

刘伟良, 王红军, 邹湘军, 等. 基于知识的变速箱齿轮虚拟设计研究 [J]. 华南农业大学学报, 2020, 41(4): 120-126.
LIU Weiliang, WANG Hongjun, ZOU Xiangjun, et al. Research on virtual design of gearbox gear based on knowledge[J]. Journal of South China Agricultural University, 2020, 41(4): 120-126.

基于知识的变速箱齿轮虚拟设计研究

刘伟良, 王红军, 邹湘军, 李 慧, 汪润鸿, 李承恩, 邓 通
(华南农业大学 工程学院, 广东 广州 510642)

摘要:【目的】为解决农机变速箱虚拟设计与仿真过程中, 齿轮零件复杂多变、知识重用率低的问题。【方法】在对变速箱齿轮知识进行分类的基础上, 采用本体对齿轮设计知识进行描述, 融合知识工程与参数化设计技术, 提出了一种基于知识的齿轮虚拟设计方法。以拖拉机变速箱复杂花键齿轮设计为例对系统进行验证。【结果】以三维建模软件 NX 为平台开发了变速箱齿轮虚拟设计系统, 通过人机系统界面获取齿轮设计需求, 在齿轮设计知识库和模型库的支持下, 利用知识重用推理出齿轮结构, 在几何参数的驱动下, 快速构建出符合设计需求的齿轮模型, 实现了复杂结构齿轮的快速智能设计。验证结果表明, 在人机界面进行设计需求录入, 系统在数秒内自动输出花键齿轮详细结构模型。【结论】该系统可以较好地支持变速箱的虚拟设计与仿真, 缩短了农机的开发周期, 也可为其他机械产品的虚拟设计提供技术借鉴。

关键词: 变速箱; 齿轮; 知识工程; 参数化; 本体表示法
中图分类号: S23-0 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-411X(2020)04-0120-07

Research on virtual design of gearbox gear based on knowledge

LIU Weiliang, WANG Hongjun, ZOU Xiangjun, LI Hui, WANG Runhong, LI Cheng'en, DENG Tong
(College of Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: 【Objective】 In order to solve the problems of complex and variable gear parts and low knowledge reuse rate in the process of virtual design and simulation of agricultural gearboxes. 【Method】 Based on the classification of gearbox gear knowledge, the ontology was used to describe the gear design knowledge. Combining knowledge engineering and parametric design technology, a knowledge-based virtual gear design method was proposed. This system was verified using the complex spline gear design of tractor gearbox as an example. 【Result】 A virtual design system for gearbox gear was developed using the three-dimensional modeling software NX as a platform. The gear design requirements were obtained through the human-machine system interface. With the support of gear design knowledge base and model library, the gear structure was inferred using knowledge reuse. Driven by the geometric parameters, a gear model that met the design requirements was quickly constructed to achieve the rapid and intelligent design of gears with complex structures. The verification results showed that the system could automatically output the detailed spline gear structure model in seconds when entering the design requirements in the man-machine interface. 【Conclusion】 This system can better support the virtual design and simulation of gearbox, shorten the development cycle of agricultural machinery, and also provide a technical reference for the virtual design of other mechanical product.

Key words: gearbox; gear; knowledge engineering; parameterization; ontology representation

收稿日期: 2019-12-23 网络首发时间: 2020-05-12 14:35:22
网络首发地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1110.S.20200512.1337.002.html>
作者简介: 刘伟良 (1995—), 男, 硕士研究生, E-mail: 760500112@qq.com; 通信作者: 王红军 (1966—), 女, 教授, 博士, E-mail: xtwhj@scau.edu.cn
基金项目: 国家重点研发计划 (2017YFD0700100)

因人口老龄化危机和农业劳动力的锐减,我国愈发重视农业机械的发展^[1]。而农业机械种类多,生产批量小,需要进行大量的虚拟仿真试验^[2-3]。齿轮作为农业机械的关键零件,复杂多变、建模困难,存在大量的重复设计工作^[4],严重影响了农机的研发周期。引入知识工程^[5]、三维重建建模^[6]、虚拟仿真^[7-8]等现代设计方法,提高我国农机产品设计的智能化和自动化,是农业机械可持续发展的关键^[9]。

知识工程是虚拟设计的基础理论,近年来国内外很多机构对知识工程展开了深入的研究,并取得了一系列重要的成果。中国农业大学对智能农机装备开展了大量的工作,建立了履带式拖拉机等关键模型知识库^[10-11]。浙江大学开发了智能夹具设计系统,提出了基于本体的夹具设计知识表示与推理方法^[12]。华南农业大学将三维重构应用于产品知识的建模,并进行了采摘机械手虚拟仿真系统的研究^[13-14]。Reddy 等^[15]开发了基于知识的圆柱齿轮参数化建模系统,大大缩短了齿轮设计的时间。Yin 等^[16]

提出了一种基于遗忘曲线的知识推荐方法,通过推荐适用的知识帮助工程师提高设计效率和质量。三维软件公司 CATIA、NX 开发了知识工程专家^[17]和知识熔接^[18]等知识工程设计模块,取得了较好的效果。

变速箱虚拟设计与仿真过程中,齿轮模型较多、知识重用率低,影响了整机的研发周期。为提高农机智能化设计水平,本文以拖拉机变速箱齿轮设计为例,将知识工程和参数化设计等方法应用于齿轮的虚拟设计中,开发了基于知识的变速箱齿轮虚拟设计系统,并通过实例验证了该方法的可行性和有效性。

1 系统功能分析

基于知识的变速箱齿轮虚拟设计方法将知识工程和参数化设计技术相融合,以 NX 为平台开发了变速箱齿轮虚拟设计系统,其系统框架如图 1 所示。

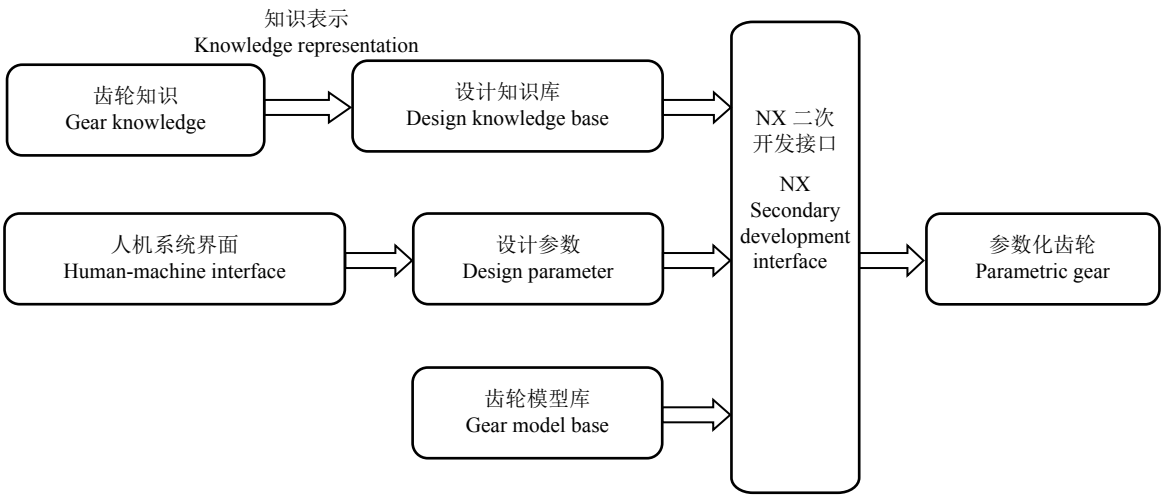


图 1 变速箱齿轮虚拟设计系统框架图

Fig. 1 Frame diagram of gearbox gear virtual design system

变速箱齿轮的主要设计过程如下：

1) 归纳整理齿轮的设计参数、公式、特征、结构、属性等知识。采用合适的知识表示方法,形成齿轮设计知识库,便于系统调用和工程师查看。参数、公式知识可导入 NX 的表达式,并与齿轮参数化模型关联。特征和结构知识采用产生式表示法,用于推理判断。属性和设计经验知识采用本体表示法进行描述,进一步提高齿轮知识的共享与重用。

2) 构建人机系统界面。使用二次开发工具集 NX/Open 制作用户菜单和用户输入对话框,便于设计人员输入设计参数,实现齿轮虚拟设计系统与建模软件 NX 的无缝对接。

3) 建立齿轮模型库。对不同的齿轮特征进行参数化建模,并与齿轮参数、公式、规则关联,形成通用齿轮模型库。使齿轮模型具有演化多种结构的能力且互不冲突,可弥补传统简单参数化设计系统的不足。

4) 创建参数化齿轮。在 Visual Studio 2013 环境中编写程序,将用户设计参数与齿轮模型进行关联,建立规则并进行齿轮结构的智能选择等。

基于知识的变速箱齿轮虚拟设计系统可对齿轮进行智能化快速设计,减少设计人员查阅设计手册、反复建模等重复劳动,提高变速箱虚拟仿真中模型的构建效率,缩短变速箱的研发周期。

2 知识工程技术

知识是新产品竞争力的决定性因素。基于知识工程的产品设计是对成熟的设计经验和知识进行归纳整理,在新的产品设计中加以继承和重用,以达到快速响应设计的效果。知识工程技术主要包括知识获取、知识表示和知识运用。下面以齿轮为例进行具体分析。

2.1 齿轮知识获取

知识获取是指将所需要的知识从某些知识源中提炼出来,其中,知识源包括网络数据、领域专家、文本文献等。按照知识获取方式的不同,知识获取可分为手动、半自动和自动获取^[19]。

本文的齿轮知识获取主要通过人工方式,从设计手册、科学文献、实例模型中整理出变速箱齿轮的参数、公式、特征、结构等设计知识,提炼后导入 CAD 系统,从而实现齿轮设计知识的重用。

2.2 齿轮知识表示

知识表示是指将设计知识用计算机能够识别处理的符号表示出来。常用的知识表示方法有产生式表示法、框架表示法、面向对象表示法、人工神经网络表示法和基于本体的表示法等^[20],不同的表示方法有各自的优缺点和适用范围。

齿轮建模过程中的知识主要为参数公式和条件判断,本文采用产生式表示法。将齿轮知识表示成 NX 表达式能够识别的语言,通过设计规则进行齿轮结构的智能判断实现基于知识的智能参数化设计效果。例如,齿轮的结构划分知识采用产生式表示法可表示为:

- Rule 1: IF $e < 2m$ THEN 齿轮轴,
 - Rule 2: IF $e \geq 2m$ AND $d_a \leq 160$ THEN 实心式齿轮,
 - Rule 3: IF $e \geq 2m$ AND $160 < d_a \leq 500$ THEN 腹板式齿轮,
 - Rule 4: IF $e \geq 2m$ AND $500 < d_a \leq 1\,000$ THEN 轮辐式齿轮,
- 式中, e ——键槽底部至齿根圆的距离, mm;
 m ——模数, mm; d_a ——齿顶圆直径, mm。

齿轮的设计知识具有模糊性、隐含性、多样性等特点,使用单一的知识表示方法难以有效地、全面地描述所有的设计知识。本文将本体表示法应用到齿轮领域知识的表示中,进一步提高齿轮设计知识表示的灵活性和准确性。本体起源于哲学的概念,是共享概念模型的、明确的形式化规范说明^[21],基于本体构建齿轮知识库可以更好地实现齿轮知识的共享、重用、扩展和维护等^[22]。

Protégé是斯坦福大学研发的本体开发工具,其完全开源且拥有众多的插件,已成为最受欢迎的本体编辑器。本文将齿轮领域知识收集整理,并使用 Protégé-5.5.0 工具构建齿轮领域本体,齿轮概念之间的链接关系如图 2 所示。首先,整理齿轮的重要概念,在 Protégé中定义相应类及子类层次关系;然后,定义类的属性和实例;最后,进行完善和更新,形成本体概念树。

本体不仅可以描述不同概念间的语义网络关系,如 Kind-of(继承关系)、Part-of(部分和整体关系)、Instance-of(概念和实例关系)、Attribute-of(属性关系) 等简单链接关系,还可以定义不同概念的数

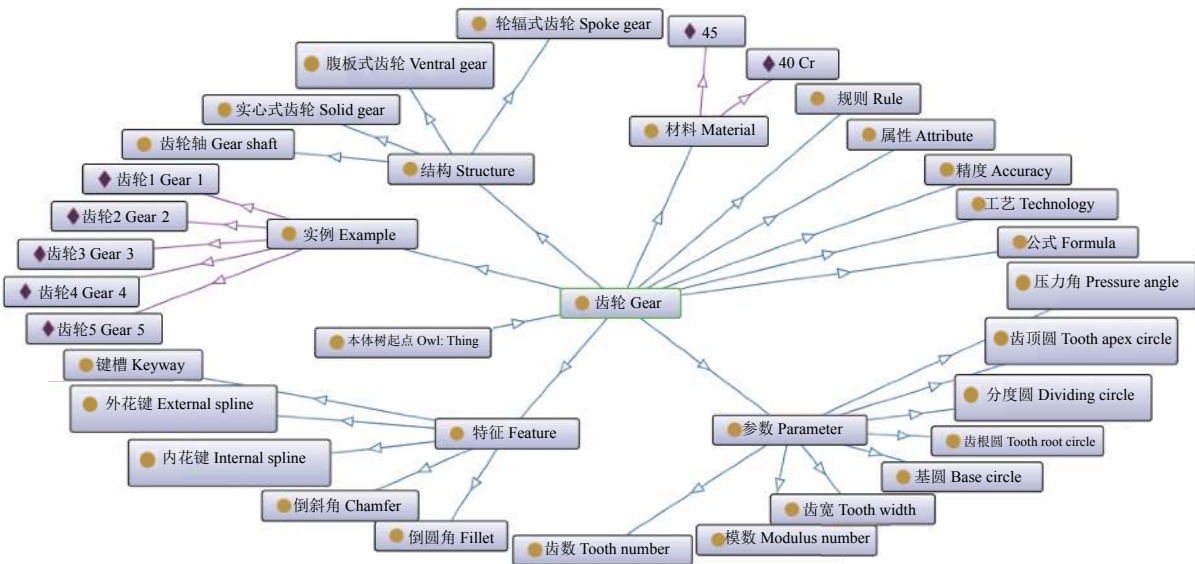


图 2 齿轮概念本体树
Fig. 2 The ontology tree of gear concept

据属性、对象属性、注释属性, 将各种概念关系进行明确表达^[23]。基于本体的齿轮知识库可以保证齿轮概念知识间的一致性, 还可以推理出概念知识之间的隐含关系, 使齿轮领域知识得到更有效的表示和重用^[24]。

2.3 齿轮知识运用

知识运用是指让计算机能模拟人的思维方式, 运用知识进行推理、求解问题, 具有一定的智能设计能力。对于变速箱齿轮虚拟设计系统来说, 知识主要运用在齿轮结构特征智能判断选择上, 使一个模型具有演化多种结构的能力。将知识工程技术融

入 CAD 系统, 提高齿轮设计的智能性。如图 3a 所示的简单参数化系统, 只能实现齿轮几何模型参数或尺寸的快速变更, 不能改变齿轮的结构特征。而图 3b 所示的智能参数化系统, 融合了齿轮的结构设计知识, 定义了齿轮结构设计规则, 可根据输入参数自动选择齿轮的结构特征, 并根据齿轮轴孔直径确定键槽的个数、键宽、键高以及倒角半径等具体参数, 将设计人员查阅设计手册判断过程的“智力活动”程序化, 使 CAD 系统能够模拟人的思维进行智能设计。

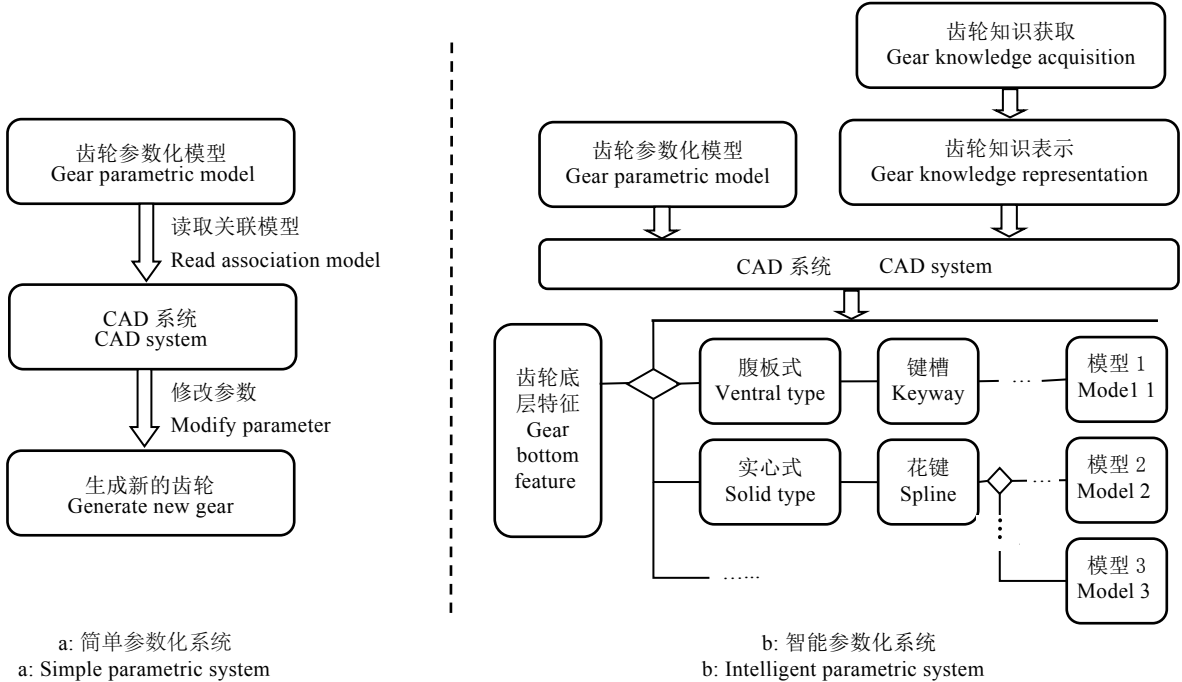


图 3 简单参数化系统和智能参数化系统比较

Fig. 3 Comparison between simple parametric system and intelligent parametric system

3 系统实现

3.1 创建齿轮参数化模型

NX 软件本身可以生成齿轮模型, 但只能生成如图 4 所示的齿轮结构底层特征, 由于齿轮为非参数化模型, 难以修改和重用, 不能成对设计。因此根据变速箱齿轮的特点, 开发齿轮虚拟设计系统, 可以方便设计人员快速设计出结构复杂的变速箱齿轮, 提高设计效率。

针对某拖拉机变速箱齿轮的设计需求, 提取了多组特征创建齿轮参数化模型, 分别是直齿轮和斜齿轮、内啮合齿轮和外啮合齿轮、标准齿轮和变位齿轮、花键齿轮和键槽齿轮。系统根据参数自动确定齿轮结构, 设计人员也可根据实际要求进行修改。

齿轮的设计参数主要包括模数、齿数、齿宽、压

力角、齿顶高系数、顶隙系数和变位系数, 变位齿轮的设计需同时考虑与之相配对的齿轮参数。齿轮建

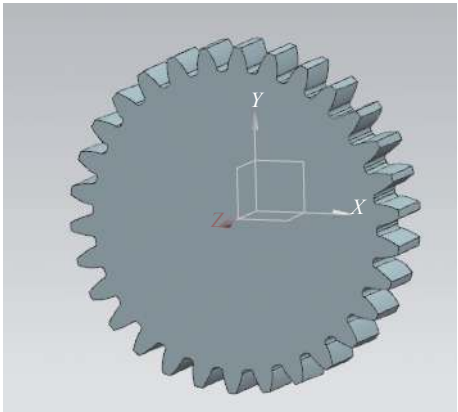


图 4 齿轮结构底层特征

Fig. 4 Features of bottom layer of gear structure

模的公式包括分度圆直径 (d_1)、齿根圆直径 (d_{f1})、中心距变动系数 (y)、齿高变动系数 (Δy)、端面压力角 (α_t)、渐开线镜像角 (degree) 等, 主要公式如下:

$$d_1 = mz_1 / \cos \beta, \tag{1}$$

$$d_{f1} = d_1 - 2m(h_a^* + c^* - x_1), \tag{2}$$

$$y = \frac{a'_0}{m} - \frac{1}{2}m(z_1 + z_2), \tag{3}$$

$$\Delta y = x_1 + x_2 - y, \tag{4}$$

$$\alpha_t = \arctan(\tan \alpha_n / \cos \beta), \tag{5}$$

$$\text{degree} = 180 \left(\frac{\pi}{2} + 2x_1 \tan \alpha_t \right) / (\pi z_1), \tag{6}$$

式中: m ——模数, mm; z_1 ——齿轮 1 齿数; z_2 ——齿轮 1 配对齿轮齿数; β ——螺旋角, ($^\circ$); h_a^* ——齿顶高系数; c^* ——顶隙系数; x_1 ——齿轮 1 变位系数; x_2 ——齿轮 1 配对齿轮变位系数; a'_0 ——变位后中心距, mm; α_n ——法面压力角, ($^\circ$).

编辑好齿轮公式后, 导入 NX 表达式, 在建模过程中与参数进行关联即可完成齿轮的底层结构特征建模, 如图 4 所示. 在齿轮底层结构特征的基础上, 继续创建其他分支特征, 然后对所有的分支特征进行抑制, 将抑制规则写入 NX 表达式, 再使用 NX 软件“由表达式抑制”功能对分支特征进行控制. 例如: 建立表达式规则 $\text{IF}(e \geq 2m \ \& \ d_a \leq 160)(1)\text{ELSE}(0)$, 将表达式与实心式齿轮分支特征进行关联, 当 $d_a > 160$ mm 时, 实心式齿轮特征分支将处于抑制不生成状态. 对于分支特征, 可继续建立表达式进行下一级分支特征的控制, 例如: $\text{IF}(30 < d \leq 50)(c=1.2)\text{ELSE IF}(50 < d \leq 80)(c=2)$, 表示在生成实心齿轮分支特征的基础上, 轴孔倒角 (c , mm) 与轴的直径 (d , mm) 之间的关系. 将所有的齿轮结构知识用产生式规则表示后, 系统可根据设计要求选择生成不同结构的齿轮模型, 达到了智能设计的目标.

3.2 人机系统界面开发

使用 NX 二次开发工具集 NX/Open 对 NX 10.0 进行开发, 建立变速箱齿轮人机系统界面. 人机系统界面包括制作用户菜单和用户输入对话框. 用户菜单使用 MenuScript 创建, 开发人员可以通过它添加新菜单、建立程序和 NX 软件的连接, 齿轮用户菜单运行界面如图 5 所示. 使用 UIStyler 创建用户输入对话框, 用于输入用户设计要求, 修改齿轮相关参数, 建立输入参数和齿轮模型的关联, 齿轮用户输入对话框运行界面如图 6 所示.



图 5 齿轮用户菜单
Fig. 5 The menu for gear user



图 6 齿轮用户输入对话框
Fig. 6 The dialog window of input for gear user

在 Visual Studio 2013 环境下编写程序, 将用户输入参数和 NX 表达式进行关联, 进而控制齿

轮参数化模型。将齿轮模型从模型库读入 NX 内存, 再根据用户输入参数, 对齿轮结构进行判断选择, 确定好齿轮的分支结构后, 对 NX 表达式进行关联控制, 最后, 驱动 NX 对模型库齿轮进行修改, 得到新的参数化齿轮。齿轮参数输入完成后点击确定按钮, 系统即可通过智能选择生成不同

结构的齿轮, 用户也可通过对话框对齿轮结构进行修改。

3.3 设计实例与结果

以三维建模软件 NX 为平台开发的变速箱齿轮虚拟设计系统界面如图 7 所示, 在齿轮用户菜单的引导下, 设计人员可快速完成齿轮详细结构设计。

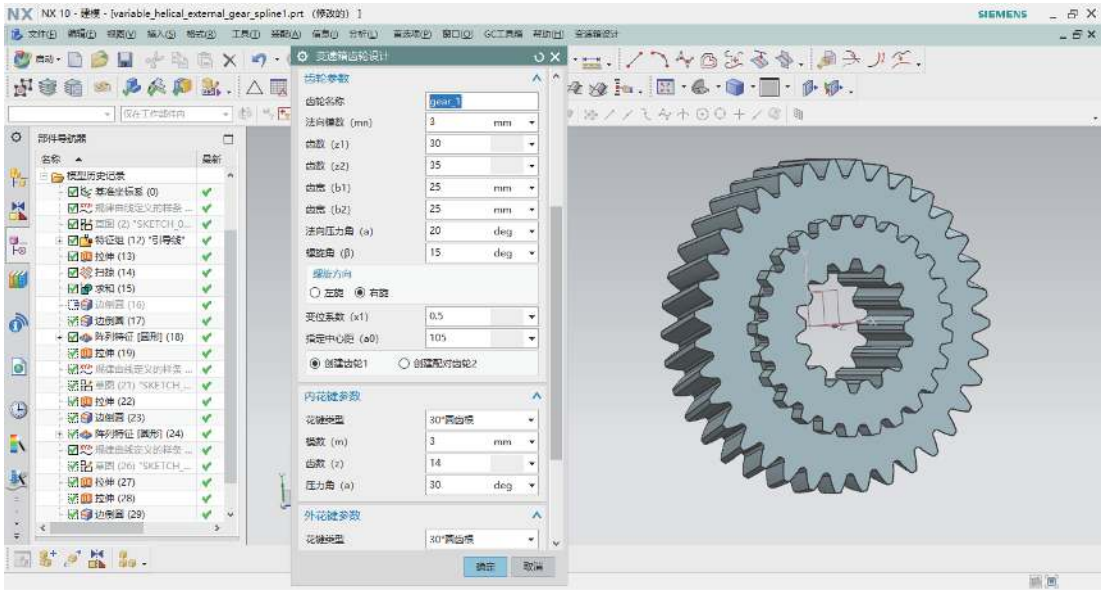


图 7 变速箱齿轮虚拟设计系统界面

Fig. 7 The virtual design system interface of transmission gear

图 8 为拖拉机变速箱中常见的复杂渐开线花键齿轮设计实例, 分别为内花键直齿轮和内外花键斜齿轮。经分析, 虚拟设计系统中齿轮的结构特征参数集为:

$$X = \{X_0, X_1, X_2, \cdots, X_n\}, \tag{7}$$

齿轮底层结构特征参数集为:

$$X_0 = (m, z_1, z_2, b_1, b_2, \alpha, \beta), \tag{8}$$

分支特征 1 内花键参数集为:

$$X_1 = (m, z_3, \alpha), \tag{9}$$

分支特征 2 外花键参数集为:

$$X_2 = (m, z_4, \alpha, b), \tag{10}$$

式中: X_n ——第 n 个分支特征参数集; b_1 ——齿轮 1 齿宽, mm; b_2 ——齿轮 1 配对齿轮齿宽, mm; z_3 ——内花键齿数; z_4 ——外花键齿数; α ——直齿轮压力角或斜齿轮法面压力角, (°); b ——外花键齿宽, mm。

对内花键直齿轮进行设计参数赋值, 参数集为:

$$X_{inner} = \{X_0, X_1\} = \{(3.5, 30, 42, 20, 20, 20, 0), (3, 14, 30)\}。$$

系统在该数据集驱动下自动生成的内花键直

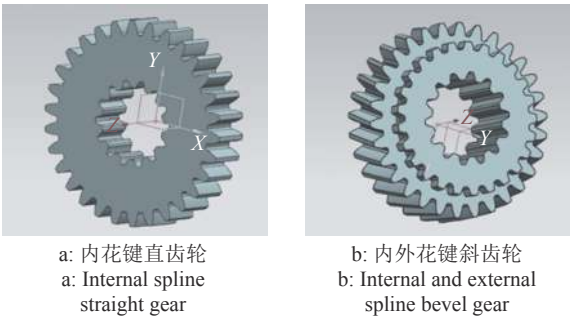


图 8 拖拉机花键齿轮

Fig. 8 Tractor spline gear

齿轮模型如图 8a 所示。

对内外花键斜齿轮进行设计的参数赋值, 参数集为:

$$X_{exter} = \{X_0, X_1, X_2\} = \{(3, 30, 35, 25, 25, 20, 15), (3, 14, 30), (3, 25, 30, 7)\}。$$

系统在该数据集驱动下自动生成的内外花键斜齿轮模型如图 8b 所示。

设计完成一个齿轮后, 选择用户输入对话框创建配对齿轮 2 按钮, 可继续对其配对的齿轮进行设计, 以提高齿轮设计的效率, 达到快速设计的效果。

在拖拉机变速箱虚拟设计与仿真过程中, 齿轮零件占变速箱总零件一半左右, 建模困难, 存在着大量的重复劳动。新的设计人员需要花费大量的时间学习齿轮设计知识, 且难以保证齿轮模型的准确性和精度, 严重影响了变速箱的虚拟仿真周期。变速箱齿轮虚拟设计系统重用了以往成熟的设计经验, 手动数小时才能完成的复杂齿轮模型, 设计系统数秒即可创建。针对拖拉机变速箱中常见的复杂花键齿轮、变位齿轮, 可快速大批量设计。设计人员仅需在人机系统界面录入参数, 系统自动输出花键齿轮详细结构模型。在整机大量齿轮模型的虚拟设计中, 可减少设计人员繁杂的重复建模工作, 缩短变速箱的仿真周期。

4 结论

本文以拖拉机变速箱齿轮为例, 研究了知识工程与参数化设计技术相结合的齿轮虚拟设计方法, 完成了齿轮设计相关的知识获取, 并采用产生式、本体等知识表示方法进行表达, 实现了齿轮设计知识的重用。运用 NX 二次开发技术, 在 NX 系统中实现了齿轮结构智能选择与虚拟设计, 可较好地支持变速箱的虚拟设计与仿真, 验证了该方法的可行性。该设计系统继承和重用了齿轮成熟的设计知识, 在保证齿轮造型准确的同时缩短了设计时间, 亦可为其他机械产品的虚拟设计提供借鉴。

参考文献:

[1] 罗锡文, 廖娟, 邹湘军, 等. 信息技术提升农业机械化水平[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(20): 1-14.

[2] 陈燕, 曾泽钦, 王杰, 等. 收获机虚拟环境模型与仿真平台构建[J]. *农业机械学报*, 2019, 50(7): 159-166.

[3] 陈科尹, 邹湘军, 彭红星, 等. 基于半实物仿真的采摘机器人视觉定位研究[J]. *系统仿真学报*, 2017, 29(8): 1736-1746.

[4] 李春燕, 石小龙, 刘德仿, 等. 基于知识的拖拉机变速箱智能化设计系统研究[J]. *农机化研究*, 2016, 38(10): 250-253.

[5] FEIGENBAUM E A. The art of artificial intelligence: Themes and case studies of knowledge engineering[C]// Proceedings of the fifth joint international conference on artificial intelligence. Pennsylvania: Carnegie-Mellon University, 1977: 1014-1029.

[6] TANG Y, LI L, WANG C, et al. Real-time detection of surface deformation and strain in recycled aggregate concrete-filled steel tubular columns via four-ocular vision[J]. *Robot Com-Int Manuf*, 2019, 59: 36-46.

[7] 王红军, 赵润茂, 唐之富, 等. 基于多领域统一建模的采摘机械手运动仿真[J]. *机械设计与制造*, 2015, 297(11): 156-159.

[8] ZOU X, ZOU H, LU J. Virtual manipulator-based binocular stereo vision positioning system and errors modeling[J]. *Mach Vision Appl*, 2012, 23(1): 43-63.

[9] 刘宏新, 王登宇, 郭丽峰, 等. 先进设计技术在农业装备研究中的应用分析[J]. *农业机械学报*, 2019, 50(7): 1-18.

[10] 宋正河, 毕淑琴, 金晓萍, 等. 履带式收获机械传动系快速设计推理方法[J]. *农业机械学报*, 2013, 44(S2): 268-272.

[11] 陈雨, 毛恩荣, 吕黄珍, 等. 基于推理的大型收获机械变速箱参数化设计[J]. *农业机械学报*, 2013, 44(S2): 278-282.

[12] 郑军红. 基于知识工程的智能夹具设计系统构建研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2010.

[13] 邹湘军, 李静, 孙权, 等. 采摘机械手虚拟设计与仿真系统的研究[J]. *系统仿真学报*, 2010, 22(11): 2748-2752.

[14] CHEN M, TANG Y, ZOU X, et al. High-accuracy multi-camera reconstruction enhanced by adaptive point cloud correction algorithm[J]. *Opt Laser Eng*, 2019, 122: 170-183.

[15] REDDY E J, RANGADU V P. Development of knowledge based parametric CAD modeling system for spur gear: An approach[J]. *Alx Eng J*, 2018, 57(4): 3139-3149.

[16] YIN X, SHENG B, ZHAO F, et al. A correlation-experience-demand based personalized knowledge recommendation approach[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 61811-61830.

[17] 王智明, 杨旭, 平海涛. 知识工程及专家系统[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.

[18] 张幼军, 岳清萍. 知识熔接技术的研究与应用[J]. *沈阳工业大学学报*, 2007, 29(1): 5-8.

[19] 林海伦, 王元卓, 贾岩涛, 等. 面向网络大数据的知识融合方法综述[J]. *计算机学报*, 2017, 40(1): 1-27.

[20] 杜岳峰, 傅生辉, 毛恩荣, 等. 农业机械智能化设计技术发展现状与展望[J]. *农业机械学报*, 2019, 50(9): 1-17.

[21] GRUBER T R. A translation approach to portable ontology specifications[J]. *Knowl Acq*, 1993, 5(2): 199-220.

[22] 张开兴, 王丽, 刘贤喜, 等. 基于本体的水稻收割机底盘虚拟装配工艺知识库设计[J]. *农机化研究*, 2015, 37(11): 121-124.

[23] 黄颖, 李康顺, 李伟, 等. 一种基于本体语言的业务流程建模算法[J]. *系统仿真学报*, 2017, 29(10): 2282-2290.

[24] 曹丽英, 姚玉霞, 于合龙, 等. 基于模糊本体的玉米病害诊断模型的构建[J]. *华南农业大学学报*, 2014, 35(2): 101-104.

【责任编辑 周志红】