

行星齿轮传动的可靠性优化设计

陈举华

朱国强

(山东工业大学机械工程系 济南 250014) (山东工业大学计算中心 济南 250014)

摘要 根据齿轮传动可靠性与优化设计的相关性,建立起双级行星齿轮传动在合理可靠性条件下的优化数学模型,并完成了55kW风力发电机组的行星齿轮传动可靠性优化设计,从根本上克服了原设计方案可靠性设计的缺陷,使其设计参数更加科学、先进、合理。

关键词 行星齿轮;可靠性;最佳化;设计

中图分类号 TH122;TH132.425

0 前言

由于行星齿轮传动具有重量轻、体积小、承载能力及传动比大和效率高的特点,所以伴随着制造、装配工艺对其精度保证的可能性,该类传动已日益显示出在工程实用上的广阔发展前景。

传统的行星齿轮设计方法,其研究和应用都已呈现出明显的局限性。诸如视齿轮应力与强度为一常量,但实际上由于载荷和工况系数等参数的随机性,应力和强度也存在一定的概率分布规律。因此按照传统的设计方法,将不可避免地出现浪费材料或可靠度(可靠性的定量指标)不足,难以体现行星齿轮传动的固有特点。在GB3480—83中,就明确地对各种工况场合下的齿轮传动,分别规定了不同的可靠性指标^[1]。

优化设计可以灵敏地确定在可行域内的最优方案。但是,如果与带有较强经验性的传统设计相连,其结果必然减小或抵消优化设计带来的效益。而只有与能精确反映工程实况的可靠性设计相结合,才能充分发挥优化设计的优越性。可行的思路是:在齿轮传动可靠性满足国标相应标准的前提下,使其结构和性能指标达到最佳设计。

由于可靠度函数对变量微小变动的敏感性,因此在可靠性与优化设计的结合中,若仍以连续变量的优化方法进行设计,当所得最优解圆整为标准参数时,其圆整结果可能导致可靠性要求不能满足^[2]。所以可靠性设计只有与混合离散变量的优化方法相结合,才能得到最优的设计效果。

本文结合 55kW 风力发电机组的双级 NGW92 型行星齿轮减速器,进行可靠性—混合离散变量的优化设计.避免了其传动高速级可靠度过高造成浪费、低速级可靠度偏低形成隐患的不合理现状.调整后的齿轮参数设计更适于风力发电机组的齿轮传动要求.

1 可靠性优化设计数学模型的建立

1.1 目标函数

55kW 风力发电机组的行星齿轮传动,根据载荷及转速等项要求,需选用 NGW92 型双级行星齿轮减速器,主要参数见文献[3].考虑安装减速器的短仓空间有限,将行星齿轮传动体积最小(重量最轻)定为优化目标.双级行星齿轮传动虽比单级传动复杂,但就体积而言,NGW 型双级行星齿轮传动可以认为是高、低速单级行星齿轮传动之和.这样在目标函数处理上可有两种方案供选择:

分别对高、低速级传动求体积最小时的最优设计参数;或采用加权求双级传动体积最小时的最优设计参数;具体目标函数建立如下.

分别寻优,高速级目标函数为(高速加注下标 h)

$$f_h(X) = 0.19635x_1^2 \cdot x_2^2 \cdot x_3[4 + (k-1)^2c] \rightarrow \min$$

$$X = [m_h \quad Z_{ah} \quad b_h]^T = [x_1 \quad x_2 \quad x_3]^T$$

式中: c ——行星轮个数,事先选定; k ——内传动比, $k = Z_b/Z_a$; m ——齿轮模数; b ——有效齿宽; Z_a, Z_b ——太阳轮、内齿轮齿数.

采用混合离散变量的优化方法,各变量取值为

$$x_1 = 3, 4, 5, 6, 8, 10; x_2 = 20, 21, \dots, 30; x_3 = 20, 21, \dots, 60.$$

初始点选原设计参数,以便于比较:

$$X_0 = [4 \quad 25 \quad 50]^T$$

在目标函数曲面的图形处理上,考虑若 m_h, Z_{ah}, b_h 都为自变量时,加之目标函数 $f(X)$,则为四维空间的超曲面,可视性差,故分别令三变量中一变量为常数,作三维空间曲面以分析函数性态.现仅以 $Z_{ah} = 20$ 时的函数曲面为代表作分析用.图 1 所示为由计算机绘出的高速级在变量取值范围内的目标函数图形.

分别寻优,则低速级的目标函数为(低速加注下标 l)

$$f_l(X) = 0.19635x_1^2 \cdot x_2^2 \cdot x_3[4 + (k-1)^2c] \rightarrow \min$$

$$X = [m_l \quad Z_{al} \quad b_l]^T = [x_1 \quad x_2 \quad x_3]^T$$

各变量取值为

$$x_1 = 3, 4, 5, 6, 8, 10; x_2 = 17, 18, \dots, 30; x_3 = 20, 21, \dots, 80.$$

初始点也为原设计参数,为

$$X_0 = [6 \quad 19 \quad 57]^T$$

低速级当 $Z_{al} = 17, m_l, b_l$ 为自变量时,目标函数在取值范围内的图形见图 2.

由高、低速级目标函数曲面可见,高、低速级目标函数曲面性态好,容易寻全局最优解,所以双级行星齿轮传动的目标函数可由高、低速目标函数组合而得.

整体寻优,由高、低速级目标函数的变量组合,得含6个变量的双级行星齿轮传动目标函数为

$$f(X) = \omega_1 \cdot f_h(X) + \omega_2 \cdot f_l(X) \rightarrow \min$$

其中 ω_1, ω_2 分别为高、低速级目标函数的加权因子. 可根据各目标函数优化的重要程度、量纲和量级的不同而定, ω 的取法如下^[4]:

$$\omega_j = 1/[\Delta f_j(X)]^2 \quad (j = 1, 2)$$

式中: $\Delta f_j(X)$ ——该项目目标函数的容限, $\Delta f_j(X)$

$$= (\beta_j - \alpha_j)/2;$$

α_j, β_j ——该项目目标函数的变动范围,即 $\alpha_j \leq f_j(X) \leq \beta_j$.

6个变量的目标函数图由三维空间分别作出后,再综合分析所得最优解是否为全局最优解,因篇幅较多,故不一一赘列.

1.2 约束条件

GB3480-83 在分述几种工作情况下的可靠性指标时,规定“要求在很长的使用寿命内有较高的可靠性”的齿轮传动,其“可靠性应大于 98%”. 55kW 风力发电机组选用的行星齿轮传动,因置于几十米高的台架短仓内而维修不便,同时用于发电机组传动较为重要,所以其接触与弯曲疲劳可靠性指标应涉入此列. 但通过计算,NGW92 型双级行星齿轮传动的每对(个)齿轮的可靠度不尽合理,见表

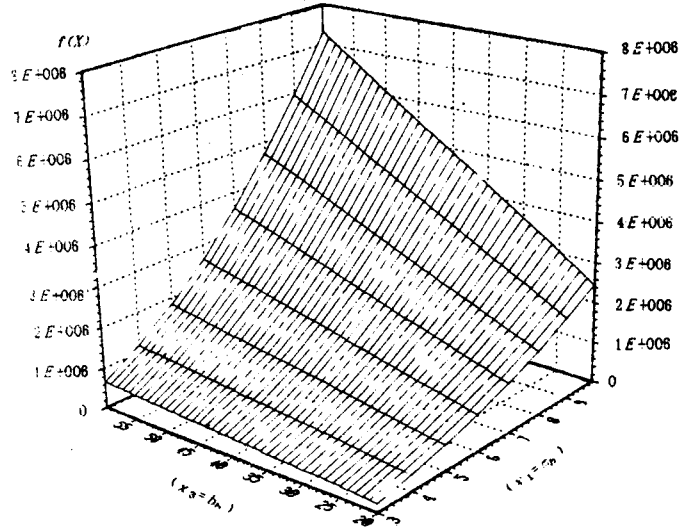


图1 高速级目标函数曲面 ($Z_{ah} = 20$, 未考虑约束)

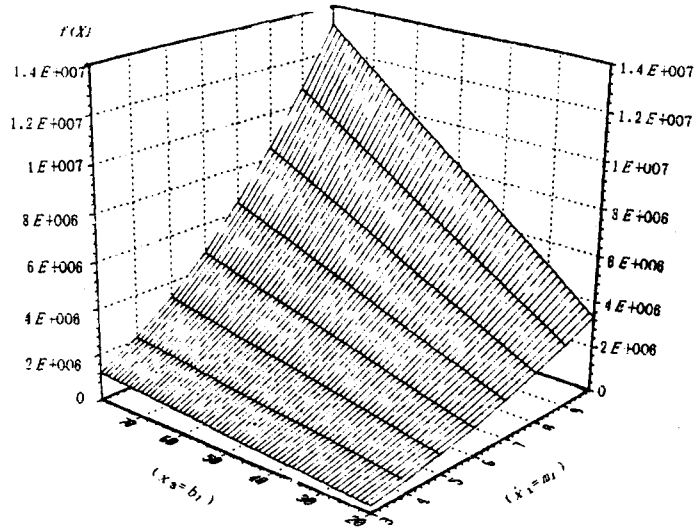


图2 低速级目标函数曲面 ($Z_{ah} = 17$, 未考虑约束)

1~3. 这势必导致系统的可靠度偏低. 为提高系统可靠度, 每对(个) 齿轮的接触、弯曲疲劳可靠度须大于或等于 0.99, 即 $R \geq 0.99$ (可靠性高于 98%).

根据中心极限定理, 所研究的随机变量可以表示为数目充分多且相互独立的随机变量之和, 而每个随机变量对总和的影响很小时, 概率分布渐近于正态分布. 由文献[1] 推举的齿轮接触、疲劳应力 σ_H 、弯曲疲劳应力 σ_F 计算公式, 两边取对数可变为和式形式(符号注释从略):

$$\begin{aligned} \ln\sigma_H &= \ln Z_E + \ln Z_H + \ln Z_\epsilon + \ln Z_\beta + [\ln F_t + \ln K_A + \ln K_V + \ln K_{H\beta} \\ &\quad + \ln K_{H\alpha} + \ln(u \pm 1) - \ln d_1 - \ln b - \ln u]/2 \\ \ln\sigma_F &= \ln F_t + \ln K_A + \ln K_V + \ln K_{F\beta} + \ln K_{F\alpha} + \ln Y_{Fa} + \ln Y_{sa} + \ln Y_\epsilon \\ &\quad + \ln Y_\beta - \ln b - \ln m_n \end{aligned}$$

各随机变量对总和的影响很小, 即没有一项比其它项更占有绝对优势. 因此 $\ln\sigma_H, \ln\sigma_F$ 必渐近于正态分布, σ_H, σ_F 服从对数正态分布, 故采用左偏态的对数正态分布作为齿轮接触、弯曲应力的近似分布规律. 同理也可分析得齿面的接触疲劳极限 $\sigma'_{Hlim} = \sigma_{Hlim} \cdot Z_N \cdot Z_L \cdot Z_R \cdot Z_W \cdot Z_X \cdot Z_V$, 齿根的弯曲疲劳极限 $\sigma'_{Flim} = \sigma_{Flim} \cdot Y_{ST} \cdot Y_{NT} \cdot Y_{\delta rel T} \cdot Y_{Rrel T} \cdot Y_x$ 都服从对数正态分布规律. 即齿轮强度由对数正态分布规律计算. 文献[5] 的接触疲劳强度可靠性试验分析也证明了这一论点的正确性.

根据以上分布规律, 再由可靠度计算联结方程得行星齿轮传动各对(个) 齿轮的 u_H, u_F 值. 又查正态分布表可知, 可靠度 R 与联结方程计算得 u 值有一一对应关系. 当各对(个) 齿轮的可靠度 $R = 0.99$ 时, 对应 $u = 2.33$. 若使其可靠度 $R \geq 0.99$, 则 $u \geq 2.33$, 因此得高速级目标函数的 5 个约束条件. 其中 g_1, g_2 为齿面接触疲劳可靠度约束条件; g_3, g_4, g_5 为齿根弯曲疲劳可靠度约束条件:

$$\begin{aligned} g_1(X) &= 2.33 + 17.966 - 3.9 \ln[x_1^2 \cdot x_2 \cdot x_3 / (23 + x_2)] \leq 0 \\ g_2(X) &= 2.33 + 18.686 - 7.353 \ln[x_1 \cdot \sqrt{x_3}] \leq 0 \\ g_3(X) &= 2.33 + 20.598 - 4.270 \ln(x_1^2 \cdot x_3) \leq 0 \\ g_4(X) &= 2.33 + 22.17 - 4.27 \ln(x_1^2 \cdot x_3) \leq 0 \\ g_5(X) &= 2.33 + 22.26 - 4.26 \ln(x_1^2 \cdot x_3) \leq 0 \end{aligned}$$

齿轮用于动力传动, 齿轮模数须大于或等于 2mm; 齿轮加工无根切产生, 最少齿数须大于或等于 17 齿; 一般对最小齿宽也应加以限制. 以上约束均可在变量输入的上、下界中实现, 因此在约束条件中可以省略. 以下补充的两个约束条件, 是为了齿轮模数和齿宽的取值相对协调, 一般要求 $5 \cdot m \leq b \leq 17 \cdot m$, 所以:

$$\begin{aligned} g_6(X) &= 5x_1 - x_3 \leq 0 \\ g_7(X) &= x_3 - 17x_1 \leq 0 \end{aligned}$$

这样高速级目标函数共建立 7 个约束条件. 低速级传动约束条件的建立与高速级雷同. 由以上分析也可知, 双级行星齿轮传动目标函数应有 14 个约束条件.

2 可靠性优化设计结果

应用混合离散变量优化方法 MDCP^[2],对高速级行星齿轮传动单独寻优,得最优设计参数(加注 * 号):

$$X^* = [3 \quad 20 \quad 44]^T$$

由图 1 也可以看到 $m_n^* = 3\text{mm}$, $Z_{ah}^* = 20$, $b_n^* = 44\text{mm}$,确为满足约束条件的全局最优解(X^* 未取无约束全局最优解是因其约束条件所限).由表 1 列出的电算值可知,各对(个)齿轮满足了可靠度大于 0.99 的约束条件.

表 1 高速级 u_H, u_F 约束值

	$g_1(X)$	$g_2(X)$	$g_3(X)$	$g_4(X)$	$g_5(X)$
可靠性优化前	- 3.23	- 3.56	- 5.62	- 4.04	- 3.89
可靠性优化后	- 0.05	- 0.97	- 2.61	- 1.04	- 0.89

由表 1 可以看出,原设计方案的可靠度大大超过 0.99.可靠度盲目偏高,只能造成材料、成本的不必要浪费,也不适于风力发电机组对其齿轮传动力求体积小、重量轻的要求.经过优化处理后的可靠度趋于合理,体积与重量比原设计方案也下降了 68.32%.由计算机绘出的图 3 可以清晰地看到,高速级目标函数值随寻优过程调用目标函数次数增加的下降过程.

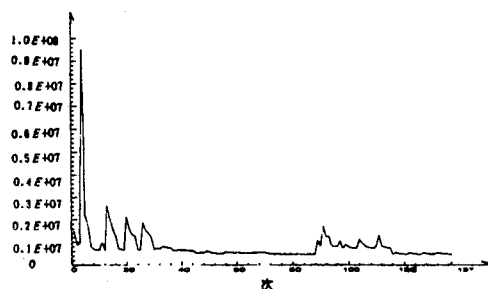


图 3 高速级目标函数寻优过程

低速级行星齿轮传动采用 MDCP 单独寻优,得最优设计参数:

$$X^* = [8 \quad 17 \quad 65]^T$$

各对(个)齿轮原设计方案可靠度相应 u_H, u_F 的约束值和最优设计方案可靠度相应 u_H, u_F 的约束值见表 2.

表 2 低速级 u_H, u_F 的约束值

	$g_1(X)$	$g_2(X)$	$g_3(X)$	$g_4(X)$	$g_5(X)$
可靠性优化前	1.01	2.67	1.26	2.55	1.97
可靠性优化后	- 1.09	- 0.01	- 1.75	- 0.46	- 1.32

由表 2 可以看出原设计方案可靠度不符合要求,故优化后的目标函数值必然上升.但由于风力发电机组齿轮传动可靠度要求为重要指标,此优化方案在满足可靠度要求的前提下,合理调配齿轮参数,使传动体积尽可能减小,所以仍不失一最优方案.由图 2 也可以看出,低

速级行星齿轮传动最优方案 X^* 确为满足约束条件的全局最优解(X^* 未取无约束全局最优解为约束条件所限)。

双级行星齿轮传动综合寻优,原方案和优化后方案可靠度相应 u_H, u_F 的约束值见表3。表中 $g_1(X) \sim g_5(X)$ 为高速级可靠度约束, $g_6(X) \sim g_{10}(X)$ 为低速级可靠度约束。各接触、弯曲疲劳可靠度约束顺序同单级寻优时约束顺序。

表3 双级传动 u_H, u_F 的约束值

	$g_1(X)$	$g_2(X)$	$g_3(X)$	$g_4(X)$	$g_5(X)$	$g_6(X)$	$g_7(X)$	$g_8(X)$	$g_9(X)$	$g_{10}(X)$
可靠性优化前	-3.23	-3.56	-5.62	-4.04	-3.89	1.01	2.67	1.26	2.55	1.97
可靠性优化后	-0.05	-0.97	-2.61	-1.04	-0.89	-1.90	-0.01	-1.75	-0.46	-1.32

由表3可见,此可靠性优化设计方案克服了原高速级可靠度过高和原低速级可靠度不足的缺陷,可靠度设置趋于合理。最优设计参数分别为 $m_h = 3\text{mm}$, $Z_{ah} = 20$, $b_h = 44\text{mm}$, $m_l = 8\text{mm}$, $Z_{al} = 17$, $b_l = 65\text{mm}$ 。以上也可以证实,建立双级目标函数的指导思想和数学处理是正确的。双级目标函数寻优过程见图4。

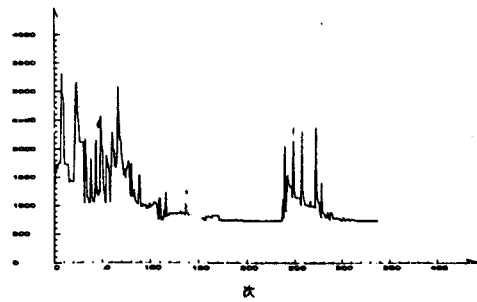


图4 双级目标函数寻优过程

3 结论

(1) 可靠性优化设计的引入,从运筹学角度注意了优化设计的强度指标由可靠性设计满足,使优化设计的强度要求更加符合客观实际规律,优化方案更加准确,优化效益更加显著;从概率论角度可靠性设计注意了参数的寻优,使可靠性指标更加合理,充分发掘了齿轮强度的潜力。故可靠性—混合离散变量优化设计用于机械设计学科,将取得可观的经济效益。

(2) 对于应用越来越广泛的硬面齿轮传动,如文中提到的行星齿轮传动,除本文阐述的设计方案外,由于其危害性失效形式为齿根的弯曲疲劳折断,故可构思在体积一定条件下,弯曲疲劳承载能力最高的优化设计方案,也是一充分发掘硬面齿轮传动潜力的理想方案。

参 考 文 献

- 1 国家齿轮强度课题组. 国家标准“渐开线圆柱齿轮承载能力计算方法”的介绍. 齿轮, 1983, 7(4): 1~90
- 2 陈立周. 工程离散变量优化设计方法. 北京:机械工业出版社, 1989. 108~129
- 3 东北工学院《机械零件设计手册》编写组. 机械零件设计手册. 北京:冶金工业出版社, 1982. 4~100

(下转第228页)

REAL-TIME MEASUREMENT OF ACTIVE POWER BY MICROPROCESSOR

Li Renjun Ma Shaoyan Liang Jun et al

(Dept. of Elect. Power Eng. ,Shandong Univ. of Tech. ,Jinan 250014)

ABSTRACT Development of a new type of real power transducer is described. Based on a high performance 16 bit microprocessor and using HALL effect based current sensor as a multiplier of current and voltage, the power transducer can take fast and accurate measurement of real power with numerical integration technique. Some dynamic simulation test results are given.

KEY WORDS Monolithic processors; Wattful power measurement; Hall sensors; Real time

(上接第 223 页)

4 刘惟信. 机械最优化设计. 北京:清华大学出版社,1986. 189~194

5 朱孝录. 调质钢齿轮接触疲劳强度可靠性试验研究. 齿轮,1983,7(3):1~9

RELIABILITY AND OPTIMIZATION DESIGN OF PLANETARY GEARS TRANSMISSION

Chen Juhua

(Dept. of Mech. Eng. ,Shandong Univ. of Tech. ,Jinan 250014)

Zhu Guoqiang

(Comput Cent. ,Shandong Univ. of Tech. ,Jinan 250014)

ABSTRACT According to the interrelation between the reliability and the optimization design in gears drive, an optimal mathematics model of double reduction planetary transmission is set up on rational reliability conditions. Furthermore, a reliability and optimal design on double reduction planetary transmission is accomplished which is used in 55kW wind power set. The design overcomes basically the shortcomings in the former design and makes the parameters more scientific, more advance and more reasonable.

KEY WORDS Planetary gears; Reliability; Optimization; Design