

# 强度计算的工程应用：船舶工程：船舶结构力学基础

## 1 船舶结构力学概述

### 1.1 船舶结构力学的重要性

船舶结构力学是船舶工程中的一个核心分支，它研究船舶在各种载荷作用下的结构响应，包括变形、应力和稳定性。这一领域的深入理解对于设计安全、高效和经济的船舶至关重要。船舶在航行中会遇到波浪、风力、水流等自然力，以及自身重量、货物重量、机械振动等内部载荷。结构力学帮助工程师预测这些载荷对船舶结构的影响，确保船舶在设计寿命内能够承受这些载荷而不发生破坏。

#### 1.1.1 作用与挑战

- **作用：**通过结构力学分析，可以优化船舶设计，减少材料使用，降低成本，同时保证结构强度和刚度满足安全要求。
- **挑战：**船舶结构复杂，载荷多变，需要考虑的工况广泛，如极端天气条件下的航行、碰撞、搁浅等，这要求结构力学分析必须全面且精确。

### 1.2 船舶结构的基本类型

船舶结构可以分为两大类：主船体结构和上层建筑结构。

#### 1.2.1 主船体结构

主船体结构是船舶的基础，包括船底、船侧、甲板、舱壁和龙骨等部分。这些结构共同作用，承受船舶在水中的浮力、波浪冲击力、自重和货物重量等。

##### 1.2.1.1 船底结构

船底结构主要由平板龙骨、底纵桁、底横桁和底板组成。平板龙骨是船底的中心线，是船体强度的主要承载部分。底纵桁和底横桁提供纵向和横向的支撑，增强船底的刚性。

##### 1.2.1.2 船侧结构

船侧结构包括船壳板、侧纵桁、侧横桁和肋骨。船壳板直接与水接触，承受水压力。侧纵桁和侧横桁以及肋骨提供结构支撑，确保船侧的强度和稳定性。

### 1.2.1.3 甲板结构

甲板结构包括上甲板、下甲板和舱口盖。上甲板是船舶的顶部，承受货物重量和人员活动的载荷。下甲板则提供内部空间的分隔和支撑。舱口盖用于货物的装卸，需要设计成能够承受风浪和货物堆叠的载荷。

## 1.2.2 上层建筑结构

上层建筑结构包括驾驶室、生活区、货舱和各种设备安装平台。这些结构不仅提供必要的功能空间，还必须考虑其对船舶稳性和航行性能的影响。

### 1.2.2.1 驾驶室和生活区

驾驶室和生活区通常位于船舶的前部或中部，设计时需要考虑人员的安全和舒适性，同时确保结构强度，以应对航行中的各种载荷。

### 1.2.2.2 货舱

货舱的设计必须考虑到货物的重量分布、装卸操作的安全性以及货物在航行过程中的稳定性。货舱的结构强度直接影响到船舶的整体安全。

### 1.2.2.3 设备安装平台

设备安装平台用于安装船舶的各种机械设备，如发动机、发电机、导航设备等。这些平台的设计必须考虑到设备的重量和振动，以及在恶劣海况下的安全性。

## 1.3 结构分析方法

船舶结构力学分析通常采用有限元方法(FEM)。有限元方法是一种数值分析技术，可以将复杂的结构分解成许多小的、简单的单元，然后对每个单元进行独立的力学分析，最后将结果综合起来，得到整个结构的力学响应。

### 1.3.1 有限元分析示例

假设我们正在分析一艘货船的甲板结构，使用有限元分析软件进行建模和分析。

*# 以下是一个简化的有限元分析代码示例，使用 Python 和 FEniCS 库*

```
from dolfin import *  
  
# 创建网格  
mesh = UnitSquareMesh(10, 10)
```

```

# 定义函数空间
V = FunctionSpace(mesh, 'P', 1)

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

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

# 定义变分问题
u = TrialFunction(V)
v = TestFunction(V)
f = Constant(-10) # 假设甲板上每平方米有 10N 的载荷
g = Constant(0) # 假设边界上没有载荷

# 定义方程
a = dot(grad(u), grad(v))*dx
L = f*v*dx + g*v*ds

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

# 输出结果
plot(u)
interactive()

```

### 1.3.2 解释

在上述示例中，我们首先创建了一个单位正方形网格来代表甲板的一部分。然后定义了函数空间，这是有限元分析中的一个数学概念，用于描述可能的解空间。接着，我们定义了边界条件，假设所有边界上的位移为 **0**，这代表甲板被固定在船体上。我们定义了变分问题，其中 **a** 是刚度矩阵，**L** 是载荷向量。最后，我们求解了变分问题，并将结果可视化，以检查甲板在载荷作用下的变形情况。

通过这样的分析，工程师可以评估甲板的结构强度，确保其在各种载荷作用下不会发生过大的变形或破坏，从而保证船舶的安全性和可靠性。

## 2 材料力学基础

### 2.1 应力与应变的概念

#### 2.1.1 应力

应力 (Stress) 是材料力学中的基本概念，定义为单位面积上的内力。在船舶工程中，应力分析对于确保船舶结构的安全至关重要。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作用时产生的应力，用符号  $\sigma$  表示。正应力可以是拉应力 (Tensile Stress) 或压应力 (Compressive Stress)，取决于力的方向。
- **剪应力**：当力平行于材料表面作用时产生的应力，用符号  $\tau$  表示。剪应力会导致材料内部产生相对滑动。

#### 2.1.2 应变

应变 (Strain) 是材料在应力作用下发生的形变程度，没有单位。应变分为线应变 (Linear Strain) 和剪应变 (Shear Strain)。

- **线应变**：材料在拉伸或压缩时长度的变化与原长的比值，用符号  $\epsilon$  表示。
- **剪应变**：材料在剪切力作用下角度的变化，用符号  $\gamma$  表示。

#### 2.1.3 应力-应变关系

在材料力学中，应力与应变之间的关系通常通过应力-应变曲线来描述。对于线弹性材料，应力与应变之间遵循胡克定律 (Hooke's Law)，即应力与应变成正比，比例常数为材料的弹性模量 (Modulus of Elasticity)。

##### 2.1.3.1 示例：计算正应力

假设船舶的某一结构件受到的力为 1000N，作用面积为 0.01m<sup>2</sup>。

```
# 定义力和面积
force = 1000 # 单位：牛顿 (N)
area = 0.01 # 单位：平方米 (m2)

# 计算正应力
normal_stress = force / area

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

### 2.1.4 计算结果解释

上述代码计算了船舶结构件在 1000N 力作用下的正应力，结果为 100000Pa，即 100kPa。这表示每平方米的面积上承受了 100kN 的力。

## 2.2 材料的力学性能

材料的力学性能是其在不同应力状态下的响应特性，对于船舶工程而言，理解材料的力学性能对于设计和评估船舶结构至关重要。

### 2.2.1 弹性模量

弹性模量（Modulus of Elasticity）是材料在弹性范围内应力与应变的比值，反映了材料抵抗弹性变形的能力。对于金属材料，弹性模量通常在 100GPa 到 300GPa 之间。

### 2.2.2 屈服强度

屈服强度（Yield Strength）是材料开始发生永久形变时的应力值。在船舶工程中，选择屈服强度高的材料可以提高结构的安全性和可靠性。

### 2.2.3 抗拉强度

抗拉强度（Tensile Strength）是材料在拉伸过程中所能承受的最大应力。对于船舶的甲板、船体等承受拉伸力的结构，抗拉强度是一个关键的设计参数。

### 2.2.4 断裂韧性

断裂韧性（Fracture Toughness）是材料抵抗裂纹扩展的能力。在海洋环境中，船舶结构可能受到腐蚀和疲劳的影响，断裂韧性高的材料可以减少裂纹的形成和扩展，提高结构的寿命。

### 2.2.5 疲劳极限

疲劳极限（Fatigue Limit）是材料在重复应力作用下不发生疲劳破坏的最大应力值。船舶在航行中会经历周期性的载荷，疲劳极限是评估材料在动态载荷下性能的重要指标。

### 2.2.6 示例：计算材料的弹性模量

假设在拉伸试验中，材料的长度变化了 0.002m，原长为 1m，所受力为 1000N，作用面积为 0.01m<sup>2</sup>。

```
# 定义力、面积、长度变化和原长
force = 1000 # 单位：牛顿 (N)
area = 0.01 # 单位：平方米 (m2)
```

```

delta_length = 0.002 # 单位: 米 (m)
original_length = 1 # 单位: 米 (m)

# 计算正应力和线应变
normal_stress = force / area
linear_strain = delta_length / original_length

# 计算弹性模量
elastic_modulus = normal_stress / linear_strain

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

```

## 2.2.7 计算结果解释

上述代码计算了材料在拉伸试验中的弹性模量，结果为 500000000Pa，即 500MPa。这表示材料在弹性范围内，应力与应变的比值为 500MPa，反映了材料抵抗弹性变形的能力。

通过理解和应用这些材料力学基础概念，船舶工程师可以更准确地评估和设计船舶结构，确保其在各种载荷条件下的安全性和可靠性。

# 3 静力学分析

## 3.1 船舶的浮力与重力平衡

在船舶工程中，确保船舶在水面上稳定且安全地漂浮是设计过程中的关键步骤。这涉及到船舶的浮力与重力之间的平衡。浮力是水对船舶向上施加的力，而重力则是船舶自身的重量。为了保持平衡，船舶的浮力必须等于其重力。

### 3.1.1 原理

船舶的浮力可以通过阿基米德原理来计算，即船舶排开水的体积乘以水的密度。船舶的重力则由其总质量决定，包括船体、货物、燃料、水等所有重量的总和。在设计阶段，工程师会使用船舶的几何形状和材料密度来预测其浮力和重力，确保在各种载荷条件下，船舶都能保持正浮。

### 3.1.2 内容

1. **船舶几何形状的分析：** 确定船舶的排水体积，这是计算浮力的基础。
2. **水的密度：** 考虑到海水和淡水的密度差异，以及温度和盐度对水密度的影响。
3. **船舶质量的计算：** 包括船体结构、设备、货物、燃料和水的总质

量。

4. **浮力与重力的平衡计算**：确保在不同载荷条件下，船舶的浮力始终等于或略大于其重力，以提供足够的储备浮力。

## 3.2 静水压力的计算

静水压力是水对船舶底部和侧面施加的压力，是船舶设计中必须考虑的重要因素。它影响船舶的结构强度和稳定性，特别是在深水和恶劣天气条件下。

### 3.2.1 原理

静水压力的计算基于水静力学原理，即水的压力随深度增加而增加。压力的计算公式为：

$$P = \rho gh$$

其中， $P$ 是压力， $\rho$ 是水的密度， $g$ 是重力加速度， $h$ 是水的深度。

### 3.2.2 内容

1. **水静力学原理的应用**：理解水压力随深度线性增加的规律。
2. **计算船舶底部和侧面的静水压力**：根据船舶的吃水深度和水线以下的形状，计算不同部位的静水压力。
3. **考虑水密度的变化**：在不同海域和季节，水的密度会有所不同，这需要在计算中加以考虑。
4. **评估静水压力对船舶结构的影响**：确保船舶结构能够承受最大预期的静水压力，特别是在设计吃水线以下的结构时。

### 3.2.3 示例

假设我们有一艘船舶，其吃水深度为  $5m$ ，位于密度为  $1025kg/m^3$  的海水中。我们想要计算船舶底部某点的静水压力。

```
# 定义常量
rho = 1025 # 水的密度，单位：kg/m^3
g = 9.81 # 重力加速度，单位：m/s^2
h = 5 # 吃水深度，单位：m

# 计算静水压力
P = rho * g * h
print(f"静水压力为：{P} Pa")
```

这段代码将输出船舶底部某点的静水压力，单位为帕斯卡(Pa)。通过调整 $h$ 的值，可以计算不同深度的静水压力，这对于评估船舶在不同载荷条件下的结构强度至关重要。

通过以上分析和计算，工程师可以确保船舶在设计和建造过程中，能够安全地承受各种静力学载荷，包括浮力与重力的平衡以及静水压力的影响，从而提高船舶的稳定性和安全性。

## 4 结构强度计算

### 4.1 梁的弯曲理论

#### 4.1.1 理论基础

梁的弯曲理论是船舶结构力学中的一个关键部分，主要研究梁在横向载荷作用下产生的弯曲变形和应力分布。梁的弯曲理论基于欧拉-伯努利梁理论，该理论假设梁是均匀、各向同性的，并且在弯曲时，梁的中性轴保持直线，横截面保持平面。根据这些假设，可以推导出梁的弯曲方程，用于计算梁的挠度、转角、弯矩和剪力。

#### 4.1.2 弯曲方程

梁的弯曲方程通常表示为：

$$\frac{d^2w}{dx^2} = -\frac{M(x)}{EI}$$

其中， $w$  是梁的挠度， $M(x)$  是弯矩， $E$  是弹性模量， $I$  是截面惯性矩。这个方程表明，梁的弯曲程度与弯矩、弹性模量和截面惯性矩有关。

#### 4.1.3 弹性模量和截面惯性矩

弹性模量  $E$  描述了材料抵抗弹性变形的能力，对于钢材，其值大约为  $200 \times 10^9$  Pa。截面惯性矩  $I$  则是描述梁截面抵抗弯曲变形的几何属性，其计算公式为：

$$I = \int_A y^2 dA$$

其中， $A$  是截面面积， $y$  是截面上某点到中性轴的距离。

#### 4.1.4 示例：计算梁的挠度

假设有一根简支梁，长度为  $L = 4$  m，承受均布载荷  $q = 10$  kN/m，材料为钢材，弹性模量  $E = 200 \times 10^9$  Pa，截面为矩形，宽度  $b = 0.2$  m，高度  $h = 0.1$  m。计算梁中点的挠度。

##### 4.1.4.1 计算截面惯性矩

$$I = \frac{bh^3}{12} = \frac{0.2 \times 0.1^3}{12} = 1.667 \times 10^{-5} \text{ m}^4$$

#### 4.1.4.2 计算弯矩

对于简支梁，最大弯矩发生在中点，计算公式为：

$$M_{max} = \frac{qL^2}{8} = \frac{10 \times 4^2}{8} = 20 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

#### 4.1.4.3 计算挠度

根据梁的弯曲方程，梁中点的挠度计算公式为：

$$w_{max} = \frac{M_{max}L^2}{8EI} = \frac{20 \times 4^2}{8 \times 200 \times 10^9 \times 1.667 \times 10^{-5}} = 0.00025 \text{ m}$$

#### 4.1.5 Python 代码示例

```
# 定义参数
L = 4 # 梁的长度, 单位: m
q = 10e3 # 均布载荷, 单位: N/m
E = 200e9 # 弹性模量, 单位: Pa
b = 0.2 # 截面宽度, 单位: m
h = 0.1 # 截面高度, 单位: m

# 计算截面惯性矩
I = (b * h**3) / 12

# 计算最大弯矩
M_max = (q * L**2) / 8

# 计算最大挠度
w_max = (M_max * L**2) / (8 * E * I)

# 输出结果
print(f"梁中点的挠度为: {w_max:.6f} m")
```

### 4.2 船舶结构的强度评估

#### 4.2.1 强度评估的重要性

船舶结构的强度评估是确保船舶安全航行的关键步骤。它涉及到对船舶在各种载荷条件下的结构响应进行分析，包括波浪载荷、风载荷、自重、货物重量等，以确保结构能够承受这些载荷而不发生破坏。

## 4.2.2 评估方法

船舶结构的强度评估通常采用有限元分析（FEA）方法。FEA 是一种数值模拟技术，可以将复杂的结构分解为许多小的、简单的单元，然后对每个单元进行独立的力学分析，最后将所有单元的结果综合起来，得到整个结构的力学响应。

## 4.2.3 示例：使用有限元分析评估船舶结构

假设需要评估一艘船的甲板结构在波浪载荷下的强度。可以使用有限元软件，如 ANSYS 或 ABAQUS，建立甲板结构的三维模型，然后施加波浪载荷，进行强度分析。

### 4.2.3.1 建立模型

在有限元软件中，首先需要定义材料属性、几何形状和网格划分。

### 4.2.3.2 施加载荷

根据船舶航行的海域和条件，确定波浪载荷的大小和方向，然后在模型中施加载荷。

### 4.2.3.3 分析结果

分析完成后，可以查看模型中各部分的应力和变形，以评估结构的强度和稳定性。

## 4.2.4 Python 代码示例（简化版）

虽然实际的船舶结构强度评估通常在专业的有限元软件中进行，但可以使用 Python 的 NumPy 和 SciPy 库来简化计算，例如计算梁的弯曲应力。

```
import numpy as np

# 定义参数
M = 20e3 # 弯矩, 单位: N*m
I = 1.667e-5 # 截面惯性矩, 单位: m^4
y = 0.05 # 距离中性轴的距离, 单位: m

# 计算弯曲应力
sigma = (M * y) / I

# 输出结果
print(f"梁的弯曲应力为: {sigma:.2f} Pa")
```

### 4.2.5 结论

通过梁的弯曲理论和船舶结构的强度评估，可以深入理解船舶工程中结构力学的基础，这对于设计和维护船舶结构至关重要。上述示例和代码提供了基本的计算方法，但在实际工程应用中，需要更复杂的分析和更详细的考虑。

## 5 船舶结构设计原则

### 5.1 结构设计的基本要求

船舶结构设计是船舶工程中的关键环节，它直接关系到船舶的安全性、经济性和使用寿命。设计时，必须满足以下基本要求：

1. **安全性：**结构应能承受在设计寿命内可能遇到的各种载荷，包括静载荷、动载荷、环境载荷等，确保船舶在各种工况下都能安全运行。
2. **经济性：**在满足安全性的前提下，结构设计应追求经济性，合理选择材料，优化结构形式，减少建造和维护成本。
3. **可靠性：**结构设计应考虑材料的疲劳、腐蚀等长期性能，确保船舶在设计寿命内具有足够的可靠性。
4. **适应性：**结构应能适应船舶的使用环境和任务需求，如抗冰、抗风浪等。
5. **可维护性：**结构设计应便于检查和维护，减少维修时间和成本。
6. **环保性：**设计时应考虑减少对环境的影响，如减少油漆使用，采用环保材料等。

### 5.2 材料选择与结构优化

#### 5.2.1 材料选择

船舶结构材料的选择直接影响到船舶的性能和成本。常见的船舶结构材料包括：

- **钢材：**由于其良好的强度、韧性和焊接性能，钢材是船舶结构中最常用的材料。
- **铝合金：**在高速船和小型游艇中，铝合金因其轻质和良好的耐腐蚀性而被广泛使用。
- **复合材料：**如玻璃纤维增强塑料（GRP）、碳纤维增强塑料（CFRP）等，这些材料在减轻重量、提高强度方面有显著优势，适用于特殊用途的船舶。

选择材料时，需要考虑材料的强度、韧性、耐腐蚀性、成本、可加工性等因素。

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/927026106053006160>