



“十二五”国家重点图书出版规划项目

核能与核技术出版工程

总主编 杨福家

核医学与分子影像

Nuclear Medicine and
Molecular Imaging

黄 钢 等 编著



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS



“十二五”国家重点图书出版规划项目

核能与核技术出版工程

总主编 杨福家

核医学与分子影像

Nuclear Medicine and Molecular Imaging

黄 钢 等 编著



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

内容提要

本书为“十二五”国家重点图书出版规划项目“核能与核技术出版工程”之一。本书分三篇,从强化分子影像和分子医学概念的角度,阐述了核医学基础、显像药物和临床应用。第一篇为总论,主要介绍核医学的基础知识、核医学设备及图像处理。第二篇为放射性药物篇,系统介绍目前临床常用的放射性药物包括正电子显像剂、单光子显像剂及核素治疗试剂的生物学和示踪特点,在分子医学时代的应用前景与价值。第三篇重点强调核医学与分子影像学在临床中的应用价值,主要探讨了常规显像剂 ^{18}F -FDG在不同肿瘤及神经退行性疾病中的临床应用, ^{18}F -多巴显像在神经系统中的应用, $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 标记药物在甲状旁腺疾病、冠心病、心肌梗死、前哨淋巴结检测、转移性骨肿瘤、小儿肝胆疾病中的临床应用,核素 ^{131}I 在治疗 Graves' 疾病中的应用和治疗分化型甲状腺癌及其转移灶中的应用。本书适合从事核医学临床与研究的专业人员阅读与参考。

图书在版编目(CIP)数据

核医学与分子影像 / 黄钢等编著. —上海: 上海交通大学出版社, 2016
核能与核技术出版工程
ISBN 978-7-313-14180-4

I. ①核… II. ①黄… III. ①核医学②分子-成像-影像诊断 IV. ①R81②R445.9

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 288835 号

核医学与分子影像

编 著: 黄钢 等

出版发行: 上海交通大学出版社

地 址: 上海市番禺路 951 号

邮政编码: 200030

电 话: 021-64071208

出 版 人: 韩建民

印 制: 山东鸿君杰文化发展有限公司

经 销: 全国新华书店

开 本: 710 mm×1000 mm 1/16

印 张: 29.25

字 数: 481 千字

版 次: 2016 年 2 月第 1 版

印 次: 2016 年 2 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-313-14180-4/R

定 价: 138.00 元

版权所有 侵权必究

告读者: 如发现本书有印装质量问题请与印刷厂质量科联系

联系电话: 0533-8510898

丛书编委会

总主编

杨福家 (复旦大学原校长,中国科学院院士)

编委 (按姓氏笔画排序)

于俊崇 (中国核动力研究设计院,中国工程院院士)

马余刚 (中国科学院上海应用物理研究所,研究员)

马栩泉 (清华大学核能技术设计研究院,教授)

王大中 (清华大学原校长,中国科学院院士)

韦悦周 (上海交通大学核科学与工程学院,教授)

申 森 (上海核工程研究设计院,研究员级高工)

朱国英 (复旦大学放射医学研究所,研究员)

华跃进 (浙江大学农业与生物技术学院,教授)

许道礼 (中国科学院上海应用物理研究所,研究员)

孙 扬 (上海交通大学物理与天文系,教授)

苏著亭 (中国原子能科学研究院,研究员级高工)

肖国青 (中国科学院近代物理研究所所长,研究员)

吴国忠 (中国科学院上海应用物理研究所,研究员)

沈文庆 (中国科学院上海分院,中国科学院院士)

陆书玉 (上海市环境科学学会副理事长,教授)

周邦新 (上海大学材料研究所所长,中国工程院院士)

郑明光 (上海核工程研究设计院院长,研究员级高工)

赵振堂 (中国科学院上海应用物理研究所所长,研究员)

胡立生 (上海交通大学电子信息与电气工程学院,教授)

胡思得 (中国工程物理研究院,中国工程院院士)

徐步进 (浙江大学农业与生物技术学院,教授)

徐洪杰 (中国科学院上海应用物理研究所原所长,研究员)

黄 钢 (上海健康医学院院长,教授)

曹学武 (上海交通大学机械与动力工程学院,教授)

程 旭 (上海交通大学核科学与工程学院,教授)

潘健生 (上海交通大学材料科学与工程学院,中国工程院院士)

本书编委会

(按姓氏笔画排序)

- 王 成(上海交通大学医学院附属仁济医院,博士)
王瑞民(解放军总医院,主任医师)
尹雅芙(中国医科大学附属第一医院,主任医师)
左传涛(复旦大学华山医院,主任医师)
田 蓉(四川大学华西医院,主任医师)
朱小华(华中科大同济医学院附属同济医院,主任医师)
朱 宝(无锡市人民医院,主任医师)
朱高红(昆明医科大学第一附属医院,主任医师)
刘建军(上海交通大学附属仁济医院,主任医师)
李剑明(泰达国际心血管病医院,主任医师)
杨卫东(第四军医大学西京医院,主任医师)
杨吉刚(首都医科大学附属北京友谊医院,主任医师)
杨 敏(江苏省原子医学研究所,研究员)
吴湖炳(南方医科大学南方医院,主任医师)
张国旭(沈阳军区总医院,主任医师)
张晨鹏(上海交通大学医学院附属仁济医院,博士)
陈志军(江西省肿瘤医院,主任医师)
陈虞梅(上海交通大学医学院附属仁济医院,主治医师)
罗全勇(上海市第六人民医院,主任医师)
金问森(安徽医科大学核医学教研室,教授)
周 翔(上海交通大学医学院附属仁济医院,博士)
赵春雷(杭州市第一人民医院/杭州市肿瘤医院,主任医师)
赵德善(山西医科大学第二医院,主任医师)
袁志斌(上海市第六人民医院,主任技师)

袁梦晖(第四军医大学唐都医院核医学科,主任医师)

贾志云(四川大学华西医院,主任医师)

贾 强(天津医科大学总医院,主任技师)

黄 钢(上海健康医学院院长,教授)

章 斌(苏州大学附属第一医院,主任医师)

梁 婷(山东大学医学院实验核医学研究所,教授)

程 兵(郑州大学第一附属医院,主任医师)

傅宏亮(上海交通大学医学院附属新华医院,主任医师)

谢文晖(上海市胸科医院,主任医师)

总 序

1896年法国物理学家贝可勒尔对天然放射性现象的发现,标志着原子核物理学的开始,直接导致了居里夫妇镭的发现,为后来核科学的发展开辟了道路。1942年人类历史上第一个核反应堆在芝加哥的建成被认为是原子核科学技术应用的开端,至今已经历了70多年的发展历程。核技术应用包括军用与民用两个方面,其中民用核技术又分为民用动力核技术(核电)与民用非动力核技术(即核技术在理、工、农、医方面的应用)。在核技术应用发展史上发生的两次核爆炸与三次重大核电站事故,成为人们长期挥之不去的阴影。然而全球能源匮乏以及生态环境恶化问题日益严峻,迫切需要开发新能源,调整能源结构。核能作为清洁、高效、安全的绿色能源,还具有储量最丰富、高能量密集度、低碳无污染等优点,受到了各国政府的极大重视。发展安全核能已成为当前各国解决能源不足和应对气候变化的重要战略。我国《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020)》明确指出“大力发展核能技术,形成核电系统技术的自主开发能力”,并设立国家科技重大专项“大型先进压水堆及高温气冷堆核电站专项”,把“钍基熔盐堆”核能系统列为国家首项科技先导项目,投资25亿元,已在中国科学院上海应用物理研究所启动,以创建具有自主知识产权的中国核电技术品牌。

从世界来看,核能应用范围正不断扩大。目前核能发电量美国排名第一,中国排名第六;不过核能发电的占比方面,法国占比约74%,排名第一,中国仅约2%,排名几乎最后。但是中国在建、拟建和提议的反应堆数比任何国家都多。相比而言,未来中国核电有很大的发展空间。2015年为中国核电重启的关键年,据中国核能行业协会发布的最新数据显示,截至2015年6月底,中国投入商业运行的核电机组共25台,总装机容量为2334万千瓦。值此核电发展的历史机遇期,中国应大力推广自主开发的第三代以及第四代的“快堆”、

“高温气冷堆”、“钍基熔盐堆”核电技术,努力使中国核电走出去,带动中国由核电大国向核电强国跨越。

随着先进核技术的应用发展,核能将成为逐步代替化石能源的重要能源。受控核聚变技术有望从实验室走向实用,为人类提供取之不尽的干净能源;威力巨大的核爆炸将为工程建设、改造环境和开发资源服务;核动力将在交通运输及星际航行等方面发挥更大的作用。核技术几乎在国民经济的所有领域得到应用。原子核结构的揭示,核能、核技术的开发利用,是 21 世纪人类征服自然的重大突破,具有划时代的意义。然而,日本大海啸导致的福岛核电站危机,使得发展安全级别更高的核能系统更加急迫,核能技术与核安全成为先进核电技术产业化追求的核心目标,在国家核心利益中的地位愈加显著。

在 21 世纪的尖端科学中,核科学技术作为战略性高科技学科,已成为标志国家经济发展实力和国防力量的关键学科之一。通过学科间的交叉、融合,核科学技术已形成了多个分支学科并得到了广泛应用,诸如核物理与原子物理、核天体物理、核反应堆工程技术、加速器工程技术、辐射工艺与辐射加工、同步辐射技术、放射化学、放射性同位素及示踪技术、辐射生物等,以及核技术在农学、医学、环境、国防安全等领域的应用。随着核科学技术的稳步发展,我国已经形成了较为完整的核工业体系。核科学技术已走进各行各业,为人类造福。

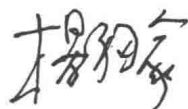
无论是科学研究方面,还是产业化进程方面,我国的核能与核技术研究与应用都积累了丰富的成果和宝贵经验,应该系统总结、整理一下。另外,在大力发展核电的新时期,也急需有一套系统而实用的、汇集前沿成果的技术丛书作指导。在此鼓舞下,上海交通大学出版社联合上海市核学会,召集了国内核领域的权威专家组成高水平编委会,经过多次策划、研讨,召开编委会商讨大纲、遴选书目,最终编写了这套“核能与核技术出版工程”丛书。本丛书的出版旨在:培养核科技人才;推动核科学研究和学科发展;为核技术应用提供决策参考和智力支持;为核科学研究与交流搭建一个学术平台,鼓励创新与科学精神的传承。

这套丛书的编委及作者都是活跃在核科学前沿领域的优秀学者,如核反应堆工程及核安全专家王大中院士、核武器专家胡思得院士、实验核物理专家沈文庆院士、核动力专家于俊崇院士、核材料专家周邦新院士、核电设备专家潘健生院士,还有“国家杰出青年”科学家、“973”项目首席科学家、“国家千人计划”特聘教授等一批有影响的科研工作者。他们都来自各大高校及研究单

位,如清华大学、复旦大学、上海交通大学、浙江大学、上海大学、中国科学院上海应用物理研究所、中国科学院近代物理研究所、中国原子能科学研究院、中国核动力研究设计院、中国工程物理研究院、上海核工程研究设计院、上海市辐射环境监督站等。本丛书是他们最新研究成果的荟萃,其中多项研究成果获国家级或省部级大奖,代表了国内甚至国际先进水平。丛书涵盖军用核技术、民用动力核技术、民用非动力核技术及其在理、工、农、医方面的应用。内容系统而全面且极具实用性与指导性,例如,《应用核物理》就阐述了当今国内外核物理研究与应用的全貌,有助于读者对核物理的应用领域及实验技术有全面的了解,其他书目也都力求做到了这一点,极具可读性。

由于本丛书良好的立意和高品质的学术成果,使得本丛书在策划之初就受到国家的重视,成功入选了“十二五”国家重点图书出版规划项目。另外,本丛书也受到上海新闻出版局的高度肯定,部分书目成功入选了“上海高校服务国家重大战略出版工程”。

在丛书出版的过程中,我们本着追求卓越的精神,力争把丛书从内容到形式上做到最好。希望这套丛书的出版能为我国大力发展核能技术提供上游的思想、理论、方法,能为核科技人才的培养与科创中心建设贡献一份力量,能成为不断汇集核能与核技术科研成果的平台,推动我国核科学事业不断向前发展。



2015年11月

前 言

近 30 年来,随着电子学与计算机技术的迅猛发展,医学影像学已形成了以 X-CT、MRI、影像核医学和超声影像等先进影像技术为主干的综合性临床学科。而核医学与分子影像作为其中极为重要的组成部分,能够灵敏而准确地显示和分析机体脏器的功能、代谢、血流、受体密度以及基因的分布和动态过程,在机体病理生理变化的检测中具有独特的作用,为全面揭示机体从分子结构与功能的改变到临床疾病的早期诊断、病程与疗效的客观评价及预后与转归的准确判断提供了准确量化的科学依据。

全书内容共分为 3 篇 31 章,主要内容包括核医学设备、显像药物以及临床应用三部分,并强调体现核医学示踪特色。前 7 章主要介绍了与核医学相关的物理概念、仪器设备、图像处理等。通过简要介绍,使读者初步了解和领会核医学所涉及的成像原理及基本技术,对核医学所涉及的领域具有一定认识;第 8~15 章主要通过对常规显像剂的生物学特点与示踪进行系统阐述,并介绍核医学的一些极具潜力或已经开展的一些研究成果,使读者了解和熟悉未来核医学在分子医学时代的应用发展前景与价值;最后 16 章主要是核医学的临床应用部分,包括神经、内分泌、心脏、肿瘤等各个脏器显像,重点强调核医学与分子影像在临床中的应用价值,使读者对核医学在疾病诊断中的规范化应用能够充分掌握和理解。本书编者在编写中试图在以下几方面作出探索:① 突出核医学放射性示踪特点,并力求强化分子影像和分子医学概念;② 编写时在保持整体风格的延续性与关联性中,适时彰显核医学在功能、代谢、受体与基因显像中的独特优势,力求推动学科间相互认识并合作提升,培

养读者综合掌握核医学与分子影像医学知识,客观理解各种影像的优势,根据循证理论灵活运用,提升核医学各项技术在临床中的价值;③ 在突出分子影像等先进性的同时,强调完整性与系统性。本书还附有英文缩略词的全文和中文解释,便于读者随时查阅。

由于核医学发展速度很快,尤其是不同影像技术的融合应用如 PET/CT、SPECT/CT 等设备相继问世,使核医学影像更进入一个新的发展阶段,为现代分子医学研究提供了最为先进可靠的手段和方法,对临床医学的发展具有不可替代的贡献。因此,本书力求通过体现现代科技与分子医学最新发展成果在医学临床中的应用,使读者在掌握影像核医学基础知识、基础理论及基本技能的基础上,对现代分子医学的发展前沿亦具有一定的了解。本书主要读者对象是从事核医学临床与研究的专业人员,包括核医学临床医师、核医学技术员、核医学工程师以及核医学药师等,也可以作为核医学研究生、核医学专科医师培训以及核医学大型设备上岗证的辅助参考书。

参加本书编写的所有人员有一个共同心愿,就是齐心协力精诚合作、严肃认真群策群力,力求做到系统、完整、先进、科学的统一。但限于作者的水平,本书存在的一些不足之处,恳请核医学同行和读者给予斧正,在此先致谢意。

黄 钢

缩 略 词

- ^{11}C - β -CFT(2 β - carbomethoxy - 3 β -(4 - fluorophenyl) -(N- ^{11}C - methyl) tropane) ^{11}C -甲基-N-2 β -甲基酯-3 β -(4-F-苯基)托烷
 ^{18}F -FDG(fluorodeoxyglucose) 氟代脱氧葡萄糖
 ^{11}C -MET(^{11}C -methionine) ^{11}C -蛋氨酸
 ^{11}C -NMSP(^{11}C -N-methylspiperone) ^{11}C 标记的 N-甲基螺旋哌啶酮
 ^{18}F -FLT(3'-deoxy-3'- ^{18}F fluorothymidine) 3'-脱氧-3'-[^{18}F]-氟胸腺嘧啶核苷

A

- ACSOG(American College of Surgeons Oncology Group) 美国肿瘤外科学会
AD(Alzheimer's disease) 阿尔茨海默病
AFP(alpha fetoprotein) 甲胎蛋白
AJCC(American Joint Committee on Cancer) 美国癌症联合会
ALC(absolute lymphocyte count) 确切淋巴细胞总数
ALND(axillary lymph nodes dissection) 腋窝淋巴结清扫
ALS(amyotrophic lateral sclerosis) 肌萎缩侧索硬化症
AODN(antisense oligonucleotides) 反义脱氧寡核苷酸
APD(avalanche photodiode) 雪崩光电二极管
ASC(antimony trisulfide colloid) 硫化锑胶体
A β (amyloid β) β -淀粉样蛋白

B

- BBN(bombesin) 蛙皮素

BFCA(bifunctional chelating agent) 双功能螯合剂

BGO(bismuth germanium oxide) 锗酸铋

BLI(bioluminescence imaging) 生物发光成像

C

CBD(corticobasal degeneration) 皮质基底节变性

CCK(cholecystokinin) 促胆囊收缩素

CHD(coronary atherosclerotic heart disease) 冠状动脉粥样硬化性心脏病

CLM(colorectal liver metastasis) 结直肠癌肝转移

COPD(chronic obstructive pulmonary disease) 慢性阻塞性肺疾病

CR(complete remission) 完全缓解

CRC(colorectal carcinoma) 结直肠癌

CT(calcitonin) 降钙素

CTCA(CT coronary angiography) CT 冠状动脉造影

D

DAT(dopamine transporter) 多巴胺转运蛋白

DLB(dementia with Lewy body) 路易小体痴呆

DLBCL(diffuse large B cell lymphoma) 弥漫大 B 细胞淋巴瘤

DMSA(dimercaptosuccinic acid) 二巯基琥珀酸

DTC(differentiated thyroid cancer) 分化型甲状腺癌

DTPA(diethylenetriaminepentaacetic acid) 二乙三胺五乙酸

DX(dextran) 右旋糖酐

E

EC(electron capture) 电子俘获

EC(ethylenedicysteine) 双半胱氨酸

ECD(ethyl cysteinyl dimer) 双半胱氨酸乙酯

ET(essential tremor) 特发性震颤

EUS(endoscopic ultrasonography) 食管超声内镜检查

F

- FBP(filtered back-projection) 滤波反投影
 FNH(focal nodular hyperplasia) 肝局灶性结节性增生
 FTD(frontotemporal dementia) 额颞叶痴呆
 FUR(fractional uptake rate) 分数摄取率

G

- GBEF(gallbladder ejection fraction) 胆囊排胆分数
 GFR(glomerular filtration rate) 肾小球滤过率
 GH(sodium d-glycero-d-gulo-heptonate) 葡庚糖酸钠
 GRP(gastrin releasing peptide) 胃泌素释放肽
 GRPR(gastrin releasing peptide receptor) 胃泌素释放肽受体

H

- HAS(human serum albumin) 人血清白蛋白
 HD(Huntington's disease) 亨廷顿病
 HD(Hodgkin's disease) 霍奇金病
 HEDP(hydroxy ethylidene diphosphonic acid) 羟基亚乙基二膦酸
 HIG(human immunoglobulin) 人免疫球蛋白
 HMDP(hydroxymethylene diphosphonic acid) 亚甲基羟基二膦酸
 HPLC(high performance liquid chromatography) 高效液相色谱法
 HPS(hepatopulmonary syndrome) 肝肺综合征

I

- ICG(indocyanine green) 吲哚花青绿
 ICMA(immunochemiluminometry) 免疫化学发光分析法
 IDA(iminodiacetate) 亚氨基二乙酸酯
 IE(internal conversion electron) 内转换电子
 IHP(international harmonization project) 国际协调项目
 IRA(infarction related artery) 梗塞相关动脉
 IRMA(immunoradiometric assay) 免疫放射分析

IT(isomeric transition) 同质异能跃迁

L

LPO(lactoperoxidase) 乳过氧化物酶

LSO(lutetium oxyorthosilicate) 硅酸镨

M

MAA(macroaggregated albumin) 聚合人血白蛋白颗粒

MACE(major adverse cardiac events) 心脏主要不良事件

MBF(myocardial blood flow) 心肌血流量

MCI(mild cognitive impairment) 轻度认知损害

MC - PMT(multi-channel photomultiplier tubes) 多通道光电倍增管

MDP(methylenediphosphonic acid) 亚甲基二磷酸盐

MI(myocardial infarction) 心肌梗死

MIBG(metaiodobenzyl guanidine) 间位碘代苜胍

MIBI(methoxyisobutylisonitrile) 甲氧基异丁基异腈

MORF(morpholino oligomer) 吗啉低聚物

MPI(myocardial perfusion imaging) 心肌血流灌注显像

MRI(magnetic resonance imaging) 磁共振显像

MRS(magnetic resonance spectroscopy) 磁共振波谱分析

MSA(multiple system atrophy) 多系统萎缩

MTC(medullary thyroid carcinoma) 甲状腺髓样癌

MTV(metabolic tumor volume) 肿瘤代谢容积

MWPC(multiwire proportional chamber) 多丝正比室

N

NEMA(National Electrical Manufacturers Association) (美国)电器生产制造商协会

NET(neuroendocrine therapy) 神经内分泌疾病

NFTs(neurobrillary tangles) 神经纤维缠结

NHL(non-Hodgkin's lymphoma) 非霍奇金淋巴瘤

NIRF(near-infrared fluorescence) 近红外荧光成像

NIS(Na^+/I^- symporter) 钠碘转运体

NSCLC(non-small cell lung cancer) 非小细胞肺癌

NT(non-target) 非靶

O

OCT(octerotide) 奥曲肽

OSEM(ordered subsets expectation maximization) 有序子集最大期望值法

P

PCI(percutaneous coronary intervention) 皮冠状动脉介入治疗

PD(Parkinson's disease) 帕金森病

PDCP(PD-related cognitive pattern) PD 认知相关脑葡萄糖代谢网络

PDD(Parkinson's disease dementia) 帕金森病痴呆

PD-MCI(Parkinson's disease with mild cognitive impairment) PD 合并轻度认知功能障碍

PE(pulmonary embolism) 肺栓塞

PET(positron emission computed tomography) 正电子发射断层扫描仪

PFS(progression-free survival) 无进展生存

PHA(pulse height analyzer) 脉冲高度分析器

PHPT(primary hyperparathyroidism) 原发性甲状旁腺功能亢进症

PHY(sodium 2, 3, 4, 5, 6-pentakis(phosphonoxy)cyclohexyl hydrogen phosphate) 植酸钠

PMT(photomultiplier tube) 光电倍增管

PSF(point spread function) 点扩张函数

PSP(progressive supranuclear palsy) 进行性核上性麻痹

PSPMT, PS-PMT(position sensitive photomultiplier tube) 位置灵敏光电倍增管

PTH(parathyroid hormone) 甲状旁腺激素

PYP(pyrophosphate) 焦磷酸盐

R

rCBF(regional cerebral blood flow) 局部脑血流量

Rf(retention factor value) 比移值
RIA(radioimmunoassay) 放射免疫分析
ROC(receiver operation characteristic curve) 受试者工作特征曲线
ROI(region of interest) 感兴趣区

S

SC(sulphur colloid) 硫胶体
SCLC(small cell lung cancer) 小细胞肺癌
SEE(specific effective energy) 比有效能量
SHPT(secondary hyperparathyroidism) 继发性甲状旁腺功能亢进症
SLN(sentinel lymphnode) 前哨淋巴结
SLNM(sentinel lymph node mapping) 淋巴结显像技术
SPACC(strain-promoted alkyne azide cycloaddition) 张力环促进的点击化学方法
SPECT(single photon emission computed tomography) 单光子发射体层摄影
SRS(somatostatin receptor scintigraphy) 生长抑素受体显像
SSA(somatostatin analogue) 生长抑素类似物
SST(somatostatin) 生长抑素
SSTR(somatostatin receptor) 生长抑素受体
SUV(standardized uptake value) 标准摄取值

T

T(target) 靶
T/S(ratios between the tumor and striatum) 放射性计数比值
TAC(time - activity curve) 放射性活度-时间曲线
TAO(thyroid associated ophthalmopathy) 甲状腺相关性眼病
TBI(*t*-butyl isonitrile) 叔丁基异腈
TCEP(tris(2 - carboxyethyl) phosphine hydrochloride) 三(2-羧乙基)膦盐
酸盐
Tg(thyroglobulin) 甲状腺球蛋白
THPT(tertiary hyperparathyroidism) 三发性甲状旁腺功能亢进症