行星际激波传播至 1AU 的渡越时间预测*

高　原[1,2]　冯学尚[1]

[1](中国科学院空间科学与应用研究中心　北京 100080)

[2](中国科学院研究生院)

摘　要　考虑了激波爆发源角宽度、能量、驱动时间、激波速度及其与背景太阳风之间的相互作用，利用流体力学扰动方程建立起一个激波扰动传播模型，用于研究激波从太阳传播到地球轨道附近 (1 AU 处) 所需要的时间 (渡越时间) 问题. 为印证扰动传播模型的适用性，利用 1979—1989 年间的 27 个激波事件，以及 1997 年 2 月到 2000 年 1 月间的 68 个激波事件，对激波到达地球轨道附近的渡越时间进行了预测，并将结果与 STOA 和 ISPM 预报模型结果进行了比较. 实验表明，该模型在所有 95 个事件中，渡越时间相对误差小于 10% 的事件数占总事件数的 25.26%; 相对误差小于 20% 的占总事件数的 50.53%; 相对误差小于 30% 的占总事件的 65.26%.

关键词　行星际激波; 扰动传播模型; 渡越时间预测

中图法分类号　P 353

Predicting the 1 AU Arrival Times of Interplanetary Shocks

GAO Yuan[1,2]　FENG Xueshang[1]

[1](*Laboratory for Space Weather, Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100080)

[2](*Graduate School, Chinese Academy of Sciences*)

Abstract　In order to predict the arrival time at 1 AU of interplanetary shocks, a simple model called shock propagation model is established here. In this model, the travel time is assumed to be a function of energy that is released from solar explosives, and pulse longitudinal width, pulse duration, the interaction of interplanetary shock and background solar wind are also taken into account. In order to verify the prediction efficiency, 27 interplanetary shock events from January 1979 to October 1989 and 68 interplanetary shock events from February 1997 to January 2000 are used for testing. Comparing the results of our shock propagation model with those obtained by STOA and ISPM models, we find that our disturbance propagation model is as good as the other two models, and in some cases even better. The shock propagation model can give the prediction for all the 95 shock events, while STOA model works for 89 events and ISPM model for only 72 events. There are 25.26% percentage of all the 95 events with the relative time error less than 10%, 50.53% of all the events with the relative time error less than 20%, 65.26% of all the events with the relative time error less

* 国家自然科学基金项目 (40374056, 40336053), 973 计划 (G200078405), 中国科学院 "百人计划" 项目和教育部地球空间环境与大地测量重点实验室共同资助

2004-05-26 收到原稿，　2005-05-08 收到修定稿

than 30%.

Key words Interplanetary shocks, Shock propagation model, Arrival time prediction

1 引言

空间天气学是一门迅速发展起来的把日地物理科学与地面和空间技术应用紧密结合在一起的学科. 它把太阳大气、行星际和地球磁层、电离层和中高层大气联系了起来, 作为一个有机的耦合系统来研究. 在太阳活动爆发时, 从太阳上逃逸出来的日冕物质以每秒数百公里至上千公里的速度在行星际空间传播, 形成了冲击波似的太阳风暴, 可在两三天的时间内到达地球, 其与地球磁层相互作用, 可在近地空间造成一系列灾害性空间天气事件, 如地磁暴、磁层亚暴和电离层暴等. 行星际空间作为中间媒介起到了承上启下的作用, 研究行星际激波事件的传播过程也就成了一个具有广泛意义的问题, 特别是对于强激波引起的地球环境灾害性事件就更是空间天气研究的关键学科问题之一.

有关空间天气的预报方法研究是空间天气研究的一个重要内容之一, 目前已经建立起来了一些预报模型, 可以预报激波何时到达, 以及到达地球时引起地磁暴的强度大小 (如地磁 Kp 指数或 Ap 指数), 内容十分丰富 [1],[2]. 就预测激波何时到达地球的问题, 国内外许多学者都进行了深入的研究. 魏奉思等人 [3]-[5] 也一直致力于此项研究, 他们以行星际闪烁观测记录到的耀斑-激波为基础, 综合了行星际扰动过程的物理模型并运用了模糊数学的概念, 提出了 "ISF" 方法, 该方法被成功地应用于对空间天气事件地磁扰动预报研究, 取得了良好效果.

在行星际激波渡越时间的预测方面, STOA 模型 [6],[7] 和 ISPM 模型 [8],[9] 也是较为常用的两个模型. STOA 模型是基于活塞驱动概念修改的爆炸波自相似理论, 由 Dryer 和 Smart 等人提出的, 用于预测与太阳耀斑伴生的行星际激波渡越时间. 该模型认为太阳耀斑 (爆炸) 驱动的行星际激波在驱动阶段保持常速度 v_s, 而在驱动结束后按爆炸波理论减速 $v_s \approx R^{-1/2}$. 模型认为激波是在一均匀的背景太阳风中传播的, 且激波的最快传播方向位于耀斑法向. ISPM 模型 [8],[9] 是 1990 年由 Smith 和 Dryer 等人提出的, 它是一个基于 2.5 维跨声速跨阿尔芬速区的 MHD 数值模拟研究行星际激波的预报模型. 该模型认为爆发源释放到太阳风中的能量和爆发源在太阳上的位置 (经度) 决定激波渡越到 1 AU 所需时间和激波强度, 模型还给出了一个利用太阳观测估计太阳爆发活动所释放能量的经验公式. 这两个模型都没有考虑背景太阳风速度的不均匀性和快速流与慢速流的相互作用, 而实际情况则复杂得多, 背景太阳风在很大程度上会影响激波的传播性质, Heinemann[10] 认为渡越时间不确定性的主要根源在于周围介质密度和速度的多样性.

预测行星际激波渡越时间的还有 Fry 和 Akasofu 等人提出的运动学 HAFv.2 模型 [11]. 该模型将太阳风速度、密度、磁场和动压视为时间的函数, 曾被用于模拟宁静期和活动期的太阳风状态, 也可用来研究行星际扰动传播以及三维日球电流片的结构. Fry 和 McKenna-Lawlor 等人把 STOA 模型、 ISPM 模型和 HAFv.2 模型三者进行了比较 [12],[13], 结论是 STOA 和 ISMP 模型需要将初始激波速度、持续时间、爆发源的位置作为输入参数, 另外 STOA 还需要日地连线 L1 点观测到的太阳风速度, 而 HAFv.2 模型为了考虑太阳风的不均匀性需要输入太阳源表面磁场以计算太阳附近的磁通量散度和太阳风速度. 在模型的输出上, 除了得出激波到达地球时间外, STOA 和 ISMP 分别给出激波马赫数 Ma 和激波强度指数 SSI (Shock Strength Index) 描述激波的强弱. 而 HAFv.2 模型则能输出行星际空间任意点上的太阳风速度、密度、动压和行星际磁场随时间的变化, 并通过引入激波搜寻指数 SSI 判断行星际激波渡越时间.

在日冕物质抛射 (CME) 的渡越时间预测方面, Gopalswamy 等人 [14] 给出了一个简单的运动学经验模型, 认为 CME 在行星际空间传播过程中的加速度线性依赖于其初始速度, CME 保持此匀加速运动直到某一截止距离, 随后按匀速或常速运动; Americo 等人 [15] 对 CME 的传播进行了一维数值模拟, 发现 CME 和背景太阳风的相互作用使得快速 CME 减速而慢速 CME 加速, 并且该加速或减速过程在不同日心距离上具有不同的特征. 最近 Xie 等人 [16] 提出了一种适用于 halo CME 的锥模型, 该模型通过对 halo CME 观测图象的处理来获取较为真实的 CME 径向速度, 从而对日冕物质抛射的渡越时间进行预测. 但由于仅对几个事件进

行了实验，其广泛的适用性还有待深入研究.

本文考虑激波爆发源角宽度、能量、驱动时间、激波速度及其与背景太阳风的相互作用，对基本的扰动方程做一级近似 [17]，建立了一个激波扰动传播模型，利用该模型对 95 个激波事件进行了试验.

2 扰动传播模型

2.1 方法描述

根据文献 [17] 的研究，把无量纲自变量 $x=\dfrac{r}{R}$，$y=\dfrac{u_0}{D}$ 代入到理想流体的 3 个守恒方程，

$$\frac{\partial\rho}{\partial t}+u\frac{\partial\rho}{\partial r}+\rho\left(\frac{\partial u}{\partial r}+\frac{2u}{r}\right)=0,$$
$$\rho\left(\frac{\partial u}{\partial t}+u\frac{\partial u}{\partial r}\right)+\frac{\partial p}{\partial r}=0,$$
$$\frac{\partial p}{\partial t}+u\frac{\partial p}{\partial r}+\gamma\cdot p\left(\frac{\partial u}{\partial r}+\frac{2u}{r}\right)=0.$$

其中，R 为激波面到爆发源点的距离；D 为激波速度；$D=\mathrm{d}R/\mathrm{d}t$；$u_o$ 为背景太阳风速度. 整理得方程的无量纲形式为

$$(f-x)h'_x+\frac{\lambda}{2}yh'_y+hf'_x=0,$$
$$-\frac{\lambda}{2}fh+(f-x)hf'_x+\frac{\lambda}{2}yhf'_y-\frac{2g}{x}+g'_x=0,$$
$$-\lambda g+(f-x)g'_x+\frac{\lambda}{2}yg'_y+g\left[\frac{2f}{x}(\gamma-1)+\gamma f'_x\right]=0,$$
$$\lambda=2\frac{R}{y}\frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}R}.$$

其中，f,h,g 分别表示无量纲的速度、密度和压力.

对该方程做一级近似解，可得到激波速度与背景风及日地距离之间的关系式为

$$D=\left[-2\lambda_1+\sqrt{(2\lambda_1)^2+\frac{E_s}{Au_0^2J_0R}+\frac{1}{2J_0}}\right]u_0.$$

其中，λ_1 是对 λ 的一级近似，这里取 -0.1808，E_s 是太阳爆发事件的总能量，A 是常数 (取值为 300 kg/m)，J_0 是无量纲化能量的基态值 (取值为 3/8). 对上述等式进行积分，得到

$$T=\frac{1}{u_0}\left\{4\lambda_1J_0[R+2E_0\cdot\ln(2J_0)-2E_0\cdot\ln(R+2E_0)]+\frac{1}{(2\lambda_1)^2+1/2J_0}\sqrt{X}+\frac{E_0/J_0}{2\cdot[(2\lambda_1)^2+1/2J_0]^{3/2}}\cdot\ln\left[1+\frac{2[(2\lambda_1)^2+1/2J_0]}{E_0/J_0}\cdot R-\frac{2\sqrt{(2\lambda_1)^2+1/2J_0}}{E_0/J_0}\cdot\sqrt{X}\right]-8\lambda_1J_0E_0\cdot\ln\left[\frac{\sqrt{X}+4\lambda_1E_0}{R+2E_0}-\frac{16\lambda_1+1/J_0}{8\lambda_1}\right]\right\}+T_0. \tag{1}$$

其中，T_0 由 $R=0$ 时 $T=0$ 的条件确定，并且

$$\sqrt{X}=\sqrt{\frac{E_0}{J_0}R+\left(4\lambda_1^2+\frac{1}{2J_0}\right)R^2},\quad E_0=\frac{E_s}{Au_0^2}. \tag{2}$$

显然，公式 (1) 和 (2) 结合反映了激波传播时间与太阳爆发事件能量、激波传播距离及背景风速度之间的关系，其详细推导见文献 [17].

2.2 能量值的估计

从上述公式 (1) 和 (2) 可以看出，要对行星际激波渡越时间进行预测，还需要太阳爆发事件所释放的总能量. 太阳爆发事件的总能量现今还不能直接通过观测得到，因此需要根据其它观测值来估计总能量. 这些观测值包括了对耀斑 (日冕物质抛射) 的可见光和软 X 射线观测以及对日冕中激波的 Ⅱ 型射电观测. 在这些量中，与能量关系最为密切的是激波速度、角宽度和持续时间，Smith 和 Dryer[9] 用这些量找到了一个与能量相关的经验公式：

$$E_s=Cv_s^3\omega(\tau+D). \tag{3}$$

其中，v_s 是激波速度，ω 是角宽度，τ 是驱动时间，C 和 D 是常数，分别取 0.283×10^{13} J/m$^3\cdot$s$^2\cdot$rad 和 0.52 h. Smith 和 Dryer[9] 曾将这里的经验能量估计用于其 ISMP 模型来预测行星际激波的扰动传播问题，我们将利用此近似能量公式于激波事件渡越时间的预测. 此时，公式 (1)、(2) 和 (3) 构成了本文所说的行星际激波扰动传播模型.

3 试验结果及比较

为了便于与 STOA 和 ISPM 模型进行比较，我们选取了 1979 年 1 月到 1989 年 10 月的 27 个激波事件 [9] 以及 1997 年 2 月到 2000 年 1 月的 68 个激波事件 [12]，共 95 个激波事件作为事例进行了计算. 结果见表 1. 表 1 中列出了事件的爆发时间、到达 1 AU 的渡越时间及各个模型的预测时间，其中 TT 表示激波实际渡越时间，$\mathrm{TT_r}$、$\mathrm{TT_p}$、$\mathrm{TT_s}$ 分

表 1 激波事件列表及试验结果

Table 1 Shock events and test results

event	time	TT/h	TT_r/h	TT_p/h	TT_s/h
1	1979-01-03	49.3	53.44	46.75	60.5
2	1979-02-16	63.76	54.77	65.97	65.16
3	1979-05-02	60.83	61.21	83.69	78.93
4	1979-07-04	45.54	60.14	35.23	46.74
5	1979-11-06	30.08	56.19	35.5	57.78
6	1979-11-08	70.7	50.97	78.55	62.9
7	1979-12-19	25.84	48.75	21.74	29.69
8	1980-04-09	53.53	56.46	46.02	48.18
9	1980-05-21	38.26	47.44	96.94	60.48
10	1980-06-03	59.36	64.68	60.26	76.16
11	1980-08-22	54.82	55.11	50.52	66.07
12	1981-02-15	87.15	57.36	80.09	67.46
13	1981-02-26	57.01	64.64	72.02	79.51
14	1981-04-04	83.55	57.13	17.41	884.35
15	1981-04-10	49.21	47.65	43.97	50.21
16	1981-04-10	19.81	20.11	17.68	31.41
17	1981-04-24	40.55	38.04	33.23	45.45
18	1981-05-13	36.34	40.39	41.71	42.14
19	1981-05-16	36.12	41.67	23.79	36.32
20	1981-08-28	64.61	61.28	53.53	70.71
21	1982-06-03	73.45	35.38	14.9	51.35
22	1982-06-06	53.4	34.18	40.3	45.4
23	1982-06-15	91.78	60.78	59.7	80.15
24	1982-06-18	84.56	50.63	59.27	61.96
25	1982-06-19	113.52	70.05	16.4	68.32
26	1982-07-22	86.57	47.78	26.36	56.92
27	1989-10-19	43.98	39.67	55.03	43.49
28	1997-02-09	58.3	56.55	68.8	66
29	1997-04-10	71	55.93	73.1	71.1
30	1997-05-15	68	54.75	29.5	45.8
31	1997-11-06	64.2	55.16	40	51.9
32	1997-11-30	65.9	64.74		86.7
33	1998-01-28	41.7	58.45	67.1	69.1
34	1998-05-23	87.1	55.13	75.8	69.3
35	1998-06-13	56.8	57.09	58.7	64.5
36	1998-08-11	91.4	59.95	82	78.5
37	1998-08-26	32.7	49.26	31.6	47.1
38	1998-09-06	66	49.11	58.7	67.7
39	1998-09-24	40.4	43.9	31.7	43.9
40	1998-10-02	41.6	51.77		63.2
41	1998-10-23	61.6	43.86		58.5
42	1998-11-08	56.5	56.96	56.8	63.1
43	1998-11-30	47.3	56.58	48.2	54.7
44	1998-12-26	74.9	62.54		76.4
45	1999-01-22	47.7	51.8		71.4
46	1999-02-11	51.7	67.47		84.2
47	1999-02-18	42.2	50.5	49.3	55.4

续表 1

event	time	TT/h	TT_r/h	TT_p/h	TT_s/h
48	1999-02-21	120.6	53.92	97	73
49	1999-03-01	42	53.23		74
50	1999-06-26	79.9	60.07	39	53
51	1999-07-02	67.2	48.38	82	66
52	1999-07-13	56.5	84.82		108
53	1999-07-22	79.6	73.71	88	90
54	1999-07-28	72	48.46		62
55	1999-07-30	40	62.46	88	79
56	1999-08-04	52.1	56.56	72	72
57	1999-08-08	49.1	51.59		73
58	1999-08-23	60.2	48.32		69
59	1999-08-23	46.2	53.18		
60	1999-08-31	55.4	37.22	72	58
61	1999-09-02	63.5	44.77	62	56
62	1999-09-15	51.7	44.3	100	62
63	1999-11-19	60.4	58.45	62	69
64	1999-11-23	68.1	58.62	63	68
65	1999-11-28	90.5	63.32		83
66	1999-12-26	115.4	79.88		100
67	1999-12-30	63.1	60.09		81
68	2000-01-22	79.1	75.63		
69	2000-02-11	65.3	47.9	76	61
70	2000-02-11	45.5	49.7	40	52
71	2000-02-14	50.8	43.76	78	57
72	2000-02-20	59.5	39.78		61
73	2000-04-06	48.6	42.83	45	45
74	2000-04-24	83.6	44.31		
75	2000-05-02	50.6	58.07	63	68
76	2000-05-12	45.6	66.82	64	74
77	2000-05-16	86.2	60.08	102	80
78	2000-05-23	89.3	54	100	75
79	2000-06-08	41.3	46.92	38	49
80	2000-06-11	87.4	45.18	59	57
81	2000-06-18	69.3	38.9	88	52
82	2000-06-21	85	60.41		
83	2000-06-23	64.9	62.55	70	76
84	2000-07-10	66.7	59.47	69	69
85	2000-07-13	59.9	44.13	45	46
86	2000-07-14	43.3	48.81		65
87	2000-07-15	28.3	50.24	25	29
88	2000-07-19	42.5	44.42		
89	2000-07-25	73.9	54.33		64
90	2000-07-28	74.9	65.11	68	80
91	2000-09-06	117.8	60.56		
92	2000-09-15	63.9	51.94	41	48
93	2000-10-03	34.9	53.73	41	54
94	2000-10-12	70.1	59.47	46	57
95	2000-10-31	62.7	53.85	48	57

别表示扰动传播模型、 ISPM 模型及 STOA 模型对事件的预测结果值.

利用上述扰动传播模型所得到的结果，我们可以得到两个关系图，即激波速度与到达时间的关系图 (如图 1 所示)，以及背景太阳风速度与到达时间的关系图 (如图 2 所示). 从中可以看到到达时间与两者都存在一定的关系，而且背景太阳风速度的影响更为密切，这说明背景太阳风速度是一个不可以忽视的因素.

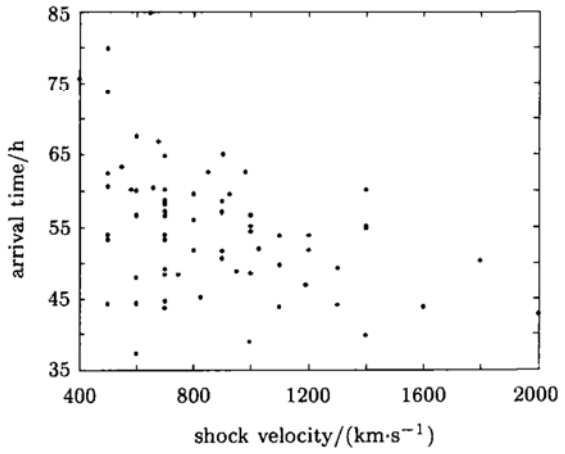


图 1 激波速度与到达时间的关系

Fig.1 The relationship between the interplanetary shock velocity and arrival time

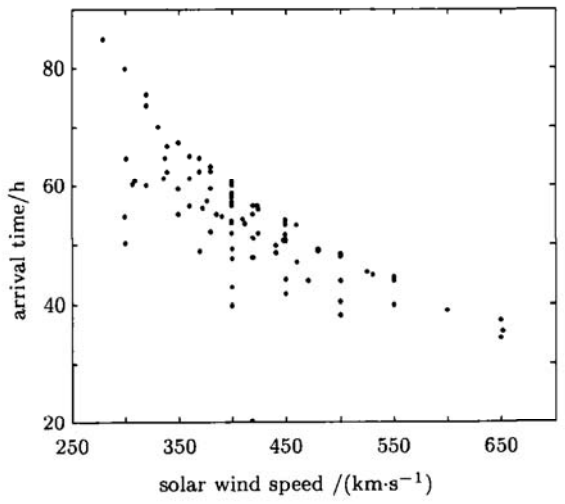


图 2 背景太阳风速度与到达时间的关系

Fig.2 The relationship between the solar wind speed and arrival time

从表 1 可以看出，对 95 个激波事件，扰动传播模型都进行了预测并给出了结果；而 STOA 模型只能对其中 89 个事件进行预测； ISPM 模型能预测的事件数目最少，为 72 个. 为了能对 3 个模型进行公平比较，就只对 ISPM 模型预测到的这 72 个事件来进行分析. 从表 2 中看到， ISPM 模型和 STOA 模型对事件 14 的预报误差都很大 (后面我们将进行分析说明).

下面是 3 个模型的绝对误差和相对误差统计值，其中下标 r 表示扰动传播模型， p 表示 ISPM 模型， s 表示 STOA 模型. 绝对误差为

$$\sum_i \Delta T_{\mathrm{r}} = 1082.5\,\mathrm{h}, \quad \overline{\Delta T}_{\mathrm{r}} = 15.03\,\mathrm{h};$$

$$\sum_i \Delta T_{\mathrm{p}} = 1175.33\,\mathrm{h}, \quad \overline{\Delta T}_{\mathrm{p}} = 16.32\,\mathrm{h};$$

$$\sum_i \Delta T_{\mathrm{s}} = 1674.05\mathrm{h}, \quad \overline{\Delta T}_{\mathrm{s}} = 23.25\,\mathrm{h}.$$

除去事件 14 后，

$$\sum_i \Delta T_{\mathrm{r}} = 1056.08\,\mathrm{h}, \quad \overline{\Delta T}_{\mathrm{r}} = 14.87\,\mathrm{h};$$

$$\sum_i \Delta T_{\mathrm{p}} = 1041.43\,\mathrm{h}, \quad \overline{\Delta T}_{\mathrm{p}} = 14.67\,\mathrm{h};$$

$$\sum_i \Delta T_{\mathrm{s}} = 873.25\,\mathrm{h}, \quad \overline{\Delta T}_{\mathrm{s}} = 12.30\,\mathrm{h}.$$

相对误差为

$$\overline{\Delta T_{\mathrm{r}}/T} = 24.28\%,$$

$$\overline{\Delta T_{\mathrm{p}}/T} = 26.89\%, \quad \overline{\Delta T_{\mathrm{s}}/T} = 34.37\%.$$

除去事件 14 后，

$$\overline{\Delta T_{\mathrm{r}}/T} = 24.18\%, \quad \overline{\Delta T_{\mathrm{p}}/T} = 25.01\%,$$

$$\overline{\Delta T_{\mathrm{s}}/T} = 21.35\%.$$

为了能直观地看出 3 个模型的比较结果，给出的柱状图结果如图 3 和图 4 所示.

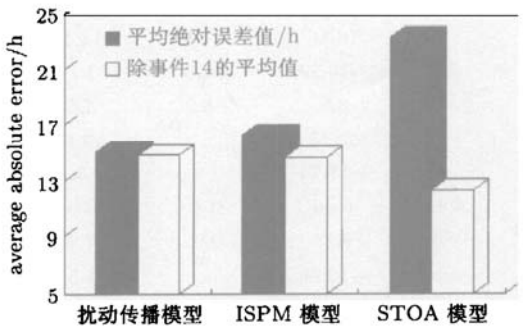


图 3 3 个模型绝对误差值的比较

Fig.3 Comparison of the average absolute errors for the three models

表 2 事件误差分析

Table 2 Error analysis

event	Δ TT_r/h	Δ TT_p/h	Δ TT_s/h	(Δ TT_r/TT)/(%)	(Δ TT_p /TT)(%)	(Δ TT_s /TT)/(%)
1	4.14	−2.6	11.2	8.4	5.27	22.72
2	−8.99	2.2	1.4	14.1	3.45	2.2
3	0.38	22.9	18.1	0.62	37.65	29.76
4	14.59	−10.3	1.2	32.04	22.62	2.64
5	26.11	5.4	27.7	86.8	17.95	92.09
6	−19.73	7.8	−7.8	27.91	11.03	11.03
7	22.91	−4.1	3.85	88.66	15.87	14.9
8	2.93	−7.51	−5.35	5.47	14.03	9.99
9	9.18	58.68	22.22	23.99	153.37	58.08
10	5.32	0.9	16.8	8.96	1.52	28.3
11	0.29	−4.3	11.25	0.53	7.84	20.52
12	−29.79	−7.06	−19.7	34.18	8.1	22.6
13	7.63	15	22.5	13.38	26.31	39.47
14	−26.42	133.9	800.8	31.62	160.26	958.47
15	−1.56	−5.2	1	3.17	10.57	2.03
16	0.3	−2.1	11.6	0.02	10.6	28.25
17	−2.51	−7.3	4.9	6.19	18	12.08
18	4.05	5.4	5.8	11.14	14.86	15.96
19	5.55	−12.3	0.2	15.37	34.05	0.55
20	−3.33	−11.1	6.1	5.15	17.18	9.44
21	−38.07	41.4	−22.1	51.83	56.36	30.09
22	−19.22	−13.1	−8	35.99	24.53	14.98
23	−31.01	67.92	−11.63	33.79	74	12.67
24	−33.93	−25.3	−22.6	40.13	29.92	26.73
25	−43.47	2.9	−22.6	38.29	2.55	19.91
26	−38.79	−60.21	−29.65	44.81	69.55	34.25
27	−4.31	11.05	−4.8	9.8	25.13	1.09
28	−1.75	10.5	7.7	3	18.01	13.21
29	−15.07	2.1	0.1	21.23	2.96	0.14
30	−13.25	−38.5	−22.2	19.49	56.62	32.65
31	−9.04	−24.2	−12.3	14.08	37.69	19.16
32	−1.16		20.8	1.76		31.56
33	16.75	25.4	27.4	40.17	60.91	65.71
34	−31.97	−11.3	−17.8	32.92	12.97	20.44
35	0.29	1.9	7.7	0.51	3.35	13.56
36	−31.45	−9.4	−12.9	34.41	10.28	14.11
37	16.56	−1.1	14.4	50.64	3.36	44.06
38	−16.89	−7.3	1.7	25.59	11.06	2.58
39	3.5	−8.7	3.5	8.66	21.53	8.66
40	10.17		21.6	24.45		51.92
41	−17.74		−3.1	28.8		5.03
42	0.46	0.3	6.6	0.81	0.53	11.68
43	9.28	0.9	7.4	19.62	1.9	15.64
44	−12.36		1.5	16.5		2
45	−4.9		23.7	10.27		49.69
46	15.77		32.5	30.5		62.86
47	8.3	2.1	8.2	19.67	4.45	17.37

续表 2

event	Δ TT_r/h	Δ TT_p/h	Δ TT_s/h	(Δ TT_r/TT)/(%)	(Δ TT_p /TT)(%)	(Δ TT_s /TT)/(%)
48	−66.68	−23.6	−47.6	55.29	19.57	39.47
49	11.23		32	26.74		79.19
50	−19.38	−40.9	−26.9	24.82	51.19	33.67
51	−18.82	14.8	−1.2	28.01	22.02	1.79
52	28.32		51.5	50.12		91.15
53	−5.89	8.4	10.4	0.74	10.55	13.07
54	−23.54		−10	32.69		13.89
55	22.46	48	39	56.15	120	97.5
56	4.46	19.9	19.9	8.56	38.2	38.2
57	2.49		23.9	5.07		48.68
58	−11.88		8.8	19.73		14.62
59	6.89			15.11		
60	−18.18	16.6	2.6	32.82	29.96	4.69
61	−18.73	−1.5	−7.5	29.5	2.36	11.81
62	−7.4	48.3	10.3	14.31	93.42	19.92
63	−1.95	1.6	8.6	3.23	2.65	14.24
64	−9.48	−5.1	−0.1	13.92	7.49	0.15
65	−27.18		−7.5	30.03		8.29
66	−35.52		−15.4	30.8		13.34
67	−3.01		17.9	4.77		28.37
68	−3.47			4.39		
69	−17.3	10.7	−4.3	26.65	16.39	6.58
70	4.2	−5.5	6.5	9.23	12.09	14.29
71	−7.04	27.2	6.2	13.86	53.54	12.2
72	−19.72		1.5	33.14		2.52
73	−5.77	−3.6	−3.6	11.87	7.41	7.41
74	−39.29			47		
75	7.47	12.4	17.4	14.76	24.51	34.39
76	21.22	18.4	28.4	46.54	40.35	62.28
77	−26.12	15.8	−6.2	30.3	18.33	7.19
78	−35.3	10.7	−14.3	39.53	11.98	16.01
79	5.62	−3.3	7.7	13.61	7.99	18.64
80	−42.22	−28.4	−30.4	48.31	32.49	34.78
81	−30.4	18.7	−17.3	43.87	26.98	24.96
82	−24.59			28.93		
83	−2.35	5.1	11.1	3.62	7.86	17.1
84	−7.23	2.3	2.3	10.84	3.45	3.45
85	−15.77	−14.9	−13.9	26.33	24.87	24.14
86	5.51		21.7	12.73		50.12
87	21.93	−3.3	0.7	77.53	11.66	2.47
88	1.92			4.52		
89	−19.57		−9.9	26.48		13.4
90	−9.79	−6.9	5.1	13.07	9.21	6.81
91	−57.24			48.59		
92	−11.96	−22.9	−15.9	18.72	35.84	24.88
93	18.83	6.1	19.1	53.95	17.48	54.73
94	−10.63	−24.1	−13.1	15.16	34.38	18.69
95	−8.85	−14.7	−5.7	14.11	23.44	9.09

注：带有符号 Δ 表示绝对误差值，带有符号 Δ/TT 表示相对误差值.

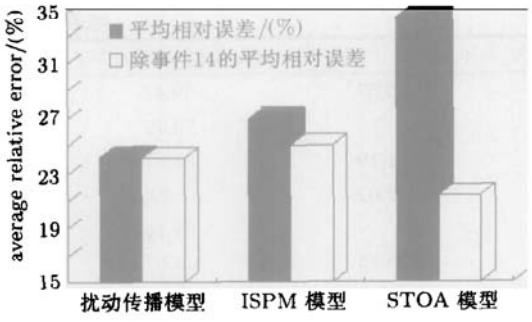


图 4 3 个模型相对误差值的比较

Fig.4 Comparison of the average relative error for the three models

从图 3 和图 4 中可以看到，对于考虑事件 14 和不考虑事件 14,ISPM 模型和 STOA 模型之间差异很大. 为什么会出现如此大的差别呢？因为事件 14 之前的 20 h 之内，在接近赤道 11° 的范围内也有一系列的太阳爆发事件，根据 II 型射电的观测估计速度可达 1200 km/s, 由于有多个事件的相互作用导致朝地球而来的激波会变得非常强. 也就是说事件 14 本身的速度比这些事件的速度慢，但它会被周围的介质加速，即它与周围行星际介质间的相互作用是不能忽视的. 而 STOA 模型和 ISPM 模型并没有考虑对激波事件和背景太阳风之间的相互作用，因此导致了误差很大；在本文使用的扰动传播模型中，考虑了激波速度和背景太阳风速度之间的相互作用，对动力学基本方程的扰动做一级近似，因此结果也比这两个模型要好. 自然地，从图 3 和图 4 中就看出我们的模型对于考虑事件 14 和不考虑事件 14 的结果并没有差别.

从柱状图中还可以看到，在不考虑事件 14 的情况下，似乎 STOA 模型的结果最为理想. 但是对所有 95 个事件进行统计，我们使用的扰动传播模型相对误差平均值为 24.01%, 而对 STOA 模型预测到的 89 个事件进行统计， STOA 模型的相对误差平均值为 23.97%. 与统计 72 个事件的结果比较，扰动传播模型明显误差降低了，而 STOA 模型的误差却增加了. 这说明分析的事件越多我们的误差就能越小， STOA 模型则不然.

实验表明，我们的扰动模型在所有 95 个数据中，相对误差小于 10% 的事件数为 24 个，占总事件的 25.26%, 即有 1/4 的事件预报得非常精确；相对误差小于 20% 的事件数为 48 个，占总事件数的 50.53%, 即有 1/2 的事件预报精确度能达到 20% 以内；相对误差小于 30% 的事件数为 62 个，占总事件的 65.26%; 相对误差在 30%—60% 的事件数为 30 个，占总事件的 31.58%; 剩下的 3 个事件相对误差在 60%—80%, 所有事件相对误差小于 80%, 即误报率很低. 因为 3 个模型能预报的事件不同，因此选定 ISPM 模型预报的 72 个事件进行比较如下：相对误差小于 5% 的事件，扰动模型有 10 个，占总事件数的 13.89%, ISPM 模型有 12 个，占总事件数的 16.67%, STOA 模型也有 12 个；相对误差在 5%—10% 的事件，扰动模型有 9 个，占总事件数的 12.5%, ISPM 模型有 8 个，占总事件数的 11.11%, STOA 模型也有 8 个；相对误差大于 60% 的事件，扰动传播模型只有 3 个，占总事件数的 4.17%, 但是 ISPM 和 STOA 模型分别有 7 个和 5 个，占总事件数的 9.72% 和 6.94%; 大于 100% 的错报事件，扰动模型没有，而 ISPM 和 STOA 模型分别有 3 个和 1 个，占总事件数的 4.17% 和 1.39%, 表明其他两个模型的错报率比扰动模型大.

4 讨论

本文中利用扰动传播模型对 95 个激波事件的渡越时间进行了预测，模型能对所有事件给出预报值， STOA 模型能给出 89 个预报值，而 ISPM 模型则只能给出 72 个. 从总的平均绝对误差和平均相对误差来看，我们的模型结果比其他两个模型理想. 再者，对于相对误差大于 60% 的很不精准的事件，扰动传播模型只有 3 个，占总事件数的 4.17%, 但 ISPM 和 STOA 模型分别有 7 个和 5 个，占总事件数的 9.72% 和 6.94%; 对于误差大于 100% 的错报事件，扰动传播模型没有，而 ISPM 和 STOA 模型分别有 3 个和 1 个，占总事件数的 4.17% 和 1.39%. 这说明扰动传播模型对行星际激波渡越时间的预测结果比 STOA 和 ISMP 模型更精确、更好.

从图 3 和图 4 中可发现，对于我们所使用的扰动传播模型，考虑事件 14 和不考虑事件 14 所计算的相对误差几乎没有变，分别为 24.28% 和 24.18%, 证明了此方法能很好地体现太阳爆发所引起的激波事件与背景太阳风之间的相互作用；对于 ISPM 模型和 STOA 模型考虑事件 14 和不考虑事件 14 所计算的相对误差就相差很多了，特别是 STOA 模型，考虑了事件 14 时相对误差达到 34.48%, 而不考虑时也有 23.97%. 从整体来看，仍然是扰动传播模型

所得的结果令人满意，毕竟太阳风事件并不是孤立的，而是要与背景太阳风相互作用的.

但是，这里给出的模型仅考虑了根据观测确定的激波速度、根据经验确定的能量、激波驱动时间、角宽度和背景太阳风速度之间的相互关系，因此必须客观地说这是一个在某些理想假设下的模型. 更实际的模型还应考虑激波的传播方向、太阳风背景速度密度的非均匀性对传播的影响，更重要的是考察行星际磁场和电流片对行星际激波传播影响等，这将是我们进一步努力的方向.

参考文献

[1] Yurchyshyn V, Wang Haimin, Abramenko V. Correlation between speeds of coronal mass ejections and the intensity of geomagnetic storms. *Space Weather*, 2004, S02001, doi:10.1029/2003SW000020

[2] Song P, Singer H J, Siscoe G L. Space Weather. American Geophysical Union: Washington DC, 2001

[3] Wei Fengsi, Cai Hongchang. Preliminary application of fuzzy clustering in the flare-geomagnetic disturbance analysis. *Chin. J. Space Sci.*, 1990, **10**(1):35—41. in Chinese (魏奉思, 蔡红昌. 从属函数在地磁扰动预报研究中的初步应用. 空间科学学报, 1990, **10**(1):35—41)

[4] Wei Fengsi, Cai Hongchang, Feng Xueshang. A prediction method of geomagnetic disturbances based on IPS observations dynamics fuzzy mathematics. *Adv. Space Res.*, 2003, **31**(4):1069—1073

[5] Wei Fengsi, Xu Ya, Feng Xueshang. Prediction tests by using ISF method for the geomagnetic disturbances. *Sci. China*, 2002, **45**(E5):525—530. in Chinese

[6] Dryer M, Smart D F. Dynamical models of coronal transients and interplanetary disturbances. *Adv. Space Res.*, 1984, **4**:291—301

[7] Smart D F, Shea M A. A simplified model for timing the arrival of solar flare-initiated shocks. *J. Geophys. Res.*, 1985, **90**:183—190

[8] Smith Z, Dryer M. MHD study of temporal and spatial evolution of simulated interplanetary shocks in the ecliptic plane within 1AU. *Solar Phys.*, 1990, **129**:387—405

[9] Smith Z, Dryer D. The interplanetary shock propagation model: a model for predicting solar-flare-caused geomagnetic storms, based on the 2 1/2D, MHD numerical simulation results from the interplanetary global model. NOAA technical memorandum ERL SEL-89, 1995

[10] Heinemann M. Effects of solar wind inhomogeneities on transit times of interplanetary shock waves. *J. Atmos. Solar Terr. Phys.*, 2002, **64**:315—325

[11] Dryer M, Fry C D *et al.* Prediction in real time of the 2000 July 14 heliospheric shock wave and its companions during the "Bastille" epoch. *Solar Phys.*, 2001, **204**:267—286

[12] Fry C D, Dryer M, Smith Z, Sun W, Deehr C S, Akaslfu S I. Forecasting solar wind structures and shock arrival times using an ensemble of models. *J. Geophys. Res.*, 2003, **108**(A2):1070—1089

[13] McKenna-Lawlor S M P, Dryer M, Smith Z *et al.* Arrival times of Flare/Halo CME associated shocks at the Earth: comparison of the predictions of three numerical models with these observations. *Ann. Geophys.*, 2002, **20**:917—935

[14] Gopalswamy N *et al.* Predicting the 1-AU arrival times of coronal mass ejections. *J. Geophys. Res.*, 2001, **106**(A12):29 207—29 217

[15] Americo J, Gonzalez-esparza *et al.* A numerical study on the acceleration and transit time of coronal mass ejections in the interplanetary medium. *J. Geophys. Res.*, 2003, **108**(A1):1039—1045

[16] Xie H, Ofman L, Lawrence G. Cone model for halo CMEs: Application to space weather forecasting. *J. Geophys. Res.*, 2004, **109**: A03109, doi:10.1029/2003JA010226

[17] Wei Fengsi. The blast wave propagating in a moving medium variable density. *Chin. J. Space Sci.*, 1982, **2**(1):63—72. in Chinese (魏奉思. 冲击波在变密度、运动介质中的传播. 空间科学学报, 1982, **2**(1):63—72)