

基于 GT-SUITE 的凸轮型线设计及配气机构运动学和动力学分析

The project of the design cam profile, kinematic and dynamics analysis of valve train by GT-SUITE

贺翀 拓海东 周华 骆富贵

(海马汽车有限公司)

摘要: 本文对发动机凸轮型线及配气机构的作用、类型做了简单的说明。对运用 VT-Design 软件设计凸轮型线的流程做了详细的介绍,并用此软件设计了某发动机的排气凸轮型线。运用 VT-Design 和 GT-VTrain 软件分别搭建了该发动机配气机构的单缸运动学模型和完整的运动学模型,并对计算结果做了评价。最后把设计好的型线输入到发动机性能仿真模型中,对发动机性能进行了校核。

关键词: VT-Design、GT-VTrain、凸轮型线、配气机构、运动学分析、动力学分析

Abstract: This paper describes the effect and type of engine cam and valve train. It detailed description of process that use the VT-Design software to design cam profile. And was designed a certain engine exhaust cam profile use VT-Design software. Respectively, using VT-Design and GT-VTrain software to build a single-cylinder kinematic model and the complete kinematics model, and appraised to the results. Finally, the designed type line input to the engine performance simulation model of the engine performance was checked.

Keywords: VT-Design, GT-VTrain, cam profile, valve train, kinematic analysis, quasi dynamic analysis

1 概述

发动机的换气过程对发动机的性能有着直接的影响,良好的配气机构不仅要求气门的开启有尽可能大的时面值,保证内燃机气缸具有良好的换气质量;还要具有良好的动力性能,保证内燃机工作平稳可靠并使噪声减至最低程度;此外还需要具有小磨损,寿命长,布置紧凑,结构简单的特点。其中凸轮轴是配气机构中最重要的组成部分。本文利用 VT-Design 软件设计了某发动机的排气凸轮型线,并进行了单缸运动学校核。在配气机构设计过程中,提高发动机的进排气性能和改善配气机构动力学特性是主要的矛盾。本文利用 GT-VTrain 软件搭建完整的配气机构动力学模型,计算分析并对其动力学特性进行了评价。最后对新型线下发动机的性能进行了分析。

2 凸轮型线设计

凸轮的外形设计在配气机构的设计中极为重要,这是由于气门开关的快慢、开度的大小、开启时间的长短均取决于配气凸轮的形状。因此必须合理的设计凸轮型线,合理的凸轮型线必须满足下面两个要求:一是要保证获得尽可能大的时间断面,即气门开启和关闭的快,以求在尽可能大的凸轮转角内气门接近全开位置;二是要保证配气机构各零件所受的冲击力和跳动尽可能的小,以求配气机构具有较好的可靠性、稳定性和耐久性。目前常用的凸轮可以分为三大类,由若干段简单几何曲线构成的几何凸轮、由函数曲线组成的函数凸轮、由理想气门升程曲线得出凸轮外形的多项动力凸轮。凸轮应包含工作段和缓冲段两部分。因为内燃机配气机构由很多零部件组成,这些零部件在内燃机工作时均会有不同程度的伸长,所以在整个配气机构的传动链中必须留有一定的间隙,以保证气门在任何情况下都能闭合。因此在设计凸轮型线的时候除了基本工作段以外,还必须要有的缓冲段,用以克服配气机构间的间隙和弹性变形。

2.1 凸轮型线设计流程

凸轮型线的设计一般分为两类，一类是全新设计，另一类是优化设计，其区别仅在于得到凸轮型线的途径不同，后续的运动学和动力学校核是一致的。设计流程如图 2.1 所示。本文凸轮型线设计属于参考设计，先在发动机一维仿真 GT-Power 模型中优化分析，得出一组满足发动机性能要求的凸轮型线数据，再用 VT-Design 软件拟合优化此型线，从而得出新的型线数据。

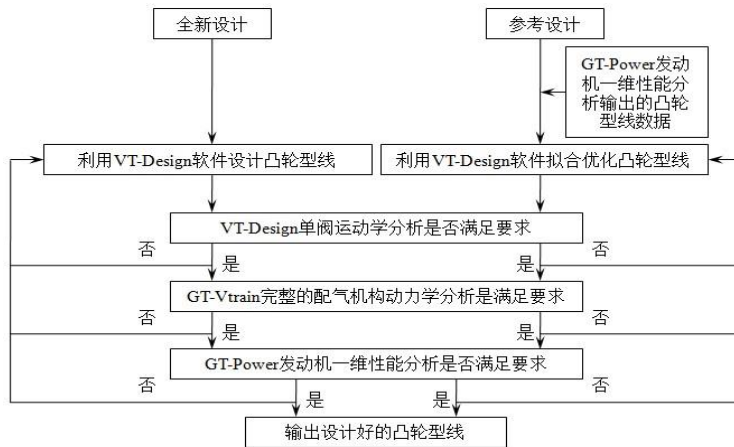


图 2.1 凸轮型线设计流程

2.2 VT-Design 凸轮型线设计

VT-Design 是 GT-SUIT 中凸轮型线设计模块，VT-Design 包含三个部分，一是凸轮型线设计 Cam Design，二是配气机构其他部件设计 Valvetrain Design，三是弹簧设计 Spring Design，所以 VT-Design 可以实现所有配气机构相关的部件设计。在进入 Cam Design 界面后有多种凸轮设计方法可供选择，全程凸轮型线、半程凸轮型线、线性加速度型线等，选择一种设计方法进入型线的边界输入窗口。VT-Design 也可以由设计者自己设定一种凸轮设计方法。进入 Cam Design 界面后可以看到凸轮型线的升程、速度、加速度、跃度以及更高阶导数的曲线。图中各个区域的角度和一些特征点的数据均可以调整，通过调整这些角度和特征点来得到满足要求的凸轮型线。如图 2.2 所示。

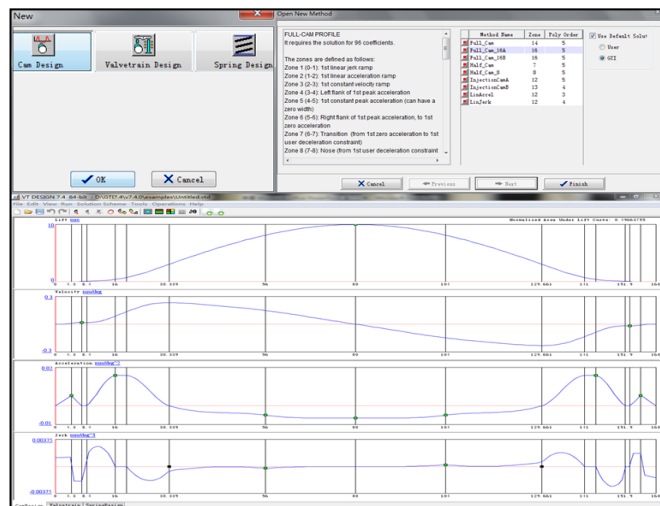


图 2.2 VT-Design 凸轮型线设计模型

本文采用 VT-Design 设定好的 16 个分区的全程凸轮设计方法 Full_Cam_16A，来设计该发动机排气凸轮型线，具体设计过程如下：

- 1) 在设计界面导入一维性能计算得出的型线数据；
- 2) 导入的数据质量较差，需通过拟合得到一条与导入型线最近似的型线；
- 3) 调整各分区边界角度和特征点数据，使整个型线曲线光滑、平顺、无突变；
- 4) 确认型线无误后输出凸轮型线。

在特征点数据调整中需要保证以下几个方面：缓冲段的高度和角度、最大升程、缓冲段末端速度、最大正加速度、最小负加速度，它们的值要适中。型线设计好之后，导出型线数据进行运动学和动力学的计算校核。设计过程如图 2.3 所示。

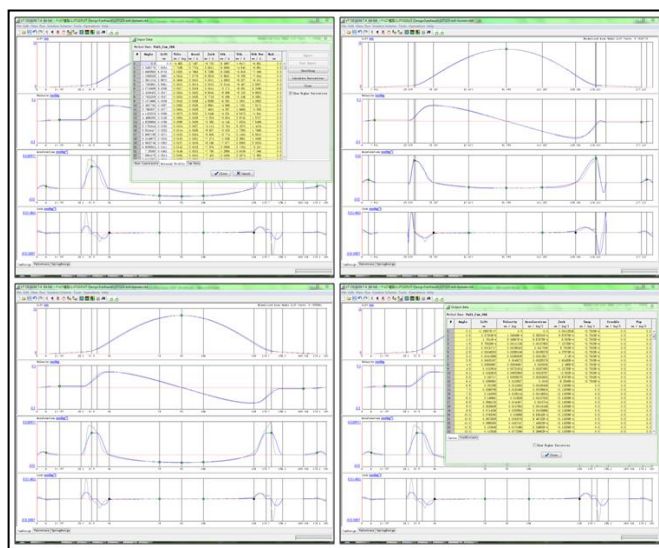


图 2.3 VT-Design 凸轮型线设计过程

3 配气机构校核

配气机构的任务是根据内燃机工作状况的需要，适时适度的开闭进排气气门，对气缸进行换气。通常由凸轮、摇臂、挺杆、气门、气门弹簧、配气相位调节机构等组成。目前广泛采用的是气门、凸轮式配气机构，它能较好的保证气缸的密封性。现代发动机配气机构主要有以下几个特征，顶置凸轮轴、多气门、可变配气正时及气门升程。

3.1 配气机构运动学分析

配气机构运动学计算主要涉及的是阀系的几何结构，根据已知的凸轮型线计算气门升程曲线。不考虑阀系各部件的弹性，只考虑各部件的质量和转动惯量。由于配气机构各缸各气门运动情况基本一致，所以运动学计算只需建立相对较为简单的单阀系模型即可。这里采用 VT-Design 里的 Valvetrain Design 部分来进行单阀运动学的分析。

3.1.1 模型搭建及计算

单阀系运动学分析只需在软件中输入相应的配气机构各部件的几何参数即可完成运动学的分析模型。单阀运动学模型建好之后，确认各参数无误即可运行计算，计算结束后在 GT-Post 后处理中打开结果文件，查看需要的计算结果，如图 3.1 所示。

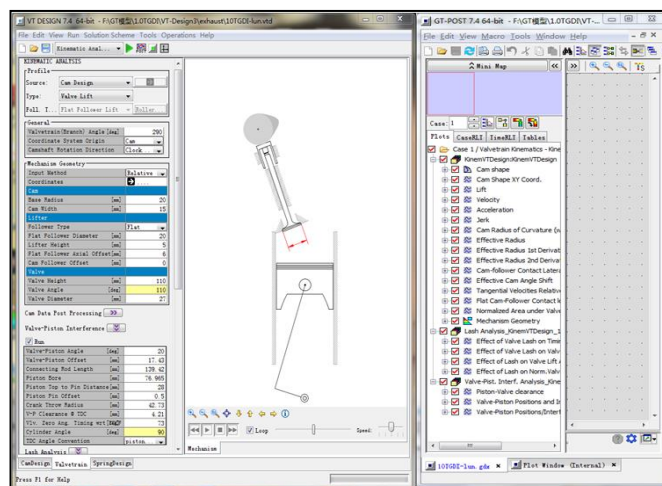


图 3.1 搭建好的配气机构运动学模型

3.1.2 单阀运动学评价指标

运动学模型计算完成之后，需要通过以下几个特征指标来评价阀系几何结构设计的是否合理。

1) 计算结果中的凸轮外形、升程曲线、速度曲线、加速度曲线和跃度曲线均要求连续平顺、光滑无突变，且速度、加速度、跃度的最大值不宜过大，如图 3.2、3.3 所示。

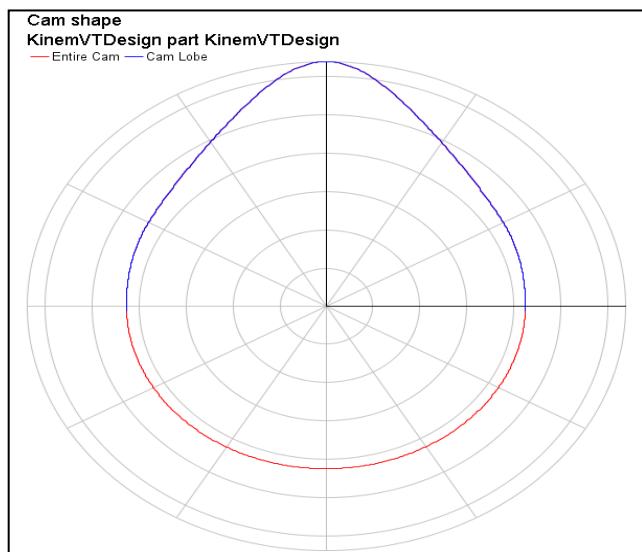


图 3.2 凸轮外形

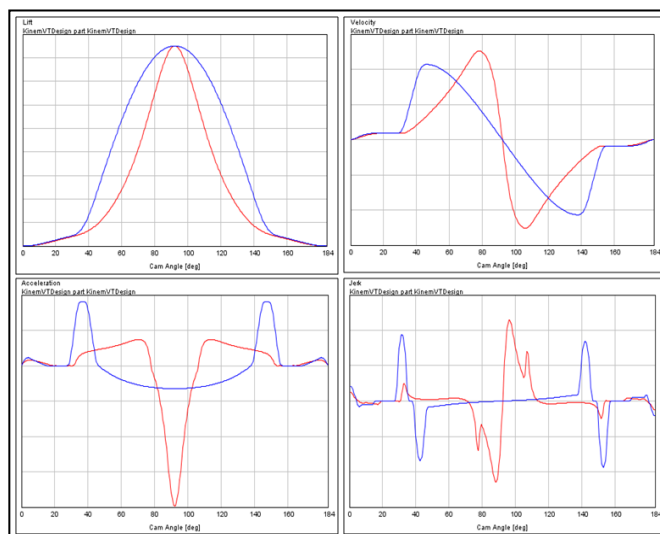


图 3.3 凸轮升程、速度、加速度、跃度

2) 曲率半径反应了凸轮加工的难易程度，也间接的反应了凸轮的润滑系数。曲率半径不能为负，且凸轮桃尖处润滑系数要适中，气门与活塞必须保证在配气机构的极限相位时留有一定的间隙，如图 3.4 所示。

3) K 系数是反应阀系共振趋势的一个参数。阀系固有频率越低，或凸轮型线正加速度宽度越窄，共振的可能性就越大。本例的凸轮型线正加速度宽度如图 3.4 所示，满足要求。

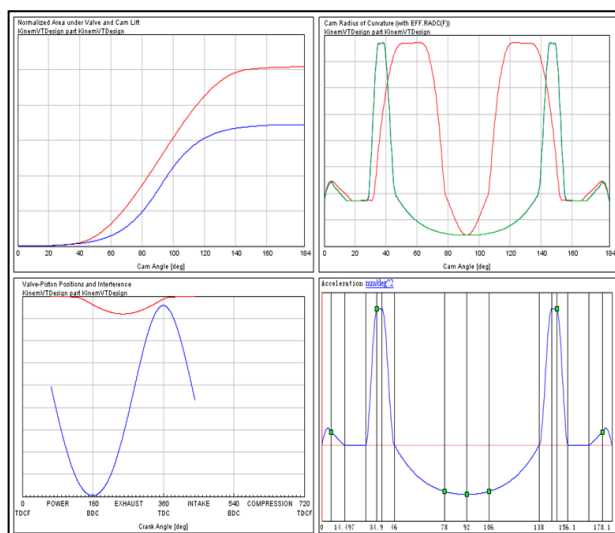


图 3.4 曲率半径、丰满系数等参数

3.2 配气机构动力学校核

配气机构动力学计算需考虑配气机构各部件的刚度，如气门、气门座、挺柱等的弹性变形，并考虑气门弹簧的振动、阻尼及摩擦系数的影响，所以动力学计算在一定程度上能更真实的反应实际的配气机构的运动状况。动力学模型需要输入的参数较多，许多参数较难确定如摩擦、阻尼等，所以动力学模型计算的准确性较差，需通过试验数据不断调整校核模型积累相关经验数据。

3.2.1 模型搭建及运算

配气机构动力学模型则需要用 GT-VTrain 搭建完整的配气机构模型。GT-VTrain 是 GT-SUIT 下的配气机构动力学分析模块，其包含了所有的配气机构元件，只需按实际的配气机构选择相应得模块并在在相应的模块中输入相关参数即可完成相应的模型。配气机构动力学模型运算需要从发动机的怠速转速开始一直算到发动机的最大转速。计算结果同样在后处理 GT-Post 中打开。搭建好的模型及计算结果如图 3.5 所示。

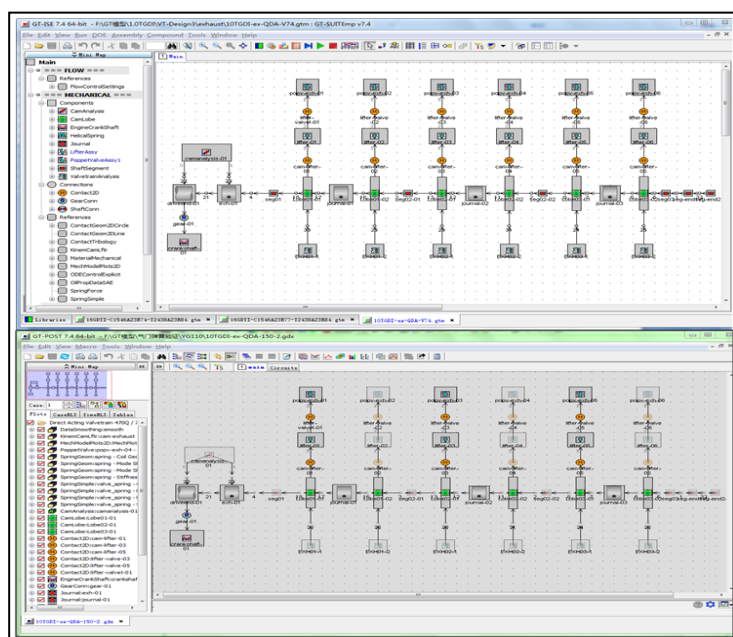


图 3.5 完整的配气机构动力学模型及计算结果

3.2.2 动力学模型计算原理

动力学计算原理是以多体动力学理论中的拉格朗日方程法为基础建立数学模型方程。对于机构中的刚体 i 采用质心在惯性参考系中的笛卡尔坐标和反应刚体方位的欧拉角或广义欧拉角作为广义坐标，即：

$$q_i = [x, y, z, \psi, \theta, \phi]_i^T \quad q_i = [q_1^T, q_2^T, \dots, q_n^T]^T$$

接着建立系统的约束方程和作用方程，应用拉格朗日乘子法建立系统的运动微分方程：

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}} \right)^T - \left(\frac{\partial T}{\partial q} \right)^T + \phi_q^T \rho + \theta_q^T u = Q$$

式中， T 为系统动能； q 为系统广义坐标阵列； Q 为广义力阵列； ρ 为对应于完整约束的拉氏乘子列阵； u 为对应于非完整约束的拉氏乘子列阵； $\phi(q, t) = 0$ 为完整约束方程； $\theta(q, \dot{q}, t) = 0$ 为非完整约束方程。将完整约束方程和非完整约束方程写成一般形式：

$$F(q, u, \dot{u}, \lambda, t) = 0 \quad G(u, \dot{q})u - \dot{q} = 0 \quad \phi(q, t) = 0$$

式中， $\dot{u}$ 为广义速度阵列； λ 为约束反力及作用力矩阵； F 为系统动力学微分方程； G 为用户定义微分方程； ϕ 为描述约束的代数方程阵列。一维动力学计算是将各零部件等效成集中质量 M 、弹簧 K 和阻尼 C 系统组成动力学方程求解，则可得到系统中物体上任意点在系统运动过程中的受力、运动位移及速度等数据。

3.2.3 配气机构动力学评价标准

动力学模型计算完成之后，需要关注以下几个特征指标来评价配气机构设计的是否合理。这些特征指标需在各转速下均满足要求。

1) 气门运动特性：气门升程曲线需保证连续、平滑，速度曲线和加速度曲线在高速部分的波动尽可能小，气门落座后没有反跳，如图 3.6 所示。

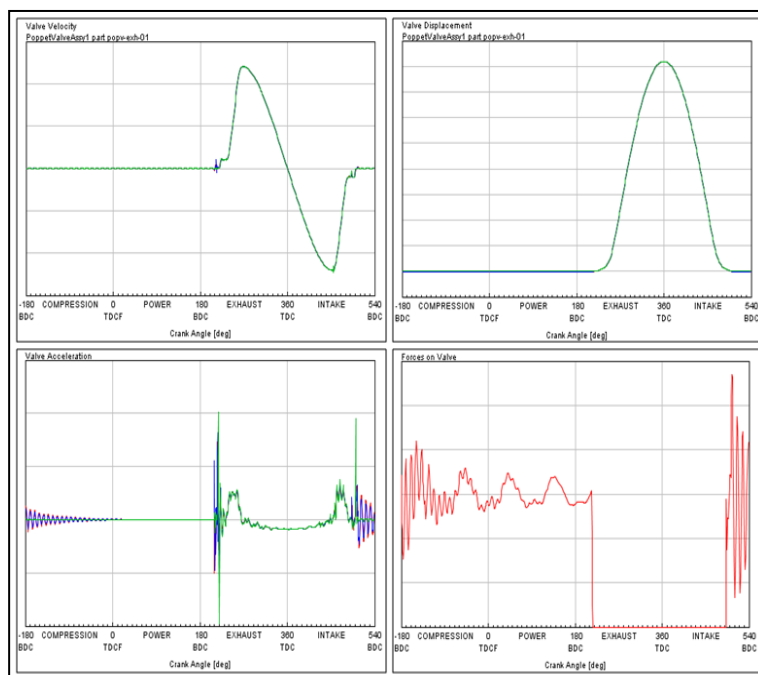


图 3.6 7000rpm 时气门升程、速度、加速度及气门落座情况

2) 凸轮与挺柱接触应力：凸轮与挺柱是配气机构中最主要的摩擦副，凸轮与挺柱的接触应力不能超过二者材料的许用应力。较大的接触应力会带来较大的摩擦，导致凸轮与挺柱急剧磨损，寿命减短，发动机

摩擦功增大。当凸轮与从动件材料相同时最大接触应力为：
$$\sigma_{\max} = 0.418 \sqrt{\frac{F_N \times E}{w} \left(\frac{1}{R_F} + \frac{1}{R} \right)}$$

其中 F_N 为接触法向力， E 为材料综合弹性模量， w 为凸轮与从动件接触宽度， R_F 为从动件半径， R 为凸轮型线曲率半径。本例凸轮与挺杆的接触应力如图 3.7 所示，满足要求。

3) 气门落座冲击力：气门与气门座的冲击力不宜过大，如气门与气门座的冲击力较大，会产生较大的噪音，甚至损坏气门及气门座圈。本例中气门落座时，气门与气门座的冲击力如图 3.7 所示，满足要求。

4) 气门弹簧裕度：气门的负加速度段运动的时候，由于气门所受到的惯性力方向与气门弹簧力方向相反，如果气门弹簧力不够大或气门减速度过大，会导致凸轮与从动件脱开。为防止飞脱现象产生，要求气门弹簧力留有一定的余量，即弹簧裕度。本例中的弹簧裕度如图 3.7 所示，满足要求。

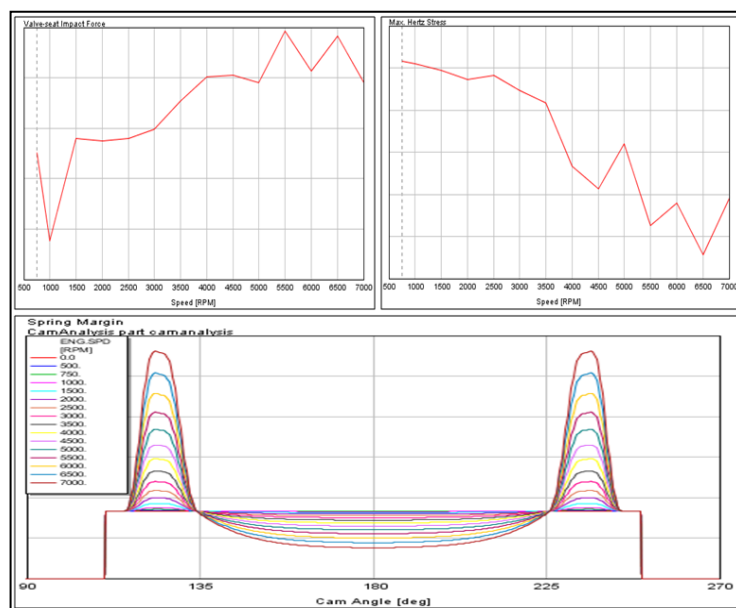
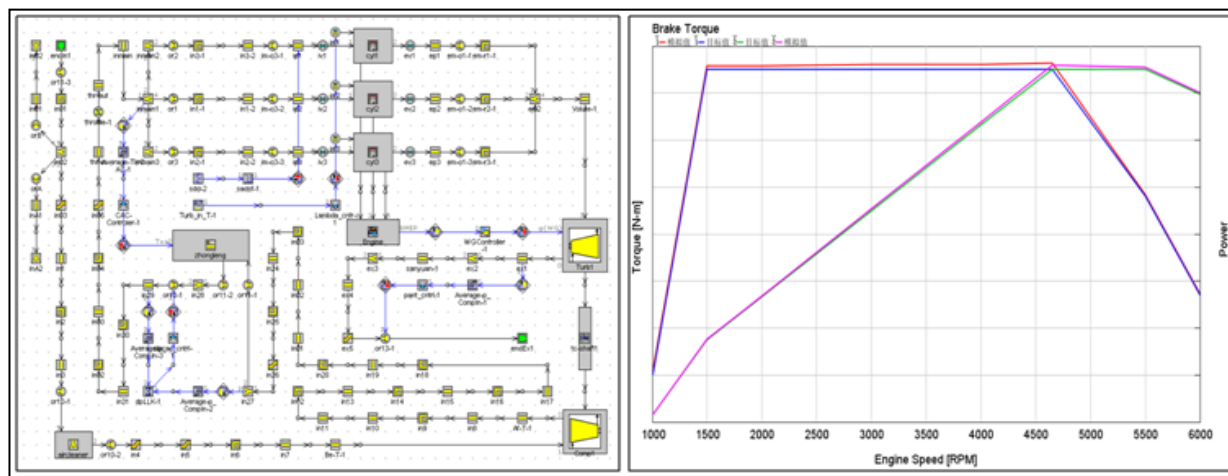


图 3.7 凸轮与挺柱接触应力、气门落座冲击力
和气门弹簧裕度

4 GT-Power 一维性能仿真校核

把经过校核，满足要求的凸轮型线输入一维性能仿真模型中，重新计算发动机性能，看其是否满足性能要求。计算结果和设计目标值基本一致，所以此型线满足要求，如图 4.1 所示。



比。但各特征点输入参数的数值范围需要设计人员积累一定的经验，各特征点的调整会对整体型线产生什么样的影响也需要积累大量的设计经验。

2) VT-Design 软件的 Valvetrain 模块可以对前面 CamDesign 模块设计好的型线或其他型线数据进行运动学校核，只需输入各配气机构的几何尺寸，运算即可得到运动学分析结果。且与 CamDesign 处于同一软件中，方便对照运动学结果调整凸轮型线。运动学分析结果包含了凸轮和气门的升程、速度、加速度、跃度、曲率半径、润滑系数、丰满度、气门与活塞最小间隙等主要运动学特征，能够较为全面的反应配气机构的运动学特性。

3) GT-VTrain 能提供一个环境，使设计者搭建模型、参数输入调整均较为简洁，且能很好的完成配气机构这类多体动力学问题。在参数输入中，各部件间的摩擦和润滑需要通过试验校核积累相关的经验。动力学分析中包含了不同转速下气门运动的升程、速度、加速度以及气门落座情况，气门与气门座的冲击力、凸轮与挺柱的接触应力与气门弹簧的裕度等主要配气机构运动学特性。

6 参考文献

- [1] 周龙保，刘巽俊，高宗英，内燃机学[M]，机械工业出版社，2005
- [2] 张翼，苏铁雄. 发动机设计讲义[M]
- [3] 赵海峰，孙黎明，基于 VT design 的凸轮型线设计. 2012 年 idaj 中国区用户年会，2012
- [4] 刘刚, 发动机配气机构及链传动系动力学分析及性能优化[D]，上海：上海交通大学，2009
- [5] GT-SUIT 帮助文档