

# 光固化快速成形 飞机风洞模型制造方法

## Fabrication of Aircraft Wind Tunnel Model Using Stereolithography

机械制造系统工程国家重点实验室 李涤尘 曾俊华 周志华 卢秉恒  
中国空气动力研究与发展中心 张征宇



李涤尘

西安交通大学长江学者特聘教授, 博士生导师。主要研究方向为: 快速成形制造, 生物制造和复合材料成型。发表论文 70 篇, 获得中国发明专利 13 项; 国家和省部级科技奖励 3 项。

在飞机研制中, 气动外形设计是其首要工作。飞机外形与其空气动力学特性密切相关, 而风洞实验是评价设计质量和优化设计的关键环节。飞机的设计是一个“设计-模型实验-设计”的多次迭代过程。在飞机的研制过程中, 风洞模型的设计与制造成为飞机风洞实验和飞机设计的一个关键问题。

用光固化快速成形的制作方法制作飞机风洞模型, 研究了其中的数据处理、制作方法、装配结构等问题, 以提高光固化原型的制造精度和使用性能。针对光固化树脂材料强度不足的问题, 提出了树脂-金属复合镀层方法, 以提高力学性能。

由于飞机的外形与内部结构复杂, 尤其是新型战机(气动、结构超复杂)、大型运输机(机翼细长, 容易变形), 给其风洞模型的制造带来了巨大困难。目前, 普遍采用数控加工方法制造金属模型, 但该方法存在一些不足: (1) 制造周期长, 成本高; (2) 复杂的内部承载结构、微细测量孔及器件的安装孔难以加工; (3) 金属模型质量大(固有频率低), 与低频气流脉动耦合共振, 影响实验精准度; (4) 模型质量、刚度分布难以实现, 对于特种风洞实验, 比如颤振、立式尾旋、投放以及模型自由飞等实验, 严格要求各部分质量、刚度分布的特种模型对常规的模型制造技术提出了难题。数控加工方法的这些不足之处难以满足飞机风洞实验的新要求, 制约了飞机设计速度和设计质量的提高。

国外的航空航天研发机构和部

门正在积极探索和研究风洞模型快速制造新技术, 其中以快速成形制造技术为中心和重点。美国航空航天局和空军、俄罗斯中央空气动力研究院等单位通过与数控加工的金属模型对比研究, 认为快速成形制造技术在风洞模型制造上具有数控加工无法比拟的优势, 主要表现在不受形状和结构的复杂程度限制, 对于飞机复杂流线外形制造具有很大优势。美国航空航天局马歇尔中心(NASA Marshall)、美国空军研究实验室(AFRL)和美国约翰霍普金斯大学应用物理实验室(JHU/APL)的研究人员以新型UCAV X-45A 无人攻击机和导弹风洞模型作为研究对象, 对比分析了各种不同的快速成形技术在各种载荷实验条件下的适用性。研究发现, 各种快速成形技术都适用于中小气动载

荷实验条件,其中由于光固化成形(Stereolithography, SL)制造精度高,模型表面质量好,所以在风洞模型快速成形制造技术中最具前景。

本课题用光固化快速成形的制作方法制作飞机风洞模型,研究了其中的数据处理、制作方法、装配结构等问题,以提高光固化原型的制造精度和使用性能。针对光固化树脂材料强度不足的问题,提出了树脂-金属复合镀层方法,以提高力学性能。该方法为探索快速风洞模型制造方法提供新的途径,为支持大型飞机和新型战机的研制提供了快速的设计验证手段。

### 风洞模型的快速成形制造

风洞模型有着较高精度要求,在执行快速成形加工时,应充分保证模型的加工精度。光固化法成形制作工艺产生的误差包括数据准备误差、成形工艺误差和后处理误差。本课题模型设计在 CATIA V5 下进行。

#### 1 模型数据的 STL 精度优化

STL 文件格式是目前 CAD 系统与快速成形系统之间的数据交换标准。STL 文件的数据格式采用小三角形来近似逼近三维 CAD 模型的外表面,小三角形数量的多少直接影响着近似逼近的精度。精度要求越高,选取的三角形应该越多。随着精度的提高,三角面片的数目增加,尤其是在模型的细节部位会出现大量的极细三角形,这样 STL 文件大小将剧增,无疑会加大后续数据处理时间。一般三维 CAD 系统在输出 STL 格式文件时都要求输入精度参数,也就是用 STL 格式拟合原 CAD 模型的最大允许误差。不同 CAD 软件确定逼近三角面片的系数不同,软件中给定一个选取范围,一般情况下都可以满足工程要求。飞机设计常用软件为 CATIA V5,在“工具-选项-显示(常规)-性能”可以看到 CATIA 的默认精度和可调的最高精度,图 1 所示为在不同的精度条

件下的 STL 三角面片划分。由于飞机风洞模型大多是曲面,外形表面精度十分关键,因而从 CAD 到 STL 的数据设计有着重要影响,常用的直接另存为 STL 格式的文件输出方式并不可取,在很大程度上降低了成形件的精度要求。

通过“开始-加工-STL Rapid Prototyping”进入专门面向快速成形的 STL 设计转换模块,此处可通过 Tessellation 命令的凹陷 Sag 和步距 Step 参数控制从 CAD 向 STL 的转换精度,如图 2 所示。在这里可单独控制 Sag,同前所述的三维精度,但是这里可以将精度调整得更高。也可以结合 Step 进行调节,Step 设置了三角面片的最大边长,不仅调整了在特定 Sag 下的曲面划分,而且对平面也进行了细分,这样在一定程度上也增加了数据量,因而一般可不设置 Step 参数。

目前,快速成形制造精度多在  $\pm 0.1\text{mm}$  左右,这是由快速成形工艺本身的特点决定的,过高的精度要求并非必要。因为过高的精度要求可能会超出快速成形制造系统所能达到的精度指标,而且三角形数目增加会引起计算机存储容量的加大,同时带来切片处理时间的显著增加,有时截面的轮廓会产生许多小线段,不利于光束的扫描运动,导致生产效率低和表面粗糙度差。所以,从 CATIA 软件输出 STL 文件时,选取的精度指标和控制参数应该根据 CAD 模型的复杂程度以及快速成形精度要求的高低进行综合考虑。风洞模型主要由气动外型面和装配

平面组成,较好的 STL 文件输出方法是将曲面和平面切分,对不同的型面选取不同的精度设置,将各型面三角划分后合并成统一的 STL 输出格式,既能保证零件数据精度又能尽量减小数据文件,提高后续数据处理的效率。

#### 2 快速成形制作工艺优化

使用的快速成形设备为 SPS600B,光敏树脂类型为 DSM SOMOS 14120。

在风洞模型快速成形制造中,以机翼为例,对于常规测力模型而言,仅存在外形精度问题,因而较优的成

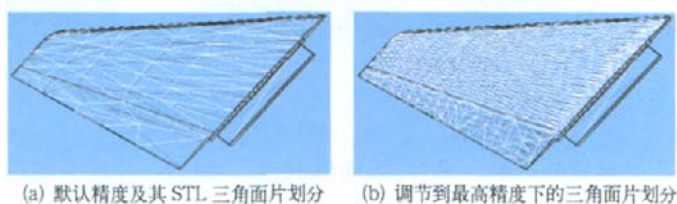


图1 CATIA软件不同三维精度设置下的STL格式精度

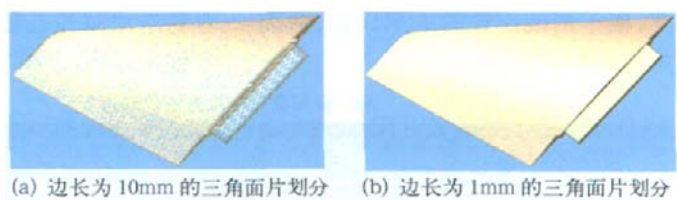


图2 在STL Rapid Prototyping模块中的精度控制方法

形方向是沿翼展方向竖直成形,并尽可能将前缘平行于制作方向,因为前缘是对气动性能有较大影响的关键部位。对于常规测压模型而言,同时存在外形和内部测压孔道的精度问题,虽然沿翼展方向切层能较好地保证外形精度,而且也能尽量使传压流道的轴线沿切层方向形成较好的流道质量,但测压孔是按要求垂直于翼面设计的,测压孔比传压流道有着更重要的作用,因而形成了测压孔质量与机翼型面质量的矛盾,应结合实际要求确定制作方向。若要求测压孔质量,则水平摆放制作;若要求外型面质量,则竖直摆放制作;若综合考虑测压孔和外型面质量,且风洞模型设计按一般考虑将上下表面的测

压孔分别布置在两对称机翼上,则可将风洞模型的测压表面朝上,并按常规成形方向制作,即与水平面倾斜 $20^{\circ} \sim 30^{\circ}$ ,这种方向同时有着较高的制作效率和较少的实验成本,同时可以减少支撑后处理对测压表面与

3所示。用树脂成形孔直接定位时,由于快速成形变形误差等的影响,实际孔径与设计直径之间会存在一定差距,因此存在金属套筒不能恰当地安装定位的缺陷,若实际树脂孔径比金属大,则径向偏移误差大;若实际

时,可采用螺丝螺母连接。由于装配部位会破坏表面外形,因而一般紧固后在凹陷孔洞内涂抹腻子或其他填充材料,抹平并进行表面抛光处理。

### 风洞模型的电沉积制造

由于树脂风洞模型和金属模型有很大的性能差异,即使采用金属嵌件与树脂复合的装配方法增强了连接强度,但对于整体的强度和刚度要求仍然存在很大的不足,且不能满足风洞模型的防腐蚀、耐变形等要求,因而提出对树脂模型进行电沉积表面处理,以提高风洞模型

的使用性能。风洞模型电沉积的流程如图4所示,面向电沉积工艺修改风洞模型设计,并对CAD模型做预留金属沉积层厚的偏移补偿,保证制造精度。偏移设计可用CATIA等三维软件进行,也可以用Magics RP等快速成形前处理软件进行,光固化快速成形制作得到树脂风洞模型,制作方向与水平面成 $20^{\circ} \sim 30^{\circ}$ ,可多零件二维布局一次加工成形。

由于不存在电流在零件上的分配问题,化学沉积时分散能力基本上是100%,无论有深孔、盲孔、深槽或形状复杂的工件均可获得厚度均匀的沉积层。化学沉积的沉积速度在短时间内大致与时间成线性关系,相

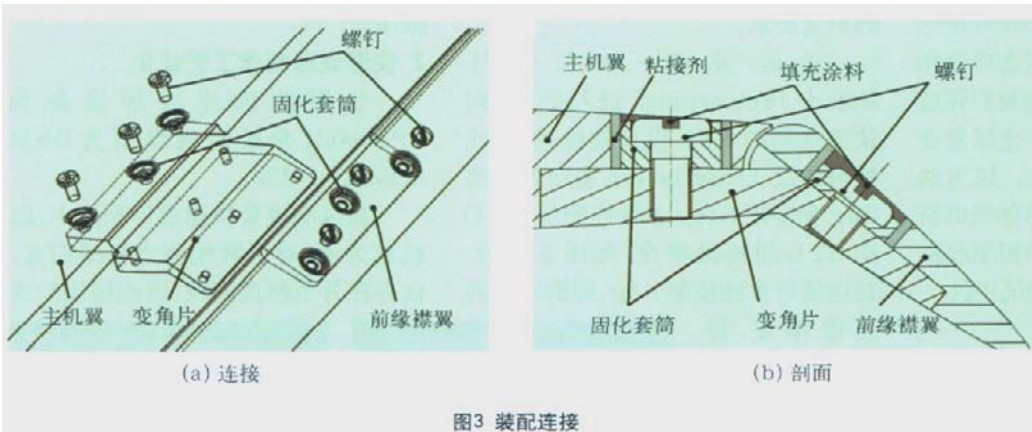


图3 装配连接

孔缘质量的影响。另外,因为风洞模型的对称性和组合性,各对称部件或各装配组合件应采用相同的加工工艺,便于形成一致的成形误差,从而减小整体误差。

树脂孔径比金属小,则需要对树脂孔进行修磨扩孔,也可能对定位误差产生影响。在一个模型上孔比较多时,容易造成整体孔轴的不准确。辅助定位和直接定位的优缺点见表1。

表1 金属套筒定位方法优缺点

套筒定位方法	优点	缺点
辅助定位	采用数控加工定位板进行多孔定位时有较好的整体准确度	过程繁琐,速度慢
直接定位	粘接方便,快速	树脂定位孔面的收缩或半径补偿过大,可能导致定位不准确

### 风洞模型装配结构

快速成形得到的树脂风洞模型采用金属嵌件进行连接增强,保证各部件拆装的重复使用,同时金属装配孔需要定位后粘接。在以数控加工模板辅助定位时,金属套筒定位粘接前需要打磨粘接孔,以除去表面杂质,改善粘接面的粗糙度,从而增大粘接强度。涂胶时要注意树脂产品的固化时间,以求及时除下定位装置又不对套筒已定位置造成破坏。定位模板表面粗糙度要求较高,为防止胶体与定位板固接,也可在模板表面铺一层树脂薄膜,固化后可方便除去。辅助定位粘接的金属套筒如图

如图3所示,可将机翼和副翼采用不同形式的变角片进行螺栓或螺钉连接固定。变角片为金属套筒粘接方式时,可采用螺纹连接;变角片为内衬金属板和树脂外形粘接复合

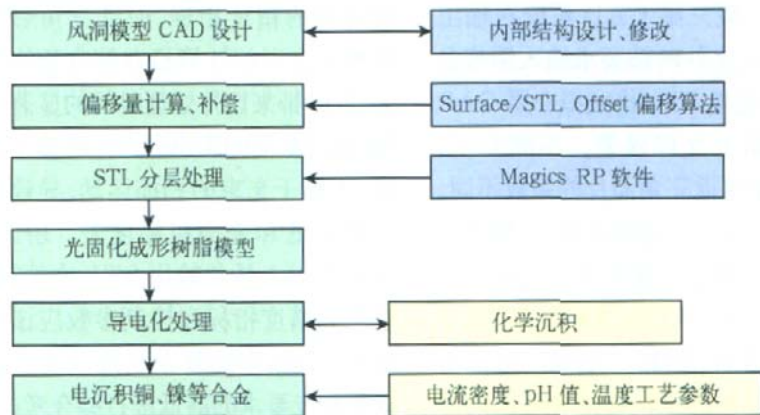


图4 风洞模型电沉积设计制造流程

当于在恒电流密度下的电沉积。化学沉积得到的镀层厚度大多在 1 ~ 2  $\mu\text{m}$  以下。

### 快速制造时间和成本分析

本课题制造了某型飞机 1:17 的测力风洞模型,包括机翼、尾翼等部件,而且进行了测压模型的成形尝试,为了降低试验成本,采用的是缩比较小的试验模型。工程应用的机翼测力模型尺寸为 320mm  $\times$  350mm  $\times$  30.0mm,而测压试验模型尺寸大小为 210mm  $\times$  240mm  $\times$  16.0mm,体积约成 4 倍的关系,将其模型统一为工程应用的缩比进行时间和成本对比。

各制造方法的时间和成本对比分析如表 2 所示。由于快速成形方

### 结束语

本课题采用了快速成形工艺和电沉积工艺进行了风洞模型制造。分析了面向飞机风洞模型制造的数据处理和成形方向优化,通过镶嵌金属件增强装配强度来制造树脂风洞模型。提出了在树脂表面进行金属电沉积的模型强度增强制造方法,这样不仅可以提高材料的力学性能,而且有助于风洞模型的表面防护。分析了基于光固化快速成形的制造方法对比传统风洞模型制造方法的时间和成本上的优越性,应用快速成形技术为某型飞机 1:17 风洞测力模型,约减少制作时间 60%,降低成本 25%。研究为飞机风洞模型的快速制造提供了新的方法。

表2 风洞模型制造时间和成本分析

模型类型	制造方法	时间/h	成本/元
机翼测力模型	光固化 SL	16 ~ 18/1 ~ 2 (成形/后处理)	16000
	电沉积 ED	2/13 (化学沉积/电沉积)	2000
	数控加工 NC	40 ~ 50	20000 ~ 25000
	SL 对比 NC	减少 50% ~ 65%	降低 20% ~ 35%
	SL&ED 对比 NC	减少 15% ~ 35%	降低 10% ~ 30%
机翼测压模型	光固化 SL	16 ~ 18/3 ~ 5(成形/后处理)	15000
	电沉积 ED	2/13 (化学沉积/电沉积)	3000
	数控加工 NC	100 ~ 120	30000 ~ 35000
	SL 对比 NC	减少 75% ~ 85%	降低 50% ~ 60%
	SL&ED 对比 NC	减少 60% ~ 70%	降低 40% ~ 50%

法与模型的复杂程度无关,因此制造相同缩比的测力和测压模型有着相近的成形时间和成本。对于测压模型的数控加工来说,模型越小,制作难度越大,特别是襟翼等的测压孔加工来说,制作时间越长,制作成本越高,所以使用快速成形制造方法有很大的优势。

以上时间和成本分析是在试验研究阶段得出的,若将风洞模型的快速成形制造方法完善为统一的制作规范,并将各制造环节专业化,可更系统地保证风洞模型制造的快速性和准确性。

### 参考文献

- [1] 恽起麟. 风洞试验. 北京: 国防工业出版社, 2000.
- [2] Springer A. Evaluating aerodynamic characteristics of wind-tunnel models produced by rapid prototyping methods. Journal of Spacecraft and Rockets, 1998, 35(6): 755-59.
- [3] Springer A, Cooper K. Comparing the aerodynamic characteristics of wind tunnel models produced by rapid prototyping and conventional methods. AIAA 1997-2222.
- [4] Springer A, Cooper K, Roberts F. Application of rapid prototyping models to transonic wind-tunnel testing.

AIAA 97-0988,35th AIAA Aerospace Sciences Meeting & Exhibit,Reno,NV, 6-9 January,1997.

[5] Azarov, Yu A, Vermel V D, et al. Experience in laser stereolithography and its application in manufacturing wind-tunnel aerodynamic models of various purposes. Seventh International Conference on Laser and Laser-Information Technologies, Suzdal, Proceedings of SPIE, 2002, 4644: 433-440.

[6] Tyler C, Braisted W, Higgins J. Evaluation of rapid prototyping technologies for use in wind tunnel model fabrication. AIAA 2005-1301, 43rd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, Nevada, 10-13 January, 2005.

[7] Tyler C, Reeder M, Braisted W, et al. Rapid technology focused experimental and computational aerodynamic investigation of a strike tanker. AIAA Paper 2004-6870, USAF Development Test and Evaluation Summit, Woodland Hills, CA, 16-18 November, 2004.

[8] Hildebrand R J, Eidson R C, Tyler C. Development of a low cost, rapid prototype, lambda wing-body wind-tunnel model. AIAA 2003-3818, 21st Applied Aerodynamics Conference, Orlando, Florida, 23-26 June, 2003.

[9] Buck G M. Rapid model fabrication and testing for aerospace vehicles. AIAA 2000-0826, 38th Aerospace Sciences Meeting & Exhibit, Reno, Nevada, 10-13 January, 2000.

[10] Heyes A L, Smith D A R. Rapid technique for wind-tunnel model manufacture. Journal of Aircraft, 2004, 41(2): 413-415.

[11] Chuk R N, Thomson V J. A comparison of rapid prototyping techniques used for wind tunnel model fabrication. Rapid Prototyping Journal, 1998, 4(4): 185-196.

[12] Aghanajafi S, Adelnia R, Daneshmand S. Production of wind tunnel testing models with use of rapid prototyping methods. WSEAS Transactions on Circuits and Systems, 2006, 5(4): 555-561.

[13] 马雷. 激光快速成形工艺的研究. 西安: 西安交通大学, 2000.

[14] 张宇红. S0UP600GH 激光成形机的工艺优化问题研究. 西安: 西安交通大学, 2004.

(责编 依然)