

船用柴油发电机组负荷突变轴系 瞬时扭转振动研究

陈爱志¹, 马怀腾², 周 昊²

(1. 海装驻沈阳地区军事代表局, 辽宁 沈阳 110081;

2. 中国船舶重工集团公司第 704 研究所, 上海 200031)

摘 要: 选取船用柴油发电机组运行过程中可能出现的极端工况作为分析对象, 通过轴系稳态扭转振动计算和瞬时扭转振动仿真, 计算某型船用柴油发电机组轴系扭转振动固有频率、稳态运行扭转振动应力基础和瞬间过负荷工况轴系扭转振动附加应力。综合考量、全面分析瞬间过负荷工况柴油发电机组轴系运行安全性, 确保柴油发电机组全工况可靠供电。

关键词: 柴油发电机组; 瞬时扭转振动; 过负荷

中图分类号: TM 31 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2020)05-0060-04

doi: 10.12177/emca.2020.022

Shaft Instantaneous Torsional Vibration Analysis of a Marine Diesel Generator Set at Sudden Load Change Condition

CHEN Aizhi¹, MA Huaiteng², ZHOU Hao²

(1. Military Representative Office of Naval Equipment Department in Shenyang, Shenyang 110081, China;

2. Shanghai Marine Equipment Research Institute, Shanghai 200031, China)

Abstract: To ensure reliable power supply of diesel generator set at all working conditions, especially some extreme conditions, shaft torsional vibration calculation is carried out for the natural frequency, the steady-state basic stress and the additive stress at instantaneous overload condition for a marine diesel generator set the shaft, based on steady-state and instantaneous torsional vibration analysis of the shaft. Comprehensive study on the operational security of diesel generator set shaft at instantaneous overload condition can assure the reliable all-condition power supply.

Key words: diesel generator set; instantaneous torsional vibration; overload

0 引 言

柴油发电机组因其响应迅速、环境适应能力强、外围保障资源需求少等优点, 作为主电站、备用电站或应急电站广泛应用于各型船舶电力系统。船用柴油发电机组设计生产遵循 GB/T 13032—2010《船用柴油发电机组》等标准规范的要求, 包括需要具备承受 20%~100% 额定功率的负载长期稳定运行的能力, 以及承受 110% 额定功率连续运行 1 h(每 12 h)的能力。

扭转振动是柴油发电机组轴系的固有特性, 表现为轴系扭转振动固有频率、轴段扭振应力、变动扭矩等指标参数。轴系扭转振动共振或外加过大扭矩致使轴段扭振应力、变动扭矩等指标超出许用值, 将严重影响机组运行安全^[1]。在柴油发电机组设计过程中, 会进行轴系扭转振动的自由振动计算和额定工况、一缸熄火工况轴系扭转振动强迫振动计算。但是, 上述计算均为稳定运行工况的校核分析, 对动态过程瞬时扭转振动的关注尚存在不足。瞬时扭转振动出现在起

收稿日期: 2020-01-18; 收到修改稿日期: 2020-04-03

作者简介: 陈爱志(1974—), 男, 高级工程师, 研究方向为舰船工程。

动、加载、减载等动态工况,会在稳定运行工况机组轴系扭振应力的基础上增加新的附加应力,若二者叠加后超出设备许用值,同样会影响机组运行安全。因此,需要对瞬时扭转振动进行计算分析,对比计算值与许用值,确保柴油发电机组瞬时运行安全可靠。本文对某船用柴油发电机组实际应用过程中可能出现大附加应力的瞬时工况进行瞬时扭转振动计算分析,并进一步分析了轴系运行安全情况。

1 计算工况

船用柴油发电机组在实船运行过程中一般采用 2 台或多台并联运行的方式。当 1 台机组突然故障停机时,负荷会转移到尚在运行的机组,在电力系统负荷控制措施动作前,可能出现单台机组承受超过 110% 额定功率的情况,即超出标准规范常规要求。

某船电力系统配置 4 台大功率柴油发电机组,选用某 V 型 16 缸柴油机作原动机,常采用 2 台或 3 台柴油发电机组并联运行的方式,单台机组负荷率为 50% ~ 70%。本文选用最苛刻的工况,即 2 台机组并联运行,单台机组负荷率取 70%,突然发生一台机组故障停机,尚在运行的机组负荷率瞬间突变至 140%,电力系统负荷控制措施动作时机依经验取 170 ms,即 170 ms 后负荷率降至许可范围内。

2 计算模型

轴系扭振计算基于轴系当量系统,即将轴系简化为离散的集中转动惯量的圆盘和无质量的弹性轴,计算时需考虑集中转动惯量圆盘的转动惯

量、弹性轴段扭转刚度、弹性轴段内部阻尼和相关集中转动惯量外部阻尼。

对于具有 n 个集中转动惯量的扭振系统,在一组圆频率为 ω 的简谐激励力矩 M 作用下,其任意 k 质量的运动方程式^[2]为

$$I_k \ddot{\varphi}_k + C_k \dot{\varphi}_k + \mu_{k-1,k} (\dot{\varphi}_k - \dot{\varphi}_{k-1}) + \mu_{k,k+1} (\dot{\varphi}_k - \dot{\varphi}_{k+1}) + K_{k-1,k} (\varphi_k - \varphi_{k-1}) + K_{k,k+1} (\varphi_k - \varphi_{k+1}) = M_k e^{i(\omega t + \alpha_k)} \quad (1)$$

式中: I_k 为 k 质量的转动惯量, $\text{kg} \cdot \text{m}^2$; φ_k 、 $\dot{\varphi}_k$ 、 $\ddot{\varphi}_k$ 为 k 质量的角位移、角速度、角加速度; C_k 为 k 质量的绝对阻尼系数, $\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}/\text{rad}$; $\mu_{k-1,k}$ 、 $\mu_{k,k+1}$ 为 $(k-1) \sim k$ 和 $k \sim (k+1)$ 轴段的相对阻尼系数, $\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}/\text{rad}$; $K_{k-1,k}$ 、 $K_{k,k+1}$ 为 $(k-1) \sim k$ 和 $k \sim (k+1)$ 轴段的扭转刚度, $\text{N} \cdot \text{m}/\text{rad}$; M_k 为 k 质量上作用的激励力矩振幅值, $\text{N} \cdot \text{m}$; ω 为激励力矩的圆频率; t 为时间, s ; α_k 为激励力矩的初始相位角。

瞬时工况下,轴系承受的总应力 τ_{tot} 为扭振应力基础值 τ_{bas} 和瞬时值 τ_{ins} 的叠加:

$$\tau_{\text{tot}} = \tau_{\text{bas}} + \tau_{\text{ins}} = \frac{\tau_{\text{ini}} + \tau_{\text{up}}}{2} + \tau_{\text{ins}} \quad (2)$$

式中: τ_{ini} 为突加起始时的稳态扭振应力值; τ_{up} 为齿条上限时的稳态扭振应力值,即 110% 额定功率。

本文涉及的柴油机曲轴许可扭振应力为 49 MPa,即需要 $\tau_{\text{tot}} \leq 49 \text{ MPa}$ 。

本文计算涉及的柴油发电机组轴系当量系统简图如图 1 所示。图 1 中,成对的圆圈及其中间连线表示集中质量,相邻集中质量间的横线表示轴段。

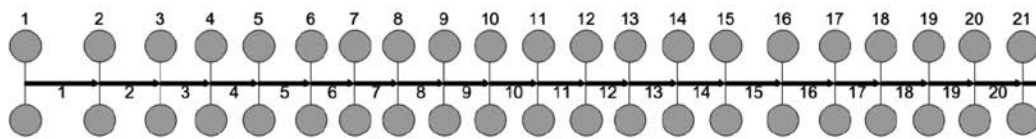


图 1 轴系当量系统简图

轴系当量参数如表 1 所示。其中,阻尼系数包括绝对阻尼系数和相对阻尼系数,对于减振器和联轴器,计算选用相对阻尼系数,施加在轴段上;对于柴油机和发电机集中质量,计算选用绝对

阻尼系数,施加在质量点上。

3 稳态扭转振动计算

自由振动计算结果如表 2 所示。

表 1 轴系当量参数表

质量号	质量名称	转动惯量/ (kg·m ²)	绝对阻尼系数/ (N·m·s·rad ⁻¹)	轴段号	扭转刚度/ (MN·m·rad ⁻¹)	相对阻尼系数/ (N·m·s·rad ⁻¹)
1	减振器外件	19.627	—	1	0.651	4 700
2	减振器内件+曲轴	9.599	—	2	24.7	—
3	A ₁ 缸活塞连杆组件	6.51	230	3	2 240	—
4	B ₁ 缸活塞连杆组件	6.51	230	4	33.2	—
5	A ₂ 缸活塞连杆组件	6.51	230	5	2 240	—
6	B ₂ 缸活塞连杆组件	6.51	230	6	33.2	—
7	A ₃ 缸活塞连杆组件	6.51	230	7	2 240	—
8	B ₃ 缸活塞连杆组件	6.51	230	8	33.2	—
9	A ₄ 缸活塞连杆组件	6.51	230	9	2 240	—
10	B ₄ 缸活塞连杆组件	6.51	230	10	33.2	—
11	A ₅ 缸活塞连杆组件	6.51	230	11	2 240	—
12	B ₅ 缸活塞连杆组件	6.51	230	12	33.2	—
13	A ₆ 缸活塞连杆组件	6.51	230	13	2 240	—
14	B ₆ 缸活塞连杆组件	6.51	230	14	33.2	—
15	A ₇ 缸活塞连杆组件	6.51	230	15	2 240	—
16	B ₇ 缸活塞连杆组件	6.51	230	16	33.2	—
17	A ₈ 缸活塞连杆组件	6.51	230	17	2 240	—
18	B ₈ 缸活塞连杆组件	6.51	230	18	55.2	—
19	曲轴法兰+联轴器主动端+飞轮	211.09	—	19	1.37	2 001
20	联轴器从动端	12.77	—	20	16.02	—
21	发电机	590.7	—	—	—	—

表 2 自由振动计算结果

结点数	自振频率/(r·min ⁻¹)	工作转速区振动谱次
1	715.76	无
2	1 692.89	无
3	3 523.97	3.5 次(1 006.85 r/min)
4	8 702.17	8 次(1 087.77 r/min), 8.5 次(1 023.78 r/min), 9 次(966.91 r/min)

强迫振动部分计算结果如图 2~图 4 所示。强迫振动计算包括正常发火工况和一缸熄火工况,校核额定工况各轴段扭振应力、发电机电位角、联轴器变动扭矩等。选取了部分较接近许用值的计算结果:图 2 是正常发火工况曲轴扭振应力最大位置处的计算结果;图 3 是正常发火工况联轴器变动扭矩计算结果;图 4 是一缸熄火工况曲轴扭振应力最大位置处的计算结果。

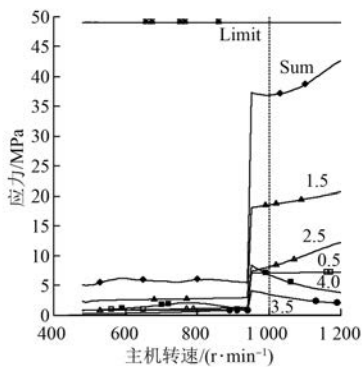


图 2 正常发火工况强迫振动曲轴扭振应力计算结果

由计算结果可知,机组轴系扭转振动固有频率在工作转速区内无主谱次及主副谱次共振,额定功率稳态扭振应力约 38 MPa,小于 49 MPa。可见,在稳定运行工况,轴系扭振应力未超出许用值,轴系运行安全可靠。

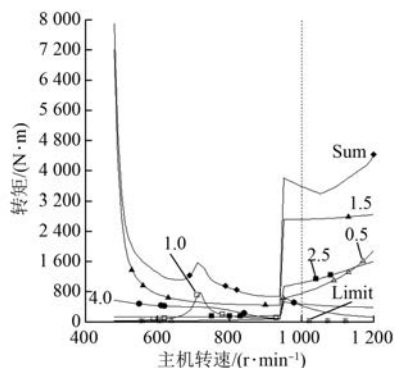


图3 正常发火工况强迫振动联轴器变动扭矩计算结果

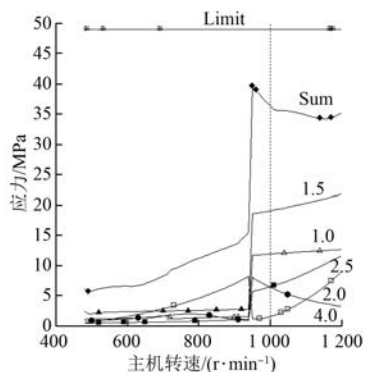


图4 一缸熄火工况强迫振动曲轴扭转应力计算结果

不同负荷率下柴油机激励力与此时的平均有效压力成正比,平均有效压力与负荷率成正比,故不同负荷率下的稳态扭振应力可由额定功率下的稳态扭振应力与负荷率的乘积得到,可得70%负载突加下的运行扭振应力值为26.6 MPa,齿条上限时的稳态扭振应力值为41.8 MPa。

4 瞬态扭转振动计算

由于工况发生时间只有170 ms,故不考虑柴油机激励变化,仅考虑电机载荷变化。计算得到负载瞬时增加到140%时对应施加到电机轴上的扭矩为 $T=4\ 626 \times 0.7 \times 9\ 550 / 1\ 000 = 30\ 924.81\ \text{N} \cdot \text{m}$ 。

取计算时长为2 000 ms,0~200 ms外部载荷为零,200~260 ms施加扭矩为30 924.81 N·m的外部载荷,260~370 ms外部载荷线性下降到零,370~2 000 ms外部载荷保持为零,如图5所示。

瞬时工况附加扭振应力如图6所示。

由图6可知,突变负荷下曲轴瞬态扭振应力最大增加约6.7 MPa。

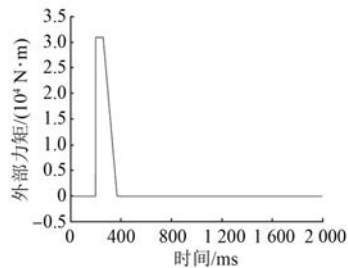


图5 瞬时工况外部载荷

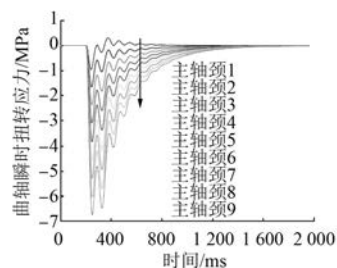


图6 瞬时工况附加曲轴扭振应力

5 计算结果分析

根据式(2),有:

$$\tau_{\text{tot}} = \frac{26.6 + 41.8}{2} + 6.7 = 40.9 < 49\ \text{MPa} \quad (3)$$

因此,瞬时工况柴油机应力值在安全范围内,本型机组轴系设计科学合理。

突变负荷下附加曲轴瞬态扭振应力最大增加约6.7 MPa,约为许用值的13.7%,是柴油发电机组轴系设计不可忽略的环节。通过联轴器优化匹配^[3]、附加惯量盘^[4]等手段可调整轴系扭转振动特性^[5],有效规避轴系扭转振动共振、降低稳定运行工况扭振应力,即降低瞬时工况运行基础值,进而规避瞬时工况扭振应力超限的风险。

6 结 语

瞬时附加扭振应力占轴系许用值比例较高,需在柴油发电机组轴系设计过程中予以重视。本文针对某型船用柴油发电机组在负荷突变工况下的瞬时扭转振动进行了计算分析,完成了瞬时扭转振动校核。计算结果表明,瞬时工况柴油机应力值在安全范围内,柴油发电机组轴系设计合理,可确保机组在全工况下安全可靠地运行。

(下转第69页)