

DOI: 10.7652/xjtuxb201906006

改进的 6σ 设计的螺旋锥齿轮 加工参数反调修正方法

彭山东^{1,2}, 丁撼^{1,2}, 唐进元^{1,2}

(1. 中南大学高性能复杂制造国家重点实验室, 410083, 长沙; 2. 中南大学机电工程学院, 410083, 长沙)

摘要: 针对螺旋锥齿轮传统加工参数反调过程中存在的多个加工参数之间的耦合作用难以控制、求解的反调量无实际意义等问题,提出了改进的 6σ 设计的螺旋锥齿轮加工参数反调修正计算方法。该方法考虑精确齿面几何形貌与齿面接触性能的协调优化,建立了螺旋锥齿轮形性协同制造的多目标反调优化(MOO)模型,计算了接触点位置处齿面误差对加工参数的敏感性系数;根据敏感性系数求得对齿面误差影响较大的加工参数的反调修正量;利用加工参数反调量,通过加载接触分析(LTCA)计算得到齿面加载接触性能评价项,减少了多个加工参数之间不必要的耦合作用对齿面接触性能的影响。计算结果表明:与不考虑敏感性系数的参数反调方法相比,该方法求解的齿面 ease-off 的最大值和最小值均至少减小 $2\ \mu\text{m}$,且齿面接触性能评价项都满足给定的要求,进一步证明了该方法的可靠性与实用性。

关键词: 螺旋锥齿轮;协同制造;多目标反调优化

中图分类号: TH132 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2019)06-0035-09

Corrected Calculation of Machine Settings for Spiral Bevel and Gears Using an Improved 6σ Method

PENG Shandong^{1,2}, DING Han^{1,2}, TANG Jinyuan^{1,2}

(1. State Key Laboratory of High Performance Complex Manufacturing, Central South University, Changsha 410083, China;

2. School of Mechanical and Electrical Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: An inverse calculation method of correction parameters for machine settings based on the design for 6σ is proposed to focus on the problem that the coupling among parameters for machine settings is difficult to control in the process of correction for spiral bevel gears and the resulting correction parameters have no practical significance. The method considers the coordination optimization between the precise tooth surface geometry and the tooth contact performance, and establishes a multi-objective optimization (MOO) model of collaborative manufacturing considering both geometric and physical performance for spiral bevel gears. The sensitivity coefficient of the tooth surface error at contact points to the machining settings is calculated, and then the sensitivity coefficient is used to obtain inverse corrections for the machining parameters that have great influence on the tooth surface error. Finally, the inverse corrections for machining parameters are used to obtain the loaded tooth contact performance through the loaded tooth contact analysis (LTCA), and the influence of unnecessary coupling

收稿日期: 2018-12-27。 作者简介: 彭山东(1994—),男,硕士生;唐进元(通信作者),男,教授,博士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(51535012, U1604255);湖南省重点研发计划资助项目(2016JC2001)。

网络出版时间: 2019-03-21

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20190320.1332.006.html>

among machine settings on the tooth contact performance is reduced. The calculation results and a comparison with the correction method of machine tool settings without considering the sensitivity coefficient show that both the maximum value and the minimum value of the ease-off obtained by the proposed method are reduced by at least $2\text{ }\mu\text{m}$, and the loaded tooth contact performance items meet given requirements, which verifies the reliability and practicability of the proposed method.

Keywords: spiral bevel gears; collaborative manufacturing; multi-objective modification optimization

螺旋锥齿轮由于具有承载能力大、传动比大、重合度高且能传递空间相交轴和交错轴之间的动力等特点,成为航空航天、汽车、工程机械等领域中动力传递的关键部件。螺旋锥齿轮的形状和性能对设备的使用寿命甚至安全性能有着至关重要的影响^[1],因此关于螺旋锥齿轮的形性协同设计与制造是很有必要的。Artoni 和 Gabiccini 考虑了齿面接触印痕的系统优化,并且基于齿面 ease-off 修正研究了传动误差的变化规律^[2];Ding 等提出了多目标函数优化系统,研究了不确定载荷对螺旋锥齿轮加载接触性能的影响^[3-6];Deng 等通过将齿轮制造技术与网络、信息和管理相结合,建立了基于网络的螺旋锥齿轮制造模型^[7]。随着螺旋锥齿轮技术的发展,形性协同制造技术已经通过现代信息和自动化技术相关联而得到快速发展。Yang 等利用 web 服务技术提出了一种新颖的信息集成服务平台,可为齿轮的网络化制造提供更好的服务和支持^[8-9];Fung 等通过将质量功能部署(QFD)、层次分析和模糊集理论的原理融合到混合系统中,可以确定齿轮设计的目标^[10]。但是,由于螺旋锥齿轮形性协同制造系统涉及到实际齿轮加工、真实齿轮测量、加工参数反调等诸多环节,其整个系统流程繁杂而且稳定性差^[11],尤其以通用加工参数为驱动载体的智能化自动识别、控制及反馈过程,需要充分考虑整个设计流程、决策与处理、数值求解算法的协同匹配及优化关系,实现整个系统的快速高效高质量的参数驱动^[5]。因此,本文在国内外有关齿轮形性协同制造的基础上,提出了一种改进的定义-测量-分析-改进-控制(DMA-IC)框架,根据改进的参数驱动关系形成改进的 6σ 设计流程;同时引入鲁棒性多目标反调优化方法,构建螺旋锥齿轮形性协同制造的多目标反调优化(MOO)模型,利用模糊 QFD 方法^[12]将客户对齿轮产品的需求(VOC)反馈转化为相应的产品质量信息(CTQ),建立相应的质量屋(HOQ),并采用 MOO 求解方法^[13]求解 MOO 模型,得到加工参数

对接触性能的敏感性系数,结合组成敏感性系数矩阵,分析得到基于 6σ 设计的加工参数反调量,保证齿面接触性能评价项能够满足所设定的目标要求,实现整个螺旋锥齿轮形性协同制造的智能参数驱动;并以一对航空用螺旋锥齿轮为例,采用 MOO 方法对其进行基于 6σ 鲁棒性的 MOO 反调决策与优化,得到了加工参数的反调量和齿面接触性能的评价项参数值。

1 加工参数驱动决策的流程优化设计

1.1 改进的 DMAIC 框架

在基于 6σ 设计的螺旋锥齿轮形性协同制造智能参数驱动决策与处理中,存在着依托于有限元仿真齿面载荷接触分析(LTCA)平台的设计流程复杂、计算鲁棒性差等问题。传统的基于 6σ 的设计流程主要包括定义、测量、分析、设计和验证(DMADV)^[5]等过程,其流程方案繁杂且稳健性较低,一旦框架不满足产品的设计要求时,就需重新寻找问题来源进行流程并进一步优化设计流程,提高决策处理的效率和整个流程的鲁棒性。本文基于目前的 6σ 设计研究成果,区别于 DMADV 框架,给出了一个改进的基本框架,包括定义、测量、分析、改进和控制(DMAIC),如图 1 所示。在传统流程中的设计阶段给出了改进方案,主要是考虑整个参数驱动系统的智能化程度和鲁棒性,提出了基于 LTCA 的物理性能评价的直接参数驱动函数关系^[14],并且考虑了几何与物理性能协同优化的 MOO 加工参数反调过程,以此完成基于改进的 6σ 设计的螺旋锥齿轮形性协同制造方案设计。MOO 反调模型中, $f(\mathbf{M}, \mathbf{X}, \mathbf{Z})$ 描述系统响应 y ,它是初始输入信号 $\mathbf{M}$ 、设计因子 $\mathbf{X}$ 和噪声因子 $\mathbf{Z}$ 的函数。对于输入信号 $\mathbf{M}$,加工参数被用作协同制造系统过程中的设计变量。

1.2 改进的参数驱动关系

在整个螺旋锥齿轮形性协同制造的智能参数驱动决策过程中,对于性能评价项与加工参数的函数

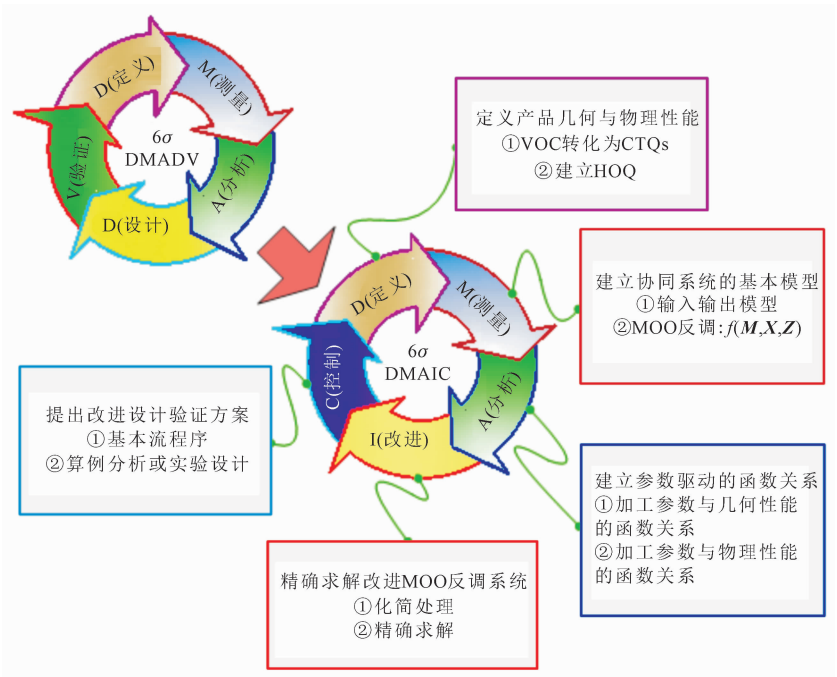


图 1 形性协同系统的改进的 6σ 设计基本框架

关系,将采用精确的函数求解方式完成其关联规律的直接参数驱动表达。首先,建立加工参数与几何性能评价项的函数关系,其参数驱动表达式为

$$f_1:\mathbf{M}^* = \arg \min \frac{1}{2} \mathbf{h}^T(\mathbf{M}) \mathbf{h}(\mathbf{M}) \quad (1)$$

式中: $\mathbf{h}$ 表示残余 ease-off 齿面形貌,是螺旋锥齿轮几何性能评价项; $\mathbf{M}$ 为初始加工参数; $\mathbf{M}^*$ 为 MOO 反调后的精确加工参数。

对于加工参数与物理性能评价项的直接参数驱动关系,本文主要利用了齿面载荷接触分析方法^[5]。如图 2 所示,建立螺旋锥齿轮的有限元模型,考虑齿面接触受力平衡与变形协调条件^[15],就可以完成齿

面物理评价项关于加工参数的函数关系表达,直接构建其多目标函数

$$\left. \begin{aligned} f_2:\mathbf{M} &\rightarrow X_2 \rightarrow C_{\text{P}_{\text{MAX}}}(\mathbf{M}) \\ f_3:\mathbf{M} &\rightarrow X_3 \rightarrow L_{\text{TE}_{\text{MAX}}}(\mathbf{M}) \\ f_4:\mathbf{M} &\rightarrow X_4 \rightarrow C_{\text{R}}(\mathbf{M}) \\ f_5:\mathbf{M} &\rightarrow X_5 \rightarrow \eta(\mathbf{M}) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: $C_{\text{P}_{\text{MAX}}}$ 是最大接触压力; $L_{\text{TE}_{\text{MAX}}}$ 是最大传动误差; C_{R} 是齿轮传动的重合度; η 是齿轮的效率。具体的多目标函数关系构建可参考文献[4-5]。

式(2)联立子目标函数 f_1 ,可以构成 5 个目标函数协同的多目标优化系统,一次完成整个产品性能评价项的直接参数驱动决策与优化。

2 改进的 6σ 设计的基本流程

为了满足螺旋锥齿轮产品的客户需求,本文提出了考虑几何与物理性能协同优化的改进的 6σ 设计方案。基于改进的 6σ 设计的螺旋锥齿轮形性协同制造基本流程如图 3 所示,与现有的基于 DMADV 框架的设计流程不同,改进的设计流程引入了 MOO 加工参数反调设计方法。提出的 MOO 加工参数反调是一个考虑接触性能和多个加工参数相互耦合作用的复杂系统^[16-17]。建立的反调模型的强烈非线性^[18]、子目标优化函数之间耦合性、迭代计算的收敛性等都将会较大程度地影响整个设计结果的鲁棒性。因此,为了保证结果数据的可靠性与

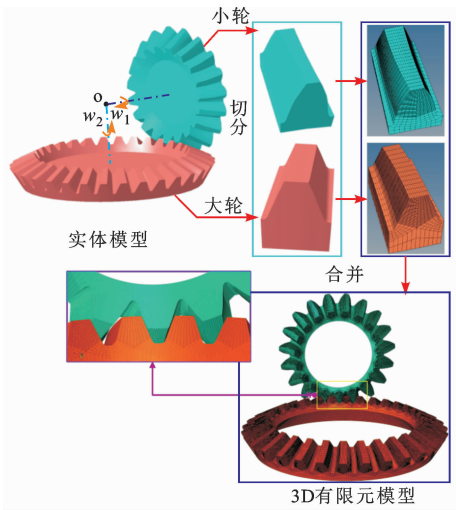


图 2 螺旋锥齿轮精确有限元模型

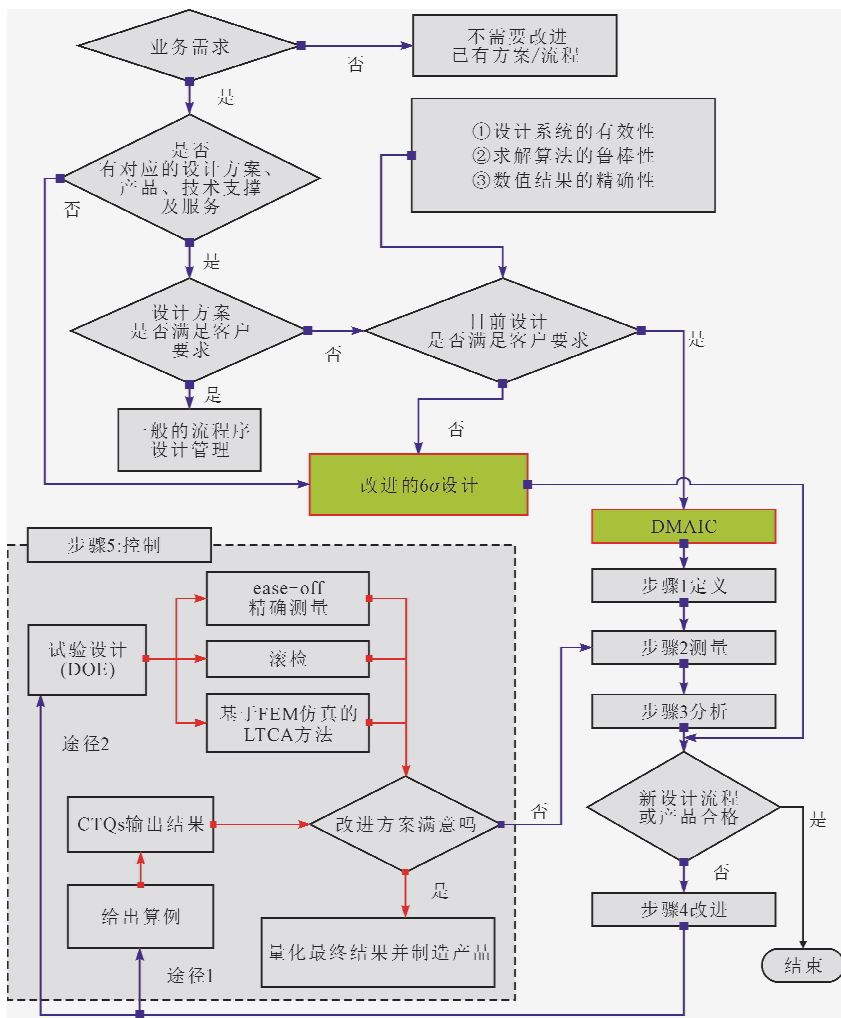


图3 基于改进的6σ设计的协同制造的参数驱动流程

精度,需提供合适的决策与优化方案,保证参数驱动设计与形性协同制造之间的关联性,必须同时满足所设定的几何和物理性能评价指标。

3 基于6σ鲁棒性MOO反调的决策与优化

在当前齿轮产品的设计与制造中,满足客户要求始终是设计者和制造者追求的目标之一。为了更好地将客户对齿轮产品的需求(VOC,设为 V_{OC})反馈转化为相应的产品质量信息(CTQ),并保证其精确性和实用性,本文采用模糊QFD的方法^[12],同时匹配基于模糊QFD的螺旋锥齿轮形性协同制造的智能参数驱动决策与优化方案。该模糊QFD过程可表示为^[19]

$$\begin{aligned} \mathbf{X}: V_{OC} \subseteq \mathbf{R} \mapsto C_{TQs} \subseteq \mathbf{R} \mapsto \mathbf{X} = \\ [X_1, X_2, X_3, X_4, X_5] = \\ [\omega_1 h_{RMSE}, \omega_2 L_{TEMAX}, \omega_3 C_{PMAX}, \omega_4 C_R, \omega_5 \eta] \end{aligned}$$

$$\text{s. t. } \begin{cases} 0 \leq h_{RMSE} \leq 2.5 \mu\text{m}, \\ 0 \leq L_{TEMAX} \leq 50 \mu\text{rad}, \\ 0 \leq C_{PMAX} \leq 1\,500 \text{ MPa}, \\ 1.2 \leq C_R \leq 2.5 \\ 90\% \leq \eta \leq 100\% \end{cases} \quad (3)$$

式中: $\omega_i (i=1, 2, \dots, 5)$ 是客户需求项的最终权重因子,可以利用在模糊期望值算子中模糊权重平均值法来确定,详细的过程可参考文献^[19]。

对于所提出的设计方法,选择以下几何和物理性能评价指标:①残余 ease-off 的均方根误差 h_{RMSE} 的最小化,是螺旋锥齿轮设计的传统几何性能目标评估项;②最大齿面接压力 C_{PMAX} 的最小化,可以提高强度、降低齿轮破坏形式的风险;③最大加载传动误差(L_{TEMAX})的最小化,可以减少齿轮传动在其主要包括噪声和振动的工况下的振动激励;④重合度 C_R 的最大化,可以提高齿轮啮合强度,降低齿轮传动的冲击频率;⑤机械效率 η 最大化,可以预测摩

擦功率损失和燃料经济性。

3.1 MOO 基本模型

螺旋锥齿轮形性协同制造的参数驱动设计中,最核心的内容就是考虑几何和物理性能的 MOO 加工参数反调。根据实际加工精度可以预设齿面 ease-off,即基本齿面与目标齿面沿法向方向的偏差值,同时考虑齿面物理性能评价项的多目标优化(MOO)方法,依次确定目标齿面,然后以机床加工参数为设计变量来考虑设计齿面与目标齿面的逼近,实际上表达的是一个齿面误差无穷小的数值优化过程,其目标函数可以表示为

$$\left. \begin{aligned} &[(L_{\text{TEMAX}}, C_{\text{PMAX}}, C_R, \eta), x] \rightarrow p_i^* = \\ &p_i^{(0)}(u, \theta, \phi_i) + n_i^{(0)}(u, \theta, \phi_i) h_i^{(0)}(u, \theta, \phi_i) \\ &[p_i^* [(L_{\text{TEMAX}}, C_{\text{PMAX}}, C_R, \eta), x] - \\ &\quad p((u, \theta, \phi_i), M_{(0)})] \cdot \\ &\quad n((u, \theta, \phi_i), M_{(0)}) = h_i \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中: μ, θ, ϕ 表示基本设计参数,包含刀具的高斯参数(μ, θ)和机床运动基本参数 ϕ ; p_i^* 为目标齿面点; $p((\mu, \theta, \phi_i), M_{(0)})$ 为理论设计齿面点; $p_i^{(0)}((\mu, \theta, \phi_i))$ 为基本齿面点, i 表示所要求的齿面误差的阶次。 $M_{(0)}$ 表示所要求解的精确的加工参数,可表示为

$$M_{(0)} = M_{(0)}^0 + \Delta M_{(0)}^0 \quad (5)$$

式中: $\Delta M_{(0)}^0$ 是加工参数的反调量; $M_{(0)}^0$ 是初始输入的加工参数。

由于方程式(4)具有强烈非线性,可以转为关于加工参数的非线性最小二乘问题

$$\begin{aligned} &M^* = \arg \min \frac{1}{2} h^T(M) h(M) \\ &\text{s. t. } F((u, \theta, \phi_i), M) = 0 \\ &\quad |h_i^{(0)}((u, \theta, \phi_i), M)| \leq \mathcal{P}, i = 1, 2, \dots, m \end{aligned} \quad (6)$$

式中: $\mathcal{P}$ 是齿面 ease-off 要求的精度阈值,一般是一个区间范围,可以人为预设或者由客户要求。

3.2 6σ 鲁棒性优化的 MOO 求解算法

本文所采用的鲁棒性优化计算方法可写成^[13]

$$\begin{aligned} &\min F(u_y(\mathbf{X}), \sigma_y(\mathbf{X})) \\ &\text{s. t. } g_i(u_y(\mathbf{X}), \sigma_y(\mathbf{X})) \leq 0, i = 1, 2, \dots, m \\ &\quad X^L + n\sigma_X \leq u_X \leq X^U - n\sigma_X \end{aligned} \quad (7)$$

式中: $\mathbf{X}$ 为设计因子; X^U 和 X^L 分别为 $\mathbf{X}$ 的上、下边界; m 为约束条件数; F 为性能评价项的均值和标准偏差的目标函数; n 为期望的 σ 水平。

针对上述提出的 MOO 基本模型,引入 6σ 鲁棒性优化设计方法,得到了基于 6σ 设计方法的 MOO 模型。为了保证结果数据的可靠性与精度,避免多

个加工参数之间的耦合作用,需要求解齿面误差对加工参数的敏感性系数矩阵。根据敏感性系数矩阵判断加工参数对齿面误差的影响大小,主要针对敏感性较大的加工参数进行择优反调修正,其中所用的敏感性系数矩阵表示为

$$J_{ij} \subseteq \mathbf{R} \rightarrow (J(x))_{ij} = \frac{\partial h_i(x)}{\partial x_j} \quad (8)$$

式中: $h_i(x)$ 表示齿面 ease-off 关于加工参数的函数; x_j 表示加工参数。基于建立的几何性能和物理性能的直接驱动关系,建立考虑形性协同的 MOO 模型,如下式

$$\begin{aligned} &f(\mathbf{M}, \mathbf{X}) = (f_1, f_2, f_3, f_4, f_5) |_{M \in [0]} \\ &\text{s. t. } \begin{cases} g_1 = h_{\text{RMSE}}(\mathbf{M}) \leq b_1^L = [b_1^L, b_1^U] \\ g_2 = C_{\text{PMAX}}(\mathbf{M}) \leq b_2^L = [b_2^L, b_2^U] \\ g_3 = L_{\text{TEMAX}}(\mathbf{M}) \leq b_3^L = [b_3^L, b_3^U] \\ g_4 = C_R(\mathbf{M}) \leq b_4^L = [b_4^L, b_4^U] \\ g_5 = \eta(\mathbf{M}) \leq b_5^L = [b_5^L, b_5^U] \end{cases} \end{aligned} \quad (9)$$

$$\sigma_y |_{y \in [y_1, y_2, \dots, y_p]} \leq [\sigma_i^L, \sigma_i^U], i = 1, 2, \dots, p$$

式中: σ_y 为设计性能响应 y 的标准偏差,可由下式计算^[12]

$$\begin{aligned} &\sigma_y = \left(\left(\sum_{i=1}^n \left(\frac{d\mathbf{Y}}{dX_i} \right)^2 \right) \sigma_{X_i}^2 + \right. \\ &\quad \left. \frac{1}{2} \left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{d^2 \mathbf{Y}}{dX_i dX_j} \right) (\sigma_{X_i})^2 (\sigma_{X_j})^2 \right)^{-1/2} \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} &\mathbf{Y} = y\mathbf{Y} + \frac{d\mathbf{Y}}{d\mathbf{X}} \Delta \mathbf{X} \frac{1}{2} (\Delta \mathbf{X})^T \frac{d^2 \mathbf{Y}}{d\mathbf{X}^2} \Delta \mathbf{X} \left\{ \right. \\ &\quad \mu_y = Y(\mu_y) + \frac{1}{2} \left(\sum_{i=1}^n \frac{d^2 \mathbf{Y}}{dX_i^2} \right) (\sigma_{X_i})^2 \left. \right\} \end{aligned} \quad (11)$$

其中 μ_y 是性能响应 y 的平均值, σ_{X_i} 和 σ_{X_j} 为第 i 个和第 j 个设计变量的标准偏差。

对于多目标参数反调优化问题,本文采用列文博格-马跨尔特(L-M)算法^[20]进行求解,其迭代过程表达为

$$\begin{aligned} &\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{x}_k + \mathbf{d} \\ &\left. \begin{aligned} &\mathbf{g}_k = \mathbf{J}(\mathbf{x}_k)^T \mathbf{h}(\mathbf{x}_k) \\ &\mathbf{G}_k = \mathbf{J}(\mathbf{x}_k)^T \mathbf{J}(\mathbf{x}_k) \end{aligned} \right\} \Rightarrow (\mathbf{G}_k + u_k \mathbf{I}) \mathbf{d}_k^{\text{LM}} = -\mathbf{g}_k \\ &\Rightarrow \mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{x}_k - [\mathbf{J}(\mathbf{x}_k)^T \mathbf{J}(\mathbf{x}_k) + u_k \mathbf{I}] \cdot \mathbf{J}(\mathbf{x}_k)^T \mathbf{h}(\mathbf{x}_k) \end{aligned} \quad (12)$$

式中: u_k 是阻尼系数; $\mathbf{d}_k^{\text{LM}}$ 是迭代步长。

整个设计求解过程可以描述如下。

步骤 1 令 $K=0$;

步骤 2 根据客户需求建立质量屋(HOQ),将 VOC 转化为 CTQs;

步骤 3 建立如方程式(9)所示的 MOO 系统,并设

定对应的目标约束条件；

步骤 4 利用 L-M 算法求解 MOO 模型来获得对应的最优解 $\mathbf{M}_K \in \mathbf{P}_S$ 和目标函数向量 $\mathbf{f}_K^{[2]} = \mathbf{f}_K^{[2]}(\mathbf{M}_K)$ ；

步骤 5 验证 $\mathbf{M}_K \in \mathbf{P}_S$ 的实用性，通过与对应的 CTQs 的设定要求值比较；

步骤 6 通过求解计算来获得其他 M 个数值解；

步骤 7 给出所有 $M+1$ 个解来匹配 CTQs。如果他们其中一个解是符合 6σ 要求的，则可用最终的最优解 $\mathbf{M}_K \in \mathbf{P}_F$ 作为最终的输出响应 $\mathbf{M}_{(0)}^*$ ，并终止整个 MOO 过程。否则，令 $K=K+1$ ，搜寻最满意的参考点 $\mathbf{f}_{K_i}^{[2]}$ ，然后 $\mathbf{f}_{K_i}^{[2]} \rightarrow \mathbf{f}_{K+1}^{[2]}$ ，并返回步骤 3。

4 改进的 6σ 设计的螺旋锥齿轮加工参数反调计算

4.1 齿坯几何基本设计

本文以一对航空用螺旋锥齿轮为例，采用的齿坯设计参数和机床加工参数见表 1、表 2，其中将加工参数作为整个优化参数驱动过程的主要输入信号。考虑到几何与物理性能要求，采用提出的模糊 FQD 方法来将客户对齿轮的产品需求转换成产品质量信息，并以最终的几何与物理性能评价项作为

表 1 齿坯设计几何参数

基本几何参数	数值	
	小轮	大轮
旋向	左旋	右旋
齿数	47	55
齿宽/mm	19	19
外锥距/mm	108.52	108.52
齿高/mm	6.61	6.61
节锥角/(°)	40.31	49.29
顶锥角/(°)	42.37	51.12
根锥角/(°)	38.48	47.23
螺旋角/(°)	5	5

表 2 螺旋锥齿轮通用机床加工参数

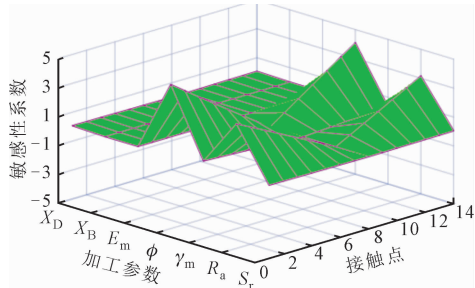
通用加工参数	数值(大轮)	数值(小轮)	
		凹面	凸面
滚比 R_a	1.315	1.561	1.528
径向刀位 S_r /mm	119.566	144.272	159.893
垂直轮位 E_m /mm	0	-0.36	0.15
床位 X_B /mm	0	-0.32	-0.27
水平轮位 X_D /mm	0	0.52	0.43
根锥安装角 γ_m /(°)	47.23	38.48	38.48
基本摇台角 ϕ /(°)	39.411	43.975	37.696

性能目标驱动整个流程的求解。从动轮所受的扭矩载荷为 $257.693\text{ N}\cdot\text{m}$ ，从动轮转速为 $12\,767\text{ r/min}$ 。

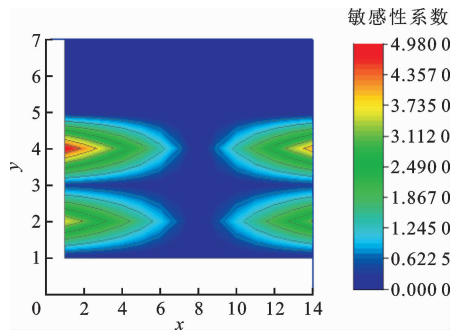
4.2 计算结果及分析

为了节约计算时间并兼顾反调效果，本文主要针对接触点位置的参数进行反调修正。根据齿轮的加工方法不同，主要考虑径向刀位、滚比、床位、基本摇台角等加工参数的反调修正。基于提出的参数驱动决策与优化方法，计算各接触点位置时各加工参数对齿面 ease-off 的敏感性系数，组合得到各加工参数对齿面误差的敏感性系数矩阵。表 3 给出了接触点位置的加工参数的敏感性系数。根据提出的基于 6σ 鲁棒性优化的 MOO 反调求解算法，计算得到的精确加工参数和相应的加工参数反调量数值结果见表 4。

图 4 给出了齿面接触点对加工参数的敏感性系数的拓扑图和分布图。分析对比各个加工参数敏感性系数可知，基本摇台角的敏感性系数最大，最大值接近 5，滚比和机床安装根锥角的敏感性系数次之。因此，为了避免多个加工参数之间的耦合作用带来不必要的影响，降低反调计算的非线性，根据敏感性系数矩阵分析结果可知，主要针对基本摇台角、滚比、机床安装根锥角 3 个加工参数进行二次优化反调。通过二次优化反调后，可以得到优化反调的加工参数反调量，其参数的优化反调量见表 4。



(a) 拓扑图



(b) 分布图

图 4 齿面接触点的敏感性系数

表 3 接触点位置处各加工参数的敏感性系数

接触点	敏感性系数						
	径向刀位	滚比	根锥安装角	基本摇台角	垂直轮位	床位	水平轮位
1	0.056 26	3.618 19	0.366 41	4.967 97	0.004 46	4.514 96	0.067 76
2	0.048 33	3.107 31	0.317 31	4.242 12	0.004 19	3.869 97	0.058 03
3	0.040 36	2.594 21	0.267 14	3.522 05	0.003 79	3.224 97	0.048 31
4	0.032 36	2.079 02	0.215 88	2.807 51	0.003 27	2.579 98	0.038 61
5	0.024 32	1.561 87	0.163 54	2.098 28	0.002 63	1.934 98	0.028 92
6	0.016 24	1.042 89	0.110 11	1.394 12	0.001 87	1.289 99	0.019 26
7	0.008 13	0.522 22	0.055 59	0.694 77	0.000 99	0.644 99	0.009 62
8	0.012 05	0.511 25	0.055 64	0.692 45	0.001 05	0.644 73	0.009 61
9	0.008 16	0.523 64	0.056 67	0.690 45	0.001 11	0.643 99	0.009 60
10	0.016 36	1.048 57	0.114 41	1.376 83	0.002 35	1.289 99	0.019 18
11	0.024 58	1.574 66	0.173 21	2.059 38	0.003 70	1.934 98	0.028 74
12	0.032 83	2.101 77	0.233 06	2.738 36	0.005 16	2.579 98	0.038 28
13	0.041 10	2.629 77	0.293 94	3.413 99	0.006 73	3.224 97	0.047 79
14	0.049 40	3.158 55	0.355 85	4.086 51	0.008 41	3.869 97	0.057 29

表 4 基于 6σ 鲁棒性优化的精确加工参数和反调量

加工参数	初始值	参数反调量	参数反调精确值	优化参数反调量	优化参数反调精确值
径向刀位 S_r/mm	144.272	-0.011 52	144.260 00		
滚比 R_a	1.561	-0.633 94	0.927 00	-0.083 35	1.477 65
根锥安装角 $\gamma_m/(\text{^\circ})$	38.480	-0.267 32	38.212 68	-0.088 36	38.391 64
基本摇台角 $\phi/(\text{^\circ})$	43.975	0.498 42	44.473 00	0.230 49	44.205 00
垂直轮位 E_m/mm	-0.360	-0.026 12	-0.386 00		
床位 X_B/mm	-0.320	0.000 25	-0.319 75		
水平轮位 X_D/mm	0.520	-0.001 61	0.518 40		

4.3 MOO 方法求解结果评价

通过上文提出的求解算法可进行物理性能和几何性能评价项的评价。图 5a 给出了参数反调和优化参数二次反调后的齿面 ease-off,即目标齿面与基本齿面之间的距离偏差,设为 H ,参数反调后的 H 最大值为 $55.644\text{ }\mu\text{m}$,最小值为 $-47.69\text{ }\mu\text{m}$;优化参数反调后的 H 最大值为 $53.465\text{ }\mu\text{m}$,最小值为 $-45.83\text{ }\mu\text{m}$ 。优化参数二次反调后的齿面接触点位置的残余 ease-off(h_{RMSE})如图 5b 所示,其中,最大残余 ease-off 为 $2.178\text{ }\mu\text{m}$,最小值为 $-1.870\text{ }\mu\text{m}$ 。此目标齿面能反映出足够的齿面精度,因为比铣削加工精度更高的磨削加工的精度量级一般为 $50\text{ }\mu\text{m}$ ^[21]。与上文客户所给的目标值对比可知,参数反调和优化参数反调都能达到提高齿面精度的作用且都满足设计预设的目标值;由于优化参数二次反调在普通参数反调的基础上优先考虑敏感性系数

较大的加工参数进行反调,避免了较多个加工参数之间的耦合作用影响,优化参数反调的效果比参数反调的效果好。总体来说,通过再次的优化参数反调修正,残余误差精度有了很好的提高。

图 6 给出了 MOO 方法求解后的物理性能评价项。如图 6a 所示,齿面接触区域位于一个合理范围内,且最大接触压力 C_{PMAX} 达到了 978.25 MPa ,主要分布区域呈长条形椭圆分布,且沿齿宽方向呈现对角倾斜状态,表明了齿面具有足够的接触强度。在图 6b 中,最大载荷传动误差 L_{TEMAX} 为 $44.685\text{ }\mu\text{rad}$,且整个传动误差变化平稳,传动噪声和振动性能好。如图 6c 所示,重合度 C_R 为 1.63 。另外,机械效率 η 可以通过计算公式求得为 95.32% 。通过与上文中提出的所要求的目标数值相比较,都达到了满意的设计要求^[22]。

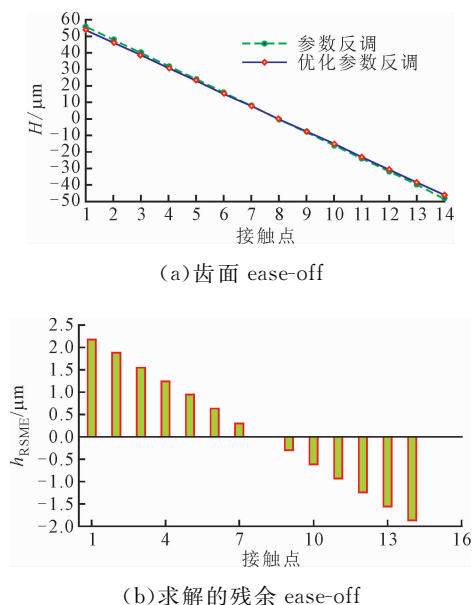


图5 MOO方法求解后的几何性能评价项

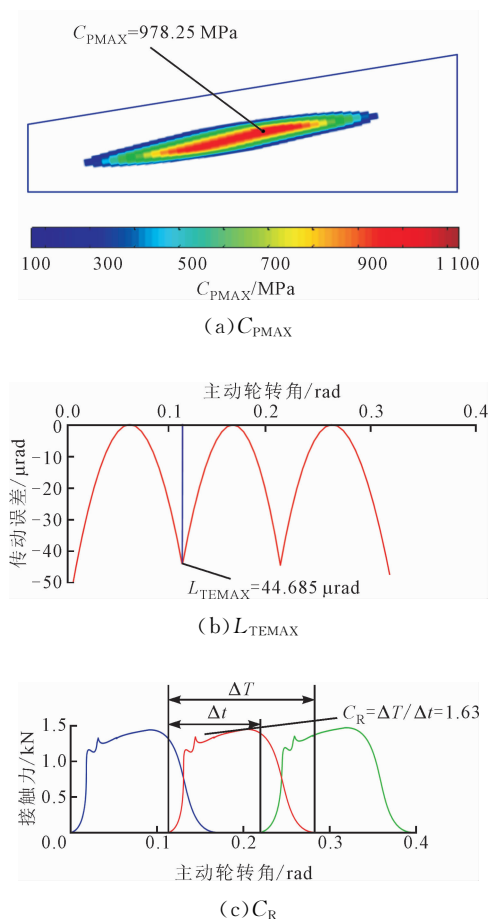


图6 MOO方法求解后的物理性能评价项

5 结论

(1) 基于现有 6σ 设计流程, 提出了一种改进的 DMAIC 框架, 即定义-测量-分析-改进-控制框架; 基

于改进的参数驱动关系, 构建齿面评价项的多目标函数, 完成产品性能的直接参数驱动决策与优化。

(2) 采用模糊 QFD 的方法, 将客户对齿轮产品的需求转化为相应的产品质量信息, 建立基本的 MOO 模型, 引入 6σ 鲁棒性优化设计方法, 得到考虑形性协同的鲁棒性优化的 MOO 模型, 采用提出的求解算法, 计算加工参数反调量和优化加工参数二次反调量, 根据计算的反调量, 通过 LTCA 方法求解得到齿面加载接触性能。

(3) 以一对航空用螺旋锥齿轮为例, 利用所提方法计算得到 MOO 加工参数反调量, 根据反调量获得最终的齿面评价项 L_{TMAX} 、 C_{PMAX} 、 C_R 、 h_{RSMF} 等, 与客户提出的设计要求对比验证, 较好地满足了设计要求, 证明了设计方法的正确性, 可为将来的螺旋锥齿轮形性协同制造及智能制造提供技术支撑。

参考文献:

- [1] 曾韬. 螺旋锥齿轮设计与加工 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 1989: 47-85.
- [2] ARTONI A, GABICINI M, GUIGGIANI M. Optimization of the loaded contact pattern in hypoid gears by automatic topography modification [J]. Journal of Mechanical Design, 2010, 131(1): 011008.
- [3] DING Han, TANG Jinyuan, SHAO Wen, et al. Optimal modification of tooth flank form error considering measurement and compensation of cutter geometric errors for spiral bevel and hypoid gears [J]. Mechanism and Machine Theory, 2017, 118: 14-31.
- [4] DING Han, TANG Jinyuan, ZHONG Jue, et al. A hybrid modification approach of machine-tool setting considering high tooth contact performance in spiral bevel and hypoid gears [J]. Journal of Manufacturing Systems, 2016, 41: 228-238.
- [5] SHAO Wen, DING Han, TANG Jinyuan, et al. A data-driven optimization model to collaborative manufacturing system considering geometric and physical performances for hypoid gear product [J]. Robotics and Computer Integrated Manufacturing, 2018, 54: 1-16.
- [6] DING Han, TANG Jinyuan, ZHOU Yuansheng, et al. A multi-objective correction of machine settings considering loaded tooth contact performance in spiral bevel gears by nonlinear interval number optimization [J]. Mechanism & Machine Theory, 2017, 113: 85-108.
- [7] DENG Jing, LI Jubo, DENG Xiaozhong. A network-based manufacturing model for spiral bevel gears [J].

- Journal of Intelligent Manufacturing, 2018(4): 1-15.
- [8] YANG Jianjun, LI Jubo, DENG Xiaozhong, et al. A web services-based approach to develop a networked information integration service platform for gear enterprise [J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2012, 23(5): 1721-1732.
- [9] LAN Hongbo, DING Yucheng, HONG Jun, et al. A web-based manufacturing service system for rapid product development [J]. Computers in Industry, 2004, 54(1): 51-67.
- [10] FUNG R Y K, POPPLEWELL K, XIE J. An intelligent hybrid system for customer requirements analysis and product attribute targets determination [J]. International Journal of Production Research, 1998, 36(1): 13-34.
- [11] DING Han, WAN Zhigang, ZHOU Yuansheng, et al. A data-driven programming of the human-computer interactions for modeling a collaborative manufacturing system of hypoid gears by considering both geometric and physical performances [J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2018, 51: 121-138.
- [12] WU J, SHANGGUAN W B. Robust optimization design method for powertrain mounting systems based on six sigma quality control criteria [J]. International Journal of Automotive Technology, 2010, 11(5): 651-658.
- [13] KOCH P N, YANG R J, GU L. Design for six sigma through robust optimization [J]. Structural and Multi-disciplinary Optimization, 2004, 26(3/4): 235-248.
- [14] VAIDYANATHAN S, BUSBY H R, HOUSER D R. A numerical approach to the static analysis of an annular sector Mindlin plate with applications to bevel gear design [J]. Computers and Structures, 1994, 51(3): 255-266.
- [15] 纪名刚. 用有限元-线性规划法解弹性接触问题 [J]. 机械设计, 1983(1): 1-11.
- JI Minggang. Solving elastic contact problems with finite element-linear programming method [J]. Mechanical Design, 1983(1): 1-11.
- [16] 杨帅. 机械产品动态性能建模、分析、优化及工程应用研究 [D]. 天津: 天津大学, 2010: 20-56.
- [17] 聂金安. 高精度螺旋锥齿轮加工参数反调修正技术研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2010: 30-62.
- [18] ARTONI A, GABICINI M, GUIGGIANI M, et al. Multi-objective ease-off optimization of hypoid gears for their efficiency, noise and durability performances [C]//Proceedings of the ASME 2011 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference. New York, USA: ASME, 2011: 267-277.
- [19] CHENA Y, TANG J. Rating technical attributes in fuzzy QFD by integrating fuzzy weighted average method and fuzzy expected value operator [J]. European Journal of Operational Research, 2006, 174(3): 1553-1566.
- [20] 龚纯, 王正林. 精通 MATLAB 最优化计算 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2009: 210-217.
- [21] 唐进元, 李友元, 周超, 等. 螺旋锥齿轮数控磨齿机床空间误差与机床调整参数的关系 [J]. 机械工程学报, 2009, 45(4): 148-154.
- TANG Jinyuan, LI Youyuan, ZHOU Chao, et al. Relationship between machine tool space error and machine tool adjustment parameters of spiral bevel gear CNC gear grinding machine [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(4): 148-154.
- [22] 卓耀彬. 螺旋锥齿轮准静态接触特性分析方法及试验研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2016: 52-69.

[本刊相关文献链接]

- 陈乐瑞, 曹建福, 王晓琪. 工业机器人驱动系统非线性频谱故障诊断方法. 2019, 53(4): 93-99. [doi:10.7652/xjtuxb201904014]
- 李卫星, 陶建峰, 覃程锦, 等. 同步压缩小波与极限梯度提升树融合的柴油机失火故障诊断. 2019, 53(2): 47-54. [doi:10.7652/xjtuxb201902007]
- 张西宁, 唐春华, 周融通, 等. 一种自适应形态滤波算法及其在轴承故障诊断中的应用. 2018, 52(12): 1-8. [doi:10.7652/xjtuxb201812001]
- 张西宁, 向宙, 夏心锐, 等. 堆叠自编码网络性能优化及其在滚动轴承故障诊断中的应用. 2018, 52(10): 49-56. [doi:10.7652/xjtuxb201810007]
- 张西宁, 雷威, 杨雨薇, 等. 采用自适应基因粒子群算法优化隐马尔科夫模型的方法及应用. 2018, 52(8): 1-8. [doi:10.7652/xjtuxb201808001]
- 邓飞跃, 强亚文, 杨绍普, 等. 一种自适应频率窗经验小波变换的滚动轴承故障诊断方法. 2018, 52(8): 22-29. [doi:10.7652/xjtuxb201808004]
- 易甜, 张刚, 张天骐, 等. 二阶随机共振系统的冲击信号检测. 2018, 52(6): 106-113. [doi:10.7652/xjtuxb201806016]
- 贾林山, 张庆. 多分量调幅-调频信号的瞬时频率直接计算与畸变消除方法. 2018, 52(6): 122-127. [doi:10.7652/xjtuxb201806018]
- 陈保家, 汪新波, 严文超, 等. 采用品质因子优化和子带重构的共振稀疏分解滚动轴承故障诊断方法. 2018, 52(4): 70-76. [doi:10.7652/xjtuxb201804010]

(编辑 武红江)