

# 基于重叠网格法的高速列车明线交会分析<sup>①</sup>

谭宝来, 李 慧, 王东屏, 尤 明

(大连交通大学 机械工程学院, 大连 116028)

**摘 要:** 研究了高速列车在明线交会时产生的瞬态压力波以及气动作用力将会对列车的运行安全产生不利影响。采用三维、非定常、可压缩流体控制方程和双方程湍流模型的数值方法, 基于重叠网格法对时速 300km 高速列车明线交会的压力波进行研究。研究表明: 重叠网格法能够解决高速列车明线交会的压力波变化问题, 主区域网格与从属区域的动网格数据传输准确; 高速列车相距 70m, 0.42s 时列车进入交会, 此时出现车头鼻尖处交会压力波“头波”, 车头鼻尖处所受压力达到最大; 0.95s 列车车头行驶到通过列车的车尾处, 两车纵向重合, 出现“尾波”。

**关键词:** 高速列车; 重叠网格法; 明线交会

## Analysis of High-Speed Trains Passing Each Other in the Open Air Based on Overset Mesh

TAN Bao-Lai, LI Hui, WANG Dong-Ping, YOU Ming

(School of Mechanical Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, China)

**Abstract:** The transient pressure waves and pneumatic force of high-speed trains passing each other in the open air will adversely affect the safety of train operation. Using the numerical method of three-dimensional, unsteady, compressible fluid control equation and two-equation turbulence model unsteady, compressible fluid control equation and two-equation turbulence model, the pressure changed for 300km/h high-speed rains passing each other in the open air based on overset mesh. The results show that the method of overset mesh can solve the problem of the pressure wave changed for the high-speed trains passing each other, and the grid transmission accurate between master zone and salve zone. There are 70m away from the high-speed trains, when the high-speed trains start rendezvous in 0.42s, the pressure wave “head waves” of front nose is appearing, the pressure of the front nose is maximum. The front of the train traveling through the rear of the train in 0.95s, two cars vertical coincidence, making a “trail wave”.

**Key words:** high-speed train; overset mesh; open wire intersection

随着我国经济的快速发展, 各个行业对计算流体力学的需求越来越高, 特别是车辆制造(高铁、汽车)、航天航空(飞机)、自然灾害(沙尘暴、洪水)等方面<sup>[1]</sup>。并且人们对产品效率、稳定性和安全性等的分析验证要求也越来越高。机械产品自身外形的复杂性及其运动幅度也给计算分析提出更多的挑战, 同时, 用户也期望 CFD 软件使用起来更加简单便捷<sup>[1,2]</sup>。本文使用的仿真软件为 SC/Tetra, 日本 CRADLE 公司于 1998 年基于非结构网格和控制体积法开发。该软件

在汽车、高铁、电站、国防、民用机械和环境等领域得到广泛应用; SC/Tetra 使用简单、结果精确、求解迅速且节约内存; 它已经成为现代 CFD 在许多领域的重要工具。

近年来, 重叠网格方法已经应用到大量流场求特别是对旋转机械和跨声速流场的求解。

国内外学者对重叠网格法的相关理论和生成算法都进行了研究。如张罗莲等人对 SC/Tetra 软件中的交叉旋转模型进行重叠网格的分析<sup>[3]</sup>; Hirsch 等人

<sup>①</sup> 基金项目: 国家科技合作计划(2010DFB80050)

收稿时间: 2014-09-17; 收到修改稿时间: 2014-10-29

对重叠网格之间的传递数据的合理性进行了分析<sup>[4]</sup>。以上研究都没有涉及到实际工程应用中。本文基于重叠网格法对某型高速列车明线交会过程进行数值模拟,分析明线交会过程中气动特性,车头、车身和车尾表面的交会压力波分布情况,为高速列车交会压力波参数检验提供理论依据。

## 1 重叠网格法

### 1.1 重叠网格法的基本概述

现在市场流通的计算流体力学数值仿真软件的动变形网格技术主要用来解决相对运动问题<sup>[7]</sup>。网格变形方式有 3 种: 弹簧压缩式、动态铺层式、局部网格重生式以及重叠网格法,而前三种网格变形技术对网格质量要求很高,不能很好的解决物体固体面的碰撞问题<sup>[5]</sup>。重叠网格法通过网格重叠进行计算,其显著优点是可以解决部分区域做非常复杂的相对运动以及固体空间接触问题,而其他三种模拟流场相对运动方法往往难以解决上述问题。

### 1.2 重叠网格法的基本原理

重叠网格法的基本原理是通过重叠部分的网格在不同的 2 个区域之间传递计算信息。如图 1 所示,主区域(master)与从属区域(slave)间的网格重叠在一起,其中主区域是静止的,不做相对运动的,而从属区域一般是用来模拟相对运动的<sup>[3]</sup>。在计算开始后,先在从属区域的细网格上进行迭代,然后重叠区域以从属区域的插值信息为基础,根据与重叠区域外部邻近网格的连接信息,将这些结果传递到一系列主区域的粗网格上,由于主区域的粗网格含有比较少的网格点,每次扫描给定的流场需要较少的计算量,因此可以节省计算机时间。再将主区域的计算结果通过插值的方式传回到从属区域,这个过程反复进行,知道满足从属区域的收敛条件。在重叠网格计算过程当中,需要记录交叉在一起的 2 种不同

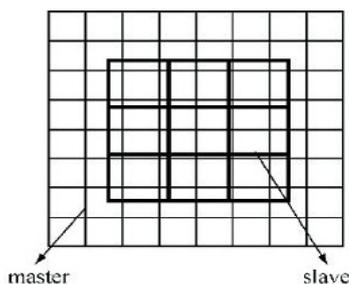


图 1 重叠网格法基本原理

网格的信息并让数值在其间传递,因此对计算机硬件要求比较高,计算往往耗时较长。

## 2 计算模型和网格划分

### 2.1 计算模型

高速列车计算模型如图 2 所示,列车计算模型取四辆编组车,车厢与车厢之间以外风挡相连接。由于中间列车结构具有相对对称性,横截面形状不变,其结构相对车头、车尾部分复杂度低很多,当流场流过头车一定距离后,绕流附面层的结构已趋于稳定,对列车中部流场的影响已经变得很小。因此,将列车缩短为四辆编组是一种合理的简化方法。



图 2 列车简化后的计算模型

列车外流场的计算区域理论上应该无边界,但事实上计算只能取有限的区域,此外,计算的区域如果很大,网格数量也会很大,这对计算机软硬件的要求就变得很苛刻,计算耗时也越长,数值模拟也就无法体现自身的便利性。依据以往的经验,当计算区域大到一定程度后,加大计算流场区域对结果的精度几乎没有影响。

明线流场边界尽可能远离车体以减小边界对流场的影响,明线列车外流场宽度至少应为列车宽度的 10 倍,长度至少为列车长度的 3 倍,由此确定明线交会流场域为宽度为 120m、高度为 40m、长度为 430m 的长方体区域。两车初始时相距 70m,相向等速交会,直至两列车的车尾相距 70m 时计算结束。

### 2.2 网格划分

影响 CFD 仿真的求解时间和精度的重要因素之一是网格质量<sup>[8]</sup>,包括网格尺寸、正交性、长宽比、内角和相邻网格的过度等。在本文算例中,采用八叉树方法计算网格,即 Octree 方法。Octree 方法的网格划分原理为:在曲面模型外围形成一个将物体完全包围起来的封闭空间,一般将此封闭空间命名为包围盒;使用 Octree 方法将包围盒从 3 个方向分层次地分割为 8 个子立方体层次结构;根据网格

精度要求,再依次继续使用 Octree 方法划分各子立方体,周而复始,直至完全达到网格尺寸要求为止.显然,子立方体越小,得到的四面体网格就越精细,即得到的网格单元密度可通过子立方体的大小或八叉树的分解层次决定.该方法思想简单、易于实现,并且具有几何局部特征的自适应性和单元密度的可控制性特点.

在本文算例中,因为使用重叠网格法,所以先对列车的计算模型和整体计算域空间分开,然后在对两个部分分别进行网格划分.如图 3 所示,先对列车的计算模型放入小型单独计算域内,设定为从属区域,作为移动网格部分.如图 4 使用 Octree 方法先对整个模型划分一次八叉树,然后对车体部分进行加密.在此基础上实现网格的自动划分,共划分四面体网格数目为 13 万,如图 5 所示.

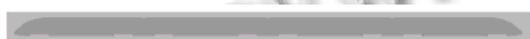


图 3 包括列车计算模型的从属区域

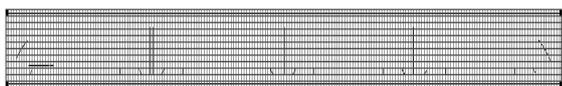


图 4 从属区域的八叉树划分



图 5 从属区域的网格划分

根据从属区域的网格尺寸只能小于或者相似于主区域的网格尺寸,由于主区域模型简单,不需要对局部进行加密,所以直接对主区域使用 Octree 方法进行一次八叉树划分,在此基础上进行网格的自动划分,共产生四面体网格数目为 693 万,主区域计算模型如图 6.



图 6 主区域的模型

将以上两个部分的网格合并在一起,如图 7 所示,在 SC/Tetra 软件中 overset mesh 设置中,将两个含有高速列车计算模型的从属区域的网格设置为 master 区域,主区域的网格设置为 slave 区域,生成

新的网格文件.



图 7 合并后的模型

### 3 研究方法验证

因为数值计算结果本身并不能直接应用于实际工程项目中,必须将它与具体试验进行对比验证.为了验证本文数值仿真方法与计算结果的准确性与可信性,利用前述模型,计算 2006 年 11 月份在胶济线高密至即墨段实车试验的典型工况:试验列车为庞巴迪公司研制的 BSP-200km/h 高速列车,实验过程中,两列 8 节车厢列车以 200km/h 的速度交会,对试验列车的外表面空气压力波进行了监测记录,为验证数值模拟计算的可靠性提供技术参考.具体的实车测试数据来自于田红旗老师的《列车交会压力波与运行速度的关系》<sup>[8]</sup>与《列车空气动力学》<sup>[9]</sup>书籍中以及熊小慧老师的《CRH2 型动车组列车交会空气压力波试验研究》<sup>[10]</sup>论文中.

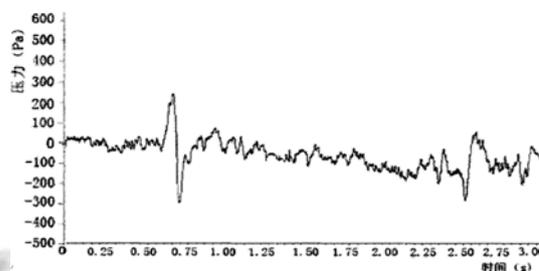


图 8 200km/h 试验车列车中部测点测试压力波曲线

### 4 计算结果及分析

在本文算例中,以某型高速列车明线交会为例,运行速度为 300KM/H. 明线运行时列车鼻尖的压力可以估算,公式如下:

$$p = \frac{1}{2} \rho v^2 \tag{1}$$

其中 p 为鼻尖压力,ρ 为空气密度, v 为列车运动速度,将数据代入公式可以得到列车车速 300km/h 时压力大概为 4253.5Pa,与图 9 中 0.26s 之前的鼻尖最大压力值(4450.04Pa)较为吻合,误差不超过 5%,说明该计算模型符合实际情况,在 0.26s 之后,鼻端压力开始升高,这是由于两辆列车在靠近,列车前端的空

气受到相互挤压而对鼻尖处压力造成干扰。

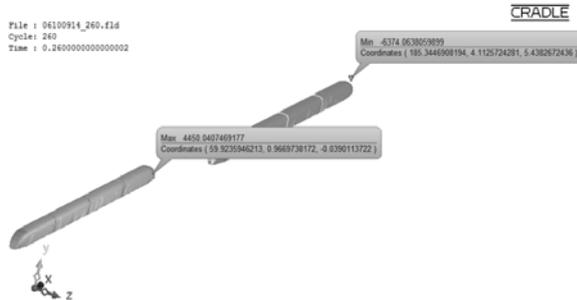


图 9 列车运行 0.26s 时最大压力值(鼻尖处)分布图

随着列车逐渐接近,鼻端压力开始升高,列车前端的空气受到相互挤压而对鼻尖处压力造成干扰,在 0.42s 时,也就是两辆列车的鼻尖相交会,如图 10 所示,鼻尖最大压力值为 4884.38Pa。然后流动向等截面车身发展,流动速度不断增大,当通过列车的车头到达被监测列车的车肩(变截面结束的位置)时,鼻尖最大压力降低,如图 11 所示,鼻尖最大压力值为 4028.17Pa,在这极短的时间内,形成“头波”,波幅为 856.21Pa,车身交会侧也有较大正压,车头非交会侧处于负压状态下。



图 10 列车运行 0.42s 时最大压力值(鼻尖处)分布图

0.95s 左右时,通过列车车尾到另一辆列车的车头处,在极短时间内再次形成一大、一小压力脉冲,形成“尾波”,波幅为 648.66Pa。如图 12 所示,0.98s 时鼻尖的最大压力值为 4905.49Pa。列车车尾相向驶过,尾车处于尾流作用下,两辆列车尾车几乎完全处于负压状态下。1.2s 之后,两列车驶离,如图 13 所示,列车分离后,1.82s 时的鼻尖最大压力值为 4256.83Pa,与理论计算的最大压力 4253.5Pa 相近,误差不超过 5%,符合实际计算情况。

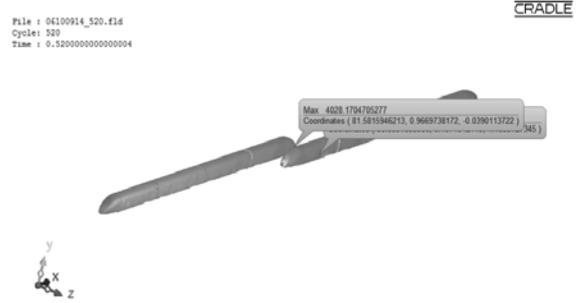


图 11 列车运行 0.52s 时最大压力值(鼻尖处)分布图



图 12 列车运行 0.98s 时最大压力值(鼻尖处)分布图

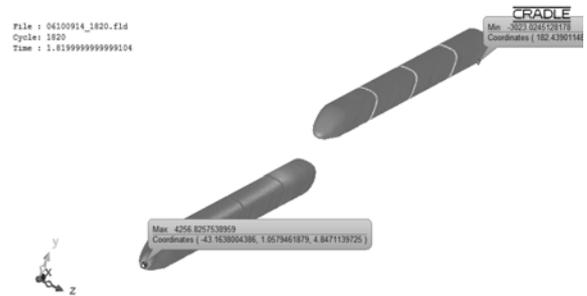


图 13 列车运行 1.82s 时最大压力值(鼻尖处)分布图

## 5 结论

本文通过以某型高铁明线交会为例,对 SC/Tetra 软件中的重叠网格法进行研究分析,得出如下结论:

(1)重叠网格法对网格质量要求不高,操作简单,可以很好的使用在较为复杂的相对运动中,以及固体空间接触的问题中,具有较高的工程实用性。

(2)时速 300km 的高速列车明线交会时,车体表面最大压力的变化值,与实际情况基本吻合,计算结果准确,可以为高速列车明线交会提供相关参数。

(3)高速列车 0.42s 开始交会时,鼻尖最大压力值由 4884.38Pa 下降到 4028.17Pa,形成“头波”,波幅为 856.21Pa; 1.53s 开始驶离时,鼻尖最大压力值由 4905.49Pa 下降到 4256.83Pa,形成“尾波”,波幅为

648.66Pa.

### 参考文献

- 1 方贵银.蓄能空调技术.北京:机械工业出版社,2006.
- 2 Khudhair AM, Farid MM. A review on energy conservation in building applications with thermal storage by latent heat using phase change materials. *Energy Conversion and Buildings*, 2004, 45: 263–275.
- 3 张罗莲.基于 SC/Tetra 重叠网格法的交叉旋转模型分析. *计算机辅助工程*,2012,4:69–71.
- 4 Hirsch C. *Numerical Computation of Internal and External Flows*, vol. 1: Fundamentals of Numerical Discretization. New York: Wiley, 1988.
- 5 唐家鹏.Fluent14.0 超级学习手册.北京:人民邮电出版社,2013.
- 6 王秀珍,刘堂红.时速 350km 动车组过隧道气动效应分析. *铁道科学与工程学报*,2013,1:92–97.
- 7 肖云华,李行,熊小慧.明线运行时动车组空调装置表面压力分布数值分析. *铁道科学与工程学报*,2013,3:108–111.
- 8 田红旗,许平,梁习峰,刘堂红.列车交会压力波与运行速度的关系. *中国铁道科学*,2006,6:64–67.
- 9 田红旗. *列车空气动力学*.北京:中国铁道出版社,2007.
- 10 熊小慧,梁习峰.CRH2 型动车组列车交会空气压力波试验分析. *铁道学报*,2009,6:16–19.