

平片X线摄影 数字成像系统

Digital Imaging Systems
for Plain Radiography

主编 [葡] 路易斯·兰卡
奥古斯托·席尔瓦
主译 王 骏 刘小艳 杨晓鹏
主审 周 桔 刘丹木

天津出版传媒集团



天津科技翻译出版有限公司

Digital Imaging Systems for Plain Radiography

平片 X 线摄影 数字成像系统

主 编 [葡] 路易斯·兰卡
奥古斯托·席尔瓦
主 译 王 骏 刘小艳 杨晓鹏
主 审 周 桔 刘丹木

天津出版传媒集团



天津科技翻译出版有限公司

著作权合同登记号:图字:02-2014-40

图书在版编目(CIP)数据

平片 X 线摄影数字成像系统/(葡)兰卡(Lança, L.), (葡)席尔瓦(Silva, A.)
主编;王骏等译. —天津:天津科技翻译出版有限公司, 2015. 3

书名原文: Digital Imaging Systems for Plain Radiography

ISBN 978-7-5433-3476-2

I. ①平… II. ①兰… ②席… ③王… III. ①X 射线摄影-成像系统
IV. ①R814.43

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 035229 号

Translation from English language edition:

Digital Imaging Systems for Plain Radiography by Luís Lança and Augusto Silva

Copyright © 2013 Springer New York

Springer New York is a part of Springer Science + Business Media

All Rights Reserved

中文简体字版权属天津科技翻译出版有限公司。

授权单位: Springer-Verlag GmbH

出版: 天津科技翻译出版有限公司

出版人: 刘庆

地址: 天津市南开区白堤路 244 号

邮政编码: 300192

电话: (022) 87894896

传真: (022) 87895650

网址: www.tsttpc.com

印刷: 高教社(天津)印务有限公司

发行: 全国新华书店

版本记录: 787 × 1092 16 开本 9.5 印张 200 千字

2015 年 3 月第 1 版 2015 年 3 月第 1 次印刷

定价: 58.00 元

(如发现印装问题, 可与出版社调换)

译者名单

主 译

王 骏 南京军区南京总医院(南京大学附属金陵医院)

刘小艳 南通大学附属医院

杨晓鹏 郑州大学第一附属医院

副主译

林海霞 南通大学外国语学院

于长路 天津市第三中心医院

王 涛 天津市第三中心医院

吴虹桥 南京医科大学附属常州市妇幼保健院

杨 磊 中国科学院南京地理与湖泊研究所

张文杰 中国人民解放军第八一医院

主 审

周 桔 江苏广播电视大学

刘丹木 南京航空航天大学金城学院

译 者(以姓氏笔画为序)

于长路 天津市第三中心医院

王 涛 天津市第三中心医院

王 骏 南京军区南京总医院(南京大学附属金陵医院)

王云飞 南方医科大学

刘一铭 南方医科大学

刘小艳 南通大学附属医院

刘丹木 南京航空航天大学金城学院

许志丹 江苏省盐城卫生职业技术学院

李如帅	江苏省盐城卫生职业技术学院
李罗阳	南方医科大学
李梦杰	江苏省盐城卫生职业技术学院
杨磊	中国科学院南京地理与湖泊研究所
杨晓鹏	郑州大学第一附属医院
吴洋	徐州医学院
吴虹桥	南京医科大学附属常州市妇幼保健院
何家鸿	南方医科大学
张文杰	中国人民解放军第八一医院
林海霞	南通大学外国语学院
周桔	江苏广播电视大学
徐州	江苏省盐城卫生职业技术学院
商凯	徐州医学院
程阳乐	南方医科大学
潘立德	南方医科大学
潘雪婷	江苏建康职业学院

中文版前言

对于医学成像来讲,最后一个进入数字成像时代的却是日常应用最多的常规 X 线摄影。

早在 20 世纪 90 年代初,该技术被称为“荧光存储 X 线摄影”,直至近 21 世纪才逐步定型为“计算机 X 线摄影”,也就是人们现在所说的“CR”。它采用 X 线对成像板进行曝光,通过激光对成像板扫描,将其潜影形成数字图像在电脑上显示、后处理及存储,然后对成像板利用强光照射,擦除潜影后成像板循环使用。数字成像技术免除了胶片的使用,并可在一定程度上对 X 线摄影过程中过度曝光或曝光不足的图像进行后处理,可适当弥补图像质量欠佳的问题,特别是减少了重复拍片。因此,理论上讲,在满足影像诊断的前提下,CR 可适当地降低一定的 X 线剂量(这里是指非同像质的比较),避免放射师曝光条件选择不当所造成的缺陷,特别是在床边 X 线摄影中其一度发挥了重要的作用,且可以与原先的 X 线机配套使用。但其最大的缺点是图像空间分辨率不高、时间分辨率更是欠佳,不能满足大流通量检查的需求。

随着科学技术的发展,摄影技术进入了数字 X 线摄影时代,即 DR。DR 种类繁多,通常分为直接数字 X 线摄影(非晶硒、多丝正比电离室)和间接数字 X 线摄影(非晶硅、电子耦合器件)。两者之间以是否产生可见光进行划分:如将 X 线转换成可见光,再将可见光转换成电信号,则称为间接 X 线摄影;如将 X 线一步转换成电信号,则称为直接 X 线摄影。如今,非晶硅 DR 因其具有针状 CsI 可减少漫散射,加之造价相对较低而成为市场主流产品。由于 DR 可使受检者的曝光剂量大幅度降低,且图像空间分辨率有所提高,特别是时间分辨率能在数秒内即刻显示所摄影的 X 线图像,使原先一个上午仅能检查 100 余位患者上升为 400 余位,因此其在全世界范围内得到广泛的使用。

然而,理论与实践还是存在着不小的差距,这尤其体现在 X 线摄影的曝光上。本来因为 DR 的非耦合效应,可做到 X 线剂量与最终图像的分离,其本身可以通过后处理技术弥补因 X 线曝光选择失误而造成的图像质量不足,这本来是一件好事。然而,正因为如此,造成放射师在选择 X 线摄影条件时随意性加大,加之

因时间分辨率的提高,工作量大幅上升,导致照射野扩大,所以并没有因为 DR 的优势使受检者及公众接受的 X 线剂量大幅度降低。相反,也正是由于其时间分辨率高,临床医师给患者检查的适应证放宽,这些均将进一步加大公众的集体 X 线剂量及累积剂量。

综上所述,我们有必要通过一段时间的临床应用之后,再回顾性地、全面、系统地研讨平片数字 X 线摄影技术,以达到温故而知新的目的。由路易斯·兰卡和奥古斯托·席尔瓦主编的《平片 X 线摄影数字成像系统》一书全面反映了当今数字成像系统的实际,从深层次上广泛探讨数字 X 线摄影成像系统的理论,充分体现了当今临床应用的最新成果。为此,翻译工作得到了我们团队成员的积极响应,并为之付出了艰辛的劳动。

当然,由于我们水平有限,定有不少表达欠佳或不容易使读者理解的地方,敬请批评指正,可以通过“医学影像健康网”(www.mih365.com)或 E-mail:ying-song@sina.com 发来您的高见,以利我们再版所需。最后,感谢团队成员的积极付出与敬业精神;感谢出版社工作人员的编辑、加工、修改和润色;热忱欢迎广大同行及学生品鉴!

全军医学影像中心

南京军区南京总医院

南京大学附属金陵医院 王骏

2015 年 1 月 28 日

序 言

本著作的初版在放射学领域非常受欢迎。数字成像技术在很短的时间内被广泛地应用。许多放射师以及其他正在从事数字成像的工作者,面对日新月异的信息和技术,表现得不堪重负。最近,可作为放射专业学生学习放射成像重点知识的参考书层出不穷。每个参与到数字成像并直接应用此技术的工作者必须掌握技术理论方面的诸多知识,才能有效地使用它,并保持辐射剂量的正当化。以数字成像为主要内容的著作越来越多,特别是这些作者来自世界各地,对放射学的发展非常有益。

兰卡博士和席尔瓦博士是葡萄牙备受尊重的放射师、研究员、教授。他们已经把关于数字成像的最新信息写在这本著作里。本书的取材广泛,让读者能够完整地了解这项技术,以及如何有效地使用它。其中有一些材料更是来自他们自己的研究成果和出版物。

引言论述了 CR 和 DR 图像接收器的基本知识,详细介绍了探测器的结构,以及它们是如何发挥作用的,再配以图表,让读者能够充分理解光子能量是怎样以数字形式被捕获的。这些信息对刚刚接触放射学的学生和放射科住院医师特别有用,因为这使他们能够理解陈旧的屏-片技术和先进的数字技术之间的差异。对于刚刚进入放射科工作的人员而言,至关重要的是,书中全面、详尽论述了调制传递函数、噪声谱和量子效率因子。同时列出了数字成像的优点,因为它涉及 X 线的产生、曝光技术、准直、散射和滤线栅。读者会特别注意到准直、散射和 kVp , 这些因素直接决定了数字成像的质量。

关于患者剂量这一章节是本书的重中之重,同时对放射专业的学生和住院医师也特别重要。作者提出了关于 X 线吸收、剂量当量、有效剂量的全面信息,因为它们与数字化的工作平台密切相关。对于不同的厂商系统,本章对新的曝光指数值进行了讨论。这些因素对放射师至关重要,以便调整曝光技术,以尽可能低的剂量获得最优质的图像,也就是说,曝光剂量直接影响图像质量。本书的其他章节包含了体现图像质量的一些参数,包括空间分辨率、灰阶,以及诊断医师的业务能力。作者指出,评判数字图像的优劣,是一位出色的技师或诊断医师摒弃以往的旧

模式,对信息进行思维处理的过程。

如今,安全在放射科数字系统的应用中占据非常重要的地位。作者通过对多样的数字化技术性能、剂量优化及其与图像质量的联系等关键环节的论述,阐明了安全的至关重要性。曝光参数是获得最佳数字图像的必要条件,在整本书中都有很详尽的介绍。

本书最后一章详述了数字成像既新颖又独特的一个方面——图像的后处理,其中包括减影、线性滤波、直方图绘制、去噪声技术,操作者可以选择各种各样的方式创建图像。本章最后一节论述了存储和存档系统,也就是 PACS 系统。也介绍了与此相关的国际标准数字通信——DICOM。

一直以来,没有太多的书专门为数字成像而著。这本著作对全球放射界而言都是非常受欢迎并且极富价值的。作者撰写这本著作的思路是将放射技术与工程学及物理学理论结合成一个整体,建立全方位的课题。执业放射师和放射科医师,以及刚刚迈入此领域的学生会发现本书对于他们的日常工作极其有用!

美国明尼苏达州罗切斯特市

梅奥大学临床医学院

Eugene D. Frank, M.A., RT(R),

FASRT, FAEIRS

名誉副教授

前 言

数字技术的进步促进了当前用于 X 线摄影的数字 X 线探测器长足的发展。计算机 X 线摄影 (computed radiography, CR) 和数字 X 线摄影 (digital radiography, DR) 都是目前广泛应用于医疗保健机构的数字技术。这些技术已经取代传统的屏-片 (screen-film, SF) 系统, 这对放射师及其他卫生保健专业人员来说是一个挑战。在发达国家, 数字成像系统已经迅速取代了传统 X 线透视和 X 线摄影设备。数字 X 线探测器的研制成功是以各种技术问题的解决为基础的, 现已应用于临床。

与模拟探测器相比, 数字探测器具有许多优势, 如更宽的动态范围, 更灵活的图像后处理, 图像质量更优, 图像获取更快, 并可以进行远程图像评价。

放射师在应用数字系统进行工作时, 不可忽略一个非常重要的问题: 图像质量和患者剂量的管理。曝光量对成像质量有着非常直接的影响, 为了达到诊断目的而一味地增加患者剂量, 这是不合适的。诊断的准确性可能会受不当曝光量的影响, 因此必须达到一个适当的曝光水平。

对于那些想学习本专业知识的学生和为了体现自身业务水准而正在使用数字系统进行放射学检查的专业人士, 这本著作将会对他们起到极大的帮助作用。

本书致力于全面介绍数字放射系统的有关知识, 涉及的内容非常广泛。此外, 本书旨在提供一个切实可行的实践方法和途径, 而这些方法均来自于作者近年的工作实践。此外, 本书也展现了将 X 线摄影、工程学和物理学融为一体的美好前景。

我们希望这本著作能够对放射师及学生、放射科医师及住院医师、临床医学学生和医学物理学家, 包括其他一些在放射学领域工作的医护人员做出有意义的贡献, 促进他们对放射学的理解。

感谢 Springer 出版公司的 Elektra McDermott 编辑, 她对本书进行了认真的编辑, 并对原稿的所有章节进行了细致的审核, 感谢她的鼎力支持和出色的工作! 感谢 Springer 出版公司的 Andrew Moyer 对本书给予的关注! 我们也对为本书能够顺利出版发行提供支持和给予鼓励的人们表示衷心的感谢!

路易斯·兰卡
奥古斯托·席尔瓦

目 录

第1章 引言	1
1 引言	1
2 现代健康保健中的数字成像系统	1
3 数字技术在诊断质量和安全方面的影响	3
4 章节概述	4
参考文献	5
第2章 数字X线探测器;技术概述	7
1 引言	7
2 计算机X线摄影和数字X线摄影探测器概述	8
2.1 计算机X线摄影	10
2.2 数字X线摄影	11
3 大面积直接转换系统	13
4 大面积间接转换系统	13
5 小结	14
参考文献	14
第3章 数字X线探测器性能	17
1 引言	17
2 图像采集	17
3 定量测定方法	18
4 调制传递函数测定	20
5 噪声功率频谱测定	23
6 量子检测效率测定	25
7 小结	28
参考文献	29
第4章 关于数字科技的技术探讨	31
1 引言	31
2 实践中的数字技术	31
3 设备和技术	32
3.1 X线管和X线产生	32

3.2	曝光参数	33
3.3	准直器和照射野尺寸	34
3.4	X 线源到影像探测器距离	34
3.5	防散射滤线栅	34
3.6	射线滤过	35
3.7	数字技术的要求和进展	35
4	小结	38
	参考文献	38
第 5 章	数字系统的患者剂量评估	41
1	引言	41
2	放射曝光的影响	41
3	患者剂量概念	42
3.1	吸收剂量	42
3.2	等效剂量	43
3.3	有效剂量	43
3.4	剂量面积乘积	44
3.5	体表入射剂量	45
4	曝光指数和探测器曝光	45
5	诊断性参考水平	46
6	曝光对剂量和图像显示的影响	47
7	小结	49
	参考文献	50
第 6 章	诊断放射学中的图像质量	53
1	引言	53
2	数字图像表现	53
3	空间域表征	53
4	频率域表征	55
5	灰阶表征	56
6	图像质量评价	57
7	主要的物理图像质量参数	60
8	图像质量的客观测量	60
9	观察者性能研究	61
10	小结	63
	参考文献	63

第 7 章 数字 X 线摄影的实践	65
1 引言	65
2 数字 X 线摄影系统性能	66
3 数字图像与曝光参数	66
3.1 横断面研究	66
3.2 DICOM 日志文件	68
4 剂量优化与患者防护	70
4.1 体模研究	71
4.2 临床实践中曝光指数的评价	75
5 数字 X 线摄影中诊断图像的质量	78
5.1 胸部体模 ROC 分析中观察者性能研究	78
5.2 患者 VGAS 图像分析中观察者性能研究	81
6 数字 X 线摄影的优化架构	85
7 小结	87
参考文献	87
第 8 章 数字 X 线摄影图像增强	89
1 引言	89
2 综合空间独立法	90
2.1 特性曲线调制	90
2.2 直方图	93
2.3 直方图修正	93
2.4 自适应直方图	95
3 滤波方法	97
3.1 线性平滑滤波	99
3.2 线性锐化滤波	99
3.3 组成的空间增强	101
3.4 形态对比增强	103
3.5 多尺度处理	105
4 小结	108
参考文献	109
第 9 章 数字 X 线摄影和图像存储与传输系统	111
1 引言	111
2 范例改变	112
3 IHE 框架	112
4 PACS 体系结构	113

4.1	一般概念	113
4.2	PACS 组成	114
4.3	当前的体系结构	115
5	DICOM 一览	117
5.1	以对象为导向的标准	117
5.2	信息对象	119
5.3	数字 X 线 IOD	120
5.4	剂量	121
5.5	DICOM 文件	124
6	搜索 PACS	125
7	小结	127
	参考文献	127
	索引	129

第 1 章

引言

摘 要

伦琴于 1895 年发现 X 线,在放射学领域孕育了新的研究方法和技术。在突破性技术开发的推动下,直到今天,放射学一直在持续不断地发展,其运用现已被拓展到医学成像这一广阔的领域。

关键词

X 线;伦琴;放射学;技术开发;成像;处理;胶片

1 引言

1895 年伦琴发现了 X 线,在放射学领域孕育了新的研究方法和技术。技术进步推动着放射学不断地发展,现在 X 线已被广泛应用于各种医学成像过程中。

X 线在被发现的初期是使用胶片作为成像载体的。自从 20 世纪 80 年代早期开始,特别是最近二十年,计算机应用和放射技术有了很大发展。目前,放射学在临床中的应用已进入数字化时代。从传统胶片向数字化采集的这种转变使放射专业人员需要评估、回顾和改进涉及图像质量与辐射防护等电子技术的放射环节。

2 现代健康保健中的数字成像系统

数字技术的进步带动了全数字 X 线探测器的发展。目前,全数字 X 线探测器已经可以在 X 线摄影中进行应用。计算机 X 线摄影(computed radiography,CR)和数字 X 线摄影(digital radiography,DR)都是数字技术,目前已在医疗机构中广泛应用。这些技术已经取代传统屏-片(screen-film,SF)系统,这对 X 线技师和其他医务人员构成了一个挑战。国际放射防护委员会(ICRP)指出^[1,2],在发达国家自 20 世纪 90 年代中期开始,数字成像系统迅速增加,取代了传统的荧光和 X 线成像设备^[3]。在世界范围内,许多医院和放射科购买数字系统进行 X 线摄影越来越常见。

虽然数字 X 线摄影技术已经被引入放射师的日常工作,但在使用数字技术时,如何采用

适当的手段来评估和优化系统性能,从而确保成像安全 and 质量方面仍然缺乏充足的证据。从屏-片到数字技术的转换对放射师、研究人员和其他医务人员构成了挑战。南非的一项研究结果显示^[4],需要对卫生专业人员应用新的数字技术进行正规培训。

第一个数字 X 线摄影系统的基本原理是利用激光扫描激励荧光(scanning laser stimulated luminescence, SLSL)将 X 线能量转化为数字信号,该系统由富士公司(日本,东京)研发,并于 20 世纪 80 年代初引入市场^[5]。在 80 年代中期,存储荧光系统(storage phosphor system, SPS)作为一种新的成像方法应用于站立位摄影、床上滤线器摄影以及床旁摄影,成为一种新的临床应用。严格的技术要求、高昂的费用以及有限的图像质量,加之操作困难使检查时间并未减少,以致延迟了 SPS 进入常规临床应用,直到 90 年代初才有所增多^[6]。目前,存储荧光 X 线摄影系统或 CR 系统在数字 X 线摄影中仍然发挥着基础性的作用。

同时,其他几种技术发展也已经进入放射学领域。自 2000 年初,大面积平板 X 线探测器已经研发成功并引入临床实践中^[7]。最近,在探测器上直接产生图像信息的平板探测器已经研发出来,数字大面积探测器已经实现商用并引入常规临床应用。在常规胸部 X 线摄影中,平板技术在不损失图像质量的前提下使剂量明显减少^[8]。相对于传统屏-片系统,它的高量子检测效率和大的动态范围,使骨骼和胸部 X 线摄影检查中剂量减少可达 50%而不损失图像质量^[9]。根据 Chotas 和 Ravin 的研究^[10],应用数字系统允许在常规剂量水平下获得优质图像质量,或降低患者剂量获得与屏-片 X 线摄影相同的图像质量。

在美国,平片 X 线摄影(包括乳腺 X 线摄影)在每年各类 X 线成像中约占 74%,占每年医学成像中放射成像的 11%^[11]。

在发达国家中,通过应用 X 线检查对许多疾病进行早期检测、更有效的诊断和更得力的治疗监测,有助于减少发病率、提供其他的治疗方案并延长患者寿命。然而,这些类型的检查使患者暴露在电离辐射之中。这可能增大个体终生罹患癌症的风险。公共卫生措施应是平衡的,在寻找支持这些医学成像检查好处的同时使风险也最小化^[11]。

国际原子能组织(IAEA)估计全球每年因诊断而曝光的人数为 25 亿,因治疗而曝光的人数为 550 万^[12,13]。在诊断曝光中,78%为医用 X 线,21%为牙科 X 线,其余 1%为核医学技术^[12,13]。每年所有诊断曝光的接受剂量大约为 25 亿 Sv,相当于全球每年人均 0.4Sv。根据联合国原子辐射效应科学委员会(UNSCEAR)的报告^[4],从 1991 年到 1996 年,总体上每次检查的有效剂量平均增加 20%,每年累积有效剂量增加近 50%。

最近,UNSCEAR 报告指出,从 1997 年到 2007 年,医学诊断检查总的有效剂量估计增加 170 万 Sv,从 230 万 Sv 增加到 400 万 Sv,大约增加 70%。这一事实表明,发达国家中医用辐射的应用增加了患者剂量^[15]。趋势之一是,在许多国家,新的大剂量 X 线技术(尤其是计算机断层扫描),导致每年进行放射检查的人数迅猛增长,总的辐射剂量显著增加。

基于不同的技术方法的数字 X 线探测器已可供临床应用。X 线摄影处理的最优化涉及图像质量与减少患者辐射剂量,有以下几个问题需要思考:数字系统曝光参数如何影响诊断质量?对于一张有价值的诊断图像什么是可接受的辐射剂量?剂量降低到什么水平可不影响精确诊断?

3 数字技术在诊断质量和安全方面的影响

根据 DIMOND 协会的最终报告^[6],讨论新的成像方法的质量必须基于我们所积累的 100 多年的屏-片 X 线摄影经验、超过 25 年的数字图像增强器 X 线摄影经验和 20 年的存储荧光 X 线摄影经验。

对于诊断性 X 线摄影图像^[16],已经开展了多项基于欧洲质量标准指南的研究,旨在研究诊断性图像质量与曝光参数之间的关系^[17-19]。

还有其他研究在不同的数字探测器上比较了数字系统关于图像质量性能测量^[20]与诊断质量的价值^[21]。与传统 X 线平片系统相比,数字技术的发展使得辐射剂量减少多达 50% 而不损失图像质量成为可能^[22]。数字系统在提供同等或更佳的诊断性能的同时,还有许多其他方面的优势,如数字 X 线摄影所固有的传输和存储能力,更便于每天的工作^[23]。

在过去,放射学专业人士的关注都集中在图像质量上。今天,减少剂量和良好的成本/效益关系是放射图像管理的重要决策标准。放射师有责任应用合理使用低剂量(as low as reasonably practicable, ALARP)原则。该原则旨在满足临床所需的图像质量要求的前提下尽量减少剂量^[6]。

有研究报道,不同国家医学成像检查对国人年平均有效剂量的影响存在显著差异^[14,24]。报告阐述,在英国和欧洲,在同一医院或不同医院进行相同的放射检查时,患者接受的辐射剂量有很大的差异^[25,26]。有报道特别提出了以下问题:“一种设备所使用的曝光剂量比采用另一个设备产生的 X 线图像的剂量大 10 倍、20 倍甚至 126 倍,这是合理的吗?”^[27]。此外, Berrington de González 和 Darby 的研究^[28]推测,在许多欧洲国家诊断性 X 线检查导致 75 岁患者的累积癌症风险增加。

关于这个问题,ICRP^[1]在其著作中提出了一些新的建议,其中就强调了医学辐射防护的重要性并随后引入了诊断辐射优化这一概念^[2]。最近,ICRP^[3]对数字放射技术中患者剂量管理提出了一些建议。

Lança 等^[29-30]建议开展全国性或区域性研究,以推动平片 X 线摄影曝光参数的优化和技术流程的改进。这是有必要的,因为在当地 X 线摄影剂量水平没有履行 CEC 指南的曝光技术准则,并在许多检查中发现曝光参数差异显著。

为帮助从业人员为患者提供适当的放射防护,美国放射学会(ACR)制定并出版了《普通 X 线摄影实践指南》^[31]。

用于诊断目的的辐射防护和辐射最优化涉及成像过程中的 3 个重要方面^[32]:①X 线摄影图像的诊断质量;②患者的辐射剂量;③X 线摄影技术的选择。这 3 方面决定因素都对 X 线摄影图像诊断质量有影响。它们取决于放射师在进行 X 线摄影检查时所选择的技术。

在医学成像中优化图像质量和减少患者辐射剂量是当前欧盟重要的研究领域^[32]。此外, DIMOND 协会^[6]的报告指出,未来必须对图像质量优化、标准化的策略和方法进行深入的探讨。DIMOND III 报告强调了针对基于一种新的概念的方法框架开展科学研究的重要性。该框架包含三个步骤: