

文章编号: 1007-4627(2013)01-0017-05

中子星制动机制的研究

熊雪宇, 高春媛, 徐仁新

(北京大学物理学院和核物理与核技术国家重点实验室, 北京 100871)

摘要: 中子星的制动机制是中子星研究中的基本问题。磁偶极辐射模型给出中子星的制动指数为 3, 而所有观测到的中子星的制动指数都小于 3, 这表明中子星除磁偶极辐射之外还存在其他的转动能量损失方式。考虑中子星的转动动能损失来自: 磁偶极辐射、由于单极感应引起的粒子流逃逸以及中子星和量子真空摩擦引起的能量损失。基于这 3 种辐射机制, 给出了改进后的中子星能量损失功率的计算公式和周期对时间一阶导数与周期的依赖关系。考察了 6 颗中子星 (J1119-6127, B1509-58, J1846-0258, B0531+21, B0540-69 和 B0833-45) 的周期-周期一阶导数关系, 制动指数、表面磁场强度以及磁倾角之间的关系。研究表明, 星风效应中, 真空间隙电势差为常数时磁倾角只能在有限范围内取值, 而其他情况下磁倾角在 $0\sim 90^\circ$ 之间连续取值。

关键词: 中子星; 制动指数; 量子真空摩擦; 单极感应

中图分类号: O571 **文献标志码:** A **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.30.01.017

1 引言

中子星的辐射过程目前是一个没有完全研究清楚的问题。中子星是为脉冲星建立的一种模型, 还有其他模型认为中子星是夸克星^[1]。由于历史原因, 脉冲星一般也被称为中子星, 在不涉及内部结构时, 这种相互替称是合理的, 本文中脉冲星和中子星属同一个概念。中子星的转动能量损失、转动减慢过程叫中子星的制动。对于转动供能脉冲星, 如果假设其能量损失全部来自于磁偶极辐射, 则由此得出的制动指数 $n=3$, 但观测发现转动供能中子星的制动指数都小于 3。很多模型试图解释这种差别。例如: 认为脉冲星的转动能量损失是磁偶极辐射与相对论粒子流带走转动动能之和^[2-5]; 考虑磁倾角的变化对脉冲星转动动能损失的影响^[6-9]; 考虑磁场强度变化对脉冲星转动动能损失的影响^[10-13]; 考虑吸积对脉冲星制动的影响^[13-15]; 考虑脉冲星磁层里的磁重联对脉冲星制动的影响^[16]; 考虑由于脉冲星和量子真空摩擦对脉冲星制动的影响^[17]等。Kramer 等对 PSRB1931+24 的

观测表明磁偶极辐射和相对论粒子流对脉冲星的制动都起着重要作用^[12]。徐仁新等^[3]提出的磁偶极+星风模型(也称为“联合模型”)考虑脉冲星的转动能量损失为脉冲星的磁偶极辐射和由于相对论粒子流逃逸带走的能量之和^[3]。联合模型能够很好地解释为什么观测到的制动指数总是小于 3, 但是该模型推出的 Vela (B0833-45) 的磁倾角和观测不符合, 这要求人们进一步研究脉冲星的辐射机制。考虑到脉冲星磁层中加速区的真空间隙有效电势差对脉冲星转动周期的依赖较小, 岳友岭等在联合模型的基础上考虑粒子加速区真空间隙的电势差为常数^[18], 也能给出脉冲星制动指数小于 3 的结论, 我们称这种模型为“常数电势-联合模型”。

近年来, Davies^[19]、Lambrecht 等^[20]、Pendry 等^[21]、Feicel^[22]、Tiggelen 等^[23] 和 Manjavacas 等^[24] 研究表明量子真空摩擦是一个基本的电磁现象。Dupays 等的工作表明, 量子真空摩擦在强磁场中对中子星的制动有重要影响^[17]。量子真空摩擦从微观的角度, 考虑强磁场中 QED 效应, 得出脉冲星和量

收稿日期: 2012-06-15 修改日期: 2012-10-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (10935001, 10973002, 10875003)

作者简介: 熊雪宇 (1983-), 男, 四川盐源人, 硕士研究生, 从事理论核物理研究; E-mail: xueyuxiong@126.com

通信作者: 高春媛, Email: gaocyy@pku.edu.cn

<http://www.npr.ac.cn>

子真空作用而引起的能量损失。量子真空摩擦在强磁场 ($B > 10^9$ T) 和短周期 ($P < 1$ s) 时起重要作用, 在磁场较低 ($B < 10^9$ T) 和长周期 ($P > 1$ s) 时, 与经典的磁偶极辐射相比可以忽略。因此, 在脉冲星的转动能量损失中计入量子真空摩擦是必要的, 特别是对强磁场和短周期的脉冲星, 量子真空摩擦显得更重要。我们考虑脉冲星的转动动能损失可能有 3 种途径: 磁偶极辐射、单极感引起的粒子流逃逸带走能量以及脉冲星与量子真空摩擦引起能量损失。在计算单极感应引起的粒子流逃逸带走的能量时, 也考虑了真空间隙电势差为常数的情况, 即在“常数电势-联合模型”基础上再加入脉冲星和量子真空摩擦损失的能量。在计算量子真空摩擦时, 我们考虑了磁倾角 θ 在 $(0, \pi/2)$ 变化的情况。

2 制动机制

假设脉冲星的磁矩为 μ , 磁倾角为 θ , 自转角速度为 Ω , 真空中的光速为 c , 则磁偶极辐射功率为^[25]

$$\dot{E}_{\text{dip}} = -\frac{2\mu^2\Omega^4}{3c^3} \sin^4\theta, \quad (1)$$

同时考虑单极感应引起的带电粒子流逃逸, 则脉冲星的总能量损失功率为^[3]

$$\dot{E}_{\text{dip+uni}} = -\frac{2\mu^2\Omega^4}{3c^3} \eta, \quad (2)$$

其中: $\eta \equiv \sin^2\theta + 3\cos^2\theta(\Delta\phi/\Delta\Phi) \approx \sin^2\theta + (5.4 \times 10^{-9})R_6^{-3}B_{12}^{-1}\cos^2\theta\Omega^{-2}\Delta\phi$, $R_6 = R \times 10^{-6}$ cm⁻¹, R 为脉冲星半径, $B_{12} = B \times 10^{-8}$ T⁻¹, B 为脉冲星表面磁场磁感应强度, ϕ 为脉冲星磁层中粒子加速区的真空间隙的电势差。按照磁层中电磁场的不同物理过程, 此模型分为 6 种子模型, 对应 6 种不同的 η 。曲率辐射: $\eta_1 \approx \sin^2\theta + (4.96 \times 10^2)R_6^{-7/19}B_{12}^{-8/7}\cos^2\theta\Omega^{-15/7}$; 逆康普顿散射: $\eta_2 \approx \sin^2\theta + (1.02 \times 10^5)R_6^{-17/7}B_{12}^{-22/7}\cos^2\theta\Omega^{-13/7}$; 二区空间电荷的有限电流的曲率辐射: $\eta_3 \approx \sin^2\theta + (38)R_6^{-9/4} \times B_{12}^{-1}\cos^2\theta\Omega^{-7/4}$; 二区空间电荷的有限电流的逆康普顿散射: $\eta_4 \approx \sin^2\theta + (2.3)R_6^{-11/13}B_{12}^{-22/13}\cos^2\theta\Omega^{8/13}$; 一区空间电荷的有限电流的辐射: $\eta_5 \approx \sin^2\theta + (9.8)R_6^{-17/7}B_{12}^{-8/7}\cos^2\theta\Omega^{-15/7}$; 外部间隙电荷的辐射: $\eta_6 \approx \sin^2\theta + (8.6 \times 10^3)B_{12}^{-8/7}\cos^2\theta\Omega^{-52/21}$ 。岳友岭等提出脉冲星磁层的粒子加速区的真空间隙电势差为常数, 给出: $\eta_7 \approx \sin^2\theta + 6c^2\kappa B^{-1}R^{-3}\Omega^{-2}\phi\cos^2\theta$ 。 κ 是正负粒子密度

耦合系数, 我们取典型值 10^3 , 常数电势差 $\phi = 10^{12}$ V。

脉冲星由于和量子真空摩擦而损失的能量为^[17]

$$\dot{E}_{\text{qv}} \approx -\alpha \frac{18\pi^2}{45} \frac{\sin^2\theta}{B_c^2\mu_0^2c} \frac{B^4R^4}{P^2}, \quad (3)$$

式中: $\alpha = e^2/\hbar c \approx 1/137$ 是精细结构常数, $B_c = 4.4 \times 10^9$ T 是 QED 的临界磁场, μ_0 是真空磁导率, P 是脉冲星的自转周期。由此, 我们得到脉冲星由于磁偶极辐射、单极感应和量子真空摩擦引起的总能量损失率为

$$\dot{E} \approx -\frac{2\mu^2\Omega^4}{3c^3} \eta - \alpha \frac{18\pi^2}{45} \frac{\sin^2\theta}{B_c^2\mu_0^2c} \frac{B^4R^4}{P^2}. \quad (4)$$

另一方面脉冲星的转动能量损失率为 $\dot{E} = I\Omega\dot{\Omega}$, 周期 $P = 2\pi/\Omega$, 所以我们得到脉冲星周期和周期一阶导数的关系为

$$\dot{P} \approx \frac{2B^2R^6\pi^2}{3\mu_0c^3IP} \eta + \frac{\alpha \sin^2\theta B^4R^4}{10B_c^2\mu_0cI} P, \quad (5)$$

脉冲星的制动指数定义为

$$n = \frac{\Omega\dot{\Omega}}{\dot{\Omega}^2}.$$

在式 (4) 和式 (5) 中代入每个 η 的具体形式和观测得到的制动指数, 可以得到各种模型下脉冲星磁倾角与表面磁场强度的关系以及每颗脉冲星的周期对时间的一阶导数与周期的关系。

3 结果和分析

我们取脉冲星的典型半径 $R = 10^6$ cm, 考虑到脉冲星转动惯量在 100 年之内变化都很小^[17], 取常数转动惯量 $M = 10^{45}$ g·cm²。6 颗脉冲星的观测参数列于表 1。表中 P 为脉冲星的周期, 单位为 s, \dot{P} 为周期对时间的一阶导数, 为 10^{-13} 量级, n 为制动指数, B_0 为假定磁倾角为 90° 时磁偶极辐射模型给出的磁场强度,

表 1 已测得制动指数的 6 颗脉冲星的参数

Name	P/s	$\dot{P}(10^{-13})$	n	$B_0/T(10^9)$
B0531+21	0.033	4.23	2.51(1)	0.76
B0540-69	0.050	4.79	2.140(9)	1.0
B0833-45	0.089	1.25	1.4(2)	0.68
J1119-6127	0.408	40.2	2.91(5)	8.2
B1509-58	0.151	15.4	2.839(3)	3.1
J1846-0258	0.324	71.0	2.65(1)	9.7

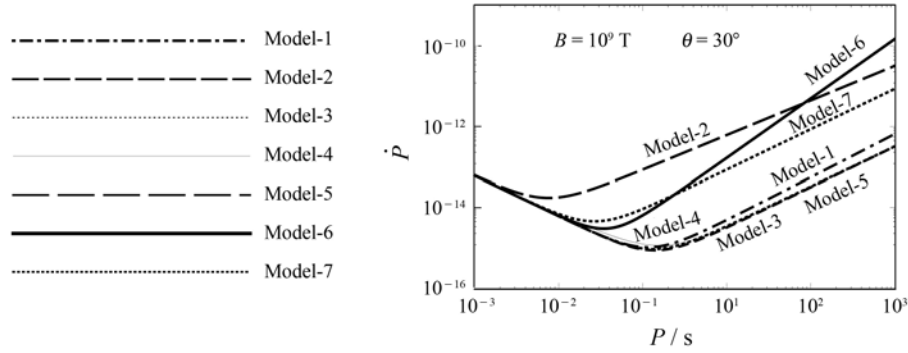


图 1 各模型中脉冲星 $P-\dot{P}$ 关系

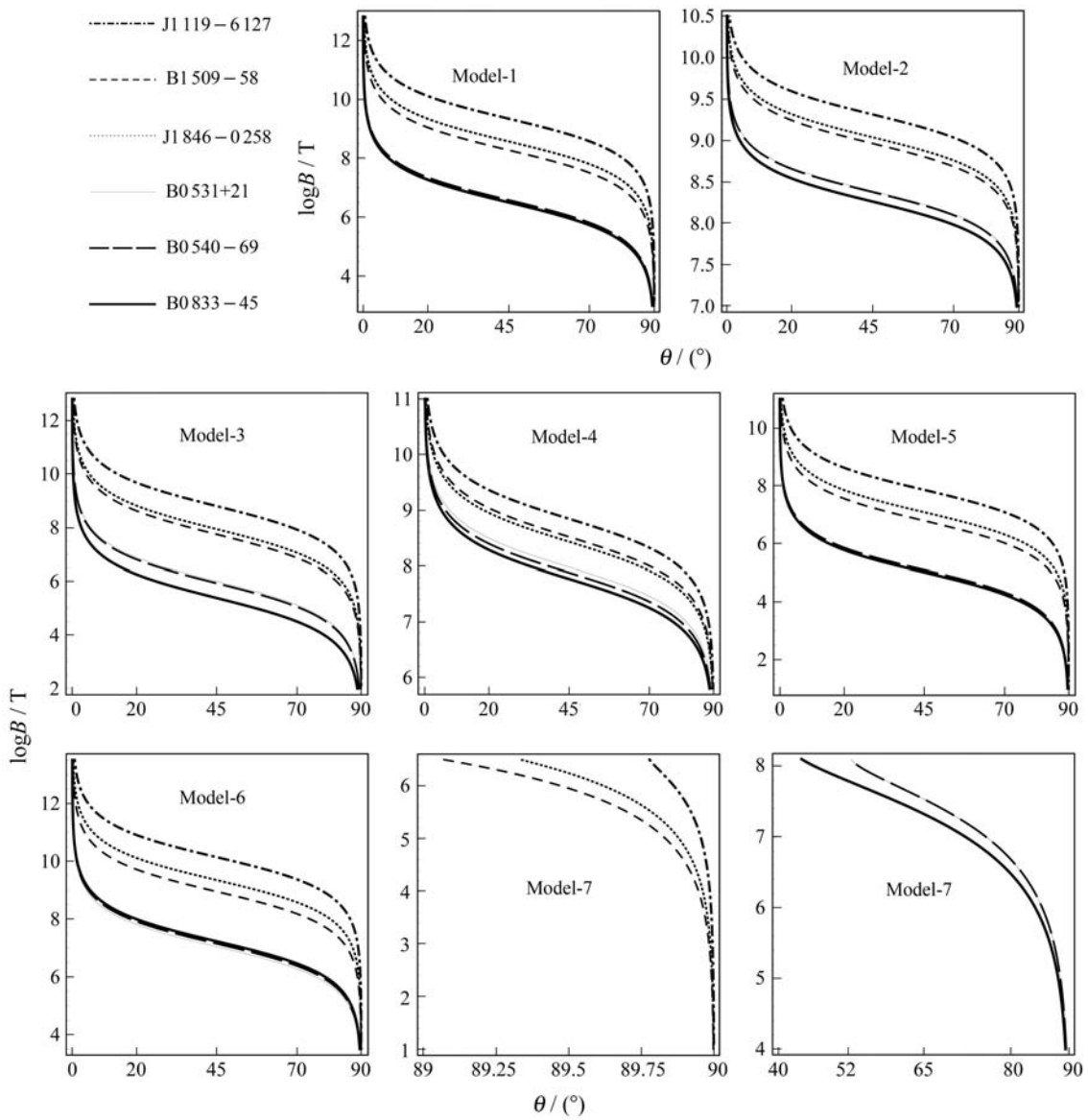


图 2 已测得制动指数的 6 颗脉冲星的表面磁场和磁倾角的依赖关系

单位为 10^9 T。模型 1 对应徐仁新和乔国俊的联合模型中的 $\eta = \eta_1$ ；模型 2 对应于 $\eta = \eta_2$ ；模型 3 对应于 $\eta = \eta_3$ ；模型 4 对应于 $\eta = \eta_4$ ；模型 5 对应于 $\eta = \eta_5$ ；模型 6 对应于 $\eta = \eta_6$ ；模型 7 对应于岳友岭、徐仁新、

朱炜玮提出的真空间隙电势差为常数的模型。

图 1 给出了根据式 (5) 画出的各个模型的周期和周期一阶导数关系图。由图 1 和式 (5), 可以看到, 对短周期 ($P < 50 \text{ ms}$) 脉冲星, 转动能量损失主要来自磁偶极辐射, $P \propto \dot{P}$ 。周期很短 ($P < 10 \text{ ms}$) 时, 各种模型实际没有差别, 转动能量损失几乎全部来自于磁偶极辐射。对长周期 ($P > 0.5 \text{ s}$) 脉冲星, 星风效应和量子真空摩擦起主要作用, 周期导数随周期的增加而增加。对中等周期 ($50 \text{ ms} < P < 0.5 \text{ s}$) 脉冲星, 磁偶极辐射、星风效应和量子真空摩擦都重要。模型 3、模型 4 和模型 5 的周期和周期一阶导数的关系非常接近, 这和它们的 η 第二项的常系数接近是一致的。这个常系数越大, 星风效应在能量损失中占的比例越大, 周期一阶导数取极小值越靠前。

根据式 (4) 和观测到的脉冲星制动指数, 可以得到脉冲星表面磁场强度和磁倾角的关系, 如图 2 所示。在模型 1、模型 2、模型 3、模型 4、模型 5 和模型 6 中, 对 6 颗已测得制动指数的脉冲星, 周期越长其表面磁场强度也越大 (例外的是模型 2 和模型 3 中 B0833-45 磁场比 B0531+21 和 B0540-69 小)。磁倾角在 $10^\circ \sim 80^\circ$ 时, 磁场变化比较平缓。B1509-58 和 B1846-0258 以及 B0531+21 和 B0540-69 的磁场大小基本相同。模型 1、模型 2、模型 3、模型 4、模型 5 和模型 6 中磁场强度都随磁倾角增加而减小。真空间隙电势差为常数时, 即模型 7 中, B1509-58、J1846-0258 和 J1119-6127 几乎没有星风效应 (磁倾角取 $89^\circ \sim 90^\circ$), 而 B0531+21、B0540-69 和 B0833-45 有较小的星风效应 (磁倾角取 $40^\circ \sim 90^\circ$)。

4 结论

在徐仁新和乔国俊提出的脉冲星辐射机制的联合模型基础上, 加入了量子真空摩擦, 考虑脉冲星的转动能量损失为磁偶极辐射、星风效应和量子真空摩擦 3 种途径, 给出了脉冲星转动能量损失以及周期一阶导数的计算公式, 在此基础上考察了 6 颗脉冲星 (B0531+21、B0540-69、B0833-45、J1119-6127、B1509-58、J1846-0258) 的周期和周期一阶导数的关系。根据观测到的周期 P 、周期一阶导数 \dot{P} 和制动指数 n , 考察了表面磁场强度和磁倾角的关系。每个模型都可以在磁场 $B \in (10^7 \text{ T}, 10^{12} \text{ T})$ 、磁倾

角 $\theta \in (0, 90^\circ)$ 时得到所考察的 6 颗脉冲星的周期、周期一阶导数。

到目前为止, 脉冲星的磁场强度和磁倾角都没有令人满意的观测结果, 各种模型给出的结果也不尽相同, 考虑 3 种途径能量损失后, 我们给出 6 颗已测得制动指数的脉冲星的磁倾角和表面磁场强度范围为: 磁倾角在 $0 \sim 90^\circ$ 时, 模型 1 中磁场在 $10^4 \sim 10^{12} \text{ T}$ 之间连续取值、模型 2 中磁场在 $10^7 \sim 10^{10} \text{ T}$ 之间连续取值、模型 3 中磁场在 $10^3 \sim 10^{12} \text{ T}$ 之间连续取值、模型 4 中磁场在 $10^6 \sim 10^{11} \text{ T}$ 之间连续取值、模型 5 中磁场在 $10^2 \sim 10^{10} \text{ T}$ 之间连续取值、模型 6 中磁场在 $10^4 \sim 10^{12} \text{ T}$ 之间连续取值; 在模型 7 中, B1509-58、J1846-0258 和 J1119-6127 磁倾角在 89° 到 90° 之间取值, 磁场强度在 $10^3 \sim 10^6 \text{ T}$ 之间连续取值, B0833-45、B0531+21 和 B0540-69 磁倾角在 40° 到 90° 之间取值, 磁场强度在 $10^5 \sim 10^8 \text{ T}$ 之间连续取值。

将来对这 6 颗脉冲星 (J1119-6127, B1509-58, J1846-0258, B0531+21, B0540-69 和 B0833-45) 的磁场和磁倾角的进一步观测, 可以检测我们的模型, 也可能提供进一步认识和研究量子真空摩擦及星风效应的信息。

参考文献 (References):

- [1] XU R X. ApJ, 2003, **596**: L59.
- [2] DAR A. ArXiv: astroph/9911473, 1999.
- [3] XU R X, QIAO G J. ApJ, 2001, **561**: L85.
- [4] WU F, XU R X, GIL J. Astronomy and Astrophysics, 2003, **409**: 641.
- [5] CONTOPOULOS I, SPITKOVSKY A. ApJ, 2006, **643**: 1139.
- [6] BLANDFORD R D, ROMANI R W. MNRAS, 1998, **234**: 57.
- [7] ALLEN M P, HORVATH J E. MNRAS, 1997, **287**: 615.
- [8] ALLEN M P, HORVATH J E. ApJ, 1997, **488**: 409.
- [9] RUDERMAN M. New Astronomy Reviews, 2010, **54**: 110.
- [10] LIN J R, ZHANG S N. ApJL, 2004, **615**: L33.
- [11] LYNE A G. IAU Symposium, 2004, **218**: 257.
- [12] KRAMER M, LYNE A G, BRIEN J T, *et al.* Science, 2006, **312**: 549.
- [13] CHEN W C, LI X D. Astronomy and Astrophysics, 2006, **450**: L1.
- [14] MENOU K, PERNA R, HERNQUIST L. ApJL, 2001, **554**: L63.
- [15] ALPAR M A, ANKAY A, YAZGAN E. ApJL, 2001, **557**: L61.
- [16] CONTOPOULOS I. Astronomy and Astrophysics, 2007, **466**: 301.
- [17] DUPAYS A, RIZZO C, BAKALOV D, *et al.* EPL, 2008, **82**: 69002.

- [18] YUE Y L, XU R X, ZHU W W. *Advances in Space Research*, 2007, **40**: 1491.
- [19] DAVIES P C W. *Opt J*, 2005, **7**: S40.
- [20] LAMBRECHT A, JAEKEL M T, REYNAUD S. *Phy Rev Lett*, 1996, **77**: 4.
- [21] PENDRY J B. *Phys J*, 1997, **9**: 10301.
- [22] FEIGEL A. *Phy Rev Lett*, 2004, **92**: 2.
- [23] TIGGELEN B A, RIKKEN G L, KRSTIC V. *Phys Rev Lett*, 2006, **96**: 130402.
- [24] MANJAVACAS A, GRARCIA D E, ABAJO F J. *Phys Rev Lett*, 2010, **105**: 113601.
- [25] XU Renxin. *INTRODUCTION TO ASTROPHYSICS*[M]. Beijing: Peking University Press, 2006: 178(in Chinese). (徐仁新. 天体物理导论[M]. 北京: 北京大学出版社, 2006: 178.)

Investigation of Spindown of Neutron Stars

XIONG Xue-yu, GAO Chun-yuan, XU Ren-xin

(*School of Physics and State Key Laboratory of Nuclear Physics and Technology, Peking University, Beijing 100871, China*)

Abstract: The neutron stars' braking mechanism is a fundamental problem in the study of neutron stars. The braking index exactly equal to 3 in pure magnetodipole radiation model, however, all the observed braking index of rotation-powered pulsars is less than 3. This indicates that the additional energy loss ways must exist besides the magnetodipole radiation. The magnetodipole radiation, the ejection of particle outflow and quantum vacuum friction are considered as the source of the loss of rotational kinetic energy of rotation-powered pulsars. Based on the three mechanism of loss of the energy, the relation between the period of pulsars and the first derivative of the period to time and the pulsars' energy losing power are given. The relationship of the periods and the first derivative of the periods of six pulsars(J1119–6127, B1509–58, J1846–0258, B0531+21, B0540–69 and B0833–45) is studied. The relation between the surface magnetic field intensity and the magnetic inclination is discussed. Research shows that when the electric potential difference of vacuum gap is a constant the inclination angle is limited in a smaller range and in the other cases the inclination is the continuous value between 0~90 degrees.

Key words: neutron star; braking index; quantum vacuum friction; unipolar induction

Received date: 15 Jun. 2012; **Revised date:** 12 Oct. 2012

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (10935001, 10973002, 10875003)

Corresponding author: GAO Chun-yuan, E-mail: gaocy@pku.edu.cn

<http://www.npr.ac.cn>