

DOI: 10.7652/xjtuxb201809004

复杂机械装配体的响应面优化设计方法

刘超, 方宗德

(西北工业大学机电学院, 710072, 西安)

摘要: 针对复杂机械装配体优化过程中的隐性目标函数问题,提出了基于统计学理论的响应面优化设计方法,并以齿轮驱动涡扇发动机(GTF)减速器结构系统的优化设计为案例,详细阐述了该方法的主要思想与基本过程。使用 Python 语言在 Abaqus 平台上开发了该系统参数化的有限元分析(FEA)程序,以自动实现前、后处理及求解等全过程;采用两水平全因子正交试验设计方法对主要的结构参数进行析因设计,确定了参与优化的设计变量;采用优化的拉丁超立方抽样方法并调用参数化的 FEA 程序,求得了对应结构系统上的最大 von Mises 等效应力,并以该应力为目标函数建立了响应面优化模型。优化后的系统满足强度条件,且整体刚度较优化前提高了 7.13%,最大 von Mises 等效应力和最大接触应力分别降低了 12.15%和 18.99%,有效提高了该结构系统的工作性能。将数值最优解代入有限元模型中再次建模求解,所得结果验证了该响应面模型的正确性。案例分析及验证结果表明,本文方法在工程应用方面具有一定的普适性及优越性,能为更多的隐性优化问题提供设计参考及解决方案。

关键词: 复杂机械装配体;涡扇发动机;减速器;响应面设计;参数化有限元方法

中图分类号: TH132.46 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2018)09-0028-09

Response Surface Method for Complex Mechanical Assembly

LIU Chao, FANG Zongde

(School of Mechanical Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Aiming at the problem of implicit objective function in the optimization of complex mechanical assembly, a design method with response surface optimization is proposed based on statistical theory. Taking the optimization design of the structure system in geared turbofan engine (GTF) reducer as the example, the main idea and basic process of the proposed method are explained in detail. A parametric program in Python language is developed on Abaqus platform for the automatic finite element analysis (FEA) of the system. Then the factorial design is conducted for the main structural parameters using two-level orthogonal test design method to determine the design variables. Invoking the developed FEA program, the maximum von Mises stress is obtained by the optimized Latin hypercube sampling method, and the response surface optimization model is established for the Mises function accordingly. The obtained optimal structure system meets the strength requirements. The stiffness is increased by 7.13%, while the von Mises stress and the contact stress are decreased by 12.15% and 18.99%, respectively. The response surface model is validated by the additional FEA results under the optimal

收稿日期: 2018-01-26。 作者简介: 刘超(1987—),男,博士生;方宗德(通信作者),男,教授,博士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51375384)。

网络出版时间: 2018-06-27

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20180627.2048.002.html>

geometric parameters. The case analysis and verification results indicate better applicability and superiority of the proposed method in engineering application. This study may provide design reference and solution to other implicit optimization problems.

Keywords: complex mechanical assembly; turbofan engine; gear reduction unit; response surface design; parametric finite element method

机械优化设计中普遍存在着目标函数为隐性甚至是完全未知的情况,这给该优化问题的数学建模带来了极大困难。例如,在齿轮驱动涡扇发动机(gearred turbofan engine,GTF)减速器结构系统的优化设计中,由于整体刚度很难用解析方法求得,通常采用有限元分析(FEA)方法进行计算,因此刚度目标函数在优化前很难表示为明确的函数关系式^[1]。再如,在指尖密封性能多目标优化设计中,结构的几何参数与响应变量间的函数关系是隐性的,同样需要进行 FEA 计算以确定对应结构条件下的磨损率和泄漏率(即目标函数)^[2-3]。在这类隐性优化问题中,机械装配体的几何结构和相互作用关系较为复杂,且常表现出高度非线性特性等,此外,常规的解析方法很难描述隐性目标函数的关系式,因而通常采用 FEA 方法求解系统响应(例如变形式、刚度、强度、接触应力及摩擦因数等)。

径向基函数神经网络^[4]可以有效构造系统的输入输出关系以替代真实的隐性目标函数,遗传算法^[5]可以巧妙避开隐性目标函数的数学建模而直接进行迭代优化,因此这 2 种方法对常规隐性优化问题具有一定的适用性。然而,对于本文的这类典型隐性问题而言,由于优化算法需要进行多次迭代以获得最优解,而采用这 2 种方法进行优化需要大量的计算资源以获得 FEA 结果,这无疑会降低优化设计的效率。响应面法(response surface method,RSM)^[6]通过在设计空间内科学地选取试验点,能够有效减少有限元计算次数,进而提高整体优化效

率,因此对求解本文的典型隐性优化问题具有优越性。张春宜等应用多重响应面法对航空发动机涡轮叶片进行了可靠性分析^[7],李兴泉等基于响应面法对液力变矩器叶片进行了优化设计^[8],汪建等运用响应面法拟合了齿轮修形量与动态传递误差波动量间的函数关系^[9],王枫等应用响应面法对小型活塞式压缩机的曲轴进行了结构优化设计^[10]。目前,响应面法多应用于单一构件或简单机构的优化设计,而对于大型复杂机械装配体嵌入 FEA 计算的响应面优化设计方法,尚需进行更加深入的研究与总结。

本文针对复杂机械装配体的隐性优化问题,提出了一种基于统计学理论的响应面优化方法,并以 GTF 减速器结构系统的优化设计为案例,详细阐述了该方法的求解思路与基本过程,最后深入讨论了该方法在工程应用方面的适用性与优越性。

1 理论分析

图 1 所示为复杂机械装配体嵌入参数化 FEA 的响应面优化设计流程。由于采用 FEA 方法求解复杂机械装配体的响应值需要大量的计算资源,因此首先应建立装配体系统的参数化 FEA 程序,这样不但可以大大节省有限元的建模时间从而有效提高整体优化效率,还可以降低因人为操作而引入的模型误差。整个设计流程主要包括试验设计(DOE)过程、RSM 建模过程及数学优化过程 3 个阶段,现详细分析如下。

(1)试验设计的目的是确定设计变量。首先选

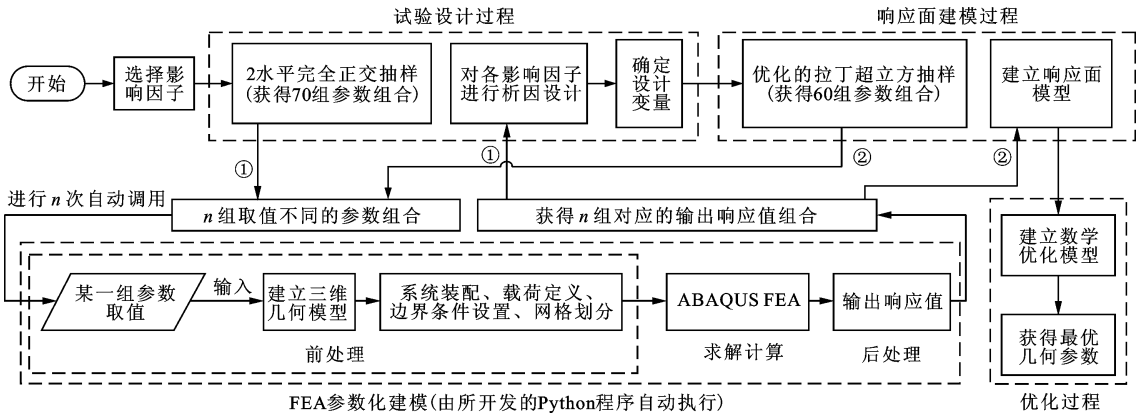


图 1 复杂机械装配体嵌入参数化 FEA 的响应面优化设计流程

择出对响应值影响较大的若干个影响因素,并采用两水平完全正交方法进行抽样,获得多组取值不同的输入参数组合,再通过多次调用参数化的 FEA 程序求得多组对应的输出响应值组合,据此对各影响因素进行析因设计,最终确定优化问题的设计变量。

(2)RSM 建模过程的目的是确定目标函数。在复杂机械装配体的隐性优化问题中,由于系统的几何结构及相互作用关系过于复杂,响应变量通常采用 FEA 方法求解,因此这类问题的目标函数在优化前是未知的,很难用明确的函数进行描述,从而给相应的数学建模带来极大的困难。本文采用 RSM 构建相应的目标函数表达式:首先采用优化的拉丁超立方方法在可行域内进行科学的抽样,从而获得多组取值不同的输入参数组合;多次调用参数化的 FEA 程序获得这些参数组合所对应的输出响应值;结合试验设计的响应结果,再根据统计学理论建立设计变量与响应变量间的函数关系式,从而确定优化问题的目标函数。

(3)通过试验设计与 RSM 建模,可最终确定本文优化问题的数学模型。最后,对所建立的数学模型进行求解,得到最优参数下的机械结构系统,为复杂装配体的后续分析与设计提供理论保障。

2 GTF 减速器结构系统优化设计案例

GTF 不仅成为了新一代民用发动机的主要发展方向之一,同时也在军用航空动力领域表现出了诱人的应用潜力^[11-12]。齿轮减速器作为 GTF 的核心部件,其均载特性极大地影响着整个发动机的动态性能。图 2 为某型号 GTF 齿轮减速器的结构示意图。



图 2 某型 GTF 齿轮减速器结构示意图

为了保证这种减速器的均载设计,通常要求支撑该减速器的结构系统(主要指图 2 中星型架与力矩器的复杂装配体)在满足构件强度要求的同时能提供最优的刚度,以保证各对齿轮在高速大载荷工

况下仍能按照理论设计规律相互啮合,进而确保最佳的啮合性能。然而,由于该结构系统的几何构型及其所包含的非线性耦合关系非常复杂,使得传统的解析方法很难描述隐性的刚度目标函数,通常只能采用 FEA 方法进行计算。因此,在 GTF 的众多核心技术中,齿轮减速器结构系统的优化设计无疑成为了重点和难点之一。

下面将以 GTF 减速器结构系统的优化设计为案例,详细阐述本文方法。

2.1 参数化的 FEA 计算模型

显然,传统的手动 FEA 流程是不可取的,这是因为过多的人工干预会使得整个优化过程耗时费力,因此,建立参数化的 FEA 模型具有重要意义。案例采用 Python 语言在 Abaqus 平台上进行编程,可实现 FEA 从结构系统的三维实体建模到求解计算、再到结果后处理的自动化运行。整个 FEA 流程无需人工干预,只需在应用时根据优化要求控制相应的输入参数,即可在程序运行结束后获得装配体的 FEA 响应结果。

GTF 减速器在实际工作时,其力矩器通过螺栓固定在机架上,星型架通过销钉与力矩器相连,因此星型架也是相对固定的。输入轴通过花键与中心轮相连,中心轮通过轮齿与 5 个星型轮外啮合。各星型轮的轮轴安装在星型架上,因此,5 个星型轮只能绕各自的轴线转动。各星型轮再通过轮齿与柔性齿圈内啮合,所产生的啮合力使得内齿圈绕其轴线转动。内齿圈通过螺栓与输出轴相连,从而将运动传递出去。根据上述 GTF 减速器的基本工作原理^[13-16],可建立其结构系统的参数化 FEA 模型,如图 3 所示。建模要点总结如下。

(1)根据基本的几何尺寸建立星型架与力矩器的三维模型。力矩器保留了主要的倒角特征以获得准确的 FEA 结果;星型架上去除了油孔以及倒角等微小特征,因为这些特征对结果不会有显著影响,反而会增加 FEA 的计算量。各齿轮轮轴采用三维线单元模拟。各轴承采用三维等效弹簧模拟,弹簧的刚度取轴承的实际支承刚度。根据各零部件的材料属性,分别定义相应的弹性模量、泊松比及密度等。

(2)根据各零部件的装配关系对该结构系统进行组装。力矩器的法兰面采用位移全约束,即约束法兰面上各节点在空间内的 6 个自由度。星型架通过销钉与力矩器上的“手指”相连。为简化模型,销钉与星型架固连在一起,且销钉与“手指”上的销孔通过面面接触定义其相互作用关系。轴承等效弹簧

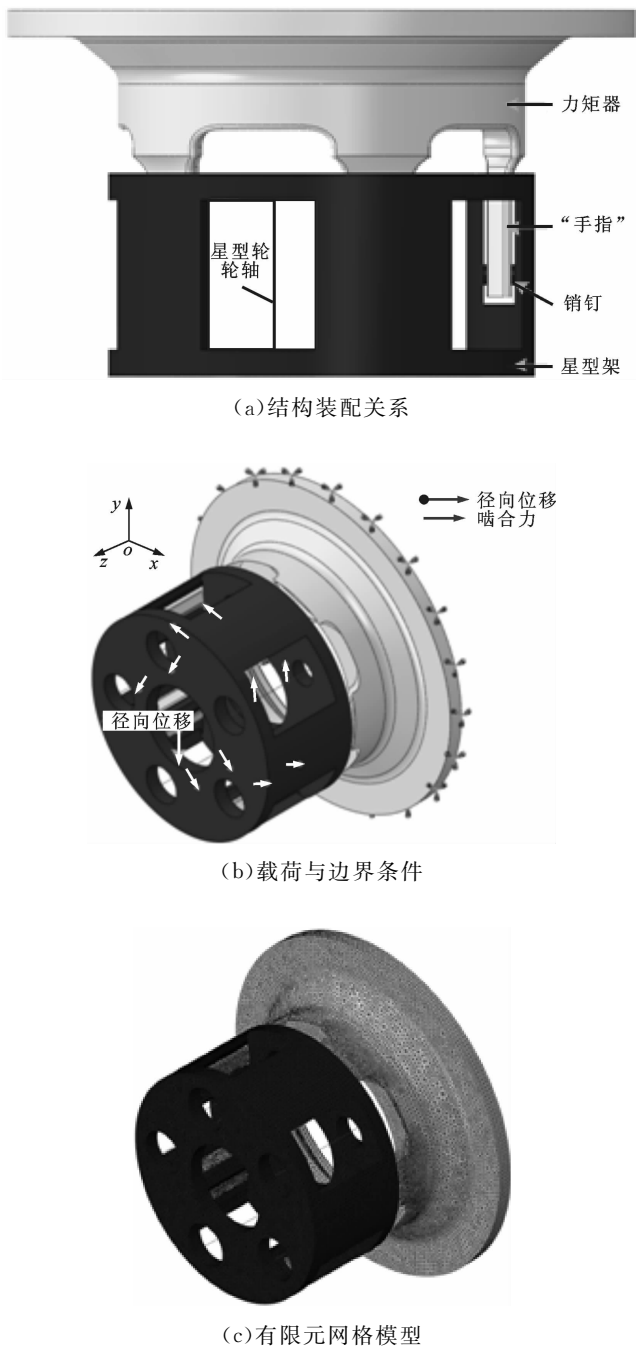


图 3 GTF 减速器结构系统的参数化 FEA 模型

的一端与星型架上的轴承孔内表面耦合,另一端与星型轮轮轴上的支撑点耦合。在三维轴线上的星型轮轮心处分别施加集中力,以模拟啮合齿对间的法向啮合力,该力通过三维齿轮轴线、等效轴承弹簧、星型架及销钉传递到“手指”上,并最终与力矩器法兰面上的固定支反力相平衡。此外,给定星型架一微小的径向位移(见图 3b),用于模拟减速器的不平衡力所产生的装配体弯曲变形,由该变形量最终可求得结构系统的整体刚度。

(3)采用 Abaqus 中的 C3D4 单元(三维四节点

四面体线性单元)模拟三维几何实体,同时采用 B31 单元模拟三维齿轮轴线。应用 Abaqus 自由网格技术对整个结构系统进行网格划分,以实现参数化的建模要求。众所周知,随着有限元模型网格数量的增多,位移近似解将收敛于精确解。然而,过度地增加网格密度不仅会大大增加单元划分时间及方程求解时间,有时还会因计算的累积误差而降低求解精度。因此,案例综合考虑计算效率及计算精度等因素,最终选择了恰当的全局网格种子密度,并对重点关心的几何特征(如力矩器“手指”根部倒角及销孔的接触面等)进行了局部网格加密,从而获得了高质量的网格模型。整个结构系统的参数化 FEA 模型包含约 28 万个节点和 140 万个单元。案例关心的是该结构装配体的长期变形效应,故采用 Abaqus\Standard 中的“General,Static”分析步进行求解。

2.2 析因设计

尽管该结构系统所包含的几何尺寸较多,但由于减速器中的各几何尺寸间存在相互制约关系,因此该结构系统上可供优化的几何参数非常有限。基于整体设计的概念,在主要零部件(如齿轮、轴承等)的设计工作结束后即可基本确定该结构系统可供优化的几何参数。此外,根据该结构系统在实际工作时的受力情况进行初步判断,影响系统刚度和强度的几何尺寸主要位于力矩器的“手指”部分及星型架的轴承孔。综合以上考虑,选取如图 4 所示的 6 个几何参数作为影响因子参与析因设计。

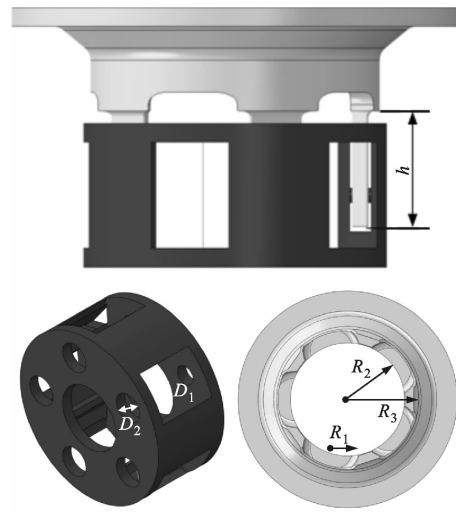


图 4 析因设计的影响因子

析因设计的目的是从众多的影响因子中确定出参与优化的设计变量。对这 6 个影响因子进行两水平完全正交抽样,共可获得 70 组取值不同的几何参

数的组合。如图1所示,将这些组合中的几何参数的取值分别传入第2.1节中所建立的参数化FEA模型并运行程序,可最终求得相应的70组FEA响应结果。

案例以该结构系统的销钉与销孔处的接触应力 p 、最大 von Mises 等效应力 s 以及系统整体刚度 k 作为响应变量,各影响因子及其交互作用对各响应变量的 Pareto 效应如图5所示。图中横坐标“标准化效应”表示各效应的 t 检验所获得的 t 值的绝对值,纵坐标按标准化效应值的大小从高到低对各效应项依次排列^[17]。根据选定的显著性水平 $\alpha = 0.05$,给出了 t 值的临界值 2.01,绝对值超过临界值的效应为显著效应。由图5可知,对销钉与销孔处的接触应力 p 、最大 von Mises 等效应力 s 和系统整体刚度 k 影响较大的几何参数是 h 、 R_1 、 R_2 和 R_3 ,故考虑将这4个参数作为本例优化问题的设计变量。

2.3 响应面模型的建立

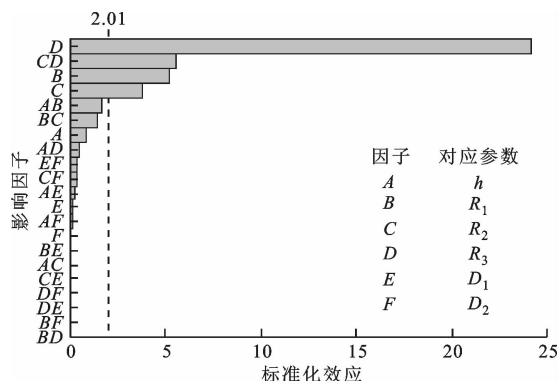
结构系统的主要功能是为整个减速器提供足够的刚度,以保证每对啮合副都能在理论工作位置处正确啮合,因此在该结构系统的优化设计中,通常以星型架和力矩器的整体刚度为优化目标。然而,经计算发现,该结构系统的强度属于危险指标,其最大 von Mises 等效应力超出了构件的许用应力。为了使构件不致失效,首先以结构的强度为主要优化目标,在保证构件强度的条件下尽量使得整个结构系统的刚度有一定的提升。

根据该装配体的基本几何尺寸及其复杂的装配关系,可确定4个设计变量的取值范围如下

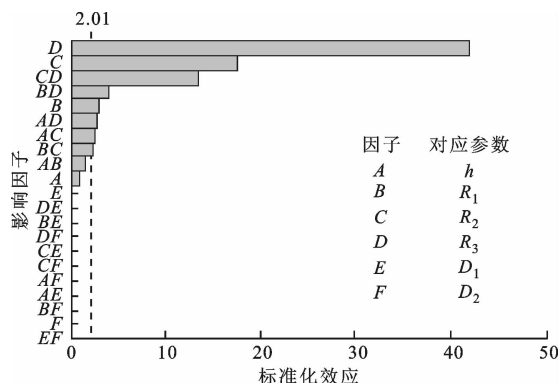
$$\left. \begin{aligned} 160 \text{ mm} &\leq h \leq 200 \text{ mm} \\ 91 \text{ mm} &\leq R_1 \leq 94 \text{ mm} \\ 188 \text{ mm} &\leq R_2 \leq 200 \text{ mm} \\ 208 \text{ mm} &\leq R_3 \leq 220 \text{ mm} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

通常,样本容量过小会导致样本信息失真,而样本容量过大可能会造成样本信息间的互相干扰,不利于获得具有统计规律的结论。因此,案例采用优化的拉丁超立方抽样方法,在式(1)所示的可行域内得到60个采样点,即60组不同的设计参数。如图1所示,将每组参数值代入第2.1节中建立的参数化FEA模型并运行程序,可最终求得相应的60组FEA响应结果。结合析因设计中的70组结果,共计有130组样本信息,以此样本对GTF减速器结构系统的强度进行响应面设计不但可以提高统计精度,还可以提高优化效率。

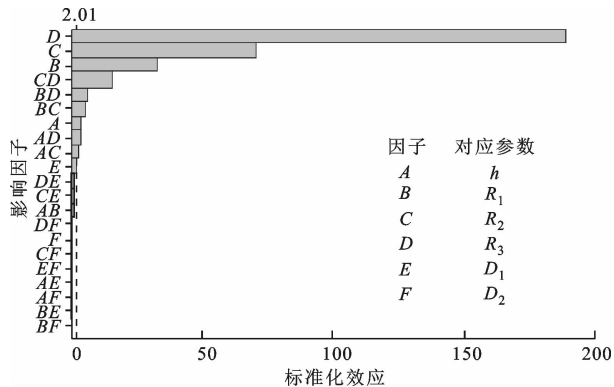
根据求得的130组 s 响应值,采用二次多项式



(a) 接触应力 p



(b) 最大 von Mises 等效应力 s



(c) 系统整体刚度 k

图5 标准化效应的 Pareto 图

函数来拟合设计变量 R_1 、 R_2 、 R_3 与目标函数 s 之间的函数关系式,并以此作为初始响应面模型,再通过回归分析方法不断修正该模型,直至达到精度要求(通常取显著性水平 $\alpha = 0.05$,即方差分析的置信水平为95%)。案例最终确定的最大 von Mises 等效应力 s 的响应面模型为

$$\begin{aligned} s = & 386\,302 - 12\,105R_1 + 620R_2 + 1\,106R_3 + \\ & 68.1R_1R_1 + 2.63R_1R_2 - 4.58R_1R_3 - 3.892R_2R_3 \end{aligned} \quad (2)$$

该模型的方差分析结果见表1,其中 S^2 表示调

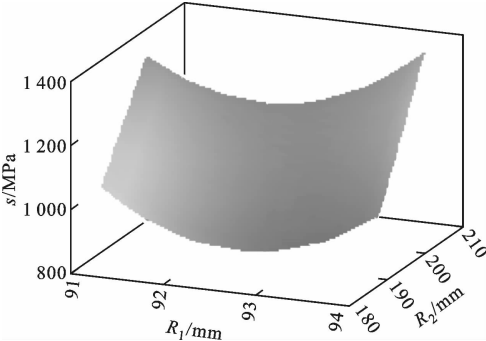
整后的偏差平方和, S_m^2 表示调整后的平均偏差平方和, F 值和 P 值分别表示 F 检验法和 P 检验法所得的统计值, “*”表示两因子的交互效应。由此可知, 该响应面模型中各项的 P 值均远小于显著性水平 0.05。此外, 所计算的模型拟合的总效果判定系数

R^2 为 98%, 修正的判定系数 R_{adj}^2 为 97.79%, 两者都接近 1, 且两者之差非常小, 这说明该响应面模型是有效的。再者, 基于式(2)所得的预测的判定系数 R_{pred}^2 已达到 97.49%, 这说明该响应面模型的精度满足工程要求。

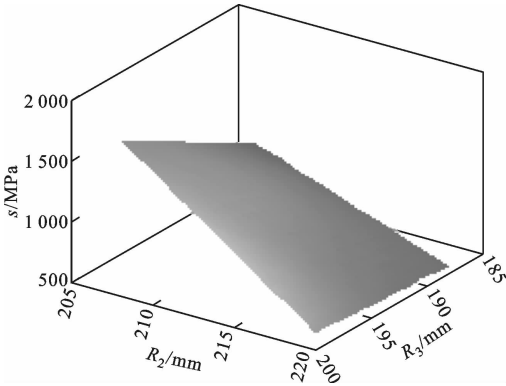
表 1 最大 von Mises 等效应力 s 的响应面模型的方差分析结果

来源	自由度	S^2	S_m^2	F 值	P 值
模型	7	15 876 208	2 268 030	436.63	0.000
线性项	3	14 346 622	4 782 207	920.65	0.000
R_1	1	58 797	58 797	11.32	0.001
R_2	1	2 102 676	2 102 676	404.80	0.000
R_3	1	12 185 149	12 185 149	2 345.84	0.000
平方项	1	128 730	128 730	24.78	0.000
$R_1 * R_1$	1	128 730	128 730	24.78	0.000
交互项	3	1 400 856	466 952	89.90	0.000
$R_1 * R_2$	1	35 793	35 793	6.89	0.011
$R_1 * R_3$	1	108 810	108 810	20.95	0.000
$R_2 * R_3$	1	1 256 253	1 256 253	241.85	0.000
误差	62	322 051	5 194		
失拟	57	322 051	5 650		
合计	69	16 198 258			

图 6 所示为式(2)的三维响应曲面(保持值选定为设计变量取值范围的中心点)。

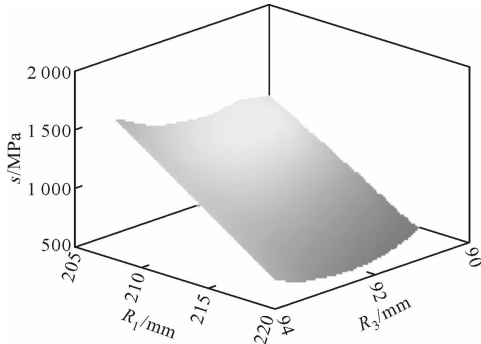


(a)保持 $R_3=214$ mm



(c)保持 $R_1=92.5$ mm

图 6 最大 von Mises 等效应力 s 的三维响应曲面



(b)保持 $R_2=194$ mm

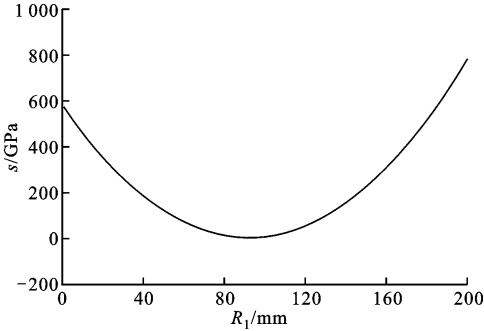
2.4 优化模型及结果

结合式(1)与式(2), 可得 GTF 减速器结构系统优化设计的数学模型

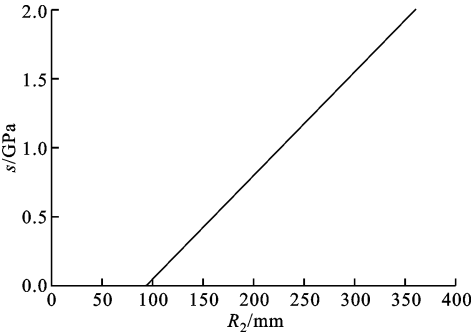
$$\left. \begin{aligned} &\min s(R_1, R_2, R_3) \\ &\text{s. t. } 91 \text{ mm} \leq R_1 \leq 94 \text{ mm} \\ &\quad 188 \text{ mm} \leq R_2 \leq 200 \text{ mm} \\ &\quad 208 \text{ mm} \leq R_3 \leq 220 \text{ mm} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式(3)是一个多元函数含约束条件的优化问题。对式(3)进行数值优化, 可得该问题的局部最优解

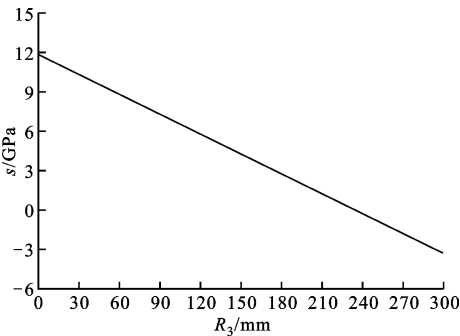
为: $R_1=92.67\text{ mm}$; $R_2=188.00\text{ mm}$; $R_3=220.00\text{ mm}$;最大 von Mises 等效应力 s 在设计变量取值范围内的最小值 $s_{\min}=558.92\text{ MPa}$ 。图 7 所示分别为参数 R_1 、 R_2 、 R_3 与 s 间的关系。



(a) R_1 与 s



(b) R_2 与 s



(c) R_3 与 s

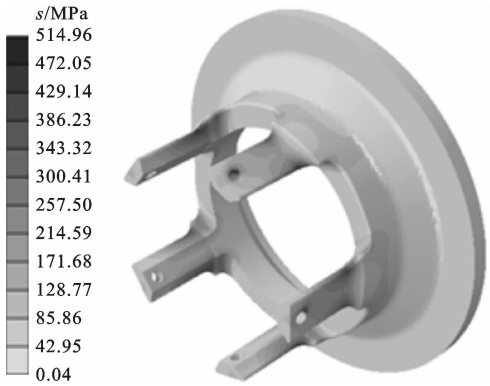
图 7 设计变量与响应值 s 的关系曲线

3 案例验证及讨论

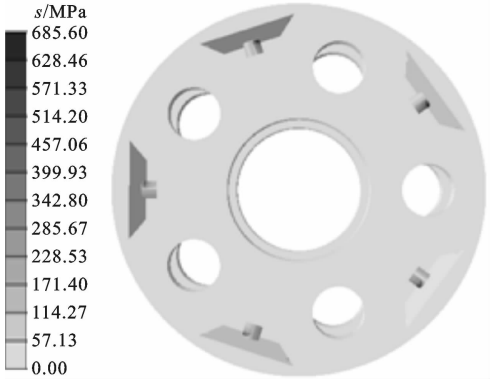
为了考察本文方法在上述案例应用中的准确性,现以所得的 GTF 减速器结构系统的最优几何参数重新建立精确的有限元模型,并将求解后的结果与响应面数值优化结果进行比较。

将局部最优解代入第 2.1 节建立的参数化 FEA 模型中并运行程序,所得的主要结果如图 8 所示。

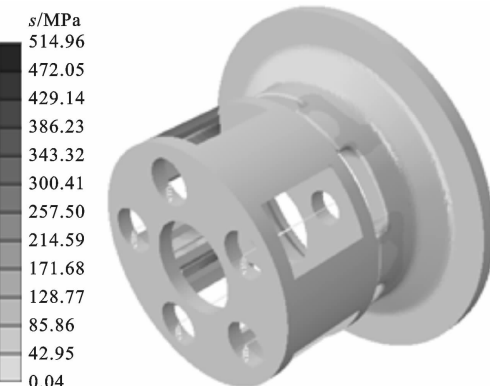
在最优几何参数下,有限元计算结果与等效应力 s 的响应面优化结果的对比见表 2,可知响应面



(a) 力矩器的等效应力云图



(b) 星型架的接触应力云图



(c) 结构系统的等效应力云图

图 8 最优几何参数下的有限元仿真结果

优化模型与精确有限元模型所计算的最大 von Mises 等效应力之间的相对误差为 5.92%，从而验证了本文方法获得的响应面模型的正确性。

表 2 最优几何参数下 s 的有限元仿真与数值优化结果对比

$R_{1,opt}/$ mm	$R_{2,opt}/$ mm	$R_{3,opt}/$ mm	s/MPa		误差/ %
			有限元	响应面	
92.67	188.0	220.0	594.12	558.92	5.92

从 2.1 节中的案例建模过程可以看出,构成 GTF 减速器结构系统的星型架和力矩器的几何结构本身很复杂,加之该装配体中存在非线性的接触或耦合关系,且其所承受的边界条件和载荷情况也非常复杂,因此,常规隐性优化算法在求解此类复杂工程问题时,由于在迭代中需要多次调用有限元计算以获得最优解,会导致优化效率大幅下降。然而,上述算例验证的结果表明,本文方法在保证计算精度的前提下,其内嵌的参数化 FEA 流程及科学的 DOE 设计能有效提高优化效率,从而对此类复杂机械装配体的隐性优化问题具有更好的适用性。

由图 8 可知,所得的最优结构系统上的最大 von Mises 等效应力发生在销钉与销孔的接触面上以及力矩器的“手指”根部,因此在进行强度校核时,应对这 2 处危险部位分别校核。由于受力类型不同,在接触面上主要受接触应力,故应以接触应力来校核,而力矩器指根部主要受弯曲应力和拉应力的综合作用,故可以用 von Mises 等效应力来校核。按照齿轮接触强度校核标准,该结构系统所受最大接触应力远小于许用接触应力(1 200 MPa)。需要说明的是,尽管本例所计算的该结构系统上的最大 von Mises 等效应力为 594.12 MPa,但该应力作用于销钉与销孔的接触面上而并非作用于力矩器的指根部。根据构件的强度校核条件

$$[\sigma] = \frac{\sigma_s}{n_{\text{safe}}} = \frac{930}{1.8} = 516.66 \text{ (MPa)}$$

(4)

力矩器指根部位的等效应力(437.51 MPa)远小于许用应力(516.66 MPa),故该力矩器满足强度条件,这说明本文方法确定的 GTF 减速器的最优结构系统安全可靠,满足工程使用要求。

将案例的响应面优化结果与优化前的模型仿真结果进行对比(见表 3),可知优化后模型的刚度比优化前的刚度提高了 7.13%,最大等效应力和最大接触应力分别降低了 12.15%和 18.99%,说明经本文方法优化后该结构系统的整体工作性能得到了大幅度提升。

表 3 减速器结构系统优化前后仿真结果对比

模型	整体刚度/ N · mm ⁻¹	等效应力/ MPa	接触应力/ MPa
优化后	255 984.24	594.12	685.60
优化前	275 637.11	676.33	846.27
优化效率	7.13%	12.15%	18.99%

4 装配体响应面方法的特点及应用

从上述算例可以看出,本文方法具有以下特点。

(1)与单一构件或简单机构的响应面方法不同,本文方法主要针对多个零部件所构成的复杂机械装配体。这类多体系统不仅几何构型较为复杂,且其构件间的相互作用关系常伴有高度非线性特性(如接触、摩擦及动态耦合等),所以常规解析方法很难描述此类隐性优化问题的目标函数,故常选择 FEA 方法进行求解。例如,在 GTF 齿轮传动系统的减振降噪设计中,复杂的装配体结构不仅包含了非线性的轮齿接触关系,还涉及到柔性输入、输出轴和轴承系统的相互耦合作用,而本文方法可用于求解齿轮减速器动态传递误差目标函数的优化问题。

(2)常规优化算法的多次迭代搜索需要大量有限元计算资源以获得最优解,而本文方法集成的 DOE 设计及 RSM 设计在保证计算精度的前提下能有效节省计算成本,从而提高整体优化效率,因此本文方法更适合于求解计算量较大的隐性优化问题。例如,在指尖密封性能多目标优化设计中,为了获得磨损率与泄漏率的大样本容量信息,往往需要上千次的 FEA 计算,而本文方法能有效求解该优化问题并大幅提升设计效率。

(3)内嵌式的参数化 FEA 流程使得本文方法可选择的设计变量的类型以及可求解的隐性目标函数的类型更加丰富。事实上,在参数化的 FEA 流程中,模型的结构尺寸、材料属性及接触属性等均可作为设计变量,而通过 FEA 获得的刚度、强度、接触应力、弹塑性变形量、热效应以及动态位移响应等均可作为目标函数,这使得本文方法在工程实际中具有更强的适用性。例如,在大型电除尘器底梁及支架装配体的轻量化设计中,复杂的钢结构具有多变的载荷工况及边界条件,本文方法适用于该系统的质量优化问题,从而可获得最优的构件截面尺寸、材料密度、弹性模量及泊松比等。

正是由于以上特点,本文方法在实际工程应用方面具有一定的优越性及使用价值,能为更多的机械结构设计提供便利。

5 结 论

对于 GTF 减速器结构系统的优化设计案例,本文提出的参数化的 FEA 程序可自动实现有限元前、后处理及分析计算等全过程;两水平全因子正交试验设计方法确定的设计变量合理有效;建立的最

大 von Mises 等效应力的响应面模型正确,优化后的结构系统整体刚度较优化前提高了 7.13%,最大 von Mises 等效应力和最大接触应力分别降低了 12.15%和 18.99%,有效提高了该结构系统的工作性能。

本文提出的复杂机械装配体的响应面优化设计方法是一种可行、高效的隐性优化方法,具有一定的普适性和优越性,能为更多的工程优化问题提供设计参考及解决方案。

参考文献:

- [1] LIU Chao, FANG Zongde. Multi-objective optimal design for carrier and torque frame assembled together in planetary gear train of GTF by integrated DOE, RSM and LSGRG [J]. Journal of the Chinese Society of Mechanical Engineers, 2018, 39(1): 81-98.
- [2] 张延超,陈国定,周连杰,等. 指尖密封性能优化的一种新方法 [J]. 机械工程学报, 2010, 46(10): 156-163.
ZHANG Yanchao, CHEN Guoding, ZHOU Lianjie, et al. New method for performance optimization of finger seals [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(10): 156-163.
- [3] 张延超,陈国定,申晓龙. 指尖密封性能的模糊 Nash 平衡优化 [J]. 航空动力学报, 2010, 25(1): 228-233.
ZHANG Yanchao, CHEN Guoding, SHEN Xiaolong. Performance optimization for finger seal based on fuzzy Nash equilibrium game [J]. Journal of Aerospace Power, 2010, 25(1): 228-233.
- [4] 苏美娟. 径向基函数神经网络学习算法研究 [D]. 江苏苏州: 苏州大学, 2007.
- [5] 蔡美菊. 交互式遗传算法及其在隐性目标决策问题中的应用研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2015.
- [6] MONTGOMERY D C. Design and analysis of experiments [M]. 8th ed. Hoboken, New Jersey, USA: John Wiley & Sons, 2012: 478-553.
- [7] 张春宜,刘令君,孙旭东,等. 航空发动机叶片多重响应面法可靠性分析 [J]. 哈尔滨理工大学学报, 2016, 21(6): 22-27.
ZHANG Chunyi, LIU Lingjun, SUN Xudong, et al. Reliability analysis for aero-engine blades with multiple response surface method [J]. Journal of Harbin University of Science and Technology, 2016, 21(6): 22-27.
- [8] 李兴泉,邓兆祥,章竟成,等. 基于响应面的液力变矩器叶片优化设计 [J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2011, 39(11): 149-154.
LI Xingquan, DENG Zhaoxiang, ZHANG Jingcheng, et al. Optimized design of blade of hydraulic torque converter based on response surface method [J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2011, 39(11): 149-154.
- [9] 汪建,张俊. 轮齿修形对斜齿轮传递误差影响的比较性分析 [J]. 振动与冲击, 2018, 37(2): 254-260.
WANG Jian, ZHANG Jun. Effects of gear modification on transmission error of a helical gear pair [J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(2): 254-260.
- [10] 王枫,陈征,李花,等. 采用多体动力学的压缩机油轴结构优化 [J]. 西安交通大学学报, 2017, 51(3): 7-13.
WANG Feng, CHEN Zheng, LI Hua, et al. Optimization for compressor crankshaft by multi-body dynamics analysis method [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2017, 51(3): 7-13.
- [11] TOBI A L M, ISMAIL A E. Development in geared turbofan aeroengine [C]//Proceedings of 4th International Conference on Manufacturing, Optimization, Industrial and Material Engineering (MOIME). London, England: Institute of Physics, 2016: 1-10.
- [12] Boeing Company. Current market outlook 2017 to 2036 [EB/OL]. [2018-01-12]. <http://www.boeing.com/resources/boeingdotcom/commercial/market/current-market-outlook-2017/assets/downloads/cmo-2018-2-22vpdf>.
- [13] SHERIDAN W G, SOUTHWINGTON C T. Fan drive gear system integrated carrier and torque frame: US8900083-B2 [P]. 2014-12-02.
- [14] MCCUNE M E, COLCHESTER C T, SHERIDAN W G. Method of assembly for gas turbine fan drive gear system: US8667688-B2 [P]. 2014-03-11.
- [15] SHERIDAN W G, SOUTHWINGTON C T. Fundamental gear system architecture: US8572943-B1 [P]. 2013-11-05.
- [16] SHERIDAN W G, SOUTHWINGTON C T. Epicyclic gear train for turbo fan engine: US8205432-B2 [P]. 2012-06-26.
- [17] 闵亚能. 实验设计(DOE)应用指南 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2011: 80-84.

(编辑 葛赵青)