

基于自动化技术的机械设计优化方法研究

王子宇

邢台纳科诺尔精轧科技股份有限公司, 河北 邢台 054000

[摘要] 自动化技术成了推动机械设计范式改变的主要力量。文中对自动化技术在机械设计优化中所起的作用以及应用基础和方法体系进行了详细的论述, 并且对参数化建模、仿真优化、智能控制等关键技术进行了分析, 提出了一个包含结构优化、参数优化、系统优化、流程优化的四维方法框架。在此基础上提出平台搭建、数据管理、仿真验证和保障体系的实施策略, 以期给机械产品设计的高效化、智能化发展赋予系统性的理论支持和技术途径。

[关键词] 自动化技术; 机械设计; 设计优化

DOI: 10.33142/ect.v4i8.20344

中图分类号: TP242

文献标识码: A

Research on Optimization Method of Mechanical Design Based on Automation Technology

WANG Ziyu

Xingtai Naknor Technology Co., Ltd., Xingtai, Hebei, 054000, China

Abstract: Automation technology has become the main driving force behind the paradigm shift in mechanical design. The article provides a detailed discussion on the role, application foundation, and methodology of automation technology in mechanical design optimization. Key technologies such as parametric modeling, simulation optimization, and intelligent control are analyzed, and a four-dimensional method framework is proposed, which includes structural optimization, parameter optimization, system optimization, and process optimization. On this basis, implementation strategies for platform construction, data management, simulation verification, and guarantee system are proposed to provide systematic theoretical support and technical approaches for the efficient and intelligent development of mechanical product design.

Keywords: automation technology; mechanical design; design optimization

引言

传统的机械设计大多依靠设计人员的经验和串行开发的方式, 设计周期长、迭代成本高, 不能满足现代制造对多种产品、大批量生产的要求。据统计, 设计阶段虽然只占产品全生命周期成本很小一部分, 但是决定产品性能和可制造性大部分。伴随着智能制造战略的发展, 自动化技术依靠算法驱动和数据贯通, 给设计流程再造和参数寻优带来了新的思路。依据自动化控制理论展开机械设计改良探究, 创建状态空间控制模型, 同步对结构参数及控制策略实施协同改良, 可显著改善系统反应速度与运转稳定情况。因此, 系统探究自动化技术支撑下的机械设计改进办法, 对于推进制造业高质量发展有着十分重要的理论价值和现实意义。

1 自动化技术与机械设计优化概述

自动化设计以减少人工操作、实现流程标准化为目标, 用计算机辅助设计工具和编程技术把重复性的设计任务

变成自动执行的流程, 从而提高设计的效率和一致性。在机械设计当中, 自动化并不是简单的工具取代, 它把参数化建模, 规则校验, 数据传递这些环节融入到设计流程里, 达成从需求输入到图纸输出的半自动化甚至全自动化流转。从优化的角度来说, 机械设计优化就是指在满足强度、刚度、成本、重量、可靠性等各方面约束的情况下, 寻找出最佳的设计方案的过程。传统的优化方法是依靠人工计算以及经验调节来实现的, 存在效率低下、容易陷入局部最优等缺点。智能化设计是在自动化的基础上, 加入人工智能和数据驱动技术之后形成的, 具有自主学习、决策优化的能力, 可以模仿人类设计师的思维过程来解决复杂的设计问题。二者相融之后, 设计优化由被动验证转向主动寻优, 给高性能机械产品开发开拓出新的途径。

2 自动化技术在机械设计中的应用基础

2.1 自动化技术在机械设计中的应用特点

自动化技术在机械设计中具有三个主要的特点。第一,

就是流程标准化,把常用的尺寸标注、公差设定、材料选择、工程图生成等设计步骤固化成标准模块,实现一键调用,简化设计过程。标准化的流程模板还可以按照产品种类来定制设置,从而保证不同设计人员对于同种产品的操作途径保持一致,进而减小由于个人习惯的不同而造成的输出质量上的波动。第二,参数驱动,根据设置好的尺寸、角度、材料属性等参数来生成几何模型,省去人工绘图的麻烦和误差,使设计人员可以把更多的精力投入到方案构思当中。第三,数据贯通,利用接口技术使设计软件同产品数据管理系统、制造执行系统等其它系统之间实现数据的无缝对接,减少人工数据录入时出现的错误,保证设计数据在产品整个生命周期内准确、一致。

2.2 自动化技术支撑机械设计优化的关键技术

支撑机械设计优化的关键技术有参数化建模技术、仿真集成技术、智能优化算法、协同管理平台这四大部分。参数化建模技术是自动化设计的基础。CAD 软件的参数化模块可以按照规则自动生成设计变体,完成参数化设计。设计人员设定几何约束和尺寸变量之后,系统会自动更新相关的特征,从而大大缩减改型设计的时间。仿真集成技术把设计验证自动化了。自动化工具用批处理脚本来完成各种工况的仿真实验,一次性得到各种不同的载荷、工况下的应力分析、变形分析、振动分析等大量的仿真数据。智能优化算法给多目标寻优提供了一个核心的引擎。结合遗传算法、神经网络、粒子群优化等智能算法,在满足多约束的情况下找到最优解,达到各方面的设计指标。协同管理平台实现了设计流程的自动化控制。自动化技术搭建起云端共享平台,让各个团队、各个地点的设计人员可以对设计文件进行实时访问、编辑、同步,利用版本控制功能来实现设计文件版本的自动管理。

3 基于自动化技术的机械设计优化方法

3.1 基于自动化建模的结构优化方法

结构优化就是确定机械构件最佳的几何形状、尺寸分布和材料布置。自动化建模技术把参数化驱动同拓扑优化算法融合起来,从而达成由概念构型向详细设计的自动演进。设计人员在设定设计空间、载荷工况和约束条件之后,系统会自动对材料进行调节,得到符合性能要求、质量最轻的结构方案。参数化设计就是对设计参数以及约束条件进行定义之后,使设计可以自动地产生并进行修改。在汽车零部件轻量化设计当中,自动化建模工具可以迅速产生几十种拓扑构型,并且自动评判这些构型的力学性能,把传统数周的设计时间缩短到数天。采用质量去除法对转子

齿面进行减重孔的设计,并利用参数化建模技术以及NSGA-II算法来获得最佳的减重孔参数和布置角度,从而达到优化质量分布的目的。

3.2 基于仿真分析的设计参数优化方法

设计参数优化就是研究关键尺寸、材料属性等设计变量对产品性能的影响规律。自动化技术依靠集成仿真工具和优化算法来创建起“建模-仿真-剖析-改良”这种闭环改进链条。智能化算法对仿真结果做深入的挖掘工作,用数据挖掘的方法找出影响性能的主要参数,比如灵敏度分析可以找出对结构刚度、强度或者振动特性有较大影响的尺寸变量或者材料参数,从而给设计优化指明方向^[1]。智能系统可以自主设置仿真迭代策略,按照前面的分析结果来自动调节结构参数,直到达到性能指标控制的要求为止。由表 1 可知,不同的优化策略在典型机械设计场景中应用效果比较清楚地体现了自动化仿真的效率优势。

表 1 不同优化策略的应用效果对比

优化策略	典型应用场景	迭代次数	设计周期缩短比例
传统试错法	通用零部件设计	8~15 次	—
参数化扫描优化	尺寸系列化设计	5~8 次	40%~55%
智能算法驱动优化	复杂结构多目标优化	20~50 次	60%~75%

3.3 基于智能控制的机械系统优化方法

对带有运动、传动和控制部分的复杂机械系统来说,设计优化要同时考虑结构参数和控制策略的协调配合。根据自动化控制理论,用建立状态空间控制模型的方法,协调结构参数和控制策略来形成控制-结构耦合系统。该方法把机械系统的结构参数(惯量、刚度、阻尼)和控制参数(增益、时间常数)一起放在一个优化模型里,用系统响应速度、稳态精度和稳定性作为目标来综合寻优。智能自动化技术在机械设计中可以提高设计效率、提高产品的可靠性、提高产品的性能。在工业机器人关节设计中,用耦合优化减速比、电机参数和伺服控制参数来提高轨迹跟踪精度的同时又可以减小能耗和振动水平。

3.4 基于数字化协同的设计流程优化方法

设计流程优化的主要就是从串行开发转为并行协同。自动化技术凭借创建集成化的环境来打通需求管理、概念设计、详细设计、仿真验证和工艺规划之间存在的障碍。自动化工具迅速创建出方案的三维模型以及物料清单,使设计构想可以直观地展现出来,从而让设计人员以及用户在早期阶段对设计方案进行评价^[2]。自动化技术依靠云端协同平台达成全球设计师的实时协作。从流程控

制角度来说,智能系统可以对各个参与方的设计进程加以追踪,并且同计划进度展开比较,从而发出预警信号,及时提醒相关人员采取措施。图1为基于数字化协同设计流程的高效迭代过程,以前的数据驱动的人工交接变成了现在的系统自动同步。

4 基于自动化技术的机械设计优化实施策略

4.1 构建自动化设计平台,提高设计集成水平

企业要努力创建起以计算机辅助设计(CAD)、计算机辅助工程(CAE)、计算机辅助工艺设计(CAPP)和产品数据管理(PDM)为内容的集成化设计平台。该平台的关键之处在于用统一的数据模型打通各个环节的信息孤岛,使设计人员在一个环境里就可以完成从概念构思到工艺输出的全部工作,而不需要在不同的软件之间频繁地导入导出数据。加强自动化和智能化技术的深度融合,开发集成化设计平台,把参数化建模、智能优化、自动仿真、工程图生成等功能整合在一起,实现模型构建、性能分析、方案优化、工程图输出的一键式处理,简化设计流程,提高设计效率。平台内置的流程引擎可以按照预先设定好的规则自动调度各个功能模块,在模型参数发生改变的时候会自动执行仿真任务,在仿真收敛之后又会立刻更新工程图以及物料清单,从而创建出不需要人工干预的自动化工作流。

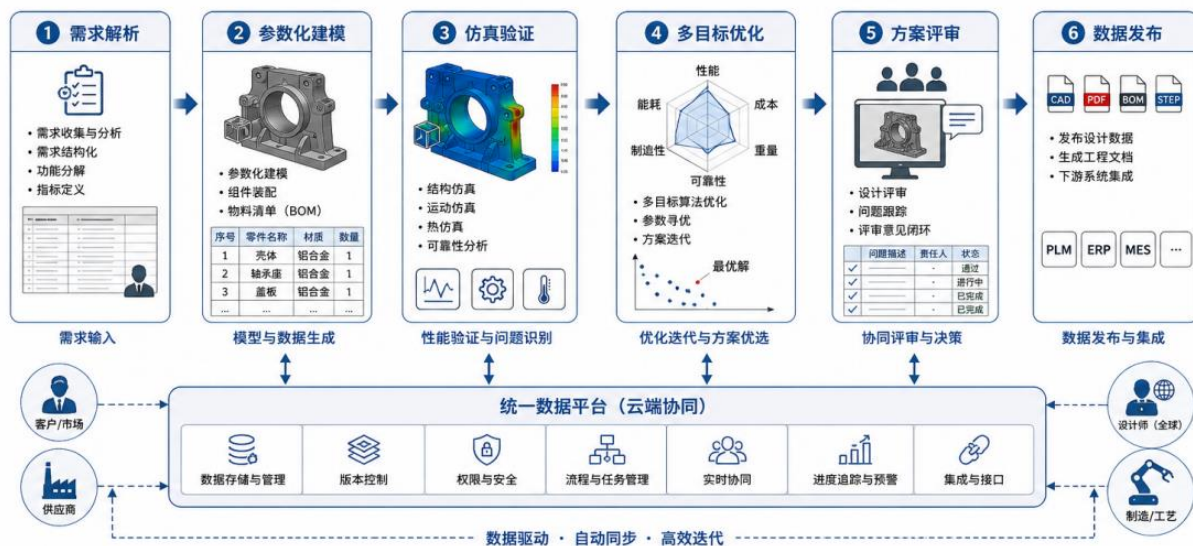
平台的建设应采取模块化的结构,能够实现按需配置、逐步扩展,从而减少一次性投资的风险。具体实施时可以把平台分为几何建模模块、仿真求解模块、优化算法库和

数据管理模块这四个主要部分,各个部分之间用标准化的接口进行通信,企业根据自身的实际情况和技术条件可以分阶段部署,先在建模和仿真模块上运行,待运行稳定后再加入优化和协同的功能。同时要重视应用程序接口(API)的开放性、标准化,方便之后接入新的工具、算法模块。开放式的API体系可以和企业已有的ERP、MES等管理系统进行对接,实现设计数据到制造端的自动流转,为数字化工厂的建设打下数据基础。

4.2 完善设计数据管理,实现全过程协同优化

设计数据属于自动化优化的基本资料。企业要创建起统一的设计数据管理规范,包含参数库,材料库,工况库,仿真结果库以及案例库这些主要的数据库。利用接口技术使设计软件同产品数据管理系统、制造执行系统等其它系统之间数据能够无缝对接。从数据治理的角度出发,要创建起版本管理、权限管控以及变更追踪的体系,保证各个团队所使用的都是最新的、有效的设计数据^[3]。同时还要确定各种数据格式标准以及命名规则,即在参数库中每一个设计变量都应该包含名称、取值范围、步长和物理单位等元数据信息,从而保证数据在整个流程中可以被识别并一致地使用。另外还要建立设计知识库,把历史项目中获得的优化经验、设计准则等数字化,用规则引擎和案例推理技术来实现系统对于新设计需求的自动检索、推荐初始参数组合的功能,从而减轻设计人员从零开始工作的负担,给新项目提供智能推荐和决策支持。

图1 基于数字化协同的机械设计流程示意图



(图注:该图展示了从需求输入到方案输出的全流程自动化流转路径,包含需求解析、参数化建模、仿真验证、多目标优化、方案评审与数据发布六个环节,各环节通过统一数据平台实现信息互通与自动触发。)

图1 基于数字化协同的机械设计流程示意图

4.3 强化智能分析与仿真实验，提高设计可靠性

仿真实验的准确性、效率直接影响到优化结果的可信度。企业应该建立多层次、多学科的仿真实验体系，包括静力学、动力学、热学、疲劳等各个方面的性能。智能化算法会把仿真结果做进一步的分析，用数据挖掘技术找出影响性能的主要因素。在此期间可以采用高斯过程回归或者随机森林等代理模型技术，用少量的高精度仿真数据来训练预测模型，代替大量的全阶仿真计算，在保证预测精度的基础上把优化周期缩短 50%以上。验证策略上可以采用“快速筛查、精细校核、试验标定”的递进式模式，用自动化批处理技术完成大量候选方案的初步筛选，只对少数优选方案做高精度仿真和物理试验。该递进策略的主要优点就是合理分配计算资源，在初步筛选阶段使用粗网格或者简化模型快速排除不可行方案，在精细校核阶段再对通过筛选的少量方案启用高保真模型，在有限的计算成本内得到可靠的优化结果。还要创建仿真结果同试验数据的闭环校核体系，不断修正仿真模型参数，把仿真输出同物理试验数据加以对比，反向标定材料本构模型参数、边界条件设定和接触属性界定，使得仿真模型渐渐接近真实的物理行为，提高预测精确度。

4.4 健全自动化设计保障体系，提升机械设计质量

自动化设计高效运转要依靠完善的保障体系来支撑。从人才上来说，应该建立以机械、计算机、人工智能为三足鼎立的跨学科培养体系，高校要对课程进行重新安排，提高学生在交叉学科方面的知识水平和实践能力。企业层面要创建分层培训体系，对设计人员实施参数化建模和优化算法的基础培训，对技术骨干给予仿真集成及平台开发的进阶研修，设立自动化设计专员岗位，从事工具保养和流程改良工作。从标准上来说，行业协会应该组织制定技术标准，对自动化的设计流程、数据接口标准、智能算法评价指标、设计数据安全管理工作进行规范。标准制定要遵照“先急后缓、分步推进”的准则，先统一数据交换格

式和仿真结果输出规范，解决目前各个工具之间数据不通的紧迫问题，然后慢慢发展到算法验证、模型可信度评定等更深一层的问题上。从安全角度出发，要创建起设计数据的安全防护体系，防止出现数据泄露和篡改的情况。另外还要创建起自动化设计工具的评价和更新机制，定时对算法精确度，计算速度以及适用性展开检验，保证工具链一直处在可利用的状态之中。

5 结语

自动化技术给机械设计优化带来的是两种力量，一种是流程效率的提高，另一种是方案质量的飞跃。本文从应用基础、方法体系、实施策略三个方面对基于自动化技术的机械设计优化理论进行系统的构建。经过研究得知，自动化技术以及其相关联的控制理论成了现代工业发展的关键核心技术，按照该理论指引展开机械设计改良工作，可明显提升机械设计的精确度、效能以及系统稳定性。目前机械设计由原来的静态参数优化变为现在的动态自适应优化，自动化技术在其中起着数据贯通和决策赋能的作用。伴随着人工智能、数字孪生、工业互联网技术不断渗透，机械设计优化也越来越向自主设计、智能决策方向发展。企业要把握住技术变革的机遇，有步骤地推进设计体系的自动化更新，从而不断加强产品的创新能力以及市场的竞争力。

[参考文献]

- [1]孙润泽.自动化控制理论下的机械设计优化方法[J].自动化应用,2025,66(13):28-30.
- [2]高龙,陈涛,宋栓军,等.基于 NSGA-II算法的变螺距转子动平衡设计方法[J].真空,2025,62(6):39-46.
- [3]李金龙.基于智能自动化技术的机械设计研究[J].模具制造,2023,23(11):178-180.

作者简介：王子宇（2000—），男，汉族，河北省邢台人，售前技术现职称：工程师，2023 年 6 月毕业于北华航天工业学院，本科，目前主要从事售前技术交流工作。