

在链轮及齿轮的机械工程图样中，国家标准中有许多表达上的人为规定。基于AIP2011，用户在实际设计中只需根据不同工况改变链轮参数、三维模型、有限元分析结果和工程图就可以自动根据链轮的参数变化进行调整，达到快速设计、分析及生成加工图纸的目的。这样，从设计的角度上可以极大地提高研发部门的工作效率。

Inventor在船舶运动部件设计分析中的实际应用

中船重工集团公司第七二二研究所
陈振生 林志军 赵立志 谢宏晓

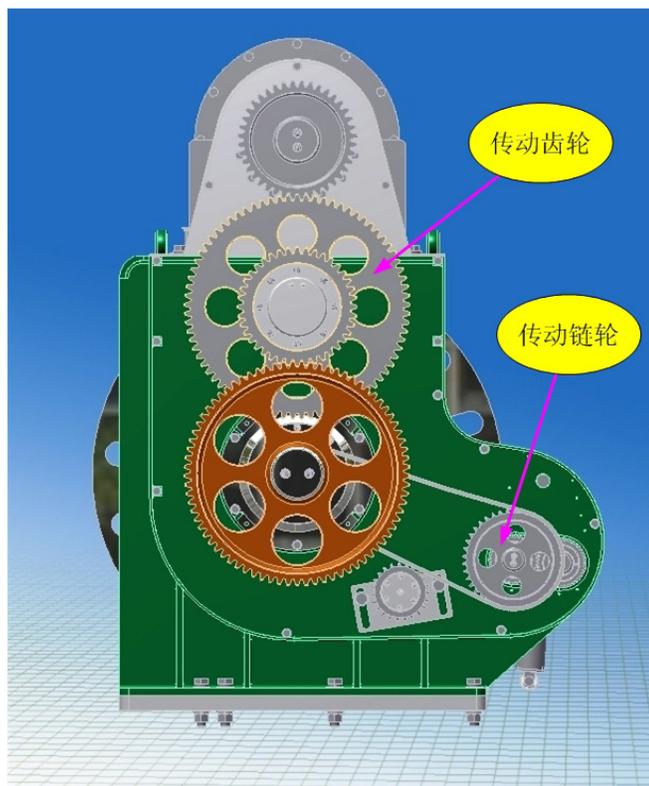


图1 牵引装置传动箱模型图

项目背景

目前，我国船舶制造业的结构设计正随着制造业信息化和智能化的发展方向，朝着利用计算机进行辅助设计、辅助分析的方向发展。三维设计因其能直接表达设计者的意图，缩短设计环节，提高设计效率，在产品设计制造中发挥着越来越重要的作用。

在船舶舷外机械装置相关结构中，对机械零件材料的性能要求相对都比较高，既要求结构强度高，又要求耐海水腐蚀，更要求重量轻。一般情况下的设计流程是：预选一种高强度、耐海水腐蚀的不锈钢材料，在相关三维CAD中建立相关模型，然后在CAE软件中进行各种分析，再根据分析结果反馈到三维CAD中，进行相应的调整，最后出二维工程图下车间进行加工制造。二维工程图目前在大部分船舶结构制造业中是不可避免的。在船舶传动部件设计中，齿轮传动和链传动是应用相对比较广泛的两种传动形式，而滚子链链轮是船舶运动部件链传动中常用的零件之一。

如图1所示，就是船舶结构中一种牵引装置传动结构的模型示意图，传动系统由两级齿轮传动和一级链传动组成。传动系统由液压马达提供动力，通过各级齿轮及链轮带动各传动轴完成设计功能。在机械工程图样国家标准中有许多表达上的人为规定。

Autodesk Inventor Professional主要包括5个基本模块：零件造型、钣金、装配、表达视图、工程图。AIP除提供上述模块外，还将应力分析和运动仿真这种CAE功能同时集成AIP中。这样，AIP就使用户能在同一环境下进行参数化建模，并利用模型进行有限元分析，对设计结果作出评估和修改，从而驱动设计，然后利用其工程图完成最终图纸设计的过程。这样可以显著加快设计进度，缩短设计周期。

基于Inventor的链轮参数化设计与建模

1.链轮的齿槽形状

滚子链与链轮的啮合属于非共轭啮合，其链轮齿

形的设计有较大的灵活性。在GB/T1243-1997中，规定了最大和最小的齿槽形状，而实际的齿槽形状取决于刀具和加工方法，并需处于最小和最大齿侧圆弧半径之间。目前比较通用的三圆弧-直线齿形符合上述规定的齿槽形状范围。本项目就以该种齿形为例，来介绍链轮的建模过程。

2. 链轮模型的参数化设计

(1) 添加设计参数

启动Inventor，进入零件设计环境，利用“fx参数”命令设置链轮建模所需要的主要参数，在设置过程中，可以将参数名字修改成机械设计中常用的名字，也可以在注释栏中以文字的形式加以注明，具体设置如图2所示。以后只用于此参数表中改变相关参数，即可得到所需模型，用于后续的设计分析。

(2) 链轮毛坯生成

退出参数设置环境，创建草图，利用刚才设置的参数对基本毛坯轮廓标注相关尺寸，如图3所示，然后利用旋转命令生成链轮毛坯。

用户参数	id	21 id	21.0000	21.0000	设计输入条件
链轮齿	mm	15.8750	15.8750	15.8750	设计输入条件
链子直径	mm	10.16	10.1600	10.1600	设计输入条件
链条节距内宽	mm	8.4	8.4000	8.4000	设计输入条件
链齿厚度	mm	32	32.0000	32.0000	设计输入条件
齿顶圆直径	mm	20	20.0000	20.0000	链齿长度
齿底圆直径	mm	链节距 * sin(180 deg / 齿数)	100.875	100.875	
链宽	mm	10	10.0000	10.0000	链节轴径确定
链槽宽	mm	3.3	3.3000	3.3000	
链槽直径	mm	tan(180 deg / 2) * (8.4 mm + 0.24 * d + 0.01 ul) * 分度圆直径 / (1 / 1 mm) * 1 mm	84.0000	84.0000	
齿顶圆半径	deg	55 deg - 40 deg / 齿数	52.1429	52.1429	
工作齿顶圆中心角	mm	1.3025 ul * 链节直径 * 0.05 mm	13.2048	13.2048	
工作齿底圆中心角	deg	18 deg - 55 deg / 齿数	16.3333	16.3333	
工作齿侧角	deg	17 deg - 44 deg / 齿数	13.8523	13.8523	
齿顶圆半径	mm	链子直径 * (1.3 ul * cos(齿顶圆半径) + 0.01 ul * cos(1 / 2 链节圆中心角) + 1.3025 ul) * 0.05 mm	7.3739	7.3739	
工作齿顶圆厚度	mm	链子直径 * (1.3 ul * sin(齿顶圆半径) + 0.01 ul * sin(1 / 2 链节圆中心角))	1.0353	1.0353	
齿底圆半径	mm	0.0025 ul * 链子直径 * 0.05 mm	5.1544	5.1544	
链槽厚度	mm	2.0000	2.0000	2.0000	
齿顶圆到链槽底	mm	分度圆直径 - 链子直径	116.675	116.675	链节轴径选择
齿底圆到链槽底	mm	分度圆直径 * cos(55 deg / 齿数) - 链子直径	118.375	118.375	
链节厚度	mm	链子直径	10.1600	10.1600	
齿顶圆厚度	mm	分度圆直径 - 链子直径	85.3548	85.3548	

图2 设置fx参数表

(3) 链轮基本模型生成

生成基本毛坯之后，创建草图，根据三圆弧-直线齿形，利用在参数表中预先设置的参数，同理创建链轮的基本齿槽轮廓草图，如图4所示。退出基本齿槽轮廓草图创建，利用“拉伸”命令，选择“切除”选项，生成第一个齿槽特征。如图5所示。利用“环形阵列”命令沿链轮中心轴周阵列生成剩余的齿槽，个数为预先设置的齿数。结果如图6所示。

(4) 添加修饰特征

最后，可以根据实际工况，添加其它特征，比如键槽、倒角和圆角等等，结果如图7所示。第一步确定的设计输入条件参数就是设计者可以按照实

际需求进行修改的参数。比如可以改变齿数、链节距、链条内节内宽和轴径，点击更新，即可得到相应的模型。如图8所示。在这个过程中，模型受到参数表中参数的完全控制，这样在实际工作中，类似的链轮就没有必要进行重复的创建，设计者只需要对通用模型进行参数变更，就可以得到想要的设计模型。

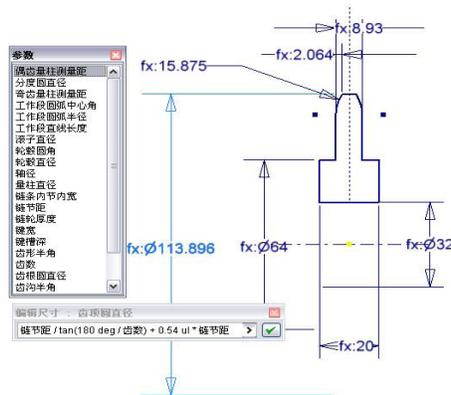


图3 基本毛坯轮廓草图

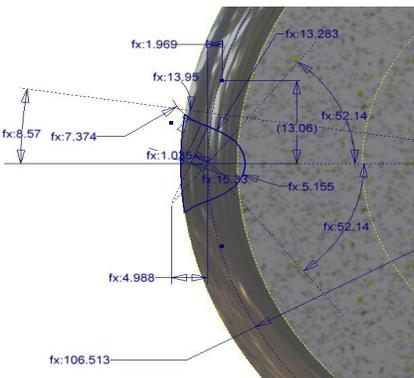


图4 基本齿槽草图

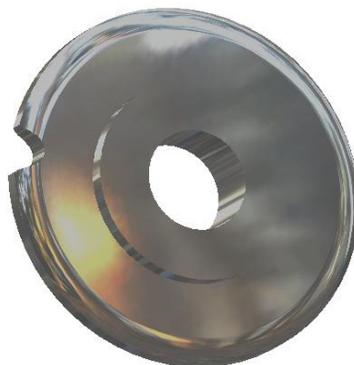


图5 第一个齿槽特征



图6 链轮基本模型



图7 最终模型



图8 变更设计参数后模型

基于Inventor的链轮有限元分析

按照三圆弧-直线齿形生成链轮模型后，我们可以利用AIP2011提供的有限元分析模块对链轮进行有限元分析。AIP2011中的有限元分析模块是Inventor的附加模块，在附加模块管理器中可以设

置AIP2011启动时是否加载，若选择加载，软件启动后，当打开一个链轮模型时，就可以从主菜单的“环境”选项卡中点击应力分析进入有限元分析环境，软件自动弹出“应力分析”工具面板和应力分析浏览器，如图9所示。在这里模块提供了进行分析的前处理、求解及后处理的各种工具。

在AIP2011中进行应力分析的过程与在专业有限元分析软件基本类似，不同的是将分析与设计集成为一个界面环境中，这样就可以根据有限元分析的结果直接调整CAD模型相关参数，再次投入分析，避免了设计软件和分析软件两套参数系统中数据传递过程中出现的各种问题，大大提高了设计及分析效率。在AIP2011中进行有限元应力分析的常规分析步骤如下：

- 1) 利用特征控制工具对模型进行处理，抑制次要特征（仅在应力分析中），这些特征对零件来说可能是重要的，但对整体的应力分析的影响是不显著的，因此，在应力分析时，可以不予考虑。有时网格划分失败的主要原因就在于这些次要特征上。
- 2) 定义待分析零部件的材料，可以使用软件提供的各种常用材料，也可利用零部件建模时通过材料管理器输入的自定义材料。
- 3) 定义待分析零部件的约束；
- 4) 定义待分析零部件的载荷；
- 5) 定义待分析零部件各零件间的接触；
- 6) 网格划分：设置相关网格控制参数后点击工具面板上的“查看网格”命令进行网格划分；
- 7) 分析求解：网格划分完成后，点击工具面板上的“分析”命令进行分析求解；
- 8) 结果判读：求解完成后，浏览器的“结果”文件夹中会列出相关结果，其中包括等效应力、第一、三主应力、各方向位移（变形）及安全系数等，如图10所示。工程师对分析结果不满意可调整相关参数更新模型后再次投入分析，直至得到满意结果。

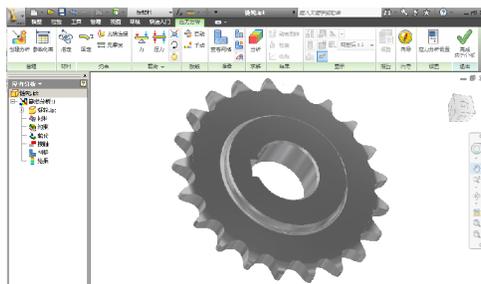


图9 AIP2011应力分析工具面板和浏览器

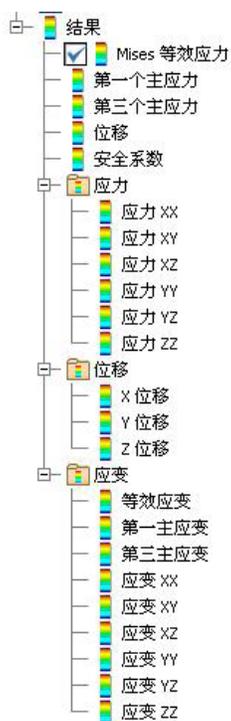


图10 AIP2011应力分析结果项

1. 链轮材料的选择与定义

根据工作环境的不同，链轮可以选择不同材料制作。常规使用环境下可以采用45钢，齿面进行热处理硬度至45~50HRC。在海洋环境下，通常选用耐海水腐蚀的不锈钢材料制作，比如1Cr18Ni9Ti，经过固溶920℃~1150℃快冷处理后，其相关性能指标为： $\sigma_0.2 \geq 205\text{MPa}$ ， $\sigma_b \geq 520\text{MPa}$ ，硬度HRB ≥ 90 ，密度8.03g/cm³，泊松比为0.3，杨氏模量为190GPa。

在AIP2011中，可以利用管理选项卡中的样式编辑器可以自定义上述材料样式，输入材料相关参数，备后续在应力分析时直接指定相关材料。AIP2011中自定义材料样式界面如图11所示，指定材料界面如图12所示。



图11 AIP2011自定义材料样式



图12 链轮有限元分析指定材料

2. 链轮有限元分析

(1) 链轮有限元分析前的准备及调整

为减小分析规模，在有限元分析时常常对模型上一些不影响分析结果的细节进行简化。利用AIP2011提供的特征控制工具抑制次要微小特征（仅在应力分析中），比如连接螺钉螺纹孔、倒角等，这些特征对于模型的有限元分析的结果来讲影响不大，但会大大增加网格数量，造成有限元分析求解时间的增加，甚至造成网格划分失败。链轮有限元分析也可以将一些微小特征简化，投入分析的链轮有限元几何模型如图13所示。



图13 链轮有限元几何模型

(2)链轮约束及载荷的施加

链轮的载荷根据具体工况尽量贴近实际进行施加，施加结果如图14所示。

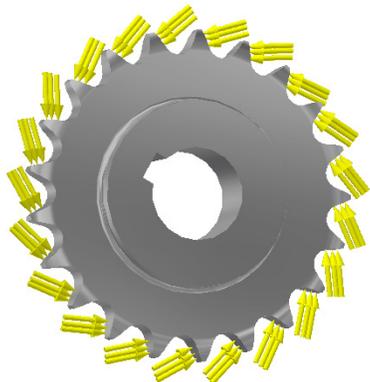


图14 链轮约束及载荷施加

(3)链轮有限元分析的设置

在AIP2011中，有限元分析的应力分析设置包括网格设置和分析特性设置。AIP2011中有限元模块网格单元采用典型的四面体单元，右键单击浏览器中分析可弹出“编辑分析特性”和“网格设置”选型，可单击选择后依次设置相关内容。网格设置可根据链轮的结构特点，把“创建弯曲网格元素”勾选，其它采用系统默认值即可。在分析特性设置对话框中，可根据所分析零件的受力载荷及约束特点，将“检测并消除刚体模态”勾选，这样在外部水压作用下，各零件的变形及应力接近实际情况，指导后续的优化。设置界面如图15~16所示。



图15 AIP2011有限元分析网格设置



图16 AIP2011有限元分析特性设置

(4)进行链轮有限元分析

上述设置完成后，可以进一步查看网格，窗口会显示有限元模型网格划分的结果，左上角会出现节点数和元素数；如果对局部网格划分不满意，可以对局部进行手动局部网格控制，控制元素的大小。网格划分用户觉得满意后，在工具面板上点击“求解”选项卡上的“分析”按钮，AIP2011会弹出“分析”对话框，点击“运行”，软件会按照自动进行有限元分析。图17为链轮的网格划分结果及分析对话框。

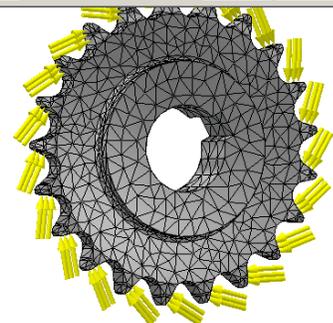


图17 链轮网格划分结果及分析对话框

(5)链轮有限元分析结果

链轮制作采用的不锈钢材料均属于典型的塑性材料，而第四强度理论中所表述的等效应力的大小对塑性材料的构件的强度评估有直观的指标性意义，更符合试验结果。等效应力，通常又称为von Mises应力，是Richard von Mises提出的用于最大畸变能屈服准则的变量。它可用3个主应力用如下公式表示：

$$\sigma_e = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]}$$

在上式中， σ_1 、 σ_2 、 σ_3 是模型中某点的3个主应力； σ_e 是等效应力，它是一个标量。对于塑性材料，模型上任意一点的等效应力均应小于材料的屈服强度 S_y ，否则，零件将发生屈服，导致零件失效。这一条件可以表述为：

$$\sigma_e \leq S_y$$

经过划分网格并运行分析，可以得到链轮的有限元分析结果云图如图18~20所示。

节点:17284
元素:10684
类型: Mises 等效应力
单位: MPa
2012-04-07, 10:08:40
112.1 最大值

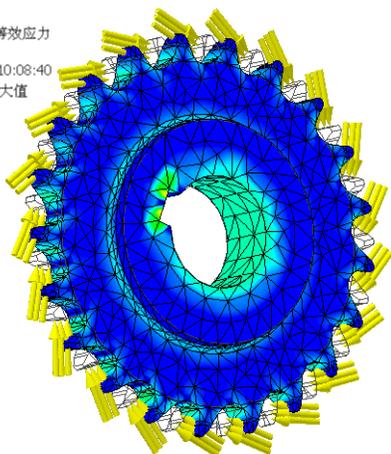


图18 链轮等效应力结果云图

节点:17284
元素:10684
类型: 位移
单位: mm
2012-04-07, 10:10:26
0.01778 最大值

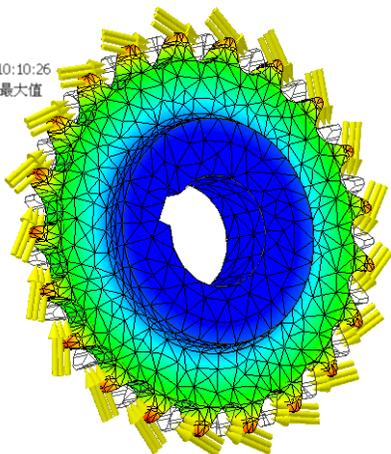


图19 链轮变形结果云图

节点:17284
元素:10684
类型: 安全系数
单位: 1
2012-04-07, 10:11:21
15 最大值

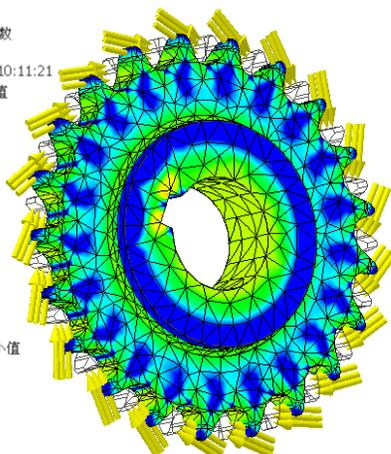


图20 链轮安全系数结果云图

从链轮有限元分析的结果可以找出链轮结构设计的薄弱环节, 在链轮设计参数表中调整相关参数, 重新生成模型, 进行分析, 得到设计满意结果后就可以进行后续二维工程图的处理。

4 基于Inventor的链轮工程图处理

二维工程图处理是今后相当长时间内整个三维CAD实施过程中不可缺少的设计结果处理环节, 同时也是耗时较长、讲究较多, 最不容易由软件自动做好的。链轮的工程图中更是包含了许多与三维模型真实投影结果不完全相同的机械工程图表达的人为规定。下面简单介绍一下链轮工程图模板的制作过程。

首先, 根据各个企业的具体情况, 生成符合企业规定的通用工程图模板, 里面包括标准的图框和标题栏。在标题栏和图框中利用工程图与三维模型的关联特性引用链轮三维模型中的相关物理信息, 比如材料、名称、零件代号等, 如图21所示。这样当三维模型的相关信息调整后, 利用此模板创建的工程图中的相应信息也会自动调整。

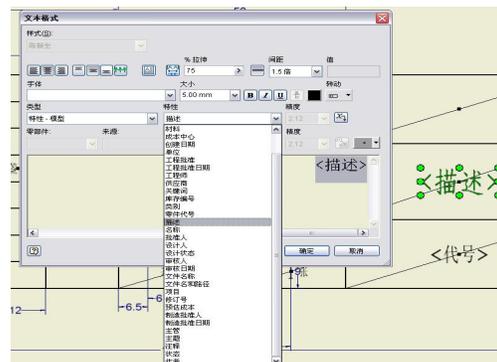


图21 标题栏引用相应的模型特性

其次, 在链轮工程图中, 其右上角按照国标要求通常会有一个附加的表格, 里面含有节距、滚子直径、齿数、量柱测量距、量柱直径和齿形等加工信息, 这个表格也可以利用制作标题栏相同的技术来制作, 在表格中相应内容栏里面引用三维模型中的相关建模信息。这里需要说明的一点就是在Inventor中可以将fx参数表中的相应参数设置成“输出”, (参见图2参数表中后面打勾的选项), 这样在链轮三维模型的iProperties中的自定义中就会出现设置成“输出”的参数的名称和其相应的值, 如图22所示。由于在工程图中可以引用三维模型中的自定义特性, 这样制作这个附加表格时就可以间接引用三维模型建模过程中的参数, 当设计参数改变时, 附加表格的内容也会随着改变。如图23所示。



图22 添加到自定义特性中的相关设计参数

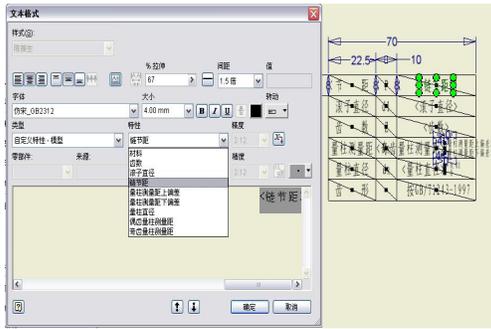


图23 附加表格中引用模型的自定义特性

最后，使用上述制作的工程图图框及标题栏来制作链轮工程图模版。新开一个工程图，选用大小合适的纸张，插入相应的通用图框，并在图框相应位置插入标题栏和附加表格，投影链轮工程图视图，按照国标要求修饰完善链轮工程图、标注尺寸，然后将其与三维模型一起保存到合适的位置，作为后续的模版使用。最终的链轮工程图模版如图24所示。使用时，将三维模型和工程图模版一起复制到用户的工作目录中，改变新目录下三维模型的设计参数，该目录下的三维模型和工程图都会随着设计参数的更改而自动调整。

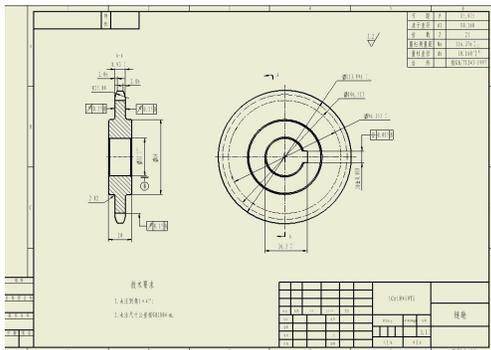


图24 最终的链轮工程图模版

结论

(1)从上述过程可以看到，通过基于Inventor的链轮三维参数化设计，设计者只需要在fx参数表中变更链轮的设计输入基本参数，即可自动生成所需要的三维实体模型。

(2)由于该模型是严格按照三圆弧-直线齿槽形状建立的，所以设定相应的材料以后，就可以在后续的有限元分析中，比较准确地反映在外载荷作用下的应力及变形情况，然后根据分析结果对链轮模型相关参数进行调整，对链轮的相关结构进行优化设计，把昂贵的材料用于应该加强的地方，这样就有效避免了原来“傻大粗”的设计，减轻了链轮的重量，对零件的优化设计可以有效地指导。

(3)完成所设计链轮的有限元分析，确定其最终设计方案以后，基于全参数相关的工程图也同时会跟随做相应改变，这样就完成了一个链轮的完整设计流程，大大提高了整个设计过程的效率。当链轮的材料、约束和载荷施加尽量与链轮的实际工况接近时，有限元分析的结果就具有了较大的参考价值。

项目评价

在本人工作的船舶通信研究所里面，许多机械装置都是单件小批量生产，但它们之间还是有很多类似的地方，本文提供的定制方法可以有效地减少设计师的低水平重复劳动，减轻他们的负担，近似的零件可以不用重新建模，直接复制一份后更改模型相关尺寸，经过有限元分析后确定最终的尺寸，原工程图经过简单的调整，就可以得到满意的加工图纸，这样就大大提高了设计师的工作效率。这种办法也可以广泛使用于船舶其它机

械零件的建模过程及工程图处理中，比如各种齿轮、蜗轮等，来达到提高设计效率的目的；在许多企业中，还有许多企业用通用件，拓扑结构一致，不同规格仅仅相关尺寸调整即可，一般也可以采用此种办法，生成通用工程图，当需要调整时，只需更改模型的相关尺寸，二维工程图会自动随之更新。

欧特克软件(中国)有限公司
100004
北京市建国门外大街1号
国贸大厦2座2911-2918室
Tel: 86-10-6505 6848
Fax: 86-10-6505 6865

欧特克软件(中国)有限公司
上海分公司
200122
上海市浦东新区浦电路399号
Tel: 86-21-3865 3333
Fax: 86-21-6876 7363

欧特克软件(中国)有限公司
广州分公司
510613
广州市天河区天河北路233号
中信广场办公楼7403室
Tel: 86-20-8393 6609
Fax: 86-20-3877 3200

欧特克软件(中国)有限公司
成都分公司
610021
成都市滨江东路9号
香格里拉中心办公楼1507-1508室
Tel: 86-28-8445 9800
Fax: 86-28-8620 3370

欧特克软件(中国)有限公司
武汉分公司
430015
武汉市汉口建设大道700号
武汉香格里拉大饭店439室
电话: 86-27-8732 2577
传真: 86-27-8732 2891

购买咨询: 400-080-9010

图片由长春轨道客车股份有限公司提供。

Autodesk 和 Inventor 是 Autodesk, Inc. 在美国和其他国家的注册商标。所有其他品牌名称、产品名称或商标分别属于各自所有者。Autodesk 保留在不事先通知的情况下随时变更产品和服务内容、说明和价格的权利，同时对文档中出现的文字印刷或图形错误不承担任何责任。

© 2012 Autodesk, Inc. 保留所有权利。