

团 体 标 准

T/CSNAME 135—2025

船用柴油机曲轴寿命计算 含初始缺陷的材料-载荷-疲劳耦合计算方法

Life calculation of marine diesel engine crankshaft: coupled calculation method of material with initial defects - load - fatigue

2025 - 09 - 05 发布

2025 - 12 - 04 实施

前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国造船工程学会船舶标准化专业委员会提出。

本文件由中国造船工程学会归口。

本文件起草单位：哈尔滨工程大学、嘉庚创新实验室。

本文件主要起草人：李玩幽、李宏亮、付万葳、杨林喜、叶斌、张恒诚、徐含章、史修江、卢熙群、率志君、郭宜斌、孟亮虎、赵滨、马旋。

船用柴油机曲轴寿命计算 含初始缺陷的材料-载荷-疲劳耦合计算方法

1 范围

本文件规定了船用柴油机曲轴寿命计算中涉及含初始缺陷的材料载荷-疲劳耦合计算方法的分析目的和原理、分析方法、计算方法以及结果分析与评估等要求。

本文件适用于塑性区尺寸远小于裂纹尺寸的船用柴油机曲轴寿命计算，不适用于显著弹塑性拓展、腐蚀疲劳加速阶段的船用柴油机曲轴寿命计算。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 6398-2017 金属材料 疲劳试验 疲劳裂纹扩展方法

GB/T 42903-2023 金属材料 蠕变裂纹及蠕变-疲劳裂纹扩展速率测定方法

JB/T 13554-2018 内燃机曲轴弯曲疲劳试验方法

GD12-2022 海洋工程结构物疲劳强度评估技术指南

IACS UR M53 曲轴强度校核统一要求 (crankshafts of reciprocating internal combustion engines)

3 术语和定义

GB/T 6398-2017、GB/T 42903-2023、JB/T 13554-2018、IACS UR M53界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

初始缺陷 initial imperfection

曲轴在制造、加工或服役早期形成的、尚未扩展到失效临界的裂纹、划痕、夹杂等缺陷。

3.2

疲劳扩展划痕裂纹深度危险阈值 fatigue threshold of crack depth hazard

根据材料疲劳裂纹扩展门槛值及应力强度因子计算得到的、裂纹扩展风险显著增加的临界裂纹深度。

4 分析目的及原理

4.1 分析目的

通过耦合初始缺陷、材料特性、载荷条件和疲劳性能分析，预测曲轴在实际工况下的疲劳寿命。

4.2 计算原理

疲劳扩展划痕裂纹深度危险阈值理论分析与基于有限元法的裂纹疲劳数值分析。

5 计算流程

5.1 计算方法包括疲劳扩展划痕裂纹深度危险阈值理论定性分析与基于有限元法进行裂纹疲劳计算分析的两种，整体分析思路如图1所示。

5.2 基于疲劳扩展划痕裂纹深度危险阈值理论定性分析流程为：

a) 输入曲轴所受载荷，确定疲劳扩展的名义应力（见6.1）；

- b) 确定裂纹尖端应力强度因子（见 6.2），特别关注曲轴轴颈、曲柄等应力集中部位的主应力；
- c) 确定材料疲劳裂纹扩展门槛值（见 6.3），结合曲轴实际使用的材料特性进行评估；
- d) 确定裂纹尖端应力强度因子表达式，分析裂纹尖端附近区域的主应力。同时，确定本材料的裂纹疲劳扩展门槛值。在此基础上，进一步确定疲劳扩展划痕裂纹深度危险阈值（见 6.4）。
- e) 利用疲劳扩展速率曲线对裂纹疲劳扩展周期进行推算（见 8）。
- 5.3 基于有限元法进行裂纹疲劳的分析流程为：
- a) 通过对曲轴整体有限元模型进行瞬态计算，得到曲轴整体应力分布规律，与理论分析结果相互校正（见 7.1）；
- b) 建立含裂纹故障子模型，对子模型边界位置施加位移约束；
- c) 对含裂纹故障子模型，计算稳态响应并采用位移法求解裂纹尖端应力强度因子（见 7.2）；
- d) 利用疲劳扩展速率曲线对裂纹疲劳扩展周期进行推算（见 8）。

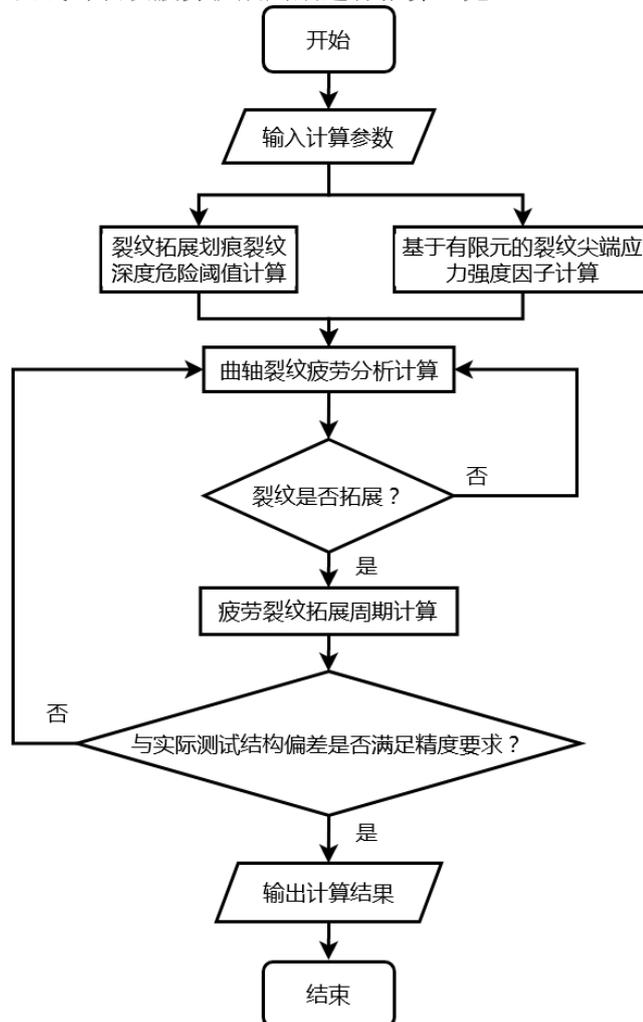


图1 含初始缺陷的材料—载荷—疲劳耦合的曲轴寿命计算方法整体流程

6 疲劳扩展划痕裂纹深度危险阈值计算

6.1 主应力分析

选取受力分析模型如图2所示。

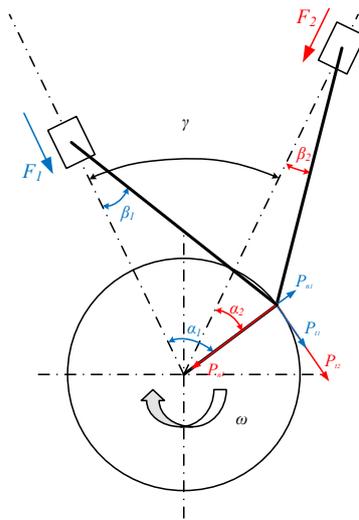


图2 受力分析模型示意图

曲柄销所受正应力和剪应力，以及名义应力分别如公式（1）～公式（3）所示：

$$\sigma_w = \frac{M_w}{W} = \frac{32M_w}{\pi d^3} \dots\dots\dots (1)$$

$$\tau_w = \frac{M_n}{W_n} = \frac{16M_n}{\pi d^3} \dots\dots\dots (2)$$

$$\sigma_{max} = \sqrt{\sigma_w^2 + 3\tau_w^2} = \frac{1}{W} \sqrt{M_w^2 + 0.75M_n^2} \dots\dots\dots (3)$$

式中：

M_w ——xy平面内的弯矩和xz平面内的弯矩之和的算数平方根，单位为牛·米（N·m）；

M_n ——所受扭矩，单位为牛·米（N·m）；

W ——抗弯截面系数，单位为米的三次方（ m^3 ）；

W_n ——抗扭截面系数，单位为米的三次方（ m^3 ）。

d ——轴径，单位为米（m）。

此计算结果仅为名义应力，计算疲劳扩展的名义应力还应该考虑应力集中，应力集中系数可查阅GD12-2022，即疲劳扩展的名义应力为：

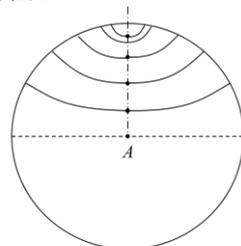
$$\sigma_f = K_t \sigma_{max} \dots\dots\dots (4)$$

式中：

K_t ——应力集中系数，无量纲数。

6.2 应力强度因子确定

疲劳扩展分析应确定裂纹位置的应力强度因子。采用如图3所示模型来确定应力强度因子。曲线前缘表面裂纹，受均匀拉伸和弯曲。



曲线前缘($b/s \approx 0.78$)，对 $b > D/2$
 ↓
 直前缘($b/s \rightarrow 0.64$)，对 $b \rightarrow D/2$

图3 裂纹前缘参数曲线

直径为 D 的圆杆含一曲线前缘表面裂纹，受均匀拉伸应力 σ 和弯矩 M ，见图（3），其裂纹前缘的应力强度因子表达式按公式（5）计算：

$$K_1 = \sigma\sqrt{\pi b} \cdot F_1 \text{ 或者 } K_1 = \sigma_M\sqrt{\pi b} \cdot F_1^M, \quad \sigma_M = \frac{32M}{\pi D^3} \dots \dots \dots (5)$$

式中：

- σ ——拉伸应力，牛每平方米（ N/m^2 ）；
- b ——如图4所示的简化模型中的尺寸，单位为米（ m ）；
- D ——如图4所示的简化模型中的尺寸，单位为米（ m ）；
- M ——所受弯矩，单位为牛·米（ $N \cdot m$ ）。
- F_1 ——形状比例因子，无量纲数；
- σ_M ——由弯矩产生的正应力，单位为帕斯卡（ Pa ）
- K_1 ——应力强度因子，单位为帕斯卡乘以米的零点五次方（ $Pa \cdot m^{0.5}$ ）

假定裂纹在扩展中其形状由曲线前缘逐渐过渡成直前缘，见图3，其最大深度点A的 F_1 可由图4和图5中曲线查得。

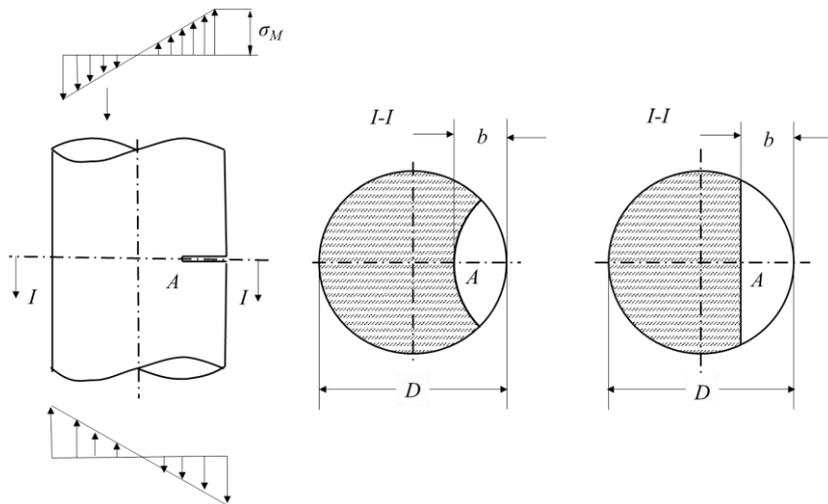


图4 弯矩作用下裂纹特征

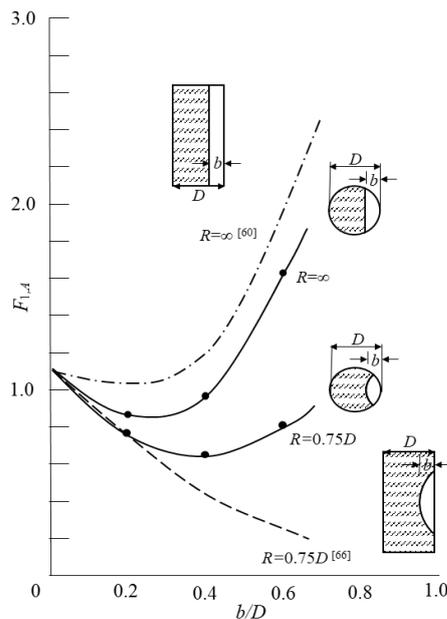


图5 形状比例因子 F_1

6.3 疲劳裂纹扩展门槛值确定

一般的疲劳扩展速率按公式 (6)、公式 (7) 所示:

$$\frac{db}{dN} = C(\Delta K_1)^m \dots\dots\dots (6)$$

$$\Delta K_1 = K_{1max} - K_{1min} = F_1 \sigma_{max} \sqrt{\pi b} - F_1 \sigma_{min} \sqrt{\pi b} \dots\dots\dots (7)$$

式中:

b ——裂纹的深度, 单位为米 (m);

N ——应力循环次数, 无量纲数;

C ——与材料有关的无量纲数;

m ——与材料有关的无量纲数;

ΔK_1 ——应力强度因子的变化范围, 单位为帕斯卡乘以米的零点五次方 ($\text{Pa} \cdot \text{m}^{0.5}$);

σ_{min} ——受到的最小应力, 单位为帕斯卡 (Pa)。

根据图6所示曲线, 当裂纹扩展速率趋于0时, 通常取裂纹扩展速率 $\frac{lg da}{dN} = 1 \times 10^{-7} \text{ mm/cycle}$ 时对应的 ΔK 值, 作为疲劳裂纹扩展门槛值 ΔK_{th} 。疲劳裂纹扩展门槛值的测定按GB/T 6398-2017执行, 并根据图6的 $lg da/dN - \Delta K$ 曲线确定。

疲劳裂纹扩展曲线的获取应符合 GB/T 6398-2017 的要求, 采用CT或MT等标准试样, 加载方式可为恒幅或变幅疲劳, 应力比 R 宜取 0.1~0.5, 裂纹长度测量方法可采用直流电位差法 (DCPD)、电阻应变计或光学成像法。对于典型船用曲轴钢材 (如42CrMo、34CrNiMoA等), 宜建立疲劳裂纹扩展参数数据库, 包含 C 、 m 、门槛值等主要参数及其适用条件 (热处理状态、环境温度等), 以便设计计算时直接调用。

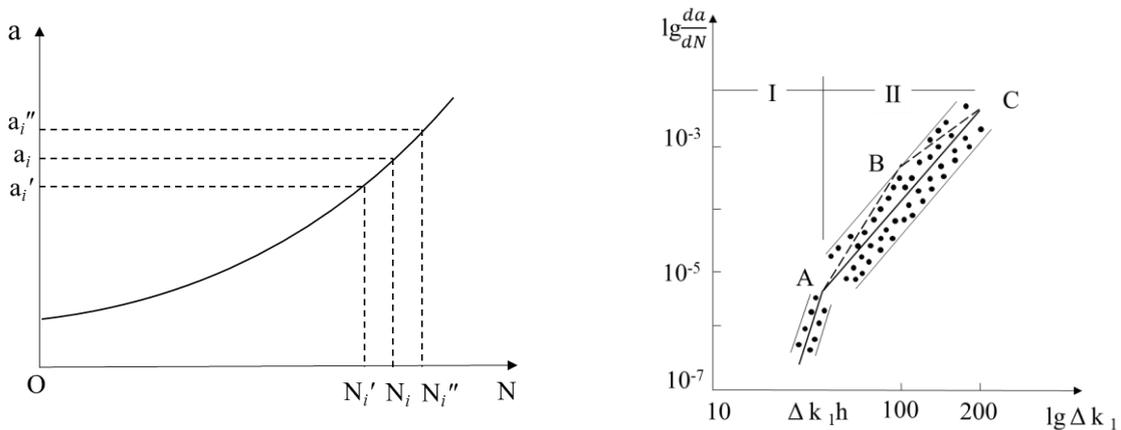


图6 裂纹扩展特征曲线

6.4 疲劳扩展划痕裂纹深度危险阈值确定

$$\Delta K_1 = \Delta K_{th} \dots\dots\dots (8)$$

式中:

ΔK_{th} ——疲劳拓展裂纹扩展门槛值, 单位为兆帕·米的零点五次方 ($\text{N} \cdot \text{m}^{0.5}$)。

取 ΔK_1 为 ΔK_{th} , 将疲劳裂纹扩展门槛值 ΔK_1 代入公式 (7), 即可获得疲劳扩展划痕裂纹深度危险阈值, 记为 b_s 。

7 基于有限元方法的裂纹尖端强度因子计算

7.1 曲轴有限元模型

7.1.1 按照曲轴尺寸建立的有限元模型, 根据已知材料牌号设定单元属性, 杨氏模量、密度、泊松比。

瞬态计算使用一阶实体单元 Solid45 进行计算。将各气缸活塞连杆力等效作用到曲柄销处，并在主轴颈位置建立三向弹簧模拟油膜刚度。

7.1.2 采用两次子模型对含裂纹轴段进行位移和应力分布的求解。一级子模型位于裂纹处，宏观尺寸网格加密，二级子模型位于一级模型局部。在仿真计算中，等效初始缺陷应明确等效缺陷面。根据定义的初始缺陷的等效缺陷面建立尺寸相符的裂纹面，裂纹应符合实际缺陷形态与工程检测结果，同时满足有限元软件建模与计算精度要求的尺寸设定。

7.1.3 一级子模型应采用全局加密策略，单元尺寸应保证几何细节完整，且关键受力区域单元尺寸不大于局部特征尺寸的 1/10~1/5；二级子模型应在裂纹前缘区域采用奇异单元，并进行渐进加密，裂纹尖端首层单元尺寸应满足 r 与 a 的比值小于 0.1，裂纹前缘每 15°~20°至少布置 1 个单元。

7.1.4 子模型边界条件由母模型计算结果提取。母模型在裂纹位置截取的边界应力、应变或位移分布数据，经插值映射到子模型对应节点作为约束条件。

7.1.5 除了初始裂纹缺陷，对于夹杂、空腔的故障形式，多级子模型同样适用。

7.2 裂纹尖端强度因子计算

裂纹尖端应力强度因子 K 按公式 (9) 计算：

$$K = \beta S \sqrt{\pi a} \dots\dots\dots (9)$$

式中：

S ——远方施加的应力，单位为帕斯卡 (Pa)；

a ——裂纹长度，单位为米 (m)；

β ——与试样集合或零件结构有关的一个无量纲因子。

裂纹的扩展形式根据裂纹位置的应力方向将张开模式分为拉伸张开、面内剪切、横向剪切三种，如图7所示。

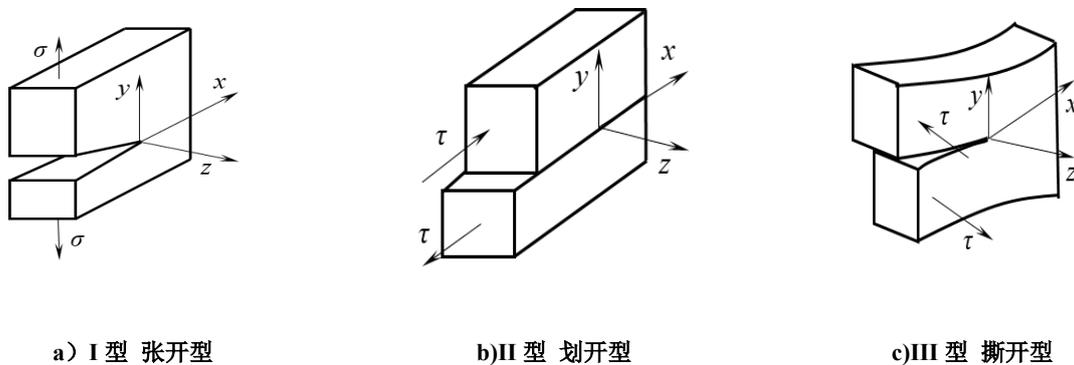


图7 三种不同的裂纹张开模式

3种类型应力强度因子表达式按公式 (10) 计算：

$$\begin{aligned} K_I &= \frac{2\mu}{\kappa+1} \sqrt{\frac{2\pi}{r_{a-b}}} (v_a - v_b) \\ K_{II} &= \frac{2\mu}{\kappa+1} \sqrt{\frac{2\pi}{r_{a-b}}} (u_b - u_a) \dots\dots\dots (10) \\ K_{III} &= \mu \sqrt{\frac{\pi}{2r_{a-b}}} (w_b - w_a) \end{aligned}$$

式中：

μ ——切变模量，单位为帕斯卡 (Pa)；

κ ——与材料泊松比有关的常数；

r_{a-b} ——与裂纹尖端很近的一点的极坐标的极径，单位为米 (m)；

v_a ——为裂纹前缘端点及1/4位置处节点直角坐标系下 y 方向位移，单位为米 (m)；

v_b ——为裂纹前缘端点及1/4位置处节点直角坐标系下 y 方向位移，单位为米 (m)；

u_a ——为裂纹前缘端点及1/4位置处节点直角坐标系下x方向位移，单位为米（m）；
 u_b ——为裂纹前缘端点及1/4位置处节点直角坐标系下x方向位移，单位为米（m）；
 w_a ——为裂纹前缘端点及1/4位置处节点直角坐标系下z方向位移，单位为米（m）；
 w_b ——为裂纹前缘端点及1/4位置处节点直角坐标系下z方向位移，单位为米（m）。

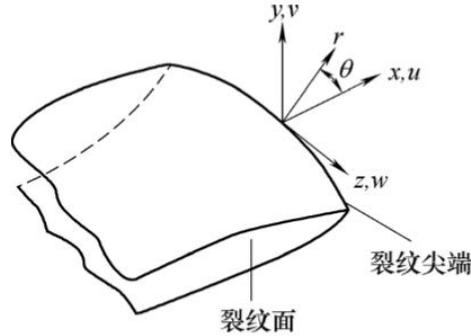


图8 三维裂纹模型

20节点奇异单元围绕裂纹前缘形式见图9。

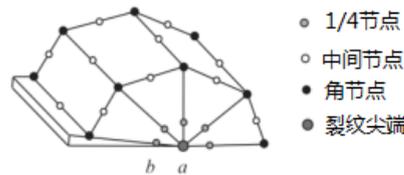


图9 20节点奇异单元围绕裂纹前缘形式

使用数值仿真软件，对子模型进行稳态计算。网格属性、材料属性与前述计算保持一致，单元类型为二阶单元Solid95。以KCALC指令对二级子模型的裂纹尖端进行计算，得此模型的裂纹应力强度因子 K_I 、 K_{II} 、 K_{III} 。

由应力强度因子与裂纹尖端应力的对应关系，应力强度因子服从矢量合成法则，见公式（11）：

$$K_{\Sigma} = \sqrt{K_I^2 + K_{II}^2 + K_{III}^2} \dots\dots\dots (11)$$

8 疲劳扩展周期推断

$$\frac{db}{dN} = C(F_1 \Delta \sigma \sqrt{\pi b})^m = C_1 (\Delta \sigma)^m b^{\frac{m}{2}} \dots\dots\dots (12)$$

$$C_1 = C F_1^m \pi^{\frac{m}{2}} = C \left(\frac{\Delta K_I}{\Delta \sigma \sqrt{b}} \right)^m \dots\dots\dots (13)$$

$$N_c = \int_0^{N_c} dN = \frac{1}{(1-\frac{m}{2})C_1(\Delta \sigma)^m} \left(b_c^{1-\frac{m}{2}} - b_0^{1-\frac{m}{2}} \right) \dots\dots\dots (14)$$

通过计算可以得到曲轴寿命 N_c 。

与实验数据进行对比，如果寿命计算满足精度要求则输出。如果误差大于 50%，则重新修正曲轴裂纹疲劳分析模型。

9 结果分析

9.1 关键参数

结果分析聚焦以下核心参数：

a) 应力强度因子：

通过理论公式与有限元计算获得，表征曲轴裂纹尖端应力状态，为疲劳裂纹扩展分析基础；

- b) 疲劳裂纹扩展门槛值：
基于疲劳扩展速率公式及材料试验数据确定，反映材料抗疲劳性能临界值；
- c) 疲劳扩展划痕裂纹深度危险阈值：
由门槛值推导得出，用于评估初始缺陷扩展风险；
- d) 疲劳扩展周期：
依据应力强度因子与材料性能参数推算，直接表征曲轴疲劳寿命。

9.2 分析与改进

9.2.1 分析方法

- a) 基于力学理论的疲劳扩展划痕裂纹深度临界值分析方法：
 - 1) 适用于早期设计阶段的快速评估与参数优化。
 - 2) 具有较高的计算效率，可快速估计裂纹深度危险阈值。
 - 3) 支持对裂纹敏感性及相关参数（如截面半径、直径变化对应力强度因子的影响）开展定性研究与初步寿命校核。
 - 4) 尤其适用于简单构型的疲劳分析。
- b) 基于有限元方法的疲劳扩展划痕裂纹深度临界值分析方法：
 - 1) 适用于实际工程中复杂的曲轴结构（如多曲拐、含油孔、表面强化层等情形）。
 - 2) 能够处理多工况载荷、非线性材料行为以及局部应力集中效应。
 - 3) 可实现对裂纹前缘应力强度因子的云图显示与精确分析。
 - 4) 支持局部裂纹扩展行为预测、疲劳寿命评估与优化设计。
 - 5) 可用于验证理论方法中的假设合理性。
- c) 方法比较与选用：
 - 1) 理论分析法以数值计算为主，结果表现为单一数值输出；有限元法则提供场变量分布云图，更直观反映裂纹前缘力学状态。
 - 2) 两者在适用场景、分析精度和输出形态上形成互补：理论方法长于快速初步评估，有限元方法擅于精细复杂建模。
 - 3) 实际应用中，可首先采用理论方法进行必要的前期定性分析；若需深入考察局部行为或复杂边界条件，可进一步借助有限元方法，通过调整网格密度和求解设置，实现高保真度的裂纹扩展仿真。
 - 4) 若 a) 方法与 b) 方法计算结果不一致，以 b) 方法为准，尤其针对复杂几何或非线性工况。

9.2.2 结果分析

9.2.2.1 疲劳扩展划痕裂纹深度危险阈值理论定性分析

理论方法的阈值设置可适当放宽：

- a) 寿命评估：
若理论预测寿命低于设计要求的寿命的 2 倍，即判定为寿命不足，需进行参数优化或结构改进。
- b) 应力强度因子：
若计算的应力强度因子超过材料疲劳扩展门槛值的 1.5 倍，则认为存在较高裂纹扩展风险，需进一步分析。
- c) 裂纹扩展速率：
若理论计算的扩展速率高于材料相应 Paris 定律参考值的 1.3 倍，需复核载荷条件与材料参数。

9.2.2.2 基于有限元法进行裂纹疲劳计算分析

有限元方法可重点关注裂纹前缘分布：

- a) 寿命评估：若有限元预测寿命低于设计要求的寿命的 1.5 倍，即判定为寿命不足，需开展局部结构强化或工艺改进。
- b) 应力强度因子：若有限元计算的应力强度因子超过材料疲劳扩展门槛值的 1.5 倍，则认为存在较高裂纹扩展风险，需进行集合优化或者残余应力调控。

结果一致性判断：若理论与有限元结果不一致，以有限元方法为准，尤其针对复杂几何或非线性工况。

9.2.3 问题诊断

当通过上述计算得到异常结果时，应按照下列常见原因进行排查：

- a) 设计缺陷；
- b) 材料质量缺陷；
- c) 制造工艺偏差；
- d) 载荷估算误差；
- e) 运行不当。

9.2.4 改进措施

根据分析及问题诊断结果，可采取如下措施对船用柴油机设计进行优化：

- a) 当设计缺陷导致局部高应力时，应优化几何设计与载荷分布；
 - b) 当材料质量不足时，应严控原材料检测与热处理工艺；
 - c) 当初始缺陷尺寸超限时，应提升加工质量并加强出厂检测；
 - d) 当疲劳耐久不足时，可应用表面强化涂层（如喷丸、渗碳、氮化）提高抗裂能力；
 - e) 当载荷谱不准确时，应优化工况参数测量与载荷建模方法。
-