

考虑齿轮系的凸轮轴强度及曲轴扭振计算

郑康¹, 朱明敏¹, 郭磊², 滕启寨², 安木金²(1. 宁波工程学院 机械工程学院, 浙江 宁波 315336;
2. 中国重汽集团杭州动力研发中心, 浙江 杭州 310007)

摘要:提出一种通过建立某型号发动机的整机三维多体动力学模型来计算凸轮轴受力的方法。基于分析软件自带的模块生成圆角子模型;利用子模型方法获得凸轮轴的全局模型及子模型单位载荷应力从而计算获得凸轮轴圆角安全系数;建立3种不同复杂程度的三维曲轴动力学模型;通过分析计算,观察采用不同模型计算扭振的准确性。研究结果证明:考虑齿轮系的计算方法会对扭振的计算产生一定的影响,并且齿轮系所产生的影响大于离合器。

关键词: 齿轮系;凸轮轴强度;曲轴疲劳;扭振;圆角子模型

中图分类号: TH132.47 **文献标志码:** B **文章编号:** 1671-5276(2023)04-0080-04

Simulation of Camshaft Strength and Crankshaft Torsion with Gear System

ZHENG Kang¹, ZHU Mingmin¹, GUO Lei², TENG Qizhai², AN Mujin²(1. College of Mechanical Engineering, Ningbo University of Technology, Ningbo 315336, China;
2. CNHTC Hangzhou Power R&D Center, Hangzhou 310007, China)

Abstract: This paper proposes a method to calculate the force on the camshaft by establishing a three-dimensional multi-body dynamic model of an engine. A corner sub model was generated based on the module of the analysis software, and the global model and the unit load stress of the sub model were obtained by using the sub model method to calculate the safety factor of the camshaft fillet. On the basis of the above research, three kinds of three-dimensional crankshaft dynamic models with different complexity were established, and through analysis and calculation, the accuracy of applying different models calculating torsional vibration was observed. The results show that considering the calculation method of gear train will have a certain influence on the calculation of torsional vibration, and the influence of gear train is greater than that of clutch.

Keywords: gear system; camshaft strength; camshaft fatigue; torsion; fillet sub model

0 引言

多体动力学计算已经在车用汽油发动机和柴油发动机开发设计中起到重要作用^[1]。一维的动力学计算能快速地对比出整机各部分因素对轴系扭振和受力的影响^[2],这种计算使得在初期多种方案被筛选的情况下极大地缩短所需时间,进而缩短总体的研发耗时^[3-4]。尽管如此,如果研究人员需要准确而快速地获得曲轴或凸轮轴的受力,还需要对发动机整机进行三维的弹性体动力学计算。在传统的计算中,出于简化模型或者减少计算量的需求出发,曲轴扭振只考虑曲轴自身的情况^[5-6],前后轮系带来的影响常常做忽略处理。同样地,对凸轮轴的分析往往只考虑一维的受力情况^[7]。本文将结合实际案例,建立弹性体动力学模型,并考虑前后端齿轮系对曲轴扭振及凸轮轴受力的分析。

1 考虑前端齿轮系的凸轮轴动力学计算

柴油发动机的正时轮系往往分布于发动机的同一侧,

主要部件包含曲轴轮、凸轮轴齿轮、供油泵齿轮、方向机助力泵齿轮,附加部件有空调压缩机齿轮、机油泵齿轮等,发动机则一般由皮带传动,不在正时齿轮系中。图1是安放于试验台的某柴油机实物图,黑圈所示位置为曲轴外延前端皮带轮,其作用是驱动发动机工作。除此之外,与凸轮轴齿轮相连的齿轮有:供油泵中间齿轮、供油泵齿轮、凸轮轴齿轮、空调压缩机齿轮及液压泵齿轮,它们之间的位置关系如图2所示。

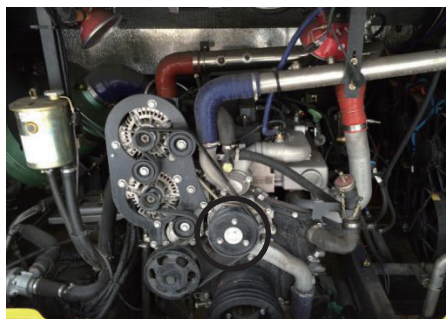


图1 正时齿轮式柴油发动机

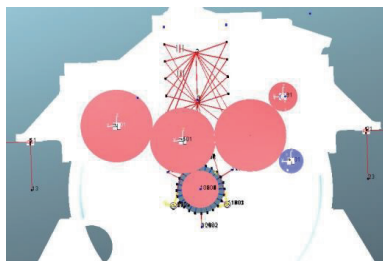


图2 齿轮系的位置关系

显然,涉及凸轮轴的各项计算的精度都受到这些轮系的影响,在计算模型的搭建过程中,如何处理这些轮系,使其在保证精度的条件下有利于计算的进行和程序的简化,是研究者对整个模型建立的实用性必须考虑的重要因素。

1.1 动力学模型搭建

凸轮轴的计算往往是利用 Timing Drive 来进行一维计算和校核的^[8]。然而,在特定的工况下,例如前端齿轮系负载过大时,凸轮轴的疲劳断裂问题可能发生。此时一维的计算无法精确计算其圆角应力以及安全系数,而应该考虑齿轮系的影响,本文提出在 Power Unit 中建立带有三维凸轮轴的整机模型并带上齿轮系相关的各个附件及其载荷,图3展示了此方法的程序和凸轮轴形状。

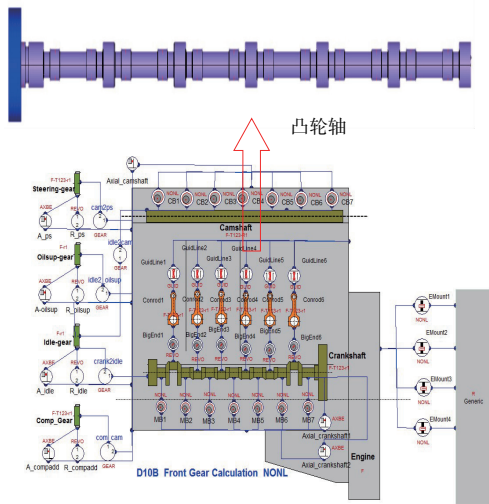


图3 带凸轮轴及前端齿轮系的整机模型

建立凸轮轴的六面体网格并进行缩减,其具体的方法是:保留主节点用于加载进排气门作用力、凸轮轴轴承支撑以及齿轮传动连接点,略去其他次要因素的结构。前端齿轮系的参数设置按照实际结构图样进行参数输入,建立 GEAR 连接副。

1.2 边界条件设定

边界条件除了必须的爆发压力外,还需要包括凸轮轴转矩、凸轮轴进排气受力、油泵转矩、空压机转矩及转向泵转矩。该部分转矩计算来源于 Timing Drive 的模型计算,并作了相应转换,即将曲轴转角转换为时间坐标,如图4所示(本刊黑白印刷,相关疑问咨询作者)。

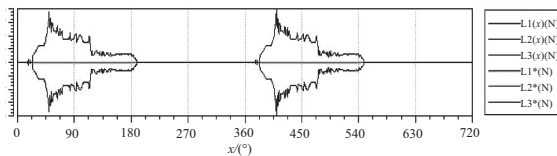


图4 凸轮轴排气门受力变化

表1展示了计算所涉及边界条件的总体参数,在这种设置原则下,对比疲劳分析基本载荷和线性静态分析的参数设置分别如表2、表3所示。

表1 边界条件总体参数

转速/(r/min)	爆发压力	弹性体	齿轮链接	其他外部载荷
2 000	设计值	缸体,曲轴,凸轮轴	GEAR	气门作用力,凸轮轴转矩,轮系转矩,皮带轮载荷

表2 疲劳分析基本载荷参数

项目	选项
总体分析	总体模型及子模型
通用方法	多扰动步
子模型外部分差	0.05

表3 线性静态分析参数

项目	选项
总体分析	仅总体模型
通用方法	负荷生成
疲劳软件	FEMFAT
间隔开始	0
间隔结束	3
结果区间增量	1

凸轮轴每个轴端所载荷具有重复特性,它们之间的主要区别在于周期性变化的相位差,故需在 load distribution 模块中进行相应的角度转换,并分别加载到各轴段的进排气受力主节点上。

1.3 凸轮轴圆角子模型建立与安全系数计算

由于已经知道经常断裂的轴段位置,故其他轴段的应力并不需要关注,因此本文忽略了其他轴段的应力计算。

类似于曲轴圆角子模型的计算,凸轮轴圆角也可以利用相同的方法进行。图5和图6展示的是凸轮轴的圆角子模型及其网格模型,框内的结构是本文的关注重点。

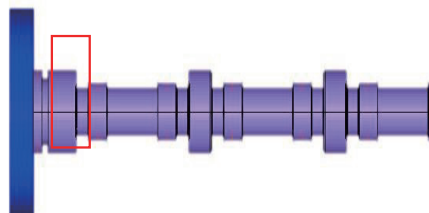


图5 凸轮轴圆角子模型

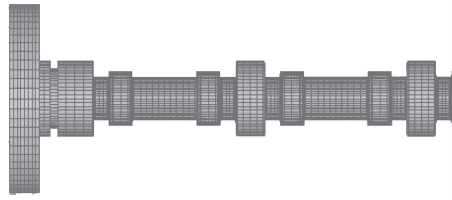


图6 凸轮轴圆角子模型网格模型

本文借鉴了曲轴圆角子模型的计算方法,通过建立凸轮轴圆角子模型,计算凸轮轴端全局模型和子模型的单位载荷应力,结合载荷历程在疲劳软件中进行圆角安全系数的计算。快速建立多个圆角的方案,网格单元质量好、密度高,且整个恢复过程时间短。其中圆角子模型既可以借用软件自带的 fillet modeler 模块建立,也可以手动划分。图7展示了凸轮轴圆角安全系数计算过程。

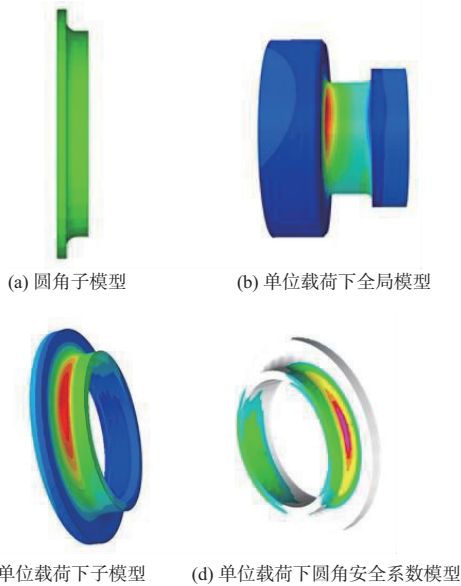


图7 凸轮轴圆角安全系数计算过程

本文分别计算了 R3 和 R5 两种圆角子模型,经过遍历全转速后发现在额定工况下凸轮轴受力最大,其应力分布云图如图8所示,其最大值分别为 387 MPa 和 360 MPa。此时该段凸轮轴圆角的安全系数云图如图9所示,其最小安全系数分别为 1.1 和 1.17,较为危险,需要重新设计以减小应力集中或改变圆角加工工艺使表面疲劳强度得到强化。

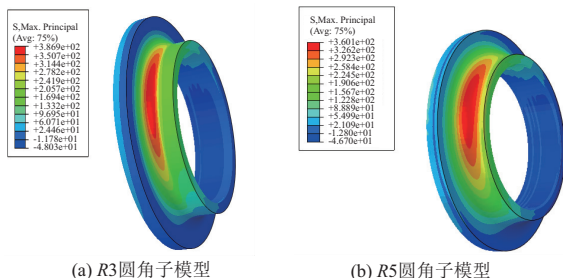


图8 凸轮轴圆角受力分布云图

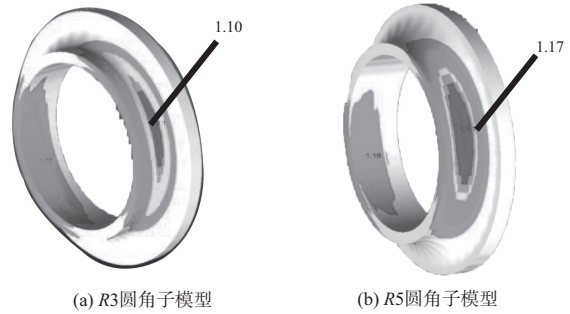


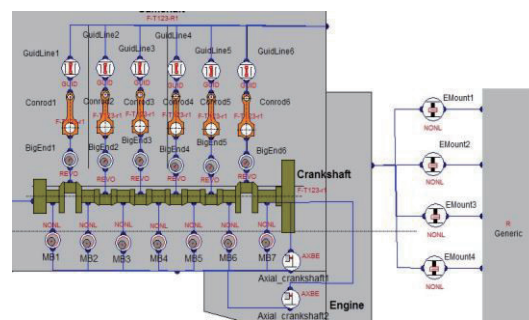
图9 凸轮轴圆角安全系数云图

2 考虑齿轮系的曲轴动力学计算

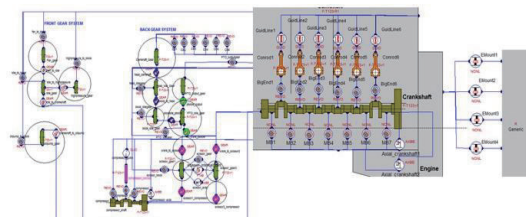
曲轴的扭振计算是 NVH 研究中不可或缺的组成部分之一^[9],在 NVH(即振动、噪声和行驶平顺性)研究中,振动是基础因素,而曲轴的振动则是整个机器中最重要的振动来源^[10]。另外,曲轴扭振计算也是保证发动机运行可靠性的重要计算环节。因此,曲轴扭振模型的建立就显得尤为重要了。

2.1 3种复杂程度的动力学模型搭建

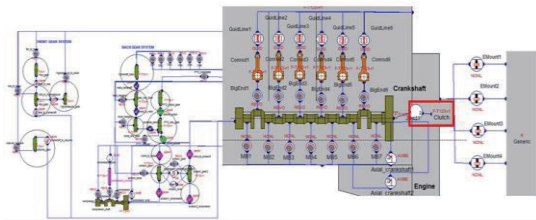
曲轴的扭振计算在概念阶段可以利用 Designer 快速地选型。而对于大型柴油机而言,气缸阻尼很难准确地设定,其导致 Designer 的扭振结果只能与其他案例的结果横向对比。本文利用 Power Unit 进行三维建模,同时为了确认模型的准确性,建立了以下3种模型(图10),即:不含齿轮系的模型(a)、包含齿轮系(包括凸轮轴及附件载荷)的模型(b)、包含齿轮系及离合器(包括凸轮轴及附件载荷)的模型(c),并进行对比,以确认各个影响因素对曲轴扭振计算准确性的影响。



(a) 不含齿轮系



(b) 包含齿轮系



(c) 包含齿轮系及离合器

图 10 3 种不同复杂程度的曲轴动力学模型

2.2 动力学模型扭振计算结果对比与分析

根据试验选择扭振的峰值转速进行计算并对比主阶次的扭振幅值,如图 11 所示。

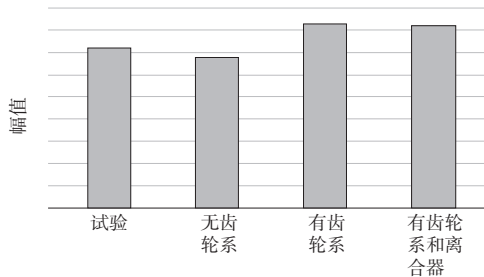


图 11 3 种动力学模型扭振结果与试验对比

由于试验时包含了转接盘、橡胶联接件以及台架,并且测试的是曲轴前端,故扭振幅值应比计算的略小(计算时扭振幅值取曲轴前端和飞轮端的最大相对变形)。从图 11 可知,包含齿轮系的曲轴扭振幅值比不包含齿轮系的大,比试验所得幅值也略大,更接近真实值。有、无离合器则对扭振影响不大(但不代表变速箱及后端轴系对扭振没有影响)。至此完成了模型标定和筛选,最终选择模型(b)作为后续方案计算的基础模型。

各方案的差异以及最终结果如表 4 所示,数值均在限值范围内。考虑到扭振和转速波动两个因素,最终选择相对较优的方案 3 扭振减振器。

表 4 各方案的扭振峰值对比

方案	转动惯量/(kgm ²)		阻尼/ (Nms · rad ⁻¹)	扭振总值/ (°)	主阶次 幅值/(°)
	轮毂	环			
1	0.13	0.20	100	0.43	0.16
2	0.11	0.21	100	0.43	0.17
3	0.08	0.15	120	0.49	0.14

3 结语

本文提出一种通过建立发动机整机三维多体动力学模型来计算凸轮轴受力的方法,并建立了 3 种不同复杂程度的三维曲轴动力学模型,观察了使用不同模型计算扭振的准确性。结果显示:考虑齿轮系的计算方法会对凸轮轴强度和曲轴扭振的计算产生一定的影响,在曲轴扭振计算中,齿轮系所产生的影响大于离合器。概括地讲,本文主要得到以下两个结论:

1) 通过 EXCITE 的动力学计算,可以快速计算发动机上轴类部件的圆角疲劳强度;

2) Designer 和 Power Unit 的配合使用既可快速筛选多种减振器方案,又可在没有试验数据的情况下通过建立较为复杂的模型从而获得比较准确的扭振幅值。

参考文献:

- [1] 刘佳鑫,顾灿松,袁兆成,等. 基于多体动力学方法的发动机曲轴系全局振动研究[J]. 车用发动机,2018(6):1-8.
- [2] MENDES A S, MEIRELLES P S, ZAMPIERI D E. Analysis of torsional vibration in internal combustion engines; modelling and experimental validation [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part K; Journal of Multi-Body Dynamics, 2008,222(2):155-178.
- [3] DESAVALA R, PATIL A. Theoretical and experimental analysis of torsional and bending effect on four cylinders engine crankshafts by using finite element approach [J]. International Journal of Engineering Research, 2013(2):379-385.
- [4] 岳东鹏,张峻霞. 发动机轴系三维振动的多体动力学分析[J]. 拖拉机与农用运输车,2007,34(6):29-30,33.
- [5] 吕大立,李海龙,景亚兵. 基于混合建模的发动机曲轴模态分析[J]. 车用发动机,2019(4):47-51.
- [6] 李德水,闫兵,华春蓉,等. 小型柴油机曲轴模态试验研究[J]. 车用发动机,2010(2):89-92.
- [7] 刘功文,郝志勇,张庆辉,等. 凸轮轴疲劳及瞬态动力学特性研究[J]. 汽车技术,2014(5):25-29.
- [8] 李民,陈焯龙,庞建武,等. 柴油机双顶置凸轮轴消除齿轮动力学特性研究[J]. 内燃机工程,2016,37(4):247-252.
- [9] 张良良,毕嵘,韦静思,等. 基于传递路径分析的动力总成 NVH 问题控制研究[J]. 现代车用动力,2020(4):6-10,53.
- [10] 马俊达,卢小锐,王晖. 基于整机噪声的发动机曲轴扭转减振器匹配[J]. 汽车工程师,2016(4):23-25,34.

收稿日期:2022-01-27