

基于 AMESim 的柴油机调速器仿真优化研究

杨 波¹, 杜宝国¹, 崔靖晨¹, 隆武强¹, 田江平¹, 黄贵川², 何 利²

(1. 大连理工大学, 辽宁 大连 116023; 2. 重庆红江机械有限责任公司, 重庆 402162)

摘 要: 利用 AMESim 软件分别建立了某型柴油机液压调速器控制阀和执行机构的一维模型, 研究了调速弹簧刚度、控制阀质量、飞块质量等参数对调速器性能的影响, 以及优化前后控制阀和执行机构的响应特性。研究表明: 调速弹簧刚度值为 40 ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$) 时, 控制阀响应时间最短; 控制阀质量为 0.03 kg 时, 震荡剧烈程度显著减小; 飞块质量在 0.052 kg 时, 可有效减少控制阀响应时间; 优化前调速器响应时间为 3 s, 优化后为 0.1 s。优化后的调速器控制阀以及执行机构能够很好地满足准确性和快速性的要求。

关键词: 柴油机; 液压调速器; 仿真; 优化

中图分类号: TK424.3⁺¹ **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2015)04-0018-05

Study on Simulation and Optimization of Diesel Engine Governor Based on AMESim

Yang Bo¹, Du Baoguo¹, Cui Jingchen¹, Long Wuqiang¹, Tian Jiangping¹, Huang Guichuan², He Li²

(1. Dalian University of Technology, Liaoning Dalian 116023;
2. Chongqing Hongjiang Machinery Co., Ltd., Chongqing 402162)

Abstract: One-dimensional models of the controlling valve and actuator were established respectively based on AMESim to study influences of the governing spring stiffness, controlling valve mass and flyweight mass on performance of speed governor and response characteristics of the controlling valve and actuator before and after optimization. Results showed that, the minimum response time of the controlling valve appeared when the governing spring stiffness was 40 ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$). When the controlling valve mass was 0.03 kg, the intensity of shock decreased dramatically. When the flyweight mass was 0.052 kg, the response time of the controlling valve reduced effectively. The response time of speed governor was 0.1 s after optimization while it was 3 s before. The optimized controlling valve and actuator of speed governor could meet the requirements of accuracy and rapidity well.

Key words: diesel engine; hydraulic governor; simulation analysis; optimization

0 引 言

调速器作为柴油机转速控制系统的核心部件, 能够根据柴油机外界负载的变化自动调节供油量, 当柴油机转速降低时自动增加喷油泵的供油量; 转速升高时自动减少喷油泵的供油量, 使喷油泵的供油量始终保持与外界负载相匹配, 进而保证柴油机

具有较好的工作性能^[1]。近年来, 为应对能源短缺以及排放法规日趋严苛, 柴油机正朝着高性能、高可靠性、低排放、低油耗的方向发展, 这对调速器性能提出了更高的要求^[2]。目前国内对于柴油机调速器的研究日益深入, 郭彬等利用 Matlab 建立了柴油机电子调速系统的仿真模型并提出一种模糊自整定 PID 控制算法^[3]; 张友荣等基于 LabView

建立仿真系统，证实柴油机液压调速器试验台工作的有效性^[4]；宋百玲等应用 Simulink 进行仿真研究，给出了动态调速特性曲线^[5]；黄学武等采用 VB 语言建立调速器模型，试验结果满足低速柴油机调速器性能要求^[6]。从整个研究环境来看，利用 AMESim 软件对调速器关键部位控制阀以及调速执行机构模拟仿真方面的研究尚较少^[7]。

本文以重庆红江机械有限责任公司生产的某型柴油机调速器为研究对象，利用一维仿真软件 AMESim 对该调速器控制阀以及执行机构进行模拟仿真，研究其动态响应；在此基础上研究控制阀各参数对调速器性能的影响，并通过对各参数的优化使调速器性能达到最佳。

1 调速器结构及工作原理

本文研究的某型调速器主要由飞块、调速弹簧、控制阀、动力活塞等部件组成，如图 1 所示。

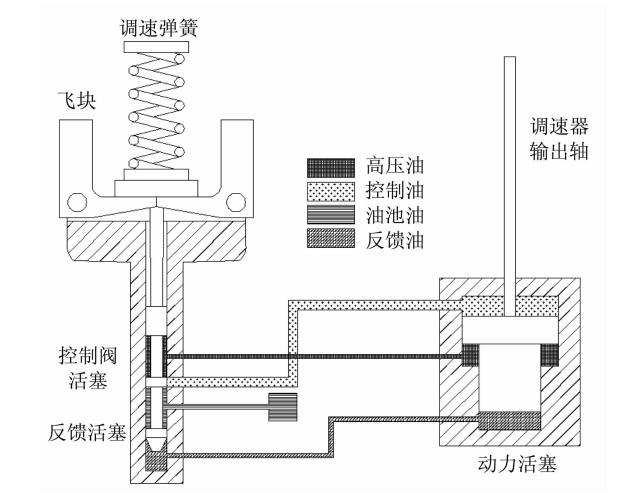


图 1 调速器结构与工作原理图

当柴油机外界负载增加时，转速降低，飞块回转速度降低，调速弹簧回复力大于飞块的离心力，控制阀向下移动，使动力活塞上下腔都与高压油接通，由于动力活塞上端面面积大于下端面积，所以上端面受力大于下端面受力，动力活塞下移，输出轴控制喷油泵向燃油供给量增加的方向移动，柴油机转速升高，回到规定转速；同时动力活塞向下移动，将反馈系统的油从活塞下部压出，进入补偿腔，反馈系统油压增大并且作用在控制阀的底部，与原来调速弹簧力不再平衡，推动控制阀向上移动；当控制阀移动到遮盖住控制口时，切断进入动力活塞上部的高压油，同时反馈系统的油通过可调节螺钉或针阀泄放，直到反馈油压降至零，调速器将重新达到稳定运行状态。

当柴油机外界负载减小时，调速器各部件的动作过程与上述过程相反。

2 控制阀模型建立与仿真分析

2.1 控制阀的模型建立

AMESim 仿真软件是一种工程系统高级建模与仿真平台，可在单一平台上建立复杂的一维多学科领域的机电液一体化系统模型，并在此基础上进行仿真计算和深入分析^[8]。本研究根据调速器控制阀组件的基本结构，利用 AMESim 软件在信号库、机械库、液压库、液压元件设计库等模块库中选择模块，在 Sketch 模式中构建调速器控制阀模型，如图 2 所示。

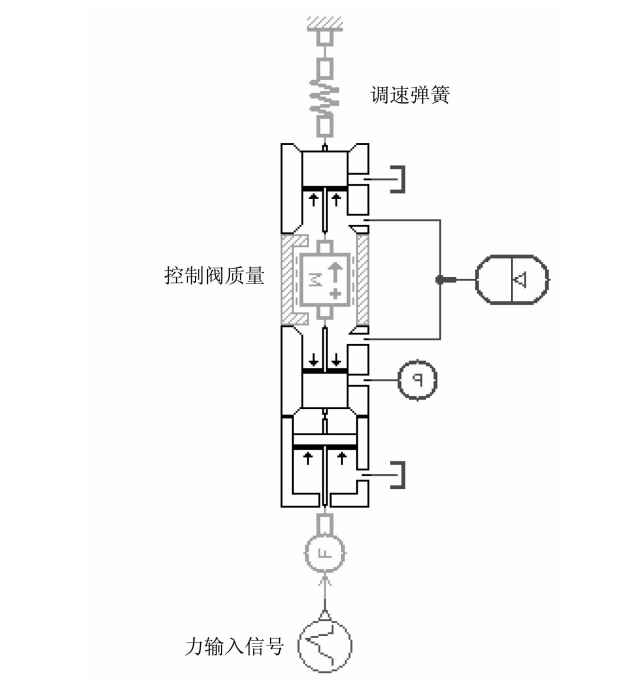


图 2 控制阀模型

由于本文研究的调速器的调速弹簧为非线性弹簧，所以对该弹簧子模型的处理如下：非线性弹簧受力与形变量之间的关系采用如下公式^[9]：

$$F = kx + \varepsilon kx^3 \tag{1}$$

式中： F 为弹簧受力，N； x 为弹簧形变量，mm； k 为弹簧基本刚度， $(\text{kN} \cdot \text{m}^{-1})$ ； ε 为一小参数，表示弹簧的非线性程度。

本模型中，为了能检测到控制阀与高压油是否通断，在出口处设置一个储能器。信号源设置为阶跃信号，用以模拟柴油机外界负载突增或突减。

本模型中，将飞块的转速信号转化为离心力信号作为系统的输入，表示柴油机速度的变化。根据调速器设定转速 $1\,500\ (\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$ ，小参数 ε 设置为 0.6；通过飞块离心力进而作用在调速弹簧上的

初始弹力定为 16 N。进入 Parameter 模式，根据调速器控制阀基本参数，设置模型中各子模块参数，如表 1 所示。

表 1 控制阀主要技术参数

控制阀质量/kg	0.023
活塞直径/mm	5
连杆直径/mm	2
反馈活塞直径/mm	5
高压油压力/MPa	1
调速弹簧刚度/(kN·m ⁻¹)	80
飞块质量/kg	0.025
调速弹簧初始弹力/N	16

2.2 控制阀仿真分析

控制阀的运动主要受柴油机转速的影响。在 AMESim 模型中，控制阀的运动受飞块离心力和调速弹簧回复力的合力作用。

仿真分析中，设输入力信号初始值为 16 N，仿真时间为 10 s，在运行 2 s 后分别设阶跃值为 0 N、10 N、-10 N，在这三种情况下，分别研究控制阀的位移响应特性。

图 3 为三种输入信号下控制阀位移曲线。由图 3 可见，2 s 之前输入力信号始终保持 16 N，控制阀不产生位移，保持在原位。在 2 s 时，输入力信号施加阶跃值，使控制阀产生位移响应，并且经过多次震荡后在 3 s 后稳定在新的平衡位置。可见，控制信号产生突变，控制阀需要 3 s 才能完成响应动作，虽然能够完成动作，但是并没有达到快速响应的要求。

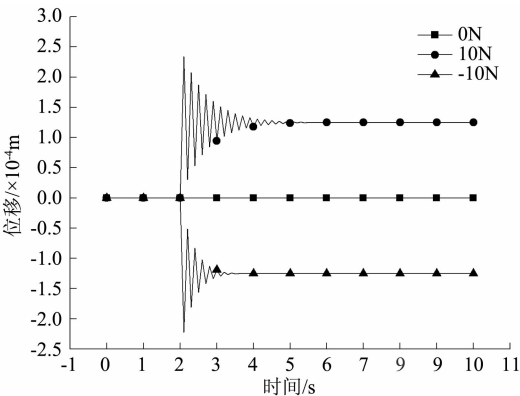


图 3 三种输入信号下的控制阀位移曲线

3 控制阀参数对调速器性能的影响

控制阀作为调速器动作的关键部位，其各参数对调速器响应的准确性及快速性等具有重要影响。下面对控制阀机构相关参数进行变量分析，找出影

响控制阀响应时间及震荡过程的因素，并进行优化，使其更好地符合调速器准确快速动作的要求。

3.1 调速弹簧刚度

在控制阀组件参数中，决定控制阀响应准确性及快速性的主要参数之一是调速弹簧刚度。本文设定除调速弹簧刚度外其他参数不变，通过仿真计算确定最优刚度值，从而优化控制阀组件。

图 4 为不同调速弹簧刚度下控制阀位移曲线。由图 4 可见，调速弹簧刚度对控制阀的震荡幅度及响应时间有很大影响，调速弹簧刚度值增大，响应时间增大。当调速弹簧刚度值为 40 (kN·m⁻¹) 时，控制阀响应时间最短，并且震荡幅度大大降低。

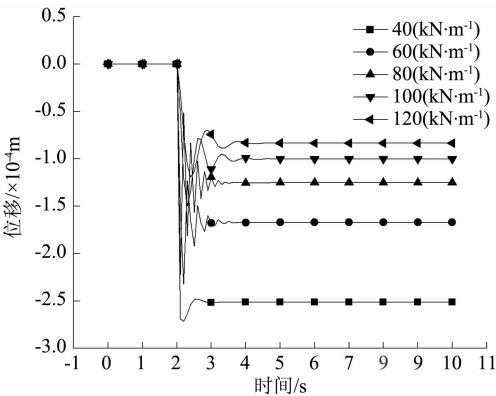


图 4 不同调速弹簧刚度下控制阀位移曲线

3.2 控制阀质量

图 5 为不同控制阀质量下控制阀位移曲线。由图 5 可见，随着控制阀质量的增加，震荡幅度及震荡次数先增加后减少。当控制阀质量为 0.03 kg 时震荡剧烈程度显著降低，有利于调速器工作。

3.3 飞块质量

图 6 为不同飞块质量下控制阀位移曲线。由图 6 可见，随着飞块质量的增加，控制阀响应时间逐渐减少，震荡幅度及震荡次数减少。当飞块质量在 0.052 kg 时，可以有效减少控制阀响应时间，实现调速器快速响应。当然，考虑到整个调速器的结构尺寸，飞块质量不能无限制地增加。

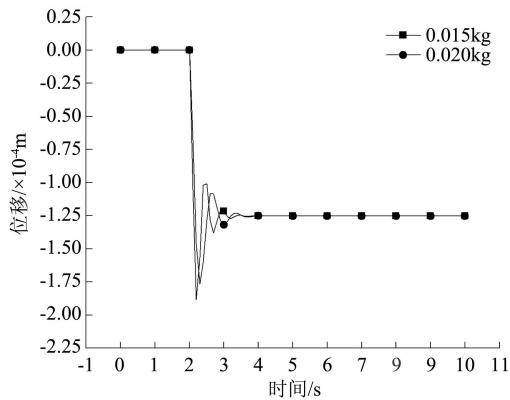
4 优化控制阀仿真分析

通过对调速器控制阀参数的变量分析，采用优化参数对该调速器控制阀进行仿真分析。具体参数如表 2 所示。

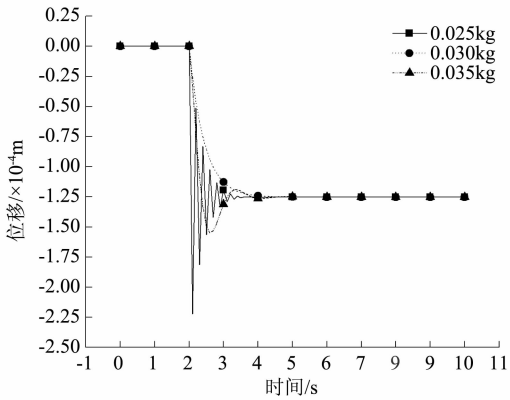
与优化前类似，将输入力信号初始值设为 32.6 N，仿真时间为 10 s。

图 7 为优化后三种输入信号下控制阀位移曲

线。通过图 7 与图 3 的对比可以看出，在 2 s 时，当输入力信号发生突变，优化后的控制阀瞬时产生响应，并且经过轻微振荡后在 0.1 s 内即达到新的稳定值；相比优化前控制阀响应时间缩短 2.9 s。由此表明，优化后调速器控制阀能够迅速完成响应动作，满足调速器快速响应的要求。



(a)0.015kg、0.020kg时控制阀位移



(b)0.025kg、0.030kg、0.035kg时控制阀位移

图 5 不同控制阀质量下控制阀位移曲线

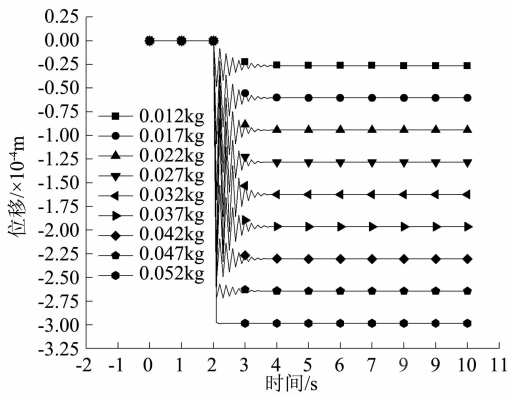


图 6 不同飞块质量下控制阀位移曲线

表 2 控制阀优化技术参数

控制阀质量/kg	0.035
调速弹簧刚度/ (kN·m ⁻¹)	40
飞块质量/kg	0.06
调速弹簧初始弹力/N	32.6

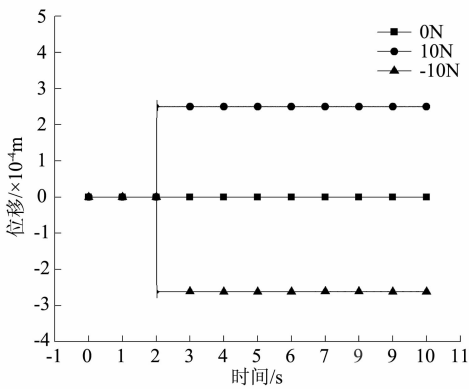


图 7 优化后三种输入信号下的控制阀位移曲线

进一步研究输入力信号阶跃值为 -10 N 时调速器油池油口、高压油口的流量，可以发现：输入力信号保持不变时，流量为零；输入力信号突减时高压油口流量改变，0.1 s 后流量稳定在 13.2 (m³·s⁻¹)，而油池油口流量保持为零。

5 执行机构模型建立与仿真分析

5.1 执行机构的模型建立

根据调速器执行机构的基本组成，对目标调速器执行机构进行建模，其主要技术参数见表 3，并且采用优化后的控制阀组件参数。

表 3 执行机构主要技术参数

动力活塞质量/kg	160
动力活塞杆径/mm	5
动力活塞外径/mm	20
动力活塞内径/mm	12
反馈活塞直径/mm	8

图 8 为调速器执行机构模型。该执行机构主要由控制阀组件、动力活塞、反馈活塞组成。

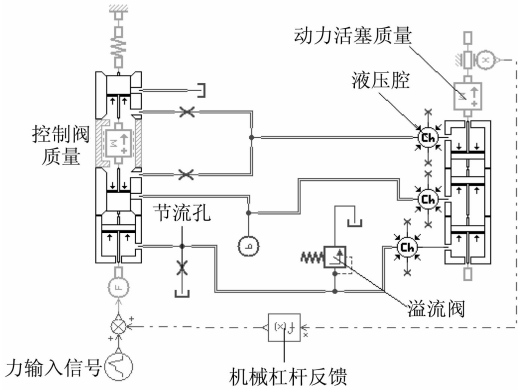


图 8 执行机构模型

本模型中，在动力活塞杆与机械反馈杆之间通过一个比例函数来表征。考虑到软件标准子模型只能提供流量，没有体积的表征，所以增加液压腔。

依照物理模型在动力活塞与齿轮泵之间设置一溢流阀, 同时在控制阀组件反馈活塞下腔出口处设置一节流孔口, 这样可准确模拟模型中的物理特性。

5.2 执行机构仿真分析

调速器的执行机构根据控制阀的运动而动作。为了研究执行机构的响应特性, 设输入力信号初始值为 32.6 N, 阶跃值为 -10 N, 仿真时间为 10 s。

图 9 为接入整个执行机构的控制阀位移曲线。由图 9 可见, 2 s 之前, 控制阀保持在原位置; 2 s 时随着输入力信号突减, 控制阀产生向下的位移; 由于反馈系统的存在, 控制阀在 1 s 后回到平衡位置, 准备进行下一轮调速。

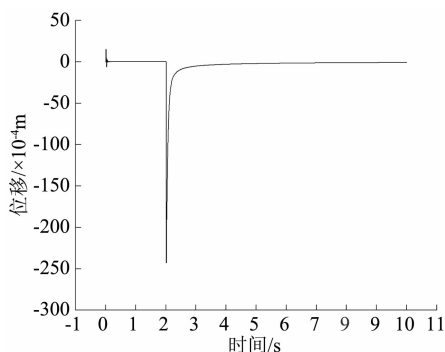


图 9 控制阀位移曲线

经过研究发现: 整个执行机构的控制阀上、下端其瞬时压力保持一致。由此可知控制阀的运动只取决于调速弹簧回复力和飞块离心力, 并且上、下端面压力在 1 s 内即达到稳定值。

图 10 为动力活塞与机械杠杆反馈位移曲线。可见, 在 0~2 s 内, 动力活塞保持在原位置; 在 2 s 时动力活塞瞬时响应, 产生向下的位移。这与调速器实际物理运动相一致。机械杠杆反馈作为反馈系统的一部分对控制阀及时复位具有重要影响。

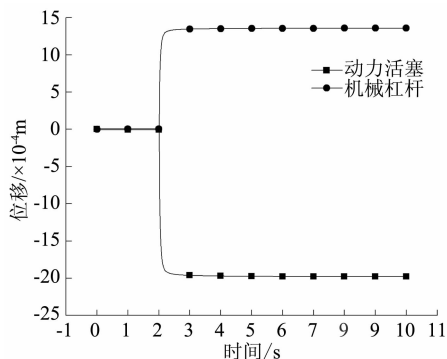


图 10 动力活塞与机械杠杆反馈位移曲线

6 结论

本文基于 AMESim 软件对柴油机液压调速器响

应特性进行了模拟, 并通过研究不同参数对调速器性能的影响对其进行优化, 结果表明:

(1) 调速弹簧刚度值为 40 ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$) 时, 控制阀响应时间最短; 随着控制阀质量的增加, 震荡幅度先增加后减少, 当控制阀质量为 0.03 kg 时震荡最小; 随着飞块质量的增加, 响应时间及震荡幅度减少, 飞块质量为 0.052 kg 时, 控制阀响应时间显著减少。

(2) 优化前调速器响应时间为 3 s, 并且震荡幅度较大; 优化后调速器响应时间为 0.1 s, 震荡幅度显著减小。

(3) 某型调速器经过优化后能够很好地实现高压油路通断功能, 各部件准确快速完成动作, 从而达到较好地调节柴油机转速的功能。

此项工作为今后深入研究柴油机调速器响应特性奠定了基础。控制阀和执行机构模型可用于模拟以机械液压为基础的柴油机调速器。但该模型也存在一些问题, 如在 AMESim 软件中如何直接以转速信号作为输入, 以及怎样建立飞块子模型等, 有待进一步研究。

参考文献

- [1] 王普凯, 毕小平, 李莉. 一种 RQV 调速器的仿真模型及应用 [J]. 内燃机工程, 2004, 25 (1): 17-22.
- [2] FAUSTINO V, ARUN SIVASUBRAHMANYAN. Experimental investigation of effect of speed governors on fuel consumption, emission, noise & safety [C]. SAE International. 2013; 2013-01-2763.
- [3] 郭彬, 刘波. 基于分离模糊 PID 控制的柴油机调速器仿真研究 [J]. 中国修船, 2013, 26 (6): 40-42.
- [4] 张友荣, 张卫东, 姚晓山, 等. 柴油机液压调速器通用试验台研制 [J]. 武汉理工大学学报 (交通科学与工程版), 2012, 36 (5): 976-979.
- [5] 宋百玲, 宋恩哲. 应用 Simulink 对 M851 型柴油机调速系统建模与仿真 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2004, 25 (4): 468-471.
- [6] 黄学武, 陈铭治. 船用低速柴油机数字电子调速器仿真研究 [J]. 航海工程, 2011, 40 (5): 55-58.
- [7] 胡明江, 杨铁皂, 徐斌, 等. 柴油机电子调速器的研究现状及发展趋势 [J]. 河南科技大学学报 (自然科学版), 2003, 24 (4): 44-47.
- [8] 付永领, 祁晓野. LMS Imagine. Lab AMESim 系统建模和仿真 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2011: 2-26.
- [9] 赵和平, 黄宏成, 习纲, 等. 非线性弹簧汽车悬架动态特性研究 [J]. 机械强度, 2001, 23 (2): 165-167.