第21卷 第3期 空 间 科 学 学 报 Vol.21, No.3
2001 年 7月 CHINESE JOURNAL OF SPACE SCIENCE July, 2001

地磁长期变化引起的低高度卫星轨道辐射带粒子环境的变化

乐贵明 叶宗海 周国成
(中国科学院空间科学与应用研究中心 北京 100080)

摘 要

利用 IGRF2000 模式计算了几个典型轨道辐射带粒子环境并与 IGRF1970 模式计算的结果进行了比较. 计算结果表明, 在辐射带的低部, 对应某些倾角的能量大于 0.1 MeV 质子的轨道积分通量变化达到 2 个量级, 而能量大于 10 MeV 的辐射带质子的轨道积分通量变化达到 1 个量级; 轨道积分通量的最大值变化为 1 个量级. 能量大于 0.04 MeV 辐射带电子的轨道积分通量变化在某些倾角达到 3 个量级, 但轨道积分最大值的变化低于 1 个量级. 1 000 km 以上高度辐射带粒子环境的变化很小.

关键词 国际地磁参考场—辐射带粒子—积分通量

1 引 言

在地磁活动平静, 且没有质子事件与无磁暴时, 中低高度轨道上运行的卫星遇到的辐射环境主要来自辐射带的高能粒子. 目前国内外广泛使用的辐射带粒子通量模式 AP8[1] 与 AE8[2], 是根据 30 多颗卫星的观测数据于 1988 年编制的, 其中 AP8 与 AE8 采用的数据是 20 世纪 60—70 年代探测到的数据. AE8 分为两部分: 太阳活动低年的 AE8MIN 和太阳活动高年的 AE8MAX. 同样, AP8 也分为两部分: 1964 年太阳活动低年的 AP8MIN 与 1970 年太阳活动高年 AP8MAX. 由于辐射带粒子是地磁场捕获的, 地磁场的空间位形决定辐射带粒子空间分布的位形. 而 AP8 与 AE8 是根据当时探测数据时的地磁场模式编制出来的, 只能代表 20 世纪 60—70 年代空间粒子分布的情况. 由于地磁场一直在缓慢地发生变化, 经过 30 年的变化, 地磁场的变化不能忽略, 相应的由地磁场空间位形决定的辐射带粒子的空间分布也必然发生变化. 因此, 我们计算现在的辐射带粒子的空间分布时必须用最新的地磁模式. 由于辐射带粒子环境对卫星的电子器件 (如触发器等), 功能材料 (如太阳能电池材料) 和人等都有不利的影响, 而且辐射带电子是地球空间非常重要的背景辐射源, 因此, 航天部门以及一些科研部门和军事部门对辐射带粒子环境都非常关心. 国内学者在这些方面已经做过很多的有意义的研究 [3−7]. 正是他们的研究推动了国内辐射带粒子模式与环境研究的发展. 焦维新等采用国际地磁参考场 (IGRF1990) 计算了低轨圆形轨道的能量大于 0.1 MeV 的质子通量 [6], 方晓华、濮祖荫等进行过低高度部分高度的等值线强度计算 [5,7], 但没有给出一定轨道的辐射带质子积分通量能谱, 而轨道的电子积分通量谱还没有见到过报道. 对应用部门来说, 他们需要知道飞行器沿所给飞行

2001-03-02 收到原稿, 2001-05-11 收到修定稿

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

轨道的电子与质子的通量积分能谱. 本文不涉及具体的物理机制, 有关机制方面的讨论可以参考后面所列的文献 [3—7]. 本文应用目前国际上最新的国际地磁参考场 (IGRF2000) 模式, 重点计算了无磁暴与无质子事件条件下, 即无扰动时的 400 km 高度辐射带粒子环境, 并与国际地磁参考场 (IGRF1970) 模式计算得到的结果进行了比较. 此外, 计算了给定倾角, 辐射带粒子的轨道积分随高度的变化. 最后计算了几个典型轨道的辐射带质子与电子的积分能谱并与由 IGRF1970 模式给出的结果进行了对照. 考虑到 10 MeV 以上能量质子环境对工程设计非常重要, 因此本文对 10 MeV 以上能量质子环境进行了有关计算. 计算结果表明, 地磁长期变化引起的低高度辐射带粒子环境的变化主要有以下特征: 辐射带低部高度粒子环境变化较大, 10 MeV 以上能量质子环境变化达到 1 个量级. 随着高度的增加, 环境变化越来越小; 低高度辐射带的空间分布位形也发生了一定程度的变化.

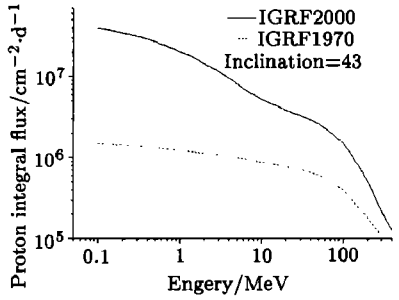
2　计算方法简介与计算结果

对任一给定的空间点 A, 有且只有一条磁力线通过该点且该点具有确定的磁场强度. 描述通过该点的磁力线用参数 L 来表示, 空间点的磁场强度值用 B 来表示, 那么, 任一空间点对应一个 (L,B). 对于空间给定点 A, 首先要由该点的坐标 (x,y,z) 计算它的 L 值与 B 值, 然后利用 AP8 与 AE8 模式中的子程序 TRARA1(IHEAD, MAP, L, BB_0, E, NE) 就可以得到该点的粒子通量值. 其中 BB_0 为 B_A/B_0, B_A 为 A 点的磁场强度, B_0 为通过 A 点的磁力线与磁赤道面交点的磁场强度, IHEAD 与 MAP 为由探测结果确定的参数. E 对应的是输入的两个能量 $E(1)$, $E(2)$, 输出为 flux(1), flux(2), 能量大于 E_1 与 E_2 的粒子通量分别为 $10^{\mathrm{flux}(1)}$ 与 $10^{\mathrm{flux}(2)}$.

2.1　400 km 圆形轨道辐射带粒子环境变化

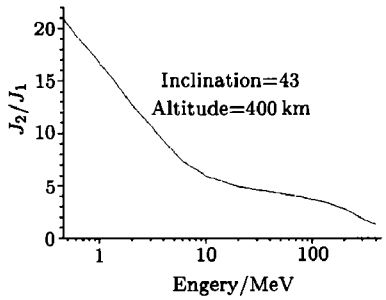
从图 1(a) 我们看到, 经过 30 年的变化, 该轨道的质子环境已经有较大的变化, IGRF-2000 模式计算得到的质子通量比由 IGRF1970 模式计算得到的质子通量要高, 在低能部分两者差异较大, 随着能量的增加, 两者之间的差异减小. J_2 与 J_1 分别为用 IGRF2000 模式计算得到的粒子通量与用 IGRF1970 模式计算得到的粒子通量 (以下 J_2, J_1 的意思与此相同), 两者之比为 J_2/J_1. 从图 1(b) 我们看到, 10 MeV 以上能量的粒子的通量增加了 4.7 倍, 100 MeV 以上能量粒子的通量增加的倍数为 2.7 倍. 这说明, 经过 30 年的变化, 该轨道辐射带异常区中主要是低能质子通量有较大增加, 10 MeV 以上能量的粒子通量的变化相对而言要低得多. 从图 1(c) 和 1(d) 可以看到, 该轨道的电子环境变化不大, 无论高能还是低能粒子环境的变化都不超过 4 倍, 而且大于 4 MeV 的电子环境基本没有变化. 图 1(e) 给出的是 400 km 高度不同倾角的轨道上能量大于 10 MeV 质子的轨道积分通量谱. 其中实线对应的地磁模式是 IGRF2000, 虚线对应的地磁模式是 IGRF1970. 其中实线分别在 39° 和 141° 取得极值, 而虚线则在 36° 和 141° 取得极值. 实线与虚线的第一个极值对应的倾角不同, 相差 3°, 这说明 400 km 高度辐射带质子空间分布的位形相对 1970 年已经发生了一定的变化. 对任意一个角度图中实线值要高于图中虚线值, 它们之间的倍数关系见图 1(f). 从图 1(f) 可以看到, 能量大于 10 MeV 粒子环境的变化在 400 km 高度所有角度的圆形轨道都不超过 10 倍.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com



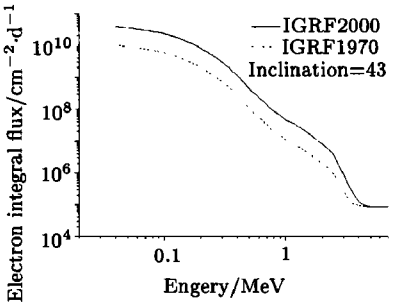
(a) 轨道的质子积分通量

(a) Proton integral flux along the orbit



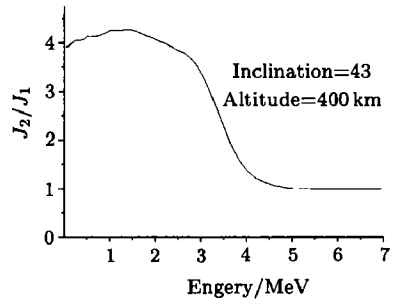
(b) J_2/J_1 随质子能量的变化

(b) J_2/J_1 variation with proton energy



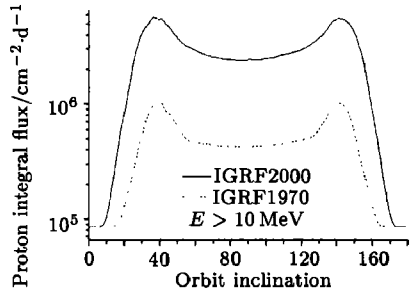
(c) 轨道的电子积分通量

(c) Electron integral flux along the orbit



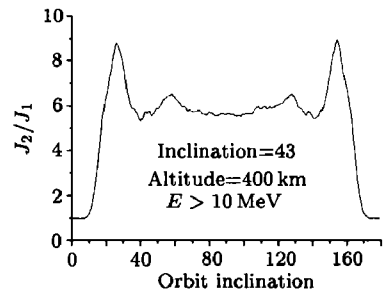
(d) J_2/J_1 随电子能量的变化

(d) J_2/J_1 variation with electron energy



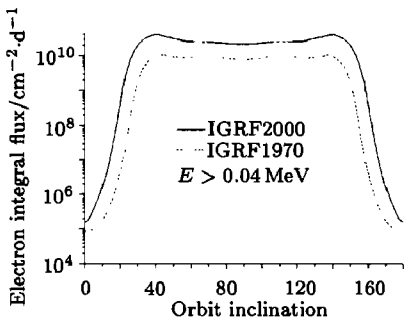
(e) 质子积分通量随倾角的变化

(e) Protons integral flux varies with inclination



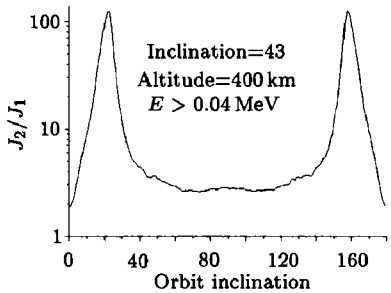
(f) J_2/J_1 随倾角的变化

(f) J_2/J_1 varies with inclination



(g) 电子积分通量随倾角的变化

(g) Electron integral flux varies with inclination



(h) J_2/J_1 随倾角的变化

(h) J_2/J_1 varies with inclination

图 1

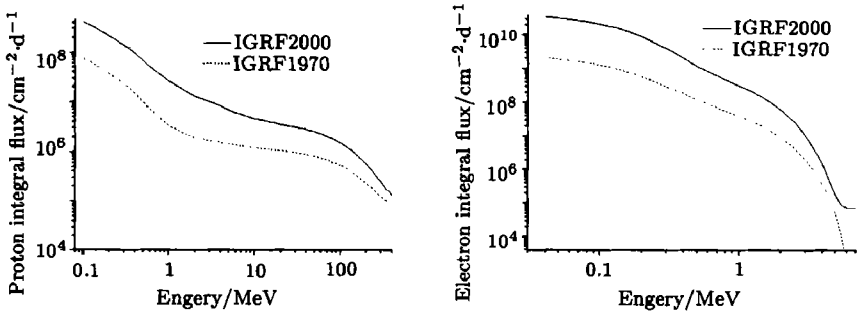
Fig.1

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

类似地，对于电子有图 1(g) 和图 1(h). 图 1(g) 中 IGRF2000 模式的实线两个峰值分别为 40.5° 时的 $4.05 \times 10^{10}/\mathrm{cm}^2\cdot\mathrm{d}$ 和 140.5° 时的 $3.98 \times 10^{10}/\mathrm{cm}^2\cdot\mathrm{d}$; IGRF1970 模式的虚线对应的两个峰值分别为 44° 的 $1.03 \times 10/\mathrm{cm}^2\cdot\mathrm{d}$ 和 137.5° 时的 $1.04 \times 10^{10}/\mathrm{cm}^2\cdot\mathrm{d}$, 这说明 400 km 高度辐射带电子的空间分布的位形相对 1970 年也经发生了一定的变化. 从两种模式峰值比值看，两种地磁模式的差异不超过 3 倍. 在图 1(h) 中出现两个较高的峰值，分别是 22.5° 对应的 122.8 倍和 157.5° 对应的 124.03 倍. 这是由于轨道积分通量在出现极值的局部角度范围内辐射带粒子通量的角度梯度绝对值很大造成的.

2.2　高度 490 km, 倾角 97° 的圆形轨道

图 2(a) 是质子的轨道积分通量谱. 其中实线是由 IGRF2000 模式给出的计算结果，虚线是由 IGRF1970 模式给出的计算结果. 图 2(b) 是电子的轨道积分通量谱. 其中实线是由 IGRF2000 模式给出的计算结果，虚线是由 IGRF1970 模式给出的计算结果. 从图 2(a) 我们看到，经过 30 年的变化，该轨道的质子环境发生了变化，轨道的质子积分通量谱增加了，但该轨道所有能量质子的积分通量的变化都低于 1 个量级. 从图 2(b) 我们看到，

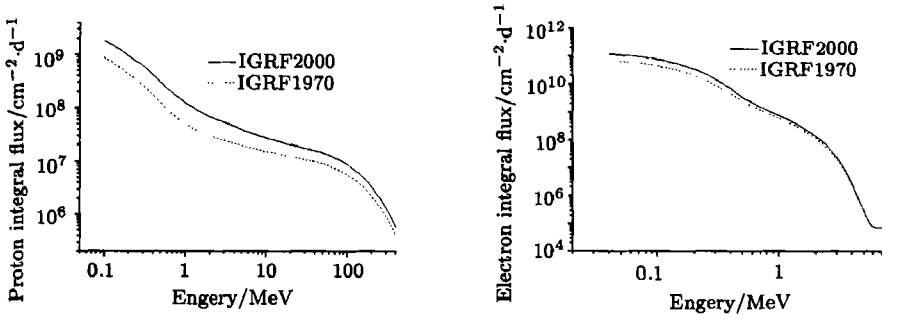


(a)　轨道的质子积分通量　　(b)　轨道的电子积分通量

(a)　Proton integral flux along the orbit　　(b)　Electron integral flux along the orbit

图 2

Fig.2



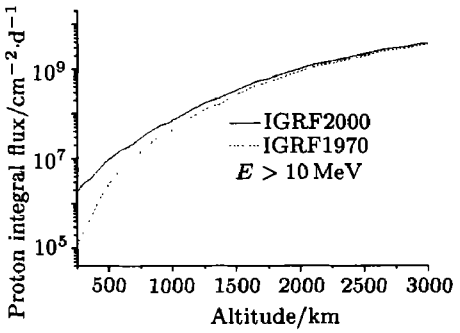
(a)　轨道的质子积分通量　　(b)　轨道的电子通量

(a)　Proton integral flux along the orbit　　(b)　Electron integral flux along the orbit

图 3

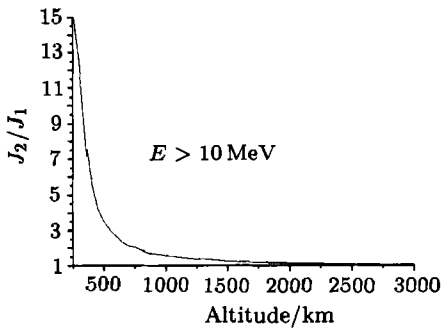
Fig.3

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com



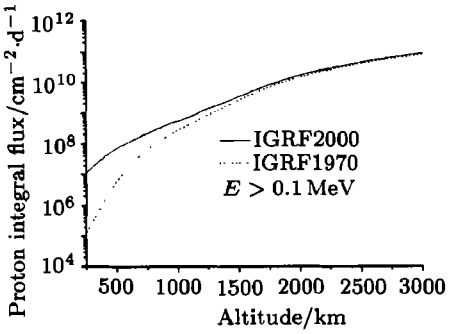
(a) 质子积分通量随高度的变化

(a) Proton integral flux varies with altitude



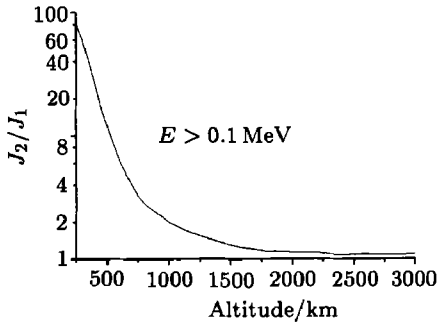
(b) J_2/J_1 随高度的变化

(b) J_2/J_1 varies with altitude



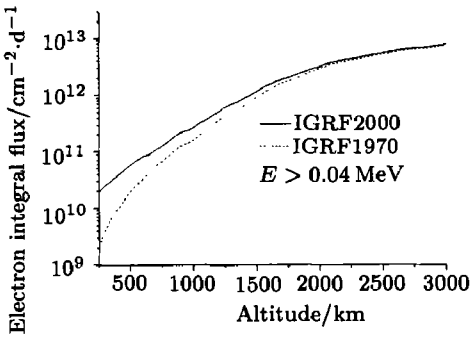
(c) 质子积分通量差异随高度的变化

(c) Integral flux difference varies with altitude



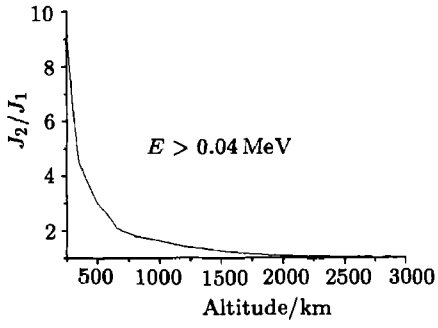
(d) J_2/J_1 随高度的变化

(d) J_2/J_1 varies with altitude



(e) 电子积分通量差异随高度的变化

(e) Electron integral flux varies with altitude



(f) J_2/J_1 随高度的变化

(f) J_2/J_1 varies with altitude

图 4

Fig.4

电子的低能部分的差异达到 1 个量级，随着能量的增加，这种差异还在减小.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

2.3　900 km, 倾角 99° 的圆形轨道

从图 3(a) 和 3(b) 的计算结果看，由 IGRF2000 与由 IGRF1970 给出的太阳同步轨道质子与电子的积分通量谱的差异不大，也即该轨道的粒子变化不大.

2.4　倾角 43° 轨道积分通量差异随高度的变化

图 4(a) 和 4(b) 是倾角为 43° 圆形轨道的能量大于 10 MeV 的质子通量随高度变化的情况，其中实线代表由 IGRF2000 模式计算得到的结果，虚线表示由 IGRF1970 模式计算得到的结果. 图 4(b) 为两种结果比值 (倍数) 随高度变化的情况. 从图 4(a) 和 4(b) 我们看到，在 250 km 由 IGRF2000 模式计算得到的能量大于 10 MeV 的轨道质子积分强度是 IGRF1970 模式给出结果的 15 倍，到 2000 km 高度，两种模式计算得到的结果非常接近. 图 4(c) 为由 IGRF2000(实线) 与 IGRF1970(虚线) 给出的能量大于 0.1 MeV 的轨道质子通量随高度的变化. 图 4(d) 为两种模式给出的能量大于 0.1 MeV 轨道质子通量强度的比值倍数，在 250 km 的高度其比值为 80. 图 4(e) 和 4(f) 是倾角为 43° 圆形轨道的能量大于 0.04 MeV 的电子通量随高度变化的情况，其中实线代表由 IGRF2000 模式计算得到的结果，虚线表示由 IGRF1970 模式计算得到的结果，两种模式的结果在该倾角下的差异不大，在 250 km 的高度也只差 1 个数量级，到 2000 km 高度，两种模式计算得到的结果非常接近.

以上结果说明，辐射带低部高度的粒子环境变化比较大，为此我们还是对 250 km 高度粒子环境随倾角的变化做一计算，并把计算结果列于下表 1. 表 1 中的最大比值是指 250 km 高度，对应某轨道倾角由 IGRF2000 模式计算得到的轨道积分通量与由 IGRF1970 模式计算得到的轨道积分通量的比的最大值. 表 2 为 250 km 高度圆形轨道质子与电子通量的最大值.

表 1　250 km 两种地磁模式计算的轨道通量的最大比值

	能量范围	轨道积分通量的最大比值
质子	$E > 0.1$ MeV	1.28×10^2
	$E > 10$ MeV	1.68×10^1
电子	$E > 0.04$ MeV	2.84×10^3

表 1 说明，电子在辐射带低部高度对应某些倾角，能量大于 0.04 MeV 的电子积分通量的变化达到 3 个量级，这也是由于轨道的电子通量在轨道倾角的部分范围内的角度梯度很大，而两种模式得到的轨道电子积分通量随轨道倾角的增长或衰减不同步造成的.

表 2　250 km 高度圆形轨道两种模式粒子通量的最大值

	地磁模式	能量范围	轨道积分的通量峰值 (粒子数 /cm^2·d)
质子	IGRF2000	$E > 0.1$ MeV	1.61×10^8
	IGRF1970	$E > 0.1$ MeV	1.24×10^7
	IGRF2000	$E > 10$ MeV	1.97×10^6
	IGRF1970	$E > 10$ MeV	1.21×10^5
电子	IGRF2000	$E > 0.04$ MeV	2.06×10^{10}
	IGRF1970	$E > 0.04$ MeV	4.28×10^9

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

从表2看到，250 km 高度，IGRF2000 模式比 IGRF1970 模式给出的能量大于 0.1 MeV 和 10 MeV 的质子轨道积分通量峰值都高 1 个量级，而电子的峰值通量的增加不超过 5 倍.

3 结 论

1. 2000 km 以下的高度所有卫星轨道的粒子环境都发生了变化，由 IGRF2000 模式给出的辐射带粒子的轨道积分通量都高于由 IGRF1970 模式给出的粒子环境通量.

2. 在辐射带的低部高度，对于某些相同的轨道倾角，IGRF2000 给出的卫星圆形轨道辐射带质子积分通量与 IGRF1970 给出的质子积分通量差异较大. 其中能量大于 0.1 MeV 的低能质子粒子的差异达到 2 个量级，而能量高于 10 MeV 的质子的差异为 1 个量级. 随着高度的增加，两种模式给出的轨道的质子通量谱的差异迅速减小. 低高度某些倾角能量大于 0.04 MeV 的轨道电子积分通量的变化达到 3 个量级，随着高度的增加，这种差异也在减小， 1 000 km 以上环境的变化很小. 大于 4 MeV 的电子环境在低高度基本上也没有变化.

3. 即使在辐射带低部，圆形轨道辐射带质子通量的峰值变化为 1 个量级，圆形轨道电子积分通量的峰值变化低于 1 个量级.

4. 经过 30 年的时间，辐射带粒子的空间分布的位形发生了一定程度的变化.

以上计算说明，经历 30 年的时间，低高度辐射带粒子环境已经发生了变化，特别是在辐射带的低部高度粒子环境的变化很大，计算没有考虑大气的散射效应. 目前还不能完全给出辐射带低部高度的理论值，这是因为在辐射带低部高度必须考虑大气的影响，而大气的影响是非常复杂的，因为即使是无磁暴时，大气密度的波动也是很大的. 低高度粒子环境是非常重要的环境，也是国际上目前研究与讨论的热点. 因为这方面的研究不仅具有很重要的学术价值，另外也有很强的实用价值，因为大量的卫星，空间站活动在这一区域. 这一区域环境的重要性还在于，即使在地磁暴期间，低高度的辐射带粒子环境变化也很小. 正是这个特性，环境参数可以作为工程设计的重要依据.

参 考 文 献

[1] Vette J I. The AE-8 trapped electron model environment. NSSDC WDC-A-R&S 91—24, Maryland: NASA Goddard Space Flight Center, 1991

[2] Sawyer D M, Vette J I. AP8 trapped proton environment. NSSDC 91—24, Maryland: NASA Goddard Space Flight Center, 1976

[3] 刘振兴. 空间粒子探测数据处理中的磁坐标简化计算方法. 全国空间物理学术会议文集. 北京：科学出版社, 1979

[4] 臧振群. 地磁场的长期变化对辐射带质子通量计算的影响. 空间科学学报， 1997, **17**(1):34—39

[5] 方晓华，濮祖荫. 漂移壳追踪方法与内辐射带的长期变化. 空间科学学报， 2000, **20**(2):150—157

[6] 焦维新，濮祖荫，方晓华，傅绥燕. 南大西洋异常区的辐射环境与低轨卫星粒子计算. 地球物理学报， 1999, **42**(2):163—168

[7] 濮祖荫，方晓华，焦维新. 内辐射带南大西洋异常区“空间气候”研究. 中国科学 (A 辑), 2000, **30**(增刊):131—135

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

LOW ALTITUDE SATELLITE ORBIT RADIAITION BELT PARTICLEENVIRONMENT VARIATION DUE TO GEOMAGNETIC LONG TERM VARIATION

LE Guiming　YE Zonghai　ZHOU Guocheng

(*Center for Space Science and Applied Research, The Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100080)

Abstract

Several typical low altitude orbits' radiation belt particle environment have been computed by using IGRF2000 and compared with those of using IGRF1970. The results show that the orbit integral flux's variation for protons with energy greater than 0.1 MeV reaches two order of magnitude for some inclination at the current part of the radiation belt. While the orbit integral flux for protons with energy greater than 10 MeV reaches an order of magnitude for some inclination at same location of the radiation belt. The orbit's proton integral flux maximum variation is an order of magnitude. The electron integral flux's variation reaches up to three order of magnitude for some inclination orbit at lowest radiation belt radiation belt. The electron integral flux's maximum variation is one of magnitude lower. The particle environment variation is little at the altitude greater than 1 000 km.

Key words　International geomagnetic reference field, Radiation belt particles, Integral flux

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com