

从属函数在地磁扰动预报研究 中的初步应用

魏奉思 蔡红昌

(中国科学院空间科学与应用研究中心, 北京)

摘 要

根据1966—1982年期间有关太阳耀斑、行星际激波和地磁扰动的观测资料而建立的从属函数, 对1984—1985年间的行星际闪烁观测中能证认出的耀斑-激波所引起地磁扰动作了预报试验。结果表明: (1) 磁扰开始时间预报的相对误差, $\delta T/T \leq 10\%$ 的事件数为20个, 占总事件数的50%, $\delta T/T \leq 20\%$ 的事件占总事件数的70%以上; (2) 磁扰幅度(ΣKp)大小的预报, 其相对误差 $\delta \Sigma Kp / \Sigma Kp \leq 30\%$ 的事件数为32个, 占总事件数的80%, 而 $\delta \Sigma Kp / \Sigma Kp \geq 60\%$ 仅占15%。本文方法显示了一定潜力, 有待从聚类分析方面进一步深入。

关键词: 从属函数, 地磁扰动, 预报

一、引 言

地磁扰动变化是由太阳活动、行星际扰动以及地球系统本身的多种不确定性复杂因素综合作用的结果, 因此它的定量预报是十分困难的。就研究预报方法的角度而言, 如何综合评估多种不确定性复杂因素, 对改善预报能力是很重要的。我们曾借助模糊数学中从属函数的概念, 对影响地磁扰动的多种不确定性复杂因素进行了综合评估, 预报试验结果是令人鼓舞的^{[2]**}。鉴于从属函数的重要性, 我们最近根据1966—1982年期间有关太阳耀斑、行星际激波和地磁扰动的观测资料重新确定了用于地磁扰动的从属函数^{[1]*}。本文侧重介绍利用新确立的从属函数对1984—1985期间的耀斑-地磁扰动进行预报试验的结果。

二、模糊集与从属函数

本文介绍的地磁扰动预报方法试验是以行星际闪烁(简称IPS)观测记录到耀斑-激波为基础而进行的, 但是在IPS观测中, 如何评判一个射电源的IPS观测, 它记录到的一

本文于1989年1月29日收到。

* 魏奉思和王海涛, 空间物理和探测技术, 第3期, 第100页, 1988。

** Wei Fengsi, Proceedings of The International Symposium On Space Physics, p. 8, 1986。

定是同耀斑有关联的激波呢,实际上并没有明确的标准和模式,由于 IPS 观测本身的局限性,空间传播条件的复杂多变性以及激波本身结构诸多方面的复杂性等等,使 IPS 激波观测和证认存在一定的模糊性,很难用是或非予以简单地判断,于是我们引进模糊数学中模糊集合和从属函数的概念来描述 IPS 的激波观测. 论域 $X = \{x\}$ 上的模糊集合 A 由从属函数 $\mu_A(x)$ 来表征,其中 $\mu_A(x)$ 在实轴上的闭区间 $[0, 1]$ 中取值, $\mu_A(x)$ 的大小反映了 x 对于模糊集合 A 的从属程度,论域是指被讨论的全体对象. 上述概念表明,论域 $X = \{x\}$ 上的模糊集合 A 是指 x 中具有某种性质的元素整体,这些元素具有某些不明确的界限. 对于 x 中任一元素,可根据该种性质,用一个 $[0, 1]$ 间的数来表征该元素从属于集合 A 的程度. $\mu_A(x)$ 的值接近于 1, 表示 x 从属于 A 的程度很高, $\mu_A(x)$ 的值接近于零,则表示 x 从属于 A 的程度很低. 就本文而言,将不同射电源的 IPS 观测用模糊集 A 表示,进而确定从属函数. 例如典型的耀斑-激波传播到地球的时间为 50 小时左右,设计从属函数 $\mu_A(x = 50) = 1$, 偏离 50 小时越远越接近于零. 同理,我们将 IPS-耀斑-激波观测中的其它重要元素均做如上处理,于是,对判断耀斑-激波就有了较客观的依据.

通过对耀斑-激波传播三维特性的了解和对 IPS 观测数据的分析^[1,2], 从物理上考虑, IPS-耀斑-激波的模糊集合 A_i 应考虑五个因素:

$T(R)$ ——从耀斑爆发开始,激波传播到 R 处的渡越时间;

E ——所研究方向单位立体角内的激波能量;

Δv ——激波面前后介质速度的跃变量 $v - v_0$;

θ ——IPS 观测所给速度增加处的纬度;

ϕ ——IPS 观测所给速度增加处的经度.

为了进行地磁扰动预报,尚须实施下列转换:

$$A_i(T_i(R_i), E_i, \Delta v_i, \theta_i, \phi_i) \Rightarrow A_{ic}(T_{ic}(R = 1), M_{ic}, \Delta v_i, \theta_{ij}, \phi_{ij}).$$

这里足标 c 表示以地球为参照点, T_{ic} , M_{ic} 均系根据激波理论^[3]、长期平均的激波三维传播统计模式^[4], 以及激波能量 E_i 同磁扰 M_i 间的相关关系, 由 $T_i(R_i)$, E_i 转换而来的激波渡越到地球的时间和所引起的地磁扰动 ΣKp 指数的大小. $\theta_{ij} = \theta_i - \lambda$, $\phi_{ij} = \phi_i - \xi$ 为射电源的 IPS 观测相对于耀斑的纬度和经度.

从属函数的设计,对于模糊集特性的表征是十分重要的. 然而,它的确定并没有一定的程式,主要取决于作者对物理问题的了解和经验,并在实际应用中不断完善. 本文根据挑选的 IPS-耀斑-激波事件(挑选判据见文献[4]), 将有关的 T_s 、 ΣKp 、 AE_{φ} 、 $AE_{\star}$ 、 Dst_{φ} 、 Dst 、 Ap 、 Δv 、 θ 和 ξ 的数据作出其分布的频次图, 根据从频次图中看到的有关激波的物理特性,选择合适的分布函数并取归一化的形式,以表征该种观测数据所构成的从属函数. 关于如何设计从属函数,可参看文献[1]. 这里仅给出初步得到的从属函数如下:

$$\mu_T = (-0.0022T_s^2 + 0.2150T_s - 4.1539),$$

$$\mu_M = \frac{1}{181} M_s^{2.5} e^{-0.115M_s},$$

$$\mu_{\theta} = 1 - \frac{|\theta - 15|}{150} e^{(\theta+15)/100},$$

$$\mu_{\phi} = 1 - \frac{|\phi - 30|}{270} e^{(\phi + 30)/360},$$

$$\mu_{\Delta v} = \frac{1}{1 + \left(\frac{50}{\Delta v}\right)^2 \frac{1}{R}}.$$

这时, 描述耀斑-激波的模糊集合 A_{ie} 可表示为:

$$A_i^1 = (\mu_{T_i}, \mu_{M_i}, \mu_{\Delta v_i}, \mu_{\theta_i}, \mu_{\phi_i}),$$

$i = 1, 2, \dots, N$, N 为提供给 IPS-激波观测的射电源数目.

三、预报方法

上面简要介绍了以耀斑-激波的 IPS 观测为基础而建立的模糊集和从属函数, 下面介绍利用模糊集和从属函数进行地磁扰动的预报方法.

上述模糊集 A_{ie} 中五种观测因素, 在决定 IPS 观测是否记录到耀斑-激波上的相对重要程度不同, 建立加权模糊集:

$$W = \{0.4, 0.3, 0.1, 0.1, 0.1\},$$

括号中的数值依次对应于 A_{ie} 集中的 $\mu_{T_i}, \mu_{M_i}, \mu_{\Delta v_i}, \mu_{\theta_i}, \mu_{\phi_i}$ 的加权系数. 这里认为激波的渡越时间和激波的能量(或引起的磁扰大小)对于确定激波是起主要作用的两个因素.

耀斑-激波事件观测所构成的模糊集矩阵可具体表示为:

$$A_{Ne} = \begin{pmatrix} \mu_{11} & \mu_{12} & \mu_{13} & \mu_{14} & \mu_{15} \\ \mu_{21} & \mu_{22} & \mu_{23} & \mu_{24} & \mu_{25} \\ \vdots & & & & \\ \mu_{N1} & \mu_{N2} & \mu_{N3} & \mu_{N4} & \mu_{N5} \end{pmatrix}.$$

为了从 N 个子集中挑选出最可能的耀斑-激波事件来进行有关地磁扰动的预报, 需要有典型集来作比较. 根据实际观测到的耀斑-激波磁扰事件的统计结果来构成典型模糊集, 经加权后为

$$B = \{0.4, 0.24, 0.08, 0.08, 0.07\}.$$

于是, 可计算耀斑-激波观测的模糊集 A_{ie} 同典型集 B 之间的贴近度:

$$(A_{ii}, B) = \frac{\sum_{j=1}^5 \min(A_{ij}, B)}{\sum_{j=1}^5 \max(A_{ij}, B)},$$

最后, 选择贴近度大的 IPS 观测作为进行激波和地磁扰动预报的最优观测. 这样做使我们在选取样本和作预报时有比较定量的综合考虑, 减少观测数据中因非耀斑-激波因素所带来的误报, 从而提高了预报质量.

下面举一个实例来说明上述预报方法的使用.

耀斑事件: 1978.5.8, 1212—1312, N22, W76, 16

IPS 观测: θ ϕ R Δv T_s $\sum Kp$ (A', B)

射电源 a: 22.8 -28.0 0.44 132 69.0 5.1 0.48

射电源 b: 0.8 -114.0 0.73 267 43.0 42.1 0.84

射电源 c: -26.2 -131.0 0.59 99 56.5 33.4 0.90

实际观测: $T = 56.0$, $\sum Kp = 35.2$.

预报结果: $T = 56.5$, $\sum Kp = 33.4$

由 IPS 观测参数和激波模型计算得来的激波能量, 并经过 $E_i \sim M_i$ 的相关关系算出 $\sum Kp$, 于是, 由前述从属函数可算出模糊矩阵 A' , 乘上加权模糊集 W , 可得:

$$A^0 = A' \cdot W = \begin{vmatrix} 0.200 & 0.150 & 0.067 & 0.058 & 0.084 \\ 0.304 & 0.267 & 0.082 & 0.078 & 0.088 \\ 0.400 & 0.297 & 0.069 & 0.097 & 0.082 \end{vmatrix}$$

然后计算其同典型集 B 的贴近度:

$$(A', B) = \frac{\sum \min \begin{vmatrix} (A_{11} \wedge B_1) & (A_{12} \wedge B_2) & (A_{13} \wedge B_3) & (A_{14} \wedge B_4) & (A_{15} \wedge B_5) \\ (A_{21} \wedge B_1) & (A_{22} \wedge B_2) & (A_{23} \wedge B_3) & (A_{24} \wedge B_4) & (A_{25} \wedge B_5) \\ (A_{31} \wedge B_1) & (A_{32} \wedge B_2) & (A_{33} \wedge B_3) & (A_{34} \wedge B_4) & (A_{35} \wedge B_5) \end{vmatrix}}{\sum \max \begin{vmatrix} (A_{11} \vee B_1) & (A_{12} \vee B_2) & (A_{13} \vee B_3) & (A_{14} \vee B_4) & (A_{15} \vee B_5) \\ (A_{21} \vee B_1) & (A_{22} \vee B_2) & (A_{23} \vee B_3) & (A_{24} \vee B_4) & (A_{25} \vee B_5) \\ (A_{31} \vee B_1) & (A_{32} \vee B_2) & (A_{33} \vee B_3) & (A_{34} \vee B_4) & (A_{35} \vee B_5) \end{vmatrix}} = \begin{vmatrix} 0.48 \\ 0.84 \\ 0.90 \end{vmatrix}.$$

由上面贴近度计算看到, 第 b 和 c 两个射电源的观测, 其贴近度都很高, 分别为 0.84 和 0.90, 都远高于射电源 a 的贴近度, 均可视为最佳观测. 若按射电源 c 的观测来预报, $T_{\text{预}} = 56.5$ 小时, $\sum Kp_{\text{预}} = 33.4$, 同实际观测结果相比较, 其相对误差分别为

$$\Delta T_s = \frac{|T_s - T_{\text{预}}|}{T_s} \% = 1\%, \quad \Delta \sum Kp = (\sum Kp - \sum Kp_{\text{预}}) / \sum Kp \% = 4\%,$$

这是一个预报很好的例子. 按射电源 b 或 b 和 c 的平均来预报, 也可获得较好结果. 若按射电源 a 来作预报, 将大大偏离实际情况. 这个例子很直观地告诉我们, 应用模糊数学中的概念和方法, 使我们有较充分的定量依据来确定对较复杂现象的最佳预报方案.

四、预报试验结果

根据前面介绍的方法, 对 1984—1985 期间我们所掌握的观测资料, 可以确认的全部耀斑-IPS-激波事件共 40 个, 均进行预报试验, 主要结果如下:

1. 磁扰开始时间

图 1 给出耀斑磁扰开始时间的预报值 $T_{\text{预}}$ 与观测值 $T_{\text{观}}$ 之差 $\Delta T = T_{\text{观}} - T_{\text{预}}$ 的频次分布. 由图可看出 $\Delta T \leq 6$ 小时的事件数占 50%, $\Delta T \leq 12$ 小时, 为 70%, 而

$$12 < \Delta T \leq 18, \quad 18 < \Delta T \leq 24,$$

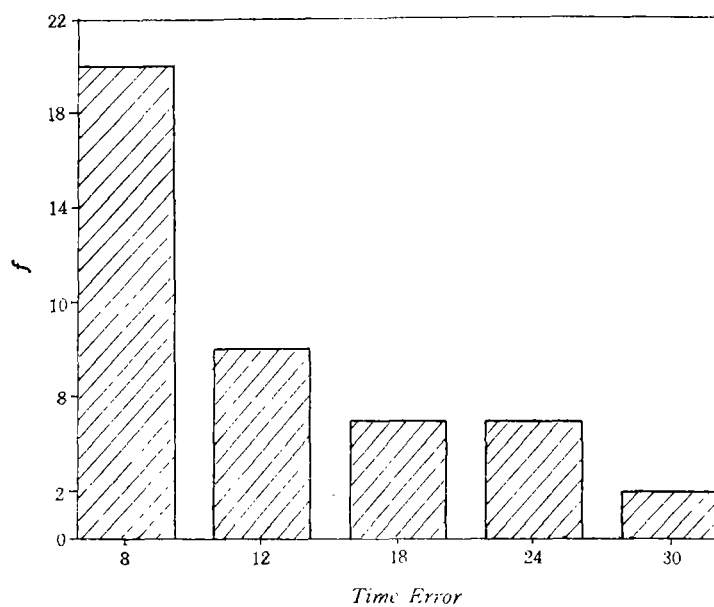
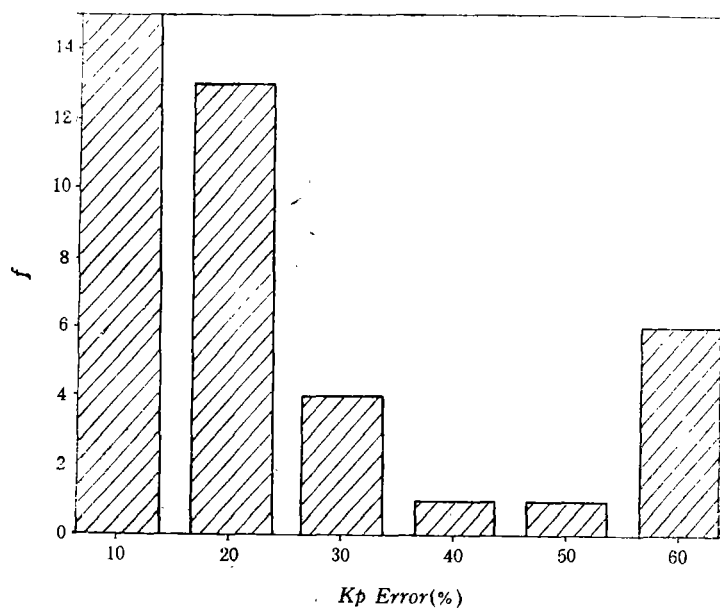
图 1 磁扰开始时间预报的相对误差的频次(f)分布图

Fig. 1 The frequency distribution for the relative error predicting initial time of the geomagnetic disturbances

图 2 地磁 ΣKp 指数预报的相对误差的频次(f)分布图Fig. 2 The frequency distribution for the relative error predicting the geomagnetic index ΣKp

分别为 12.5% 和 12.5%。

2. 磁扰幅度大小

图2给出耀斑-激波所引起的磁扰幅度大小的预报值 $\sum Kp_{\text{预}}$ 同 $\sum Kp_{\text{真}}$ 之差的相对误差的频次图。由图可以看到 $\delta \sum Kp / \sum Kp \leq 30\%$ 的事件数为32个,占总事件数的80%,而 $\delta \sum Kp / \sum Kp \geq 60\%$ 的事件数为6个,只占15%。

3. 预报结果一览表

图3按40个耀斑-激波事件的顺序编号分别依次给出磁扰开始时间和幅度大小的相对误差结果。图中实心方块符号表示 $\sum Kp \leq 20$ 的小事件,其余为大事件。可以看出,预报的相对误差,大多数事件在30%以下,而且相对误差大于30%者,多为缓始型小磁扰事件。

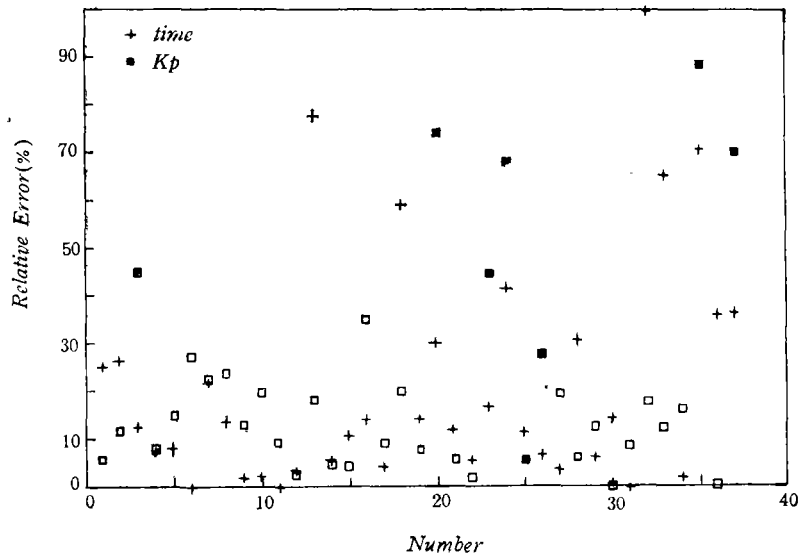


图3 预报结果一览表

Fig. 3 General survey of the prediction results

五、结论与讨论

1. 本文的初步预报试验表明,预报的准确度是比较高的,结果令人鼓舞。本文方法的基本特点是:观测上,以行星际闪烁观测为基础——在日地空间观测到扰动是否发生;物理上,进行了激波传播动力学效应的改正;方法上,运用模糊数学中从属函数的概念,选出最佳观测作预报依据。因而本文方法对于发展磁扰预报是有潜力的,值得进一步研究。

2. 本文结果也表明,尚待深究的问题有如:

①大事件的 $T_{\text{预}}$ 多大于 $T_{\text{真}}$,而小事件的 $T_{\text{预}}$ 多小于 $T_{\text{真}}$,可能原因来自二个方面:对大事件,主要是根据 IPS 观测确定激波面到达时间时,采用了较长的时间,而 IPS 观测确定的背景速度 V_0 平均比飞船观测低 50km/s,这些都导致了激波能量的低估以及由此而最终使得 $T_{\text{预}}$ 高于 $T_{\text{真}}$;对于小事件,主要问题是在小磁扰事件多为缓始型磁扰,观测上

磁扰开始时间很难确定,本文以极大为开始时间,而它总是滞后于激波到达的时间,因而造成小事件 $T_{\text{预}}$ 多小于 $T_{\text{观}}$ 。这需从定义上或经验上来重新定义磁扰开始时间,以使物理含意更清楚些。

②本文未对各种类型的磁扰事件分类,均采用同样的从属函数,这招致对大、小二端事件挑选,因从属函数值较低,而有所失误。因此,对各类磁扰进行聚类分析,分别设计从属函数,其预报效果将会更加令人满意。

以上问题,我们正在研讨之中。

致谢: 日本 Watanabe, T., Kakinuma, T., and Kojima, M., 博士们赠送了 IPS 观测资料,特此致谢。

参 考 文 献

- [1] 魏奉思, 中国科学 A 辑, 第 2 期, 第 186 页, 1987。
- [2] Wei Fengsi, Yang Guang and Zhang Gongling, Proceedings of Kunming Workshop On Solar Physics and Interplanetary Travelling Phenomena (Ed. by Cornelis de Jager and Chen Biao), Science Press, Vol. II, p. 1043, 1983.
- [3] 魏奉思, 空间科学学报, 第 2 卷, 第 63 页, 1982。

PRIMARY APPLICATION OF THE MEMBERSHIP FUNCTIONS IN THE GEOMAGNETIC DISTURBANCE PREDICTIONS

Wei Feng-si Cai Hong-chang

(Center for Space Science and Applied Research, Academia Sinica, Beijing)

Abstract

Prediction test for 40 geomagnetic disturbance events caused by the flare-associated interplanetary shock waves, which can be identified by interplanetary scintillation (IPS) observations during 1984—1985, are made based on the membership functions established by using observational data on the solar flares, the interplanetary shock waves and the geomagnetic disturbances during the period of 1966—1982. Main results are: (1) Prediction of the magnetic disturbance onset time——for 50% of all events, the relative error, $\delta T/T \leq 10\%$; and for 70%, $\delta T/T \leq 20\%$; (2) Prediction of the geomagnetic disturbance amplitudes——for 80% of all events, the relative error, $\delta \Sigma Kp / \Sigma Kp \leq 30\%$; and only for 15%, $\delta \Sigma Kp / \Sigma Kp \geq 60\%$. These results show that the method adoption in this paper has some potential prospects for investigating the flare-associated interplanetary shock waves and the geomagnetic disturbance predictions.

Key words Membership function, Geomagnetic disturbance, Prediction