

doi: 10.7690/bgzd.2014.12.024

仿生机器鱼机械结构使用综合加工技术的应用

李卫国, 周晓天, 艾志华, 李一迪

(太原理工大学工程训练中心, 太原 030024)

摘要: 为了改善现有仿生机器鱼外部结构存在的诸多问题, 提出利用 3D 打印技术、线切割技术、数控加工技术制作仿生机器鱼头部和内部机械结构件的应用方法。通过 CAD 制作图纸, 选用熔融沉积成型 (fused deposition modeling, FDM) 技术的三维打印成型设备进行外壳制作, 并利用雕铣机与线切割技术进行配合件加工。在环氧树脂和树脂清漆涂覆、精打磨再上胶的处理后, 配合橡胶鱼尾能完成整个仿生机器鱼的测试。应用结果表明: 3D 打印以及相关机械加工技术可缩减原型制作时间、加快测试与迭代速度, 对仿生机器鱼的加工与应用有较高的实用价值。

关键词: 仿生机器鱼; 机械结构; 综合加工技术

中图分类号: TP242.6 **文献标志码:** A

Application of Composite Processing Technology of ROBOFISH Mechanical Structure

Li Weiguo, Zhou Xiaotian, Ai Zhihua, Li Yidi

(Engineering Training Center, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: In order to improve the shortcomings of current robot fish external structure, put forward method that using three-dimensional printing technology, wiring cutting technology, NC machining technology to manufacture robot fish head and internal mechanical component. Based on CAD drawing, use three-dimensional printing equipment of (fused deposition modeling) FDM to manufacture shell, and adopt carves-milling machine and wire cutting technology to carry out cooperating parts machining. After coating epoxy resin and copal varnish, fine polishing and sizing, use rubber tail to realize bionics robot fish testing. The application results show that the three-dimensional printing and related mechanical machining technology can reduce prototype manufacture time, accelerate test and iteration speed, which have a high practical value to bionics robot fish machining and application.

Keywords: bionics robot fish; mechanical structure; comprehensive processing technology

0 引言

仿生机器鱼的机械结构以往多采用玻璃钢一次性加工, 需要单独制备模具, 前期投入较大, 不易修正。利用快速成型技术和现代化的雕铣技术、线切割技术以及普通机械加工技术可以满足仿生机器鱼机械结构的适时调整和加工需求。

快速原型 (rapid prototyping, RP) 制造技术始于 20 世纪 80 年代, 能够将数字几何模型快速、自动地物化为具有一定的结构和功能的零件和原型。RP 技术是直接由计算机模型产生三维实体的快速原型制造工艺技术。三维打印 (three-dimensional printing, 3DP) 技术产生于 1980 年, 是快速原型制造技术中最常见的一种工艺方法。之后出现了紫外光固化三维成型技术、熔融沉积三维成型技术、激光三维打印成型技术。如今 3DP 技术可以成型树脂、金属、陶瓷等多种材料, 配合 CAD 技术满足了各行业的相关需求。

相比仿生机器鱼外壳之前的制备方式, 3DP 技术不再需要模具, 而是运用数字化生产工具并结合传统加工工艺, 展现出极大的优势。应用 3DP 成型技术可制备大小为 114 mm×114 mm×197 mm 的仿生机器鱼的流线型外壳。

雕铣机 (engraving and milling machine, CNC) 是数控机床的一种, 同时具备雕刻与铣削的能力。它的主轴转速高, 适合小刀具加工, 扭矩较小。在加工机器鱼外壳铝制配合件时操作方便、一次成型, 精度也满足要求。

电火花线切割简称线切割, 由电火花穿孔、成型制造的基础上发展而来。它通过连续不断的电极间脉冲放电时电火花腐蚀来对材料进行切割加工。

就整体加工过程而言, 笔者利用 3DP 技术及现代化的机械加工设备, 结合传统材料处理方法的综合加工技术, 对制备仿生机器鱼外壳及其机械结构的快速成型、加速迭代等技术进行应用研究。

收稿日期: 2014-06-23; 修回日期: 2014-08-05

作者简介: 李卫国(1967—), 男, 山西人, 学士, 高工, 从事智能控制机器人及创新实践制作研究。

1 三维成型技术的应用

1.1 仿生机器鱼外壳的 CAD 制图

笔者主要介绍材料制备过程，数学分析与建模部分略去。在综合力学、加工工艺等各方面因素影响下，确定出外壳的各项参数，并且应用 Solidworks 建模软件建造三维模型(可应用其他主流三维建模软件)。仿生机器鱼模型如图 1。输 STL 快速原型系统标准文件，利用三角网格来表现 3D CAD 模型表面。同时运用其他 CAD 建模软件输出文件均可。STL 文件是常用面片模型文件之一，是输入三维打印设备的控制软件能够识别的文件格式。需要注意的是输出 STL 模型时一般会有精度损失，特殊的零件需要注意。制备对象的精度损失基本忽略。

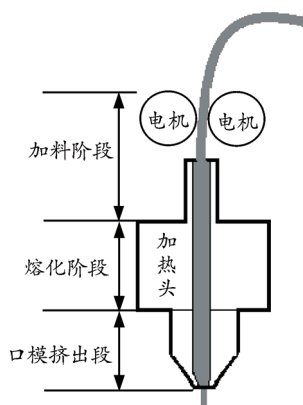


图 1 FMD 喷头结构

1.2 3DP 打印设备与材料

当今三维打印技术有以下 5 种^[1]:

1) 光固化成型 (stereo lithography apparatus, SLA) 技术: 利用激光扫描固化液态树脂, 可以达到的尺寸精度为 0.1 mm, 公差约 1.25×10^{-2} mm。

2) 分层实体制造 (laminated object manufacturing, LOM) 技术: 利用单面粘性特殊纸张材料, 激光扫描轮廓进行切割。纸张一层层相叠加形成纸质三维模型。原型产品变形挠度较小, 尺寸精度较高有良好的力学性能。之后延伸有金属薄膜热粘接技术。

3) 熔融沉积成型 (fused deposition modeling, FDM) 技术: 不需要激光, 通过融化丝状材料, 按照断面扫描叠加为实体模型。丝线直径在 0.25 mm 到 0.50 mm。FDM 成本低, 精度低, 表面质量差, 不宜制作结构复杂零件。FMD 碰头结构见图 1。

4) 选择性激光烧结 (selected laser sintering, SLS) 技术: 使用激光光斑烧结高分子粉末材料。SLS 可选用多种材料, 适合不同用途的需要, 其原型产

品成型件强度高。

5) 三维印刷 (three dimension printer, TDP) 技术: 通过喷头喷出粘接剂, 将被粘材料固化为所需断面来粘接实体。TDP 制成原型的尺寸精度不高, 并且强度较差较适合小型零件制作。

考虑到要制备的材料的需要和成本因素, 最终选用运用 FDM 技术的三维打印成型设备(设备为某公司企业设定型号: FPRINTA)。设备为双加热喷头, 这主要是为了配合主体与支架的异种材料打印, 否则也可使用单加热喷头的设备。为配合设备加热头温度设置以及制备材料需要, 选用了惯用的(丙烯酸/丁二烯/苯乙烯)共聚物 (ABS), 这种材料具备合适的流动性, 有合适的熔融区间, 有一定的力学强度, 同时还有较小的成型收缩率, 可以减少由于液固相变时内应力引起的收缩, 因而应用十分广泛。同时丝料要求光滑平直、杂质少, 以有效防止喷嘴堵塞与送丝不匀。如果条件允许, 可以在主喷头使用 ABS 材料作为主体材料时, 提供给副喷头高抗冲聚苯乙烯 (HIPS) 或其他有效材料, 来达到有脆性, 易剥离的效果。不过现在大部分打印机匹配的软件已经可以有效的规划路径, 即使只有单加热喷头也可很好地处理主体与支架的部分, 使二者易于剥离。

1.3 仿生机器鱼外壳 3DP 成型过程

最终将打印机成型温度设置在 80 °C, 初始化设备后载入软件片层化后的模型, 设备自动开始按照规划好的路径打印材料。涉及到的具体设备成型数据为, 每层层厚 0.25 mm, 轮廓与填充部分交叉率为 0%, 线宽控制为 0.53 mm。零间隔填充。整个成型过程参照图 2。

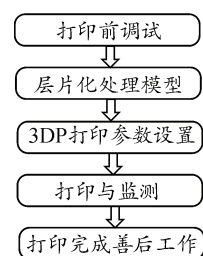


图 2 打印流程

由于不同设备的软件基本操作基本相同且较为简单, 且界面不统一, 所以笔者不再赘述操作方面。下面主要介绍运用 FDM 技术的设备整个成型过程中的一些技术经验, 供读者参考, 其中有一些虽然是小问题, 但是实际操作时对整个制作过程可能会产生影响。

1.3.1 3DP 打印前调试

打印前的设备调试是整个 3DP 打印过程中最重要的一步。制备的材料高度越大，产生累积误差的而导致制备失败的可能性也越大，所以一定要做到位的调试。

首先是送丝机构的调试，利用匹配软件控制喷头多次出丝，看是否顺畅，看送丝电机是否能牵引材料丝线。这主要是为了排除送丝机构的机械问题，防止由于送丝不畅而导致的设备打印异常，而误以为是参数设置有误。导致送丝机构失效的原因主要有：送丝齿轮与材料摩擦产生的碎屑减小了两者的摩擦力，长时间工作的送丝电机(主要以步进电机为主)老化与损坏。所以在发现问题时，要首先排除机械故障与送丝机构的问题。

其次是设备参数调试。如果是单加热喷头设备，调试的主要重心在打印台初始高度。打印台过高，过于靠近打印头，会导致在低层次打印时材料的压缩，使细部、整体发生变形，对后续打印造成影响。如果打印台过低，会导致底部疏松，与底板链接不稳固的问题，可能会发生材料翘起等问题。现在虽然一些设备有自动对高的技术，但是原理简单，手动对高也完全可以完成任务。经验调试方法为调整平台高度，当喷头与平台能恰好夹住一张标准 A4 纸时高度合适，记录并使用此时的平台高度设备即可。不同设备可能需要不同微调。由于采用了双加热喷头打印设备，比单加热喷头的设备还多了主副喷头偏移量的参数调节，这个参数以 0.2 mm 为调节精度，在打印需要支架的细部与材料悬空部分时尤为重要。调节方式主要是通过利用方台测试件的打印结果作为测量对象，计算误差并进行调节。反复上述步骤直到测试件符合要求如图 3，即支撑部分与主体的间隙在 x、y 2 个方向上都均匀，无偏移。

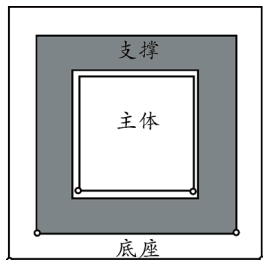


图 3 调试好的测试件效果

1.3.2 外壳层片化处理模型

利用 3DP 设备软件将 CAD 工具生成的 STL 文件所表达的模型进行分层处理。这步主要需要确定

分层的参数与同时生成的路径的参数设置。所用软件参数主要有以下几项：

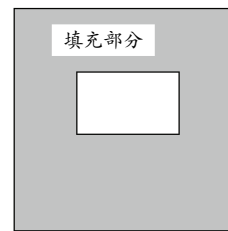
1) 线宽：由喷嘴直径、层片厚度、喷射速度扫描速度 4 个因素影响，需根据原型实际情况进行调整。合适的线宽下填充线紧密相连，同时不发生材料过堆。

2) 填充间隔：对于后壁原型，为提高成型速度，降低原型应力可以采用空隙填充的方法，即填充有间隔。制作机器人外壳为薄壁结构，同时为了增强强度选择了无间隔填充。

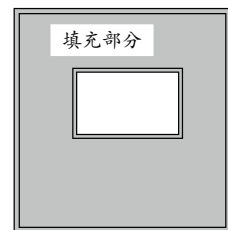
3) 表面层数：对于轮廓线打印的处理。根据具体情况设置。图 4(a)为扫描一次与图 4(b)为扫描 2 次的情况。

4) 交叉率：支撑部分与表面部分的交叉程度，一般为 0%，如果有些材料有特殊需要，可以调节该参数。

软件最终生成 CLI 层片模型文件。



(a) 轮廓线扫描 1 次



(b) 轮廓线扫描 2 次

图 4 表面层数示意图

1.3.3 3DP 打印参数设置

在此步骤中，主要任务是 2 个参数的设置：初始平台高度和成型温度。初始平台高度由第 1 步的测试得到。成型空间温度是带温控成型设备的附加参数选项，设置成型空间温度为 80 ℃，实验中相比开放空间中的三维打印设备，可控的成型空间温度可以有效防止模型和底板粘接不牢或翘曲现象。若其温度过高，可能会使打印过程中出现拉丝、支撑材料细且凌乱的问题，需要根据实际情况加以调整。

1.3.4 3DP 打印与监测

由于设备可能出现误差与异常，所以在初始的

几个模型打印时需要全程值守，在打印结果稳定后需要在打印过程中定期查看，如果有条件配备监控设备可节约人力，这是为了应对打印失误，及时终止打印失败的模型，防止对加热头与设备造成损坏。

1.3.5 3DP 打印完成的善后工作

善后工作常被 3DP 成型设备使用者忽略。根据实验的经验，应在每次模型打印完毕后，保持加热喷头的温度，对喷头周围杂质进行及时清理，打扫成型空间，检查喷头是否有出丝异常，可为下一次打印任务做好准备，同时能有效延长模口使用寿命，防止堵塞的出现。

另一方面是对于打印完成的模型，要做编号记录，分析支架与主体的打印情况，以及时发现问题。

1.4 3DP 打印外壳的处理

制备的对象是仿生机器鱼的外壳，防水是很重要的特性。由于成品只用于水面下 1 m 内的深度，故不需要特殊的防水处理来满足压强需求。主要介绍以环氧树脂与酯胶清漆为原料的防水处理方法。经试验证明，该防水方式简单有效，处理后表面光滑易于清理。经过简单打磨可以很好配合连接件。

1.4.1 外壳的材料分析

以之前制备的外壳材料为分析对象，进行注水测试，发现透水的问题主要存在于 2 个方面：一是鱼头部末端由于流线型缘故曲率较大，使得每层轮廓线接触面积减小，进而产生缝隙；二是每层片材料本身有微小缝隙所以会发生渗水。所以将材料防水处理分为材料成型方向(纵向)的防水处理与垂直于成型方向(横向)的防水处理。

1.4.2 打印材料的纵向处理

纵向处理主要是为了密封因轮廓线重合程度小而产生的缝隙，相比横向处理的缝隙更大。使用环氧树脂胶(MP 54750)作为防水处理材料。利用环氧树脂的流动性，可以均匀密封内部平面与外壳头部末端，可以同时增强材料韧性与抗重击性。

1.4.3 打印材料的横向处理

处理对象主要是层与层之间的微小缝隙。由于无法单独定位，并为了简化工艺，运用浸泡酯胶清漆整体覆膜的方式处理。由于清漆的流平性很好，所以可以很好的覆盖表面。相比聚酯漆，出现流挂(漆泪)也很好处理，只要再刷一遍就可使其溶解。

1.4.4 3DP 打印模型的其他处理方式

如果有大型风箱还可以采用丙酮熏蒸法进行表

面处理^[2]。具体方法是：将材料放在 1 个玻璃容器内，离开底面。在底部倒一层丙酮溶液。将容器加盖密封，放在温水浴中促使丙酮挥发。充满容器空间的丙酮会均匀附着在模型表面，将其重新融为一体。处理后的表面防水且有光泽。处理时注意防毒。

1.5 仿生机器鱼外壳性能分析

制备的材料与选用的 FDM 技术的精度要求都不是很高，对于外壳的力学性能检测主要是对薄弱部分的抗压测试。如果其他实验有较高的力学性能要求，可以测定维氏硬度、抗压强度及弹性模量并运用统计软件分析对材料进行评估。

在鱼身外壳的力学模型分析上，分析鱼身质心坐标位置和鱼身轨迹的运动规律，考虑其运动过程中鱼身转动惯量、鱼体受到的驱动力矩以及水的阻力矩等一系列模型参数的影响。影响因素较多，现给出一种简单的实验方法来判断鱼身的运动稳定性：在鱼身正上方添加一项干性好的激光发射装置，其质量很小且具备防水功能，在水池箱上方添加一透明玻璃板，用高频摄像头拍摄发射信号的轨迹，其轨迹偏离程度定性地反映了鱼身游动的稳定性^[3]。

在仿生机器鱼防水处理后，本身的材料与胶、漆较好混合。进行短时浸水实验，可以保证在 0.5 m 水深情况下 15 min 无漏水现象，大部分测试结果接近于 IPX7 标准要求。

制作完成后，在实际应用时，仿生机器鱼的外壳可以承受机器鱼的相互撞击、机器鱼与铁质球门的撞击，且均未发现材料破损迹象。其强度能满足基本使用要求。

2 配合件、连接件的机械加工与制作

在仿生机器鱼外壳打印的同时，可以进行相关配合件与连接件的机械加工与制作。这样可以节约时间，且能尽早处理过程中可能会出现的问题。

为配合三维打印的外壳设计，利用雕铣机、线切割机、小型台钻、电动磨具、丝锥等工具进行相关配件的机械加工。具体流程如图 5、6 所示。

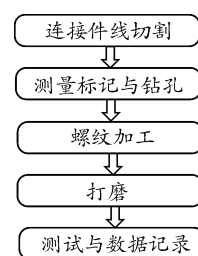


图 5 连接件制备过程

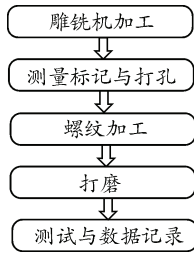


图 6 外壳配合件加工

2.1 利用雕铣机加工外壳配合件

2.1.1 影响外壳配合件材料选择的因素

1) 工作位置因素制约。配合件工作位置位于鱼头前部和上部，宜选用密度较小材料，增大机器鱼游动过程的平稳性；

2) 制造工艺以及装配精度的要求^[4]。配合件与外壳的配合尺寸公差带的大小以及形状位置公差要求高，配件与鱼身配合方式为过渡配合，其侧面的表面加工质量要求也较高(较小的表面粗糙度等)，从而满足防水性要求，此外材料的加工热塑性变形不宜太大。综合比较选用铝材料较为合适。

2.1.2 配件的制造过程

配件采用雕铣机进行加工，数控雕铣机本身是一种既可以雕刻，又可铣削的数控机床。它可以弥补通用数控机床加工中心的加工功能单一、加工小型产品成本过高的劣势，是我国先进制造业的不可或缺的新产品。雕铣机中的激光干涉仪测量系统能够动态测量轴向全行程移动的定位精度、重复定位精度，其中它的高性能伺服系统能够准确高效及时地反馈，从而能进行高精度位置控制，其控制原理如图 7 所示。高精度球杆仪检测伺服轴在平面运动的真圆度，主轴动态平衡校检机的检测确保主轴动态平衡精度等，这些是雕铣机维持较高加工精度不可缺少的重要保证。

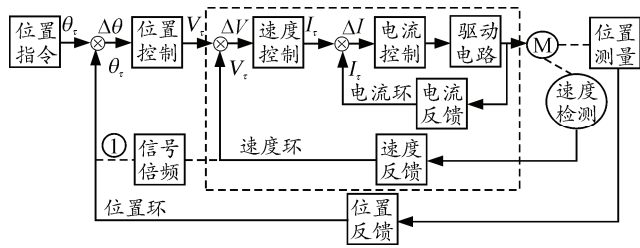


图 7 全闭环伺服系统

制造出的配件需制造一个螺纹孔来满足安装信号天线的需要，工件表面适当打磨去除毛刺以免损坏其他部件，及时打磨清理金属残渣，以免落入集成电路板造成电路短路而损坏，其他制造工艺(如钻孔、攻丝等)比较简单，此处不再赘述。配件的大概轮廓三维模型图 8 所示。

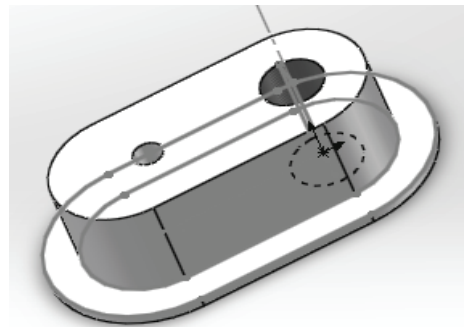


图 8 配件轮廓模型

2.2 利用线切割技术加工外壳-鱼身连接件

2.2.1 影响连接件材料选择的因素

1) 新型机器鱼外壳独特流线形状，使其拥有独特的力学性能；

2) 工作环境(水)的特殊性，调节机器鱼全身的平衡尤为重要；

3) 加工工艺对材料的影响；

4) 考虑连接件复杂交变应力条件，选用不宜拉丝的材料连接件的设计主要是克服新型机器鱼外壳在水中浮力太大的影响，来实现鱼身整体重心下降，增大游动的平稳性。经综合比较发现，选择 45#钢较为合适。

通过查询资料可知：灰口铸铁的密度大约 $6.6 \sim 7.4 \text{ g/cm}^3$ ，铸钢的密度 7.8 g/cm^3 ，普通碳素钢的密度 7.85 g/cm^3 ，优质碳素钢的密度 7.85 g/cm^3 ，黄铜密度 8.8 g/cm^3 。经分析，由于铝材的密度太小，连接件成型后，鱼身整体的重心偏上、偏后，稳定性偏差，并且由于鱼身游动过程中交变应力的存在，使得铝材拉丝现象明显，造成连接松动。黄铜等一些有色金属密度性能较好，线切割制造工艺合适。连接件成型后能够有效地将鱼身整体重心降低，但其价格昂贵，不适宜推广使用。45#钢为优质碳素钢较为典型的代表，其密度 7.85 g/cm^3 ，强度较高，塑性和韧性较好，其机械加工工艺性能很好，价格低廉，获取途径较为广泛，综合比较可知，45#钢较为合适。

关于连接件结构设计的需求，首先应满足连接性能的要求，其次考虑到鱼身游动的稳定性，连接件的机械结构从不同设计分析鱼身整体重心位置的高低。开始的设计如图 9。

综合不同连接件下仿生机器鱼的游动效果与平衡情况，笔者最终选用了低重心位置的设计，配合电路与电池部分的移动，使得机器鱼的总体重心在 SolidWorks 软件评估中整体下降 0.5 mm ，调整后连接件如图 10 所示。经实际试验，仿生机器鱼的平衡

情况较之前更好。

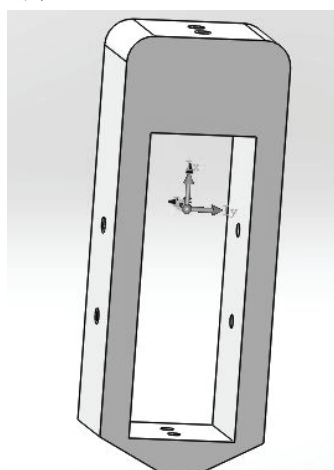


图9 初始连接件设计

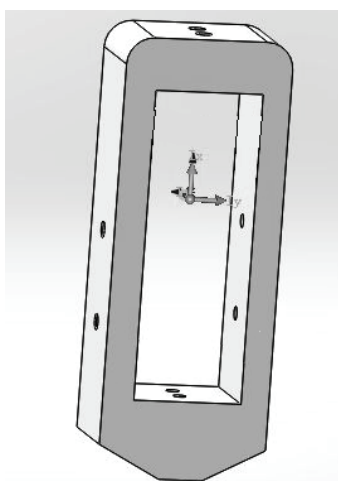


图10 经实验调整后连接件设计

2.2.2 连接件的制造工艺

连接件的制造选用电火花线切割加工技术，它是特种加工中电火花加工的一种常用制造技术，工作原理是电极间脉冲放电时电火花腐蚀原理。以高速移动的细金属丝（钼丝或铜丝）作为工具电极，工件按照已经 CAD 制造好的连接件模型的轨迹进行运动，一次火花放电瞬间放电通道可达 5 000 ℃以上的高温，使工件局部熔化，甚至少量汽化，高温同时使工作液部分汽化，迅速膨胀，抛出已熔化和汽化的金属材料实现加工。电火花线切割制造技术的原理，如图 11 所示。

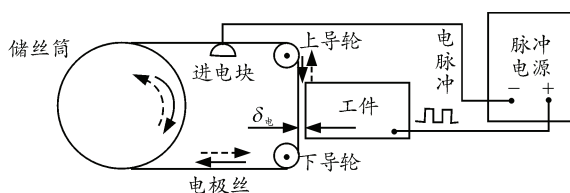


图11 电火花线切割加工原理

制造出的连接件按照装配需要进行打孔。工件表面适当打磨去除毛刺损坏其他部件(如舵机)，及时清理金属残渣，以免落入集成电路板造成电路短路而损坏，其他制造工艺(如钻孔、磨削等)比较简单，此处不再赘述。

2.3 连接件、配件装配

连接件与新型机器鱼外壳之间以及连接件与内部舵机集成电路套装之间的配合均为间隙配合，便于装配以及机器鱼的维修保养。连接件与机器鱼外壳选用受横向力的螺钉组连接，螺钉紧固时受有一定的预紧力，另外螺钉组受到交变横向力 F_r 作用，因此综合考虑螺钉所受复杂应力状态，选用强度较高的螺钉，在打螺纹孔制作前进行强度校核计算。

配件与新型机器鱼外壳之间选用过渡配合，注意到尺寸公差带以及形状位置公差要求，以便实现安装信号接收天线和充电接头的同时保证在受振动，碰撞等的复杂条件的影下不宜脱落并且起到防水的作用。外壳配件在安装后在连接处可用硅橡胶防水，其易于清理不与表面发生化学作用。

3 结束语

实验主要任务是快速制作仿生机器鱼机械结构原型，完成测试并进行迭代，确定最终的设计方案。笔者运用 3DP 技术与简单加工技术，使本制备项目在 2 周内完成第一代产品的测试，之后每周在原基础上进行修改可以完成对原型的一次迭代。相比传统工业加工方式大大加速了原型开发的速度。

经制备仿生机器鱼机械结构实验验证，3DP 打印技术结现代化机械加工中的雕铣机、线切割设备制造原型的方法快速可行，可以加速产品原型的生产效率、完成产品的快速迭代。通过这次运用多种设备的综合加工实践，使机械结构的制作任务更加科学合理。

参考文献：

- [1] 王成焘, 李祥, 袁建兵. 三维打印技术与制造业的革命[J]. 科学, 2013, 65(3): 21-25.
- [2] 丁丁, 张旭, 斯铁冬, 等. 三维工艺设计中基于加工特征的工序模型生成技术[J]. 兵工自动化, 2013, 32(6): 31-35.
- [3] 王龙, 喻俊志, 胡永辉, 等. 机器海豚的机构设计与运动控制[J]. 北京大学学报: 自然科学版, 2006, 42(3): 294-301.
- [4] 李卫国, 王志刚. 进攻型武术擂台机器人的研究与实践[J]. 机器人技术与应用, 2009(4): 41-43.