

X 射线脉冲星能谱模拟方法

俞建杰, 曾倪香, 叶凌云, 方建正, 宋开臣

(浙江大学 生物医学工程与仪器科学学院, 浙江 杭州 310027)

摘要: 为探索 X 射线脉冲星能谱特征对 X 射线脉冲星导航的作用, 提出了一种模拟 X 射线脉冲星能谱的方法。该方法利用 X 射线管模拟 X 射线信号, 并通过阳极高压控制 X 射线管出射能谱, 根据不同阳极高压下 X 射线管出射谱特征, 采用最小二乘法拟合得到阳极高压随时间的变化曲线, 从而实现 X 射线脉冲星能谱的地面模拟。进行了相应的数学建模仿真, 仿真结果证明了该方法的可行性。完成了地面模拟实验, 实验结果表明, 利用该方法模拟得到的 X 射线脉冲星能谱与真实能谱的相似度达到 79%。此外, 为完善模拟 X 射线脉冲星特性, 在能谱模拟的基础上提出了 X 射线脉冲星能谱和流量同时模拟的方案。这些工作为将来在地面验证 X 射线探测器性能和导航算法提供了实验平台。

关键词: 能谱模拟; X 射线脉冲星; 阳极高压; 最小二乘拟合

中图分类号: P128.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)S-0126-05

Energy spectrum simulation method of X-ray pulsar

Yu Jianjie, Zeng Nixiang, Ye Lingyun, Fang Jianzheng, Song Kaichen

(College of Biomedical Engineering & Instrument Science, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: In order to explore the significance of X-ray pulsar spectra for X-ray pulsar navigation, an X-ray pulsar energy simulation method was proposed. In this paper, X-ray tube was used to produce X-ray signals, and emission spectroscopy was controlled with anode voltage. To achieve X-ray pulsar spectrum simulation, least squares was used to obtain anode voltage curve, and then ground experiment was realized. Mathematical modeling and simulation were implemented, and the corresponding results prove the feasibility of this method. Furthermore, ground experiments were carried out, experimental results show that the similarity of X-ray pulsar spectra between experimental and actual is almost 79%. In addition, a scheme of simulating X-ray pulsar energy and flow simultaneously was proposed based on above energy simulation. These works can provide an experimental platform for future X-ray detector and navigation algorithm.

Key words: spectrum simulation; X-ray pulsar; anode high voltage; least squares

收稿日期: 2015-10-05; 修订日期: 2015-11-09

作者简介: 俞建杰(1980-), 男, 副研究员, 博士, 主要从事光学惯性传感方面的研究。Email: yjjhit@zju.edu.cn

0 引言

在 X 射线脉冲星导航中, 脉冲轮廓是导航的基本观测量, 但是由于脉冲星在 X 射线频段光子流量密度低, 需要经过较长时间的积分并通过周期折叠才能获得较高信噪比的脉冲轮廓^[1]。过长的积分时间局限了 X 射线脉冲星在短时导航的应用。X 射线脉冲星的探测能谱作为脉冲星的重要物理特征参数之一^[2], 其获取方式与 X 射线脉冲星脉冲轮廓的获取不同, 不依赖于脉冲星的周期。因此, 有必要研究能谱特征在 X 射线脉冲星自主导航中的应用, 弥补利用脉冲轮廓进行自主导航^[3]的不足。

为了探索能谱特征对 X 射线脉冲星导航的意义, 需要构建地面能谱模拟系统。其中 X 射线脉冲星能谱数据的获取是进行地面模拟最重要的前提。自第一颗脉冲星被发现以来, 脉冲星的理论和观测研究成为了一个新的研究热点^[4]。进入 20 世纪 80 年代以来, 各国相继发射卫星, 制定各种巡天观测计划^[5], 形成对 X 射线观测的热潮。目前 NASA 的深空探测网已具规模^[6], 积累了大量新的脉冲星观测数据。为分析脉冲星特征、建立脉冲星导航数据库^[7], 获取地面模拟数据提供了丰富的资源。在地面模拟方面, 国外的 X 射线脉冲星导航半实物仿真技术公开资料相对较少。国内对 X 射线脉冲星的地面模拟技术开展了相关的研究。参考文献[8]研制了国内首套 X 射线脉冲星导航地面模拟平台。采用分光器和斩波器实现, 模拟了 X 射线脉冲星导航的星源强度、周期及脉冲轮廓。参考文献[9]设计了一种模拟调制方式的栅控 X 射线脉冲星仿真源模拟脉冲星的流量特征。

现有的 X 射线脉冲星地面模拟系统已能实现较高精度流量轮廓的模拟, 但对于能谱的模拟还仅停留在能量范围的模拟上, 未能实现能谱特征的较好还原。文中将研究 X 射线脉冲星能谱模拟方法, 利用现有 X 射线脉冲星数据并结合 X 射线管出射能谱特征, 采用最小二乘法实现 X 射线脉冲星能谱特征的模拟。此外, 为了更好地模拟脉冲星的物理特征, 文中给出了能谱和流量同时模拟的方案, 以满足未来在地面实现探测器性能和导航算法验证的需求。

1 能谱模拟存在的问题分析

用 X 射线管产生 X 射线信号是最常用的方式。

为了控制 X 射线管的出射能谱实现对脉冲星能谱特征的模拟, 有必要对 X 射线管的出射谱特征进行深入分析。

X 射线管是根据 X 射线的产生机理而形成的器件, 通过给灯丝加热产生电子云, 在两端阳极电压的作用下, 电子以高能高速的状态撞击靶材, 高速电子到达靶面, 运动突然收到阻止, 其动能的一小部分便转化为辐射能, 以 X 射线的形式放出, 以这种形式产出的辐射称为轫致辐射。当施加在 X 射线管两端的阳极高压达到一定值时, X 射线管会向外发出 X 射线标志谱, 标志谱的产生与阳极靶的材料有关。根据 X 射线管的工作原理, 可以得到, 阳极靶材和阳极高压决定 X 射线管的出射能谱。

在实际实验过程中, X 射线管的靶材是确定的。因此, X 射线管产生的 X 射线的能谱就只跟阳极高压有关, 其出射能谱可通过 X 射线管连续分布谱的经验公式获得^[10-11]:

$$I_{\lambda}=2.72 \times 10^{-6} Z \frac{1}{\lambda^2} \left(\frac{\lambda}{\lambda_0} - 1 \right) f W_{ab} \quad (1)$$

其中

$$W_{ab}=\exp(-0.35 \lambda^{2.86} t_{be}) \quad (2)$$

$$f=(1+C \xi)^{-2} \quad (3)$$

公式(3)中

$$\xi=\left(\frac{1}{\lambda_0^{1.65}} - \frac{1}{\lambda^{1.65}} \right) \mu_{eg} \csc \varphi \quad (4)$$

$$C=\frac{1+(1+2.56 \times 10^{-3} Z^2)^{-1}}{[1+(2.56 \times 10^3) \lambda_0 Z^{-2}](0.25 \xi+1 \times 10^4)} \quad (5)$$

式中: I_{λ} 为 X 射线管的出射强度; W_{ab} 为铍窗吸收限校正; f 为参数。公式(2)的 t_{be} 为铍窗厚度, 通过公式(4)和公式(5)计算可得到参数 f , 公式(4)的 λ_0 为 X 射线管出射的最短波长, 与所加阳极电压的大小有关, μ_{eg} 为靶材质量吸收系数, φ 为 X 射线出射角。公式(5)的 Z 为靶材原子序数。

通过上述公式对 X 射线管的出射能谱进行分析计算。计算中取铍窗厚度为 30 μm , 选用钨靶, 因此 Z 为 42, μ_{eg} 的值可以通过查表并进行插值获取, X 射线出射角为 45°。选取几个阳极电压对 X 射线管的出射谱进行计算, 通过计算可以得到如图 1 所示在不同阳极电压下 X 射线管的出射能谱。图中高度最高的为 15 kV 阳极电压下对应的 X 射线管出射能谱。最低的为 5 kV 阳极电压下对应的 X 射线管出射

能谱。由图可知阳极电压越高, X 射线管出射谱的强度越大, 通过改变阳极高压可以得到不同的 X 射线管出射能谱。图 1 并未表示出 X 射线管发出的标志谱, 这是由于计算中选用的靶材为钨靶, 其需要 20 kV 的阳极高压才会发出标志谱, 而计算中所加的最高阳极电压只有 15 kV, 不足以激发出标志谱。

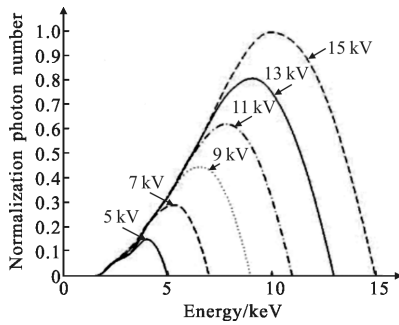


图 1 不同阳极电压下 X 射线管的理论出射能谱

Fig.1 X-ray tube theoretical spectrum under different anode voltage

由于 X 射线脉冲星的实际能谱更偏向于 X 射线管的韧致辐射, 因此可以通过构造一系列 X 射线管出射能谱来获取需要模拟的 X 射线脉冲星的能谱。但是阳极高压在变化过程中 X 射线出射管的能谱是未知的, 如何实现阳极电压变化过程中 X 射线管出射能谱的控制, 是 X 射线脉冲星能谱模拟所要解决的关键问题。

2 X 射线脉冲星能谱模拟方法

由于脉冲星信号流量低, 宇宙背景噪声强, 为了从一个周期探测的光子信号中提取 X 射线脉冲星轮廓信息, 必须经过长时间的信号积分, 并将所有探测到的光子按照单个脉冲的光子到达时间对齐并排列起来, 通过该脉冲星的周期对光子序列进行周期叠加^[12]。这种方法给 X 射线脉冲星能谱的模拟提供一种新的思路, 即分时模拟。文中选取 Crab 脉冲星的能谱作为能谱模拟的对象。此方法要求得到不同阳极高压的持续时间, 根据 X 射线脉冲星的实际能谱和图 1 所示的 X 射线管的出射能谱, 通过最小二乘法获得阳极电压的持续时间, 从而可以得到阳极高压调节曲线。由于持续时间不能是负的, 因此在计算时, 需要合理的选取阳极高压。图 2 为选取阳极高压为 4 kV、5 kV、6 kV、7 kV 和 9 kV 条件下, X 射线管阳极电压的一个调节周期。其中横坐标表示阳极电

压持续的所模拟脉冲星的周期数, 纵坐标表示阳极电压的大小。通过阳极电压的周期性调节可以实现能谱的周期性模拟。

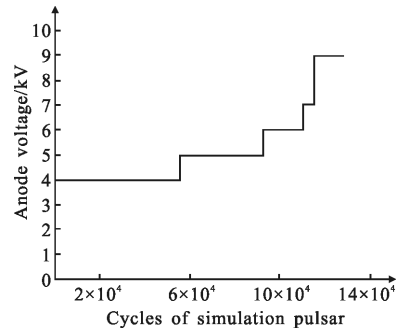


图 2 阳极高压调节曲线

Fig.2 Anode high voltage adjustment curve

为了实现阳极电压调节过程中, X 射线管出射能谱可控, 采用栅控 X 射线管的方式产生 X 射线信号。栅控 X 射线管是在传统的 X 射线管的基础上, 增加控制栅极, 使得从阴极发出的电子在控制栅极作用下阴极发射的部分电子被截住, 从而达到改变轰击金属靶电子数目的目的。此方法已被用于 X 射线管出射流量的控制, 实现了 X 射线脉冲星流量轮廓的模拟, 取得了较高的仿真效果^[9]。将此方法应用于能谱模拟, 在调节阳极电压的同时控制栅极电压使出射的光子数为零, 就能够实现阳极电压变化过程中, X 射线管出射能谱的控制, 从而使模拟能谱更大程度地接近真实能谱。

3 能谱模拟仿真与实验

为了对模拟效果进行评估, 通过上一节得到的各个阳极电压的持续时间, 计算得到对应的模拟能谱曲线。通过 Matlab 处理, 可以获得如图 3 所示的模拟能谱和 X 射线脉冲星实际能谱, 利用互相关系数来表征两条曲线的相似程度。通过计算可知, X 射线脉冲星实际能谱与利用 X 射线管模拟的能谱的相似度可达 97%, 从理论上验证了文中提出的能谱模拟想法的可行性。

在理论仿真的基础上, 通过实验验证能谱模拟方法的可行性。实验中选用威思曼高压电源 XRA30P15 作为 X 射线管的供电电源, 该高压源可通过 PC 机实现阳极电压的远程控制。阳极电压调节时间通过上位机的控制实现。栅控 X 射线管由中国科学院西

安精密机械研究所研制,选用钨靶作为阳极材料。在探测端选用北京昌瑞有限公司自主研发的 CR-S100 能谱探测器对 X 射线管的出射能谱进行探测,实验结果通过专用软件获得。整个探测过程在屏蔽良好的屏蔽结构中进行。

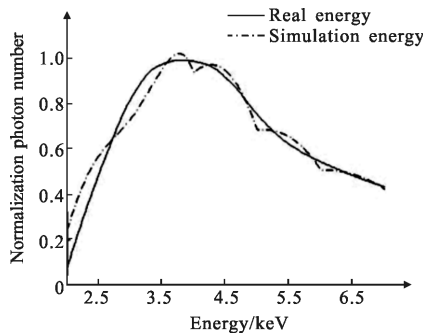


图 3 Crab 脉冲星能谱模拟仿真图

Fig.3 Spectrum simulation diagram of Crab pulsar

实验中首先对 5~12 kV 固定阳极电压下 X 射线管的出射能谱进行了探测,探测时间为半个小时,灯丝电流为 1000 mA,探测器离放射源的距离为 15 cm。探测结果如图 4 所示。图中高度最高的为 12 kV 阳极电压下对应的 X 射线管出射能谱。最低的为 5 kV 阳极电压下对应的 X 射线管出射能谱。与理论计算得到的 X 射线管的出射能谱相比,结果是一致的。

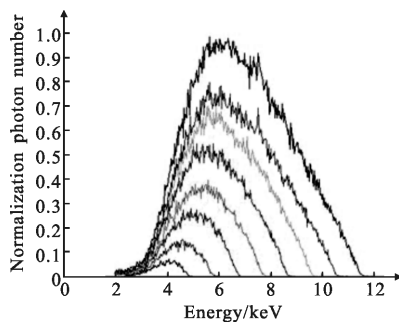


图 4 不同阳极电压下 X 射线管真实出射能谱图

Fig.4 X-ray tube real spectrum under different anode voltages

根据 X 射线脉冲星真实能谱,选取合适的阳极电压利用最小二乘法计算出阳极电压调节曲线。根据调节曲线通过高压源控制 X 射线管,并在阳极电压变化过程中,实现栅极电压的控制,使 X 射线管无能谱辐射。

图 5 表示了 X 射线管出射的构造能谱和 X 射线脉冲星的真实能谱。与真实能谱相比,模拟得到的相似度为 79%。模拟精度有待进一步提高,主要原因

是低能段数据量不够,一方面是空气对 X 射线的衰减作用,另一方面是受限于探测器所能探测到的最低光子能量。为了获得较多低能段的数据,需要保证探测过程在真空中进行。但是,从实验结果可知,文中提出的能谱构造方法能较为真实地模拟 X 射线脉冲星的真实能谱。

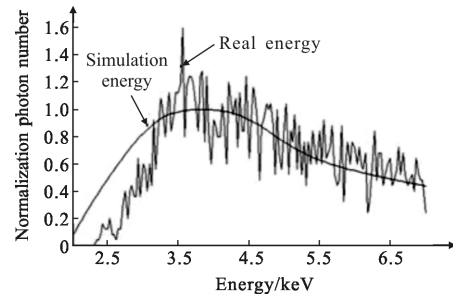


图 5 Crab 脉冲星能谱模拟实验图

Fig.5 Spectrum simulation experimental diagram of Crab pulsar

4 X 射线脉冲星流量能谱同时模拟方案

流量轮廓是 X 射线脉冲星导航最主要的参数,为了使 X 射线模拟源尽可能接近真实星源,需要同时实现 X 射线脉冲星流量轮廓和能谱的模拟。同样采用栅控 X 射线管的方式来模拟 X 射线脉冲星的流量。在每一个阳极高压下都有对应的栅控电压-线流量曲线,图 6 给出了不同阳极电压下栅控 X 射线管的栅控电压与出射流量关系的曲线,更多阳极高压下的栅控电压-流量曲线均可通过实验测得。

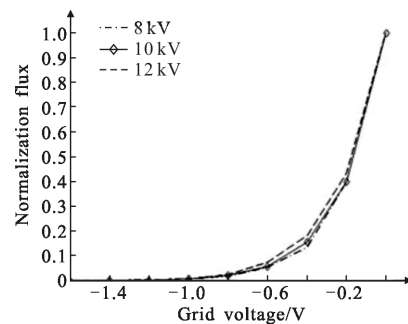


图 6 不同阳极电压下栅控-流量曲线

Fig.6 Grid-controlled flux curve under different anode voltages

由于能谱模拟时需要改变阳极电压,阳极电压的改变,会加快管内加速电场强度变化,导致阳极收集电子的能力发生相应的变化,从而导致管电流的改变^[13],这不利于流量的模拟。为了实现流量和能谱的同时模拟,采用如下的模拟方案:

如图 7 所示,在阳极电压调节过程中,通过控制栅极电压,使栅控 X 射线管处于关断状态,关断时间跟高压源的稳定时间以及 X 射线脉冲星的周期相关。必须保证关断时间为脉冲星周期的整数倍且大于高压源稳定时间。这种方式也能消除阳极电压调节过程中对管电流的影响。当阳极电压电压稳定后,通过改变栅控电压,使流量波形符合 X 射线脉冲星周期变化的流量轮廓,在这段时间内输出整数个轮廓波形。不同阳极电压下,输出的轮廓波形不同,波形输出个数与最小二乘拟合得到的阳极高压持续时间相关。最后通过历元折叠,获得模拟的流量轮廓和能谱特征。

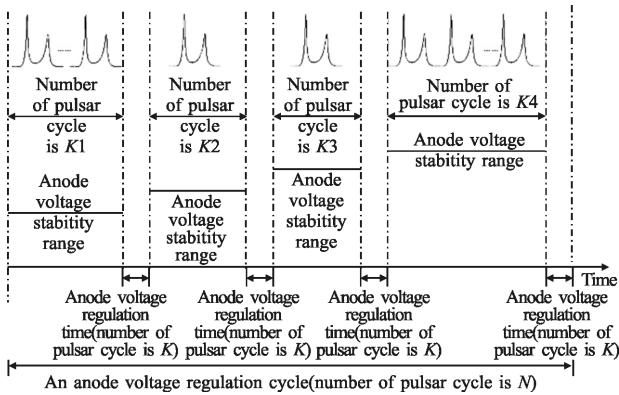


图 7 脉冲星地面模拟方案图

Fig.7 Pulsar ground simulation diagram

5 结论

文中提出了一种 X 射线脉冲星能谱特征模拟方法,并进行了仿真和实验验证。仿真和实验结果表明该方法能有效还原 X 射线脉冲星的能谱特征。文中同时提出了一种能够同时模拟流量轮廓和能谱特征的方案,该方案对未来 X 射线脉冲星自主导航算法的可行性验证有一定参考价值。

参考文献:

[1] Liu Jin. Spacecraft autonomous navigation method based on X-ray pulsars [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2011. (in Chinese)

[2] Shuai Ping, Li Ming, Chen Shaolong, et al. X-ray Pulsar Navigation Principle and Method [M]. Beijing: China Aerospace Press, 2009: 175-180. (in Chinese)

[3] Liang Dongsheng. Aviation aircraft astronomical autonomous navigation and positioning technology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014(09): 3020-3025. (in Chinese)

[4] Shuai Ping, Chen Shaolong, Wu Yifan, et al. Analysis of X-ray pulsar navigation technology and application prospect[J]. *Chinese Space*, 2014(09): 3020-3025. (in Chinese)

[5] Lu Jinghui. Method of uniformity and rapidity for selecting guide stars [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(1): 348-353. (in Chinese)

[6] Wang Yidi. Research on X-ray pulsar navigation methods in deep space [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2011. (in Chinese)

[7] Cui Xiangxiang. Guide star selection method for star tracker with thin field of view [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(4): 1249-1253. (in Chinese)

[8] Liu Li, Zheng Wei, Tang Guojian, et al. Simulation system based on X-ray pulsars navigation [J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2012(5): 10-14. (in Chinese)

[9] Zhou Feng, Wu Guangmin, Zhao Baosheng, et al. Research on source simulation modulation based on X-ray pulsars navigation[J]. *Acta Physica Sinica*, 2013(11): 582-587. (in Chinese)

[10] Pella P A, Feng L Y, Small J A. An analytical algorithm for calculation of spectral distributions of X-ray tubes for quantitative X-ray fluorescence analysis [J]. *X-ray Spectrometry*, 1985, 14(3): 125-135.

[11] Gu Yi, Xiong Shengqing, Ge Liangquan, et al. Research on micro X-ray tube exit spectral characteristics and determination the sickness of Be window [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2014(01): 252-256. (in Chinese)

[12] Wang Jing. Design and implementation of X-ray pulsar ground simulation system with high resolution [D]. Xi'an: Xidian University, 2013. (in Chinese)

[13] Chen Wenlong, Rao Yihua, Chen Haihui. Research on X-ray tube current control [J]. *Nuclear Electronics & Detection Technology*, 2008(04): 770-773. (in Chinese)