

# CFD 在高速列车研究中的应用

符松

(清华大学工程力学系, 北京 100084)

**[摘要]** 探讨高速列车设计中所应当考虑的空气动力学问题, 与数值计算方法在解决这些问题中的应用现状及前景, 并通过求解流体力学的基本方程, 初步获得了二维模型高速列车中头部附近的流动特征, 为进一步研究高速列车空气动力学问题打下了基础。

**[关键词]** 高速列车, 计算流体力学, 空气动力学

## 1 概况

空气动力学问题是高速列车设计中所必须考虑的关键问题之一。它主要包括: 列车运行中的气动阻力、列车交会、进出隧道及在隧道中运行的气动力场的变化, 列车运行所产生的气动噪声, 侧向风对高速列车运行安全的影响等。例如, 低速运行的列车(时速约 60 km), 其所受的空气阻力约占总阻力的 30%, 但当时速提高到 250 km 时, 空气阻力将占 80%。在工业发达国家, 时速 450 km 以上的高速列车正在研究之中, 列车运行的气动特性将十分接近高速飞行器, “子弹车”的描述不仅形象而且准确。列车交会过程中很可能产生激波。然而, 由于地面效应, 高速列车空气动力学问题与航空航天领域中空气动力学问题相比有重要差别。

在我国, 研究工作已受重视<sup>[1]</sup>, 但主要集中于单车运行的实验研究, 为车头的外形设计提供一定的依据。然而, 我国应用计算流体力学(CFD)方法解决高速列车的气动力学问题的研究工作仍然处于起步阶段, 远落后于国外的研究水平。本文的目的在于探讨 CFD 方法在高速列车研究中的重要作用, 介绍作者所得到的数值计算的初步结果。

## 2 高速列车空气动力学

### 2.1 高速列车空气动力学的主要问题

(1) 空气阻力 高速列车运行的阻力绝大部分来自空气, 这个问题引起了研究人员的高度关注<sup>[2,3]</sup>。降低空气阻力的主要措施取决于改进高速列车的外形设计, 尤其是车头车尾的几何形状对改善阻力有很大影响。尽管这一问题已在风洞实验中作了较深入的研究, 应当指出的是, 由于表面摩擦系数与模型的尺度相关, 风洞实验的数据不能直接说明高速列车在真实尺度雷诺数时的运行状况, 因此, 必须建立表面阻力系数与雷诺数之间的关系。

(2) 高速列车交会 当两列火车反向行驶交会时, 列车之间将产生不可忽略的压缩波, 甚至激波, 其大小对列车运行的安全间距起重要影响, 并对列车窗户玻璃的强度提出了要求。从

本文工作获国家自然科学基金优秀中青年人才专项基金和清华大学科学研究基金资助。

本文于 1995 年 4 月 26 日收到。

空气动力学的角度来说,这一问题较之上一问题更为复杂,主要是人们难于在常规风洞实验中实现两车交会的状况。列车交会过程是一个非定常问题。在水池中反向拖曳是个较易实行且经济的模拟方案,但压缩性的效应可能得不到好的模拟,游乐场旋转轮式的方案则要求旋转半径足够的大、以避免曲率的影响。但即使这样,重要的地面效应仍必须考虑在内。

(3) 隧道问题 通常把高速列车进入隧道及在隧道中的运行类比于活塞效应。列车有可能感应到强烈的压缩波与空气阻力,受工程设计投资的制约,隧道的最小许可尺寸是追求的目标。它由列车高速行驶时所受到的阻力及其安全性来决定。同时,隧道的通风系统应能有效地排出废气,甚至起到消压的作用。列车在隧洞中的交会对隧道的设计提出了更高要求<sup>[4]</sup>。在国外,高速列车运行实践中仍尽量避免隧道中的交会,其相关的空气动力学问题还不十分清楚。发展我国高速列车计划应重视这一研究。

(4) 气动力噪声 高速列车的行驶不可避免地产生噪声,噪声分贝比普通列车高得多,除了机械噪声外(车轮旋转、车身的振动等),由空气与列车相对运动所产生的噪声必须予以重视,它对车内旅客在旅行过程中是否处于一个良好舒适的环境,以及对铁路沿线居民是否造成严重的噪声污染都有十分重要的影响。这方面的研究工作我国目前尚未见展开,它提出了诸如高速列车铁路线须距居民区住宅的合适距离的问题。

## 2.2 高速列车研究对 CFD 的挑战

计算流体力学是研究流动问题的重要手段。它的特点是通过合理的数值方法在计算机上对所研究的问题进行模拟、仿真,并提供工程人员所需要的流体力学参数。随着计算机工业的迅猛发展,计算流体力学已用来解决愈来愈复杂的实际流动问题。由于它不直接要求建立实验室硬件设备,因而可避免许多在实验室条件下所不能克服的困难。在高速列车空气动力学问题的研究中,计算流体力学是不可缺少的重要手段。在国外的高速列车研究中,CFD 为工程设计作出了重要贡献。

然而,CFD 远不是一个万能的工具,它的作用受计算机硬件(我国的计算条件尚待大幅度提高),流动的数学物理模型和数值方法的精度制约。因此,应用 CFD 研究高速列车空气动力学问题仍有许多问题需要解决。根据国外特别是欧洲的经验,我们可以对 CFD 在高速列车研究中所能解决的问题及其仍存在的问题作出以下评价<sup>[5]</sup>:

(1) 现有的 CFD 软件是非常有价值的工具,能为列车空气动力学专业人员提供许多有用信息,帮助他们通过对流动现象的深入了解选择更加合理的设计方案。然而,CFD 模型应满足这样一些要求:(a) 模型应是三维、可压缩和有粘的,在一些初步的简化研究中,压缩性可以被忽略;(b) CFD 编码应包含选择范围较宽的湍流模型,使数值模拟能够选择最合适的模式,现有的高速列车实验数据尚不能为湍流模式的选择提供可靠依据;(c) 模型应是用户友好式的、包含高效的数据管理和可视化软件服务。

(2) 现有的 CFD 模型还不能解决列车空气动力学的所有问题。基于所研究问题的复杂性,目前还必须应用不同类型的 CFD 模式解决不同的问题。例如,倚仗贴体坐标的结构网格有限体积法可用来解决一般的对流动细节要求不高的问题(如列车的总体流场)而对于具有复杂几何形状的局部区域,无结构网格的计算模型则应是更为有效。

(3) CFD 不能完全替代实验,实验数据对 CFD 模型的标定和湍流模式的验证是必不可少的。但是,一个好的 CFD 软件可以大幅度地降低对实验的要求,并可在一些领域展开既有创

造性且又经济的研究,如:瞬态现象的研究,特别是对阵风、侧向风和列车交会现象;改进列车的设计,实验研究的周期长,耗资大,提供的设计方案也有限,CFD则可避免这些问题。

(4) 现有实验数据对验证CFD模型和湍流模式来说都还很不充分,限制了CFD进入实际应用所能解决问题的能力。

以上问题是在应用CFD时所必须面临的,其中一些问题可根据现有的计算经验加以初步解决,如数值格式,湍流模式等。

### 3 CFD在高速列车研究中的初步应用

尽管CFD在研究高速列车空气动力学问题中仍有许多问题需要解决,现有的计算手段仍可对许多重要问题提供定性答案。在我们的初步研究中,为简化问题,我们假设列车是二维的,即认为列车足够高,并认为列车是矩形的,空气的压缩性可以被忽略(这在非交会状态时是合理的)且流动为层流;同时取列车的运行速度为360 km/h。

#### 3.1 列车正常行驶时的流动特征

根据以上条件,如将坐标固定在列车上,则流动特性为一长矩形绕流。在这种流动中矩形的侧翼、尾部、甚至头部区域都可能回流区的出现。我们认为列车的前半部分的流动特征对列车的运行阻力影响最大,本文计算因而针对这一区域。图1(a)给出的是以地面为参照系列车运行时周围空气速度的矢量图。我们看到,列车前方空气被运动列车向侧翼排开,并形成强旋涡。紧贴车身,气流被列车带动向前运动,但在旋涡后面离车身一定距离的气流则是向后运动,并出现一极大值。图1(b)给出是压力等值线图,从中我们可以判断车身周围高压区的位置是列车前缘及旋涡尾部附近,旋涡中心区域为低压区。

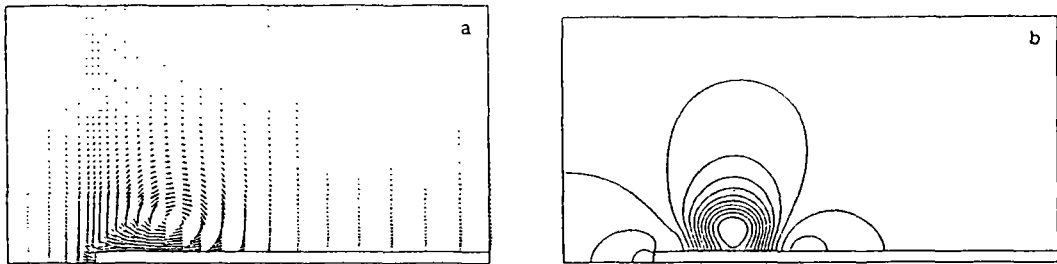


图1 模型高速列车行驶时周围空气的气动力场:(a)速度矢量图;(b)压力等值线

#### 3.2 双车并行的流场特征

在实际商业运营中,两列列车一般不可能等速同向并行行驶,但从理论研究及技术储备的角度出发,这一问题很有意义,它是否类似于两船并行会靠拢相撞?

图2(a)中显示的是两列并行列车等速行驶时的对称半平面流场矢量图。在列车的外侧的流型与单列火车的流场类似,但旋涡,强度更大;在两列车之间区域的流体也与列车一起向前运动。值得注意的是,中间气流的速度比列车行走还快,按常理是难于理解的。然而,由于列车内侧阻力较大,气流难于穿越,而列车又将空气向两边分开,产生头部的横向气流,从而将中间区域的空气引出。这与两船并行的情况不一样,船体的流线型设计使船间流体得以通过且速度较快,因而压力较低。从图2(b)的压力等值线可以看出,列车间的压力高且变

化小,因而流体从并行列车中心流出。不过这一现象很可能与本文的二维假设有关,若列车高度有限且存在地面效应。列车的上部应会有消压作用,产生上升气流,平行于地面的速度矢量与二维流场应有较大差别。

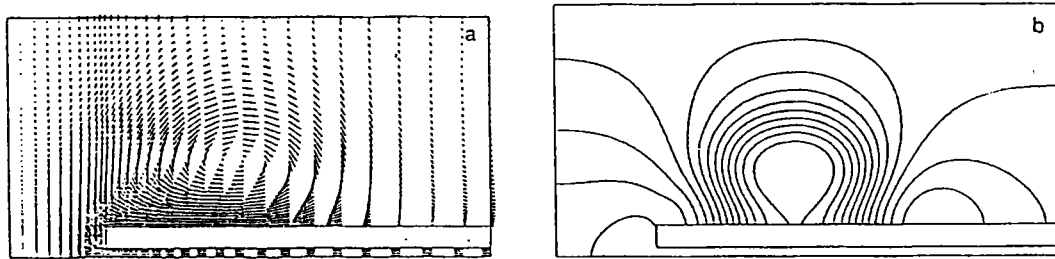


图2 两辆模型高速列车并行时周围空气的气动力场:(a)速度矢量图;(b)压力等值线

### 3.3 列车交会

列车交会是列车行驶过程中的常见状态,由于高速列车的相对速度较大, $Ma > 0.5$ 是正常现象,是否产生弱激波,则是一必须认真研究的问题。但是,空气的压缩性是必须考虑的。列车交会为数值计算带来一系列新问题,这里有三个参照系:地面及分别固定于两列对开的列车上的坐标系。这项数值计算工作正在清华大学进行。

### 3.4 总结

本文简要探讨了高速列车的空气动力学问题,通过数值计算得到了简化模型的流场特征,表明CFD是研究高速列车空气动力学问题的重要手段。

## 参 考 文 献

- [1] 王卫东, 贺启庸. 高速铁路列车系统中的动力学问题. 力学进展, 1995, 25 (1): 134-143.
- [2] 肖京平. 高速列车空气动力学研究取得重大进展. 气动动态, 1994, (总 178).
- [3] Brockie N J W, Baker C J. The aerodynamic drag of high speed trains. J. Wind Eng. Industr. Aerodyn. 1990, 34, 273-290.
- [4] Forster, K. The crossing of two high-speed trains in a tunnel. Proceedings of 4th Int. Symp. Aerodyn & Ventil, Vehicle Tunnels, 1982, March 23-25, 129-136.
- [5] A state of the art review and preparatory study of CFD applications to train aerodynamics, ERCOFTAC Report to ORE, May 1989.

## APPLICATION OF CFD IN HIGH-SPEED TRAIN AERODYNAMIC STUDY

Fu Song

(Department of Engineering Mechanics, Tsinghua University, Beijing 100084)

**Abstract** Aerodynamics is one of the major concerns in high-speed train design. At the speed above 250 km/h, for instance, air drag becomes the dominant resistance force to the movement of the train and the compressibility effect of the air flow induced by the motion of the train may be not insignificant, in contrary to low-speed train. This paper thus attempts to discuss the successes and problems associated with the application of computational fluid dynamics approach in the study of high-speed train aerodynamics. Particular attention is focused on the aerodynamic characteristics of high-speed train crossing, crossing in tunnel, parallel running, running in tunnel and cross-wind effect. Existing studies show that the CFD has proved to be a power approach to provide aerodynamic information for the designers. However, CFD approach has to overcome computer power limitation as well as the deficiencies in turbulence modelling. Interesting results of the preliminary computation of flow around high-speed train by the author is also presented.

**Key words** high-speed train, computational fluid dynamics, aerodynamics

· 信息 ·

## 张存浩主任率代表团访问俄罗斯

应俄罗斯基础研究基金会主席福尔多夫院士的邀请,张存浩主任率国家自然科学基金会代表团于1995年6月8日至15日对俄罗斯进行了访问。

在俄访问期间,代表团同俄罗斯基础研究基金会签署了合作协定议定书和谅解备忘录两个文件。这次签署的合作协定议定书,是为了实施我委员会与俄罗斯基础研究基金会1994年12月23日在北京签订的合作协定,对其中各项条款都作了比较具体的规定,主要内容有:双方每年资助合作项目不超过30个;合作项目中双方互访次数每年不超过2次,每次人数不超过2人,访问期限不超过10天;每个合作项目中每方参加人数不超过5人,以及财政资助等细则。这次签署的谅解备忘录实际上是双方的会谈纪要,备忘录明确了双方将拨款用于双方的国际合作,双方将于1995年秋和1996年春受理中俄合作项目的申请,并在各自的国家公布这一消息,以及中俄合作项目将在同行评议的基础上由双方同意后实施等管理办法。

代表团还访问了俄罗斯科学院,同副院长贡恰尔院士举行了会谈,并签署了会谈纪要,其内容是双方同意将我委员会与俄罗斯科学院合作协议中1993—1994年的合作计划延长至1995—1996年。

代表团访问了莫斯科和圣彼得堡两个城市,考察了国立莫斯科大学和几个研究所,对俄罗斯的科研现状有了比较现实的认识。

这次访问是在江泽民主席访问俄罗斯之后,李鹏总理访俄之前进行的,对于促进两国科学家在基础科学领域中就双方感兴趣的题目开展合作具有重要的意义。

(国际合作局 袁幼新 供稿)