



中华人民共和国国家标准

GB/T 39343—2020

宇航用处理器器件单粒子试验设计与程序

Processor device single event effects experiment design and
procedure for aerospace

2020-11-19 发布

2021-06-01 实施

国家市场监督管理总局
国家标准化管理委员会 发布

目 次

前言	I
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义、缩略语	1
3.1 术语和定义	1
3.2 缩略语	2
4 一般要求	2
4.1 试验环境	2
4.2 试验样品	3
4.3 基本原则	3
4.4 需求分析	4
4.5 试验准备	4
5 试验设计	5
5.1 硬件设计	5
5.1.1 概述	5
5.2 软件架构	7
5.3 软件设计	7
6 试验过程	11
6.1 试验流程	11
6.2 注意事项	12
6.3 试验判定	12
6.4 试验中断	13
6.5 试验故障判据	13
6.6 故障处理	13
6.7 试验安全	13
7 试验结果处理	13
7.1 试验数据记录	13
7.2 试验数据分析	14
7.3 试验报告	14
附录 A (资料性附录) 试验场所	16
附录 B (资料性附录) 宇航用处理器器件单粒子试验报告格式	18

前 言

本标准按照 GB/T 1.1—2009 给出的规则起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别这些专利的责任。

本标准由全国宇航技术及其应用标准化技术委员会(SAC/TC 425)提出并归口。

本标准起草单位:中国航天科技集团有限公司第九研究院第七七一研究所。

本标准主要起草人:张群、刘洪卫、马振华、李春。



宇航用处理器器件单粒子试验设计与程序

1 范围

本标准规定了宇航用处理器器件的单粒子试验设计与程序。
本标准适用于宇航用处理器器件的单粒子试验设计和过程控制,其他领域应用可参照执行。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件,仅注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件,其最新版本(包括所有的修改单)适用于本文件。

GB 18871—2002 电离辐射防护与辐射源安全基本标准

3 术语和定义、缩略语

3.1 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1.1

处理器器件 processor device

内部含有处理器的器件,在正常的使用中可取指并执行指令的器件。

3.1.2

单粒子效应 single event effects;SEE

描述单粒子事件中的许多效应的术语。

3.1.3

单粒子事件 single event phenomena;SEP

由单个高能粒子撞击引发的半导体器件一系列响应的统称,包括中子、质子引起的效应。

3.1.4

单粒子翻转 single event upset;SEU

单个高能粒子作用于器件,引发器件的逻辑状态改变的一种辐射效应。

3.1.5

单粒子锁定 single event latch up;SEL

单个高能粒子将器件内的可控硅触发开启,形成低电阻、大电流状态。

3.1.6

单粒子功能中断 single event functional interrupt;SEFI

单个高能粒子作用于器件,使被试器件功能丧失或紊乱,只有通过复位和重新配置才能恢复器件功能。

3.1.7

线性能量传输 linear energy transfer;LET

粒子沿入射方向在材料中单位长度沉积的能量。

3.1.8

LET 阈值 threshold LET

一定比例饱和截面对应的 LET 值。

3.1.9

有效 LET effective LET

离子倾角入射时等效于沿表面法线方向单位长度上沉积的能量。

3.1.10

注量 fluence

垂直入射方向单位面积粒子总数,单位为粒子数每平方厘米(n/cm^2)。

3.1.11

注量率 flux

单位时间内单位面积垂直入射的粒子数,单位为粒子数每平方厘米秒 $[\text{n}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})]$ 。

3.1.12

单粒子事件截面 SEP section

单位注量下的单粒子事件数。

3.1.13

饱和截面 saturation cross section

增加入射粒子的 LET 值而 SEP 数不再增加时的单粒子事件截面。

3.1.14

单粒子事件率 SEP rate

发生单粒子事件的概率,根据不同空间轨道宇宙射线的粒子种类和粒子数,结合翻转截面和单粒子事件截面,可计算出特定空间辐射环境下发生单粒子事件的概率。

3.2 缩略语

下列缩略语适用于本文件。

DUT 待测器件(device under test)

ECC 错误检测与修正(error checking and correction)

LET 线性能量传输(liner energy transfer)

MBU 多位翻转(multiple-bit upset)

MCU 多单元翻转(multiple-cell upset)

PCB 印制电器板(print circuit board)

SEE 单粒子效应(single event effect)

SEFI 单粒子功能中断(single event functional interrupt)

SEL 单粒子锁定(single event latch up)

SEP 单粒子事件(single event phenomena)

SET 单粒子瞬态(single event transient)

SEU 单粒子翻转(single event upset)

4 一般要求

4.1 试验环境

除另有规定外,测量和试验环境条件应满足:

- 温度:15℃~35℃;
- 相对湿度:20%~80%。

4.2 试验样品

试验样品应满足以下要求:

- a) 同一批次产品的试验样品数量应满足单粒子效应的统计学要求。样品电路试验前应进行常温电参数测试和功能测试,确保电参数合格,功能正常,对器件编号,并按编号记录相关数据。
- b) 确保粒子可穿透处理器器件的有源区。
- c) 开盖或减薄过程中做好防机械冲击、防静电等措施。
- d) 选用未经辐照的样品电路参加试验。
- e) 记录样品电路的详细信息。

4.3 基本原则

4.3.1 最恶劣测试条件

处理器器件设计功能复杂,在进行单粒子试验时测试的功能多,可能发生的单粒子效应种类也多。进行单粒子试验时,处理器应工作在某种特定的应用模式或处于最恶劣条件下,包括作用于处理器的所有的电参数(供电电压、激励输入、温度、时钟频率等)和束流条件。处理器的最恶劣测试条件取决于应用要求和测试的单粒子效应的类型:

- a) SEU:最小工作电压和最高工作频率;
- b) SET:最恶劣工作情况或与实际应用相当;
- c) SEL:最大工作电压和最高工作温度。

4.3.2 束流选择

束流应选择最恶劣测试条件:

- a) 高能质子 SEE 测试最恶劣条件是最大质子能量,但建议扫描整个质子能量范围;
- b) 重离子辐射源 SEU、SET、SEFI 测试的最恶劣条件是最大束流能量的硅中射程,硅中射程应不小于 30 μm ;
- c) 重离子辐射源 SEL 测试的最恶劣条件是最大束流能量的硅中射程,若不能证明低范围的束流能量足够产生锁定现象,硅中射程最小为 60 μm 。

4.3.3 基本要求

针对不同类型的 SEE,设计的基本要求为:

- a) SEU
 - 1) 分析处理器器件的结构,确定器件的功能模块是否包含寄存器或存储器等双极性单元;
 - 2) 测试硬件和软件的设计应可监控功能模块,结合不同模式的写(全“0”、全“1”、检验、随即模式等),并对发生 SEU 而受影响的单元进行重写操作;
 - 3) 测试软件应能统计翻转的个数、位置和时间,并能区分 MCU 和 MBU。
- b) SEL
 - 1) 测试软件和硬件应设计完善,可探测和记录锁定现象,并在发生锁定现象时保护器件;
 - 2) 发生锁定时,确保锁定保护时间对器件不会产生损坏或退化;
 - 3) 软件设计应执行“活跃”时间百分比,即在一种敏感的条件下可以探测 SEE 的发生,剩余的“死区”时间可能发生 SEE 但不可探测,这段时间是软件运行时间,为器件复位、读/写

和记录试验结果的时间；

- 4) 在利用束流和 SEP 计算器件的截面时应考虑活跃时间所占的比例。

c) SET

- 1) 模拟或数模混合器件可能因 SEE 产生错误的输出或出现瞬态错误；
- 2) 因偏置、输入/输出负载的条件变化会显著影响器件的敏感性和特性，器件应在最恶劣条件下或应用条件下进行试验；
- 3) 单粒子试验系统应能监测和记录 SET，应记录瞬态的极性、波形、持续时间和放大量；
- 4) 为降低 SET 积累的风险，应控制束流的注量，确保不发生总剂量效应；
- 5) 辐射后的软件分析应能去掉 SET 积累的影响，或分开分析。

d) SEFI

- 1) SEFI 的敏感性与器件的运行模式有关，处理器器件应运行所有的工作模式来测试实际应用中可能出现的情况；
- 2) 硬件和软件设计应包含复位功能和通断电功能，可测试和记录 SEFI 的类型，并对发生的 SEFI 纠错。

4.4 需求分析

需求分析包括以下内容：

- a) 分析参加试验的处理器器件的设计功能和制造工艺，研究器件敏感性，确定器件发生 SEE 的种类，并根据测试基本原则，确定单粒子试验系统设计中软硬件的注意事项，给出每一个功能模块的设计原则和测试方法；
- b) 根据处理器器件敏感性分析结果，结合试验场所提供的粒子源特点，确定试验中使用的粒子种类；
- c) 根据处理器器件的特点和 SEE 试验中选用的粒子，分析试验过程中可能出现的 SEE 种类、SEE 现象的判定及应急处理预案。

4.5 试验准备

4.5.1 试验人员

试验人员应经过上岗培训，了解测试设备使用方法，具有紧急事件处理能力。具体要求如下：

- a) 熟悉器件设计原理，可从理论角度提供器件在辐照试验过程中突发状况的解决方法；
- b) 熟知器件工作状态，可确定辐照试验中剂量率对器件的影响，决定试验进度；
- c) 了解试验环境，包括试验场所、试验环境搭建、试验板操作等。

4.5.2 试验设备

试验前，测试人员、试验人员和检验人员应确认试验产品状态正确，试验设备状态正确，并在计量检定期内，测试软件版本正确。

4.5.3 试验种类

单粒子试验根据所处环境可分为大气试验和真空试验。

大气试验通过束流引出窗将束流引到窗外，在大气环境下的定位辐照台上进行测试。在大气试验中将测试板 L 形两边固定在辐照台上。

真空试验是将测试板先放入真空罐中进行真空预抽，预抽完成后通过移动真空罐中的测试架对测试板定位辐照，经节省抽真空时间以提高测试效率。在真空试验中，由试验场所提供样品架，将多个试

验板固定在样品架上,一次性放进真空罐中。

试验板结构设计应满足试验场所的尺寸要求。试验场所相关要求可参照附录 A。

5 试验设计

5.1 硬件设计

5.1.1 概述

硬件设计包含单粒子试验系统集成、单粒子试验板设计、供电设计、试验板结构、布局布线、外观、接口、器件选型等。

5.1.2 试验系统集成

单粒子试验系统由远程计算机、控制计算机、电源控制、通信控制、单粒子试验板等组成。可在单粒子试验环境下为处理器器件提供测试平台,监控整个试验流程,对参加试验的处理器进行全面的测试和评估,并对试验结果实时处理或保存试验数据,为处理器器件的抗辐照性能评估提供基础。

5.1.3 试验板设计

针对处理器器件的单粒子试验,测试方法主要选择辅助测试法,即在设计时应由另外一片主控制器件控制测试过程,并将测试结果回传至控制端。在设计处理器器件的单粒子试验板时,应集成被测处理器器件最小系统和主控制器件最小系统,在主控制器件与被测器件之间建立通信链路,实现对试验过程的控制和测试结果的管理等功能。

主控制器件选择集成通信接口器件,数据率可满足控制信号发送、控制状态返回和测试数据回传等功能,可选择抗辐照器件。

5.1.4 供电设计

单粒子试验板供电设计应考虑如下因素:

- a) 进行 SEU 试验时,被测处理器器件因辐照影响而产生功耗波动,易引发大电流现象,被测处理器器件与最小系统中其他元器件应分开供电,可实时监控被测处理器器件功耗情况;
- b) 在进行 SEU 试验时,应考虑不同电压偏置对试验结果的影响,采取正常供电与拉偏供电可选设计,可在板级电源供电设计中采用多选通控制,以满足不同条件下的测试需求;
- c) 在进行 SEL 试验时,器件发生锁定时将出现瞬态大电流现象,为顺利完成试验,并确保不对被测处理器器件造成损坏,可在单独供电、拉偏供电等基础上进行过流保护设计;
- d) 针对处理器多电源域情况,可设计电流采样电路,实时回传电流采样数据,实现对不同电源域功耗实时监控;
- e) 针对不同处理器器件和不同电源域,应预留监测点,供调试和监测;
- f) 为减少潜通路风险,主控制器件、被测处理器器件等不同电源域应采取隔离设计,并隔离选通主控制器件与被测处理器器件之间的通信接口;
- g) 随着处理器器件工作电压降低,建议整板输入一种电压,利用 DC/DC 变换满足不同供电需求。

5.1.5 试验板结构

5.1.5.1 通用要求

单粒子试验板结构设计应满足以下通用要求:

- a) 单粒子试验板边缘 10 mm 内不应布线和放置元器件；
- b) 被测器件正面周围 10 mm 之内不应放置其他元器件；
- c) 若在一块试验板上放置多只被测处理器器件或插座之间的间距应不小于 20 mm。

5.1.5.2 串列静电加速器试验板结构要求

对于串列静电加速器试验环境,试验板结构的特殊要求如下:

- a) 为将多个试验板堆叠一次性放进真空罐,试验板边缘应设计安装孔；
- b) 试验板堆叠后,通信或供电接口的接插件应在单粒子试验板的一个边沿出线；
- c) 堆叠试验板时,为使上面试验板不遮挡下面的被测处理器器件,设计试验板时器件布局应规则,且靠近试验板边沿；
- d) 试验板的堆叠高度不应高于 450 mm,试验板上的元器件、插座或接插件高度应小于 25 mm。

5.1.5.3 回旋加速器试验板结构要求

对于回旋加速器试验环境,试验板结构的特殊要求为:

单粒子试验板单板尺寸应不大于 235 mm×250 mm,厚度不超过 30 mm。

5.1.6 试验板布局布线

为增强单粒子试验板稳定性,并满足试验中供电、通信、监控、功能测试等需求,单粒子试验板布局布线应满足如下要求:

- a) 距离单粒子试验板边沿 10 mm~15 mm 为禁止布线区和禁止摆放区；
- b) 为方便试验中叠层安装,应设计定位孔；
- c) 被测处理器器件不同电源域隔离；
- d) 被测处理器器件的电源域与主控制器件电源域进行隔离；
- e) 对供电电流小于 1 A 的电源线,布线尺寸不应小于 0.254 mm；
- f) 对供电电流大于 1 A 的电源线,布线尺寸不应小于 0.5 mm；
- g) 时钟线布线应远离电源器件；
- h) 不同时钟域布线应保持距离；
- i) 滤波电容应靠近器件布局布线；
- j) 同一时钟域应单层走线；
- k) 差分线应同层等长走线；
- l) 时钟源靠近处理器器件布线,若长距离布线则注意线宽；
- m) 高频信号线应远离电源线。

5.1.7 外观要求

在单粒子试验板上不放置发光器件或反光材料,若存在,则应在试验前进行处理。

5.1.8 接口要求

单粒子试验板的接口设计应满足以下要求:

- a) 高频信号采用高频接口连接；
- b) 大功率信号采用大功率接口；
- c) 试验板接插件与真空罐内、外接插件匹配；
- d) 设计可远距离传输接口。

5.1.9 器件选型要求

试验为真空试验时,硬件设计中应选择能够在真空中安全工作的元器件。

5.2 软件架构

单粒子试验软件包括嵌入式测试软件和测试人员监控软件,嵌入式测试软件又包含被测处理器器件功能测试软件和主控制器件控制软件。

单粒子试验软件在系统中运行的位置示意图如图 1 所示。

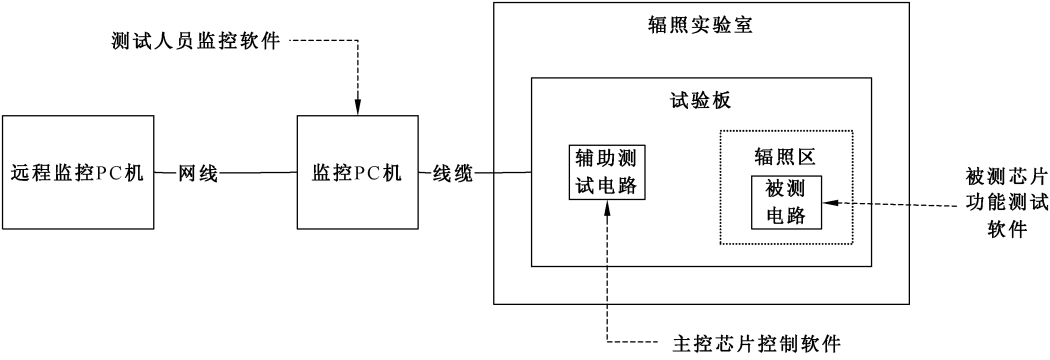


图 1 单粒子试验软件结构示意图

在图 1 中,有三个组成部分需要运行软件,监控 PC 机、主控制器件和被测处理器器件,控制流程如下:

- a) 试验准备就绪后,测试人员通过监控 PC 机的监控软件选择测试内容并发送启动命令;
- b) 主控制器件接收到命令后,控制被测处理器器件,传递启动命令;
- c) 被测处理器器件接收到测试命令后,执行测试程序,并将测试结果反馈给主控制器件;
- d) 主控制器件接收到测试结果后,将结果发送监控 PC 机,监控软件根据协议将结果解析后显示,并保存。

主控制器件的功能是在监控 PC 机与被测器件之间进行消息中转,一旦被测处理器器件受辐照环境影响不能发送测试结果,测试人员可控制主控制器件对被测处理器器件复位、重启等操作,重新进行试验。

5.3 软件设计

5.3.1 测试软件

5.3.1.1 基本要求



处理器器件测试软件的基本要求如下:

- a) 确定测试条件:测试内容覆盖典型应用,对于存储单元和寄存器的测试程序应覆盖全“0”、全“1”和更多的复杂变化,可变换行和列以确定处理器是否存在某些数据状态更健壮或更容易受相邻单元的影响。
- b) 在测试条件下监测和记录所有错误现象:当重新配置处理器或重新通断电后,错误仍然存在,则应是硬件失效或间歇性失效,硬件失效在最终的报告中应阐述产生的原因(如被测处理器的潜在故障、前期寿命失效、供电失效等)。
- c) 提供错误覆盖率和错误位图:可区分 SEE 是由一次高能粒子撞击所引起的相邻单元的多个独立错误还是单个 MCU。对于冗余设计的锁存器,因单个粒子而引起的坏行、坏列,但仍可返

回已修复值,则该错误模式应与普通 SEU 或 MCU 相区别;若在存储阵列中发生 SEL,则该事件的特性应严格区分,特别是包含很多连续多位失效的情况。

- d) 初始化控制器件并监测冗余设计功能:当发生翻转时,应区分是控制器件还是被测处理器器件的翻转。
- e) 选择工作模式(静态或动态工作模式)并提供复位功能:对存储器的静态测试,应先写入测试模式,后连续读,或在一定的工作频率下交叉读/写操作。
- f) 提供错误监测和记录功能:典型的错误纠正码可纠一检二,但不能检测多于两位的多位错误,可利用读模式与写入原始数据逐位比较,以分析单个粒子撞击引起的多位错误的具体细节。
- g) 试验过程中数据分析和记录的功能:可区分多个粒子引起的独立的 SEE 和单个粒子引起的 MCU。
- h) 测试软件功能应全面:可选择测试模式(静态测试或者动态测试),开、关 ECC 选择,可对被测设备复位、断电、上电等,可区分不同的软件错误类型:如 SEU、MCU、SEL 和因粒子照射至地址或控制寄存器上引起的 SEFI 等。

5.3.1.2 SEE 测试软件要求

针对具体的 SEE 试验,软件要求如下:

- a) SEU 测试
 - 1) 应可向可读写寄存器和存储器单元写任意值,可重写发生 SEU 的单元,并可统计翻转事件次数,定位翻转发生的位置和时间。
 - 2) 因设计差异性,不同处理器具有各自单粒子事件敏感区,软件设计应针对具体处理器特性,充分测试敏感区。
 - 3) 测试软件填充的数据模型应丰富,填充典型值为 0x0, 0xffffffff, 0x55555555, 0xaaaaaaaa, 还应包含按行、列分布的更复杂的数字结构等,当某一位为某个特定值时,可能更容易受辐照影响,也可能使相邻位受影响。
 - 4) 测试时要监测每一次器件的输出,并与期望值比较。两次读的时间间隔要小于两次出错时间间隔的十分之一。该频率可辨别 MCU 是由单个粒子引起还是由多个单粒子事件造成的。
- b) SEL 测试

试验中若发生 SEL,一般电流将升高,测试设备可能被损坏,软件应具备检测这种状态的能力,并及时对被测设备进行读、写、复位、断电等操作。此时若再次发生单粒子事件,将检测不到。因此,软件应可记录“有效试验时间”(即能够检测到 SEL 的测试实验执行时间)时长,计算粒子总注量时应按有效试验时间计算。
- c) SET 测试

测试应覆盖处理器正常情况和最坏情况下的工作状态,因偏置、输入输出条件等因素均影响模拟或数模混合电路的单粒子瞬态效应,软件应检测和记录这些瞬态效应,包括瞬态时的极性、波形、持续时间、相位等信息。

试验时,束流应该尽量小以降低瞬态累积的风险,单粒子瞬态效应单独讨论与分析。
- d) SEFI 测试

SEFI 敏感区取决于处理器工作模式,软件应尽量全面地测试处理器的各种工作模式,并且能够检测、记录和更正各种类型的功能中断。

设备发生 SEFI 时,其内部可能进入不确定的测试模式,或之前的配置数据丢失,导致无法实现正常功能,电流也可能升高。过高的电流可能损坏设备,软件应能够及时对被测设备复位、断电等。

e) 硬件错误

发生错误时,若重写或关电、再开电都没有消除,应是硬错误,在结果中应单独记录,且在后续测试中不重复统计为翻转错误或功能错误。

f) 传输错误

为区分系统读时的错误种类,读数据时应多次读。若错误在重复读时不保持,可认为是一次传输错误;若多次读不重写的情况下错误一直保持,可认为是软件错误。传输错误不属于软件错误。

g) 辅助设备错误

控制设备和供电设备不被直接辐照,但仍可能受到辐射影响,软件应可区分辅助设备造成的错误和被测处理器由于辐照造成的错误。

h) ECC 选择

测试应在开 ECC 和不开 ECC 两种情况下分别测试。开 ECC 时能够纠一检二,对于单位错,可自动修复,大于或等于两位的错误则无法自动修复,需通过软件按位对比然后更正,并进行统计;不开 ECC 时单位错也无法自动修复。

5.3.1.3 静态测试与动态测试

处理器单粒子测试一般包括静态测试和动态测试,含义如下:

- a) 静态测试即寄存器测试,即对各功能模块可读写寄存器或寄存器可读写的位进行写一次,重复读的测试。试验开始时对寄存器一次写操作,后续只进行读操作,读出值与初始化值不一致则发生单粒子翻转,应对翻转位重新写,将翻转位数反馈给主控制器。
- b) 动态测试即功能测试,即运行被测处理器器件各功能模块的实际功能,以测试处理器内部有数据传输时其内部存储器、配置逻辑单元的单粒子翻转敏感度,将测试结果反馈给主控制器,并在下一次测试前对该模块重新初始化。

5.3.1.4 功能模块测试

针对具体的功能模块,设计被测器件测试软件时应注意以下三个方面:

- a) 通信模块测试方法:测试通信模块至少需要两个通信节点进行通信测试,但考虑到单粒子试验板资源有限,需设计成最小系统,对通信总线一般采用两路环测或一路自环的方法。若处理器通信功能只有一路且不能自环,应在硬件上增加通信模块设计,用通信模块模拟另一节点进行通信测试。若硬件无法实现,则该通信模块只进行静态测试。
- b) 需激励的模块测试方法:在硬件环境中设计激励进行动态测试,若该模块所需激励硬件环境无法实现,则只进行静态测试。
- c) 静态测试与动态测试顺序:静态测试与动态测试分开测试,不应一次静态测试与一次动态测试交替测试,若在写寄存器之前出现寄存器翻转,则无法监测到。软件测试流程示意图如图 2 所示。

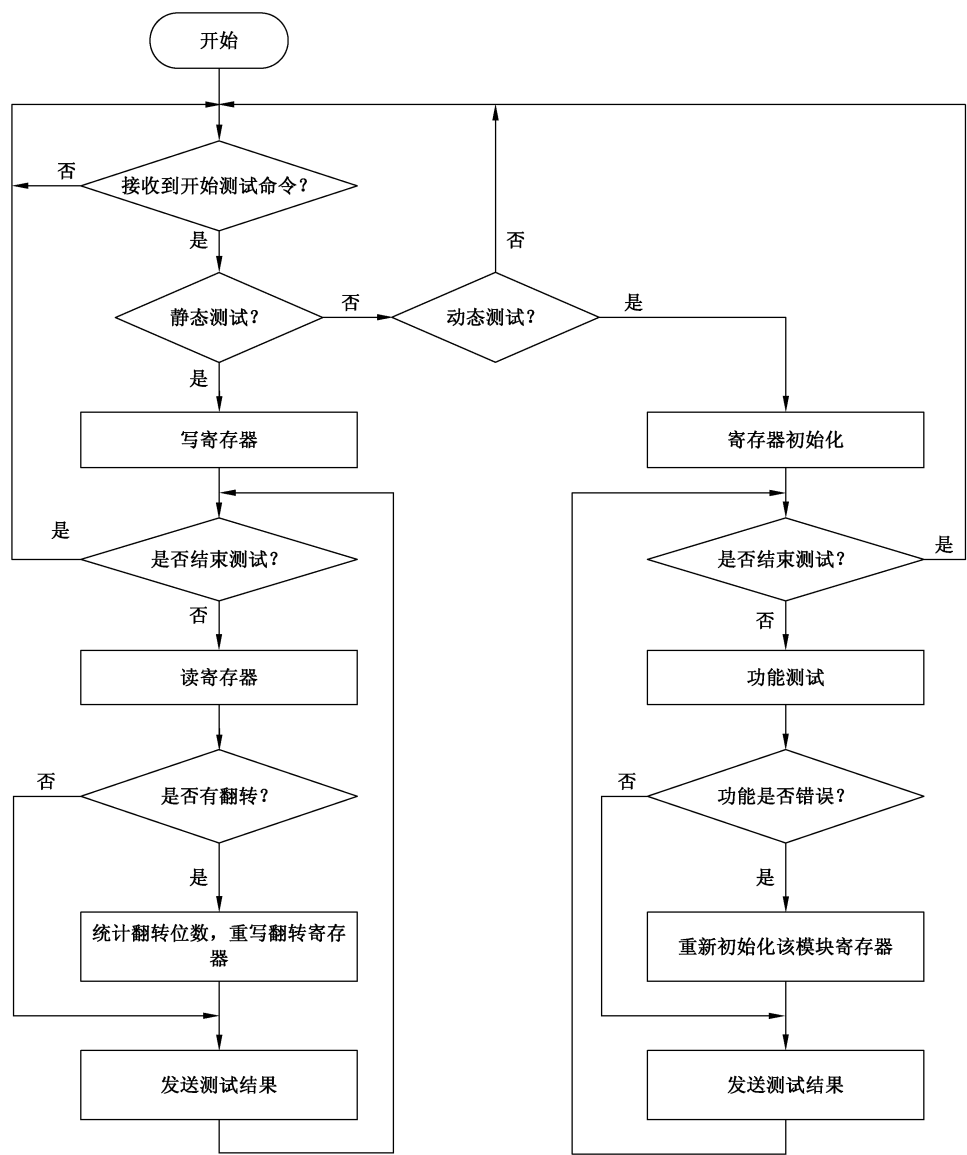


图 2 处理器器件单粒子试验软件测试流程示意图

5.3.2 主控器件控制软件

主控器件需接收 PC 机测试命令发送给被测处理器器件,且接收被测处理器器件反馈的测试结果给 PC 机。主控器件应及时向 PC 机反映被测处理器器件状态,若被测处理器器件受辐照环境影响严重,通信功能异常而无法向主控器件发送测试结果,则主控器件应将该情况反馈给 PC 机,并对被测处理器器件复位。主控器件控制软件的流程示意图如图 3 所示。

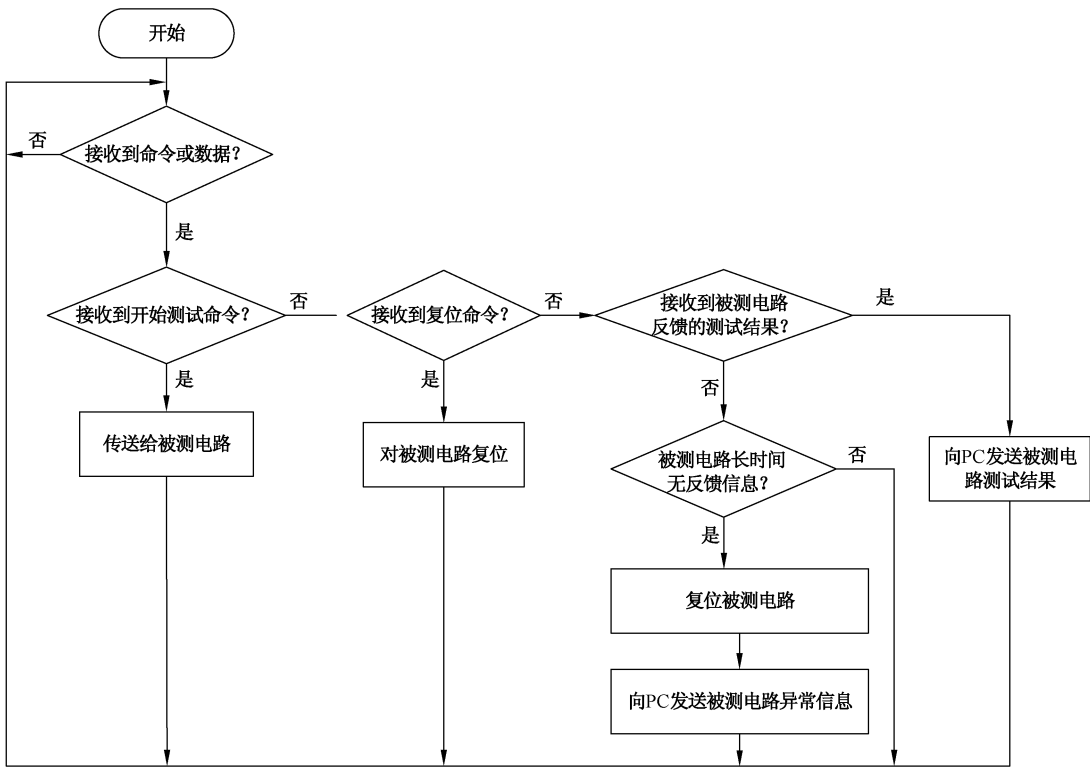


图 3 主控制器控制软件流程示意图

5.3.3 PC 监控软件

PC 监控软件要求界面友好、直观，操作简单、控制方便。PC 监控界面分为两个区域：试验配置区和结果显示区。测试结果应包含时间、模块、错误类型等，若是静态测试，则说明寄存器翻转位数，应统计结果，实时显示错误总数量。配置区包含如下内容：

- a) 通信口配置：PC 机与主控制器通信接口需配置端口号、波特率、校验方式、校验位、停止位等信息；
- b) 被测处理器器件选择：在试验开始前选择被辐照的被测处理器器件编号；
- c) 测试类型：选择静态测试还是动态测试；
- d) 选择被测模块：选择处理器的测试模块；
- e) 选择是否开 Cache；
- f) 开始测试、复位被测处理器器件等主要控制功能。

PC 监控软件应具备配置、显示功能，以及测试信息存储功能。将测试过程中显示的测试结果信息实时存储在后台文件中，供试验结束后对试验效果分析。

6 试验过程

6.1 试验流程

试验流程如下：

- a) 试验测试设备完成调试、准备进行试验前，对试验样品标号，将所有的参试样品从 1 到 N 编号；

- b) 正式试验前通过激光设备标记每个样品坐标；
- c) 试验中根据试验方案对样品照射相应的粒子,确保编号样品与参试样品一一对应；
- d) 运行处理器器件测试软件,当粒子种类和束流达到试验要求后,按照既定试验方案对标号器件照射选择的粒子,实时监测器件状态,记录测试结果；
- e) 试验完成后,由试验场所开具束流证明,根据粒子种类、粒子能量和产生的 SEE,导入轨道模型,计算出翻转截面和饱和截面,并给出单粒子事件率。

6.2 注意事项

6.2.1 样品安装要求

在方案设计中采用大母板上堆叠小板的方法,要求在同一 PCB 板上摆放多只待测处理器器件,则应规则摆放。若一块 PCB 板上只能放置一只处理器器件,则应考虑多块 PCB 板叠放及安装问题,确保试验中待测处理器器件没有被遮挡。多板叠装效果示意图如图 4 所示。

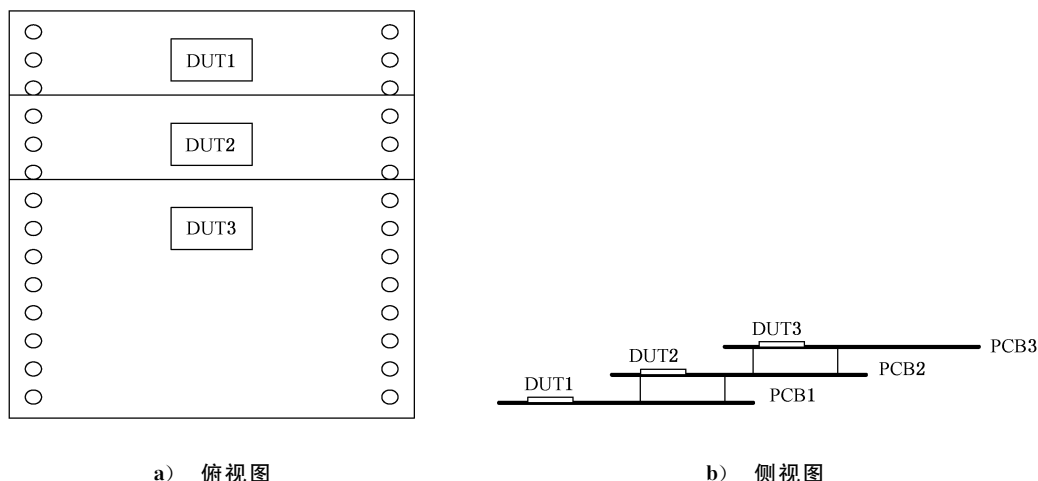


图 4 多板叠装效果示意图

6.2.2 线缆长度

试验室到监控室距离为 50 m 左右,要求线缆的长度不小于 50 m。

6.2.3 器件试验前

被测处理器器件在筛测完后应开盖处理,对于采取倒封形式的器件,在试验前进行减薄处理,确保试验中粒子可穿透器件有源区。在印制板制作时应设计被测器件安装部位,便于粒子注入被测处理器器件。

6.3 试验判定

6.3.1 SEU

进行 SEU 试验时,功能正常而实时监控的电流超出设定阈值,则可能发生了锁定情况：

- a) 在保证器件不被烧毁的情况下可继续试验,直到发生功能异常；
- b) 若功能异常而电流未变大,则可先进行复位操作；
- c) 若复位后功能正常,则可继续进行试验；
- d) 若复位后功能不正常则停止试验；
- e) 若功能异常且电流变大,则发生锁定,可先复位,然后继续进行试验,若现象复现则确认发生了

锁定,停止试验。

6.3.2 SEL

进行 SEL 试验时:

- a) 若电流变大但功能正常,保证电路不损坏的前提下可继续进行试验直到功能异常;
- b) 功能异常后先复位,若复位后在没有照射情况下功能正常,则可继续进行试验;
- c) 若复位后功能异常则可能发生了锁定、栅穿或烧毁,应停止试验。

6.4 试验中断

当出现以下任何一种情况时,试验应中断,通过判断采集的试验数据是否有效,以确定是否重新进行:

- a) 试验设备及监测仪器精度超出极限;
- b) 安装不符合要求或安装状态发生改变。

6.5 试验故障判据

当出现下面情况时,判为试验故障:

- a) 正式试验前试验系统调试不通,且在规定时间内仍无法解决;
- b) 参试样品因开盖处理,携带过程中出现损坏现象,无法进行系统调试;
- c) 试验过程中参试样品因不可控因素发生功能失效,或不能正常工作;
- d) 因试验终端故障或其他原因不能提供设计方案中相应种类的粒子。

6.6 故障处理

当发生试验故障时,处理措施为:

- a) 试验场所安排后续单位试验,参试系统继续调试,若在规定时间内仍无法恢复测试系统,则放弃该次试验机时,进行设计和工艺质量复查,提交故障分析报告,采取有效措施,经评审后方能重新申请试验;
- b) 在准备试验时,根据参加试验样品数量,准备备份样品,出现参试样品损坏情况后及时更换;
- c) 在试验板硬件设计中,可在一块试验板或多块试验板上预留参试样品备份靶位,若试验中参试样品出现故障,在不影响试验结果的前提下,直接将辐照光斑移至备份样品,继续试验;
- d) 若因设备故障不能提供设计方案中的粒子种类,在相近能量的粒子也可满足考核试验要求的前提下,更改试验方案,继续进行试验,按实际粒子种类分析试验结果。

6.7 试验安全

严格控制参试人员数量,使之处于安全区域内,并按 GB 18871—2002 和试验场所安全规定,采取保护措施,防止辐射伤害。

7 试验结果处理

7.1 试验数据记录

试验完成后,试验场所单位应给出本次试验的束流证明,内容涉及时间、地点、参加试验的样品明细、试验场所提供的离子种类和离子强度等信息。试验数据记录格式如附录 B 图 B.1 所示。

7.2 试验数据分析

在实际空间中,不同轨道高度的粒子种类不同,辐射能量也各异。空间离子最大 LET 为 $120 \text{ MeV} \cdot \text{cm}^2/\text{mg}$,若器件抗单粒子效应 LET 阈值大于 $120 \text{ MeV} \cdot \text{cm}^2/\text{mg}$,则单粒子效应免疫。空间高能粒子通量在 LET 大于 $37 \text{ MeV} \cdot \text{cm}^2/\text{mg}$ 之后迅速减少。考虑空间粒子倾斜入射的影响将器件 SEL 的 LET 阈值定为 $75 \text{ MeV} \cdot \text{cm}^2/\text{mg}$ 。

试验结束后,应计算每种 LET 粒子总注量、每种 LET 下的单粒子事件截面,绘制出单粒子事件截面 σ 与入射粒子有效 LET 值的关系曲线,如图 5 所示。

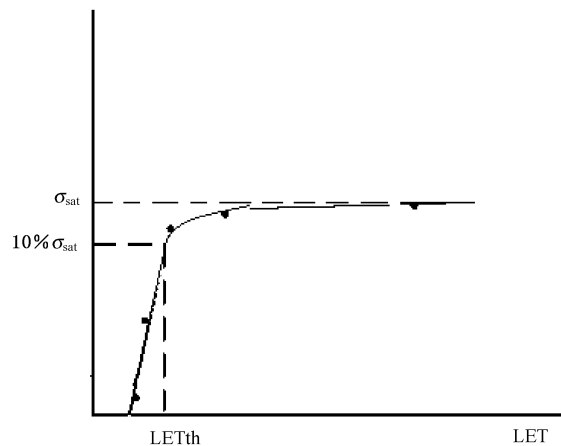


图 5 σ 与入射粒子有效 LET 值的关系曲线

根据曲线获得单粒子事件截面和 SEU 阈值 LET_{th} 。由 σ -LET 曲线得出单粒子事件饱和截面 σ_{sat} 和 LET 阈值 LET_{th} 。

由单粒子事件饱和截面 σ_{sat} 和 LET 阈值 LET_{th} ,结合空间辐射环境模型,可预测器件在各种空间环境中发生单粒子事件的概率,给出单粒子事件率评估结果。

在实际试验执行过程中,一般由参试单位将试验结果和试验场所开具的束流证明到规定单位进行试验结果的评估,根据试验结果撰写试验报告。

7.3 试验报告

单粒子试验报告格式参照附录 B,试验报告应包含以下内容:

- 单粒子试验报告的页码(第 $\times\times$ 页 共 $\times\times$ 页);
- 单粒子试验报告的版本和参考的标准(标准编号);
- 处理器设计信息;
- 制造商或器件使用者的单粒子测试报告,标注版本号;
- 处理器器件型谱;
- 处理器器件封装;
- 测试机构,名称和地址;
- 单粒子测试方案,标注版本号;
- 制造商,名称和地址;
- 辐射源种类:重离子或中子等;
- 待测处理器器件序列号和主控制器件;
- 处理器器件生产序列号和标号;

- m) 封装、晶圆和晶圆标号的照片；
- n) 处理器器件结构：CMOS、CMOS EPI、CMOS SOS、CMOS SOI 或其他类型，用 μm 表示器件特征尺寸和工艺线宽；
- o) 管芯尺寸(mm)；
- p) 有源区深度，测试得到的或从制造商手册提供的数据；
- q) 测试的类型：SEU、SEFI、SET、SEL 或其他；
- r) 测试条件；
- s) 辐射源类型和粒子加速技术，离子种类和电荷状态，能量用 MeV 或 MeV/n，LET 值；待测处理器器件的温度，待测处理器器件与束流的倾角，有效 LET 值等；
- t) 单粒子测试流程应以表格的形式给出运行测试的细节：在测试开始前应根据单粒子测试方案准备好测试流程；若测试流程篇幅较长，应在测试结果中以附录的形式作为引用的参考；测试流程应注明日期、时间、运行次数、束流参数和条件，被测处理器器件和电气条件，运行持续时间，注量、束流、发生单粒子效应的种类、数量和对于每次测试运行的评价；
- u) 试验场所负责人的姓名和联系方式；
- v) 试验过程中负责电测试和功能测试负责人的姓名和联系方式；
- w) 翻转截面(每位或每器件)对应的 LET 或能量的点，包括误差和可信度；
- x) 其他：应记录测试过程中预估的辐射的粒子总剂量，参考和分析测试过程中出现的任何现象，例如软件或硬件锁定，软件跑飞以及总剂量效应的影响(持续增加的漏电等)，也应包括关于管芯的描述；
- y) 试验结论，并给出在轨预测结果。



附 录 A
(资料性附录)
试 验 场 所

A.1 HI-13 串列静电加速器

HI-13 串列静电加速器标称端电压为 13 MV,电压稳定度 1 kV,离子能量连续可调。该加速器进行单粒子试验常用的离子种类、能量和在硅中的 LET 值及射程见表 A.1。

表 A.1 HI-13 串列静电加速器单粒子效应试验常用离子

离子种类	能量/MeV	表面 LET 值/(MeV·cm ² /mg)	Si 中射程/ μ m
H	23	0.02	3 100
Li	46	0.44	269
B	70	1.26	149
C	80	1.73	127
O	103	3.05	99.4
F	115	4.06	87.9
Al	132	8.19	56.1
Si	143	9.01	54.5
S	152	11.8	46.9
Cl	164	12.9	47.4
Ca	146	18.7	33.0
Ti	169	21.8	34.7
Fe	170	27.9	33.0
Cu	212	32.2	33.1
Ge	212	37.2	30.8
Br	218	42.0	30.2
Ag	279	58.6	30.0
I	283	65.6	30.0

A.2 HI-13 回旋加速器 HIRFL

HIRFL 典型的可用于器件单粒子效应试验的离子种类、能量及在硅中射程和 LET 见表 A.2。

表 A.2 回旋加速器 HIRFL 典型的离子

离子种类	能量 MeV/u	总能量 MeV	Si 中射程 μm	Si 中 LET $\text{MeV} \cdot \text{cm}^2/\text{mg}$	Si 中 LET _{max} $\text{MeV} \cdot \text{cm}^2/\text{mg}$	LET _{max} 值 对应的能量 MeV	LET _{max} 值 对应的离子 射程/ μm
¹² C	80	960	9 560	0.2	3.0	35	39.3
¹⁴ N	80	1 120	8 050	0.3	4.0	40	34.9
¹⁶ O	75	1 200	6 300	0.5	4.7	50	37.7
²⁰ Ne	80	1 600	5 700	0.7	6.1	80	45.9
³² S	5.35	171.2	54.2	11.1	13.0	120	35.8
⁴⁰ Ar	58	2 320	2 010	2.9	16.0	130	34.1
⁵⁶ Fe	22	1 232	317.5	11.2	27.0	200	35.5
⁵⁸ Ni	50	2 900	1 040	7.4	30.0	200	34.1
⁸⁴ Kr	25	2 150	347.4	18.5	40.2	300	38.5
¹²⁹ Xe	19.5	2 515	197.2	45.1	69.2	500	41.5
¹⁸¹ Ta	12.5	2 262.5	134.4	72.9	87.2	800	52.7
²⁰⁹ Bi	9.5	1 985.5	101.4	91.3	99.7	900	52.7

A.3 100 MeV 质子单粒子效应辐射试验终端束流参数

100 MeV 质子单粒子效应辐射试验终端束流参数如下：

- a) 质子能量调节范围：30 MeV~100 MeV；
- b) SEE 终端可提供注量率范围： $10^3 \text{ p}(\text{cm}^2 \cdot \text{s}) \sim 10^9 \text{ p}(\text{cm}^2 \cdot \text{S})$ 可调节；
- c) 质子辐照束斑面积： $1 \text{ cm} \times 1 \text{ cm} \sim 10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$ ；连续可调；
- d) 束斑均匀性： $4 \text{ cm} \times 4 \text{ cm}$ 范围内均匀性好于 90%， $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$ 范围内均匀性好于 70%。

A.4 12 MeV 质子单粒子效应辐射试验终端束流参数

12 MeV 质子单粒子效应辐射试验终端束流参数如下：

- a) 质子能量调节范围：3 MeV~12 MeV；
- b) SEE 终端可提供注量率范围： $10^{11} \text{ p}(\text{cm}^2 \cdot \text{S})$ 以下可调节；
- c) 质子辐照束斑面积： $1 \text{ cm} \times 1 \text{ cm} \sim 4 \text{ cm} \times 4 \text{ cm}$ ；连续可调；
- d) 束斑均匀性： $4 \text{ cm} \times 4 \text{ cm}$ 范围内均匀性好于 90%。

附 录 B

(资料性附录)

宇航用处理器器件单粒子试验报告格式

B.1 试验报告格式

宇航用处理器器件单粒子试验报告格式见图 B.1。

报告编号：	版本：	日期：	第	页	共	页
-------	-----	-----	---	---	---	---

1. 参考××标准(版本,日期)

2. 参试处理器

名称		制造商	
类别		管芯面积	
设计信息		有源区深度	
型谱		编号	
系列		封装、管芯等照片	
封装		辅助控制器	
生产序列号		制造工艺	

3. 辐射源

辐射源名称		辐射源地址	
粒子种类		粒子能量	
LET 值		SI 中射程/ μm	

4. 现场试验

试验类型	SEU、SEL、SET、SEFI	测试条件	
测试环境		试验场所负责人	
电参数测试负责人		功能测试负责人	
试验板编号		被测器件名称	
离子		能量	
LET		Si 中射程	
试验日期		试验地点	
记录人			

5. 处理器器件单粒子试验记录

器件编号	供电电压	模块	起止时间	注量	温度/电流	翻转次数	锁定次数	数据记录文件	软件运行次数	照射总剂量
1		模块 1								
		模块 2								
									
2		模块 1								
		模块 2								
									

6. 试验结果

根据试验数据,计算出翻转截面(每位或每器件)与 LET 或能量之间的曲线,应包含误差和可信度评估。根据器件应用轨道辐射情况,带入评估模型,最终给出单粒子事件率。各种轨道空间的粒子 LET 能谱如图 B.2 所示。

图 B.1 宇航用处理器器件单粒子试验报告格式

B.2 LET 能谱

各种轨道空间的粒子 LET 能谱如图 B.2 所示。

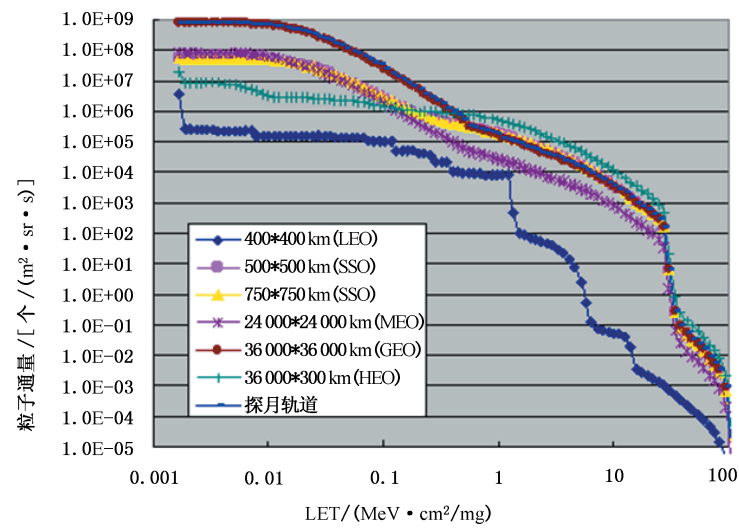


图 B.2 各轨道空间粒子 LET 能谱