

机械优化设计课程实践教学项目设计

翟国栋, 李明阳

(中国矿业大学(北京)机电与信息工程学院, 北京 100083)



摘要:项目教学是一种以问题为导向的教学模式,而教学项目设计是项目教学的一个关键环节。针对《机械优化设计》课程特点及教学中存在的问题,以提高学生对理论知识的运用能力为目标,选取一个带传动和链传动两级传动的优化设计为教学项目,建立了优化设计的数学模型,包括目标函数、约束条件等。应用 Excel 软件,按照图表数据化、模型实现和解算等步骤实现对优化设计模型的求解。该软件对解决优化设计问题具有建模过程简单、优化设计计算速度快、设计资料可读性高、设计自动化水平高等优点,可以大大提高设计人员的设计效率,为优化设计的工程应用提供了新的借鉴思路。该教学项目“教、学、做”相结合,突出学生应用能力的培养,提高了学生学习兴趣和解决实际问题的能力。

关键词:传动系统; 优化设计; 项目化教学

中图分类号:TH 122

文献标志码:A

文章编号:1006-7167(2017)05-0178-06

Design of Practice Teaching Project for the Course Mechanical Optimization Design

ZHAI Guodong, LI Mingyang

(School of Mechanical Electronic & Information Engineering, China University of Mining & Technology(Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: Project teaching is a question-oriented teaching mode. Teaching project design is a key section of project-based teaching. This paper discussed the problems existing in the teaching of mechanical optimization design. According to the characteristic of the course, project teaching can improve teaching quality. On the basis of the student's enhancement on the application of the theory, a real example of belt and chain drives optimization problem is selected as a teaching project. It is established the optimal design model including objective function, constraints etc. The optimal design model is solved through chart data, model realization and reconciliation by using Microsoft Excel. In this way, it has the advantages of simple modeling process, high speed of optimization design, high readability of design data and high level of design automation and so on. So it can save a lot of time and make the design process more convenient. This project can achieve the teaching-learning-doing combination and cultivation of students' application ability. Teaching practice shows that the project-oriented teaching can raise the interests of students in learning and the ability to solve practical problems.

Key words: power transmission system; optimization design; project-based teaching

收稿日期:2016-09-19

基金项目:国家级大学生创新创业训练计划(201611413086);北京市大学生创新训练项目(K201504024);中央高校基本科研业务费专项资金(2014YJ02);中国矿业大学(北京)教学改革项目(j160403、j150402、k130409、C160401)

作者简介:翟国栋(1973-),男,河北高碑店人,博士,高级工程师,机电与信息工程学院副书记兼副院长,主要从事机械专业的教学、科研工作,已发表论文20余篇。

Tel.:(010)62339034,13691002308; E-mail:zgd@cumb.edu.cn

0 引言

机械优化设计是在规定的工况及设计要求条件下,在满足机械产品的几何关系和性能约束的限制下,选取设计变量,建立目标函数并使机械设计的某项或某几项指标获得最优值的一种设计方法。机械优化设计是机械类研究生和高年级本科生的选修课,也是现代设计理论与方法课程的重要组成部分^[1-5]。

机械优化设计的教学目标是使学生掌握机械优化设计的基本理论和方法,能够针对工程项目中的优化设计问题合理地建立数学模型,选用恰当的优化方法,编写计算机程序求解优化设计问题,并对结果进行分析,最终达到独立解决工程实际中的机械优化设计问题的目的。该课程理论性及实践性都较强,其中公式及推导较多,涉及高等数学、线性代数、理论力学、材料力学及计算机语言等课程的知识。在掌握理论知识的基础上,又要将其应用到工程实际中。由于该课程对学生的数学基础、专业知识、计算机的运用及编程求解等方面均有较高的要求,部分学生因此产生畏难情绪,学习兴趣不高^[6-10]。

为了充分调动学生自主学习的积极性,机械优化设计应坚持以项目为主线、任务为驱动、教师为主导、学生为主体的原则开展项目教学^[11-13]。项目教学是一种以问题为导向的教学模式,是将学习目标和理论知识凝编成许多教学单元,将知识以面向项目的方式呈现给师生,已经应用许多工程类课程^[14]。本文结合工程实践讲述机械优化设计课程,通过实践教学项目来带动课程的教学。

1 优化设计数学模型的建立

传统的带传动和链传动设计需要查找大量的手册,计算比较繁琐,需要耗费设计人员大量的时间,而且很难得到最优解。借助计算机,可以大大减少设计人员的计算量,但仍需进行大量的编程工作。目前常用的优化设计理论建模过程往往比较复杂,并且主要是针对连续变量的优化设计,但工程大多数情况下处理的都是离散变量,这就对设计人员提出了很高的能力要求。为了提高带传动和链传动的设计效率,采用 Excel 建立带传动和链传动两级传动的优化模型,并运用内置集成工具 Solver 求最优解。与 Matlab 编程进行优化设计比较,这种方法建模过程简单,优化设计计算速度快,设计资料可读性高,设计自动化水平高。

某壳牌环保马拉松汽车采用带传动和链传动两级传动方案,如图 1 所示,发动机为单缸摩托车发动机,中等冲击。由于所设计汽车的性能需要,传动系统要求尽可能占用更少的空间体积。已知传动系统的传动功率为 4.123 1 kW,传动系统的输入转速为 2 418.055

r/min,输出转速为 760.6 r/min。带传动采用 CONTITECH 的 XPZ 型 V 带,链传动采用 RENOLD 公司的滚子链,链节距为 12.7 mm,对应的链轮宽度为 7.2 mm,所用的滚子链能承受的最大拉力为 17.8 kN。

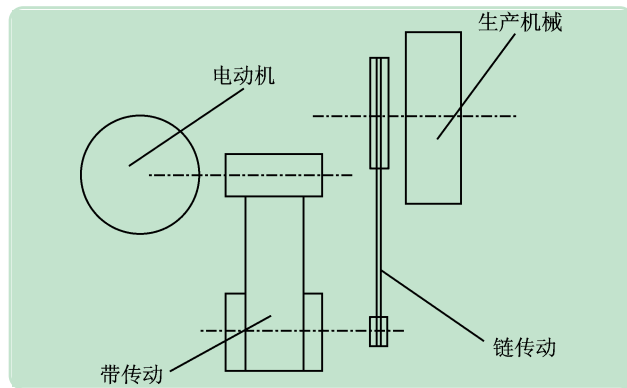


图1 传动方案简图

1.1 目标函数的确定

壳牌环保马拉松比赛要求参赛汽车用 1 L 汽油跑尽量长的距离,这就要求整车的体积要尽量小,因而也要求传动系统要尽可能地占用更少的空间体积。在带传动中,用能够装下传动系统的长方体的体积表示带传动所占用的空间体积,如图 2 所示。长方体的长为带轮的中心距与大小带轮半径之和,长方体的宽即为带轮的宽度,长方体的高等于大带轮的直径,因此带传动所占用的空间体积为:

$$V_{b1} = [a + (d_1 + d_2)/2][(N-1)e + 2f]d_2 = [a + (d_1 + d_2)/2][(N-1)12 + 2 \times 8]d_2$$

其中: a 为两个带轮的中心距, d_1 和 d_2 分别为小带轮和大带轮的直径, N 为V带的根数。

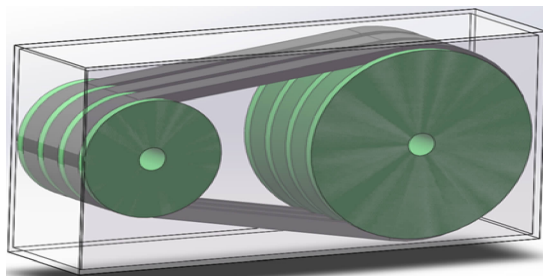


图2 带传动模型图

同理,链传动所占的空间体积为:

$$V_{c1} = \left\{ C + \left[\frac{12.7}{\sin(\pi/Z_1)} + \frac{12.7}{\sin(\pi/Z_2)} \right] / 2 \right\} \times 7.2 \times \frac{12.7}{\sin(\pi/Z_2)}$$

其中: C 为两个链轮的中心距, Z_1 和 Z_2 分别为小链轮和大链轮的齿数。

因此,优化设计的目标函数为:

$$f(x) = V_{b1} + V_{c1} = [a + (d_1 + d_2)/2] \cdot$$

$$\begin{aligned} & [(N-1)12+16]d_2 + \\ & \left\{ C + \left[\frac{12.7}{\sin(\pi/Z_1)} + \frac{12.7}{\sin(\pi/Z_2)} \right] / 2 \right\} \times \\ & 7.2 \times \frac{12.7}{\sin(\pi/Z_2)} \end{aligned}$$

1.2 设计变量的选取

从目标函数的组成上可以看出传动系统的空间体积有6个相关的设计变量:小带轮的直径 d_1 、大带轮的直径 d_2 、两个带轮的中心距 a 、V带的根数 N 、两个链轮的齿数 Z_1 和 Z_2 以及链轮的中心距 C 。在这些变量中,带轮的直径和链轮的齿数并不是相互独立的设计变量,因为整个传动系统的传动比是确定的,当确定两个链轮齿数和小带轮直径之后,大带轮的直径也就随之确定了下来。其中,带轮直径已经实现了标准化,在设计时小带轮直径应当从标准系列中选取。因为V带带长在生产中已经标准化、系列化,当确定了带轮的直径和中心距后,计算出来的带长并不能直接使用,往往需要圆整到邻近的标准值。相类似的,滚子链链长只能是整数,也需要在得到计算值后圆整到邻近的整数值。为了在优化设计过程中合理处理这些离散数据,可以用带长和链长(节数)来分别代替相应的中心距。因此,本设计实例中,选取的设计变量为:

$$\begin{aligned} \mathbf{x} &= [x_1 \quad x_2 \quad x_3 \quad x_4 \quad x_5 \quad x_6]^T = \\ & [d_1 \quad L_w \quad N \quad z_1 \quad z_2 \quad L]^T \end{aligned}$$

其中: d_1 为小带轮的直径, L_w 为V带带长, N 为V带的根数, Z_1 和 Z_2 分别为两个链轮的齿数, L 为链长,单位为节。从设计变量可以看出,所有的设计变量取值都是离散的,这是一个离散变量的优化设计问题。

1.3 约束条件

1.3.1 带传动约束条件

(1) 根据CONTITECH产品手册,此实例中带传动的安全系数应大于1.1。根据产品手册,带传动的安全系数为:

$$c_2 = \frac{Nc_1c_3P_r}{P}$$

其中: c_1 为带传动的包角修正系数, $c_1 = 1.25 \times (1 - 5^{-\frac{\beta}{180}})$, β 为带传动中小带轮的围包角; c_3 为带长修正系数,在产品手册中以表格给出; P_r 为单根V带的额定功率,与小带轮的直径、转速和传动比成函数关系。

因此,带传动的安全系数约束方程为:

$$g_1(x) = 1.1 - \frac{zc_1c_3P_r}{P} \leq 0$$

(2) V带的带速不能超过50 m/s,带传动的带速

为 $v = \frac{\pi d_1 n}{60\,000}$,因此V带带速的约束方程为:

$$g_2(x) = \frac{2\,414.005\pi d_1}{60\,000} - 50 \leq 0$$

(3) 带的根数不能超过10,其约束方程为:

$$g_3(x) = N - 10 \leq 0$$

(4) 带传动的中心距范围 $0.7(d_1 + d_2) \leq a \leq 2(d_1 + d_2)$,带传动的中心距为:

$$a = \frac{1}{4} \left(L_w - \frac{d_1 + d_2}{2} \pi \right) +$$

$$\frac{1}{4} \sqrt{\left(L_w - \frac{d_1 + d_2}{2} \pi \right)^2 - 2(d_2 - d_1)^2} \leq 0$$

因此该约束方程为:

$$g_4(x) = 0.7(d_1 + d_2) - \frac{1}{4} \left(L_w - \frac{d_1 + d_2}{2} \pi \right) -$$

$$\frac{1}{4} \sqrt{\left(L_w - \frac{d_1 + d_2}{2} \pi \right)^2 - 2(d_2 - d_1)^2} \leq 0$$

$$g_5(x) = \frac{1}{4} \left(L_w - \frac{d_1 + d_2}{2} \pi \right) +$$

$$\frac{1}{4} \sqrt{\left(L_w - \frac{d_1 + d_2}{2} \pi \right)^2 - 2(d_2 - d_1)^2} - 2(d_1 + d_2) \leq 0$$

(5) 根据产品手册小带轮直径和带长的范围: $50 \leq d_1 \leq 140, 590 \leq L_w \leq 3\,550$,因此约束方程为:

$$g_6(x) = d_1 - 140 \leq 0$$

$$g_7(x) = 50 - d_1 \leq 0$$

$$g_8(x) = d_3 - 3\,550 \leq 0$$

$$g_9(x) = 590 - d_3 \leq 0$$

1.3.2 链传动约束条件

(1) 为了减小链传动中多边形效应的影响,小链轮的齿数应当大于19,即

$$g_{10}(x) = 19 - Z_1 \leq 0$$

(2) 大链轮齿数应当小于114,即:

$$g_{11}(x) = Z_2 - 114 \leq 0$$

(3) 保证是减速传动,大链轮齿数要多于小链轮,即

$$g_{12}(x) = Z_1 - Z_2 \leq 0$$

(4) 总齿数应该超过50,即

$$g_{13}(x) = 50 - Z_1 - Z_2 \leq 0$$

(5) 此实例中,链传动用于传动系统,要求安全系数大于8,链传动的传动比为 $i_2 = Z_2/Z_1$,链传动的链速 $v = \frac{n_3 p Z_1}{60\,000}$;由传动引起的负载 $F_1 = \frac{1\,000Q}{v}$;由于离心力引起的负载 $F_2 = (\text{链重}/\text{m}) \cdot v^2 = 0.70v^2$;12.7 mm滚子链可以承受的最大拉力为 $F = 17\,800\text{ N}$,安全系数 $= \frac{F}{F_1 + F_2}$,因此约束方程为:

$$g_{14}(x) = 8 - \frac{F}{F_1 + F_2} \leq 0$$

(6) 链轮的中心距应该在节距的30~50之间;链传动的中心距为

$$C = \frac{p}{8} \left[2L - z_2 - z_1 + \sqrt{(2L - z_2 - z_1)^2 - \frac{\pi}{3.88}(z_2 - z_1)^2} \right]$$

p 为链传动的节距,此例中节距为 12.7 mm。

$$g_{15}(x) = C - 50p \leq 0$$

$$g_{16}(x) = 30p - C \leq 0$$

2 图表的公式化

在带传动当中,带长修正系数和单根 V 带的额定功率需要查表,这样的查表操作在优化设计过程中会使优化难度大大增加。为了取得更好的优化效果,需要将产品手册中的图表进行公式化处理^[15-16]。

2.1 带长修正系数的公式化

产品手册中带长修正系数以表格的形式给出,如表 1 所示,考虑到带长修正系数只与带长有关,可以用 Matlab 进行多项式拟合,从而用一个多项式代替表 1。拟合之后的结果是:

$$c_3 = 1.2601 \times 10^{-11} L_w^3 - 1.0661 \times 10^{-7} \times L_w^2 + 3.6319 \times 10^{-4} L_w + 0.6407$$

表 2 单根 V 带额定功率

$D_{wk}/$ mm	传动 比, i	小带轮的转速, $n_k/(r \cdot \min^{-1})$													
		100	200	400	700	800	950	1 200	1 450	1 600	2 000	2 400	2 850	3 200	3 600
63.0	1.00	0.14	0.25	0.45	0.70	0.78	0.90	1.08	1.24	1.34	1.58	1.80	2.02	2.17	2.33
	1.05	0.14	0.26	0.46	0.72	0.80	0.92	1.11	1.28	1.38	1.63	1.85	2.09	2.25	2.42
	1.20	0.15	0.28	0.51	0.81	0.91	1.05	1.27	1.47	1.59	1.89	2.17	2.46	2.67	2.90
	1.50	0.16	0.30	0.54	0.86	0.97	1.11	1.35	1.57	1.70	2.03	2.34	2.66	2.90	3.15
	3.00	0.17	0.31	0.56	0.90	1.01	1.16	1.41	1.65	1.79	2.14	2.47	2.82	3.07	3.34
71.0	1.00	0.19	0.34	0.62	1.00	1.12	1.29	1.57	1.83	1.98	2.37	2.73	3.10	3.37	3.66
	1.05	0.19	0.35	0.63	1.01	1.14	1.32	1.60	1.97	2.02	2.42	2.79	3.17	3.45	3.75
	1.20	0.20	0.37	0.69	1.11	1.25	1.44	1.76	2.06	2.24	2.68	3.11	3.55	3.88	4.23
	1.50	0.21	0.39	0.71	1.16	1.30	1.51	1.84	2.16	2.35	2.82	3.27	3.75	4.10	4.48
	3.00	0.21	0.40	0.74	1.20	1.35	1.56	1.91	2.24	2.43	2.93	3.40	3.90	4.27	4.67

从带传动的原理上可知,单根 V 带的额定功率为:

$$Pr = v \left(\frac{K_1}{v^{0.09}} - \frac{K_2}{d_1 \cdot K_i} - K_3 v^2 \right) c_1 c_3 \quad (1)$$

$$K_i = i \left(\frac{2}{1 + i^{5.3}} \right)^{1/5.3} \quad (2)$$

$$v = \frac{\pi d_1 n_1}{60\,000} \quad (3)$$

将式(2)、(3)代入式(1)可得:

$$Pr = v \left(\frac{K_1}{v^{0.09}} - \frac{K_2}{d_1 K_i} - K_3 v^2 \right) = An_1^3 d_1^3 + Bn_1^{0.91} d_1^{0.91} +$$

表 1 带长修正系数 C_3

L_w/m	C_3	L_w/m	C_3
0.59	0.76	2.00	0.96
0.80	0.81	2.24	0.98
0.90	0.83	2.50	1.00
1.00	0.85	2.65	1.01
1.12	0.86	2.80	1.02
1.25	0.88	3.00	1.03
1.40	0.90	3.15	1.04
1.60	0.92	3.35	1.05
1.80	0.94	3.55	1.06

2.2 单根 V 带额定功率图表的公式化

如表 2 所示,在 V 形带的产品手册中,单根 V 带的额定功率与小带轮直径 d_{wk} 、小带轮转速 n_k 和带传动的传动比 i 有关,但是并没有给出具体的函数关系,这种多变量的图表在优化设计过程中,计算机很难从中查找需要的数据,为此,需要进行图表的公式化处理。

$$Cn_1 \cdot \frac{1}{i \cdot \left[\frac{2}{1 + i^{5.3}} \right]^{\frac{1}{5.3}}} \quad (4)$$

在本设计实例中,由于小带轮转速已知,通过对表格中的数据进行插值得到了输入转速下的数据,因此只需求出在输入转速下,单根 V 带额定功率与小带轮直径和传动比的关系即可。那么,只需要将插值后的数据与下面公式进行拟合:

$$Pr = k_1 d_1^3 + k_2 d_1^{0.91} + k_3 \left\{ 1 / \left[i \left(\frac{2}{1 + i^{5.3}} \right)^{1/5.3} \right] \right\} n_1 \left\{ 1 / \left[i \left(\frac{2}{1 + i^{5.3}} \right)^{1/5.3} \right] \right\} \quad (5)$$

计算多项式中每一项除系数 k_1 、 k_2 、 k_3 外的值,然后利用 Matlab 中 regress 函数进行数据拟合,可以得到拟合后的单根 V 带额定功率的函数式为:

$$Pr = -0.000\ 000\ 046\ 596\ 821 \cdot d_1^3 + 0.111\ 056\ 675\ 832\ 058 \cdot d_1^{0.91} - 2.775\ 427\ 691\ 010\ 937 \cdot \left\{ 1 / \left[i \left(\frac{2}{1 + i^{5.3}} \right)^{1/5.3} \right] \right\} \quad (6)$$

3 在 Excel 中建立优化设计的模型

在 Excel 中进行工程计算,可以极大地减少重复的计算量。在 Excel 中建模就是编写产品计算书的过程。对于带传动和链传动两级传动优化设计,建立的模型如图 3~10 所示。

图 3 用来输入设计参数;图 4 用来表示设计变量,其中小带轮直径和带长只能从表格中选取,图 5 用来存储这些数据。以小带轮直径为例,在相应的蓝色字体单元格内调用 VLOOKUP 函数,即通过改变之后蓝

设计条件			
传动功率	P	4.1231	kW
输入转速	n1	2418.055	r/min
输出转速	n4	760.6	r/min
链节距	p	12.7	mm
链传动最大拉力		17800	N
总传动比	i	3.1791415	

图 3 设计条件

设计变量			
小带轮直径	d1	71	mm
V带长度	Lw	590	mm
带的根数	N	2	
小链轮齿数	Z1	19	
大链轮齿数	Z2	38	
链长	L	89	节

图 4 设计变量

带传动设计过程			
大带轮直径	d2	112.86	mm
带传动传动比	i1	1.5895707	
带轮中心距	a	149.12835	mm
小带轮包角	β	163.86411	(°)
包角修正系数	c1	0.9611992	
带长修正系数	m	1.26E-11	-1.1E-07 3.63E-04 6.41E-01
带传动额定功率	c3	0.82	
带传动安全系数	Pr	2.88	kW
带速	c2	1.1027506	
	vb	8.98924335	m/s

图 5 带传动设计过程

带传动约束条件			
1. 安全系数应该大于 1.1			约束单元格
$g1(x)=1.1-c2 \leq 0$			-0.00275
2. 带速应该小于 50m/s			
$g2(x)=\pi \cdot d1 \cdot n / 60000 - 50 \leq 0$			-41.0108
3. 带的根数不应超过 10			
$g3(x)=Z-10 \leq 0$			-8
4. 中心距 $0.7 \cdot (dwg+dwk) < a < 2 \cdot (dwg+dwk)$			
$g4(x)=0.7 \cdot (dwg+dwk) - a \leq 0$			-20.4267
$g5(x)=a - 2 \cdot (dwg+dwk) \leq 0$			-218.591
5. 带型限制 $50 \leq d < 140, 590 \leq Lw \leq 3550$			
$g6(x)=d1-140 \leq 0$			-69
$g7(x)=50-d1 \leq 0$			-21
$g8(x)=Lw-3550 \leq 0$			-2960
$g9(x)=590-Lw \leq 0$			0

图 6 带传动约束条件

链传动设计过程			
小链轮转速	n2(n3)	1521.2	r/min
链传动传动比	i2	2	
链轮中心距	C	382.24788	
链重		0.7	kg/m
使用系数	f1	1.7	
齿数系数	f2=19/Z1	1	
计算功率	Q	7.00927	kW
小链轮直径	d3	77.15928	mm
大链轮直径	d4	153.79148	mm
链速	v	6.1177593	m/s
传动引起的拉力	F1	1145.725	N
离心力引起的拉力	F2	26.198885	N
滚子链总拉力	F	1171.9239	N
链传动安全系数	c2	15.188699	

图 7 链传动的设计过程

链传动约束条件			
1. 小链轮齿数至少 19, 大链轮齿数不能超过 114			
$g10(x)=19-Z1 \leq 0$			0
$g11(x)=19-Z1 \leq 1$			-76
$g12(x)=Z1-Z2 \leq 0$			-19
2. 中心距应该在链节距的 30~50 倍之间			
$g13(x)=C-50p \leq 0$			-252.752
$g14(x)=30p-C \leq 0$			-1.24788
3. 总齿数不能少于 50			
$g15(x)=50-(Z1+Z2) \leq 0$			-7
4. 安全系数要大于 8			
$g16(x)=8-c2 \leq 0$			-7.1887

图 8 链传动约束条件

目标函数			
带传动空间体积	V1	761759.69	mm ³
链传动空间体积	V2	551128.31	mm ³
传动系统空间总体积	V	1312888	mm ³

图 9 目标函数设置

查表数据		
序号	可选带长	小带轮直径
1	590	50
2	610	56
3	630	63
4	640	71
5	660	80
6	670	90
7	690	100
8	710	112
9	730	125
10	750	140
11	760	
12	780	
13	800	

图 10 查表数据

色方框内数值调用表格数据获取标准值。图 5、6 完成设计中主要参数的计算,图 7、8 用来添加约束条件。图 9 用来建立目标函数,当设计变量中输入相应值时,此处会自动计算出目标函数的函数值。图 10 为查表数据。这样建立起来的模型可以作为带传动和链传动两级传动的设计书,设计人员可以用在传统设计当中,大大减少了重复的计算量。

4 利用 Excel 集成的优化求解工具求最优解

微软 Excel 内部集成的“规划求解”工具提供了很好的优化设计工具^[18-19]。通过点击数据->规划求解打开优化求解工具,如图 11 所示。选取目标函数对应的单元格设置为优化目标,选择“最小值”设计变量对应的单元格选取为可变单元格,并添加整数约束,约束

条件部分的约束单元格全部添加小于等于零的约束。

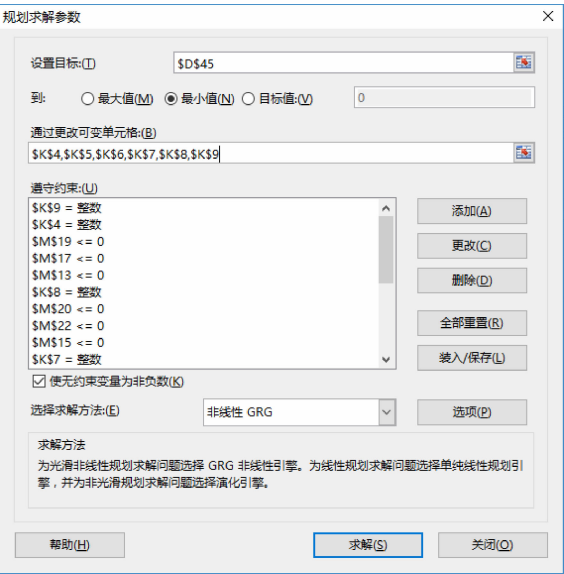


图 11 规划求解工具

在设计变量对应的单元格内随机输入几个初值,运用优化工具求解,以目标函数最小值对应的设计变量作为最优解。

计算结果对比见表 3,与未进行优化设计时传统设计方案相比,传动系统的体积减少了 15.95%,效果非常明显。为了检验优化结果的可靠性,考虑到变量全部都是离散变量,在 Matlab 中采用穷举法对这个优化问题进行了求解,所求结果相同,但在 Matlab 当中的求解时间达到了 3 h,而本文中所用方法求解时间只有几 min。本文采用 Matlab 对带传动当中的主要表格进行了公式化处理,在 Excel 当中完成了优化设计模型的建立,并使用微软 Excel 特有的“规划求解”工具对设计方案进行了优化。结果表明,采用 Excel 进行传动系统的优化设计可以大大提高设计人员的设计效率,简化设计流程,减少重复计算,并且具有比较高的通用性,非常具有应用价值。

表 3 结果对比

参数	优化设计方案	原设计方案
d_1/mm	71	63
L_w/mm	590	590
N	2	3
Z_1	19	19
Z_2	38	40
$L/\text{节}$	89	94
v/mm^3	1 312 888	1 562 019

5 结 语

教学实践证明,在机械优化设计课程实施案例教学法后学生的学习兴趣得到了提高,分析问题、解决问题的工程实践能力得到增强。在实践中学生会将工程问题转化为最优化设计问题,分析机械优化的基本方法并合理建立数学模型,能编写调试简单的优化程序,较好地完成实验内容。项目化教学切实提高了学生的学习兴趣 and 工程实践能力,培养了学生动手能力和创新能力。

参考文献 (References) :

[1] 黄 平. 最优化理论与方法[M]. 北京:清华大学出版社,2009.

[2] 刘惟信. 机械最优化设计[M]. 北京:清华大学出版社,1994.

[3] 孙靖民,梁迎春. 机械优化设计[M]. 北京:机械工业出版社,2006.

[4] 裴飞飞. 量子遗传算法在机械优化问题中的应用研究[D]. 武汉:武汉科技大学,2010.

[5] 孙全颖,王艺霖,杜须韦. 遗传算法在机械优化设计中的应用研究[J]. 哈尔滨理工大学学报,2015(8):46-50.

[6] 李 旻. 机械优化设计实验教学系统的研制[J]. 辽宁师范大学学报,2009,32(S):189-190.

[7] 李 旻,李 静,饶雄新,等. Matlab 优化工具箱在机械优化设计教学中的应用[J]. 装备制造技术,2010(3):156-158.

[8] 单建华,汪永明,谢能刚. 基于 Matlab 的机械优化设计课程改革探索[J]. 安徽工业大学学报(社会科学版)2014(3):109-110.

[9] 万朝燕,鲍君华等. 激发学生学习《机械优化设计方法》兴趣当议[J]. 科技展望,2016(23):216.

[10] 杨亚洲,徐 杰,杨 斌,等.《机械优化设计》课程教学研究与探索[J]. 软件,2012(11):255-256.

[11] 林桂娟. 机械优化设计课程的项目驱动式教学方法探讨[J]. 赤峰学院学报(自然科学版),2014(10):256-257.

[12] 刘长青,孔丽丹. 以项目驱动的双主体教育模式在本科生导师制中的实施[J]. 黑龙江高教研究,2013,31(7):13-15.

[13] 陈长清,陈传波. 项目驱动产学研结合的软件工程系列课程构建探讨[J]. 计算机工程与科学,2011,33(A1):24-27.

[14] 刘云龙,唐述宏. 现代控制系统课程的主动式项目教学方法[J]. 实验室研究与探索,2016(1):161-165.

[15] 王 成,沈婷婷. 斜齿轮体积优化过程中建模方法的研究[J]. 燕山大学学报,2015(1):16-21.

[16] 张 翔,陈建能. 机械优化设计[M]. 北京:科学出版社,2012.

[17] 严寒冰,原思聪,季文祥. 基于遗传算法及 Matlab 的 V 带传动优化设计[J]. 机械,2008(9):23-25.

[18] 谢永盛. Excel 的规划求解及其在最优化问题中的应用[J]. 柳州师专学报,2015(4):156-160.

[19] 魏杰羽. Excel 在物流运筹课程中的应用[J]. 物流工程与管理,2012(5):201-203.