

文章编号:1674-8190(2013)02-252-04

离散/堆积理论在大尺寸轻质模型设计中的应用

董海峰,高旭,王健,艾俊强

(中国航空工业集团公司第一飞机设计研究院,西安 710089)

摘要:为了解决大尺寸金属雷达隐身测试模型在设计中遇到的重量问题,借鉴快速成型技术中的离散/堆积理论,提出采用离散化重点剖面框架加堆积式蒙皮的模型设计方法,基于此方法设计并加工隐身测试用的金属模型。试验证明该模型符合隐身试验要求,且实现了模型重量小于50 kg的轻质化目标。此设计方法可提高隐身模型设计加工的水平并可减少试验成本。

关键词:雷达散射;隐身测试;大尺寸轻质模型;离散/堆积

中图分类号: V260.1

文献标识码: A

Application of Discrete Data/Accumulation Theory on Large-size Light Model Design

Dong Haifeng, Gao Xu, Wang Jian, Ai Junqiang

(The First Aircraft Institute, Aviation Industry Corporation of China, Xi'an 710089, China)

Abstract: Based on the discrete data/accumulation theory of rapid prototyping technology, a method for stealth model design is given to solve the problem of weight in large size stealth model design. Metal model is designed and manufactured by using some discrete frames and cumulate surface for stealth test. The test shows that the model meets stealth test requirement, while the model is lighter than 50 kg. This method can improve the precision of radar stealth model design and reduce test cost.

Key words: radar cross; stealth test; large-size light model; discrete data/accumulation

0 引言

随着现代战争形式的发展,高隐身远程作战飞机成为军用飞机设计的迫切需求。作为飞行器雷达隐身设计方案的有效检验和评估手段,雷达隐身测试技术受到全世界的关注。由此发展出了系统的隐身性能测试方法,包括紧缩场缩比模型测试和全尺寸目标测试,对整机进行目标特性采集与隐身效果鉴定等。美国宣称F-22飞机全程采用紧缩场缩比模型测试来完成隐身设计。因此,隐身测试模型的设计对全机隐身性能地评定有着重要影响。

目前常用的隐身测试模型的设计和加工方法

的思路如下:数模采用实体设计、数控加工整体成型的方法,结构简单,分块数少,由减重孔进行局部减重,不同模块之间直接采用沉头钉连接。在模型尺寸较小的情况下,这种设计和加工方法可满足飞机概念设计阶段的高度缩比小模型使用;但在加工大尺寸模型时就会带来严重的重量问题。如某试验采用上述设计和加工方法制造的硬铝模型,重60 kg,超出了泡沫支架的最大承重(50 kg);虽然试验最终正常完成,但支架变形对测试环境的影响以及在支架上吊装过程耗时过久的弊端,影响了试验精度。

本文提出一种应用离散/堆积理论的大尺寸金属模型设计方法,使制造出的模型具有重量轻的优点,节约成本的同时减少试验环境变化对目标测试的影响,解决飞机隐身性能测试模型超重带来的问题,也有助于提高测试精度。

1 离散/堆积理论概述

离散/堆积成型思想的广泛应用是以快速成型技术(Rapid Prototyping, 简称 RP)^[1]的兴起为代表的。快速成型技术是 20 世纪 80 年代中后期发展起来的新型数字制造工艺技术。RP 技术的加工原理是基于离散/堆积理论,由 CAD 模型直接驱动,把零件的三维数字模型进行离散化,然后按照数字积分的思路进行逐层加工,以快速完成任意复杂形状三维实体零件的制作加工。快速成型技术是继数控技术之后制造业的又一次重大革命。

离散/堆积成型过程可分为数据处理(离散)和物理实现(堆积)两个阶段,如图 1 所示。

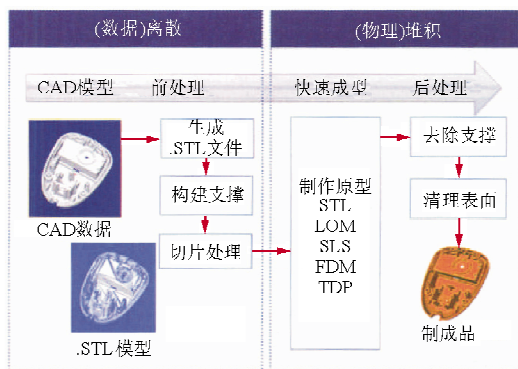


图 1 离散/堆积成型技术示意图

Fig. 1 Schematic diagram of discrete data/accumulation prototyping technology

在离散过程中,根据不同的工艺要求,将零件的三维 CAD 模型沿一定方向分解得到一系列厚度很薄的离散化二维平面模型数据,在此基础上获得控制成型头的运动轨迹;在堆积过程中,成型头在运动轨迹的控制下,以平面加工方式连续、逐层加工出零件的每一个截面,如此反复进行层层截面地堆积连接,并使之粘结,最终获得加工零件。

与传统的切削加工去除成型的减法原理不同,RP 技术基于离散的增长方式,以加法的方式来获得产品,可直接从 CAD 文件快速地制作产品物理原型(样件),用以验证产品外观造型、零件装配关系或进行功能试验,从而提供了一种可测量、可触摸的直观手段,改善了设计过程中的人机交流,缩短了产品开发周期。

2 快速成型技术在航空领域的应用

在航空工程制造中,能实现轻质模型设计加工的方法有木模^[2]、复合材料快速成型技术等,其中快速成型技术因其轻型、快速、数字化成型度高等优点而逐渐受到重视。目前,快速成型技术在航空领域中的应用之一是低速风洞试验模型的加工^[3]。低速风洞试验模型,要求模型数据准确,具备一定的强度,后期还需人工进行表面打磨光滑,加工周期长,成本高,由于重量较大,试验操作也不方便。国内曾采用快速成型技术制作某无人机项目的 1:13 风洞试验模型,满足了低速试验要求。模型制作时间为 5 周,而传统金属风洞模型的制作通常需要 3~5 个月的时间,模型制作成本也仅为钢制模型的 1/4 左右。但由于复合材料目前在精度控制方面与金属材料的加工方式相比还有一定差距,对于精度要求更高的高速吹风试验,还需要在工艺上进一步改进和优化。

对于隐身测试模型而言,快速成型技术制造的模型需进行表面喷涂或者贴膜才能满足雷达隐身测试的使用要求,在表面精度和满足模型表面电磁参数的相似性方面存在一些固有的工艺缺陷。另一个问题是模型尺寸的限制,目前国外的快速成型系统,如比利时 Materialise 公司的 Mammoth 激光快速成型系统,一次性最大加工尺寸约为 2 200 mm;国内最大可提供 800 mm×600 mm×500 mm 的成型空间,难以满足雷达隐身模型的大尺寸要求。同时,作为整体成型的模型,其拆卸性能亦不佳,无法满足雷达隐身测试的需求。

3 隐身模型设计原理

雷达隐身缩比模型试验技术^[4]指在满足一定条件下,将真实电磁目标按一定缩尺比例缩小(或放大)成便于测试的模型目标,通过对模型目标的电磁波传播规律及其特性的研究和测试,得到真实电磁目标的电磁运行规律,具有可实现性强、重复性好、试验数据可靠等优点。

缩比模型试验技术的基础是 J. A. Sinclair 和 J. A. Stratton 等根据麦克斯韦方程线形理论提出的电磁系统模拟试验理论^[4]。其基本原理是:当模

型尺寸相对于原尺寸缩小(或放大) n 倍时,原型系统与模型系统具有成比例的场强关系,描述如下

$$\begin{cases} x = nx' \\ y = ny' \\ z = nz' \end{cases} \quad (1)$$

$$t = \gamma t' \quad (2)$$

$$E(x, y, z) = \alpha E'(x', y', z') \quad (3)$$

$$H(x, y, z) = \beta H'(x', y', z') \quad (4)$$

式中: (x, y, z) 为原型系统的尺寸坐标; t 为时间; E, H 为电磁场; (x', y', z') 为模型系统的尺寸坐标; t' 为时间; E', H' 为电磁场; n, γ, α, β 为比例系数,也称为缩比因子。

由于原型系统和模型系统都满足麦克斯韦方程,即

$$\begin{cases} \nabla \times H = \epsilon \frac{\partial E}{\partial t} + \sigma E \\ \nabla \times E = -\mu \frac{\partial H}{\partial t} \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} \nabla' \times H' = n \nabla \times \frac{1}{\beta} H = \epsilon \frac{n\alpha}{\gamma\beta} \frac{\partial E}{\partial t} + \sigma \frac{n\alpha}{\beta} E \\ \quad = \epsilon' \frac{\partial E'}{\partial t'} + \sigma' E' \\ \nabla' \times E' = -\mu \frac{n\beta}{\gamma\alpha} \frac{\partial H}{\partial t} = -\mu' \frac{\partial H'}{\partial t'} \end{cases} \quad (6)$$

式中:电导率 σ 、介电常数 ϵ 、磁导率 μ 为原型系统的介质参数;电导率 σ' 、介电常数 ϵ' 、磁导率 μ' 为模型系统的介质参数。

要使模型系统和原型系统电磁场相似,必须满足

$$\begin{cases} \sigma' = \sigma \frac{n\alpha}{\beta} \\ \epsilon' = \epsilon \frac{n\alpha}{\gamma\beta} \\ \mu' = \mu \frac{n\beta}{\gamma\alpha} \end{cases} \quad (7)$$

如果电磁系统中包含有耗介质,要完整模拟原型电磁系统的电磁特性,模型系统除了满足式(1)~式(7)条件外,还必须保持介质损耗角正切值和原型电磁系统相应的量相同。这样,模型和原型系统就是相似的。

因此,理想的雷达隐身模型^[5]应当具备以下三个条件:(1)模型必须与原型几何相似。除外形相似外,入射电磁波的传播方向和极化、散射波的方

向和极化也必须与原型的测试条件一致;(2)模型测试的电磁波波长必须以几何缩比因子的同一比例缩短,即测试波长应当与几何尺寸同步改变;(3)必须保持模型表面与原型的对应部位有相同的表面阻抗,包括实部和虚部。由于表面阻抗是频率的函数,模型的表面阻抗是指在模型测试频率上的值。

此外,表面光滑度也是需要重点考虑的因素,在测量低雷达散射截面(Radar Cross Section,简称RCS)目标时,如果原型表面相对于波长很光滑,为保持电尺寸的不变性,模型的绝对光滑度就必须做得非常高。以球体为例,球体的RCS理论上是各向同性的,但一个表面粗糙金属球的RCS测试结果,会随平面波入射角变化出现明显的凹凸,而非直线。因此,模型的加工并非一个单纯的车间工序,还需结合电磁理论进行规划。

4 离散/堆积理论在大尺寸模型设计中的应用

结合快速成型技术中的离散/堆积理论与隐身模型设计原理,本文提出一种将离散/堆积理论应用于大尺寸金属隐身测试模型的设计方法。

具体设计思路如下:首先,在数模基础上,将模型按照测试需求划分成若干模块,模块以尽可能模拟真实目标、减少不必要的缝隙和孔洞为原则;确定各模块之间的连接面和连接方式,连接方式以使用螺/铆接及粘接为主;然后,根据目标外形特点及试验关注对象的分布,选择合适的离散剖面位置,设计框架结构作为主要承力单元,设计连续曲面蒙皮来连接和固定各框架;最后,对目标中关注的局部细节进行单独模块设计,进行多介质材料/结构模拟,并留出操作空间。

为了有效减小模型重量,将三维模型离散化后,合理选取不同加工要求位置的重要剖面为离散点,进行框架结构设计,局部采用壁板、梁和肋进行加强,以保证结构强度和刚度;设计连续曲面的贴体蒙皮,起到堆积成型的作用;将各个剖面框架粘接固定成型。连接面设置壁板,定位孔、连接孔等均设置在结构承重处。离散剖面框架及堆积式蒙皮设计示意图如图2所示。

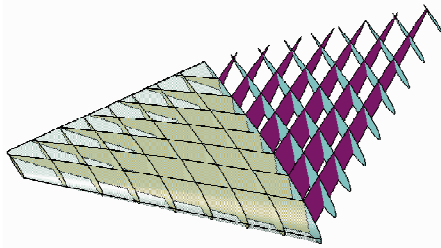


图2 大尺寸模型离散/堆积设计示意图

Fig.2 Schematic diagram of large-size model by discrete data/accumulation theory

对飞机这种外形复杂的大尺寸目标而言,其座舱、进排气系统以及各种设备舱、外挂等部件需要进行较为详细地模拟。因此在模块划分阶段,应根据测试目的将飞机划分为若干模块,如翼身融合段、进排气系统、机翼外段、单独座舱等。然后对各模块分别选取重点剖面进行离散,所有离散剖面遵循统一基准(如机头最前端点和飞机水平基准面)。对曲面较为复杂的模块,如进排气系统,沿飞机展向和纵向的离散剖面度应加密;对机翼外段等曲面变化较为平缓的模块,可采用大间距的剖面以尽量减轻模型重量。当所有剖面以框架结构形式加工并定型之后,通过碾压、铆接、打磨等工艺在框架外蒙敷金属蒙皮。各模块之间采用预留安装口盖、加强肋板进行连接,以方便拆卸。

在该设计方法中,对气动外形、关键部件的模拟保证了模型的几何相似,表面精度遵循了尺寸与波长的关系,表面粗糙度 R_a 值不大于 $1.25 \sim 2.5 \mu\text{m}$;同时,根据测试条件选择模型比例进行设计,保证了换算后测试波长能满足原型测试的需要;在金属模型表面上,对接缝隙用导电腻子或介质填补,满足任意两点间直流电阻不大于 1Ω ,较好地满足了雷达隐身模型的要求。在加工精度方面,采用这种方法加工得到的型框公差小于 0.1 mm ,蒙皮通过碾压、铆接、打磨,制造公差小于 0.1 mm ,对接蒙皮的缝隙公差为 0.15 mm ,满足了设计要求。

试验证明,采用此设计方法加工得到的大尺寸模型重量显著减小,泡沫支架完全满足试验要求,节约了加工和试验成本,同时使试验的安全性和精度都有所提高。

5 结 论

由于隐身技术及其试验的特殊性,国外在相关技术成果方面实行信息封锁,没有类似的技术成果

可供借鉴;而国内相关资料上也未见关于雷达隐身测试模型设计的系统论述。本文提出的应用离散/堆积理论的大尺寸轻质模型设计方法,将飞机这种大尺寸外形复杂的目标分解成若干模块,提高了模拟逼真度;重点剖面的选取随模块复杂度而灵活变化,连续蒙皮在保证型面的同时提高了表面精度,很好地满足隐身试验精度要求并实现了大型目标的轻质化。通过进一步的试验验证和完善,此方法可有效提高隐身模型的设计加工水平。

参考文献

- [1] 马劲松. 浅谈快速成型技术在航空航天业的应用与发展[J]. 航空制造技术, 2010(8): 51-54.
Ma Jinsong. Application of rapid prototyping in aviation industry[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2010(8): 51-54. (in Chinese)
- [2] 张云飞, 马东立, 武哲, 等. 两种隐身飞机模型的雷达散射特性测试与分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2003, 29(2): 147-150.
Zhang Yunfei, Ma Dongli, Wu Zhe, et al. Radar scattering characteristic test and analysis of two stealth aircraft models [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2003, 29(2): 147-150. (in Chinese)
- [3] 李臻尘, 曾俊华, 周志华, 等. 光固化快速成形飞机风洞模型制造方法[J]. 航空制造技术, 2008(8): 26-29.
Li Dichen, Zeng Junhua, Zhou Zhihua, et al. Fabrication of aircraft wind tunnel model using stereolithography[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2008(8): 26-29. (in Chinese)
- [4] 郑星, 汪连栋. 缩比模型试验技术在射频仿真暗室设计中的应用[J]. 电讯技术, 2008, 48(5): 32-35.
Zheng Xing, Wang Liandong. Application of scaled model technique in design of RF simulation anechoic chamber[J]. Telecommunication Engineering, 2008, 48(5): 32-35. (in Chinese)
- [5] 时振栋, 刘宏伟. 隐身目标雷达截面的缩比测量及反演计算[J]. 电子科技大学学报, 1995, 24(7): 13-17.
Shi Zhendong, Liu Hongwei. Model-measurement and reverse evaluation for RCS of stealthy targets[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 1995, 24(7): 13-17. (in Chinese)

作者简介:

董海峰(1982—),男,硕士,工程师。主要研究方向:航空发展预先研究、飞机总体设计。

高旭(1983—),女,硕士,工程师。主要研究方向:飞机总体设计、气动布局设计。

王健(1980—),男,硕士,高级工程师。主要研究方向:飞机布局设计。

艾俊强(1964—),男,研究员。主要研究方向:飞机总体设计、气动布局设计。

(编辑:马文静)