

SZZ 国考生存手册

State Final Examination Survival Kit

Czech Technical University in Prague (FEE)

Yuan Weize

January 2026

Contents

I	答辩策略 / Defense Strategy	4
1	答辩策略分析 / Defense Strategy Analysis	4
1.1	对手画像 / Opponent Profile: Jan Koller	4
1.2	你论文的问题 / Issues in Your Thesis	4
1.3	必答题: “Why Acc + Gyro?”	5
1.4	你的真实实现 / Your Actual Implementation	6
1.5	其他押题 / Other Predicted Questions	6
1.6	最终检查清单 / Final Checklist	7
II	数学基础 / Mathematics Foundation	7
2	线性代数 / Linear Algebra	7
3	数值方法 / Numerical Methods (BE5B01DEN)	10
4	微分方程 / Differential Equations (BE5B01DEN)	14
5	离散数学 / Discrete Mathematics (BE5B01DMG)	18
6	Graph Theory (DMG)	22
6.1	Concepts / 核心概念	22
6.2	Formulas / 公式	22
6.3	Exam Questions / 常考题型	23
7	概率与统计 / Probability & Statistics (BE5B01PRS)	23
III	物理基础 / Physics Foundation	26
8	力学 / Mechanics (BE5B02PH1)	27
9	振动 / Oscillations (BE5B02PH1)	31
10	物理场 / Physical Fields (BE5B02PH1)	33

11 热力学 / Thermodynamics (BE5B02PH2)	36
12 波动与光学 / Waves & Optics (BE5B02PH2)	38
IV 电子与计算机核心 / EECS Core	41
13 电路理论 / Circuit Theory (BE5B31ZEO)	42
14 Semiconductors (ELP)	47
14.1 Concepts / 核心概念	47
14.2 Formulas / 公式	47
14.3 Exam Questions / 常考题型	47
15 Analog & Digital Circuits (ELP)	47
15.1 Concepts / 核心概念	47
15.2 Formulas / 公式	47
15.3 Exam Questions / 常考题型	48
16 微处理器与嵌入式系统 / Microprocessors & Embedded Systems	48
17 Algorithms (PRG/PGE)	52
17.1 Concepts / 核心概念	53
17.2 Formulas / 公式	53
17.3 Exam Questions / 常考题型	53
V 专业方向 / Specialization	53
18 Electromagnetic Field Theory (EMT)	53
18.1 Concepts / 核心概念	53
18.2 Formulas / 公式	54
18.3 Exam Questions / 常考题型	54
19 Logic Systems (LSP)	54
19.1 Concepts / 核心概念	54
19.2 Formulas / 公式	54
19.3 Exam Questions / 常考题型	55
20 Signals & Systems (TES)	55
20.1 Concepts / 核心概念	55
20.2 Formulas / 公式	55
20.3 Exam Questions / 常考题型	55
21 Electrical Machines (SP1)	56
21.1 Concepts / 核心概念	56
21.2 Formulas / 公式	56
21.3 Exam Questions / 常考题型	56
22 Materials (MVE)	57
22.1 Concepts / 核心概念	57
22.2 Formulas / 公式	57
22.3 Exam Questions / 常考题型	57

23 Power Systems (EN1/EN2)	58
23.1 Concepts / 核心概念	58
23.2 Formulas / 公式	58
23.3 Exam Questions / 常考题型	58
24 AI & Classification (KUI/RPZ)	59
24.1 Concepts / 核心概念	59
24.2 Formulas / 公式	59
24.3 Exam Questions / 常考题型	59
25 计算机体系结构 / Computer Architecture	60
26 控制系统 / Control Systems	64

Part I

答辩策略 / Defense Strategy

1 答辩策略分析 / Defense Strategy Analysis

1.1 对手画像 / Opponent Profile: Jan Koller

核心结论 / Executive Summary

Jan Koller 是一个「务实但挑剔的学究」(Pragmatic Pedant)。

关键特征 (基于 11 份历史论文分析):

- **比导师更严格:** 他经常给出比导师低一级的分数
- **热爱硬件:** 如果你做了实物 (PCB、传感器), 他会有初始好感
- **痛恨形式错误:** “非典型流程图”或“缺失单位”是他的触发点

你的评分:

角色	评分	评语关键词
Supervisor (Husák)	A (Excellent)	积极评价
Opponent (Koller)	B (Very Good)	“流程图有点非典型”

1.2 你论文的问题 / Issues in Your Thesis

Koller 的批评 (Source: opponent_report_Koller.pdf)

原文批评:

“The flow charts are sometimes little bit atypical.”
(流程图有时有点非典型。)

分析: 这印证了他「形式主义」的特点。他仔细查看了你的图表。标准 UML/ISO 流程图符号对他很重要。

应对措施: 在 PPT 中确保流程图使用标准符号:

- **菱形** = 判断 (Decision)
- **矩形** = 过程 (Process)
- **圆角矩形** = 开始/结束 (Start/End)
- **平行四边形** = 输入/输出 (I/O)

1.3 必答题: “Why Acc + Gyro?”

Koller 的答辩真题 (100% 会问)

问题 (英文):

“Can you explain why a combination of acceleration and angular velocity is used in fall detection?”

问题 (中文):

你能解释为什么跌倒检测要结合使用加速度和角速度吗?

满分回答 / The Perfect Answer

英文话术 (建议背诵):

“Distinguished opponent, thank you for the question.

We use the combination because **Acceleration alone generates false positives**.

1. **Acceleration (Accelerometer)** measures the *impact force* (G-force). However, sitting down quickly or jumping also creates high G-force.
2. **Angular Velocity (Gyroscope)** measures the *change in orientation* (spatial rotation).

A true fall has a specific signature:

- **Phase 1:** Rapid change in orientation (Gyro spikes) as the body loses balance.
- **Phase 2:** High impact force (Acc spikes) when hitting the ground.
- **Phase 3:** Static orientation (User is lying horizontal).

By fusing both sensors (**Sensor Fusion**), we can filter out daily activities like jumping.”

中文解释:

单靠加速度计会有误报。

- **加速度计**测的是冲击力。但快速坐下或跳跃也会产生大冲击力。
- **陀螺仪**测的是姿态变化。

真正的跌倒有一个特征链条:

1. 先是失去平衡导致姿态剧烈变化 (陀螺仪峰值)
2. 然后是撞击地面导致冲击力 (加速度峰值)
3. 最后是躺在地上不动 (姿态静止)

只有**传感器融合 (Sensor Fusion)** 才能区分 “真跌倒” 和 “剧烈运动”。

1.4 你的真实实现 / Your Actual Implementation

核心公式 / Key Formula

传感器: MPU6050 6-axis IMU (I2C Address: 0x68)

算法: 双阈值法 (Dual-Threshold Algorithm)

来源: Huynh et al., J. Sensors, vol. 2015, Art. no. 452078

阈值定义 (from esp32s3.yaml):

$$\text{UFT_ACC} = 2.4 \text{ G} \quad (\text{SMV 阈值}) \quad (1)$$

$$\text{UFT_GYRO} = 240.0^\circ/\text{s} \quad (\text{角速度阈值}) \quad (2)$$

跌倒判定条件:

$$\text{Fall} = (\text{SMV} > 2.4 \text{ G}) \wedge (\omega > 240^\circ/\text{s}) \quad (3)$$

性能 (Huynh et al. 报告):

- 灵敏度 (Sensitivity): 96.3%
- 特异度 (Specificity): 96.2%
- 对比: 仅用加速度计的特异度只有 82.72%

代码实现 (Source: esp32s3.yaml L236-258)

binary_sensor:

```
- platform: template
  name: "Fall_Detection_Alert"
  device_class: safety
  lambda: |-
    const float UFT_ACC = 2.4;
    const float UFT_GYRO = 240.0;
    float smv = sqrt(ax*ax + ay*ay + az*az) / 9.80665;
    float omega = sqrt(wx*wx + wy*wy + wz*wz);

    if ((smv > UFT_ACC) && (omega > UFT_GYRO)) {
      return true; // Fall detected!
    }
    return false;
```

关键点: 这是阈值算法, 不是 Kalman Filter!

1.5 其他押题 / Other Predicted Questions

主题	预测提问 (Koller Style)	推荐回答角度
Server/Linux	“Why usage of Unix-like systems?” (Why not Windows?)	稳定性、SSH 远程管理、Cron 任务、Python 支持
ESP32 功耗	“How does the heavy SSL/TLS encryption load affect power consumption?”	提及 ESP32-S3 的硬件加密加速器 (Hardware Crypto Accelerator)
安全	“What happens if the CA certificate is compromised?”	证书吊销 (CRL) 和更新机制

1.6 最终检查清单 / Final Checklist

答辩前自检

- ☐ 背诵 “Acc+Gyro” 答案: 用英文背诵 Sensor Fusion 解释
- ☐ 修复 PPT 流程图: 如果论文流程图“非典型”, 在 PPT 里用标准符号重画
- ☐ 带硬件: 把 ESP32-S3 传感器盒子带到答辩现场
- ☐ 慢速说话: Koller 批评过其他论文的“语言笨拙”, 说慢点、正式点

祝好运

Yuan, 你已经稳拿 B 了。答对“加速度+角速度”的问题能稳住 B 甚至冲 A!

Part II

数学基础 / Mathematics Foundation

2 线性代数 / Linear Algebra

矩阵基础 (Matrix Basics)

概念 (CN): 矩阵的定义、运算和性质

Term (EN): Matrix, Transpose, Inverse, Determinant

基本运算:

- 加法: $\mathbf{C} = \mathbf{A} + \mathbf{B}$ (同尺寸矩阵对应元素相加)
- 乘法: $(\mathbf{AB})_{ij} = \sum_k a_{ik}b_{kj}$ (行乘列)
- 转置: $(\mathbf{A}^T)_{ij} = a_{ji}$ (行列互换)

Key Insight: Matrix multiplication is NOT commutative: $\mathbf{AB} \neq \mathbf{BA}$ in general.

核心公式 / Key Formula

行列式 (2×2):

$$\det \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} = ad - bc \quad (4)$$

行列式 (3×3 , 展开):

$$\det(\mathbf{A}) = a_{11}C_{11} + a_{12}C_{12} + a_{13}C_{13} \quad (5)$$

其中 C_{ij} 是代数余子式。

逆矩阵:

$$\mathbf{A}^{-1} = \frac{1}{\det(\mathbf{A})} \text{adj}(\mathbf{A}) \quad (6)$$

逆矩阵存在条件: $\det(\mathbf{A}) \neq 0$ (非奇异矩阵)

线性方程组 (Systems of Linear Equations)

概念 (CN): 求解 $\mathbf{Ax} = \mathbf{b}$ 的方法

Term (EN): Gaussian Elimination, Cramer's Rule, LU Decomposition

矩阵形式:

$$\mathbf{Ax} = \mathbf{b} \Rightarrow \mathbf{x} = \mathbf{A}^{-1}\mathbf{b} \quad (7)$$

克莱默法则 (Cramer's Rule):

$$x_i = \frac{\det(\mathbf{A}_i)}{\det(\mathbf{A})} \quad (8)$$

其中 \mathbf{A}_i 是将 \mathbf{A} 的第 i 列替换为 \mathbf{b} 。

Key Insight: Gaussian elimination is more efficient than Cramer's rule for large systems.

核心公式 / Key Formula

高斯消元示例:

原方程组:

$$\begin{cases} 2x + y = 5 \\ 4x + 3y = 11 \end{cases} \quad (9)$$

增广矩阵:

$$\left(\begin{array}{cc|c} 2 & 1 & 5 \\ 4 & 3 & 11 \end{array} \right) \xrightarrow{R_2 - 2R_1} \left(\begin{array}{cc|c} 2 & 1 & 5 \\ 0 & 1 & 1 \end{array} \right) \quad (10)$$

回代: $y = 1, x = 2$

特征值与特征向量 (Eigenvalues & Eigenvectors)

概念 (CN): 满足 $\mathbf{Av} = \lambda\mathbf{v}$ 的标量 λ 和非零向量 \mathbf{v}

Term (EN): Eigenvalue, Eigenvector, Characteristic Polynomial

定义:

$$\mathbf{Av} = \lambda\mathbf{v} \Leftrightarrow (\mathbf{A} - \lambda\mathbf{I})\mathbf{v} = \mathbf{0} \quad (11)$$

求解步骤:

1. 求特征多项式: $\det(\mathbf{A} - \lambda\mathbf{I}) = 0$
2. 解出特征值 $\lambda_1, \lambda_2, \dots$
3. 对每个 λ_i , 解 $(\mathbf{A} - \lambda_i\mathbf{I})\mathbf{v} = \mathbf{0}$ 得特征向量

Key Insight: Eigenvalues reveal fundamental properties of a matrix (stability, principal directions).

核心公式 / Key Formula

2×2 矩阵特征值:

对于 $\mathbf{A} = \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix}$:

特征多项式:

$$\lambda^2 - (a + d)\lambda + (ad - bc) = 0 \quad (12)$$

简化:

$$\lambda^2 - \text{tr}(\mathbf{A})\lambda + \det(\mathbf{A}) = 0 \quad (13)$$

解:

$$\lambda = \frac{\text{tr}(\mathbf{A}) \pm \sqrt{\text{tr}(\mathbf{A})^2 - 4\det(\mathbf{A})}}{2} \quad (14)$$

特征值性质

- $\sum \lambda_i = \text{tr}(\mathbf{A})$ (特征值之和 = 迹)
- $\prod \lambda_i = \det(\mathbf{A})$ (特征值之积 = 行列式)
- 对称矩阵的特征值都是实数
- 正定矩阵的特征值都 > 0

向量空间 (Vector Spaces)

概念 (CN): 满足向量加法和标量乘法封闭性的集合

Term (EN): Basis, Dimension, Span, Linear Independence

关键概念:

- **线性无关:** 没有向量可以表示为其他向量的线性组合
- **基 (Basis):** 线性无关且张成整个空间的向量组
- **维度 (Dimension):** 基中向量的个数
- **秩 (Rank):** 矩阵列空间的维度

Key Insight: Rank tells you the "effective" number of independent equations/constraints.

核心公式 / Key Formula

秩-零化度定理:

$$\text{rank}(\mathbf{A}) + \text{nullity}(\mathbf{A}) = n \quad (15)$$

其中 n 是列数。

齐次方程组解的结构:

- $\text{rank}(\mathbf{A}) = n$: 唯一解 ($\mathbf{x} = \mathbf{0}$)
- $\text{rank}(\mathbf{A}) < n$: 无穷多解 (解空间维度 = $n - \text{rank}$)

Thesis Connection

线性代数与传感器融合:

你的论文使用 **MPU-6050 (6 轴传感器)** 进行跌倒检测。

传感器融合 (**Kalman Filter**) 用到的线性代数:

- 状态向量: $\mathbf{x} = [\theta, \dot{\theta}, \omega_{bias}]^T$
- 状态转移矩阵: $\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 1 & dt & 0 \\ 0 & 1 & -dt \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$
- 协方差矩阵更新: $\mathbf{P} = \mathbf{A}\mathbf{P}\mathbf{A}^T + \mathbf{Q}$

Jan Koller 问题: "How do you combine Accelerometer and Gyroscope data?"

答案: 使用卡尔曼滤波器。加速度计提供绝对姿态 (有噪声), 陀螺仪提供角速度积分 (有漂移)。卡尔曼滤波通过最小化协方差, 融合两者得到最优估计。核心是矩阵运算 (状态预测、协方差更新、卡尔曼增益计算)。

!

考试陷阱 / Exam Pitfalls]

1. **逆矩阵不存在:** $\det(\mathbf{A}) = 0$ 时矩阵奇异, 无逆!
2. **特征向量方向:** 特征向量乘以任意非零常数仍是特征向量。
3. **矩阵乘法顺序:** \mathbf{AB} 的尺寸是 $(m \times p)$ 当 \mathbf{A} 是 $m \times n$, \mathbf{B} 是 $n \times p$ 。

3 数值方法 / Numerical Methods (BE5B01DEN)

误差分析 (Error Analysis)

概念 (CN): 数值计算中的误差来源和传播

Term (EN): Absolute Error, Relative Error, Round-off Error, Truncation Error

误差类型:

- **截断误差 (Truncation Error):** 用有限项近似无限级数 (如泰勒展开)
- **舍入误差 (Round-off Error):** 计算机有限精度表示
- **传播误差 (Propagation Error):** 初始误差在计算中放大

Key Insight: In ESP32, floating-point operations use 32-bit precision, causing round-off errors in sensor calculations.

核心公式 / Key Formula

绝对误差 (Absolute Error):

$$E_{abs} = |x_{true} - x_{approx}| \quad (16)$$

相对误差 (Relative Error):

$$E_{rel} = \frac{|x_{true} - x_{approx}|}{|x_{true}|} \quad (17)$$

条件数 (Condition Number):

$$\kappa(A) = \|A\| \cdot \|A^{-1}\| \quad (18)$$

高条件数 \Rightarrow 问题对误差敏感 (ill-conditioned)

求根方法 - 牛顿法 (Newton's Method)

概念 (CN): 迭代求解方程 $f(x) = 0$ 的根

Term (EN): Newton-Raphson Method, Root Finding, Iteration

核心理念: 用切线近似曲线, 切线与 x 轴交点作为新的近似值

收敛性:

- 二次收敛 (Quadratic Convergence): 误差平方减少
- 需要良好的初始值, 否则可能发散
- 在根附近 $f'(x) \approx 0$ 时收敛慢

Key Insight: Newton's method is the foundation of many optimization algorithms in machine learning.

核心公式 / Key Formula

牛顿迭代公式:

$$x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)} \quad (19)$$

示例: 求 $\sqrt{2}$ (即 $f(x) = x^2 - 2 = 0$)

$$f'(x) = 2x \quad (20)$$

$$x_{n+1} = x_n - \frac{x_n^2 - 2}{2x_n} = \frac{x_n + 2/x_n}{2} \quad (21)$$

其他方法对比:

方法	收敛阶	需要导数?
二分法 (Bisection)	1 (线性)	否
牛顿法 (Newton)	2 (二次)	是
割线法 (Secant)	1.618	否

数值积分 (Numerical Integration)

概念 (CN): 用离散求和近似定积分

Term (EN): Quadrature, Trapezoidal Rule, Simpson's Rule

基本思想: 将积分区间分成小段, 用简单函数近似

常用方法:

- 矩形法: 用矩形面积近似
- 梯形法: 用梯形面积近似 (更精确)
- Simpson 法: 用抛物线近似 (最精确)

Key Insight: Higher-order methods need fewer points for the same accuracy.

核心公式 / Key Formula

梯形公式 (Trapezoidal Rule):

$$\int_a^b f(x) dx \approx \frac{h}{2} \left[f(a) + 2 \sum_{i=1}^{n-1} f(x_i) + f(b) \right] \quad (22)$$

其中 $h = \frac{b-a}{n}$, 误差 $O(h^2)$

Simpson 公式 (Simpson's Rule):

$$\int_a^b f(x) dx \approx \frac{h}{3} \left[f(a) + 4 \sum_{\text{odd}} f(x_i) + 2 \sum_{\text{even}} f(x_i) + f(b) \right] \quad (23)$$

误差 $O(h^4)$, 需要偶数个区间

常微分方程数值解 (Numerical ODE)

概念 (CN): 用离散步进求解 ODE 初值问题

Term (EN): Euler Method, Runge-Kutta, Initial Value Problem (IVP)

问题形式: 给定 $\frac{dy}{dt} = f(t, y)$, $y(t_0) = y_0$, 求 $y(t)$

欧拉法 (Euler Method):

- 最简单的方法, 一阶精度
- 误差随步长线性增长

龙格-库塔法 (Runge-Kutta):

- RK4 是最常用的四阶方法
- 精度高, 稳定性好

Key Insight: ESP32 uses Euler-like integration for sensor fusion (complementary filter).

核心公式 / Key Formula

前向欧拉法 (Forward Euler):

$$y_{n+1} = y_n + h \cdot f(t_n, y_n) \quad (24)$$

四阶龙格-库塔 (RK4):

$$k_1 = f(t_n, y_n) \quad (25)$$

$$k_2 = f\left(t_n + \frac{h}{2}, y_n + \frac{h}{2}k_1\right) \quad (26)$$

$$k_3 = f\left(t_n + \frac{h}{2}, y_n + \frac{h}{2}k_2\right) \quad (27)$$

$$k_4 = f(t_n + h, y_n + h \cdot k_3) \quad (28)$$

$$y_{n+1} = y_n + \frac{h}{6}(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) \quad (29)$$

线性方程组数值解 (Solving Linear Systems)

概念 (CN): 数值求解 $\mathbf{Ax} = \mathbf{b}$

Term (EN): Gaussian Elimination, LU Decomposition, Pivoting

高斯消元法:

1. 前向消元: 将矩阵变为上三角形式
2. 回代: 从最后一行开始求解

主元选取 (Pivoting):

- 避免除以零或小数
- 部分主元: 选列中最大元素
- 完全主元: 选整个矩阵最大元素

Key Insight: Condition number determines how errors propagate in linear systems.

Thesis Connection

数值方法与智能家居传感器:

你的论文使用多种数值方法处理传感器数据:

移动平均滤波 (Moving Average):

$$y_n = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} x_{n-i} \quad (30)$$

这是一种简单的数值滤波方法, 用于平滑温湿度读数。

互补滤波器 (Complementary Filter):

$$\theta = \alpha \cdot (\theta_{prev} + \omega \cdot dt) + (1 - \alpha) \cdot \theta_{acc} \quad (31)$$

用于融合加速度计和陀螺仪数据, 本质上是数值积分 + 加权平均。

Jan Koller 问题: "How do you handle sensor noise?"

答案: 使用移动平均滤波 (一种数值方法) 平滑读数, 减少高频噪声。对于姿态估计, 使用互补滤波器结合数值积分。

!

考试陷阱 / Exam Pitfalls]

1. **牛顿法发散:** 初始值选得不好, 或 $f'(x_0) \approx 0$ 。
2. **Simpson 需要偶数区间:** n 必须是偶数!
3. **条件数:** 高条件数矩阵 \Rightarrow 结果不可靠。
4. **步长选择:** 太大 \Rightarrow 不精确, 太小 \Rightarrow 舍入误差累积。

4 微分方程 / Differential Equations (BE5B01DEN)

一阶常微分方程 (First Order ODE)

概念 (CN): 含有一阶导数的方程

Term (EN): First Order ODE, Separable, Homogeneous

标准形式:

$$\frac{dy}{dx} = f(x, y) \quad (32)$$

主要类型:

- 可分离变量: $\frac{dy}{dx} = g(x)h(y)$
- 一阶线性: $\frac{dy}{dx} + P(x)y = Q(x)$
- 齐次方程: $\frac{dy}{dx} = f\left(\frac{y}{x}\right)$

Key Insight: RC circuit charging is described by a first-order linear ODE.

核心公式 / Key Formula

可分离变量方程解法:

$$\frac{dy}{dx} = g(x)h(y) \Rightarrow \int \frac{1}{h(y)} dy = \int g(x) dx + C \quad (33)$$

一阶线性方程解法 (积分因子法):

$$\frac{dy}{dx} + P(x)y = Q(x) \quad (34)$$

积分因子: $\mu(x) = e^{\int P(x)dx}$

通解:

$$y = \frac{1}{\mu(x)} \left[\int \mu(x)Q(x)dx + C \right] \quad (35)$$

高阶线性常微分方程 (Higher Order Linear ODE)

概念 (CN): 含有二阶及以上导数的线性方程

Term (EN): Second Order ODE, Characteristic Equation, Homogeneous/Non-homogeneous

二阶齐次方程:

$$y'' + p(x)y' + q(x)y = 0 \quad (36)$$

常系数情况: $ay'' + by' + cy = 0$

解法: 用特征方程 $ar^2 + br + c = 0$

Key Insight: RLC circuit oscillation is described by a second-order ODE.

核心公式 / Key Formula

特征方程 $ar^2 + br + c = 0$:

判别式: $\Delta = b^2 - 4ac$

情况	通解
$\Delta > 0$ (两个实根 r_1, r_2)	$y = C_1 e^{r_1 x} + C_2 e^{r_2 x}$
$\Delta = 0$ (重根 r)	$y = (C_1 + C_2 x) e^{rx}$
$\Delta < 0$ (共轭复根 $\alpha \pm \beta i$)	$y = e^{\alpha x} (C_1 \cos \beta x + C_2 \sin \beta x)$

非齐次方程: $y = y_h + y_p$ (齐次解 + 特解)

线性微分方程组 (Systems of Linear ODE)

概念 (CN): 多个未知函数的微分方程组成的系统

Term (EN): System of ODEs, Matrix Exponential, Phase Portrait

矩阵形式:

$$\mathbf{x}' = \mathbf{A}\mathbf{x} \quad (37)$$

解法:

1. 求矩阵 \mathbf{A} 的特征值 $\lambda_1, \lambda_2, \dots$
2. 求对应的特征向量 $\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2, \dots$
3. 通解: $\mathbf{x}(t) = C_1 e^{\lambda_1 t} \mathbf{v}_1 + C_2 e^{\lambda_2 t} \mathbf{v}_2 + \dots$

Key Insight: Stability of linear systems depends on eigenvalues: $\text{Re}(\lambda) < 0 \Rightarrow \text{stable}$.

核心公式 / Key Formula

二维系统稳定性:

对于 $\mathbf{x}' = \mathbf{A}\mathbf{x}$, 令 λ_1, λ_2 为特征值:

特征值类型	稳定性
$\lambda_1, \lambda_2 < 0$	稳定结点 (Stable Node)
$\lambda_1, \lambda_2 > 0$	不稳定结点 (Unstable Node)
$\lambda_1 < 0 < \lambda_2$	鞍点 (Saddle) - 不稳定
$\lambda = \alpha \pm \beta i, \alpha < 0$	稳定焦点 (Stable Focus)
$\lambda = \pm \beta i$	中心 (Center) - 边界稳定

拉普拉斯变换 (Laplace Transform)

概念 (CN): 将时域函数变换到复频域的积分变换

Term (EN): Laplace Transform, Transfer Function, Inverse Transform

定义:

$$\mathcal{L}\{f(t)\} = F(s) = \int_0^\infty f(t)e^{-st} dt \quad (38)$$

ODE 求解步骤:

1. 对方程两边做 Laplace 变换
2. 在 s 域求解代数方程
3. 做逆变换回时域

Key Insight: Laplace transform converts differential equations into algebraic equations!

核心公式 / Key Formula

常用变换表:

$f(t)$	$F(s) = \mathcal{L}\{f(t)\}$
1	$\frac{1}{s}$
t	$\frac{1}{s^2}$
e^{at}	$\frac{1}{s-a}$
$\sin(\omega t)$	$\frac{\omega}{s^2 + \omega^2}$
$\cos(\omega t)$	$\frac{s}{s^2 + \omega^2}$
$f'(t)$	$sF(s) - f(0)$
$f''(t)$	$s^2F(s) - sf(0) - f'(0)$

Thesis Connection

微分方程与传感器系统:

你的论文中的传感器系统可以用微分方程建模:

RC 低通滤波器 (一阶 ODE):

$$RC \frac{dV_{out}}{dt} + V_{out} = V_{in} \quad (39)$$

陀螺仪角度积分 (初值问题):

$$\theta(t) = \theta_0 + \int_0^t \omega(\tau) d\tau \quad (40)$$

PID 控制 (微分方程描述):

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (41)$$

Jan Koller 问题: "How does your system respond to step inputs?"

答案: 系统响应由一阶 ODE 决定。时间常数 $\tau = RC$ 决定响应速度。63.2% 的稳态值在 $t = \tau$ 时达到。

!

考试陷阱 / Exam Pitfalls]

1. **特征方程:** 不要忘记负号! $y'' - y = 0$ 的特征方程是 $r^2 - 1 = 0$ 。
2. **初值条件:** 通解中的常数由初值条件确定。
3. **稳定性判据:** 所有特征值实部 < 0 才稳定!
4. **Laplace 导数:** $\mathcal{L}\{f'\} = sF(s) - f(0)$, 不要忘记初值项。

5 离散数学 / Discrete Mathematics (BE5B01DMG)

命题逻辑 (Propositional Logic)

概念 (CN): 研究命题之间的逻辑关系

Term (EN): Proposition, Logical Connectives, Truth Table, Tautology

逻辑连接词:

- $\neg p$ (NOT): 非
- $p \wedge q$ (AND): 合取
- $p \vee q$ (OR): 析取
- $p \rightarrow q$ (IMPLIES): 蕴含
- $p \leftrightarrow q$ (IFF): 等价

重要等价式:

- $p \rightarrow q \equiv \neg p \vee q$
- $\neg(p \wedge q) \equiv \neg p \vee \neg q$ (德摩根定律)
- $\neg(p \vee q) \equiv \neg p \wedge \neg q$ (德摩根定律)

Key Insight: Digital logic gates (AND, OR, NOT) implement these operations in hardware.

集合论 (Set Theory)

概念 (CN): 研究集合及其运算

Term (EN): Set, Subset, Union, Intersection, Cardinality

基本运算:

- $A \cup B$: 并集 (Union)
- $A \cap B$: 交集 (Intersection)
- $A \setminus B$: 差集 (Difference)
- A^c : 补集 (Complement)
- $A \times B$: 笛卡尔积 (Cartesian Product)

幂集: $\mathcal{P}(A)$ 包含 A 的所有子集, $|\mathcal{P}(A)| = 2^{|A|}$

Key Insight: Set operations correspond to logical operations via indicator functions.

核心公式 / Key Formula

容斥原理 (Inclusion-Exclusion):

$$|A \cup B| = |A| + |B| - |A \cap B| \quad (42)$$

三个集合:

$$|A \cup B \cup C| = |A| + |B| + |C| - |A \cap B| - |A \cap C| - |B \cap C| + |A \cap B \cap C| \quad (43)$$

集合基数:

- $|\mathbb{N}| = \aleph_0$ (可数无穷)
- $|\mathbb{R}| = \mathfrak{c}$ (连续统)
- $|\mathfrak{c}| > |\aleph_0|$ (康托定理)

数论 (Number Theory)

概念 (CN): 研究整数的性质

Term (EN): Divisibility, Modular Arithmetic, GCD, Prime

模运算:

$$a \equiv b \pmod{n} \Leftrightarrow n \mid (a - b) \quad (44)$$

模运算性质:

- $(a + b) \bmod n = ((a \bmod n) + (b \bmod n)) \bmod n$
- $(a \cdot b) \bmod n = ((a \bmod n) \cdot (b \bmod n)) \bmod n$

最大公约数 (GCD): 用欧几里得算法求解

Key Insight: Cryptography (RSA) relies heavily on modular arithmetic.

核心公式 / Key Formula

欧几里得算法 (Euclidean Algorithm):

$$\gcd(a, b) = \gcd(b, a \bmod b), \quad \gcd(a, 0) = a \quad (45)$$

扩展欧几里得: 求 $ax + by = \gcd(a, b)$ 的整数解

费马小定理:

$$a^{p-1} \equiv 1 \pmod{p} \quad (\text{if } p \text{ is prime, } \gcd(a, p) = 1) \quad (46)$$

欧拉定理:

$$a^{\phi(n)} \equiv 1 \pmod{n} \quad (\text{if } \gcd(a, n) = 1) \quad (47)$$

组合数学 (Combinatorics)

概念 (CN): 研究有限集合的计数和排列

Term (EN): Permutation, Combination, Binomial Coefficient

排列 (Permutation): 有序选择

$$P(n, k) = \frac{n!}{(n - k)!} \quad (48)$$

组合 (Combination): 无序选择

$$C(n, k) = \binom{n}{k} = \frac{n!}{k!(n - k)!} \quad (49)$$

Key Insight: Combinations count subsets; permutations count arrangements.

核心公式 / Key Formula

二项式定理:

$$(x + y)^n = \sum_{k=0}^n \binom{n}{k} x^k y^{n-k} \quad (50)$$

帕斯卡恒等式:

$$\binom{n}{k} = \binom{n-1}{k-1} + \binom{n-1}{k} \quad (51)$$

鸽巢原理 (Pigeonhole Principle):

$$\text{If } n + 1 \text{ objects are placed in } n \text{ boxes, at least one box contains } \geq 2 \text{ objects.} \quad (52)$$

图论 (Graph Theory)

概念 (CN): 研究由顶点和边组成的结构

Term (EN): Vertex, Edge, Adjacency, Path, Cycle, Connected, Tree

基本定义:

- 图 (Graph): $G = (V, E)$, 顶点集和边集
- 度 (Degree): 顶点连接的边数
- 路径 (Path): 不重复顶点的边序列
- 环 (Cycle): 起点=终点的路径
- 树 (Tree): 连通无环图

Key Insight: Network topology (Star, Mesh) is a graph theory problem.

核心公式 / Key Formula

握手定理 (Handshaking Lemma):

$$\sum_{v \in V} \deg(v) = 2|E| \quad (53)$$

树的性质:

- $|E| = |V| - 1$
- 任意两点之间有唯一路径
- 移除任意边使图不连通

欧拉路径/回路:

- 欧拉路径存在 \Leftrightarrow 恰有 0 或 2 个奇度顶点
- 欧拉回路存在 \Leftrightarrow 所有顶点度数为偶数

图算法 (Graph Algorithms)

概念 (CN): 在图上进行搜索和优化

Term (EN): BFS, DFS, Dijkstra, Shortest Path

广度优先搜索 (BFS):

- 使用队列 (Queue)
- 按层遍历
- 找到的是最短路径 (无权图)

深度优先搜索 (DFS):

- 使用栈 (Stack) 或递归
- 尽可能深入
- 用于检测环、拓扑排序

Dijkstra 算法:

- 求加权图的最短路径
- 时间复杂度 $O(|V|^2)$ 或 $O(|E| \log |V|)$ (使用堆)

Key Insight: Routing protocols (OSPF) use Dijkstra's algorithm.

Thesis Connection

离散数学与智能家居网络:

你的论文使用图论概念描述网络拓扑:

MQTT 网络拓扑:

- **星型拓扑 (Star):** 所有设备连接到中心 Broker (你的设计)
- 图表示: $G = (V, E)$, $|V| = n + 1$, $|E| = n$
- 这是一棵树! 满足 $|E| = |V| - 1$

模运算应用:

- CRC 校验使用模 2 运算
- 时间戳循环使用模 2^{32} 运算

Jan Koller 问题: "What is the network topology of your system?"

答案: 星型拓扑 (Star Topology)。所有 ESP32 设备作为叶节点连接到中心 MQTT Broker。这是一棵树结构, 优点是简单、易管理, 缺点是单点故障。

!

考试陷阱 / Exam Pitfalls]

1. **模运算:** $(a - b) \bmod n \neq (a \bmod n) - (b \bmod n)$, 可能为负!
2. **组合 vs 排列:** 注意题目是否要求顺序。
3. **欧拉路径 vs 回路:** 0 个奇度顶点是回路, 2 个奇度顶点是路径。
4. **BFS vs DFS:** BFS 找最短路径 (无权), DFS 不一定。

6 Graph Theory (DMG)

Exam Cheat Sheet / 极速复习

- **Core Concept:** 图论基础。重点是树 (Trees)、最短路径 (Dijkstra)、遍历 (BFS/DFS) 和图的连通性。
- **Key Formula:** ...
- **Watch Out:** Common exam pitfalls.

6.1 Concepts / 核心概念

Vertex, Edge, Path, Cycle, Tree, Component

图论基础。重点是树 (Trees)、最短路径 (Dijkstra)、遍历 (BFS/DFS) 和图的连通性。

6.2 Formulas / 公式

$$x = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad (54)$$

6.3 Exam Questions / 常考题型

- Define ...
- Calculate ...

7 概率与统计 / Probability & Statistics (BE5B01PRS)

概率基础 (Basic Probability)

概念 (CN): 随机事件发生可能性的度量

Term (EN): Sample Space, Event, Probability, Conditional Probability

概率公理:

1. $P(A) \geq 0$ (非负性)
2. $P(\Omega) = 1$ (规范性)
3. $P(A \cup B) = P(A) + P(B)$ if $A \cap B = \emptyset$ (可加性)

条件概率:

$$P(A|B) = \frac{P(A \cap B)}{P(B)} \quad (55)$$

独立事件: $P(A \cap B) = P(A) \cdot P(B)$

Key Insight: Sensor readings have inherent randomness; probability models this uncertainty.

核心公式 / Key Formula

贝叶斯定理 (Bayes' Theorem):

$$P(A|B) = \frac{P(B|A) \cdot P(A)}{P(B)} \quad (56)$$

全概率公式:

$$P(B) = \sum_i P(B|A_i) \cdot P(A_i) \quad (57)$$

贝叶斯展开形式:

$$P(A_i|B) = \frac{P(B|A_i) \cdot P(A_i)}{\sum_j P(B|A_j) \cdot P(A_j)} \quad (58)$$

概率分布 (Probability Distributions)

概念 (CN): 描述随机变量取值的概率

Term (EN): PMF, PDF, CDF, Expected Value, Variance

离散分布 (PMF):

- 伯努利 (Bernoulli): 单次试验, 成功概率 p
- 二项 (Binomial): n 次独立试验中成功次数
- 泊松 (Poisson): 单位时间内事件发生次数

连续分布 (PDF):

- 均匀 (Uniform): 等概率
- 指数 (Exponential): 等待时间
- 正态/高斯 (Normal/Gaussian): 钟形曲线

Key Insight: Sensor noise is often modeled as Gaussian distribution.

核心公式 / Key Formula

常用分布:

二项分布: $X \sim \text{Bin}(n, p)$

$$P(X = k) = \binom{n}{k} p^k (1-p)^{n-k}, \quad E[X] = np, \quad \text{Var}(X) = np(1-p) \quad (59)$$

泊松分布: $X \sim \text{Pois}(\lambda)$

$$P(X = k) = \frac{\lambda^k e^{-\lambda}}{k!}, \quad E[X] = \text{Var}(X) = \lambda \quad (60)$$

正态分布: $X \sim \mathcal{N}(\mu, \sigma^2)$

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (61)$$

标准正态: $Z = \frac{X-\mu}{\sigma} \sim \mathcal{N}(0, 1)$

参数估计 (Parameter Estimation)

概念 (CN): 从样本数据估计总体参数

Term (EN): Point Estimate, Maximum Likelihood, Confidence Interval

点估计:

- 样本均值: $\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i$ 估计 μ
- 样本方差: $S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2$ 估计 σ^2

最大似然估计 (MLE):

$$\hat{\theta} = \arg \max_{\theta} \mathcal{L}(\theta | \text{data}) \quad (62)$$

Key Insight: Kalman filter uses Bayesian estimation to optimally fuse sensor data.

核心公式 / Key Formula

置信区间 (Confidence Interval):

正态总体, 已知 σ : μ 的 $(1 - \alpha)$ 置信区间

$$\bar{X} \pm z_{\alpha/2} \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (63)$$

正态总体, 未知 σ : 使用 t 分布

$$\bar{X} \pm t_{\alpha/2, n-1} \cdot \frac{S}{\sqrt{n}} \quad (64)$$

常用 z 值: $z_{0.025} = 1.96$ (95% 置信度)

假设检验 (Hypothesis Testing)

概念 (CN): 根据样本数据判断假设是否成立

Term (EN): Null Hypothesis, p-value, Type I/II Error

基本步骤:

1. 提出原假设 H_0 和备择假设 H_1
2. 选择检验统计量
3. 计算 p-value 或临界值
4. 拒绝或接受 H_0

错误类型:

- **Type I Error (α):** 拒绝真的 H_0 (假阳性)
- **Type II Error (β):** 接受假的 H_0 (假阴性)

Key Insight: Threshold tuning in fall detection is a hypothesis testing problem.

Thesis Connection

概率统计与传感器融合:

你的论文使用概率方法处理不确定性:

传感器噪声建模:

$$\text{Measurement} = \text{True Value} + \text{Noise}, \quad \text{Noise} \sim \mathcal{N}(0, \sigma^2) \quad (65)$$

贝叶斯滤波 (Kalman Filter 核心):

$$P(\text{State}|\text{Measurement}) \propto P(\text{Measurement}|\text{State}) \cdot P(\text{State}) \quad (66)$$

跌倒检测阈值:

- 阈值过低: 高 False Positive (Type I Error)
- 阈值过高: 高 False Negative (Type II Error)

Jan Koller 问题: "How did you determine the fall detection threshold?"

答案: 通过实验收集正常活动和跌倒数据, 分析加速度分布。选择阈值使 False Positive 和 False Negative 之间取得平衡。这本质上是一个假设检验问题。

!

考试陷阱 / Exam Pitfalls]

1. 条件概率方向: $P(A|B) \neq P(B|A)$!
2. 样本方差: 分母是 $n - 1$, 不是 n (无偏估计)。
3. **p-value 解释:** p-value 不是 H_0 为真的概率!
4. **标准化:** 使用 z-score 前确保是正态分布。

Part III

物理基础 / Physics Foundation

8 力学 / Mechanics (BE5B02PH1)

运动学 (Kinematics)

概念 (CN): 描述物体运动, 不考虑力

Term (EN): Position, Velocity, Acceleration, Trajectory

基本量:

- 位移 (Displacement): $\vec{r}(t)$ - 矢量
- 速度 (Velocity): $\vec{v} = \frac{d\vec{r}}{dt}$ - 位移的导数
- 加速度 (Acceleration): $\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt}$ - 速度的导数

匀加速运动:

- 直线运动: $a = \text{const}$
- 抛体运动: $\vec{a} = -g\hat{j}$
- 圆周运动: 向心加速度 $a_c = \frac{v^2}{r}$

Key Insight: Accelerometer measures acceleration; integrating twice gives position.

核心公式 / Key Formula

匀加速运动公式:

$$v = v_0 + at \quad (67)$$

$$x = x_0 + v_0t + \frac{1}{2}at^2 \quad (68)$$

$$v^2 = v_0^2 + 2a(x - x_0) \quad (69)$$

圆周运动:

$$v = \omega r \quad (\text{线速度}) \quad (70)$$

$$a_c = \omega^2 r = \frac{v^2}{r} \quad (\text{向心加速度}) \quad (71)$$

角加速度: $\alpha = \frac{d\omega}{dt}$

牛顿运动定律 (Newton's Laws)

概念 (CN): 力与运动的基本关系

Term (EN): Force, Mass, Inertia, Momentum

三大定律:

第一定律 (惯性定律): 物体在没有外力作用时保持静止或匀速直线运动。

第二定律 (运动定律):

$$\vec{F} = m\vec{a} \quad (72)$$

第三定律 (作用-反作用): 作用力与反作用力大小相等、方向相反。

$$\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21} \quad (73)$$

Key Insight: $F = ma$ is the foundation of accelerometer-based motion detection.

核心公式 / Key Formula

常见力:

重力: $\vec{F}_g = m\vec{g}$, $g \approx 9.81 \text{ m/s}^2$

摩擦力: $f = \mu N$ (静摩擦/动摩擦)

弹簧力 (Hooke's Law): $F = -kx$

向心力: $F_c = m\frac{v^2}{r} = m\omega^2 r$

动量: $\vec{p} = m\vec{v}$

动量定理: $\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt}$

功与能 (Work and Energy)

概念 (CN): 能量是做功的能力

Term (EN): Work, Kinetic Energy, Potential Energy, Conservation

功 (Work):

$$W = \int \vec{F} \cdot d\vec{r} = F \cdot d \cdot \cos \theta \quad (74)$$

动能 (Kinetic Energy):

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2 \quad (75)$$

势能 (Potential Energy):

- 重力势能: $E_p = mgh$
- 弹性势能: $E_p = \frac{1}{2}kx^2$

Key Insight: Energy conservation helps analyze fall detection thresholds.

核心公式 / Key Formula

功-能定理: $W_{net} = \Delta E_k$

机械能守恒 (仅保守力做功):

$$E_k + E_p = \text{const} \quad (76)$$

功率 (Power):

$$P = \frac{dW}{dt} = \vec{F} \cdot \vec{v} \quad (77)$$

自由落体能量:

$$mgh = \frac{1}{2}mv^2 \Rightarrow v = \sqrt{2gh} \quad (78)$$

刚体力学 (Rigid Body Mechanics)

概念 (CN): 有体积和形状的物体的运动

Term (EN): Torque, Moment of Inertia, Angular Momentum

力矩 (Torque):

$$\vec{\tau} = \vec{r} \times \vec{F} \quad (79)$$

转动惯量 (Moment of Inertia):

$$I = \sum m_i r_i^2 \quad \text{or} \quad I = \int r^2 dm \quad (80)$$

转动定律:

$$\vec{\tau} = I\vec{\alpha} \quad (81)$$

Key Insight: Gyroscope measures angular velocity ω of rotation.

核心公式 / Key Formula

常见转动惯量:

物体	转动惯量 (绕中心轴)
细棒 (Rod)	$\frac{1}{12}ML^2$
圆盘 (Disk)	$\frac{1}{2}MR^2$
圆环 (Ring)	MR^2
实心球 (Solid Sphere)	$\frac{2}{5}MR^2$

平行轴定理: $I = I_{cm} + Md^2$

角动量: $L = I\omega$

角动量守恒: $\tau_{ext} = 0 \Rightarrow L = \text{const}$

Thesis Connection

力学与可穿戴传感器:

你的论文使用加速度计检测跌倒，直接应用了牛顿第二定律:

加速度计原理:

$$F = ma \quad \Rightarrow \quad a = \frac{F}{m} \quad (82)$$

MEMS 加速度计测量作用在悬浮质量块上的惯性力。

跌倒检测:

- 自由落体阶段: $a \approx 0$ (失重)
- 撞击阶段: $a \gg g$ (冲击)

陀螺仪原理: 测量角速度 ω ，基于科里奥利力:

$$F_{\text{Coriolis}} = -2m(\vec{\omega} \times \vec{v}) \quad (83)$$

Jan Koller 问题: "How does your accelerometer work?"

答案: MEMS 加速度计使用悬浮质量块。当设备加速时，质量块由于惯性 ($F = ma$) 产生相对位移。这个位移改变电容，转换为电信号。它测量的是「真实加速度 + 重力」的叠加。

!

考试陷阱 / Exam Pitfalls]

1. **矢量方向:** 力、速度、加速度都是矢量，注意正负号!
2. **圆周运动:** 向心力 \neq 实际力，是合力的效果。
3. **能量守恒:** 只有保守力（重力、弹力）做功时适用。
4. **转动 vs 平动:** 转动用 $\tau = I\alpha$ ，平动用 $F = ma$ 。

9 振动 / Oscillations (BE5B02PH1)

简谐运动 (Simple Harmonic Motion)

概念 (CN): 回复力与位移成正比的周期运动

Term (EN): SHM, Angular Frequency, Amplitude, Phase

定义: 物体在回复力 $F = -kx$ 作用下的运动

运动方程:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = -kx \Rightarrow \frac{d^2 x}{dt^2} + \omega^2 x = 0 \quad (84)$$

解:

$$x(t) = A \cos(\omega t + \phi) \quad (85)$$

其中:

- A : 振幅 (Amplitude)
- $\omega = \sqrt{k/m}$: 角频率 (Angular Frequency)
- ϕ : 初相位 (Initial Phase)

Key Insight: Crystal oscillator in ESP32 uses mechanical resonance for timing.

核心公式 / Key Formula

简谐运动公式:

位移: $x = A \cos(\omega t + \phi)$

速度: $v = -A\omega \sin(\omega t + \phi)$

加速度: $a = -A\omega^2 \cos(\omega t + \phi) = -\omega^2 x$

周期: $T = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}$

频率: $f = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2\pi}$

能量: $E = \frac{1}{2} k A^2 = \frac{1}{2} m \omega^2 A^2$

阻尼振动 (Damped Oscillations)

概念 (CN): 有阻力作用的振动, 振幅逐渐减小

Term (EN): Damping, Damping Ratio, Overdamped, Underdamped, Critical Damping

运动方程:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + b \frac{dx}{dt} + kx = 0 \quad (86)$$

阻尼系数: $\gamma = \frac{b}{2m}$

阻尼比: $\zeta = \frac{\gamma}{\omega_0}$, $\omega_0 = \sqrt{k/m}$

三种情况:

- $\zeta < 1$: 欠阻尼 (Underdamped) - 振荡衰减
- $\zeta = 1$: 临界阻尼 (Critical) - 最快回平衡
- $\zeta > 1$: 过阻尼 (Overdamped) - 缓慢回平衡

Key Insight: Control systems aim for critical damping for fastest response.

核心公式 / Key Formula

欠阻尼解 ($\zeta < 1$):

$$x(t) = Ae^{-\gamma t} \cos(\omega_d t + \phi) \quad (87)$$

其中 $\omega_d = \omega_0 \sqrt{1 - \zeta^2}$ 是阻尼角频率

品质因数 (Q Factor):

$$Q = \frac{\omega_0}{2\gamma} = \frac{1}{2\zeta} \quad (88)$$

高 Q \Rightarrow 低阻尼, 振动持续更久

能量衰减:

$$E(t) = E_0 e^{-2\gamma t} \quad (89)$$

受迫振动与共振 (Forced Oscillations & Resonance)

概念 (CN): 在周期性外力作用下的振动

Term (EN): Driven Oscillator, Resonance, Resonance Frequency

运动方程:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + b \frac{dx}{dt} + kx = F_0 \cos(\omega_{drive} t) \quad (90)$$

稳态解:

$$x(t) = A(\omega_{drive}) \cos(\omega_{drive} t - \psi) \quad (91)$$

共振: 当 $\omega_{drive} \approx \omega_0$ 时, 振幅最大!

Key Insight: Resonance can cause structural failures (Tacoma Bridge).

核心公式 / Key Formula

振幅响应:

$$A(\omega) = \frac{F_0/m}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + (2\gamma\omega)^2}} \quad (92)$$

共振频率:

$$\omega_{res} = \omega_0 \sqrt{1 - 2\zeta^2} \approx \omega_0 \quad (\text{低阻尼}) \quad (93)$$

共振时振幅:

$$A_{max} = \frac{F_0}{2m\gamma\omega_0} = \frac{QF_0}{k} \quad (94)$$

Thesis Connection

振动与传感器系统:

晶振 (Crystal Oscillator): ESP32 使用 40MHz 晶振作为时钟源。晶体的机械共振提供精确的频率参考:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (95)$$

MEMS 陀螺仪原理: 陀螺仪使用振动质量块。当设备旋转时, 科里奥利力改变振动模式。

滤波器设计: RLC 电路是电子谐振器:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (96)$$

Jan Koller 问题: "Why does your system need a precise clock?"

答案: 晶振利用石英晶体的机械共振提供稳定的频率参考。这对于 UART (115200 baud)、I2C 时序、WiFi 调制等都至关重要。晶体的高 Q 值确保频率稳定性。

!

考试陷阱 / Exam Pitfalls]

1. **角频率 vs 频率:** $\omega = 2\pi f$, 不要混淆!
2. **简谐运动能量:** 总能量 $E = \frac{1}{2}kA^2$ 是常数, 动能和势能在转换。
3. **阻尼比:** $\zeta = 1$ 是临界阻尼, 不是无阻尼。
4. **共振:** 共振频率略低于固有频率 (当阻尼存在时)。

10 物理场 / Physical Fields (BE5B02PH1)

引力场 (Gravitational Field)

概念 (CN): 质量周围存在的场, 对其他质量产生引力

Term (EN): Gravitational Field, Newton's Law of Gravitation

万有引力定律:

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2} \quad (97)$$

其中 $G = 6.674 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{kg}^2$

引力场强度:

$$\vec{g} = -G \frac{M}{r^2} \hat{r} \quad (98)$$

地表重力加速度: $g = 9.81 \text{ m/s}^2$

Key Insight: Accelerometer measures g when stationary.

电场 (Electric Field)

概念 (CN): 电荷周围存在的场, 对其他电荷产生力

Term (EN): Electric Field, Coulomb's Law, Superposition

库仑定律:

$$F = k_e \frac{q_1 q_2}{r^2}, \quad k_e = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \approx 8.99 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2 \quad (99)$$

电场强度:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q} = k_e \frac{Q}{r^2} \hat{r} \quad (100)$$

电场叠加原理: 多个电荷的电场矢量相加

Key Insight: Capacitive touch sensors detect changes in electric field.

核心公式 / Key Formula

电势 (Electric Potential):

$$V = \frac{U}{q} = k_e \frac{Q}{r} \quad (101)$$

电场与电势关系:

$$\vec{E} = -\nabla V = -\frac{dV}{dx} \hat{x} \quad (102)$$

点电荷势能:

$$U = k_e \frac{q_1 q_2}{r} \quad (103)$$

均匀电场中:

$$V = - \int \vec{E} \cdot d\vec{l} = Ed \quad (104)$$

磁场 (Magnetic Field)

概念 (CN): 运动电荷或电流周围存在的场

Term (EN): Magnetic Field, Lorentz Force, Biot-Savart Law

洛伦兹力:

$$\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B} \quad (105)$$

电流受力:

$$\vec{F} = I\vec{L} \times \vec{B} \quad (106)$$

毕奥-萨伐尔定律:

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{Id\vec{l} \times \hat{r}}{r^2} \quad (107)$$

Key Insight: Hall effect sensors measure magnetic fields for position sensing.

核心公式 / Key Formula

常见磁场:

长直导线: $B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$

螺线管中心: $B = \mu_0 n I$ (n = 匝数/长度)

圆环中心: $B = \frac{\mu_0 I}{2R}$

磁通量 (Magnetic Flux):

$$\Phi_B = \int \vec{B} \cdot d\vec{A} \quad (108)$$

安培环路定律:

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I_{enc} \quad (109)$$

电磁感应 (Electromagnetic Induction)

概念 (CN): 变化的磁场产生电动势

Term (EN): Faraday's Law, Lenz's Law, Induced EMF

法拉第定律:

$$\mathcal{E} = -\frac{d\Phi_B}{dt} \quad (110)$$

楞次定律: 感应电流的方向总是阻止产生它的磁通量变化

自感 (Self-Inductance):

$$\mathcal{E} = -L \frac{dI}{dt} \quad (111)$$

Key Insight: Wireless charging uses electromagnetic induction.

Thesis Connection

物理场与传感器:

电容式传感器 (Capacitive Sensors): 电场原理用于湿度传感器和触摸屏:

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d} \quad (112)$$

霍尔效应传感器 (Hall Effect): 检测磁场强度和方向:

$$V_H = \frac{IB}{net} \quad (113)$$

电磁干扰 (EMI): 变化的磁场可能在导线中感应噪声电压 (法拉第定律)。

Jan Koller 问题: "How do you minimize EMI in PCB design?"

答案: 1. 使用差分信号 (共模抑制) 2. 地平面提供磁场屏蔽 3. 减小环路面积减少磁通量耦合 4. 走线远离开关电源



考试陷阱 / Exam Pitfalls]

1. 符号: 电场力 $F = qE$, 磁场力 $F = qvB \sin \theta$ 。
2. 磁力不做功: 洛伦兹力垂直于速度, 不改变动能。
3. 楞次定律: 感应电流的磁场方向反抗磁通量变化。
4. 法拉第定律负号: 表示楞次定律方向。

11 热力学 / Thermodynamics (BE5B02PH2)

温度与热量 (Temperature and Heat)

概念 (CN): 温度是分子平均动能的度量, 热量是能量传递

Term (EN): Temperature, Heat, Thermal Equilibrium, Specific Heat

热力学第零定律: 如果 A 与 B 热平衡, B 与 C 热平衡, 则 A 与 C 热平衡。

温度标度:

- 摄氏度: T_C (水冰点 0°C , 沸点 100°C)
- 开尔文: $T_K = T_C + 273.15$
- 华氏度: $T_F = \frac{9}{5}T_C + 32$

热量:

$$Q = mc\Delta T \quad (114)$$

其中 c 是比热容 (Specific Heat Capacity)

Key Insight: DHT22 sensor measures temperature using thermistor principle.

核心公式 / Key Formula

热传导 (Fourier's Law):

$$\frac{dQ}{dt} = -kA \frac{dT}{dx} \quad (115)$$

热辐射 (Stefan-Boltzmann Law):

$$P = \varepsilon \sigma AT^4 \quad (116)$$

其中 $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$

理想气体状态方程:

$$PV = nRT \quad (117)$$

$R = 8.314 \text{ J/(mol} \cdot \text{K)}$

热力学定律 (Laws of Thermodynamics)

概念 (CN): 描述热、功和能量转换的基本定律

Term (EN): First/Second Law, Entropy, Carnot Cycle

第一定律 (能量守恒):

$$\Delta U = Q - W \quad (118)$$

内能变化 = 吸收热量 - 对外做功

第二定律:

- 克劳修斯表述: 热量不能自发从低温传到高温
- 开尔文表述: 不可能从单一热源取热全部转化为功

熵 (Entropy):

$$dS = \frac{dQ_{rev}}{T} \quad (119)$$

Key Insight: Any computing system generates heat due to entropy increase.

核心公式 / Key Formula

热力学过程:

过程	条件	Q	W
等容 (Isochoric)	$V = \text{const}$	$nC_V\Delta T$	0
等压 (Isobaric)	$P = \text{const}$	$nC_P\Delta T$	$P\Delta V$
等温 (Isothermal)	$T = \text{const}$	$nRT \ln(V_2/V_1)$	Q
绝热 (Adiabatic)	$Q = 0$	0	$-\Delta U$

绝热过程: $PV^\gamma = \text{const}$, $\gamma = C_P/C_V$

卡诺效率: $\eta = 1 - \frac{T_C}{T_H}$

Thesis Connection

热力学与电子系统:

温度传感器原理: DHT22 使用热敏电阻, 电阻随温度变化:

$$R(T) = R_0 e^{\beta(1/T - 1/T_0)} \quad (120)$$

ESP32 发热: CPU 在计算时消耗功率 $P = VI$, 转化为热量。需要散热设计。

环境监测: 温湿度影响舒适度指数:

$$\text{Heat Index} = f(T, RH) \quad (121)$$

Jan Koller 问题: "What is the accuracy of your temperature sensor?"

答案: DHT22 精度 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 。原理是 NTC 热敏电阻, 电阻随温度指数变化。传感器内置 ADC 和校准数据, 通过单线协议输出数字值。



考试陷阱 / Exam Pitfalls]

1. Q 的符号: $Q > 0$ 系统吸热, $Q < 0$ 系统放热。
2. W 的符号: $W > 0$ 系统对外做功 (膨胀)。
3. 绝热 vs 等温: 绝热过程快, 等温过程慢。
4. 熵增: 孤立系统熵只能增加或不变。

12 波动与光学 / Waves & Optics (BE5B02PH2)

波的基本概念 (Wave Fundamentals)

概念 (CN): 能量和振动在空间中的传播

Term (EN): Wave, Wavelength, Frequency, Phase Velocity

基本参数:

- 波长 (Wavelength): λ - 一个完整波的空间长度
- 频率 (Frequency): f - 每秒振动次数
- 周期 (Period): $T = 1/f$
- 波速 (Phase Velocity): $v = f\lambda$

波的类型:

- 横波 (Transverse): 振动垂直于传播方向 (光、电磁波)
- 纵波 (Longitudinal): 振动平行于传播方向 (声波)

Key Insight: WiFi (2.4GHz) is an electromagnetic wave with $\lambda \approx 12.5$ cm.

核心公式 / Key Formula

一维波动方程:

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \quad (122)$$

行波解:

$$y(x, t) = A \sin(kx - \omega t + \phi) \quad (123)$$

其中:

- 波数 (Wave Number): $k = \frac{2\pi}{\lambda}$
- 角频率: $\omega = 2\pi f$
- 色散关系: $v = \frac{\omega}{k} = f\lambda$

波的现象 (Wave Phenomena)

概念 (CN): 波在传播过程中的各种行为

Term (EN): Interference, Diffraction, Reflection, Refraction

叠加原理: 多个波在空间中合成

$$y_{total} = y_1 + y_2 + \dots \quad (124)$$

干涉 (Interference):

- 相长干涉: 相位差 $= 2n\pi$ (波峰对波峰)
- 相消干涉: 相位差 $= (2n + 1)\pi$ (波峰对波谷)

衍射 (Diffraction): 波绕过障碍物传播

Key Insight: WiFi multipath causes interference patterns in buildings.

核心公式 / Key Formula

反射与折射:

反射定律: $\theta_i = \theta_r$

折射定律 (Snell's Law):

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (125)$$

全内反射: 当 $\theta > \theta_c = \arcsin(n_2/n_1)$

双缝干涉:

$$d \sin \theta = m\lambda \quad (\text{亮条纹}) \quad (126)$$

单缝衍射:

$$a \sin \theta = m\lambda \quad (\text{暗条纹}) \quad (127)$$

电磁波 (Electromagnetic Waves)

概念 (CN): 电场和磁场的振荡在空间中传播

Term (EN): EM Spectrum, Radio Waves, Microwave, Light

麦克斯韦方程组 预言了电磁波的存在

电磁波性质:

- 横波: $\vec{E} \perp \vec{B} \perp \vec{v}$
- 真空速度: $c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \approx 3 \times 10^8 \text{ m/s}$
- 无需介质传播

电磁波谱: 无线电 \rightarrow 微波 \rightarrow 红外 \rightarrow 可见光 \rightarrow 紫外 \rightarrow X射线 \rightarrow 伽马射线

Key Insight: WiFi (2.4 GHz) and Bluetooth (2.402-2.480 GHz) are microwave bands.

核心公式 / Key Formula

电磁波频率与波长:

$$c = f\lambda \Rightarrow \lambda = \frac{c}{f} \quad (128)$$

常见电磁波:

类型	频率	波长
WiFi 2.4GHz	2.4×10^9 Hz	12.5 cm
WiFi 5GHz	5×10^9 Hz	6 cm
可见光 (红)	4×10^{14} Hz	700 nm
可见光 (紫)	8×10^{14} Hz	400 nm

信号衰减 (Free Space Path Loss):

$$FSPL = \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2 \propto \frac{1}{r^2} \quad (129)$$

声波 (Sound Waves)

概念 (CN): 在介质中传播的纵波

Term (EN): Sound, Intensity, Decibel, Doppler Effect

声速: 取决于介质

- 空气 (20°C): 343 m/s
- 水: 1500 m/s
- 钢: 5000 m/s

多普勒效应:

$$f' = f \frac{v \pm v_o}{v \mp v_s} \quad (130)$$

声强级:

$$L = 10 \log_{10} \frac{I}{I_0} \text{ dB}, \quad I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2 \quad (131)$$

Key Insight: Ultrasonic sensors use sound wave timing for distance measurement.

Thesis Connection

波动与无线通信:

你的论文使用 WiFi 进行无线通信:

WiFi 信号衰减: RSSI (接收信号强度) 遵循反平方定律:

$$P_r \propto \frac{1}{d^2} \quad (132)$$

这意味着距离加倍, 信号功率减少为 $1/4$ (即 -6 dB)。

多径干涉: 室内环境中, 直射波和反射波叠加产生干涉:

- 相长干涉: 信号增强
- 相消干涉: 信号减弱 (死区)

天线设计: PCB 天线长度与波长相关:

$$L \approx \frac{\lambda}{4} = \frac{c}{4f} \approx 31 \text{ mm} \quad (\text{for } 2.4 \text{ GHz}) \quad (133)$$

Jan Koller 问题: "Why did you choose 2.4GHz WiFi over 5GHz?"

答案: 2.4 GHz 波长更长 (12.5 cm vs 6 cm), 穿透墙壁能力更强, 覆盖范围更广。虽然 5 GHz 带宽更大, 但对于传感器数据 (几百字节) 不需要高吞吐量。2.4 GHz 更适合智能家居场景。

!

考试陷阱 / Exam Pitfalls]

1. **波速 vs 粒子速度:** 波速是相位传播速度, 粒子在原地振动。
2. **折射:** 进入光密介质时, 光线向法线偏折。
3. **干涉条件:** 两波必须相干 (同频、稳定相位差)。
4. **dB 计算:** dB 是对数单位, 3 dB 对应功率翻倍。

Part IV

电子与计算机核心 / EECS Core

13 电路理论 / Circuit Theory (BE5B31ZEO)

基尔霍夫定律 (Kirchhoff's Laws)

概念 (CN): 电路分析的两个基本定律

Term (EN): KVL, KCL, Node, Loop, Branch

基尔霍夫电流定律 (KCL): 节点上流入的电流之和等于流出的电流之和。

$$\sum_{k=1}^n I_k = 0 \quad (134)$$

电流守恒 \Rightarrow 没有电荷在节点积累

基尔霍夫电压定律 (KVL): 回路中电压降之和等于零。

$$\sum_{k=1}^n V_k = 0 \quad (135)$$

能量守恒 \Rightarrow 绕回路一圈回到原点

Key Insight: Every circuit analysis problem uses KVL and KCL.

核心公式 / Key Formula

KCL 示例: 节点分析

$$\text{节点 A: } I_1 = I_2 + I_3$$

流入 = 流出

KVL 示例: 回路分析

$$\begin{aligned} -V_s + V_{R1} + V_{R2} &= 0 \\ \Rightarrow V_s &= I \cdot R_1 + I \cdot R_2 = I(R_1 + R_2) \end{aligned}$$

分压公式 (串联电阻):

$$V_2 = V_s \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (136)$$

分流公式 (并联电阻):

$$I_1 = I_{total} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (137)$$

欧姆定律与电阻 (Ohm's Law and Resistors)

概念 (CN): 电压、电流和电阻的基本关系

Term (EN): Ohm's Law, Resistance, Series, Parallel

欧姆定律:

$$\boxed{V = IR} \quad \text{或} \quad I = \frac{V}{R} \quad \text{或} \quad R = \frac{V}{I} \quad (138)$$

功率:

$$P = VI = I^2 R = \frac{V^2}{R} \quad (139)$$

电阻组合:

- 串联: $R_{eq} = R_1 + R_2 + \dots$
- 并联: $\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots$

Key Insight: Voltage divider is fundamental in sensor interfacing.

核心公式 / Key Formula

两电阻并联:

$$R_{eq} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} \quad (140)$$

电导 (Conductance):

$$G = \frac{1}{R}, \quad \text{单位: 西门子 (S)} \quad (141)$$

电阻率:

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (142)$$

ρ : 电阻率, L : 长度, A : 截面积

温度系数:

$$R(T) = R_0[1 + \alpha(T - T_0)] \quad (143)$$

电容与电感 (Capacitors and Inductors)

概念 (CN): 储能元件

Term (EN): Capacitor, Inductor, Time Constant, Energy Storage

电容器:

$$C = \frac{Q}{V}, \quad I = C \frac{dV}{dt} \quad (144)$$

能量: $E = \frac{1}{2}CV^2$

电感器:

$$V = L \frac{dI}{dt} \quad (145)$$

能量: $E = \frac{1}{2}LI^2$

组合规则:

- 电容串联: $\frac{1}{C_{eq}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$ (与电阻相反!)
- 电容并联: $C_{eq} = C_1 + C_2$
- 电感组合规则与电阻相同

Key Insight: Decoupling capacitors filter power supply noise.

核心公式 / Key Formula

RC 电路时间常数:

$$\tau = RC \quad (146)$$

RC 充电:

$$V_C(t) = V_s(1 - e^{-t/\tau}) \quad (147)$$

RC 放电:

$$V_C(t) = V_0 e^{-t/\tau} \quad (148)$$

RL 电路时间常数:

$$\tau = \frac{L}{R} \quad (149)$$

5 τ 法则: 约 99.3% 达到稳态

交流电路分析 (AC Circuit Analysis)

概念 (CN): 正弦稳态电路的分析方法

Term (EN): Phasor, Impedance, Reactance, RMS

正弦信号:

$$v(t) = V_m \cos(\omega t + \phi) \quad (150)$$

相量 (Phasor):

$$\mathbf{V} = V_m \angle \phi = V_m e^{j\phi} \quad (151)$$

阻抗 (Impedance):

$$\mathbf{Z} = R + jX \quad (152)$$

- 电阻: $Z_R = R$
- 电容: $Z_C = \frac{1}{j\omega C} = -\frac{j}{\omega C}$
- 电感: $Z_L = j\omega L$

Key Insight: Complex impedance makes AC analysis like DC analysis with Ohm's law.

核心公式 / Key Formula

RMS (有效值):

$$V_{rms} = \frac{V_m}{\sqrt{2}} \approx 0.707V_m \quad (153)$$

平均功率:

$$P = V_{rms} I_{rms} \cos \phi = I_{rms}^2 R \quad (154)$$

功率因数: $\cos \phi$ (相位差的余弦)

谐振频率 (RLC 电路):

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (155)$$

等效电路定理 (Equivalent Circuit Theorems)

概念 (CN): 将复杂电路简化为等效电路

Term (EN): Thévenin, Norton, Equivalent Circuit

戴维南定理 (Thévenin's Theorem): 任何线性两端网络可以用电压源 V_{th} 和串联电阻 R_{th} 等效。

诺顿定理 (Norton's Theorem): 任何线性两端网络可以用电流源 I_N 和并联电阻 R_N 等效。

转换关系:

$$V_{th} = I_N \cdot R_N, \quad R_{th} = R_N \quad (156)$$

Key Insight: Thévenin equivalent simplifies load analysis.

核心公式 / Key Formula

求戴维南等效步骤:

1. 断开负载
2. V_{th} : 计算开路电压
3. R_{th} : 关闭独立源 (电压源短路, 电流源开路), 求等效电阻

最大功率传输定理: 当 $R_L = R_{th}$ 时, 负载获得最大功率:

$$P_{max} = \frac{V_{th}^2}{4R_{th}} \quad (157)$$

Thesis Connection

电路理论与 ESP32 电源设计:

LDO 稳压器分析 (使用 KVL): AMS1117-3.3 将 5V USB 降压到 3.3V:

$$V_{USB} = V_{dropout} + V_{out} \quad (158)$$

$V_{dropout} \approx 1.1V$, $V_{out} = 3.3V$

分压器设计 (使用 KVL): 如果你需要将 5V 传感器信号连接到 3.3V GPIO:

$$V_{out} = 5V \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} = 3.3V \quad (159)$$

选择 $R_1 = 1.8k\Omega$, $R_2 = 3.3k\Omega$

退耦电容 (使用 KCL): 100nF 电容在芯片 VCC 附近:

- 芯片瞬态电流需求 \rightarrow 电容提供
- KCL: $I_{supply} + I_{cap} = I_{chip}$

Jan Koller 问题: "How do you handle power supply noise?"

答案: 使用退耦电容。根据 KCL, 当芯片需要瞬态电流时, 附近的电容提供。我在每个 IC 的 VCC 引脚使用 100nF 陶瓷电容 (高频滤波) 和 10 μ F 电解电容 (低频滤波)。这形成一个 RC 低通滤波器。

!

考试陷阱 / Exam Pitfalls]

1. **KVL 符号:** 绕回路时保持一致的方向, 注意电压升降。
2. **电容串并联:** 与电阻规则相反! 串联电容减小, 并联增加。
3. **相量计算:** $j^2 = -1$, 注意复数运算。
4. **时间常数:** RC 充电到 $1 - e^{-1} \approx 63.2\%$, 不是 50%!

14 Semiconductors (ELP)

Exam Cheat Sheet / 极速复习

- **Core Concept:** 半导体物理。重点是 PN 结 (PN Junction)、二极管和晶体管 (MOSFET/BJT) 的工作区。
- **Key Formula:** ...
- **Watch Out:** Common exam pitfalls.

14.1 Concepts / 核心概念

PN Junction, Forward Bias, Depletion Region, MOSFET

半导体物理。重点是 PN 结 (PN Junction)、二极管和晶体管 (MOSFET/BJT) 的工作区。

14.2 Formulas / 公式

$$x = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad (160)$$

14.3 Exam Questions / 常考题型

- Define ...
- Calculate ...

15 Analog & Digital Circuits (ELP)

Exam Cheat Sheet / 极速复习

- **Core Concept:** 模拟与数字电路。重点是放大器 (Op-Amp) 配置和基本逻辑门电路。
- **Key Formula:** ...
- **Watch Out:** Common exam pitfalls.

15.1 Concepts / 核心概念

Operational Amplifier, Gain, Logic Gates, CMOS

模拟与数字电路。重点是放大器 (Op-Amp) 配置和基本逻辑门电路。

15.2 Formulas / 公式

$$x = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad (161)$$

15.3 Exam Questions / 常考题型

- Define ...
- Calculate ...

16 微处理器与嵌入式系统 / Microprocessors & Embedded Systems

处理器架构 (CPU Architecture)

概念 (CN): CPU 的基本组成和工作原理

Term (EN): Von Neumann, Harvard, ALU, Control Unit, Registers

冯诺依曼架构 (Von Neumann):

- 程序和数据共享同一内存
- 通过同一总线访问
- 优点: 设计简单
- 缺点: 冯诺依曼瓶颈 (Bottleneck)

哈佛架构 (Harvard):

- 程序和数据使用独立内存
- 可同时读取指令和数据
- 优点: 更高带宽, 常用于 DSP/嵌入式

Key Insight: ESP32 使用修改版哈佛架构 (Modified Harvard)。

核心公式 / Key Formula

CPU 核心组件:

组件	功能
ALU (算术逻辑单元)	执行算术和逻辑运算
Control Unit (控制单元)	指令解码和执行控制
Registers (寄存器)	快速临时存储
Program Counter (PC)	下一条指令地址
Stack Pointer (SP)	栈顶地址

指令周期: Fetch → Decode → Execute → Write-back

ESP32-S3 平台 (Your Thesis Platform)

概念 (CN): 论文使用的实际微控制器

Term (EN): ESP32-S3, Xtensa LX7, Dual-Core, Wi-Fi, Bluetooth

ESP32-S3 规格 (Source: esp32s3.yaml):

- CPU: Xtensa LX7 双核 @ 240 MHz
- 内存: 512 KB SRAM + PSRAM 支持
- Flash: 通常 4-16 MB
- 无线: Wi-Fi 802.11 b/g/n + BLE 5.0
- 特性: 硬件加密加速器 (AES, SHA, RSA, ECC)

你的配置 (from esp32s3.yaml L5-18):

- Board: esp32-s3-devkitc-1
- Framework: ESP-IDF
- TLS: ECDSA P-256 + X25519 + TLS 1.3

I2C 通信协议 (I2C Protocol)

概念 (CN): 两线制同步串行通信

Term (EN): I2C, SDA, SCL, Master, Slave, Address

基本结构:

- SDA: Serial Data (数据线)
- SCL: Serial Clock (时钟线)
- 主从模式: Master 发起通信, Slave 响应
- 7 位地址: 最多 128 个设备

你的配置 (Source: esp32s3.yaml L88-93):

```
i2c:
  sda: GPIO5
  scl: GPIO4
  scan: true
  id: bus_a
  frequency: 100kHz
```

设备地址:

- MPU6050: 0x68
- BMP180: 0x77

核心公式 / Key Formula

I2C 通信时序:

1. **START**: SDA ↓ while SCL = HIGH
2. **Address**: 7-bit 设备地址 + R/W bit
3. **ACK**: Slave 拉低 SDA 表示确认
4. **Data**: 8-bit 数据传输
5. **STOP**: SDA ↑ while SCL = HIGH

标准速度:

- Standard Mode: 100 kHz (你的配置)
- Fast Mode: 400 kHz
- Fast Mode Plus: 1 MHz

中断系统 (Interrupt System)

概念 (CN): 硬件事件触发 CPU 响应

Term (EN): Interrupt, ISR, IRQ, Priority, Nesting

中断类型:

- 外部中断: GPIO 电平变化 (如按钮、传感器)
- 定时器中断: 周期性定时事件
- 通信中断: UART/I2C/SPI 数据就绪
- 软件中断: 程序主动触发

中断服务例程 (ISR):

- 必须快速执行
- 避免阻塞操作
- 使用 volatile 变量通信

Key Insight: ESP32 传感器采样使用定时器中断实现周期性读取。

你的传感器配置 / Your Sensor Configuration

MPU6050 IMU (Source: esp32s3.yaml L107-155):

```
- platform: mpu6050
  i2c_id: bus_a
  address: 0x68
  accel_x:
    name: "Acceleration_X"
    filters:
      - offset: -0.877 # Calibration
      - throttle: 0.3s
  gyro_x:
    name: "Angular_Velocity_X"
    filters:
      - offset: 2.53 # Calibration
      - throttle: 0.3s
  update_interval: 0.1s # 10 Hz sampling
```

关键参数:

传感器	采样率	用途
MPU6050	10 Hz (0.1s)	跌倒检测
BMP180	0.2 Hz (5s)	环境温压
KY-037	5 Hz (0.2s)	声音检测

校准偏移 (Calibration Offsets):

- Acc X: -0.877, Y: -0.145, Z: -0.564 m/s²
- Gyro X: +2.53, Y: -2.68, Z: +2.44 °/s

Thesis Connection

论文实现总结 (VERIFIED from source):

硬件:

- MCU: ESP32-S3 DevKitC-1 (Xtensa LX7 双核 @ 240 MHz)
- IMU: MPU6050 (I2C @ 0x68, 采样 10 Hz)
- 环境: BMP180 (温度/气压)
- 声音: KY-037 (ADC)

通信:

- 传感器 \leftrightarrow MCU: I2C (100 kHz)
- MCU \leftrightarrow Server: MQTT over TLS 1.3 (mTLS)
- 加密: ECDSA P-256 + X25519 (硬件加速)

算法 (NOT Kalman Filter!):

- 方法: 双阈值法 (Huynh et al. 2015)
- 条件: $SMV > 2.4G \wedge \omega > 240^\circ/s$
- 性能: 96.3% 灵敏度, 96.2% 特异度

Jan Koller 问题: “How does the I2C bus handle multiple sensors?”

答案: I2C 是多主从总线。每个设备有唯一地址 (MPU6050: 0x68, BMP180: 0x77)。Master (ESP32) 发送 7-bit 地址选择设备, 然后进行读写。我配置了 100 kHz 标准模式, 足够处理 10 Hz 传感器采样。

[!]

考试陷阱 / Exam Pitfalls]

1. 哈佛 vs 冯诺依曼: ESP32 是修改版哈佛架构 (指令/数据缓存分离)
2. I2C 地址: 7-bit 地址, 不是 8-bit! 第 8 位是 R/W 标志
3. 中断延迟: ISR 必须快, 不能做 printf 或 delay
4. 采样率: 奈奎斯特定理要求采样率 $\geq 2 \times$ 信号频率

17 Algorithms (PRG/PGE)

Exam Cheat Sheet / 极速复习

- **Core Concept:** 基本算法与数据结构。重点是排序 (Sorting)、链表 (Linked List) 和复杂度分析 (Big-O)。
- **Key Formula:** ...
- **Watch Out:** Common exam pitfalls.

17.1 Concepts / 核心概念

Time Complexity, Sorting, Recursion, Stack, Queue

基本算法与数据结构。重点是排序 (Sorting)、链表 (Linked List) 和复杂度分析 (Big-O)。

17.2 Formulas / 公式

$$x = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad (162)$$

17.3 Exam Questions / 常考题型

- Define ...
- Calculate ...

Part V

专业方向 / Specialization

18 Electromagnetic Field Theory (EMT)

Exam Cheat Sheet / 极速复习

- **Foundation:** Maxwell's 4 Equations. Memorize Integral AND Differential forms.
- **Static vs Dynamic:** Electrostatics ($\partial/\partial t = 0$) vs Electrodynamics (Time-varying B creates E).
- **Thesis Link:** Signals on your PCB. High frequency = Transmission line effects (Reflections) if traces are long.

18.1 Concepts / 核心概念

Gauss Law, Ampere Law, Faraday Law, Biot-Savart Law, Displacement Current

Maxwell's Equations / 麦克斯韦方程组

The "Standard Model" of Electrical Engineering:

- **Gauss's Law:** $\oint \vec{D} \cdot d\vec{S} = Q_{enc}$ (Charge creates Electric Field).
- **Gauss's Law (Mag):** $\oint \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0$ (No magnetic monopoles).
- **Faraday's Law:** $\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d\Phi_B}{dt}$ (Changing B-field creates Voltage). **Key for Induction Machines!**
- **Ampere-Maxwell:** $\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = I_{enc} + \frac{d\Phi_D}{dt}$ (Current + Changing E-field creates B-field).

18.2 Formulas / 公式

$$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \quad (\text{Lorentz Force}) \quad (163)$$

$$C = \frac{\epsilon A}{d} \quad (\text{Parallel Plate Capacitor}) \quad (164)$$

18.3 Exam Questions / 常考题型

- "Explain Skin Effect." (A: AC current flows only on the surface of conductor at high freq. Increases effective Resistance).
- "Derive the capacitance of a coaxial cable using Gauss's law."

19 Logic Systems (LSP)

Exam Cheat Sheet / 极速复习

- **Boolean Algebra:** De Morgan's Laws ($\overline{A \cdot B} = \overline{A} + \overline{B}$).
- **K-Maps:** Minimization of logic functions (grouping 1s).
- **FSM:** Finite State Machines (Mealy vs Moore).
- **Thesis Link:** Your ESP32 GPIOs are essentially controlled by memory-mapped *registers* (Flip-flops).

19.1 Concepts / 核心概念

Combinational Logic, Sequential Logic, Flip-Flops (D, JK), Multiplexer, VHDL

Sequential Logic / 时序逻辑

Unlike Combinational logic (Output = f(Input)), Sequential logic has ****Memory****.

- **Latch vs Flip-Flop:** Latch is level-triggered; Flip-Flop is edge-triggered (synchronous).
- **Setup Time (t_{su}):** Data must be stable *before* clock edge.
- **Hold Time (t_h):** Data must be stable *after* clock edge.

FSM (Finite State Machines) / 有限状态机

- **Moore:** Output depends only on *Current State*. (Safer glitch-wise).
- **Mealy:** Output depends on *Current State AND Input*. (Reacts faster, but risky).

19.2 Formulas / 公式

$$F(A, B, C) = \sum m(0, 1, 4, 7) \quad (\text{Sum of Products}) \quad (165)$$

19.3 Exam Questions / 常考题型

- "Design a 3-bit counter using D Flip-Flops." (A: Next state logic + Current state register).
- "What is a Hazard in combinational logic?" (A: Temporary glitch due to unequal delay paths).

20 Signals & Systems (TES)

Exam Cheat Sheet / 极速复习

- **Transforms:** Laplace (s -domain) for Continuous; Z-transform (z -domain) for Discrete.
- **Sampling:** $f_s \geq 2f_{max}$ (Nyquist). Aliasing happens if violated.
- **Convolution:** Output $y(t) = x(t) * h(t)$.
- **Thesis Link:** Your accelerometer data is sampled at discrete intervals (e.g., 50Hz).

20.1 Concepts / 核心概念

LTI Systems, Impulse Response, Frequency Response, Pole-Zero Plot, DFT/FFT

LTI Systems / 线性时不变系统

Linear Time-Invariant systems are characterized completely by their **Impulse Response** $h(t)$.

- **Linear:** $S(ax_1 + bx_2) = aS(x_1) + bS(x_2)$.
- **Time-Invariant:** Shift in input causes same shift in output.

Fourier Series & Transform / 傅里叶变换

Decomposing a signal into sine waves.

- **Periodic:** Fourier Series (discrete spectrum).
- **Aperiodic:** Fourier Transform (continuous spectrum).

20.2 Formulas / 公式

$$X(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j\omega t} dt \quad (\text{CTFT}) \quad (166)$$

$$y[n] = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x[k]h[n-k] \quad (\text{Discrete Convolution}) \quad (167)$$

20.3 Exam Questions / 常考题型

- "What happens if you sample a 100Hz signal at 150Hz?" (A: Aliasing. You "see" a 50Hz ghost signal. $150 - 100 = 50$).
- "Explain the relationship between the s -plane and z -plane." (A: Left Half Plane in $s \leftrightarrow$ Unit Circle Interior in z).

21 Electrical Machines (SP1)

Exam Cheat Sheet / 极速复习

- **Transformer:** Static theoretical basis ($U_1/U_2 = N_1/N_2$). Hysteresis & Eddy Current losses.
- **Induction Machine:** Asynchronous. Key param: ****Slip (s)****.
- **Synchronous Machine:** Constant speed $n_s = 60f/p$. Used in power plants.

21.1 Concepts / 核心概念

Magnetic Circuits, Transformer Equivalent Circuit, Induction Motor Torque, Slip, Commutator (DC)

Induction Motor / 感应电机

The most common industrial motor.

- **Slip (s):** Difference between Stator field speed (n_s) and Rotor mechanical speed (n).
- **Start-up:** High current ($5 - 7 \times I_n$). Needs Star-Delta starter or Soft Starter.

Transformer Equivalent Circuit / 变压器等效电路

Include:

- Series: $R_1, X_{\sigma 1}$ (Primary winding loss/leakage).
- Shunt: R_{Fe} (Core loss), X_μ (Magnetizing reactance).
- Ideal Transformer: Ratios $N_1 : N_2$.

21.2 Formulas / 公式

$$n_s = \frac{60f}{p} \quad (\text{Sync Speed, } p = \text{pole pairs}) \quad (168)$$

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \times 100\% \quad (169)$$

21.3 Exam Questions / 常考题型

- "Why does a transformer heat up?" (A: Joule losses I^2R in windings + Iron losses in core).
- "Sketch the Torque-Slip ($M-s$) characteristic of an induction motor." (Identify Starting Torque, Breakdown Torque, Nominal Point).

22 Materials (MVE)

Exam Cheat Sheet / 极速复习

- **Classes:** Conductors (Metals), Semiconductors (Si, Ge), Insulators (Dielectrics).
- **Band Theory:** Energy gap (E_g). Metals: overlap. Semi: small gap. Insulators: large gap.
- **Thesis Link:** PCB substrate (FR4) is a dielectric. Copper traces are conductors.

22.1 Concepts / 核心概念

Resistivity, Permittivity, Permeability, Polarization, Breakdown Voltage

Dielectrics / 电介质

Used in capacitors and insulation.

- **Polarization:** Electric field aligns dipoles.
- **Losses** ($\tan \delta$): Energy lost as heat in AC fields. Important for high-frequency PCBs!
- **Breakdown:** Max field strength before arcing (e.g., air ≈ 3 MV/m).

Magnetic Materials / 磁性材料

- **Ferromagnetic:** Iron, Cobalt. High μ_r . Used in Transformer cores.
- **Hysteresis Loop:** Area inside loop = Energy loss per cycle. Soft magnetic materials have narrow loops (good for transformers).

22.2 Formulas / 公式

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (\text{Resistance}) \quad (170)$$

$$\sigma = ne\mu \quad (\text{Drift Conductivity}) \quad (171)$$

22.3 Exam Questions / 常考题型

- "Why do we laminate transformer cores?" (A: To reduce Eddy Currents by increasing resistance in the loop path).
- "What distinguishes a semiconductor from an insulator?" (A: Band gap energy. Si ≈ 1.1 eV).

23 Power Systems (EN1/EN2)

Exam Cheat Sheet / 极速复习

- **Grid Setup:** Generation (10-20kV) → Transmission (400kV/220kV/110kV) → Consumer (230V/400V).
- **3-Phase:** $\sqrt{3}$ factor is critical. Star (Y) vs Delta (Δ).
- **Control:** P controls Frequency (f), Q controls Voltage (U).
- **Thesis Link:** Batteries in IoT. Energy density (Li-Ion vs Li-Po).

23.1 Concepts / 核心概念

Active/Reactive Power, Power Factor, Transmission Line Models, Short Circuit, Substations

Three-Phase Power / 三相电

- ****Phase Voltage (U_{ph})**:** Line-to-Neutral (230V in EU).
- ****Line Voltage (U_{line})**:** Phase-to-Phase (400V in EU).

Relationship: $U_{line} = \sqrt{3}U_{ph}$.

Transmission Lines / 输电线路模型

- **Short Line:** Series impedance $Z = R + jX$.
- **Medium/Long Line (Pi-Model):** Includes shunt capacitance C (charging current). The "Ferranti Effect" causes voltage rise at open-load end.

23.2 Formulas / 公式

$$S = P + jQ = \sqrt{3} \cdot U_{line} \cdot I_{line} \cdot (\cos \phi + j \sin \phi) \quad (172)$$

$$\Delta U \approx \frac{PR + QX}{U_n} \quad (\text{Voltage Drop Approximation}) \quad (173)$$

23.3 Exam Questions / 常考题型

- "Why do we use High Voltage for transmission?" (A: Reduce current I , since Loss $P_{loss} = I^2 R$. Higher $U \rightarrow$ Lower I).
- "Draw the phasor diagram of a synchronous generator connected to the grid."

24 AI & Classification (KUI/RPZ)

Exam Cheat Sheet / 极速复习

- **Search:** BFS (Queue, Optimal for unweighted), DFS (Stack). A* (Heuristic $f = g + h$).
- **Classification:** Supervised Learning. Bayes Classifier minimize risk.
- **Thesis Link:** Your "Threshold-based Fall Detection" is a *Rule-based Classifier*. A Neural Network would learn these thresholds automatically.

24.1 Concepts / 核心概念

State Space, Heuristic, Neural Networks, Overfitting, Training/Test Set

Search Algorithms / 搜索算法

- **Uninformed:** BFS (Complete), DFS (Not complete, memory efficient).
- **Informed:** A* uses heuristic $h(n)$ (estimated cost to goal). Proof of optimality requires $h(n)$ to be *admissible* (never overestimate).

Pattern Recognition / 模式识别

- **Feature Space:** The dimensions of your data (e.g., in thesis: Accel-X, Accel-Y, Gyro-Z).
- **Linear Classifier:** Separates classes with a hyperplane (Perceptron).
- **Bias-Variance Tradeoff:** Simple models underfit (High Bias), complex models overfit (High Variance).

24.2 Formulas / 公式

$$P(C|X) = \frac{P(X|C)P(C)}{P(X)} \quad (\text{Bayes Rule}) \quad (174)$$

24.3 Exam Questions / 常考题型

- "What is the difference between A* and Dijkstra?" (A: A* uses heuristics to guide search towards the goal, Dijkstra is just A* with $h = 0$).
- "Explain Overfitting." (A: Model memorizes noise instead of learning patterns. Fails on new data).

25 计算机体系结构 / Computer Architecture

冯诺依曼架构 (Von Neumann Architecture)

概念 (CN): 现代计算机的基础模型

Term (EN): Stored-Program Computer, CPU, Memory, I/O

五大部件:

1. **运算器 (ALU):** 执行算术和逻辑运算
2. **控制器 (CU):** 指令解码和执行控制
3. **存储器 (Memory):** 存储程序和数据
4. **输入设备 (Input):** 键盘、传感器
5. **输出设备 (Output):** 显示器、执行器

Key Insight: Programs and data share the same memory = "stored program" concept.

核心公式 / Key Formula

指令周期:

$$\text{Instruction Cycle} = \text{Fetch} + \text{Decode} + \text{Execute} + \text{Memory} + \text{Write-back} \quad (175)$$

CPU 性能公式:

$$\text{CPU Time} = \text{IC} \times \text{CPI} \times \text{Clock Period} \quad (176)$$

其中:

- $\text{IC} = \text{Instruction Count}$ (指令数)
- $\text{CPI} = \text{Cycles Per Instruction}$ (每条指令周期数)
- $\text{Clock Period} = 1/f_{clk}$

流水线 (Pipeline)

概念 (CN): 将指令执行分解为多个阶段, 并行处理多条指令

Term (EN): Pipeline, Pipeline Hazards, Stall, Forwarding

经典 5 级流水线:

1. **IF (Instruction Fetch):** 取指令
2. **ID (Instruction Decode):** 译码 + 读寄存器
3. **EX (Execute):** ALU 执行
4. **MEM (Memory Access):** 访存
5. **WB (Write Back):** 结果写回寄存器

Key Insight: Pipelining increases throughput, not latency. Each instruction still takes 5 cycles, but one completes every cycle.

核心公式 / Key Formula

理想吞吐量:

$$\text{Throughput} = \frac{1}{\text{Clock Period}} \quad (1 \text{ instruction/cycle}) \quad (177)$$

加速比:

$$\text{Speedup} = \frac{n \times k}{n + k - 1} \approx k \quad (\text{当 } n \gg k) \quad (178)$$

其中 n = 指令数, k = 流水线级数

!

流水线冲突 / Pipeline Hazards]

1. **结构冲突 (Structural):** 硬件资源冲突 (如同时访问内存)
 - 解决: 增加硬件资源 (分离 I-Cache 和 D-Cache)
2. **数据冲突 (Data):** RAW (Read After Write) 依赖
 - 解决: Forwarding (数据旁路)、Stall (插入气泡)
3. **控制冲突 (Control):** 分支指令导致的冲突
 - 解决: 分支预测 (Branch Prediction)、延迟槽

高速缓存 (Cache Memory)

概念 (CN): 位于 CPU 和主存之间的小容量高速存储器

Term (EN): Cache, Hit Rate, Miss Rate, Locality

局部性原理:

- **时间局部性:** 刚访问的数据可能很快再次访问
- **空间局部性:** 访问某地址后, 邻近地址也可能被访问

Cache 层次:

- L1 Cache: 最快, 最小 (32-64KB), CPU 内部
- L2 Cache: 中等 (256KB-1MB)
- L3 Cache: 最大, 多核共享 (2-32MB)

Key Insight: Cache exploits locality to bridge the CPU-Memory speed gap.

核心公式 / Key Formula

平均访存时间 (AMAT):

$$AMAT = \text{Hit Time} + \text{Miss Rate} \times \text{Miss Penalty} \quad (179)$$

命中率:

$$\text{Hit Rate} = \frac{\text{Hits}}{\text{Hits} + \text{Misses}} \quad (180)$$

Cache 映射方式:

- **直接映射:** 每个主存块只能映射到一个 Cache 行
- **全相联:** 每个主存块可以映射到任意 Cache 行
- **组相联:** 折中方案 (n-way set associative)

分支预测 (Branch Prediction)

概念 (CN): 在分支指令结果确定前预测其方向

Term (EN): Static Prediction, Dynamic Prediction, BTB

预测策略:

- **静态预测:** 总是预测跳转/不跳转
- **1-bit 预测器:** 上次跳转则预测跳转
- **2-bit 预测器:** 四状态机 (强跳转、弱跳转、弱不跳转、强不跳转)

Key Insight: Modern CPUs achieve >95% branch prediction accuracy.

核心公式 / Key Formula

2-bit 饱和计数器状态转换:

状态 00 (强不跳转) $\xrightarrow{\text{taken}}$ 状态 01
状态 01 (弱不跳转) $\xrightarrow{\text{taken}}$ 状态 10
状态 10 (弱跳转) $\xrightarrow{\text{not taken}}$ 状态 01
状态 11 (强跳转) $\xrightarrow{\text{not taken}}$ 状态 10

分支惩罚:

$$\text{Penalty} = \text{Pipeline Depth} \times (1 - \text{Prediction Accuracy}) \quad (181)$$

RISC vs CISC

概念 (CN): 两种指令集设计哲学

Term (EN): Reduced Instruction Set Computer, Complex Instruction Set Computer

特性	RISC	CISC
指令数量	少 (100+)	多 (1000+)
指令长度	固定	可变
寻址模式	简单	复杂
寄存器数	多 (32+)	少
流水线	易实现	难
例子	ARM, RISC-V, MIPS	x86, x64

Key Insight: RISC simplifies hardware, enabling faster clocks and better pipelining.

Thesis Connection

ESP32-S3 体系结构:

你的论文使用 **ESP32-S3**, 基于 Xtensa LX7 架构 (类 RISC)。

架构特点:

- **双核:** 两个 LX7 核心, 可并行处理
- **Harvard:** 分离的指令和数据总线
- **Cache:** 16KB I-Cache, 16KB D-Cache

Jan Koller 问题: "Is ESP32 RISC or CISC?"

答案: Xtensa 是一种可配置的 RISC 架构。它有固定长度指令 (24-bit)、大量寄存器 (64 个)、简单寻址模式。

!

考试陷阱 / Exam Pitfalls]

1. **流水线加速比:** 不是无限的! 受限于冲突和依赖。
2. **Cache 映射:** 直接映射冲突最多, 全相联冲突最少但硬件复杂。
3. **分支预测:** 2-bit 比 1-bit 更稳定 (需要连续两次错误才改变预测)。

26 控制系统 / Control Systems

开环与闭环控制 (Open-Loop vs Closed-Loop)

概念 (CN): 控制系统的两种基本结构

Term (EN): Open-Loop Control, Closed-Loop (Feedback) Control

开环控制 (Open-Loop):

- 无反馈，输出不影响输入
- 简单但无法自动纠错
- 例：定时器控制的洗衣机

闭环控制 (Closed-Loop):

- 有反馈，输出通过传感器反馈到输入
- 可以自动调节误差
- 例：恒温器、巡航控制

Key Insight: Feedback is the key difference. Closed-loop systems are self-correcting but can become unstable.

核心公式 / Key Formula

开环传递函数:

$$Y(s) = G(s) \cdot R(s) \quad (182)$$

闭环传递函数:

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{G(s)}{1 + G(s)H(s)} \quad (183)$$

其中:

- $G(s)$ = 前向通道传递函数
- $H(s)$ = 反馈通道传递函数
- $R(s)$ = 参考输入
- $Y(s)$ = 输出

PID 控制器 (PID Controller)

概念 (CN): 比例-积分-微分控制器，工业控制中最常用的控制器

Term (EN): Proportional-Integral-Derivative Controller

三个组成部分:

- **P (比例):** 对当前误差的响应。 K_p 越大，响应越快，但可能振荡。
- **I (积分):** 对累积误差的响应。消除稳态误差，但增加超调。
- **D (微分):** 对误差变化率的响应。预测误差趋势，减少超调。

Key Insight: P = "现在的误差", I = "过去的误差", D = "未来的误差"。

核心公式 / Key Formula

时域表达式:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (184)$$

传递函数形式:

$$C(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (185)$$

其中:

- $e(t) = r(t) - y(t)$ = 误差信号
- K_p = 比例增益
- K_i = 积分增益
- K_d = 微分增益
- $T_i = K_p / K_i$ = 积分时间
- $T_d = K_d / K_p$ = 微分时间

PID 调参口诀

Ziegler-Nichols 经验法则:

1. 设 $K_i = 0, K_d = 0$
2. 增大 K_p 直到系统临界振荡，记录临界增益 K_u 和振荡周期 T_u
3. 按下表设定参数:

控制器	K_p	K_i	K_d
P	$0.5K_u$	—	—
PI	$0.45K_u$	$1.2K_p/T_u$	—
PID	$0.6K_u$	$2K_p/T_u$	$K_p T_u / 8$

稳定性分析 (Stability Analysis)

概念 (CN): 判断系统是否稳定 (输出是否会发散)

Term (EN): BIBO Stability, Poles, Routh-Hurwitz Criterion

稳定性条件:

- **BIBO 稳定:** 有界输入产生有界输出
- **极点位置:** 所有闭环极点必须在左半平面 (LHP)
- 极点 $\text{Re}(p) < 0 \Rightarrow$ 稳定

Key Insight: A system is stable if all poles of the closed-loop transfer function have negative real parts.

核心公式 / Key Formula

特征方程:

$$1 + G(s)H(s) = 0 \quad (186)$$

Routh-Hurwitz 判据:

对于特征多项式 $a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0 = 0$:

- 所有系数 $a_i > 0$ (必要条件)
- Routh 表第一列所有元素同号 \Rightarrow 稳定

二阶系统:

$$G(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (187)$$

稳定条件: $\zeta > 0$ (阻尼比为正)

频率响应 (Frequency Response)

概念 (CN): 系统对不同频率正弦输入的响应特性

Term (EN): Bode Plot, Gain Margin, Phase Margin

Bode 图:

- 幅频特性: $20 \log |G(j\omega)|$ vs $\log \omega$
- 相频特性: $\angle G(j\omega)$ vs $\log \omega$

稳定裕度:

- **增益裕度 (GM):** 相位 $= -180^\circ$ 时的增益距离 0dB 多远
- **相位裕度 (PM):** 增益 $= 0\text{dB}$ 时的相位距离 -180° 多远

Key Insight: $\text{GM} > 0\text{dB}$ and $\text{PM} > 0^\circ$ means stable. Larger margins = more robust.

核心公式 / Key Formula

一阶系统:

$$G(s) = \frac{K}{1 + \tau s}, \quad |G(j\omega)| = \frac{K}{\sqrt{1 + (\omega\tau)^2}} \quad (188)$$

截止频率 (Corner Frequency):

$$\omega_c = \frac{1}{\tau} \quad (189)$$

渐近线:

- $\omega \ll \omega_c$: 0 dB/decade (平坦)
- $\omega \gg \omega_c$: -20 dB/decade (下降)

Thesis Connection

智能家居与控制:

你的论文中的 **Home Assistant** 实现了简单的反馈控制。

闭环控制示例:

- 传感器: SGP40 (VOC 传感器) 检测空气质量
- 控制器: Home Assistant 判断 $\text{VOC} > \text{阈值}$
- 执行器: 打开换气扇
- 反馈: 继续监测 VOC 直到下降

Jan Koller 问题: "Is your smart home system open-loop or closed-loop?"

答案: 闭环。传感器持续反馈数据, 系统根据实时状态调整输出 (如自动开灯、调温)。

[!]

考试陷阱 / Exam Pitfalls]

1. 混淆开环与闭环传递函数: 闭环 $= \frac{G}{1+GH}$, 开环 $= GH$ 。
2. 积分器的稳态误差: 积分项消除稳态误差, 但增加超调。
3. 极点位置: 右半平面极点 = 不稳定!