

Parameters Optimization of the Three-Stage Planetary Gear Reduction

Haibing Wang¹, Bing Lv¹, Fei Peng¹, Yin Wang², Bangzhi Wu³

¹Chongqing Tsingshan Industrial, Chongqing

²Power Research Institute of Chang'an Automobile, Chongqing

³State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University, Chongqing
Email: 102877@tsingshan.cn, qslb305@163.com, 103178@tsingshan.cn, wangyin@changan.com.cn, bangzhiwu@cqu.edu.cn

Received: Jan. 3rd, 2019; accepted: Jan. 21st, 2019; published: Jan. 28th, 2019

Abstract

The parameters of the three-stage planetary gear reduction in shield tunneling machine was optimized by Lingo software, for the Lingo software has the function of nonlinear Integer optimization, so the optimized teeth numbers need not to be rounded off and the error caused by rounding off is avoided. The optimizing model was constructed with the optimization objective of minimum volume of sun gears and planetary gears and the constraint of total transmission ratio, relationship of teeth numbers, gear strength and the size of the reduction to make the weight of reduction reduce significantly.

Keywords

Shield Tunneling Machine, Planetary Gear Reduction, Optimization Design, Lingo

三级行星齿轮减速器参数优化设计

王海兵¹, 吕兵¹, 彭飞¹, 王银², 吴邦治³

¹重庆青山工业有限责任公司, 重庆

²重庆长安汽车股份有限公司动力研究院, 重庆

³重庆大学机械传动国家重点实验室, 重庆
Email: 102877@tsingshan.cn, qslb305@163.com, 103178@tsingshan.cn, wangyin@changan.com.cn, bangzhiwu@cqu.edu.cn

收稿日期: 2019年1月3日; 录用日期: 2019年1月21日; 发布日期: 2019年1月28日

摘要

利用Lingo软件对盾构掘进机三级行星齿轮减速器进行参数优化设计, Lingo软件具有整数非线性优化功

能,可直接得到最优解而不需要对齿数圆整,避免了圆整之后的解不是最优解的缺点。以太阳轮和行星轮的总体积最小为优化目标,以总传动比、配齿条件、齿轮强度条件、减速器外形尺寸限制等为约束条件,建立优化设计数学模型进行优化设计,使减速器减重明显。

关键词

盾构掘进机,行星齿轮减速器,优化设计, Lingo

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

盾构机是盾构工法中的关键装备,其刀盘驱动系统在掘进施工中驱动刀盘切割岩土,它包括液压马达、主减速器和小齿轮大齿圈减速单元,主减速器传递扭矩大而且传动比大,通常采用三级行星齿轮机构,由于主减速的工作环境空间狭小,因此要求主加速器体积小而且要满足大传动比、大扭矩的要求,故在设计过程中通常采用优化设计的方法来满足上述要求。现在有很多成熟的优化程序可供选择,但每一种优化方法都有自己的适用范围和特点,解决实际工程问题时很容易因为优化方法和初始参数选择不当而无法得到最优解。袁亚辉[1]等运用 Matlab 软件对三级斜齿轮减速器进行了可靠性优化设计,胡青春[2]等运用 Matlab 优化工具箱对二级行星齿轮减速器进行了多目标优化设计。由于齿数为整数,模数也为离散的数据,因此减速器的优化设计是一个整数非线性规划问题。Matlab 没有整数非线性规划的功能,如果选用 Matlab 进行减速器的优化设计,在所得优化结果中必须圆整,这将导致所得结果并不是最优解,文献[1][2]存在这样的问题。朱莉莉[3]等对三级直齿圆柱齿轮减速器进行了参数优化设计并开发了软件,但与文献[1][2]存在相似的问题。由于 Lingo 软件具有整数非线性规划的功能,本文选用 Lingo 软件对三级行星齿轮减速器进行参数优化设计,所得结果不需圆整即可得到最优解。

2. 模型建立

盾构掘进机的主减速器采用的是三级串联 NGW 型行星齿轮机构,其结构简图如图 1。盾构掘进机的主减速器的设计目标是使减速器轻量化,而且还有外形尺寸限制。因此选择太阳轮和行星轮的总体积为目标函数(密度一定,质量与体积成正比);总传动比、配齿条件、齿轮强度条件、减速器外形尺寸限制等为约束条件;以各级行星齿轮的太阳轮齿数、齿圈齿数,名义齿宽、模数、行星轮个数为设计变量建立优化模型。

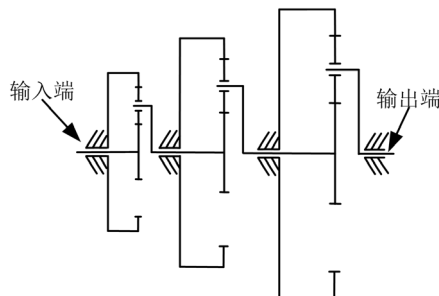


Figure 1. Structure diagram of main reducer star gear mechanism of shield tunneling machine

图 1. 盾构掘进机主减速器星齿轮机构结构简图

2.1. 目标函数

太阳轮和行星轮的总体积为目标函数, 因为密度一定, 质量与体积成正比。建立的目标函数如式(1):

$$\min = \pi b_j \sum_{j=1}^3 \left\{ \frac{(m_j z_{aj})^2}{4} + n_{pj} \frac{[m_j (z_{bj} - z_{aj})]^2}{16} \right\} \quad (1)$$

$z_{aj}(j=1, 2, 3)$ 第 j 级太阳轮齿数, $z_{bj}(j=1, 2, 3)$ 第 j 级内齿圈齿数, m_j 第 j 级模数, n_{pj} 是第 j 级行星轮个数, b_j 是第 j 级齿宽。

2.2. 设计变量

由式(1)可知三级行星齿轮的体积主要与结构参数有关。其中影响其体积的主要因素有各级行星齿轮机构的齿宽、模数、齿数以及行星轮的个数。所以选取 $[z_{a1}, z_{b1}, b_1, m_1, n_{p1}, z_{a2}, z_{b2}, b_2, m_2, n_{p2}, z_{a3}, z_{b3}, b_3, m_3, n_{p3}]$ 作为设计变量。

2.3. 约束条件

2.3.1. 齿数约束

为保证不发生根切, 最小齿数大于等于 17, 而且齿数为整数。

$$17 - z_{aj} \leq 0; (z_{aj} \text{为整数}) \quad (2)$$

$$17 - z_{bj} \leq 0; (z_{bj} \text{为整数}) \quad (3)$$

在 Lingo 中使用@GIN()函数来定义 z_{aj} 和 z_{bj} 为整型变量。

2.3.2. 同心条件约束

选取合理的太阳轮齿数和齿圈齿数使得行星轮齿数 z_g 满足不根切最小齿数条件和齿数为整数的条件, 因为根据同心条件 $z_g = (z_b - z_a)/2$, z_a 和 z_b 分别为太阳轮和内齿圈齿数, 所以该约束条件可以表示为:

$$z_{gj} = \frac{z_{bj} - z_{aj}}{2} \geq 17; \left(\frac{z_{bj} - z_{aj}}{2} \text{为整数} \right) \quad (4)$$

式(4)中, z_{gj} 为第 j 级行星轮齿数, 在 Lingo 中使用@GIN()函数限定 $(z_{bj} - z_{aj})/2$ 为整数。

2.3.3. 模数约束

模数是离散变量。但在本设计中, 该减速器为重型齿轮传动, 一般取模数大于等于 3, 而且优先选用第一系列标准模数, 第一系列标准模数从 3 之后为为整数, 因此可将模数作为整型变量, 以便得到最优解, 在本设计中可将模数当作整型变量。

$$m_j \geq 3; (m_j \text{为整数}) \quad (5)$$

在 Lingo 中使用@GIN()函数限定 m_j 为整型变量。

2.3.4. 装配条件约束

$$K_j = \frac{z_{aj} + z_{bj}}{n}; (K_j \text{为整数}) \quad (6)$$

在 Lingo 中使用@GIN()函数定义 K_j 整型变量。

2.3.5. 邻接条件约束

$$(z_{aj} + z_{gj}) \sin\left(\frac{180^\circ}{n_{pj}}\right) > z_{gj} + 2h_a^* \quad (7)$$

式(7)中: h_a^* 是齿顶高系数。

2.3.6. 齿宽系数约束

根据《机械设计手册》[4], 齿宽系数 Φ_d 选择为 $0.5 < \Phi_d < 1$ 。

$$0.5 < \Phi_{dj} < 1 \quad (8)$$

式(8)中: Φ_{dj} 为第 j 级齿宽系数。

2.3.7. 传动比约束

根据《机械设计手册》[4], 单级行星齿轮减速器传动比推荐值为 $i = 3 \sim 9$ 。

$$3 \leq i_j \leq 9 \quad (9)$$

总传动比的约束:

$$\left| \left(\prod_{j=1}^3 i_j - i_t \right) / i_t \right| < e_i \quad (10)$$

式(9)和(10)中, i_j 为第 j 级行星齿轮机构单级传动比, i_t 为设计要求的总传动比, e_i 为允许的传动比误差。

2.3.8. 空间约束

径向空间限制通过约束内齿圈的直径来实现:

$$m_j z_{bj} \leq d_r \quad (11)$$

轴向空间限制通过约束总齿宽来实现:

$$\sum_{j=1}^3 b_j \leq b_r \quad (12)$$

式(11)和(12)中, d_r 和 b_r 分别为内齿圈和总齿宽的约束值。

2.3.9. 接触应力条件约束

因为 NGW 型行星齿轮传动的接触强度主要取决于太阳轮与行星轮的外啮合副, 为减少约束条件以减少计算量, 只将外啮合的齿面接触疲劳应力的限制作为约束条件。

$$\sigma_{Hj} = Z_{Ej} Z_{Hj} Z_{\epsilon j} \sqrt{\frac{2000 K_j T_j (u_j + 1)}{b_j d_{1j}^2 u_j}} \leq [\sigma_H]_j \quad (13)$$

式(13)中: Z_{Ej} 、 Z_{Hj} 、 $Z_{\epsilon j}$ 和 K_j 分别为第 j 级外啮合副的弹性系数、节点区域系数、重合度系数和载荷系数, μ_j 为第 j 级外啮合副的齿数比, 为大齿轮数与小齿轮数之比, $\mu_j = \max(z_{aj}, z_{gj}) / \min(z_{aj}, z_{gj})$, z_{aj} 和 z_{gj} 分别为第 j 级太阳轮和行星轮齿数, d_{1j} 为第 j 级外啮合的小齿轮直径, T_j 为第 j 级外啮合的小齿轮所受到的力矩, $[\sigma_H]_j$ 为第 j 级行星齿轮机构的外啮合副许用接触应力。

2.3.10. 弯曲应力条件约束

因为 NGW 型行星齿轮传动的强度主要取决于太阳轮与行星轮的外啮合副, 为减少约束条件, 只将外啮合副的齿根弯曲疲劳应力限制作为约束条件。

$$\sigma_{Fj} = \frac{K_j F_{tj}}{b_j m_j} Y_{Fa_j} Y_{Sa_j} Y_{\epsilon_j} < [\sigma_F]_j \quad (14)$$

式(14)中: Y_{Fa_j} 、 Y_{Sa_j} 、 Z_{ϵ_j} 和 K_j 分别为第 j 级外啮合副的齿形系数、应力修正系数、重合度系数和载荷系数, F_{tj} 为第 j 级外啮合副的齿轮所受到的切向应力, $[\sigma_F]_j$ 为第 j 级外啮合副许用弯曲应力。

3. 应用举例

某盾构掘进机三级行星齿轮减速器的设计要求为: 盾构减速器输入转矩 $T = 1489 \text{ N}\cdot\text{m}$; 盾构减速器输入转速 $n = 1145.6 \text{ r/min}$; 循环次数 $N = 50\,000\,000$; 不均载系数 $K_p = 1.1$; 总传动比 $i_t = 51.4$, 允许传动比误差 $e_t = 1\%$; 径向尺寸限制为 490 mm , 总齿宽限制为 400 mm ; 太阳轮与行星轮的材料为 18CrMnTi , 渗碳淬火处理, 硬度为 $58 \text{ HRC} \sim 62 \text{ HRC}$, 内齿圈材料为 40 Cr 调质处理, 硬度为 $250 \text{ HB} \sim 280 \text{ HB}$; 齿轮精度为 6 级。

根据以上目标函数和限制条件, 编写优化程序。在 Lingo 中运行以上程序可得优化后的设计结果: [17, 59, 46, 5, 4, 46, 116, 65, 3, 6, 33, 75, 102, 6, 6], 其太阳轮和行星轮总体积 16966582 mm^3 。优化前设计值为 [27, 75, 60, 4, 3, 23, 65, 85, 6, 4, 27, 69, 130, 7, 4], 其太阳轮和行星轮总体积为 20238894 mm^3 , 由此可见优化后体积减少 16.17% , 减重明显。

4. 结论

本文利用 Lingo 软件对盾构掘进机三级串联 NGW 型行星齿轮传动机构进行了参数优化设计。在综合考虑各种约束条件的情况下, 分析三级行星齿轮传动机构中各参数之间的相互制约关系, 提出以太阳轮和行星轮总体积最小为目标函数的优化设计数学模型, 并采用 Lingo 软件进行优化设计。通过算例表明, 采用 Lingo 软件进行优化设计问题求解, 不用编写大量优化算法程序, 提高了设计效率, 而且所得优化结果可以直接采用, 不需要圆整, 避免了圆整所得结果不是最优解的缺点, 使优化结果更加准确。

参考文献

- [1] 袁亚辉, 张小玲, 安宗文, 等. 基于 MATLAB 的三级圆柱斜齿轮减速器可靠性优化设计[J]. 机械, 2008(9): 6-10.
- [2] 胡青春, 闵锐, 段福海. 两级行星齿轮传动系统多目标优化设计研究[J]. 现代制造工程, 2008(3): 98-101.
- [3] 朱莉莉, 万朝燕, 王广欣. 三级圆柱齿轮减速器参数优化设计及软件开发[J]. 机械传动, 2005(6): 48-50.
- [4] 成大先. 机械设计手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2167-6631, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: met@hanspub.org