



# 虚拟仿真技术在齿轮零件设计中的应用

李 峥, 沈 强, 索双富

(清华大学 机械工程系, 北京 100084)

**摘要:** 针对机械原理齿轮范成实验教学理论与工程实践相脱节的问题, 清华大学机械原理教研组进行了系统化的教学改革与设计, 建立了针对齿轮设计与加工综合实践改革思路及内容, 构建了全过程实践方法。以范成法完成对齿轮设计计算的基本知识及理论加工方法的掌握, 通过引入虚拟仿真技术完成对齿轮设计与仿真及创新加工方法的掌握。该实验教学体系的建立, 有利于培养学生从理论设计到三维建模仿真再到实体加工的全过程的综合能力, 有利于培养学生的科技创新与实践创新能力。

**关键词:** 机械原理; 教学改革; 实验教学

中图分类号: TH132.413; G420

文献标志码: A

DOI: 10.12179/1672-4550.20220099

## Application of Virtual Simulation Technology in Gear Part Design

LI Zheng, SHEN Qiang, SUO Shuangfu

(Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 10084, China)

**Abstract:** In order to solve the problem that the theory of gear generation experiment teaching is independent of the engineering practice, the teaching and research group of the mechanical principle of Tsinghua University carried out a systematic teaching reform and design, established the idea and content of comprehensive practice reform for gear design and processing, and constructed the whole process practice method. The basic knowledge of gear design and calculation and theoretical processing method were mastered by using the generating method, and the gear design and simulation and innovative processing method were mastered by introducing the virtual simulation technology. The establishment of the experimental teaching system was conducive to the cultivation of students' comprehensive ability in the whole process from theoretical design to three-dimensional modeling and simulation, and then to solid processing. It was also conducive to the cultivation of students' ability of scientific and technological innovation and practical innovation in the future.

**Key words:** mechanical principle; teaching reform; experimental teaching reform

机械原理具有很强的专业性、系统性、工程及应用性<sup>[1-3]</sup>, 是学生进行机械综合能力训练, 培养解决工程问题的课程。由于课程知识点繁多, 学习环节中普遍存在理论与实际相脱节的问题, 短时间难以将知识应用到工程实践中。尤其是在齿轮范成实验环节, 各高校仍利用齿轮范成仪进行实验教学, 学生只能在理论上勉强完成设计与加工, 与实际齿轮设计加工过程完全脱离<sup>[4-6]</sup>。为此清华大学机械原理教研组对教学环节中出现的理论进行了系统化的教学改革实践, 在原有实验教学基础上通过系统

化的实践设计, 融入新技术、新方法改变原有实验教学, 使学生对于理论知识也更容易接受和理解。通过建立实验教学目标, 构建实验教学体系; 通过全过程实验教学及实践过程, 帮助学生更好地掌握齿轮设计与加工的基本知识、方法, 提高了学生自主设计创新能力, 培养了学生全过程设计思维方式。

### 1 全过程实验教学改革思路及内容

本文以清华三位一体人才培养为方针, 引入最新手段与方法, 结合学生能力与素质, 对齿轮

收稿日期: 2022-01-10; 修回日期: 2023-07-18

基金项目: 清华大学本科教学改革项目(53412103923)。

作者简介: 李峥(1984-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事实验教育与转子动力学及机械故障诊断方面的研究。E-mail:

[lizheng2021@tsinghua.edu.cn](mailto:lizheng2021@tsinghua.edu.cn)

设计与加工进行了全过程实验教学设计。全过程实验主要由3个部分组成, 每部分实验为2学时, 流程图如图1所示。

全过程实验教学设计弥补了齿轮设计实验教学的不足, 以工程案例齿轮设计为主线, 通过引入三维软件进行建模仿真与虚拟加工, 最后借助最新的加工方法完成齿轮的制造过程。全过程实践教学规划流程表如表1所示, 该实践教学有利

于培养学生掌握齿轮设计加工全过程实践能力, 拓展学生相关领域的知识, 为今后科学研究奠定基础。



图1 全过程齿轮设计与加工实验教学流程图

表1 全过程实践教学规划流程表

序号	实验教学内容	学时及形式	实验教学目标
1	根据给定齿轮相关参数完成对齿轮设计与计算	2学时、个人	掌握用范成法切制渐开线齿轮的基本原理; 掌握传统渐开线齿轮的传动设计的步骤加工原理和加工方法
2	利用SolidWorks软件针对齿轮进行建模及仿真——CAD/CAE	2学时、个人	熟悉掌握SolidWorks软件, 完成对齿轮的建模与仿真分析, 使学生初步掌握简单建模与仿真的能力
3	利用UG软件针对设计的齿轮进行虚拟加工过程——CAM	2学时、个人	熟悉掌握UG软件, 完成对齿轮进行虚拟加工的过程, 得到NC程序为后续数控机床加工奠定基础
4	教学插齿机、3D打印、数据加工	2学时、个人	熟悉掌握传统齿轮加工方式以及3D打印机数据加工技术及方法

## 2 全过程虚拟仿真实践探索

齿轮设计涵盖多个学科领域<sup>[7-8]</sup>, 如机械原理、机械设计、材料学、动力学、力学等, 传统设计加工方式与实际严重脱节。近年来清华大学机械原理教研组针对齿轮范成实验教学中发现的问题进行了系统化的设计与改革, 对齿轮设计与加工实验教学改革进行了初步的实践与探索, 取得了一定的成效。

以渐开线齿轮设计加工制造实践教学为抓手, 在齿轮设计环节上, 以理论知识为基础, 增加CAD-CAE-CAM全过程设计仿真加工环节, 培养学生理论设计与虚拟加工仿真的能力; 在加工环节上, 引入教学用插齿机和3D打印与数控加工技术, 拓展学生对传统与先进加工方式的了解, 通过对比使学生掌握各种加工方法。针对齿轮的全过程设计仿真加工, 让学生对齿轮设计与加工基础知识有更高层次的认知, 并对数值仿真及3D打印等加工方式有更加深入的理解。齿轮设计与加工流程图如图2所示。

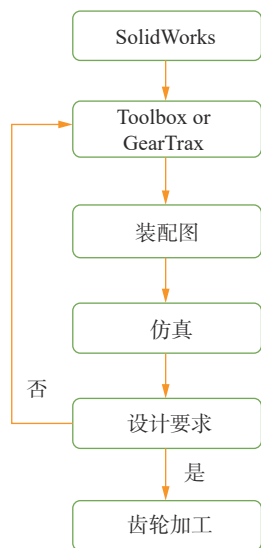


图2 齿轮设计与加工流程图

## 3 齿轮设计方法

传统齿轮设计加工实验是利用齿轮范成仪进行实验模块教学的, 齿轮范成仪如图3所示。

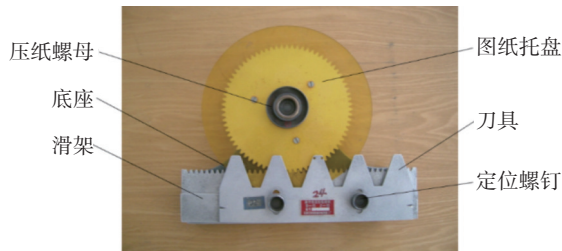


图3 齿轮范成仪

利用VB设计了齿轮范成轨迹小程序, 模拟演示了齿轮范成法加工齿轮时齿轮齿廓的形成过

程, 有利于学生进行先期的理解与认知, 增加实验过程和实验结果的可视性, 提高实验教学的质量和效率, 其软件及范成轨迹如图 4 所示。

### 3.1 齿轮设计

实验案例是设计一台直齿齿轮减速试验台, 传动比为 2, 给定电机输入功率  $P_1 = 1.5 \text{ kW}$ , 小齿

轮工作最高设计转速  $n_1 = 1\,000 \text{ r/min}$ , 材料选用 45 号钢, 给定齿轮的基本参数如表 2 所示。

专业设计软件有很多, 如 SolidWorks、UG、PRE、3Dmax 等, 该实践教学课程前期齿轮设计与力学仿真选用软件 SolidWorks 2015, 利用齿轮设计插件进行齿轮的设计, 其插件如图 5 所示。

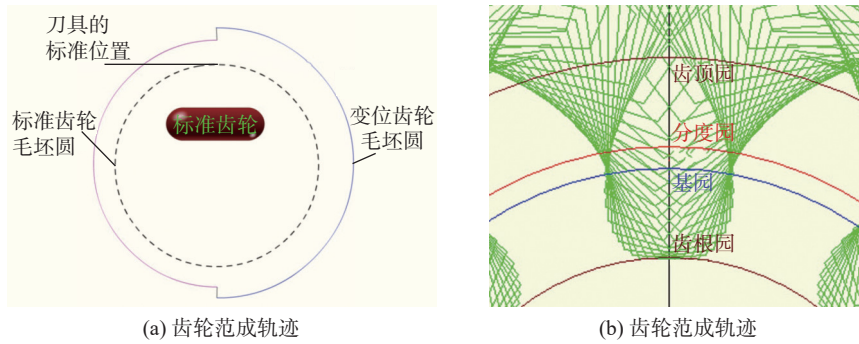


图 4 齿轮范成软件及范成轨迹

表 2 齿轮具体参数

	齿数	压力角/(°)	模数 $m$	齿宽系数	齿宽/mm
小齿轮 $z_1$	20	20	2	1	20
大齿轮 $z_2$	40	20	2	1	20

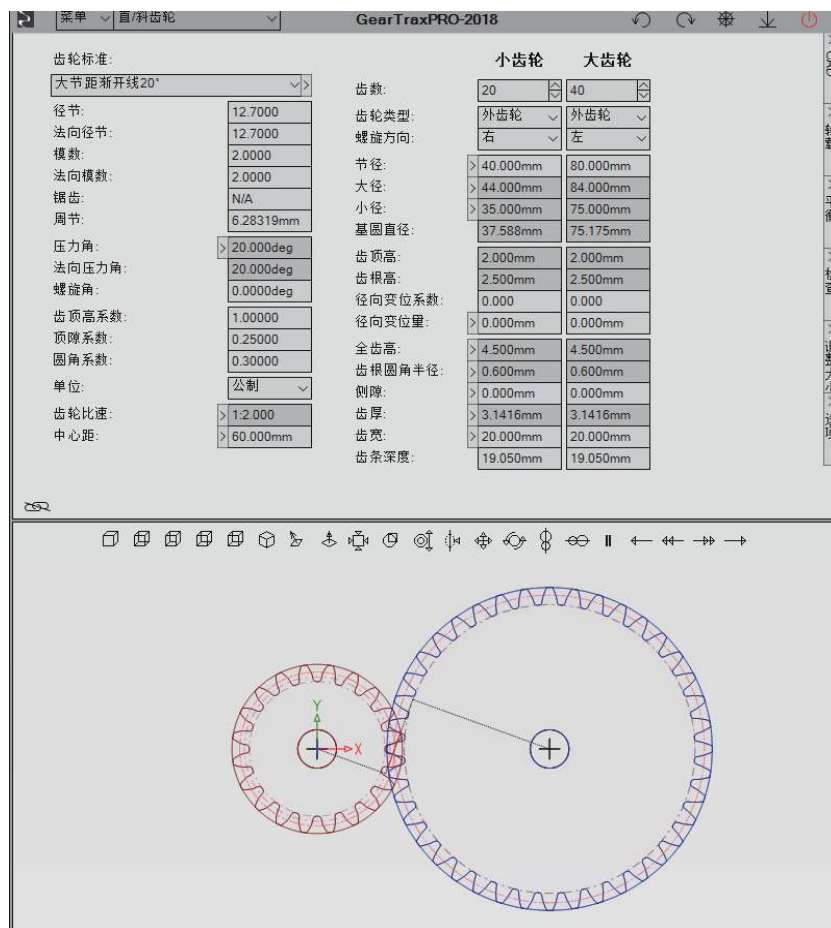


图 5 齿轮设计插件

### 3.2 理论计算与虚拟仿真

在小齿轮内表面上施加扭矩载荷为:

$$T_{\text{输入}} = \frac{95.5 \times 10^5 P_1}{1\,000 n_1} = \frac{95.5 \times 10^5 \times 1.5}{1\,000 \times 1\,000} = 14.325 \text{ (N} \cdot \text{M)} \quad (1)$$

齿轮失效的主要形式为弯曲疲劳强度<sup>[3]</sup>, 则齿轮的最大扭矩 $T_1 = \frac{[\sigma_F] b d_1 m}{2 K Y_{FS}}$ , 由 $\sigma_F = \frac{K F_t}{b m} \times Y_{Fa} Y_{Sa} = 2 \frac{K T_1}{b d_1 m} Y_{FS} \leq [\sigma_F]$ , 其中 $Y_{Fa}$ 为齿形系数,  $Y_{FS}$ 为复核齿形系数,  $Y_{FS} = Y_{Fa} Y_{Sa}$ , 可通过查外啮合齿轮复合齿形系数得到, 则 $\sigma_F = 338.5 \text{ MPa}$ <sup>[9]</sup>。

在实验教学仿真阶段, 通过软件自带 Simulation 对齿轮进行有限元仿真, 为齿轮后续进行优化设计提供了依据与指导。利用 Simulation 仿真前需要对设计的齿轮啮合过程进行干涉分析, 为后续的仿真及受力分析提供前提, 然后进行赋予材料、夹具固定、输入力矩、划分网格和最后的分析。根据前面计算所得的输入扭矩带入仿真软件中进行静力学仿真, 其结果如图 6 所示。通过观察仿真数据, 齿轮在此工况下的屈服力为 135 MPa, 而材料的最大屈服应力为 530 MPa, 则设计符合要求。

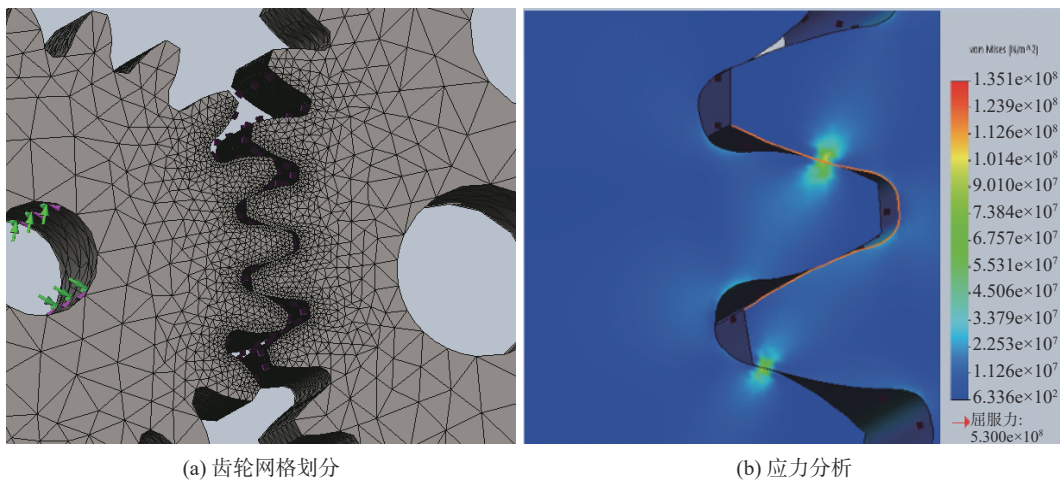


图 6 齿轮网格划分及应力分析

设备在运行时不可避免要发生各种振动, 为避免共振产生, 还要对其进行模态分析。专业的模态分析软件有 ANSYS 等, 本文采用 SolidWorks 自带的 Simulation 插件进行固有频率的分析与仿真。通过前面各种参数可计算得出齿轮工作时啮合频率为 333.3 Hz, 其仿真结果如图 7 所示, 无论是齿轮的转频和齿轮啮合频率都远远小于齿轮固有频率, 因此设备运行情况下不会产生共振, 产品设计符合要求。

综上, 针对设计的齿轮进行静力分析与模态分析都符合设计要求, 如不符合再对齿轮材料及参数进行更改以最终达到设计要求。通过上述对齿轮的计算与仿真可以加深学生理论知识的理解, 培养对专业软件的应用能力, 为今后开展相关零件设计及仿真奠定基础。同时该插件还提供了其他分析功能, 如热应力、疲劳、屈曲等, 面对不同的应用场景可采用不同分析方法。

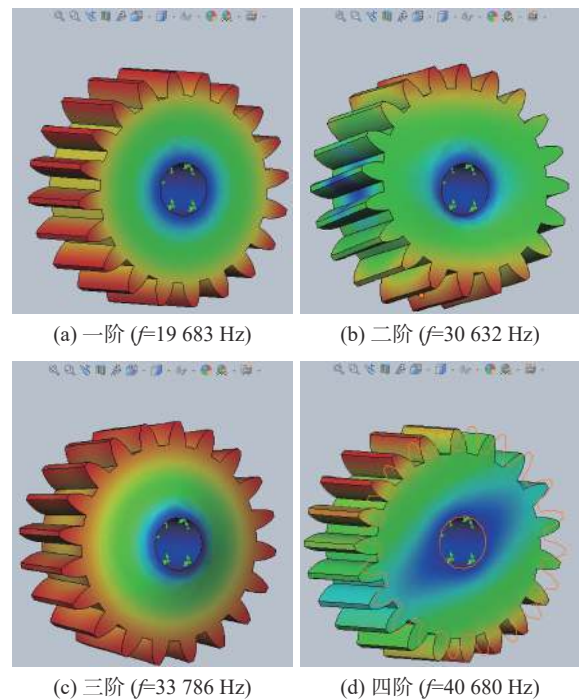


图 7 齿轮前四阶振型图

### 3.3 虚拟加工

齿轮加工仿真选用的是 UG 软件，应用该软件可直观地进行动态齿轮模拟加工过程，只需要按照软件提示进行即可完成针对齿轮的虚拟加工过程。首先指定机床坐标系及安全平面，建立毛坯模型，创建刀具及工序，指定部件及切削区；然后设定机床转速及进给速度，选择模型；最后进行虚拟加工，初步校验工艺过程布排的合理性、刀具选择的正确性、干涉及过切现象的发生确认，无误可生成 NC 代码，从而可以直接导入相应的智能数控车床进行实际加工。刀具路径和虚拟加工过程如图 8 所示，齿轮虚拟加工流程图如图 9 所示，UG 导出的 NC 代码如图 10 所示。

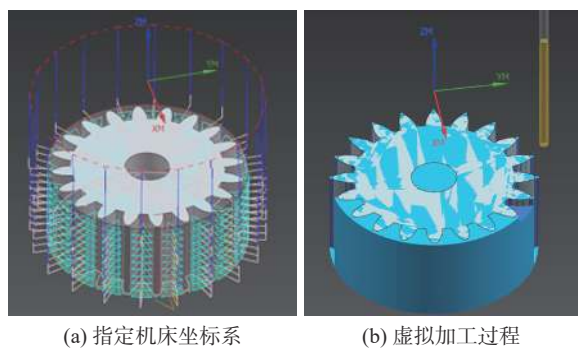


图 8 刀具路径和虚拟加工过程

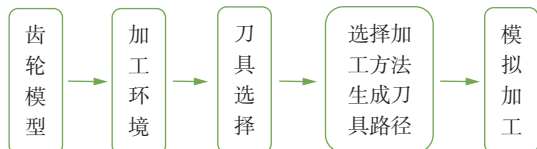


图 9 齿轮虚拟加工流程图

### 4 结束语

齿轮设计与加工全过程实验教学改革是基于从理论设计到建模仿真再到加工成品的一体化实践教学训练。该教学模式打破了传统实验教学方法，全过程齿轮设计与加工实践教学可使学生有效掌握齿轮设计加工过程中所设计的环节，加深对于齿轮设计加工的理解与认识，有利于培养学

生从理论到工程再到创新的综合能力，为今后开展相关科技创新设计奠定基础。该实践教学方案可以为开展其他实践教学项目提供参考与借鉴。

```

%
N0010 G40 G17 G90 G70
N0020 G91 G28 Z0.0
N0030 T00 M06
N0040 G00 G90 X.1563 Y-1.0372 S1500 M03
N0050 G43 Z-.1969 H00
N0060 Z-.9449
N0070 G01 Z-1.063 F3.9 M08
N0080 X.0441 Y-.8968
N0090 G02 X0.0 Y-.8281 I.3075 J.2458
N0100 X-.0441 Y-.8968 I-.3516 J.1771
N0110 G01 X-.1563 Y-1.0372
N0120 Z-.9449
N0130 G00 Z-.1969
N0140 X.2152 Y-1.0331
N0150 Z-.9449
N0160 G01 Z-1.063
N0170 X.0926 Y-.8931
N0180 X.0851 Y-.8845
N0190 G02 X.0058 Y-.7283 I.2666 J.2334
N0200 X-.0058 I-.0058 J.7283
N0210 X-.0851 Y-.8845 I-.3458 J.0773
N0220 G01 X-.0927 Y-.8932
N0230 X-.2154 Y-1.0333
N0240 Z-.9449
N0250 G00 Z-.1969
N0260 X.1563 Y-1.0372
N0270 Z-1.0236
N0280 G01 Z-1.1417
N0290 X.0441 Y-.8968
N0300 G02 X0.0 Y-.8281 I.3075 J.2458
N0310 X-.0441 Y-.8968 I-.3516 J.1771
N0320 G01 X-.1563 Y-1.0372
N0330 Z-1.0236
N0340 G00 Z-.1969

```

图 10 NC 代码

### 参考文献

- [1] 阎绍泽, 申永胜. 研究型大学机械类精品课程教学的六个基本要素[J]. 中国大学教学, 2009(9): 5-7.
- [2] 阎绍泽, 季林红, 申永胜, 等. 机械原理实验教学新体系[J]. 实验技术与管理, 2004, 20(2): 102-105.
- [3] 索双富, 季林红, 刘向峰, 等. 中、美机械基础教材与教学内容比较分析[J]. 中国大学教学, 2003(11): 1-23.
- [4] 寇尊权, 王顺, 柴博森, 等. 渐开线内齿轮范成仿真[J]. 实验室研究与探索, 2018, 37(4): 90-93.
- [5] 李梦如, 陈茂林, 陈哲, 等. 渐开线齿轮范成原理虚拟实验建立[J]. 实验室研究与探索, 2019, 38(10): 115-119.
- [6] 严天祥, 陈静, 黄灿华, 等. 基于电气控制的齿轮范成仪设计[J]. 实验技术与管理, 2016, 33(10): 107-109.
- [7] 申永胜. 机械原理学习指导[M]. 3 版. 北京: 清华大学出版社, 2015.
- [8] 申永胜. 机械原理教程[M]. 北京: 清华大学出版社, 1999.
- [9] 刘向峰. 机械设计教程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008.

编辑 张俊