

基于三级驱动模型的产品数字化设计策略与方法*

高飞 张元鸣 肖刚

(浙江工业大学计算机科学与技术学院, 杭州 310023)

摘要: 数字化设计是实施大批量定制的重要技术之一,建立设计模型是实现数字化设计自动求解的关键。通过深入分析产品设计知识,提出了基于需求参数→关键参数→结构参数三级驱动模型的数字化设计策略与方法。一级驱动以需求参数为输入,由方案设计系统推理及优化得出产品关键参数,二级驱动以关键参数为输入,驱动根据层次化策略建立的基于各种性能和结构推导的约束网络模型,得到各零部件的细化结构参数,三级驱动以细化结构参数为输入,驱动参数化的几何模型及远程的有限元分析模型,进行可视化几何与性能验证,同时基于 Web 技术实现了分布式数字化设计。以浙江省某起重机械厂的 QD 型桥式起重机数字化设计为例说明了上述策略和方法的有效性。

关键词: 数字化设计 三级驱动模型 约束网络 大批量定制

中图分类号: TP391.72 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)04-0239-07

Strategy and Method of Digital Design Based on Three-level-drive Model

Gao Fei Zhang Yuanming Xiao Gang

(College of Computer Science and Technology, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)

Abstract: Digital design is an important tactic for mass customization. It is a key technique to establish an effective design model. Through analyzing design knowledge, a method of digital design based on a three-level-drive model which included demand parameters, key parameters and structure parameters was proposed. Demand parameters were the input of first-level drive, where product key parameters were obtained through product scheme design system and optimization model. Key parameters were the input of second-level drive, where a hierarchical strategy was advised to establish constraint network model, so that detail structure parameters of parts can be derived. Detail structure parameters were the input of third-level drive which could drive parametric geometry model and remote finite element analysis model to validate the design. Web-based technology was also employed to facilitate the distributed digital design. The whole strategy and method were put into practice in a crane factory, and proved to be applicable and effective.

Key words: Digital design Three-level-drive model Constraint network Mass customization

引言

当前,制造业进入了以全球化竞争加剧、客户需求变化频繁、市场多极化、先进制造与信息技术集成为特征的后工业时代^[1],由此给制造业带来了三大巨变:全球竞争、先进技术、管理实践^[2]。Hayes 等^[3]认为多极化的市场与尖锐的竞争要求提高设

计与制造的柔性,而数字化设计作为快速响应客户需求、缩短产品开发周期、降低成本的有效策略之一受到了国内外学者、企业的高度重视。

数字化设计是提高产品创新能力、缩短产品开发周期的重要理念,是建立基于计算机的数字化产品模型,并在产品开发全程采用,达到减少或避免使用实物模型的一种产品开发技术,它涵盖了现代

收稿日期:2012-03-25 修回日期:2012-07-15

*国家自然科学基金资助项目(50705087)、浙江省重大(优先主题)科技专项资助项目(2009C11164)和浙江省自然科学基金资助项目(Y105200)

作者简介:高飞,教授,博士,主要从事数字化设计、大批量定制和产品族设计研究,E-mail: gfei_jack@163.com

设计的最新技术,同时又是现代设计的前提^[4],国内外学者对其展开了大量的研究^[5-11]。

当前数字化设计系统强调几何设计,但对产品的功能选型以及设计模型的集成研究较少,同时各子系统之间的接口模糊,没有形成无缝集成与自动驱动。本文通过仔细分析产品设计的特点,提出基于需求参数→关键参数→结构参数三级驱动模型的产品数字化设计策略与方法。

1 数字化设计的三级驱动策略

在产品主要功能结构不变的情况下,数字化设计更关注产品技术方案的快速响应,由此设计出满足不同细分市场的产品。通过整理产品族公共的设计知识以及不同系列的差异化设计知识,可得到面向不同变体的设计知识模型,根据该模型可建立数字化设计的三级驱动策略:一级驱动以需求参数为输入,由方案设计系统推理计算得出产品性能参数(如起重机的大车电动机功率等),进一步可得到各外协件或标准件的选型参数,在此基础上,经过优化设计,得出其他重要自制零部件的主要结构参数(如起重机主梁横截面尺寸等),由这些性能参数和主要结构参数构成一级驱动结果,即产品关键参数,这些参数相对需求参数较细,但仍较粗略。二级驱动以关键参数为输入,驱动基于各种性能和结构约束推导的结构参数求解模型(包括接口约束关系、零部件内部的约束关系等),从而得到绘制零部件图所需的细化结构参数。三级驱动以细化结构参数为输入,驱动以几何模型为主的参数化模型以及参数化有限元分析模型,对整个设计结果进行可视化的几何与性能验证。利用上述由粗及细的三级细分策略,可建立需求参数→关键参数→结构参数三级驱动模型,如图1所示。

2 各级驱动关键技术

2.1 一级驱动

2.1.1 需求参数转换

一级驱动以需求参数为输入,通常情况下客户需求可以分为质变需求与量变需求两种类型。质变需求常指功能域范围的变化,通常表现为需求的使用场合、场景变化、产品某些子功能的有无、安全性、可操作性、方便性、非标准的功能要求等,这种需求相对模糊,通常由客户直接表述,表现为一些自然语言的定性描述;量变需求常指功能的强弱或大小变化,是一种功能谱上的变化,它影响着产品纵向系列的设计计算,常常需要产品生产企业的专业人员与客户进行多次沟通以共同确定。部分质变需求可通

过模块的选配实现,其余部分则需通过某种映射转换成量变需求,成为可直接驱动数字化设计的需求参数。

质变需求的转换通常分为两种情况:

(1) 通过设计手册的相关表格映射完成,如 QD 型桥式起重机的工作级别,它通常与制动安全系数相关,不同的工作级别对应不同的制动安全系数,后者与制动器的选型计算相关联,由此转换为量变需求。

(2) 由设计师根据经验利用质量功能配置(QFD)工具映射得到相应的模块并取其主要参数,如 QD 型起重机的可操作性根据经验或实际情况可映射成集中式的控制面板或驾驶室。

量变需求又分单一值和区间值,单一值是指需求可直接表示为某种单一的量化参数,如 QD 型起重机的跨度 22.5 m、额定起重量 75 t、起升高度 16 m 等,区间值分为两种情况,一种是需求在某个数值范围内取任意值即可,则该区间上下限仅仅构成一种约束,如 QD 型起重机端梁高度须在 426 ~ 430 mm,它构成一种取值约束;另一种情况是需求同样表达为某个数值范围内,但在设计时只要按最大值进行设计计算即可满足,如 QD 型起重机的主起升速度为 0.4 ~ 4.1 m/min,在设计时通常按 4.1 m/min 进行计算即可满足其要求。需求参数采集与表达如图 2 所示,首先通过收集客户需求并整理成设计表,然后将部分质变需求通过设计手册及质量功能配置进行映射转换,与量变需求共同构成需求参数。

2.1.2 设计知识模型建立

一级驱动核心是建立设计知识模型。首先,对产品族进行分析并寻求公共设计知识,将差异化设计知识整理成不同的计算模型,根据需求参数,基于公共设计模型自主选择差异设计模型,从而得到主要的性能参数,根据这些性能参数,可对外协件或标准件进行选型,如起重机中的电动机功率、钢丝绳的直径、减速器的传动比、制动器的制动扭矩等。在此基础上,通过优化得到主要自制零部件的主要结构参数,如 QD 型起重机主梁的截面尺寸。一级驱动过程如图 3 所示,其中 D_0 表示不同系数的公共设计知识模型, D_i ($i=1, 2, \dots, m$) 表示差异设计模型, m 表示产品族包含的系列数, R_i ($i=1, 2, \dots, m$) 表示不同类型的一级驱动结果,包括各种选型参数及主要零部件的主要结构参数,称为产品关键参数。

2.2 二级驱动

二级驱动以产品关键参数为输入,可能包括选型零部件的安装参数、自制零部件的主要结构参数等,通过结构参数约束网络得到各零部件的细化结

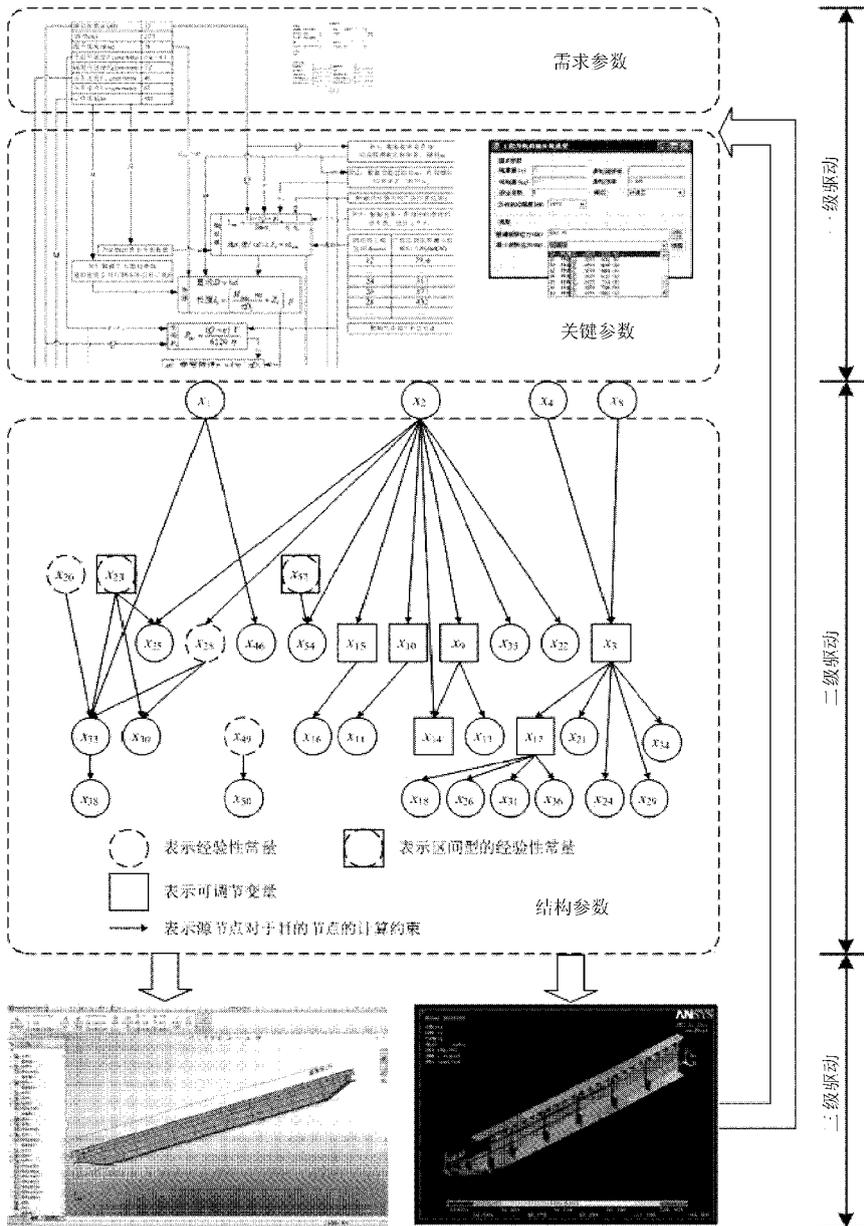


图 1 数字化设计的三级驱动模型

Fig. 1 Three-level-drive model of digital design

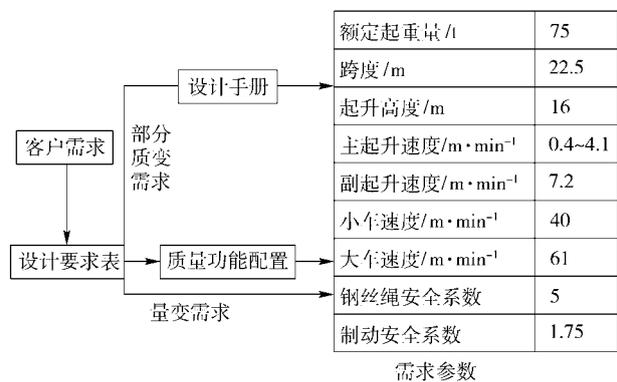


图 2 需求参数采集与表达

Fig. 2 Collection and presentation of requirements parameters

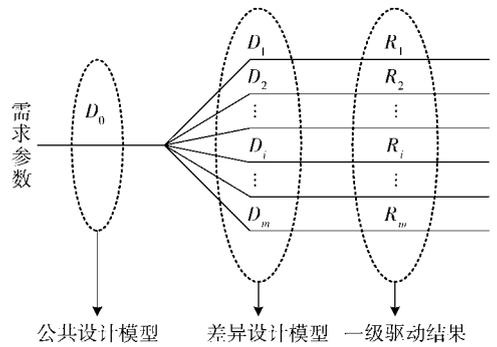


图 3 一级驱动过程原理图

Fig. 3 Schematic diagram of first-level drive

构参数,并以此作为三级驱动的输入参数。首先,需要建立各零部件的细化结构参数化哑图,并建立各

细化结构参数的各种约束,即 $f_i(\mathbf{X}) \geq 0$,其中 f_i 表示约束方程, $\mathbf{X} = \{x_i | i = 1, 2, \dots, n\}$ 表示参数集。为便于表达及自动求解,引入图论^[12]中的无向图对约

束网络进行建模。令无向约束网络为二元组,记为 $N = \langle V, E \rangle$, 其中 V 是非空有限集合, 它的元素构成参数节点集合, 即 $V = X = \{x_i \mid i = 1, 2, \dots, n\}$; E 是一个有限集合, 其元素表示 x_i 与 x_j 之间存在约束关系, 即 $E = \{ \langle x_i, x_j \rangle \mid i \in [1, n], j \in [1, n], k = 1, 2, \dots, m \}$, 它满足: $\exists \langle x_i, x_j \rangle \Leftrightarrow \exists f_k(\dots, x_i, x_j, \dots)$ 。由于 N 为无向图, 若 $\langle x_i, x_j \rangle \in E$, 则 $\langle x_j, x_i \rangle \in E$ 。与一级驱动模型的区别在于, 细化结构参数的计算顺序通常不固定, 因此, 求解无向约束网络 N 的关键是确定各参数节点之间的计算顺序, 并找出其中的关键节点。下面提出参数层次化策略将无向约束网络转换成有向约束网络 D 进行求解:

(1) 参数节点集 V 分为两个层次。第一层次参数的确定将优先于第二层次, 第二层次部分参数的计算求解依赖于第一层次。

(2) 第一层次通常包括驱动参数和常量参数, 驱动参数由一级驱动给出, 表现为选型零部件的安装参数、自制零部件的主要结构参数等, 常量参数通常表达为经验性的参数, 如倒角、起重机主梁肋板厚度等。

(3) 第二层次参数节点的优先级由其度数确定, 令 $d(x_i)$ 表示 x_i 的度数。节点度数越大说明越是关键节点, 需要优先确定; 度数小的节点受到度数较大相关节点的计算约束, 如, 若 $\langle x_i, x_j \rangle \in E$, 则说明 x_i 与 x_j 之间存在计算约束, 若 $d(x_i) > d(x_j)$, 则首先计算 x_i , 再通过计算约束得到 x_j ; 反之优先计算 x_j ; 若 $d(x_i) = d(x_j)$, 则由设计师根据经验确定其优先级。

(4) 为便于自动求解, 可利用上述层次化策略将无向图转换为单向有向图, 即第一层次的节点指向第二层次的节点, 同一层次的度数大的节点指向度数小的节点, 相同度数的关联节点优先级由设计师根据经验确定。根据这一策略, 可调整得到单向约束网络 D , 其参数节点集仍为 V , 其边集按如下形式化规则构造: 存在 $f_k(\dots, x_i, x_j, \dots)$, 若 x_i 为第一层次, x_j 为第二层次, 则 $\langle x_i, x_j \rangle \in E$; 若 x_i 与 x_j 同属第二层次且 $d(x_i) > d(x_j)$, 则 $\langle x_i, x_j \rangle \in E$; 若 x_i 与 x_j 同属第二层次且设计师认为 x_i 优先于 x_j , 则 $\langle x_i, x_j \rangle \in E$ 。根据单向图规则, 若 $\langle x_i, x_j \rangle \in E$ 则 $\langle x_j, x_i \rangle \notin E$ 。

(5) 显然, 在上述单向约束网络 D 中, 位于第一层次的部分节点将是孤立的, 即其度数为 0, 为了简化存储及计算, 这部分孤立的节点需从 D 中删除。

(6) 根据有向约束网络 D 可得其邻接矩阵 $A =$

$[a_{ij}]_{n_0 \times n_0}$, n_0 表示去除孤立节点之后的总数, 有 $n_0 \leq n$ 。其中

$$a_{ij} = \begin{cases} 1 & (\langle x_i, x_j \rangle \in E) \\ 0 & (\langle x_i, x_j \rangle \notin E) \end{cases} \quad (1)$$

在上述有向约束网络 D 中, 并非每个约束都是等式约束, 其中部分可为不等式约束或区间约束。如 QD 型起重机主梁第一道横向加强肋外伸宽度 x_{10} 与主梁高度 x_2 之间的约束关系为 $f_1(X) = x_{10} - 1.2(x_2/30 + 40) \geq 0$, 主梁空箱宽度 x_{17} 与主梁宽度 x_3 之间的约束关系为 $f_2(X) = x_{17} - [x_3 - (240 \sim 280)] = 0$, 前者为不等式约束, 后者为区间约束, 这两类均为当产品设计约束不能满足时的可调式约束。

根据有向约束网络 D , 可对零部件的细化结构参数进行求解, 具体算法如下:

(1) 以第一层次参数节点为索引, 如 x_i , 查找邻接矩阵 A , 根据 $a_{ij} = 1$ 找到与该节点相关联的所有节点 x_j 。

(2) 根据 a_{ij} 找到对应的约束方程, 若该方程需要其他参数, 则继续从邻接矩阵 A 或第一层次参数节点中查找。

(3) 求解约束方程。二级驱动的约束方程通常为线性方程, 因此一般情况下总是有解; 若无解, 只需改变可调节变量, 继续求解直至有解为止。

(4) 若存在下一个参数节点, 转步骤(1); 否则结束。

2.3 三级驱动

三级驱动以零部件的细化结构参数为输入进行几何与性能的可视化验证, 流程如图 4 所示。几何可视化验证充分利用现有参数化软件(如 SolidWorks 等), 首先从数据库中读取二级驱动的结果并保存为本地的 *.txt 接口文件, 另一方面, 根据设计任务读取数据库中的几何参数化模型并保存于本地接口目录中, 该参数化模型事先由设计师建立并保存于数据库, 根据产品族中不同系列不同功能与结构形式分别整理, 可采用产品重组技术对其接口与形式进行规范化处理^[13]。基于 Automation 技术启动参数化软件, 同时自动加载接口文件与参数化模型, 从而实现三维绘图。在此过程中, 若各零部件及装配模型出现几何干涉, 则自动反馈至上级驱动模型。

性能可视化验证主要通过远程调用 ANSYS 进行有限元分析。有限元分析所需要的变量为参数化所需参数的子集, 因此, 二级驱动输出仍可作为性能可视化验证的输入。远程有限元分析以基于 APDL 的 ANSYS 参数化形式进行, 首先建立主要零部件的

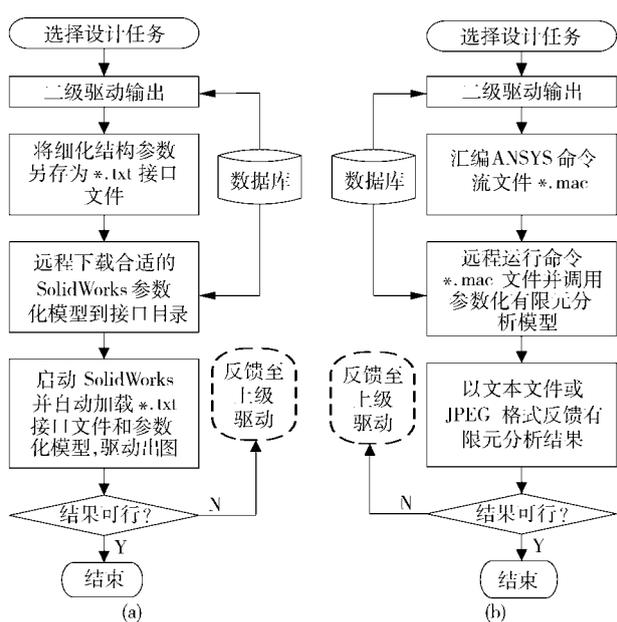


图 4 几何与性能可视化验证流程图

Fig. 4 Flowchart of visual verification of geometry and performance

(a) 几何验证 (b) 性能验证

ANSYS 有限元参数化模型,并以形如“ $a = 10; b = 20 \dots$ ”的文本文件为接口,在客户端汇编成 ANSYS 的 *.mac 文件,利用 Internet 网络提交至远程 ANSYS 执行并分析,其中零部件的参数化模型从数据库中获取,待远程 ANSYS 分析结束,结果以文本

文件或 JPEG 的图片形式在客户端呈现,包括应力云图等。

3 应用实例

以浙江省某企业的起重机为例说明上述基于三级驱动模型的数字化设计策略与方法应用。该企业目前生产的起重机包括 LDA 型单梁起重机、QD 型桥式起重机等 18 大类,其核心的抽象功能保持一致,即将物料从一个位置移到另一个位置,因此,可采用上述三级驱动策略进行总体设计。在起重机族中,公共设计知识包括小车起升机构(包括钢丝绳、卷筒、电动机、减速器、制动器等)、小车运行机构(电动机、减速器、制动器等)等^[14],这些零部件均为选型件,差异化设计核心模块为各种主梁。

某 QD 型桥式起重机订单原始需求之一工作级别为 M5,它通过质变需求的映射转换(设计手册查表映射)可转变为量变需求,即钢丝绳安全系数与制动安全系数分别为 5 和 1.75,同时与其他量变需求共同构成需求参数,如图 2 所示。将这些参数输入一级驱动人机界面,如图 5 所示,可得到设计结果,其中包括主梁横截面(图 6a 的参数化哑图)的优化模块,优化得到的结果(即主梁截面尺寸)构成二级驱动的部分输入。

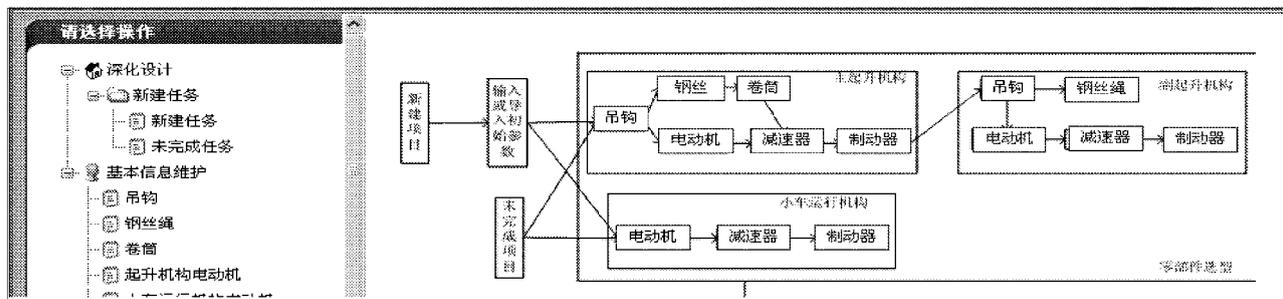


图 5 一级驱动人机界面

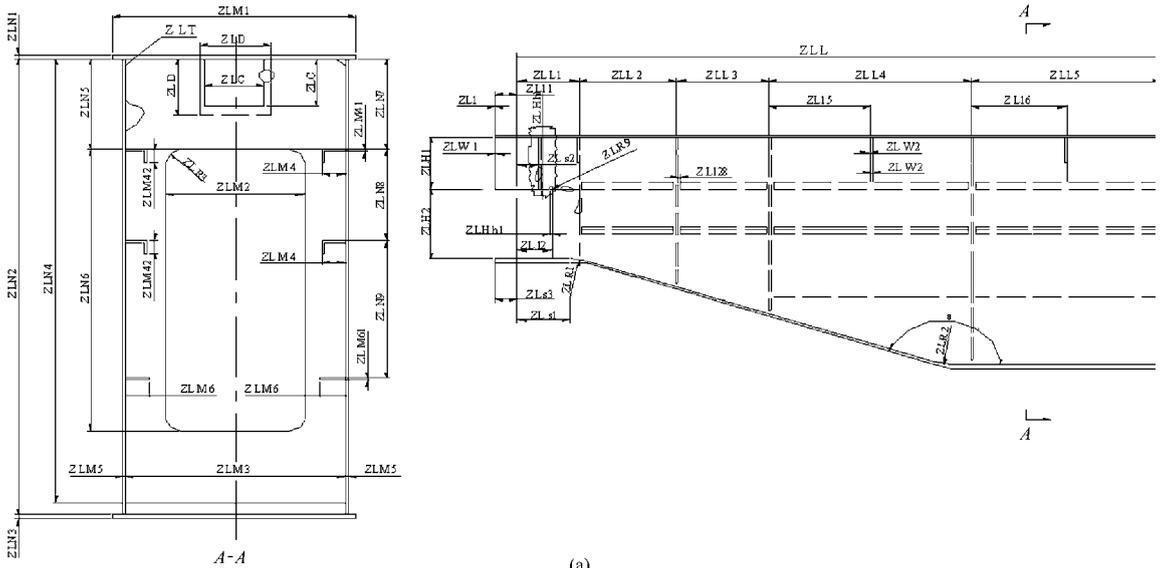
Fig. 5 Human-computer interface of first-level drive

二级驱动的关键是建立各零部件的约束网络。图 6 显示了该 QD 型桥式起重机主梁的细化结构参数无向约束网络图,利用二级驱动的参数层次化策略可将其简化并转化成有向约束网络图,如图 1 所示。其中,可调节变量被单独标出,利用其邻接矩阵可以在设计反馈时进行调节,由于为单向有向图,所以在调节时可将计算量控制在最小范围内,例如若主梁横截面宽度 x_3 发生变化,则只需重新计算 x_{17} 、 x_{18} 、 x_{21} 、 x_{24} 、 x_{26} 、 x_{29} 、 x_{31} 、 x_{34} 、 x_{36} 即可,在调整时,可以通过表 1 所示的映射找到相应的约束方程,若需更新 x_{17} ,在表 1 中找到关联参数对 $\langle x_{17}, x_3 \rangle$ 所在的

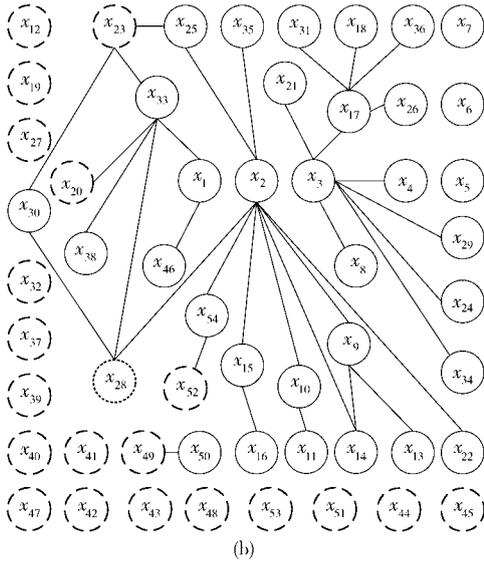
行,然后找到对应的 f_j 约束方程,即可求得 x_{17} ,其余类推。二级驱动的软件人机界面如图 7 所示。

三级驱动以二级驱动的输出为输入,在得到三维参数化图纸与有限元分析结果的同时,也对前述计算结果进行了可视化验证,包括几何与性能验证,图 1 的三级驱动部分为 QD 型桥式起重机主梁的可视化验证情况,从该示例来看,计算结果满足设计要求。

上述方法在浙江省某企业的起重机设计实践中得到了应用,其设计周期从原有的 30 ~ 45 d 缩短到 20 ~ 30 d,应用效果明显。



(a)



(b)

参数符号	变量名称	变量含义
x_1	ZLL	主梁跨度
x_2	ZLN2	主梁横截面高度
x_3	ZLM3	主梁横截面宽度
x_4	ZLM5	主梁横截面壁厚
x_5	ZLN1	主梁上下盖板厚度
x_6	ZLM1	主梁上盖板宽度
x_7	ZLN3	主梁下盖板厚度
x_8	ZLM1	主梁下盖板宽度
x_9	ZLN7	第一道横向加强肋位置
x_{10}	ZLM4	第一道横向加强肋外伸宽度
x_{11}	ZLM41	第一道横向加强肋厚度
\vdots	\vdots	\vdots
x_{51}	a	腹板倾斜角
x_{52}	ZLH2	端梁高度
x_{53}	ZLHh1	端梁圆角距离
x_{54}	ZLH1	主梁倾斜高度

(c)

图6 基于无向图的QD型桥式起重机主梁结构参数约束网络表达

Fig.6 Expression of parameter constraints network of QD crane girder based on non-directed graph

(a) QD型桥式起重机主梁参数化哑图 (b) 结构参数约束网络图(无向图) (c) 节点参数说明

表1 QD型桥式起重机主梁参数节点与约束方程映射表

Tab.1 Mapping of parameter node to constraint equation of QD crane girder

关联参数	约束方程	关联参数	约束方程
x_3, x_4, x_8	$f_1: x_3 - x_6 + 2x_4 + (48 \sim 54) = 0$	x_{25}, x_2, x_{23}	$f_{13}: x_{25} - 0.5x_2 - (260 + x_{23}) \tan 20^\circ + 50 = 0$
x_9, x_2	$f_2: x_9 - (1/4 \sim 1/5)x_2 = 0$	x_{26}, x_{17}	$f_{14}: x_{26} - x_{17} = 0$
x_{10}, x_2	$f_3: x_{10} - 1.2(x_2/30 + 40) \geq 0$	x_{29}, x_3	$f_{15}: x_{29} - x_3 = 0$
x_{11}, x_{10}	$f_4: x_{11} - 1/15x_{10} = 0$	$x_{30}, x_2, x_{23}, x_{28}$	$f_{16}: x_{30} - 0.5x_2 - (260 + x_{23} + x_{28}) \tan 20^\circ + 50 = 0$
x_{13}, x_9	$f_5: x_9 - x_{13} = 0$	x_{31}, x_{17}	$f_{17}: x_{31} - x_{17} = 0$
x_{14}, x_2, x_9	$f_6: x_{14} - (0.35 \sim 0.4)(x_2 - x_9) = 0$	$x_{33}, x_1, x_{20}, x_{23}, x_{28}$	$f_{18}: x_{33} - 0.5(x_1 - 140 - x_{20} - x_{23} - x_{28}) = 0$
x_{15}, x_2	$f_7: x_{15} - 1.2(x_2/30 + 40) - (5 \sim 10) = 0$	x_{34}, x_3	$f_{19}: x_{34} - x_3 = 0$
x_{16}, x_{15}	$f_8: x_{16} - 1/15x_{15} = 0$	x_{35}, x_2	$f_{20}: x_{35} - x_2 + 50 = 0$
x_{17}, x_3	$f_9: x_{17} - x_3 + (240 \sim 280) = 0$	x_{36}, x_{17}	$f_{21}: x_{36} - x_{17} = 0$
x_{18}, x_{17}	$f_{10}: x_{18} - x_{17} = 0$	x_{38}, x_{33}	$f_{22}: x_{38} - x_{33} = 0$
x_{21}, x_3	$f_{11}: x_{21} - x_3 = 0$	x_{50}, x_{49}	$f_{23}: x_{50} - x_{49} - 10 = 0$
x_{22}, x_2	$f_{12}: x_{22} - 0.5x_2 - 260 \tan 20^\circ + 50 = 0$	x_{54}, x_2, x_{52}	$f_{24}: x_{54} - 0.5x_2 + x_{52} = 0$

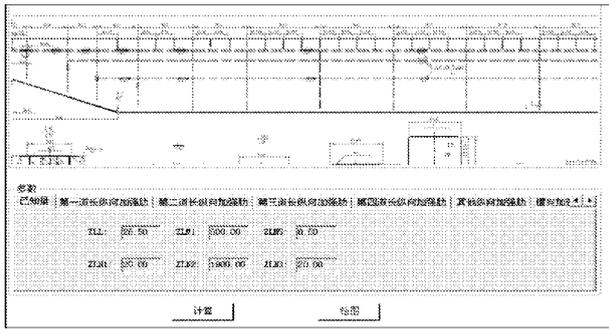


图7 二级驱动人机界面

Fig.7 Human-computer interface of second-level drive

4 讨论

在三级驱动模型中,为了实现自动求解,需要注意两种情况:第一,输入以需求参数为主,但还包括一些经验性的区间型参数,如 QD 型桥式起重机的起升机构采用闭式圆柱齿轮传动时其机构总效率 η 通常取 $0.8 \sim 0.85$ ^[14],这往往是设计反馈中可调节与修正的变量;第二,等式约束与不等式约束,当性能参数可通过等式约束确定而整个产品设计无解时,通常不作反馈式调整,而不等式约束的设计端形成离散值,这是反馈时重点可调整的变量,无解时往往需通过调整这些参数从而作进一步推理计算,例如某不等式约束中要求 $x_1 \leq g(x_2, x_3, \dots, x_m)$,则

往往 x_1 会取某一个集合中的一个值,即 $x_1 \in \{v_i | i = 1, 2, \dots, n\}$,则当 v_i 不能满足整个设计约束时,则需调整 x_1 的取值,例如取 v_{i+1} ,事实上,起重机电动机的选型设计即为此例。因此,在整个设计过程中通过调整这些区间型参数及不等式约束的设计端可实现自动求解。

5 结论

(1)整个数字化设计以三级驱动模型为基础,一级驱动重点在于产品技术方案的求解,它提供产品功能方案的选择及主要性能参数的选型,二级驱动重点在于产品细化结构参数的求解,它通过层次化策略建立细化结构参数的有向约束网络,从而实现自动求解,三级驱动对上述求解结果进行几何与性能的可视化验证。三级驱动模型中,上级为下级提供驱动参数,下级为上级提供反馈,这有利于实现数字化设计的自动求解。

(2)适用性的基本准则是核心抽象功能相似且产品功能结构变化较小,同时可参考的准则包括功能变化较少、客户需求分布相对集中但细分程度较高、产品族的横向功能模块变化较少甚至没有、各模块之间的接口比较固定与清晰、客户更关心整机的工作性能等。

参 考 文 献

- 1 Pine B J II. Mass customization: the new frontier in business competition[M]. Boston: Harvard Business School Press, 1993.
- 2 Da Silveira G, Borenstein D, Fogliato F S. Mass customization: literature review and research directions[J]. International Journal of Production Economics, 2001, 72(1): 1~13.
- 3 Hayes R H, Pisano G P. Manufacturing strategy: at the intersection of two paradigm shifts[J]. Production and Operations Management, 1996, 5(1): 25~41.
- 4 王玉新. 数字化设计[M]. 北京:机械工业出版社,2003.
- 5 潘为民,雷毅,闫光荣. 三维数字化设计软件二次开发平台技术的应用[J]. 计算机工程,2006,32(16):1~3, 8. Pan Weimin, Lei Yi, Yan Guangrong. Application of customized development platform of 3D digital design[J]. Computer Engineering, 2006,32(16):1~3, 8. (in Chinese)
- 6 刘子健,艾彦迪,王平,等. 耗散结构与时空信息差意义上的数字化设计系统特性评价[J]. 机械工程学报,2010,46(21): 137~142. Liu Zijian, Ai Yandi, Wang Ping, et al. Digital design system characteristic evaluation in the sense of dissipative structure and time-space information different[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010,46(21):137~142. (in Chinese)
- 7 刘云峰,朱慧勇,董星涛,等. 实现精确颌面外斜手术的数字化设计与制造技术研究[J]. 中国机械工程,2010,17(9):2 100~2 106. Liu Yunfeng, Zhu Huiyong, Dong Xingtao, et al. Study on digital design and manufacturing techniques to realize precise maxillofacial prostheses surgery[J]. Chinese Mechanical Engineering, 2010,17(9):2 100~2 106. (in Chinese)
- 8 林小夏,张树有,伊国栋,等. 基于 PDM 的产品数字化设计与数控加工集成信息模型[J]. 计算机集成制造系统,2011, 17(12):2 583~2 589. Lin Xiaxia, Zhang Shuyou, Yi Guodong, et al. Product digital design and numerical control machining integrated information model based on PDM[J]. Computer Integrated Manufacturing System, 2011,17(12):2 583~2 589. (in Chinese)
- 9 张国凤,王俊军,陈建能,等. 基于 UG 和 VB. NET 的蔬菜移栽装置数字化设计[J]. 农业机械学报,2010,41(6):61~64,86. Zhang Guofeng, Wang Junjun, Chen Jianneng, et al. Digital design of vegetable transplanter based on UG and VB. NET[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010,41(6):61~64,86. (in Chinese)

- hydraulic pump[J]. Chinese Mechanical Engineering, 2011, 22(14):1 668 ~ 1 671. (in Chinese)
- 3 胡仁喜,苑士华,刘红宁,等. 高压高速条件下柱塞副泄漏流场分析[J]. 农业机械学报,2009,40(4):221 ~ 226.
Hu Renxi, Yuan Shihua, Liu Hongning, et al. Analysis on the leaking flow field of the piston sector considering the high press and high velocity[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009,40(4): 221 ~ 226. (in Chinese)
- 4 杨华勇,周华. 纯水液压传动技术的若干关键问题[J]. 机械工程学报,2002,38(增刊):96 ~ 100.
Yang Huayong, Zhou Hua. Some key problems of the water hydraulics[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2002, 38(Supp.):96 ~ 100. (in Chinese)
- 5 Wang X, Yamaguchi A. Characteristics of hydrostatic bearing/seal parts for water hydraulic pumps and motors. Part 1: experiment and theory[J]. Tribology International, 2002,35(7):425 ~ 433.
- 6 Yui Akinori, Okuyama Shigeki, Kitajima Takayuki. Study on precision machine table equipped with constant-flow hydrostatic water bearings[J]. Advanced Materials Research, 2009,76 ~ 78:664 ~ 669.
- 7 Conrad F. Trends in design of water hydraulics-motion control and open-ended solutions[C] // Proceedings of the 6th JFPS International Symposium on Fluid Power, 2005: 420 ~ 431.
- 8 翟江,赵勇刚,周华. 水压轴向柱塞泵内部空化流动数值模拟[J]. 农业机械学报,2012,43(11):244 ~ 249.
Zhai Jiang, Zhao Yonggang, Zhou Hua. Numerical of cavitating flow in water hydraulic axial piston pump[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012,43(11): 244 ~ 249. (in Chinese)
- 9 燕山大学. 径向活塞滚珠式端面配流低速大扭矩水压马达:中国,201110379726.7 [P]. 2012-05-02.
- 10 陈燕生. 液体静压支承原理和设计[M]. 北京:国防工业出版社,1980.
- 11 许耀铭. 油膜理论与液压泵和马达的摩擦副设计[M]. 北京:机械工业出版社,1984.

(上接第 245 页)

- 10 Souad Latorre, Jean-Marc Pointet. The contributions and consequences of simulation tools and digital mock-ups on design and production as applied to the automobile and aeronautics industries[J]. International Journal of Automotive Technology and Management, 2008, 8(3): 350 ~ 368.
- 11 Charles Snyder, Chetan S Sankar. Use of information technologies in the process of building the Boeing 777[J]. Journal of Information Technology Management, 1998, IX(3 ~ 4): 31 ~ 42.
- 12 李盘林,李宝洁,孟定. 离散数学[M]. 北京:人民邮电出版社,2002.
- 13 Fei Gao, Gang Xiao, JiuJun Chen. Product interface reengineering using fuzzy clustering[J]. Computer-Aided Design, 2008, 40(4): 439 ~ 446.
- 14 张质文,虞和谦. 起重机设计手册[M]. 北京:中国铁道出版社,2001.

(上接第 261 页)

- 19 王知行,邓宗全. 机械原理[M]. 北京:高等教育出版社,2006.
- 20 魏权龄,王日爽. 数学规划与优化设计[M]. 北京:国防工业出版社,1984.
- 21 李新兰,姜潮,韩旭. 基于区间的不确定多目标优化方法及应用[J]. 中国机械工程,2011,22(9):1 100 ~ 1 106.
Li Xinlan, Jiang Chao, Han Xu. An uncertainty multi-objective optimization based on interval analysis and its application[J]. China Mechanical Engineering,2011, 22(9):1 100 ~ 1 106. (in Chinese)
- 22 李方义,李光耀,郑刚. 基于区间的不确定多目标优化方法研究[J]. 固体力学学报,2010,31(1):86 ~ 93.
Li Fangyi, Li Guangyao, Zheng Gang. Uncertain multi-objective optimization method based on interval[J]. Chinese Journal of Solid Mechanics, 2010, 31(1): 86 ~ 93. (in Chinese)
- 23 赵匀,赵雄,张玮炜,等. 水稻插秧机现代设计理论与方法[J]. 农业机械学报,2011,42(3):65 ~ 68.
Zhao Yun, Zhao Xiong, Zhang Weiwei, et al. Modern design theory and method of rice transplanter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2011,42(3): 65 ~ 68. (in Chinese)