http://www.seejournal.cn E-mail: htqhjgc@126.com Tel: (010)68116407, 68116408, 68116544

质子单粒子效应引发卫星典型轨道下 SRAM 在轨错误率分析

张付强，郭 刚，覃英参，陈启明
（中国原子能科学研究院 国防科技工业抗辐照应用技术创新中心，北京 102413）

摘要：利用中国原子能科学研究院 100 MeV 质子回旋加速器（CY CIAE-100）的单粒子效应辐照装置，测量了典型静态随机存储器（SRAM）的质子单粒子翻转截面；利用 Space Radiation 7.0 软件计算了卫星搭载该器件在典型轨道条件下运行的在轨错误率；同时研究了航天器在不同轨道高度、轨道倾角和屏蔽条件下对质子单粒子效应引发的在轨错误率的影响。计算结果表明：航天器运行于地球同步轨道高度及以下时，质子单粒子效应引发的在轨错误率均高于重离子的，最高可相差 3 个数量级左右。
关键词：空间辐射环境；单粒子效应；在轨错误率；轨道参数；回旋加速器
中图分类号：V520.6; O483 **文献标志码：**A **文章编号：**1673-1379(2018)04-0365-06
DOI: 10.3969/j.issn.1673-1379.2018.04.010

Prediction of proton-induced single event effect on SRAM's in-orbit soft error rate on typical satellite orbit

ZHANG Fuqiang, GUO Gang, QIN Yingcan, CHEN Qiming
(National Innovation Center of Radiation Application, China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

Abstract: A typical static random access memory (SRAM) is chosen for the single event effect testing with the 100 MeV proton cyclotron in China Institute of Atomic Energy (CIAE). The cross section for the single event upset under proton irradiation is measured, and the in-orbit soft error rate (SER) of the device used for typical satellite orbits is calculated by the Space Radiation 7.0 software. The influence of the orbit altitude, the orbit angle and the shielding condition on the in-orbit soft error rate is analyzed. It is shown that the SER single event effect (SEE) induced by proton is higher than that induced by heavy ions in the geosynchronous orbit. The SER induced by the proton SEE is up to three orders of magnitude higher than that induced by the heavy ion SEE
Key words: space radiation environment; single event effect; in-orbit soft error rate; orbit parameters; cyclotron

收稿日期：2018-04-24；**修回日期：**2018-08-18
基金项目：国家自然科学基金项目“纳米器件单粒子效应敏感区重离子微束定位分析技术”（编号：11690044）

引用格式：张付强, 郭刚, 覃英参, 等. 质子单粒子效应引发卫星典型轨道下 SRAM 在轨错误率分析[J]. 航天器环境工程, 2018, 35(4): 365-370
ZHANG F Q, GUO G, QIN Y C, et al. Prediction of proton-induced single event effect on SRAM's in-orbit soft error rate on typical satellite orbit[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2018, 35(4): 365-370

0 引言

航天器在轨运行面临恶劣的空间辐射环境。其中的高能粒子入射到航天器的微电子器件敏感区域时，将会产生单粒子效应，干扰甚至破坏航天器的正常运行。如，美国 MSTI 和 IRON9906 卫星由于单粒子翻转效应导致提前结束寿命[1]。因此，微电子器件必须经过重离子及质子单粒子效应地面模拟考核，且达到相关指标才能应用于航天器。单粒子效应地面模拟考核是指利用粒子加速器、脉冲激光、放射源等设备和手段模拟空间粒子辐射环境，通过对器件进行辐照，评估器件抗单粒子效应能力。其中利用粒子加速器对器件进行辐照是目前最为常见的方法[2]。

国外开展单粒子效应的研究起步较早，涉及单粒子效应理论、单粒子效应实验方法等[3-5]。这些成果汇集形成标准单粒子效应实验考核方法。常见的标准有欧洲航天局发布的 ESA/SCC No.25100 标准[6]，美国国防部发布的 MIL-STD-750 标准[7]，美国电子工业协会发布的 EIA/JESD-57 标准[8]。我国发布了重离子单粒子效应考核实验标准 GJB 7242—2011[9]，但是缺乏质子单粒子效应考核实验标准。其原因在于我国缺乏适用于质子单粒子效应考核实验的粒子加速器和相关辐照装置，进行质子单粒子效应实验只能申请国外加速器辐照装置的机时，需耗费大量精力和物力。

中国原子能科学研究院 100 MeV 质子回旋加速器（CY CIAE-100）的单粒子效应辐照装置在 2016 年年底正式运行，标志着我国质子单粒子效应实验能力的形成。本研究将利用该装置开展质子单粒子效应引发的卫星典型轨道在轨错误率分析，进一步揭示开展宇航用微电子器件质子单粒子效应考核的重要性。

1 质子单粒子效应实验

1.1 被试器件

选取欧洲航天局开发的单粒子效应监督器（ESA SEU Monitor）作为被试器件，其核心为 AT 68188F 型静态随机存储器（如图 1 所示），由 4 块 AT60142F 型 SRAM 组成。AT60142F 是一款 250 nm、CMOS 工艺的低功耗 SRAM，尺寸为 6.1 mm×11.2 mm，工作电压为 3.3 V。为避免出现单粒子多位翻转（MBU）效应，AT60142F 型 SRAM 被设计为 8 个并行存储块，总存储容量为 512 kByte×8。

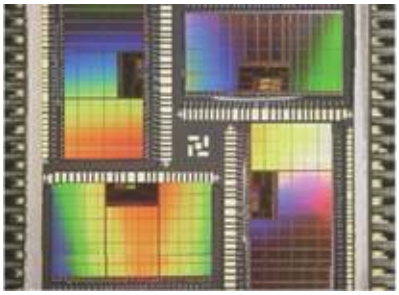

图 1 AT 68188F 型静态随机存储器
Fig. 1 AT 68188F SRAM

1.2 实验方法

实验主要在 CY CIAE-100 的单粒子效应辐照装置上进行，选取质子束流能量分别为 30、40、50、60、80 和 90 MeV。为获得器件在 30 MeV 以下能量点的质子单粒子翻转截面，实验还在中国原子能科学研究院 HI-13 串列加速器单粒子效应辐照装置上进行了 22 MeV 和 15 MeV 能量点的质子单粒子效应实验。

单粒子效应测试体系布局如图 2 所示。实验所用待测芯片固定于测试板上，由稳压电源提供 3.3 V 工作电压。上位机与芯片之间的通信通过 TCP/IP 协议进行。进行单粒子效应测试时，芯片处于静态工作模式，采用写入数据—辐照器件—回读数据进行比较的测试程序。具体来说，实验开始前利用上位机中的单粒子效应测试系统对芯片存储单元写入全零模式测试图形；然后接受束流辐照，注量率为 1×10^{7} $cm^{-2}\cdot s^{-1}$，当总注量达到 5×10^{9} cm^{-2} 时停止辐照；回读此时存储单元的数据并与初始写入数据进行比较得出单粒子翻转事件的发生数量。

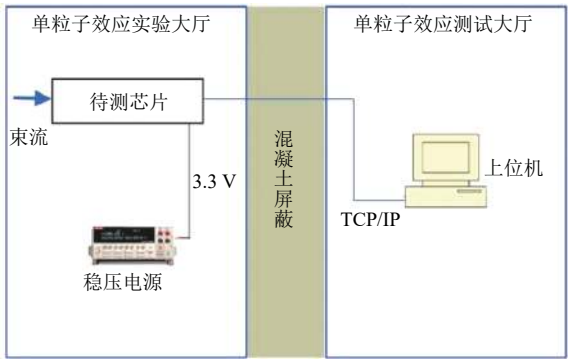

图 2 单粒子效应测试系统布局
Fig. 2 Layout of the SEE testing system

2　典型轨道在轨错误率预估方法

测试得到待测器件发生单粒子翻转的数量及对应的质子辐照总注量后，利用

$$\sigma=\frac{N}{\Phi\cdot H} \tag{1}$$

进行单粒子翻转截面的计算。式中：σ 为器件单粒子翻转截面面积，cm^2/bit；N 为器件发生单粒子翻转事件的数量；Φ 为此时器件所受辐照的总注量，cm^{-2}；H 为器件存储容量，bit。

通过式 (1) 得到的 SEU Monitor 静态随机存储器的质子单粒子翻转截面数据点如图 3(a) 所示，该结果与文献[10]报道的同款器件单粒子翻转截面数据较为一致，验证了本实验截面测量的准确性[10]。为进行在轨错误率预估，利用式 (2) 进行 Weibull 拟合后得到质子单粒子翻转截面曲线（图 3(a)）。

$$y=A(1-e^{-[(x-x_c)/W]^S}) \tag{2}$$

式中：A 为拟合得到的饱和翻转截面；x_c 为翻转截面曲线的阈值；W 为宽度参数；S 为量纲为 1 的指数。

同时利用已有的 SEU Monitor 重离子单粒子效应实验数据拟合得到器件的重离子单粒子翻转截面曲线如图 3(b) 所示[11]。可以看到，该器件的质子单粒子翻转饱和截面比重离子单粒子翻转饱和截面低约 6 个数量级。为评价不同带电重离子在材料中直接电离的能力，重离子单粒子翻转截面曲线的横坐标使用的是线性能量传输（Linear Energy Transfer, LET）值（重离子在材料单位路径长度上损失的能量）。该量值通常采用被材料密度归一化的形式，单位为 MeV·cm^2/mg。区别于重离子，质子单粒子效应翻转截面曲线的横坐标使用质子能量表示，原因在于质子单粒子效应的主要物理机制为间接电离作用。

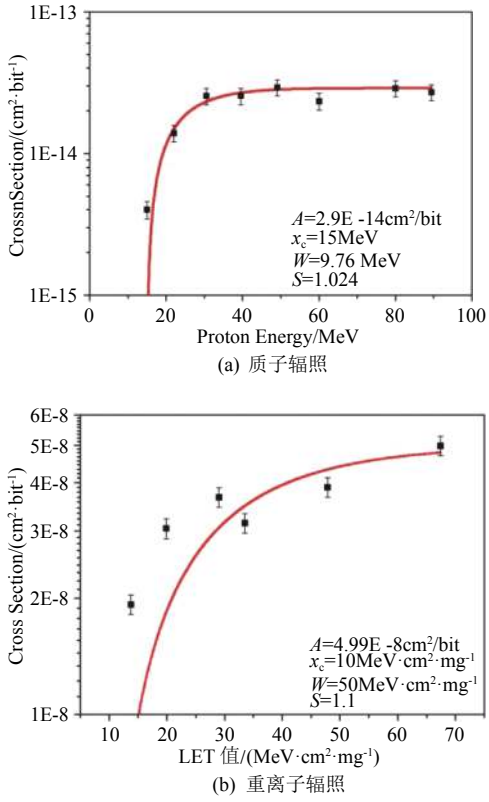

图 3　不同粒子辐照条件下的 SRAM 单粒子翻转截面曲线

Fig. 3　SEU curve of the SRAM under different radiation conditions

在轨错误率计算将基于拟合得到的器件单粒子效应相关数据进行。Space Radiation 7.0 是由 Space Radiation Associates 开发的空间辐射效应计算软件，得到美国众多航天研究机构的认可和使用，并已成功为多种型号航天器的在轨正常运行提供数据保障[12]。现利用该软件，选取低地球轨道（LEO）、中地球轨道（MEO）、高地球轨道（HEO）、地球同步轨道（GEO）和太阳同步轨道（SSO）作为典型轨道进行质子单粒子效应引发的在轨错误率的计算，同时与重离子单粒子效应引发的在轨错误率进行对比，相关结果如表 1 所示。计算中，地球俘获带质子使用 AP-8 模型；太阳宇宙射线质子使用 JPL1991 模型；由于银河宇宙射线质子通量较低（1~10 $cm^{-2}\cdot s^{-1}$），故不予考虑。

表 1　典型轨道上单粒子效应引发的在轨错误率

Table 1　SEE induced in-orbit soft error rate

轨道类型	轨道高度/km		轨道倾角/(°)	在轨错误率/(upset·$bit^{-1}\cdot d^{-1}$)	
	远地点	近地点		质子 SEU	重离子 SEU
LEO	500	500	52	3.88×10^{-8}	2.86×10^{-9}
SSO	870	870	98.9	5.62×10^{-7}	1.08×10^{-8}
MEO	10 000	10 000	55	1.31×10^{-7}	2.02×10^{-8}
HEO	21 500	21 500	55	1.98×10^{-7}	3.87×10^{-8}
GEO	35 786	35 786	0	1.51×10^{-7}	4.21×10^{-8}

由表 1 可以看到，在低轨道、中轨道及高轨道条件下质子单粒子效应引发的在轨错误率均高于重离子单粒子效应引发的，且这 2 个错误率的比值随轨道高度的变化而变化。

3 各类参数对在轨错误率的影响计算

3.1 轨道高度的影响

航天器轨道高度是研究辐射环境影响的重要参数之一。取航天器屏蔽层等效铝厚度为 3 mm，轨道倾角为 52°，计算分析轨道高度对单粒子效应引发的在轨错误率的影响，并绘制轨道高度–在轨错误率曲线，如图 4 所示。

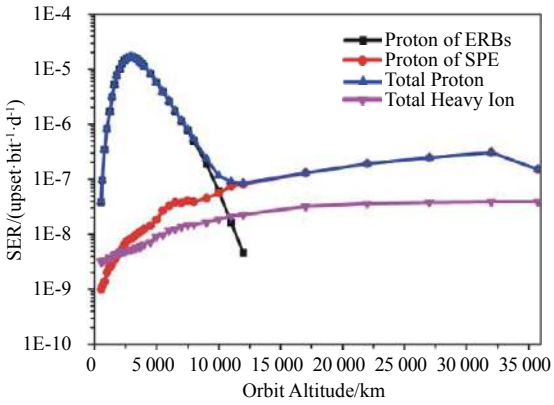

图 4 轨道高度对质子单粒子效应在轨错误率的影响

Fig. 4 The influence of orbit altitude on the proton SEE induced On-orbit SER

由图 4 可见，在 GEO 高度以下，随着轨道高度的增加，质子单粒子效应引发的在轨错误率呈现先增加后减少再增加的趋势，而重离子单粒子效应引发的在轨错误率则一直呈现缓慢增加的趋势。其中地球俘获带质子单粒子效应引发的在轨错误率随着轨道高度增加先增加后减少，在 H=3000 km 时达极大值，约为 1.66×10^{-5} upset/(bit·d)，而此时重离子单粒子效应引发的在轨错误率约为 5.4×10^{-9} upset/(bit·d)。当 H>10 000 km 后，地球俘获带质子单粒子效应引发的在轨错误率下降至低于重离子单粒子效应引发的在轨错误率，且接近于 0。太阳宇宙射线质子单粒子效应引发的在轨错误率则呈现随着轨道高度增加一直增大的趋势。

质子单粒子效应引发的在轨错误率中，当 H<10 000 km 时由地球俘获带质子引发的在轨错误率占主要地位，而当 H>10 000 km 时由太阳质子引发的在轨错误率占主要地位。

中低轨道条件下，质子单粒子效应引发的在轨错误率最高比重离子单粒子效应引发的在轨错误率高 3 个数量级左右；在高轨道条件下，质子单粒子效应引发的在轨错误率比重离子单粒子效应引发的在轨错误率高 5 倍左右。

3.2 轨道倾角的影响

卫星轨道倾角对质子单粒子效应引发的在轨错误率的影响如图 5 所示。在不同轨道高度条件下质子单粒子效应引发的在轨错误率都随着卫星轨道倾角的增加呈现先增大后减小的规律。

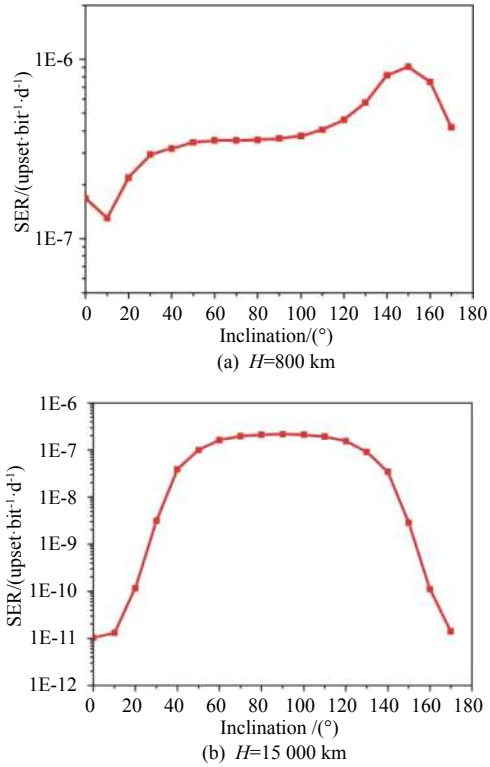

图 5 轨道倾角对质子单粒子效应引发的在轨错误率的影响

Fig. 5 The influence of orbit inclination on proton SEE induced in-orbit soft error rate

当 H=800 km 时，在轨错误率在轨道倾角为 150°时出现极大值。这可能是因为当航天器处于低轨道运行时，地球俘获带质子单粒子效应引发的在轨错误率占主要地位，但地球俘获带质子分布并不均匀，以该轨道倾角运行的卫星将会通过南大西洋异常区附近，该区域明显增大的质子通量使得卫星在轨错误率提高。

当 H=15 000 km 时，太阳质子单粒子效应引发的在轨错误率占主要地位，轨道倾角–在轨错误率曲线呈轴对称分布。

3.3　屏蔽层厚度的影响

不同铝等效厚度的航天器屏蔽层对质子单粒子效应引发的在轨错误率的影响如图 6 所示。

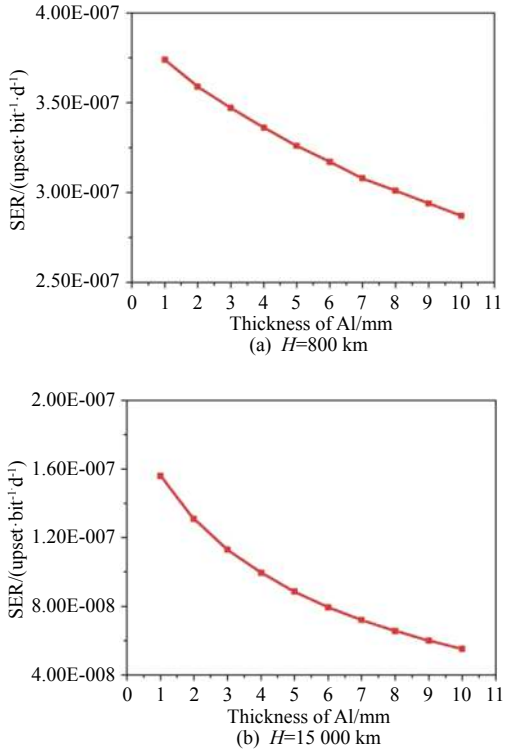

图 6　屏蔽层等效铝厚度对质子单粒子效应引发的在轨错误率的影响

Fig. 6　The influence of Al thickness on proton induced in-orbit soft error rate

可以看出，随着屏蔽层厚度的增加，不同轨道高度条件下质子单粒子效应引发的在轨错误率均逐渐降低。在低地球轨道条件（H=800 km）下，等效屏蔽层厚度每提高约 1 个数量级，质子单粒子效应引发的在轨错误率降低约 23%；在中高地球轨道条件（H=15 000 km）下，等效屏蔽层厚度每提高约 1 个数量级，质子单粒子效应引发的在轨错误率降低约 64%。可见，若要大幅度降低器件的在轨错误率，需要采用相当厚度的屏蔽层，但这将导致航天器质量的大幅增加。

3.4　太阳活动的影响

描述地球俘获带质子的 AP-8 模型分 Min 和 Max，分别描述太阳活动极小和极大时地球俘获带的质子通量。我们研究这 2 种太阳活动条件对质子单粒子效应引发的在轨错误率的影响。选取轨道高度为 800 km，轨道倾角为 98.7°的“风云三号 D”气象卫星的轨道条件进行计算。结果显示：AP-8 Max 条件下时的卫星的在轨错误率低于 AP-8 Min 条件时的，分别为 2.78×10^{-7} 和 3.7×10^{-7} upset/(bit·d)。其主要原因在于 AP-8 Max 条件下太阳活动剧烈，将加热地球大气层使其膨胀，使得本不与大气层接触的质子与大气发生核反应，造成质子通量和能量的下降[13]。图 7 为计算得到的不同条件下的质子能谱图，进一步验证了该推测。

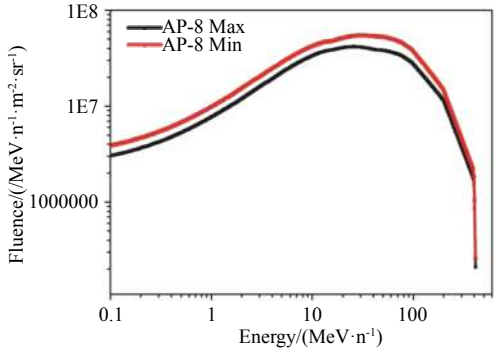

图 7　AP-8 Max/Min 条件下的质子能谱图（H=800 km）

Fig. 7　The energy spectra of proton under AP-8 Max and AP-8 Min conditions (H=800 km)

4　结束语

本文利用 CY CIAE-100 的质子单粒子效应辐照实验装置，选取典型 SRAM 器件，通过测试推导出其单粒子翻转截面，并分析计算了运行于典型轨道的卫星搭载该器件时的质子单粒子效应引发的在轨错误率。研究结果表明：当卫星运行轨道高度 H＜10 000 km 时，地球俘获带质子单粒子效应引发的在轨错误率占主要地位；当 H＞10 000 km 时，太阳质子单粒子效应引发的在轨错误率占主要地位。当卫星运行于同步地球轨道高度及以下高度时，质子单粒子效应引发的在轨错误率均高于重离子单粒子效应引发的，最大差别可达 3 个数量级左右。

参考文献（References）

[1] KOONS H C, MAZUR J E, SELESBICK R S, et al. The impact of the space environment on space system: American Defense Report (20000509112)[R], 1999

[2] DUZELLIER S, ECOFFET R. Recent trends in single event effect ground testing[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1996, 43(2): 671-677

[3] McMORROW D, LOTSHAW W T, MELINGER J S, et al. Subbandgap laser-induced single event effects: carrier generation via two-photon absorption[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2002, 49(6): 3002-3008

[4] PETERSEN E L, PICKEL J C, ADAMS J H, et al. Rate prediction for single event effects-a critique[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1992, 39(6): 1577-1599

[5] KOGA R. Single-event effect ground test issues[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1996, 43(2): 661-670

[6] Single event effects test method and guidelines: ESA/SCC basic specification No. 25100[S]. Noordwijk, The Netherlands, ESA, 1995: 1

[7] MIL-STD-750 Method 1017: Neutron irradiation[S]. Columbus: Defense Logistics Agency, 2012: 1

[8] Procedures for the measurement of single-event effects in semiconductor devices from heavy-ion irradiation: EIA/JESD-57[S]. Greenbelt, MD, USA: NASA Goddard Space Flight Center, 2015: 1

[9] 单粒子效应试验方法和程序: GJB 7242—2011[S]. 北京: 中国人民解放军总装备部, 2011: 1

[10] HARBOE-SORENSEN R, POIVEY C, GUERRE F X, et al. From the reference SEU monitor to the technology demonstration module on-board PROBA-II[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2008, 55(6): 3082-3087

[11] 沈东军, 范辉, 郭刚, 等. 欧空局单粒子监督器在北京 HI-13 串列加速器上的单粒子效应校核实验[J]. 原子能科学技术, 2017, 51(3): 555-560

SHEN D J, FAN H, GUO G, et al. Single event effect calibration experiment with ESA single event upset monitor on Beijing HI-13 tandem accelerator[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2017, 51(3): 555-560

[12] 薛玉雄, 曹洲, 杨世宇, 等. 基于 Space Radiation 5.0 软件平台分析典型 GEO 空间辐射环境[J]. 航天器环境工程, 2007, 24(5): 291-295

XUE Y X, CAO Z, YANG S Y, et al. Analyses of typical GEO space radiation environment using software package Space Radiation 5.0[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2007, 24(5): 291-295

[13] XAPSOS M. Modeling the space radiation environment[C]// IEEE Nuclear and Space Radiation Effects Conference, 2006: 11-12

（编辑：冯露漪）

作者简介：张付强（1989—），男，博士学位，主要研究方向为空间辐射效应。E-mail: fqzhang@mail.bnu.edu.cn。