

基于 STL 模型处理的飞机燃油质量特性计算

Calculation for Aircraft Fuel Gravity Based on STL Model

中航工业第一飞机设计研究院 罗景锋 刘小锋
西安交通大学 洪军

[摘要] 飞机燃油系统是飞机不可或缺的系统,燃油量占据了飞机近 50% 的重量和机翼翼盒 80% 多的空间,而且现代飞机愈加依赖燃油质量特性来调整重心,机电系统必须基于实时的燃油量状态和系统状态的精确获取,因此现代先进飞机复杂燃油箱中的燃油量测量和燃油质量特性计算成为燃油系统最为关注的基本问题。本文给出了以 STL 模型为基础的飞机燃油箱燃油量、燃油质量特性计算的主要实现方法和优点。

关键词: 飞机燃油系统 燃油质量特性计算 STL 模型文件

[ABSTRACT] The fuel system is the indispensable system of aircraft, fuel quantity is nearly 50% of the aircraft weight and over 80% of the wing space. And more aircrafts depend on fuel gravity to adjust center of aircraft gravity, accurate fuel measurement is a base for electromechanical integration. So the basic item is how to accurately measure fuel quantity and how to calculate fuel gravity in modern aircraft complex tank. The main method and advantage that calculate fuel quantity and gravity are preset based on STL format file.

Keywords: Aircraft fuel system Fuel gravity calculation STL format file

无论是最初较粗糙的还是当今精细的飞机,飞机设计中重量、重心是最重要的参数之一。在飞机飞行过程中燃油持续消耗是飞机重量、重心变化的主要因素,飞机飞行需要较佳的重心来使飞行更节能、更高效,因此在飞机设计全周期内需要进行多轮飞机燃油质量特性计算,以供分析重心并优化设计使用。随着能源价格的攀升,飞机燃油消耗率成为衡量飞机主要性能之一。新研发飞机对燃油消耗率均有很高的要求,特别是飞机长途飞行,燃油消耗效率的优劣关系到飞机性能、目标群认可、市场占有率。目前,国际上不仅仅通过燃油消耗顺序控制燃油重心,而且利用燃油分布来主动控制飞机重心。

例如空客 A310、A330、A340 飞机就在尾翼中设置了燃油箱,通过尾翼燃油箱和机翼燃油箱的燃油转输进

行飞机重心的调整控制,以获得燃油的高效利用。空客资料表明, A310 飞机的重心控制使得飞机在巡航状态下的阻力减小了 1.5%^[1], A340 飞机的重心控制可使飞机在巡航状态下的重心控制在 2%MAC (Mean aerodynamic chord, 平均气动弦) 以内^[2]。更有为了减弱超音速飞机跨音速飞行时飞机焦点变化带来的额外阻力,通过主动控制燃油的分布来调整飞机燃油重心,以获得理想效果。飞机燃油质量特性计算就是重心控制的重要基础^[3-4]。

现代飞机充分综合各系统功能以获得飞机整体最优。机内燃油用来作为其他系统散热热沉,早期飞机在燃油系统供油管路上设置液压散热器,燃油流动带走飞机液压系统的热量,再进入发动机为发动机滑油系统散热,最后燃油提供给发动机。然而随着需要飞机其他系统散热需求量愈来愈多,供油管路逐渐无法满足散热要求,目前先进飞机在燃油箱中布置散热元件进行散热。燃油箱内的热量是影响飞机安全的因素之一,散热需求和散热量的安全性限制的矛盾,需要对燃油箱燃油温度进行计算并控制。飞机能量综合(热管理)研究的内容就是如何高效管理热量使得飞机整体节能、满足需求,飞机燃油热计算更是不能脱离飞机燃油质量的计算。

目前大多数的飞机结构及系统采用了计算机数字设计,形成了大量的计算机数字模型和制造装配的精细模型,其中以 CATIA 软件形成的模型为主。因而充分地利用 CATIA 软件所产生的模型对飞机燃油质量特性进行精确计算成为业界的共识和目标。只有获得飞机燃油质量特性数据才能为飞机机电综合乃至飞机数字化精细控制和信息交流提供基础数据。

1 飞机燃油质量特性计算的主要方法

飞机燃油质量特性数据计算方法主要为解析法和模型切片法。解析法通过计算解析燃油箱数学模型来获得飞机燃油质量特性。模型切片法为切割 CATIA 燃油模型和有限元表达的燃油模型得到燃油质量特性数据的计算方法。

1.1 解析法

大约 20 多年前,国内某型飞机设计过程中就将燃

油箱用几何方程形式表达,积分计算获取燃油箱燃油质量特性。设计人员将燃油箱抽象为数学曲线、面等,再使用代表油面的直线和平面切割曲线和面,得到代表燃油面和燃油体积的面、体,再辅助以计算编程计算,取得了可利用的燃油箱各姿态下的燃油箱 H-V 曲线及质量特性,最后通过试验数据获取修正参数,获得飞机实际使用的数据。

该方法通过不断改进,为当时的飞机燃油系统的燃油质量特性获得提供了较为方便和经济的途径。但该方法显然无法满足现代飞机设计初步方案多、飞机外形多变、燃油箱系统构型复杂的要求,导致构建燃油箱数学模型困难,计算精度低,无法满足设计过程中多阶段的快速和愈加精细的评估数据的获取需要。

1.2 模型切片法

在燃油箱数学模型解析应用不久产生了模型切片法,模型切片法采用了微分方法,即燃油模型和代表燃油面的切割平面相交得到相交平面,相交平面面积乘以微高度 Δh 得到切片的体积,切割平面继续偏移 Δh 得到新切片的体积,依次计算可得到整个燃油箱中燃油的质量特性。

切片模型之一为燃油有限元模型,该燃油有限元模型获取为利用相关软件构建,或将燃油箱的 CAD 模型,通过人工或软件获得离散化的有限元模型。该方法中有限元建模较复杂且需具有一定的工程经验;计算方法复杂,需编写有限元计算程序;计算的精度仍不能满足要求,而且工程应用中很不直观。

进入 21 世纪,国内外飞机设计普遍使用 CATIA 软件,利用该软件可在飞机设计过程中形成精细准确的飞机外形模型、燃油箱模型及系统模型,而且 CATIA 软件具有庞大的接口文件供使用,因此国内出现了利用 CATIA 数模计算燃油质量特性的 CATIA 模型切片法^[5-6]。

1.3 CATIA 模型切片法

CATIA 模型切片法主要思想为利用飞机外形、燃油箱结构及系统 CATIA 数模,建立 CATIA 燃油数模,使用表示燃油面的平面切割燃油数模,利用 CATIA 软件的特性分析程序得到切割后的燃油质量特性。通过 CATIA 二次开发工具,可以自动完成系列切片,获得对应数据,形成所需的燃油质量特性数据。该方法成为国内大多数飞机设计时燃油质量特性数据获取的主要手段,再辅助以试验数据修正,应用于机载燃油特性的获取。

CATIA 模型切片法如图 1 所示。CATIA 模型切片建模相对简单,切割平面定义简洁而直观。切割后,计算燃油质量特性简单而准确,再辅之以 CATIA 二次开发的接口,可得到不同状态下的燃油质量特性,且较直

观。图 2 为 CATIA 模型切割。

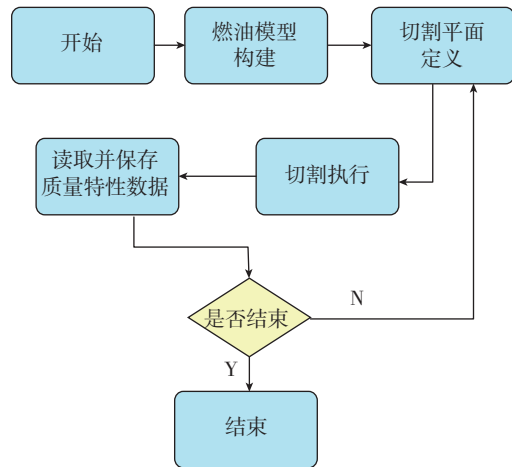


图 1 CATIA模型切片流程
Fig.1 Process of CATIA model slice

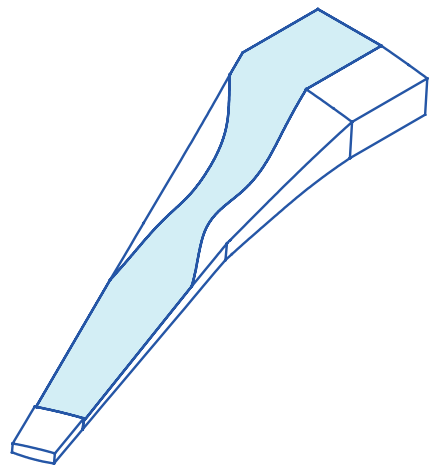


图 2 CATIA模型切片
Fig.2 Slice of CATIA model

飞机燃油质量特性计算是伴随着设计手段的提高和计算能力的发展而不断升级,质量特性计算向着计算精确、迅速,建模简单,显示直观、形象的目标发展。而事实上建模简易则模型有误差,计算失真不满足要求;CATIA 软件庞大,导致计算时对计算机的要求较高,无法满足适时、快速计算要求;对飞机燃油分布及质量特性要求的不断提高,设计师对燃油分布的直观评估要求苛刻,而目前计算无法实现较高的评估需求。

鉴于此,本课题给出了基于 STL (stereo lithographic) 模型处理的燃油质量特性计算的方法,使用 CATIA 软件将设计中形成的飞机燃油箱结构数模和系统数模转化为 STL 模型,通过对 STL 模型处理获得燃油质量特性。

2 STL 模型特点

STL 文件格式由美国 3D System 公司推出,在快速成形领域得到了广泛应用,很多主流 CAD 软件均支持 STL 文件的输入、输出,如 CATIA、Pro-E、UG 等。在工业界, STL 已被公认为是一种使用相当广泛的快速成形领域标准零件描述的文件格式,而且在其他需要进行三维实体模型处理的领域(如数控加工、反求工程、有限元分析及仿真等)都有较好的应用。STL 文件的数据格式相对简单,可以输出各种类型的空间表面。

STL 文件格式是用一系列的三角面片表达实体表面数据的文件格式,每个三角形面片用三角形的 3 个顶点和指向模型外部的法向量表示,图 3 为 CATIA 简单的模型。STL 文件本身无任何拓扑信息,它仅仅是表达多个三角面片。用 STL 文件表述物体表面,是用很多个三角形面片去逼近 CAD 实体模型。它所描述的是一种空间封闭的、有界的、唯一表达物体的模型。

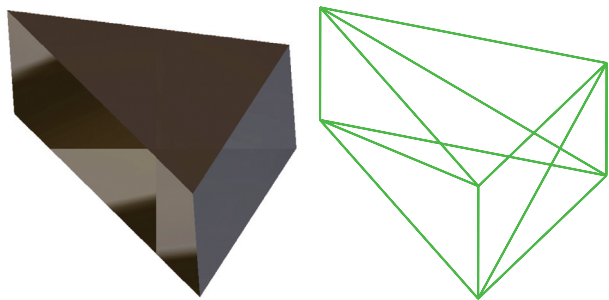


图 3 CATIA软件形成成为三维模型
Fig.3 3D model formed by CATIA

STL 模型处理方法工业界相当成熟,使用 VC 编程对 STL 模型文件的数据储存、读取进行优化以达到处理数据量小、运行速度快和构建拓扑关系等,调用 OpenGL 接口文件函数对 STL 数据模型进行显示及渲染^[7-8]。

3 基于 STL 模型处理的飞机燃油质量特性计算

基于 STL 模型处理计算飞机燃油质量特性数据的核心为:利用已有的飞机燃油箱模型和系统模型,通过 CATIA 软件产生各自的 STL 模型,将燃油箱的 STL 模型中的外表面部分三角面片集合取消,留存燃油箱内腔 STL 三角面片集合,再利用燃油箱内的系统 STL 模型形成燃油 STL 模型,通过对形成的燃油 STL 模型体积求解,得到燃油箱的质量特性数据。燃油 STL 模型本身可通过软件接口形成网格化的有限元燃油模型,可为计算燃油温度奠定基础。通过叠加燃油箱、系统和燃油自身

的 STL 模型可获得形象的燃油箱燃油分布,这样就形成了燃油仿真计算的基础。STL 模型计算流程见图 4。

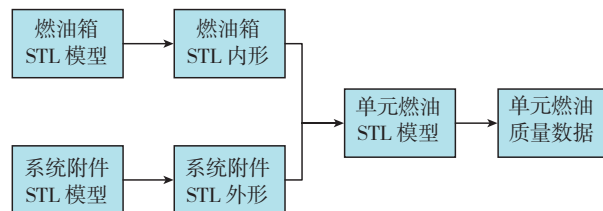


图 4 STL模型求解燃油质量特性数据图

Fig.4 Process of fuel gravity property calculation based on STL

STL 模型计算涉及到模型数据读取存储、数据修正、面片集合处理、模型计算等问题。STL 模型数据读取存储,主要针对 STL 文件的特点,提高读取存储效率、速度,减少数据量问题来进行。CATIA 软件产生的标准 STL 文件以三角面片定义数据,每个三角面片储存 3 顶点坐标值和面片矢量值, STL 模型本身不具有拓扑关系,冗余数据量大。因此通过对 STL 模型数据处理,建立不重复的顶点坐标及三角面片与顶点间的关系,使得所形成的 STL 模型具有数据量小,三角面片间相邻关系明晰, STL 模型完整,没有“孔洞”的特点。这种处理方式在快速造型等研究方面较为成熟^[9-10]。

燃油 STL 模型获取是通过删除燃油箱 STL 模型的外表面三角面片集合,得到燃油箱“容积”模型,该模型与燃油系统附件 STL 模型(实心)叠加,形成可求解的燃油 STL 模型。由于 STL 模型只有三角片信息,没有拓扑信息,甚至三角片的相邻信息等也处于隐含状态,因此无法提取诸如特征面之类信息。飞机油箱拓扑复杂,还含有大量附件结构,因此其 STL 模型相当复杂,鉴于此情况,采用交互选择与智能判断相结合的原则,外加 STL 模型切割等辅助手段共同完成删除外表面三角面片集合的目的。智能判断将外表面相连的大多数三角面片删除;在通过选取内表面智能处理,反选获得外部孤岛三角面片集合并删除;仅留存内表面三角面片集合;缝合内表面集合“孔洞”可形成完整的燃油箱容积 STL 集合(轮廓)。

在获得燃油 STL 模型后,使用数值积分法获得该 STL 模型轮廓体积。其核心为指定投影平面,计算燃油 STL 模型的每个三角面片与其在投影平面上的投影所围成的凸五面体的带符号体积,整个 STL 模型的体积为所有凸五面体带符号体积的代数和。三角面片投影体是凸五面体,可将其分为一个三菱柱和一个四棱锥,它们的体积和即为凸五面体体积。三菱柱体积可由三角面片在投影平面上的投影面积和菱柱高度来计算。四棱锥的体积根据四棱锥体积公式进行计算。如将投影

平面与具有飞机姿态信息的燃油平面联系起来,就可得到具有切片效应的燃油质量信息。又由于燃油的匀质性,得到体积,也容易地得到重心及惯性矩、惯性积特性。燃油 STL 模型体积计算流程如图 5 所示。

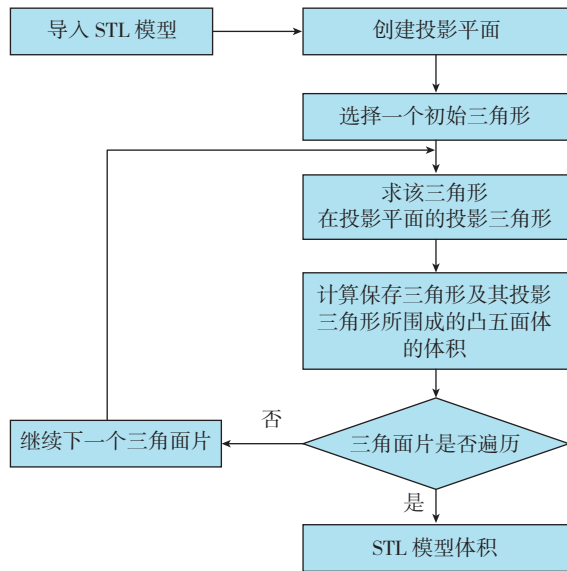


图5 燃油STL模型体积计算流程
Fig.5 Process of volume calculation based on STL

通过系列的平面切割燃油 STL 模型并构造新模型,可以获得燃油质量特性数据,也可以通过积分投影平面的燃油面重合得到所需燃油质量特性数据。该质量数据库可通过微小距离截面间距得到精细的、大量的燃油质量特性数据,再通过处理优化该数据库,获取飞机适用的燃油质量数据库,实现飞机燃油量的适时快速测量及重心控制目的。

4 STL 模型处理燃油质量特性数据的优点

通过 STL 模型处理得到燃油质量特性数据具有较明显的 3 点优点。

(1) STL 模型是充分利用目前航空业数字化设计技术所形成的三维模型获得,直接由 CATIA 软件得到,具有模型获取相对较易,且易在设计各环节中进行初步、详细的评估,数据的准确性直接由数模的精细度决定。

(2) 所形成的 STL 模型后期处理完全脱离 CATIA 软件的束缚,在性能硬件等要求不高的计算机上可以处理。

(3) STL 模型处理可以进行后期的传感器布置优化处理,可以进行温度场分析处理, STL 模型的网格化具有较强分析软件接口。

最后,使用 STL 模型处理,具有形象表达燃油分布特性的能力,与系统仿真具有较强相容性。图 6 为某飞

机燃油隔间燃油分布,外层为隐藏了上壁板的燃油箱,燃油箱装载了部分燃油,由于飞机抬头的原因,燃油箱内燃油面有夹角。

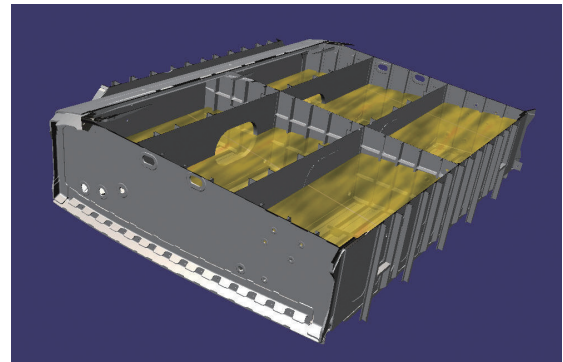


图6 某飞机燃油箱隔间燃油分布图仿真
Fig.6 Simulation of fuel distribution state in aircraft fuel tank

5 结论

使用快速成形领域处理 STL 模型的较成熟技术来获得飞机燃油质量数据的方法可行、高效且具有后期仿真分析处理、仿真形象的优点。STL 模型处理软件的应用使得在飞机设计各环节可以快速得到分析结果,极大地帮助设计师对系统的特性进行评估。脱离大型软件 CATIA 的束缚,提高了分析速度,降低了平台要求并丰富了设计分析手段方法。

参考文献

- [1] Walker R. The new A340-500/-600 Fuel System & the principal differences with the A340-200/-300. AIRBUS FAST / NUMBER 26: 15-22.
- [2] Orme C. The A310-300 Fuel System and Center Gravity Control. AIRBUS FAST / NUMBER 7: 15-20.
- [3] 张晶, 申功璋, 杨凌宇. 飞机主动重心控制系统设计及应用. 飞行力学. 2008, 26(6): 68-72.
- [4] 张晶, 申功璋, 张磊. 飞机超声速巡航主动重心控制系统设计. 系统仿真学报. 2009, 21(23): 7526-7530.
- [5] 张永涛, 刘欣, 潘若刚. 基于 CATIA V5 二次开发平台的飞机燃油质量特性分析. 飞机设计. 2009, 29(3): 48-61.
- [6] 杨华保. 旅客机燃油质量分布特性计算方法研究. 航空计算技术. 1999, 29(2): 19-22.
- [7] 李玉魁, 王志远, 谢明红. 用 OpenGL 开发的 STL 文件仿真系统. 华侨大学学报(自然科学版). 2009, 30(1): 114-116.
- [8] 陈太喜, 方亮, 刘艳伟, 等. 基于 OpenGL 的 STL 数据模型建模方法. 机床与液压. 2009, 37(3): 155-158.
- [9] 闫涛. 基于 STL 三角网格的数据快速读取研究. 现代计算机, 2009, 2: 60-63.
- [10] 杨光, 刘伟军, 王维, 田凤杰. STL 格式文件拓扑重建及快速切片算法研究. 现代制造工程, 2009, 10: 32-35.

(责编 小城)