

磁壳参数 L 与磁暴 Dst 指数和行星际条件的关系^{*}

曹晋滨 燕春晓 刘振兴 周国成

(中国科学院空间科学与应用研究中心 北京 100080)

摘 要

用磁坐标 L - A 来描述地球近地空间粒子特性和卫星位置是近年来空间物理探测研究和数据分析中的一个新趋势. 利用 T96 磁场模型计算了 L 值, 并比较了在地球磁层剧烈活动期间和不同行星际条件下, 用偶极子模型, 国际参照磁场 (IGRF) 模型, 和 T96 磁场模型这三种方式计算得到的地球表面 L - A 磁坐标之间的区别. 在地磁纬度大于 30° 时偶极子近似和 IGRF 磁场模型计算得到的 L 值差别开始增大. 在地磁纬度大于 50° 时, 用 IGRF 磁场模型和 T96 磁场模型计算得到的 L 值差别开始增大. 由于 T96 磁场模型引入了行星际磁场南北和东西分量, 计算的 L 值包含了行星际条件的影响, 并具有了随地方时变化的特性. 本工作对于辐射带粒子动态模式的建立, 以及正确理解卫星磁坐标位置等具有重要意义.

关键词 磁壳参数; T96 磁场模型; 磁暴 Dst ; 行星际磁场

1 引言

地球磁壳参数 L 最早用来描述地球辐射带粒子的运动状态和空间分布 (在地球周围一定空间范围内存在着大量被地球磁场捕获的高能带电粒子. 这些带电粒子的捕获区就被称为辐射带). 地球辐射带粒子的运动状态和空间分布强烈地受到地磁场控制, 并随地磁场的变化而变化. 在理想偶极子情况下, 辐射带粒子沿着一个固定的磁壳层漂移. L 值就是以地球半径为单位的漂移壳层与赤道面相交环线的地心距离, 也被称为 McIlwain L 值.

由于辐射带中粒子被捕获在地磁场中, 这些粒子沿着磁力线在两个镜点之间来回运动. 并沿着一个固定 L 值的壳层围绕着地球漂移. 所以用磁壳参数 L 描述粒子特性非常方便. 在磁偶极子近似情况下, $L = 1/\cos^2 A$, 这里 A 为通过空间点的磁力线与地面交点的地磁纬度^{[1]~[3]}. 由于地球磁场并不是一个理想的偶极子磁场, 所以用偶极子磁场来求 L 值的方法只是一个近似的方法. 比磁偶极子近似更为精确的是利用国际参照磁场 (IGRF) 来求解 L 值^{[4]~[6]}.

近年来在空间粒子探测中出现了一个趋势, 就是在分析数据过程中, 广泛使用磁坐标 (L, A) 来描述卫星的空间位置. 有时卫星磁坐标的 L 值会很大. 例如, 在 Cluster 卫星计划中, 给出的卫星位置 L 值远大于 6, 有时甚至达到几百, 甚至上千. 在描述辐射带粒子

^{*} 国家自然科学基金项目 (40025413, 4040390150) 资助
2003-10-16 收到原稿, 2004-01-06 收到修定稿

模式的公式中,为了描述的连续性,AP8和AE8也经常使用较大的 L 值(L 有时甚至达到15).在空间物理研究中,人们对地面数据进行分析时,往往经常进行磁力线反推,用该磁纬对应的 L 值来推断与地面观测数据所对应的空间位置,也经常使用较大的 L 值.在以上所说的这些应用过程中, L 值的意义得到了扩展,不再是原来包围地球的一个粒子漂移磁壳参数,而是代表了观测点所在位置磁力线的延伸程度.例如, L 值为几百甚至上千的物理意义就是表示该点磁力线不封闭,或在很远的地方封闭.

在使用 L 值来研究的各种空间物理事件往往发生在地球暴时.在地球暴时,由于磁力线的形状和方向的改变,使观测点对应着的 L 值与静时是有很大差别的.这样很自然提出了一个问题,在地球暴时 L 值是否还是平静时期的 L 值?如果有差别,到底有多大?

T96模型是国际上普遍使用的地球磁层磁场模型,它的输入条件中包括了行星际动压和磁场,磁暴 Dst 指数^[7].虽然T96模型还不是一个完美的地球空间磁场模型,但是它是目前可以用来描述受行星际条件和磁暴影响的地球磁场的最好的模型.所以用它来粗略估计变化的磁场对观测点 L 值的影响.

本文利用T96磁场模型和IGRF磁场模型,研究了暴时 L 值、静时 L 值和偶极子近似求得的 L 值之间的区别,分析了行星际磁场,磁暴 Dst 指数,磁地方时(MLT)对 L 值的影响,并给出了有关理论上的解释.

2 磁壳参数 L 值的计算

计算 L 值,要用到文献[5],[6]的公式,即

$$L = L[r, I(B)]. \quad (1)$$

其中, r 是观测点位置, $I(B)$ 是位于两个磁共轭点的一个与磁场有关的积分函数,通常也称为磁场几何积分.有关该公式的详细计算参见文献[5],[6].这样取不同磁场模型,就得到不同的 L 值.

在磁场偶极子近似下,将偶极子磁场代入(1),可得到磁壳参数 $L = 1/\cos^2 \Lambda$,有关其推导过程可见文献[1],[2].这样计算出来的 L 值具有经度和地方时的对称性.

更精确地计算 L 值,可以采用IGRF磁场模型的磁场,计算出来的 L 值比偶极子近似方法要精确,但是它是一个静态的,是与太阳风条件、磁层条件、地方时无关的一个磁壳参数.用IGRF计算出来的 L 值具有地方时的对称性,但不具有经度的对称性.

如果采用T96模型,可以计算出更为精确的,动态的,与太阳风条件、磁层条件和地方时相关的 L 值.用T96模型计算出来的 L 值不具有经度和地方时对称性.

这里需要指出的是,虽然计算了在磁暴过程中针对某个 Dst 指数的 L 值的变化,但是其变化的物理过程在主相和恢复相期间却不一样.在主相期间,磁场变化太快, L 值快速增大,辐射带粒子主要是受到磁场变化引起的感应电场加速;粒子将附着在磁力线上随磁力线一起移动.在恢复相期间,磁场变化的很慢,可以看成是一个绝热过程,这期间粒子的三个绝热不变量没有受到破坏.粒子将缓慢地保持原有粒子分布而回到初态.

3 地球暴时 L 值的变化

3.1 地球表面不同磁纬的 L 值

首先用三种磁场模型计算了在不同 Dst 指数情况下地面不同磁纬的 L 值. 图 1 给出三种磁场模型计算的 L 值随磁纬的分布. L_T , L_I 和 L_D 分别表示用 T96, IGRF 和偶极子模型计算的 L 值. 其中偶极子磁场模型和 IGRF 模型都与 Dst 指数无关. 但 T96 模型与 Dst 指数有明显关系. 需要指出, T96 模型在 $-100 \text{ nT} < Dst < 20 \text{ nT}$ 范围内计算精度最高. 因此, 这里使用了较小的 Dst 值 (例如, $Dst = -200 \text{ nT}$) 来计算. 其他有关参数选取如下: 磁地方时 $t_m = 0$, 太阳风动压为 $P_D = 10 \text{ nPa}$, 行星际磁场 $B_z = B_y = 0$.

图 1 的结果显示在磁纬 30° 以下, 3 种磁场模型计算的结果几乎没有区别. 磁纬 $30^\circ - 50^\circ$ 之间, 偶极子磁场模型与用磁场模型 IGRF 和 T96 计算出来的 L 值有明显区别, 并随着纬度的增大而增大. 但用 IGRF 和 T96 计算出来的 L 值差别不大. 在 $A = 30.3^\circ$ 时, $L_D = 1.341$, $L_I = 1.254$, $L_T(Dst=0)=1.255$, $L_T(Dst=-100 \text{ nT})=1.257$, $L_T(Dst=-200 \text{ nT})=1.259$. 但当磁纬 50° 以上时, 由 IGRF 计算的 L 值, 与 T96 ($Dst = -100 \text{ nT}$, -200 nT) 的区别开始增大. 所以当磁纬大于 50° 时, 更为准确的 L 值, 应该用 T96 磁场来计算.

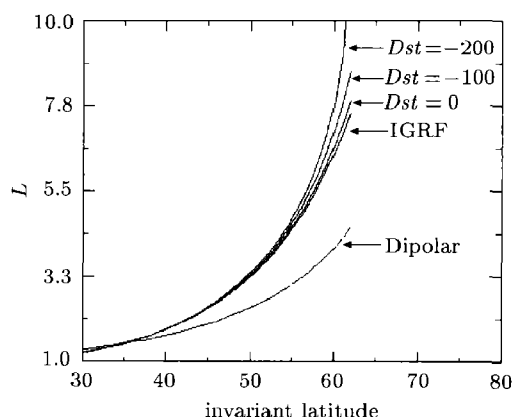


图 1 用三种磁场模型计算的 L 值随磁纬的分布 ($t_m = 0$, $P_D = 10 \text{ nPa}$, $B_z = B_y = 0$)

Fig.1 L - A relation calculated from Dipolar model, IGRF, and T96 in the case of $t_m = 0$, $P_D = 10 \text{ nPa}$ and $B_z = B_y = 0$

图 1 显示, 当 $A = 50.67^\circ$ 时, $L_D = 2.49$, $L_I = 3.375$, $L_T(Dst=0)=3.400$, $L_T(Dst=-100 \text{ nT})=3.442$, $L_T(Dst=-200 \text{ nT})=3.488$. 当 $A = 55.45^\circ$ 时, $L_D = 3.109$, $L_I = 4.631$, $L_T(Dst=0)=4.698$, $L_T(Dst=-100 \text{ nT})=4.816$, $L_T(Dst=-200 \text{ nT})=4.957$. 当 $A = 60.16^\circ$ 时, $L_D = 4.038$, $L_I = 6.524$, $L_T(Dst=0)=6.729$, $L_T(Dst=-100 \text{ nT})=7.146$, $L_T(Dst=-200 \text{ nT})=7.891$. 可以看出, 磁暴 Dst 指数越大, 用 IGRF 模型计算得到的 L 值与 T96 模型计算的差别就越大. 所以用 IGRF 磁场计算得到 L 值分布只能适合于 $|A| < 55^\circ$ (或磁壳参数 $L < 3.4$) 的范围. 在暴时 $Dst = -200 \text{ nT}$, 磁纬约为 55.0° 时, 用 IGRF 和 T96 模型计算的 L 值相差约为 7%. 当磁纬约为 60.16° 时, 两个值相差约为 21%.

如果用误差 5% 为判断标准, 则偶极子近似只能用于磁纬小于 10° 的地面范围. IGRF 模型方法只能用于磁纬小于 54° 的地面范围.

用 T96 模型计算的 L 值与 IGRF 模型计算的 L 值的区别本质上反应了两者磁场模型的区别. 图 2 给出了地面 $\lambda = 50^\circ, 55^\circ, 60^\circ$ 情况下, IGRF 模型磁力线和 T96 模型 ($Dst = -200$ nT 时), 磁力线图. 从图中可以看出, 当 $\lambda = 50^\circ$ 时, 两条磁力线形状相似, 但已经明显区分开来, 在磁赤道相差约为 0.2 个地球半径. 当 $\lambda = 55^\circ$ 时, 两种情况下计算出来的磁力线形状还类似, 但在磁赤道面上的地心距离的差别增大, 达到 0.5 个地球半径. 如果按照磁壳参数为磁力线在磁赤道上的地心距离计算, 则图 2 的结果与图 1 的结果基本上是一致的. 当 $\lambda = 60^\circ$ 时, 两种方法计算的磁力线形状都完全不一样. 由于地球环电流的存在, 整个磁力线不再对磁赤道对称.

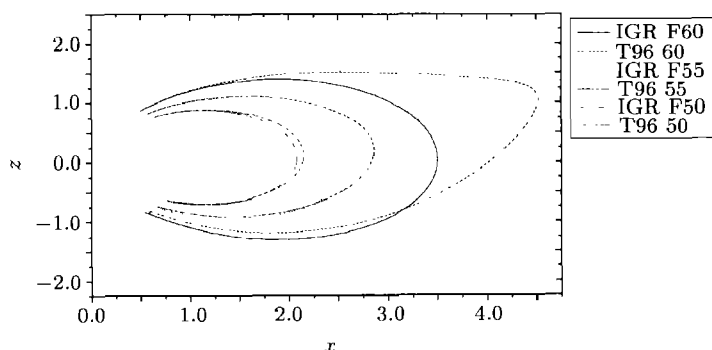


图 2 在子夜子午面内通过地面磁纬为 $50^\circ, 55^\circ, 60^\circ$, 分别用 IGRF 和 T96 磁场模型计算出的磁力线在该子午面内的投影

Fig.2 Magnetic field lines of the magnetic latitude $50^\circ, 55^\circ$ and 60° on the meridian noon-midnight plane calculated from IGRF and T96 in the case of $t_m = 0$, $P_D = 10$ nPa and $B_z = B_y = 0$

T96 模型中输入参数中有磁暴指数 Dst , 行星际磁场南北分量 B_z , 行星际东西分量 B_y , 太阳风动压 P_D . 所有这些物理量都对 L 值计算有影响.

首先我们考察 B_z 的影响. 图 3 显示了在行星际磁场 $B_z = 0, -10, +10$ nT 三种情况下, L 值随磁纬的分布. 为了对比, 同时也给出了用 IGRF 和偶极子磁场模型计算得到的 L 值分布. 可以看出, 用 IGRF 磁场模型计算得到的 L 值分布与 $B_z = 0$ 时 T96 磁场模型计算得到的 L 值分布是一致的. 行星际的北向磁场对 L 值影响较小. 即使在磁纬为 60.16° 时, $L_T(B_z = 0) = 6.729$, $L_T(B_z = 10 \text{ nT}) = 6.716$, 两者相差不大, 约为 0.2%. 但是行星际南向磁场对 L 值的影响还是较为明显的. 在磁纬为 60.16° 时, $L_T(B_z = -10 \text{ nT}) = 6.869$, 与 $L_T(B_z = 0) = 6.729$ 相差 0.14, 约为 2.1%. 行星际南向磁场对 L 值的影响, 本质上是起源于磁层顶的重联过程. 太阳风中南向磁场, 通过磁场重联不断剥蚀地球磁层磁场, 使得磁层顶不断向地球方向移动. 极尖区向赤道方向移动. 这些磁场大小和方向的改变使磁力线的 L 值减小.

图 4 显示了在行星际磁场 $B_y = 0, -10, +10$ nT 三种情况下, L 值随磁纬的分布. 当磁纬为 60° 时, $L_T(B_y = 0) = 6.729$, $L_T(B_y = -10 \text{ nT}) = 6.813$, $L_T(B_y = +10 \text{ nT}) = 6.816$. 可以看出, 行星际磁场东西分量对 L 值的影响没有行星际南向分量对 L 值影响大, 这与行

星际磁场东西分量对磁层的渗透能力没有南向分量强有关. 行星际磁场东西分量 B_y 对 L 值的修正量为 0.084, 约为 1.2%. 同时, 行星际磁场东西向分量对 L 值的影响是对称的, $L_T(B_z = -10 \text{ nT}) \sim L_T(B_z = +10 \text{ nT})$.

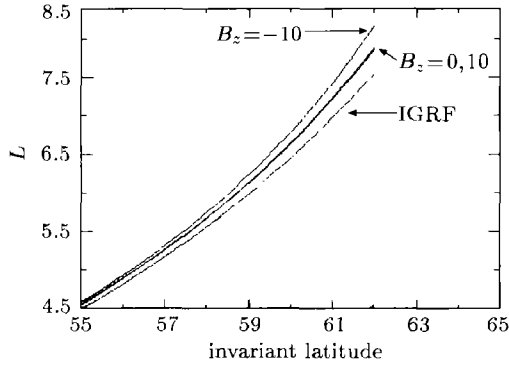


图 3 在行星际磁场 $B_z = 0, -10, +10 \text{ nT}$ 三种情况下, L 值随磁纬的分布 ($t_m = 0$)

$P_D = 10 \text{ nPa}$, $Dst = 0$, and $B_y = 0$

Fig.3 L - A relation calculated from T96 for $B_z = 0, -10, +10 \text{ nT}$ in the case of $t_m = 0$, $P_D = 10 \text{ nPa}$, $Dst = 0$ and $B_y = 0$

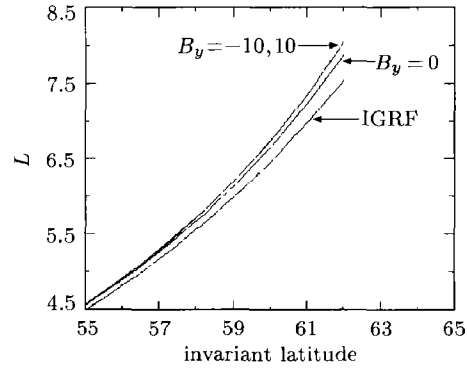


图 4 行星际磁场 $B_y = 0, -10, +10 \text{ nT}$ 三种情况下, L 值随磁纬的分布 ($t_m = 0$)

$P_D = 10 \text{ nPa}$, $Dst = 0$, and $B_z = 0$

Fig.4 L - A relation calculated from T96 for $B_y = 0, -10, +10 \text{ nT}$ in the case of $t_m = 0$, $P_D = 10 \text{ nPa}$, $Dst = 0$, and $B_z = 0$

图 5 显示了在太阳风动压 $P_D = 2, 6, 10 \text{ nPa}$ 情况下, L 值随磁纬的分布. 当磁纬为 60° 时, $L_T(P_D = 10 \text{ nPa}) = 6.729$, $L_T(P_D = 6 \text{ nPa}) = 6.678$, $L_T(P_D = 2 \text{ nPa}) = 6.607$, $L_I = 6.524$. 可以看出, 动压越大, L 值越大. 太阳风动压对磁层的压缩迫使日侧的磁力线向地球方向移动, 夜侧磁力线向磁尾伸展, 故造成日侧的 L 值减小, 夜侧的 L 值增大.

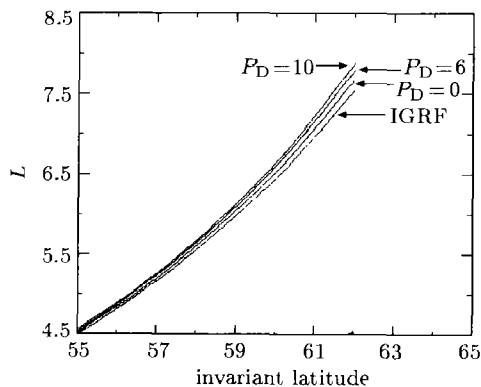


图 5 太阳风动压 $P_D = 2, 6, 10 \text{ nPa}$ 三种情况下, L 值随磁纬的分布. $t_m = 0$, $Dst = 0$, and $B_z = B_y = 0$

Fig.5 L - A relation calculated from T96 for $P_D = 2, 6, 10 \text{ nPa}$ in the case of $t_m = 0$, $Dst = 0$ and $B_z = B_y = 0$

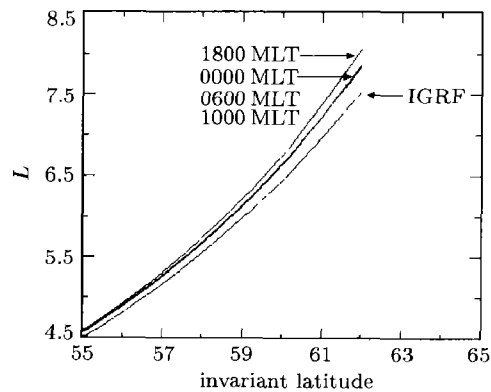


图 6 在东经 120° 子午面内, 在 0000, 0600, 1200 和 1800 (MLT) 四个时间, L 值随磁纬的分布

Fig.6 L - A relation calculated from T96 for $MLT = 0000, 0600, 1200, 1800$ in the case of $Dst = 0$, and $B_z = B_y = 0$ on the meridian plane of 120°E

从以上结果可以看出, L 值的计算是同磁场模型以及相关的对称性联系在一起的. 当用偶极子磁场模型近似来计算时, L 值分布与偶极子磁场一样, 具有地方时和地理经度的对称性. 当用 IGRF 磁场模型计算 L 值时, L 值失去了不同经度的对称性, 但仍然具有关于不同地方时的对称性. 当用 T96 磁场模型来计算 L 值时, L 值分布失去了随经度和不同地方时变化的对称性. 图 6 的结果也说明了这一点.

图 6 给出在东经 120° 子午面内, 在 0000, 0600, 1200, 1800 (MLT) 四个时间 L 值随磁纬的分布. 在磁纬小于 50° 时, 不同地方时的 L 值没有明显的区别. 当磁纬大于 50° 时, 地方时 0000, 0600, 1200 MLT 处的 L 值相似; 而 1800 MLT 时的 L 值与其他 (0000, 0600, 1200 MLT) 处的 L 值之间的差异明显增大. 当磁纬等于 60° 时, $L_T(0000 \text{ MLT})=6.729$, $L_T(0600 \text{ MLT})=6.735$, $L_T(1200 \text{ MLT})=6.735$, $L_T(1800 \text{ MLT})=6.844$. L 值在昏侧的增大原因是由于等离子体层顶的黄昏隆起所致. 由于等离子体层顶黄昏隆起, 向外挤压, 使得等离子体层顶以外的磁力线也在黄昏处隆起, 这样用 T96 计算的 L 值就在黄昏出增大.

4 结论

本文利用偶极子, IGRF 和 T96 三种磁场模型计算了地球表面磁壳参数. 计算结果如下.

(1) 偶极子磁场模型只适用于计算地球表面磁纬 30° 以下的 L 值. 国际参照磁场 (IGRF) 模型适用于计算地球表面磁纬 50° 以下的 L 值.

(2) 磁暴期间, 由于环电流存在, 磁场的大小和方向都改变, 相应地 L 值也增大. 磁暴 Dst 指数的绝对值越大, L 值也就越大. 当 Dst 为 -200 nT , 磁纬约为 60.16° 时, L 值可以增大 21%.

(3) 行星际磁场的南向分量对 L 值也有影响, 但是影响不大. 行星际北向磁场和东西向磁场几乎对 L 值无影响.

(4) 伴随着等离子体层的黄昏隆起, L 值在黄昏处增大. 利用 T96 模型计算的 L 值不仅具有经度不对称性, 而且具有地方时不对称性. 与实际情况更加符合.

以上只是利用 T96 磁场模型研究了 L 值的变化. 实际上各种因素对 L 值的影响是同其时间变化尺度相连的. 例如, T96 模型在描述行星际条件对磁场的影响时也只适合一个平衡态的情况下, 即行星际磁场缓慢变化到给定值时的情形. 当行星际磁场快速变化, 其在地球磁层中的渗入磁场也快速变化, 从而造成了粒子漂移壳的快速变化. 如果行星际磁场变化时间尺度大于粒子环绕地球漂移一周的时间尺度, 则 L 值还可以看成一个漂移壳的参数, 否则 L 值只能看成磁力线伸展的程度, 磁暴指数对磁场的影响也类似. 因为磁暴过程中, 主相的时间太短, 这期间 L 值不能看成漂移壳指数. 但磁暴恢复相一般需要 1—3 天, 与辐射带粒子环绕地球漂移一周的时间尺度 (约为 1 h 量级) 相比, 在这么长的时间尺度中, 漂移壳还是较为固定的. 所以此时 L 值仍然可以看成漂移壳指数.

目前, 国际上所使用的辐射带粒子模式都是一种仅考虑到太阳活动峰年和低年静态模式. 利用这种模式对卫星辐射环境的估计难免与卫星的实际动态辐射环境有区别. 我们的工作将会对辐射带粒子动态模式的建立有重要意义.

参 考 文 献

- [1] Tu Chuanyi *et al.* Solar Terrestrial Physics. Beijing: Science Press, 1988. in Chinese (涂传诒等. 日地空间物理学. 北京: 科学出版社, 1988)
- [2] Cao Jinbin, Li Lei, Wu Ji *et al.* Introduction to Space Physics. Beijing: Science Press, 2001. in Chinese (曹晋滨, 李磊, 吴季等译. 太空物理学导论. 北京: 科学出版社, 2001)
- [3] Xu Wenyao. Geomagnetism. Beijing: Seismological Press, 2003. in Chinese (徐文耀. 地磁学. 北京: 地震出版社, 2003)
- [4] Du Heng, Ye Zonghai. Handbook of Low Earth Orbit Spacecraft. Beijing: Defence Industry Press, 1996. in Chinese (都亨, 叶宗海. 低轨道航天器空间环境手册. 北京: 国防工业出版社, 1996)
- [5] Center for Space Science and Applied Research, CAS. Handbook of Space Environment Book. Beijing: China Science and Technology Press, 2000. in Chinese (中国科学院空间科学与应用研究中心. 宇航空间环境手册. 北京: 中国科学技术出版社, 2000)
- [6] McIlwain C R. Coordinates for mapping the distribution of magnetically trapped particles. *Geophys. Res.* 1961, **66**:36—81
- [7] Tsyganenko N A. Modeling the earth's magnetospheric magnetic field confined within a realistic magnetopause. *J. Geophys. Res.* 1995 **100**:55—99

RELATION BETWEEN MAGNETIC SHELL PARAMETER L , Dst AND IMF

CAO Jinbin YAN Chunxiao LIU Zhenxing ZHOU Guocheng

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

Abstract

It is a new trend to use the magnetic coordinate L - A . to describe space particle features and position of spacecraft. T96 model is used to calculate magnetic shell parameter, and the difference between L values calculated from Dipolar model, IGRF and T96 were compared. The difference between L values calculated from Dipolar model and IGRF, begin to increase when magnetic latitude is larger than 30° . Also, the difference between L values calculated from IGRF and T96, begin to increase when magnetic latitude is larger than 50° . The L values are therefore dependent on the IMF (interplanetary magnetic field) and have also the dependence of local time. This work is meaningful to radiation belt dynamic modeling and understanding of magnetic position of satellite.

Key words Magnetic shell parameter, T96 magnetic model, Magnetic storm Dst , Interplanetary magnetic field