

共轨燃油系统油量调节电控执行器 数值模拟与优化设计

方文超¹, 高春华², 平 涛¹, 甘海燕¹, 王 锋¹, 宋 蓓¹

(1. 七一一研究所, 上海 201108; 2. 大庆石化公司, 黑龙江大庆 163714)

摘 要: 以共轨燃油系统油量调节电控执行器为研究对象, 运用 AMESim 软件完成机械、流体、电磁阀的系统建模, 开展机械、液压、驱动等方面性能仿真, 通过比较分析, 得出各因素对性能的影响, 总结提出油量调节阀电控执行器的关键设计原则, 并利用该方法完成了某型油量调节阀的优化设计。

关键词: 电控执行器; 油量调节阀; 仿真; 高压共轨

中图分类号: TK421.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2010)04-0005-05

Numerical Analysis and Optimal Design on the Electromagnetic Fuel Delivery Regulating Actuator of Common Rail System

Fang Wenchao¹, Gao Chunhua², Ping Tao¹, Gan Haiyan¹, Wang Feng¹, Song Bei¹

(1. Shanghai Marine Diesel Engine Research Institute, Shanghai 201108;

2. Daqing Petrochemical Company, Heilongjiang Daqing 163714)

Abstract: To study electromagnetic actuator used in common rail fuel injection system, AMESim software was applied to establish mechanical, fluid dynamic and electromagnetic valve models. Impacts of main factors on the system performance were figured out by simulation, including mechanism, hydraulic pressure and driving. Important design principles on electromagnetic fuel delivery regulating actuator were put forward. This method has been applied on a certain fuel delivery regulating actuator to accomplish its optimizing design.

Keywords: electromagnetic actuator; fuel delivery regulating valve; simulation; high pressure common rail

1 前 言

为满足柴油机日益提高的性能与排放要求, 世界各国不断发展新技术, 电控燃油喷射技术是改善排放、降低油耗、提高动力性能的重要手段。共轨技术是目前最先进的电控燃油喷射技术, 共轨燃油系统得到广泛应用。油量调节阀是共轨燃油系统中的重要控制部件, 油量调节和轨压控制很大程度取决于油量调节阀的执行器特性。因此油量调节阀的结构设计、控制方法与性能优化是该领域的重要研究课题。

共轨燃油系统的油量调节阀大多数为比例节流调节, 个别为开关调节。比例节流调节原理, 即执行器通过改变进油节流面积来调节供油量, 按工作方式分为直接行程控制型和压力先导控制型两类。直接行程控制型比例调节阀采用的是比例电磁铁, 实现电流→力→位移转换, 最大开度受比例电磁铁的最大升程限制。压力先导控制型比例调节阀通过先导阀控制敏感腔压力, 实现电流→压力→位移的线性转换, 最大开度与电磁铁最大升程无直接关系。

本文研究的油量调节阀为压力先导液压半桥反比

例流量调节阀, 剖面结构如图 1 所示, 该阀安装于高压油泵低压进油通路, 控制方式为进油量控制。

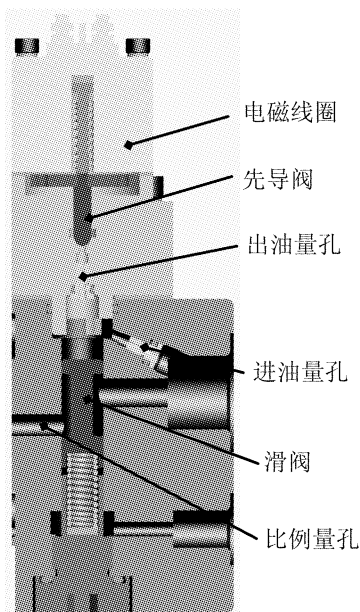


图 1 油量调节阀剖面

2 结构与工作过程

油量调节阀特点: ①模块化结构, 连接方便, 适用不同共轨燃油系统; ②先导类型, 大流量特点, 适用船用大功率柴油机共轨燃油系统; ③节流采用通用滑阀形式, 结构可靠稳定; ④滑阀芯为轻质材料, 惯量小, 表面耐磨强化处理, 运行可靠; ⑤进、出油量孔采用分离式螺栓结构便于低成本和高精度加工。

工作过程分析: 低压燃油系统供给 0.7 MPa 压力稳定的燃油由油量调节阀进油口进入, 经进油量孔进入压力敏感容积腔中, 电磁线圈通电, 电磁线圈产生电磁力吸引衔铁克服衔铁弹簧的预紧力向上运动, 先导阀开启, 燃油由压力敏感容积腔经出油量孔流出。出油量孔的流通截面积大于进油量孔的流通截面积, 压力敏感容积腔中燃油压力下降, 在一定的驱动频率下, 通过调节电磁线圈的通电占空比可使压力敏感容积腔中的压力维持稳定, 当滑阀芯上部受到压力敏感容积腔的燃油压力与下部受到滑阀弹簧的压紧力动态平衡时, 滑阀芯将维持在一个动态平衡位置, 此时滑阀开度达到动态稳定。

增大电磁线圈通电占空比, 压力敏感容积腔回油量增大, 压力敏感容积腔压力下降, 滑阀芯所受液压力减小, 滑阀弹簧压紧力大于液压力, 弹簧伸长直至弹簧力减小到与液压力平衡, 滑阀芯则达到新的动态平衡位置, 此时滑阀开度减小。相反, 减

小电磁线圈通电占空比, 压力敏感容积腔回油量减小, 压力敏感容积腔升高, 滑阀芯所受液压力增大, 弹簧压紧力小于液压力, 滑阀弹簧压缩直至弹簧力增大到与液压力平衡, 滑阀则达到新的平衡位置, 此时滑阀开度增加。在适当的驱动频率下, 通过控制电磁线圈通电占空比即可实现滑阀开度可控。

3 软件仿真建模

利用 AMESim 软件建立如图 2 所示的油量调节阀仿真模型。油量调节阀由容积腔、管路、运动件、弹簧、节流孔、控制阀等组成, 仿真对运动件建立动力学方程, 对容积腔和燃油管路建立流动方程, 对燃油建立状态方程, 并综合考虑偶件中的燃油泄漏、燃油流道中压力波传播等因素的影响。

油量调节阀的工作是一个复杂的机械、液力过程, 数值仿真计算时很难面面俱到, 特做出以下假设:

- (1) 燃油的温度不变, 设为 40 ℃;
- (2) 各腔视为集中容积, 燃油容积腔内流动, 不考虑压力传播时间;

- (3) 运动件惯性质量为集中质量。

建成的模型如图 2 所示, 模型主要设置如下:

- (1) 燃油介质类型 ISO4113, 介质温度为 40 ℃, 绝对黏度为 0.02cP;
- (2) 油量调节阀入口的压力值设定为 0.7 MPa;
- (3) 短孔考虑液体的可压缩性、管路摩擦和液体惯性, 高压油管 and 长孔还另外考虑了管道内的压力波动的影响;
- (4) 偶件泄漏模型考虑了偶件直径、间隙和泄漏长度。

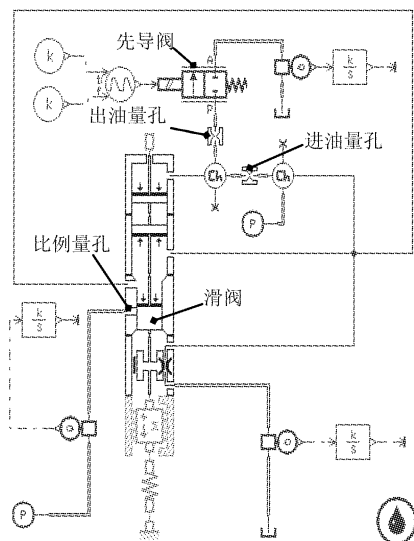


图 2 油量调节阀仿真模型

4 性能分析与优化

4.1 滑阀芯运行学特性

油量调节阀的滑阀芯运动过程见图 3, 其动作是在某位置上下波动的动态过程。

驱动信号由高电平转换至低电平, 滑阀芯加速运行, 位移增加, 速度增加, 加速度增加; 当驱动信号为低电平后, 出油量孔关闭, 此时滑阀芯速度、加速度产生振荡, 大约 3.6 ms 后达到平衡, 产生原因是敏感压力腔的压力因驱动信号由高电平至低电平转换的阀扰动产生了压力振荡。

驱动信号由低电平上升至高电平, 滑阀芯加速反向运行, 速度反向, 位移减小; 当驱动信号为高电平后, 出油量孔完全开启, 此时滑阀芯的速度、加速度也产生振荡, 大约 0.6 ms 后达到平衡, 滑阀芯平衡时间明显小于出油量孔关闭过程, 产生原因是出油阀量孔开启后敏感压力腔的燃油流动状态更迅速地达到压力-流量平衡。

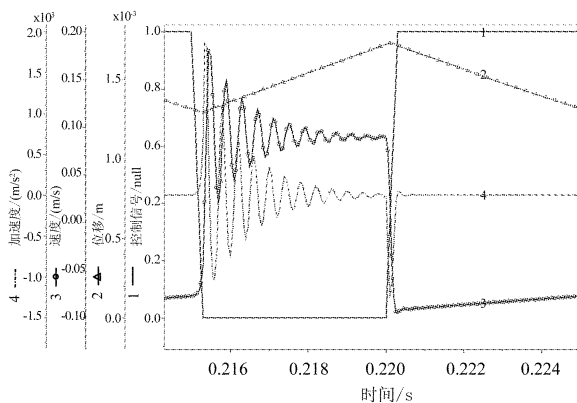


图3 滑阀直径_振幅特性

4.2 惯性质量、滑阀直径对动态性能的影响

惯性质量、滑阀直径对动态性能的影响见图 4 ~ 图 7。

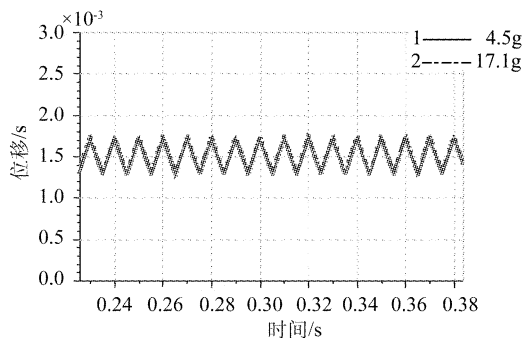


图4 质量_振幅特性

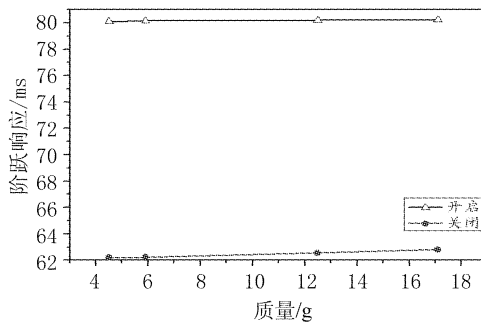


图5 不同惯性质量下的阶跃响应

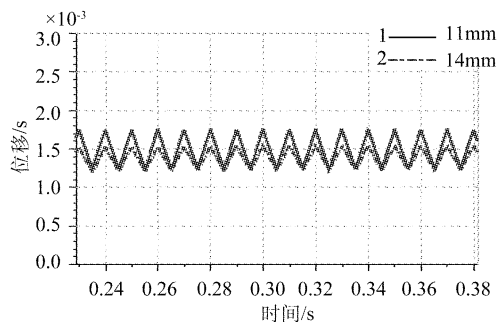


图6 滑阀直径_振幅特性

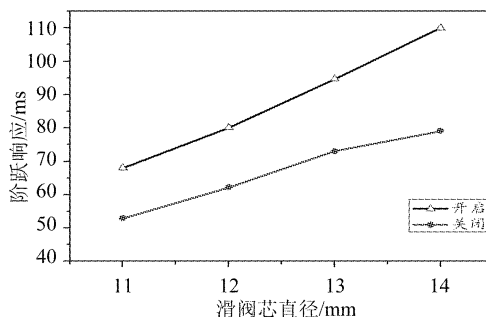


图7 不同滑阀直径的阶跃响应

从图 4 ~ 图 7 得出: 减小运动件惯性质量有利于减小滑阀位移峰谷差值, 提高阶跃响应, 但效果不明显。减小滑阀芯直径有利于提高阶跃响应, 但位移振幅大。滑阀运动件惯性质量因素与滑阀芯直径因素相比较, 对阶跃响应、振幅特性影响, 后者占主导地位。

4.3 量孔对动态性能的影响

出油量孔的孔径固定为 1.15 mm, 进油量孔的方案分别为 0.40、0.50、0.60、0.70、0.80、0.90 mm, 滑阀位移的仿真结果见图 8。进油量孔的孔径固定为 0.65 mm, 出油量孔的方案分别为 0.80、0.90、1.00、1.10、1.20、1.30 mm, 滑阀位移的仿真结果见图 9。

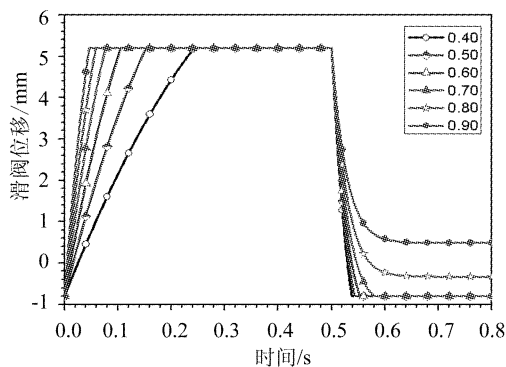


图 8 不同进油量孔下动态响应

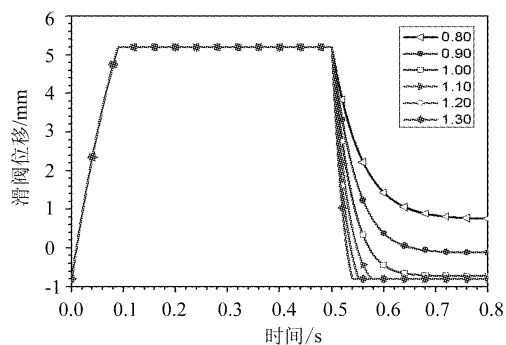


图 9 不同出油量孔下动态响应

分析图 8、9 得出：进油量孔的孔径既影响油量调节阀阶跃响应的开启特性又影响阶跃响应的关闭特性，进油量孔的孔径增大，开启响应时间减小，关闭响应时间增加，进油量孔过大会导致油量调节阀关闭异常现象。出油量孔孔径只对油量调节阀阶跃响应的关闭特性产生影响，对开启特性无影响，出油量孔孔径增加，油量调节阀关闭时间减小，出油量孔孔径过小也会导致油量调节阀关闭异常。

4.4 先导阀响应速度的影响

先导阀响应慢，滑阀控制区间狭窄，仿真结果见图 10。过小的控制区间不利于实现油量稳定控制，在先导阀设计中可通过提高其响应速度来扩大占空比控制区间，提高先导阀响应的措施：增大驱动力、减小运动件质量、降低运动件流体阻尼。

4.5 开关频率对稳定度的影响

先导阀开关频率大，滑阀位移振幅波动小。提高先导阀驱动的开关频率有利于减小滑阀振幅，提高滑阀的稳定性。图 11 仿真结果显示了不同频率对滑阀振幅的影响程度，当开关频率大于 100 Hz 时，滑阀振幅减小趋势明显减缓。图 12 仿真结果同时表明开关频率增大后，油量调节阀的比例控制区域减小。

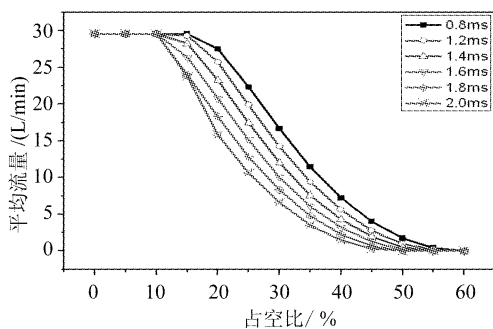


图 10 不同响应速度下的比例特性

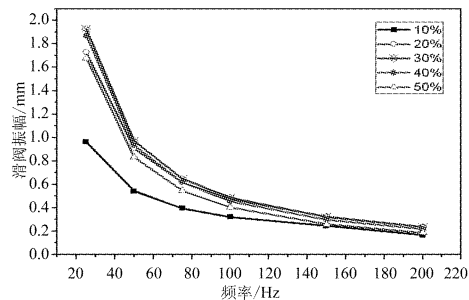


图 11 频率_振幅特性

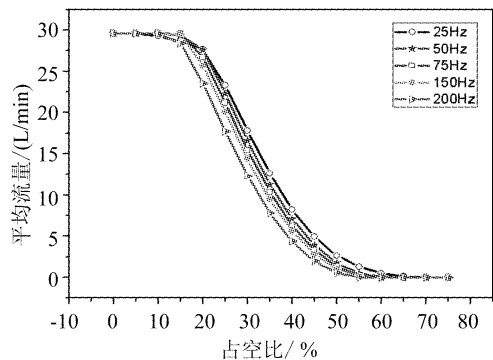


图 12 占空比_比例特性

4.6 比例量孔对流量特性的影响

图 13 仿真结果反映油量调节阀的最大流量与比例量孔面积基本成正比线性关系，大流量油量调节阀对应大的比例量孔面积，从结构设计上要求增大比例量孔直径、增加量孔数量或加大滑阀运动行程。

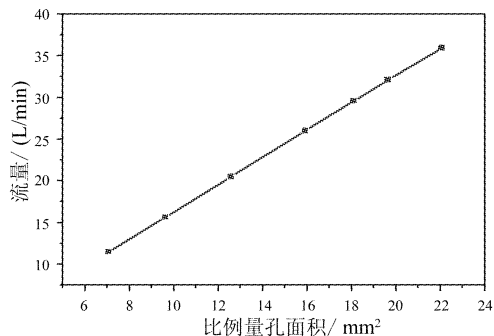


图 13 流量与量孔面积的关系

4.7 油量调节阀性能优化

经优化后的油量调节阀的阶跃响应开启时间为 85 ms, 关闭时间为 55 ms, 见图 14。供油油量为 $0 \sim 2\,900\text{ mm}^3/\text{冲程}$, 有效控制区间为 8% ~ 57%, 其中线性控制区间为 25% ~ 50%, 见图 15。匹配共轨燃油系统的轨压控制稳定, 见图 16, 性能指标满足目标要求。

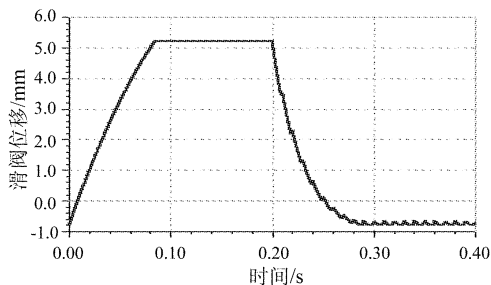


图 14 阶跃响应特性

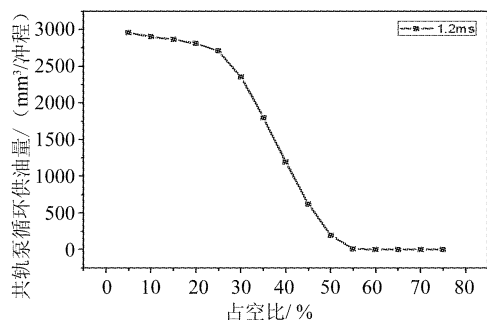


图 15 比例特性

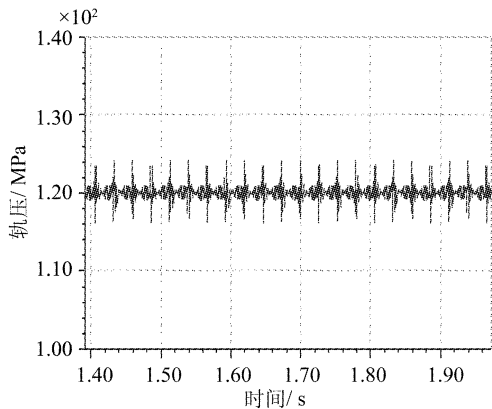


图 16 轨压控制 (油量 $2\,900\text{ mm}^3$, 目标轨压 120 MPa)

5 结 论

本文对油量调节阀的结构、液压、驱动开展了仿真研究, 并进行参数优化。通过研究得到以下设计原则:

(1) 滑阀芯直径设计原则: 小直径的滑阀芯直径可以提高响应特性。具体设计过程中响应特性和振幅特性应兼顾考虑, 以满足油泵流量特性要求。

(2) 惯性质量设计原则: 滑阀芯直径确定后, 从材料和导向长度两方面着手减小惯性质量。材料可采用硬铝材料, 并加以表面强化耐磨处理。

(3) 进、出量孔设计原则: 进、出油量孔匹配需要综合权衡, 增大进出油量孔的直径可获得更快的阶跃响应。

(4) 增加占空比控制区间的手段: 提高先导阀的响应速度。

(5) 比例量孔设计原则: 大流量调节阀需要增大比例量孔流通面积, 可以加大比例量孔直径或增加比例量孔数目。

(6) 滑阀芯直径、进出油量孔直径、先导阀响应速度和开关控制频率、比例量孔直径等的具体确定需要通过仿真优化设计。

笔者采用上述方法完成了某型油量调节阀的优化设计, 优化后的油量调节阀响应迅速、控制区间较宽、流量大, 可满足大型共轨燃油系统油量调节和轨压控制要求。

参考文献

- [1] 徐家龙. 柴油机电控喷油技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
- [2] 杨青、张红光等. 柴油机供油系统用新型电磁阀的研究[J]. 柴油机, 2006(5).
- [3] Dr. Rainer W. Jorach, Horst Ressel, Dr. Wolfgang Scheibe, Rolf Prillwitz, Dr. Leo Bakaj. The upcoming generation of common rail injection systems large bore engines from L'orange GMBH[C]. ICEF2002-479.
- [4] 许益民. 电液比例控制系统分析与设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.