

基于 LOD 四叉树算法的 中尺度云团三维流场可视化模拟分析

尤宏宇[†], 陈曦, 边立峰

(大兴安岭地区气象局, 黑龙江 加格达奇 165000)

摘要: 中尺度环流在复杂的天气环境下时常被大尺度环流掩盖, 不能及时获取中尺度云团的时空密度, 影响了中尺度云团三维流场可视化模拟效果, 为了提升可视化模拟性能, 提出基于四叉树算法(levels of detail, LOD)的中尺度云团三维流场可视化模拟分析方法。分析了中尺度云团三维相对流场, 从中获取了中尺度云团三维流场运动规律, 并基于二维直方图取得中尺度云团三维流场特征; 将粒子源与四叉树结构相结合, 构成四叉树粒子系统, 把取得的特征映射到系统内, 利用该系统中的粒子完成中尺度云团三维流场的渲染绘制, 从而实现中尺度云团三维流场的可视化模拟。实验结果表明, 绘制帧率对比测试、可视化模拟速率对比测试和可视化模拟效果对比测试结果清晰度较高, 可视化程度较高, 实用性强、可靠性高。

关键词: LOD 四叉树; 中尺度云团三维流场; 可视化模拟分析; 渲染绘制

中图分类号: P44

文献标识码: A

Visual Simulation Analysis of 3D Flow Field of Mesoscale Cloud Clusters Based on LOD Quadtree Algorithm

YOU Hongyu[†], CHEN Xi, BIAN Lifeng

(Da Xinganling Meteorological Bureau, Jiagedaqi, Heilongjiang 165000, China)

Abstract: Mesoscale circulation in complex weather environment is often covered by large scale circulation. The spatial and temporal density of mesoscale clouds can not be obtained in time, which affects the visual simulation effect of 3D flow field of mesoscale clouds. In order to improve the visual simulation performance, a visual simulation analysis method of 3D flow of mesoscale clouds based on LOD quadtree is proposed. The visual simulation of the three-dimensional relative flow field of the cloud is analyzed. The results show that the results of drawing frame ratio comparison test, visual simulation rate comparison test and visual simulation effect comparison test have high clarity, high visualization degree, strong practicability and high reliability.

Key words: LOD quadtree; 3D flow field of mesoscale clouds; visual simulation analysis; rendering

暴雨等强对流天气与中尺度天气系统具有关联性, 而中尺度云团在江河流域属于主要暴雨系统^[1]。由于中尺度环流日常被大尺度环流背景掩盖, 导致人们不能完全获取时空密度, 致使天气预报系统不够完善, 在业务预报时具备一定的困难

性。有些研究者通过卫星及雷达探测出云团的结构和演变过程, 从中分析出中尺度云团的扰动因子^[2], 并模拟了中尺度云团在气旋暖区的对流情况, 从中取得中尺度云团在时空中能量不稳定的主要因素, 但这些研究成果还不够完善, 需要对中尺

度云团三维流场可视化模拟方法展开详细分析。

柴博森等^[3]提出制动工况下液力变矩器大涡模拟流场仿真及可视化试验验证方法,该方法首先利用建立的模型获取大涡模拟三维流场,并对三维流场的内部结构进行识别和提取,基于提取结果分析时空多尺度大涡演化的流程及演变规律,基于粒子图像测速技术(Particle Image Velocimetry, PIV)技术试验大涡的内部流场情况,并从中提取流场信息,再对比大涡模拟仿真结果,实现可视化模拟分析,该方法的获取结构不完善,存在可视化模拟效果差的问题。

白悦荻等^[4]提出直线翼垂直轴风力机静态流场数值模拟与可视化试验方法,实现了可视化模拟分析,该方法的分析结果不佳,存在可视化模拟速率低的问题;鲍婷婷等^[5]提出多普勒天气雷达三维可视化分析平台设计与实现方法,可以更好地显示出天气雷达的可视化模拟效果,从而实现可视化模拟分析,该方法的显示效果不完善,存在绘制帧率差的问题。

为了解决上述方法中存在可视化模拟速率低,因显示效果不完善造成绘制帧率差,因模型获取三维流场结构不完善导致可视化模拟效果差三方面的问题,提出基于 LOD 四叉树算法的中尺度云团三维流场可视化模拟分析方法,创新性地利用二维直方图获取三维流场特征,依据模拟速率验证模拟效率,弥补其丢失的信息,降低了流场流线的相似性度量错误,得到最佳可视化模拟结果,为中尺度流场发展机理的数值模拟研究提供新思路。

1 中尺度云团三维流场流动分析及特征提取

1.1 中尺度云团三维相对流场

1.1.1 中尺度云团相对气流

中尺度云团主要分布在高山峰、高河流的区域,随着气温的不断变化,云团的面积会有着显著的变化,中尺度云团会在一定时期出现强盛期,且中尺度云团的色调会不一致,云体也会由不同的云区构成。随着时间的不断变化,云团也会有所减弱,主要呈长椭圆形,云体也会出现松散或消散的状态,一定时间后云梯就会消散。

为了能够有效分析出中尺度云团的三维分布情况^[6],设置云团的相对气流为:云团内部或云团附近,有 850~500 hPa 的气流盘旋,直至 400 hPa 时,这些气流就会变化为反气旋曲度气流,而 200 hPa 后,气流变化更加明显。以上属于云团在气流附近变化的强盛期。

而云团的减弱时期,云团周边气流的气旋性会直接转换成反气旋性气流,其高度有所降低,主要在 700~500 hPa 之间。而云团消散时,气流高度会变得更低,700~200 hPa 都会导致气流变成反气旋曲度,但 900 hPa 时,属于平直气流。当气流的低空反气旋曲度比较小时,高空就会较大,即使是在 200 hPa 也会有反气旋气流处于云团的上部分位置。

1.1.2 中尺度云团相对流场

按照不同的方向切割中尺度云团,以东西方向为主,沿着中尺度云团的中间位置以东西方向为主对云团进行剖切。由于强盛时期,剖切云团表面后,云团的低空区域的气流属于东风,当东风进入到云团后,云团会以垂直向上的方式向上空运动,而气流也会逐渐垂直,到 200 hPa 时,东风就会向东流出。

在减弱时期,以云团的偏北的区域剖切云团,当东风气流向云团切入后,云团会向上运动,直至 400 hPa 时,会朝着西方周转,时还会有部分云团流出。云团向南部区域剖切时,气流会沿着东侧步入到云团内,云团中会有较小的上升分量,在上升的同时也有少许云团向西部流出。

而消散时期,以北部为剖面,剖切完成后气流流入到云团后会转变为西风,内部包含的上升分量最小,同时有少许云团从东部流出。

以南北方向为主,强盛时期剖切云团时,云团的低空为北风,气流与云团逐渐接近时,云团就会垂直向上升。在不同时期下,以不同的方向剖切云团,云团都会随着气流的变化而产生不同的运动。例如在 500 hPa 时,会有从南方向过来的水平气流,而云团的附近会出现闭合环流,气流会在闭合环流的北部向上运动,也会有少许云团向北部流出,最终南部属于下沉气流。

通过对中尺度云团三维相对流场进行分析,获取了中尺度云团在不同情况下的运动规律。

1.2 基于二维直方图的中尺度云团三维流场特征获取

根据中尺度云团三维相对流场的运动规律,提取中尺度云团的流线形状特征^[7]。

为了能够有效获取中尺度云团三维流场特征,从四个方面提取中尺度云团流线几何属性,分别是曲率、挠率、曲折度、速度方向熵,以此反映出中尺度云团三维流场曲线的均匀程度。

中尺度云团三维流场曲线的曲率就是指中尺度云团的某点切线方向角所产生的转动率,证明三维流场曲线的弯曲变化,那么计算中尺度云团三维流场曲线曲率的方程表达式定义如下:

$$kp = \|\dot{V}(p) \times \ddot{V}(p)\| / \|\dot{V}(p)\|^3 \quad (1)$$

式中, kp 标记为曲率, $\dot{V}(p)$ 标记为中尺度云团三维流场位于点 p 的速度矢量一阶导数, $\ddot{V}(p)$ 属于二阶导数。

中尺度云团三维流场绕率的绝对值表现在流场曲线相邻点与向量之间的夹角对流场曲线弧长所产生的变化率,其证明了中尺度云团三维流场曲线的扭曲效果,因而利用下述方程计算出绕率:

$$\kappa p = \frac{\det [\dot{V}(p), \ddot{V}(p), \ddot{\ddot{V}}(p)]}{\|\dot{V}(p) \times \ddot{V}(p)\|^2} \quad (2)$$

式中, κp 标记为绕率, $\ddot{\ddot{V}}(p)$ 标记为三阶导数, \det 属于行列式。

中尺度云团三维流场的曲折度体现在流场曲线的长度及两点距离中,所以当中尺度云团三维流场的流线中有一点 p 时,它的曲折度就表示如下:

$$tortuosity(p) = s(p) / \|p - p_0\| \quad (3)$$

式中, $tortuosity(p)$ 标记曲折度, p_0 代表流场流线的起始点, $s(p)$ 标记为流线弧长。

基于点 p 在流线中,从中获取一点 p 对中尺度云团三维流场的速度方向熵进行计算。将中尺度云团三维流场作为单位球体,对其划分成若干份相同的区域,根据 p 点的位置判断流场流线附近的 u 个矢量指向,并不断累积指向单位球体上各块区域的速度频率,从而计算出流场流线的速度方向熵,该公式表示如下:

$$VDE(p) = \sum_{i=1}^{40} d_i + \log(d_i) \quad (4)$$

式中, $VDE(p)$ 标记为速度方向熵, d_i 标记为指向频率。

依据以上计算结果,采用二维直方图^[8]度量流线特征,对中尺度云团三维流场的各条流线划分,共为 Z 段,并在每段流线中构建一个直方图, Z 个直方图就会组成一个二维直方图。由于二维直方图本身的优势,可以弥补中尺度云团空间丢失信息,减少中尺度云团三维流场流线的相似性度量错误。因而基于方程(1)~方程(4)的计算结果获取流线一维直方图,并建立该流线的二维直方图,利用二维直方图完成中尺度云团三维流场流线的特征描述。

3 三维流场可视化模拟

根据二维直方图对中尺度云团三维流场流线的特征获取结果,利用四叉树算法对中尺度云团三维流场开展渲染绘制,从而实现中尺度云团三维流场可视化模拟分析。

LOD 四叉树算法可以在规模较大的数据中实现渲染绘制,但四叉树算法不能应用到球面区域,为了加快 LOD 四叉树对中尺度云团三维流场的渲染绘制速度,以球面四叉树为主,采用球面四叉树对二维直方图特征区域进行划分管理,令中尺度云团三维流场可以被快速渲染。那么球面四叉树的基本原理就如图 1 所示^[9]。

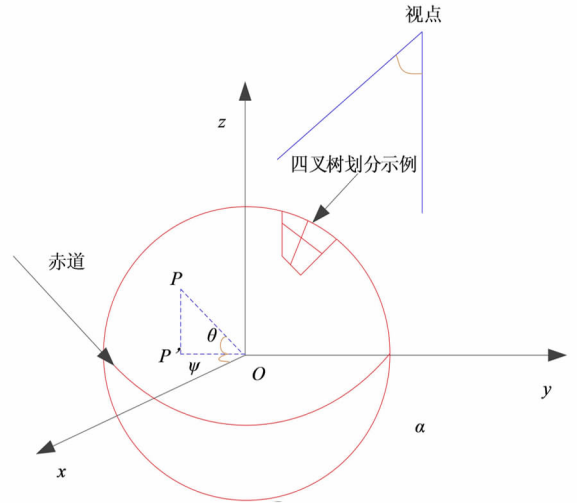


图 1 球面四叉树原理

图 1 内球体的中心为点 O ,在球体的表面任意位置为点 P ,而 OP 与球体之间的距离就是半径 R 。由于 P' 是整个球体平面 xOy 的投影,所以 P 在球体中的坐标系表示为:

$$P_{\text{sph}} = (r, \theta, \varphi), \quad \{r = R, \theta \in [-\pi/2, \pi/2], \varphi \in (-\pi, \pi]\} \quad (5)$$

式中, θ 标记为夹角, φ 标记为 OP' 和 x 轴的夹角, P_{sph} 表示球体坐标系, r 标记为半径。

根据方程(5)确定了球面区域的位置及面积,划分球面区域,划分后各个球体各个区域的 θ 及 φ 取值区间定义如下:

$$\begin{cases} \text{ChildRegion}_1: \{\theta \in [-\pi/2, 0], \varphi \in (-\pi, 0]\} \\ \text{ChildRegion}_2: \{\theta \in [-\pi/2, 0], \varphi \in (0, \pi]\} \\ \text{ChildRegion}_3: \{\theta \in [0, \pi/2], \varphi \in (-\pi, 0]\} \\ \text{ChildRegion}_4: \{\theta \in [0, \pi/2], \varphi \in (0, \pi]\} \end{cases} \quad (6)$$

式中, ChildRegion 代表划分区域。通过该方程可见将地球球体表面区域划分成 4 个区域块,实现球体的四叉划分。

划分后的球体属于四叉树形结构^[10],属于球面四叉树,其性质表示为:

1. 将球面用作四叉树的根节点块,设置根节点属于四叉树的第一层,令 θ 的区间取值为 π , φ 的区

间取值为 2π 。

2. 划分四叉树的叶子节点为 4 个子节点,在第 g 层的 θ 的长度: $\theta = (1/2)^{g-1} + \pi$; 而 φ 的长度区间为: $\varphi = (1/2)^{g-2} + \pi$ 。

基于建立的球面四叉树,在四叉树叶子节点块中设置一个粒子发射器,形成粒子源。以中尺度云团为例,设定中尺度云团生成位置的海拔高度为 h ,那么在球面四叉树中,中尺度云团在四叉树区域块中心点的坐标位置为:

$$P_{\text{sph}} = (R+h, \theta_{\text{lat}}, \varphi_{\text{lon}}) \quad (7)$$

式中, θ_{lat} 代表球面四叉树 θ 角度下的纬度, φ_{lon} 标记为四叉树 φ 角度下的经度。

粒子发射器引入到该区域的叶子节点中形成粒子源,获取粒子初始化位置,标记为:

$$P_{\text{sph}}^0 = \left(R+h, \theta_{\text{lat}} + \text{Rand}\left(\frac{1}{2}U_{\text{lat}}\right), \varphi_{\text{lon}} + \text{Rand}\left(\frac{1}{2}U_{\text{lon}}\right) \right) \quad (8)$$

式中, U_{lat} 表述为纬度方向, $\frac{1}{2}U_{\text{lon}}$ 表述经度方向, Rand 属于函数。

粒子源的粒子初始化完成后,可以及时更新粒子的最新位置、速度及其余属性。因而将粒子源引入球面四叉树后,就会组成四叉树粒子系统。将提取的中尺度云团三维流场特征映射到四叉树粒子系统,通过四叉树粒子系统中的粒子完成对中尺度云团三维流场任意区域的渲染,达成中尺度云团三维流场的可视化模拟,实现中尺度云团三维流场可视化模拟分析,最终中尺度云团三维流场可视化模拟结果如图 2 所示。



图 2 中尺度云团三维流场可视化模拟结果

4 实验与分析

为了验证基于 LOD 四叉树算法的中尺度云团三维流场可视化模拟分析方法的有效性,需要对该方法开展实验对比测试。

采用基于 LOD 四叉树算法的中尺度云团三

维流场可视化模拟分析方法(方法 1)、直线翼垂直轴风力机静态流场数值模拟与可视化试验方法(方法 2)和多普勒天气雷达三维可视化分析平台设计与实现方法(方法 3)实行对比测试。

(1)对中尺度云团三维流场开展可视化模拟时,会对中尺度云团三维流场流线实行渲染绘制,由于中尺度云团三维流场的分布区域会对渲染绘制帧率产生影响,导致最终绘制结果不佳,影响了中尺度云团三维流场可视化模拟效果。所以采用方法 1、方法 2 和方法 3 分别对中尺度云团三维流场流线的渲染绘制帧率开展详细测试,验证了三种方法的绘制性能。具体测试结果如图 3 所示。

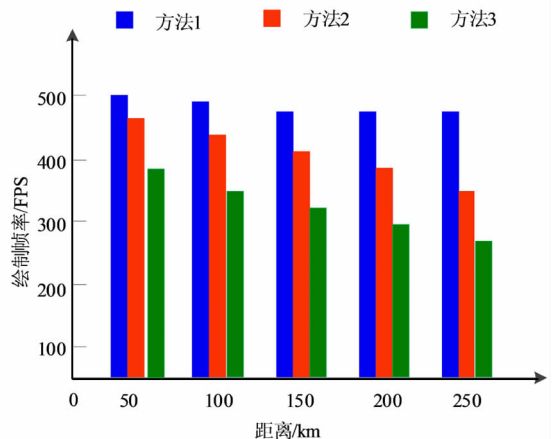


图 3 中尺度云团三维流场绘制帧率对比测试

分析图 3 中的数据可知,由于中尺度云团的绘制距离较远,三种方法对中尺度云团三维流场进行绘制时受到影响,导致绘制帧率有所下降。绘制期间方法 1 所绘制的帧率下降速度较慢,对中尺度云团三维流场的流线绘制完成后,帧率仍保持最高。但方法 3 与方法 1 形成了鲜明对比,其绘制帧率始终保持最低,验证了方法 1 的绘制帧率最优、绘制性能最好。

(2)将获取中尺度云团三维流场特征映射到四叉树粒子系统中,对粒子进行初始化时将数量控制在 1500~2000 个,当粒子不断增加后,中尺度云团三维流场的每秒帧数就会减少,因此为了验证方法 1、方法 2 和方法 3 的中尺度云团三维流场可视化模拟性能,利用三种方法对中尺度云团三维流场可视化模拟,依据模拟速率验证模拟效率,具体测试结果如表 1 所示。

分析表 1 中的数据可知,在粒子数相同的情况下,方法 1 的可视化模拟速率明显优于方法 2 和方法 3,粒子数量越多,方法 1 模拟速率提高效果就越明显,方法 2 在这种情况下可视化模拟速率也显著提升,但最终模拟速率要低于方法 1,而方法 3 的可视化模拟速率提升效果不显著,说明方法 3 的

模拟速率最低。

表 1 三种方法的可视化模拟效率测试

粒子数/个	三种方法的可视化模拟速率/%		
	方法 1	方法 2	方法 3
200	95.6	93.5	91.7
400	95.8	93.6	91.9
600	96.7	93.7	92.3
800	96.9	94.2	92.5
1000	97.5	94.5	92.8
1200	97.8	94.7	93.0
1400	97.9	95.2	93.2
1600	98.2	95.6	93.4
1800	98.6	95.8	93.5
2000	99.2	96.0	93.8

(3)基于以上两种实验,利用方法 1、方法 2 和方法 3 对中尺度云团开展可视化模拟,并将可视化模拟结果与实际可视化模拟结果相比较,以此证明三种方法可视化模拟效果的优劣。具体测试结果如图 4 所示。

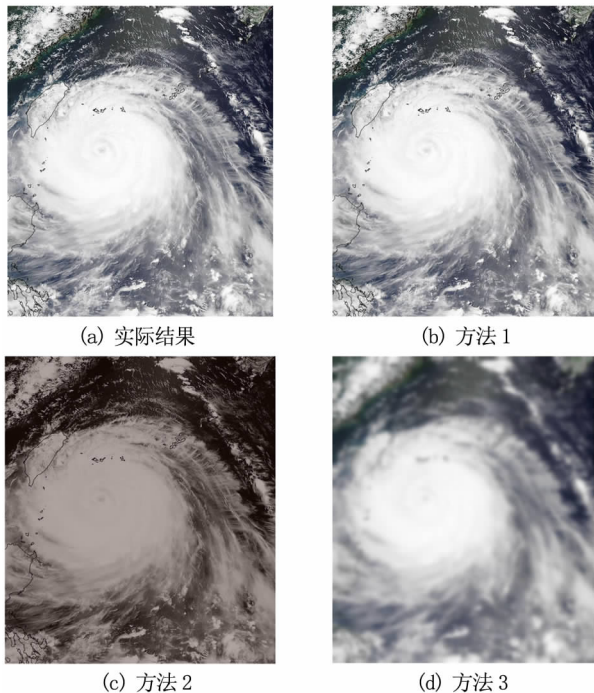


图 4 可视化模拟结果对比测试

通过图 4 可知,方法 1 的可视化模拟结果与实际结果相同,而方法 2 的模拟结果与实际结果的色彩绘制存有偏差,方法 3 的可视化模拟结果清晰度最差,不能从中获取中尺度云团三维流场信息。

综上所述,方法 1 的可视化模拟结果最佳,这是因为方法 1 利用二维直方图获取了中尺度云团

三维流场特征,弥补了中尺度云团空间丢失的信息,降低了流场流线的相似性度量错误,从而增强了可视化模拟效果,令可视化模拟结果与实际结果保持一致。

5 结 论

天气的复杂程度会导致中尺度云团三维流场可视化模拟效果不佳,针对这一问题,提出基于 LOD 二叉树算法的中尺度云团三维流场可视化模拟分析方法。该方法基于二维直方图取得中尺度云团三维流场特征,通过中尺度云团三维流场分析结果获取了中尺度云团三维流场特征,降低了流场流线的相似性度量错误,从而增强了可视化模拟效果;并将特征结果映射到构建的二叉树粒子系统中,利用该系统实现中尺度云团三维流场可视化模拟,对比另外两种现存方法,绘制帧率最优、绘制性能最好,模拟速率最低。在中尺度云团三维流场可视化模拟分析方法中发挥着重要作用,日后在中尺度云团三维流场可视化模拟分析方法中有着长远的发展前景。

参考文献

- [1] 王婧羽,崔春光,陈杨瑞雪,等.西南山区 5—8 月产生突发性暴雨事件的中尺度对流系统的时空分布特征[J].气象学报,2022,80(1):21—38.
- [2] 王金平,夏继红,汪颖俊,等.山丘区中小河流滩地时空演化与扰动因子分析[J].中国农村水利水电,2018(12):66—69+76.
- [3] 柴博森,王广义,朱国仁,等.制动工况下液力变矩器大涡模拟流场仿真及可视化试验验证[J].华南理工大学学报(自然科学版),2022,50(3):95—105.
- [4] 白悦获,佟国强,曲春明,等.直线翼垂直轴风力机静态流场数值模拟与可视化试验[J].排灌机械工程学报,2021,39(2):165—171.
- [5] 鲍婷婷,焦圣明,殷笑茹.多普勒天气雷达三维可视化分析平台设计与实现[J].气象科技,2020,48(4):490—495.
- [6] 吴金泰,蒋思艺,雷磊,等.猎户座分子云团中弥散电离介质的视向速度及线强度比分布[J].天文学报,2020,61(6):105—117.
- [7] 周晋红,王秀明,蔡晓芳,等.山西一次突发大暴雨的中尺度特征分析[J].干旱区资源与环境,2021,35(12):52—59.
- [8] 毕秀丽,邱雨檬,肖斌,等.基于统计特征的图像直方图均衡化检测方法[J].计算机学报,2021,44(2):292—303.
- [9] 姜哈,贺付亮,王世元.基于生长二叉树结构的二维建图算法[J].西南大学学报(自然科学版),2020,42(6):128—139.
- [10] 代欣位,郭甲腾,刘善军,等.基于动态二叉树索引的三维地质模型组合剖切算法[J].地理与地理信息科学,2020,36(4):8—13.