

电液调速器弹性连接板优化设计^{*}

李云松^{1,2} 陈小安¹ 杨恩志³ 吴国祥¹ 周明红¹

(1. 重庆大学机械传动国家重点实验室, 重庆 400030; 2. 重庆广播电视大学, 重庆 400052;
3. 重庆红江机械有限责任公司, 重庆 402162)

【摘要】 结合电液调速器的调节特性和结构特点,对弹性连接板进行了优化设计。通过精确受力分析,采用有限元方法对连接板初始设计进行静力学分析。选取连接板中部槽口处多个尺寸为设计变量,以中部更大的变形位移为优化目标,以高可靠性和良好的响应为约束条件,建立了优化设计的数学模型。采用不同配置应用COSMOSWorks的OPTSTAR模块对连接板进行优化分析,并通过模拟连接板的实际工况对有限元计算精度进行了试验验证。分析结果表明,优化后的连接板增大了Z方向变形位移,有效地提高了连接板的调节灵敏度和在系统中的可靠性能。

关键词: 柴油机 电液调速器 连接板 优化设计

中图分类号: TK424.3⁺1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2012)05-0032-05

Optimization for Elastic Connecting Plates of Electric-hydraulic Speed Governor

Li Yunsong^{1,2} Chen Xiaolan¹ Yang Enzhi³ Wu Guoxiang¹ Zhou Minghong¹

(1. State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University, Chongqing 400030, China
2. Chongqing Radio & TV University, Chongqing 400052, China
3. Chongqing Hongjiang Machinery Co., Ltd., Chongqing 402162, China)

Abstract

Considering the regulating and structural characteristics of electric-hydraulic speed governor, an optimization study on elastic connecting plates was conducted. Firstly, on the basis of accurate force analysis, static analysis was done for the initial design of connecting plates by using the finite element method. Then, the mathematical model of the optimization design was established, which took several geometrical dimensions near the connecting plate's middle rabbets as design variables, larger deformation displacement of the middle part as the optimization objective, and high reliability and good response as the constraint condition. Finally, an optimization analysis was carried out for different configurations by using COSMOSWorks/OPTSTAR, the actual working condition of the connecting plate was simulated and the calculation precision of the finite element method was verified through the experiments. The analysis of the result revealed that after optimization, the connecting plate increased Z-axial deformation displacement of the connecting plate, which can effectively improve the plate's regulating sensitivity and reliability in the system.

Key words Diesel engine, Electro-hydraulic speed governor, Connecting plate, Optimization design

收稿日期: 2011-12-06 修回日期: 2011-12-20

^{*} 重庆市科技攻关资助项目 (CSTC2008AB3048)

作者简介: 李云松, 博士生, 重庆广播电视大学讲师, 主要从事结构设计和优化分析研究, E-mail: piny@ cqu. edu. cn

通讯作者: 陈小安, 教授, 博士生导师, 主要从事计算机辅助设计、分析与制造研究, E-mail: xachen@ cqu. edu. cn

引言

调速器性能直接影响着柴油机的稳定性和可靠性,传统的机械、液压调速器已普遍应用在大中功率柴油机上。随着电子技术的飞速发展,电液调速器将越来越多地应用在车用、船用柴油机以及柴油发电机组上^[1-3]。电液调速器中的电磁转换器是最为关键的部件,而决定其响应灵敏度的关键元件是其中的弹性连接板,其设计方法往往是通过经验和同类产品进行仿造^[4]。本文根据调速器的调节特性要求,对弹性连接板这一关键元件进行优化设计,使得优化设计后的连接板具有较高的可靠性、调节灵敏度和较长的使用寿命。

1 弹性连接板受力分析

图1为某型电液调速器执行器弹性连接板的三维模型,其上下方向孔通过螺钉将连接板固定在座体上;通过左右方向孔连接在电磁转换器上。连接板的支撑方式如图2所示,中间连接部分可以左右摇摆。在中间的连接部位处,下端螺钉连接平衡杠杆并通过一垫圈紧贴中间部分,上端连接电磁转换部件的铁芯。当电流变化时,电磁铁芯左右摇摆。

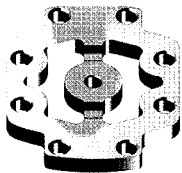


图1 连接板三维模型
Fig.1 Three-dimensional model for connecting plate

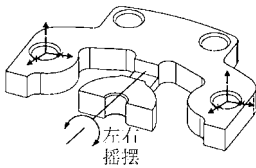


图2 连接板支撑方式
Fig.2 Supporting way for connecting plate

由于中间部件的上下受力面均为一环面,所以其受力应为非均匀分布力,即沿半径方向改变,如图3所示。所以在进行有限元分析时,必须加以考虑。在实际的工况中,试验测得电磁转换部件施加275 N·mm的力矩使得平衡杠杆的控制螺钉能产生幅值为0.3 mm的位移。由于力矩中心与端面的受力处距离为5 mm,由理论力学知识可知,中间部件上下受力面的受力为55 N。

在电磁转化系统中,连接板随外界负荷的交变不断左右扭曲,所以它必须在满足强度要求的情况

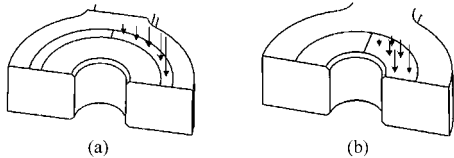


图3 上下端面受力分布
Fig.3 Force distribution at face
(a) 上端面 (b) 下端面

下,还要能达到给定扭矩力所能产生的变形位移。在图4中,控制螺钉与旋转中心的距离 b 为60 mm,连接板中部的半径 a 为7.75 mm,控制螺钉在竖直方向的最大位移 y 为0.3 mm。则可以算出连接板中间部位边缘的最大位移为

$$y_1 = \frac{a}{b}y = \frac{7.75}{60} \times 0.3 = 0.03875 \text{ mm} \quad (1)$$

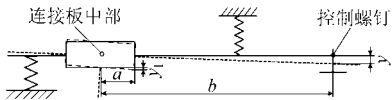


图4 控制螺钉与连接板几何关系示意图
Fig.4 Geometric relation of controlling screw and connecting plate

2 弹性连接板有限元分析

该电液调速器的执行器弹性连接板为铝青铜材质,其材料属性为:弹性模量 1.1×10^{11} Pa,泊松比0.3,密度7 400 kg/m³,屈服强度275.742 MPa。对弹性连接板采用ABAQUS进行工况下的静力学分析,得到其应力分布如图5所示。为了能采用有限元的方法对弹性连接板进行优化设计,文中采用COSMOSWorks的优化模块OPTSTAR进行基于有限元方法的优化。对连接板进行静力学分析,采用第四强度理论定义连接板的VonMise应力大小如图6所示。两种CAE软件分析结果对比如表1所示。

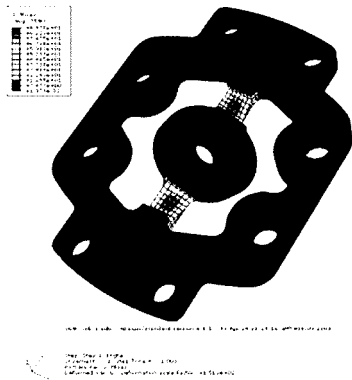


图5 ABAQUS分析结果
Fig.5 Analysis results by ABAQUS

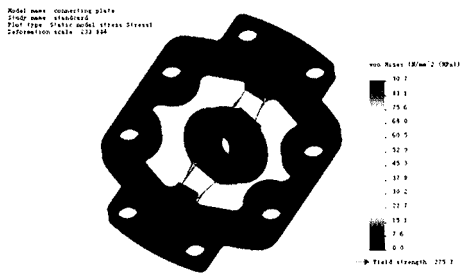


图6 COSMOSWorks分析结果
Fig.6 Analysis results by COSMOSWorks

表 1 分析结果比较

Tab.1 Comparison of different analysis results

CAE 软件	参数设置	最大 VonMise 应力/MPa	Z 方向最大 位移/mm
ABAQUS	六面体 1 mm 网格大	89.7	2.513×10^{-2}
	小,C3D20R 单元,RP 耦合力接触端面		
COSMOSWorks	四面体 1/0.3 mm 网	90.7	2.560×10^{-2}
	格控制,高品质单元, 端面非均匀分布力		

从表 1 可以看出,采用 COSMOSWorks 求解的结果比较接近于 ABAQUS 的结果。从连接板的应力分布情况来看,在切口的薄板连接处的应力较大,最大处的 VonMise 应力为 90.7 MPa。而铝青铜的屈服极限为 275.742 MPa,所以该处的应力分布对连接板比较安全。

从图 7 可以看到,连接板中部边缘的最大位移为 0.025 6 mm。如果要使控制螺钉产生 0.3 mm 的位移,就需要对连接板中部的切口部位进行优化设计。为了能使连接板在“安全”的条件下产生更大的变形,从而达到设计的要求,提高电磁转换系统的稳定性能,有必要对连接板进行优化设计。这样既有利于电磁转化器功耗更小,减小其发热量;又使整个系统的响应更为敏捷。

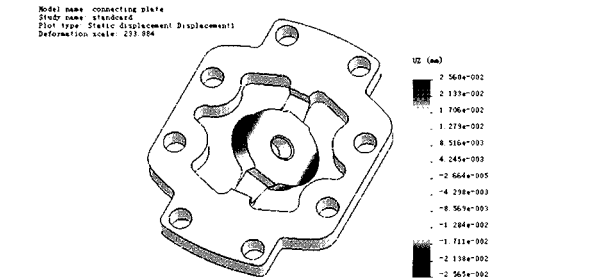


图 7 连接板位移云图

Fig.7 Displacement nephogram of connecting plate

3 结构优化设计

3.1 优化问题描述

采用 COSMOSWorks 的 OPTSTAR 模块对连接板进行优化分析。通常在进行结构的形状优化以及结构的拓扑优化时,存在很多不可控的因素,如果通过软件自动优化,那么结果很可能不符合要求,或者是一个不合理的结构^[5]。如果想要符合要求,就需要添加很多约束来保证得到的结构是可用的,这样会使分析变得异常复杂。对于本文的连接板,由于本身结构比较小,通过拓扑优化分析达不到目标函数最优的目的。所以从尺寸和形状上来优化连接板更为有效。由于 COSMOSWorks 和 SolidWorks 完美集成,可以使用 SolidWorks 的配置来进行结构的形

状优化,通过建立多个可行的配置,经过计算来确定最终设计^[6]。

3.1.1 设计变量和目标函数的选取

在优化过程中,通常需要定义目标函数、设计变量和约束条件^[7-8]。在连接板中,其目标函数就是在正常运行过程中能以额定的力矩使中间连接部位产生更大的变形量。设计变量可以是薄板连接处的尺寸,也可以是连接过渡处的形状。

从静力学有限元分析中可以看出,在连接板的薄板连接处应力相对集中,这里的尺寸参数和形状特征直接关系到应力大小和变形程度。所以优化中的设计变量集中在这里,可以从连接处的切除高度 b_1 、宽度 b_2 以及连接板的宽度 b_3 来定义设计变量。通过这些尺寸参数的变化,使设计达到最优方案。由于连接板厚度为 5 mm,所以在设定设计变量时,必须考虑其范围。考虑到连接板转角处的直角部位应力比较集中,可以增加一个变量在直角处倒一圆角 b_4 。其设计变量如图 8 所示, $b_1 = 2.7$ mm, $b_2 = 5$ mm, $b_3 = 6$ mm, $b_4 = 0.5$ mm。

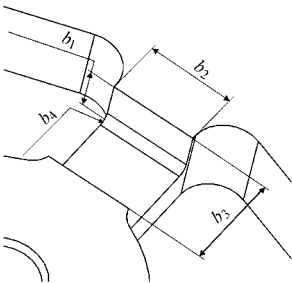


图 8 连接板优化设计变量示意图

Fig.8 Design variables of connecting plate

3.1.2 约束条件

该连接板优化设计的约束条件是执行器正常运行过程中连接板不会损坏,且变形大小在设定的范围内。为了能使连接板具有高的可靠性和良好的响应,把约束条件中的应力设定在 120 MPa 以内,这样其安全系数都大于 2.3。同时在变形方面根据实际的工况要求希望在 Z 方向能达到 0.038 mm 的位移,所以把 Z 方向的位移纳入约束条件中。这样就能保证在绝对安全的条件下,达到设定变形位移范围。设计变量及约束条件参数如表 2 所示。

表 2 变量及约束参数

Tab.2 Variables and constraint parameters

变量	下限	上限
b_1 /mm	2.0	3.4
b_2 /mm	3	5
b_3 /mm	5	7
b_4 /mm	0.25	0.75
VonMise 应力/MPa	0	120
Z 方向位移/mm	0.038	0.039

3.1.3 优化数学模型

根据连接板优化设计的约束条件和设计变量，以连接板中部 Z 向在额定力矩下产生更大的变形量 ΔC 为优化目标,对连接板中部槽口处尺寸进行优化。用 n 表示优化设计中设计变量个数(本文中 $n=4$), r 表示约束条件的个数(本文中 $r=2$),用 $\mathbf{B}$ 表示设计变量所组成的向量;设 $F(\mathbf{B})$ 为该连接板优化的目标函数, $g_i(\mathbf{B})$ 为约束函数,包括应力和变形位移约束条件, σ_e 和 $[\sigma]_a$ 分别表示连接板的屈服强度和工作应力; s 表示连接板 Z 方向位移量。则该连接板优化的数学模型描述:

设计变量

$$\mathbf{B} = (b_1, b_2, b_3, b_4)$$

目标函数

$$\max F(\mathbf{B}) = \Delta C \quad (\Delta C \geq 0.38 \text{ mm})$$

约束条件

$$\text{s. t. } \begin{cases} g_j(\mathbf{B}) \leq 0 & (j = 1, 2, \dots, r) \\ [\sigma]_a / \sigma_e \geq 2.3 \\ 0.038 < s < 0.039 \end{cases}$$

3.2 优化过程

优化过程的流程如图 9 所示。

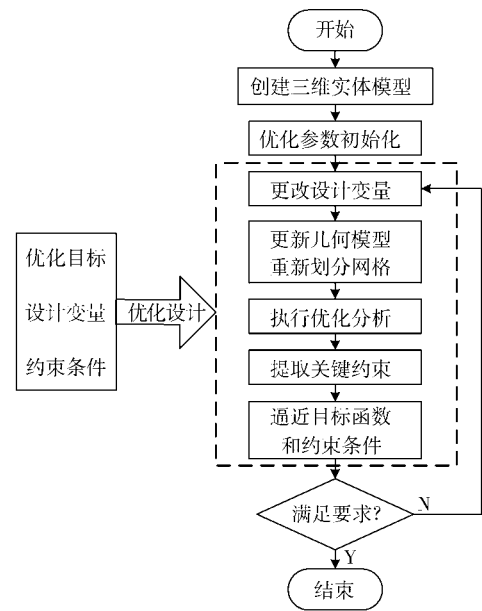


图 9 优化流程图
Fig.9 Flow chart for optimization

通过 SolidWorks 的不同设计配置方案,来对连接板进行优化。运行连接板优化算例,经过 17 次的迭代得到理想的优化结果。其优化前后连接板形状如图 10 所示。

图 11 显示了优化设计过程中各个变量的历史变化趋势。

3.3 优化结果

图 12、13 分别为优化后的连接板 VonMise 应力

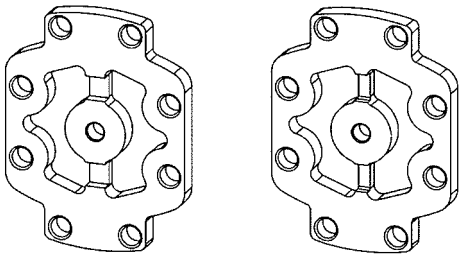


图 10 优化前后连接板形状对比
Fig.10 Comparison of pre- and post- optimized connecting plate shapes

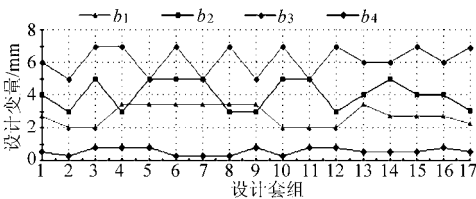


图 11 优化设计历史图表
Fig.11 Optimization design history graph

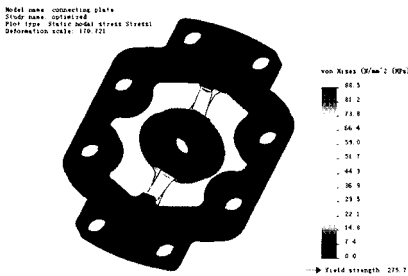


图 12 连接板优化后应力云图
Fig.12 Optimized stresses nephogram of connecting plate

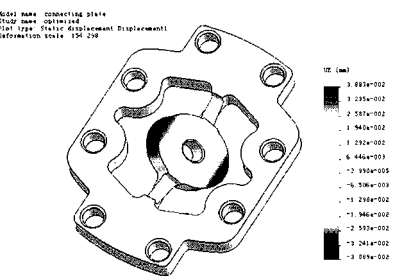


图 13 连接板优化后 Z 向位移云图
Fig.13 Optimized UZ displacement nephogram of connecting plate

分布和 Z 方向位移云图。

表 3 为连接板优化前后设计变量及目标函数比较。

表 3 优化前后参数对比		
Tab.3 Comparison of pre- and post- optimized parameters		
参数	优化前	优化后
b_1/mm	2.70	2.24
b_2/mm	5	3
b_3/mm	6.00	6.93
b_4/mm	0.50	0.55
最大 VonMise 应力/MPa	90.7	88.5
Z 方向位移/mm	2.560×10^{-2}	3.889×10^{-2}
安全系数	3.03	3.11

4 优化后连接板变形试验验证

为了验证有限元优化结果的准确性,搭建了试验平台对优化后的连接板进行了试验验证,通过采用图 4 中控制螺钉同连接板的几何关系,在给电磁转换系统通电的情况下,测量控制螺钉在垂直方向的响应位移来验证优化前后连接板中部在 Z 方向的变形位移。其试验平台如图 14 所示,通过微调高精度输入电流模拟电磁转换系统中连接板的实际工况,来观察激光位移传感器采集的控制螺钉垂直方向的位移数据。

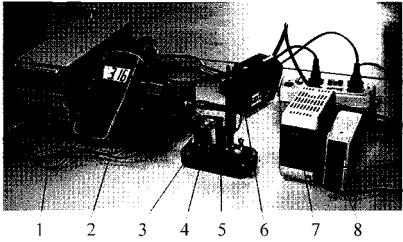


图 14 电磁转换系统试验台

Fig. 14 Experimental bench of electromagnetic transform system

1. 高精度直流电源 2. 万用表 3. 电磁转换系统 4. 弹性连接板 5. 夹具 6. 激光位移传感器 7. 数据采集控制器 8. 电源

应用式(1),将试验采集到的控制螺钉垂直方向位移数据转换为连接板中间部位边缘的最大位移,其优化前后的变形位移如图 15 所示。

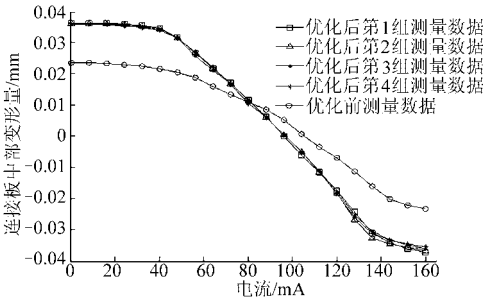


图 15 连接板优化前后 Z 向位移试验曲线

Fig. 15 UZ displacement of pre- and post- optimized connecting plate by experiment

从图 15 可以看出,试验间接测得优化后的连接板中间部位边缘的最大位移由 0.023 6 mm 增加为 0.036 1 mm,同采用有限元方法优化结果(表 3 中计算值)接近。由此可见,优化后的连接板在不增大 VonMise 应力的条件下增加了中部边缘连接处的 Z 方向位移,达到了优化设计的目的。

5 结束语

对某型电液调速器执行器弹性连接板的结构优化进行了研究。通过确定优化目标、定义设计变量及约束条件,利用有限元方法,完成了连接板结构的优化设计,并通过试验验证了有限元计算精度。结果表明在提高安全系数的条件下,明显增加了连接板在 Z 方向上的变形位移,达到了优化的目的。

参 考 文 献

1 王珂,李丹,李骏,等. 车用柴油机电子调速器的模糊控制研究[J]. 内燃机学报,1999,17(3):219~222.
Wang Ke, Li Dan, Li Jun, et al. Fuzzy control of electronic speed governor for an automotive diesel engine [J]. Transactions of CSICE, 1999, 17(3): 219~222. (in Chinese)

2 甘伟,曹丹,韩厚德,等. 神经网络在船舶柴油机调速中的应用[J]. 机电设备,2007,24(5):28~30,27.
Gan Wei, Cao Dan, Han Houde, et al. Applications of B-P networks in the revolution adjustment of marine diesel engine [J]. Mechanical and Electrical Equipment, 2007, 24(5):28~30, 27. (in Chinese)

3 陈笃红,袁银南,朱磊,等. 柴油机数字电子调速器开发[J]. 农业机械学报,2006,37(10):11~14.
Chen Duhong, Yuan Yinnan, Zhu Lei, et al. Development of diesel digital electronic governor[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(10):11~14. (in Chinese)

4 李云松. 电液调速器性能仿真及分析技术研究[D]. 重庆:重庆大学,2009.
Li Yunsong. Research on performance simulation and analysis technology of electric-hydraulic speed governor[D]. Chongqing: Chongqing University, 2009. (in Chinese)

5 Statnikov R B. Multicriteria design: optimization and identification[M]. Dordrecht, Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1999.

6 陈盛贵,陈海彬,叶静. 基于 COSMOSWorks 的实体有限元优化设计及其应用[J]. 机电工程技术,2009,38(11):25~27,103.
Chen Shenggui, Chen Haibin, Ye Jing. Solid finite elements optimization design and application based on COSMOSWorks[J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2009,38(11):25~27,103. (in Chinese)

7 白新理. 结构优化设计[M]. 郑州:黄河水利出版社,2008.

8 王安麟,刘广军,姜涛. 广义机械优化设计[M]. 武汉:华中科技大学出版社,2008.