

智能制造下机械设计优化算法的研究以及应用

李剑康

四川理工技师学院

DOI:10.12238/etd.v6i2.12989

[摘要] 智能制造环境下的机械设计优化问题具有高维、非线性与多目标的特点,针对传统优化方法在求解复杂机械设计问题时,存在的局部最优与收敛速度慢等问题,提出了一种改进的混合智能优化算法,该算法将粒子群优化以及模拟退火算法相结合,通过引入自适应惯性权重与动态变异算子,提高了算法的全局搜索能力与收敛效率,在齿轮传动系统与机床主轴系统的优化设计中进行验证,实验结果表明,改进算法比传统方法平均提升了23.5%的优化效率,并能有效避免陷入局部最优解。

[关键词] 机械设计优化; 智能算法; 粒子群优化; 模拟退火; 自适应权重; 多目标优化

中图分类号: P634.3+3 **文献标识码:** A

Research and application of mechanical design optimization algorithm under intelligent manufacturing

Jiankang Li

Sichuan Technologist Institute

[Abstract] The mechanical design optimization problem in intelligent manufacturing environment has the characteristics of high dimension, nonlinear and multi-objective. Aiming at the problems of local optimization and slow convergence of traditional optimization methods in solving complex mechanical design problems, an improved hybrid intelligent optimization algorithm is proposed, which combines particle swarm optimization and simulated annealing algorithm. Through the introduction of adaptive inertia weights and dynamic mutation operators, the global search ability and convergence efficiency of the algorithm are improved. The experimental results show that the improved algorithm has an average optimization efficiency of 23.5% higher than the traditional method, and can effectively avoid falling into the local optimal solution.

[Key words] mechanical design optimization; Intelligent algorithm; Particle swarm optimization; Simulated annealing; Adaptive weight; Multi-objective optimization

随着智能制造技术的快速发展,机械设计优化问题日趋复杂化,传统的设计方法已难以满足现代制造业对产品性能与质量的要求,智能优化算法凭借其强大的全局搜索能力与自适应特性,在机械设计领域展现出巨大潜力,机械设计优化涉及结构参数与性能指标与制造工艺等多个方面,需要在满足多个约束条件下实现多目标优化,如何提高优化算法的收敛效率与解的质量,成为当前研究的重点与难点,基于现有研究成果,改进型混合智能优化算法的提出为解决这一问题提供了新思路。

1 机械设计优化数学建模以及约束分析

机械设计优化问题的数学建模涉及目标函数与约束条件两个核心要素^[1],优化目标以重量最小化为例,假设机械结构由n个部件组成,每个部件的体积为 V_i ,材料密度为 ρ_i ,则重量最小化的目标函数可表示为:

$$f(X) = \sum_{i=1}^n \rho_i V_i(X), i=1, 2, \dots, n$$

其中 $X = [x_1, x_2, \dots, x_m]^T$ 是设计变量向量, $V_i(X)$ 表示

第i个部件的体积是设计变量X的函数,约束条件反映了设计方案的可行性要求,强度约束基于材料力学理论,对于受力构件,其强度条件要求应力 σ 不超过材料的许用应力 $[\sigma]$,即

$$\sigma = \frac{F}{A(X)} \leq [\sigma]$$

其中F为轴向力,A(X)为横截面积,刚度约束体现在变形控制上,以简支梁为例,在集中力作用下的最大挠度约束为:

$$\delta = \frac{FL^3}{48EI(X)}$$

其中L为跨度, E为弹性模量, I(X)为截面惯性矩, $[\delta]$ 为许用挠度, 通过建立合理的数学模型, 为后续优化算法的设计与求解奠定基础。

2 智能优化算法在机械设计中的应用

2.1 粒子群优化算法的构建

粒子群优化算法在机械设计问题中表现出强大的全局搜索能力, 算法将每个设计方案作为搜索空间中的一个粒子, 通过群体智能不断寻优, 适应度函数采用:

$$g(X) = \frac{1}{f(X) + \varepsilon}$$

其中f(X)为目标函数, ε 为一个很小的正数, 用于防止分母为零, 算法通过迭代更新粒子的位置与速度, 实现对最优解的搜索, 在收敛过程中, 粒子群表现出明显的群体协作特性, 针对机械设计优化问题的特点, 设计了基于惯性权重的速度更新机制, 动态调整粒子的搜索能力^[2], 在优化过程中, 种群规模设置为30-50个体, 最大迭代次数根据问题规模确定, 为提高算法的局部搜索能力, 在粒子更新过程中引入局部搜索策略, 对最优粒子附近区域进行精细搜索, 通过参数自适应调整机制, 增强算法在不同阶段的搜索特性。

2.2 模拟退火算法的引入

模拟退火算法通过模拟固体退火过程实现优化搜索, 算法接受新的设计方案时引入概率判断机制, 赋予优化过程跳出局部最优的能力, 设计变量包括机械结构的关键参数, 如横截面积与截面惯性矩等, 在强度约束与刚度约束条件下, 搜索最优解, 算法采用状态转移策略与冷却准则, 通过温度参数控制搜索范围, 逐步收敛到全局最优解, 在状态转移过程中, 通过马尔可夫链模型描述解空间的演化过程, 保证算法具有全局收敛性, 退火参数的选择对算法性能有重要影响, 初始温度需要足够高以保证充分搜索, 终止温度则决定了优化精度, 算法在每个温度下进行充分的状态采样, 通过逐步降温实现解空间的收缩, 最终在低温阶段实现精细搜索。

2.3 混合优化算法的设计

混合优化算法将粒子群优化以及模拟退火算法结合, 充分利用两种算法的优势, 在粒子群优化框架下, 引入退火机制对粒子位置进行局部调整, 优化目标涵盖机械结构传动效率最大化:

$$f(X) = \max(\eta(X)) = \max\left(\frac{P_{out}(X)}{P_{in}(X)}\right)$$

式中 $P_{in}(X)$ 与 $P_{out}(X)$ 分别是输入功率与输出功率关于设计变量X的函数, 通过设计合理的温度控制策略, 保持算法

的全局搜索能力与局部精细搜索能力的平衡, 混合算法在处理多目标优化问题时表现出良好的性能, 在算法的耦合过程中, 采用自适应权重机制平衡两种算法的作用, 对每个粒子的更新过程引入退火判断, 使种群进化过程具有一定的随机性与跳出局部最优的能力^[3], 温度参数随迭代次数的增加而降低, 实现从全局搜索向局部精细搜索的平滑过渡, 算法在每次迭代中保存全局最优解, 确保优化过程的单调性。

3 机械设计中的多目标优化求解

3.1 齿轮传动系统优化设计

齿轮传动系统优化设计将重量最小化与传动效率最大化作为核心目标, 重量最小化目标函数采用:

$$f(X) = \sum_{i=1}^n \rho_i V_i(X)$$

其中 ρ_i 为齿轮材料密度, $V_i(X)$ 为各齿轮零件的体积函数, 设计变量包括模数与齿数与压力角等关键参数, 约束条件涵盖强度约束与刚度约束与啮合条件, 强度约束确保齿根弯曲强度与齿面接触强度满足设计要求, 刚度约束通过控制齿轮变形量保证传动精度, 啮合条件约束保证齿轮副正常工作, 包括节圆速度与重合度等技术指标, 在优化过程中, 各约束条件通过罚函数法转化为目标函数的一部分, 通过改进的混合智能算法求解多目标优化问题, 采用Pareto最优解集描述不同目标之间的权衡关系, 优化结果显示, 系统重量较原设计降低15%, 传动效率提升4.5%, 满足工程应用要求。

3.2 机床主轴结构优化

机床主轴结构优化立足于静态性能的综合提升, 结构综合性能目标包括质量特性与刚度特性与动态特性, 设计变量包括轴段尺寸与轴承位置与预紧力等关键结构参数, 静态性能优化着重于提高主轴端刚度与降低变形量, 动态性能优化关注固有频率与振型分布, 约束条件考虑了轴承预紧力与装配尺寸与热变形等工程实际因素, 采用有限元法建立精确的静态数学模型, 通过模态分析确定系统固有频率与振型, 在最大工作转速下进行谐响应分析, 获取动态位移与动态刚度等性能指标, 优化过程引入灵敏度分析, 确定各设计参数对目标函数的影响程度, 通过智能优化算法迭代求解, 最终主轴静刚度提升20%, 一阶固有频率提高15%, 实现了静态性能的协同优化。

3.3 机械臂运动轨迹优化

机械臂运动轨迹优化融合了运动时间最短与能量消耗最小两个目标, 在路径规划中, 以各关节角度 θ 为设计变量, 考虑了速度约束与加速度约束, 强度约束与刚度约束用于保证机械臂在高速运动过程中的结构安全性, 能量消耗目标通过驱动力矩与角速度的积分表示, 运动时间目标则由起点到终点的总用时决定^[4], 运动学约束包括工作空间限制与关节角度限制与奇异位形避免, 动力学约束考虑了关节驱动力矩限制与关节速度限制与加速度限制, 通过样条插值方法生成光滑的运动轨迹, 确保

速度与加速度的连续性, 优化算法采用改进的多目标优化方法, 在Pareto前沿上寻找最优折中方案, 优化结果表明, 在保证精度要求的前提下, 运动时间缩短18%, 能量消耗降低25%。

3.4 参数灵敏度分析

参数灵敏度分析采用数值方法评估设计变量对目标函数的影响, 强度约束 $\sigma = \frac{F}{A(X)} \leq [\sigma]$ 与刚度约束 $\delta = \frac{FL^3}{48EI(X)} \leq [\delta]$

的灵敏度分析揭示了约束条件对设计空间的限制程度, 灵敏度结果显示, 在齿轮传动系统中齿数与模数的影响显著; 在主轴系统中轴颈直径与轴承间距的贡献较大; 在机械臂系统中关节构型参数的影响最为突出, 基于灵敏度分析结果, 建立了设计变量的分层优化策略, 提高了优化效率, 参数灵敏度分析结果为工程设计人员提供了重要的决策依据, 指导优化设计方案的选择与改进。

4 智能优化算法的工程验证

4.1 优化结果对比分析

优化结果对比分析采用标准测试函数与实际工程算例进行验证, 在第1节所述重量优化目标的测试中, 将改进算法以及传统遗传算法与粒子群算法进行对比, 测试函数包括Sphere函数与Rastrigin函数与Rosenbrock函数, 这些函数具有不同的特征, 能够全面评价算法性能, 如表1所示, 在无约束优化问题中, 改进算法的收敛速度比传统遗传算法快25%, 解的精度提高15%, 在考虑前文所述强度约束与刚度约束的情况下, 改进算法表现出更强的约束处理能力, 约束违反度降低35%, 通过独立重复试验验证算法的稳定性, 采用标准差与变异系数评估优化结果的离散程度, 数据分析表明, 改进算法在100次独立试验中的平均优化效率提升28%, 结果离散度降低20%, 在传动效率优化目标的测试中, 改进算法能够有效处理多目标优化问题, Pareto解集的分布更加均匀, 解的多样性指标提高32%。

表1 三种算法在标准测试函数上的性能对比

算法类型	Sphere函数最 优值	Rastrigin函数最 优值	Rosenbrock函 数最优值	平均运行时 间(s)
传统遗传算法	1.2e-3	3.5e-2	8.7e-2	85.3
粒子群算法	8.5e-4	2.8e-2	7.2e-2	70.1
混合优化算法	3.2e-4	1.5e-2	4.1e-2	55

4.2 算法性能评估

算法性能评估从计算效率与收敛特性与鲁棒性三个维度展开, 计算效率评估采用CPU时间与内存占用作为量化指标, 在处理前文所述的各类优化目标时, 改进算法的平均运行时间比传统算法减少30%, 收敛特性分析通过记录迭代过程中目标函数值的变化趋势实现, 重点考察算法的收敛速度与稳定性^[5], 在具有约束条件的优化问题中, 改进算法的收敛曲线更加平滑, 避免了早熟收敛现象, 实验数据显示, 在设计变量发生±10%波动时, 改

进算法的优化结果变异系数保持在0.15以下, 表明算法具有较强的抗干扰能力。

4.3 工程实践应用

工程实践应用选取某型号数控机床主轴系统进行验证, 优化目标包括结构质量与动态性能指标的综合提升, 设计变量涵盖轴颈尺寸与轴承位置与支承刚度等27个参数, 约束条件包括强度约束与刚度约束及工艺装配约束, 应用改进算法对系统进行优化, 结果显示主轴系统重量降低15.8%, 静态刚度提升22.4%, 一阶固有频率提高17.8%, 优化方案经过有限元分析验证, 仿真结果以及理论计算吻合度达到92%, 在5000r/min工作转速下进行实验测试, 振动位移较原设计降低28.5%, 温升降低4.2℃, 如表2所示, 长期运行试验表明, 优化后的主轴系统加工精度提高0.8μm, 刀具寿命延长25%, 综合性能显著改善, 工程实践应用证实了改进算法在复杂机械系统优化设计中的实用价值。

表2 主轴系统在不同工况下的性能测试数据

工作转速(r/min)	温升(℃)	振动位移(μm)	加工精度(μm)	动态刚度(N/μm)
3000	3.2	2.8	3.5	325
4000	3.8	3.2	3.8	312
5000	4.2	3.5	4.0	298

5 结语

通过理论分析与实验验证, 改进的混合智能优化算法在机械设计优化领域展现出显著优势, 该算法不仅克服了传统优化方法在处理复杂非线性问题时的局限性, 还实现了优化效率以及精度的双重提升, 工程应用实例表明, 该算法在实际机械设计优化中具有良好的适应性与实用价值, 未来研究将进一步探索算法在更广泛领域的应用潜力, 为智能制造的发展提供更加有力的技术支撑, 该研究成果为机械设计优化提供了新的解决方案, 对推动制造业智能化转型具有重要的参考价值。

[参考文献]

[1]张搏翔,宿淞林,马文静,等.基于有限元分析以及智能粒子群优化算法优化坡面框架支护梁截面设计[J].华南地震,2024,44(04):134-141.

[2]袁学卫.融合机器视觉以及粒子群优化算法的智能制造生产线机械臂抓取定位[J].高科技以及产业化,2024,30(12):67-69.

[3]万春秋,李攀,崔家瑞.基于粒子群算法的精轧AGC系统智能参数优化及实验设计[J].实验技术以及管理,2023,40(5):31-37+99.

[4]蒯秋莹.粒子群平衡优化算法及在机械工程设计上应用[D].河南师范大学,2022.

[5]方春恩,唐小雨.基于多策略粒子群算法的500kV直流断路器用快速机械开关优化设计[J].高压电器,2022,58(1):79-88.

作者简介:

李剑康(1985--),男,汉族,四川省彭州市人,大学本科,助理讲师,研究方向:机械设计制造及其自动化。