钻机优化设计问题的研究

冯晓东[1]，冉恒谦[2]，陈庆寿[1]，袁明昕[2]
(1.中国地质大学(北京)工程技术学院，北京 100083；2.中国地质科学院勘探技术研究所，河北 廊坊 065000)

摘　要：论述了钻机最优化设计研究中的某些问题，探讨了钻机优化设计中的目标函数、约束条件和求解方法。在实际的生产实践中具有一定的指导意义。

关键词：钻机；最优化设计；设计变量；目标函数；约束条件；有限元
中图分类号：P634.3+1；TP391.77　**文献标识码**：A　**文章编号**：1000-3746(2001)02-0034-03

Research on Optimum Disign of Drill Rig/ *FENG Xiao-dong, CHEN Qing-shou* (College of Engineering, China University of Geo-sciences, Beijing 100083, China); *RAN Heng-qian, YUAN Ming-xin* (Institute of Exploration Techniques, CAGS, Langfang Hebei 065000, China)

Abstract: The optimal method is one of the most important and active branchs in the domain of modern design and mechanic design. With applying to mechanic design domain, it promotes mechanic design more scientific, keeps the fine performance of the product and reduces the cost of projects. In this article, the authors present the research on the object functions, subject conditions and resolve methods in the optimal methods of borer design.

Key words: drill rig; optimal design; design variable; object function; subject condition; limit unit

1　最优化设计的概念

最优化方法是现代设计和机械设计领域中最重要而且有活力的分支之一，它在机械设计领域中的应用，有助于推动机械设计过程更加科学，保证产品具有优良的性能，减轻自重或体积，降低工程造价，具有极其重要的现实意义。

最优化设计反映出人们对于设计规律这一客观世界认识的深化。设计上的“最优值”是指在一定条件影响下所能得到的最佳设计值。最优值是一个相对的概念，它不同于数学上的极值，但在很多情况下可以用最大值或最小值来表示。

概括起来，最优化设计工作包括以下2部分内容：

(1)将设计问题的物理模型转化为数学模型，建立数学模型要选取的设计变量。列出目标函数，给出约束条件。目标函数是设计问题所要求的最优指标与设计变量之间的函数关系。

(2)采用适当的最优化方法，在计算机上求解数学模型。这归结为在给定条件下求目标函数的极值或最优值问题。

优化设计的数学模型是设计问题的数学表达式，它反映了设计问题中各主要因素间内在联系的一种数学关系。因此，从工程实际问题中抽象出正确的数学模型，是工程优化的关键，也是工程设计人员进行优化设计的主要任务。而求解这个数学模型的最优化方法，属于计算数学或应用数学的范畴，是工程设计的一种工具。

2　最优化设计的基本要素

2.1　设计变量

设计变量是设计时给定的参数。设计变量的数目称为最优化问题的维数。如有 $n(n=1,2,\cdots)$ 个设计变量，则称为 n 维设计问题，其全部设计变量可用 n 维向量的形式表示为：

$$X=[x_1,x_2,\cdots,x_n]^T$$

x_i 就是 X 的第 i 个变量。n 维向量的全体，称为 n 维向量空间。分量为实数的 n 维向量的全体，称为 n 维实数空间，记作 R^n。如果其中任意2个向量又有内积运算，则称为 n 维欧式空间，用 E^n 表示。在

收稿日期：2000-11-13
基金项目：原地矿部“九五”高新技术研究开发项目(9505507)中的内容
作者简介：冯晓东(1970-)，男(回族)，河北人，中国地质大学(北京)博士在读，助理工程师，研究方向为计算机在探矿工程中的应用，北京市海淀区学院路29号，13501071038；冉恒谦(1963-)，男(汉族)，重庆人，中国地质科学院勘探技术研究所科技开发处副处长，高级工程师，探矿工程专业，博士，从事岩土工程、机械设计专家系统研究工作，河北省廊坊市金光道77号，(0316)2015312-2060；陈庆寿(1937-)，男(汉族)，福建莆田人，中国地质大学(北京)教授，博士生导师，探矿工程专业；袁明昕(1975-)，男(汉族)，河北唐山人，中国地质科学院勘探技术研究所助理工程师，计算机科学与技术专业，从事地质钻机设计专家系统研究工作。

最优化设计中各设计变量的坐标轴所描述的空间，就是所谓的“设计空间”。设计空间中的一个点就是一种设计方案。

2.2 目标函数

在最优化设计中，可将所追求的设计目标(最优指标)用设计变量的函数形式表达出来，这一过程称为建立目标函数。即目标函数是设计中预期要达到的目标，表达为各设计变量的函数：

$$f(X)=f(x_1,x_2,\cdots,x_n)$$

目标函数是设计变量的标量函数。最优化设计的过程是优选设计变量，使目标函数达到最优值，或找出目标函数的最小值(或最大值)的过程。

在最优化设计问题中，可以只有一个目标函数，称为单目标函数的最优化问题。当在同一设计中要提出多个目标函数时，这种问题称为多目标函数的最优化问题。

目标函数与设计变量之间的关系，可用曲线或曲面表示。一个设计变量与一个目标函数之间的函数关系是二维平面上的一条曲线。当有2个设计变量时，目标函数与它们的关系是三维空间的一个曲面。若有 n 个设计变量时，则目标函数与 n 个设计变量间呈 $(n+1)$ 维空间的超维曲面关系。

最优化设计中的一个重要概念，就是目标函数的梯度。梯度表示在其取值点处与该函数面相垂直的向量：它是目标函数 $f(X)$ 对各个设计变量的偏导数所组成的列向量，以符号“$\nabla f(X)$”表示，即：

$$\nabla f(X)=[\frac{\partial f(X)}{\partial x_1},\frac{\partial f(X)}{\partial x_2},\cdots,\frac{\partial f(X)}{\partial x_n}]^T$$

在最优化设计中，当以给定的步长改变设计时，目标函数值在沿梯度的方向变化最快，这就使梯度向量获得了实际的效用。

2.3 约束条件

目标函数取决于设计变量，而在许多实际问题中设计变量的取值范围是有限制的或必须满足一定的条件。在最优化设计中，这种对设计变量取值的限制条件，称为约束条件或设计约束。约束条件可以用数学等式或不等式表示。

等式约束对设计变量的约束严格，起着降低设计自由度的作用。等式约束可能是显约束，也可能是隐约束，其形式为：

$$h_v(X)=0 \quad (v=1,2,\cdots,p)$$

在机械最优化设计中不等式约束更为普遍，不等式约束的形式为：

$$g_u(X)\leqslant 0 \quad (u=1,2,\cdots,m)$$

式中：X ——设计变量；p ——等式约束的数目；m ——不等式约束的数目。

2.4 数学模型

任何一个最优化问题均可归结为如下的描述，在满足给定的约束条件下，选取适当的设计变量 X，使其目标函数 $f(X)$ 达到最优值。其数学表达式(数学模型)为：

设计变量

$$X=[x_1,x_2,\cdots,x_n]^T \quad X\in D\subset E^n$$

在满足约束

$$h_v(X)=0 \quad (v=1,2,\cdots,p)$$

$$g_u(X)\leqslant 0 \quad (u=1,2,\cdots,m)$$

的条件下，求目标函数 $f(X)$ 的最优值。

目标函数的最优值一般可用最小值(或最大值)的形式来表示，因此，最优化设计的数学模型可表示为：

$$\begin{aligned} &\min \quad f(X) \quad X\in D\subset E^n \\ &\text{s.t.(subject to)} \quad h_v(X)=0 \quad v=1,2,\cdots,p \\ &\qquad\qquad\qquad g_u(X)\leqslant 0 \quad u=1,2,\cdots,m \end{aligned}$$

3 链轮的有限元优化设计方法

在实际工程应用中，许多机械结构的优化设计并不容易实现，原因是由于优化模型中的目标函数或约束函数不能建立对于设计变量的明显的数学表达式，因而难以进行优化计算。

有限元方法能够计算复杂结构在复杂工况作用下的应力分布、位移分布以及固有频率等性能，因此将有限元方法与优化方法相结合，便能解决许多实际问题。这种方法的特点是，用一定优化算法控制整个优化迭代过程的进行，而用有限元方法完成每次迭代中的强度、刚度和动态性能计算。有限元优化设计的一般过程如图1所示。

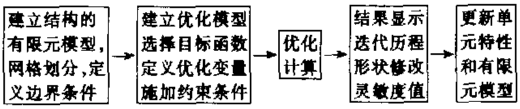

图1 有限元优化设计过程图

利用有限元的形状优化方法，对水井钻机给进机构中的链轮进行优化设计。通过改变结构的形状来实现优化目的。

首先对链轮建立正确的形状变量，保证结构的形状按照规定的要求变化。一个形状变量是一组节点，该节点包括：节点编号，规定节点组包括哪些节点；节点运动的参考坐标系；节点运动方向，规定节

点沿参考坐标系的哪个方向运动;节点运动规律,规定节点组内节点之间运动的相对大小。

然后选取链轮结构的1/12进行有限元分析,网格划分采用单元变换法,利用链轮的形状划分抛物线四边形平面单元,为施加周期对称边界条件,边界上的节点数相同且各节点间距相等。优化的性能约束条件为:

$$\sigma_{max} \leqslant [\sigma]$$

式中:σ_{max}——链轮工作时的最大应力;$[\sigma]$——链轮材料的许用应力。

利用有限元优化计算进行迭代,最终计算出链轮的结构优化参数,实现优化设计。

4 转盘的可靠性优化设计

可靠性设计来源于人们对传统机械设计方法的研究和思考,采用可靠性设计方法,所得到的结果更接近实际设计情况。在可靠性设计中,将载荷、材料性能与强度及零部件的尺寸,都视为属于某种概率分布的统计量,应用概率与数理统计理论及强度理论,求出在给定设计条件下,零部件不产生破坏的概率公式,应用这些公式,就可以在给定可靠度下求出零部件的尺寸。

通过对转盘的结构分析以及可靠性的研究,转盘的可靠性优化设计可以简化为在满足特定条件下的直齿圆锥齿轮的优化设计,在满足可靠度约束的条件下,使转盘的体积最小,质量最轻。

4.1 确定设计变量

在设计转盘之前,在锥齿轮副的部件中,小锥齿轮传递的扭矩、转速、传动比和两轴间的交角已确定,独立的设计参数只有小锥齿轮的齿数 Z_1、大端模数 m 和齿宽 B。故设计变量取为:

$$X=(X_1,X_2,X_3)^T=(Z_1,B,m)^T$$

4.2 建立目标函数

转盘的结构可简化为直齿圆锥齿轮,其体积可近似以大端分度圆与小端分度圆间的圆锥台体积来计算。由截头圆锥的体积计算公式,目标函数可表达为:

$$\begin{aligned}F(x) &= V_1(x)+V_2(x)\\ &=\frac{\pi}{3}B\cos\delta_1\Big[\Big(\frac{mZ_1}{2}\Big)^2+\Big(\frac{mZ_1}{2}\cdot\frac{R-B}{R}\Big)^2+\\ &\quad\frac{mZ_1}{2}\Big(\frac{mZ_1}{2}\cdot\frac{R-B}{R}\Big)\Big]+\\ &\quad\frac{\pi}{3}B\cos\delta_2\Big[\Big(\frac{mZ_2}{2}\Big)^2+\Big(\frac{mZ_2}{2}\cdot\frac{R-B}{R}\Big)^2+\\ &\quad\frac{mZ_2}{2}\Big(\frac{mZ_2}{2}\cdot\frac{R-B}{R}\Big)\Big]\end{aligned}$$

式中:$V_1(x)$——小锥齿轮体积;$V_2(x)$——大锥齿轮体积;R——节锥顶距;B——齿宽;δ_1——小齿轮分度圆锥角;δ_2——大齿轮分度圆锥角。

4.3 建立可靠性优化约束条件

齿轮的接触和弯曲疲劳强度的可靠度约束为:

$$Z_{OH}-(\bar{\sigma}_{HP}-\bar{\sigma}_H)/\sqrt{S^2_{\sigma HP}+S^2_{\sigma H}}\leqslant 0$$

$$Z_{OF_1}-(\bar{\sigma}_{FP_1}-\bar{\sigma}_{F_1})/\sqrt{S^2_{\sigma F_1}+S^2_{\sigma FP_1}}\leqslant 0$$

$$Z_{OF_2}-(\bar{\sigma}_{FP_2}-\bar{\sigma}_{F_2})/\sqrt{S^2_{\sigma F_2}+S^2_{\sigma FP_2}}\leqslant 0$$

式中:$Z_{OF_1}(Z_{OF_2})$——小(大)齿轮弯曲疲劳强度要求的可靠度 $R_{OF_1}(R_{OF_2})$ 对应的可靠性指数;Z_{OH}——齿轮接触疲劳强度要求的可靠度 R_{OH} 对应的可靠性指数。

同时要满足的约束条件有齿宽的上下限约束、大端模数约束、小锥齿轮齿数约束和齿宽系数约束:

$$B_{min}\leqslant B\leqslant B_{max}$$

$$m_{min}\leqslant m\leqslant m_{max}$$

$$Z_{1min}\leqslant Z\leqslant Z_{1max}$$

$$\Phi_{Rmin}\leqslant \Phi\leqslant \Phi_{Rmax}$$

通过对上述优化数学模型的分析,采用约束随机方法求得最优解。由于齿数必须为整数,模数必须取标准化数据,齿宽也应圆整为整数。因此,求得理论上的最优解后,需将最优解圆整为符合工程要求的最优值。

5 结论

本文探讨了将优化设计方法中的有限元优化方法和可靠性优化设计方法应用于钻机的零部件结构设计中,对于提高钻机设计水平,具有一定的实际意义。

参考文献:

[1] 张鄂.现代设计方法[M].西安:西安交通大学出版社,1999.
[2] 藏勇.现代机械设计方法[M].北京:冶金工业出版社,1998.
[3] 陈秀宁.机械优化设计[M].杭州:浙江大学出版社,1991.
[4] 杜平安.MCAE计算机辅助机械工程[M].北京:机械工业出版社,1996.
[5] 周济.机械设计优化方法及应用[M].北京:高等教育出版社,1989.
[6] 孙菊芳.有限元法及其应用[M].北京:北京航空航天大学出版社,1990.
[7] 姜培刚,等.直齿圆锥齿轮传动的可靠性优化设计[M].现代机械,1995,(2).