

智能柴油机的扭振优化控制方法研究

陈 鹏, 周 炎, 童宗鹏, 周文建, 姜小荧, 殷长春

(七一一研究所, 上海 200090)

摘 要: 针对传统扭振控制方法已不能满足现代柴油机技术发展的需求, 提出基于智能柴油机工作参数可调的扭振优化控制新方法。以某高压共轨中速机为对象, 研究柴油机工作参数, 如喷油定时和进气定时的改变与扭振应力间的关系, 并进行了扭振优化计算与验证, 取得了较好的扭振优化控制效果。

关键词: 智能柴油机; 扭振; 工作参数; 优化

中图分类号: TK427+.127 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2013)03-0044-04

The Study of the Optimization Control Method of Torsional Vibration of Intelligent Diesel Engine

Chen Peng, Zhou Yan, Tong Zongpeng, Zhou Wenjian, Jiang Xiaoying, Yin Changchun

(Shanghai Marine Diesel Engine Research Institute, Shanghai 200090)

Abstract: The traditional torsional vibration control methods can't meet the needs of modern diesel technology, therefore, the optimization control method of torsional vibration based on controllable parameters of the intelligent diesel engine was put forward. A high-pressure common rail medium-speed engine was chosen to study the relationship between the variation of diesel engine's operational parameters, such as injection timing and air intake timing, and torsional vibration stress. Moreover, torsional vibration optimization calculation and tests were carried out, and finally obtained good results in torsional vibration optimum control.

Keywords: intelligent diesel engine; torsional vibration; operational parameters; optimization

0 引 言

为保证柴油机轴系安全, 常采取的减振避振措施有: 调整自振频率; 设置转速禁区; 减小激振能量法^[1](通过调整发火间隔角等方法实现)。船舶柴油机最常用的扭振控制措施是在曲轴的自由端安装扭振减振器, 这会产生附加系统成本, 且扭振控制范围窄。随着船舶柴油机技术朝着高功率密度、智能化、低排放、低噪声和模块化等方向发展^[2], 柴油机曲轴的负荷大大增加, 同时对柴油机低噪声的要求逐渐提高, 传统的扭振控制方法已难以满足现代柴油机技术的要求。传统方法基本上是从扭振

传播途径方向考虑的; 另一个方向是调整柴油机激励源对扭振进行控制^[3], 如 RT-flex 系列柴油机的低扭转振动调谐控制^[4]。理论上, 改变各谐次激励力矩, 可以改变输入系统的激振能量^[1], 在同一工况下, 对柴油机工作参数进行调整, 缸内气体压力曲线将发生变化, 若通过调整使得输入轴系能量的主要谐次的激励力最小, 则能减小输入轴系的扭振能量, 从而达到对扭振的控制目的。

智能柴油机能实现对燃油喷射参数和配气参数的柔性控制, 为扭振优化提供了条件, 这是传统的机械控制式柴油机无法企及的。因此, 针对现代船用柴油机技术的发展, 本文提出新的扭振控制手

段，即通过电控系统调整柴油机工作参数进行轴系扭振优化控制。扭振优化控制措施不会对柴油机结构有任何改变，而且能针对不同工况改善扭振情况，具有更宽广的控制范围，甚至可以不用附加扭振减振结构，节约资源成本。

1 扭转振动优化计算建模及验证

通过 GT-power 建立柴油机单缸工作模型，用于仿真计算不同运行参数下的示功图，通过简谐分析提取气体激励力数据；在扭转振动数学解析法计算理论上，运用 MATLAB 编写扭振计算程序（包括激励力简谐分析程序，自由振动计算程序和强迫振动计算程序）。最后，将这两者结合在一起形成扭转振动的优化计算模型。

1.1 柴油机单缸工作模型

以某电控柴油机轴系为研究对象，其形式为直列六缸、四冲程、涡轮增压、中冷，配气形式为四气门，缸径 210 mm，行程 320 mm，喷油系统为高压共轨，额定功率 1 320 kW，额定转速 1 000 (r·min⁻¹)，压缩比 16.8。

对该柴油机的单个气缸进行独立分析，热力系统模拟为子系统所组成的物理模型，包括：进排气子系统、气缸子系统、进排气管子系统和燃油喷射子系统，以及相应的边界条件设置；模型中气缸传热模型采用 Woschni 模型^[5]；平均机械压力损失采用试验数据；燃烧模型采用三元韦伯燃烧模型^[6]；以柴油机燃烧过程的研究为依据，进、排气门流量系数及进气门涡流强度通过气道稳流试验获得。运用 GT-power 搭建单缸工作模型如图 1 所示。

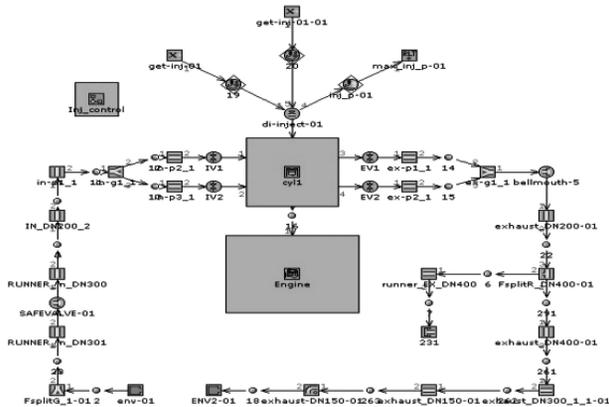


图 1 单缸工作模型

以额定转速的 25% 负荷计算，缸内压力的试验数据与计算结果的对比见图 2，可见计算值与试验数据基本吻合，表明用该模型进行模拟计算的结果是可信。

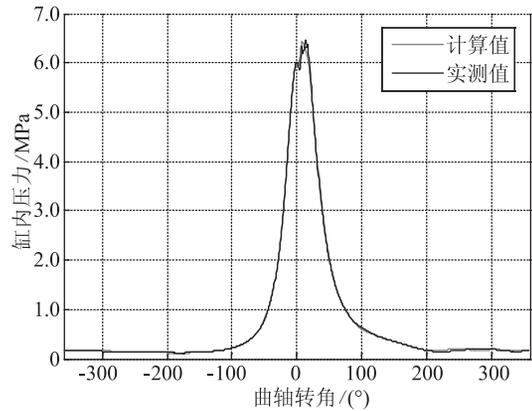


图 2 柴油机缸内压力曲线对比

1.2 轴系质量弹性系统模型及验证

柴油机轴系由电控柴油机—联轴器—水力测功器组成，经简化后的质量弹性系统见图 3。

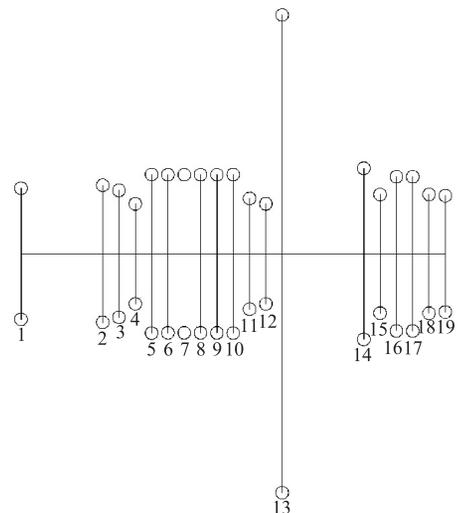


图 3 轴系质量弹性系统图

通过 MATLAB 扭振计算程序，计算得到前四阶模态的固有频率见表 1。

表 1 自由振动计算结果

单位：Hz (min⁻¹)

F1	F2	F3	F4
13.34 (800.4)	52.51 (3 150.6)	81.45 (4 886.7)	182.65 (10 958.8)

测试转速范围为 400 ~ 1 140 (r·min⁻¹)，约每隔 20 (r·min⁻¹) 记录一点。转速传感器 TV102 测点安装在柴油机的自由端。采用 DP104 扭振测量分析系统，测量分析系统经英国南方仪器公司的 AE-11 型校验台校验。测试信号经 DP104 扭振测试分析系统分析，并作频响修正后转换成扭角，给出 3.0、3.5、4.5 和 6.0 谐次的扭振振幅曲线，见图 4 所示。

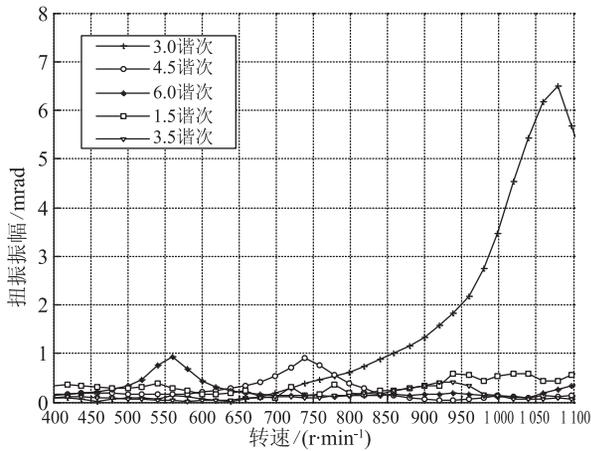


图 4 扭振测试的曲轴自由端扭振振幅

表 2 为计算共振频率与实测共振频率的比较, 最大误差为 4.18%, 表明轴系简化模型是可信的。

表 2 共振转速对比表

谱次	实测共振转速/ (r·min ⁻¹)	实测振动频率/ (r·min ⁻¹)	平均振动频率/ (min ⁻¹)	计算振动频率/ (min ⁻¹)	相对误差
3.0	1 080	3 240	3 287.5	3 150.6	4.18%
3.5	920	3 320			
4.5	740	3 330			
6.0	560	3 360			

2 扭振优化控制方法研究

2.1 扭振优化控制数学模型

在智能柴油机的电控系统基础上, 可以调整燃油系统(喷油正时 α_1 、共轨压力 P_f , 喷射次数 K 和喷油间隔 $\Delta\alpha$ 、喷油量 β 、喷射速率 ν) 和配气系统(进气正时 α_2 、进气压力 P_a) 等参数, 对柴油机各项性能进行优化控制。

定义扭振优化控制的目标函数为扭振响应: $M=f(\alpha_1, \alpha_2, \Delta\alpha, \beta, P_f, P_a, K, \nu, \dots)$ 。

优化控制的目标为: 在额定转速的各个工况且满足其它性能要求的条件下, 轴系的扭振响应最小。

本文对扭振优化控制理论进行探索性研究, 取喷油定时和进气定时研究工作参数与扭振应力之间的关系, 优化过程主要考虑柴油机的功率要求, 对排放影响未作分析。

2.2 调整单个工作参数对扭振的影响

在 25% 和 100% 负荷下, 单独改变一个运行参数, 其它参数维持初始参数不变。曲轴的合成应力在不同进气正时改变量(-10°, 20°)的值见表 3, 在不同喷油正时改变量(-3°, 3°)的值见表 4。据表中数据分析可知, 在 25% 负荷推迟进气阀开启时刻和

提前喷油可减小扭振, 而 100% 负荷的情况相反。

表 3 25%、100% 负荷下进气正时改变量对扭振应力的影响

单位: MPa

进气正时改变量/(°)	-10	-5	0	5	10	15	20
25%	9.8	9.3	8.9	8.5	8.2	8.4	9.0
100%	44	46	49	51	54	57	59

表 4 25%、100% 负荷下喷油正时改变量对扭振应力

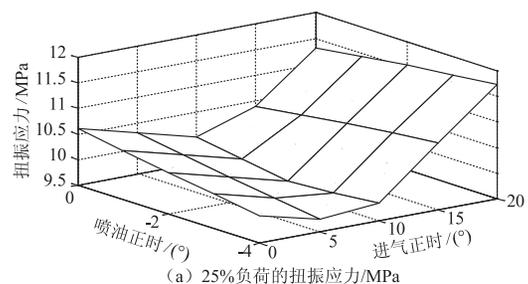
单位: MPa

喷油正时改变量/(°)	-3	-2	-1	0	1	2	3
25%	8.6	8.7	8.8	8.9	9.1	9.2	9.3
100%	54	53	52	51	50	49	47

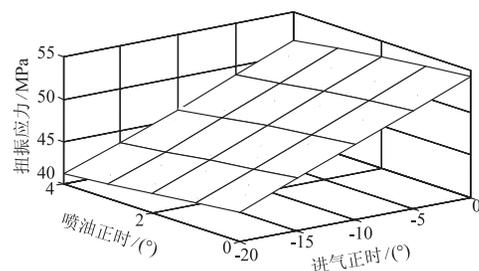
2.3 多参数的扭振优化控制

同时调整进气正时和喷油正时对扭振进行优化控制, 根据单个参数对扭振的影响确定参数优化计算范围: 25% 负荷喷油正时改变范围为(-4°, 0°), 进气正时改变范围为(0°, 20°); 100% 负荷喷油正时改变范围为(0°, 4°), 进气正时改变范围为(-20°, 0°)。扭振应力幅值随参数变化的关系如图 5 所示。

由图 5(a)可知, 在 25% 负荷时, 将喷油正时提前 2°和进气正时推迟 10°的曲轴应力最低; 由图 5(b)可知, 在 100% 负荷时, 将喷油正时推迟 4°和进气正时提前 20°的曲轴应力最低, 此外, 曲轴应力基本上随着喷油正时推迟和进气正时提前呈线性减小的趋势。因此, 在大负荷情况下, 要减小曲轴应力, 应在柴油机工作状态允许的情况下尽量推迟喷油和提前进气正时。



(a) 25% 负荷的扭振应力/MPa



(b) 100% 负荷的扭振应力/MPa

图 5 扭振应力随两个参数变化 MAP 图

根据 MAP 图确定扭振最优化的工作参数: 25% 负荷喷油提前 2° , 进气开启时刻推迟 10° ; 50%、75% 和 100% 负荷喷油推迟 4° , 进气开启时刻提前 20° ; 结合初始参数值, 得到扭振优化控制参数见表 5。

表 5 不同工况的扭振优化控制参数

工况	25%	50%	75%	100%
喷油定时/ $(^\circ)$	-10	-6	-9	-7
进气定时/ $(^\circ)$	316	286	286	286

优化前后各负荷下曲轴最大扭振应力对比如图 6 所示。可见: 100% 负荷时扭振应力减幅最大, 为 23.6%; 25% 负荷时扭振应力减幅最小, 为 8.5%。

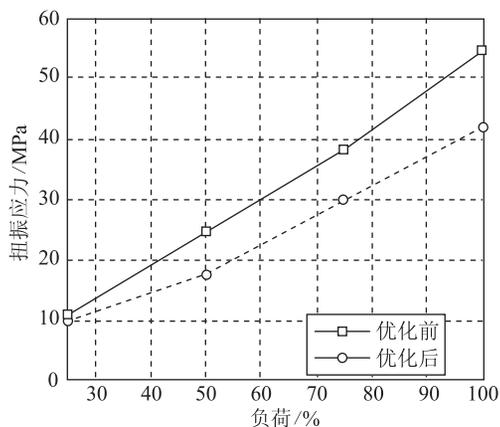


图 6 优化前后曲轴应力随负荷变化曲线

(上接第 36 页)

这种冷却系统在布置方式上更加紧凑、灵活, 节能性也更好; 但结构复杂, 制造成本比传统的轴带风扇系统高, 需要外部控制设备。这些特点正符合厢式机组的设计要求, 具备合理性和优越性。

6 结 语

综上所述, 非轴带式风机有许多优点, 风量均匀, 噪音低; 出风方向和安装位置灵活, 可多种选择; 电路上分段控制, 可达到节能效果; 改造简单可行。该多风机并联冷却模块与 500 kW 厢式机组配套性能较好, 各项指标均满足设计要求。其节能、紧凑和灵活性等特点也为厢式机组的设计提供

3 结 论

本文提出利用智能柴油机可控运行参数对轴系扭振进行优化控制的方法, 建立扭振优化计算模型并验证了其准确性。单个参数对扭振的影响表明: 在 25% 负荷推迟进气门和提前喷油可减小扭振; 而 100% 负荷的情况相反。联合优化结果表明, 在高负荷工况下, 要减小曲轴应力, 应在柴油机工作状态允许的情况下尽量推迟喷油和提前进气正时, 优化后的曲轴扭振应力最大减幅为 23.6%。因此, 通过调整柴油机工作参数进行扭振优化控制是可行的。

参考文献

- [1] 王棋. 内燃机轴系扭转振动[M]. 大连:大连理工大学出版社,1988.
- [2] 吴金源,唐小亚. 国外舰船柴油机技术展望[J]. 柴油机, 2005(2).
- [3] 杜剑维,汤建华,李南. 国外舰船动力装置技术发展现状及趋势[J]. 舰船科学技术,2010(8).
- [4] WartsilaTurning Guidelines for RT-flex engine[R].
- [5] 林杰伦. 内燃机工作过程数值计算[M]. 西安:西安交通大学出版社, 1986.
- [6] 李艳红. 直喷式柴油机的特性预测及参数优化[D]. 镇江:江苏大学, 2003.

了一个新的解决方案和设计理念。但它的前提是要具备三相电源, 所以还不能在所有柴油机冷却系统上推广。

参考文献

- [1] 安军,牟恕宽. 8V240ZD 柴油发电机组的设计和研制[J]. 铁道机车车辆,2005(25):35-42.
- [2] 杨连生. 内燃机设计[M]. 北京:中国农业机械出版社, 1981.
- [3] 柴油机设计手册编辑委员会. 柴油机设计手册(中册)[M]. 北京:中国农业机械出版社, 1984.
- [4] 王兆媛. 散热器、中冷器和风扇的选型校核计算[J]. 柴油机设计与制造,2009(04):20-31.