

基于 Pylinac 的放射治疗 QA 数字化分析系统^①



高大地, 王佳舟, 罗吉, 钟阳, 翟鹏, 杨彦举

(复旦大学附属肿瘤医院 放疗科治疗中心, 上海 200032)

通讯作者: 杨彦举, E-mail: yangyanju00@126.com

摘要: 目的: 建立放射治疗直线加速器质量保证 (Quality Assurance, QA) 标准化体系和数字化分析系统是提升放疗水平和质量的有效途径. 方法: 基于 Pylinac 函数库, 采用 Django 框架和 MySQL 数据库结构搭建 QA 数字化分析系统, 并通过临床测试来评价该系统的稳定性与实用性. 结果: 放射治疗 QA 数字化分析系统不仅有利于监控及回顾分析直线加速器的运行状况, 而且有效减少医用直线加速器 QA 流程中计算分析的时间, 同时该系统还有助于放疗科新入职物理师快速熟悉 QA 流程. 结论: QA 数字化分析系统在简化 QA 工作流程, 提高工作效率的同时, 更对放射治疗直线加速器的治疗体系中 QA 标准化起到进一步推进作用.

关键词: 放射治疗; 直线加速器 QA; 数字化系统; Pylinac 库

引用格式: 高大地, 王佳舟, 罗吉, 钟阳, 翟鹏, 杨彦举. 基于 Pylinac 的放射治疗 QA 数字化分析系统. 计算机系统应用, 2021, 30(7): 95-101. <http://www.c-s-a.org.cn/1003-3254/8012.html>

QA Digital Analysis System for Radiotherapy Based on Pylinac Library

GAO Da-Di, WANG Jia-Zhou, LUO Ji, ZHONG Yang, ZHAI Peng, YANG Yan-Ju

(Department of Radiation Oncology, Fudan University Shanghai Cancer Center, Shanghai 200032, China)

Abstract: Objective: Establishing the Quality Assurance (QA) standardization and digital analysis system of linear accelerators (linacs) is an effective way to improve the level and quality of radiotherapy. Methods: Based on the Pylinac function library, a QA digital analysis system is built with the Django framework and the MySQL database structure. The stability and practicability of the system are evaluated through clinical tests. Results: The QA digital analysis system can substantially reduce the time of calculation and analysis in the QA process, while facilitating the monitoring and review of linac operation. Moreover, it can help new physicists in the radiotherapy department to master the QA process quickly. Conclusion: The QA digital analysis system not only simplifies the QA workflow and improves the working efficiency, but also promotes the QA standardization for the treatment system of radiotherapy linacs.

Key words: radiotherapy; linear accelerator Quality Assurance (QA); digital system; Pylinac library

目前放射治疗为肿瘤治疗主要治疗手段之一^[1], 在肿瘤的综合治疗手段中占有重要的地位. 放射治疗过程中, 医用直线加速器产生射线照射肿瘤以达到治愈肿瘤的目的. 近些年来, 肿瘤精确放射治疗技术要求提高射线照射区域的照射剂量^[2], 同时降低肿瘤周围正常组织吸收剂量, 即提高放射治疗执行的准确性. 医用直线加速器的质量保证 (Quality Assurance, QA) 是保证

放射治疗准确执行、提高治疗效果、控制不必要照射和防止辐射事故的关键, 因此质量保证在放射治疗流程中具有重要意义^[3,4].

我国放射治疗 QA 流程在整体上正在不断完善, 但一些问题仍尚未解决, 如 QA 流程复杂繁琐以及流程规范性差等, 导致放疗过程中的 QA 高效完成仍有一定障碍^[5]. 在互联网技术高速发展的大环境下, 建立

① 收稿时间: 2020-11-06; 修改时间: 2020-12-12; 采用时间: 2020-12-25; csa 在线出版时间: 2021-06-30

放疗 QA 数字化分析系统, 实现放疗设备 QA 数据的数字存储与智能分析, 可极大地简化放疗 QA 流程, 提高物理师工作效率, 符合精准放疗时代所提出的基本要求^[6-8].

Pylinac 是一套提供 AAPM TG-142 报告相关的加速器 QA 分析的开源代码^[9,10], 用于分析日常加速器 QA 的数据和图片. 本研究利用 Python 编程语言调用 Pylinac 中各函数模块, 基于 Django Web 开发框架和 MySQL 数据库建立 QA 数字化分析系统. 其可分析物理师导入的加速器 QA 流程中数字、图片或日志数据并得出分析结果. 同时, QA 数字化分析系统可简化并规范放疗设备安装后的验收检查和放疗流程中质量保证, 提高放疗工作效率, 节省物理师工作时间, 降低放疗差错和放疗事故的发生概率.

1 系统设计

本文中放射治疗 QA 数字化分析系统是一款专用于放射治疗流程中质量保证工作的分析系统. 该系统基于 B/S 架构进行设计, 包含数据上传、QA 数据分析和可视化展示 3 个功能模块, 实现 QA 数字化分析流程中 QA 数据的导入、自动处理分析、结果展示和存储下载功能.

1.1 系统整体架构设计

本文中放射治疗 QA 数字化分析系统采用分层架构设计模式, 其应用层、服务层和数据层之间保持相互独立且各层内部迭代互不影响, 系统整体架构如图 1 所示. 以浏览器作为用户交互界面, 交互界面包含数据上传模块和可视化展示模块. 数据上传模块具有从 Django 框架中加载前端界面模板与上传 QA 数据和图片至 Django 框架功能; 可视化展示模块可具有将图表等直观的形式展示分析结果和下载分析结果功能. Django 服务框架将数据上传模块上传的数据和图片进行处理后保存至数据库中, 同时将数据导入 QA 分析模块. QA 分析模块可完成对数据和图片的自动分析, 一方面将结果保存于数据库, 另一方面将结果进行格式化封装封装后返回到 Django 服务框架.

1.2 系统功能模块设计

1.2.1 数据上传模块设计

数据上传模块在 QA 数字化分析系统中主要负责将 QA 分析所需要的数据、图片及日志文件上传至 Django 服务框架, 主要包括前端界面加载功能和数据

上传功能. 前端界面加载功能将前端界面加载展示到浏览器以用于用户交互, 其中包括需要 QA 分析功能选择区, 数据上传区与结果展示区. 数据上传功能实现将数据上传区的数据上传至 Django 服务框架中.

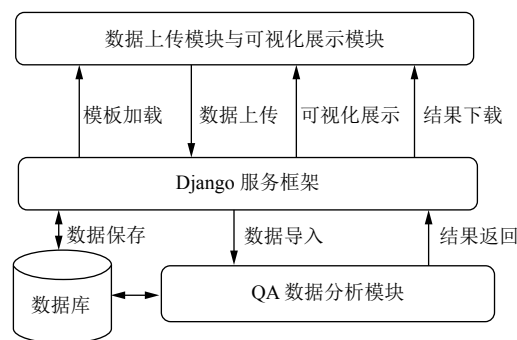


图 1 放射治疗 QA 系统程序架构

1.2.2 QA 数据分析模块设计

QA 数据分析模块主要负责将导入的医用加速器数据进行自动化分析得到结果. 数据分析模块主要包括数据存储、数据比对分析与结果格式化封装 3 个功能. 数据存储功能实现 QA 数据分析流程中数据的保存与读取, 可将 Django 框架中 QA 初始数据和 QA 分析结果保存至数据库, 亦可从数据库读取初始数据和初始数据. 数据分析功能对 QA 原始数据的内容和格式进行判断, 若数据缺失或格式错误, 则向前端界面返回数据错误提示; 若数据齐全且格式正确, 则模块调用分析函数进行 QA 数据分析并给出分析结果. 结果格式化封装功能将分析结果生成前端界面所需要的 JSON 格式数据并返回到 Django 服务框架供可视化结果显示使用.

1.2.3 可视化展示模块设计

可视化展示模块包括可视化界面展示和结果下载两个部分. 可视化展示功能是将数据分析功能模块返回到 Django 服务框架中的 QA 分析结果以表和图的形式展示在前端界面. 结果下载功能是将 QA 分析结果以 PDF 的形式下载, 方便交流与研究.

2 系统实现

基于上文系统的架构设计和各个功能模块的设计需求, 需选择开发语言、开发框架和数据库对各个模块功能进行实现. 系统服务端选用 Python 3.7 语言, 并基于 Django 框架进行开发. 该框架是 MVC (Model View Controller) 软件架构的扩展与延伸, 具有耦合性

低,重用性高和开发周期短的特点.系统客户端基于 Bootstrap 开发框架对前端界面进行编写.Bootstrap 为聚合 HTML、CSS 和 JS 开发语音的前端开发框架,可用于开发响应式布局、移动设备优先的 Web 项目.系统数据库采用 MySQL 数据库管理系统对 QA 数据、图片、日志文件及结果进行存取管理.

2.1 数据上传模块设计

数据上传模块完成 QA 数据、图片和日志文件的上传至 Django 系统框架的功能.模块功能主要包块界面加载功能和文件上传功能.在系统开发过程中,各个 QA 分析前端界面中页头和侧边栏部分完全一样,若各界面单独编写前端代码,则增加了工作量,更为后期更新升级带来不便,故在界面加载中选用 Django 模板继承方式,将界面中顶部和侧边栏写入 base.html 模板中,各功能界面通过 {% extends "base.html" %} 载入 'base' 模板.因此,各个界面只需编写模块功能代码,大大减少冗余内容.

文件上传功能中通过基于加 jQuery 的 Ajax (Asynchronous javascript and xml) 方式完成 QA 数据、图片和日志的上传.引用 jQuery 文件以方便使用文件中 Ajax 文件上传模板.在数据输入表单中载入 QA 数据,点击上传按钮触发文件上传事件.系统通过 jQuery 技术 \$("#id").val() 得到 form 表单数据,创建一个 formdata 对象并将 form 表单数据以键值对的形式保存, Ajax 携带 formdata 对象以 post 方式上传至指定 Django 后台中的 url.py 文件进行数据处理. Django 后台将接收到的数据后会自动识别其信息类型,若是数字型或字符串型则通过 request.POST.get 方式读取数据;若是图片和日志文件则 request.FILES.get 方式读取文件.获取数据和文件后对格式进行判断,若文件格式错误,返回上传文件错误提示;若上传正确,则将文件发送至数据分析模块.

文件上传功能通过 Ajax 方式完成 QA 数据、图片和日志的上传,接收服务端返回数据并处理的关键代码如下:

```
$.ajax({
  url: "{% url 'planarimagingleeds' %}",
  type: "post",
  data: formdata,
  contentType: false,
  processData: false,
```

```
  success: function (data) {
    if(data.status == 'success') {
      var hc_rois_points = data.hc_rois;
      am4core.ready(function() {...});
      var constant_points = data.contrast_constant;
      var noise_points = data.contrast_to_noise;
      am4core.ready(function() {...});
      $('#MTF').val(data.MTF);
      $('#median_Contrast').val(data.median_Contrast);
      $('#Median_CNR').val(data.Median_CNR);
      $('#result_image').attr("src","../"+data.result_img);
    }else if(data.status == 'fail'){
      $('#jsEditUserForm').html(data.msg)
    }
  }
});
```

2.2 QA 数据分析模块设计

QA 数据分析模块是系统的核心功能模块,具有存储数据、QA 数据分析和格式化封装结果三项功能.存储数据功能选用 MySQL 数据库管理系统对数据进行管理,采用 ORM 模型来操作数据库.首先在 settings.py 中配置 DATABASES 中数据库信息;然后在 model.py 中以类继承 models.Model 的方式生成数据表;最后在 view.py 文件中获取 models.py 对应数据表对象,从而完成前端上传数据和 QA 数据分析结果的存取操作.

对于 QA 数据分析功能,首先新建功能类继承 Pylinac 库中类来实现 QA 数据与图片的分析功能;然后通过数据表对象获取 QA 数据并将数据导入功能类中使用 analyze 函数分析;最后通过 get() 函数和 save_image_image() 分别得到数据结果与图表结果.以平板成像模块中 Leeds TOR 18 部分为例,QA 数据分析功能新建功能类核心代码如下所示:

```
class myLeedsTOR(LeedsTOR):
  def plot_image_image(self):
    self.plot_analyzed_image(low_contrast=False,high_contrast=False)
  def get_hc_rois(self):
    hc_rois = [roi.mtf for roi in self.hc_rois]
    return hc_rois
  def get_contrast_constant(self):
    contrast_constant = [roi.contrast_constant for roi in self.lc_rois]
    return contrast_constant
```



```

def get_contrast_to_noise(self):
    contrast_to_noise = [roi.contrast_to_noise for roi in
self.lc_rois]
    return contrast_to_noise
def save_image_image(self, filename,**kwargs):
    self.plot_analyzed_image(show=False,low_contrast=
False,high_contrast=False, **kwargs)
    plt.savefig(filename, **kwargs)

```

其中, plot_image_image() 与 save_image_image() 函数完成图表结果的绘制与保存工作。get_hc_rois()、get_contrast_constant() 和 get_contrast_to_noise() 分别具有获得平板成像的高频相对调制传递函数值、低频率对比度和载噪比数值功能。

结果格式化封装功能将分析结果整理成 json 类型数据, 通过 HttpResponse(json.dumps(result_dict), content_type='application/json') 将 json 数据返回到指定 HTML 前端界面用于可视化展示。

2.3 可视化展示模块设计

可视化展示模块包括可视化界面展示和结果下载两项功能。可视化界面展示功能主要实现将 QA 分析结果以图表形式直观的展现出来。首先通过 Ajax 的异步调用获取服务器端返回的 json 类型数据, 然后使用 amCharts 定制图表加载数据的方法将 QA 分析结果进行动态加载实现可视化展示功能。在使用 amCharts 定制图表时, 先通过 DIV 标签设置图表的位置和大小, 然后在<script></script>标签中调用 amCharts 中 var chart = am4core.create("ID", am4charts.XYChart) 方法来得到图表 div; 然后通过对象定义完成图表属性的相关设置, 如 xAxes、yAxes、color 以及图表数据 data 等相关信息; 最后通过 chart.series.push(new am4charts.LineSeries()) 设置图表属性。结果下载功能实现对可视化结果以 PDF 形式下载, 点击下载按钮触发 download 事件, 调用 download(request) 函数将分析结果以数据流的方式下载。

amCharts 定制平板成像模块中 Leeds TOR 18 图标的核心代码如下所示:

```

am4core.ready(function() {
    var chart = am4core.create("rMTF_Chart",
am4charts.XYChart);
    chart.data = get_hc_rois_points(hc_rois_points);
    var dateAxis = chart.xAxes.push(new am4charts.

```

```

CategoryAxis());
    dateAxis.dataFields.category = "date";
    dateAxis.title.text = "线对值";
    dateAxis.renderer.minGridDistance =5;
    var contrastAxis = chart.yAxes.push(new am4charts.
ValueAxis());
    contrastAxis.title.text = "相对 MTF";
    contrastAxis.renderer.grid.template.disabled = false;
    var rMTF_Series = chart.series.push(new am4charts.
LineSeries());
    rMTF_Series.dataFields.valueY = "hc_rois";
    rMTF_Series.dataFields.categoryX = "date";
    rMTF_Series.yAxis = contrastAxis;
    rMTF_Series.tooltipText = "{date}: {hc_rois}";
    rMTF_Series.name = "相对 MTF";
    rMTF_Series.strokeWidth = 2;}

```

3 系统测试

3.1 系统操作界面

放射治疗 QA 数字化分析系统的主界面如图 2 所示, 左侧为 QA 分析模块操作侧边栏, 包括日常周检查和月检查所需 QA 分析操作。其中剂量校准模块依据 TG51 协议可完成对医用直线加速器输出剂量的测定和校准数据计算。等中心验证模块通过分析胶片图像, 既可验证机架旋转轴与辐射束等中心一致性, 也可完成准直器旋转轴与辐射束等中心一致性的验证。容积调强质控模块主要包括剂量率与机架旋转速率的联合测试和多叶光栅速率与剂量率的联合测试两个部分。该模块加载电子投影影像设备 (EPID) 采集的 DICOM 图像文件并分析 VMAT/Rapid Arc 的误差变化。平板成像模块通过分析直线加速器 MV 图像或 KV 图像来判断 MV 探测板及 KV 探测板成像质量, 其支持 Leeds TOR 18、Standard Imaging QC-3 和 Las Vegas 模体的分析。Winston_Lutz 分析模块可加载 winston_lutz 图像, 分析验证医用直线加速器的机械等中心与辐射束等中心的重合度。光栅运动检测模块通过分析 EPID 采集的 DICOM 图像来确定多叶光栅的峰值, 判断多叶光栅的运动状况, 并给出通过、警告或失败的可视化指示。CT 质量检查模块对上传的 CBCT 或 CT 图像进行分析, 得到 CT 图像的空间分辨率、图像噪声和低对比度分辨率结果。平坦度与对称性模块依据平坦度/对

称性计算标准,可以加载和分析胶片或 EPID 图像来检查直线加速器辐射束的平坦度与对称性. 日志分析模

块可读取及分析瓦里安直线加速器机器的日志,包括动态日志和轨迹日志.

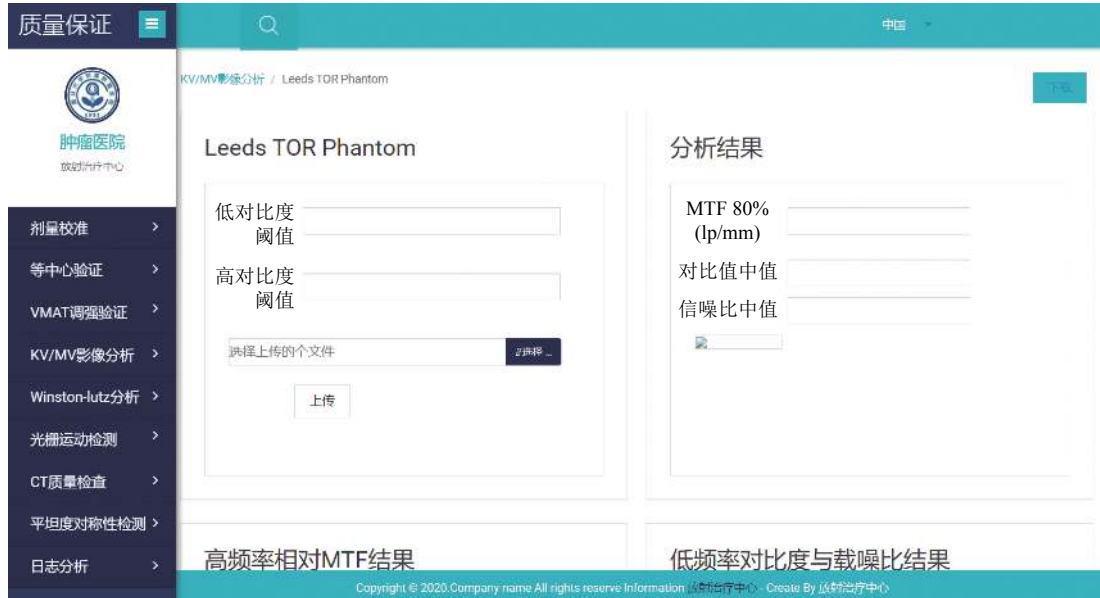


图2 放射治疗 QA 数字化分析系统主界面

选择界面左侧 QA 分析操作侧边栏对应 QA 分析操作,右侧主界面会加载 QA 分析操作与结果界面,其包括参数设置、文件上传、结果可视化和结果下载. 文件上传部分支持图片上传格式为 TIF 格式、JPEG 格式和 DICOM 格式,同时也支持文件压缩包上传及文件夹上传. 参数设置部分需要设定 QA 中测定的参数值和预定的影响 QA 结果的值,其中测定值主要包括:温度、气压和跳数、参考值、误差值和对比度阈值等.

3.2 测试实例

本文选用 KV/MV 影像分析中分析 KV/MV 影像质量的 Leeds TOR Phantom 为例来介绍 QA 数字化分析系统分析操作界面. 使用本院医用直线加速器 Varian Edge 拍摄 Leeds TOR Phantom 图像用于 MV 平板质量分析. 如图 3 Leeds TOR Phantom 分析操作与结果界面所示,在左上方文件上传部分输入低对比度阈值和高对比度阈值并载入加速器拍摄 dicom 类型 MV 平板分析文件. 点击上传按钮,对数据和文件进行上传. 上传数据及文件后,系统可自动进行分析并返回可视化结果,结果呈现部分以图表的形式展现 QA 的分析结果. Leeds TOR Phantom 的可视化结果分别在分析结

果、高频相对 MTF 结果和低频率对比度与载噪比结果 3 个区域展示. 在可视化结果界面点击“下载”,既可进入结果下载界面. 结果下载界面中根据日期排序列出分析结果,点击“下载”即可得到分析结果的 PDF 文件. Leeds TOR Phantom 传统 QA 流程是物理师采集到模体图像后,在高对比度区域通过肉眼判断得出高对比度结果,在低对比度画圈读出低对比度结果. QA 数字化分析系统改变了传统 QA 流程,通过分析上传的模体图片可得到结果,减少了因为技能水平差异而造成的分析结果误差,将影像质量评定缩短至数分钟内可以完成的任务.

在系统可靠性和实用性测试中,分别将本院七台医用直线加速器 2019 年度年检 QA 数据与图片 QA 导入用数字化分析系统进行分析,使用对比分析法将分析结果与年检结果进行比较后得到两者偏差的概率小于千分之一.

经测试结果表明,我们搭建的放射治疗 QA 数字化分析系统可以成功识别并自动处理前端界面表单中添加的放疗设备参数、图像或日志文件,帮助物理师得到 QA 分析计算结果并根据 QA 标准检查设备工作质量.

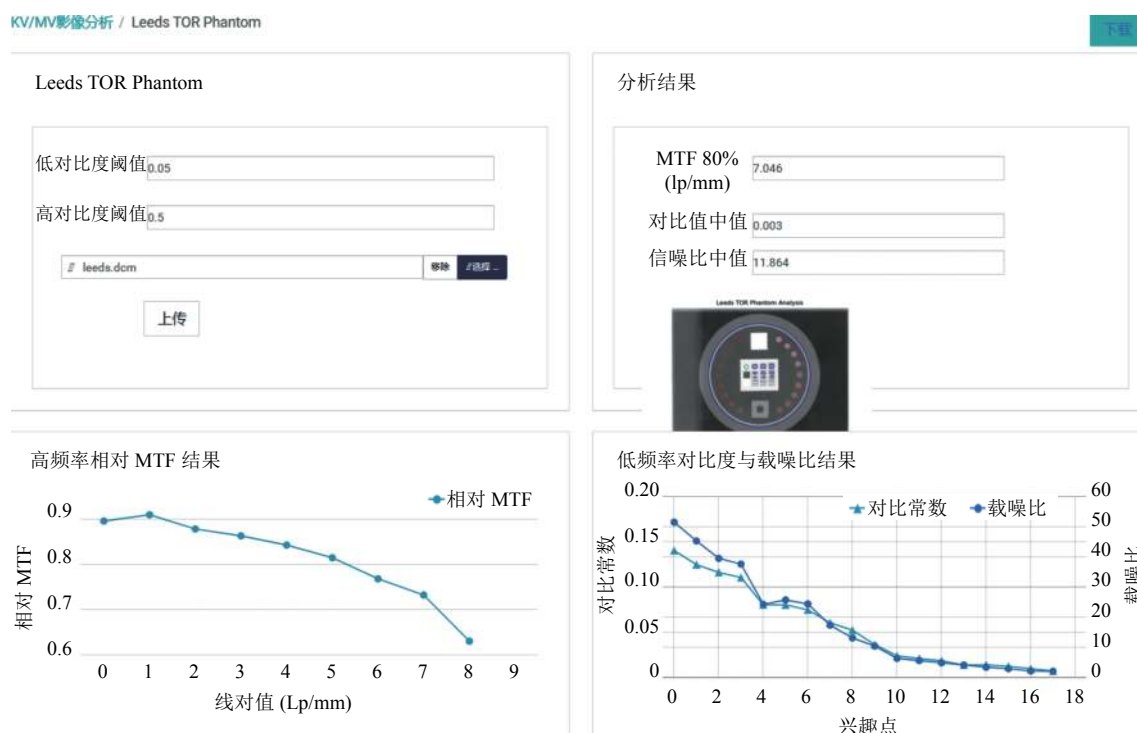


图3 Leeds TOR Phantom 分析操作与结果界面

4 讨论

放射治疗的 QA 是保证和提高肿瘤治疗水平的基础,也是放射治疗的安全与有效的关键^[11,12]. 高水平的质量保证工作不但减少或避免放疗差错及放疗事故的发生,而且使直线加速器保持良好的工作状态. 通过精确地输送处方剂量到放疗靶区,减少附近正常组织的受照量,进而使患者能够获得更好的治疗^[13-15].

在传统的 QA 过程中,物理师使用 QA 设备得到 QA 数值或图像后,通过人工计算或观察评估医用直线加速器 QA 是否通过^[16-18]. 由于 QA 工作繁重且计算复杂,在进行手动计算的时,可能存在人为失误导致重新计算或数据采集,会进一步增加了物理师的工作量. 此外,物理师个人之间的工作能力与 QA 评价标准也存在差别,需要分析的图片数量多且复杂,观察评估 QA 是否通过存在较大主观性和间接性^[19,20]. 基于 Pylinac 开发的 QA 数字化分析系统很好地解决了这方面的问题,物理师将采集的数据导入系统,系统自动分析得到 QA 结果,从而可直观的判断直线加速器 QA 能否通过. 本系统的测试结果显示,医用加速器 QA 工作流程得以顺利地实现,物理师工作内容得到简化,工作效率得到明显的改善和提高.

随着互联网与自动化技术的发展,越来越多放射

治疗 QA 管理系统被物理师接触并使用,如 Darcis M 开发设计的加速器等中心检验系统^[21,22]. 但这样的系统往往功能单一,缺乏系统整合,物理师对直线加速器进行不同项目的 QA 时需要打开多个软件. 本设计将加速器性能检测的所有项目都集成到一个系统中,极大地简化了工作流程,提高工作效率.

综上所述,基于 Pylinac 的放射治疗 QA 数字化分析系统改变了物理师传统的 QA 流程,使质量保证过程得到进一步规范;建立 QA 流程标准化体系和数据数字化管理并自动化分析 QA 数据,提高了物理师工作效率,从而具有推动放射治疗事业向前发展的作用.

参考文献

- 1 Myint AS. The role of radiotherapy in the palliative treatment of gastrointestinal cancer. *European Journal of Gastroenterology & Hepatology*, 2000, 12(4): 381-390.
- 2 李涛,王培,吴大可,等. 非小细胞肺癌精确放射治疗呼吸控制及剂量学研究. *中国医疗前沿*, 2007, 2(18): 17-19. [doi: 10.3969/j.issn.1673-5552.2007.18.010]
- 3 张峰. 放射治疗的物理质量控制与质量保证. *临床医药文献电子杂志*, 2016, 3(34): 6901, 6903.
- 4 Ishikura S. Quality assurance of radiotherapy in cancer treatment: Toward improvement of patient safety and quality

- of care. *Japanese Journal of Clinical Oncology*, 2008, 38(11): 723–729. [doi: [10.1093/jjco/hyn112](https://doi.org/10.1093/jjco/hyn112)]
- 5 田源, 张红志. 肿瘤放射治疗技术进展. *中华结直肠疾病电子杂志*, 2016, 5(4): 287–291. [doi: [10.3877/cma.j.issn.2095-3224.2016.04.002](https://doi.org/10.3877/cma.j.issn.2095-3224.2016.04.002)]
- 6 朱晓华, 曾程, 刘汉成, 等. 放射治疗质量控制标准化体系的研究进展与应用. *中国医疗设备*, 2018, 33(4): 108–110, 114. [doi: [10.3969/j.issn.1674-1633.2018.04.028](https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-1633.2018.04.028)]
- 7 陈利军, 谷晓华, 杨留勤. 基于放射治疗图像引导系统对放疗设备进行质控检查. *中国医疗设备*, 2017, 32(1): 75–77. [doi: [10.3969/j.issn.1674-1633.2017.01.019](https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-1633.2017.01.019)]
- 8 Gaze MN, Boterberg T, Dieckmann K, *et al.* Development of an electronic database for quality assurance of radiotherapy in the International Society of Paediatric Oncology (Europe) high risk neuroblastoma study. *Radiotherapy and Oncology*, 2010, 97(3): 593–595. [doi: [10.1016/j.radonc.2010.08.017](https://doi.org/10.1016/j.radonc.2010.08.017)]
- 9 Benedict SH, Yenice KM, Followill D, *et al.* Stereotactic body radiation therapy: The report of AAPM Task Group 101. *Medical Physics*, 2010, 37(8): 4078–4101. [doi: [10.1118/1.3438081](https://doi.org/10.1118/1.3438081)]
- 10 Zaila A, Adili M, Bamajboor S. Pylinac: A toolkit for performing TG-142 QA related tasks on linear accelerator. *Physica Medica*, 2016, 32(S3): 292–293.
- 11 Bernier J, Horiot JC, Bartelink H, *et al.* Profile of radiotherapy departments contributing to the Cooperative Group of Radiotherapy of the European Organization for Research and Treatment of Cancer. *International Journal of Radiation Oncology·Biology·Physics*, 1996, 34(4): 953–960. [doi: [10.1016/0360-3016\(95\)02177-9](https://doi.org/10.1016/0360-3016(95)02177-9)]
- 12 Munbodh R, Jackson A. Quantifying cell migration distance as a contributing factor to the development of rectal toxicity after prostate radiotherapy. *Medical Physics*, 2014, 41(2): 021724. [doi: [10.1118/1.4852955](https://doi.org/10.1118/1.4852955)]
- 13 刘咏梅. 图像引导的自适应放疗研究进展. *中国肿瘤临床*, 2008, 35(22): 1314–1316, 1320. [doi: [10.3969/j.issn.1000-8179.2008.22.014](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-8179.2008.22.014)]
- 14 Kim SW, Shin JW, Oh KM, *et al.* Study on the feasibility of the HgI₂ dosimeter for quality assurance of radiotherapy. *Journal of Instrumentation*, 2013, 8(5): P05020. [doi: [10.1088/1748-0221/8/05/P05020](https://doi.org/10.1088/1748-0221/8/05/P05020)]
- 15 邵洁, 闫婧, 周霞, 等. 质量保证和质量控制体系在放射治疗中的建立与应用. *浙江临床医学*, 2013, 15(7): 1101–1103. [doi: [10.3969/j.issn.1008-7664.2013.07.085](https://doi.org/10.3969/j.issn.1008-7664.2013.07.085)]
- 16 Du WL, Johnson JL, Jiang W, *et al.* On the selection of gantry and collimator angles for isocenter localization using Winston-Lutz tests. *Journal of Applied Clinical Medical Physics*, 2016, 17(1): 167–178. [doi: [10.1120/jacmp.v17i1.5792](https://doi.org/10.1120/jacmp.v17i1.5792)]
- 17 Levitt SH, Khan F. Quality assurance in radiation oncology. *Cancer*, 1994, 74(S9): 2642–2646. [doi: [10.1002/1097-0142\(19941101\)74:9+<2642::AID-CNCR2820741810>3.0.CO;2-E](https://doi.org/10.1002/1097-0142(19941101)74:9+<2642::AID-CNCR2820741810>3.0.CO;2-E)]
- 18 Papakostidi A, Tolia M, Tsoukalas N. Quality assurance in health services: The paradigm of radiotherapy. *Journal of the Balkan Union of Oncology*, 2014, 19(1): 47–52.
- 19 张晓军, 吴文魁. 放射治疗中的质量保证与质量控制. *中国医疗设备*, 2009, 24(11): 83–84. [doi: [10.3969/j.issn.1674-1633.2009.11.032](https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-1633.2009.11.032)]
- 20 应军盛. 医院放疗技术的质量管理与控制探讨. *中医药管理杂志*, 2014, 22(10): 1711–1712.
- 21 Gao J, Liu X. SU-F-T-547: Off-isocenter Winston-Lutz test for stereotactic radiosurgery/stereotactic body radiotherapy. *Medical Physics*, 2016, 43(6): 3589.
- 22 Pitz M, Birmili W, Schmid O, *et al.* Quality control and quality assurance for particle size distribution measurements at an urban monitoring station in Augsburg, Germany. *Journal of Environmental Monitoring*, 2008, 10(9): 1017–1024. [doi: [10.1039/b807264g](https://doi.org/10.1039/b807264g)]