

文丘里管设计仿真一体化平台的设计

闫乐乐^{1,2}, 李楠^{1,2}, 王俊莉^{1,2}, 姚旺^{1,2}, 孟庆当^{1,2}

1. 内燃机可靠性国家重点实验室, 山东 潍坊 261061; 2. 潍柴动力股份有限公司, 山东 潍坊 261061

摘要: 为避免文丘里管设计过程中因压差传感器量程而导致的大量重复性迭代工作, 基于优化设计软件 Isight、Creo 二次开发工具 Protoolkit、计算流体动力学 (computational fluid dynamics, CFD) 仿真分析软件 STAR-CCM+ 和参数化设计原理, 开发文丘里管设计仿真一体化平台, 通过某发动机的文丘里管设计对一体化平台进行实例验证。结果表明, 文丘里管设计仿真一体化平台能够通过对接口直径的快速优化迭代获得最优计算结果, 实现文丘里管自动优化设计, 满足国六柴油机的仿真开发要求。

关键词: 文丘里管; 喉口直径; Isight; Protoolkit; CFD; 参数化

中图分类号: TK421.5; TP391.9

文献标志码: A

文章编号: 1673-6397(2021)06-0071-05

引用格式: 闫乐乐, 李楠, 王俊莉, 等. 文丘里管设计仿真一体化平台的设计[J]. 内燃机与动力装置, 2021, 38(6): 71-75.

YAN Lele, LI Nan, WANG Junli, et al. Integrated platform for design and simulation of Venturi tube[J].

Internal Combustion Engine & Powerplant, 2021, 38(6): 71-75.

0 引言

柴油机在经济性、动力性、可靠性等方面具有优势, 是汽车、工程机械、农机、电站和船舶的主要动力来源^[1]。对柴油机 NO_x 排放要求越来越高, 废气再循环 (exhaust gas recirculation, EGR) 已成为控制柴油机 NO_x 排放的关键技术, 实现 EGR 闭环精确控制尤为重要^[2-5]。文丘里管的测量精度较高, 对发动机、整车等应用边界的适应性好, 已广泛应用于柴油机的设计和生产制造, 利用传感器测量文丘里管入口与喉口的压差, 可准确计算流过的废气流量。

为满足压差传感器量程要求, 文丘里管设计过程中需要对仿真设计进行多次迭代。本文中基于优化设计软件 Isight、Creo 二次开发工具 Protoolkit、计算流体动力学 (computational fluid dynamics, CFD) 仿真分析软件 STAR-CCM+ 及参数化设计原理开发文丘里管设计仿真一体化平台, 计算过程中通过不断优化迭代, 得到最优的文丘里管设计, 实现文丘里管自动优化设计, 满足国六柴油机开发要求。

1 总体方案

1.1 结构和设计流程

文丘里管由圆筒段 (也称入口段)、收缩段、喉部和扩散段等组成。喉部直径小于圆筒段直径, 喉口流速大于入口流速, 流经文丘里管的废气质量流量^[6-7]

$$q_m = \frac{C}{\sqrt{1-\beta^4}} \varepsilon \frac{\pi}{4} d^2 \sqrt{2\Delta p p} \quad (1)$$

收稿日期: 2020-11-13

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2017YFC0211304)

第一作者简介: 闫乐乐 (1989—), 女, 山东潍坊人, 工程师, 主要研究方向为内燃机进排气系统设计, E-mail: yanlele@weichai.com。

式中: C 为表征通过装置的实际流量与理论流量之间关系的流出系数; β 为喉口直径与入口直径之比; ε 为膨胀因子; d 为喉口直径,mm; Δp 为入口与喉口的静压差,kPa; ρ 为通过的废气密度, kg/m^3 。

文丘里管结构如图1所示。传统的文丘里管设计流程如图2所示。

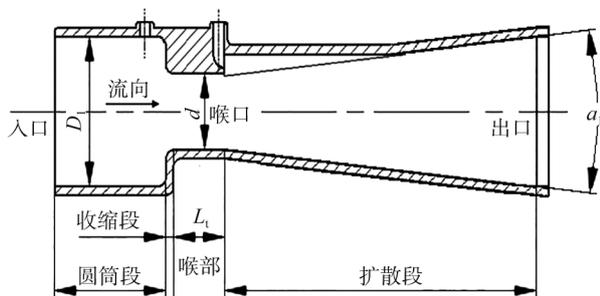


图1 文丘里管结构图

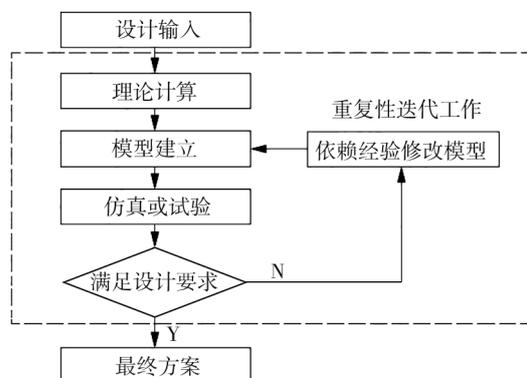


图2 传统文丘里管设计过程

传统文丘里管设计过程包括理论计算、三维数字模型曲面修改、网格划分、CFD 流场计算、采样和优化设计等流程^[8]。大量重复性迭代工作枯燥、费时,不仅延长了设计和仿真周期,也耗费设计人员过多精力,存在出错的潜在风险。对此,本文中依托优化设计软件 Isight 和 Creo 二次开发工具 Protoolkit,基于参数化设计原理^[9-12]开发了文丘里管设计仿真一体化平台,实现文丘里管自动最优化设计,满足国六柴油机开发要求。

文丘里管设计仿真一体化总体设计流程如图3所示。根据一维热力学仿真得到 EGR 管路直径 D_1 ,新鲜进气量、EGR 率、温度 T 、压力 p 等参数,以压差传感器量程的 1/2 (10 kPa,且满足精度 ± 0.2 kPa) 要求作为目标,根据式(1)反向计算文丘里管喉口直径 d 。在现有定型的文丘里管中选取一款与计算的 d 最接近的文丘里管进行计算,计算应用流量系数和膨胀系数均默认为 1,判断计算出的压差 Δp 是否为 8~15 kPa,若符合要求,Isight 启动 CCM+ 单向仿真计算程序,仿真计算压差满足目标要求,则定型该方案进行开发,输出仿真报告作为开发依据;若不满足目标要求或数据库中所有产品均无法满足压差为 8~15 kPa 要求,则重新输入结构参数,在系统中生成三维模型,Isight 启动 CCM+ 进行迭代仿真计算,迭代仿真计算过程通过不断调整 d 以满足目标要求,满足目标要求的 d 作为此次定型方案,输出仿真报告作为开发依据。

1.2 输入参数设计及优化目标

设计输入参数分为性能参数、结构参数和其他相关参数 3 类,输入参数分类如表 1 所示。

实测压差超过压差传感量器量程,会导致测量失准,实际测量压差信号如图 4 所示。

实际压差信号是不断波动的,由于测量压差超过传感器量程限值(传感器量程为 20 kPa)时

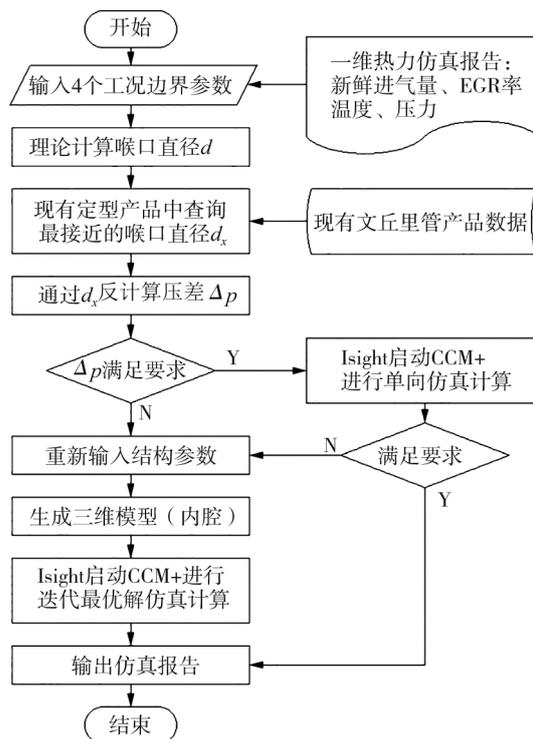


图3 文丘里管设计仿真一体化总体设计流程

表1 输入参数分类

性能参数	结构参数	其他相关参数
新鲜进气量/ $(\text{kg}\cdot\text{h}^{-1})$	D_1/mm	空气常数/ $(\text{J}\cdot(\text{kg}\cdot\text{K})^{-1})$
EGR 率/%	L_1/mm	传感器最大量程/kPa
出口绝对压力/kPa	$a_1/(\text{°})$	当地温度/ °C
出口温度/ °C	d/mm	当地压力/kPa

曲线 *a* 按照量程限值进行计算,因此压差传感量器得到的压差信号比实际压差偏小。为避免压差超过传感器量程限值,在设计文丘里管时将压差设计在量程一半左右(如曲线 *b* 所示)。在废气流量不变情况下,喉口直径对压差信号影响显著,实际应用中可通过调整喉口直径将压差信号控制在压差传感量器量程一半左右。

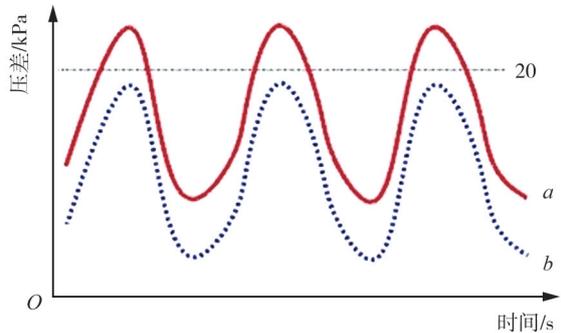


图4 实际压差信号

2 文丘里管设计仿真一体化的实现

2.1 过程集成

Isight 具有强大的过程集成能力^[13],能够将多学科代码集成并使流程自动化,并提供实时监控。本文中设计的系统在 Isight 基础上集成 Creo 二次开发代码、CFD 仿真分析软件 STAR-CCM+。

Isight 集成优化界面如图 5 所示,箭头代表数据及过程传递路径;Creo 代码实现对三维模型的数据传递;STAR-CCM+和脚本实现边界条件以及有限分析求解,输出压差信号;Script 通过压差信号判断喉口直径变化,当 $\Delta p < 9.8$ kPa 时,喉口直径递减 0.1 mm,当 $\Delta p > 10.2$ kPa 时,喉口直径递增 0.1 mm,触发 Creo 二次开发代码及 STAR-CCM+ 脚本计算,直至压差信号为 9.8~10.2 kPa 时终止计算。

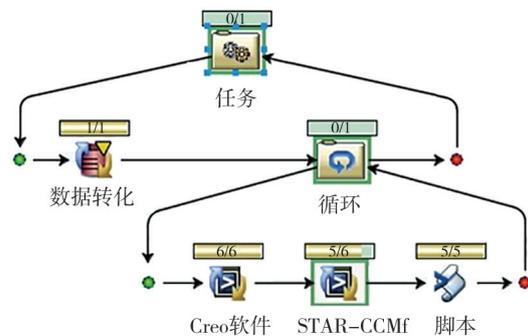


图5 Isight 集成优化界面

2.2 Creo 二次开发

由于录制 Creo 宏文件容易造成 Creo 闪退,终止整个系统,且错误不易发现,本文中采用 Protoolkit^[14-15]开发 Creo 代码取代录制 Creo 宏文件,Protoolkit 开发 Creo 代码更加稳健,其 API 函数涵盖了 Creo 的大部分功能,Protoolkit 能够实现深层次开发。

本系统采用 Protoolkit 异步开发模式作为独立程序进行 Creo 开发,每次 Isight 调用 STAR-CCM+ 计算完成后,结果不满足要求时执行以下程序:获取 Creo 路径并通过 ProEngineerStart() 函数触发 Creo 启动,获取模板路径并通过 ProMdlRetrieve() 函数加载模板模型,通过 ProModelItemInit()、ProParameterInit() 函数初始化当前模板模型及模型参数,通过 ProParameterValueSet() 函数将参数赋值给模板对象,通过 ProSolidRegenerate() 实现模板对象再生;ProIntf3DFileWrite() 函数完成模板对象转码为 .stp 格式给 STAR-CCM+ 提供输入模型。

2.3 STAR-CCM+宏文件

STAR-CCM+ 宏文件主要集成模型导入、网格划分、边界条件输入、输出结果设置等功能。相比 STAR-CCM+ 中 Geometry 3D-CAD models 模块,Creo 是更为专业的绘图软件。考虑测压部位形状会随着喉口位置发生微调整,选择绘图 Creo 进行三维建模,保证三维模型的鲁棒性,进而保证迭代计算正常进行。

3 仿真实例

3.1 发动机参数

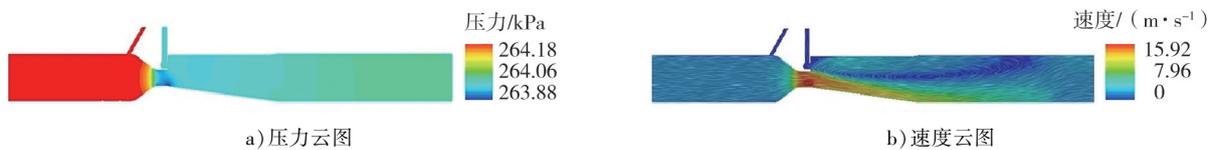
某 6 L 发动机设计参数如表 2 所示。

表2 发动机设计参数

新鲜进气量/(kg·h ⁻¹)	EGR率/%	入口绝对压力/kPa	入口温度/°C	D ₁ /mm	L ₁ /mm
1020	15	261	180	40	12
a ₁ /°	d/mm	空气常数/(J·(kg·K) ⁻¹)	传感器最大量程/kPa	当地温度/°C	当地压力/kPa
10	15.5	287	20	25	101.3

3.2 计算结果

经过7轮迭代优化计算,压差由8.49 kPa优化至10.03 kPa,满足9.8~10.2 kPa要求,喉口直径由15.5 mm优化至14.9 mm,同时输出仿真结果,优化喉口直径 d 后文丘里管的流动压力和速度云图仿真结果如图6所示。整个计算过程,无需人为干涉,无需重新修改模型、重新划分网格、重新输入边界条件等重复性工作,全程用时15 min左右,极大提高了工作效率。

图6 优化喉口直径 d 的文丘里管流动压力和速度云图仿真结果

4 结论

采用优化设计软件 Isight、Creo 二次开发工具 Protoolkit 和 CFD 仿真分析软件 STAR-CCM+, 基于参数化设计原理开发了文丘里管设计仿真一体化平台, 实现文丘里管自动优化设计, 满足国六柴油机开发要求。

1) 设计过程实现自动计算及优化, 无需重新修改模型、重新划分网格、重新输入边界条件等重复性工作, 经过多轮迭代优化, 迅速得到最优化的计算结果, 极大提高工作效率。

2) 仿真迭代优化计算过程无需人为干涉, 没有报错, 证明模型及程序稳健, 模型及程序的鲁棒性满足文丘里管自动计算优化要求。

参考文献:

- [1] 曹平平, 陈怀望, 曹明柱, 等. 基于节流方程的 EGR 阀废气流量控制标定研究[J]. 内燃机, 2018(2): 24-26.
- [2] 王平, 司建明, 王彦伟, 等. 关于废气再循环(EGR)技术[J]. 内燃机与动力装置, 2006, 23(4): 52-55.
- [3] 张雄伟, 陈稳超, 费腾, 等. 国IV柴油机 EGR 的控制与匹配研究[J]. 现代车用动力, 2015(4): 10-13.
- [4] 方祖华, 李桂华, 上官平. 增压直喷柴油机 EGR 系统结构方案及关键技术[J]. 内燃机, 2003(6): 15-17.
- [5] 张雷, 徐博雅, 陈征, 等. 新型 EGR 系统对非道路柴油机性能和排放的影响[J]. 小型内燃机与车辆技术, 2018, 47(3): 1-4.
- [6] 全国工业过程测量和控制标准化技术委员会第一分技术委员会. 用安装在圆形截面管道中的差压装置测量满管流体流量第3部分: 喷嘴和文丘里喷嘴: GB/T 2624.3—2006[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- [7] 梁郑岳, 朱万冬, 谢正良, 等. 基于文丘里管测量的 EGR 闭环控制试验研究[J]. 天津科技, 2020, 47(2): 46-49.
- [8] 郭凤华, 张彩明, 焦文江. 网格参数化研究进展[J]. 软件学报, 2016, 27(1): 112-135.
- [9] 黄炎, 苏松松, 冯明松. 基于隐式参数化正向建模的车身概念设计方法研究[J]. 时代汽车, 2018(6): 96-99.
- [10] 陈蓓, 曹岩, 杜江, 等. 基于 CATIA 航空标准件模板参数化建模方法研究[J]. 现代机械, 2018(3): 104-107.
- [11] 孟祥旭, 徐延宁. 参数化设计研究[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2002, 14(11): 1086-1090.
- [12] 陈维奇, 苟锐. 可视化编程参数化设计在工业设计中的应用[J]. 设计艺术研究, 2019, 9(1): 70-75.
- [13] 王峰, 吴永海. 基于 iSIGHT 的陶瓷轴承优化设计[J]. 机械设计与制造, 2007(12): 96-97.
- [14] 张文彬, 沈精虎, 姜兆康. 基于 Creo 二次开发的零件参数化变型设计[J]. 微型电脑应用, 2018, 34(2): 48-50.

[15]孙太良. 基于Creo二次开发的外啮合圆柱齿轮优化设计[J]. 电动工具, 2017(5):14-16.

Integrated platform for design and simulation of Venturi tube

YAN Lele^{1,2}, LI Nan^{1,2}, WANG Junli^{1,2}, YAO Wang^{1,2}, MENG Qingdang^{1,2}

1. State Key Laboratory of Engine Reliability, Weifang 261061, China; 2. Weichai Power Diesel Engine Co., Ltd., Weifang 261061, China

Abstract: In order to avoid a lot of repetitive iterative work in the design process of Venturi tube due to the range selection of pressure differential sensor, an integrated platform of Venturi tube is developed based on the optimization design software Isight, the secondary development tool Protoolkit of Creo, the CFD software STAR-CCM+ combined with the parametric design principle. An example of Venturi tube design is given to verify the integrated platform. The results show that the integrated platform for design and simulation of the Venturi tube can obtain the optimal calculation results of the throat diameter through the rapid optimization iteration, and realize the automatic optimization of the design of the Venturi tube, which meets the simulation development requirements of CHINA 6.

Keywords: Venturi tube; throat diameter; Isight; Protoolkit; CFD; parameterization

(责任编辑:张啸虎)

(上接第70页)

[14]黄修鹏. 齿轮制造误差对变速器啸叫性能的影响机理研究[D]. 重庆:重庆理工大学, 2017.

[15]王泽贵,周益,周观鹏,等. 变速器啸叫声与下线台架振动的相关性试验研究[J]. 振动与冲击, 2012, 31(23):180-184.

Optimization and evaluation of transmission gear shape

PENG Guomin, TANG Tianbao, HU Junfeng, DENG Xiaolong, CHEN Chaowei

Zhejiang Geely Powertrain Research Institute, Ningbo 315336, China

Abstract: The application of gear whistling excitation probability analysis method in reducing transmission gear noise is studied. The causes of gear whistling noise and the influence of gear machining accuracy on whistling noise are analyzed, the manufacturing tolerance of gear is adopted in computer aided engineering (CAE) simulation analysis, the probability statistical method is used to predict the noise improvement of gear modification optimization scheme, and mass test verification is carried out on the off-line inspection bench. The research and test results show that the transmission error probability of gear whistling noise is approximately normal distribution, and the fluctuation is about 15 dB. Compared with the nominal value single point analysis method, the noise reduction effect of transmission error probability analysis method is closer to the result of mass production, which can provide a reference for the development of vehicle noise, vibration and acoustic vibration roughness consistency.

Keywords: transmission gear whine; transmission error; micro-geometry parameter; probability distribution

(责任编辑:郎伟锋)