# 降落伞工作过程数值模拟研究综述

简相辉,金哲岩\*

同济大学 航空航天与力学学院, 上海 200092

摘 要:回顾了降落伞研究方法从实验方法、半经验半理论方法到仿真模拟方法的发展历程,显示了数值模拟方法在降落 伞研究方面的巨大前景。同时总结了伞衣流场数值模拟、伞衣结构数值模拟、流场和结构耦合的数值模拟的最新进展,通 过研究发现,降落伞流固耦合数值模拟研究的主要方法是任意拉格朗日欧拉方法 (ALE)、变空间域 / 稳定时间 – 空间 (DSD/ SST) 方法和浸没边界法 (IBM),这些方法代表了降落伞流固耦合技术研究的最新水平。

关键词:降落伞,流场数值模拟,结构数值模拟,流固耦合数值模拟

#### 中图分类号: V244.21+6 文献标识码: A 文章编号: 1007-5453 (2016) 10-0001-07

现代高性能降落伞是由化纤织物 (如尼龙、涤纶、锦纶 等)制成,具有质量轻、弹性好、强度高、展开后阻力面积大等 特点。此外,还具有另外一个重要性质,即透气性。透气性 与降落伞的使用性能密切相关,能够提高降落伞的稳定性以 及降低伞衣拉直时的动载,而这一性质也给降落伞的研究带 来了很大的困难。降落伞的主要用途是减速,如救生伞和伞 兵伞就是利用降落伞具有很高的阻力系数以达到降低乘客 和伞兵下落速度的目的。其次,降落伞还可以在物体运动过 程中起稳定作用,如空投水雷、鱼雷在入水时需要有一定的 入水角,飞行员需要在有利姿态下与弹射座椅分离,这些都 需要降落伞的稳定作用。根据降落伞的结构形式,可以把降 落伞分为:密织物伞、带条伞、旋转伞和滑翔伞(主要包括冲 压式翼伞和龙骨式翼伞),它们的性能和用途各不相同。降 落伞的一般工作过程主要包括:自由坠落阶段、拉直阶段、充 气阶段和稳定阶段。拉直和充气阶段的时间非常短,却是体 现降落伞性能的最为重要的阶段,也是研究最多的阶段<sup>11</sup>。

降落伞的传统研究方法主要有实验法和理论法。实验法主要包括风洞试验、水洞试验、空投试验、拖曳试验、气动炮试验等。通过试验可以验证降落伞的阻力系数、稳定性、临界充满速度、开伞动载、伞衣流场压力分布,也可以研究伞衣织物透气量、伞衣形状、伞衣结构对降落伞性能的影响。1972年, Reidhenau DE利用风洞实验方法研究了

从 Ma0.2 到 Ma2.6 下多种盘 - 缝 - 带伞结构在维京 (Viking) 探测器尾流中的气动特性<sup>[2]</sup>。2008年,余莉等人利用七孔 探针和风洞设备对不同透气情况下的降落伞的绕流流场 进行了试验测量,直观地描绘了伞衣流场的静压和速度分 布<sup>13</sup>。该试验方法具有耗时、昂贵的缺点,只能作为一种验 证方法,无法指导设计。理论方法采用在实验方法中获得降落 伞的性能参数,通过把伞衣、伞绳、载荷简化成一系列刚性模型 来求解降落伞的拉直、充气等工作过程。该方法没有考虑伞衣 和流场的耦合作用,还需依赖试验取得的参数,所以不是纯理 论方法。理论方法主要有 Wolf 直线拉直模型法、充气时间与 充气距离法、轴向动量方程模型法、轴向-径向动量方程模型 法。Scheube 等人对理论研究方法的发展做出了很大贡献<sup>[49]</sup>。 然而,由于降落伞的工作过程具有极为复杂的动力学特征,它 涉及到空气动力学、结构动力学、多体动力学等诸多学科。降 落伞在拉直、充气展开和稳定下降的3个工作过程中,充气过 程是动力学特征最为复杂的阶段,这是一个几何非线性与材料 非线性并存的大变形结构动力学问题,且是一个流固耦合过 程,又加上伞衣具有透气性。因此,理论研究方法具有一定的 局限性。

随着计算机技术和计算力学方法的发展,数值模拟技术引起降落伞研究和设计人员的极大关注。经过近40年的研究发展,科研人员研究出了很多流场模型、伞衣结构模型、

收稿日期: 2016-07-01; 退修日期: 2016-07-13; 录用日期: 2016-07-18

<sup>\*</sup> 通讯作者 . Tel.: 13917312780 E-mail: zheyanjin@tongji.edu.cn

引用格式: JIAN Xianghui, JIN Zheyan. Review on the development of numerical simulations on parachutes [J]. Aeronautical Science & Technology, 2016, 27 (10):01-07. 简相辉,金哲岩. 降落伞工作过程数值模拟研究综述 [J]. 航空科学技术, 2016, 27 (10):01-07.

流场模型和伞衣结构模型的耦合方法,在充分反映伞衣和流 场特性的情况下,能够精确模拟单个降落伞或伞群的拉直、 冲气展开、稳定下降、着陆冲击的整个工作过程。本文简要 介绍了降落伞数值模拟研究的发展现状。

#### 1 伞衣流场数值模拟

早在20世纪70年代,研究人员就已经考虑利用计算机 来对降落伞的工作过程进行数值模拟和计算机仿真研究。最 初,研究人员仅仅在指定伞衣形状的前提下计算伞衣流场。 通过对伞衣流场的模拟计算,可以确定伞衣上的压力分布。

#### 1.1 基于网格的流场模拟

目前,计算非流线型物体气动力的数值方法有两大类: 一是传统的基于网格的计算流体方法,另一类是涡方法。 基于网格方法的优势是目前有很多商业软件可以使用,如 CFD-ACE 可以用来计算不可压流动, FLUENT 可以用来计 算可压流动。然而,基于网格的方法也有明显的缺点:(1) 为了更精确求解流场,尾流区应该取的比较大;(2)为了精 确表示尾流结构及防止数值耗散,尾流区的网格应该划分 得很细;(3)由于是非流线型物体,上游及侧向的边界要取 得比较远;(4)对可变形的物体,受流场影响,物体变形要不 断进行网格重新划分<sup>[10]</sup>。这4个因素造成了计算量很大。 1995年, Nelsen 使用计算流体力学 (Computational Fluid Dynamics, CFD) 代码 RAMPANT 计算了具有 12 幅面的带 条伞,采用刚性伞衣模型同时模拟了低声速和超声速的流 场<sup>[11]</sup>。2012年, Xiaopeng Xue 等人采用刚性伞盖, 数值求解 2.0 马赫数下的雷诺平均纳维 – 斯托克斯 (Navier-Stokes) 方程,所得的流场结构和激波结构与试验结果非常接近,同 时观察到了半球形状的弓形激波周期性的侧向扩张<sup>[12]</sup>,如 图1所示。



#### 1.2 基于涡方法的流场模拟

涡方法的优点是只需将涡布置在有涡量的区域,这样 就减少了计算量;其缺点是可利用的商业软件少。目前, 利用涡格法的商业软件有 VSAERO, USAERO, 但是这 些软件都只能用来计算没有流动分离的情况。1975年, Reddy 和 Roberts 将伞衣模拟成一系列铰链连接的线段, 考虑伞衣上涡的脱落及尾流的流动,计算了伞衣上压力分 布<sup>[13]</sup>, 1979年, Klimas 用附着涡代替实际的伞衣,计算了伞 衣上的压力分布<sup>[14]</sup>, 1989年, Strickland 用涡方法计算了二 维圆弧的绕流问题<sup>[15]</sup>, 2007年, Michael B 等人采用脱落涡 模拟法 (DES) 计算模拟了超声速下的盘-缝-带伞的流场 结构<sup>[16]</sup>。从计算结果可以发现,伞衣上的压力有周期性的 过压和低压现象,这种现象是造成超声速下伞衣底边塌陷的 主要原因。以上伞衣周围流场的数值模拟计算都是在指定 伞衣形状的前提下建立的,没有将伞衣周围流场的变化与伞 衣结构的变形耦合起来。

### 2 伞衣结构数值模拟

伞衣结构的模拟计算就是用来求解伞衣在外力作用下 的应力及形状问题。伞衣的结构应力分布如图 2 所示。



图 2 伞衣的结构应力分布 Fig.2 Computational structure stress distribution

2.1 基于质点 - 弹簧 - 阻尼 (MSD) 模型的结构模拟

降落伞的伞衣产生大变形的主要阶段是充气过程,在这 一过程的每个时刻可用达朗伯原理将伞衣变形作为静态问 题来处理。压力 - 应变平衡法就是按照上述思路,在充气条 件和充气状态下,用给定的吊带力和压力分布,调整气动力数 值,计算出平衡状态下的伞衣应力和形状。20世纪 60~70年 代,美国人基于此方法提出了伞衣应力分析 (CANO) 模型, 该模型假设伞衣上气动力由实验得到。1975年,Sundberg将 伞衣离散为一系列用阻尼弹簧连接的质点,即质点 - 弹簧 -阻尼 (MSD) 模型,通过计算每个质点在惯性力、张力、重力、 气动力作用下的运动,得到伞衣的形状和应力<sup>[17]</sup>。其中,气 动力由试验得到。1988年,Sundberg 基于压力-应变平衡法 和 MSD 模型提出了一个比 CANO 更为简单实用的模型伞衣 载荷分析模型(CALA)<sup>[18]</sup>。由于 MSD 模型概念清晰,易于 理解和应用,能够与多种流体力学计算方法和耦合格式结合, 在降落伞的流固耦合模拟中得到了广泛应用。

#### 2.2 基于薄膜有限元的结构模拟

伞衣结构的有限元模拟是伞衣的另一种离散方法。该 方法是随着薄膜非线性有限元理论的发展而建立的,能够更 精确地表示伞衣的变形,与流场的模拟计算联系也更加紧 密,为降落伞的流固耦合计算提供了重要支撑。

1993年, Benny 等人将伞衣假设为半球形薄膜。根据 Stroke 球形薄膜公式,考虑伞衣切向和法向的加速度与速 度,推导出伞衣变形的 2 个偏微分方程<sup>[19]</sup>。1995年, Benny 又建立了伞系统的三维有限元模型<sup>[20]</sup>。2000年, Accorsi 等 人也建立了包含有薄膜和索带单元的伞衣结构动力学有限 元模型<sup>[21]</sup>。2001年, Accorsi 等人又提出了薄膜褶皱的有限 元算法<sup>[22]</sup>。2003年,又发展出了滑移索单元,用于解决索单 元通过给定动结点的问题<sup>[23]</sup>。

在利用这些模型对伞衣的模拟计算中,伞衣上气动力 都由试验得到,也没有将伞衣结构计算与伞衣周围流场计算 耦合起来。研究人员开发的这些伞衣结构模型不仅用于静 态下伞衣应力的计算,在用于降落伞流场与结构的耦合模拟 中也发挥了很大作用。

## 3 流场与结构的耦合模拟

降落伞实际的工作过程是流场与伞衣相互影响的过程,单独的流场模拟计算和伞衣模拟计算都依赖于试验或预 先指定的数据。同时,对伞衣的模拟计算,无论是 CANO 模 型还是 CALA 模型,都忽略了伞衣的惯性项。然而,在许多 情况下,降落伞的动态效应是十分显著的,特别是降落伞的 载荷峰值往往发生在伞衣形状发生剧烈变化的充气阶段。 这就要求流场模拟计算和伞衣结构模拟计算耦合起来。根 据耦合方式的不同可以分为紧耦合和松耦合。紧耦合就是 在每个时间步将流场方程与结构方程同时联立进行求解。 这种耦合方式的不足是:由于流场与结构的特性不同,可能 导致联立方程组为刚性;另外,结构方程的计算与流体方程 的计算速度相差太大,导致计算资源的浪费。而松耦合是将 上个时间步流体方程的计算结果传给结构方程,并进行下个 时间步的计算,再把结构计算得到的结果传给流体方程进 行下一个时间步的计算。这种耦合方式能够大大提高计算 速度。

#### 3.1 基于 MSD 模型的耦合模拟

MSD 模型也叫多节点模型,最早由 Sundberg 提出并用 于降落伞结构的离散,从而建立降落伞结构的动力学模型。 最初仅用于降落伞静态气动性能计算,而后随着耦合方法的 完善被广泛用于降落伞动态耦合的计算模拟。主要原理是 将伞衣和伞绳上的气动力离散作用于由弹簧阻尼连接的质 点上,然后根据力学定律求解出质点的位移,从而得出以质 点表示的伞衣的形状变化,再根据已经得到的伞衣形状进行 流体力学计算,得到这一状态下的伞衣和伞绳气动力,完成 一个时间步的耦合。这一模拟方法的显著特点是伞衣和伞 绳的 MSD 模型。

1981年, Purvis 开始将伞衣的运动方程与伞衣内部流体的运动方程进行耦合计算<sup>[24]</sup>,采用紧耦合的耦合方式,但是伞衣结构模型和伞衣内部流场模型都很简化。1984年, Purvis 完善了该模型,伞衣采用 MSD 模型,伞衣内部流场的计算采用二维欧拉方程<sup>[25]</sup>。1993年, Stein 和 Benny 使用简化的任意拉格朗日-欧拉 (ALE) CFD 程序与伞系统的 MSD 模型,采用松耦合的方式,计算了 C-9 平面圆形伞的充气过程<sup>[26]</sup>,伞衣的变形过程如图 3 所示。2007年,余莉和明晓使用伞衣的 MSD 模型,利用标准二方程紊流模型,采用松耦合的方式模拟计算了平面圆形伞的主充气过程<sup>[27]</sup>,真实地得到了伞衣形状的变化情况,计算速度下的开伞载荷,充满时间和试验结果吻合较好,同时较详尽地得到了伞衣充气时的流场变化特性。2011年,张红英等人使



Fig.3 Canopy shape deformation in principal inflation stage

用伞衣的 MSD 模型,采用 RNG k-ε 湍流模型下的雷诺平均 纳维-斯托克斯(N-S)方程,模拟计算了伞衣的初始充气过 程,并首次考虑了初始充气过程中的折叠伞衣的张开问题, 实验结果证明了该模型的可靠性<sup>[28]</sup>。伞衣和流场的变化如 图 4 所示。





#### 3.2 基于 DSD/SST 格式的耦合模拟

从 1997 年开始,由 Tayfun E T 领导的团队开始关注 降落伞的流场与结构的耦合模拟 (FSI) 问题。他们的模拟 计算过程的核心方法采用的是变空间域 / 稳定时间 - 空间 (Deformable Spatial Domain / Stabilized Space-Time, DSD/ SST)格式,在这种格式里,问题的有限元格式被改写成与问 题相关的空间 - 时间域,这样有限元格式将会自动考虑到边 界与交接面的移动。交界面追踪技术和交接面捕捉技术成 为处理移动边界和移动交接面问题的通用方法。降落伞与 流场的相互作用在本质上是移动交接面问题,因此,该格式 在降落伞的模拟中将发挥越来越重要的作用。2000 年,他 们将该格式与伞衣的薄膜有限元模型相结合,采用并行计算 方法,对T-10 平面圆形伞稳定下降时的状态进行了 3D FSI 计算<sup>[29]</sup>,部分结果如图 5 所示。2004 年以后,他们所使用的 耦合方式由松耦合改进到准直接和直接的耦合方式,对于较 轻的结构,准直接和直接的耦合方式能够保证更加稳定和高

效的算法。2007年,他们又提出了稳定的时间-空间流构 耦合方法 (SSTFSI) 技术<sup>[30]</sup>,该技术基于更新一代的 DSD/ SST 格式,提高和扩展了 FSI 技术的性能和范围,这项技术 成为该团队降落伞数值模拟的核心技术。2008年,该团队 模拟了宇宙飞船所用的降落伞——环帆伞<sup>[31]</sup>。由于环帆伞 的伞衣上面有很多环缝和帆孔,使伞衣结构变得非常复杂。 他们采用均质几何孔隙模型 (HMGP) 技术解决了由结构透 气引起的难题。2011年,该团队又模拟了3具环帆伞同时 工作的稳定下降状态<sup>[32]</sup>。为了解决结构表面的接触问题, 该团队又提出了面-边-节点接触追踪(SENCT)技术,该 技术经过进一步发展,成为他们团队伞群 FSI 模拟的基本技 术。2012年,该团队使用开发的各种针对降落伞 FSI 模拟 的技术,对收口伞衣进行了三维模拟<sup>[33]</sup>。研究内容包括单 个环帆降落伞的解除收口过程、环帆伞群的解除收口过程和 解除收口前后的降落伞的工作状态。计算结果表明,该技术 能够解决降落伞数值模拟最具挑战性的问题。



图 5 伞衣形状和流场结构的变化 Fig.5 Canopy shape and fluid structure versus time

#### 3.3 基于任意拉格朗日 – 欧拉格式的耦合模拟

LS-DYNA 软件能够模拟计算瞬间大变形、冲击和流固 耦合等问题,它的流固耦合的主要计算格式是任意拉格朗 日-欧拉 (ALE) 格式。该格式兼有拉格朗日 (Langrange) 方法和欧拉(Euler)方法的特长。在结构边界上采用 Langrange 方法,能够有效地跟踪物质结构边界的运动,而在 内部网格的划分上,采用 Euler 方法,网格单元独立于物质实 体并且能够在求解过程中适当调整位置,使网格不至于出现 严重的畸变。这种格式分析剧烈变形问题时,既能清晰表现 边界变化又能适时调整网格。从2005年开始,研究人员开 始用该软件模拟降落伞的FSI问题,并取得了很大的成功。 2005年, Benjamin和 Anthony 使用该软件模拟了平面圆形 伞的充气过程,其中,耦合方法是欧拉-拉格朗日罚函数算 法<sup>[34]</sup>。在模拟结果中能够观察到降落伞的过度充气和循环呼 吸现象,证明了该方法具有很高的可靠性和使用前景。2007 年, Benjamin 和 Nicolas 应用一种新的欧拉 - 拉格朗日耦合 算法,该算法能够把伞衣的透气性引进降落伞的FSI模拟计 算中<sup>[35]</sup>。从LS-DYNA 971 版本起,该软件增加了透气性材 料的流固耦合算法,需要设置流固耦合关键字参数。2007 年, Lingard 等人采用该软件模拟计算了火星探索用降落 伞盘-缝-带伞在超声速下和受前体尾流影响时的工作性 能<sup>[36]</sup>。模拟结果直观展现了伞衣受流场压力脉动影响导致 的伞衣循环张满和塌陷现象。从模拟结果中还可以发现,在 超声速下,由于前体尾流和降落伞的弓形激波的相互作用导 致的降落伞的阻力丢失。超声速下的模拟结果如图 6 所示。 2013年,余莉等人采用该软件模拟降落伞的充气过程,然后 将得到的伞衣形状导出,经过处理后作为 CFD 的伞衣模型, 同时采用多孔介质模型模拟伞衣的透气性[37]。该伞衣模型具 有较真实的结构细节,如伞衣幅的突起,得到的流场数据也更 加符合实际情况。所使用的伞衣结构如图7所示。此方法可 以作为充气过程 FSI 模拟之后的流场模拟的辅助方法。





#### 3.4 基于浸没边界法的耦合模拟

近年来,也有研究者将浸没边界法(IBM)用于降落伞的FSI模拟计算。该方法既是一种数学建模方法,也是一种数值离散方法。在数学方法上,采用欧拉变量描述流体的状态,利用拉格朗日变量描述结构的运动边界,用光滑 Delta



图 7 伞衣结构的计算模型 Fig.7 The computational model of canopy structure

近似函数,通过分布节点力和插值速度来表示流场和结构的 相互作用,流场计算采用笛卡尔网格,而不是按照物体形状 生成复杂的贴体网格,无需处理从物理平面到计算平面的 转换问题,因而,可以大大提高计算效率。对于动态边界问 题,无需在每一时间步长上实时更新网格。浸没边界法在模 拟血液流动、湍流的直接数值模拟、多相流动等方面取得成 功,模拟结果和实验数据非常吻合,是目前计算流体力学领 域研究的热点。2006年, Peskin 等人将 IBM 方法扩展到能 够解决透气性边界问题,并用该方法模拟了 2D 伞衣的充气 过程,研究了伞衣的透气性对降落伞侧向稳定性的影响<sup>[38]</sup>。 2008年, Peskin 等人将 IBM 方法用于 3D 降落伞的数值模 拟,同时采用罚函数浸没边界法 (PIB) 方法<sup>[39]</sup>,该方法不仅 能模拟降落伞的充气过程、稳定下降过程、软着陆过程,而 且能模拟多个降落伞共同工作时的相互影响。降落伞的着 陆模拟结果如图 8 所示。2012 年, Xiaopeng Xue 等人采用 MSD 结构模型和 IBM 数值模拟方法相结合,计算了超声速 下伞衣变形和流场的动态变化,模拟结果与该状态下的实验 结果相吻合,展现了 IBM 方法的广泛适用性<sup>[40]</sup>。



图 8 用 IBM 模拟的降落伞着陆过程 Fig.8 Simulation of parachute landing by IBM

# 4 结束语

降落伞作为一种高效的气动力减速和稳定装置,在民 用、国防等领域有着非常广泛的应用。过去对它的研究一 直停留在理论分析和实验研究上。近年来的研究表明,数值模 拟技术作为降落伞研究的一种重要的研究方法具有很大的发展潜力。然而,由于降落伞结构的复杂性和工作环境、工作阶段的特殊性,对它的数值模拟虽然取得了一定成果,但仍然面临很大的挑战,如从折叠状态到拉直状态的模拟、自由下降时伴随有侧风时的模拟、某些具有操纵性能降落伞被操纵时的模拟、降落伞软着陆时的数值模拟等。

#### 参考文献

[1] 王利荣. 降落伞理论与应用 [M]. 北京: 宇航出版社, 1997: 7-12.

WANG Lirong. Parachutes' theories and applications [M]. Beijing: Aerospace Press, 1997: 7-12. (in Chinese)

- [2] Reichenau D E. Aerodynamic characteristics of disk-gap-band parachutes in the wake of Viking entry forebodies at Mach numbers from 0.2 to 2.6[R].AEDC-TR-72-78, Tennessee: Arnold AFB, 1972.
- [3] 余莉,明晓,陈丽君.不同透气情况降落伞的流场试验研究 [J]. 空气动力学学报, 2008, 26 (1): 19-25.
  YU Li, MING Xiao, CHEN Lijun. Experimental investigation on the flow-field of different vent canopy [J]. Acta Aero Dynamica Sinica, 2008, 26 (1): 19-25. (in Chinese)
- [4] French K. The initial phase of parachute inflation[C]// Proceedings of the 1968 Aerodynamic Deceleration Systems Conference El Centro, 1968.
- [5] Heinrich H, Norem R. Analysis of parachute opening dynamics with supporting wind tunnel experiments[C]//Proceedings of the 1969 Aerodynamic Deceleration Systems Conference, 1969.
- [6] McEwen A. An investigation of parachute opening loads, and a new engineering method for their determination[R]. AIAA, 1970.
- [7] Toni R A. Theory on the dynamics of a parachute system undergoing its inflation process[R]. AIAA, 1970.
- [8] Wolf D. A simplified dynamic model of parachute inflation[R]. AIAA, 1973.
- [9] Knacke T W. Parachute recovery systems design manual[R]. AD-A247666, 1991.
- [10] 余莉,明晓.降落伞技术的研究进展及展望[J].世界科技研究 与发展,2005,27(5):21-25.

YU Li, MING Xiao. Development history of parachute and expectation [J]. World Sci-Tech R&D, 2005, 27 (5): 21-15. (in Chinese)

[11] Strickland J, Higuchi H. Parachute aerodynamics: an assessment

of prediction capability [J]. Journal of Aircraft, 1996, 33 (2) : 241-152.

- [12] Nelsen J. Computational fluid dynamics studies of a solid and ribbon 12-gore parachute canopy in subsonic and supersonic flow[C]//AIAA 13th Aerodynamic Decelerator Systems Technology Conference, 1995.
- [13] Reddy K, Roberts B. Oscillations of a wedge in a free stream with particular reference to parachutes [J]. Appl Sci, 1975; 279-308.
- [14] Klimas P. Inflating parachutes canopy differential pressures [J]. Journal of Aircraft, 1979, 16 (12): 861-862.
- [15] Strickland J. A vortex panel analysis of circular-arc bluff-bodies in unsteady flow[R]. AIAA, 1989.
- [16] Barnhardt M, Drayna T, Nompelis I, et al. Detached eddy simulations of the MSL parachute at supersonic conditions[R]. AIAA, 2007.
- [17] Sundberg W. Finite-element modeling of parachute development and inflation[R]. AIAA, 1975.
- [18] Sundberg W. New solution method for steady-state canopy structural loads [J]. Journal of Aircraft, 1988, 25 (11): 1045-1051.
- [19] Benny R. A nonlinear dynamic spherical membrane model[R]. AIAA, 1993.
- [20] Benny R, Leonard J. A 3-D finite element structural parachute model [R]. AIAA, 1995.
- [21] Accorsi M, Leonard J. Structural modeling of parachute dynamics [J]. AIAA Journal, 2000, 38 (1): 139-146.
- [22] Accorsi M, Lu K, Leonard J. Finite element analysis of membrane wrinkling [J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2001, 50; 1017-1028.
- [23] Accorsi M, Zhou B, Leonard J. Finite element formulation for modeling sliding cable elements [J].Computers and Structures, 2004, 82: 271-280.
- [24] Purvis J. Theoretical analysis of parachute inflation including fluid kinetics [J]. Journal of Aircraft, 1981, 19 (4): 290-296.
- [25] Purvis J. Numerical prediction of deployment, initial fill, and inflation of parachute canopies[R]. AIAA, 1984.
- [26] Benny R, Stein K. Parachute inflation: a problem in aeroelasticity[R]. AIAA, 1994.
- [27] Yu L, Ming X. Study on transient aerodynamic characteristics of parachute opening process [J]. Acta Mech Sin, 2007, 23: 627-633.
- [28] 张红英,刘卫华,秦福德,等. 降落伞充气过程中伞衣外形及流

场变化研究 [J]. 空气动力学学报, 2011, 29 (3): 288-294. ZHANG Hongying, LIU Weihua, QIN Fude, et al. Study on the canopy shape and the fluid field during parachute inflation process [J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2011, 29 (3): 288-294. (in Chinese)

- [29] Stein K, Benny R, Kalro V, et al. Parachute fluid-structure interactions: 3-D computation [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2000, 190: 373-386.
- [30] Tezduyar T, Sathe S. Modelling of fluid-structure interactions with the space-time finite elements: solution techniques [J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 2007, 54: 855-900.
- [31] Tezduyar T, Sathe S, Schwaab M, et al. Fluid-structure interaction modeling of ringsail parachutes [J]. Comput Mech, 2008, 43: 133-142.
- [32] Tezduyar T, Takizawa K, Spielman T. Space-time FSI modeling and dynamical analysis of spacecraft parachutes and parachute clusters [J]. Comput Mech, 2011, 48: 345-364.
- [33] Tezduyar T, Takizawa K, Fritze M, et al. Fluid-structure interaction modeling of ringsail parachutes, with disreefing and modified geometric porosity[J]. Comput Mech, 2012, 50: 835-854.
- [34] Tutt B, Taylor A. The use of LS-DYNA to simulate the inflation of parachute canopy[R]. AIAA, 2005.
- [35] Tutt B, Aquelet N. Euler-lagrange coupling for porous parachute

canopy analysis [J].International Journal of Multiphysics, 2007, 1 (1): 53-68.

- [36] Lingard J, Darley M, Underwood J. Simulation of mars supersonic parachute performance and dynamics[C]// 19th AIAA Aerodynamic Decelerator Systems Technology Conference and Seminar, 2007.
- [37] Cheng H, Yu L, Rong W, et al. A numerical study of parachute inflation based on a mixed method [J]. Aviation, 2012, 16 (4) : 115-123.
- [38] Peskin C, Kim Y. 2-D parachute simulation by the immersed boundary method [J]. SIAM Sci. Comput, 2006, 28 (6) : 2294-2312.
- [39] Peskin C, Kim Y. 3-D parachute simulation by the immersed boundary method [J]. Computers & Fluids, 2009, 38: 1080-1090.
- [40] Xue X P, Hiroto K, Yoshiaki N. Numerical simulation on supersonic aerodynamic interference for rigid and flexible parachutes[C]// AIAA, 2012.

#### 作者简介

简相辉(1990-) 男,硕士。主要研究方向:降落伞空气动力 学。 金哲岩(1978-) 男,博士,副教授。主要研究方向:实验 流体力学。

porous parachute Tel: 13917312780 E-mail: zheyanjin@tongji.edu.cn

# Review on the Development of Numerical Simulations on Parachutes

JIAN Xianghui, JIN Zheyan\*

School of Aerospace Engineering and Applied Mechanics, Tongji University, Shanghai 200092, China

**Abstract:** The development history of parachute research methods from experimental methods, semi empirical and semi theoretical methods to simulation methods were reviewed, which shows the great prospect of numerical simulation in parachute research. The developments of Computational Fluid Dynamics (CFD) simulation of the fluid field surrounding the canopy, Computational Structure Dynamics (CSD) simulation of canopy structure and Fluid Structure Interaction (FSI) simulation of canopy structure were introduced, which mainly use ALE method, DSD/SST method and IBM method. These methods represent the latest technique level of the research on the parachute fluid-structure interaction.

Key Words: parachute, Computational Fluid Dynamics, Computational Structure Dynamics, Fluid Structure Interaction

 Received:
 2016-07-01;
 Revised:
 2016-07-13;
 Accepted:
 2016-07-18

 \*Corresponding author.
 Tel.:
 :13917312780
 E-mail:
 zheyanjin@tongji.edu.cn