

# 风电齿轮箱行星架多圆弧结构的优化设计研究

覃立<sup>1</sup>,陈荣梅<sup>2</sup>,郭勤涛<sup>1</sup>

(1. 南京航空航天大学 机电学院,江苏 南京 210016;

2. 南京安维士传动技术股份有限公司,江苏 南京 210019)

**摘要:**针对风电齿轮箱行星架阶梯轴处的应力集中现象,采用过渡多圆弧的改进措施。基于多圆弧曲线的通用几何关系,联合 MATLAB 和 HyperWorks 对多圆弧结构进行参数化建模。以多圆弧结构质量最小为优化目标,应力符合强度要求为约束条件建立优化问题,结合代理模型和粒子群算法对多圆弧结构进行优化设计,优化后的应力降低了 9.8%,满足疲劳强度要求,优化了时间成本。

**关键词:**风电齿轮箱;参数化建模;代理模型;粒子群算法;优化设计

**中图分类号:**TH132.425 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2021)05-0035-04

## Research on Optimal Design of Multi-arcs Structures in Wind Turbine Gearbox's Planetary Carrier

QIN Li<sup>1</sup>, CHEN Rongmei<sup>2</sup>, GUO Qintao<sup>1</sup>

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China; 2. Nanjing Avis Transmission Technology Co., Ltd., Nanjing 210019, China)

**Abstract:** To reduce stress concentration at stepped shaft of planet carrier in wind power gearbox, transit multi-arc was used as a feasible method to optimize the structure. Based on general geometric relationship of multi-arc curves, the multi-arc structure was modelled parametrically in conjunction with MATLAB and HyperWorks. Agent models and particle swarm algorithm were combined to optimize the design of multi-arc structure, while the parameters were chosen as design variables to get minimum mass with constrained maximum principle stresses. The optimized stress was reduced by 9.8%, which enhanced fatigue strength and improved time efficiency.

**Keywords:** wind power gearbox; parametric modeling; agent models; particle swarm algorithm; optimal design

## 0 引言

在大型风电传动系统中,行星架承担着主轴传递过来的转矩,是风电齿轮箱中承载最大的零部件,在工程应用中前臂和前轴联接处时常会发生断裂、疲劳等故障<sup>[1]</sup>。行星架作为齿轮箱中最重要的零部件之一,为了保证风力发电机 20 年的运行寿命,须保证行星架具有足够的极限强度和疲劳强度<sup>[2]</sup>,因此行星架的强度设计研究具有重要意义。

在某些双臂行星架中,在前臂和前轴联接处设置有阶梯轴结构,如图 1 所示,以便于对支承行星架的滚动轴承轴向定位。显然,在阶梯轴的 1、2 两处存在应力集中现象。在机械零部件中,通常采用过渡圆弧来改善该现象,常见过渡圆弧构型有单圆弧、双圆弧和三圆弧等<sup>[3-4]</sup>。鉴于采用单圆弧过渡影响轴承装配且应力降低效果不明显。过渡多圆弧被作为一种低应力设计方案,但如何实现多圆弧参数优化设计并提高优化设计效率成为一个研究问题。

本文以两种圆弧构型即图 1 中 1 处采用双圆弧、2 处采用三圆弧为例进行多圆弧结构优化设计研究。首先对

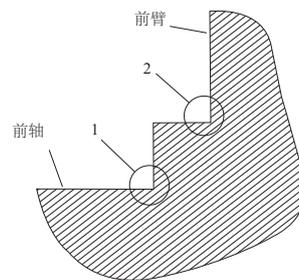


图 1 阶梯轴结构

多圆弧参数设计方法进行了研究,利用有限元和编程软件实现行星架多圆弧结构的参数化建模,最后进行了优化方法的探讨。

## 1 多圆弧曲线的参数设计

为了准确描述多圆弧曲线的形状和位置并保证设计参数之间相互独立,以三圆弧曲线为例,推导其通用的几何关系<sup>[5-8]</sup>,提取出设计参数。然后,利用该方法确定多

圆弧结构的设计参数,为其优化设计提供理论依据。

### 1.1 三圆弧曲线的参数设计

三圆弧设计参数的确定方法如图 2 所示,画两条分别与圆弧  $\widehat{AB}$ 、 $\widehat{CD}$  相切的直线相交于  $O$  点,夹角为  $\beta$ ,以  $O$  点为原点,一条切线为  $y$  轴建立平面直角坐标系  $x_2Oy_2$ 。在该坐标系下, $S_1$ 、 $S_2$  分别为  $A$  点和  $B$  点的横坐标,通过式(1)~式(4)可以推出,用 5 个独立参数即可确定三圆弧的形状。

根据几何关系,可以推出圆心  $O_1(x_{o_1}, y_{o_1})$ 、 $O_2(x_{o_2}, y_{o_2})$ 、 $O_3(x_{o_3}, y_{o_3})$  的坐标:

$$\begin{cases} x_{o_1} = S_2 - R_1 \cos\beta \\ y_{o_1} = R_1 \sin\beta + S_2 / \tan\beta \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} x_{o_2} = (S_2 - S_1)R_2 / R_1 + S_1 - R_2 \cos\beta \\ y_{o_2} = y_{o_1} \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} x_{o_3} = R_3 \\ y_{o_3} = y_{o_1} \end{cases} \quad (3)$$

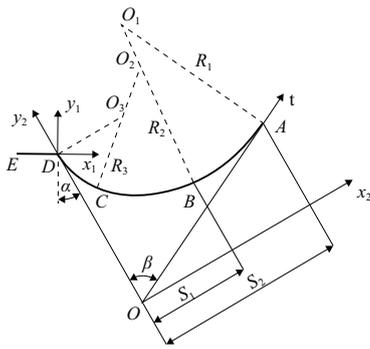


图 2 三圆弧参数的示意图

根据三圆弧的相切条件,可得

$$\begin{cases} (x_{o_1} - x_{o_2})^2 + (y_{o_1} - y_{o_2})^2 = (R_1 - R_2)^2 \\ (x_{o_2} - x_{o_3})^2 + (y_{o_2} - y_{o_3})^2 = (R_2 - R_3)^2 \end{cases} \quad (4)$$

在图 2 中,线段  $ED$  为与多圆弧相接的已知结构,以  $D$  点为原点, $ED$  为  $x$  轴,建立坐标系  $x_1Dy_1$ , $\alpha$  为两坐标系  $y$  轴相交形成的锐角。在三圆弧形状确定时, $\alpha$  可以控制三圆弧结构的位置,需将其作为独立变量,用公式(5)可将圆弧上点的坐标从坐标系  $x_2Oy_2$  转换到坐标系  $x_1Dy_1$  上,即将坐标  $(x_2, y_2)$  转换成坐标  $(x_1, y_1)$ 。

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\alpha & -\sin\alpha \\ \sin\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 - y_{o_3} \end{bmatrix} \quad (5)$$

因此,为了确定三圆弧曲线的位置和形状,共需采用 6 个独立变量。应用该参数设计方法,单圆弧和双圆弧的独立变量数目分别为 3 个和 4 个。此外,圆弧段数  $> 3$  的多圆弧曲线也可利用上述方法确定独立变量。

### 1.2 多圆弧结构的参数设计

多圆弧结构的母线如图 3 所示,结合上一节的参数设计方法和实际位置约束(点  $A$ 、 $D$ 、 $F$ 、 $H$  均固定不动),该母

线可用 8 个独立参数描述,其中三圆弧段 5 个,两圆弧段 3 个,其参数范围如表 1 所示。

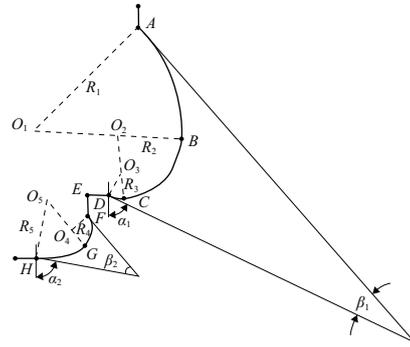


图 3 多圆弧结构的示意图

表 1 多圆弧结构的设计参数及范围

区域	设计参数	下限	上限
三圆弧段	$R_1/\text{mm}$	30	37
	$R_2/\text{mm}$	15	18
	$R_3/\text{mm}$	4	8
	$\alpha_1/(\text{°})$	60	65
	$\beta_1/(\text{°})$	7	18
两圆弧段	$R_5/\text{mm}$	14	20
	$\alpha_2/(\text{°})$	60	80
	$\beta_2/(\text{°})$	5	40

## 2 行星架的应力分析

### 2.1 参数化建模及应力分析过程

图 4 为联合 MATLAB 和 HyperWorks 两种软件对多圆弧结构参数化建模的方法:利用 MATLAB 编程,用设计变量控制多圆弧曲线的形状和位置,并调用 MESH2D 工具箱<sup>[9]</sup>生成多圆弧结构截面的二维网格模型,在 HyperMesh 中建立多圆弧结构和整体行星架的三维网格模型,此外还需利用 MATLAB 程序和 HyperWorks 的二次开发功能<sup>[10]</sup>保证参数化建模过程的可重复性。

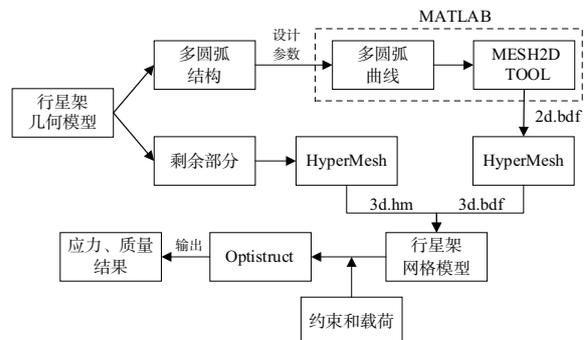


图 4 行星架参数化建模及应力计算过程

图5为行星架的有限元模型及边界条件。许多学者对行星架的极限强度分析做了大量的工作<sup>[11-12]</sup>,本文不再赘述该过程。行星架的材料为QT700-2A,其疲劳极限为380 MPa,材料局部安全系数为1.1,其他安全系数均考虑在载荷中,此时疲劳强度许用应力 $[\sigma]$ 为345 MPa。同时,分析应力类型为最大主应力<sup>[13]</sup>,且需用许用应力评判结构是否满足强度要求。

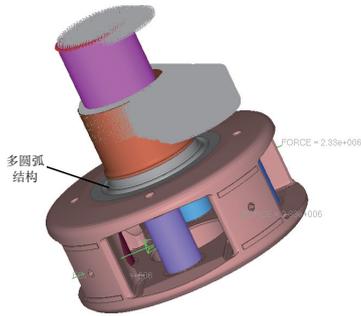


图5 行星架的有限元模型及边界条件

## 2.2 多圆弧参数与应力、质量的变化关系

基于表1中的设计参数和图4的应力分析过程,可以开展多圆弧参数与多圆弧结构上最大应力、质量之间的变化关系研究。

三圆弧的形状和位置由5个独立设计参数 $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$ 、 $\alpha_1$ 和 $\beta_1$ 确定,固定两圆弧的设计参数,此时可取 $R_5 = 18 \text{ mm}$ , $\alpha_2 = 80^\circ$ , $\beta_2 = 18^\circ$ 。在设计参数的取值范围内取等距的7个值,探究 $\sigma_{1,\max}$ 、 $\sigma_{s,\max}$ 和质量随单一参数的变化规律,如图6-图8所示。

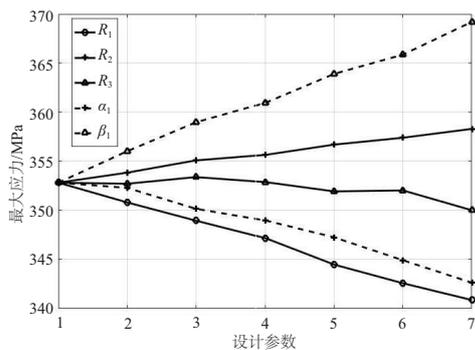


图6 两圆弧处最大应力与参数的变化关系

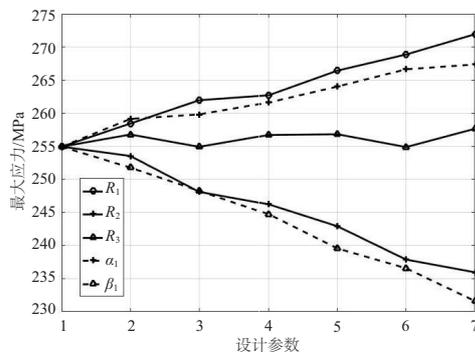


图7 三圆弧处最大应力与参数的变化关系

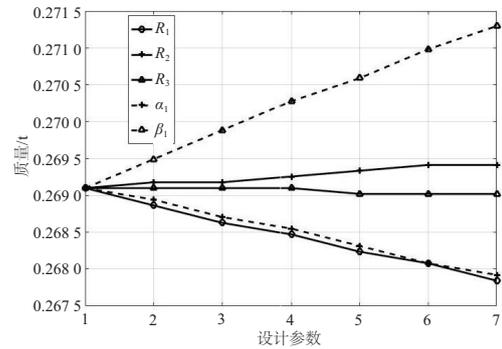


图8 参数化部分质量与参数的变化关系

从图6-图8中可以看出,两圆弧处的应力值明显高于三圆弧处,并可能超过许用应力值;质量和 $\sigma_{1,\max}$ 应力随着参数 $R_2$ 、 $\beta_1$ 的增大而增大,随着参数 $R_1$ 、 $R_3$ 、 $\alpha_1$ 的增大而减小, $\sigma_{s,\max}$ 的变化规律与之相反;5个参数对两个圆弧段上的应力均有影响。其中, $\sigma_{1,\max}$ 表示两圆弧段上最大应力, $\sigma_{s,\max}$ 表示三圆弧段上最大应力。另外,两圆弧的参数也符合类似规律。

## 3 多圆弧结构的优化设计

### 3.1 优化问题的建立

基于2.2节中多圆弧参数与质量的变化规律可知,当 $R_1 = 35 \text{ mm}$ , $R_2 = 15 \text{ mm}$ , $R_3 = 8 \text{ mm}$ , $\alpha_1 = 65^\circ$ , $\beta_1 = 7^\circ$ , $R_5 = 14 \text{ mm}$ , $\alpha_2 = 60^\circ$ 和 $\beta_2 = 40^\circ$ 时,质量取最小值0.2318 t,此时应力 $\sigma_{1,\max} = 375.3 \text{ MPa}$ , $\sigma_{s,\max} = 261.7 \text{ MPa}$ 。 $\sigma_{1,\max}$ 超出了许用应力,因此不满足疲劳强度要求。为了对多圆弧结构进行低应力和低质量设计,本文以多圆弧结构的8个参数作为设计变量,应力满足疲劳强度要求作为约束条件和参数化部分质量最小作为目标函数建立优化问题,数学模型如下所示。

$$\begin{aligned} \min \quad & \text{mass} = f(R_1, R_2, R_3, \alpha_1, \beta_1, R_5, \alpha_2, \beta_2) \\ \text{s.t.} \quad & \sigma_{1,\max} \leq 260 \text{ MPa} \\ & \sigma_{s,\max} \leq 345 \text{ MPa} \end{aligned}$$

### 3.2 多种代理模型的实现

行星架有限元模型每进行一次静力学分析需耗费时间为5 min左右。由于涉及8个设计变量,在优化过程中可能会迭代计算成千上万次,若基于有限元模型反复计算响应,必将产生巨大的时间成本。为了减少仿真计算时间,可采用代理模型技术<sup>[14]</sup>,它可以代替实际物理模型的计算过程。

在建立代理模型时,试验设计方法和近似模型直接影响代理模型的精度<sup>[15]</sup>,可对比不同试验设计和近似模型下代理模型的精度选出最优方案。采用正交设计、拉丁超立方和优化超立方三种试验设计方法获取模型样本点,样本点数如表2所示,并利用该样本点分别构建多项式响应面模型、Kriging模型和径向基模型,然后使用测试点验证方法<sup>[15]</sup>对模型精度进行检验,其中验证样本点为同一组

拉丁超立方抽样的样本点。图9为 $\sigma_{1,\max}$ 应力代理模型精度对比图。在模型样本点数相当的情况下,正交试验设计的代理模型精度明显优于其他两种设计方法,所以试验设计方法选用正交设计。在正交设计下, $\sigma_{1,\max}$ 应力的三阶多项式响应面模型精度最高, $\sigma_{s,\max}$ 应力的径向基模型精度最高,质量的径向基模型精度最高,依此可以确定各目标量最优的近似模型。各目标量代理模型的优选方案如表3所示。

表2 试验和验证的样本点数

类别	试验设计		
	正交设计	拉丁超立方	优化拉丁超立方
样本点数	64	60	60
验证点数	30	30	30

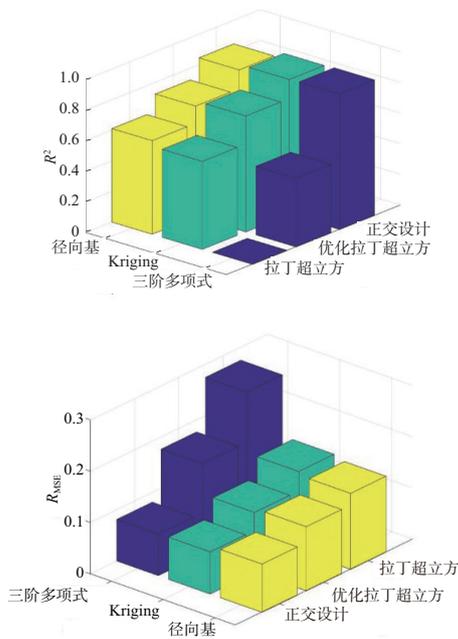
图9  $\sigma_{1,\max}$ 应力代理模型的精度对比

表3 各目标量代理模型的优选方案及精度

目标量	试验设计	近似模型	$R^2$	$R_{MSE}$
$\sigma_{1,\max}$	正交设计	多项式	0.885	0.081
$\sigma_{s,\max}$	正交设计	径向基	0.982	0.032
质量	正交设计	径向基	0.991	0.030

### 3.3 基于粒子群算法的结构优化

在建立高精度的代理模型后,可采用优化算法求解优化模型的最优解。粒子群算法在求解优化问题时表现出良好的寻优能力,通过迭代寻优计算能够迅速找到最优解,因此粒子群算法在工程计算中广泛应用<sup>[16]</sup>。本文将质量最小时的参数作为优化初始值,采用粒子群算法对优化问题进行求解。

优化前后的结果比较如表4所示。从表中可以看出,

优化后两圆弧段的应力值为338.5 MPa,比优化前降低了9.8%,三圆弧段应力变化不大,均满足疲劳强度条件,同时多圆弧结构质量降低了5.7%。

表4 优化前后的变量值及变化量

变量	优化前	优化后	变化量/%
$R_1/\text{mm}$	35.0	33.9	-3.1
$R_2/\text{mm}$	15.0	16.5	10.1
$R_3/\text{mm}$	8.0	6.1	-24.0
$\alpha_1/(\circ)$	65.0	65.0	0.0
$\beta_1/(\circ)$	7.0	7.0	0.0
$R_5/\text{mm}$	14.0	15.8	12.7
$\alpha_2/(\circ)$	60.0	77.0	28.4
$\beta_2/(\circ)$	40.0	18.4	-54.0
$\sigma_{1,\max}/\text{MPa}$	375.3	338.5	-9.8
$\sigma_{s,\max}/\text{MPa}$	261.7	259.9	-0.7
质量/t	0.259	0.245	-5.7

## 4 结语

本文提出了基于代理模型和粒子群算法的多圆弧结构优化设计方法,并将其应用在风电齿轮箱行星架上,具体的研究内容及后续研究任务如下:

1) 推导了双圆弧和三圆弧通用的几何关系,为多圆弧结构的参数设计提供了理论依据,并基于MATLAB和HyperWorks联合建模方法建立了多圆弧结构的参数化模型;

2) 结合粒子群算法和代理模型进行多圆弧结构的优化设计,降低了多圆弧结构上应力的最大值,并显著提高了优化效率;

3) 由于时间和经济等原因,尚未制造出优化后的物理模型以对该套方法进行验证,之后可进一步研究试验验证的工作。

### 参考文献:

- [1] 胡艳杰. 风电齿轮箱主要故障形式及处理建议[J]. 决策探索(中),2019(8):56-57.
- [2] 石鹏飞,褚景春,袁凌,等. 兆瓦级风电齿轮箱行星架疲劳强度分析[J]. 机械传动,2017,41(11):115-119,183.
- [3] 职玉山,王仲仁. 三圆弧椭圆封头及其参数优化[J]. 机械工程师,1998(2):4-6.
- [4] 万江艳. 粉末合金轮盘关键部位多圆弧转接降应力研究[J]. 航空发动机,2015,41(1):58-61.
- [5] 徐倩. 涡轮盘的低应力设计方法研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2013.
- [6] 黄嵩. 高压涡轮轴细节结构低应力设计方法研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2014.
- [7] 雷驰,温卫东,崔海涛. 通用过渡圆弧改进设计与榫齿连接结构多变量优化[J]. 航空动力学报,2015,30(5):1178-1183.
- [8] 于洪飞,赵巍,付强,等. 涡轮盘关键部位多圆弧设计及多变量优化[J]. 航空动力学报,2017,32(12):2848-2854.

(下转第55页)

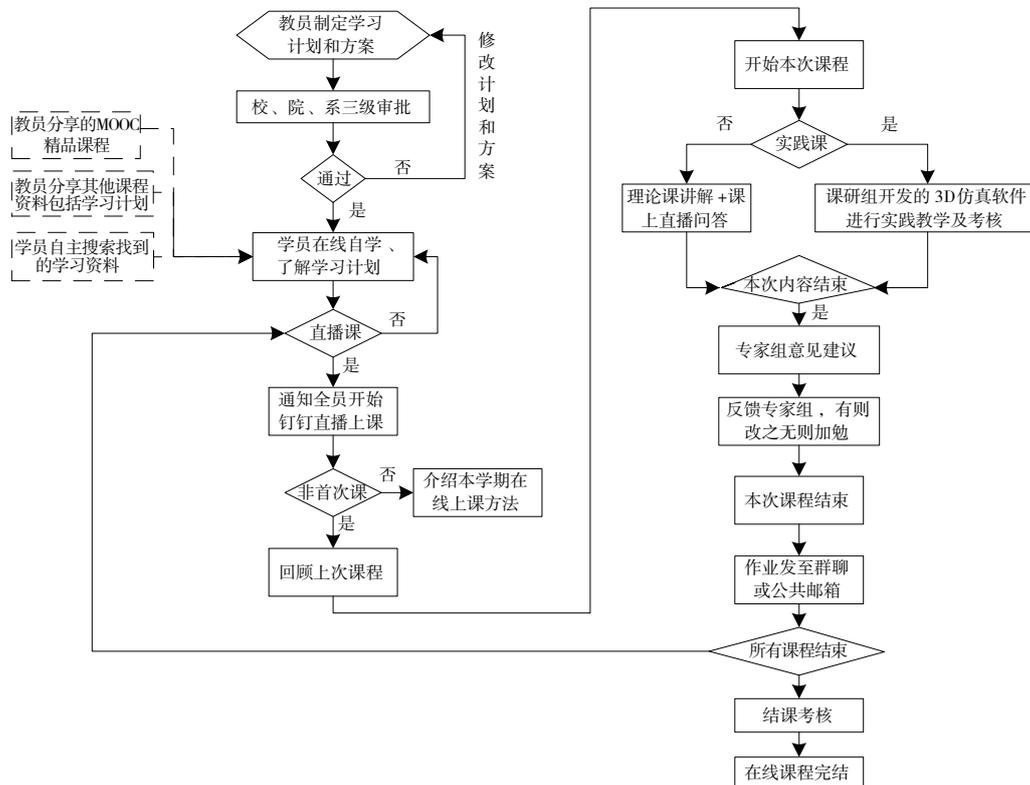


图1 “内燃机”课程全流程在线教学示意图

## 2 结语

本文主要以“内燃机”课程在线教学为例,依托钉钉平台,对装备构造类工科专业课程的在线教学进行了研究、探索和实践。整个过程包括课程教学内容的筛选、教学模式的设计、教学方法的探索和全过程考核模式的设计。实践表明:本届学员的“内燃机”课程学习成绩与往届学员基本持平;而在自主学习和课外资料阅读了解方面的能力较之前有了显著提高。可见,所实施的在线教学方式方法行之有效,达到了良好的教学效果。该研究可为相近的装备构造类课程在线教学实施提供参考和借鉴。

### 参考文献:

[1] 教育部应对新型冠状病毒感染肺炎疫情工作领导小组办公

室,关于在疫情防控期间做好普通高等学校在线教学组织与管理工作的指导意见[EB/OL]. 2020-02-04. <http://www.moe.gov.cn/>.

[2] 陈琪琳,鲍浩波. 中国在线教育发展的历程与现状[J]. 学园, 2014(26):184-185.  
 [3] 鲁立强,帅琴,李季,等. 基于中国大学MOOC、慕课堂和QQ群三结合的分析化学课程在线教学实践[J]. 大学化学, 2020,35(5):15-18.  
 [4] 智能电视网 钉钉TV版上线! 智能电视也能看钉钉网课直播[CP/OL]. 2020-03-16. <https://www.znds.com/tv-1170153-1-1.html>.  
 [5] 张蕉蕉,安立周,袁建虎,等. 基于科技创新俱乐部的学员自主学习和创新能力培养[J]. 科技创新与生产力, 2019(7):72-75.

收稿日期:2020-10-09

(上接第38页)

[9] ENGWIRDA D. Locally - optimal delaunay - refinement and optimisation - based mesh generation [D]. Sydney: The University of Sydney, 2014.  
 [10] 王钰栋,金磊,洪清泉. HyperMesh&HyperView 应用技巧与高级实例[M]. 北京:机械工业出版社,2012.  
 [11] 范卫民,杨玉良,李震. 大功率风电增速器行星架疲劳寿命分析与结构优化[J]. 机械传动,2015,39(10):162-166.  
 [12] 孙黎,石鹏飞,代海涛,等. 风电齿轮箱低速级行星架极限强度分析[J]. 机械制造,2017,55(8):43-46.

[13] Germanischer Lloyd Wind Energy GmbH. GL Wind Guideline: guideline for the certification of wind turbines[Z]. Hamburg: Germanischer Lloyd Wind Energy GmbH, 2010;222-223.  
 [14] 展铭,郭勤涛. 代理模型在结构动力学优化设计中的应用研究[J]. 机械与电子,2015,33(1):7-12.  
 [15] 叶鹏程. 代理模型技术研究及其在水下滑翔机外形设计中的应用[D]. 西安:西北工业大学,2017.  
 [16] 钱娟,王东方,缪小东. 基于粒子群算法的汽车传动系参数多目标优化[J]. 机械制造与自动化,2018,47(3):168-170.

收稿日期:2020-10-19