



中法工程师学院预科教学系列丛书

Preparatory Cycle Textbooks Series of Sino-French Institute of Engineering

丛书主编：王彪 Jean-Marie BOURGEOIS-DEMERSAY

Océane GEWIRTZ 著

Mécanique du point

质点力学（法文版）



科学出版社

中法工程师学院预科教学系列丛书

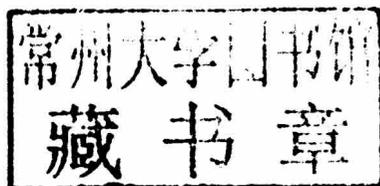
Preparatory Cycle Textbooks Series of Sino-French Institute of Engineering

丛书主编: 王彪 Jean-Marie BOURGEOIS-DEMERSAY

Mécanique du point

质点力学(法文版)

Océane GEWIRTZ 著



科学出版社

北京

内 容 简 介

本书内容包括运动学、动力学、能量、角动量、振动和非伽利略参考系等,覆盖了质点力学的基础到应用的各个环节,从最基础的量纲分析、运动学开始,读者可以从中找到所有解决力学的工具.内容全面,具有可读性、趣味性和广泛性,与日常生活紧密联系,能激发学生学习的热情.书中附有与课程内容紧密结合的练习,能有效地加深学生对已学概念的理解,同时,结合实际生活向学生解释相关的质点力学原理.

本书可作为中法合作办学单位的预科和专业教材,也可作为其他相关专业的参考教材.

图书在版编目(CIP)数据

质点力学: 法文/(法)格维尔茨(Gewirtz, O)著. —北京: 科学出版社, 2016.5

(中法工程师学院预科教学系列丛书/王彪等主编)

ISBN 978-7-03-046995-3

I. ①质… II. ①格… III. ①质点系动力学-高等学校-教材-法文
IV. ①O313.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 009686 号

责任编辑: 昌盛 罗吉 / 责任校对: 邹慧卿

责任印制: 徐晓晨 / 封面设计: 迷底书装

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京教图印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 5 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2016 年 5 月第一次印刷 印张: 13 3/4

字数: 320 000

定价: 59.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

序

高素质的工程技术人才是保证我国从工业大国向工业强国成功转变的关键因素。高质量地培养基础知识扎实、创新能力强、熟悉我国国情并且熟悉国际合作和竞争规则的高端工程技术人才是我国高等工科教育的核心任务。国家长期发展规划要求突出培养创新型科技人才和大力培养经济社会发展重点领域急需的紧缺专门人才。

核电是重要的清洁能源，在中国已经进入快速发展期，掌握和创造核电核心技术是我国核电获得长期健康发展的基础。中山大学地处我国的核电大省——广东，针对我国高素质的核电工程技术人才强烈需求，在教育部和法国相关政府部门的支持和推动下，2009年与法国民用核能工程师教学联盟共建了中山大学中法核工程与技术学院（Institut Franco-Chinois de l'Energie Nucléaire），培养能参与国际合作和竞争的核电高级工程技术人才和管理人才。教学体系完整引进法国核能工程师培养课程体系和培养经验，其目标不仅是把学生培养成优秀的工程师，而且要把学生培养成各行业的领袖。其教学特点表现为注重扎实的数理基础学习和全面的专业知识学习；注重实践应用和企业实习以及注重人文、法律管理、交流等综合素质的培养。

法国工程师精英培养模式起源于18世纪，一直在国际上享有盛誉。中山大学中法核工程与技术学院借鉴法国的培养模式，结合中国高等教育的教学特点将6年的本硕连读学制划分为预科教学和工程师教学两个阶段。预科教学阶段专注于数学、物理、化学、语言和人文课程的教学，工程师阶段专注于专业课、项目管理课的教学和以学生为主的实践和实习活动。法国预科阶段的数学、物理等基础课的课程体系和我国相应的工科基础课的教学体系有较大的不同。前者覆盖面更广，比如数学教材不仅包括高等数学、线性代数等基本知识，还包括拓扑学基础、代数结构基础等。同时更侧重于知识的逻辑性和解题的规范化，以利于学生深入理解后能充分保有基础创新潜力。

为更广泛地借鉴法国预科教育的优点和广泛传播这种教育模式，把探索实践过程中取得的成功经验和优质课程资源与国内外高校分享，促进我国高等教育基础学科教学的

改革，我们在教育部、广东省教育厅和学校的支持下，组织出版了这套预科基础课教材，包含数学、物理和化学三门课程多个阶段的学习内容。本教材主要适用于法国工程师教育预科阶段数学、物理、化学课程的学习。它的编排设计富有特色，采用了逐步深入的知识体系构建方式；既可作为中法合作办学单位的专业教材，也非常适合其他相关专业作为参考教材，方便自学。

我们衷心希望，本套教材能为我国高素质工程师的教育和培养做出贡献！



中方院长 法方院长

中山大学中法核工程与技术学院

2016年1月

前言

本系列丛书出版的初衷是为中山大学中法核工程与技术学院的学生编写一套合适的教材。中法核工程与技术学院位于中山大学珠海校区。该学院用六年时间培养通晓中英法三种语言的核能工程师。该培养体系的第一阶段持续三年，对应着法国大学的预科阶段，主要用法语教学，为学生打下扎实的数学、物理和化学知识基础；第二阶段为工程师阶段，学生将学习涉核的专业知识，并在以下关键领域进行深入研究：反应堆安全、设计与开发、核材料以及燃料循环。

本丛书物理化学部分分为以下几册，每册书分别介绍一个学期的物理课程，化学课程内容则独立成册。

第1册：质点力学（大一第二学期）；

第2册：电学、几何光学、两体系统的力学和刚体力学（大二第一学期）；

第3册：热力学（大二第二学期）

第4册：基础化学（大一第二学期，包括原子和溶液化学）和化学物理（大二第二学期，包括晶体学、化学动力学和热力学）

除了因中国学生的语言障碍对某些物理学科的课程进度做了调整以外，在中法核工程与技术学院讲授的科学课程内容与法国预科阶段的课程内容一致。

每册书都采用相同的教学安排：首先讲授课程，然后进行难度逐步加深的习题训练（概念性问题、知识应用练习、训练练习、深度训练练习或难题）。

和其他教材不同的是，为了让学生的学习过程中更加积极主动，本书设计了一系列问题（用符号  表示），答案则在书中用手写体标记以强调应由学生（在课堂上）填写完成。学生可以通过课程知识应用练习（用符号  标记）自行检查是否已掌握新学的方程和概念，并有机会接触真实器件或解决来源于日常生活中的一些问题。书中还有很多插图，有助学生对词汇和概念的理解，所谓“一图胜过千言”。

每一章书的后面是附录，收集了法语词汇、物理专业术语，以及物理学史、物理学

发展史等相关内容. 读者还可以在附录中找到和课程有关的视频链接目录.

该丛书是为预科阶段循序渐进的持续的学习过程而设计的. 譬如, 曾在力学里介绍过的概念, 在后续的几何光学或热力学部分会对其进一步深入讲解, 习题亦如是. 为了证明一些原理 (如最小作用原理) 或结论 (如对称性) 的普遍适用性, 相关习题会在物理的不同学科领域以不同形式出现.

最后值得指出的是, 该丛书物理化学的内容安排是和数学的内容安排紧密联系的. 学生可以利用已学到的数学工具解决物理问题, 如微分方程、偏微分方程或极限展开. 当这些内容在数学课程中没有展开阐述的时候, 书中也会在附录部分对其做详细介绍, 例如圆锥曲线.

得益于中法核工程与技术学院学生和老师们意见与建议, 该丛书一直在不断地改进中. 我的同事赖侃、滑伟、何广源、胡杨凡、韩东梅和康明亮博士仔细核读了该书的原稿, 并作以精准的翻译. 刘洋和熊涛两位博士也对力学部分提出了中肯的意见. 最后, 本书的成功出版离不开中法核工程与技术学院两位院长, 王彪教授 (长江特聘教授、国家杰出青年基金获得者) 和 Jean-Marie BOURGEOIS-DEMERSAY 先生 (法国矿业团首席工程师), 一直以来的鼓励与大力支持. 请允许我对以上同事及领导表示最诚挚的谢意!

Océane GEWIRTZ

法国里昂 (Lyon) 高等师范学校的毕业生,
通过法国会考取得教师职衔的预科阶段物理老师

Avant-propos

Cet ouvrage est à l'origine destiné aux élèves-ingénieurs de l'Institut franco-chinois de l'énergie nucléaire (IFCEN), situé sur le campus de l'université Sun Yat-sen à Zhuhai, dans la province du Guangdong en Chine du sud. Cet institut forme en six années des ingénieurs en génie atomique trilingues en chinois, français et anglais. La première partie du curriculum s'étend sur trois ans et correspond aux classes préparatoires aux grandes écoles, avec un enseignement en français de bases solides dans tous les domaines des mathématiques, de la physique et de la chimie. La deuxième partie du curriculum constitue le cycle d'ingénieur, qui permet aux élèves de se spécialiser dans le nucléaire et d'approfondir les domaines-clés que sont la sûreté, la conception et l'exploitation des centrales, les matériaux pour le nucléaire et le cycle du combustible.

La collection se décline en plusieurs volumes dont chacun représente un semestre de cours en sciences physiques, l'enseignement de la chimie étant regroupé dans un volume particulier :

- Volume 1 : mécanique du point (semestre 2) ;
- Volume 2 : électrocinétique, optique géométrique, mécanique des systèmes de deux points matériels et mécanique du solide (semestre 3) ;
- Volume 3 : thermodynamique (semestre 4) ;
- Volume 4 : chimie générale (atomistique et chimie des solutions au semestre 2) et chimie physique (cristallographie, cinétique chimique et thermochimie au semestre 4).

Les contenus scientifiques qui sont abordés à l'IFCEN correspondent au programme des classes préparatoires en France, si ce n'est que la progression diffère quelque peu en raison des difficultés langagières que présentent, pour un public chinois, certains domaines de la physique.

Chaque volume suit une progression identique : tout d'abord un exposé du cours, suivi d'exercices classés par ordre de difficulté croissante (questions de cours, exercices d'application directe, exercices d'entraînement, exercices d'approfondissement ou problèmes).

Dans le souci de rendre plus actif l'élève pendant son apprentissage, le cours suit une présentation qui diffère d'autres ouvrages : de nombreuses questions sont posées, précédées d'un ☞ ; les réponses sont indiquées en police manuscrite pour bien souligner qu'il appartient à l'élève de remplir cette partie. Les exercices d'application directe du cours, précédés d'un ➔, permettent à l'élève de vérifier qu'il maîtrise les formules et les concepts nouvelle-

ment acquis. Ils donnent aussi l'occasion d'étudier des dispositifs réels ou de résoudre des problèmes tirés de la vie quotidienne. De nombreuses illustrations facilitent l'acquisition du vocabulaire et des concepts, suivant l'adage bien connu qu'une image vaut mille mots.

À la fin de chaque chapitre, l'élève trouvera des annexes qui concernent le français et les difficultés lexicales, ainsi que l'histoire et le développement de telle ou telle branche de la physique. Le lecteur pourra aussi trouver une webographie comprenant des animations ou des films en lien avec le cours.

La collection a été conçue pour un apprentissage continu et progressif sur l'ensemble du cycle préparatoire. Par exemple, des notions sont d'abord introduites dans le cours de mécanique, pour être reprises et approfondies plus tard en optique géométrique ou en thermodynamique. Il en va de même pour les exercices, qui peuvent apparaître de façons différentes dans des domaines distincts de la physique, dans le but de démontrer l'universalité de certains principes (comme le principe de moindre action) ou de certains raisonnements (recherche des symétries).

Il faut enfin noter que la progression du cours de physique-chimie se fait en lien étroit avec celle du cours de mathématiques, également disponible dans la même collection. Les élèves pourront donc appliquer aux sciences physiques les outils mathématiques qu'ils auront assimilés préalablement, comme les équations différentielles, les équations aux dérivées partielles ou les développements limités. Lorsqu'elles ne sont pas développées en cours de mathématiques, certaines notions font l'objet d'annexes détaillées, à l'exemple des coniques.

Les volumes de cette collection sont en constante évolution, grâce aux remarques et aux suggestions des élèves et des professeurs de l'institut. J'ai plaisir à mentionner mes collègues les docteurs Lai Kan, Hua Wei, He Guangyuan, Hu Yangfan, Han Dongmei et Kang Mingliang, pour la qualité de leur traduction et la relecture minutieuse des manuscrits. Le volume de mécanique a aussi profité des commentaires avisés des docteurs Liu Yang et Xiong Tao. Enfin, la collection n'aurait pas pu voir le jour sans les encouragements et le soutien constant des deux directeurs de l'institut, le professeur Wang Biao, professeur des universités, membre du programme "Cheung Kong Scholars Program", lauréat du prix d'excellence de la fondation nationale des sciences pour les jeunes chercheurs, et M. Jean-Marie Bourgeois-Demersay, ancien élève de l'École normale supérieure de Paris, diplômé d'HEC, ingénieur général des mines. Qu'ils en soient tous ici remerciés!

Océane Gewirtz

Ancienne élève de l'École normale supérieure de Lyon, professeur en classes préparatoires,
agrégée de sciences physiques.

Table des matières

序	i
前言	iii
Avant-propos	v
Première partie Cours	1
Chapitre 1 Introduction au cours de physique	3
1.1 Déroulement de l'année	3
1.1.1 Programme	3
1.1.2 Méthode de travail	3
1.2 Analyse dimensionnelle	5
1.2.1 La mesure	5
1.2.2 Les dimensions de base	5
1.2.3 Dimension d'une grandeur secondaire	5
1.2.4 Vérification de l'homogénéité d'une relation	6
1.3 Le système SI	7
1.4 Le monde physique	9
1.5 La physique à l'IFCEN	11
1.6 Les outils mathématiques	12
1.6.1 Rappels sur les dérivées	12
1.6.2 Différentielle d'une fonction scalaire d'une seule variable	14
1.6.3 Signification géométrique et intérêt physique	15
Chapitre 2 Cinématique	18
2.1 Repérage dans le temps et dans l'espace	19
2.1.1 Définitions	19
2.1.2 Repère et Référentiel	20
2.1.3 Notion de point matériel	21
2.1.4 Système de coordonnées	21
2.2 Vitesse et accélération	25
2.2.1 Trajectoire	25
2.3 Exemples de mouvement	29
2.3.1 Mouvement rectiligne	29
2.3.2 Mouvement à accélération constante	29
2.3.3 Mouvement rectiligne sinusoïdal	31

2.3.4	Mouvement circulaire	31
2.3.5	Mouvement cycloïdal	33
Annexe A Cinématique		35
A.1	Un peu de français	35
Chapitre 3 Dynamique du point en référentiel galiléen		36
3.1	Les forces	36
3.1.1	Définition	36
3.1.2	Interaction électromagnétique	37
3.1.3	Interaction gravitationnelle	38
3.1.4	Forces de contact	38
3.2	Les lois de Newton	43
3.2.1	Principe d'inertie	44
3.2.2	Principe fondamental de la dynamique	46
3.2.3	Troisième loi de Newton : principe des actions réciproques	47
3.2.4	Commentaires	47
3.3	Étude de différents mouvements	48
3.3.1	Méthode	48
3.3.2	Mouvement dans le champ de pesanteur sans résistance de l'air	48
3.3.3	Mouvement avec résistance de l'air	51
3.3.4	Mouvement d'une masse accrochée à un ressort	54
3.3.5	Le pendule simple	56
Annexe B Dynamique du point en référentiel non galiléen		60
B.1	Un peu de français	60
B.2	Histoire de la mécanique	60
B.2.1	« Les Mécaniques » au début du 17 ^{ème} siècle	61
B.2.2	De Galilée à Newton	62
B.2.3	L'avènement de la mécanique classique	63
B.2.4	La relativité	65
Chapitre 4 Aspects énergétiques en mécanique du point		67
4.1	Théorème de l'énergie cinétique	67
4.1.1	Travail d'une force	67
4.1.2	Puissance d'une force	69
4.1.3	Théorème de l'énergie cinétique	70
4.1.4	Exemples de calcul de travaux	71
4.2	Énergie potentielle-Théorème de l'énergie mécanique	73
4.2.1	Définition	73
4.2.2	Exemples d'énergie potentielle	77
4.2.3	Théorème de l'énergie mécanique	79
4.3	Étude des systèmes conservatifs à un degré de liberté	80
4.3.1	Le pendule simple	80

4.3.2	Étude des positions d'équilibre	83
4.3.3	Mouvement au voisinage de l'équilibre	85
Chapitre 5	Oscillateurs mécaniques en régime libre	87
5.1	Oscillateur harmonique	87
5.1.1	Définition	87
5.1.2	Étude du mouvement	88
5.1.3	Portrait de phase	90
5.2	Oscillateur amorti à une dimension	93
5.2.1	Équation différentielle du mouvement	94
5.2.2	Portrait de phase	97
Annexe C	Oscillateurs mécaniques en régime libre	99
C.1	Webographie	99
Chapitre 6	Moment cinétique-force centrale conservative	100
6.1	Moment d'une force	100
6.1.1	Par rapport à un point	100
6.1.2	Par rapport à un axe	102
6.2	Moment cinétique	103
6.2.1	Par rapport à un point	103
6.3	Théorème du moment cinétique	104
6.3.1	En un point fixe	104
6.3.2	Par rapport à un axe fixe	105
6.3.3	Application : le pendule simple	105
6.4	Force centrale conservative	106
6.4.1	Définition	106
6.4.2	Différents exemples	106
6.5	Étude d'un mouvement à force centrale conservative	109
6.5.1	Position du problème	109
6.5.2	Constantes du mouvement	110
6.5.3	Cas particulier du mouvement circulaire	113
6.5.4	Discussion qualitative de la nature du mouvement	114
Annexe D	Moment cinétique-force centrale conservative	117
D.1	Histoire	117
D.2	Coniques	118
D.2.1	Définitions géométriques	118
D.2.2	Équation en coordonnées polaires	119
Chapitre 7	Changement de référentiel	122
7.1	Composition des vitesses	122
7.1.1	Définitions et notations	122
7.1.2	Dérivation temporelle d'un vecteur	124

7.1.3	Loi de composition des vitesses	125
7.2	Composition des accélérations	125
7.2.1	Loi de composition des accélérations	125
7.2.2	Cas particuliers	126
Chapitre 8	Dynamique en référentiel non galiléen	129
8.1	Forces d'inertie	129
8.1.1	Forces d'inertie, principe fondamental de la dynamique	130
8.1.2	Cas où R_{ng} est en translation par rapport à R_g	131
8.1.3	Cas où R_{ng} est en rotation uniforme par rapport à R_g	132
8.2	Théorèmes généraux de mécanique	134
8.2.1	Théorème du moment cinétique	134
8.2.2	Théorèmes énergétiques	134
8.3	Tableau résumé	135
Chapitre 9	Caractère galiléen approché des référentiels usuels	136
9.1	Rappels	136
9.2	Statique dans le référentiel terrestre	138
9.3	Dynamique dans le référentiel terrestre	140
9.3.1	Force de Coriolis	140
9.3.2	Météorologie	142
9.3.3	Déviations vers l'Est	145
9.3.4	Pendule de Foucault	146
Annexe E	Caractère galiléen approché des référentiels usuels	148
E.1	Histoire	148
E.2	Webographie	148
Première partie	Exercices	151
Chapitre 1	Analyse dimensionnelle	153
Chapitre 2	Cinématique	159
Chapitre 3	Dynamique en référentiel galiléen	168
Chapitre 4	Aspects énergétiques en mécanique du points	178
Chapitre 5	Oscillateurs mécaniques en régime libre	187
Chapitre 6	Moment cinétique-force centrale conservative	191
Chapitre 7	Changement de référentiel	196
Chapitre 8	Dynamique en référentiel non galiléen	200

Première partie

Cours

Chapitre 1

Introduction au cours de physique

1.1 Déroulement de l'année

1.1.1 Programme

Dans ce premier livre, nous allons étudier la mécanique du point, première partie, qui est composée de 8 chapitres :

- la cinématique du point
- la dynamique du point
- l'énergie
- les oscillateurs
- le théorème du moment cinétique et les forces centrales conservatives
- les changements de référentiel
- la dynamique en référentiel non galiléen
- le caractère galiléen approché des référentiels usuels.

1.1.2 Méthode de travail

Vous avez entre vos mains le livre de cours "complet" de physique donné en première année à l'Institut franco-chinois de l'énergie nucléaire.

En classe, ce cours est donné de façon à rendre actif les apprenants : il y a des questions posées (précédées de ) , les réponses sont données en *écriture*

manuscrite française.

et elles vont faire partie du cours, des exercices à faire (sur fond gris clair suivi d'un ☞), des mots et les définitions à connaître (sur fond foncé). Le lecteur est invité à essayer de trouver les réponses avant de les lire.

Après chaque chapitre, vous allez trouver une page "français" avec une liste de mots que vous allez devoir chercher dans le dictionnaire et qui vont être à connaître pour le cours de physique, différentes formulations ou un point important de français à maîtriser pour la physique-chimie puis, après une page "histoire des sciences" avec les noms des physiciens qui apparaissent dans le cours.

Après, vous allez avoir la partie "exercices" constituée de 3 parties :

- les questions de cours
- les exercices d'application directes du cours
- les exercices d'approfondissement.

Cette organisation va vous permettre de travailler efficacement en physique-chimie : pendant le cours, vous devez prendre des notes pour des explications supplémentaires. Après le cours, le soir-même, vous devez travailler à nouveau la partie vue en cours, c'est-à-dire que vous devez faire **tout seul** tous les calculs. Vous prenez un crayon et du papier de brouillon, vous fermez le livre et vous refaites tous les calculs, vous énoncez les théorèmes et définitions.

Quand vous avez fini, vous pouvez alors passer aux exercices du cours : questions de cours puis exercices d'application.

Les exercices d'approfondissement sont utiles en fin de chapitres, en préparation d'un devoir.

Maintenant, pour commencer, nous allons poser les bases de la physique : la mesure, c'est quoi ? Définir les unités et les dimensions, puis enfin un rapide panorama du monde de la physique.