DOI:10.3969/j.issn.1000-1298.2010.05.003

液力变矩减速装置进口调压阀动态性能优化*

金　毅[1,2]　项昌乐[1]　马　越[1]

(1. 北京理工大学车辆传动国家重点实验室，北京 100081；2. 装甲兵工程学院机械工程系，北京 100072)

【摘要】 在 AMESim 仿真环境下，根据液力变矩减速装置进口调压阀工作原理建立了进口调压阀仿真模型。以 ITAE 准则为优化目标，在 Matlab 下循环调用 AMESim 仿真模型，采用共享小生境遗传算法得到了进口调压阀设计参数的优化结果。最后进行了液力变矩减速装置进口调压试验，试验结果表明：基于 AMESim/Matlab 联合仿真和遗传算法的优化方法可以简化调压阀设计过程，实现进口调压阀性能优化的目标。

关键词：液力变矩器　调压阀　优化　小生境遗传算法

中图分类号：TH12　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-1298(2010)05-0012-05

Optimization on Dynamic Performance of Pressure-regulating Valve of Tractor-brake Hydraulic Torque Converter

Jin Yi[1,2]　Xiang Changle[1]　Ma Yue[1]

(1. *National Key Laboratory of Vehicle Transmission*, *Beijing Institute of Technology*, *Beijing* 100081, *China*

2. *Department of Mechanical Engineering*, *Academy of Armored Force Engineering*, *Beijing* 100072, *China*)

Abstract

Based on the simulation model of pressure-regulating valve of tractor-brake, a hydraulic torque converter was developed. With Niche genetic algorithms, the optimal result of pressure-regulating valve was obtained. In the process of optimization, the simulation model used Matlab and ITAE was calculated as optimal target value. Finally, dynamic performance was tested in a performance experiment. The results indicated that based on simulation model, the performance of pressure-regulating valve was improved with Niche genetic algorithms and the design process was simplified.

Key words　Hydraulic torque converter, Presure-regulating valve, Optimization, Niche genetic algorithms

引言

液力变矩减速装置是液力变矩器和液力减速器在结构上相互结合而得到的一种新型液力装置。由于液力变矩减速装置需要在牵引和制动工况之间进行转换，因此，与普通变矩器相比，其进口压力要求能够在一定范围内根据实际工况进行调节[1]。

本文采用 AMESim/Matlab 联合仿真的方法对液力变矩减速装置进口调压阀进行动态优化。优化中兼顾 AMESim 建模便捷的特点和 Matlab 易于编程、计算功能强的优势，在 Matlab 下编制共享小生境遗传算法优化程序，通过命令调用 AMESim 模型进行动态响应计算从而实现对进口调压阀的结构参数优化。

1　进口调压阀的原理及建模

1.1　进口调压阀工作原理

如图 1 所示，进口调压阀结构上属于反比例溢

收稿日期：2009-04-23　修回日期：2009-05-25

* 总装备部“十一五”预先研究基金资助项目(40402060202)

作者简介：金毅，博士生，装甲兵工程学院讲师，主要从事车辆液力传动及控制研究，E-mail：jinyi_2006@126.com

通讯作者：项昌乐，教授，博士生导师，主要从事车辆传动系统设计研究，E-mail：xiangcl@bit.edu.cn

流阀，与普通直动溢流阀的区别在于：阀的敏感腔内设计了一个反向控制腔，可以通过调节反向控制腔内的压力调节调压阀的溢流压力。根据液力变矩减速装置的工况，液力变矩减速装置进口压力需要在 0.45 ~ 0.65 MPa 之间进行调节。

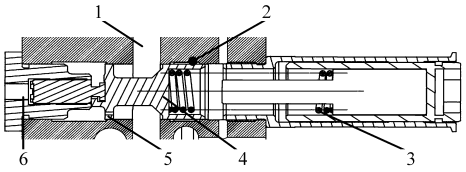

图 1　进口调压阀结构图

Fig. 1　Structure of pressure-regulating valve

1. 进油口　2. 回油口　3. 复位弹簧　4. 溢流阀主阀芯　5. 阻尼孔　6. 反向控制油腔

1.2　基于 AMESim 的建模

根据图 1 所示的工作原理图，阀芯运动方程式为

$$A_k p_k + A_c p_c - k(x_0 + x) - \rho Q_r \sqrt{\frac{2}{\rho} p_s} \cos\theta = m \frac{\mathrm{d}^2 x}{\mathrm{d}t^2}$$

其中　$Q_r = C\pi d x \sqrt{\frac{2}{\rho} p_s}$

式中　p_k——控制腔压力　　A_k——控制腔面积

A_c——敏感腔面积　　p_c——敏感腔压力

k——弹簧刚度　　x_0——弹簧预压缩量

x——阀芯位移　　ρ——油液的密度

Q_r——溢流流量　　θ——液流射出角

m——阀芯质量　　p_s——工作腔压力

C——流量系数　　d——阀芯直径

阻尼孔的流量方程为

$$Q_c = K_1(p_s - p_c) = \frac{V_c}{\beta}\frac{\mathrm{d}p_c}{\mathrm{d}t} + A_c \frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t}$$

式中　K_1——节流孔流量压力系数

β——油液的体积弹性模数

V_c——敏感腔体积

工作腔的连续性方程为

$$Q_p - Q_c - Q_r - Q_b = K_l p_s + \frac{V_s}{\beta}\frac{\mathrm{d}p_s}{\mathrm{d}t}$$

式中　Q_p——泵的输出流量

Q_b——进入液力变矩减速装置的流量

K_l——泄漏系数　　V_s——工作腔体积

根据以上 4 个方程在 AMESim 的 Sketch mode 下，通过调用机械库、信号库和液压库的元件模块，构造了图 2 所示的调压阀模型。

仿真中，通过分段线性信号发生器设置反向控制腔的压力阶跃信号，设置仿真步长为 0.001 s，通过改变调压阀设计参数，可以分析各种设计参数对调压阀动态特性的影响。例如，改变阻尼孔直径 r 可得到图 3 所示的响应曲线。

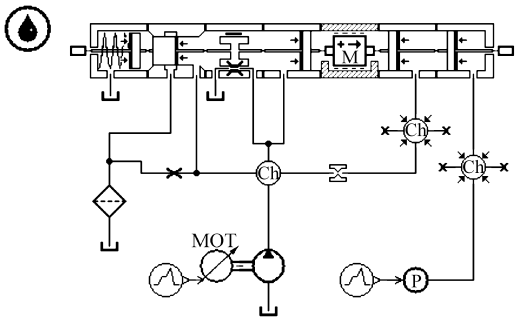

图 2　进口调压阀模型

Fig. 2　Simulation model of pressure-regulating valve

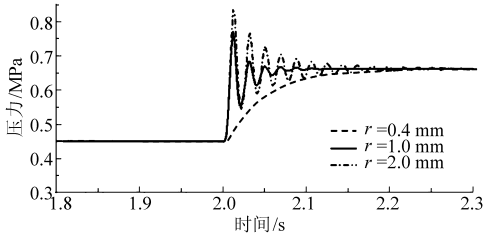

图 3　调压阀进口压力的阶跃响应

Fig. 3　Step function response of pressure-regulating valve

从仿真结果可以出：阻尼孔直径对动态特性的影响非常显著，阻尼孔直径偏小时，系统滞后明显；阻尼孔直径大时，系统反应迅速但有大幅度的超调；当 r = 0.4 mm 时系统表现为完全的过阻尼特性，响应时间为 0.2 s。

2　进口调压阀优化设计问题的模型

2.1　优化目标

进口调压阀的主要设计指标包括开启比率、响应时间和超调幅值 3 项。为了保证整个液压系统的正常工作，基本设计要求是：在保证开启比率大于 0.95 的条件下，调压响应时间不大于 0.2 s，超调幅值不大于额定压力的 15%。因此，在满足静态指标开启比率的情况下，进口调压阀优化的动态目标是抑制超调并实现快速响应。本文选择 ITAE 作为动态优化的目标值函数。它是兼顾快速性和稳定性的一种评价准则，其取值综合体现了超调幅值、稳定时长、响应时间等因素，ITAE 准则可以表示为

$$J = \int_0^\infty t\,|e(t)|\,\mathrm{d}t$$

其中　$e(t) = \frac{p(\infty) - p(t)}{p(\infty)}$

式中　$e(t)$——阶跃响应的误差

$p(\infty)$——目标压力　　$p(t)$——动态压力

2.2　优化变量

进口调压阀设计中有大量的设计参数，如果对所有参数进行优化，将非常困难。因此，只能选择对

阀的特性具有显著影响的主要参数作为优化变量。相关研究[2~3]和 AMESim 模型的仿真结果表明,阀芯质量 m、阀芯直径 d、阻尼孔直径 r、弹簧刚度 k 是主要影响参数。其中,阀的结构和材料确定后,m 可以表示为 d 的函数(图 1)为

$$m=\rho\pi(3.32d^2+50d-125)\times10^{-9}$$

这样,优化变量就化简为[d,r,k]。

2.3 优化约束

在进行优化时针对不同的设计对象有不同的约束。首先阀体对于阀芯的尺寸有限制,根据阀体尺寸可以得出阀芯设计尺寸的上限;为了减小搜索范围,提高效率,根据经验估算了限为

$$18\ \text{mm}\leqslant d\leqslant38\ \text{mm}$$

其次,根据图 3 的仿真结果,阻尼孔直径过大或过小都会使系统动态性能变差,因此也应给出约束为

$$0.2\ \text{mm}\leqslant r\leqslant2\ \text{mm}$$

再次,弹簧刚度过小会导致弹簧尺寸过长,其长度受到安装空间的限制。此外,弹簧长度过长会导致寿命下降,依据设计经验给出刚度约束为

$$10\ \text{N/mm}\leqslant k\leqslant20\ \text{N/mm}$$

最后,根据设计要求,进行动态优化应在静态指标开启比率大于 0.95 的范围内进行,即

$$n\geqslant0.95$$

开启比率是表示溢流阀的静态性能优劣的参数[3],定义为

$$n=\frac{p_0}{p_{\max}}\tag{1}$$

式中 p_0——调压阀开启压力

$p_{\max}$——调压阀额定压力

n 值体现了进口调压阀的定压精度。

将额定流量 $Q_{\max}$、额定压力 $p_{\max}$ 作为已知条件,模型的静力平衡方程为

$$Ap_{\max}-\rho Q_{\max}\sqrt{\frac{2}{\rho}p_{\max}}\cos\theta=k(x_0+x_1)\tag{2}$$

同理,也可以得到调压阀 $Q_r=0$ 时,平衡方程为

$$Ap_0=kx_0\tag{3}$$

结合式(2)和开启比率的定义可得到

$$n=\frac{p_0}{p_{\max}}=1-Q_{\max}\cos\theta\sqrt{2\rho p_{\max}}\cdot\left(\frac{1}{Ap_{\max}}+\frac{k}{2C_q\pi dAp_{\max}^2}\right)$$

2.4 优化设计模型

经以上分析,进口调压阀的性能优化问题就转换为一个带有多约束的三维单目标优化问题,并可以表示为

$$\begin{cases}\min J(d,r,k)\\ g_1(\boldsymbol{X})=(38-d)(d-18)\geqslant0\\ g_2(\boldsymbol{X})=(k-10)(20-k)\geqslant0\\ g_3(\boldsymbol{X})=(r-0.2)(2-r)\geqslant0\\ g_4(\boldsymbol{X})=n-0.95\geqslant0\end{cases}\tag{4}$$

3 基于共享小生境遗传算法的优化

遗传算法是在优化领域得到广泛应用的优化方法之一。然而,在标准遗传算法(SGA)中求解多峰值函数或多模态函数优化问题时,只能找到个别的最优解,甚至往往得到的是局部最优解[7]。与 SGA 相比,小生境遗传算法可以更好地保持解的多样性,提高全局寻优能力和收敛速度,因此本研究采用小生境遗传算法,通过共享函数调整个体适应度以实现小生境遗传,以达到维护群体多样性的目的。

如图 4 所示,优化计算过程中,在 Matlab 下调用 AMESim 模型以获得不同个体参数下的调压阀动态响应参数,进而计算得到个体适应度。

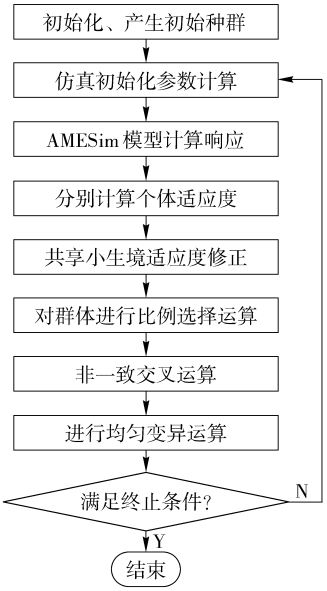

图 4 算法流程图

Fig. 4 Flow process chart of algorithm

3.1 编码以及群体初始化

采用浮点编码方法进行编码,即由问题解空间的向量[d,r,k]表示一个染色体编码。综合考虑遗传算法的性能和计算量,在实际应用时,群体的大小选择 20。为了保证其良好的全局搜索性能,初始群体应具有普遍的代表性,因而采用一致随机的方式选取初始群体。

3.2 适应度的计算

遗传算法需要通过适应度确定染色体优劣。一般对于极小正值问题,将目标函数的倒数作为适应

度。本文在目标函数中添加了罚函数，由此将约束优化问题转换为无约束优化问题。增加罚函数后的目标函数为

$$\mathrm{eval}(\boldsymbol{X}) = J(\boldsymbol{X}) - M_1 \frac{g_1(\boldsymbol{X}) + |g_1(\boldsymbol{X})|}{2} - M_2 \frac{g_2(\boldsymbol{X}) + |g_2(\boldsymbol{X})|}{2} - M_3 \frac{g_3(\boldsymbol{X}) + |g_3(\boldsymbol{X})|}{2} - M_4 \frac{g_4(\boldsymbol{X}) + |g_4(\boldsymbol{X})|}{2}$$

适应度函数为

$$\mathrm{fit}(\boldsymbol{X}) = 1/\mathrm{eval}(\boldsymbol{X})$$

若各约束满足条件，适应度与目标函数的倒数一致；若不满足条件，适应度就会急剧下降，使得不合格染色体被淘汰的概率大增。系数 M 决定评价值被惩罚的程度，由于几个约束函数的取值范围不同，所以 M 分别取为：$M_1 = M_2 = 100$，$M_3 = M_4 = 500$。

在计算目标函数值时（图 4），首先根据基因编码对 AMESim 进行参数初始化，采用具体格式为 ameputp（‘OptimizationDesign’，‘模型参数名’，参数值）；而后运行 amerun 命令，调用 AMESim 模型并获得仿真结果。在 Matlab 下根据适应度函数和目标函数的定义计算得到适应度函数值。

3.3　基于共享函数调整个体适应度

主要思路是：个体之间的相似程度决定共享函数值的大小，当个体之间比较相似时，其共享函数值比较大；反之，则小。通过计算把共享函数值大的个体的适应度调低，以达到维护群体多样性的目的。最常用的共享函数是三角共享函数

$$\mathrm{sh}(D) = \begin{cases} 1 - \dfrac{D}{\sigma_{\mathrm{share}}} & (D \leqslant \sigma_{\mathrm{share}}) \\ 0 & (D > \sigma_{\mathrm{share}}) \end{cases}$$

式中 σ_{share} 为人工选定小生境半径，D 为不同个体之间的距离。如果在半径范围内有多个个体存在，通过削减适应度，可以限制其内部的个体增加。计算个体之间的距离公式为

$$D = \sqrt{\sum_{k=1}^{3} \left(\frac{x_{kj} - x_{ki}}{x_{k\max} - x_{k\min}} \right)^2} \quad (i, j = 1, 2, \cdots, 30)$$

式中　$[x_{k\min}, x_{k\max}]$——变量 k 的优化区间

计算出群体内各个个体的共享度之后，调整各个个体的适应度公式为

$$\mathrm{fit}_{\mathrm{new}}(\boldsymbol{X}_i) = \frac{\mathrm{fit}(\boldsymbol{X}_i)}{\sum_{j=1}^{M} S(D_{ij})}$$

3.4　遗传算子设计

3.4.1　选择算子

采用的适应度比例方法是一种回放式随机采样方法，每个个体的选择概率和其适应度值成比例，可表示为

$$P_i = \mathrm{fit}(\boldsymbol{X}_i) \Big/ \sum_{j=1}^{\mathrm{popsize}} \mathrm{fit}(\boldsymbol{X}_j) \quad (i = 1, 2, \cdots, \mathrm{popsize})$$

3.4.2　交叉算子

为了得到更好的效果，使任意基因位的重要基因在交叉作用下均可以重组，并遗传到下一代，采用非一致算术交叉算子

$$\begin{cases} x'_{a,i} = \lambda_i x_{a,i} + (1 - \lambda_i) x_{b,i} \\ x'_{b,i} = \lambda_i x_{b,i} + (1 - \lambda_i) x_{a,i} \end{cases} \quad (i \in \{1, 2, \cdots, 10\})$$

式中　$x_{a,i}$、$x_{b,i}$、$x'_{a,i}$、$x'_{b,i}$——2 个染色体交叉前后的第 i 个基因

λ_i——一个服从均匀分布的随机数

3.4.3　变异算子

变异操作主要是保证群体有一定程度的多样性，变异运算采用均匀变异操作。变异时，首先选择产生变异的个体 $\boldsymbol{X}_i$，然后随机产生变异基因位置，最后在其取值范围内产生随机数代替原来的基因。

3.5　优化结果分析

计算过程中分别进行 2 次优化计算：一次基于 AMESim/Matlab 采用共享小生境遗传算法；另一次基于 AMESim 开发模块采用标准遗传算法（SGA）。2 次优化结果的对比如表 1 所示。

表 1　优化结果对比

Tab. 1　Optimized results

	参数	优化前	基本遗传算法	小生境遗传算法
结构参数	k/N·mm^{-1}	10.32	10.35	11.53
	d/mm	24	25.6	28.05
	r/mm	1.5	0.61	0.74
性能参数	开启比率	0.951	0.951 2	0.953 8
	动态误差	0.156 5	9.593×10^{-3}	9.163×10^{-3}
迭代次数			43	24

从优化结果可以看出：小生境遗传算法在优化中的应用取得了良好的效果，调压阀的动态性能在优化后有明显提高；同时对比迭代次数，小生境遗传算法与基本遗传算法相比在计算效率上有明显优势。

如图 5 所示，参数优化后的阶跃响应仿真结果通过优化大幅降低了调压阀阶跃响应时的动态误差，系统动态特性表现为过阻尼特性，超调幅值为零，优化结果以很小的滞后代价取得了极好的稳定性，完全符合设计要求。

4　试验

根据仿真结果，设计了进口调压阀性能试验，试

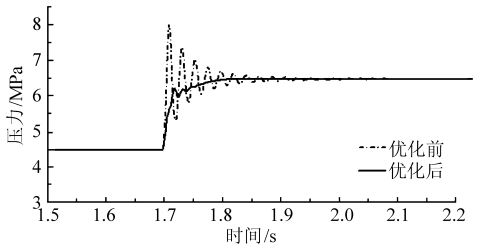

图 5 参数优化后的阶跃响应仿真结果曲线

Fig. 5 Step function response of optimized pressure-regulating valve

验原理如图 6 所示。试验中通过电磁开关阀 7 来控制调压阀反向控制腔的油压阶跃信号,通过开关阀 3 和节流阀 10 的调节,实现调压阀流量的阶跃。试验结果如图 7、8 所示。

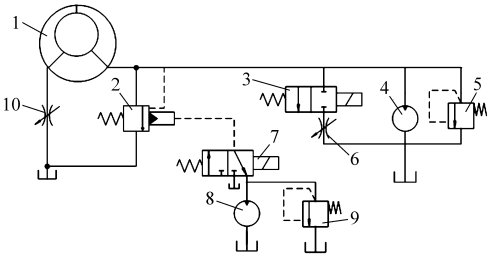

图 6 试验原理图

Fig. 6 Principle of the experiment

1. 液力变矩减速装置 2. 进口调压阀 3. 两位两通开关阀 4. 冷却泵 5、9. 安全阀 6、10. 节流阀 7. 两位三通阀 8. 控制泵

由图 7、8 的调压阀试验曲线可知,该阀的公称压力为 0.65 MPa,调压过渡过程时间为 0.1 s,对溢流流量的响应时间为 0.13 s,压力超调量为零,完全满足系统对调压过程的快速性要求。试验数据与仿真结果基本吻合,验证了仿真研究的有效性。

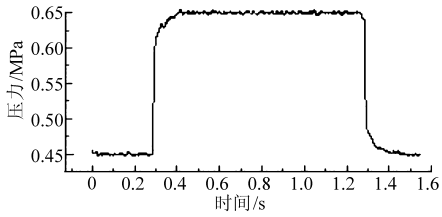

图 7 进口压力调压过程试验曲线

Fig. 7 Experimental results of pressure-regulating process

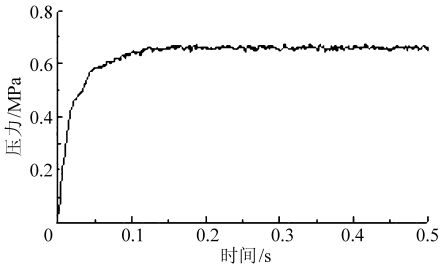

图 8 进口压力对流量阶跃的响应曲线

Fig. 8 Response of pressure to flow step

5 结束语

进口调压阀的常规设计方法是先根据阀的静态特性,设计出阀的结构参数,然后再通过试验观察其动态特性。若不满足阀的动态特性,则对阀的参数进行修正,再进行验证,设计的效果主要凭设计者的经验和设计周期,因而对设计者的经验要求高,设计周期也较长。本文结合 AMESim 和 Matlab 的各自优势,通过仿真优化的方法实现动态性能的优化。这种方法的应用降低了设计中对经验的要求,并缩短了设计周期,在液力变矩减速装置进口调压阀的设计中取得了良好的效果,对其他类似的液压设计工作也有借鉴意义。

参 考 文 献

1 孙旭光. 牵引-制动型液力变矩器控制系统研究[D]. 北京:北京理工大学,2006.
Sun Xuguang. Research on control system of tractor-brake hydraulic torque converter[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2006. (in Chinese)

2 王幼民. 溢流阀结构参数的优化设计[J]. 农业机械学报,2003,34(1):67~69.
Wang Youmin. Optimization of structure parameters of hydraulic relief valve [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2003, 34(1):67~69. (in Chinese)

3 宋俊. 液压元件优化[M]. 北京:机械工业出版社,1999.

4 林躜,黄方平. AMESim/Matlab 的仿真及其在单向阀优化设计中的应用[J]. 液压气动与密封,2006(2):14~16.
Lin Zuan, Huang Fangping. Simulation of AMESim/Matlab and its application of optimization design for check valve [J]. Hydraulics Pneumatics & Seals, 2006(2):14~16. (in Chinese)

5 赵万忠,施国标,林逸. 基于遗传算法的 EPS 系统参数优化[J]. 吉林大学学报:工学版,2009,39(2):288~292.
Zhao Wanzhong, Shi Guobiao, Lin Yi. Parameter optimization of EPS system based on genetic algorithm [J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2009, 39(2):288~292. (in Chinese)

6 朱宁,施国标,林逸. 基于小生境遗传算法的支持向量机分类器参数优化[J]. 南京理工大学学报,2009,33(1):16~19.

7 陈国良,王煦法,庄镇泉,等. 遗传算法及其应用[M]. 北京:人民邮电出版社,1996.

8 张军,林程,张国明. 基于遗传算法的客车车身骨架优化设计[J]. 北京理工大学学报,2008,28(1):45~49.