

上海交通大学试卷

(2019 至 2020 学年第2学期)

班级号_____ 学号_____

姓名(中&法)_____

课程名称 : Fundamental physics – PH124

成绩_____

Avertissement : 注意

- ▷ Durée du devoir : 2 heures. 考试时长两小时
- ▷ Les problèmes sont indépendants. Ils peuvent être traités dans un ordre quelconque. 各个大题是独立的，可以任意顺序作答。
- ▷ Attention, **la rédaction est aussi importante que le résultat**. 注意：解答过程与答案同等重要。
 - * Pas d'unités → 0 point. 答案无单位的话，得零分。
 - * Vecteur = Scalaire → 0 point. 混淆矢量和标量，得零分。
 - * Erreur de chiffre significatif → malus. 有效数字出错，扣分。
 - * Résultat non justifié (principe utilisé, référentiel, étapes de calcul, etc.) → malus.
- 解答论证（应用的定理，参考系，计算步骤等）不足，扣分
- ▷ L'utilisation d'une calculatrice est autorisée. Les autres outils électroniques (téléphone, tablette, etc.) sont interdits. Tous les documents papier sont interdits, hormis une feuille de triche. Une feuille de triche est une feuille de format A4, sur laquelle on peut écrire recto et verso. 允许用计算器，禁用其他电子设备（手机，平板等）。允许准备一张A4规格的作弊纸，正反面皆可标注，而禁用所有其他资料。
- ▷ L'examen est long (il y a beaucoup de questions), mais il n'est pas nécessaire de traiter toutes les questions pour obtenir une bonne note. 考试题量较大，得高分不必然要求回答所有问题。
- ▷ Vous pouvez choisir de traiter d'abord, parmi ces exercices, ceux que vous êtes le plus confiant de réussir. 建议从最有把握的题开始解答。

Rappels : 提示

- ▷ *exprimer* signifie *donner une expression symbolique de*. *exprimer*指给出未知量的符号表达式。
- ▷ *calculer* signifie *donner la valeur numérique de*. *calculer*指给出未知量的数值。

1 Analyse du pont de Wheatstone (20%)

Introduction

Un pont de Wheatstone est un montage électrique permettant de déterminer une résistance inconnue. Le schéma du pont est représenté sur la figure ci-dessous.

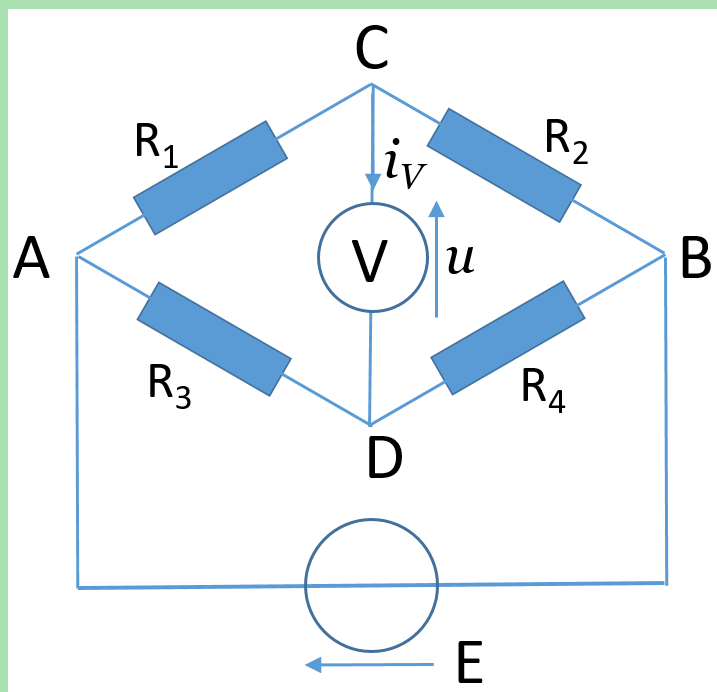


FIGURE 1 – Schéma du circuit pont de Wheatstone

La résistance à déterminer est R_1 . Les résistances R_3 et R_4 sont des résistances fixes connues. La résistance R_2 est une résistance variable dont on connaît la valeur. Le pont est équilibré quand la tension u mesurée entre C et D est nulle. La résistance du voltmètre est R_V . **On tient compte de l'effet de R_V dans tout cet exercice.**

Données

$R_2 = 1827 \Omega$, $R_3 = 100,0 \Omega$, $R_4 = 5,00 \text{ k}\Omega$, $R_V = 1,00 \text{ M}\Omega$ et $E = 6,00 \text{ V}$.

Questions

1. Déterminer la relation entre le courant i_V dans le pont et les paramètres R_1 , R_2 , R_3 , R_4 , R_V et E . Indication : utiliser le théorème de Thévenin, en précisant la résistance interne équivalente et la tension de circuit ouvert. (3 points)
2. À quelle condition le pont est-il équilibré ? Déterminer alors R_1 . (2 points)
3. Le voltmètre indique la tension « $u = 0$ » si, en réalité, on a $-1 < u < +1$ en mV. Dans le cadre de l'application numérique de la question précédente, donner la précision sur la mesure de R_1 . (6 points)

4. Le pont précédent est supposé en équilibre, c'est-à-dire que l'on a rigoureusement (严格地) $u = 0$. Nous allons étudier l'influence d'une force électromotrice e parasite (附加电动势) sur l'équilibre du pont. e est en série avec la résistance R_1 . Cela peut modéliser une tension apparue lors du contact (接触电压) de deux matériaux de nature chimique différente. Exprimer la tension u apparue. Indication : utiliser le théorème de superposition et le théorème de Millman. (6 points)

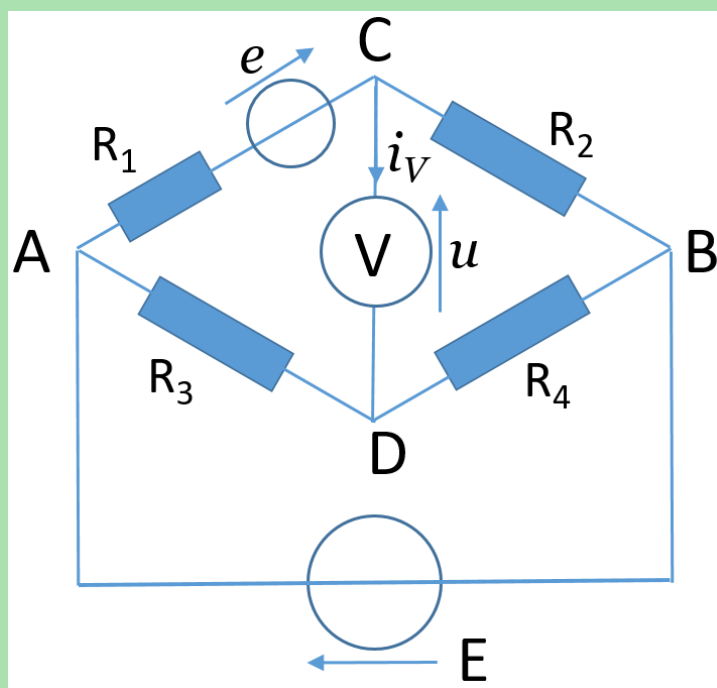


FIGURE 2 – Schéma du circuit pont de Wheatstone avec une force électromotrice parasite

5. On veut que l'influence de e soit négligeable au cours de la mesure. On estime que cette influence est négligeable si $-1 < u < +1$ en mV. Quelle est alors la condition portant sur e ? (3 points)

2 Oscilloscope analogique (25%)

Introduction

Les **oscilloscopes** (示波器) sont des outils qui permettent la **visualisation** de signaux **oscillants** (波动信号). Ces instruments sont séparés en deux catégories : les oscilloscopes **numériques** et les oscilloscopes **analogiques** (模拟示波器).

Le tube cathodique (阴极管, Fig. 3) est la partie d'un oscilloscope analogique qui produit une image des signaux que l'utilisateur cherche à observer. Il est constitué d'une cathode qui fournit un faisceau d'électrons dont la trajectoire dépend des tensions électriques appliquées entre les deux paires de plaques (板). Le faisceau percute (撞击) un écran phosphorescent (荧屏) et forme une tache de lumière. Du point de vue de l'observateur, la persistance rétinienne (视觉暂留) et le phénomène de phosphorescence (荧光现象) « figent (固定) les taches » pour former une image des signaux.

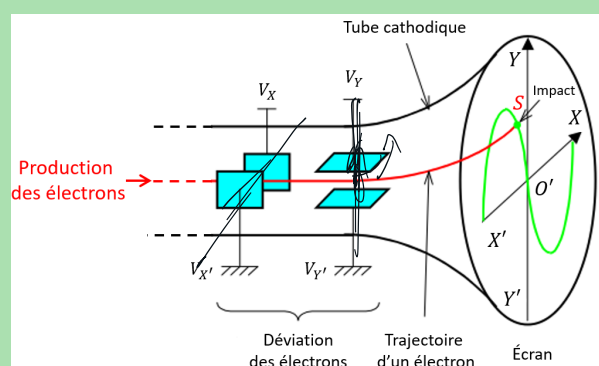


FIGURE 3 – Principe d'un tube cathodique d'oscilloscope analogique.

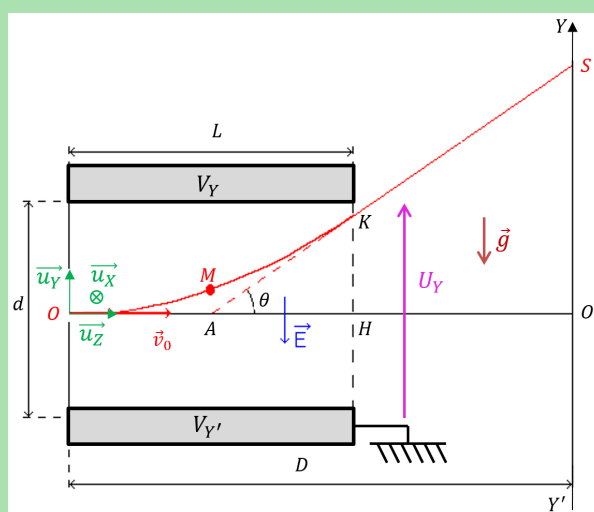


FIGURE 4 – Déviation d'un électron entre les armatures d'un condensateur.

Cette étude s'intéresse à la déviation verticale des électrons qui rend compte de la tension des signaux observés. Cette opération est réalisée lors du passage du faisceau entre deux plaques – également appelées condensateur – soumises à une tension proportionnelle à la tension du signal.

Le condensateur, modélisé par la Fig. 4, est formé de deux plans séparés par une distance d . Le premier plan, branché (连接) à une voie de l'oscilloscope, est au potentiel électrique V_Y supposé constant. Le deuxième plan est branché à la masse donc, par définition, son potentiel électrique est nul : $V_{Y'} = 0$. Ainsi, la tension entre les deux plans est $U_Y = V_Y - V_{Y'} = V_Y$, ce qui implique la présence d'un champ électrique \vec{E} entre les deux plans. Ce champ est supposé constant, de norme $E = U_Y/d$, de direction verticale et strictement compris entre les deux plans. La Fig. 4 montre le cas particulier où \vec{E} est dirigé vers le plan de masse électrique.

Les électrons, de masse m et de charge électrique q , entrent dans le condensateur au point O à la vitesse $\vec{v}_0 = v_0 \vec{u}_Z$. Chaque électron est repéré par les coordonnées (X, Y, Z) du

repère $\{O; (\vec{u}_X, \vec{u}_Y, \vec{u}_Z)\}$.

Données

- ▷ Caractéristiques de l'électron : $q = -e = -1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$; $m = 9,1 \times 10^{-31} \text{ kg}$; $v_0 = 2,0 \times 10^7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.
- ▷ Caractéristiques de l'oscilloscope : $d = 2,0 \text{ cm}$; $L = 6,0 \text{ cm}$; $D = 16,0 \text{ cm}$; $U_Y = 100 \text{ V}$.
- ▷ Autre : $g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$.

Questions

1. À l'aide d'un raisonnement sur les ordres de grandeur, montrer que le poids de l'électron est négligeable devant la force exercée par le champ électrique dans le condensateur.
2. À l'instant $t = 0$, un électron entre dans le condensateur. Déterminer les équations horaires de son mouvement.
3. En déduire l'équation de la trajectoire d'un électron à l'intérieur du condensateur en fonction de m , v_0 , U_Y , d et e . Comment s'appelle ce type de trajectoire?
4. Calculer la tension U_Y maximale possible? Commenter.

L'électron sort du condensateur à l'instant t_1 .

5. U_Y a été supposée constante. Pour un signal sinusoïdal oscillant à une fréquence de 1 MHz, est-ce que l'hypothèse « U_Y constante pendant la déflexion de l'électron » reste valable?

Le poids de l'électron est considéré comme négligeable en dehors du condensateur. L'électron percute l'écran à l'instant $t_2 > t_1$.

6. Quel est le mouvement de l'électron entre le condensateur et l'écran? En déduire l'équation de la trajectoire associée.
7. Montrer que l'ordonnée Y_s du point d'arrivée de l'électron sur l'écran est proportionnel à U_Y . Quel est l'intérêt de cette propriété de l'oscilloscope?

3 Circuit LC (20%)

Introduction

On considère le circuit ci-dessous, composé d'une bobine d'inductance L , d'un condensateur C , d'une source de courant d'un courant électromoteur η et d'une résistance interne R , et d'un interrupteur à deux positions. À l'instant initial, il n'existe pas de tension aux bornes de C et pas de courant à travers L .

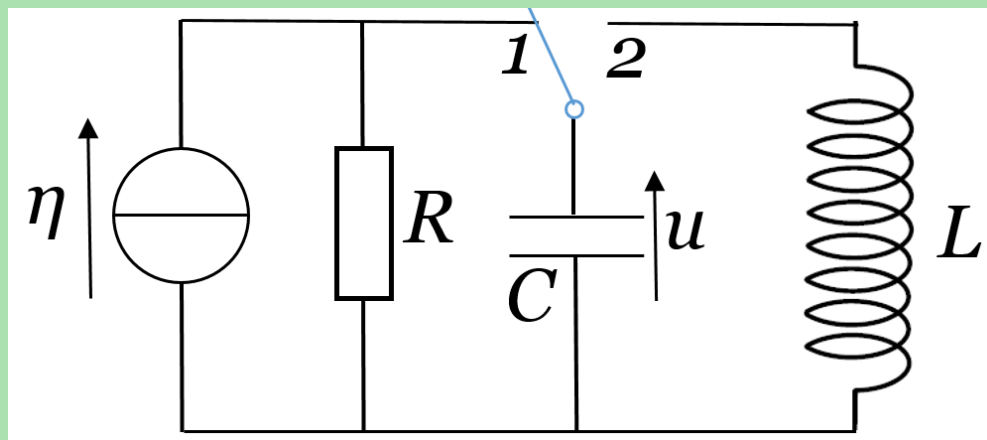


FIGURE 5 – Schéma du circuit LC avec une source de courant

Données

$C = 1,0 \mu\text{F}$, $L = 10,0 \text{ mH}$, $R = 100,0 \Omega$, $\eta = 0,10 \text{ A}$.

Questions

1. À l'instant 0, l'interrupteur est en position 1. Le chargement du condensateur commence. Établir une équation différentielle pour ce circuit de chargement, et donner les conditions initiales. (3 points)
2. Résoudre cette équation différentielle. Donner la tension aux bornes du condensateur en régime permanent. À quel moment u atteint 99,9% de cette valeur ? (3 points)
3. Après une durée suffisamment longue, l'interrupteur passe en position 2. Établir une nouvelle équation différentielle pour ce circuit LC. (3 points)
4. Déterminer la pulsation propre du circuit LC et résoudre l'équation différentielle. (3 points)
5. Calculer l'énergie stockée dans la bobine et le condensateur et commenter. (3 points)
6. Le modèle ci-dessus est-il réaliste ? Sinon, proposer un modèle plus physique. Donner l'équation différentielle correspondante et les conditions initiales. (5 points)

4 Force entre deux dipôles magnétiques (磁偶极子, 磁铁) (35%)

Introduction

Un dispositif expérimental (Fig. 6(a)) est constitué d'un banc rectiligne (Ox), incliné d'un angle α par rapport à l'horizontale grâce à l'insertion d'une cale de hauteur h . Sur ce banc, un aimant est fixé à l'origine O , et un autre aimant M , de masse m , glisse sans frottements sur le banc incliné. La distance entre l'aimant fixe et la cale (垫块) est notée L .

Les aimants sont orientés de telle sorte qu'ils se repoussent mutuellement. La possibilité pour M d'osciller autour d'une position d'équilibre x_e résulte de la compétition entre la répulsion électromagnétique, réduite à une force notée \vec{F} , prépondérante lorsque les aimants sont proches, et le poids, qui devient prépondérant lorsque la distance augmente.

Les positions d'équilibre x_e ont été mesurées pour différentes hauteurs h de cales (Fig. 6(b)). La Fig. 6(c) montre qu'il existe une relation entre ces deux grandeurs.

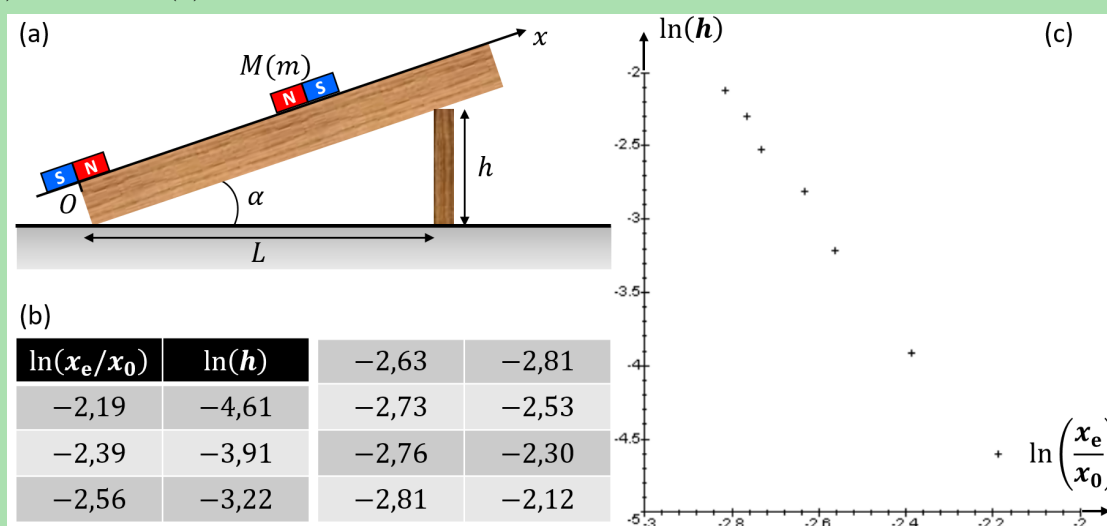


FIGURE 6 – (a) Dispositif expérimental, relevé expérimental sous forme de tableau (b) et sous forme graphique (c). La hauteur h est exprimée en mètre.

Sans connaissances préalables en électromagnétisme, l'objectif de cette étude est de vérifier si la force électromagnétique exercée par un dipôle magnétique sur un autre dipôle magnétique peut être modélisée par une loi de la forme :

$$\vec{F}(x) = \beta \left(\frac{x_0}{x} \right)^n \vec{u}_x \text{ avec } \beta > 0 \text{ et } n \in \mathbb{N}. \quad (1)$$

Données

- ▷ Constantes numériques : $x_0 = 1,00 \text{ m}$, $L = 120 \text{ cm}$, $m = 189 \text{ g}$ et $g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$.
- ▷ $\tan \alpha = \alpha = \sin \alpha$ l'ordre 1 en α au voisinage de 0.
- ▷ Développement de Taylor d'ordre 2 de l'énergie potentielle au voisinage de x_e :

$$E_p(x) = E_p(x = x_e) + (x - x_e) \frac{dE_p}{dx}(x = x_e) + \frac{(x - x_e)^2}{2} \frac{d^2E_p}{dx^2}(x = x_e) . \quad (2)$$

Questions

1. Reproduire le schéma de la Fig. 6(a). Réaliser un bilan des forces qui agissent sur M .
2. À l'aide du principe fondamental de la dynamique soigneusement appliqué, exprimer la position d'équilibre x_e en fonction de x_0 , β , m , g , L , h et n dans le cas des petits angles ($h \ll L$). Commenter.
3. Calculer les valeurs de n et de β à partir des données expérimentales reportées (報告) en Fig. 6(b) et (c).
4. Montrer que l'énergie potentielle totale de M , à une constante additive E_0 près, est

$$E_p(x) = \frac{mgh}{L}x + \frac{\beta x_0^n}{n-1}x^{1-n} + E_0 . \quad (3)$$

5. Exprimer $E_p(x)$ en fonction de x , x_0 , x_e , β et n seulement. Tracer qualitativement $E_p(x)$ puis déterminer le type de mouvement possible en supposant que $x < \frac{L}{\cos \alpha}$.

Dans le cas des oscillations de faible amplitude autour de la position d'équilibre, le développement de Taylor d'ordre 2 de l'énergie potentielle au voisinage de la position d'équilibre (Éq. (2)) est utilisé pour exprimer la constante de raideur équivalente k .

6. Exprimer k en fonction de x_0 , x_e , β et n . Effectuer une analyse dimensionnelle de l'expression de k . Quelle est l'unité associée du système international (SI) ? L'utilisation d'unités dérivées du SI n'est pas acceptable.
7. Justifier soigneusement que la résultante des forces subies par M , au voisinage de l'équilibre, équivaut à une force de rappel élastique.
8. Montrer que l'équation différentielle du mouvement des petites oscillations autour de la position d'équilibre est

$$\ddot{x}_1 + \omega_0^2 x_1 = 0 . \quad (4)$$

avec x_1 une variable et ω_0 une constante à définir. Nommer la constante ω_0 .

9. Montrer que la période T_0 des petites oscillations autour de l'équilibre est proportionnelle à une puissance de h :

$$T_0 \propto h^\gamma . \quad (5)$$

Exprimer γ en fonction de n . Expliquer, en deux phrases maximum, un protocole (方案) de mesure de n qui utilise ce résultat.