

结构与可靠性

基于 Z6170ZLCZ-19 柴油机模拟试验平台 配气机构仿真与优化设计

李志厚, 潘志翔, 曾 硕, 李 迟, 朱思魏, 何文博

(武汉理工大学能源与动力工程学院, 湖北 武汉 430063)

摘 要: 搭建了 LNG 燃料发动机多点喷射进气系统模拟试验平台; 根据原发动机的配气定时进行模拟平台进气顶置凸轮的设计, 并采用 GT-SUITE 仿真软件对凸轮型线进行优化。通过气门升程、气门速度、跃度、落座力、凸轮与顶杆接触应力、气门弹簧受力等参数来评价所设计的凸轮型线的可行性。结果表明: 设计的凸轮型线满足试验平台的设计要求, 并与原型机的进气规律具有一致性。同时指出: 实际应用中为检验该凸轮型线的设计是否合理, 还须进行相关性能试验。

关键词: 发动机模拟平台; 配气机构; 凸轮型线; 优化设计

中图分类号: TK423.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2017)06-0025-05

Simulation and Optimization Design of Valve Train Mechanism Based on Z6170ZLCZ-19 Diesel Engine Simulation Experiment Platform

Li Zhihou, Pan Zhixiang, Zeng Shuo, Li Chi, Zhu Siwei, He Wenbo

(School of Energy and Power Engineering, Wuhan University of Technology, Hubei Wuhan 430063)

Abstract: The engine simulation platform for the experiments of multi-point injection intake system in LNG fuel engine was built. According to the original engine valve timing, the design of overhead cam was simulated with the simulation platform and the GT-SUITE simulation software was used to optimize the cam profile. The feasibility of the cam profile was evaluated by experimental parameters such as valve lift, valve speed, yaw, seating force, the contact stress of cam and push rod, and valve spring force, etc. The results show that the cam profile could satisfy the design requirements of experiment platform, and share the same inlet rule as the prototype. It is also pointed out that relative performance tests are still required to verify the rationality of the cam profile.

Key words: engine simulation platform; valve train; cam profile; optimal design

0 引 言

随着计算机辅助设计技术的发展, 凸轮系统动力学优化设计已成为凸轮型线设计的主要方法。系统动力学除了考虑凸轮型线的基本参数外, 还对配气机构的运动情况、受力情况进行了更为精确地描述, 从而可对凸轮型线进行更好的优化设计^[1]。为保证模拟平台与原动机的配气定时的一致性, 使用 GT-SUITE 仿真软件建立模拟平台顶置凸轮的运

动学和动力学计算模型, 通过气门升程、气门速度、跃度、落座力、凸轮与顶杆接触应力、气门弹簧受力等参数来评价凸轮型线的可行性。

1 发动机模拟试验平台

发动机模拟平台的原型柴油机为淄博柴油机公司生产的 Z6170ZLCZ-19 船用柴油机, 其主要结构和技术参数见表 1。

该平台是为 LNG 燃料发动机多点喷射电控进

收稿日期: 2017-03-27

作者简介: 李志厚(1992-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为双燃料发动机技术, E-mail: lizhihouhappy@sina.com。

气系统策略设计开发而搭建的单缸模拟装置。该装置以 Z6170ZLCZ-19 柴油机单缸为基础,为了尽可能的简化装置,去掉原有的顶杆摇臂机构,取而代之的是顶置凸轮,顶置凸轮由变速电机驱动,同时因为试验并不考虑缸内混合气体燃烧情况,所以模拟试验平台无须设置点火装置。简化后的模拟试验平台如下图 1 所示。

表 1 Z6170ZLCZ-19 柴油机主要结构与技术参数

气缸数量	6
缸径/mm	170
冲程/mm	200
压缩比	14.5
整机排量/L	27.24
额定功率/kW	330
额定转速/($r \cdot \min^{-1}$)	1 000
额定燃油消耗率/($g \cdot (kW \cdot h)^{-1}$)	210

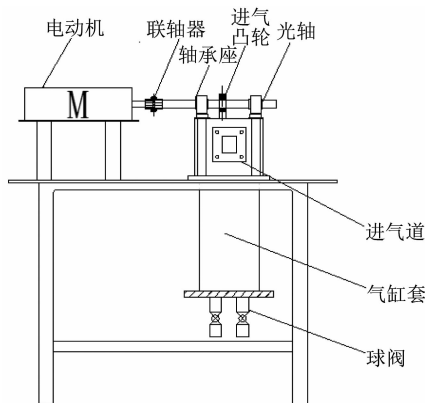


图 1 发动机模拟试验平台

2 进气凸轮型线设计

凸轮型线的设计是构建发动机模拟试验平台配气机构的核心,直接影响到试验平台的动力性、可靠性和工作平稳性^[2]。凸轮分为基圆部分与工作部分,当凸轮工作部分与进气门弹簧接触时,进气门打开;基圆部分与气门弹簧接触时,进气门关闭。基圆半径须通过电机轴心高度与阀桥的高度来确定;工作部分的型线依据新的配气正时以及气门升程曲线确定。

进气门升程曲线可直接在原型机上采集。通过在 Z6170ZLC-19 发动机上消除冷态的气门间隙进行盘车测量,每隔 10° 飞轮转角记录一次升程数据,将曲轴转角换算为凸轮轴转角后,进气门升程与凸轮转角如表 2 所示。

将得到的原始数据输入到 GT-SUITE 软件中,综合考虑发动机模拟试验平台的试验要求与原型发

动机的一致性要求,求得进气凸轮型线,如图 2 所示。

表 2 进气门升程数据

凸轮转角/ ($^\circ$)	气门升程/ mm	凸轮转角/ ($^\circ$)	气门升程/ mm	凸轮转角/ ($^\circ$)	气门升程/ mm
0	0	65	0	106.2	0
110	0.107	115	0.134	120	0.255
125	0.325	130	1.398	135	2.274
140	3.393	145	5.04	150	6.963
155	9.237	160	11.136	165	12.544
170	12.959	175	12.999	180	12.955
185	12.546			220	1.388
245	0.319	260	0.100	253.7	0.001

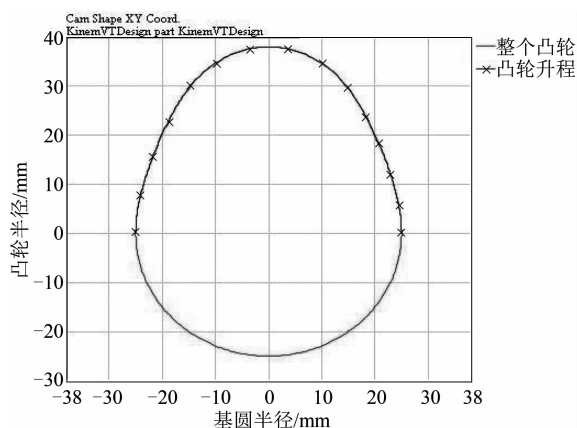


图 2 进气凸轮型线图

3 运动学和动力学模型建立

为了进一步对凸轮型线进行优化与校验,建立进气机构运动学和动力学模型,对进气机构的平稳性及进气凸轮与进气阀之间的冲击力和接触应力进行分析,校验进气凸轮与进气阀是否会因冲击力而产生噪声、振动及磨损加剧等现象。运动学模型与动力学模型如图 3、图 4 所示。

4 运动学和动力学仿真计算

由于发动机模拟试验平台的配气机构具有较大的运动惯量和较小的刚度,因而在电动机带动凸轮加速运动时会发生较大的弹性形变和振动,使得进气门不按设定的开启规律运动,发生故障。具体表现为:气门落座力过大、气门弹簧疲劳损坏、进气阀与阀座冲击力过大、配气机构变形等。导致试验结果失真。考虑配气系统中的各部件之间的阻尼以及力的平衡关系,以及进气凸轮与进气阀之间的间隙等因素,对配气机构进行动力学和运动学计算与仿真,从而对配气机构的设计和改进提供依据。

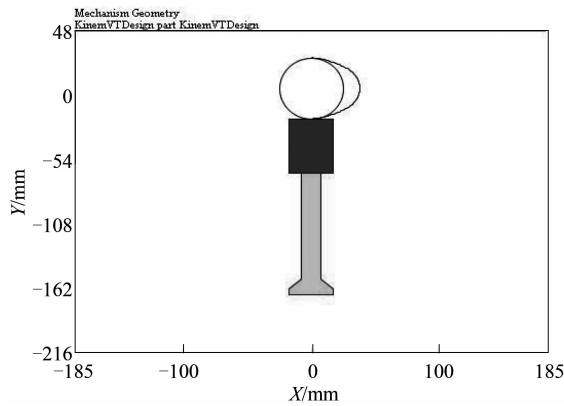


图3 运动学模型

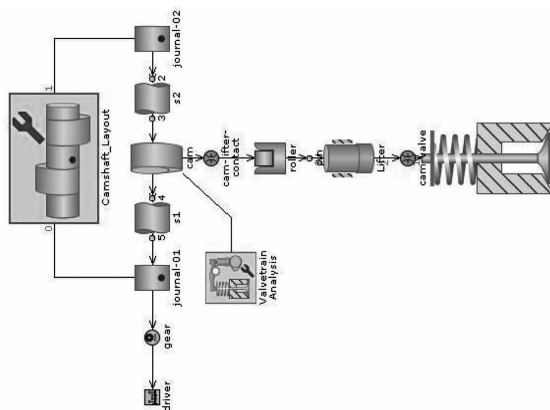


图4 动力学模型

4.1 运动学仿真计算分析

(1) 进气门升程丰满系数

配气机构的丰满系数通常用来评价各种类型的凸轮对其充气性能的影响。丰满系数过大或者过小都会影响发动机的充气性能。其定义为^[3]:

$$\zeta = \frac{\int_a^{\alpha} y(\alpha) d\alpha}{y_{\max}(\alpha_a - a)} \quad (1)$$

式中: $y(\alpha)$ 为当前凸轮转角时的气门升程; $y_{\max}$ 为气门的最大升程; a 为气门开启瞬间的凸轮转角; α_a 为气门关闭时的凸轮转角。

(2) 凸轮曲率半径

凸轮加工的难易程度主要反映在凸轮的曲率半径。凸轮曲率半径一般不能为负值, 且不能太小, 否则不易加工, 且会给从动件带来较大的接触应力。如果要求过大的丰满系数, 会导致曲率半径为负值, 加速度过大。凸轮曲率半径可由式(2)计算^[4]:

$$\rho = \frac{\left[\left(\frac{dg}{d\alpha} \right)^2 + g^2(\alpha) \right]^{\frac{3}{2}}}{g^2 + 2\left(\frac{dg}{d\alpha} \right) - g(\alpha) \frac{d^2g}{d\alpha^2}} - R_0 \quad (2)$$

其中: $g(\alpha) = R_0 + h(\alpha)$, R_0 为凸轮的基圆半径, $h(\alpha)$ 为从动件升程。进气凸轮曲率半径仿真曲线如图5所示, 从图中可以看出: 进气凸轮的最小曲率半径为 17.50 mm。对于气阀顶杆其曲率半径大于 0 即可, 满足设计要求。

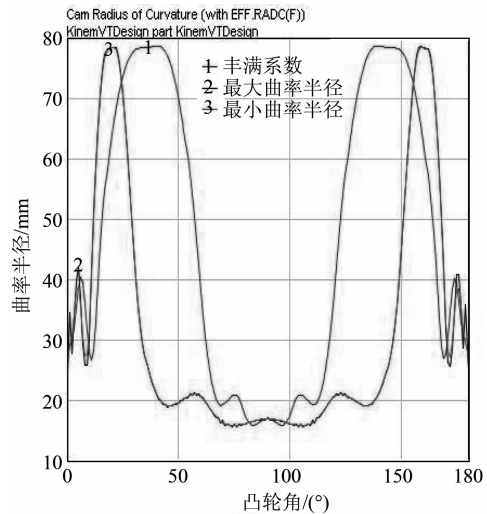


图5 凸轮曲率半径图

(3) 其他运动学特性评价指标

图6~图8为进气凸轮运动学特性, 包括进气门升程、速度和跃度。

从图中可以看出: 进气门升程最大值为 12.99 mm, 与模拟平台原型机的进气门升程相同, 同时升程曲线平稳, 未出现大的波动; 速度曲线变化平稳, 未出现速度突变, 符合发动机模拟试验平台设计要求。

4.2 动力学仿真计算分析

图9~图12为进气门动力学特性, 分别为气门升程、速度、加速度和落座力。从图中可以看出: 进气门升程曲线过渡非常平滑。气门速度曲线出现波动, 表明气门机构运动不是很稳定。在气阀关闭过程中, 由运动状态向静止状态过渡时, 进气凸轮和气门阀座发生碰撞, 产生一些峰值作用力; 在进气凸轮型线的过渡段也出现了作用力, 表明凸轮的过渡段对接触应力有相当大的影响。在气门机构的整个工作过程中, 气门的落座力基本在弹簧预紧力的附近变化; 气门与气门座的振动、磨损、冲击噪声都在允许的范围内。

4.3 凸轮与顶杆接触应力分析

模拟试验平台采用顶置凸轮机构直接驱动进排气阀门。凸轮与阀座的接触为狭小的面接触, 接触应力一般发生在接触区的中线上, 其最大的接触应力可以用赫兹公式计算^[5]:

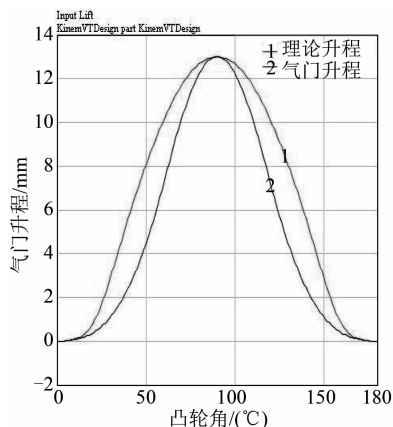


图 6 进气门升程

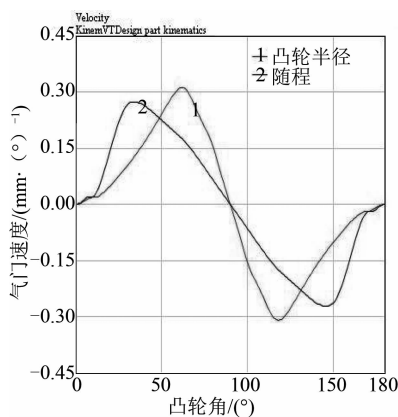


图 7 进气门速度

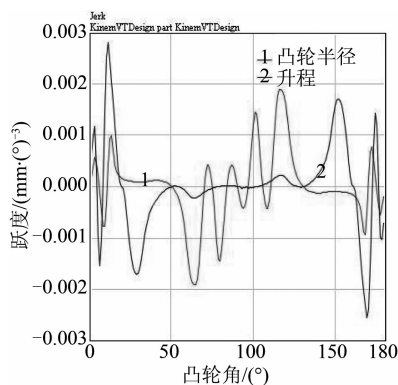


图 8 跃度

$$\sigma_H = \sqrt{\frac{F_n \left(\frac{1}{\rho_1} + \frac{1}{\rho_2} \right)}{\pi b \left(\frac{1 - \mu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \mu_2^2}{E_2} \right)}} \quad (3)$$

式中: F_n 为凸轮与平底从动件接触处法向载荷, N; ρ_1 、 ρ_2 为凸轮实际轮廓线的曲率半径和平底从动件曲率半径, mm; b 为凸轮与平底从动件的接触线长度, m; μ_1 、 μ_2 为凸轮、从动件材料的泊松比; E_1 、 E_2 为凸轮、从动件材料的弹性模量, Pa。

当从动件的曲率变化趋于无穷大时, 即 $\rho_2 \rightarrow \infty$, 进排气凸轮与阀座所使用的材料尽可能的相

同^[6], 那么公式 (3) 变为

$$\sigma_H = \sqrt{\frac{F_n E}{2\pi b \rho (1 - \mu^2)}} \quad (4)$$

式中: E 为凸轮、从动件材料弹性模量, Pa; ρ 为凸轮实际轮廓线的曲率半径, mm; μ 为凸轮、从动件材料泊松比。

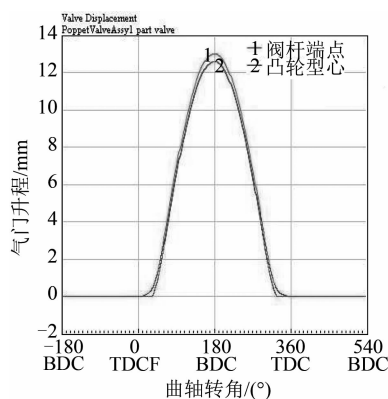


图 9 气门升程

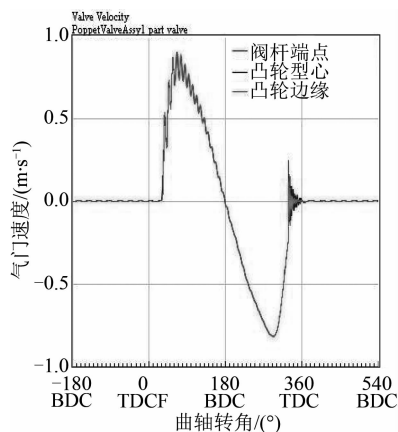


图 10 气门速度

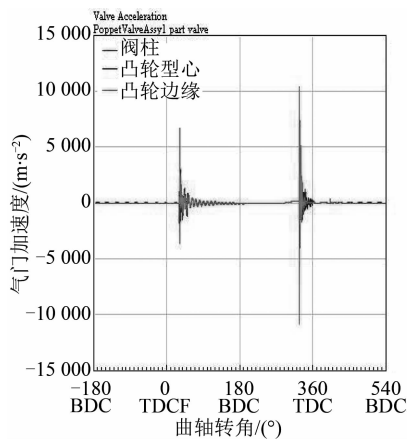


图 11 气门加速度

接触应力除了与部件之间相互作用力有关外还与部件的材料、接触面的形状及表面处理情况等有关。在不同转速情况下, 进气凸轮与从动件的接触

应力如图 13 所示。进气凸轮与从动件的接触应力最大在 600 MPa 左右, 在极限值范围内, 达到设计要求。

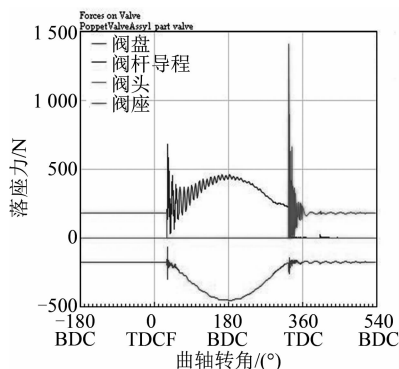


图 12 落座力

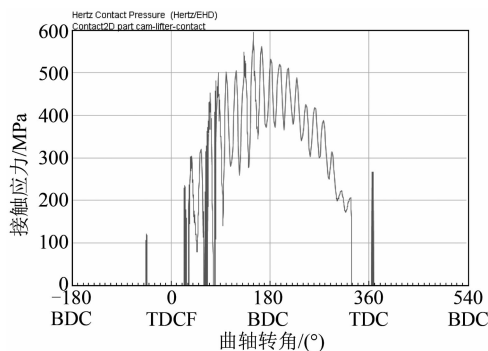


图 13 凸轮与顶杆的接触应力

4.4 气门弹簧受力分析

图 14 为气门弹簧受力仿真计算结果。从图中可以看出气门弹簧各质量点受力变化平稳, 没有陡变情况出现。由此可判断气门弹簧没有出现并圈现象, 弹簧在配气机构运动过程中受力合理。

5 结 论

采用 GT-SUITE 仿真软件对发动机模拟试验平台配气机构进气凸轮进行运动学与动力学分析。从气门升程、丰满系数、凸轮与顶杆的接触应力、气

门落座力和气门弹簧的受力情况评价所设计的凸轮型线的可行性。仿真结果表明: 设计的凸轮型线满足试验平台的设计要求, 并具有与 Z6170ZLCZ-1 原型机进气规律一致性。但在实际应用中, 为检验此凸轮型线的设计是否合理, 还须进行大量的相关性性能试验。

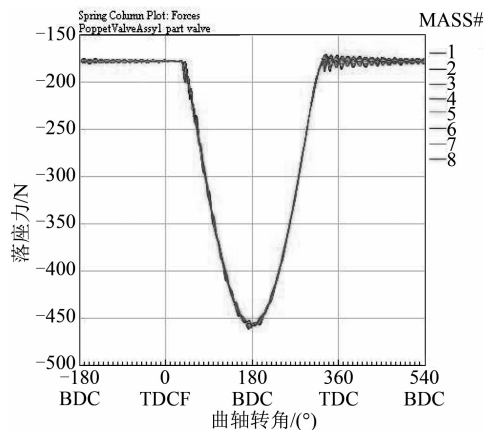


图 14 气门弹簧受力图

参考文献

- [1] 吕林, 王永波. 车用发动机配气机构运动学和动力学分析 [J]. 武汉理工大学学报 (交通科学与工程版), 2006, 30 (6): 1011-1014.
- [2] 吴国辉. JYM154FMI 发动机配气机构仿真分析及凸轮型线设计研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2008.
- [3] 张晓蓉, 朱才朝, 吴佳芸. 内燃机配气机构系统动力学分析 [J]. 重庆大学学报, 2008, 31 (3): 294-298.
- [4] 杨连生. 内燃机设计 [M]. 北京: 中国农业机械出版社, 1986.
- [5] 杨志甲, 白书战, 胡玉平, 等. 某船舶用柴油机配气机构仿真分析 [J]. 内燃机与动力装置, 2015, 32 (2): 45-51.
- [6] 崔向东. 双燃料发动机—新型液化天然气船主推进装置 [J]. 世界海运, 2008, 31 (2): 33-35.