

脉冲星自转周期不稳定的研究

何薇

武汉大学测绘学院, 武汉 (430079)

E-mail: cherubspelca@yahoo.cn

摘要: 脉冲星自转周期具有重复的均匀性, 在脉冲星计时研究中, 这是最引人关注的一个特性。基于脉冲星时间的这个特性, 使得脉冲星在导航中的运用成为可能。但脉冲星在周期上也有一些不稳定性, 通过对脉冲星的内部结构的研究, 发现脉冲星频率的不稳定性似乎与脉冲星自转速度降低以及内部超流体流有关。本文从规则自转减速和不规则自转减速两方面讨论了脉冲星自转周期的不稳定性, 为脉冲星脉冲到达时间的分析模型提供理论依据, 并着重分析了不规则减速中的时间噪声和自转突变问题, 为研究脉冲星内部结构和定义高精度的脉冲星时提供宝贵的信息。

关键词: 脉冲星; 频率稳定度; 时间噪声; 自转突变

1. 引言

脉冲星的计时研究中, 脉冲星自转周期重复的均匀性是其最引人关注的一个特性。特别是毫秒脉冲星, 其周期的高度稳定性在宇宙天体中是绝无仅有的, 因而在广泛的领域中有着特殊的研究意义。一些毫秒脉冲星的周期稳定性达到 $10^{-14} \sim 10^{-15}$, 已经与原子钟的稳定度相当, Matsakis 等人将由 PSR1855+09 确定的 PT 与原子时 TA 做了比较, 证明在长期的稳定性方面脉冲星大大地超过了原子钟^[1-6]。

基于脉冲星时间的这些特性, 脉冲星在导航中的运用成为可能。利用毫秒脉冲星计时观测建立脉冲星时间标准的研究工作日益受到重视。一般情况下, 脉冲星脉冲到达时间(TOA)的分析模型除包括脉冲星自转频率参数外, 还包括脉冲星自转频率的变化率。为分析脉冲星自转的稳定度, 我们需要对脉冲星转慢速率进行研究。通过对脉冲星的内部结构的研究, 发现脉冲星频率的不稳定性似乎与脉冲星自转速度降低以及内部超流体流有关。本文从规则的自转减速和无规则的自转减速两方面来探讨脉冲星自转的变化。

2. 规则的自转减速

脉冲星由于释放低频电磁波或者释放高能微粒和放射性物质, 使得其自身动能不断降低, 导致自转速度降低。

通常减速状态下, 制动力矩正比于旋转频率 Ω 的 n 次方, 制动系数 n 决于制动机制的物理意义:

$$\dot{\Omega} = -k\Omega^n \quad (1)$$

对于两极地区附近的磁力制动, 转速下降率由在旋转轴上的磁偶极矩 M 和中子星的转动惯量 I 组成, 公式为:

$$Torque = -2 \times M^2 \Omega^3 / 3C^3 = I\dot{\Omega} \quad (2)$$

将(2)式与(1)式比较, 可得 $n=3$ 。对于从线性旋转体飞落的微粒, n 的期望值也为 $3^{[8]}$ 。我们可将 M 表示为在半径为 R 的星体表面的磁场的形式 $B_0 = M / R^3$, 同时可得 B_0 :

$$B_0 = \sqrt{3Ic^3 P \dot{P} / 8\pi^2 R^6} = 3.3 \times 10^{19} (P \dot{P})^{1/2} \quad (3)$$

此式中, $P = 2\pi / \Omega$ 。假设中子星半径 $R=10\text{km}$, 转动惯量 $I=10^{45}\text{gm cm}^2$ 。结合(1)式, 可得具有某一时刻的初始旋转频率 Ω_0 后的时间间隔:

$$t = -\frac{\Omega}{(n-1)\dot{\Omega}} \left[1 - \left(\frac{\Omega}{\Omega_0} \right)^{n-1} \right] \quad (4)$$

由于初始旋转速率非常高，即 $\Omega_0 \gg \Omega$ ，那么

$$t = -\frac{\Omega}{(n-1)\dot{\Omega}} = +\frac{\dot{P}}{(n-1)P} = +\frac{\dot{P}}{2P} \quad (5)$$

上式中最后的一个估计式也常被称为脉冲星的特征年龄，特征年龄常常作为真实年龄的上限^[9]。

通过对公式(1)进行微分，我们可检查 n 的值：

$$n = \Omega \ddot{\Omega} / \dot{\Omega}^2 \quad (6)$$

对于老脉冲星，时间噪音是影响 $\ddot{\Omega}$ 测量结果的主要因素， n 是个可变值，而且与制动机制无关。但是年轻脉冲星由于自转速度降低明显，使得高阶导项很大，这样容易与时间噪音相混淆。^[9]

3. 无规则的自转减速

上面讨论的自转速率降低是稳定和可预测的，但是有些脉冲星有时会有不可预测的变化。由于自转速度降低，内部流体的角动量发生改变^[10]，导致了这种不可预测的变化，主要分为两种：时间噪音和自转突变。

3.1 时间噪音

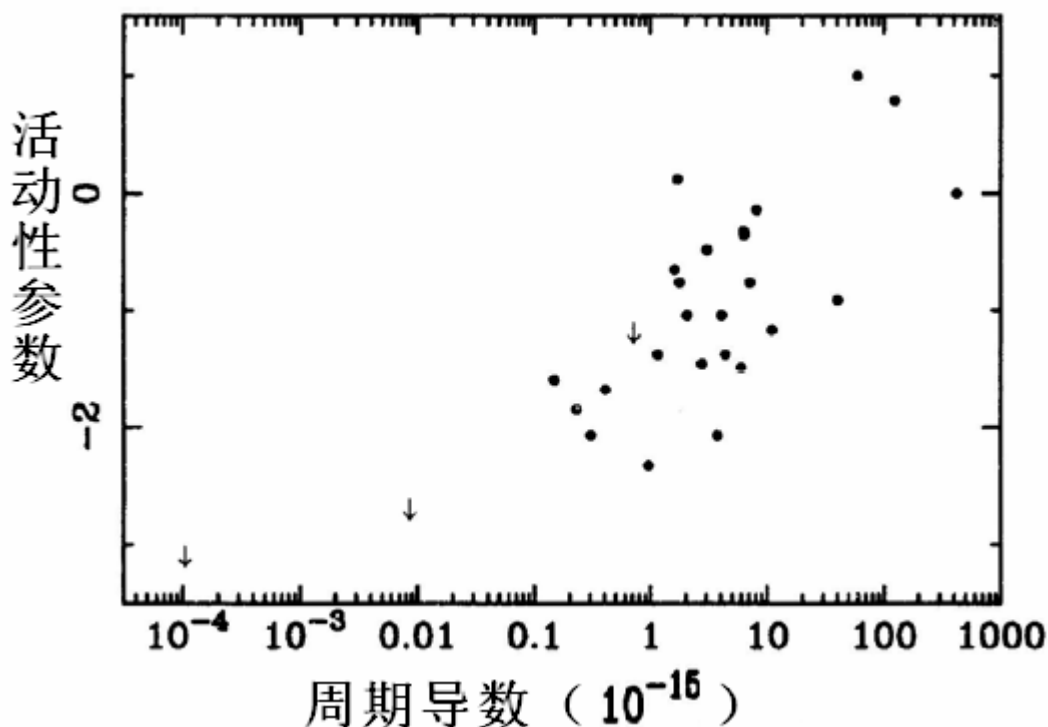


图 1^[7] 把活动性参数表示为周期倒数的函数

Figure 1: The timing activity parameter plotted as a function of period derivative

时间噪音是连续不可预测的，表现为自转周期的不规则变化。它与简单的脉冲星自转速率降低模型有关，它在有大的周期倒数的脉冲星的探测中表现显著^[11]。时间信号的大小可

由上文讨论的有规律的自转减速模型的残差反映。取时间噪声的对数，称为活动性参数，它是周期一阶导的函数^[12]。从图 1 可以看出，那些周期导数很小的毫秒脉冲星是最稳定的。

3.2 自转突变

自转突变是规模更大的周期突变，突变后往往伴随着突变的恢复或释放过程。这种现象是由于中子星内部的流体成分不全和外壳一起以同样的角速度旋转^[13]。这种模型导致了突变，突变的恢复过程是时间的函数，可用一个或多个指数函数表示^[7]：

$$\Delta v(t) = \Delta v_0 \times [1 - Q(1 - e^{-t/\tau})] \quad (7)$$

上式中 $\Delta v(t)$ 为突变的时间函数， Δv_0 为脉冲星突变发生时刻自转频率的突变， Q 表示突变恢复的程度，是突变恢复值与突变量的比值， τ 为突变恢复的时间尺度。

3.2.1 自转突变的发生原因

自观测到第一个周期突变以来，曾有很多模型解释突变发生的机制和突变规律。这些模型主要包括：

(1)星震模型：由于脉冲星自转减慢，引力使中子星收缩，椭圆率变小，设椭圆率变化 $\Delta \varepsilon_0$ ，中子星表面物质的张力 ($\propto \Delta \varepsilon_0$) 会阻止形变发生。当继续减慢时张力不足以阻止形变，中子星就突然收缩 ΔR ，释放引力势能，使中子星自转变快而发生突变。相应的转动惯量变化比率为：

$$\Delta \varepsilon = \frac{\Delta I}{I} = \frac{2\Delta R}{R} = -\frac{\Delta \Omega}{\Omega} \quad (8)$$

Crab 脉冲星每 10 年的突变 $\Delta \varepsilon = -10^{-7}$ ，如今 ε 的值大致为 10^{-3} 。由于突变， ε 减弱的年限比这颗星的年龄要大得多，这是比较合理的。但对 Vela，每 3 年的突变 $\Delta \varepsilon = 2 \times 10^{-6}$ ，如今 ε 的值大致为 10^{-4} ，这样的话， ε 将在 100 年后消失，但这个年限仅仅只占它年龄的 1%^[14]。那么现有的突变率不会是持续不变的，还需要寻找新的机制解释类似 Vela 脉冲星的大突变。尽管如此，这个理论对小规模的突变解释还比较令人满意。

(2)涡流模型：有一种观点认为中子超流内核存在于外壳的内部，这种构造是造成突变的原因。超流的旋转速度由涡流的密度决定，速度的减慢也就相当于涡流向外移动。然而，涡流可能镶嵌在外壳晶格中富含中子的原子核上，而不能向外移动^[15]。当耦合力不能超过某种极限值 (Magnus 力时)，涡流就不再镶嵌在原处，而是向外运动，进而导致外壳角动量增加，我们就观测到了突变现象。涡流在外壳物质内移动，并重新镶嵌到晶格上，向外的移动也逐渐减弱，这就是突变的恢复过程，恢复的速度受镶嵌能、温度、非镶嵌的涡流与外壳的速度差决定^[16]。在突变发生后的瞬间，涡流密度变小，内核的角速度与外壳非常接近，超流将保持这个速度，而外壳的旋转仍然逐渐减慢，直到下一次突变发生。

3.2.2 自转突变的发生频率

脉冲星周期突变现象是偶发事件，我们无法知道什么时候会发生。直到现在，突变现象的研究都受制于观测到的突变现象很少。除了 Vela 脉冲星，我们 20 年来观测到的突变现象只有 10 次。很显然，没有观测到的突变事件一定不少。由于突变现象有很长的恢复过程，要观测一个完整的突变事件不仅需要及时发现，而且还要进行跟踪观测。最理想的方法对一批年轻的脉冲星进行不间断的观测，这是非常难做到的。这是由于它们“年轻”的时间并不

长,又由于它们处在一个高温、高散射率的背景下,使得对它们的探测很不利。为了克服这种影响,有两种测量方法:低纬度测量和高无线电频率测量。运用这种测量方法,在 Jodrell Band^[17],已经成功发现了 40 颗新脉冲星,在五年的观测中,其中 6 颗脉冲星发生了 12 次突变现象^[18]。

表 1 给出了 20 颗脉冲星突变的简要信息,包括突变次数,以及转动惯量变化比率。从表中可以看出突变事件主要发生于年轻脉冲星,但年轻脉冲星只占已知脉冲星数量的 3%。

表 1^[7] 已知的突变脉冲星

Tab.1 Known Glitching pulsars

脉冲星	突变数量	$\Delta\Omega/\Omega \times 10^6$
0355+54	2	0.006, 4.4
0525+21	2	0.0013, 0.0003
0531+21	4	0.01, 0.04, 0.01, 0.08
0833-45	9	2.3, 2.0, 2.0, 3.1, 1.1, 2.0, 1.3, 1.8, 2.7
1325-43	1	0.12
1338-62	3	1.5, 0.03, 1.0
1508+55	1	0.0002
1535-56	1	2.8
1641-45	1	0.2
1706-44	1	2.1
1727-33	1	3.1
1736-29	1	0.003
1737-30	6	0.42, 0.03, 0.007, 0.03, 0.60, 0.70
1758-23	3	0.20, 0.23, 0.35
1800-21	1	4.1
1823-13	2	2.7, 3.1
1830-08	1	1.9
1859+07	1	0.03
1907+00	1	0.0007
2224+65	1	1.7

4. 结论

脉冲星到达时间的研究意义不仅在于了解脉冲星本身的特性,通过脉冲星周期的高测定精度,还开辟了用脉冲星定义时间标准的可能性。但是脉冲星到达时间的测量精度最终决定于脉冲星固有的内部扰动、射电信号在星际介质传播过程中的延迟和仪器的影响^[19]。脉冲星自转的不均匀变化,即时间噪声和突变现象的本质研究进行的尚且不够。随着观测到更多年轻脉冲星的突变和到达时间资料的积累,对于脉冲星内部结构的研究会更加的深入,以促进我们对脉冲星自转频率变化规律的研究。

参考文献

- [1] Matsakis D N, Taylor J H. Astron[J]. Astrophys., 1998,329:620.
- [2] Taylor J H. Millisecond Pulsars: Natures Most Stable Clocks[J]. Proc IEEE, 1991, 79(7): 1 054-1 062.
- [3] Petit G. systems de Reference Spatio2Temporeis[J]. Paris: Journees, 1990, (293).
- [4] Backer D C. Pulsars the New Celestial Clocks 4 Predoctoral Astrophysics School of the European Astrophysics Doctoral Network (EADN): Galactic High-Energy Astrophysics[J]. High-Accuracy Timing and Positional Astronomy. 1993, (4): 193-253.
- [5] Manchester R N. Pulsars -Setting the Standard[J]. Proc Astron Aust, 1994, 11(1): 1-6.
- [6] Lyne A G. Pulsars as Clocks 10[A]. International Conference on European Frequency and Time[C]. France, 1996. 1-7.
- [7] A.G.Lyne, R.S.Pritchard, S.L.Shemar. Timing Noise and Glitches[J]. Astrophys. Astr,1995,16: 179-190.
- [8] Goldreich P., Julian W. H.Pulsar Electrodynamics[J]. Astrophysical Journal. 1969, 157: 869-880.
- [9] A.G.Lyne, R.S.Pritchard, S.L.Shemar. Timing Noise and Glitches[J]. Astrophys. Astr, 1995, 16: 179-190.
- [10] Lyne A. G., Pritchard R. S., Graham-Smith F. Spin-up and recovery in the 1989 glitch of the Crab pulsar[J]. Nature, 1992, 359: 706-723.
- [11] Cordes J. M., Helfand D. J. Pulsar Timing. III- Timing Noise of 50 Pulsars[J]. Astrophysical Journal, 1980, 239: 640-650.
- [12] Cordes, GS Downs. Pulsar Timing Observations. III- Pulsar Rotation Fluctuations[J]. Astrophysical Journal, 1985, 59:343-382.
- [13] Baym G., Pethick C, Pines D. Superfluidity in Neutron Stars [J].Nature,1969,224: 673-674.
- [14] Pines, D.,Shaham, J., Ruderman, M.. Vela pulsar-Speedups explained in terms of corequakes [J]. Nature Physical Science,1972,237: 83.
- [15] P.W. Anderson, N. Itoh. Pulsar glitches and restlessness as a hard superfluidity phenomenon[J]. Nature,1975,256: 25-27.
- [16] J.McKenna, A.G.Lyne. PSR1737-30 and period discontinuities in young pulsars[J]. Nature,1990,343: 349-350.
- [17] T.R.Clifton, A.G.Lyne. High-radio-frequency survey for young and millisecond pulsars[J]. Nature,1986,320: 43-45.
- [18] SL Shemar, AG Lyne. Observations of pulsar glitches[J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society,1996,282:677-690.
- [19] RS Foster, JM Cordes. Interstellar Propagation Effects and the Precision of Pulsar Timing[J]. Astrophysical Journal,1990,364:123-135.

Research on Rotational Instabilities of Pulsar

HE Wei

School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan (430079)

Abstract

In the research on pulsar timing system, one of the most remarkable properties of pulsars is their rotational stability which enables pulsar to be used in navigation. However, some display timing imperfections which are due to the presence of internal superfluid according to the study on the inside of pulsars. This review describes the rotational instabilities of pulsar which is an essential parameter in TOA model and is divided into regular slowdown and irregular slowdown. Careful studies of timing noise and glitches can provide valuable information on the internal structure of pulsars and high-precision pulsar timing techniques.

Keywords: pulsar; frequency stability; timing noise; glitch

作者简介：何薇(1986.7),女,硕士研究生,现从事卫星导航与定位方向研究。