

结构与可靠性

基于 GT-suite 的 0483 天然气发动机凸轮型线设计及配气性能模拟开发

钱中华, 唐 中

(重庆普什机械有限责任公司, 重庆 400050)

摘 要: 基于高次方多项式凸轮型线设计原理及方法, 采用 VT-design 模块对 0483 天然气发动机凸轮型线进行全新设计。在此凸轮型线的基础上, 对整个配气机构运动学、动力学进行模拟; 采用 GT-power 模块对整机性能进行一维模拟, 得出缸压及充气效率等参数。试验验证表明: 模拟结果和试验结果偏差较小; 模拟的可靠度较高, 且具有成本低、开发周期短、效果好等特点。

关键词: 天然气发动机; 凸轮型线; 配气机构; GT-suite; 模拟

中图分类号: TK423.4⁺1 文献标识码: A 文章编号: 1001-4357(2016)01-0035-05

The Design of Cam Profiles and Simulation Development of Valve Mechanism's Performance of 0483 Natural Gas Engine Based on GT-suite

Qian zhonghua, Tang zhong

(Chongqing PUSH Mechanism Co., Ltd., chongqing 400050)

Abstract: On the basis of design principle and theory of higher-order polynomial cam profiles, the cam profiles of 0483 natural gas engine were newly designed with the VT-design module. The simulation of kinematics and dynamics of valve mechanism were based on the new design. The cylinder pressure and volumetric efficiency were figured out by the unidimensional simulation of the overall performance based on the GT-power module. It shows that there is little difference between the simulation results and the test results, and the simulation boasts relatively high reliability, low cost, short development period, and good effect.

Key words: natural gas engine; cam profiles; valve mechanism; GT-suite; simulation

0 引 言

随着能源危机的加剧, 传统燃油型燃料日趋减少; 而污染物排放及气候问题却越发严重。故以清洁能源为燃料的发动机已成为内燃机行业发展的一个重要方向。对于天然气发动机而言, 其热值较高、抗爆性及排放较好, 因而在新能源动力开发方面有着巨大的潜力。目前, 国内较多的燃油发动机厂家都有新能源气体机以及双燃料发动机的研发。本文结合公司柴油机改为天然气发动机的相关研发项目, 对柴油机改为天然气发动机的凸轮型线设

计、配气机构模拟进行探讨。

配气机构凸轮型线以及整个机构的运动性能对发动机充气效果有着决定性的作用; 同时, 该机构对发动机的机械噪声以及零部件的磨损有着直接的影响, 故配气机构的设计在发动机研发过程中有着极其重要的作用。

1 凸轮型线设计及配气机构运动学、动力学模拟评估

1.1 凸轮型线设计

凸轮型线设计的主要内容是得出控制凸轮廓形

收稿日期: 2015-03-30; 修回日期: 2015-06-30

作者简介: 钱中华(1976-), 男, 工程师, 主要研究方向为柴油机设计生产, E-mail: qianzh2008@163.com。

的曲线方程,由此得到对应的挺柱、气阀升程曲线。凸轮升程函数由两部分组成,一部分为缓冲段,另一部分为工作段。为保证缓冲段与工作段能够很好地平滑过渡,本文凸轮型线的设计采用高次五项式函数,缓冲段与工作段都使用同一函数进行控制,函数具体参数值由软件进行自动控制。

对配气机构而言,其运动规律主要受控于凸轮,配气机构的设计应满足:配气相位合理;单点预混合气体机无回火;充气、扫气性能良好;整个机构工作平稳;振动和噪声小;润滑良好;气阀与活塞无撞击;凸轮与挺柱的接触应力小等要求。

本文使用 GT-suite 软件中专门进行配气机构设计和运动分析的 VT-design 模块对配气机构进行设计与分析。原型柴油机配气机构的型式为中置式配气机构,包括凸轮、挺柱、挺杆、摇臂、气阀、气阀弹簧等零部件。将原有柴油机改为燃气机时需要配气相位和充气效率进行重新匹配。对增压柴油机而言,为使扫气充分,一般具有较大的气门重叠角,但对单点预混合天然气发动机而言,在上止点前过大的进气提前角可能会导致燃气机回火,而过晚关闭排气阀会使新鲜燃料不燃烧就排入排气道,加大燃气消耗率,故单点预混合天然气发动机的气门重叠角应较小。减小气门重叠角会导致扫气不充分,同时不能很好地利用进、排气气流惯性,故充气效率也会受到影响。在满足机械、动力学性能的同时,为尽量减小对充气效率的影响,可将气阀的丰满系数提高。在天然气发动机凸轮型线设计时,为保证配气机构其余部件的安全性,可参考原柴油机凸轮型线的最大升程、速度、加速度、减速度、急加速度等限值,以便沿用柴油机配气机构除凸轮以外的从动件。在设计好新的凸轮型线后,对整个机构的运动学、动力学进行模拟,得出各部件的安全性。经计算和试验:实际进气气阀间隙为 0.4 mm、排气气阀间隙为 0.5 mm 时,整个机构的振动、噪声较小,运行平稳。缓冲段、工作段曲线参数选取如表 1 所示。

表 1 缓冲段、工作段曲线主要控制参数

	进气凸轮	排气凸轮
缓冲段开启角度/(°)	21.5	21.5
缓冲段关闭角度/(°)	129.5	146
缓冲段高度/mm	0.4	0.5
缓冲段与工作段总包角/(°)	150	168
最大升程/mm	12.77	13.76

工作段其余参数参考原柴油机的凸轮型线边界条件限值(最大速度、加速度、急加速度等),将

高次方函数的相应边界条件约束值输入 VT-design 模块,选用 16 分区型控制凸轮型线设计的模块进行设计。在缩短工作段包角的同时为加大时面值,需在约束限值大体不变的情况下对曲线进行收窄等调整,进、排气凸轮 16 分区边界参考限值如图 1、图 2 所示。

升程/mm	速度/(mm·(°) ⁻¹)	加速度/(mm·(°) ⁻²)	急加速度/(mm·(°) ⁻³)
		0.00192359	
	0.0250348		
		0.0302696	
			0.0
		-0.0148867	-2.75426E-4
12.77		-0.0164907	
		-0.0154858	3.47822E-4
			0.0
		0.0307931	
	-0.0227476		
		0.00190033	

图 1 进气凸轮型线边界参考限值

升程/mm	速度/(mm·(°) ⁻¹)	加速度/(mm·(°) ⁻²)	急加速度/(mm·(°) ⁻³)
		0.00245959	
	0.0290756		
		0.0217668	
			0.0
		-0.017465	-3.5112E-4
13.76		-0.0180673	
		-0.016437	4.72312E-4
			0.0
		0.0205114	
	-0.0293374		
		0.00246696	

图 2 排气凸轮型线边界参考限值

调整后合适的进、排气凸轮高次方函数曲线如图 3、图 4 所示。

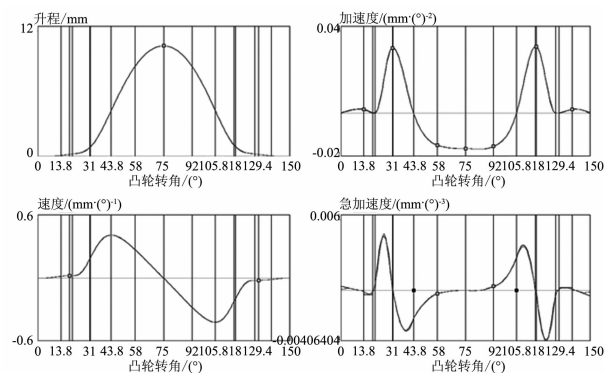


图 3 进气凸轮升程、速度、加速度、急加速度曲线

1.2 配气机构运动学、动力学模拟及评估

将配气机构其余部件的几何及性能参数输入到动力学和运动学分析模块,得到该凸轮型线下配气机构的运动学以及动力学仿真结果,并对较为关键的参数,如气阀接触力、弹簧剪切应力、活塞-气阀运动图、以及流通时面值等进行评估。

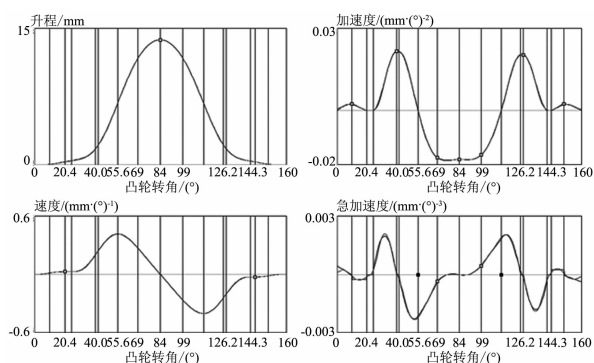


图4 排气凸轮升程、速度、加速度、急加速度曲线

图5、图8为进、排气凸轮、挺柱、气阀升程曲线；图6、图9为额定工况时进、排气阀杆底部接触力，显示始终为正值，故不会出现飞脱与反跳；图7为进气阀气门间隙与丰满系数，可见气门间隙0.4 mm时丰满系数为0.57，时面值较大；图10显示排气凸轮丰满系数为0.505，较为适中；图11、图12表明进、排气凸轮与滚轮的润滑油膜厚度较为适中，润滑条件良好。

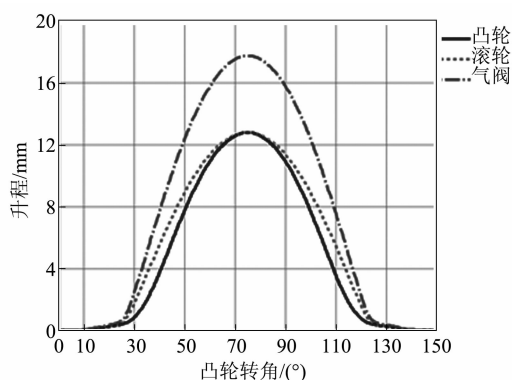


图5 进气凸轮、挺柱、气阀升程曲线

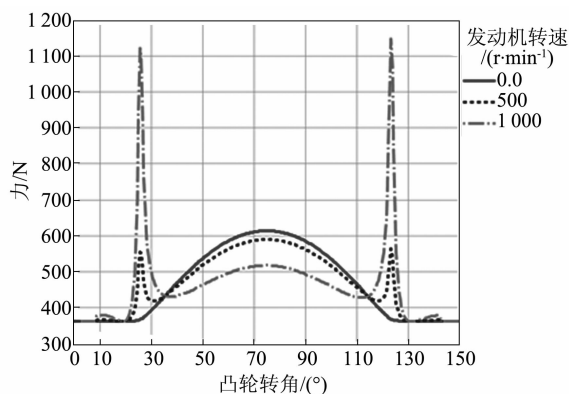


图6 进气阀杆底部接触力

其余主要参数如表2所示。

由于进、排气弹簧材料许用应力为1 200 MPa，从表2可知，进、排气弹簧安全系数为1.7，满足使用要求；活塞与气阀的运动最小间隙超过8.5

mm，故不会出现气阀与活塞撞击的情况；进、排气最小曲率半径超过21 mm，表明凸轮加工容易。

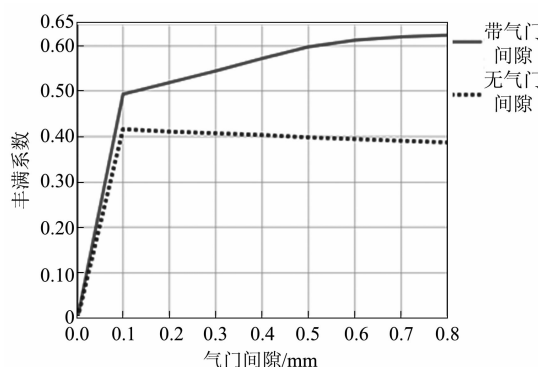


图7 进气阀气门间隙与丰满系数

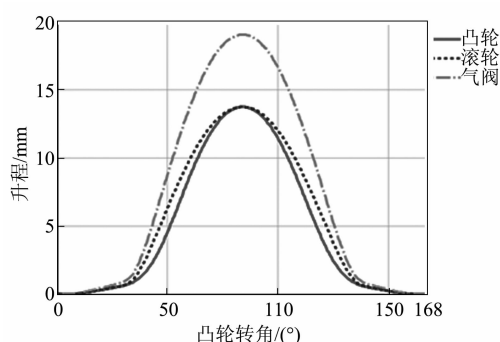


图8 排气凸轮、挺柱、气阀升程曲线

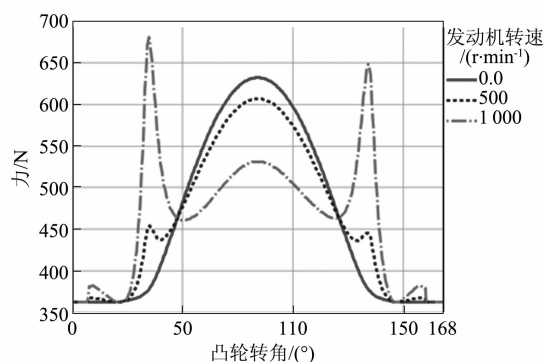


图9 排气阀杆底部接触应力

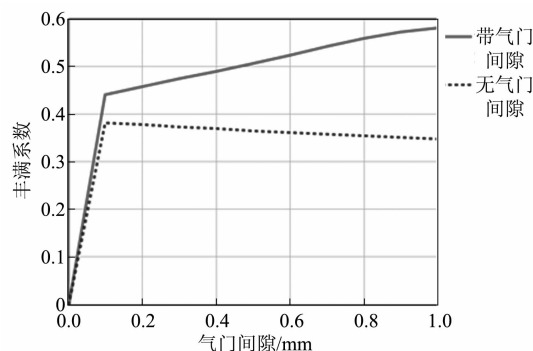


图10 排气阀气门间隙与丰满系数

该配气机构除凸轮为全新设计外,其余零部件都借用原型柴油机的相应零部件;同时,新设计的凸轮型线相应参数限值基本都在原柴油机参数限值范围内。从原型柴油机的实际运行结果及配气机构实际测试值可知,整个配气机构疲劳耐久性好,使用寿命长达 20 年,各零部件受力均匀、润滑条件良好,噪声小,故新设计的配气机构相应模拟评估值安全可靠。

表 2 配气机构运动学、动力学模拟值

进气阀弹簧最大剪应力/MPa	632
排气阀弹簧最大剪应力/MPa	665
进气阀与活塞最小间隙/mm	8.59
排气阀与活塞最小间隙/mm	9.46
进气凸轮最小曲率半径/mm	22.15
排气凸轮最小曲率半径/mm	21.74
进气阀时面值	0.421 2
排气阀时面值	0.386 3

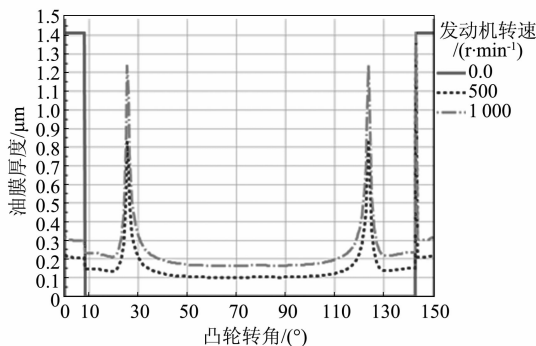


图 11 进气凸轮与滚轮润滑油膜厚度

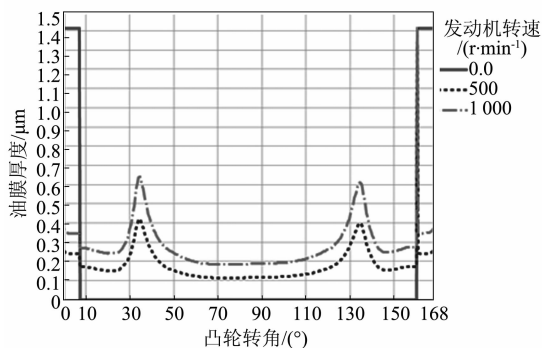


图 12 排气凸轮与滚轮润滑油膜厚度

2 配气机构流动性能评估

2.1 一维仿真模型建立

0483 中速天然气发动机模型主要结构参数如表 3 所示。

对节气门流量系数进行试验测试,得到不同开度时对应的流量系数。怠速工况时,节气门开度较

小,流量系数较小;额定工况时,节气门开度较大,流量系数较大。进、排气道处的流量系数由试验吹缸获取。发动机的机械损失参考柴油机实测参数。由于进、排气歧管的形状比较复杂,其结构尺寸参数是影响模拟结果的因素之一。使用三维造型软件建立歧管内腔的三维模型,然后将生成的 STL 文件导入 GT-power 附带的离散化工具 GEM3D 中进行离散,在 GEM3D 中直接创建 Gtm 格式的模拟模型;其余形状相对简单的流道则通过参考相关图纸并利用软件提供的模板直接构建。本文采用的燃烧模型为 SIwebe 双区燃烧模型,缸内传热使用 Woschni 传热模型。

表 3 483 中速天然气发动机主要参数

燃气机型式	直列 6 缸、单点预混合
吸气方式	增压中冷
缸径 × 冲程/mm × mm	160 × 240
连杆长度/mm	480
压缩比	11
点火顺序	1-2-4-6-5-3
升程曲线	数值输入
额定功率/kW	360
单缸排量/L	4.83

减小气门重叠角之后的配气相位设计如表 4 所示。

表 4 燃气机配气相位

进气阀开 (IVO) /°CA	上止点前 2
进气阀关 (IVC) /°CA	下止点后 32
排气阀开 (EVO) /°CA	下止点前 49
排气阀关 (EVC) /°CA	上止点后 20
气阀重叠角/°CA	22

其余关键部位参数为试验值输入,最终建立的 0483 中速天然气发动机 GT-power 模型如图 13 所示。

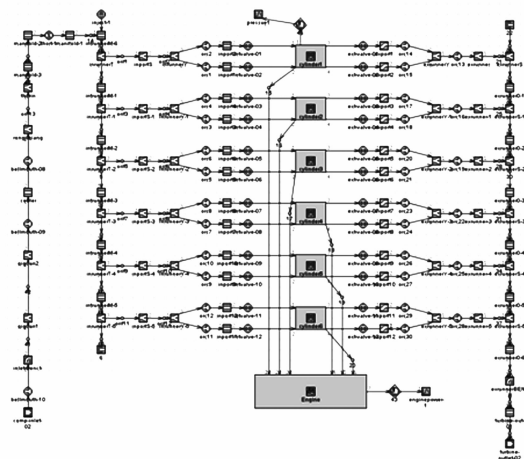


图 13 发动机一维 GT-power 仿真模型

2.2 仿真结果与试验值校对评估

模拟得到该凸轮型线、配气相位下的发动机缸压、充气效率等参数，通过样机设计、制造、装配后进行试验。模拟值与试验值对比如图 14、图 15 所示。

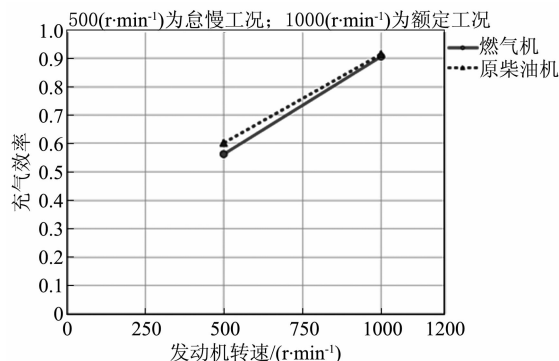


图 14 原柴油机与燃气机充气效率对比

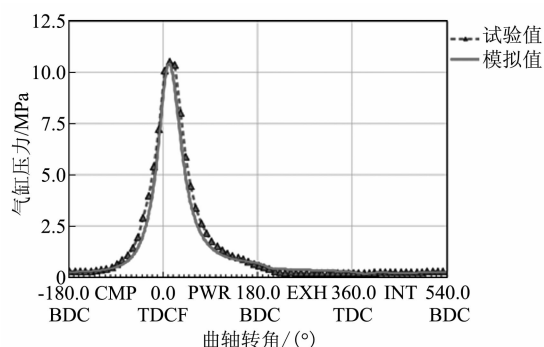


图 15 实测缸压对比

其余主要参数对比结果如表 5 所示。

表 5 0483 天然气发动机主要参数对比

参数	模拟值	试验值
有效效率/%	37.5	37.2
额定输出功率/kW	358	360
残余废气系数/%	2.4	3
总管排气温度/℃	560	580
充气效率	0.905	0.902

试验得出的缸内残余废气系数约为 3%，表明该配气相位扫气性能较好；充气效率较原柴油机下降值小于 1%，充气性能影响较小；总管排气温度较低、燃烧充分；整机效率较国内其它类似机型具有领先优势。GT-suite 模拟结果与试验值偏差在 2% 以内，故 GT 模拟开发的结果安全可靠。

3 结 论

使用 GT-suite 软件模拟开发设计发动机，具有成本低、开发周期短、开发效果好等特点。设计出的配气机构具有充气效率高；运行平稳（无飞脱、撞击、运动干涉）；疲劳耐久性好；振动噪声小；凸轮加工容易；润滑条件良好等优势。在凸轮型线设计中，缓冲段、工作段使用同一条高次方曲线控制，使得凸轮型线各段连接处连续性好。为提高充气效率，在设计过程中将负加速度区角度范围进行了加大，这会使整个机构的运动稳定性受到一定的影响，通过运动学、动力学分析，其稳定性受影响较小，各部件安全系数仍在可靠范围内。

参考文献

- [1] 陈家瑞. 汽车构造 [M]. 北京：机械工业出版社，2009.
- [2] 杨连生. 内燃机设计 [M]. 北京：中国农业机械工业出版社，1981.
- [3] 王建昕，帅石金. 汽车发动机原理 [M]. 北京：清华大学出版社，2011.
- [4] 尚汉冀. 配气凸轮机构设计与计算 [M]. 上海：复旦大学出版社，1988.
- [5] 夏金良. 471QL 发动机配气机构设计研究 [D]. 哈尔滨：哈尔滨工程大学，2006.
- [6] 拓海东，骆富贵，周华，等. 某款发动机的性能分析及优化 [C]. IDAJ-China 中国用户论文集，2013.
- [7] 朱伟飞，李明海. 基于 GT-POWER 的柴油机配气定时的优化设计 [C]. 第三届中国 CAE 工程分析技术年会论文集，2010.
- [8] 王莹臻，张小矛，陈明. 应用 GT-Power 进行气阀重叠角对汽油机怠速稳定性影响研究 [R]. 上海汽车乘用车技术中心.
- [9] 温国伟. 接触应力及润滑油膜对凸轮磨损影响的研究 [D]. 太原：中北大学，2014.
- [10] 汪学明. “S”型凸轮轴磨床磨削特性的分析 [J]. 机床，1992 (1).
- [11] David J W. Optimal design of high-speed valve train system [C]. SAE942502, 1994.
- [12] Lee, Jongmin. Dynamic modeling and experimental verification of valve train including lubrication and friction [D]. The university of Michigan, PHD, 1993.