

考虑螺纹连接的柴油机固定件建模方法与冲击响应仿真

赵建华¹, 孙宇鹏¹, 刘镇¹, 邹开凤²

1. 海军工程大学动力工程学院, 武汉 430033
2. 海军航空工程学院青岛分院, 山东青岛 266400

摘要 螺纹连接是柴油机中应用最普遍的连接方式, 影响到柴油机结构的动态特性。为了研究考虑螺纹连接时柴油机抗冲击特性, 设计加工了一个机脚螺纹连接试验件进行模态试验, 并引入梁-弹簧单元进行螺纹连接有限元建模, 试验结果与有限元分析结果误差小于 5.4%, 验证了螺纹连接建模方法的正确性。采用动态设计分析法 (DDAM) 对柴油机固定件进行冲击响应分析, 对 3 个方向的冲击应力响应结果进行相位耦合, 校核了各部件的冲击安全性。结果表明, 应更换高屈服强度极限的机脚材料, 而机脚螺纹连接符合 GJB 1060 要求。在柴油机抗冲击研究中采用该种螺纹连接模型可以得到更真实的结果。

关键词 柴油机; DDAM; 螺纹连接; 冲击响应; 有限元

中图分类号 U664.81

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2012.h1.008

Shock Resistance Characteristics of Diesel Engine Fixed Assembly with Bolt Connection

ZHAO Jianhua¹, SUN Yupeng¹, LIU Zhen¹, ZOU Kaifeng²

1. Power Engineering College, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China
2. College in Qingdao, Naval Aeronautical Astronautical College, Qingdao 266400, Shandong Province, China

Abstract The bolt connection is one of the most common connection methods applied in a diesel engine. It will affect the dynamic characteristics of the diesel engine's structure. A test model of the machine foot bolt connection is prepared to study the shock resistant characteristics of the bolt connection in the diesel engine. The screw-thread connection model of the beam-spring unit is introduced into the experiment to build the finite element model. A difference less than 5.4% is shown by comparing the results of the test model and the finite element analysis, which has verified the feasibility of the modeling method. With the DDAM (Dynamic Design Analysis Method), the impact safety of all components is verified by analyzing the shock response of the diesel engine's fastened components and phase-coupling the shock stress' response results in three directions. The experiments show that the material of the diesel engine feet should be replaced by one with a higher yield limit, while the machine foot bolts satisfy the national military standard requirements. The bolt connection model is shown to provide realistic results in the diesel engine shock resistance study.

Keywords diesel; DDAM; bolt connection; shock response; finite element

0 引言

柴油机作为最常见的船舶动力源是船舶的心脏, 其抗冲击性能是船舶生命力的重要指标之一^[1]。柴油机结构及运动

方式复杂, 承受载荷形式多样, 其抗冲击性能计算需要考虑诸多因素。需要对零部件之间的连接、接触和润滑结构对冲击载荷传递的影响进行理论和仿真分析, 其中螺纹连接是柴

收稿日期: 2012-06-22; 修回日期: 2012-08-13

基金项目: “十二五”国防预研基金项目 (4010304030202)

作者简介: 赵建华, 副教授, 研究方向为舰船设备抗冲击特性, 电子信箱: zhaojh402@sina.com

油机中应用最普遍的连接方式,对整机冲击载荷的传递特性影响较大,螺纹连接的建模方法是柴油机抗冲击计算的关键环节。

机械设备的抗冲击性能分析主要采用频域分析和时域分析两种分析方法,其中频域分析方法特别是动态设计分析方法简单实用,计算资源需求小,是国内外标准规范中计算考核的主要方法。近年来,虽然国内外运用动态设计分析(DDAM)方法对船舶设备开展了抗冲击校核,如计晨等^[1]利用DDAM方法研究了柴油机整机的冲击特性研究,但这些研究都未考虑柴油机中存在的大量的螺纹连接结构,螺纹连接对整体结构的影响仍是当前研究的热点和难点问题。本文首先提出一种螺纹连接的建模方法,并通过试验进行了验证,再将其应用于柴油机整机固定件冲击响应计算,达到了计算模型更接近实际的目的。

1 螺纹连接建模方法

柴油机固定件通常以螺纹连接的方式紧固,用以支撑柴油机的运动件,并传递动态载荷,因此在柴油机整体抗冲击特性分析中考虑螺纹连接动态特性,具有十分重要的作用。螺纹连接结构有以下两类常见的模型^[1]:(1)刚性连接模型,这是目前应用最多的方式,在建模过程中不考虑螺栓等连接构件的连接特性,直接将连接件处理为一个整体,但一般会使得计算模型的整体刚度偏大^[4];(2)精确结构有限元建模,螺纹连接采用三维实体建模,这种方法能较为准确地反映螺纹连接结构的动力学特性,但是该方法会使整体的网格数量剧增,网格奇异性变大^[5]。另外,由于精确结构有限元建模,非线性强,计算难以收敛,计算结果精度未必符合要求。

综上所述,针对整机建模既要避免上述不足,又要获得整机及螺纹连接的动态特性,本文引入了弹簧-梁单元模拟螺纹连接,建模过程中螺栓采用梁单元,再通过弹簧单元和刚性单元耦合螺纹接触区域节点自由度模拟螺栓与被连接件的连接关系,如图1所示。

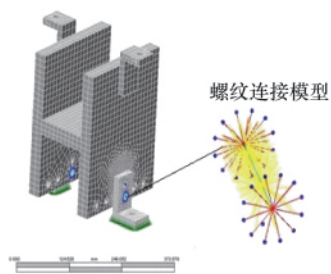


图1 试验件有螺纹连接有限元模型

Fig. 1 The finite element model of the test piece with threaded connection

2 螺纹连接模型试验验证

为了验证弹簧-梁单元螺纹连接模型的可行性,根据柴

油机整机模型频率相近原则设计加工了一个机脚螺纹连接试验件,其两个机脚采用螺纹连接结构,如图2所示。

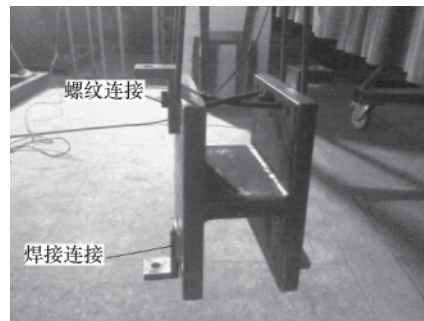


图2 试验件模型

Fig. 2 Test piece

2.1 试验件试验模态分析

对仿机脚结构进行试验模态分析时,为模拟其自由无约束状态,用较软的橡皮绳将连接板悬挂起来,使板件处于“自由-自由”状态,如图2所示。试验设备及分析系统主要有ICP力锤、KD1002LC型ICP加速度传感器、AVANT数据采集及动态信号分析系统、N-model模态分析软件等。采用单输入单输出(SISO)锤击激励法对试验件进行锤击试验以测得其传递函数,测试系统原理如图3所示。

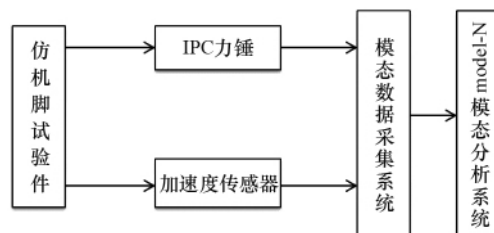


图3 试验模态过程

Fig. 3 Experiment flow chart

试验共布置了25个测点,为保证高的模态分辨率,测试点尽量避免布置在板件的振动节点处,如图4所示。试验过程采用如下精度控制方法:(1)每个测点进行5次线性平均以减小噪声信号和结构非线性等误差因素的影响;(2)通过对测试通道添加力窗和指数窗等措施,解决信号泄漏问题,提高信噪比;(3)试验过程中根据相干值的大小判断传递函

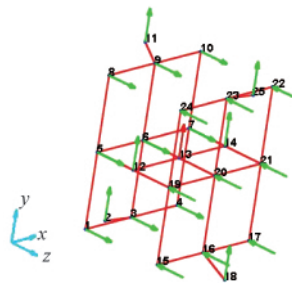


图4 试验布点及矢量图

Fig. 4 Test points and vectors

数的好坏,确认相干信号良好后(相干函数值基本大于0.9),再进行下一点测试。

将采集到的信号通过 AVANT 数据采集处理软件进行处理,得到各测点的函数;再由 N-model 模态分析软件进行模态拟合,得到前 6 阶固有频率。

2.2 螺纹连接建模方法验证

有限元模型进行仿真计算,取前 6 阶模态频率,将仿真计算结果和试验模态分析结果进行对比,如表 1 所示。

表 1 有限元仿真与试验结果对比

Table 1 Finite element simulation and experimental results

模态	有限元结果	试验结果	相对误差/%
1	449.73	452.08	0.52
2	688.15	693.08	0.71
3	1020.25	1090.75	5.40
4	1197.28	1150.01	2.51
5	1363.52	1365.94	0.18
6	1644.53	1656.01	0.69

试验与仿真结果误差在 5.4% 以内,且模态振型一致,如图 5 所示,模型的动态仿真特性与实际相符,因此该螺纹连接建模方法可用于柴油机整机有限元建模中。

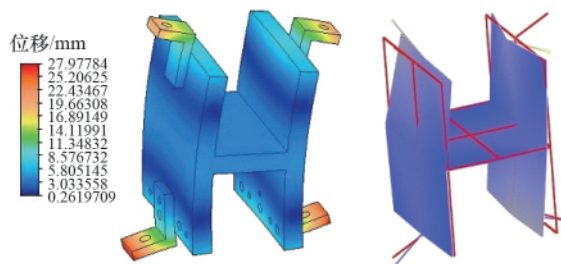


图 5 第 3 阶模态振型对比

Fig. 5 The third order modal shape

3 柴油机固定件冲击响应计算及分析

3.1 模型建立及边界条件

以某六缸柴油机为研究对象,建立三维实体模型和有限元分析模型,如图 6 所示,采用六面体和四面体混合单元对机体,飞轮壳,机脚划分网格,共划分了 176054 个单元,254780 个节点。机脚与机体的连接采用本文提出的螺纹连接模型处理,飞轮壳与机体之间定义为 tie 的接触关系。曲轴、连杆、活塞以及汽缸盖等部件采用了在机体重心位置添加质量单元的方法进行等效处理。

模型柴油机各部件材料,如表 2 所示。螺栓预紧力加载方式采用梁预载,预紧力大小为 20kN,柴油机机脚作为冲击载荷的输入部位。

根据 GJB 1060 规定选择,柴油机安装于水面舰艇,抗冲击等级为 A 级,安装部位为船体部位,进行弹性分析。冲击设

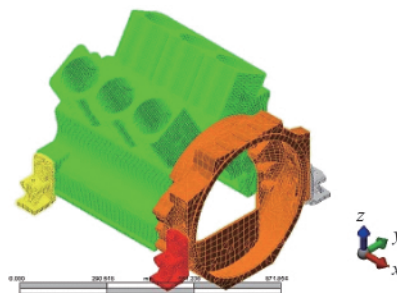


图 6 柴油机计算有限元模型

Fig. 6 Calculation of the finite element model of diesel engine

表 2 柴油机各部件材料参数

Table 2 The material parameters of the diesel engine's various components

材料属性	机体	机脚	飞轮壳	机脚螺栓
材料	HT300-Cu-Cr	35 号钢	HT250	45 号钢
密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	7800	7850	7340	7810
弹性模量 E/GPa	157	212	155	200
泊松比 ν	0.27	0.31	0.27	0.27
屈服极限 σ_s/MPa	900	315	850	355

计输入谱如表 3 所示。其中, A_a 为设计加速度, m/s^2 ; V_a 为设计速度, m/s ; A_0 、 V_0 分别为基准加速度和基准速度

$$A_0 = 196.2 \times \frac{(17.01 + m_a)(5.44 + m_a)}{(2.72 + m_a)^2}$$

$$V_0 = 1.52 \times \frac{5.44 + m_a}{2.72 + m_a}$$

式中 m_a 为设备的模态质量, t 。根据计算确定 A_a 和 $V_a \omega_a$ (其中, ω 为每阶的固体频率) 中的小值为 DDAM 分析在给定冲击方向上的冲击设计加速度。

表 3 冲击设计输入谱

Table 3 The impact of design input spectrum

安装设备部位	冲击方向	弹性设计	
		A_a	V_a
船体部位	垂向	$1.0A_0$	$1.0V_0$
	横向	$0.4A_0$	$0.4V_0$
	纵向	$0.2A_0$	$0.2V_0$

3.2 动态设计分析方法

DDAM 方法是基于结构振动模态叠加的动态设计分析方法。设备简化为多自由度系统,在计算出模态振型和模态质量后,根据基础冲击谱的输入得出模态位移和应力。通过合成模态解得出设备的位移和应力响应。船舶设备冲击响应 DDAM 方法的计算步骤如下: (1) 计算结构的固有频率和振型向量,并对振型向量正则化; (2) 计算每一阶模态的模态参

与因子和有效模态质量;(3) 定义具体应用的冲击谱;(4) 计算冲击作用下每阶模态的响应;(5) 采用 NRL 合成方法得到结构的冲击响应,包括结构的位移、速度、加速度、单元应力、单元力的响应

$$\{x\}_{NRL} = \{x_b\} + \sqrt{\sum_i x_i^2 - x_b^2}$$

其中, $x_b = \max_i(x_i)$ 为 i 阶模态中模态响应。

以上分析方法的关键在于模态如何选取,在 DDAM 方法中并不需要对所有的模态进行合并,有以下标准:(1)所有选择模态的模态质量之和不小于 80% 的结构总质量;(2) 若存在密集模态,这些模态的合并响应必须进行分析;(3) 如果模态质量超过总质量的 1%,那么这个模态也应被合并。

3.3 评估方法

根据 GJB 1060.1—91 规定, 如果设备不允许有永久变

形, 评估准则为冲击响应应力不应超过材料的静屈服强度, 对高速率应变,若经设计部门同意,许用应力值可适当增大。而船用柴油机,从安全角度出发,认为属于定位敏感且不允许有永久变形的 A 级设备,其许用应力为静屈服强度。为便于进行柴油机冲击安全性分析,定义无量纲系数 α ,称为失效系数^[6]

$$\alpha = \frac{\sigma_{Mises}}{\sigma_s}$$

其中, σ_{Mises} 为考核部位单元 Mises 应力峰值; σ_s 为材料静屈服极限。当 $\alpha \leq 1$ 时,认为结构安全,当 $\alpha > 1$ 时,认为结构不安全。

3.4 计算结果及分析

按上述方法,不同方向冲击作用下,计算时选择不同的模态频率、模态质量、模态质量百分比,进而计算出各阶模态下的冲击设计加速度值,如表 4 所示。

计算结果如图 7 所示,其中图 7(a)—图 7(c)表明,横向

表 4 设计冲击加速度
Table 4 Design impact acceleration

柴油机纵向(x)DDAM 冲击设计					柴油机横向(y)DDAM 冲击设计					柴油机垂向(z)DDAM 冲击设计				
模态	频率/Hz	模态质量/kg	质量分数/%	设计加速度/g	模态	频率/Hz	模态质量/kg	质量分数/%	设计加速度/g	模态	频率/Hz	模态质量/kg	质量分数/%	设计加速度/g
1	323.13	129.59	37.67	30.61	1	323.13	119.62	34.77	63.09	3	485.41	154.44	44.89	142.70
2	355.39	156.28	45.43	28.39	2	355.39	109.33	31.78	65.13	4	512.88	95.74	24.83	170.20
6	736.34	12.04	3.5	47.27	5	577.56	62.96	18.30	76.42	8	828.71	11.98	3.48	236.40
8	828.28	5.51	1.6	48.75	—	—	—	—	—	10	1026.99	6.52	1.90	242.60

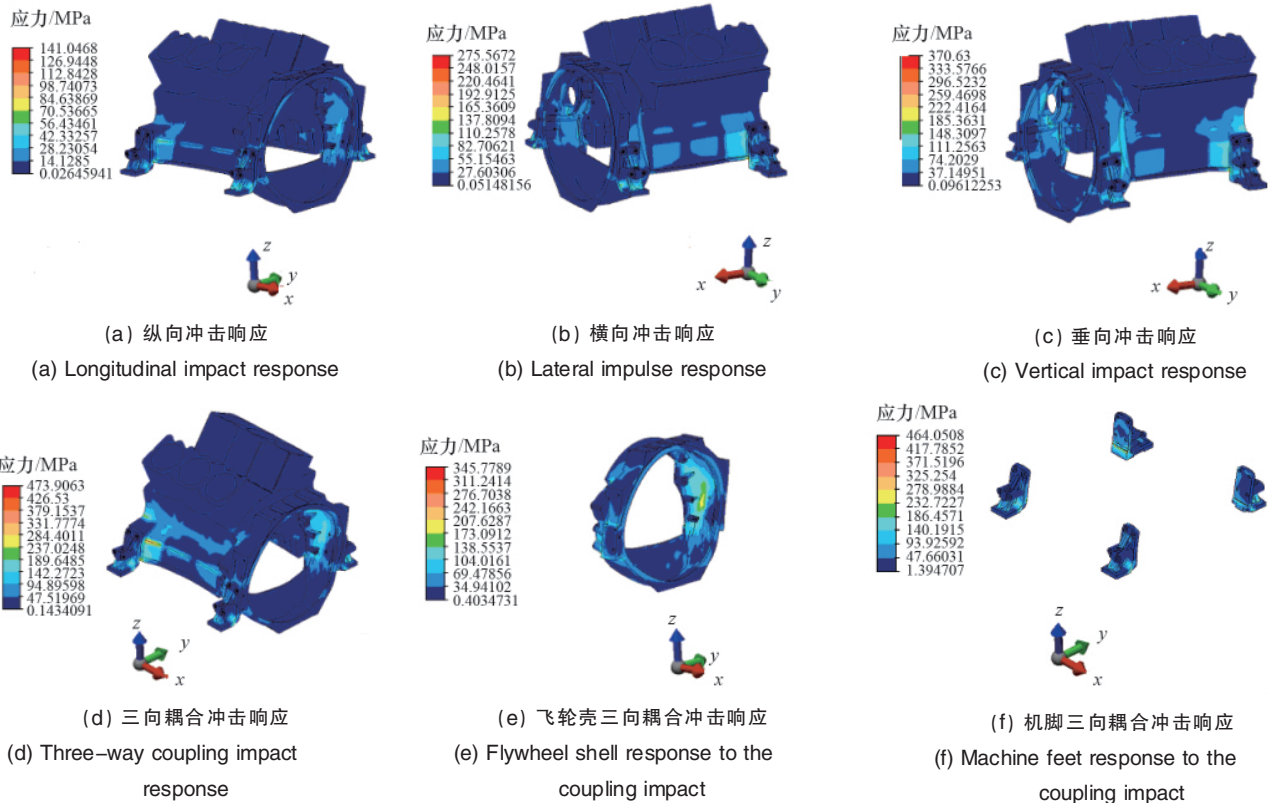


图 7 冲击响应应力云图

Fig. 7 Impulse response stress cloud

和纵向的输入冲击载荷小,柴油机垂向的响应明显高于横向和纵向。柴油机机体裙部是模态敏感区域,因此该部位的冲击应力较大,达到 370.85MPa。图 7(e)—图 7(g)为柴油机 3 向冲击耦合作用后的冲击响应,3 向冲击耦合作用下的冲击响应明显大于单向冲击加载。柴油机机脚承受的惯性力大,其最大冲击响应应力值达到 464.05MPa。

选取机体,机脚,飞轮壳、机脚螺栓 3 向耦合冲击作用下的最大应力值进行应力分析,计算其失效系数,结果如表 5 所示。

表 5 部件失效系数考核

Table 5 Failure factor assessment for parts

部件	最大应力值/MPa	失效系数
机体	473.90	0.52
飞轮壳	345.77	0.41
机脚	464.05	1.47

机体和飞轮壳等部位失效系数均小于 1,可认为结构安全。虽然机脚应力水平与机体相当,但由于机脚材料的静屈服强度较小,其失效系数大于 1,所以机脚构件应选用屈服强度更强的材料。

机脚与机体采用弹簧-梁螺纹连接模型,通过计算得到螺纹连接轴向应力最大值为 28.04MPa,小于材料屈服极限。螺纹连接的轴向力为 3888.14N,其值小于螺栓的预紧力 20kN,所以机脚螺栓是安全的。

4 结论

螺纹连接是柴油机中应用最普遍的连接方式,关乎设备的动态特性,螺纹连接的建模方法是设备冲击响应仿真的关键技术之一。本文利用弹簧-梁螺纹连接模型建立了柴油机固定件的有限元模型,并通过试验模态验证了模型的可行

性,采用 DDAM 法对柴油机固定件进行冲击响应仿真计算,得出如下结论。

(1) 通过试验模态分析与有限元计算结果对比,验证了弹簧-梁螺纹连接模型满足工程计算需要,可应用于柴油机冲击响应仿真计算。

(2) 柴油机机体裙部及机脚部位受惯性力作用较大,是模态敏感区,冲击响应比较大,柴油机机脚应力值大于材料静屈服极限,因此柴油机机脚应选用屈服强度大的材料。

(3) 使用弹簧-梁螺纹连接模型计算获得机脚螺栓轴向应力值和轴向力,通过校核发现该柴油机机脚螺纹连接结构的强度符合 GJB 1060 要求,是安全的。

参考文献 (References)

- [1] 汪玉, 华宏星. 舰艇现代冲击理论及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2005. Wang Yu, Hua Hongxing. The impact theory and application of modern naval ships[M]. Beijing: Science Press, 2005.
- [2] 计晨, 汪玉, 赵建华, 等. 舰用柴油机抗冲击性能频域分析 [J]. 振动与冲击, 2009, 29(11): 171-176. Ji Chen, Wang Yu, Zhao Jianhua, et al. Journal of Vibration and Shock, 2009, 29(11): 171-176.
- [3] 高洪滨. 柴油机螺纹连接结构冲击动力学特性研究 [D]. 武汉: 海军工程大学, 2010. Gao Hongbin. Study on shock dynamic characteristics of bolted joints of diesel engine[D]. Wuhan: Naval University of Engineering, 2010.
- [4] Wilson J F, Callis E G. The dynamics of loosely jointed structures[J]. International Journal of Non-linear Mechanics, 2004, 39(3): 503-514.
- [5] Feras A, Pierre S, Alain D. Equivalent axial stiffness of various components in bolted joints subjected to axial loading [J]. Finite Element in Analysis and Design, 2007, 43(8): 589-598.
- [6] 陈海龙, 姚熊亮, 张阿漫, 等. 船用典型动力设备抗冲击性能评估研究 [J]. 振动与冲击, 2009, 28(2): 45-50. Chen Hailong, Yao Xiongliang, Zhang Aman, et al. Journal of Vibration and Shock, 2009, 28(2): 45-50.

(责任编辑 刘志远)

·学术动态·

“第五届中国石油地质年会”征文



中国石油学会石油地质专业委员会、中国地质学会石油地质专业委员会, 拟于 2013 年 5 月 28 日在北京联合召开“第五届中国石油地质年会”。

征稿范围:(1) 非常规油气地质理论与勘探开发技术;(2) 中国陆相盆地油气地质理论与勘探技术进展;(3) 中国海相油气地质理论与勘探技术进展;(4) 中国海域油气地质理论与勘探技术进展;(5) 海外油气地质理论与勘探技术进展;(6) 石油地质理论研究与技术探索;(7) 石油工业上游面临的挑战与发展战略

论文提交日期:2013 年 3 月 31 日

联系电话:010-82282485

电子信箱:sydz.syky@sinopec.com

大会网站:www.geosociety.org.cn/web/c_0000000200020015/d_5033.htm