



复杂工程管理书系
医院建设项目管理丛书



质子治疗中心工程策划、 设计与施工管理



姚 澈 张建忠 乐 云 周 涛 陈海涛 马 进 杨凤鹤 编著



复杂工程管理书系
医院建设项目管理丛书

质子治疗中心 工程策划、设计与施工管理

姚 激 张建忠 乐 云 周 涛 陈海涛 马 进 杨凤鹤 编著



同济大学出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS

内 容 提 要

本书是“复杂工程管理书系 医院建设项目管理丛书”之一,从前期策划、设计、施工与工程管理四个维度详细记述了质子治疗中心建设过程,为未来新的质子治疗中心的建设提供参考。

质子治疗是当前先进的肿瘤治疗技术,质子治疗中心的建设不仅仅是建设独立的质子治疗区域,往往还需要有科研、培训、医疗配套及后勤服务等多种功能,对项目设计、施工与管理等各方面都提出了新的要求,质子治疗设备的特殊性也给项目建设带来了新的难点。本书详细介绍了瑞金医院肿瘤质子治疗中心项目建设全过程,包括项目前期策划、各专业工种设计、各阶段施工难点及措施、工程监理、财务监理以及甲方管理等。围绕质子治疗中心项目的方方面面,全面进行经验梳理和总结,还原项目建设过程中遇到的各种困难及解决途径。

本书所面向的是医院基本建设管理者,政府工程建设部门的管理者,专业管理咨询机构,相关设计、施工、监理、供货等参建单位,以及工程管理的研究者。

图书在版编目(CIP)数据

质子治疗中心工程策划、设计与施工管理/姚激等
编著. —上海:同济大学出版社, 2018.12
(复杂工程管理书系·医院建设项目管理丛书)
ISBN 978-7-5608-8236-9

I. ①质… II. ①姚… III. ①质子—放射疗法—防治
中心—基本建设项目—项目管理 IV. ①R815 ②R197.65

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第264092号

上海市文教结合“高校服务国家重大战略出版工程”入选项目

质子治疗中心工程策划、设计与施工管理

姚 激 张建忠 乐 云 周 涛 陈海涛 马 进 杨凤鹤 编著
责任编辑 姚烨铭 责任校对 徐春莲 封面设计 潘向葵

出版发行 同济大学出版社 www.tongjipress.com.cn
(地址:上海市四平路1239号 邮编:200092 电话:021-65985622)

经 销 全国各地新华书店
排 版 南京新翰博图文制作有限公司
印 刷 深圳国际彩印公司
开 本 787 mm × 1 092 mm 1/16
印 张 24
字 数 599 000
版 次 2018年12月第1版 2018年12月第1次印刷
书 号 ISBN 978-7-5608-8236-9

定 价 155.00 元

本书若有印装质量问题,请向本社发行部调换

版权所有 侵权必究

本书编委会

编著者 姚 激 张建忠 乐 云 周 涛 陈海涛 马 进 杨凤鹤

编委会 (按姓氏拼音排序)

薄卫彪 陈海涛 陈佳艺 陈炜力 崔建生 戴广海 何清华
洪 军 黄 卫 纪添成 金人杰 乐 云 李 俊 李永奎
林锦辉 刘 蕾 刘晓平 马 进 马 良 邱宏宇 沈朋研
王 慧 魏建军 吴璐璐 徐 飏 徐以纬 杨凤鹤 杨 慧
姚 激 姚 蓁 叶 臻 余 勇 岳建勇 张建忠 张 敏
张之薇 赵 炫 赵忠涛 周 涛

编写组 (按姓氏拼音排序)

曹岱毅 陈海涛 陈佳艺 陈炜力 陈 音 陈 湛 崔建生
杜社教 龚 卿 顾君裕 顾 勤 侯键国 黄 卫 纪添成
蒋琴华 金 靖 乐 云 李陈忠 李 俊 李 敏 林韩涵
林 楠 刘 翀 刘嘉怡 刘 江 刘 蕾 刘晓平 马 进
马 良 倪 健 祁伟祥 曲晓峰 瞿 燕 苏 康 孙 乔
王 雷 王 宁 王 锐 王学军 王 胤 汪 洁 汪 军
闻 彪 吴 慧 肖更华 许 赅 徐以纬 杨 慧 杨星光
姚 激 虞海彦 余 飞 余 勇 岳建勇 章宏伟 张建忠
张 瑾 张 敏 赵 炫 周 涛 周臻全 庄国方

编制单位

上海交通大学医学院附属瑞金医院
上海申康卫生基建管理有限公司
华建集团华东都市建筑设计研究总院
华建集团上海现代华盖建筑设计研究院有限公司
上海建工一建集团有限公司
上海建科工程咨询有限公司
上海诚杰华建设工程咨询有限公司
同济大学复杂工程管理研究院

前言

质子治疗是当前先进的肿瘤治疗技术,其本身的物理特性带来了临床上的优势,即通过精确的 Bragg 峰射程和物理半影的计算,射线对正常器官的避让能力增强,从而可以大幅度提高物理精确性。利用质子射线进行放射治疗的想法起源于 1946 年,尔后经过多家国外研究所的研究、临床试验,质子治疗技术趋于成熟。2004 年,我国首家质子治疗中心——淄博万杰医院博拉格质子治疗中心(WPTC)的博拉格质子治疗系统投入临床使用。质子治疗中心的建设,不仅仅是建设独立的质子治疗区域,往往还需要有科研、医疗配套等多种功能,质子治疗设备的特殊性也对项目建设带来了难点。

瑞金医院肿瘤质子治疗中心项目工程概算总投资 40 283 万元,项目总建筑面积约 26 370 m²,其中地上建筑面积约 14 300 m²,地下面积约 12 070 m²。主要建设内容为:治疗室(三个旋转治疗室、一个固定束治疗室和一个固定束实验室,共 4 600 m²),直线加速器区域,质子辅助用房区域(包括放射科区、公共部分、其他辅助用房等区域),门诊区,质子治疗区(地上),后勤服务、科研用房和应用培训区域。项目面临的主要困难包括:确保辐射安全;质子装置是精密的治疗仪器,定位精度要远高于常规放疗;需要优化医疗空间布局,整合复杂的功能与流程;项目参建单位众多,协调难度大等。针对以上难点,本书从前期策划、设计、施工和管理四个维度对瑞金医院肿瘤质子治疗中心项目进行总结、梳理,力求还原项目建设过程中各个困难的解决途径。

本书由上海交通大学医学院附属瑞金医院、上海市申康卫生基建管理有限公司、华建集团华东都市建筑设计研究总院、上海建工一建集团有限公司、上海建科工程咨询有限公司、上海诚杰华建设工程咨询有限公司、同济大学复杂工程研究院和华建集团上海现代华盖建筑设计研究院有限公司共同编撰。本书是对瑞金医院肿瘤质子治疗中心项目建设全过程的全面总结与梳理,主要面向医院的基本建设者,政府工程建设部门的管理者,专业管理咨询机构,相关设计、施工、监理、供货等参建单位人员以及工程管理专业的研究者。

本书由华建集团华东都市建筑设计研究总院党委书记、华建集团上海现代华盖建筑设计研究院有限公司总经理姚激,上海市申康卫生基建管理有限公司总经理张建忠,同济大学复杂工程研究院教授乐云,上海建工一建集团有限公司副总工程师周涛,上海建工一建集团有限公司副总裁杨凤鹤,上海交通大学医学院附属瑞金医院院长陈海涛和上海交

通大学医学院附属瑞金医院处长马进编著。

全书分为三篇，共 22 章。编著者的分工如下：张建忠负责牵头组织和总体构思，姚激负责设计篇编写、组稿和定稿，乐云负责详细策划、审阅和修订，周涛和杨凤鹤负责施工与管理篇中施工部分编写、组稿和定稿，陈海涛和马进负责施工与管理篇章中管理部分组稿、修订和定稿。编写组具体分工情况如下：第一篇为策划篇，包括第 1 至第 3 章。第 1 章质子治疗发展历程，由陈佳艺、李敏、许赫、龚卿、祁伟祥编写；第 2 章国外质子中心案例，由马良、陈炜力编写；第 3 章项目前期策划，由马进、陈音、张敏编写。第二篇为设计篇，包括第 4—第 10 章。第 4 章设计概述，由陈炜力编写；第 5 章建筑设计，由陈炜力、刘晓平编写；第 6 章结构设计，由姚激、徐以纬、岳建勇、黄卫、王锐编写；第 7 章机电设计，由刘蕾、余勇、闻彪、吴慧、曹岱毅、汪洁编写；第 8 章绿建设计，由瞿燕、刘蕾、陈湛编写；第 9 章 BIM 设计，由刘翀、杨慧、蒋琴华、余飞编写；第 10 章装饰、景观设计，由陈炜力、王雷、王胤编写。第三篇为施工与管理篇，包括第 11—第 21 章。第 11 章施工概述，第 12 章施工部署与总体策划，第 13 章基础与土方施工，第 14 章主体结构施工，第 15 章建筑设备安装施工，第 16 章绿色施工，第 17 章室外总体施工，以上第 11—14 章、第 16—17 章由顾勤、顾君裕、曲晓峰撰写；第 15 章由王学军、汪军编写；第 18 章室内装饰工程施工与管理，由肖更华、金靖编写；第 19 章 BIM 在施工中的应用，由周臻全、李陈忠、侯键国编写；第 20 章甲方工程管理，由张建忠、李俊、崔建生编写；第 21 章工程监理，由王宁、苏康、章宏伟、林韩涵、林楠、庄国方、杨星光编写；第 22 章财务监理，由纪添成、赵炫、虞海彦编写。全书整体修订由刘嘉怡和孙乔负责。

由于作者水平有限，书中不足之处在所难免，恳请各位读者批评指正。

编写组

2018.8

目 录

前言

第一部分 前期策划篇	1
第一章 质子治疗发展历程	1
1.1 质子治疗中心的兴起和发展	1
1.1.1 基于核物理实验室的质子治疗探索阶段	1
1.1.2 质子治疗装置的诞生和更新	2
1.1.3 基于核物理实验室的装置向医疗专用装置的转型和整合	5
1.1.4 质子治疗临床优势和挑战	8
1.2 质子治疗中心的发展趋势	14
第二章 国外质子中心案例精选	18
2.1 美国圣地亚哥 SCRIPPS 质子治疗中心	18
2.2 美国休斯顿 MD 安德森癌症中心	19
2.3 日本鹿儿岛国际质子治疗研究中心	20
2.4 日本北海道大学质子治疗中心	20
2.5 瑞士保罗谢尔研究所	22
2.6 尼斯安东尼 拉卡萨涅研究中心	23
2.7 巴黎居里研究所奥赛质子治疗中心	24
第三章 前期策划	26
3.1 建设背景	26
3.2 前期策划准备	27
3.3 选址策划	28
3.4 定位策划	30
3.5 功能分析和规模策划	30
3.5.1 基本概念	30
3.5.2 策划流程	31
3.6 设备选型策划	36
3.7 经济效益策划	36
3.8 项目管理策划	39
3.8.1 策划内容	40
3.8.2 策划流程	40

第二部分 设计篇	45
第四章 设计概述	45
4.1 项目设计概况	45
4.2 结合工程难点的设计特点	46
4.2.1 确保辐射屏蔽安全的建筑设计	46
4.2.2 确保设备安全运行的建筑环境设计	46
4.2.3 清晰便捷的医疗流程设计	47
4.2.4 以人为本的建筑环境设计	48
4.2.5 节能生态的绿色设计	48
4.2.6 勇于创新的设计应用	49
第五章 建筑设计	50
5.1 功能选择	50
5.1.1 核心的质子治疗主体功能	50
5.1.2 质子治疗配套的其他功能	50
5.2 功能组成	51
5.2.1 质子治疗区	51
5.2.2 质子装置设备区	52
5.2.3 非质子医疗区	52
5.2.4 研发办公和教学培训区	52
5.2.5 能源供应区	52
5.3 医疗流程设计	53
5.3.1 医疗单元之间的流程设计	53
5.3.2 重点医疗单元内部的流程设计	54
5.4 工艺特点及构造设计	55
5.4.1 辐射防护的相关构造措施	56
5.4.2 吊装方式相关的构造措施	56
5.4.3 防水防汛相关的构造措施	57
5.5 方案设计及优化过程	58
5.5.1 平面布局的优化	58
5.5.2 立面造型的优化	61
第六章 结构设计	65
6.1 不良地质条件及地下障碍物处理	65
6.1.1 地下障碍物分布情况	65
6.1.2 地下障碍物处理方案分析	66
6.1.3 工程桩布置调整避让措施	67
6.2 高精度的基础微变形控制	67
6.2.1 不利的软土地基条件	67
6.2.2 严格的基础微变形控制标准	68
6.2.3 微变形控制总体思路	68

6.2.4 桩基变形控制技术措施	69
6.2.5 改进桩基变形分析方法	70
6.2.6 现场实测变形结果分析	72
6.2.7 小结	75
6.3 严格的基础微振动控制	75
6.3.1 严格的基础微振动控制标准	75
6.3.2 周边环境及震源分析	76
6.3.3 基础微振动控制总体思路	77
6.3.4 现场测试及分析结果	77
6.3.5 小结	84
6.4 超厚混凝土墙板设计与实施技术措施	84
6.4.1 结构技术难点及实施技术措施	84
6.4.2 大体积混凝土施工阶段裂缝控制措施	85
6.4.3 混凝土施工阶段控制措施	86
6.5 高精度大型预埋件设计与实施技术措施	89
6.5.1 治疗设备严格的安装和使用要求	89
6.5.2 治疗设备连结端受力及预埋件设计	90
6.5.3 预埋件实施技术	91
第七章 机电设计	94
7.1 质子治疗中心暖通空调特色设计	94
7.1.1 工艺冷源特别要求及设计策略	94
7.1.2 优化配置空调及工艺冷源	95
7.1.3 热源与低品位废热利用	97
7.1.4 诊断用房暖通空调设计关键技术	98
7.1.5 质子治疗中心排烟设计技术难点	101
7.2 质子治疗中心给排水特色设计	104
7.2.1 治疗装置工艺用水与补水	104
7.2.2 装置区域泄漏废液的处置	106
7.2.3 装置区域管道布设	108
7.2.4 残余辐射安全处置	109
7.2.5 特殊空间水消防安全处置	110
7.3 质子治疗中心电气特色设计	115
7.3.1 治疗装置的负荷选择及供配电设计	115
7.3.2 治疗装置接地设计	116
7.3.3 治疗装置辐射防护	118
7.3.4 电能质量保障	119
7.3.5 特殊空间火灾报警	120
7.3.6 以人为本的智能化设计	123
第八章 绿建设计	125
8.1 绿色目标与实施原则	125

8.2	医疗建筑的特征分析	125
8.2.1	复杂的功能	126
8.2.2	复杂的流线	126
8.2.3	较高的给排水要求	126
8.2.4	较大的总体能耗	126
8.2.5	医院的总体负荷特点	127
8.3	绿色适宜技术策略	127
8.3.1	室外生态环境优化与室内外交互设计策略	127
8.3.2	室内被动式节能技术分区域有限设计策略	129
8.3.3	高品质环境营造与设备高效稳定运行策略	129
8.3.4	能源与资源有效、综合、安全利用策略	129
8.4	绿色技术亮点	130
8.4.1	根据“质子区”工艺特点创新性设计余热废热利用技术	130
8.4.2	针对医院高能耗特点的能源节约与综合利用设计	131
8.4.3	根据医疗建筑特点的室内外空气品质保障设计	139
8.4.4	室内外环境交互与卫生安全设计	142
8.4.5	控制径流、热岛效应与水资源综合利用的海绵设计	144
8.4.6	材料资源有效、综合、安全利用	145
8.4.7	施工节材优化与绿色施工管理	148
8.5	绿色成果及效益	148
第九章	BIM 设计	150
9.1	BIM 技术应用的项目背景	150
9.2	BIM 技术应用前期策划	151
9.2.1	设计阶段 BIM 技术应用点分析	151
9.2.2	BIM 实施策略	152
9.2.3	BIM 实施路线	152
9.2.4	设计阶段 BIM 实施内容	153
9.3	BIM 技术设计阶段应用	154
9.3.1	BIM 设计流程及标准制订原则	154
9.3.2	BIM 在设计阶段细节运用和分析	156
9.3.3	模型移交的技术对接	161
9.3.4	BIM 技术设计阶段应用经验总结	162
9.4	BIM 技术应用总结	164
第十章	装饰、景观设计	165
10.1	装饰设计	165
10.1.1	装饰设计的基本原则	165
10.1.2	主要室内空间的设计特点	165
10.2	景观设计	168
10.2.1	景观设计的基本原则	168
10.2.2	主要室外景观的设计特点	168

第三部分 施工与管理篇	171
第十一章 施工概述	171
11.1 工程背景	171
11.2 施工中的难点和特点	171
11.2.1 土建施工难点	171
11.2.2 机电施工难点	172
11.2.3 装饰施工难点	173
第十二章 施工部署与总体策划	174
12.1 施工组织管理	174
12.2 施工部署	175
第十三章 基础与土方施工	179
13.1 结构沉降控制解决	179
13.2 质子区测控精度控制	180
13.3 深基坑“坑中坑”施工控制	182
13.3.1 围护灌注桩施工	182
13.3.2 三轴水泥搅拌桩施工	184
13.3.3 高压旋喷桩施工	187
13.3.4 双轴搅拌桩施工	190
13.3.5 压密注浆施工	191
13.3.6 基坑降水施工	192
13.3.7 基坑土方开挖、支撑及垫层施工	196
第十四章 主体结构施工	198
14.1 墙板厚、空间超高大体积混凝土施工控制	198
14.1.1 模拟实验	198
14.1.2 混凝土浇筑分阶段控制	202
14.2 屏蔽钢板墙精度控制	202
14.2.1 屏蔽钢板加工	203
14.2.2 吊装方案模拟	203
14.2.3 屏蔽钢板拼装及运输	203
14.2.4 屏蔽钢板精度严格控制、预埋件精确定位	204
14.3 高大支模体系施工	204
14.3.1 高排架体系概述	204
14.3.2 高排架方案实施控制	205
14.4 质子区预埋件质量管控措施	208
14.4.1 预埋构件吊装	208
14.4.2 预埋构件安装	210
第十五章 建筑设备安装施工	213
15.1 质子治疗中心设备安装过程策划	213
15.1.1 施工重点难点分析与对策	213

15.1.2	施工方案编制	214
15.1.3	施工质量控制策划	214
15.2	异型束流套管的制作及其预埋	216
15.2.1	施工准备	216
15.2.2	试验块预埋	217
15.2.3	异形套管安装	217
15.2.4	质量保证措施及核验	219
15.3	能源中心重点机房安装	219
15.3.1	安装工程策划与准备	219
15.3.2	设备进场	221
15.3.3	设备吊装	222
15.3.4	施工过程管理	223
15.3.5	主要设备施工工艺	224
15.4	质子治疗系统冷源系统调试	229
15.4.1	冷源系统设备单机调试	229
15.4.2	冷源系统联动调试	230
15.5	消防系统安装工程	232
15.5.1	火灾自动报警系统基本要点	232
15.5.2	质子治疗舱特殊空间消防系统安装	233
15.5.3	系统联动调试	234
15.6	污水处理系统安装工程	236
15.6.1	难特点分析与研究	236
15.6.2	系统工作	237
15.6.3	效果评价	239
15.7	电气系统安装工程	240
15.7.1	防雷接地施工要点	240
15.7.2	强电施工工艺要点	244
15.8	暖通系统安装工程	244
15.8.1	暖通系统概况	244
15.8.2	暖通系统施工工序	245
15.8.3	暖通系统施工工艺要点	246
15.9	给排水系统安装工程	246
15.9.1	施工工序表	247
15.9.2	给排水系统施工工艺要点	247
15.10	与质子治疗系统的接口配合	249
15.10.1	质子治疗系统及接口概述	249
15.10.2	质子治疗系统概况与接口要求	249
15.10.3	质子治疗装置安装配合	250
15.10.4	质子装置调束配合	251

第十六章 绿色施工	252
16.1 绿色施工管理	252
16.1.1 绿色施工管理组织机构	252
16.1.2 绿色施工管理策划	252
16.2 绿色施工技术措施	255
16.2.1 城市生态环境保护措施	255
16.2.2 节材与绿色建筑材料的利用	272
16.2.3 节水与水资源利用	274
16.2.4 节能与能源利用	275
16.2.5 节地与施工用地保护	276
第十七章 室外总体施工	278
17.1 室外总体施工概况	278
17.2 回填土施工方案	279
17.3 室外雨污水施工方案	281
第十八章 室内装饰工程施工与管理	283
18.1 室内装饰工程概况	283
18.1.1 室内装饰工程简述	283
18.1.2 室内装饰工程的难点及应对措施	285
18.2 室内装饰工程技术管理	287
18.2.1 图纸的现场优化	287
18.2.2 机电、消防、通风综合点位的优化	288
18.3 室内装饰工程施工管理	290
18.3.1 室内装饰工程四化管理措施	290
18.3.2 室内装饰工程质量管理	292
18.3.3 室内装饰工程绿色施工管理	294
18.3.4 室内装饰工程成品保护管理	295
第十九章 BIM 在施工中的应用	298
19.1 项目 BIM 实施概述	298
19.2 施工深化设计	298
19.2.1 桩基工程 BIM 深化应用	299
19.2.2 砌体结构工程 BIM 深化应用	300
19.2.3 机电安装专业 BIM 深化	300
19.2.4 室内装饰专业 BIM 深化	305
19.3 施工场地规划	306
19.4 施工方案模拟	308
19.4.1 桩基工程 BIM 施工模拟	308
19.4.2 土方工程 BIM 施工模拟	309
19.4.3 质子区结构工程 BIM 施工模拟	309
19.4.4 屏蔽钢板墙吊装 BIM 施工模拟	310
19.4.5 质子区设备吊装 BIM 施工模拟	311

19.4.6	成排异形束流套管施工方案模拟	311
19.4.7	关键复杂节点模型深化	312
19.5	施工进度管理	314
19.5.1	施工全过程 4D 模拟	314
19.5.2	基于 BIM 的进度管控	315
19.6	设备与材料管理	317
19.6.1	基于 BIM 的工程量统计	317
19.6.2	设备的信息管理	319
19.7	质量与安全管理	321
19.7.1	施工质量管理	321
19.7.2	施工安全管理	322
19.8	竣工验收管理	324
19.8.1	竣工模型验收	324
19.8.2	竣工模型辅助运维	327
19.9	信息化技术集成应用	328
19.9.1	二维码信息技术	328
19.9.2	3D 扫描应用	329
19.10	BIM 技术应用总结	330
19.10.1	社会效益	330
19.10.2	经济效益	331
第二十章	甲方工程管理	332
20.1	代建项目组织机构	332
20.2	项目设计管理	333
20.2.1	方案设计阶段控制	334
20.2.2	初步设计阶段控制	334
20.2.3	施工图设计阶段控制	334
20.2.4	设计现场配合管理	335
20.3	项目质量、进度管理	335
20.3.1	质量管理	335
20.3.2	项目的进度管理	339
20.4	项目投资控制及财务管理	339
20.5	项目“双优”工作	341
20.6	项目信息管理	342
第二十一章	工程监理	343
21.1	监理组织特点	343
21.2	QC 管理手段运用	344
21.3	监理针对重点难点的控制措施	345
21.3.1	治疗舱区域钢筋安装	345
21.3.2	高精度埋件安装控制	347
21.3.3	大体积混凝土	348

21.3.4	质子区模板	350
21.3.5	质子区辐射屏蔽	352
21.3.6	安装工程	352
第二十二章	财务监理	355
22.1	财务监理工作概况	355
22.2	本项目财务监理造价管理的特点与难点	356
22.3	财务监理造价管理的把控重点	357
22.3.1	设计管理的经济把控	358
22.3.2	招投标程序的经济把控	358
22.3.3	主体建筑的经济把控	360
22.3.4	工程建设其他费用的全面预测及把控	360
22.4	财务监理造价管理具体工作	361
22.5	建筑信息模型在财务管理中运用	362
22.5.1	运用 BIM 技术核对工程量	362
22.5.2	运用 BIM 平台做到事前控制	362
22.5.3	运用 BIM 平台进行信息对接	363
22.5.4	运用 BIM 技术解决传统造价控制的技术难点	363
22.6	财务监理工作成效	363
22.6.1	经济管理成效	363
22.6.2	优化管理成效	365
22.6.3	新技术运用成效	365
参考文献		366

第一部分

前期策划篇

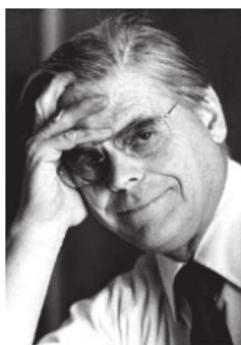
第一章 质子治疗发展历程

1.1 质子治疗中心的兴起和发展

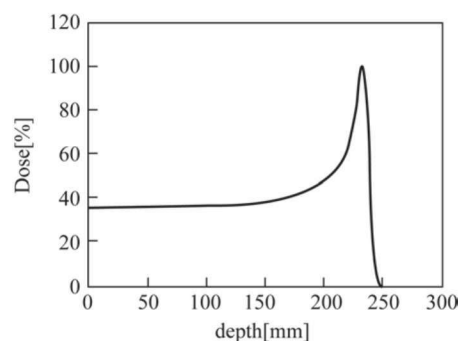
1.1.1 基于核物理实验室的质子治疗探索阶段

世界上第一次用放射线进行肿瘤治疗是 1896 年 3 月,发生在芝加哥, Emil Grubbe 医生用一个 X 射线管来照射乳腺癌患者,治疗小有成效,病人的肿瘤发生溃烂和紧缩。Grubbe 医生发现,暴露在 X 射线下的工人们皮肤和指甲总是一层层地剥落,便联想到细胞死亡与肿瘤的关系^[1]。自此,放射作为一种治疗手段开始得到重视,美国 and 欧洲的一些医生也开始了一些早期的放射治疗探索。例如,诞生于 20 世纪 20 年代的分割治疗方案^[2]。另外一些人关注于放射肿瘤过程中的正常组织保护,质子射线就这样进入了放射治疗的视野。

最早的有效利用质子射线的有限射程和布拉格峰进行放射治疗的想法出自美国曼哈顿项目科学家 Robert Wilson 在 1946 年发表的一篇论文^[3]。1952 年,加州伯克利劳伦斯实验室(Lawrence Berkeley Laboratory: LBL)发表了一些用质子、氘核和氦核射线照射老鼠进行放射生物实验的结果^[4],并且于 1954 年开展了利用质子射线对乳腺癌转移病人进行垂体照射抑制激素水平的治疗。这些治疗本身并没有利用质子射线的布拉格峰(Bragg peak)(图 1-1),而是使用 340 MeV 质



(a) Robert R. Wilson
图片来源: http://history.fnal.gov/photos_directors



(b) 质子射线在水介质中的深度剂量分布,尾部剂量突然升高的部分为布拉格峰(Bragg peak),峰前为剂量坪区
图片来源: <https://www.ptcri.ox.ac.uk/images/research>

图 1-1

子射线的坪区对垂体进行交叉照射^[5]。劳伦斯实验室后来转向了利用离子束布拉格峰治疗的前驱工作,并颇有建树。

几乎与此同时,瑞典乌普萨拉的古斯塔夫·沃纳研究所(Gustav Werner Institute)于1955年发表了他们用质子射线进行动物实验的放射生物学研究结果,并于1957年开始了质子治疗颅内病灶的实践。治疗采用的射线是回旋加速器产生的185 MeV 质子束,他们也是第一个在质子束流中使用搓板式射程调节器来展宽布拉格峰(Spread-out Bragg peak: SOBP)的机构。

1959年,哈佛大学回旋加速器实验室HCL的质子能量达到160 MeV,20世纪60年代他们完成了一系列质子射线照射的豆根染色体畸变、老鼠死亡率和灵长类动物皮肤反应的相对生物效应研究,成为今天临床相对生物效应的基础。1961年,HCL与麻省总医院(MGH)的神经外科开展颅内病灶治疗,并且在治疗中采用了单散射片扩束和布拉格峰适配。

伯克利劳伦斯实验室、乌普萨拉古斯塔夫·沃纳研究所和哈佛回旋加速器实验室-麻省总医院的这些质子治疗的前驱带来了20世纪60—90年代的第二代质子治疗热。参与第二代质子治疗的机构有苏联莫斯科的杜布那原子核联合研究所(Joint Institute for Nuclear Research: JINR)和理论实验物理研究所(Institute of Theoretical & Experimental Physics: ITEP—1967);列宁格勒的原子核物理研究所(Petersburg Nuclear Physics Institute)和伦琴与放射学中心研究所(Central Research Institute of Roentgenology & Radiology: CRIRR—1975);日本千叶国立放射科学研究所(National Institute of Radiological Science: NIRS—1979);筑波粒子放射医学科学中心—1983);瑞士的Paul Scherrer研究所(PSI—1984年开始用72 MeV 质子束治疗眼科黑色素瘤到1996年使用200 MeV 射线,引领了许多质子治疗的进步);英国克拉特布里奇(Clatterbridge—1989);法国居里研究所奥赛(Orsay—1991);南非iThemba加速器科学实验室—1993。这些机构基本上都是物理研究所,物理研究和医疗使用同一加速器质子源^[6-7]。

1990年在美国加州罗马琳达大学医疗中心(Loma Linda University Medical Center: LLUMC)诞生了世界上第一台医疗专用的质子加速器,它的同步加速器源自费米实验室,哈佛大学回旋加速器实验室为它设计了旋转机架。因为这是一套临床专用系统,这里的质子治疗数量在全球首屈一指。2001年,麻省总医院安装了第一台商品质子治疗系统。1990年以前,所有的质子治疗均在实验室的加速器上进行,而2002年以后不再新建医疗和物理研究共用的系统。

按粒子治疗协作组(PTCOG)的统计,自1954年到2016年年底,全球接受过质子治疗的病人数为149 345人^[8]。

1.1.2 质子治疗装置的诞生和更新

如图1-2所示,经典的电磁理论告诉我们,当一个带电粒子运动进入一个恒定的磁场以后将受到一个垂直于运动方向的洛伦兹力的作用。由于力的方向与速度的方向垂直,这个力对带电体的速度大小没有影响,但会起到改变速度方向的向心力作用。如果磁场是均匀的,带电体的轨迹将是一个闭合的圆周。带电体受到的向心力与其法向加速度满足如下的关系:

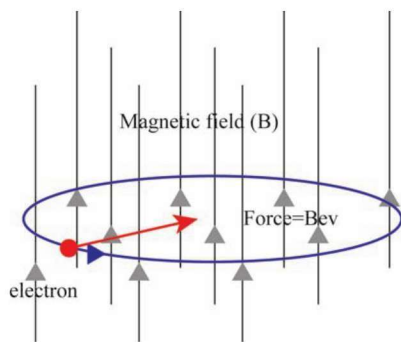


图1-2 带电粒子(图中为电子)在磁场中受到洛伦兹力作用,带电粒子的速度、磁场和洛伦兹力三个矢量方向相互垂直,因此洛伦兹力对带电粒子没有加速作用,而是使其改变速度方向。图片来源 Bing。