

# 回旋加速器虚拟样机技术进展\*

樊明武<sup>1</sup> 秦斌<sup>1,1)</sup> 熊永前<sup>1</sup> 储诚节<sup>2</sup> 余调琴<sup>1</sup> 杨军<sup>1</sup> 冯仪章<sup>1</sup> 李冬<sup>1</sup> 刘开锋<sup>1</sup>

1 (华中科技大学 武汉 430074)  
2 (中国原子能科学研究院 北京 104213)

**摘要** 基于缩短开发周期、降低物理样机成本及实现创新设计的目的, 虚拟样机(VP)技术被用于低能回旋加速器的设计中. 本文介绍了华中科技大学在回旋加速器VP技术研究上的进展. 提出了面向多学科协同设计的回旋加速器虚拟样机开发思路, 描述了基于Python脚本语言混合编程技术的VP集成平台. 在该平台下, 通过多个设计组件的支持与协作, 可实现对主磁铁、高频腔和中心区等关键部件及回旋加速器整机的优化设计.

**关键词** 回旋加速器 虚拟样机 协同设计

## 1 引言

回旋加速器自20世纪30年代发明以来, 经历了大半个世纪的发展, 目前广泛应用于国防基础科学研究、同位素生产以及医学诊断与治疗等领域. 同发达国家相比, 我国缺乏回旋加速器整机设计的原创思想, 相应的基础研究工作和技术储备不足, 难以建造具有完全独立知识产权的商品化回旋加速器. 基于该现状, 虚拟样机(Virtual Prototyping, VP)技术被引入到回旋加速器设计中, 以实现回旋加速器整机设计优化及降低开发成本的目的<sup>[1]</sup>. 作为一种基于产品计算机仿真模型的数字化设计方法, VP技术以CAD/CAE/CAM技术和虚拟现实为基础, 将不同工程领域的开发模型结合在一起, 能够从外观、功能和行为上模拟真实产品<sup>[2]</sup>.

在近年来研究工作中, 我们建立了回旋加速器虚拟样机体系结构, 开发了虚拟建模、磁铁与高频腔设计、束流动力学分析和虚拟控制等主要组件, 同时针对这些组件集成的要求, 提出了基于Python脚本语言混合编程的解决方案, 以实现高代码效率、软件灵活性与简洁性以及敏捷性开发的目的<sup>[3]</sup>. 本文全面介绍了虚拟样机技术在低能回旋加速器设计与开发中的进展与应用情况.

## 2 回旋加速器VP集成设计平台框架

回旋加速器VP平台是一个集样机建模、部件物

理设计、虚拟控制与运行仿真一体化的解决方案. 在这个平台中可以从无到有、由粗粒度到细粒度逐步建立加速器的样机模型, 并对其子系统和整体完成由设计到装配运行各个阶段的分析.

VP平台需要多个组件协同支持, 包括样机建模、磁铁设计分析、高频腔设计分析、束流跟踪与仿真、虚拟控制组件等. 从功能划分来说, 这些组件是平行的关系, 其间的数据共享与交换通过分布式总线(如CORBA)和数据库系统实现. 在这样的一个分布式系统中, 各个组件是异构的, 如何将这些组件集成于统一的平台下成为关键和难点.

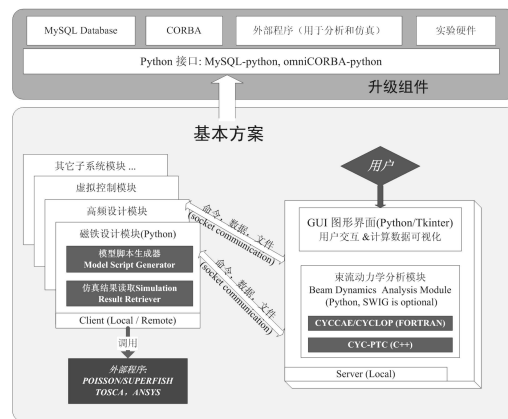


图 1 回旋加速器VP集成平台框架

Python<sup>[4]</sup>是一种面向对象的解释性脚本语言. 语

2008 - 01 - 07 收稿

\* 国家自然科学基金资助(10435030)

1) E-mail: bin.qin@mail.hust.edu.cn

法简洁,支持完备的面向对象特性,具有良好的跨平台性和可扩展性;更重要的是,Python是具备优秀的“代码胶合”性能,可用来连接异构程序模块.我们采用Python脚本语言和混合编程的方法对VP集成平台进行了实现.图1为集成平台框架.该框架采用分布式网络结构,各个设计模块既能以对等关系独立运行,同时在进行协同设计时,又可以Server/Clients方式进行信息共享和交换.

### 3 VP设计模块

基于VP技术的回旋加速器设计同传统方法的最大区别是设计从整体布局开始,不断调整各个部件,使整机优化;同时可利用各个设计模块的支持和协同作业完成回旋加速器关键部件的优化设计.

#### 3.1 样机建模

样机建模组件使用CAD软件建立回旋加速器各个部件的参数化模型库,并对其几何信息和物理信息进行管理.当开展特定机型研发时,可方便调用并生成所需的部件CAD模型,同时这些模型可经转换处理后作为电磁场有限元分析模型.图2为建立的内离子源中心区样机模型.

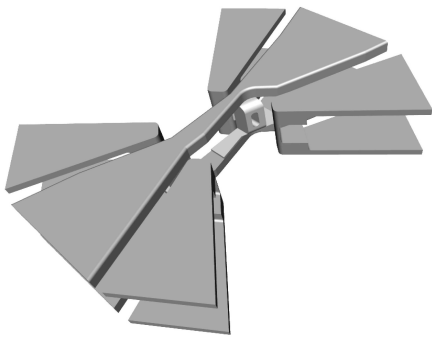


图2 内离子源中心区CAD模型

#### 3.2 主磁铁设计与分析

磁铁建模与分析是回旋加速器设计中极为重要的一个环节,其主要设计目标在于:(1)产生的磁场分布符合粒子等时性加速要求;(2)满足束流在轴向和径向的聚焦,并使得粒子横向振荡工作点远离危险的共振线.利用三维电磁场仿真软件OPERA-3D/TOSCA<sup>[5]</sup>和束流动力学分析模块的支持,提供了一种自动化的回旋加速器主磁铁建模、分析与修正方案.图3为针对一台16MeV负氢紧凑型回旋加速器主磁铁所建立的有限元模型及相应的结构力学分析.

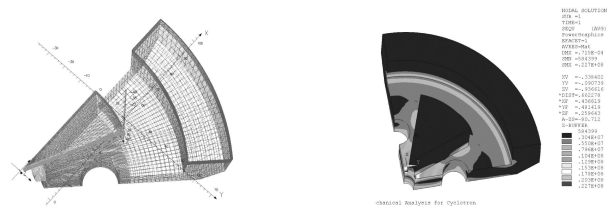


图3 (左)主磁铁有限元模型; (右)主磁铁结构力学分析

#### 3.3 谐振腔设计与分析

高频谐振腔是回旋加速器关键部件,其工作状况对加速器的性能有很大的影响.该模块主要对谐振腔进行建模与仿真,评估其谐振频率、品质因数及电压分布等重要参数.对于谐振腔分析主要使用了两种方法:(1)基于等效电路方法的二维场分析<sup>[6]</sup>.该方法将三维谐振腔问题转化为二维情况分析,由于算法效率高,适于对谐振腔参数估计和初步分析;(2)基于有限元法的三维场分析.这种方法更为耗时,但易于建立精确的模型,获得更加接近实验结果的谐振频率等参数值.

#### 3.4 束流动力学分析

该模块集成了一系列用于回旋加速器束流动力学计算的程序,通过对实测磁场或有限元计算磁场进行分析获取重要束流参数.其主要功能有:(1)平衡轨道分析,获取等时场偏差、磁场谐波、滑相和自由振荡频率等数据,并可根据分析结果对磁铁模型进行自动修正;(2)注入线、中心区的辅助设计;(3)强流空间电荷效应模拟;(4)图形化数据输入及束流模拟结果显示.图4为束流动力学模块的用户交互界面及相应的束流模拟结果.

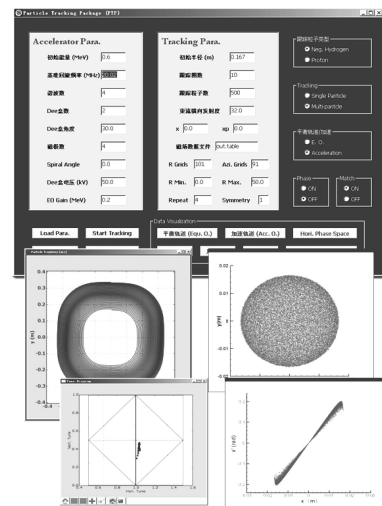


图4 束流动力学模块交互界面及模拟结果

#### 3.5 其他模块

VP集成设计平台还包含其他几个模块用于回旋加速器设计,主要有虚拟控制模块、虚拟装配模块和

整机运行仿真模块. 这些模块可用于对工程中的控制和制造装配方案进行有效性验证.

#### 4 结论

本文介绍的回旋加速器虚拟样机技术, 能以较低投入产生原发性的创新思想和方案, 在我国目前不能

大幅度增加加速器研制经费的情况下, 使我们在国际加速器学科领域不仅可以拿到发言权, 而且能以我们的创新思想和设计占据一席之地. 同时, 提出的VP集成设计平台将为回旋加速器设计和工程人员提供一种面向多学科协作的计算机辅助设计与开发环境.

#### 参考文献(References)

- 1 FAN Ming-Wu et al. Engineering Science, 2003, **5**(10): 8—13 (in Chinese)  
(樊明武等. 中国工程科学, 2003, **5**(10): 8—13)
- 2 XIONG Guang-Leng et al. Journal of System Simulation, 2001, **13**(1): 114—117 (in Chinese)  
(熊光楞等. 系统仿真学报, 2001, **13**(1): 114—117)
- 3 QIN Bin et al. Nucl. Instrum. Methods, 2007, **B261**: 56—59
- 4 Lutz M. Programming Python. O'Reilly & Associates, Sebastopol, Calif., 1996
- 5 OPERA3D user manual. Vector Fields Ltd. 2006
- 6 DONG Tian-Lin et al. Nucl. Instrum. Methods, 2003, **A513**: 631—634

## Advances in Virtual Prototyping Techniques for Design of Compact Cyclotrons<sup>\*</sup>

FAN Ming-Wu<sup>1</sup> QIN Bin<sup>1;1)</sup> XIONG Yong-Qian<sup>1</sup> CHU Cheng-Jie<sup>2</sup> YU Tiao-Qin<sup>1</sup>  
YANG Jun<sup>1</sup> FENG Yi-Zhang<sup>1</sup> LI Dong<sup>1</sup> LIU Kai-Feng<sup>1</sup>

<sup>1</sup> (Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)  
<sup>2</sup> (China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

**Abstract** As a novel technique in engineering, Virtual Prototyping (VP) was applied to the design of cyclotrons with the purpose of shortening the development period and reducing the costs for physical prototypes. The advances in VP techniques for compact cyclotron design in HUST are introduced. The idea of multi-domain collaborative design was proposed. This paper describes the pythonic mixed language programming approach to develop the VP integrate platform. Under this platform, the optimization design of main magnet, RF cavity and central region of cyclotrons is to be achieved.

**Key words** cyclotron, virtual prototyping, collaborative design

Received 7 January 2008

<sup>\*</sup> Supported by National Natural Science Foundation of China (10435030)

1) E-mail: bin.qin@mail.hust.edu.cn