

强度计算的工程应用：船舶工程：船舶强度计算原理

1 绪论

1.1 强度计算在船舶工程中的重要性

船舶工程中，强度计算是确保船舶安全、可靠和经济运行的关键环节。它涉及对船舶结构在各种载荷作用下的响应进行分析，以评估其是否能够承受预期的环境和操作条件。强度计算不仅限于设计阶段，也贯穿于船舶的整个生命周期，包括建造、运营和维护。

1.1.1 重要性分析

1. **安全性：**强度计算确保船舶在恶劣海况下不会发生结构破坏，保护船员和货物的安全。
2. **可靠性：**通过计算，可以预测船舶结构的疲劳寿命，避免因结构失效导致的非计划停航。
3. **经济性：**合理的设计可以减少材料的使用，降低建造成本，同时优化结构布局，提高船舶的运营效率。

1.2 船舶设计的基本概念

船舶设计是一个复杂的过程，涉及多个学科的知识，包括流体力学、结构力学、材料科学等。设计阶段需要考虑的因素众多，从船舶的尺寸、形状到其动力系统、载荷分布等。

1.2.1 设计流程

1. **概念设计：**确定船舶的基本类型、尺寸和性能要求。
2. **初步设计：**基于概念设计，进行详细的结构布局和系统配置。
3. **详细设计：**完成所有图纸和计算，包括强度计算，以确保设计的可行性和安全性。
4. **生产设计：**将设计转化为具体的建造图纸和工艺流程。

1.2.2 关键设计要素

- **载荷分析：**包括静水载荷、波浪载荷、风载荷等，这些载荷将直接影响强度计算的结果。
- **结构分析：**评估船体结构在载荷作用下的应力和变形，确保结构的完整性和稳定性。
- **材料选择：**根据结构分析的结果，选择合适的材料以满足强度和

重量的要求。

- **安全系数**：在设计中引入安全系数，以应对不可预见的载荷和环境条件。

1.3 示例：船舶结构的有限元分析

在船舶工程中，有限元分析(FEA)是一种常用的强度计算方法。下面是一个使用 Python 和 FEniCS 库进行船舶结构有限元分析的简化示例。

```
# 导入必要的库
from fenics import *

# 创建网格和定义函数空间
mesh = UnitSquareMesh(8, 8)
V = VectorFunctionSpace(mesh, 'P', 1)

# 定义边界条件
def boundary(x, on_boundary):
    return on_boundary

bc = DirichletBC(V, Constant((0, 0)), boundary)

# 定义变量
u = TrialFunction(V)
v = TestFunction(V)
f = Constant((0, -10))

# 定义方程
F = dot(grad(u), grad(v))*dx - dot(f, v)*dx

# 求解
solve(F == 0, u, bc)

# 可视化结果
plot(u)
```

1.3.1 示例解释

在这个示例中，我们使用 FEniCS 库来模拟一个简单的二维结构在垂直载荷下的响应。UnitSquareMesh 创建了一个单位正方形的网格，VectorFunctionSpace 定义了位移的函数空间。边界条件通过 DirichletBC 设置，确保边界上的位移为零。TrialFunction 和 TestFunction 用于定义有限元方程中的变量，Constant 用于定义载荷。最后，solve 函数求解方程，plot 函数用于可视化结果。

请注意，实际的船舶结构分析远比这个示例复杂，需要考虑三维模型、复

杂的载荷分布、材料属性以及结构的非线性响应等。此示例仅用于说明有限元分析的基本流程。

通过上述内容，我们了解了强度计算在船舶工程中的重要性以及船舶设计的基本概念。强度计算确保了船舶的安全、可靠和经济运行，而设计流程和要素则为这一计算提供了必要的输入和框架。有限元分析作为强度计算的一种方法，展示了如何通过数学模型和计算机模拟来评估船舶结构的性能。

2 船舶结构与材料

2.1 船舶的主要结构部件

船舶的结构设计是确保其安全航行和长期服役的关键。主要结构部件包括：

- **船体**：船体是船舶的主体，由底部、侧壁、甲板和舱壁组成。底部和侧壁形成船的外壳，甲板提供工作和生活空间，舱壁则用于分隔不同的舱室。
- **龙骨**：位于船体底部的中心线，是船体的纵向支撑，承受船舶的重量和水动力。
- **肋骨**：横向结构，连接船体两侧，提供横向强度，防止船体在横向受力时变形。
- **甲板框架**：支撑甲板的结构，包括横梁和纵梁，确保甲板的稳定性和强度。
- **舱壁**：用于分隔船舱，不仅提供结构支撑，还起到防火、防水和隔离噪音的作用。
- **上层建筑**：包括驾驶室、船员居住区和货物处理区，通常位于主甲板之上，提供额外的结构强度和功能空间。

2.2 材料的力学性能

船舶工程中使用的材料需要具备特定的力学性能，以适应海洋环境的挑战。主要考虑的性能包括：

- **强度**：材料抵抗外力而不发生永久变形或断裂的能力。在船舶设计中，强度是确保结构完整性的关键。
- **韧性**：材料吸收能量并在冲击或快速载荷下不发生断裂的能力。韧性对于防止船舶在恶劣天气或碰撞中损坏至关重要。
- **耐腐蚀性**：由于船舶长期处于海水和盐雾环境中，材料需要具有良好的耐腐蚀性，以延长使用寿命。
- **焊接性**：船舶结构大量使用焊接技术，因此材料需要易于焊接，且焊接后保持良好的力学性能。
- **成本效益**：在满足性能要求的同时，材料的成本也是一个重要考虑因素，需要在性能和成本之间找到平衡。

2.2.1 示例：材料强度计算

假设我们正在设计一艘船舶的龙骨，需要计算所选材料的强度是否满足设计要求。我们使用 Python 进行计算，假设材料的屈服强度为 250MPa，设计载荷为 1000kN，龙骨的横截面积为 0.5m²。

```
# 定义材料和载荷参数
yield_strength = 250e6 # 屈服强度, 单位: Pa
design_load = 1000e3 # 设计载荷, 单位: N
cross_section_area = 0.5 # 龙骨横截面积, 单位: m2

# 计算应力
stress = design_load / cross_section_area

# 检查材料强度是否满足要求
if stress < yield_strength:
    print("材料强度满足设计要求。")
else:
    print("材料强度不满足设计要求, 需要选择更强度的材料。")
```

在这个例子中，我们首先定义了材料的屈服强度、设计载荷和龙骨的横截面积。然后，我们计算了在设计载荷下龙骨的应力。最后，我们检查计算出的应力是否小于材料的屈服强度，以确定材料是否满足设计要求。

2.2.2 示例数据

- 屈服强度：250MPa
- 设计载荷：1000kN
- 横截面积：0.5m²

通过上述代码和数据，我们可以计算出应力为 2000kPa（或 2MPa），远小于材料的屈服强度 250MPa，因此材料强度满足设计要求。

2.2.3 结论

船舶工程中的强度计算不仅需要考虑材料的力学性能，还需要综合考虑结构设计和实际载荷。通过精确的计算和合理的材料选择，可以确保船舶在各种海洋环境下的安全和可靠性。

3 强度计算的工程应用：船舶工程

3.1 基本力学原理

3.1.1 静力学基础

静力学是力学的一个分支，主要研究物体在力的作用下处于平衡状态的条件。在船舶工程中，静力学原理用于分析船舶在静止或缓慢移动时的稳定性，包括船舶的浮力、重力分布、倾覆力矩等。

3.1.1.1 浮力计算

船舶的浮力计算基于阿基米德原理，即船舶所受的浮力等于它排开的水的重量。假设船舶的排水体积为 V ，水的密度为 ρ ，则船舶的浮力 F_B 可以表示为：

$$F_B = \rho \cdot g \cdot V$$

其中， g 是重力加速度。

3.1.1.2 重力分布

船舶的重力分布直接影响其稳定性。重力中心（CG）的位置是关键参数，它决定了船舶在水中的平衡状态。重力中心的计算涉及船舶各部分的质量和位置，通常需要通过详细的船舶结构分析和质量分布计算得出。

3.1.1.3 倾覆力矩

倾覆力矩是船舶在侧向力作用下可能发生的翻转力矩。它可以通过计算船舶的重力力矩和浮力力矩的差值来确定。如果倾覆力矩为正，船舶将有翻转的趋势；如果为负，则船舶有恢复平衡的趋势。

3.1.2 动力学基础

动力学研究物体在力的作用下运动状态的变化。在船舶工程中，动力学原理用于分析船舶在波浪、风力等动态环境下的运动特性，包括横摇、纵摇、升沉等。

3.1.2.1 船舶运动方程

船舶在海上的运动可以简化为六个自由度：横摇、纵摇、升沉、横移、纵移和偏航。每个自由度的运动方程都可以表示为：

$$M \cdot \ddot{x} + C \cdot \dot{x} + K \cdot x = F(t)$$

其中， M 是质量矩阵， C 是阻尼矩阵， K 是刚度矩阵， $F(t)$ 是外力随时间变化的函数， x 是船舶的位移向量。

3.1.2.2 波浪力计算

波浪力是影响船舶动态行为的主要因素之一。波浪力的计算通常基于线性波浪理论，考虑波浪的频率、方向和高度。例如，波浪力 F_w 可以表示为：

$$F_w = \rho \cdot g \cdot A \cdot H_w \cdot \sin(\omega t + \phi)$$

其中， A 是船舶受波浪影响的面积， H_w 是波浪高度， ω 是波浪频率， ϕ 是相位角。

3.1.2.3 风力计算

风力对船舶的影响也不容忽视。风力的计算通常基于风速、风向和船舶的受风面积。例如，风力 F_w 可以表示为：

$$F_w = \frac{1}{2} \cdot \rho_a \cdot C_d \cdot A_w \cdot V_w^2$$

其中， ρ_a 是空气密度， C_d 是风阻系数， A_w 是船舶的受风面积， V_w 是风速。

3.2 示例：船舶浮力计算

假设我们有一艘排水体积为 $1000m^3$ 的船舶，水的密度为 $1000kg/m^3$ ，重力加速度为 $9.8m/s^2$ 。我们可以使用以下 Python 代码来计算船舶的浮力：

```
# 定义参数
V = 1000 # 排水体积, 单位: m^3
rho = 1000 # 水的密度, 单位: kg/m^3
g = 9.8 # 重力加速度, 单位: m/s^2

# 计算浮力
F_B = rho * g * V

# 输出结果
print("船舶的浮力为: ", F_B, "N")
```

这段代码首先定义了船舶的排水体积、水的密度和重力加速度，然后根据阿基米德原理计算浮力，并输出结果。在这个例子中，船舶的浮力为 $9800000N$ 。

3.3 示例：船舶运动方程求解

假设我们有一艘船舶在海上的横摇运动，可以简化为单自由度系统。我们使用以下 MATLAB 代码来求解船舶的横摇运动方程：

```
% 定义参数
M = 100000; % 质量, 单位: kg
C = 5000; % 阻尼系数, 单位: N/(m/s)
K = 1000000; % 刚度系数, 单位: N/m
F = @(t) 10000*sin(2*pi*t); % 外力函数, 单位: N
```

```
% 定义时间范围
tspan = [0 10];
y0 = [0 0]; % 初始条件: 位移为0, 速度为0

% 使用 ode45 求解微分方程
[t, y] = ode45(@(t,y) [y(2); (-C*y(2)-K*y(1)+F(t))/M], tspan, y0);

% 绘制位移随时间变化的曲线
plot(t, y(:,1));
xlabel('时间 (s)');
ylabel('横摇位移 (m)');
title('船舶横摇运动');
```

这段代码首先定义了船舶的质量、阻尼系数、刚度系数和外力函数，然后使用 MATLAB 的 `ode45` 函数求解横摇运动方程，并绘制出横摇位移随时间变化的曲线。通过调整参数，可以模拟不同条件下的船舶横摇运动。

3.4 结论

在船舶工程中，静力学和动力学原理是进行强度计算和船舶性能分析的基础。通过理解和应用这些原理，工程师可以确保船舶在各种环境条件下都能保持稳定和安全。

4 应力与应变分析

4.1 应力的概念与计算

4.1.1 应力的概念

应力（Stress）是材料内部单位面积上所承受的力，是衡量材料受力状态的重要物理量。在船舶工程中，应力分析对于确保船舶结构的安全性和可靠性至关重要。应力可以分为正应力（Normal Stress）和剪应力（Shear Stress）。

- **正应力**：当力垂直于材料表面时产生的应力，用符号 σ 表示。
- **剪应力**：当力平行于材料表面时产生的应力，用符号 τ 表示。

4.1.2 应力的计算

应力的计算公式为：

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

其中， σ 为应力， F 为作用力， A 为受力面积。

对于剪应力，计算公式为：

$$\tau = \frac{V}{A}$$

其中， τ 为剪应力， V 为剪切力， A 为剪切面积。

4.1.2.1 示例：计算钢板的正应力

假设一块钢板的厚度为 10mm，宽度为 1m，长度为 2m，受到垂直于其表面的力为 1000N。

```
# 定义变量
force = 1000 # N
width = 1 # m
length = 2 # m
thickness = 0.01 # m (10mm)

# 计算受力面积
area = width * thickness

# 计算正应力
stress = force / area

# 输出结果
print(f"正应力为: {stress} Pa")
```

4.2 应变的概念与测量

4.2.1 应变的概念

应变（Strain）是材料在受力作用下发生的形变程度，是无量纲的物理量。应变分为线应变（Linear Strain）和剪应变（Shear Strain）。

- 线应变：材料在受力方向上的长度变化与原长度的比值，用符号 ε 表示。
- 剪应变：材料在剪切力作用下发生的角变化，用符号 γ 表示。

4.2.2 应变的测量

应变的测量通常使用应变片（Strain Gauge）。应变片是一种能够将机械形变转换为电阻变化的传感器，通过测量电阻的变化来计算应变。

4.2.2.1 示例：使用应变片测量钢板的线应变

假设钢板在受力后长度增加了 0.001m，原长度为 2m。

```
# 定义变量
original_length = 2 # m
length_change = 0.001 # m
```

```
# 计算线应变
linear_strain = length_change / original_length

# 输出结果
print(f"线应变为: {linear_strain}")
```

4.2.3 应力-应变关系

在船舶工程中，应力与应变之间的关系通常通过材料的应力-应变曲线来描述。在弹性范围内，应力与应变成正比，比例常数为材料的弹性模量（E）。

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

4.2.3.1 示例：计算钢板的弹性模量

假设钢板的正应力为 100MPa，线应变为 0.001。

```
# 定义变量
stress = 100e6 # Pa (100MPa)
linear_strain = 0.001

# 计算弹性模量
elastic_modulus = stress / linear_strain

# 输出结果
print(f"弹性模量为: {elastic_modulus} Pa")
```

4.2.4 小结

在船舶工程中，应力与应变分析是评估船舶结构强度和安全性的基础。通过计算应力和应变，可以确定材料是否在弹性范围内工作，以及是否有可能发生塑性变形或断裂。应变片的使用为实际测量应变提供了便利，而应力-应变曲线则帮助工程师理解材料的力学性能。

5 强度计算方法

在船舶工程中，强度计算是确保船舶安全性和结构完整性的关键步骤。本教程将深入探讨两种主要的强度计算方法：有限元分析和规范计算方法。

5.1 有限元分析

5.1.1 原理

有限元分析（Finite Element Analysis, FEA）是一种数值方法，用于预测工程结构在各种载荷条件下的行为。它将复杂的结构分解成许多小的、简单的部分，

称为“有限元”，然后对每个部分进行分析，最后将结果组合起来，以获得整个结构的性能。

5.1.2 内容

- **网格划分**：将船舶结构模型划分为有限数量的单元。
- **材料属性**：定义每个单元的材料属性，如弹性模量、泊松比等。
- **边界条件**：设定模型的约束和载荷，如波浪载荷、自重等。
- **求解**：使用数值方法求解结构的应力、应变和位移。

5.1.3 示例

假设我们正在分析一艘小型船舶的船体结构，使用 Python 的 FEniCS 库进行有限元分析。

```
from fenics import *

# 创建网格
mesh = Mesh("ship.xml")

# 定义函数空间
V = VectorFunctionSpace(mesh, 'Lagrange', 2)

# 定义边界条件
def boundary(x, on_boundary):
    return on_boundary

bc = DirichletBC(V, Constant((0, 0)), boundary)

# 定义材料属性
E = 210e9 # 弹性模量
nu = 0.3 # 泊松比
mu = E/(2*(1+nu))
lmbda = E*nu/((1+nu)*(1-2*nu))

# 定义应力和应变的关系
def sigma(v):
    return lmbda*tr(eps(v))*Identity(2) + 2.0*mu*eps(v)

# 定义变分问题
u = TrialFunction(V)
v = TestFunction(V)
f = Constant((0, -10))
T = Constant((1, 0))
a = inner(sigma(u), eps(v))*dx
L = dot(f, v)*dx + dot(T, v)*ds
```

```
# 求解
u = Function(V)
solve(a == L, u, bc)

# 输出结果
file = File("displacement.pvd")
file << u
```

在这个例子中，我们首先加载了船舶的网格模型，然后定义了函数空间、边界条件、材料属性，并设置了应力和应变的关系。通过求解变分问题，我们得到了船舶结构的位移，最后将结果输出为.pvd 文件，以便于可视化。

5.2 规范计算方法

5.2.1 原理

规范计算方法是基于行业标准和规范的计算方法，用于评估船舶结构的强度和稳定性。这些规范通常由国际海事组织（IMO）或船级社（如 DNV GL、LR 等）制定。

5.2.2 内容

- **载荷计算：**根据规范确定船舶可能遇到的载荷，如风载荷、波浪载荷等。
- **结构分析：**使用规范中的公式和图表，计算结构的应力和强度。
- **安全评估：**比较计算结果与规范要求，评估船舶结构的安全性。

5.2.3 示例

考虑计算船舶在特定海况下的波浪载荷，我们可以使用 IMO 的规则进行计算。以下是一个简化示例，使用 Python 进行计算：

```
# 假设数据
L = 100.0 # 船长
B = 20.0 # 船宽
T = 5.0 # 波周期
H = 10.0 # 波高

# 根据 IMO 规则计算波浪载荷
def calculate_wave_load(L, B, T, H):
    # 简化公式，实际计算应参考 IMO 规范
    F_wave = 0.5 * 1.025 * B * H**2 * (2 * pi / T)**2
    return F_wave
```

计算

```
F_wave = calculate_wave_load(L, B, T, H)
print("波浪载荷: ", F_wave, "N")
```

在这个例子中，我们定义了一个函数 `calculate_wave_load`，它使用简化公式计算波浪载荷。实际应用中，应参考 IMO 的详细规范进行更精确的计算。

通过以上两种方法，船舶工程师可以全面评估船舶结构的强度，确保设计符合安全标准。

6 船舶强度设计标准

6.1 国际海事组织(IMO)标准

6.1.1 标准概述

国际海事组织（IMO）制定了一系列船舶设计和建造的标准，旨在确保船舶的安全性和可靠性。这些标准覆盖了船舶的结构强度、稳性、防火、救生设备、航行安全等多个方面。在结构强度领域，IMO 标准着重于规范船舶在各种海况下的承受能力，防止结构失效，保障人员和货物的安全。

6.1.2 核心原则

- **安全裕度**：设计时必须考虑一定的安全裕度，以应对不可预见的载荷和环境条件。
- **极限状态设计**：采用极限状态设计方法，区分永久载荷、可变载荷和偶然载荷，确保在最不利组合下船舶结构的完整性。
- **疲劳和腐蚀**：考虑材料的疲劳和腐蚀对结构强度的影响，设定相应的维护和检查周期。

6.1.3 示例：IMO 对船舶结构强度的计算要求

IMO 的《国际完整稳性和船舶强度规则》（Intact Stability and Strength of Ships Code）中，规定了船舶结构强度的计算方法。例如，对于船舶的总纵强度计算，IMO 要求使用以下公式：

$$S = M / W$$

其中：- S 是船舶的总纵强度系数。- M 是船舶在最不利海况下的最大弯矩。- W 是船舶结构的抗弯截面模量。

6.1.4 数据样例

假设一艘船舶在设计时，计算得到其在最不利海况下的最大弯矩 M 为 100000 kNm，而其结构的抗弯截面模量 W 为 25000 m³，则其总纵强度系数 S 可以计算如下：

$$S = 100000 \text{ kNm} / 25000 \text{ m}^3 = 4 \text{ kN/m}$$

根据 IMO 标准，这个值需要与规定的安全值进行比较，以确保船舶的结构强度满足要求。

6.2 美国船舶局(ABS)规范

6.2.1 规范概述

美国船舶局（ABS）是全球领先的船舶和海洋工程结构认证机构之一，其规范详细规定了船舶设计、建造和维护的各个方面，包括结构强度、材料选择、焊接标准等。ABS 规范与 IMO 标准相辅相成，为船舶行业提供了更具体、更详细的设计指导。

6.2.2 核心原则

- **材料规范：**ABS 规范详细规定了船舶结构材料的性能要求，包括钢材、铝合金等。
- **焊接标准：**提供了焊接工艺和质量控制的详细指导，确保焊接部位的强度和可靠性。
- **结构分析：**要求进行详细的结构分析，包括有限元分析，以验证设计的合理性。

6.2.3 示例：ABS 规范中的结构分析要求

ABS 规范要求船舶设计时进行结构分析，以验证其在各种载荷下的强度和稳定性。其中，有限元分析（FEA）是一种常用的方法。以下是一个使用 Python 进行简单有限元分析的例子，计算船舶某部分结构的应力分布：

```
# 导入必要的库
import numpy as np
from scipy.sparse import lil_matrix
from scipy.sparse.linalg import spsolve

# 定义节点和单元
nodes = np.array([[0, 0], [1, 0], [1, 1], [0, 1]])
elements = np.array([[0, 1], [1, 2], [2, 3], [3, 0]])

# 定义材料属性和截面属性
E = 200e9 # 弹性模量，单位：Pa
nu = 0.3 # 泊松比
t = 0.01 # 板厚，单位：m
A = t # 截面积，单位：m^2
I = t**3 / 12 # 惯性矩，单位：m^4

# 定义外力
F = np.array([0, -1000]) # 单位：N
```

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/958025001046006133>