

基于 VB.NET 的辐射安全防护设计及工程应用

孙 谋 舒浪平 李 园 郭明哲 孔永正 文千山

(中国五洲工程设计集团有限公司 北京 100053)

摘要 针对电子加速器射线源的 L 形迷道布局, 结合国家标准规定和中国五洲工程设计集团有限公司的辐射防护工程设计经验, 利用 VB.NET 语言编程的方式, 完成了“电子加速器辐射防护计算软件”的设计开发。软件采用完善的主照射、副照射和天空反散射计算方法, 辅助设计人员完成辐射屏蔽的工程防护计算。同时, 为提升软件的可操作性, 还设计开发了单击全选、纯键盘操作、计算书自动生成等实用功能。某无损检测室的设计案例表明, 该软件的设计方法和计算结果是有效和可靠的, 可以极大地提高工程设计效率。

关键词 辐射防护, 工程设计, 电子加速器, 软件开发, VB.NET

中图分类号 TL7, X591

DOI: 10.11889/j.1000-3436.2015.rj.33.050601

随着射线检测技术在机械、化工、兵器、船舶、航空、航天、发电、交通及医疗卫生等领域的广泛应用^[1-3], 其在各行各业中发挥着越来越重要的作用。但是射线检测技术也是一把双刃剑, 它是根据介质材料不同的射线吸收和散射特性, 对被检测对象的外形、尺寸和质量等进行评定的, 在此过程中不可避免地会产生高能射线, 如果相应的辐射防护屏蔽措施不当, 势必对周围环境造成辐射污染, 进而造成严重的职业安全危害^[4-7]。因此, 辐射安全防护一直是工程设计领域的重点内容。

同时, 辐射防护的安全性与工程设计经济性成反比。在保证辐射防护安全的前提下, 为最优化其工程经济性, 辐射防护工程设计需要进行大量的复杂计算^[8]。同时, 现代很多工程设计方案往往都需要经过反复多次的调整、验证和优化, 无形中又增加了辐射防护设计的工作量。因此, 辐射安全防护也是工程设计领域中的难点^[9-10]。

目前, 国内在辐射防护计算软件方面的研究还开展较少^[11-12]。同时, 由于所处行业视角的不同, 相关研究中的软件系统也更偏向于辐射防护评价应用, 无法满足工程设计的需要。这些系统, 一是缺乏典型的平面布局方案和对应的方案级计算功能, 工程设计应用价值有限; 二是缺乏计算说明书的自动生成功能, 而在涉及安全性的工程设计中, 相应的计算说明书是设计质量过程控制的关键。

有鉴于此, 结合国家标准规定和五洲工程设计集团辐射防护工程设计经验, 使用 VB.NET 编程语言设计开发“电子加速器辐射防护计算软件”, 就显得十分具有实用操作价值和参考意义。

1 辐射防护设计

图 1 所示为一次迷道典型布局方案。同时在参考国家标准规定^[10,13-16]的基础上, 结合 NCRP^[17]报告中的图表和参数, 采用 TVL (1/10 值层) 法来计算图 1 中所示的屏蔽层厚度。

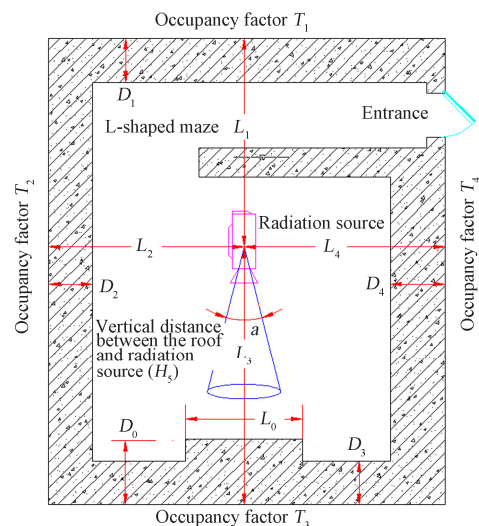


图 1 典型一次迷道辐射防护平面布局
Fig.1 The typical layout of electron accelerator radiation protection design

基金资助: 2015 年首都设计提升计划项目资助

第一作者: 孙谋, 男, 1987 年 10 月出生, 2013 年于北京理工大学获工学硕士学位, 兵器科学与技术专业, 工程师, 从事工程防护设计与应用研究, E-mail: sunmou_bit@163.com

收稿日期: 初稿 2015-05-08; 修回 2015-06-11

1.1 主照射透射率

主照射透射率见式(1)。

$$B_{xt} = \frac{\left(\frac{d}{d_0}\right)^2}{D_0 Q f T} D_{mt} \quad (1)$$

式中, B_{xt} —X-射线的主照射透射率; D_0 —距靶 d_0 (一般 d_0 取 1 m) 处 X-射线的吸收剂量指数率, $\mu\text{Gy/h}$; D_{mt} —剂量限值, $\mu\text{Sv/h}$; Q —X-射线品质, 1.0 Sv/Gy; d —辐射源到参考剂量点的距离, m; f —安全系数, 2; T —居留因子。

主照射的防护宽度见式(2)所示。

$$L_0 = 2(L_3 \times \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) + 0.3) \quad (2)$$

式中参数如图 1 所示, 单位 m。为充分考虑辐射防护的安全性, 故在主射线束左右各增加 0.3 m。

1.2 副照射透射率

副照射屏蔽主要指的是除主照射以外的其他屏蔽墙。副屏蔽是针对漏射线和散射线进行的防护, 其中漏射线平均不超过主射线的 0.1%。同时, 根据国际电工委员会的标准文件规定, 散射线对人体组织为主射线的 0.1%^[18]。因此, 副照射透射率 B_{xs} 按式(3)进行计算:

$$B_{xs} = \frac{\left(\frac{d}{d_0}\right)^2}{(0.1\% + 0.1\%) D_0 Q f T} D_{mt} \quad (3)$$

式中, B_{xs} —X-射线的副照射透射率, 其他同式(1)中定义。如图 1 所示, 在准直锥角度之外的屏蔽部分, 其厚度按照副照射进行计算。

1.3 天空反散射透射率

天空反散射透射率的计算见式(4)、(5)和(6)。

$$B_{xk} = \frac{D_{mt} d_i^2 d_s^2}{2.5 \times 10^{-2} D_0 \Omega^{1.3}} \quad (4)$$

$$\Omega = 4 \arctan \frac{ab}{hc} \quad (5)$$

$$c = \sqrt{a^2 + b^2 + h^2} \quad (6)$$

式中, B_{xk} —X-射线的天空反散射透射率; d_i —源点至屋顶上方 2 m 的距离, m; d_s —观测点到源点的距

离, m; Ω —源点与屋顶所张的仰角, 球面度; a —屏蔽室的半宽, m; b —屏蔽室半长, m; h —源点距屋顶外表面的距离, m; 其他同式(1)中定义。

1.4 TVL 值层数

TVL 值层数如公式(7)。

$$n = \lg \frac{1}{B_x} \quad (7)$$

式中, B_x —X-射线透射率; n —1/10 值层(TVL)个数。

1.5 屏蔽层厚度

屏蔽层厚度计算见公式(8)。

$$S = T_1 + (n - 1) T_e \quad (8)$$

式中, S —辐射防护屏蔽厚度, cm; T_1 —屏蔽层中首个 TVL 值层的厚度, cm; T_e —平衡 TVL 值层的厚度, cm。

美国国家辐射防护与测量委员会(NCRP)与国际放射防护委员会(ICRP)等组织极展开合作, 发布了一系列辐射防护研究报告。根据 NCRP 51 报告中的附图 E12-E14^[17], 可得表 1 和表 2。

表 1 电子加速器 0° 方向 TVL 厚度值
Table 1 Electron-accelerator TVL thickness at 0° direction

| 能量 / MeV | 4 | 6 | 10 | 15 | 18 | 20 |
|-----------------|----|----|----|----|----|----|
| Electron energy | | | | | | |
| T_1 / cm | 35 | 37 | 41 | 44 | 45 | 46 |
| T_e / cm | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 |

表 2 电子加速器 90° 方向 TVL 厚度值
Table 2 Electron-accelerator TVL thickness at 90° direction

| 能量 / MeV | 4 | 6 | 10 | 15 | 18 | 20 |
|-----------------|----|----|----|----|----|----|
| Electron energy | | | | | | |
| T_1 / cm | 33 | 34 | 35 | 36 | 36 | 36 |
| T_e / cm | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 |

2 VB.NET 设计开发

2.1 设计方案

依据软件的总体设计思路, 软件除具备“计算”、“清零”和“帮助”等 3 个基本功能外, 为满足辐射防护设计的过程质量控制, 还需要能够生成计算书。在实际工程设计中, 只需要简单补充项目名称、设计人和审核人等基本信息, 生成的计算书即可直接用于设计校验和归档管理。软件的开发流程图如图 2 所示。

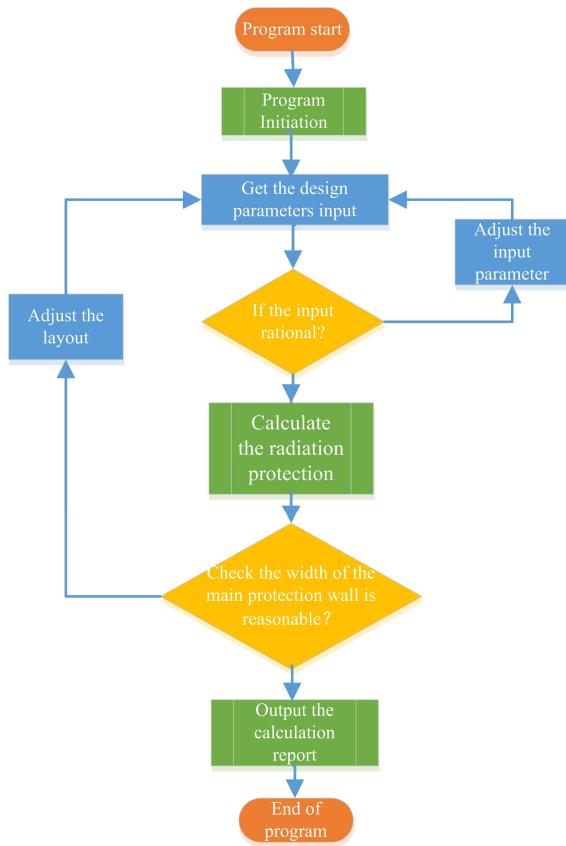


图 2 防护设计计算流程图

Fig.2 Radiation protection design process

程序启动后，首先进入初始化子流程，定义程序界面的基本属性和变量，同时为计算书输出功能和帮助文档功能，预先声明函数。然后程序读取用户输入的参数，并对参数进行判断。对于参数输入遗漏或者输入负数等情况，提醒用户重新输入。随后进入辐射计算子流程，按照上述的计算模型、方法和参数，进行一次迷道的辐射防护计算。计算子流程结束后，还需要对计算结果进行校验，避免平面布局设计不合理，造成主墙防护泄漏。在完成设计方案的计算和优选后，可以进入输出计算书流程。通过初始化子流程中声明的函数，依据预定义的 word 模板，生成新的计算书，写入计算过程数据，以完成计算书的生成。最后，程序运行结束，清空变量，关闭 word 文件。

2.2 编程开发

根据软件设计方案，构建如下图 3 的软件界面，主要分成 5 个大的功能区：基本参数输入区、平面布局示意区、布局参数输入区、计算结果输出区以及功能按钮区。通过这 5 个功能区，直接实现“计算”、“清零”、“计算书”及“帮助”等开发功能。



图 3 软件界面方案图

Fig.3 Layout of program GUI

按照图 2 所示的软件开发流程, 结合图 3 所示的软件界面进行 VB.NET 程序代码的开发。

例如程序初始化子流程:

```
Me.FormBorderStyle=1
Public myword As Object
Public mywordbook As Object
mywordbook = Nothing
myword = Nothing
Private Declare Function ShellExecute Lib
"shell32.dll" Alias "ShellExecuteA" (ByVal hwnd As
Integer, ByVal IpOperation As String, ByVal IpFile As
String, ByVal IpParameters As String, ByVal
IpDirectory As String, ByVal nShowCmd As Integer)
As Integer.
```

例如在判断参数输入合理性时, 提醒用户调整参数: `MessageBox.Show("设计参数不合理, 请重新调整参数!", "提示", MessageBoxButtons.OK, MessageBoxIcon.Warning)`

例如在输出计算书子流程, 根据预定义模板新建计算书:

```
myword = CreateObject("Word.Application")
mywordbook=myword.documents.add(AppDomain.CurrentDomain.BaseDirectory()&"\Template\
LxPrint2.dotx")
```

同时, 为提高程序的可用性和界面友好型, 除“计算”、“清零”、“计算书”及“帮助”等基本功能外, 还开发了很多诸如 Tab 键输入等实用小功能, 例如输入鼠标单击全选功能:

```
MaskedTextBox.SelectAll()
```

3 工程应用案例

某工厂采用电子加速器进行工件加工质量的检测, 平面布置为一次迷道布局, 其射线源基本工作参数如下表 3 所示, 布局参数和周边环境特性如下表 4 所示。

由于无损检测室外公众人员停留的最近距离为 4.0 m (墙外距离), 所以计算天空反散射时参考点的源点距离取 8.0 m。依据基本设计参数, 使用本文所开发的软件进行了辐射屏蔽防护计算, 结果如图 4 所示。

表 3 无损检测室设计基本参数
Table 3 Basic parameters of the nondestructive examination (NDE) room design

| 基本参数 Basic parameter | 加速器能量 / MeV Accelerator energy | 剂量吸收率 / Gy·min ⁻¹ Absorbed dose rate | 准直锥角度 / (°) Angle | 年工作小时数 /h Workload | 公众设计限值 / mSv·a ⁻¹ Public limit | 职业设计限值 / mSv·a ⁻¹ Occupation limit |
|-------------------------|--------------------------------------|---|-------------------------|--------------------------|---|---|
| 设计值 Design value | 4 | 5.0 | 30 | 1000 | 1.0 | 5.0 |

表 4 无损检测室布局参数
Table 4 Layout parameters of the NDE room

| 墙体方向 Wall direction | 主、副屏蔽墙 Main/side shield | 计算源点距/m Calculation distance | 居留因子 Occupancy factor | 周边环境 Environment |
|------------------------|----------------------------|---------------------------------|--------------------------|---|
| 西墙 L3 West wall | 主 Main | 8.0 | 1 | 职业占有区 Control area |
| 东墙 L1 East wall | 副 Side | 5.3 | 1/4 | 公众部分占有区 Non-controlled area |
| 北墙 L2 North wall | 副 Side | 3.8 | 1/4 | 公众部分占有区 Non-controlled area |
| 南墙 L4 South wall | 副 Side | 7.1 | 1/16 | 公众部偶然占有区 Non-controlled area |
| 屋顶高 H5 Roof height | 天空反散射 Sky shine | 5.2 | — | 屋外人员停留区 Non-controlled area (reference distance is 8.0 m) |

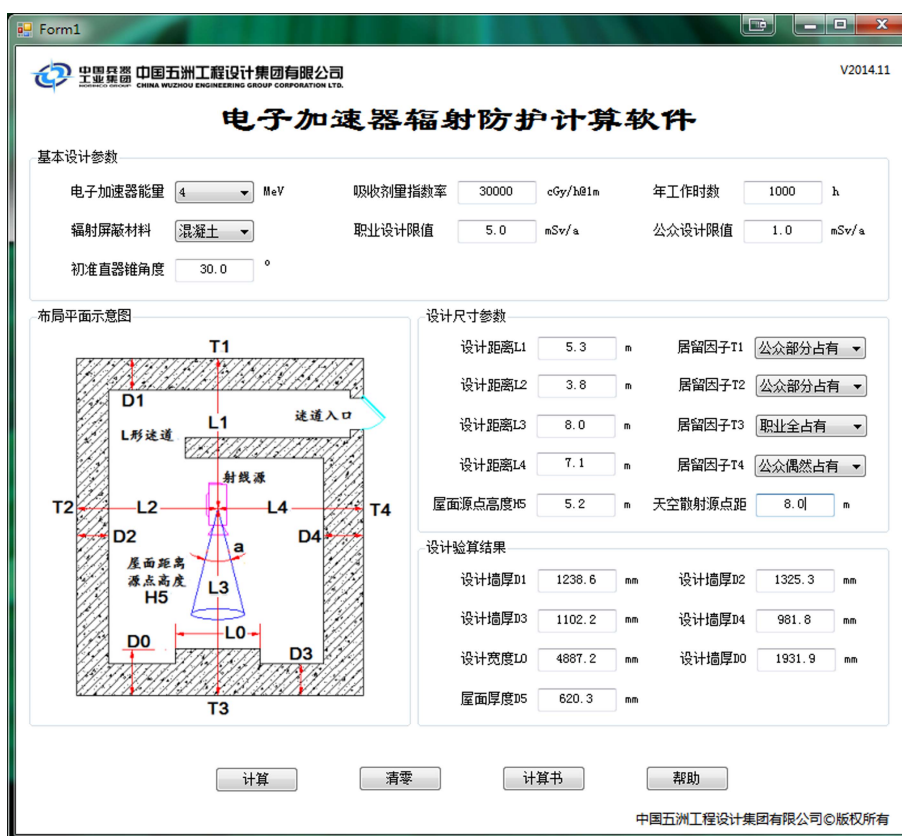


图 4 无损检测室辐射屏蔽计算结果
Fig.4 Radiation protection results of the NDE Room

表 5 无损检测室校核计算和实测结果对比
Table 5 The comparison between calculation and measurement of the NDE Room

| 墙体方向 Wall direction | 主、副屏蔽 Main/side shield | 程序计算值 / mm Computed value by program | 设计值 / mm Design value |
|------------------------|---------------------------|---|--------------------------|
| 西墙 West wall D0 | 主 Main | 1931.9 | 2000 |
| 西墙 West wall L0 | 主 Main | 4887.2 | 5000 |
| 西墙 West wall D3 | 副 Side | 1102.2 | 1150 |
| 东墙 East wall D1 | 副 Side | 1238.6 | 1300 |
| 北墙 North wall D2 | 副 Side | 1325.3 | 1350 |
| 南墙 South wall D4 | 副 Side | 981.8 | 1000 |
| 屋顶 Roof D5 | 天空反散射 Sky shine | 620.3 | 650 |

在辐射屏蔽计算结果的基础上，考虑建设施工的便捷性，进行了一定程度的取整。最终西主墙的设计厚度为 2000 mm，局部增强宽度为 5000 mm；西副防护墙的设计厚度为 1150 mm；东副防护墙的设计厚度为 1300 mm；北副防护墙的设计厚度为 1350 mm；南副防护墙的设计厚度为 1000 mm；屋顶设计厚度为 650 mm。在计算过程中，软件的辅助设计便捷性得到了充分体现，相比于传统手工计算，工作效率得到了十几倍的提升。

4 结论

结合国家标准规定要求和实际工程设计经验，设计开发了“电子加速器辐射防护计算软件”。该软件基于典型一次迷道布局方案，采用完善的主照射、副照射和天空反散射计算方法，辅助完成辐射屏蔽厚度的工程计算，不仅能够降低辐射防护设计的门槛，还可以显著提高工作效率。本文的相关实践表明，采用计算机编程来辅助辐射防护计算具有良好的便捷性和适应性，具有一定参考价值和实践意义。

参考文献

- 1 李军, 郑洁, 杨洁. 医用电子直线加速器室辐射屏蔽防护设计[J]. 干旱环境检测, 2009, **23**(2): 86-90. DOI: 10.3969/j.issn.1007-1504.2009.02.006.
LI Jun, ZHENG Jie, YANG Jie. Design for the shielding protection of medical linear accelerator [J]. Arid Environmental Monitoring, 2009, **23**(2): 86-90. DOI: 10.3969/j.issn.1007-1504.2009.02.006.
- 2 黄蔚玲, 李泉凤, 林郁正, 等. 无损检测用 15 MeV 电子直线加速器主束内中子剂量的测量与 MC 模拟计算[J]. 高能物理与核物理, 2006, **30**: 63-65. DOI: 10.3321/j.issn:0254-3052.2006.z1.020.
HUANG Weiling, LI Quanfeng, LIN Yuzheng, *et al.* Measurement and calculation of photo neutrons produced in the electron accelerator for radiography application [J]. High Energy Physics and Nuclear Physics, 2006, **30**: 63-65. DOI: 10.3321/j.issn:0254-3052.2006.z1.020.
- 3 李杰, 李乐, 王健, 等. 电子直线加速器在高速铁路道岔产品质检方面的应用[J]. 制造业自动化, 2013, **35**(11): 86-89. DOI: 10.3969/j.issn.1009-0134.2013.21.024.
LI Jie, LI Le, WANG Jian, *et al.* Standing wave electron linear accelerators products applied in railway manufacture [J]. Manufacturing Automation, 2013, **35**(11): 86-89. DOI: 10.3969/j.issn.1009-0134.2013.21.024.
- 4 张玉敏, 孙吉兵, 朱春来. 核安全与辐射安全[J]. 舰船防化, 2008(4): 27-31.
ZHANG Yumin, SUN Jibing, ZHU Chunlai. Nuclear safety and radiation safety [J]. Chemical Defence on Ships, 2008(4): 27-31.
- 5 刘华. 辐射防护最优化方法及其应用[J]. 核安全, 2007, **2**(2): 2-6. DOI: 10.3969/j.issn.1672-5360.2007.02.001.
LIU Hua. The methods and applications of optimization of radiation protection [J]. Nuclear Safety, 2008(4): 27-31. DOI: 10.3969/j.issn.1672-5360.2007.02.001.
- 6 杨晨, 胡益鑫, 王盛, 等. 工业射线探伤室防护设计分析[J]. 工程设计与建设, 2014(4): 112-114. DOI: 10.13616/j.cnki.gcjsysj.2014.04.029.
YANG Chen, HU Yixin, WANG Sheng, *et al.* Analysis of radiological protection design of industrial inspection room [J]. Environment Engineering Design, 2014(4): 112-114. DOI: 10.13616/j.cnki.gcjsysj.2014.04.029.
- 7 李雪琴, 陈栋梁, 彭建亮, 等. 电子直线加速器机房中子辐射屏蔽估算与评价[J]. 中国职业医学, 2014, **41**(5): 518-521. DOI: 10.11763/j.issn.2095-2619.2014.05.007.
LI Xueqin, CHEN Dongliang, PENG Jianliang, *et al.* Calculation and evaluation on the shielding of neutron irradiation in electron linear accelerator rooms [J]. China Occupational Medicine, 2014, **41**(5): 518-521. DOI: 10.11763/j.issn.2095-2619.2014.05.007.
- 8 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB/T 20219-2006 无损检测用电子直线加速器[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. GB/T 20219-2006 Electron linac for non-destructive testing [S]. Beijing: Standards Press of China, 2006.
- 9 郭进瑞, 陈新弟, 金益和. 某医院新建核医学科的辐射防护屏蔽设计[J]. 引进与咨询, 2006(12): 9-10. DOI: 10.3969/j.issn.1673-8683.2006.12.005.
GUO Jinrui, CHEN Xindi, JIN Yihe. Radiation protection design of new nuclear medicine in a hospital [J]. Import Inquiry, 2006(12): 9-10. DOI: 10.3969/j.issn.1673-8683.2006.12.005.
- 10 李绍海, 叶建阳, 卢杰. 工业探伤射线室防护设计特点分析[J]. 中国辐射卫生, 2010, **19**(3): 340-341.
LI Shaohai, YE Jianyang, LU Jie. Analysis on the characteristics of the protection design of the industrial flaw detector [J]. Chinese Journal of Radiological Health, 2010, **19**(3): 340-341.
- 11 刘保杰, 王思力. 无损检测用探伤机厂房辐射防护计算软件的开发[J]. 中国原子能科学研究院年报, 2012(7): 165-166.
LIU Baojie, WANG Sili. Development of radiation protection calculation software for nondestructive testing machine building [J]. Annual Report for China Institute of Atomic Energy, 2012(7): 165-166.
- 12 朱卫国, 张奇, 侯长松, 等. 医用电子直线加速器治疗室辐射屏蔽计算软件的设计[J]. 中国医学装备, 2014, **11**(9): 34-36. DOI: 10.3969/J.ISSN.1672-8270.2014.09.012.
ZHU Weiguo, ZHANG Qi, HOU Changsong, *et al.* Software design for radiation shielding calculation of medical electron linear accelerator treating room [J]. China Medical Equipment, 2014, **11**(9): 34-36. DOI: 10.3969/J.ISSN.1672-8270.2014.09.012.
- 13 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB/T 30371-2013 无损检测用电子直线加速器工程通用规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of

- China. GB/T 30371-2013 Standard of electron linear accelerator engineering for non-destructive testing [S]. Beijing: Standards Press of China, 2014.
- 14 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB 18871-2002 电离辐射防护与辐射源安全基本标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 2003.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. GB 18871-2002 Basic standard for protection against ionizing radiation and for the safety of radiation sources [S]. Beijing: Standards Press of China, 2003.
- 15 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GBZ117-2006 工业探伤卫生防护标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. GBZ117-2006 Radiological protection standards for industrial X-ray detection [S]. Beijing: Standards Press of China, 2006.
- 16 中华人民共和国标准化管理局. GB5172-1985 粒子加速器辐射防护规定[S]. 北京: 中国标准出版社, 1985.
- Standardization Administration of the People's Republic of China. GB5172-1985 the rule for radiation protection of particle accelerators [S]. Beijing: Standards Press of China, 1985.
- 17 National Council on Radiation Protection and Measurements (U.S.). NCRP Report No.51. Radiation protection design guidelines for 0.1–100 MeV particle accelerator facilities: recommendations of the National Council on Radiation Protection and Measurements [R]. Washington D.C.: The Council, 1977.
- 18 American National Standards Institute. IEC 60601-2-1:1998 Medical electrical equipment. Particular requirements for the safety of electron accelerators in the range 1 MeV to 50 MeV [S]. Washington D.C.: American National Standards Institute, 2007.
- 19 National Council on Radiation Protection and Measurements (U.S.). NCRP Report No.51. Radiation protection design guidelines for 0.1-100 MeV particle accelerator facilities: recommendations of the National Council on Radiation Protection and Measurements[R]. Washington D.C.: The Council, 1977.
- 20 American National Standards Institute. IEC 60601-2-1:1998 Medical electrical equipment. Particular requirements for the safety of electron accelerators in the range 1 MeV to 50 MeV [S]. Washington D.C.: American National Standards Institute, 2007.

Radiation protection design and engineering application based on VB.NET program

SUN Mou SHU Langping LI Yuan GUO Mingzhe KONG Yongzheng WEN Qianshan

(China Wuzhou Engineering Group, Beijing 100053, China)

ABSTRACT The calculation program of electron accelerator radiation protection was developed as an engineering design toolbox, based on the national standard rules and the abundant experiences of Wuzhou Engineering Design and Research Institute, which not only has the basic calculation function, but also possesses some special skills. For instance, users can generate the Design Report by only one simple click. And the generated report can be used for design verification and record purpose directly. A nondestructive examination (NDE) room design case was analyzed, and it indicated that the calculation program was reliable and officious.

KEYWORDS Radiation protection, Engineering design, Electron accelerator, Software program, VB.NET

CLC TL7, X591