

# 脉冲星物理参数的统计分析\*

尹德江<sup>1,2</sup> 张立云<sup>1,2†</sup>

(1 贵州大学物理学院物理与天文系 贵阳 550025)

(2 贵安超算中心 贵阳 550025)

**摘要** 随着500 m口径球面射电望远镜(Five-hundred-meter Aperture Spherical radio Telescope, FAST)的投入使用, 脉冲星发现的数目激增, 对已知脉冲星物理参数的统计分析具有非常重要的研究意义. 通过分析脉冲星的空间位置、周期、表面磁场强度等相关物理参数, 研究脉冲星的总体性质. FAST在银盘附近也发现了大量脉冲星, 体现其探测能力的优势. 更新了脉冲星周期与周期变化率关系图, 目前已有57颗脉冲星越过经典“死亡线”, 其中5颗是FAST发现的. 最后对脉冲双星系统的物理参数进行统计分析, 脉冲双星系统朝着低偏心率、伴星质量减少的方向演化, 9颗位于“加速线”上方. FAST望远镜将使中国进入脉冲星发现的黄金时期, 将进一步推动脉冲星物理的快速发展.

**关键词** 脉冲星: 普通, 恒星: 统计, 双星: 普通

**中图分类号**: P145; **文献标识码**: A

## 1 引言

20世纪30年代射电天文观测技术诞生, 到六七十年代发展成熟, 脉冲星的发现便是其诸多成果之一. 1967年Bell和Hewish首次探测到脉冲星PSR B1919+21的信号并对其进行了分析研究<sup>[1]</sup>, 不久就被证明此类新发现的信号是理论预测的中子星发出的, 截至2022年2月已发现3556颗脉冲星. 脉冲星自身极强的表面磁场强度束缚了信号的辐射, 只有转轴两极能辐射出脉冲信号, 脉冲星信号每扫过地球一次便能接收一次脉冲信号, 因此被形象地描述为“灯塔模型”, 且只有被探测到具有脉冲信号的中子星被分类为脉冲星, 如果辐射出的信号没有扫过地球便不能被探测到. 按照不同的标准可对种类

丰富的脉冲星分类, 如根据辐射波段不同把脉冲星分为射电脉冲星、光学脉冲星、高能脉冲星, 还可根据供能机制、演化历史等进行其他分类<sup>[2-3]</sup>. 脉冲星是由大质量恒星演化至晚期发生超新星爆炸诞生的<sup>[4]</sup>, 是质量致密的一类中子星, 典型特征便是周期极短, 其中毫秒脉冲星的周期在10 ms之内, 周期最长的为23.5 s, 一般脉冲星的典型周期为1 s<sup>[5]</sup>, 且脉冲星的周期变化率极小, 对于未来的太空导航也具有重要的现实意义.

FAST (Five-hundred-meter Aperture Spherical radio Telescope)是当今世界上最灵敏的单天线射电望远镜, 其多波束和多用途的特点将用于诸多科学研究<sup>[6]</sup>, 主要科学目标是搜寻微弱脉冲信号、中性氢和外星文明信号等任务<sup>[7]</sup>. FAST自2017年

2022-02-03收到原稿, 2022-06-13收到修改稿

\*国家自然科学基金项目(11963002、U1631236), 中国科学院天文大科学研究中心FAST重大成果培育项目, 贵州大学培育项目(201911)资助

†liy\_zhang@hotmail.com

探测到首颗脉冲星PSR J1900-0134<sup>[8]</sup>以来,已取得很多出色的科学成果,如Han等<sup>[9]</sup>的银道面脉冲星巡天项目(Galactic Plane Pulsar Snapshot, GPPS)已发现了201颗脉冲星,其中包括16颗脉冲双星系统,40颗毫秒脉冲星等;Pan等<sup>[10]</sup>在球状星团中已发现32颗脉冲星,其中12颗是在双星系统中;国家天文台Yao等人利用FAST找到了脉冲星三维速度与自转轴共线的证据<sup>[11]</sup>.此外,FAST的主要科学目标还包括搜寻快速射电暴(Fast Radio Burst, FRB),有研究表明一部分FRB的物理起源可能为磁星(强磁脉冲星)<sup>[12]</sup>,并且FAST已有一系列FRB亮点工作<sup>[13-16]</sup>来揭示其起源,未来FAST将不断取得更多重要的科研成果.

脉冲星物理参数的统计分析对研究脉冲星的整体性质具有重要意义.国内外有许多天文学家做过相关的统计研究.如汪珍如等<sup>[17-18]</sup>在1979年关于81颗脉冲星射电光度的统计研究,为探讨射电辐射机制提供线索;谢蓉蓉<sup>[19]</sup>在1985年对脉冲星的辐射特征和空间分布的统计分析,表明脉冲星能量和辐射都是随时间演化逐渐衰减的、脉冲星辐射频谱的极大值逐渐向射电波段演变、脉冲星的自行趋于远离银道面;蔡炎等<sup>[20-21]</sup>在2011年对脉冲星的周期和磁场等参数统计研究得出不同种类脉冲星的整体性质具有一定的差异;郑娇等<sup>[22]</sup>在2020年对银河系球状星团射电脉冲星进行了统计,发现球状星团中毫秒脉冲星占绝大部分,且双星系统比例较高;程争等<sup>[23-24]</sup>在2013年用不同的测量方法,得到不同种类中子星系统的质量分布规律;Han<sup>[25]</sup>在1997年做了关于缓慢旋转脉冲星和磁场衰减的统计研究,表明中子星的磁场强度呈幂律衰减,且衰减过程的时间尺度和初始磁场强度有关等.对于脉冲双星系统演化参数的统计资料较少,本文对相关物理参数的演化关系加以统计分析.

基于前人的研究,加上了FAST最新数据进一步研究脉冲星的总体性质.主要统计了目前所有脉冲星物理参数的性质,如空间位置分布、周期

与周期变化率的关系分布、周期和磁场强度的分布、能量损率和磁场强度随特征年龄的演化关系、脉冲双星轨道周期、偏心率、伴星质量等参数的演化.本文的统计数据来源是ATNF (Australia Telescope National Facility) Pulsar Catalogue<sup>1</sup>、FAST漂移扫描多科学目标同时巡天项目<sup>2</sup>、银道面脉冲星巡天项目<sup>3</sup>、FAST球状星团脉冲星巡天项目(The FAST globular cluster survey<sup>4</sup>).

## 2 空间位置分布

发现脉冲星数目较多的射电望远镜有美国的Arecibo、Fermi、Green Bank,澳大利亚的Parkes、Molonglo,英国Jodrell,西欧LOFAR (Low-Frequency Array),德国Effelsberg,印度GMRT (Giant Metrewave Radio Telescope)以及中国FAST.图1展示了各大型望远镜发现脉冲星的数目,“Misc”类别列出了在其他巡天中发现的脉冲星.Parkes发现数目远超其他国家,FAST在2017年才开始运行就已发现约500颗脉冲星,自建成以来发现脉冲星数目逐年增加,在未来一段时间内具有绝对的优势.

脉冲星是大质量恒星演化到后期爆炸或白矮星“吸积诱发坍塌(Accretion-Induced Collapse, AIC)”机制形成的<sup>[26-27]</sup>,其空间位置分布对于宇宙早期演化的研究具有重要意义,图2是脉冲星在银道坐标系的空间位置分布.一般脉冲星集中分布在银盘附近,毫秒脉冲星则弥散在整个天球区域,毫秒脉冲星比普通脉冲星的年龄大,且毫秒脉冲星中双星系统比例高<sup>[28]</sup>,转动能量通过吸积伴星获得<sup>[29]</sup>,在宇宙中的演化时间长,大部分已经偏离了最初的位置<sup>[30]</sup>.FAST的GPPS和CRAFTS (Commensal Radio Astronomy FAST Survey)巡天的目标不一样,两者发现脉冲星的空间分布有差异,GPPS在银纬 $\pm 5^\circ$ 的银道面上进行搜寻,且之后测量会扩展到 $\pm 10^\circ$ ,而CRAFTS巡天发现的脉冲星则弥散分布,这主要与各自的巡天策略有关.

<sup>1</sup><https://www.atnf.csiro.au/research/pulsar/psrcat/>.

<sup>2</sup><https://crafts.bao.ac.cn/pulsar/>.

<sup>3</sup><http://zmtt.bao.ac.cn/GPPS/>.

<sup>4</sup><https://fast.bao.ac.cn/cms/article/65/>.

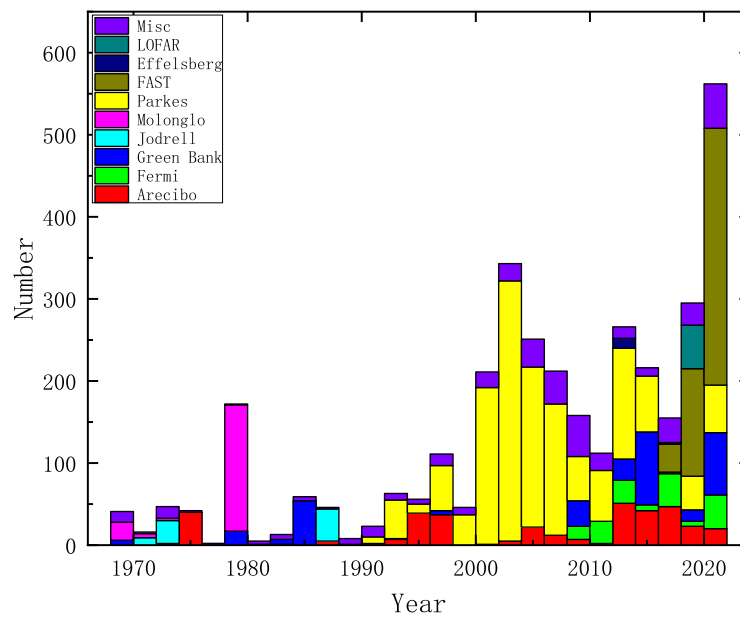


图 1 不同射电望远镜发现脉冲星数量的分布直方图

Fig. 1 Histogram of pulsar number distribution discovered by different radio telescopes

图2是脉冲星在天球上的投影分布,不能很好地展示出其整体的距离分布.为了更好地体现脉冲星的相对距离分布,选取银心银道直角坐标系.其中XX-YY平面为银道面,XX轴以银心指向日心方向为正,YY轴正方向为银河系自转方向,ZZ轴指向北银极为正.图3展示相对距离的关系分布,此处的距离来自银河系自由电子模型YMW16的估计<sup>[31]</sup>. YMW16是银河系、麦哲伦星云和银河系间介质中自由电子的分布模型,可用于基于色散测量来估计真实或模拟脉冲星和快速射电暴的距离, YMW这3个字母对应模型3个作者的名字首字母.图3左为脉冲星银道面坐标XX-YY的分布,且太阳坐标为(0, 8.5 kpc)<sup>[32]</sup>.由此可知目前已发现脉冲星的银道坐标XX分量集中分布在-10-10 kpc, YY分量集中分布在-5-10 kpc.根据郭守敬望远镜巡天的银河系结构演化研究得到的最新数据,银盘星族在距离银心20 kpc处仍然具有显著的结构<sup>[33]</sup>,此标准下仍有不少脉冲星来源于河外星系.由图可以看出,随着观测仪器灵敏度的上升,探测能力提高非常明显, FAST在以往巡天项目扫描过的区域也发现大量的脉冲星,其超高的灵敏度有望发现更多特

殊的脉冲星.

### 3 周期和周期变化率

脉冲星的辐射呈现周期性的脉冲信号,信号快速且稳定,脉冲星的电磁辐射和加速高能粒子的能量来自其自身的自转能,随着年龄的增大,自转能不断减少、周期变长<sup>[34]</sup>.磁偶极辐射模型假定脉冲星的自转动能全部转化为磁偶极辐射损失能,根据这个模型,可以由脉冲星的周期 $P$ 和周期变化率 $\dot{P}$ 导出特征年龄 $\tau = \frac{P}{2\dot{P}}$ 、表面磁场强度 $B_s = 3.2 \times 10^{19} (P\dot{P})^{1/2}$ 、自转能损率 $\dot{E} = 4\pi^2 I \dot{P} P^{-3}$ ,其中 $I$ 是脉冲星的转动惯量,取值 $I = 10^{45} \text{ g} \cdot \text{cm}^2$ <sup>[35]</sup>.由 ATNF Pulsar Catalogue数据和FAST<sup>[8, 36-40]</sup>发现的脉冲星数据绘制出 $P-\dot{P}$ 图,如图4.  $P-\dot{P}$ 已知的脉冲星数据,脉冲双星有283颗、反常脉冲星有21颗、超新星遗迹中有43颗、球状星团中有186颗、高能脉冲星有195颗、河外星系源有20颗.其中射电脉冲星PSR J0250+5854是目前发现周期最大的脉冲星,周期为23.5 s、周期变化率 $2.7 \times 10^{-14} \text{ s} \cdot \text{s}^{-1}$ 、磁场强度是 $2.6 \times 10^{13} \text{ Gs}$ 、特征年龄是13.7 Myr、能损率是 $8.2 \times 10^{-28} \text{ erg} \cdot \text{s}^{-1}$ <sup>[41]</sup>.

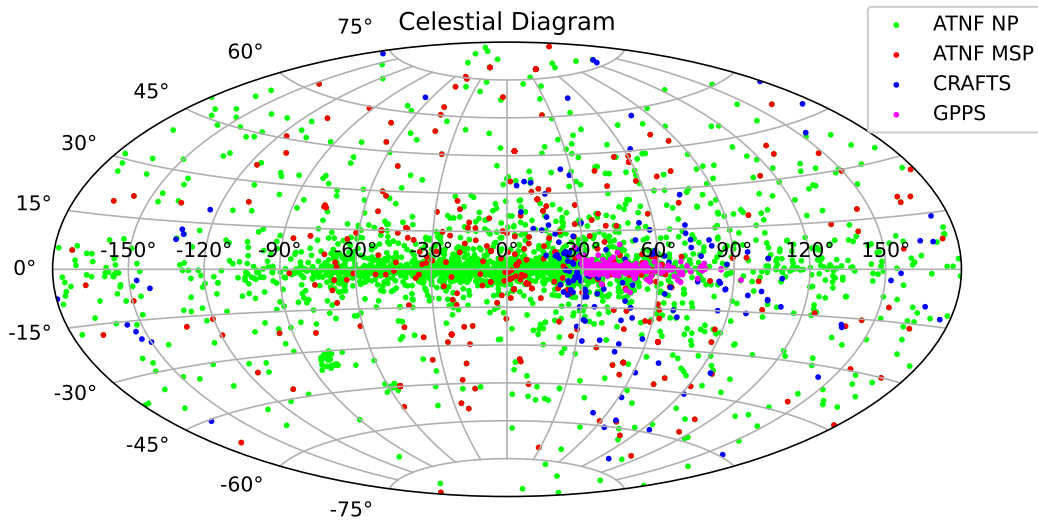


图 2 脉冲星在银道坐标系中的分布图. NP是一般脉冲星, MSP是毫秒脉冲星, GPPS和CRAFTS是FAST的两个巡天项目.

Fig. 2 Chart of pulsar position in galactic coordinate system. NP is normal pulsar, MSP is millisecond pulsar, GPPS and CRAFTS are two pulsar surveys of FAST.

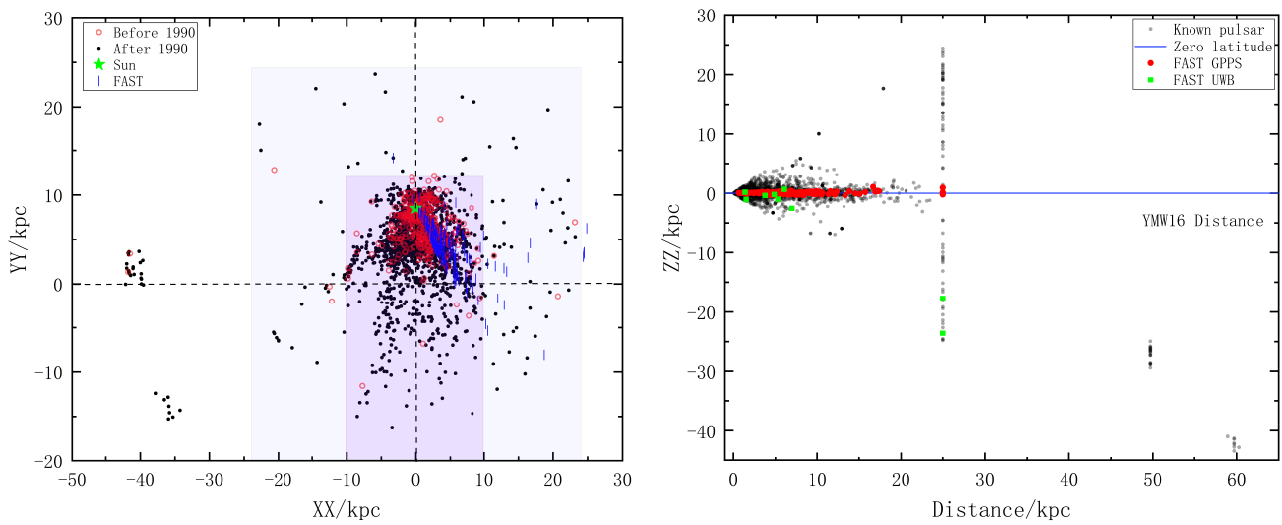


图 3 脉冲星距离分布图. 左图是银河系直角坐标系XX-YY分量分布图, 红圈是1990年前发现的脉冲星, 黑点则是1990年之后发现的脉冲星, 绿色五角星是太阳位置, 紫色竖线是FAST的GPPS巡天结果. 右图是脉冲星距离Distance (从地球到脉冲星)和ZZ的分布图. FAST UWB代表的脉冲星是在CRAFTS巡天中使用超宽带(ultrawide-band)接收机发现的.

Fig. 3 Distribution of pulsar distance. The left panel shows the distribution of XX-YY component in the galactic right angle coordinate system, where the red circle is the pulsar discovered before 1990, the black dot is the pulsar discovered after 1990, the green pentagram is the solar position, and the purple vertical line is the result of FAST GPPS survey. The right panel is the distribution of the pulsar distance between Distance (from earth to pulsars) and ZZ. The pulsars represented by FAST UWB were discovered in CRAFTS using ultrawide-band receiver.

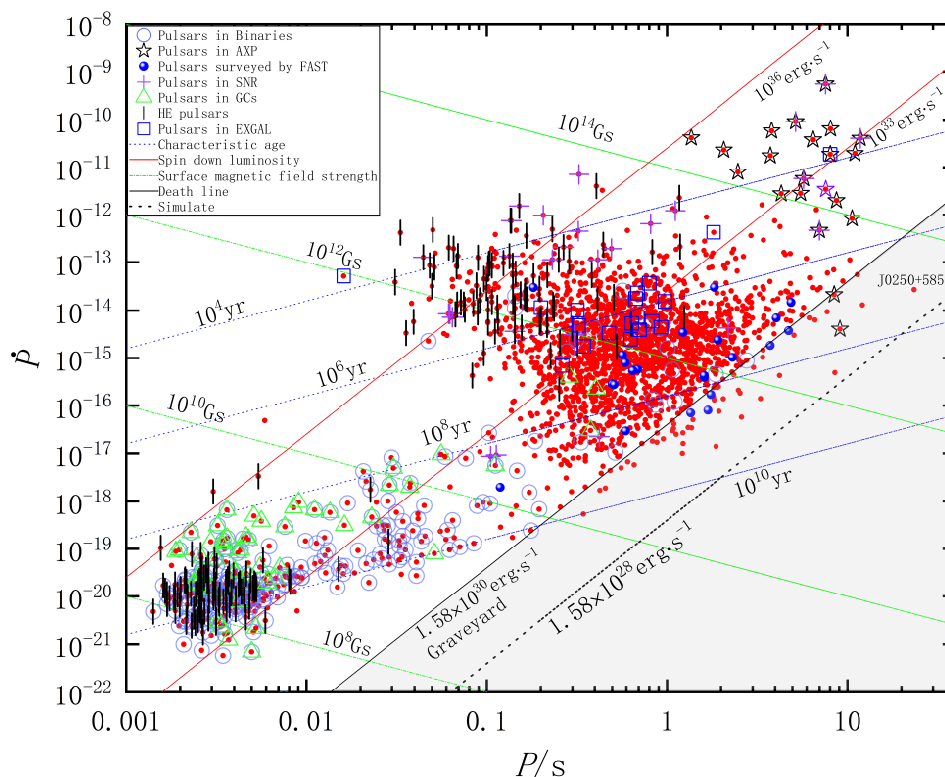


图 4 脉冲星周期与周期变化率分布图. 图中Binaries是脉冲双星, AXP是反常X射线脉冲星或探测到脉冲的软 $\gamma$ 射线复现源, FAST数据是来自相关文献, SNR是超新星遗迹, GCs是球状星团, HE是从射电到红外或者更高频率发射脉冲的自转供能脉冲星, EXGAL是河外星系源, 紫色虚线标注的是脉冲星的特征年龄, 红实线是自转能损失率, 绿色虚线是脉冲星表面磁场强度, 黑色实线是经典“死亡线”, 黑色虚线是目前脉冲星最低能损率范围.

Fig. 4 Distribution of pulsar period and time derivative of period. Binaries are binary pulsar, AXP is anomalous X-ray pulsar or soft Gamma-ray repeater with detected pulsations, FAST's data are published in related papers, SNR is supernova remnant, GCs is globular cluster, HE is spin-powered pulsar with pulsed emission from radio to infrared or higher frequencies, EXGAL is extragalactic source, purple dashed lines are characteristic ages, red solid lines are spin-down energy loss rate, and green dashed lines are pulsar surface magnetic field strength. The black solid line is the classic “death line”, and the black dashed line is the range of the lowest spin-down energy loss rate of pulsars at present.

各类脉冲星集中分布的位置有差异, 如高能脉冲星集中分布于两个位置, 分别位于周期0.033 s和0.1 s附近, 大部分的脉冲双星系统是毫秒脉冲星, 且在球状星团脉冲星中占比较大, 普通脉冲星集中在周期0.2–2 s, 且周期越小的脉冲星周期变化率也越小, 这是因为毫秒脉冲星一般来自古老的双星系统<sup>[42–43]</sup>, 靠吸积伴星能量维持辐射, 故周期更为稳定. 而普通脉冲星较为年轻, 活动更剧烈, 靠自身的转动能辐射脉冲, 周期变化率更大, 磁场强度也比毫秒脉冲星高出4个量级左右. 较为年轻的反常脉冲星周期较大, 且表面具有强磁场, 是最有希望成

为磁能驱动的孤立中子星<sup>[44]</sup>. 超新星遗迹中发现的脉冲星周期在0.1 s附近且较为年轻, 河外星系源探测到的脉冲星集中分布在0.2–1 s的周期范围内, 磁场强度在 $10^{10}$  Gs附近.

Ruderman等人给出的模型对应的射电脉冲星的“死亡线”为经典死亡线<sup>[45]</sup>, 辐射能损率低于死亡线对应的能损率时脉冲星停止脉冲辐射, 早期观测极限值是 $(B_s/10^{12})/P^2 \approx 0.2$ , 经典死亡线对应的能损率 $\dot{E} \approx 1.5 \times 10^{30} \text{ erg} \cdot \text{s}^{-1}$ <sup>[46]</sup>, 与Ruderman等人在1975年给出的理论值接近<sup>[45]</sup>. 早期观测到的脉冲星都满足这个极限值对应的范围, 但是随着PSR

J2144-3933<sup>[47]</sup>和PSR J0250+5854<sup>[41]</sup>等的发现, 挑战了经典的死亡线模型. 理论与实际观测不符, 死亡线下仍然有许多脉冲星发出信号, 截至目前有57颗脉冲星越过经典的死亡线, 其中有5颗是FAST观测到的, 刚好在“死亡线”附近. 基于脉冲星磁偶极辐射模型, 边界值缩小10倍为 $(B_s/10^{12})/P^2 \approx 0.02$ , 即最低能损率为 $\dot{E} \approx 1.5 \times 10^{28} \text{ erg} \cdot \text{s}^{-1}$ , 符合目前观测到的脉冲星数据. Wu等<sup>[48]</sup>把 $\dot{E} \approx 10^{28} \text{ erg} \cdot \text{s}^{-1}$ 对应的观测极限值称作“观测极限线”, 并且通过分析认为探测到低能损失率的脉冲星和实际观测的最低流量极限有关, 随着望远镜灵敏度的提高, 将会出现更多的脉冲星越过经典死亡线, 并且认为“观测极限线”将会随着望远镜灵敏度的提升而变化.

#### 4 特征年龄、自转能损率与磁场强度

脉冲星特征年龄、磁场强度和自转能损率是衡量脉冲星演化的重要物理参数, 这些参数可进一步研究脉冲星的演化状态, 在此讨论特征年龄、特性磁场和自转能损率之间的关系. 用特征年龄作为自变量, 画出了3者的相关演化关系, 结果如图5所示. 由前文知道导出量需 $P-\dot{P}$ 才能得出, FAST发现

脉冲星只有少数论文中的数据有 $\dot{P}$ , 故这些参数的统计样本来源于ATNF (下同). 由图可直观得出脉冲星磁场强度和自转能损率随着特征年龄的增大而衰减, 且普通脉冲星和毫秒脉冲星的规律是一致的, 但相差不同的量级, 集中分布的范围也不一样. 对此规律进行线性拟合, 结果如表1, 方程均为 $y = a + bx$ ,  $a$ 表示截距,  $b$ 表示斜率,  $R^2$ 表示拟合结果的好坏, 拟合结果如表1所示. 其中FAST的数据来源同上文 $P-\dot{P}$ 图, 符合自转周期 $P > 10 \text{ ms}$ 范围的普通脉冲星的演化规律.

Han<sup>[25]</sup>通过分析 $P-\dot{P}$ 图认为脉冲星表面磁场强度更可能是随着年龄按幂律衰减. 特征量是磁偶极辐射模型导出的, 其中特征磁场和特征年龄是特征量, 该模型基于一定的理想前提, 比如转动能的损失全部转为磁偶极辐射、磁倾角 $\alpha = 90^\circ$ 和自转变化的制动指数 $n = 3$ 等. 但实际的观测值表明, 即使测得比较准的几颗脉冲星的制动指数的值均小于3, 表明自转减速过程不是简单的偶极电磁辐射, 受到磁矩和磁倾角等的影响<sup>[49]</sup>, 不仅如此, 毫秒脉冲星再加速的过程等使得其和正常脉冲星具有不同的演化方式, 所以自转能损率与磁场强度随着特征年龄衰减的统计规律结果具有一定的局限性, 需要进一步的理论分析.

表 1 特征年龄与磁场强度和自转能损率分布拟合结果

Table 1 Fitting results of characteristic age with surface magnetic field strength and spin-down energy loss rate distribution

Name	Type	$a$	$b$	$R^2$
Age- $B_s$	Normal pulsar	$15.38891 \pm 0.05699$	$-0.50651 \pm 0.00829$	0.63156
Age- $B_s$	Millisecond pulsar	$12.80634 \pm 0.18202$	$-0.46231 \pm 0.01888$	0.71131
Age- $\dot{E}$	Normal pulsar	$39.22814 \pm 0.11397$	$-0.98699 \pm 0.01658$	0.61938
Age- $\dot{E}$	Millisecond pulsar	$44.39783 \pm 0.364$	$-1.07584 \pm 0.03775$	0.76947

#### 5 周期和磁场分布

脉冲星作为3大致密天体之一<sup>[50]</sup>, 其表面具有极强的磁场. 普通脉冲星和毫秒脉冲星的形成机制和演化规律有所不同, 相较于一般脉冲星, 毫秒脉冲星是古老的宇宙天体, 其磁场弱周期短, 一般

是X射线源的双星系统演化而来, 通过吸积伴星的物质维持自转动能<sup>[51]</sup>, 故其周期变化率较一般脉冲星小. 在此对脉冲星的磁场强度和周期分布规律进行统计分析, 其中磁场强度数据分布来源于ATNF, 周期分布则加上了FAST目前发现的484颗脉冲星周期数据, 数据较前人丰富<sup>[21]</sup>, 如图6.

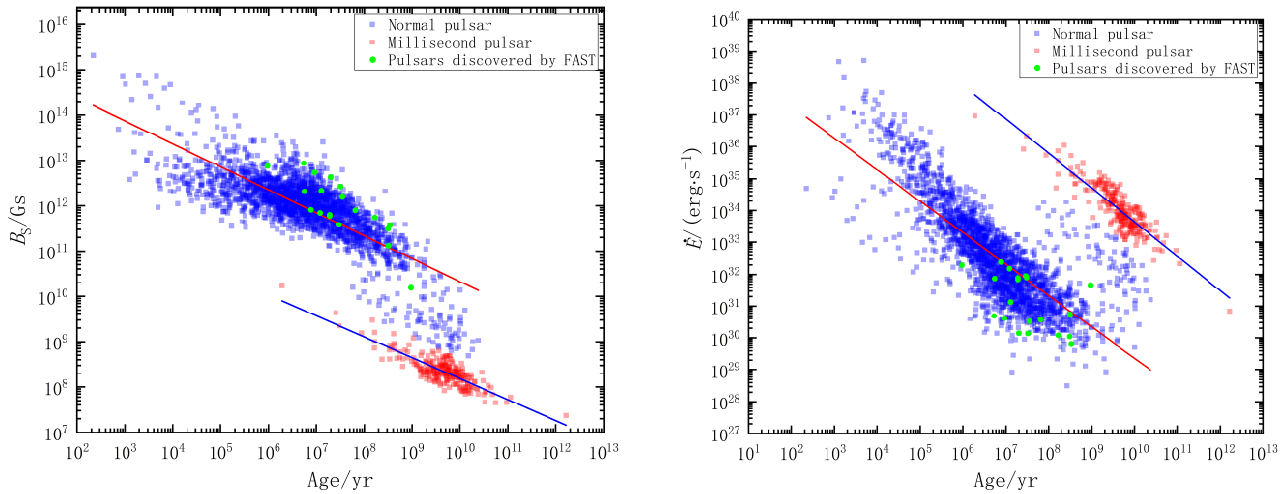


图 5 特征年龄与磁场强度和能损率分布图. 左图是脉冲星表面磁场强度随特征年龄的变化图, 右图是脉冲星自转能损率随特征年龄的变化图, 其中蓝色点代表普通脉冲星, 红色点代表毫秒脉冲星, 绿色点代表FAST发现的普通脉冲星, 其中的直线分别是对相应数据点拟合.

Fig. 5 Distribution of characteristic age, surface magnetic field strength and spin-down energy loss rate. The left panel shows the variation of the pulsar surface magnetic field strength with the characteristic age, and the right panel shows the variation of the pulsar spin-down energy loss rate with the characteristic age, where the blue points represent the normal pulsar, the red points represent the millisecond pulsar, and the green points represent the pulsars discovered by FAST. The straight lines are the corresponding linear fit, respectively.

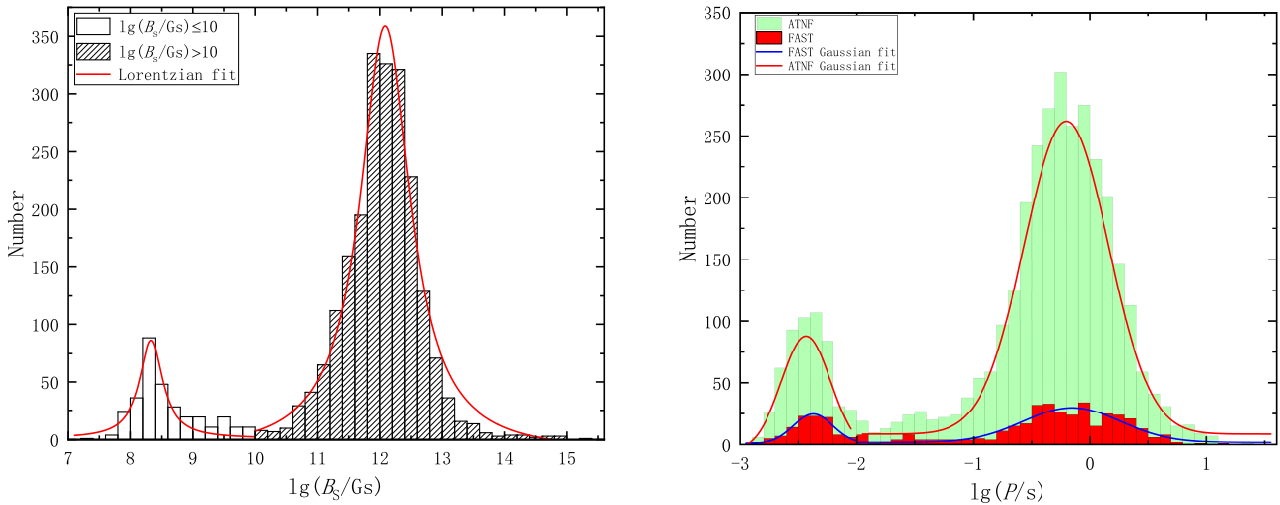


图 6 磁场强度和周期的数量分布直方图. 左图是脉冲星磁场数量分布图, 右图是脉冲星周期数量分布图, 其中曲线代表拟合结果.

Fig. 6 Quantitative distribution histogram of surface magnetic field strength and period. The left panel shows the pulsar surface magnetic field strength quantity distribution, and the right panel shows the pulsar period quantity distribution, where the curve represents the fitting curve.

磁场强度的分布呈现出两个明显的峰, 对磁场强度的分布用高斯函数拟合得不好, 转而在洛伦兹函数拟合, 方程如下:

$$y = y_0 + \frac{2s}{\pi} \frac{w}{4(x - x_c)^2 + w^2}, \quad (1)$$

其中 $y_0$ 是偏移量,  $x_c$ 是峰值,  $w$ 是半高全宽,  $s$ 是

拟合曲线的面积, 拟合结果见表2. 磁场强度 $B_s \leq 10^{10}$  Gs时, 脉冲星磁场强度集中分布在 $B_s = 10^{8.3}$  Gs附近, 磁场强度 $B_s > 10^{10}$  Gs时, 则集中分布在 $B_s = 10^{12.08}$  Gs附近.

表2 磁场强度和自转周期拟合结果  
Table 2 Surface magnetic field strength and period fitting results

Range	Fit mode	$y_0$	$x_c$	$w$	$s$	$R^2$
$B_s/\text{Gs} \leq 10^{10}$ Gs	Lorentzian	$0.971 \pm 0.864$	$8.331 \pm 0.015$	$0.448 \pm 0.040$	$59.742 \pm 4.242$	0.921
$B_s/\text{Gs} > 10^{10}$ Gs	Lorentzian	$-12.223 \pm 2.834$	$12.087 \pm 0.0122$	$0.984 \pm 0.042$	$573.727 \pm 20.684$	0.983
ATNF $P/s \leq 10$ ms	Gaussian	$-5.10757 \pm 9.755$	$-2.434 \pm 0.012$	$0.423 \pm 0.057$	$49.325 \pm 10.477$	0.966
ATNF $P/s > 10$ ms	Gaussian	$8.582 \pm 2.215$	$-0.201 \pm 0.007$	$0.724 \pm 0.017$	$229.708 \pm 5.831$	0.991
FAST $P/s \leq 10$ ms	Gaussian	$0.977 \pm 1.518$	$-2.373 \pm 0.012$	$0.339 \pm 0.037$	$10.051 \pm 1.451$	0.964
FAST $P/s > 10$ ms	Gaussian	$1.819 \pm 1.114$	$-0.153 \pm 0.032$	$0.839 \pm 0.079$	$29.451 \pm 3.157$	0.863

脉冲星周期分布也同样有明显双峰, 前人统计大多是按照 $P = 25$  ms<sup>[21]</sup>界限对两个峰值做拟合, 随着数据量的增多, 按照毫秒脉冲星和一般脉冲星的周期分界 $P = 10$  ms作为界限对两个峰值拟合, 且把ATNF和FAST数据源分开拟合. 周期分布用高斯函数拟合效果较好, 方程如下:

$$y = y_0 + \frac{s}{w\sqrt{\frac{\pi}{2}}} e^{-2\frac{(x-x_c)^2}{w^2}}. \quad (2)$$

拟合结果见表2.  $P \leq 10$  ms时, ATNF数据中脉冲星的自转周期集中分布在 $P = 3.68$  ms附近, 而FAST中的数据集中分布在 $P = 4.23$  ms附近,  $P > 10$  ms时, ATNF数据中脉冲星的自转周期集中分布在 $P = 629.51$  ms附近, 而FAST中的数据集中分布在 $P = 703.07$  ms附近, 两个数据源的结果接近, 分布规律一致. 自转周期和磁场强度的分布都显示出双峰分布, 分别对应不同脉冲星群体, 即毫秒脉冲星和一般脉冲星的整体性质呈现较大差异.

## 6 脉冲双星参数统计

脉冲双星指的是中子星与其伴星相互围绕运动的系统, 其伴星可以是白矮星、中子星和大质量恒星. 脉冲星双星系统的研究取得一些重要成果, 如利用脉冲双星系统来探测广义相对论预言的引力波<sup>[52]</sup>. 首个脉冲双星系统PSR B1913+16是Hulse和Taylor于1974年发现<sup>[53]</sup>, 其伴星是一颗中

子星, 轨道周期仅为0.3229 d, 轨道偏心率 $Ecc = 0.617$ , 主星的自转周期 $P = 59.03$  ms. 通过精确地测量射电脉冲双星轨道周期的变化可以检测引力波的存在, 验证广义相对论, Hulse和Taylor也因此获得1993年的诺贝尔物理学奖<sup>[54]</sup>.

下面将对目前已知脉冲双星系统进行统计分析. 双星系统统计分析方法仍然和上文一致, 选取已经确定相应物理参数的脉冲星作为样本, 如FAST新发现脉冲双星的参数还未给出的, 下列统计便使用ATNF数据库中的数据.

截至目前ATNF共有343颗脉冲双星, 双星系统的类型统计分布如图7, 其中最多的ELL1类型有146颗, 数量次之的BT类型有110颗, DD类型的则有46颗, DDS、BT2P和DDK都只有1颗. 双星伴星类型目前共有7种, 已知伴星类型中伴星是主序星的有26颗, 伴星是中子星的有20颗, 伴星是白矮星的有45颗, 伴星是氦白矮星的有152颗, 伴星是超轻质量伴星或者行星( $< 0.08 M_\odot$ )的有63颗, 其中343颗脉冲双星有35颗的伴星类型未确定. 去除轨道周期最大的3颗双星样本(见下文列表), 以轨道周期 $PB = 100$  d作为分界线, 对脉冲双星系统的轨道周期数量分布做出统计, 如图8. 脉冲双星系统的轨道周期集中分布在0–20 d, 其余的弥散分布规律不明显, 脉冲双星系统的轨道周期一般都较小, 利于脉冲星吸积伴星获得能量.



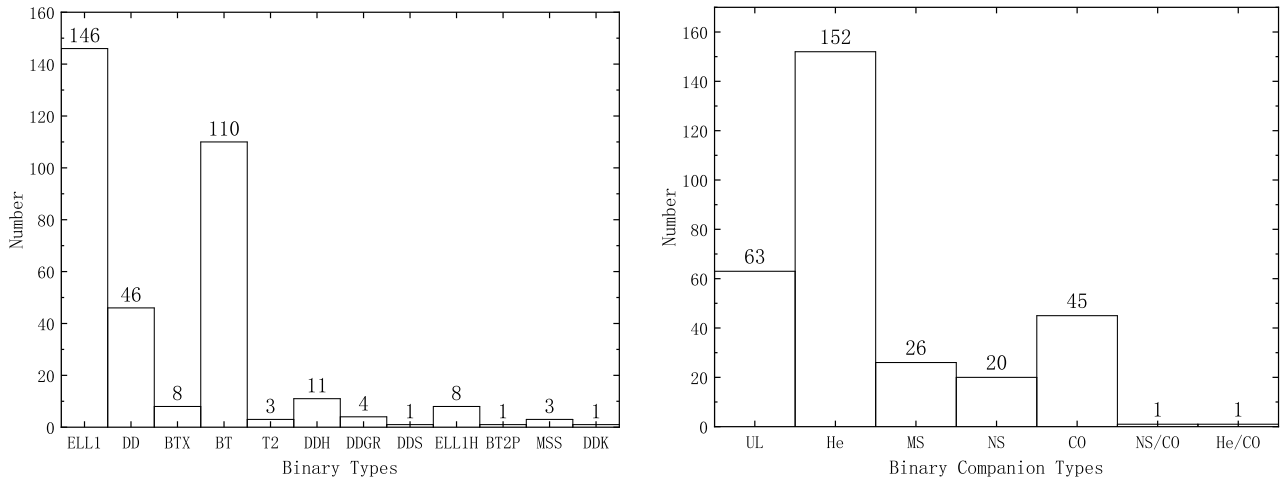


图 7 脉冲双星系统类型和双星伴星类型数量分布直方图. 左图是脉冲星双星系统类型数量分布直方图, 双星模型通常是脉冲星计时程序 TEMPO 或 TEMPO2 所识别的几个模型之一. 右图是脉冲星双星系统伴星类型的数量分布直方图, MS 代表主序星, NS 代表中子星, CO 代表 CO 或 ONeMg 白矮星, He 代表氦白矮星, UL 代表超轻质量伴星或者行星.

Fig. 7 Histograms of the number distribution of binary pulsar types and binary companion types. The left is the histogram of the quantitative distribution of pulsar binary system types, binary model is usually one of several recognised by the pulsar timing programs TEMPO or TEMPO2. The right is the quantitative distribution histogram of the concomitant star types of the pulsar binary system, MS stands for main-sequence star, NS for neutron star, CO for CO or ONeMg white dwarf, He for helium white dwarf, and UL for Ultra-light companion or planet.

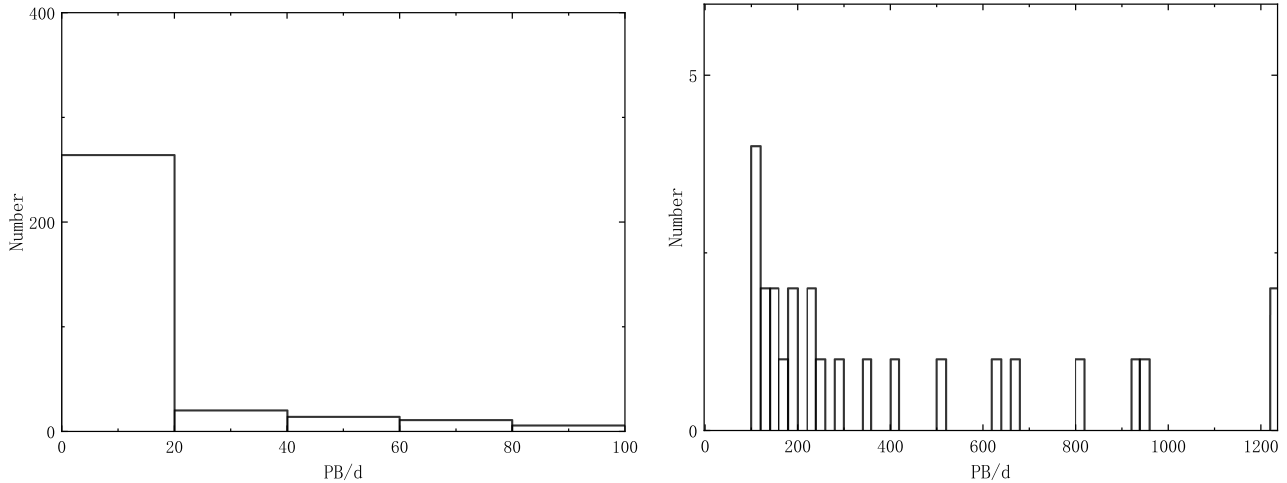


图 8 脉冲双星轨道周期数量分布直方图. 左图是脉冲星轨道周期小于等于 100 d 数量分布直方图, 右图是脉冲星双星系统轨道周期大于 100 d 数量分布直方图, 其中样本去除了轨道周期最大的 3 个样本, 见下文列出表格.

Fig. 8 Distribution histogram of orbital period number of binary pulsar. The left panel shows the quantity distribution histogram of the pulsar orbital period less than or equal to 100 d, and the right panel shows the quantity distribution histogram of the pulsar orbital period larger than 100 d, in which the sample removes the three samples with the largest orbital period, see the table listed below.

下面对脉冲双星系统的演化参数进行统计分析,即伴星质量( $M_c$ )、轨道周期(PB)和轨道偏心率(Ecc).先做出脉冲双星系统自转周期与磁场强度演化关系,如图9.目前343颗双星系统中有260颗可同时确定自转周期和磁场强度,除去40颗偏心率未知的样本,可得低偏心率( $Ecc \leq 0.1$ )、中低偏心率( $0.1 < Ecc < 0.5$ )和高偏心率( $Ecc \geq 0.5$ )分别占比86.81%、6.36%和6.81%,低偏心率的脉冲双星系统占了绝大部分,中低和高偏心率占比很小,可以推测脉冲双星系统朝着轨道偏心率小的方向演化.260颗脉冲双星系统的轨道周期 $PB \leq 1$  d、 $1 < PB < 100$  d和 $PB \geq 100$  d的分别占30.00%、60.76%、9.23%.蔡炎等<sup>[20-21]</sup>做过双中子星的统计分布,得出双中子星的平均质量为 $1.339 M_\odot$ ,大部分源的主伴星质量比接近1.在此对已知脉冲双星系统进行统计分析,除去一个伴星质量未知的样本,259颗脉冲双星系统中,微小质量伴星( $M_c \leq 0.1 M_\odot$ )、小质量伴星( $0.1 M_\odot < M_c < 0.45 M_\odot$ )和大质量伴星( $M_c \geq 0.45 M_\odot$ )分别占比17.76%、58.30%和23.94%,脉冲星通过吸积伴星质量获得能量,随着演化时间推移,伴星质量逐渐减小.

脉冲双星系统吸积足够多的伴星质量便会演化至爱丁顿吸积率极限的加速线下方,但目前ATNF所列数据有9颗脉冲星位于加速线上方,见图中标出的序号,其中有5颗伴星质量超过 $4 M_\odot$ ,每颗星的信息如表3.做出这9颗脉冲双星系统轨道偏心率和伴星质量随特征年龄的演化关系,如图10.由图可知脉冲双星系统的整体演化顺序,即轨道偏心率和伴星质量随着时间演化逐渐减小,结论和上文一致.

做出这9颗脉冲星的伴星质量累积分布函数图(cumulative distribution function, CDF)和轨道周期与伴星质量的关系图进一步分析,如图11.

由质量累积分布函数图可知这几颗脉冲星的伴星质量相差较大,均为前文划分的大质量伴星( $M_c > 0.45 M_\odot$ )类别,相较于一般的双星系统,这些系统的伴星质量较大,其中5颗伴星是目前脉冲双星系统中伴星质量最大的5颗.这9颗脉冲星的

伴星类型有6颗为主序星、2颗为中子星、1颗为白矮星.且6颗伴星类型为主序星的双星系统的轨道周期最小为51 d,最大达16835 d,都拥有较大的轨道偏心率( $M_c > 0.5 M_\odot$ ),使得主星不易吸积伴星的质量.剩下3颗脉冲星的伴星类型分别是2颗中子星和1颗白矮星,这几颗星的轨道周期和偏心率都较小,和其他一般脉冲双星系统差不多,应该会在相对较短时间尺度内演化至加速线下方.张承民等<sup>[55]</sup>对加速线上方的双星系统的演化过程做了分析,且提到以爱丁顿为吸积率的加速线的位置会受到吸积盘的自旋力矩和辐射压的影响,对加速线进行修正后,距离加速线非常近的双星系统也有可能落到加速线下方.这些特殊脉冲星的相关物理性质已经有人做出讨论<sup>[56-57]</sup>,有效地推动了脉冲星物理模型的发展.

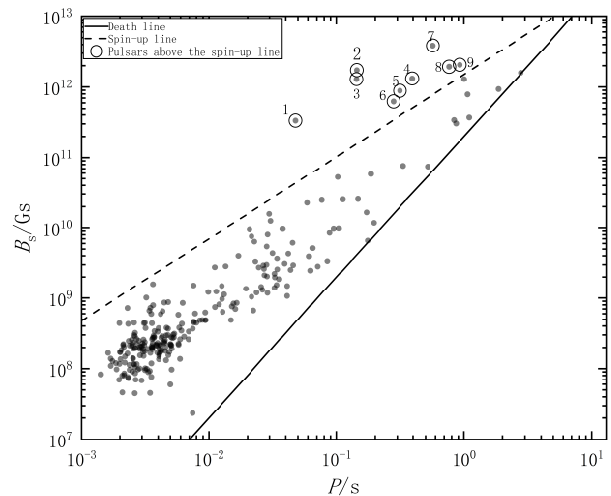


图9 脉冲双星系统自转周期与表面磁场强度之间的关系图.虚线是加速线,代表在爱丁顿吸积极限的加速下对应的最小周期,红线是死亡线,当脉冲星的极冠电压小于该线所代表的电压时,脉冲星将不再发出脉冲信号<sup>[46]</sup>.

Fig. 9 Relationship between rotation period and surface magnetic field strength of binary pulsar systems. The dashed line is the spin-up line, which represents the minimum period under the acceleration of the Eddington accretion limit, and the red line is the death line. When the polar cap voltage of the pulsar is less than the voltage represented by the line, the pulsar will no longer emit a pulse signal<sup>[46]</sup>.

表 3 加速线上方的9颗脉冲双星的物理参数  
 Table 3 Physical parameters of 9 binary pulsars above the acceleration line

Name	$P/s$	$\dot{P}$	Type	PB/d	Ecc	$M_c/M_\odot$	Companion
B1259-63	0.047762508	$2.28 \times 10^{-15}$	MSS	1236.724526	0.8698797	4.139869	MS
J1906+0746	0.144073155	$2.03 \times 10^{-14}$	DD	0.165993047	0.0853028	0.975804	NS
J2032+4127	0.14324647	$1.13 \times 10^{-14}$	BT	16835	0.964	17.016705	MS
J1141-6545	0.393898815	$4.31 \times 10^{-15}$	DD	0.197650959	0.171884	1.21326	CO
J1755-2550	0.315196062	$2.43 \times 10^{-15}$	DD	9.6963342	0.08935	0.47747	NS
B1820-11	0.279828697	$1.38 \times 10^{-15}$	BT	357.76199	0.794608	0.779239	MS
J1740-3052	0.570313412	$2.55 \times 10^{-14}$	MSS	231.02963	0.5788701	15.820183	MS
J1638-4725	0.7639335	$4.80 \times 10^{-15}$	MSS	1940.9	0.955	8.078541	MS
J0045-7319	0.926275905	$4.46 \times 10^{-15}$	BT	51.169451	0.807949	5.271109	MS

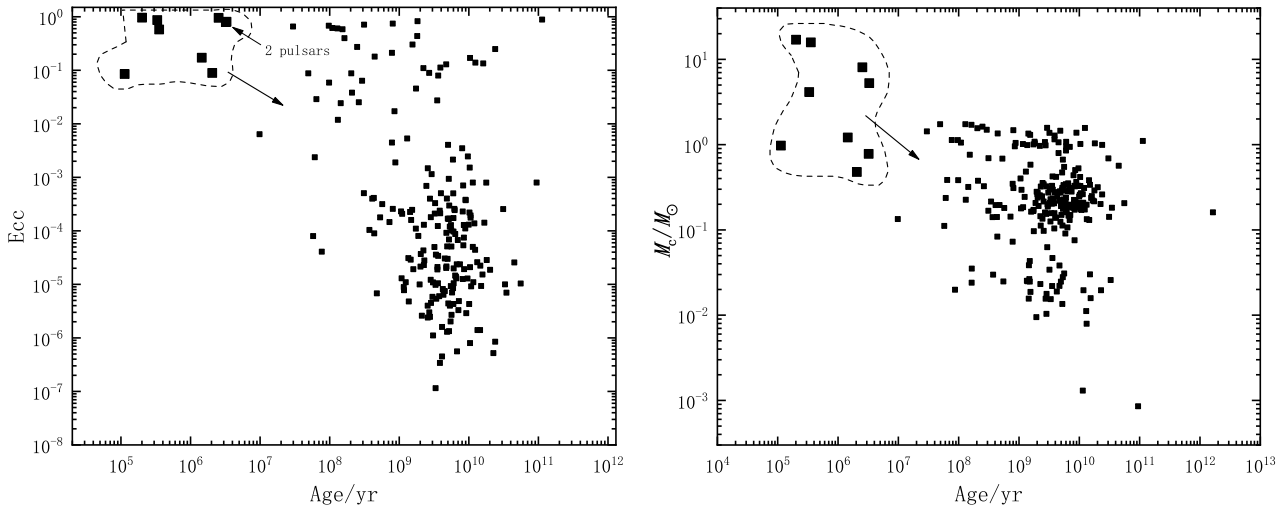


图 10 脉冲双星系统轨道偏心率和伴星质量随特征年龄演化关系图. 左图是偏心率随特征年龄的演化, 右图是伴星质量随特征年龄的演化. 加速线上方9颗脉冲星单独圈起来. 箭头代表脉冲星随着时间演化可能会移动的方向.

Fig. 10 Evolution of orbital eccentricity and companion mass with characteristic age in binary pulsar systems. The left panel shows the evolution of eccentricity with characteristic age, and the right panel shows the evolution of companion star mass with characteristic age. Nine pulsars above the spin-up line are marked by the circle, separately. The arrows represent the direction in which the pulsar may move as time evolves.

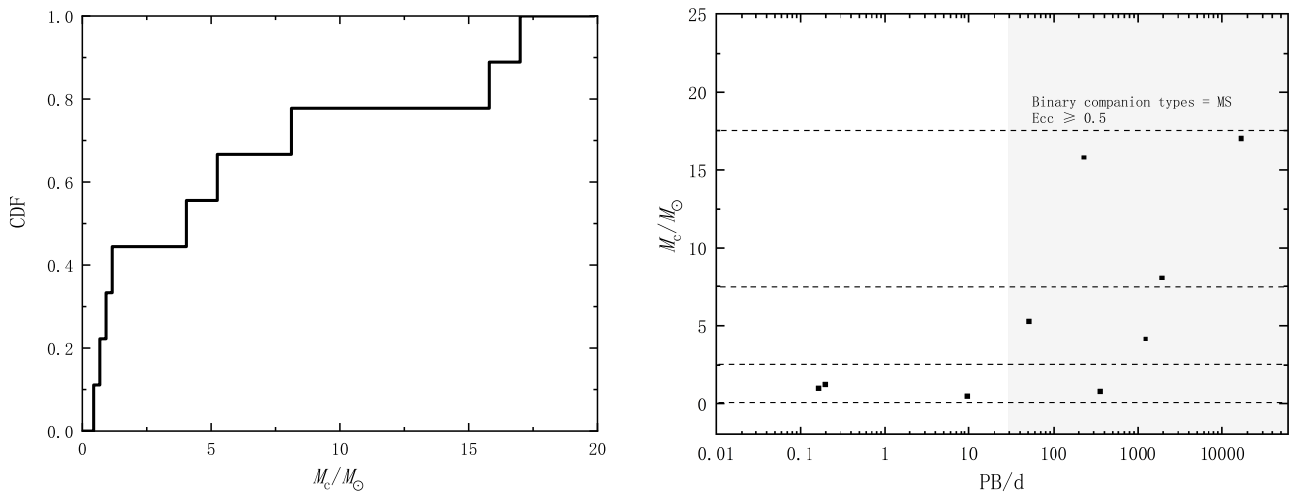


图 11 质量累积分布图和轨道周期与伴星质量的关系图. 左图是加速线上方9颗脉冲星的质量累积分布图. 右图是加速线上方脉冲星轨道周期(PB)与伴星质量( $M_c$ )的关系图, 浅色阴影代表伴星类型是MS, 轨道偏心率 $Ecc \geq 0.5$ 的双星系统.

Fig. 11 The cumulative distribution function of mass, and the relationship between the orbital period and the mass of companion stars. The left panel shows the cumulative distribution function of 9 pulsars above the spin-up line. The right panel shows the relationship between the orbital period (PB) of the pulsar above the acceleration line and the mass of the companion star ( $M_c$ ). The pale shading represents binary systems with companion type MS, orbital eccentricity  $Ecc \geq 0.5$ .

## 7 结论

本文对目前所发现脉冲星的物理参数进行了统计, 研究脉冲星的总体性质. 探讨了不同国家射电望远镜发现脉冲星数量分布, 包括目前FAST已发现近500颗脉冲星, 突显我国射电望远镜快速发展所取得的重要成果之一.

毫秒脉冲星和一般脉冲星的性质各异, 在空间位置、周期、磁场强度、自转能损率等方面的统计分布上均呈现出较为明显的差异. 毫秒脉冲星在空间位置上较为弥散分布, 周期更小、磁场强度较弱. 脉冲星周期和磁场强度的数量分布都显示双峰结构.

目前已有57颗脉冲星越过经典“死亡线”, 其中5颗是FAST发现的, 脉冲双星系统朝着低偏心率和伴星质量减小的方向演化. 脉冲双星系统中, 9颗位于“加速线”上方, 其中6颗伴星类型是主序星, 轨道周期较大, 且有5颗是目前脉冲双星系统中伴星质量最大的.

随着观测技术的提升, 将会发现越来越多经典理论不能解释的特殊脉冲星. 随着FAST等大型射电望远镜发现脉冲星数目的增多, 不仅增加和丰富

了脉冲星研究的样本, 而且也能对特殊脉冲星的特性进行更加深入的观测研究.

## 参考文献

- [1] Hewish A, Bell S J, Pilkington J D H, et al. *Nature*, 1968, 217: 709
- [2] 张承民, 王双强, 尚伦华, 等. *科技导报*, 2017, 35: 52
- [3] 王双强, 王娜, 张承民, 等. *天文学进展*, 2018, 36: 1
- [4] Julian W H. *ApJ*, 1973, 183: 967
- [5] 魏丁丁, 游霄鹏. *天文学报*, 2014, 55: 466
- [6] Li D, Wang P, Qian L, et al. *IMMag*, 2018, 19: 112
- [7] Nan R, Li D, Jin C J, et al. *IJMPD*, 2011, 20: 989
- [8] Qian L, Pan Z C, Li D, et al. *SCPMA*, 2019, 62: 959508
- [9] Han J L, Wang C, Wang P F, et al. *RAA*, 2021, 21: 107
- [10] Pan Z C, Qian L, Ma X Y, et al. *ApJ*, 2021, 915: L28
- [11] Yao J M, Zhu W W, Manchester R N, et al. *NatAs*, 2021, 5: 788
- [12] Luo R, Wang B J, Men Y P, et al. *Nature*, 2020, 586: 693
- [13] Feng Y, Li D, Yang Y P, et al. *Science*, 2022, 375: 1266
- [14] Li D, Wang P, Zhu W W, et al. *Nature*, 2021, 598: 267
- [15] Deng T, Ma M L, Liu Q H, et al. *RAA*, 2021, 21: 221
- [16] Cui X H, Zhang C M, Wang S Q, et al. *MNRAS*, 2021, 500: 3275
- [17] 汪珍如, 曲钦岳, 陆琰, 等. *天文学报*, 1979, 20: 199
- [18] Wang Z R, Qu Q Y, Lu T, et al. *ChA*, 1980, 4: 202
- [19] 谢蓉蓉. *天文研究与技术*, 1985, 2: 31

- [20] 蔡炎, 阿里塔尼, 赵永恒, 等. 天文学报, 2011, 52: 449
- [21] Cai Y, Ali T, Zhao Y H, et al. ChA&A, 2012, 36: 137
- [22] 郑娇, 游霄鹏. 天文学进展, 2020, 38: 189
- [23] 程争, 张承民, 赵永恒, 等. 天文学报, 2013, 54: 514
- [24] Cheng Z, Zhang C M, Zhao Y H, et al. ChA&A, 2014, 38: 294
- [25] Han J L. A&A, 1997, 318: 485
- [26] Ruderman M. ARA&A, 1972, 10: 427
- [27] Gautam A, Crocker R M, Ferrario L, et al. NatAs, 2022, 6, 703
- [28] Bhattacharyya B, Roy J. arXiv:2104.02294
- [29] Nagase F. PASJ, 2007, 41: 1
- [30] 王辉, 贾焕玉, 周霞, 等. 天文研究与技术, 2017, 14: 407
- [31] Yao J M, Manchester R N, Wang N. ApJ, 2017, 835: 29
- [32] Manchester R N, Hobbs G B, Teoh A, et al. AJ, 2005, 129: 1993
- [33] 刘超. 科学通报, 2021, 66: 1346
- [34] 吴庆东, 王德华, 支启军, 等. 天文学报, 2019, 60: 3
- [35] Lorimer D R, Kramer M. Handbook of Pulsar Astronomy. Cambridge: Cambridge University Press, 2012: 85
- [36] Cameron A D, Li D, Hobbs G, et al. MNRAS, 2020, 495: 3515
- [37] Zhang L, Li D, Hobbs G, et al. ApJ, 2019, 877: 55
- [38] Cruces M, Champion D J, Li D, et al. MNRAS, 2021, 508: 300
- [39] Wang S, Zhu W W, Li D, et al. RAA, 2021, 21: 251
- [40] Wang S Q, Wang J B, Wang N, et al. ApJ, 2021, 922: L13
- [41] Tan C M, Bassa C G, Cooper S, et al. ApJ, 2018, 866: 54
- [42] 张月竹, 付妍妍, 魏益焕, 等. 天文学报, 2015, 56: 235
- [43] Zhang Y Z, Fu Y Y, Wei Y H, et al. ChA&A, 2016, 40: 210
- [44] Mereghetti S. A&ARv, 2008, 15: 225
- [45] Ruderman M A, Sutherland P G. ApJ, 1975, 196: 51
- [46] Bhattacharya D, Van Den Heuvel E P J. PhR, 1991, 203: 1
- [47] Young M D, Manchester R N, Johnston S. Nature, 1999, 400: 848
- [48] Wu Q D, Zhi Q J, Zhang C M, et al. RAA, 2020, 20: 188
- [49] Lyne A G, Jordan C A, Graham-Smith F, et al. MNRAS, 2015, 446: 857
- [50] Shapiro S L, Teukolsky S A, Lightman A P. PhT, 1983, 36: 89
- [51] Li X D. SCPMA, 2010, 53: 9
- [52] Pol N, McLaughlin M, Lorimer D R. ApJ, 2019, 870: 71
- [53] Hulse R A, Taylor J H. ApJ, 1975, 195: L51
- [54] Amato I. Science, 1993, 262: 507
- [55] 张承民, 潘元月, 王德化, 等. 中子星与脉冲星天体物理. 北京: 科学出版社, 2019: 100
- [56] Aharonian F, Akhperjanian A G, Aye K M, et al. A&A, 2005, 442: 1
- [57] Lorimer D R, Stairs I H, Freire P C, et al. ApJ, 2006, 640: 428

## Statistical Analysis of Physical Parameters of Pulsars

YIN De-jiang<sup>1,2</sup>    ZHANG Li-yun<sup>1,2</sup>

(1 Department of Physics and Astronomy, Guizhou University, Guiyang 550025)

(2 Guian Supercomputing Center, Guiyang 550025)

**ABSTRACT** Thanks to the excellent performance of FAST (Five-hundred-meter Aperture Spherical radio Telescope), the number of pulsars has increased rapidly. It is very important to analyze the physical parameters of known pulsars. The overall properties of pulsars are studied by analyzing the related physical parameters such as spatial position, period, surface magnetic flux density and so on. A large number of pulsars were detected by FAST near the galactic disk, which reflect the superiority of its detection ability. The diagram of the relationship between the period and the time derivative of period of pulsars has been updated. At present, 57 pulsars have crossed the classical “death line”, and five were discovered by FAST. Finally, the physical parameters of the binary pulsar systems are statistically analyzed, the binary pulsar systems are evolving towards the direction of low eccentricity and the decrease mass of the companion star. Moreover, 9 are located above the “spin-up line”. FAST is making China into the golden age of pulsar discovery, which will further promote the rapid development of pulsar physics.

**Key words** pulsars: general, stars: statistics, binaries: general