

文章编号: 1007-2985(2009)05-0074-03

# 基于全局优化设计的全滚动活齿传动模型优化设计\*

金登权

(常德烟草机械有限责任公司, 湖南 常德 415000)

**摘要:** 全滚动活齿传动是一种新型传动, 其基本参数对传动的技术经济效果具有重要作用. 建立了全滚动活齿的优化模型, 并以 LINGO 10.0 软件的全局优化方法进行了优化设计. 实例计算表明采用 LINGO 10.0 的全局优化方法求得的解比现有优化方法求得的解更好, 且方法简单, 值得推广应用.

**关键词:** 全滚动活齿传动; 优化设计; LINGO 语言

**中图分类号:** TH122

**文献标识码:** A

全滚动活齿(Oscillatory Roller Transmission, 简称 ORT)是一种新型传动, 具有单级传动比大, 属同轴传动, 多齿同时啮合, 承载能力大、抗冲击能力强、结构紧凑, 既能实现等共轭传动又能做到全部受力之间基本上处于全滚动状态、功率损耗小等一系列优点. ORT 已取得多国专利, 已在一些行业的成功使用. 广泛应用于石油化工、冶金矿山、轻工制药、起重运输及工程机械等行业作变速器(含增速或减速)使用. ORT 的传动参数对传动的技术经济效果起着重要作用. 传统的试凑法设计已不能满足要求, 建立优化设计模型, 并采用可靠的优化设计方法求解是全滚动活齿传动的当务之急. 为此, 笔者建立全滚动活齿优化设计模型, 并提出了利用 LINGO 10.0 全局优化方法求解.

## 1 优化设计模型

### 1.1 设计变量

选择 5 个设计变量<sup>[1-2]</sup>:

$$\mathbf{X} = (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5)^T = (D_g, d_{gc}, d_{glc}, e_c, b_c)^T \quad (1)$$

其中:  $D_g$  为固齿齿轮分度圆直径; 固齿弦齿距  $t_g = D_g \sin \frac{180}{Z_g}$ ;  $Z_g$  为固齿齿轮齿数; 活齿滚轮直径  $d_g = (0.4 \sim 1.1)t_g = d_{gctg}$ ; 销轴直径  $d_{gl} = (0.4 \sim 1.2)d_g = d_{glc}d_g$ ; 偏心距  $e_c = (0.15 \sim 0.6)d_g = e_c d_g$ ; 活齿滚轮宽度  $b = (0.6 \sim 1.5)d_g = b d_g$ .

### 1.2 目标函数

选择总体积最小时的目标函数<sup>[2]</sup>, 即

$$f(x) = \frac{1}{2}(x_1 + x_1 x_2 \sin \frac{180}{Z_g})^2 x_1 x_2 x_3 \sin \frac{180}{Z_g} \quad (2)$$

### 1.3 约束条件

(1) 活齿滚轮与固齿齿廓的接触强度条件要求:

$$k = 0.418 \sqrt{\frac{F_n E}{br}} \quad k_p, g_1 = 0.418 \sqrt{\frac{F_n E}{br}} - k_p = 0 \quad (3)$$

其中:  $E$  为相接触的两材料的弹性模量(两材料均为钢材, 且  $E = 2.06 \text{ GPa}$ );  $r$  为活齿滚轮半径, 且  $r = \frac{d_g}{2}$ ;

\* 收稿日期: 2009-07-11

作者简介: 金登权(1963-), 男, 湖南常德人, 常德烟草机械有限责任公司工程师, 主要从事烟草机械及纸品机械的设计开发研究.

$k_p$  为许用接触应力;  $F_n$  为活齿滚轮垂直作用于固齿齿廓的法向力。

(2) 活齿滚轮与激波轮的接触强度条件:

$$k = 0.418 \sqrt{\frac{F_r E}{b} \frac{2(d_g + D_j)}{d_g D_j}} \quad k_p, g^2 = 0.418 \sqrt{\frac{F_r E}{b} \frac{2(d_g + D_j)}{d_g D_j}} - k_p \quad 0, \quad (4)$$

其中:  $D_j$  为激波轮直径;  $F_r$  为活齿滚轮作用于激波轮的径向力。

(3) 活齿销轴与活齿架的接触强度条件:

$$k = 0.418 \sqrt{\frac{F E}{b r}} \quad k_p, g^3 = 0.418 \sqrt{\frac{F E}{b r}} - k_p \quad 0. \quad (5)$$

其中:  $b$  为销轴与销轴槽的接触长度, 且  $b = b$ ;  $r$  为销轴半径, 且  $r = \frac{d_g}{2}$ ;  $F$  为单个活齿滚轮驱动活齿架转动的切向力。

(4) 活齿滚轮与活齿销轴的承压强度条件:

$$p = \frac{F}{bd_{gl}} \quad p_p, g^4 = \frac{F}{bd_{gl}} - p_p \quad 0. \quad (6)$$

其中  $p_p$  为许用压强。

(5) 限定设计变量的上下限。根据有关资料规定、推荐及工程经验确定设计变量的上下界:  $x_{j\min} \leq x_j \leq x_{j\max}$ , 其中  $j = 1, 2, \dots, 5$ 。

## 2 实例分析

### 2.1 LINGO 10.0 软件

LINGO 是一种专门用求解数学规划的软件包, 运行 Windows 环境。由于 LINGO 执行速度快, 易于输入、求解和分析数学规划问题, 因此在教育、科研和工业界得到了广泛的应用<sup>[3]</sup>。LINGO 主要用于求解线性规划、非线性规划、二次规划和整数规划、方程组求解等问题, 也可用于一些线性和非线性方程组的求解以及代数方程求根等, 同时 LINGO 也是一个矩阵生成器, 提供了建立最优问题(实例)的一种语言, 有了它, 使用者只需键入 1 行文字就可以建立起成千条约束或目标函数, 掌握这种最优化模型语言是非常重要的, 可以使输入较大规模问题的过程得到简化。LINGO 中包含了一种建模语言和许多常用的数学函数, 可以供使用者建立数学规划模型时调用。LINGO 的最新版本为 LINGO10.0, 它包括一系列版本, 这些软件的内核和使用方法是类似的, 但求解规模各不相同, 其中工业版本最大变量数可达 32 000, 最大约束数可达 16 000, 而非线性变量数可达 3 200, 最大整型变量数也可达 3 200。

LINGO 模型以 MODEL: 语句开始, 以 END 语句结束。所有语句除 SETS、ENDSETS、DATA、ENDDATA、INIT、ENDINIT、MODEL、END、CALC、ENDCALC 之外必须以一个分号 ; 结尾。在 LINGO 中建立优化模型或求方程组时可以引用大量的内部函数, 这些函数以 @ 符号打头。LINGO 中在使用变量时已假设变量非负, 如果变量可以为负, 则必须用 @FREE(Variable-name) 对非负条件予以取消。注释部分用 ! 开始。对于优化目标函数必须用 min 或 max; 如果变量是整型变量, 则要加上语句 @gin(Variable-name), 要作全局优化设计时只需设置全局优化选项为全局优化即可, 其他有关使用方法及和版本的区别见 LINGO 10.0 的帮助文档。

### 2.2 设计数据

设传动比  $i = 20$ , 输入功率  $P_1 = 7 \text{ kW}$ , 输入转速  $n_1 = 1 440 \text{ rpm}$ , 输出功率  $P_2 = 6.51 \text{ kW}$ , 输出转速  $n_2 = 72 \text{ rpm}$ , 输出转矩  $T_2 = 863.48 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。内齿轮固定, 激波器输入, 活齿输出, 同向传动。活齿齿数  $Z_h = i = 20$ , 内齿齿数  $Z_g = i - 1 = 19$ , 材料选用 40 Cr 表面淬火, 硬度 HRC = 50;  $k_p = 875 \text{ MPa}$ ;  $p_p = 170 \text{ MPa}$ 。

### 2.3 目标函数与约束条件

将  $Z_g = 19$  代入(2)式得目标函数为  $f(x) = \frac{1}{2}(x_1 + x_1 x_2 \sin \frac{1}{19})^2 x_1 x_2 x_5 \sin \frac{1}{19}$ , 将数据代入(3)至(6)式, 并确定变量上下界后得约束条件为:

$$g^1 = -875 + 433\,665.96 \sqrt{\frac{1}{x_1^3 x_2^2 x_5}} \quad 0; g^2 = -875 + 561\,826.85 \sqrt{\frac{x_1 - 0.32x_1x_2x_4}{x_1^3 x_2^2 x_5 (x_1x_2 - 0.32x_1x_2x_4)}} \quad 0;$$

$$g^3 = -875 + 492\,754.72 \sqrt{\frac{1}{x_1^2 x_2^2 x_3 x_5}} \quad 0; g^4 = -170 \frac{3\,372\,964.8}{x_1^3 x_2^2 x_3 x_5} \quad 0.$$

其中: 200  $x_1$  500; 0.4  $x_2$  1.1; 0.4  $x_3$  1.2; 0.15  $x_4$  0.6; 0.6  $x_5$  1.5.

## 2.4 程序编写

对于上述优化问题可用 `fmincon()` 求解<sup>[4]</sup>, 也可以用其他优化方法求解. 现采用 LINGO 10.0 对上述优化问题进行了求解(求解时使用全局优化方法<sup>[5]</sup>), 得  $x^* = [381.587\,2, 1.100\,00, 1.200\,00, 0.600\,0, 1.50\,00]^T$ ,  $f^* = 0.330\,628\,5E+08 \text{ mm}^3$ ; 而文献[2]采用复合形法的优化结果为  $x^* = [491.37, 1.047\,6, 1.139\,6, 0.596\,2, 1.433\,6]^T$ ,  $f^* = 0.633\,225\,1E+08 \text{ mm}^3$ : 由此可见, 全局优化较复合形优化体积减小 47.80%.

优化程序为:

model:

MODEL: ! 全滚动活齿全局优化设计;

min= pi/2\* (x1+ x1\* x2\* @ sin(pi/19))^2\* x1\* x2\* x5\* @ sin(pi/19);

pi= 3.1415926;

433665.96/(x1^3\* x2^2\* x5)^0.5- 875< = 0;

561826.85\* ((x1- 0.32\* x1\* x2\* x4)/(x1^3\* x2^2\* x5\* (x1\* x2- 0.32\* x1\* x2\* x4)))^(1/2)- 875< = 0;

492754.72/(x1^2\* x2^2\* x3\* x5)^0.5- 875< = 0;

3372964.8/(x1^3\* x2^2\* x3\* x5)- 170< = 0;

@ bnd(200, x1, 500); @ bnd(0.4, x2, 1.1); @ bnd(0.4, x3, 1.2); @ bnd(0.15, x4, 0.6);

@ bnd(0.6, x5, 1.5);

END

## 3 结论

建立了全滚动活齿传动优化设计模型, 并用 LINGO 10.0 全局优化方法进行求解, 求得了比常规优化设计好得多的结果. 该模型具有一系列优点, 对其优化具有十分重要意义.

参考文献:

- [1] 成大先. 机械设计手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- [2] 钱学毅. 全滚动活齿传动优化设计 [J]. 机电产品开发与创新, 2005, 18(3): 31- 33.
- [3] 何哲明, 罗佑新. 最低成本工艺的 LINGO 模型优化方法 [J]. 现代制造工程, 2002(23): 54- 55.
- [4] 罗佑新, 郭惠昕, 张龙庭, 等. 机械零件的稳健可靠性优化设计 [J]. 农业机械学报, 2002, 33(2): 109- 111.
- [5] 谢金星, 薛毅. 优化建模与 LINGO/Lingo 软件 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.

# Optimization Design of Oscillatory Roller Transmission Based on Global Optimization

JIN Deng-quan

(Changde Tobacco Machinery Co. Ltd., Changde 415000, Hunan China)

**Abstract:** Oscillatory roller transmission is a new kind of transmission. The basic parameters of oscillatory roller transmission play an important effect on transmission technology and economy. In this paper, the optimum model is established and the global optimum solution is obtained by LINGO 10.0 software. The result shows the model is practical and effective and its solution is global solution, better than the result with general optimum method. As the method is simple, it is worthy to spread in optimum design.

**Key words:** oscillatory roller transmission; optimization design; LINGO language

(责任编辑 陈炳权)