

台风路径数值预报模式的并行化及路径预报误差分析*

麻素红** 瞿安祥 张 怡

(国家气象中心,北京 100081) (北方计算中心,北京 100091)

摘 要

国家气象中心台风路径数值预报模式经过串行优化及程序并行,成功地实现了在国产超级计算机神威上的并行运算,并可满足业务时效要求。基于并行程序及神威机计算平台的台风路径数值预报业务系统于 2002 年 6 月 30 日投入实时运行,其初估场与侧边界条件从 T106L19 模式产品升级为 T213L31 模式产品(称为基于 T213 台风预报系统,原串行系统称为基于 T106 台风预报系统)。通过对 2002 年夏秋季台风路径的检验,总体来看,基于 T213 台风预报系统 48 h 内的平均路径预报误差小于基于 T106 台风预报系统的路径预报误差。对西行及西北行登陆的台风,基于 T106 台风预报系统的 48 h 预报好于基于 T213 台风预报系统的预报。对于转向台风而言,转向后的预报,基于 T213 台风预报系统的预报要好于基于 T106 台风预报系统的预报,有效地减小了基于 T106 台风预报系统对转向台风路径预报的系统性误差:即台风转向后预报路径较实况路径偏西。

关键词: 台风路径预报模式 并行化 路径预报误差

引 言

热带气旋是影响我国沿海地区最严重的自然灾害之一,它所带来的强风、暴雨和海潮往往会严重危害人民生命及财产安全。能否准确的预报热带气旋的移动路径是减轻损失的关键。国家气象中心的台风路径数值预报模式自从 1996 年投入业务运行以来,已经稳定运行 6 年。在这 6 年里,该模式经历了扩大区域^[1]、两次嵌入人造台风^[2]和细网格初始移动^[1]等改进,技术上逐渐成熟,预报效果不断提高。

该系统自投入业务以来,一直在 Cray92(C92)向量机上稳定运行。随着时间的推移,C92 的服务期已满,各种硬件设备的维护已不能完全提供保障。为了保证业务运行,国家气象中心决定在国产超级计算机神威上建立新的台风路径数值预报系统,以代替 C92 机上基于 T106 台风预报系统。

国产超级计算机神威(SW)属于可伸缩的大规模并行处理计算机,通常称之为 MPP 机(Massively Parallel Processor),它采用的是同构、分布共享主存储器体系结构,共有 384 个处理单元(PE)。每个处理单元内存为 128 MB,处理单元间以内部互连网络连接,各处理单元既可独立运行也可通过相互间的网络实现并行。每个处理单元还可通过 16 个

* 本文受到国家气象中心业务发展课题 YF2001 A-05 资助。

** 中国科学院大气物理研究所在读博士。

2003-03-19 收到,2003-05-29 收到修改稿。

I/O节点访问磁盘阵列(简称 IOP)。

基于 T106 台风预报系统是依托于 C92 向量机研制而成的,有 3 万行串程序,252 个子程序。因而在神威计算机上运行原有的台风路径预报模式,必须对原程序代码进行优化及并行化,这样才能保证在新环境下运行的时间满足业务需要。另外,国家气象中心新一代中期预报模式由 T106L19 升级为 T213L31,因此,向神威机并行化移植的台风模式系统的初估场及侧边界条件也需由 T106L19 产品改为 T213L31 产品。

1 台风路径数值预报模式

国家气象中心的台风路径数值预报模式是一个双重嵌套的有限区域格点模式,有限区域外围粗网格模式与全球业务谱模式嵌套,粗网格模式内部再嵌套一个细网格模式。粗、细网格模式间采用时间同步单向嵌套。粗网格模式的预报范围为: $0^{\circ} \sim 50.625^{\circ} \text{N}$, $84.375^{\circ} \sim 161.25^{\circ} \text{E}$,格距为 0.9375° 。细网格模式的预报范围为: $6.5625^{\circ} \sim 43.125^{\circ} \text{N}$, $101.25^{\circ} \sim 150.9375^{\circ} \text{E}$,格距为 0.46875° (大约 50 km)。模式水平方向采取的是经纬网格坐标,垂直方向取 σ 坐标,层次为不等距 15 层,水平速度 u 、 v ,温度 T ,比湿 q 都放在模式层的整层上,而垂直速度和位势高度 ϕ 放在模式层的半层上。模式的水平网格采用 Arakawa C 格式,变量在水平方向上交错分布^[3]。

基于 T106 台风预报系统主要包括如下几个部分:

① 前处理 (a) 从背景场中消除不准确的浅台风^[4],得出大尺度环境场;(b) 构造对称的人造台风模型^[5],并嵌入到大尺度环境场中,改善初始场中台风环流的描述;(c) 有限区域多变量最优插值客观分析;(d) 为了弥补在客观分析时对台风结构造成的影响,在分析场中二次嵌入对称人造台风模型;

② 运行台风路径预报模式;

③ 后处理生成预报产品。

2 并行化方案设计及检验

基于 T106 台风预报系统运行时间主要集中在台风路径预报模式上,并行化将主要针对此模式展开,而前处理及后处理部分将串行移植到神威机上。

台风路径数值预报模式包括粗网格与细网格两个区域,具有相同的预报方程、侧边界处理方案、时间积分方案及物理过程。通过对模式各部分的运行时间进行分析可以发现,双重嵌套模式时间积分的运行时间占整个模式系统运行时间的 99%,而其中物理过程是计算量最为集中的部分。物理过程的计算是在每个纬圈上依次进行的,各纬圈计算量接近,各纬圈的计算与本次时间积分中其它纬圈的计算结果无关,只与上次时间积分中相邻纬圈的计算结果有关。因此将采用如下并行化方案:① 联合采用数据并行和消息传递两种并行模型,对纬圈实行并行,将与纬圈相关的数据与计算按块分布的方式平均分配到各处理机上进行并行计算;② 采用 HPF 语言来实现整个系统的并行化设计,对于一些性能要求高的子程序用并行函数实现,以满足时效要求。

为了保证并行移植工作的顺利进行及并行结果的正确性,移植分以下几步:

① 模式串行移植 将 Cray92 机上的台风路径数值预报模式代码模块移植到神威机器上,保证串程序移植的正确。

② 程序的优化 为了进一步减低系统运行开销,为系统的并行实现奠定良好的基础对串行移植的程序代码进行优化并验证优化后串行模块的正确性;

③ 并行化处理 将优化成功的串程序按上述并行化方案进行并行处理;表 1 为模式并行效率检验。

表 1 模式预报子系统并行效率测试结果

子系统名称	PE 数	串行运行时间(s)	并行运行时间(s)	加速比
模式	8	15310	4952	3.09

从表中数据可以看出,在时间上,并行化后的模式能够满足业务时效需求,但从效能上看显然不够理想,其中神威机 128 MB 的内存是制约并行效能的一个重要因素,较小的内存使得数据不得不经常在内外存做频繁的交换,影响了并行效率。

④ 并行化正确性检验 运用多个个例数据对并行后的主模式进行检验,在初值相同的前提下,将神威上运行的并行结果与 Cray92 上运行的串行结果进行比较,检验结果证明,模式的优化及并行化是正确的。

3 基于 T213、T106 台风预报系统预报结果的比较

基于 T106 台风预报系统一直同原中期数值预报业务模式 T106L19 相嵌套。新一代中期数值预报模式 T213L31 于 2002 年正式投入业务运行。基于 T213 台风预报系统将同新一代中期预报谱模式 T213L31 嵌套。同原中期预报系统 T106L19 模式相比,新一代中期预报谱模式 T213L31 有较高的模式分辨率及较完善的物理过程^[6],同时其预报效果也有较大改进^[7]。

3.1 平均路径预报误差

基于 T213 台风预报系统于 2002 年 6 月 30 日投入实时运行,对从 No.05 台风开始的 14 个台风进行了 24h 及 48h 实时预报。14 个台风中,西行登陆台风 2 个(No.16、No.18);西北行登陆台风 1 个(No.09);转向台风 6 个(No.05、No.06、No.07、No.13、No.15、No.21);东北行台风 1 个(No.08);No.11 号台风是打转台风;No.12、No.14、No.20 等 3 个台风为北上台风。台风路径预报误差检验结果表明,从总体来看,基于 T213 台风预报系统由于同 T213L31 嵌套,其预报效果比基于 T106 台风预报系统好,其中 24 h 平均误差减少 24.5 km,约占总平均误差的 13.2%,48 h 减少 23.7 km,约占 7.4%,详细误差分析见表 2。

为了进一步了解神威机台风路径预报系统的预报特点,分析了每个台风平均路径误差,图 1 及图 2 分别为所有台风 24 h 及 48 h 路径预报误差。

表 2 2002 年基于 T106 台风预报系统同基于 T213 台风预报系统的路径预报误差比较 (km)

	预报时效 (h)			
	12	24	36	48
基于 T106 系统	108.3(116)	186.3(104)	244.5(91)	319.5(77)
基于 T213 系统	104.5(119)	161.8(107)	214.8(94)	295.8(80)
百分比	- 3.5	- 13.2	- 12.1	- 7.4

注:括号中数字为预报次数。由于 T106L19 3 次未正常提供背景场及侧边界,神威机的预报次数比 C92 多 3 次。

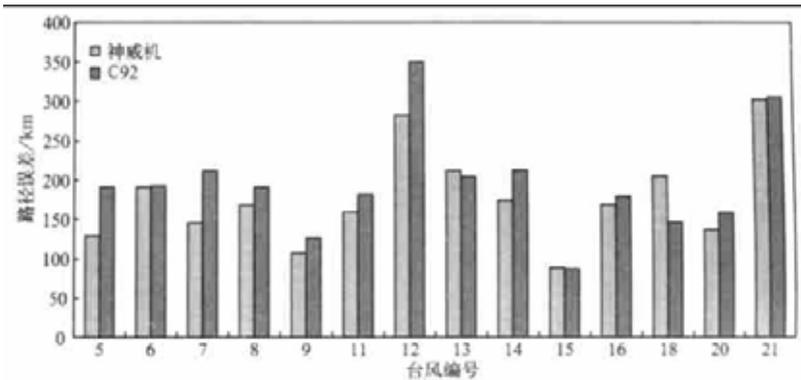


图 1 14 个台风的 24 h 预报路径平均误差

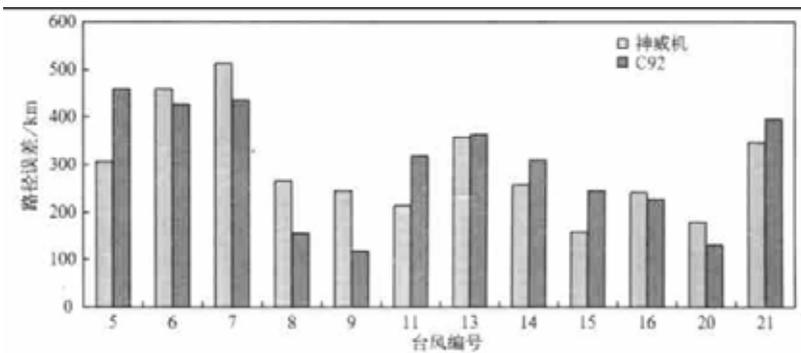


图 2 12 个台风的 48 h 预报路径平均误差

从图 1 可以看出,除 No.13(两系统预报路径平均误差分别为 212.1 km、203.8 km)、No.15(误差为 89 km、87.2 km)、No.18(误差为 204.5 km、146 km)台风外,基于 T213 台风预报系统预报的其余 11 个台风的 24 h 平均误差均比基于 T106 台风预报系统平均误差小。由此可以看出由于初始场及侧边界由 T106L19 升级为 T213L31,基于 T213 台风预报系统的 24h 路径预报得到改进。两个系统的 48 h 路径预报(图 2)各有千秋,基于 T213 台风预报系统在 12 个台风 48h 平均路径误差检验中,有 6 个台风(No.05、No.11、No.13、No.14、No.15、No.21)的平均路径误差小于基于 T106 台风预报系统的平均路径预报误差。6 个台风中转向路径有 4 个,为 No.05、No.13、No.15、No.21;北上路径一个 No.14;打转路径一个 No.11。而 48 h 路径误差大于基于 T106 台风预报系统的 6 个台风中西行或西北行登陆的台风有两个:No.09、No.16,东北行台风一个 No.08,西北行转

向的台风两个 No.06、No.07,北上路径一个 No.20。从2002年不同移向(转向、西行登陆或西北行登陆、打转、东北行及北上)台风的平均路径误差分析得出,①基于T213台风预报系统对西行登陆或西北行登陆的台风48h路径预报比基于T106台风预报系统预报效果差;②对于转向台风预报总体上预报效果好于基于T106台风预报系统预报;③两个系统对西行或西北行登陆的台风预报均明显比对转向路径的预报好,即对西行登陆或西北行登陆的台风有较好的预报能力;④而对北上路径预报基本好于基于T106台风预报系统的预报。图3为西行登陆或西北行登陆台风及转向台风的误差分布。

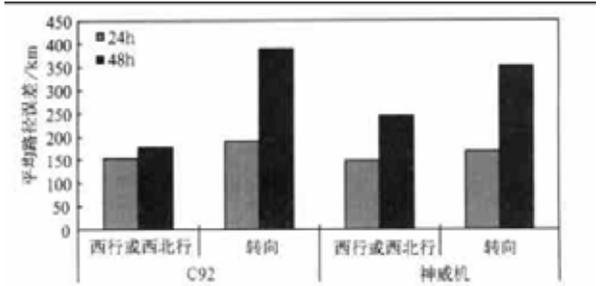


图3 基于T213、T106台风预报系统西行或西北行及转向台风平均路径误差分布

3.2 转向台风的误差分布特点

仔细分析每个转向台风路径误差分布特点可以发现,对于转向台风,通常在转向之前基于T213台风预报系统的预报效果比基于T106台风预报系统差或相当,而转向之后同基于T106台风预报系统的路径预报相当或明显好于基于T106台风预报系统的路径预报。基于T213台风预报系统有效的减小了基于T106台风预报系统对转向台风的系统性预报误差:台风转向后所预报路径比实况路径偏西。图4展示了两个系统对转向台风路径预报的特点。

从图4可以看出,对于No.05台风,基于T106台风预报系统在转向点之前的预报一直预报此台风将登陆我国;而基于T213台风预报系统提前24h预报了No.05号台风的

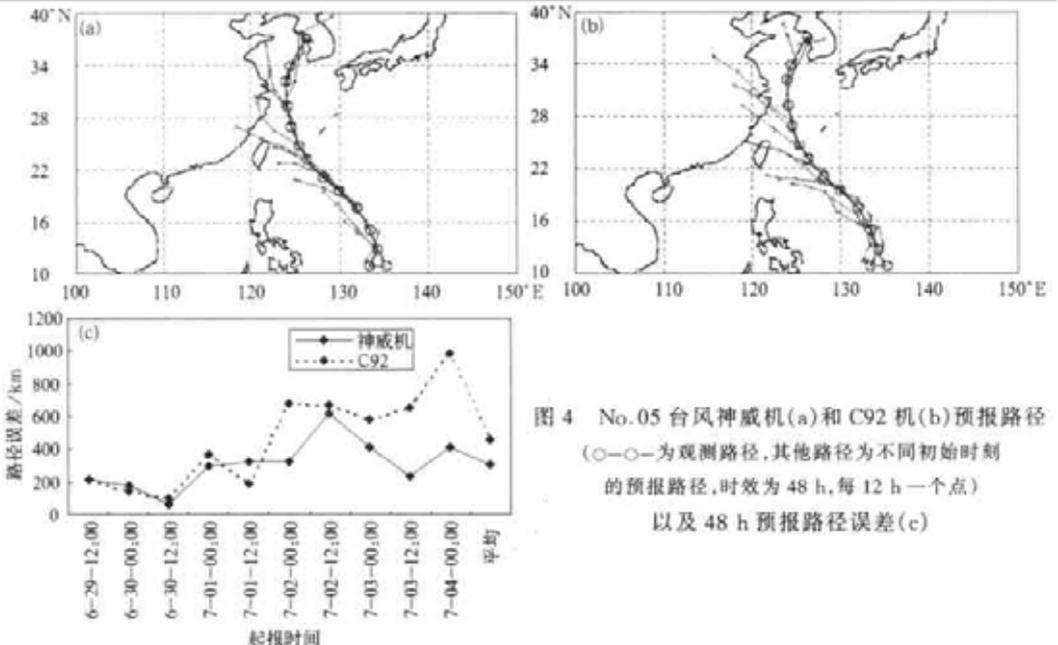


图4 No.05台风神威机(a)和C92机(b)预报路径(○—○—为观测路径,其他路径为不同初始时刻的预报路径,时效为48h,每12h一个点)以及48h预报路径误差(c)

转向趋势。仔细分析了预报路径的经、纬度预报误差发现(图略),基于 T213 台风预报系统有效的减小了基于 T106 台风预报系统对转向台风路径预报西进较快的趋势,并提高了台风向北的移动速度,两者的作用使神威系统的预报减小了原基于 T106 台风预报系统在预报转向台风时系统性的偏西误差,预报路径较基于 T106 台风预报系统预报偏东。而转向后基于 T213 台风预报系统的预报路径偏东趋势在所有转向台风中都存在,这使得基于 T213 台风预报系统在台风转向后的大部分路径预报好于基于 T106 台风预报系统的路径预报。

3.3 西行及西北行登陆台风的路径预报误差分布

分析西行登陆或西北行登陆的台风,基于 T213 台风预报系统 24 h 预报路径误差较基于 T106 台风预报系统预报误差小,而 48 h (No.09 及 No.16 台风 11 次预报平均)前者却有较大的预报误差。误差主要来源于 No.09:基于 T213 系统 48 h 平均误差为 246.3 (5) km,而基于 T106 系统 48 h 平均误差为 118.9(5) km。分析两个预报系统 48 h 预报路径误差相差大于 100 km 的预报可以看出,预报误差并不具系统性,引起 No.09 和 No.16 台风预报误差的原因不同。No.09 台风路径位于较高纬度,三次较大误差为 2002 年 7 月 23 日 12:00、7 月 24 日 00:00 及 7 月 25 日 00:00 的 48 h 预报,两个系统的预报误差相差 150~200 km。比较几次预报的 500 hPa 高度场可以发现:基于 T213 系统所预报的副高明显弱于基于 T106 系统的预报,而 No.09 台风的移动主要受副高西进及北抬影响。故在这三次预报中,基于 T213 台风预报系统的预报明显比基于 T106 台风预报系统的预报偏东偏南。位于较低纬度的 No.16 台风两次较大的误差分别出现在 2002 年 9 月 4 日 00:00 预报及 9 月 5 日 00:00 的 48 h 预报。造成 No.16 台风较大误差的原因同 No.09 台风的预报截然不同。基于 T213 台风预报系统预报路径西进过快,经度误差分别为(预报-实况):9 月 4 日 00:00 的 48 h 预报为 -4.866(SW)、-3.459(C92);9 月 5 日 00:00 的 48 h 预报为 -3.334(SW)、-2.239(C92),西移速度过快导致基于 T213 台风预报系统这两次 48 h 路径预报误差比基于 T106 台风预报系统路径预报误差大 100 km 左右。

除 No.09 台风的 48h 预报外,三个西行或西北行登陆的台风预报路径绝大部分比实况偏北,基于 T213 台风预报系统的预报偏北比较明显(图略),这一点也可能是导致基于 T213 台风预报系统预报误差较大的原因之一。

4 结 论

经过对台风路径预报模式的优化及并行化,台风路径数值预报系统成功的建立在 SW 上,预报时效满足了业务需要,同时系统的嵌套模式由原来的 T106L19 升级为 T213L31。台风路径预报误差分析表明:基于 T213 台风预报系统的总体平均路径误差减小;对转向台风、北上台风及打转台风的路径预报的改进较为明显,有效的减小了基于 T106 台风预报系统对转向台风路径预报的系统误差:即台风转向后预报路径偏西,提高了对转向台风的预报能力;对于西行及西北行登陆的台风,基于 T213 台风预报系统的 48 h 预报路径平均误差比基于 T106 台风预报系统预报误差大,尤其是纬度较高的 No.09 台风。关于基于 T213 台风预报系统对西行及西北行登陆台风的预报能力评价,需要在

以后的业务预报误差分析中继续进行,以便发现是否有系统性误差存在,从而为进一步提高台风路径数值预报能力奠定基础。

参考文献

- 1 王诗文,麻素红,徐德勇,等.扩大预报区域及初始移动网格的台风数值模式设计及试验.国家气象中心科技年报,1996.123~125.
- 2 李建军,王诗文,马秀均.台风 BOGUS 资料的两次嵌入试验.国家气象中心科技年报,1996.98~102.
- 3 王诗文,李建军.台风路径实时数值预报的初步试验.见:台风、暴雨业务数值预报方法和技术研究.北京:气象出版社,1996.14~20.
- 4 Kurihara Y, Bender M A, Ross R J, An initialization scheme of hurricane models by vortex specification. *Mon Wea Rev.*, 1993, **121**: 2030~2045.
- 5 Iwasaki T, Nakano H, Sugi M. The performance of typhoon track prediction model with cumulus parameterization. *J Meteor Soc Japan*, 1987, **65**: 555~570.
- 6 陈起英.中国的全球中期预报模式-主要技术特征与性能.国家气象中心,2002.
- 7 王雨,赵俊英.T213及T106预报效果对比检验.国家气象中心,2002年技术报告.

OPTIMIZATION AND PARALLEL OF TYPHOON TRACK PREDICTION MODEL IN NMC AND TRACK ERROR ANALYSES

Ma Suhong Qu Anxiang

(National Meteorological Center, Beijing 100081)

Zhang Yi

(North Computer Center, Beijing 100091)

Abstract

The Model for Typhoon Track Prediction (MTTP) on Cray92 in National Meteorological Center (NMC) was optimized and paralleled through data paralleling and message passing on Shenwei (SW) super computer made in China and the running time could meet the requirement of operational running. The new typhoon track prediction system was set up based on this model and SW computer was put into real time running on 30 June 2002. The initial condition and lateral boundary were updated from T106L19 to T213L31. The track results show that the track forecasts from the new system are better than that from the old system (the system on Cray92) on the whole. But the performance is different for different types of tracks: The results from the SW system are better for the northeast recurving typhoons and worse for the west and northwest moving typhoons.

Key words: Typhoon track prediction model Parallel Optimization Track forecast errors