

电控喷油器稳健性优化研究

张通^{1,2}, 金锋¹, 杨扬^{1,2}, 刘帅帅^{1,2}, 谢亦晨^{1,2}

(1. 七一一研究所, 上海 201108; 2. 船舶与海洋工程动力系统国家工程实验室, 上海 201108)

摘要: 针对电控喷油器零部件加工、装配过程中引入的尺寸、形位偏差, 运行环境中压力波动、振动等不确定性因素导致电控喷油器喷油量、持续期等性能指标发生波动和差异的问题, 在传统确定性优化的基础上, 开展了关键设计参数敏感性分析, 获得各关键设计参数在扰动条件下对循环喷油量、喷油持续期等性能指标的敏感性排序; 而后基于 6Sigma 原则, 对关键参数进行稳健性寻优计算, 获得稳健性良好的基础方案; 最后通过公差分析, 调整关键设计参数公差水平, 最终获得了基于喷油量、持续期、响应时间等指标的稳健性设计方案。

关键词: 电控喷油器; 稳健性; 敏感性; 公差分析; 6 Sigma 原则

中图分类号: TK423.8⁺4 文献标识码: A 文章编号: 1001-4357(2019)05-0035-05

Robustness Optimization of Electronic Controlled Injectors

Zhang Tong^{1,2}, Jin Feng¹, Yang Yang^{1,2}, Liu Shuaishuai^{1,2}, Xie Yichen^{1,2}

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

2. National Engineering Laboratory for Marine and Ocean Engineering Power System, Shanghai 201108)

Abstract: As for of electronic controlled injectors, uncertain factors such as size, form and position deviation caused by components machining and assembly tolerance, as well as uncertainties including pressure fluctuation and vibration under different working conditions, may lead to the fluctuation and discrepancy of injection volume and duration of electronic controlled injectors. To solve this problem, besides the traditional certain optimization, sensitivity analysis of key design parameters was carried out to obtain the sensibility ranking of how the key design parameters influence the performance parameters including cycle injection volume and duration under interference conditions. And then, based on 6Sigma theory, key parameters were robust optimized and basic program with good robustness was obtained. With tolerance analysis, the tolerance level of key design parameters was adjusted to finally obtain the robust design program based on the indexes including injection volume, injection duration and response time.

Key words: electronic controlled injector; robustness; sensibility; tolerance analysis; 6Sigma theory

0 引言

电控喷油器作为整个共轨系统核心执行器件, 直接控制喷油率曲线形状, 同时影响喷油正时和有效喷油压力。电控喷油器的整机匹配对循环喷油量、喷油持续期和喷射正时提出了非常严格的重复性和一致性要求。但是, 在零部件加工、装配过程

中引入的尺寸和装配偏差、共轨系统压力波动、外界振动以及疲劳磨损等各类不确定性因素的共同扰动下, 会导致柴油机各缸电控喷油器各项性能指标在空间和时间两个尺度上具有较大不确定性, 从而无法满足整机对其喷射重复性和一致性的要求。

为此, 本文提出一种稳健性设计流程, 以期有效提高电控喷油器各性能指标的抗扰动能力。首先

开展关键设计参数敏感性分析, 获得各关键设计参数在扰动条件下对循环喷油量、喷油持续期等性能指标的敏感性排序; 然后基于 6Sigma 原则, 对关键参数进行稳健性寻优计算, 获得稳健性良好的基础参数设计方案; 最后通过容差分析, 调整关键设计参数的公差水平范围, 进一步提高设计方案的稳健性。

1 电控喷油器 AMESim 仿真模型建立

1.1 研究对象

本文研究对象为某型头部集成蓄压容积、电磁先导控制形式的电控喷油器, 其结构如图 1 所示。

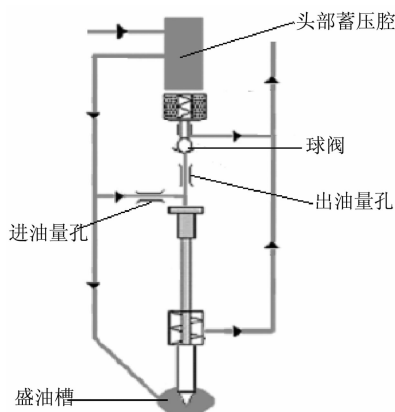


图1 某型电控喷油器结构示意图

1.2 AMESim 仿真模型

根据该型电控喷油器的结构原理, 建立其仿真模型, 如图 2 所示。

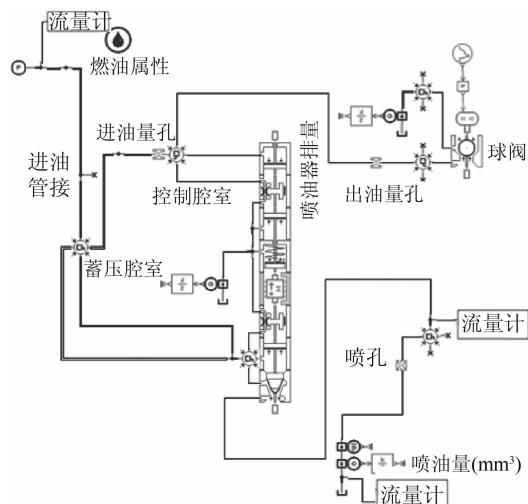


图2 某型柴油机电控喷油器仿真模型

2 设计参数敏感性及其交互性分析

2.1 敏感性及其交互性分析主要目的

(1) 通过各关键结构参数对各观察量的显著

性分析, 为寻优计算前变量水平区间的优化, 及容差分析调整顺序提供数据支撑;

(2) 明确各关键结构参数对各观察量影响是否存在交互作用, 及各结构参数是否相互独立, 作为后续多目标寻优计算前优化设计空间的依据。

2.2 敏感性及其交互性分析结果

根据电控喷油器基本结构方案及工作原理, 确定: 压力室直径 (d_{sac})、针阀密封直径 (d_s)、控制柱塞直径 (d_p)、进油量孔直径 (d_{in})、出油量孔直径 (d_{out})、针阀升程 (L)、针阀导向直径 (d_n)、喷孔直径 (d_0) 及进出油量空间流道直径 (d_{inout}) 9 个设计参数为关键设计参数。根据喷油率曲线近似梯形的几何形状, 分解出针阀启闭过程时间、循环喷油量及最大升程下平均喷射压力, 并定为 4 个独立的、各具意义的观测变量。采用 DOE 试验设计方法, 给予各设计变量 10% 的波动, 根据其对于目标量影响的大小及方向, 绘制出各设计参数对不同目标量的综合影响效应图^[1], 即各设计参数对主要目标量综合影响方向及排序, 分析结果如图 3 ~ 图 6 所示。

由上述效应图可知, 在相同的 $\pm 10\%$ 参数波动下:

(1) 针阀升程、进出油量孔有效流通截面积以及承压面相关尺寸对针阀启闭过程影响最为显著;

(2) 喷孔直径、针阀升程和压力室直径等对表征喷油器内部高压油道固有流通能力的最大升程下平均喷射压力影响较为显著;

(3) 循环喷油量是各影响因素综合作用的效果, 尤其以柱塞直径、导向直径、针阀升程和喷孔直径影响最为显著。

上述综合影响效应图仅展示了各设计参数一次量之间的敏感性排序, 根据各自变量之间是否存在交叉高次量, 还可确定交互作用 (独立与否) 及交互作用的大小, 分析结果如下:

(1) 控制柱塞直径和针阀导向直径对各观察目标量的影响交互性均较弱;

(2) 针阀导向直径和针阀密封直径对各观察目标量的影响交互性较弱;

(3) 针阀密封直径和压力室直径对各观察目标量的影响交互性较弱。

上述参数特征均由针阀详细结构所决定, 在现有方案下, 两者间有结构尺寸的限制。因此, 在后续寻优过程中可根据结构等限制搭建某种线性关系, 将其统筹考虑。

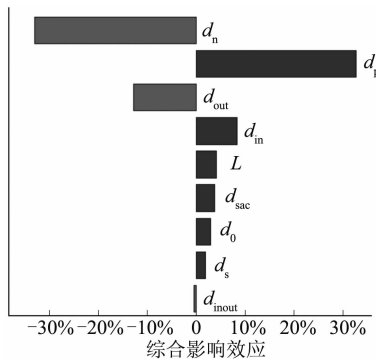


图3 针阀开启过程效应图

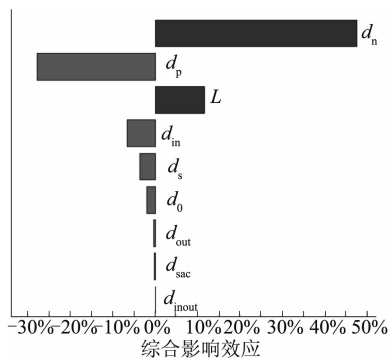


图4 针阀关闭过程效应图

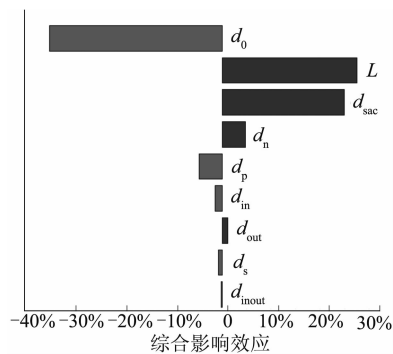


图5 最大升程下压力室平均压力效应图

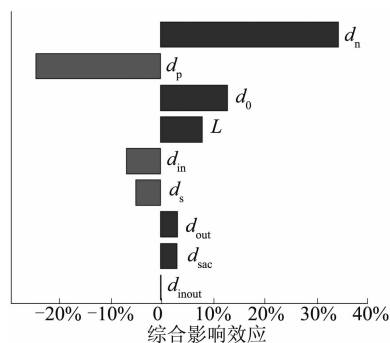


图6 循环喷油量效应图

3 6Sigma 多目标优化

3.1 方法概述

6Sigma 质量分析通常借助概率模型将目标函

数拟合成正态分布的形式, 分析不确定因素对产品性能和质量的影响, 并通过控制设计变量扰动条件下均值或方差, 有效降低产品违反性能指标约束的概率, 提高产品的稳健性^[2]。

Sigma 水平值是衡量产品设计质量的综合指标; 而可靠度指产品的性能满足约束条件的概率。图 7 为目标值正态分布曲线, 则可靠度为 $P = 1 - (P_L + P_U)$, 对应 Sigma 水平值如图 8 所示。通常在机械领域 3Sigma 认为工程质量可接受, 对应可靠度为 99.73%。3Sigma 只是一个参考水平, 具体实际评估电控喷油器性能的可靠性水平还要综合多方面考虑^[2]。

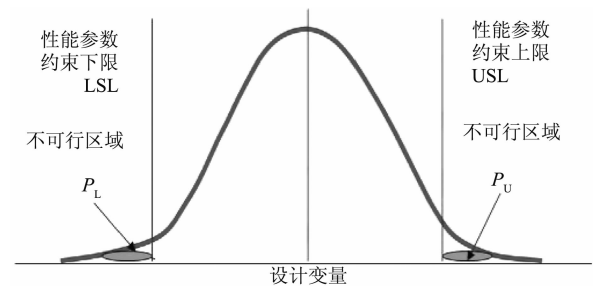


图7 概率分布示意图

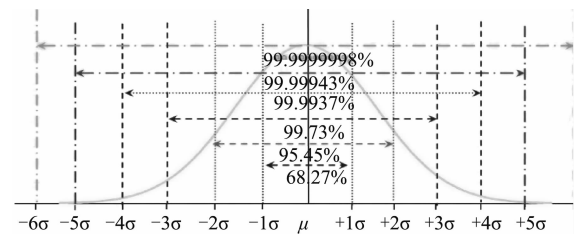


图8 正态分布与 Sigma 水平

3.2 稳健性寻优计算

针阀开启过程时间和关闭过程时间决定着喷油率上升和下降段所占的比重, 启闭过程时间过短会拉低压力室平均喷射压力, 进而拉低整个持续期内的平均喷射流量。同时, 由于整机对电控喷油器在相同脉宽下各缸喷射油量、喷油正时和喷油持续期有严格的一致性要求, 这就要求在设计、加工和装配过程引入的扰动因素对同一批电控喷油器的循环喷油量、喷油持续期和喷射正时的影响最小。

因此, 本文开展基于稳健性的多目标寻优计算, 以保证优化过程朝着稳健方向寻优, 详细计算方案如下:

(1) 首先, 在上文提到的 9 个关键参数敏感性和交互性分析基础上, 确定各设计变量水平范围; 同时, 结合历史经验给予各设计变量一个较为宽泛的初始扰动范围, 且在范围内均匀分布, 进而

明确设计空间。

(2) 然后, 基于背景参数明确以循环喷油量、喷油持续期和针阀开启延时为主要约束条件。

(3) 最后, 以针阀开启、关闭过程时间最短为首要优化方向; 同时, 以循环喷油量、喷油持续期和针阀开启延时三个量的 6Sigma 水平最大作为辅助优化目标量。

为降低计算量, 扰动的随机抽样选用蒙特卡罗随机抽样, 寻优计算方法选择 NSGA - II 遗传算法。根据上述计算方案求得寻优结果, 选取最优解和若干前沿解 (可行解), 并在前沿解中人工对比筛选, 最终确定当前设计空间下, 启闭过程时间最短且稳健性最优的基础参数设计方案。同时, 获得了该设计方案及其当前扰动条件下, 三个辅助优化目标量的 Sigma 水平, 如图 9 ~ 11 所示。图中横坐标为各目标量约束范围, 纵坐标为相应的概率密度 (数值不具具体意义), 该曲线面积积分为 1^[2]。

由图可知:

(1) 喷油持续期在背景约束条件下, 其 Sigma 水平值为 8, 可靠度为 100% (注: 由于计算仅考虑了可定量处理的扰动, 还有压力波动、振动、摩擦等诸多扰动并未考虑, 以下可靠度为相对分析参考), 可以很好地满足喷油持续期的性能指标。

(2) 喷油量在背景约束条件下, Sigma 水平值为 1.667, 可靠度为 90.44%, 有待提高。

(3) 表征针阀正时一致性的针阀开启延时时间在背景约束条件下, Sigma 水平值为 1.491, 可靠度仅为 86.4%, 有待提高。

由此可知, 三个辅助优化目标量在基础参数设计方案及其扰动范围下, Sigma 水平并不高, 有必要针对该参数设计方案的扰动范围开展进一步优化。

4 容差分析

为进一步提高循环喷油量和针阀开启延时的 Sigma 水平, 针对上述基础参数设计方案, 通过提高该参数加工、装配精度, 对其公差水平进一步收紧, 即控制各扰动参数的波动范围, 进而达到循环喷油量和开启延时时间稳健性水平的进一步提升。

收紧顺序按照先控制工程容易实现的加工公差, 再控制装配过程引入的装配偏差, 然后再对工程上存在加工难度的各类偏差做收紧。容差分析结果如图 12、图 13 所示。

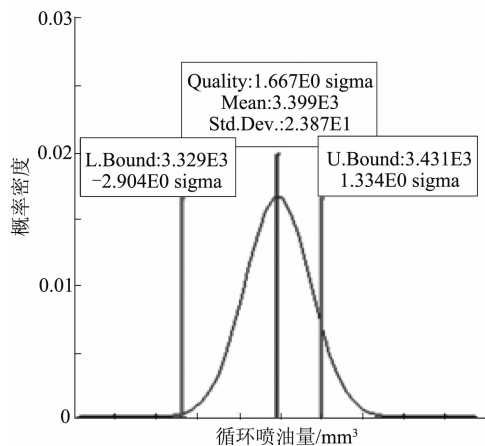


图 9 喷油量 Sigma 水平

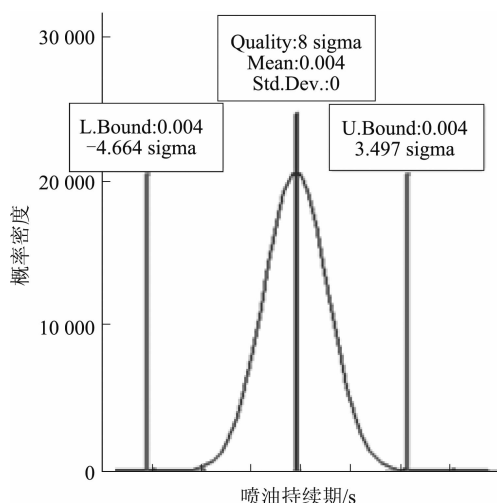


图 10 喷油持续期 Sigma 水平

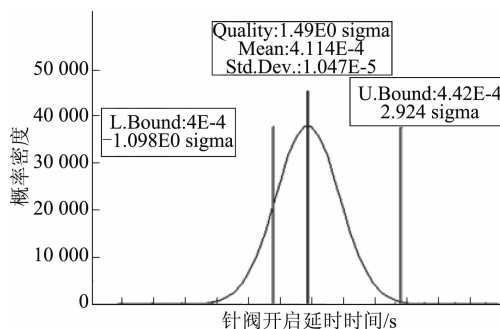


图 11 针阀开启延时 Sigma 水平

可以看出: 喷油量 Sigma 水平值为 2.721, 可靠度为 99.34%; 直接影响喷射正时的针阀开启延时时间 Sigma 水平值为 8, 可靠度为 100%。即, 通过容差分析, 循环喷油量和针阀开启延时时间的 Sigma 水平值和可靠度得到明显提升。该收紧或平移后的扰动偏差范围可为上述基础设计参数加工偏差、总成装配偏差的确定提供理论支撑。

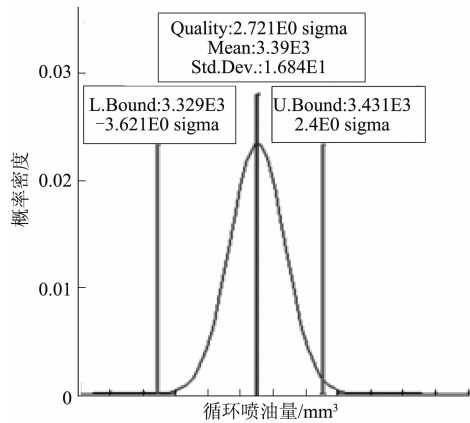


图 12 喷油量 Sigma 水平（改进后）

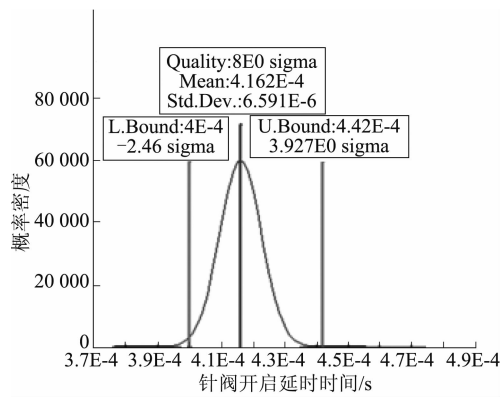


图 13 针阀开启延时 Sigma 水平（改进后）

5 总结

本文针对共轨系统电控喷油器性能和稳健性优化问题，提出了以下优化设计流程：首先开展关键设计参数敏感性和交互性分析，清晰给出各关键设计参数在已知扰动（加工装配偏差）下对循环喷油量、喷油持续期以及针阀开启延时时间等性能指标的敏感性排序；同时，根据各设计变量的交互性优化设计空间，便于后续开展稳健性优化和容差分析。然后以循环喷油量等目标量及其 6Sigma 水平为优化目标，对关键参数进行寻优计算，获得稳健性良好的基础参数设计方案。最后，为进一步提高设计方案的稳健性，根据敏感性分析排序，通过收紧或平移，获得满足稳健性要求的上述基础设计参数的加工公差范围或总成装配偏差范围。

通过上述流程可获得关键参数设计方案及加工、装配偏差范围。该方案满足电控喷油器快速启闭要求，且各目标量具有良好的稳健性，为各缸喷射油量、喷射正时的一致性奠定了基础。

参考文献

- [1] 陈魁. 实验设计与分析 [M]. 北京：清华大学出版社，2005.
- [2] 赖宇阳. Isight 参数优化理论与实例详解 [M]. 北京：北京航空航天大学出版社，2012.