

其中 E 为 X 射线能量, $J_{01}(E)$ 表示沿射束 1 的 X 射线光源能量密度, $D(E)$ 为探测器的依赖于能量 E 的辐射吸收系数, $\mu(r, E)$ 表示点 r 处依赖于能量 E 的线衰减系数。若进一步假设辐射衰减度仅依赖于沿直线传播的光束穿过药柱的路径上的密度积分, 则可将(1)式进一步简化并导出经典的 Abel 变换^[6, 7, 22]。

3.3 爆轰波阵面密度测量实验

在稳态爆轰波阵面同步辐射照相实验^[5, 7, 8, 10]

中，凝聚炸药药柱水平放置，线聚焦同步辐射光束与药柱的对称轴平行或重合，信号接收系统与药柱轴平行。凝聚炸药起爆后，爆轰波阵面以常速通过DIMEX探测器接收带形区域，其时间跨度约3—4 μs。若取同步辐射X射线脉冲的时间宽度为1 ns，脉冲间隔为500 ns，信号接收系统可接收记录3—5幅药柱轴向的X射线透过强度分布数据。爆轰波阵面同步辐射照相实验设计示意图见图3。

凝聚炸药爆轰波阵面结构的实验数据对爆轰传播理论研究具有重要的意义，通过测量穿过样品后X射线束的衰减程度，以确定光束路径上物质的质量长度 $m = \int \rho dl$ ，其中 l 是光束穿过药柱的路径长度， ρ 为光束经过点的炸药密度。而利用炸药稳态爆轰波阵面演化曲线，可以计算确定爆轰波传播速度等物理参数。

4 爆轰过程同步辐射照相实验数据诊断技术

4.1 爆轰波阵面照相实验数据校准技术

DIMEX探测器的设计方式^[19, 20, 5]，会使入射光子在多信道有电荷响应，信号边缘模糊效应蕴含在同步辐射成像接收系统中。因此，利用同步辐射光源的高稳定性，在进行爆轰波阵面密度重建前，需要进行模拟客体(比如有机玻璃PMMA构件)的辐照实验，以获得探测系统的线扩展函数(它是一种描述光学成像系统对光源解析能力的函数)，并以此设计算法，来校正密度边缘(或密度跃迁)区域的数据^[5]。

另外，即使对直径充分大的药柱，其真实的爆轰波阵面也不是平面。同步辐射照相实验中的实验客体直径较小，爆轰波阵面曲率增大会导致数据接收信道增多。波阵面形状可通过高速摄影技术记录爆轰在药柱端面的发光来进行分析。将灰度数据转换为轴向密度分布数据时，需要进行以下几方面的修正：首先假设爆轰波阵面由沿药柱轴向分布的一组具有常数值密度的等曲率薄层组成，薄层形状近似于抛物面，其参数通过实验

测定；其次通过选取密度取值，使得计算值与实验值的符合程度达到最优，来确定轴向密度的空间离散分布^[10]。

4.2 爆轰波阵面照相实验数据密度重建技术^[5]

实验客体直径不变。同步辐射光源入射强度满足下式：

$$\begin{aligned} J_{\text{before}} &= J_{\text{air}} \exp(-\beta_2 \rho_0 d) = \\ &J_{\text{air}} \exp(-\alpha_1 \rho_0 d + \alpha_2 (\rho_0 d)^2), \end{aligned} \quad (2)$$

其中 J_{air} 表示同步辐射初始光子通量， β_2 为凝聚炸药药柱吸收系数， α_1 ， α_2 为内插吸收系数， ρ_0 ， d 分别表示药柱的初始密度和直径。客体出射辐照强度为

$$J_{\text{exp}} = J_{\text{air}} \exp(-\alpha_1 \rho_x d + \alpha_2 (\rho_x d)^2). \quad (3)$$

因此，DIMEX探测器记录的波阵面强度变化可记为

$$\frac{J_{\text{exp}}}{J_{\text{air}}} = \frac{\exp(-\alpha_1 \rho_x d + \alpha_2 (\rho_x d)^2)}{\exp(-\alpha_1 \rho_0 d + \alpha_2 (\rho_0 d)^2)}, \quad (4)$$

其中 ρ_x 为待测密度。若记 $g = \frac{\ln(J_{\text{exp}}/J_{\text{before}})}{\ln(J_{\text{before}}/J_{\text{air}})}$ ，则通过计算可得到爆轰波阵面沿药柱对称轴方向相对密度分布公式：

$$\frac{\rho_x}{\rho_0} = \frac{\alpha_1}{2\alpha_2 \rho_0 d} \pm \sqrt{\left(\frac{\alpha_1}{2\alpha_2 \rho_0 d}\right)^2 - \frac{\beta_2}{\alpha_2 \rho_0 d} \left(g + \frac{\alpha_1}{\beta_2}\right) + 1}, \quad (5)$$

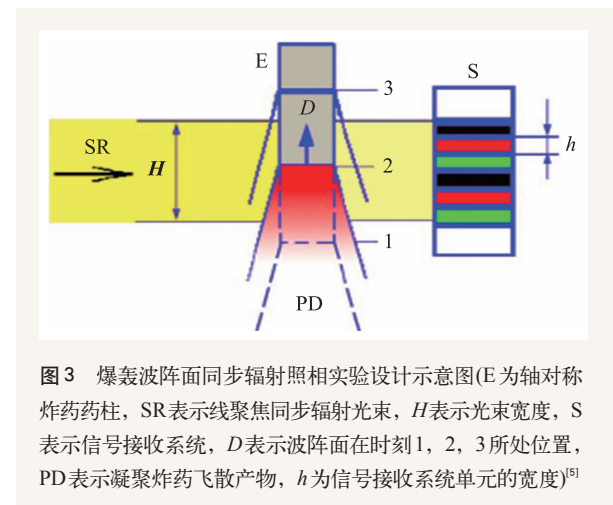


图3 爆轰波阵面同步辐射照相实验设计示意图(E为轴对称炸药药柱，SR表示线聚焦同步辐射光束， H 表示光束宽度，S表示信号接收系统， D 表示波阵面在时刻1，2，3所处位置，PD表示凝聚炸药飞散产物， h 为信号接收系统单元的宽度)^[5]

并由此获得爆轰波阵面相对密度变化曲线。

4.3 爆轰产物同步辐射层析成像实验密度重建技术

与等离子物理辐射源性质研究^[22]和内爆动力学高能X射线辐照实验研究^[23, 24]中遇到的问题类似,由投影数据重建爆轰产物密度空间分布也是一个典型的“病态”反问题^[25]。实验数据的非光滑性导致重建产物密度空间分布时不能直接使用Abel逆变换公式。目前,爆轰产物密度重建主要有两种途径:一种是利用爆轰产物结构方面的先验信息,建立正则化Abel逆变换求解技术;另一途径是计算模拟与实验数据相结合的正问题求解技术^[6, 7, 10]。引入X射线辐射衰减依赖于它直穿路径上的客体质量假设,两段法先将灰度数据转化为光束路径上的客体质量空间分布,然后通过构造密度曲线以计算产物质量空间分布。根据爆轰产物飞散气体动力学理论,可使用光滑函数近似刻画产物质量分布,函数的自由参数能通过调试计算结果与实验数据的符合程度来确定。这个方法不仅能显著提高密度重建精度,而且能确定粒子速度分布和压力等其他动力学参数^[11]。

4.4 爆轰过程同步辐射照相实验性能分析

俄罗斯第一代同步辐射光源白光束的平均能量为20 keV,利用它能够得到凝聚炸药爆炸形变和产物飞散区域的重要物理信息。但光源能量和探测器空间分辨率较低等因素也限制了它的应用范围,目前还得不到爆轰化学反应区的可靠数据。基于第一代同步辐射光源的爆轰过程观测实验系统,其沿药柱方向的时间分辨率约为0.2 μs ,

其径向空间分辨率依赖于密度重建网格的空间步长,在药柱边缘和爆轰产物飞散区域,分辨率精度可达0.2 mm。密度测量精度为 $\pm 0.2 \text{ g/cm}^3$,在低密度均匀区域和密网格区域,测量精度可提高到 $\pm 0.1 \text{ g/cm}^3$ 。

5 结束语与展望

高能凝聚炸药稳态爆轰传播规律对武器物理研究具有重要意义,基于同步辐射X射线光源的爆轰过程无损测量诊断技术,可以为爆轰等极端条件下极快过程的深入研究提供崭新的机遇和无可替代的途径。

俄罗斯爆轰过程同步辐射照相实验研究团队利用同步辐射光源,在实验布局设计、超快接收系统和数据测量诊断技术等方面取得了许多开创性成果,验证了同步辐射照相技术用于凝聚炸药的稳态爆轰过程研究的可行性。但还应注意,由于第一代同步辐射光源性能和接收系统缺陷等因素,限制了爆轰过程同步辐射照相实验的客体设计尺度与测量精度,增大了数据分析诊断的难度。这也应该是俄罗斯科学界积极参与欧洲同步辐射加速器项目的原因之一。

不难看出,凝聚炸药稳态爆轰同步辐射照相实验诊断技术具有很强的物理、数学、计算等多学科交叉的特征。中国是火药的故乡,在凝聚炸药爆轰规律研究领域理应作出更大的贡献。借鉴爆轰过程的同步辐射照相研究经验以及数据处理与密度重建领域的研究成果,探索基于上海光源(SSRF)等更高性能同步辐射光源的爆轰观测实验布局设计和数据原位无损测量技术,提高凝聚炸药爆轰模拟水平与测量诊断精度,无疑是今后凝聚炸药爆轰动力学的重要研究方向。

参考文献

- [1] Tobin J G, Chung B W *et al.* LLNL-Report: UCRL-JRNL-206886.Sep.30,2004
- [2] Ide-Ektessabi A. Applications of Synchrotron Radiation: micro beams in cell micro biology and medicine. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag,2007
- [3] Willmott P. An introduction to Synchrotron Radiation: techniques and applications. John Wiley & Sons Press,2011
- [4] Aleshav A N, Zubkov P I *et al.* Combustion, Explosion, and Shock Waves,2001,37(5):585
- [5] Ten K A, Evdokov O V *et al.* Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A,

- 2005, 543:170
- [6] Pruuél É R, Merzhievskii L A *et al.* Combustion, Explosion, and Shock Waves, 2007, 43(3):355
- [9] Evdokov O V, Kozyrev A N *et al.* Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A, 2007, 575:116
- [8] Ten K A, Evdokov O V *et al.* Combustion, Explosion, and Shock Waves, 2007, 43(2):204
- [9] Ten K A, Pruuél É R *et al.* Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A, 2009, 603:160
- [10] Titov V M, Pruuél É R *et al.* Combustion, Explosion, and Shock Waves, 2011, 47(6):615
- [11] Prueel E R, Ten K A *et al.* Doklady Physics, 2013, (1):24
- [12] Zhang F(ed.). Shock wave science and technology reference library, Vol.6: detonation dynamics. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2012
- [13] 张宝鈺, 张庆明, 黄风雷. 爆轰物理学. 北京: 兵器工业出版社, 2001. 89
- [14] Lee J H S. The Detonation Phenomenon. Cambridge: Cambridge University Press, 2008
- [15] Krehl O K. History of Shock Waves, Explosions and Impact: A chronological and biographical reference. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2009
- [16] Rivard W C, Venable D. Flash X-ray observation of the flow behind a detonation wave. Los Alamos Scientific Laboratory of the University of California, 1970, LA-4426
- [17] Molitoris J D. X-ray, detonation, and dead zone. In: <http://www.lnl.gov/str/December04/pdfs/12-04.4pdf>
- [18] Aufderheide III M *et al.* Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A, 1999, 422:704
- [19] Aulchenko V M, Evdokov O V *et al.* Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A, 2009, 603:73
- [20] Aulchenko V M, Evdokov O V *et al.* Instrum. Exp. Tech., 2010, 53(3):334
- [21] Tolochko B P, Aleshaev A N *et al.* Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A, 2001, 467—468:990
- [22] Gorenflo R, Vessella S. Abel Integral Equations: Analysis and Applications. Berlin: Springer-Verlag, 1991
- [23] Hanson K M. Tomographic Reconstruction of Axially Symmetric Objects from a Single Radiograph. In: Andre M and Hugon-schmidt M eds. Proc. SPIE 0491, 16th Inter. Cong. Strasbourg, France, 1984
- [24] Abraham R, Bergounioux M, Trélat E. Appl. Math. Optim., 2008, 58:345
- [25] Isakov V. Inverse problems for partial differential equations. New York: Springer, 2006

读者和编者

订阅《物理》得好礼

——超值回馈《岁月留痕》
——<物理>四十年集萃

的关爱和支持,《物理》编辑部特推出优惠订阅活动:向编辑部连续订阅两年(2015—2016年)《物理》杂志的订户,将免费获得《岁月留痕——<物理>四十年集萃》一本(该书收录了从1972年到2012年在《物理》各个栏目发表的四十篇文章,476页精美印刷,定价68元,值得收藏)。

欢迎各位读者订阅《物理》(编辑部直接订阅优惠价180元/年)

订阅方式

(1) 邮局汇款

地址:100190,北京603信箱

《物理》编辑部收

2012年《物理》创刊40周年,为答谢广大读者长期以来

(2) 银行汇款

开户行:农行北京科院南路支行

户名:中国科学院物理研究所

帐号:11250101040005699

(银行汇款请注明“《物理》编辑部”)

咨询电话:(010)82649266; 82649277

Email: physics@iphy.ac.cn

