

地球同步轨道高能电子增强事件预报方法

薛炳森 叶宗海

(中国科学院空间科学与应用研究中心 北京 100080)

摘 要

分析了地球同步轨道高能电子通量增强事件的发生规律及其与太阳风和行星际磁场参数的关系,并在此基础上建立了基于人工神经网络的高能电子增强事件模式,经实测数据检验,预报模式可以对未来1天的高能电子通量进行预报,误差为8.2%,达到了较高水平。

关键词 高能电子; 太阳风; 行星际磁场; 人工神经网络

1 引言

地球同步轨道是通信、气象等专业卫星非常集中的轨道,由于该轨道位于外辐射带中心附近,并且容易受行星际扰动的影响,高能电子通量的变动有时 would 超过1000倍。高能电子能够穿入卫星内部,并沉积在器件内部,逐步形成带电层,突然的放电过程类似一个脉冲信号在电路中传播,形成伪信号,使卫星错误动作,从而引起卫星故障,更严重的还可以造成电路击穿,这就是近年来备受关注的深层充电效应,产生这种效应的相对论电子又被称为“杀手电子”。形成严重的深层充电效应的前提是在短时间内积累大量净电荷,这需要足够大的外部高能电子的输入,1994年Anik E1和E2卫星的相继失事明显地与深层充电效应事件有关。事故前发生了同步轨道相对论电子通量异常增长。美国空间环境预报中心(SEC)明确规定,当能量高于2 MeV的高能电子通量连续3天超过 $3 \times 10^8 \text{cm}^{-2}$ 或单日通量超过 10^9cm^{-2} 时为深层充电的预警临界值。

高能电子通量异常增长事件可以分为突发型和和滞后型两种,突发型的特征是磁暴急始后,外辐射带高能电子通量突然增加2个数量级以上,通常是由强的CME引起。大多数事件属滞后型的,大约在磁暴发生后的1—2天,能量大于1 MeV的相对论电子通量逐步增强几个数量级,维持数天乃至1—2个星期。目前普遍认为,高能电子暴起源于对磁层亚暴所产生的10—100 keV的中能电子的加速过程,突发型事件是行星际激波到达地球后对中能电子加速产生的;对于滞后型电子通量增强事件, Li^[1]认为,地球同步轨道上的相对论电子是由地球磁层内部的较低能量的电子通过加速产生的,这个加速的过程是通过所谓“径向扩散”过程实现的,即低能电子沿径向被输运到磁场较强的区域,这种现象通常不会出现,因为这不符第三绝热不变量守恒定律。但当电场和磁场在大尺度上发生强烈扰动时,则有可能满足径向扩散的触发条件。

图1给出的是1993年11月5—9日的一次典型的高能电子增强事件的全过程(上半部分),同时给出了对应的Dst的变化趋势。可以看出,地磁暴主相开始后,地球同步轨道

2003-10-30 收到原稿, 2004-03-01 收到修定稿

上的高能电子通量迅速下降 (A), 直到磁暴恢复相开始后, 高能电子通量才开始上升 (B), 在以后的几天内, 呈连续上升的趋势, 这是一次典型的滞后型事件。

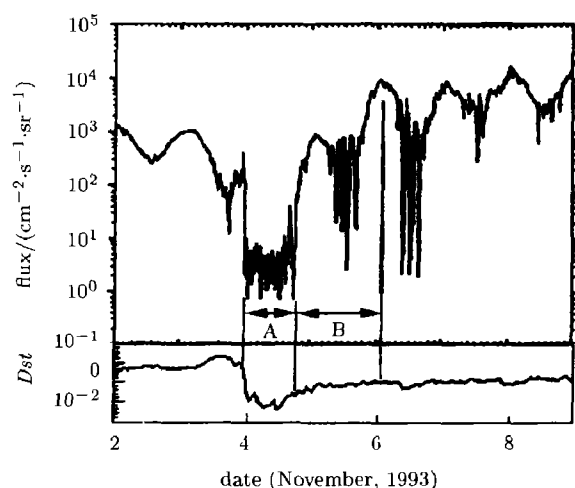


图 1 1993 年 11 月 5—9 日的一次典型的高能电子增强事件 (上半部分) 及此期间的 Dst 变化 (下半部分)

Fig.1 A whole process of energetic electron enhancement event on the geosynchronous (upper) together with the geomagnetic Dst index variation (lower) in Nov. 5—9, 1993

高能电子增强事件是滞后于地磁扰动发生的, 这就使我们对它的预报成为可能, 更进一步, 地磁扰动与太阳风和行星际联系紧密, 所以将太阳风和行星际参数的监测数据用于高能电子增强事件的预报, 无疑将增加预报提前量, 提高预报精度. Li^[1] 总结出的高能电子通量与太阳风和行星际参数的主要相关特征是: (1) 高能电子通量的峰值通常出现在太阳风速度峰值的 1—2 天之后, (2) 高能电子通量与行星际磁场南向分量的相关特征不明显, (3) 太阳风速度小的波动对应着大得多的高能电子通量变动。

2 对高能电子增长事件的统计分析

20 世纪 80 年代后期, 随着美国同步轨道应用卫星 (GOES) 系列的运行, 可以得到连续的高能电子通量的监测资料, 为对高能电子通量增强事件的研究创造了条件. 我们的统计和建模工作主要基于 GOES 卫星的高能电子监测数据和分布在磁层外的卫星对太阳风和行星际磁场的有关探测数据, 通过统计研究, 总结出一些高能电子增长事件的时间和通量的分布特征。

(1) 高能电子增强事件通常出现在太阳活动低年, 从 1994 年以来的高能电子增长事件的统计结果来看, 能量高于 2 MeV 的高能电子的单日通量超过 10^9 cm^{-2} 的 56 次事件中, 仅有 2 次发生在太阳活动高年附近 (1997-01-09, 1998-05-04), 其余全部集中在太阳活动低年, 而太阳活动高年没有记录到大的高能电子通量增长事件. 同步轨道高能电子增长事件还具有很强的季节特征, 太阳活动低年时, 春分、秋分点附近的高能电子通量明显高

于其他时段, 太阳活动高年时, 事件则主要发生在春分、秋分附近.

(2) 高能电子增强事件存在着明显的 27 天重现性, 在太阳活动低年尤为明显. 高能电子增强事件有一个由弱到强, 达到峰值后又逐渐衰减的过程, 这个周期可长可短, 与通量的最大值呈正相关, 最多的可持续 7 个太阳自转周 (6 个月). 大事件都会存在一个连续增长的过程, 可以增加预报的提前量.

(3) 就单个事件而言, 通量越大, 延续时间就越长.

(4) 高能电子通量增强事件通常出现在地磁暴以后 1—2 天, 事件的强度通常与地磁活动水平呈正相关, 但不是严格的正比关系.

(5) 高能电子通量增长事件的强度和持续时间与太阳表面冕洞的面积、形态等参数密切相关, 冕洞的面积越大, 形状越规则, 跨越的纬度越大, 与之相对应的高能电子增强事件强度越大; 冕洞覆盖的经度越宽, 事件的持续时间越长.

(6) 高能电子增长事件与太阳风的特征也有着密切的联系, 通常太阳风速度越高、激波前的密度越大、等离子体温度越高, 事件的强度就越大.

GOES 卫星监测到的高能电子增强事件主要集中在 1992—1996 年, 这期间的太阳风和行星际磁场的探测数据则来自不同的卫星, 通过对照分析, 发现了一些较好的对应关系.

首先, 高能电子通量与前一天的太阳风平均速度呈正相关, 如图 2 所示. 可以近似地认为高能电子通量的对数 ($\lg F$) 与太阳风速度线性相关.

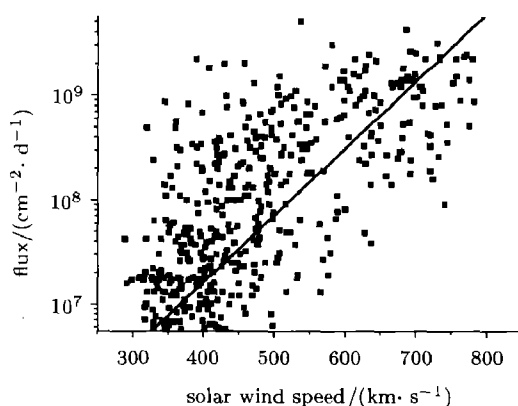


图 2 高能电子通量与太阳风速度的统计关系

Fig.2 The relation between the flux and the average solar wind velocity of the previous days

我们还发现, 太阳风等离子体密度和行星际磁场强度与高能电子通量的关系非常复杂, 很难用经验公式给出, 但它们与地磁扰动关系密切, 因此, 与高能电子通量存在着某种联系.

另外, 高能电子增强事件有一个生成—发展—恢复的过程, 而高能电子通量的最大值多出现在高能电子通量上升后的 3—4 天, 所以在此期间的太阳风密度和行星际磁场的变化也成为高能电子通量的控制因素.

如上所述, 要通过人工从众多线索中准确总结出太阳风、行星际磁场数据与高能电子

通量之间的确切关系是非常困难的. 计算机运算速度的提升和计算方法的进展, 使得这些繁杂的运算、推理过程比较容易实现, 我们要做的就是建立一种合适的计算方法, 然后通过大量的事例对计算机进行训练, 使它能够准确地掌握行星际磁场数据与高能电子通量之间的联系, 然后就可以对新输入的太阳风和行星际磁场数据进行运算, 最终给出对高能电子通量的预报.

出于对模式的进一步改进和提高的要求, 要求模式应具有学习和自我完善的能力, 而神经网络恰好满足了这方面的要求. 神经网络是由一个大量简单的处理单元广泛连接组成的网络, 用来模拟大脑神经系统的结构和功能. 通过用数据对这个神经网络进行训练, 就可以使它总结出太阳风和行星际磁场数据与高能电子通量复杂的、非线性的联系, 并将这些经验有效地“固化”, 形成可以为预报所用的高能电子通量预报模式. 在本项工作中选用的是比较成熟的全连接神经网络^[2]模型.

在对全连接神经网络进行训练时, 考虑到 20 世纪 90 年代初太阳风、行星际磁场参数的特点, 选择了日平均的太阳风速度 (v_n)、太阳风等离子体密度 (N_n) 和行星际磁场总强度 (B_n), 以及这三个参数相对前一日的变化作为输入参量, 还有当日的高能电子通量 (F_n), 预报的是第二天的高能电子通量 (F_{n+1}). 选择的训练用数据的时间段是 1992—1994 年, 1995 年 5—12 月, 留出 1995 年 1—4 月的数据用来对神经网络模式的运行结果进行检验.

3 结果与讨论

初步建立了人工神经网络模式, 用经过整理的数据集对其进行训练. 训练完成后, 我们用预留的数据集对其效果进行了检验, 结果如图 3 所示, 可以看出模式的预报效果比较好.

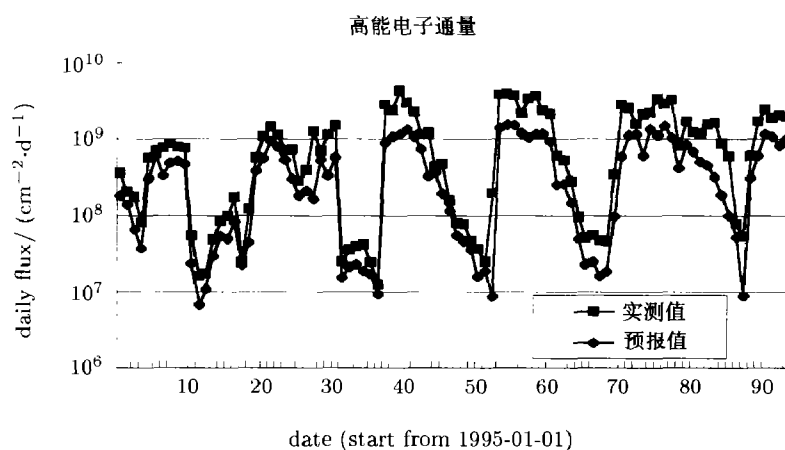


图 3 1995 年初地球同步轨道上高能电子通量的预报结果

Fig.3 The compare between the predicted values and the measured ones

图 4 给出的是预报值与实测值的对比, 图中的拟合直线的斜率为 1.02, 说明预报值与实测值非常接近, 经对检验用样本数据集的预报结果的统计分析计算, 指数通量的预报值与实测值的相对误差为 8.1%.

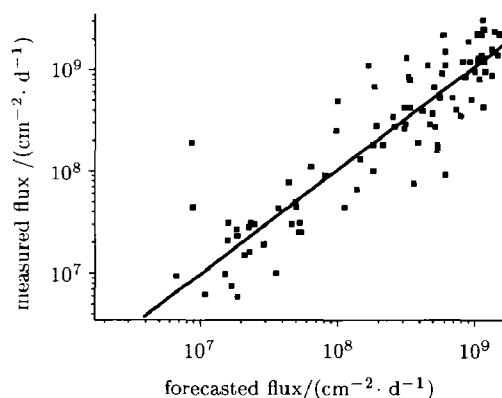


图 4 高能电子通量预报值与实测值比较分析

Fig.4 The contrast of the predicted values and the measured ones.

4 结语

神经网络方法在处理多参数的非线性关系时, 具有较高的效率和运算精度, 将这种方法运用到地球同步轨道高能电子增强事件的预报, 取得了较好的结果. 这种尝试现在只是初步的, 随着探测技术的发展, 可以得到更多更新的参数, 例如 ACE 卫星可以监测太阳风等离子体的温度, 我们的研究也已发现地球同步轨道高能电子通量与该参数有着较好的相关特性, 但由于 ACE 卫星于 1997 年正式运行, 可以得到的样本有限, 因此在本项工作中没有采用.

应当指出, 目前我们只采用了有限的几种数据, 随着工作的深入, 会有更多的规律被揭示出来, 可以在现有的模式上增加数据种类、扩大数据集规模, 现有的预报精度得到进一步改善是完全可能的.

参 考 文 献

- [1] Li Xinlin, Temern M, Baker D, Reeve D, Larson D. Quantitative prediction of radiation belt electron at geostationary orbit based on solar wind measurements. *Geophys. Res. Lett.*, 2001, **28**:1887
- [2] Hu Xiong *et al.* Warning of solar proton events. *Chin. J. Space Sci.*, 1998, **18**(4):323—328. in Chinese (胡雄等. 太阳质子事件警报. 空间科学学报, 1998, **18**(4):323—328)

FORECAST OF THE ENHANCEMENT OF RELATIVISTIC ELECTRON AT THE GEO-SYNCHRONOUS ORBIT

XUE Bingsen YE Zonghai

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

Abstract

The high flux of energetic electrons on geo-synchronous orbit can induce many kinds of malfunction of the satellite there, within which the bulk charging is the most significant that several broadcast satellite failures were confirmed to be due to this effect. The electron flux on geo-synchronous orbit varies in a large range even up to three orders accompanied the passage of interplanetary magnetic cloud and the following geomagnetic disturbances. Upon the investigation of electron flux, interplanetary solar wind data, and geomagnetic data as well, we found that, (1) The enhancement of energetic flux on the geo-synchronous orbit exhibits periodic recurrence of 27 days; (2) significant increase of electron flux relates to interplanetary index and characters of their distribution; (3) the electron flux also has relation to solar activity index. In our research work, artificial neural net was employed and constructed according to the job.

The artificial neural network was employed in this paper to build the relationship between the electron flux and interplanetary parameters. The input parameter is: the solar wind velocity in km/s; the density of the plasma density; the total strength of interplanetary magnetic field. All of them were daily average value. To represent the influence of the variation of the interplanetary parameters influence, the ratio with those of the previous day of the mentioned parameters were also input. Through the training, the neural network can adjust the internal weight and the value of the nodes to build the relationship between the electron flux and the interplanetary parameters and their variation. Preliminary result showed that the accuracy forecast of electron flux 1 day ahead can reach 80%.

Through the effort in the prediction of energetic electron fluxes enhancement with the solar wind and interplanetary magnetic field parameters, we realized that the mechanism of the electron event is far too complex to be described with simple formulas. Large database is needed for statistic work to make the prediction more accurate. Fundamentally, great measured and advance research work has to be done to investigate the source energetic electron and acceleration mechanism.

Key words Energetic, Electron, Solar wind, Interplanetary field, Artificial neuron network