

# 機械優化設計案例 1

## 1. 題目

對一對單級圓柱齒輪減速器，以體積最小為目標進行優化設計。

## 2. 已知條件

已知數輸入功  $p=58\text{kw}$ ，輸入轉速  $n_1=1000\text{r/min}$ ，齒數比  $u=5$ ，齒輪的許用應力  $[\delta]_H=550\text{Mpa}$ ，許用彎曲應力  $[\delta]_F=400\text{Mpa}$ 。

## 3. 建立優化模型

### 3.1 問題分析及設計變數的確定

由已知條件得求在滿足零件剛度和強度條件下，使減速器體積最小的各項設計參數。由於齒輪和軸的尺寸（即殼體內零件）是決定減速器體積的依據，故可按它們的體積之和最小的原則建立目標函數。

單機圓柱齒輪減速器的齒輪和軸的體積可近似的表示為：

$$\begin{aligned} v &= 0.25\pi b(d_1^2 - d_{z1}^2) + 0.25\pi b(d_2^2 - d_{z2}^2) - 0.25(b-c)(D_{g2}^2 - d_{g2}^2) - \\ &\pi d_0^2 c + 0.25\pi l(d_{z1}^2 + d_{z2}^2) + 7\pi d_{z1}^2 + 8\pi d_{z2}^2 \\ &= 0.25\pi[m_1^2 z_1^2 b - d_{z1}^2 b + m_1^2 z_2^2 u^2 b - d_{z2}^2 b - 0.8b(m_1 z_1 u - 10m_1)^2 + \\ &2.05bd_{z2}^2 - 0.05b(m_1 z_1 u - 10m_1 - 1.6d_{z2}) + d_{z2}^2 l + 28d_{z1}^2 + 32d_{z2}^2] \end{aligned}$$

式中符號意義由結構圖給出，其計算公式為

$$\begin{aligned}
d_1 &= mz_1, d_2 = mz_2 \\
D_{g2} &= u m z_1 - 10m \\
d_{g2} &= 1.6d_{z2}, d_0 = 0.25(u m z_1 - 10m - 1.6d_{z2}) \\
c &= 0.2b
\end{aligned}$$

由上式知，齒數比給定之後，體積取決於b、 $z_1$ 、m、l、 $d_{z1}$ 和 $d_{z2}$

六個參數，則設計變數可取為

$$x = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4 \ x_5 \ x_6]^T = [b \ z_1 \ m \ l \ d_{z1} \ d_{z2}]^T$$

### 3.2 目標函數為

$$\begin{aligned}
f(x) &= 0.785398(4.75x_1 x_2 x_3 + 85x_1 x_2 x_3 - 85x_1 x_3 + 0.92x_1 x_6 - x_1 x_2 + \\
&0.8x_1 x_2 x_3 - 1.6x_1 x_3 + x_4 x_5 + x_4 x_6 + 28x_5 + 32x_6) \rightarrow \min
\end{aligned}$$

### 3.3 約束條件的建立

1) 為避免發生根切，應有 $z \geq z_{\min} = 17$ ，得

$$g_1(x) = 17 - x_2 \leq 0$$

2) 齒寬應滿足 $\varphi_{\min} \leq \frac{b}{d} \leq \varphi_{\max}$ ， $\varphi_{\min}$ 和 $\varphi_{\max}$ 為齒寬係數 $\varphi_d$ 的最大值

和最小值，一般取 $\varphi_{\min} = 0.9$ ， $\varphi_{\max} = 1.4$ ，得

$$g_2(x) = 0.9 - x_1 / (x_2 x_3) \leq 0$$

$$g_3(x) = x_1 / (x_2 x_3) - 1.4 \leq 0$$

3) 動力傳遞的齒輪模數應大於 2mm，得

$$g_4(x) = 2 - x_3 \leq 0$$

4) 為了限制大齒輪的直徑不至過大，小齒輪的直徑不能大於

$d_{1\max}$ ，得

$$g_5(x) = x_2 x_3 - 30 \leq 0$$

5) 齒輪軸直徑的範圍： $d_{z \min} \leq d_z \leq d_{z \max}$  得

$$g_6(x) = 10 - x_5 \leq 0$$

$$g_7(x) = x_5 - 15 \leq 0$$

$$g_8(x) = 13 - x_6 \leq 0$$

$$g_9(x) = x_6 - 20 \leq 0$$

6) 軸的支撐距離  $l$  按結構關係，應滿足條件： $l \geq b + 2\Delta_{\min} + 0.5d_{z2}$

(可取  $\Delta_{\min} = 20$ )，得

$$g_{10}(x) = x_1 + 0.5x_6 - x_4 - 40 \leq 0$$

7) 齒輪的接觸應力和彎曲應力應不大於許用值，得

$$g_{11}(x) = 1468250 / (x_2 x_3 \sqrt{x_1}) - 550 \leq 0$$

$$g_{12}(x) = 7098 \frac{x_1 x_2 x_3^2 (0.169 + 0.6666 \times 10^{-2} x_2 - 0.854 \times 10^{-4} x_2^2)}{x_1^2} - 400 \leq 0$$

$$g_{13}(x) = 7098 \frac{x_1 x_2 x_3^2 (0.2824 + 0.177 \times 10^{-2} x_2 - 0.394 \times 10^{-4} x_2^2)}{x_2^2} - 400 \leq 0$$

8) 齒輪軸的最大撓度  $\delta_{\max}$  不大於許用值  $[\delta]$ ，得

$$g_{14}(x) = 117.04 x_4 / (x_2 x_3 x_5) - 0.003 x_4 \leq 0$$

9) 齒輪軸的彎曲應力  $\delta_w$  不大於許用值  $[\delta]_w$ ，得

$$g_{15}(x) = \frac{1}{x_5^3} \sqrt{\left(\frac{2.85 \times 10^4}{x_2 x_3}\right)^2 + 2.4 \times 10^{12}} - 5.5 \leq 0$$

$$g_{16}(x) = \frac{1}{x_6^3} \sqrt{\left(\frac{2.85 \times 10^4}{x_2 x_3}\right)^2 + 6 \times 10^{12}} - 5.5 \leq 0$$

#### 4. 優化方法的選擇

由於該問題有 6 個設計變數，16 個約束條件的優化設計問題，採用傳統的優化設計方法比較繁瑣，比較複雜，所以選用 Matlab 優化工具箱中的 fmincon 函數來求解此非線性優化問題，避免了較為繁重的計算過程。

## 5. 數學模型的求解

5.1.1 將已知及資料代入上式，該優化設計的數學優化模型表示為：

$$\min f(x) = 0.785398(4.75x_1 x_2 x_3 + 85x_1 x_2 x_3 - 85x_1 x_3 + 0.92x_1 x_6 - x_1 x_5 + 0.8x_1 x_2 x_3 x_6 - 1.6x_1 x_3 x_6 + x_4 x_5 + x_4 x_6 + 28x_5 + 32x_6)$$

Subject to:

$$g_1(x) = 17 - x_2 \leq 0$$

$$g_2(x) = 0.9 - x_1 / (x_2 x_3) \leq 0$$

$$g_3(x) = x_1 / (x_2 x_3) - 1.4 \leq 0$$

$$g_4(x) = 2 - x_3 \leq 0$$

$$g_5(x) = x_2 x_3 - 300 \leq 0$$

$$g_6(x) = 100 - x_5 \leq 0$$

$$g_7(x) = x_5 - 150 \leq 0$$

$$g_8(x) = 130 - x_6 \leq 0$$

$$g_9(x) = x_6 - 200 \leq 0$$

$$g_{10}(x) = x_1 + 0.5x_6 - x_4 - 40 \leq 0$$

$$g_{11}(x) = 1468250 / (x_2 x_3 \sqrt{x_1}) - 550 \leq 0$$

$$g_{12}(x) = 7098 / (x_1 x_2 x_3 (0.169 + 0.6666 \times 10^{-2} x_2 - 0.854 \times 10^{-4} x_2^2)) - 400 \leq 0$$

$$g_{13}(x) = 7098 / (x_1 x_2 x_3 (0.2824 + 0.177 \times 10^2 x_2 - 0.394 \times 10^{-4} x_2^2)) - 400 \leq 0$$

$$g_{14}(x) = 117.04 x_4 / (x_2 x_3 x_5) - 0.003x_4 \leq 0$$

$$g_{15}(x) = \frac{1}{x_3^5} \sqrt{\left(\frac{2.85 \times 10^4 x}{x_2 x_3}\right)^2 + 2.4 \times 10^{12} - 5.5} \leq 0$$

$$g_{16}(x) = \frac{1}{x_3^6} \sqrt{\left(\frac{2.85 \times 10^4 x}{x_2 x_3}\right)^2 + 6 \times 10^{12} - 5.5} \leq 0$$

### 5.1.2 運用 Matlab 優化工具箱對數學模型進程式求解

首先在 Matlab 優化工具箱中編寫目標函數的 M 檔 myfun.m,

返回 x 處的函數值 f :

```
function f=myfun(x)
    f=0.785398*(4.75*x(1)*x(2)^2*x(3)^2+85*x(1)*x(2)*x(3)^2-85
        *x(1)*x(3)^2+0.92*x(1)*x(6)^2-x(1)*x(5)^2+0.8*x(1)*x(2)*x(3)*x(6)
        )-1.6*x(1)*x(3)*x(6)+x(4)*x(5)^2+x(4)*x(6)^2+28*x(5)^2+32*x(6)^2
```

由於約束條件中有非線性約束，故需要編寫一個描述非線性

約束條件的 M 檔 mycon.m :

```
function [c,ceq]=myobj(x)
    c=[17-x(2);0.9-x(1)/(x(2)*x(3));x(1)/(x(2)*x(3))-1.4;2-x(3);x(2)*
        x(3)-300;100-x(5);x(5)-150;130-x(6);x(6)-200;x(1)+0.5*x(6)-x(4)-40;
        1486250/(x(2)*x(3)*sqrt(x(1)))-550;
        7098/(x(1)*x(2)*x(3)^2*(0.169+0.006666*x(2)-0.0000854*x(2)^2))-4
        00;7098/(x(1)*x(2)*x(3)^2*(0.2824+0.00177*x(2)-0.0000394*x(2)^2)
        )-400;117.04*x(4)^4/(x(2)*x(3)*x(5)^4)-0.003*x(4);(1/(x(5)^3))*sqrt(
        (2850000*x(4)/(x(2)*x(3)))^2+2.4*10^12)-5.5;(1/(x(6)^3))*sqrt((2850
        000*x(4)/(x(2)*x(3)))^2+6*10^13)-5.5];
    ceq=[];
```

最後在 command window 裡輸入 :

```
x0=[230;21;8;420;120;160];%給定初始值
```

```
[x,fval,exitflag,output]=fmincon(@myfun,x0,[],[],[],[],[],[],@my
```

obj,output)

%調用優化過程

### 5.1.3最優解以及結果分析運

行結果如下圖所示：

```
Command Window
x =
    123.3565
     99.8517
     1.7561
    147.3757
    150.4904
    129.5096

fval =
    2.3168e+007

exitflag =
     0

output =

    iterations: 42
    funcCount: 604
    stepsize: 1
    algorithm: 'medium-scale: SQP, Quasi-Newton, line-search'
firstorderopt: 1.9956e+007
cgiterations: []
    message: [1x79 char]
```

由圖可知，優化後的最終結果為

x=[123.3565    99.8517    1.7561    147.3157    150.4904

129.5096]

$$f(x)=2.36e*10^7$$

由於齒輪模數應為標準值，齒數必須為整數，其它參數也要進行圓整，所以最優解不能直接採用，按設計規範，經標準化和圓整後：

$$x=[124 \quad 100 \quad 2 \quad 148 \quad 150 \quad 130]$$

$$f(x)=6.16 *10^7$$

## 6.結果對比分析

若按初始值減速器的體積  $V$  大約為  $6.32 \times 10^7 \text{mm}^3$ ，而優化後的體積  $V$  則為  $6.16 \times 10^7 \text{mm}^3$ ，優化結果比初始值體積減少為：

$$\Delta \nu = 1 - (6.16 \times 10^7 / 6.32 \times 10^7) \times 100\% = 2.5\%$$

所以優化後的體積比未優化前減少了 2.5%，說明優化結果相對比較成功。

## 7.學習心得體會

### 學習機械優化設計課程的心得體會

通過將近一學期的學習，對這門課有了初步的瞭解和認識，學期伊始，流覽全書，發現全是純理論知識，覺得這門課會很枯燥，但是又回過頭來想想，作為 21 世紀的大學生，要使自己適應社會需求，首先在做任何事之前都應該有正確的態度看待問題，把這些想法作為促使自己進步的動力，再去學習課本知識，效果

應該很不一樣，有了想法就付諸行動，隨著對課本內容的學習跟老師的講解，發現並不是像自己在學期初想的那樣困難，特別是在老師介紹了一些與機械優化設計相關的電腦語言和電腦軟體後，真正體會到科學優化設計的強大跟簡潔明瞭，與傳統優化設計方法相比較，大大提高了設計效率和品質。

傳統設計方法常在調查分析的基礎上，參照同類產品通過估算，經驗類比或試驗來確定初始設計方案，如不能滿足指標要求，則進行反復分析計算-性能檢驗-參數修改，到滿足設計指標要求為止。整個傳統設計過程就是人工湊試和定性分析比較的過程，是被動地重複分析產品性能，不是主動設計產品參數。按照傳統設計方法做出的設計方案，有改進餘地，但不是最佳設計方案。

而現代化設計工作是借助電子電腦，應用一些精確度較高的力學數值分析方法，優化軟體進行分析計算，找最優設計方案，實現理論設計代替經驗設計，用精確計算代替近似計算，用優化設計代替一般的安全壽命可行性設計。

在進程式求解的過程中，因為是初學 Matlab 軟體，對很多問題的關鍵點不能夠掌握，非線性約束如何書寫，上、下限如何選擇，函數格式如何書寫，變數未定義等等或大或小的問題，但

是在一步步排除錯誤、重新編寫程式的過程中，漸漸的對 Matalab 熟悉起來，懂得了一些優化方法的簡單計算過程和原理，省去了繁瑣複雜的優化計算過程

在學完課程之後，反思自己在學習過程中的得失，深深體會到，不論在人生的哪個階段，都要對自己負責，做任何事都要耐心，細緻，“千里之行，始於足下”，學會在物欲橫流的社會大潮中，堅持踏踏實實走好人生的每一步。

## 8. 參考文獻

[1] 孫靖民,梁迎春. 機械優化設計. 北京:機械工業出版社,2006.

[2] 濮良貴,紀名剛. 機械設計. 8 版. 北京:高等教育出版社,2006.

[3] 孫桓,陳作模,葛文傑. 機械原理. 7 版. 北京:高等教育出版社,2006.

[4] 李濤,賀勇軍,劉志儉. MATLAB 工具箱應用指南-應用數學篇[M].北京:電子工業出版社,2000.

## 機械優化設計案例 2

### 複雜刀具優化設計數學模型的建立及演算法改進

**摘要：**目的 建立複雜刀具優化的數學模型，提高優化演算法速度。

方法 採用優化設計與 CAD 相結合的方法。結果與結論 解決了傳統刀具設計的缺點，改進後的演算法速度大幅度提高。

**關鍵字：**數學模型；優化；演算法

在傳統的刀具設計中，通過查表和經驗公式來確定各種結構參數和幾何參數，然後，反復計算來得到相對較優的刀具參數。這種方法使設計過程複雜費時，且得不到最優化的參數，設計出的刀具成本高，加工效率低。因而刀具的電腦輔助設計應採用優化設計與 CAD 相結合的方法，欲進行優化設計，必需首先建立刀具優化設計的數學模型，由於複雜刀具的種類繁多，結構變化

多樣，優化目標不同，因而需分門別類地建立模型<sup>[1]</sup>，此篇僅以輪切式拉刀為

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：  
<https://d.book118.com/458060057014006105>