

NetCDF4 性能分析与调优研究

杨玉红,寇媛媛,乔文文

(广东省气象探测数据中心,广东 广州 510000)

摘要:介绍了 NetCDF4 在气象格点数据服务系统中的应用,对比了同种数值预报模式使用不同分块策略时创建、更新文件时间,以及在不同压缩系数时的性能。通过性能分析了解了 NetCDF4 的新特性,进行了性能调校,并在此基础上总结出了 NetCDF4 的调优策略。合适的调优策略会显著减少文件的创建(更新)时间,或提高文件的压缩率,节省系统的存储空间。该研究结果为 NetCDF4 在数值预报业务中的全面使用奠定了基础,为提高数值预报业务存储效率提供了可靠的实践依据。NetCDF4 合理适当的使用将会显著提高气象格点数据服务系统的服务效率,也是未来几年“广东省气象格点数据服务系统”的主要工作方向。

关键词:NetCDF4;数值预报;存储效率;性能研究

中图分类号:TP31

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2019)10-0089-06

doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2019.10.019

Research on NetCDF4 Performance Analysis and Optimization

YANG Yu-hong, KOU Yuan-yuan, QIAO Wen-wen

(Guangdong Province Meteorological Data Center, Guangzhou 510000, China)

Abstract: The application of NetCDF4 in the meteorological grid data service system is introduced, and the performance of the same numerical prediction model when creating and updating files using different blocking strategies, and that at different compression factors are compared. Through performance analysis, the new characteristics of NetCDF4 are understood, the performance is adjusted, and on this basis, the optimization strategy of NetCDF4 is summarized. A suitable tuning strategy can significantly reduce the file creation (update) time, or increase the file compression rate, saving system storage space. The research lays the foundation for the comprehensive use of NetCDF4 in the numerical forecasting business, and provides a reliable practical basis for improving the storage efficiency of numerical forecasting services. The reasonable and appropriate use of NetCDF4 will significantly improve the service efficiency of the weather grid data service system, which is also the main working direction of the “Guangdong Province meteorological grid data service system” in the next few years.

Key words: NetCDF4; numerical prediction; storage efficiency; performance research

0 引言

近年来,随着信息技术的飞速发展,各行各业信息化建设呈现出日新月异的发展景象,气象行业更是如此^[1-6]。信息化带来海量数据,既是一种机遇,也是一种挑战。一方面,数据有长期保存的价值,必须存储很多历史数据,另一方面实时数据也在不断激增。如何提高资料的存储与应用效率已是当前一个热门话题与研究重点^[7-10]。

NetCDF 是一种可以对网格数据进行高效存储、管理、获取和分发等操作的数据格式。由于其灵活性,

能够传输海量的面向阵列(array-oriented)数据,目前广泛应用于大气科学等诸多领域。例如,NCEP(美国国家环境预报中心)发布的再分析资料,NOAA 的 CDC(气候数据中心)发布的海洋与大气综合数据集(COADS)均采用 NetCDF 作为标准。鉴于此,广东省气象探测数据中心近年来建立了“广东省气象格点资料服务平台”,服务内容之一即快速生成便于存储、查询、展示的 NetCDF 格式的数值预报产品,形成完整、有序、规范、高效的 NetCDF 产品库,并提供给省内外的用户使用。

收稿日期:2018-12-21

修回日期:2019-04-23

网络出版时间:2019-05-13

基金项目:国家气象信息中心行业专项(GYHY201506025);广东省气象科学技术研究项目(2014Q05);广州市科技计划项目(2013Y2-00074)

作者简介:杨玉红(1983-),女,工程师,硕士,研究方向为气象信息与技术保障。

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20190510.1706.002.html>

1 NetCDF4 格式分析

NetCDF 数据集(文件名后缀为 .nc)的格式不是固定的,是使用者根据需求自己定义的。一个 NetCDF 数据集包含维(dimensions)、变量(variables)和属性(attributes)三种描述类型,每种类型都会被分配一个名字和一个 ID,这些类型共同描述了一个数据集,NetCDF 库可以同时访问多个数据集,用 ID 来识别不同数据集。变量存储实际数据,维给出了变量维度信息,属性则给出了变量或数据集本身的辅助信息属性,又可以分为适用于整个文件的全局属性和适用于特定变量的局部属性,全局属性则描述了数据集的基本属性以及数据集的来源。

在传统的 NetCDF3.5 或更早期版本中,数据的存储使用默认经典格式(32 位),这种只有 32 位的默认经典格式只能写入小于 4 GB 大小的文件,于是在 NetCDF3.6 中增加了一种采用 64 位的存储格式,理论上文件大小的上限扩展到 8 EB(2^{60} Bytes, $1\text{ GB} = 2^{30}$ Bytes)。在 NetCDF4 版本,第三种对性能显著改进的二进制格式被引进,那就是 HDF5。默认条件下,NetCDF4 因向下兼容性需要,默认条件下使用 32 位经典模式,如需使用 64 位模式以及 HDF5 格式,需要在创建文件时候进行参数设置。作为气象数据主流存储格式的 NetCDF4^[11-13],是 Unidata 和 HDF Group 合作的产物^[14]。面对三种不同的文件格式,创建数据文件时候需仔细考虑选择合适的数据格式。由于 NetCDF4 项目使用 HDF5 的存储格式^[15-16],使数据文件占用的空间大幅度降低。

文件一旦创建,其格式即固定。当打开存在的 NetCDF 文件,NetCDF 库透明检测格式,并适应。然而,NetCDF 数据库在 3.6 版本以前不能识别 64 位模式,4.0 版本之前不能读取 NetCDF4-HDF5 文件。

2 省级气象格点数据服务系统

近年来,广东省气象探测数据中心逐步建立气象格点数据服务系统。该系统包含了数据解码转换子系统、数据存储管理子系统、图形产品生成子系统、数据服务子系统四大部分。其中数据解码转换子系统以气象业务实际需要为出发点,在多途径全面收集全序列的数值预报产品原始格式的数据文件的基础上,实现全序列气象数值预报产品原始格式解码,实现数据的格式转换,生成符合各类数值预报产品特征的 NetCDF 格式产品;数据存储管理子系统将数据解码转换子系统生成的 NetCDF 产品重新组织实时存储到相应的 NetCDF 产品库中,形成统一规范的实时、历史一体化 NetCDF 产品库。图形产品生成子系统则使用基于 NCL(the NCAR command language)编程语言,读取

NetCDF 库文件中的数据,生成精度高、内容展现丰富的数值预报图形产品。数据服务子系统通过“广东省实时历史一体化数据接口服务平台”将实时历史数值预报产品对外提供服务,或通过文件调度方式对外提供服务。

目前气象格点数据服务系统已经完成,接入数值预报产品的原始格式有二进制数据格式、GRIB1 格式、GRIB2 格式,GRIB1 与 GRIB2 混合编码格式,以及中国气象局下发的各种复杂压缩格式等。接入的数值预报模式有欧洲大气模式集合预报产品、欧洲大气模式确定性预报产品、NCEP_GFS 模式产品、GRAPES-TYM 区域台风数值预报产品、中国南海台风精细模式、华南中尺度模式等。最高分辨率为 $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ 。对外服务的单位有广东省气象局各单位、广东省各县气象局、广州民航、珠海民航等。实时对外提供服务的模式有 30 余个,每日生成的图片数量 30 万张,年生成 NetCDF 数据量为 30 T 左右。

随着业务应用逐步深入以及数据量的逐年积累,系统计算资源和存储资源面临业务瓶颈。为了更好地适应业务的实际需求,希望借助 NetCDF4 的分块与压缩特性,提高系统的计算与存储能力,优化数值预报格点转换平台,使得平台能够更快更稳定地对外提供服务。

3 NetCDF4 性能分析

“广东省气象格点数据服务系统”始建于 2012 年,系统建设选择的 NetCDF 版本为 3.6。为了提升系统的服务能力,2018 年开始将系统的 NetCDF 版本逐步升级为 4.5,全面提升系统的存储能力与服务效率。

3.1 性能分析策略

为了更好地研究 NetCDF4 的性能,选取了三个数据量较小、中等、较大的有代表性的模式进行分析,分别是在 NetCDF4 连续存储的情况下月数据量为 20.3 GB 的欧洲中心 32 天数值预报(简称 ECMWF_S4F)、525 GB 的 NCEP_GFS 模式和 958 GB 的欧洲中心 46 天集合预报(简称 ECMWF_ENSEXT)。三个模式在虚拟机平台中的三台不同的服务器中,且每个模式的连续、分块以及压缩程序均在同一服务器内进行,模式参数如表 1 所示。

值得注意的是,文中所有的 NetCDF 月数据量在未特殊说明的前提下均为模式在 NetCDF4 连续存储的情况下获得的数据量,同时 NetCDF4 均指版本 4.5。并且,GRIB 格式至 NetCDF 格式的转换指的是,将一个数值预报模式单时次所有 GRIB 数据,根据要素进行分类存储,得到的 NetCDF 文件个数为模式中要素的个数,且为了数据的高效读取使用,将一个月的单要

素数据存在一个数据文件中。即 ECMWF_S4F 模式, 一个月只生成 7 个 NetCDF 数据文件,NCEP_GFS 模式一个月生成 25 个 NetCDF 数据文件,ECMWF_

ENSEXT 模式一个月生成 24 个 NetCDF 数据文件。这里一个月指的是自然月。

表 1 三个数值预报模式信息

模式名称	每时段 GRIB 文 件个数	GRIB 格式单 要素单预报 时效单时段 数据量/MB	预报 时效 /时段	成员 个数	经度格 点数	纬度 格点数	要素 个数	要素 层数	单要素 NetCDF 月数据量 /GB	连续存储 NetCDF 月总数据 量/GB
ECMWF_S4F	33	0.3	129	51	61	61	7	1	2.9	20.3
NCEP_GFS	93	高空: 7.6 地面: 0.54	93	1	720	141	高空: 7 地面: 18	高空: 14 地面: 1	高空: 62 地面: 4.4	525
ECMWF_ENSEXT	32	高空 1:45.36 高空 2:22.68 地面: 11.34	32	51	高空: 360 地面: 281	高空: 91 地面: 161	高空 1:4 高空 2:2 地面: 18	高空 1:7 高空 2:1 地面: 1	高空 1:84 高空 2:12 地面: 34	958

文中主要对 NetCDF 文件的创建与更新两个核心过程做时间测算,关注 NetCDF 文件的写入操作。其中对 NetCDF 文件创建的时间测量是使用 C 函数 `gettimeofday` 分别获取 NetCDF 的 API 函数 `nc_create` 之前、`nc_close` 之后的时间,取两者差值,是指在 NetCDF 文件不存在的情况下,生成文件的耗时;其中对 NetCDF 文件写数据的更新操作是使用 `gettimeofday` 分别获取 `nc_open` 之前、`nc_close` 之后的时间,取两者差值,是指 NetCDF 文件已存在,将新的数据插入或者覆盖原有数据文件的耗时。

为了对比模式在不同存储方式下的实际运行时间,所有分析程序均在相同配置服务器上运行。服务器使用 Linux 虚拟机,内核版本为 Centos Linux release 7.1.1503,CPU 为 4 个 Intel(R) Xeon(R) CPU E7-4809,每个 4 核,共 16 核,主频 2.0 GHz,32 GB 内存,gcc 版本为 4.8.2。相同模式的不同分块、压缩策略,均在同一服务器上运行。

3.2 分块存储性能分析

分块存储策略是针对连续存储模式提出的非连续存储模式。传统的 NetCDF 模式采用连续的存储模式,无论是在内存还是外部存储器上。比如某个数据只有 `data[5,7]` 两个维度 35 个网格点,传统模式在写入数据时采用连续存储,先存储前 7 个数据 (`data[0,]`),第 8 个数据在 `data[1,0]`,第 15 个数据在 `data[2,0]`,第 22 个与第 29 个数据分别为 `data[3,0]` 与 `data[4,0]`,从外部设备的角度来看这 35 个数据是串行存储的。如果选择将第 1、第 8、第 15、第 22 与第 29 个数据分成一个组来存储,则与第 1 个数据相邻的数据不是第 2 个而是第 8 个,这就是非连续性存储。举例用的就是被称为 `[5*1]` 的分块策略,使用非连续存储模式,必须引入一个分块管理器去管理数据,对用户是透明的,这种额外开销在不同业务中会呈现出不同

的性能,同时也会带来一个好处,可以使用多个并发线程去做 IO 操作。传统的连续存储在多线程并发时 IO 必须通过资源锁机制来保证数据的完整性,一旦某个数据被锁定,其他线程就不得不进行等待,直至该锁解除为止,这就是传统连续存储的 IO 瓶颈。这就意味着如果某个业务数据的 IO 不是瓶颈,使用分块策略或者不合适的分块策略反而会大大增加业务的操作时长。因为分块管理器要做好数据的切割与访问控制,所以数据切得太细,访问过于频繁,都会使得分块管理器无法发挥最大效用。选择合适的分块大小,就是为了更好地切割数据,使得写数据与读数据的操作能够最大限度地分离,这样效率最高。

在 NetCDF4 的 HDF5,选择合适的分块策略与压缩系数会对程序的运行时间与数据文件大小有显著的影响,这是传统模式与 64 位模式不具备的。当业务处理的数据量变大,尤其在接近 1 TB 的时候,合适的分块策略会让程序运行的时长缩减为之前的约四十分之一 1/40,但分块策略也不总是会提升程序运行速度,在某些分块策略下,程序运行的时长会变得难以容忍。对于某些业务数据特别大且对程序运行的时长宽容度比较高时,通过调整数据的压缩系数可以使用时间换空间的原则,增加程序运行的时间,从而压缩数据存储空间,使得占用空间变成原来的约五百六十分之一 1/560。因此针对业务的不同需求,通过调整 NetCDF4 的分块策略与压缩系数获得最高的性能。

当 NetCDF4 程序启用了 HDF5 模式后,可以通过调整 `chunk_size` 参数来设置分块存储策略。本节使用表 1 中三个数值预报模式,分析不同分块策略创建与更新文件所需的时间。

对于 ECMWF_S4F 模式,文中共验证了 6 种不同分块策略创建文件和更新文件使用的时间,当经度维度和纬度维度分块数分别为 1 时,创建文件和更新文

件速度非常慢,耗时非常长。图 1 为 ECMWF_S4F 模式使用 5 种不同分块策略创建文件使用的时间。

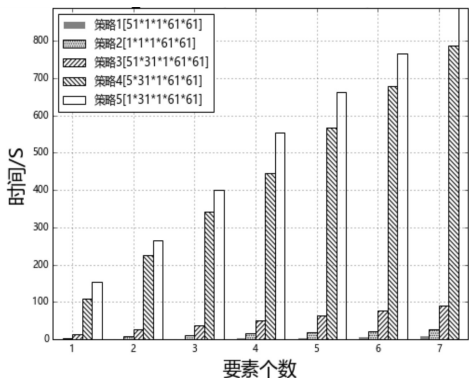


图 1 ECMWF_S4F 模式不同分块策略创建文件时间对比

对于 NCEP_GFS 模式,文中共验证了 5 种不同分块策略创建文件和更新文件使用的时间。图 2 为其中 4 种较慢分块策略创建文件使用的时间。

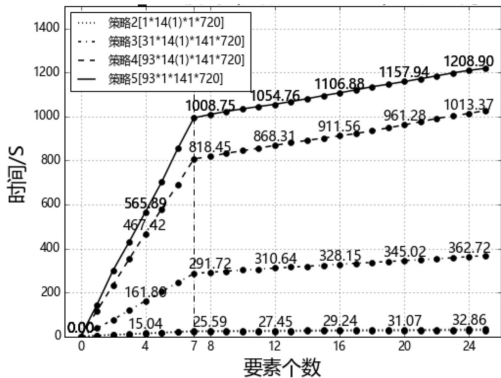


图 2 NCEP_GFS 模式不同分块策略创建文件时间对比

对于 ECMWF_ENSEXT 模式,文中共验证了 4 种不同分块策略创建文件和更新文件使用的时间。图 3 为 4 种不同分块策略创建文件使用的时间。

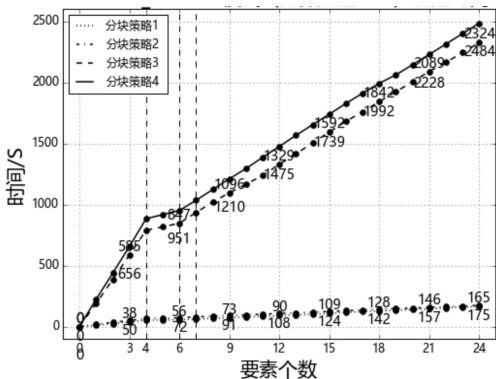


图 3 ECMWF_ENSEXT 模式不同分块策略创建文件时间对比

3.3 压缩方法性能分析

NetCDF4 可通过 HDF5 库选取不同的压缩算法对数据进行无损压缩,压缩系数为 1 至 9。常见的无损

压缩算法有 GZIP、LZF 等,其中 GZIP 算法具有中等速度高压缩率,LZF 算法具有快速但中等的压缩率。

因为 NetCDF4 使用的是无损压缩,不会对数据精度产生影响,更容易被用户接受使用。使用数据压缩的特性,可缩小文件大小,并缩短压缩数据的数据传输时间。压缩是在创建数组变量(数据集)时指定的。所有压缩/解压缩操作都由 HDF5 库自动处理,对应用程序透明。

图 4~图 6 为三种模式在压缩系数为 1 至 9 时创建文件用时与文件大小。由图 5 和图 6 可见,在压缩系数为 1 至 3 时,各模式创建文件用时相差不大,压缩

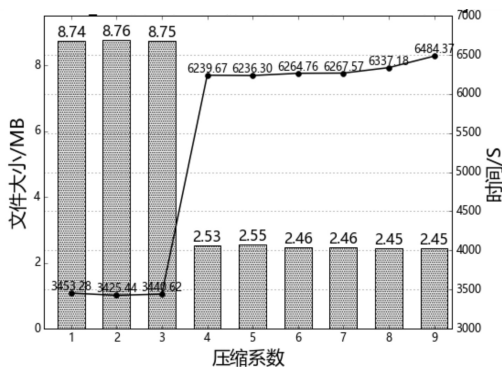


图 4 ECMWF_S4F 模式不同压缩系数创建文件用时与文件大小

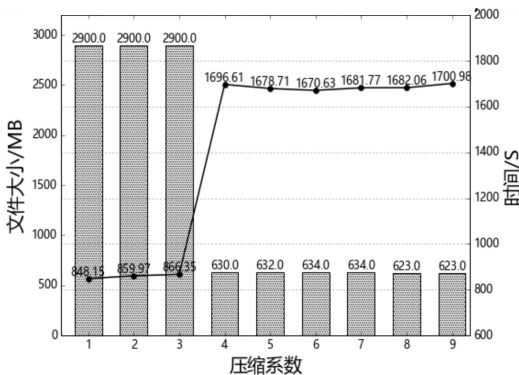


图 5 NCEP_GFS 模式不同压缩系数创建文件用时与文件大小

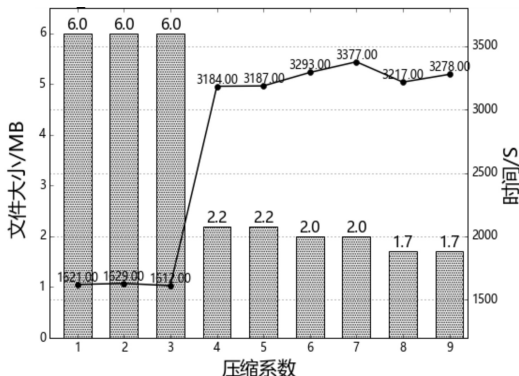


图 6 ECMWF_ENSEXT 模式不同压缩系数创建文件用时与文件大小

后的文件大小较为接近;压缩系数为 4 至 9 时,创建文件用时基本不变,文件大小的变化也不明显;而在压缩系数为 3、4 之间,压缩后的文件大小急剧减少,创建文件用时也急剧增加。

3.4 NetCDF4 调优策略

综上,结合表 2 可知,集合预报成员维度在数据量较大的模式 ECMWF_ENSEXT 中选取越大,耗时越长,在数据量较小的 ECMWF_S4F 模式中相反;预报时效维度在所有模式中显示的规律是数值越大耗时越长;第三维度以及之后的维度显示的规律是数值越小,

耗时越长。因此,如果数据产品拥有多个维度(尤其是 4 个或 4 个以上的维度),对前三个维度选取合适的分块参数,会显著提升程序的性能,在非前三个维度设置细粒度的分块参数(尤其是选择分块参数为 1 的时候),程序的性能会显著变差。

从研究结果可以看出,调整数据产品的前三个维度对程序的整体运行速度影响很大,但在参数的选择上并未出现线性规律,需要使用者通过选取不同参数的分块策略进行对比,获得针对某个业务最合适的分块策略。

表 2 三个数值预报模式不同存储策略创建、更新文件时间

模式名称	存储策略	创建时间/s	更新时间/s
ECMWF_S4F 模式	连续存储	146.96	249.9
	分块策略 1:[51 * 1 * 1 * 61 * 61]	9.64	4.13
	分块策略 2:[1 * 1 * 1 * 61 * 61]	25.7	5.09
	分块策略 3:[51 * 31 * 1 * 61 * 61]	88.97	5.86
	分块策略 4:[5 * 31 * 1 * 61 * 61]	789.12	179.23
	分块策略 5:[1 * 31 * 1 * 61 * 61]	888.06	200.30
	分块策略 6:[51 * 31 * 1 * 1 * 1]	8 364.84	642.92
NCEP_GFS 模式	连续存储	1 222.28	25.35
	分块策略 1:[1 * 14(1) * 141 * 720]	28.07	27.17
	分块策略 2:[1 * 14(1) * 1 * 720]	33.33	40.05
	分块策略 3:[31 * 14(1) * 141 * 720]	367.86	494.29
	分块策略 4:[93 * 14(1) * 141 * 720]	1 026.42	95.55
	分块策略 5:[93 * 1 * 141 * 720]	1 218.32	336.68
ECMWF_ENSEXT 模式	连续存储	2 824	3 349
	分块策略 1:[1 * 1 * 7(1) * 91 * 360]、[1 * 1 * 1 * 161 * 281]	165	174
	分块策略 2:[51 * 1 * 7(1) * 91 * 360]、[51 * 1 * 1 * 161 * 281]	175	170
	分块策略 3:[1 * 31 * 7(1) * 91 * 360]、[1 * 31 * 1 * 161 * 281]	2 324	3 769
	分块策略 4:[51 * 31 * 7(1) * 91 * 360]、[51 * 31 * 1 * 161 * 281]	2 484	3 676

表 3 三个数值预报模式不同压缩系数月文件数据量对比

模式名称	NetCDF4	NetCDF4 不同压缩系数月文件数据量								
	连续存储	系数 1	系数 2	系数 3	系数 4	系数 5	系数 6	系数 7	系数 8	系数 9
ECMWF_S4F	20.3 GB	8.74 MB	8.76 MB	8.75 MB	2.53 MB	2.55 MB	2.46 MB	2.46 MB	2.45 MB	2.45 MB
NCEP_GFS	525 GB	2 900 MB	2 900 MB	2 900 MB	630 MB	632 MB	634 MB	634 MB	623 MB	623 MB
ECMWF_ENSEXT	958 GB	6.0 GB	6.0 GB	6.0 GB	2.2 GB	2.2 GB	2.0 GB	2.0 GB	1.7 GB	1.7 GB

由表 3 可知,压缩系数 1 至 3 时,各模式压缩后的文件大小基本一致,ECMWF_S4F 模式的压缩率最高,约为连续存储方式的二千三百分之一 1/2300,ECMWF_ENSEXT 模式的压缩率最小,约为连续存储方式的一百六十分之一 1/160;各模式在压缩系数 1 至 3 时,程序用时差异不大;当压缩系数选取 4 至 9 时,各模式压缩后的文件大小也基本一致,ECMWF_S4F 模式的压缩率最高,约为连续存储方式的八千二百分之一

1/8200,ECMWF_ENSEXT 模式的压缩率最小,约为连续存储方式的四百八十分之一 1/480;各模式在压缩系数 4 至 9 时,程序用时差异不大。而在压缩系数 3、4 之间,压缩后的文件大小急剧减小,程序用时急剧上升。

因此,在时间要求严格的环境下,建议选择 3 或 3 以下的压缩系数,在空间要求严格的环境下,选择 4 或 4 以上的压缩系数。

4 结束语

从“广东省气象格点数据服务系统”出发,介绍了 NetCDF4 在气象格点数据服务系统中的应用,对比了同种数值预报模式使用不同分块策略时创建与更新文件时间,对比了 NetCDF4 在不同压缩系数时的性能,通过性能分析了解了 NetCDF4 的新特性,进行了性能调校,并在此基础上总结出了 NetCDF4 的调优策略。合适的调优策略会显著减少文件的创建(更新)时间,或提高文件的压缩率,节省系统的存储空间。

该研究结果为 NetCDF4 在数值预报业务中的全面使用奠定了基础,为提高数值预报业务存储效率提供了可靠的实践依据。NetCDF4 合理适当的使用将会显著提高气象格点数据服务系统的服务效率,也是未来几年“广东省气象格点数据服务系统”的主要工作方向。

参考文献:

- [1] 梁心雄,徐美红,罗胜平. 基于 IBUS 实现省级气象共享数据中心方法研究[J]. 计算机技术与发展,2016,26(4):148-152.
- [2] 王立俊,李晋峰,程洪涛,等. 气象资料实时传输监控系统应用研究[J]. 计算机技术与发展,2018,28(3):183-186.
- [3] 周 华,李珊梅,吴礼腾,等. 浅谈气象数值预报[J]. 农业与技术,2014,34(3):152-153
- [4] 董 全,胡海川,代 刊. 数值模式预报调整趋势分析[J]. 气象,2016,42(12):1483-1497.
- [5] 李永生,曾 沁,杨玉红,等. 基于大数据技术的气象算法并行化研究[J]. 计算机技术与发展,2016,26(9):47-49.
- [6] 魏 敏,徐金秀,王在志. 并行 I/O 技术在气候数值模式中的应用研究[J]. 计算机技术与发展,2014,24(12):11-15.
- [7] ZHANG Wusheng, LIN Jiao, XU Weiping, et al. SCStore: managing scientific computing packages for hybrid system with containers[J]. Tsinghua Science and Technology, 2017, 22(6):675-681.
- [8] LÜ Xuefeng, CHENG Chengqi, GONG Jianya, et al. Review of data storage and management technologies for massive remote sensing data [J]. Science China Technological Sciences, 2011, 54(12):3220-3232.
- [9] WANG Xin, SONG Lianchun, WANG Guofu, et al. Operational climate prediction in the era of big data in China: reviews and prospects[J]. Journal of Meteorological Research, 2016, 30(3):444-456.
- [10] WANG Zaijian, MAO Shiwen, YANG Lingyun, et al. A survey of multimedia big data [J]. China Communications, 2018, 15(1):155-176.
- [11] 刘培宁,韩 笑,杨福兴. 基于 R 语言的 NetCDF 文件分析和可视化应用[J]. 气象科技,2014,42(4):629-634.
- [12] 刘 俊,黄兴友,周红根,等. 基于 NetCDF 的国产新型气象雷达基数据通用编码试验[J]. 气象科技,2016,44(2):171-176.
- [13] 黄成南,炎利军,莫满堂,等. 广东灾害天气历史个例库系统的设计与实现[J]. 广东气象,2013,35(3):68-73.
- [14] REW R, DAVIS G, EMMERSON S. NetCDF user's guide [M]. USA:Unidata Program Center,1993:25-30.
- [15] HOWISON M. Tuning HDF5 for lustre file systems[M]. USA:Lawrence Berkeley National Laboratory,2012:2-5.
- [16] GALIANO V, MIGALLON H, MIGALLON V, et al. Py-PnetCDF: a high level framework for parallel access to netCDF files [J]. Advances in Engineering Software, 2010, 41(1):92-98.
- [17] KWON Y J, CHOI Y J, LEE D H. Heterogeneous fixed fleet vehicle routing considering carbon emission[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2013, 23: 81-89.
- [18] 邓红星,王玮琦,王永康. 公路零担物流企业末端配送路径优化[J]. 交通科技与经济,2018,20(4):1-4.
- [19] 朱 婷,王旭磊,赵来军. 带时间窗的时变多目标危险化学品道路运输路径优化[J]. 工业工程,2016,19(2):62-67.
- [20] 蒋忠中,汪定伟. 有时间窗车辆路径问题的捕食搜索算法[J]. 控制与决策,2007,22(1):59-62.
- [21] 戴 韬,杨稀麟. 考虑时间窗与随机航行时间的船舶航线规划[J]. 计算机工程与应用,2012,48(25):234-238.
- [22] 郭 月,张 涵. 校园外卖配送体系研究[J]. 中国市场, 2016(20):67-69.
- [23] 杨博文,王 静,段 辉. O2O 餐饮外卖目标市场发展趋势分析[J]. 科教导刊:电子版,2015(8):146-147.
- [24] JIA Xiaolan, CAO Xianbin, GUO Yuanping, et al. Scheduling aircraft landing based on clonal selection algorithm and receding horizon control [C]//11th international IEEE conference on intelligent transportation systems. Beijing, China: IEEE, 2008:357-362.
- [25] FRANZE G, LUCIA W. A receding horizon control strategy for autonomous vehicles in dynamic environments[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2016, 24(2): 695-702.
- [26] GENEST R, RINGWOOD J V. Receding horizon pseudo spectral control for energy maximization with application to wave energy devices[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2016, 25(1):29-38.
- [27] FORTENBACHER P, ULBIG A, ANDERSSON G. Optimal placement and sizing of distributed battery storage in low voltage grids using receding horizon control strategies[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(3):2383-2394.