

罗茨真空泵“8”字形转子数控加工研究

撰文 / 张家口煤矿机械制造技工学校 任涛

一、引言

罗茨真空泵的结构如图1所示。在泵腔内,有2个“8”字形的转子相互垂直地安装在一对平行轴上,由传动比为1的一对齿轮带动彼此反向的同步旋转运动。在转子之间,转子与泵壳内壁之间,保持有一定的间隙。由于罗茨泵是一种无内压缩的真空泵,通常压缩比很低,故中、高真空罗茨泵需要前级泵。因此,罗茨泵的极限真空除取决于泵本身结构和制造精度外,还取决于前级泵的极限真空度。工作原理如表所示。

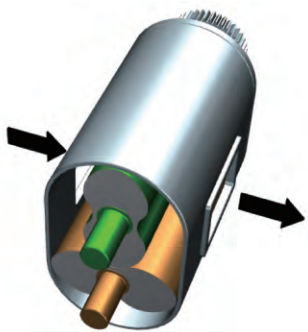


图1 罗茨真空泵的结构简图

表

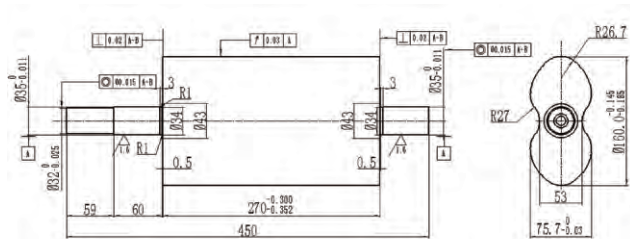
罗茨真空泵工作原理

工作过程简介	工作过程简图
<p>两个“8”字形转子之间以很小的间隙相向旋转运动,“8”字形的转子将泵室分为小的空间</p> <p>“8”字形转子位置为1和2时,吸入室空间增大</p> <p>在位置3,部分空间与吸入口隔开</p> <p>在位置4,被隔开的空间与更高压强的挤出口相连,并由于吸入更多气体受到压缩</p> <p>“8”字形转子继续旋转,被压缩的气体通过挤出口法兰排出</p>	

由此可以看出罗茨真空泵的关键零部件是“8”字形转子,而“8”字转子的关键是它的型线。“8”字转子横截面的轮廓线即为“8”字转子的型线。罗茨真空泵工作时,“8”字转子的表面之间不接触,但“8”字转子之间的间隙要保持一定,这样“8”字转子的型线必须是共轭曲线。所以本例介绍“8”字形转子的数控加工过程,以保证工件最后符合设计要求。

二、CAD 建模

本例是外来图样加工,已有设计好的CAD二维图形,如图2所示,利用NX10.0的数据接口将“8”字形转子轮廓导入软件,依次点击“文件”→导入→AutoCAD DXF/DWG,出现下一级对话框,按提示选择“8”字转子横截面的轮廓线。再使用拉伸命令得到加工零部件的CAD模型,如图3所示。



三、CAM 加工

进入加工模块，将工作部件和毛坯设置好后，选择多轴铣削 mill_multi-axis 模式，在工序子类型中选择可变轴轮廓铣 VARIABLE_CONTOUR，如图 4 所示。



图 4

在可变轴轮廓铣 VARIABLE_CONTOUR 中设置指定切削区域，如图 5 所示的工作部件的绿色区域。

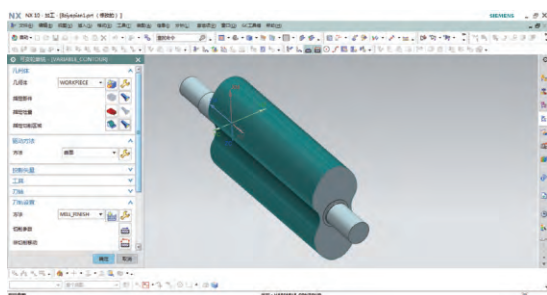


图 5

在可变轴轮廓铣 VARIABLE_CONTOUR 中设置驱动方法，如图 6 所示的蓝色圆柱曲面，调整最大残余高度为 0.0032mm 和切削方向。

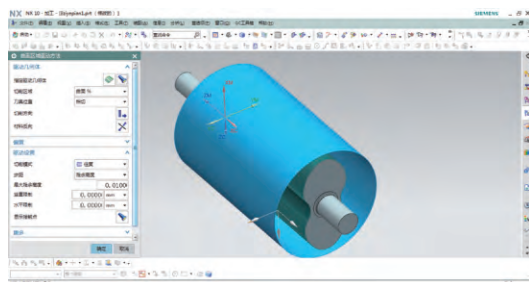


图 6

在可变轴轮廓铣 VARIABLE_CONTOUR 中设置投影矢量为垂直于驱动体，如图 7 所示。另外选择 $\Phi 12$ 的球头铣刀，如图 8 所示。设置好刀轴设置为 4 轴，相对于部件，侧倾角为 15° ，目的是解决刀具中心切削条件差的问题，如图 9 所示。



图 7

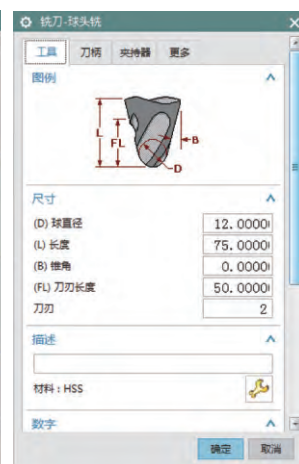


图 8

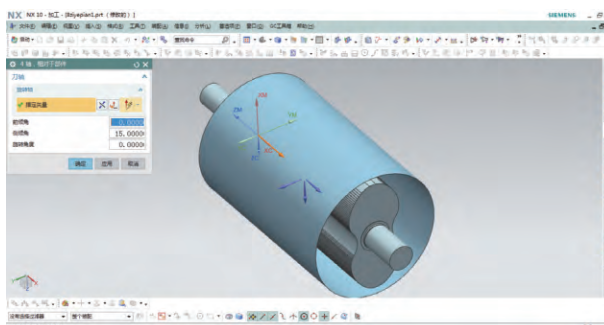


图 9

在可变轴轮廓铣 VARIABLE_CONTOUR 中设置好切削参数、非切削移动和切削用量等参数如图 10 所示。刀具轨迹生成后如图 11 所示。



图 10

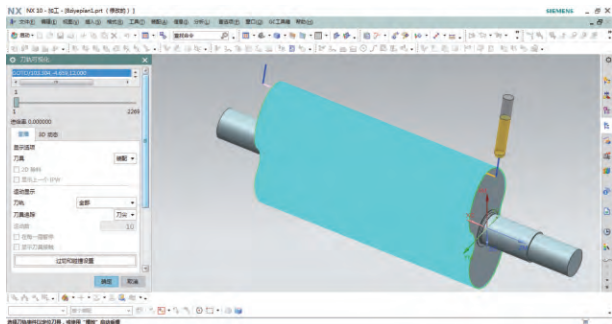


图 11

结合加工设备 INDEX TNA400 车削中心，参数为最大零件直径： $\Phi 665\text{mm}$ ；加工零件的最大长度：750 mm 最大车削直径盘件 / 轴件： $\Phi 435 \sim 340 \text{ mm}$ ；最大棒料直径： $\Phi 65\text{mm}$ ；主轴转速：50 ~ 4000r/min；主轴功率：15/18.5kW；切削进给速度：X/Z 轴 0 ~ 10r/min；最大快速移动速度：X/Z 轴 15/24m/min 刀盘工位数：12；动力刀具转速：30 ~ 4000rpm(可编程)；刀盘重复定位精度：小于等于 3" 的控制系统：T65n1/T65n2。40° 整体倾斜床身，排屑方便，结构紧凑，刚性好；高性能伺服主轴电机，主轴功率强劲；性能优异的数字式交流伺服电机，配合高精度的直线滚动导轨，定位快速，准确；绝对位置检测系统，不需参考点；尾架和中心架配有独立的滑动导轨；导轨采用柔性防护，可防止铁屑进入；纵横直线滚动导轨及相关轴承采用油脂润滑。可长期保持机床精度。提高关键部件的寿命；ATC 光学对刀仪，可减少操作者对刀时间。如图 12 所示。



图 12

四、数控代码仿真及加工

NX10.0 作为一种优秀的 CAD/CAM 软件，几乎可以覆盖从设计到加工的方方面面。NX 的 CAM 加工模块可以产生刀轨，但是不能直接将这种未修改过的刀轨文件传送给机床切削工件，因为机床的类型很多，每种类型的机床都有其独特的硬件性能和要求，比如他可以垂直或是水平的主轴，以及多轴联动等。此外，每种机床又受其控制器(controller)

的控制。控制器接受刀轨文件并指挥刀具的运动或其他的行为(比如冷却液的开关)。但控制器也无法接受这种未经格式化过的刀轨文件，因此，刀轨文件必须被修改成适合于不同机床 / 控制器的特定参数，这种修改就是所谓的后处理。需要用到 post 构造器。根据加工设备的具体参数，定制 NX 的后处理，生成 NC 代码，如图 13 所示。

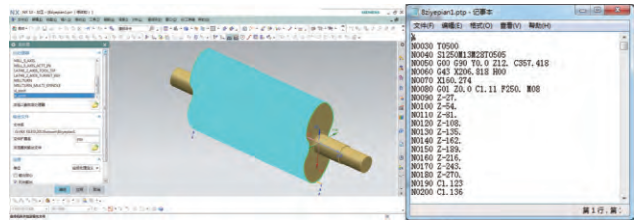


图 13

由于加工设备比较贵重，所以利用第三方仿真软件，进行 NC 代码的仿真加工，本例采用美国 CGTECH 公司开发的数控加工仿真系统 VERICUT 软件进行仿真加工，共可以进行 NC 程序优化，缩短加工时间、延长刀具寿命、改进表面质量，检查过切、欠切，防止机床碰撞、超行程等错误；具有真实的三维实体显示效果，可以对切削模型进行尺寸测量，并能保存切削模型供检验、后续工序切削加工；具有 CAD/CAM 接口，能实现与 NX、CATIA 及 MasterCAM 等软件嵌套运行。

为在 VERICUT 软件中实现 NC 程序加工仿真，需要预先构建整个工艺系统的仿真环境，其构建的一般过程如下。

(1) 工艺系统分析。

确定数控机床 CNC 系统型号和功能、机床结构形式和尺寸、机床运动原理、各坐标轴行程、机床坐标系统以及所用到的毛坯、刀具库和夹具库等。

(2) 建立机床几何模型。

采用三维 CAD 软件建立机床运动部件(主要是各运动坐标轴和刀库)和固定部件的实体几何模型，并转换成 VERICUT 软件可用的 STL 格式。使用 NX10.0 软件建立“8”字转子毛坯及夹具(三爪卡盘等)，另存为 stl 格式，在 VERICUT 软件中导入使用。

(3) 建立机床文件。

建立机床运动模型，即部件树，添加各部件的几何模型，并准确定位。将结果保存为机床文件(后缀为 mch)。机床文件为：2_axis_turret_lathe_cdc。该机床模型为车削中心，

需要在刀台处拓扑结构下添加动力铣头，如图 14 所示。

(4) 建立用户文件和控制系统文件。

在 VERICT 软件中新建用户文件（后缀为 usr），设置所用 CNC 系统文件（后缀为 ctl）。调用机床控制文件：fan15t.t。

(5) 建立刀具工具库。

根据机床选用的刀柄型式和规格、刀具种类，构建机床刀具工具库，将结果保存为刀具文件（后缀为 tcl）。建立一把直径为 12mm 的球头铣刀。

(6) 设置机床参数设置。

机床各坐标轴的行程，换刀位置、机床初始位置和机床参考原点等。

(7) 保存所有文件。

全部设置完成后，保存所有文件，则仿真系统构建完成。

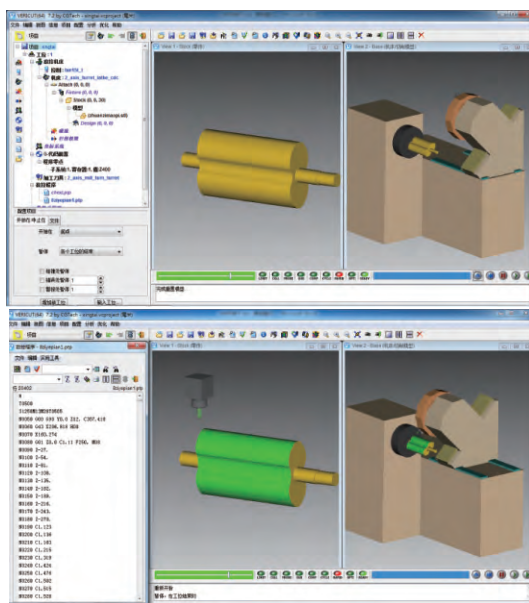


图 14

(8) 导入 NC 代码。

在 VERICUT 软件特征树中双击“数控程序”，系统打开“数控程序”对话框，依次选取前面生产 NC 代码，导入到 VERICUT 软件中。

(9) 数控仿真加工。

单击重置模型按钮，再单击仿真到末端按钮，该软件开始进行加工仿真，结果如图 14 所示。

经过仿真优化的 NC 代码传输到加工设备中，可以进行工件的数控加工，如图 15 所示。加工时需要自制辅助夹具，利于工件的批量生产。

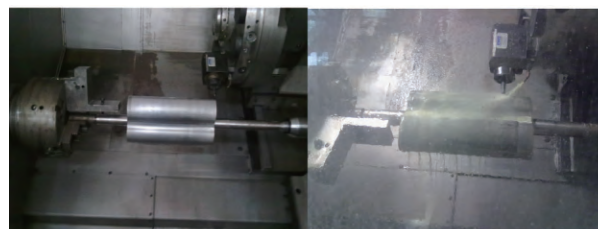


图 15

五、结语

采用 NX10.0、VERICUT 软件进行罗茨真空泵“8”字转子的三维造型、4 轴加工自动编程与仿真校验过程，是基于计算机数字建模技术和虚拟制造技术。该过程建立了仿照实际加工环境下的刀具干涉与碰撞情况。加工仿真后与传统加工对比可以有效地提高加工效率并减轻操作工人的劳动强度，而且在企业不增加设备的情况下增大机床的适用范围。另外通过仿真加工，可以提高 NC 代码的正确性，有效地保护加工设备。产品效果图如图 16 所示。



图 16

面向飞机智能制造的工艺智能决策与知识库技术

撰文 / 中航工业沈阳飞机工业（集团）有限公司 王勃 杜宝瑞 赵璐

工艺知识与决策技术是未来飞机智能制造中的关键技术之一。本文首先阐述了工艺知识与资源的获取方法以及建模方法；其次，研究了工艺智能决策中的工艺知识推理与智能决策方法；最后，建立了面向飞机智能制造的工艺智能决策平台，实现了典型零部件的智能化制造。

一、前言

21 世纪以来，虽然知识经济已初见端倪，但制造业仍是经济的主要载体，在国民经济中仍占有非常重要的地位。飞机制造处于制造业的技术顶端，在新形势下，飞机制造业不断提升其数字化、自动化水平，并逐渐向智能制造演进。作为智能制造中的关键环节，智能工艺设计已成为飞机制造领域的研究热点。

知识是智能的基础，基于知识的工艺智能决策则是工艺设计智能化的灵魂所在，其利用现有知识通过人工智能手段实现工艺自动决策及优化，同时不断更新与完善工艺知识，使企业能够更快地响应新型产品的工艺需求。航空制造企业在多年的飞机研制过程中积累了丰富的工艺知识。然而，现阶段大量的知识尚无法以独立的形式存在，而是依存于富有经验的工程师，或是被固化在特定的智能制造系统中。这使得企业无法对这些知识进行有效地维护、应用、拓展及共享。此外，由于工艺员的水平及工作习惯不尽相同，而在工艺设计中又缺乏具有指导性的规范，致使相似零件选用的工艺方案及加工参数存在差异，从而容易造成产品加工效率低及加工质量差等问题。因此，建立企业工艺知识库与资源库，并在此基础上构建工艺智能决策系统已成为智能制造中的亟待解决的关键问题。

国外基于知识的工艺系统开发技术正朝着智能化方向发展。日本政府早在上世纪 80 年代初就设立了用于制造工艺数字化、智能化研究的专项基金，其建立的国家级数字化工艺参数库已面向全国开放，并以此提高该国中小企业的制造工艺水平。美国和欧洲已建立了易维护、可重用的大型知识库系统，影响较大的有美国军方 DARPA 投资的 HPKB 及欧洲数国联合开发的 IBROW 等。

国内在此领域也已开展了卓有成效的研究。在知识库构建及系统开发方面，北京航空制造工程研究所建立了针对飞机构件制造过程的工艺知识库，该知识库主要包括典型工艺、工艺参数、刀具和基础数据等。北京航空航天大学开发了针对“机床 / 刀具 / 工件”的切削加工工艺系统，构建了动态切削力、主轴功率与转矩、工件与刀具的振动变形等工艺参数库，目前该系统已经在工厂进行了推广和应用。哈尔滨工业大学通过对树脂基复合材料成型工艺决策数据分析，建立了基于粗糙集理论的复合材料成型工艺决策的知识挖掘模型，提出了一种基于知识相依性的复合材料成型工艺决策规则挖掘方法。然而，国内目前在工艺智能决策方面仍存在明显的不足，具体表现在两个方面：一是尚未形成完整有效的工艺知识与资源库，二是尚未实现基于知识的快速工艺设计。

针对上述问题,本文首先提出了工艺知识库与资源库的构建方法,然后介绍了工艺智能决策的关键技术,最后阐述了工艺智能决策平台的体系结构,如图1所示。



图1 工艺智能决策与知识库构建的思路

二、工艺知识库及资源库体系

工艺知识是指在特定的设计制造过程环境中,经过学习、整理、归纳及整合之后的具有统一结构、普适性且可用于再生产的,并且本身不断发展和改进的一种描述工艺设计过程及其相关资源的知识体系。工艺知识库及资源库的构建过程从宏观上讲可分为两个阶段,即工艺知识的获取与工艺知识的表达。

目前,航空制造企业中的工艺设计仍以经验型设计为主,工艺知识通常隐含或蕴藏在工艺设计系统的工艺参数或工艺设计人员的设计经验中,具有广泛性、隐含性、多样性、复杂性以及模糊性等特点。如何有效地获取丰富的工艺知识是实现工艺设计智能化的重要技术基础。在获得工艺知识之后,还需要建立其结构化模型,使其显式化、逻辑化及数字化,进而使这些知识能够在新产品的工艺设计中被有效地重复利用。

1. 工艺知识的获取

工艺知识主要来自于专业书籍、标准与规范、现行工艺文件、企业工艺数据库及领域专家的经验等,内容繁多,形式多样。传统上,工艺知识的收集和获取主要依靠人工实现,这种方式无法保证知识的准确性和可靠性,难以捕获到可能存在的隐性知识,而且也难以发现知识或数据间的内在逻辑关系,因此已难以满足制造系统智能化和信息化的要求。

经过数十年的发展,当前主流的工艺知识获取方法包括:(1)基于对象模型的工艺知识获取。即建立工艺知识的对象模型,在模型的基础上对专家知识进行分类、组织,并以概念、对象、文本和数据等形式表示出来,其核心是知识的建模。(2)基于人工神经网络的工艺知识获

取。这种方式主要应用于工艺决策及工艺方案的自动生成方面,其关键在于网络拓扑结构的设计和学习训练样本的准备,这两项工作需要在大量专家经验和有效且完备的历史数据基础上进行。(3)基于实例推理的工艺知识获取。此类技术与传统的专家系统相比,获取知识较为容易,其技术难点在于实例、修正知识及相似性评估等方面的问题。

(4)基于KDD的工艺知识获取。即利用企业工艺数据库、资源库,应用数据挖掘技术从中分析、总结抽取工艺知识,其关键是建立符合工艺知识特点的挖掘算法和数据分析方法。

飞机智能制造中涉及到各类工艺知识,在知识获取过程中应对机加、钣金、复材及装配等制造流程进行全面的分析与整理。从加工对象、装配对象的结构性能及工艺特性出发,分析各类典型工艺,归纳工艺设计中涉及的事实参数,建立标准术语的准确定义及知识的规范性描述方法等,从工艺知识术语、流程、方法到规范性描述等多个层次对工艺知识进行详细分类及梳理。具体包括:

(1)工艺流程及方法的梳理:对飞机制造各环节进行流程梳理,并对流程中涉及的工艺方案、加工方法、资源选择、编程方法和资源参数等进行全面的分析与总结。

(2)标准术语整理:对工艺设计中涉及到的标准术语进行准确定义与合理分类,确保术语合理、准确且易理解,为后续工艺知识的规范描述奠定基础。

(3)工艺知识的规范性描述:将工艺信息及知识进行分类,研究各类知识的规范性描述,将知识以规范化的方法进行描述,便于后续知识模型的构建。

(4)典型工艺分析与总结:收集并整理结构件数控加工、钣金制造、复材加工及装配等典型工艺方案,形成各类加工对象、装配对象的典型工艺流程、制造资源的选取方法、编程方法和加工操作方法等。

2. 工艺知识的建模

传统制造领域中常采用的工艺知识表示与建模方法主要包括谓词逻辑法、基于规则法、框架表示法、语义网络法、基于过程方法以及面向对象法等。航空制造领域的特点决定了其难以采用某种单一的方法有效地表达制造过程中的所有工艺知识。例如,谓词逻辑法表达的知识具有比较严密的科学性,适用于确定性、陈述性和静态性知识,但对于动态、变化、模糊的知识则很难表示。

基于本体论的方法强调领域知识的规范性定义,有较

好的知识涵盖和扩充性能。该方法具有良好的概念层次结构，可对术语语义进行明确的、形式化的定义，进而实现逻辑推理。通过建立工艺知识本体模型来建立工艺知识及资源库的过程如图 2 所示。



图 2 基于本体的工艺知识库框架

根据航空工艺设计的需求，需要建立的工艺知识模型主要包括如下类型：

(1) 典型工艺流程模型。典型工艺流程模型主要描述采用何种形式表示结构件数控加工、钣金制造、复材加工及装配的典型工艺流程，以及局部的流程信息。图 3 所示为某典型机加工工艺流程的层次模型。(2) 典型方法模型。典型方法模型主要描述方法类的知识，例如典型特征的编程方法等。(3) 事实参数模型。事实参数模型是一种对象模型，用于对结构件数控加工、钣金制造、复材加工及装配等环节工艺过程中的事实参数进行分类、归纳，分析其取值。如图 4 所示为事实参数模型的示例。(4) 规则类知识模型。规则类知识模型主要描述制造资源与加工方式的选择方法以及编

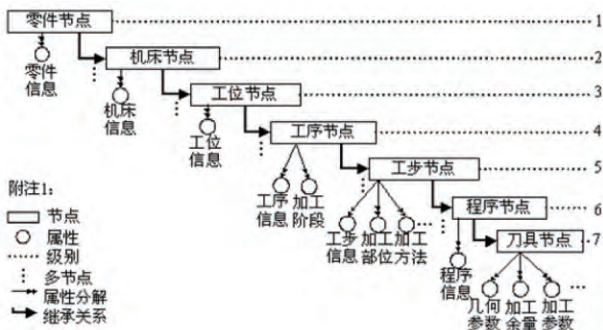


图 3 工艺过程建模

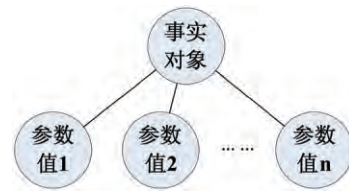


图 4 事实参数建模

程经验等方法类知识，用于后续知识推理。(5) 工艺资源模型。工艺资源模型是用于描述结构件数控加工、钣金制造、复材加工及装配等环节工艺过程中涉及到的设备、工具、工装等资源的参数及三维模型等信息的模型，工艺资源模型可为制造资源的选择提供基础参数。(6) 工艺资源仿真模型。工艺资源仿真模型主要用于工艺仿真，即在虚拟环境中验证工艺方案，进而减少实际制造中的问题。以装配仿真为例，需建立三维人体模型、三维工装模型和三维工厂模型等。如图 6 所示为工艺资源仿真模型示例。

以飞机装配工艺为例，在工艺知识及资源库的构建过程中，首先对飞机装配过程中涉及到的知识进行分析与分类，梳理出装配工艺知识结构化体系（图 7），然后构建装配工艺知识的本体模型，最终建成装配工艺知识库。知识库的整体构建流程如图 5 所示。

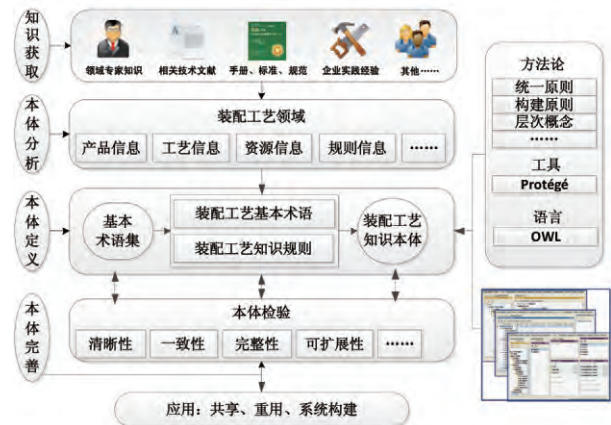


图 5 装配工艺知识本体构建流程

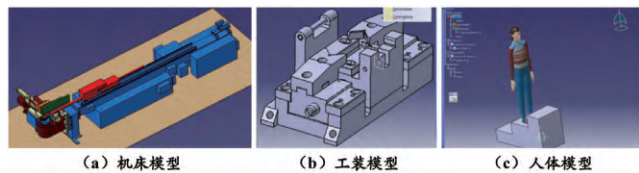
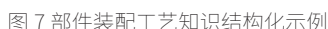


图 6 工艺仿真资源模型



工艺智能决策是基于工艺知识及资源库,面向新的工艺需求,采用适当的工艺推理方法,在工艺设计过程中由机器模拟人类的思维推理过程,构建出最优化的制造工艺。

1. 工艺知识推理

在工艺知识推理过程中, 工艺参数选取的合理性在很大程度上决定了产品的制造质量, 其中参数优化与路径优化是飞机制造工艺优化的核心内容。以数控加工为例, 目前航空制造企业尚未形成有效合理的加工参数库, 往往依靠工艺员的自身经验决定加工参数, 合理性难以保证, 并且偏向保守。为此, 可采用等材料切削模型对加工参数进行优化, 从而使单位时间内刀具的切除材料体积相等, 以保证刀具在加工过程中的状态稳定, 降低刀具损耗, 提高零件的加工质量。此外, 路径优化是关乎零件加工效率高低的另一关键, 可采用遗传算法、模拟退火算法、粒子群算法和人工神经网络等

2. 工艺智能决策方法

基于工艺模板的快速工艺决策是指在工艺模板基础上,通过可视化、图形化且便捷化的方式实现工艺决策模型的自定义,实现模型驱动的工艺快速决策。以数控加工结构件为例,为保证工艺设计质量,结构相似的零件应选用相似的工艺方案,因此,针对典型零件的加工工艺,首先建立如图3所示的加工方案模型。在工艺设计过程中,只需要交互指定机床、刀具和工装等加工资源的参数即可完成工艺设计。

工艺模板与制造资源相融合的工艺智能决策是指,通过读取产品 MBD 模型中的工艺要求,结合产品三维模型的特征识别结果,自动选择工艺模板及制造资源,并且将模板与资源进行深度融合,进而实现工艺的自动决策。同时,通过建立一定的规则,对工艺方案的有效性进行检查。如图 8 所示为工艺智能决策流程。



四、工艺智能决策平台

在前述技术基础上，可建立面向飞机智能制造的工艺智能决策平台，实现典型零部件的智能化制造。平台中主要包括工艺知识及资源库、工艺知识及资源关系系统、工艺智能决策系统以及智能化应用系统等关键构成部分。

1. 工艺知识及资源库

工艺知识及资源库为决策平台提供基础数据支撑，其中工艺知识库包括工艺模板库、工艺方案库、规则类库、参数优化库和事实参数库等；工艺资源库包括机床参数库、切削参数库、工装标准件库、刀具参数库、三维仿真模型库、工装标准件及典型件库及工件材料库等。工艺知识库及资源库通过特定的数据接口与系统各功能模块进行数据交换。

2. 工艺知识及资源管理系统

工艺知识及资源管理系统以飞机制造的工艺流程为中心，对工艺知识及资源库中的知识进行统一管理，使其成为统一、多层次、可重用且科学的工艺知识体系。管理平台可对工艺知识及资源进行检索、插入、删除以及修改等操作。为了提高工艺设计效率，该系统提供了多样化的知识检索手段，例如分类检索、关键字检索、语义检索以及实例检索等。此外，对于知识的管理，系统对普通用户、高级用户以及管理员用户分别设定了不同的权限。普通用户具有只读权限，高级用户和超级用户都具有管理员权限，但超级用户比高级用户拥有更高的权限。

3. 工艺智能决策系统

基于知识的工艺智能决策系统中实现了大量的工艺知识推理方法及工艺参数优化方法，形成了面向飞机制造的工艺推理机制与决策逻辑策略，可实现基于模板的工艺快速设计以及基于模板与资源融合的工艺自动设计。

在工艺智能决策过程中，首先从零件 MBD 模型中提取几何信息、材料信息、产品性能要求及工艺要求等，依据这些输入信息有选择性地访问工艺知识及资源库；然后通过检取到的规则类知识推理出所需的工艺模板、机床、刀具、工装和切削参数等，并借助优化模型及算法对初选结果进行优化选择；然后根据映射关系将工艺模板与各类制造资源进行深度融合，将制造资源分配到对应的工序及工步中；最后经过有效性检查等自动校验过程，推理出结

构件的合理工艺方案。

4. 智能化应用系统

知识库的强大不仅在于它能够为工艺决策提供丰富的知识支撑，而且在于它具有自学习与自维护的能力，能够使其在应用过程中不断更新、完善与拓展。在工艺决策过程中，系统可记录新的工艺知识及工艺决策方案，在用户允许的情况下将其添加至工艺知识库。随着知识库中新知识的不断加入，知识库中各知识单元之间的相互影响与联系随之变得复杂。为此，系统提供了对知识的自维护功能，对新加入的知识可进行正确性、一致性及完备性检查维护。知识的正确性维护即检查知识库是否能够推理出合理的工艺；一致性维护即检查知识单元记录格式的标准化和规范化，以及检查知识之间是否存在冗余、矛盾和循环等错误；完备性维护主要是排除由于多余输入或死节点或编码遗漏所造成的知识缺失。

五、结语

智能制造是信息化与工业化两化深度融合的重要体现，工艺智能决策与知识库技术则是实现智能制造的一项关键技术。将专家的工艺设计经验知识进行结构化存储，并基于此实现工艺快速及智能化决策，可以显著提升工艺设计的规范化水平，提高工艺设计效率和产品研发质量。同时，由于工艺知识可以有效继承、重用与拓展，在企业的可持续发展及提升企业核心竞争力方面将起到不可估量的作用。IM

Solidthinking-Inspire 在机械产品升级优化中的应用

撰文 / 安徽合力股份有限公司 钟继萍 陈春梅
工业车辆安徽省重点实验室 常亮

本文以某油缸支座改进设计过程为例，借助于 Altair 公司的 Solidthinking-Inspire 软件，详细阐述了软件在产品改进设计过程中发挥的作用，结果表明：在设计出最优的产品时能有效的提高设计效率。

一、引言

在对现有机械产品进行改进设计时，产品设计工程师容易受现有产品结构的束缚，形成思维定式，难以进行创新。而这几年蓬勃发展的拓扑优化技术恰恰可以帮助设计人员找到新的设计灵感，帮助他们掌握正确的设计方向。然而掌握拓扑优化技术，需要一定的力学、CAE 等方面的理论知识，在企业中，这项工作往往由 CAE 工程师在 CAE 平台来完成。这样，一次完整的优化流程需要产品设计工程师在 CAD 平台完成设计后，由 CAE 工程师导入 CAE 平台进行分析优化，之后再反馈优化结果到产品设计工程师在 CAD 平台进行改进设计。沟通不畅、互相专业领域的不了解、跨 CAD/CAE 平台间频繁模型切换的不畅等因素实际上影响了拓扑优化技术应用的更加普及。

Altair 作为 CAE 行业中一个优秀的软件供应商，提出了“以仿真驱动设计”的理念，以先进的 OptiStruct 优化求解器为基础，将优化的功能提到设计流程前端，开发了概念阶段优化和分析软件 Solidthinking-Inspire。

二、Solidthinking-Inspire 软件简介

Solidthinking-Inspire 颠覆性的将建模，仿真分析，

拓扑优化技术集合到了一个软件平台下，它有以下特点。

(1) 专为产品设计工程师量身定制，它不像大型的 CAE 软件有大量的菜单，界面简单易懂，具有亲和力。

(2) 软件使用操作简单，容易理解，界面及帮助有中文版本，不像大型的 CAE 软件多为英文版本，方便英文基础较差的工程师使用。

(3) 淡化 CAE 知识，不需要任何 CAE 背景知识，只需对产品设计有一定的了解，即可通过软件进行优化设计，来获得和判定优质的结构。

三、Solidthinking-Inspire 在油缸支座改进设计中的应用

基于 Solidthinking-Inspire 软件强大的建模，分析及优化功能，我们以一个油缸支座的改进设计为例，来看看 Solidthinking-Inspire 如何应用到机械产品升级优化中。

1. 静强度分析

某款油缸支座原为焊接结构（图 1），原结构由两块竖板，一块弯板，一块筋板焊接而成，焊接结构重 32.35kg，随着部件的改进升级计划改为铸钢结构，设计人员需要设计出一个新的铸钢结构油缸支座，要求相比原始结构更轻，更

耐用。首先将原焊接结构导入 Solidthinking-Inspire 进行静强度分析。

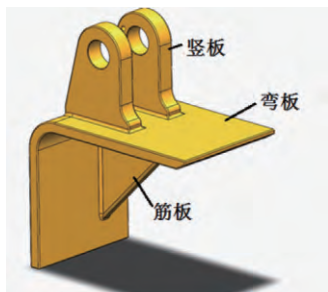


图 1 油缸支座原焊接结构

通过结构仿真模块，快速的定义材料属性，载荷、约束等边界条件，单元大小后即可点击分析进行静强度分析。之后就可以查看位移，安全系数，米塞斯等效应力等结果，可以看出结构最大应力 205MPa。



图 2 应力分布云图

2. 几何体简化

几何体简化功能能直接在 Solidthinking-Inspire 软件中对原始模型进行修改，避免了跨平台的软件切换引起的不便，它只需简单操作就可以实现查找和删除凹坑、孔，查找和删除圆角和倒角，推 / 拉面等功能。大大节省了更改模型的时间。

以本文中的油缸支座为例，点击简化几何体中的孔功能，如图 3 所示，软件自动搜索模型中的孔洞并红色高亮显示，并可以通过调整搜索容差进行搜索，也可以手动将高亮显示的孔中不需要删除的去除，之后点击删除按钮，软件即自动将一些不需要的孔去除。

同样的操作方法，软件也可以自动去除圆角、倒角。如图 4 所示。这样就得到一个简化完成的几何体，用于后面

的优化工作。



图 3 自动去除孔及凹坑



图 4 自动去除圆角及倒角

3. 拓扑优化

(1) 定义设计空间与非设计空间。

所谓设计空间就是优化前的初始结构，通过优化计算，挖掉设计空间中的多余部分，所剩部分构成的形状被认为是结构优化的结果。非设计空间即不希望优化软件进行材料去除的区域，一般为边界条件加载位置及与其他部件的连接位置，本项目中直接将油缸支座的加载孔位置和周围的约束位置分离出来作为非设计空间。

接下来通过之前的静强度分析结果及油缸支座的成型、安装方式等因素来调整设计空间：分析结果显示支撑油缸竖板根部应力较大，但由于竖板受安装限制不能改动过大，因此将筋板与弯板连接处填实来寻找最佳的材料分布；为了寻找筋板的最佳布局将筋板拉伸到两端。并将上述部分设为设计空间，如图 5 所示，红色为设计空间。

(2) 定义边界条件及形状控制。

载荷和约束与之前进行静强度分析时的相同，由于采用同一个软件，边界条件直接继承了之前的分析，这里并不



图 5 设计空间及非设计空间

需要重新定义。由于采用铸钢结构，为方便铸造工作中拔模，形状控制设置双向拔模。

(3) 拓扑优化。

点击优化，设置优化目标为刚度最大，质量目标为设计空间的 30%，之后运行优化。优化完成的结果如图 6 所示。从优化结果可以看出，竖板和弯板连接位置材料布置对结构受力贡献很大，而筋板在两侧布置效果最好。

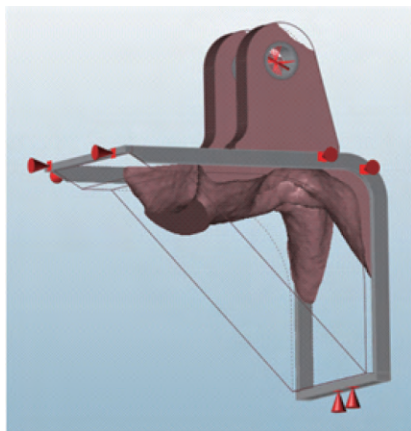


图 6 优化结果

4. 模型再设计

根据前面的优化结果，在 CAD 软件中重新设计了新的油缸支座，主要改动包括：改小了弯板的厚度，在竖板和弯板连接处增加了材料；筋板调整到两侧。改进后的模型如图 7 所示，新结构重 29.62kg。

5. 结果评价

为了验证新结构是否优于老结构，再次将新结构导入 Solidthinking-Inspire 中，如前文所述再次进行静强度计

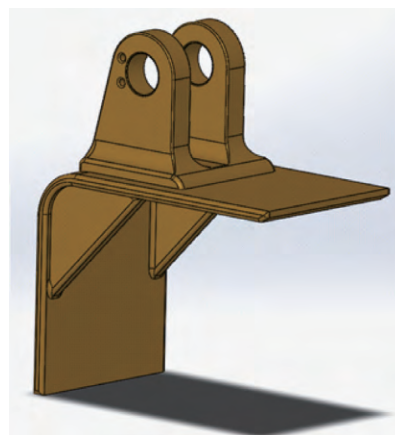


图 7 新设计的油缸支座

算，计算结果如图 8 所示，新结构最大应力仅为 92MPa

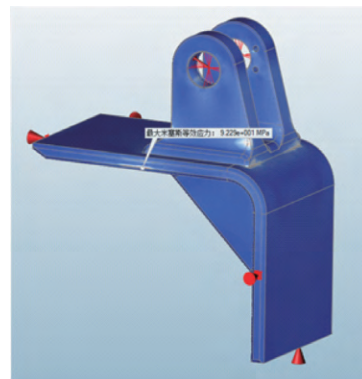


图 8 新油缸支座应力云图

四、结语

通过运用 Solidthinking-Inspire 软件对油缸支座进行了优化及改进设计，模型的分析、简化和优化整个过程均在 Solidthinking-Inspire 软件中完成，避免了软件的切换，大大提高了设计效率，另一方面新结构相比老结构得到了很大的优化，重量减少了 2.73kg，同时应力减少了 113MPa。IM

基于 HyperStudy 的航天器结构多目标优化设计

撰文 / 中国航天员科研训练中心 刘磊 马爱军 刘洪英 石蒙

对于正在研制的载人航天某装置，设计过程中存在最小化质量、最大化一阶整体振动频率的多目标优化问题，文中基于 HyperStudy 平台，利用多目标遗传算法对其求解得到多目标的 Pareto 最优解集，并与加权目标法得到的优化解进行对比，最终确定了最优结构。优化后结构设计域质量降低 11.7%，一阶整体振动频率提高 2.7%，优化效果明显。

一、引言

航天器在发射过程中要经历复杂的动力学环境，因而在航天产品结构设计中振动是考虑的重要因素。而模态是结构振动形式的直接体现，在航天产品设计中，一般希望结构固有频率（特别是低阶频率）尽可能的大，以远离火箭发射过程中的振动频率，从而避免发生共振而造成结构损坏。另一方面，航天器发射过程中对装载的航天产品质量有着苛刻的要求，航天器质量每减少 1kg，发射成本可以节省一万美元，因此航天产品结构的减重设计越来越得到重视。

对于正在研制的载人航天某装置，设计阶段对其进行有限元建模，然后进行模态分析，得到其固有频率和固有振型，在研制阶段对其进行优化设计，以达到节省研制周期与成本的目的。该装置有两个优化目标，一个目标是结构一阶整体振动频率最大，另一个目标是结构整体质量最小。

对于结构的多目标优化问题，可以采用加权目标法求解，为每一个目标设定一个权重系数，将多目标问题转化为单目标问题。加权目标法的一个明显缺点是权重系数人为给定，经验依赖性强，而且给定不同的加权系数会得到不同的优化解。为了得到结构质量与一阶整体振动频率的关系曲线，本文选择在结构有限元模型基础上，利用多目标遗传算

法进行设计变量的优化迭代求解，可以得到两个优化目标的 Pareto 最优解集。同时利用加权目标法求解该多目标优化问题，并比较两种优化方法得到优化解的差异，最终确定最优结构。

本文中的优化设计基于 HyperStudy 多学科优化平台进行，HyperStudy 可以直接引用 HyperMesh 中的有限元模型，并利用 RADIOSS 求解器进行求解，同时内置多种优化算法，方便设计者从中进行选择。

二、结构的有限元建模与模态分析

正在研制的载人航天某装置是由外部框架结构和内部诸多单机组成，外部框架结构为薄壁梁组成，有限元建模采用面网格进行建模，薄壁梁的尺寸可以进行一定幅度的调整。而内部单机为非重点考察对象，同时结构也不宜进行调整，为了提高优化设计求解迭代效率，在单机质心处利用质量点单元模拟单机产品，并通过刚性单元与单机的框架安装点进行连接。框架之间通过螺栓或焊接进行连接，模型边界条件为结构通过底板一系列安装孔进行完全约束，最终结构有限元模型如图 1 所示。

对结构进行模态分析，得到结构的一阶整体振动频率

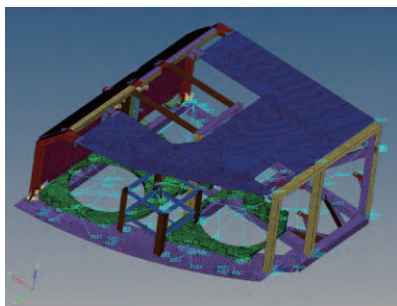


图1 载人航天某装置有限元模型
为48.7Hz，一阶整体振动振型如图2所示。

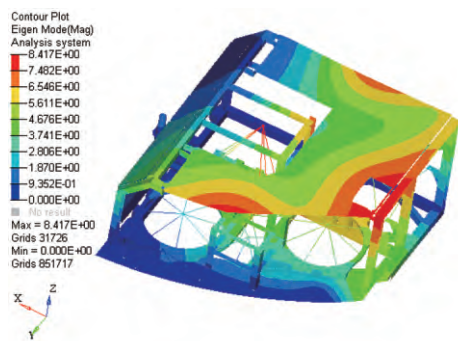


图2 载人航天某装置一阶整体振动振型

三、基于多目标遗传算法的结构多目标优化

1. 优化问题描述

结构的内部单机及框架整体拓扑构造都不能进行调整，因而优化设计变量选定为结构的外部框架部分薄壁梁尺寸，优化设计变量共10个。优化的目标有两个分别为一阶整体振动频率最大（用Freq表示），结构设计域质量最小（用Mass表示）。此时优化问题的数学模型可以表示为式（1），结构的尺寸设计变量初始值、上下限如表1所示。

$$\begin{cases} \text{find } \{x_i\} \\ \text{Min } (\text{Mass}) \\ \text{Max } (\text{Freq}) \\ \text{s.t. } x_i^{\min} \leq x_i \leq x_i^{\max} \\ i=1,2,\dots,10 \end{cases} \quad (1)$$

表1 设计变量初始值、上下限

设计变量	dv1	dv2	dv3	dv4	dv5	dv6	dv7	dv8	dv9	dv10
初始值/mm	5.0	4.0	4.3	8.0	9.0	4.4	10.0	2.5	6.0	3.0
上限/mm	6.0	5.0	5.0	10.0	12.0	5.0	15.0	2.8	8.0	4.0
下限/mm	4.0	3.0	3.0	6.0	6.0	3.0	5.0	2.2	4.0	2.0

2. 多目标遗传算法优化的 Pareto 最优解集

此多目标优化问题基于 HyperStudy 平台进行，在有

限元模型基础上利用多目标遗传算法进行求解，设置最大迭代次数为100，其余参数取默认值，图3为多目标优化的 Pareto 最优解集。

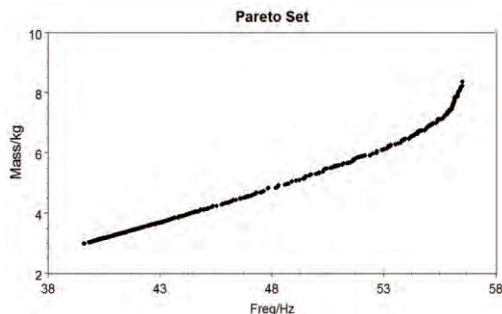


图3 多目标优化的 Pareto 最优解集

四、基于加权目标法的结构多目标优化

1. 加权目标法的优化数学模型

加权目标法的基本思想是：通过了解结构设计需求，来确定各个优化目标的权重，将每个设计目标函数乘以相应的加权系数并求和后，就可以将多目标优化设计问题转化为单目标优化设计的目标函数。

对于质量、频率两种不同的目标，可通过将其与初值之比作为目标来实现单位的规划统一，同时用最小化频率的倒数作为优化目标来代替最大化频率。此时，加权目标法的优化数学模型可以表示为式（2）。

$$\begin{cases} \text{find } \{x_i\} \\ \text{Min } G(x) = a \cdot \frac{\text{Freq}_0}{\text{Freq}} + b \cdot \frac{\text{Mass}}{\text{Mass}_0} \\ \text{s.t. } x_i^{\min} \leq x_i \leq x_i^{\max} \\ i=1,2,\dots,10 \end{cases} \quad (2)$$

其中 Freq_0 为结构初始一阶整体振动频率， Mass_0 为结构初始质量。而 a 和 b 分别是权重系数，其中 $a+b=1$ 。

2. 加权目标法的优化解

加权目标法同样基于 HyperStudy 平台进行，在有限元模型基础上对于加权后的目标函数选择利用序列二次规划法 (SQP) 进行优化迭代求解。

(a) 取权重系数为 $a=b=0.5$ ，此时加权目标为 $G1(x)$ 。经过15次迭代，结果收敛。此时优化后结构一阶整体振动频率为40.7Hz，设计域质量为3.52kg。

(b) 取权重系数 $a=0.75$ ， $b=0.25$ ，此时加权目标为 $G2(x)$ 。经过25次迭代，结果收敛。此时优化后结构一阶整体振动频率为53.7Hz，设计域质量为6.52kg。

(c) 取权重系数 $a=0.75$, $b=0.25$, 此时加权目标为 $G3(x)$ 。经过 10 次迭代, 结果收敛。此时优化后结构一阶整体振动频率为 41.1Hz, 设计域质量为 3.60kg。

加权目标 $G1(x)$, $G2(x)$, $G3(x)$ 的迭代曲线分别如图 4 (a)、4 (b)、4 (c) 所示。

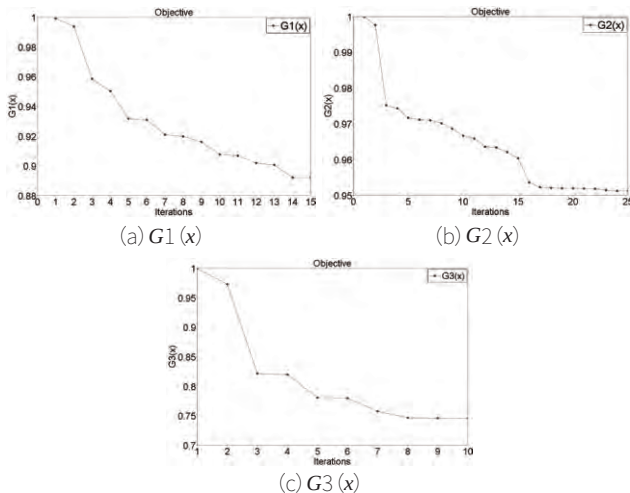


图 4 目标函数 $G(x)$ 迭代曲线

五、分析与讨论

为了更直观观察结构优化前后的两个目标变化情况, 将其表示成坐标形式 (Freq, Mass)。结构优化前一阶整体振动频率为 48.7Hz, 优化前设计域质量为 6.00kg, 则其坐标为 A (48.7, 6.00)。由加权目标法得到的三个优化解坐标分别表示为 $G1(40.7, 3.52)$, $G2(53.7, 6.52)$, $G3(41.1, 3.60)$ 。将各个坐标分别多目标优化的 Pareto 最优解集中表示, 以便于最优结构的确定, 如图 5 所示。

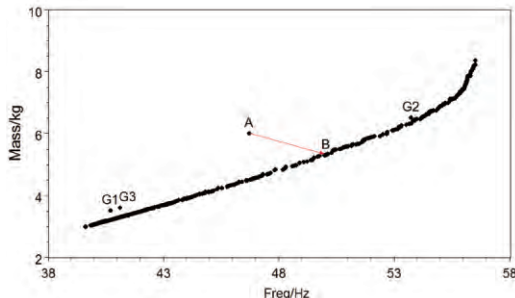


图 5 最优结构的确定示意图

案例表明利用加权目标法求解时, 赋予不同的权重因子, 会得到不同的优化解。从图 5 中还可以看出, $G1$ 、 $G2$ 、 $G3$ 三个坐标点均在 Pareto 最优解集的左上方, 表明利

用多目标遗传算法求解得到的 Pareto 最优解集相比于加权目标法得到的优化解更优。其中 $G1$ 、 $G3$ 点相比于优化前的结构在质量降低的同时, 一阶整体振动频率也大幅度的降低, 而 $G2$ 点恰恰相反, 虽然一阶整体振动频率有了一定幅度的提高, 但质量却有所增加, 因此都不是满意方案。

综上所述, 最优解需在 Pareto 最优解集中进行选择, 最终选定为图 5 的 B 点, 此时结构一阶整体振动频率为 50Hz, 相比于优化前的 48.7Hz 提升 2.7%; 设计域质量为 5.30kg, 相比于优化前的 6.00kg 降低 11.7%, 优化效果较好。B 点对应的优化后结构尺寸如表 2 所示。

表 2 设计变量优化解

设计变量	dv1	dv2	dv3	dv4	dv5	dv6	dv7	dv8	dv9	dv10
初始值/mm	5.0	4.0	4.3	8.0	9.0	4.4	10.0	2.5	6.0	3.0
优化解/mm	5.4	3.0	3.1	6.3	6.3	3.7	5.2	2.2	4.0	3.0

六、结语

本文基于 HyperStudy 平台, 对正在研制的载人航天某装置进行多目标优化设计, 利用多目标遗传算法求解得到设计域质量和一阶整体振动频率的 Pareto 最优解集, 并与加权目标法得到的最优解进行对比, 结果表明多目标遗传算法在求解结构多目标优化问题上具有一定的优势。最终确定了最优结构, 与最初结构相比, 两个优化目标均有了明显的改善, 取得了很好的优化效果, 节省了产品的研制周期与成本, 可以为类似航天产品的优化设计提供一定的参考。IM