

一种用于粒子加速器的新型高流导离子泵

亚历山德罗·阿巴特科拉

(安捷伦科技真空事业部, 意大利 都灵)

摘 要: 离子泵 (IGP) 是一种特别适用于现代加速器设备的真空获得设备。它们具有长寿命、高可靠性、高清洁度、密闭抽气等特点, 并且因为没有振动, 不会干扰粒子束的运行轨迹。通常, 离子泵通过一个与主管道形成 T 形的支管与主管道连接, 这种连接方式降低了离子泵有效的抽速, 并且需要使用复杂且昂贵的射频 (RF) 屏蔽。而且, 加速粒子通常对杂散磁场比较敏感, 由离子泵磁体产生的非对称磁场 (对加速器束线管而言) 是这些杂散磁场的主要来源。安捷伦与 DESY (德国电子同步加速器 Deutsche Elektronen-Synchrotron) 合作开发了一种新型的高流导离子泵。350 台使用这种创新设计 (专利号: EP2 431996A1) 的离子泵, 被安装在了 DESY 的 X-FEL 系统上, 离子泵在历史上第一次成为了束线管的组成部分。该泵不使用 T 型支管而是直接安装在束线管上并成为束线管道的一部分, 这使得离子泵的有效抽速最大化并简化了安装; 离子泵的磁铁对称的排列在束线管周围, 减少了杂散磁场; 同时, RF 屏蔽也可以很容易被集成在泵内。该在线结构的离子泵有望成为类似应用的标准, 为全球相关实验室真空系统开辟新的设计方向。

关 键 词: 粒子加速器; 真空系统; 在线式; 高流导; 离子泵

中图分类号: TB752+.52

文献标识码: A

文章编号: 1002-0322(2019)01-0016-04

doi: 10.13385/j.cnki.vacuum.2019.01.04

A new high-conductance ion pump for particle accelerator

Alessandro Abatecola

(Agilent Technologies Vacuum Products Division, Torino, Italy)

Abstract: Ion getter pumps (IGPs) are particularly appropriate for use in modern accelerator facilities because of their high reliability, cleanliness and the absence of vibration that could disturb the trajectory of the beam. Normally, T-pieces are used to connect the pumps to the beam tube. These reduce the effective pumping speed and require the use of radiofrequency (RF) shielding which is complicated and expensive. Moreover, very often the accelerated particles are sensitive to stray magnetic fields and the impedance of the surrounding vacuum tube. Magnetic fields generated by the ion pump magnets, which are asymmetrically oriented to the beam tube, can be a major drawback. To overcome these problems, we have developed, in collaboration with the Deutsche Elektronen-Synchrotron (DESY), an innovative in-line ion getter pump which can be mounted directly into a beam line without a T-piece and which has a symmetrical arrangement of the magnets around the beam tube. Additionally, RF shielding can be easily integrated inside the in-line pump. Using this innovative in-line concept (Patent EP2 431996A1) ion pumps will become an integral part of the beam tube for the first time when installed on the X-FEL system at DESY. The arrangement of the magnets and the geometry of the pole piece, used to guide the magnetic field lines, were designed to minimize any disturbance on the beam trajectory. Moreover, the element location inside the pump has been optimized to “self-shield” the beam, without requiring the addition of expensive and complex optical shields. Finally, thanks to the in-line solution, a simple RF shield (a copper coated tube with pumping slits) can now be easily installed directly inside the pump at the accelerator site installed directly inside the pump at the accelerator site.

Key words: particle accelerator; vacuum system; inline; high-conductance; ion pump

加速器运行时一般通过离子泵来维持腔室和管道的真空。在传统配置中, 加速器室一般由如下所示的模块组成, 离子泵沿着加速器室放

置, 通常通过 T 形支管连接到管道上。这种连接方式降低了离子泵的有效抽速并且需要复杂且昂贵的射频 (RF) 屏蔽。

收稿日期: 2018-11-15

作者简介: 亚历山德罗·阿巴特科拉, 安捷伦科技真空事业部产品经理。

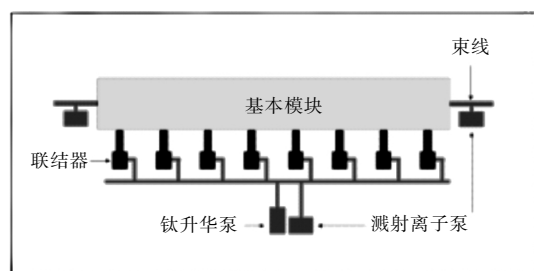


图 1 传统加速器真空系统示意图

Fig.1 Diagrammatic sketch of traditional vacuum system for accelerator



图 2 传统加速器真空系统实例

Fig.2 Traditional vacuum pump install-base on accelerator

1 传统技术的主要缺点

除离子泵的有效抽速经过管道后会大大降低外,传统技术主要受到下面两个缺点的影响:

1.1 杂散磁场

在现代加速器设备中,加速粒子对杂散磁场非常敏感,特别是对垂直于其运动方向的磁场。而传统的配置中,离子泵往往安装在束线管的一侧,这样在垂直于粒子运动的方向,就会形成比较大的磁场。

1.2 钛污染

必须保护带电粒子束免受离子泵阴极溅射的钛以及来自可能的“剥离”现象的钛碎片的影响。通常,通过添加昂贵且复杂的光学屏蔽来克服该问题^[2],这就进一步降低了离子泵的有效抽速。

2 创新的解决方案:在线式新型高流导离子泵

XFEL-X 射线自由电子激光器是 DESY (德国电子同步加速器 Deutsche Elektronen-Synchrotron) 的一条位于德国汉堡的长度为 3.4 km 的直线加速器。它产生极短的相干 X 射线闪光(fs),其亮度比最佳常规 X 射线辐射高出 10 亿倍。其用于化学反应和生物细胞等行业,研究原子尺度的纳米粒子,将为科学家和工业用户开辟全新的研究机会。

如上所述,使用传统的离子泵还要求必须保



图 3 地图上的 DESY XFEL 项目

Fig.3 DESY XFEL on the map

护粒子束免受杂散磁场和任何可能的污染(例如,由阴极溅射的钛)。为了应对这一挑战,由安捷伦科技与 DESY (德国电子同步加速器 Deutsche Elektronen-Synchrotron) 的相关技术人员组成了一个大型的跨职能团队,密切合作,开发了一个创新的解决方案:使用在线式新型高流导离子泵直接安装在束线管上(不需使用 T 型支管)。



图 4 安装在 DESY 的安捷伦新型高流导离子泵(350 台)

Fig.4 New agilent ion pump installed on DESY project (350 units)

2.1 抽速

由于该泵被直接装在管道上,甚至其本身就是管道的一部分,所以其泵口抽速即是离子泵的实际有效抽速。根据德国标准 DIN 28429,对该离子泵的抽速进行了测量,由于泵口为 3% 法兰,因此使用锥形变径将离子泵连接到测试罩,当压力在 10^{-6} mbar 到 10^{-8} mbar 之间时,测得的氮气抽速约为 45L/s,该结果经过了 DESY 的测试验证。

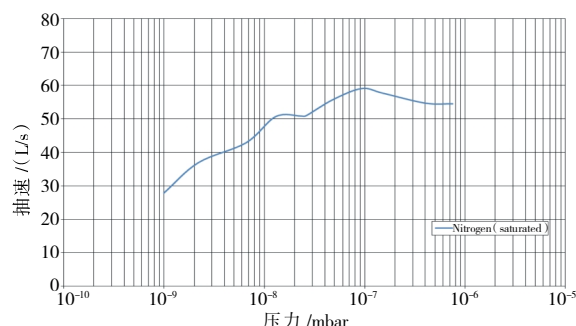


图 5 安捷伦新型离子泵抽速曲线

Fig.5 Pumping speed curve of Agilent new ion pump

图 5 为在线离子泵的对氮气的实际有效抽速,已对锥形变径的流导损失进行了修正。

2.2 杂散磁场

该离子泵的磁铁沿泵的轴心(亦即粒子加速器束线管轴心)对称分布,这样,各块磁铁所形成的磁场在垂直于轴心方向的分量将会互相抵消。

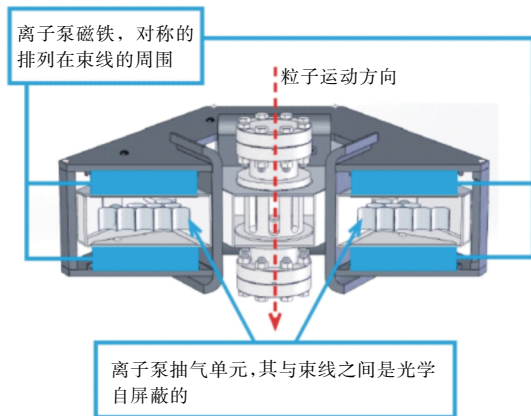


图 6 安捷伦新型离子泵剖面图

Fig.6 Cross-section of Agilent new ion pump

实测该泵各方向的磁场分布如图 7 所示,沿粒子运动方向的分量不影响带电粒子的运动,最大约为 3Gs。垂直于粒子运动方向的分量最大约为 0.5Gs。

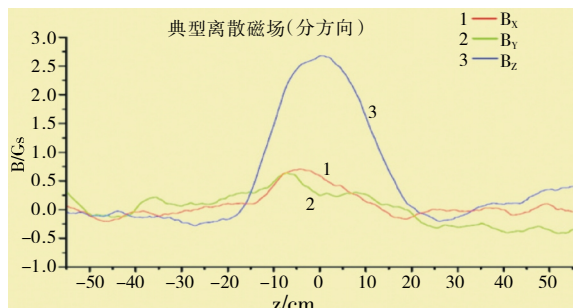


图 7 新型离子泵各方向磁场比较(B_x 与粒子运动的方向相同)^[3]

Fig.7 Magnetic stray field of new ion pump in different directions
(B_x is the same direction as beam line)

如图 8 所示,该数值(垂直于粒子运动方向的磁场强度)甚至远小于 20 L/s 的标准离子泵。

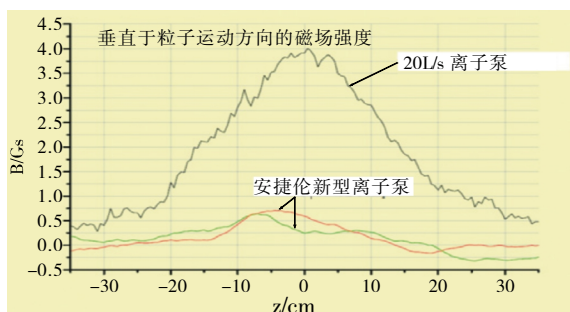


图 8 新型离子泵与标准 20L/s 的离子泵杂散磁场对比图

Fig.8 Magnetic stray field comparison between new ion pump & traditional 20L/s ion pump

2.3 RF 屏蔽



图 9 (a) 新型离子泵的内管道；(b) 新型离子泵与束线管道安装在一起

Fig.9 (a) Inner pipe of new ion pump and (b) new ion pump installed together with beam line

泵的中心是一个段内管道,由于这段内管道以后将成为束线管的一部分,其设计和制造必须满足对尺寸和公差严格要求。该内部壳体直接在客户现场与类似结构的 RF 屏蔽相匹配。

RF 屏蔽的数量和狭缝的几何形状可以根据实际的需要进行调整,以确保非常敏感的光束尽可能的免受干扰。当泵安装在束线管上时,任何可能的钛碎屑将被收集在泵的底部,不会影响到光束。

2.4 安装

对这个 3 公里长的真空系统的其中一个重要要求是它应该非常精确地对齐,在某些部分误差不能超过 0.1mm。要做到这一点,就需要在系统里有若干固定点,而在 DESY 的这个系统里,这些固定点就是离子泵,因为它们的尺寸非常精确,可以作为其他加速器组件(如磁铁等)的基准。



图 10 新型离子泵作为定位基准安装

Fig.10 New ion pumps installed as fixed points

光束位置监视器用来监视光束在真空管道中的位置,它的位置也应该非常非常精确,误差一般需要控制在 0.1mm 到 0.2mm 之间。因为在线离子泵的设置非常容易,并且位置非常精确,光束位置监视器安装时,只需要刚性地连接到离子泵,并将它们对齐在一起作为一个单元即可。这带来了一开始没有预见到的方便,当需要安装几百个这样的光束位置监视器时,最终会发现,与真空泵一起安装真的是一个非常高效的解决

方案,重点是安装更容易。如果你必须安装这么大量的泵,那么是否容易安装就非常重要,这也正是使用该新型离子泵的独特之处。

3 总结

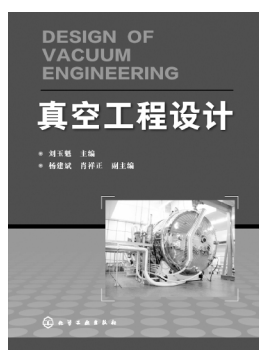
本文介绍了一种新型的高流导离子泵。有 350 台该新型离子泵被安装在了 DESY 的 XFEL 项目上,这些离子泵通过使用安捷伦 4UHV 四通道离子泵控制器来提供高压,工作在 10^{-5} 到 10^{-11} Torr/mbar 之间的真空范围内。该泵采用了创新的结构,使用时直接作为加速器管道的一部分而不是通过 T 型支管连接,这样不仅大大减少了

流导损失,还使得安装工作更为容易;同时,该泵的特殊对称性结构使得杂散磁场大大减小,使其对光束轨迹的干扰也大大减小。另外,泵内部的元件经过优化,可以轻松地将简单的 RF 屏蔽直接安装在泵内。

参考文献

- [1] Agilent Technologies, Solution Note, Inline Ion Getter Pump for Particle Accelerators, 2017
- [2] Agilent Technologies, User Manual, Diode In-line Ion Pump, 2014
- [3] Marek Grabski, Vacuum Technology for Particle Accelerators, 2016

真空领域又一部大型工具书——《真空工程设计》出版发行



由航天科技集团兰州空间技术物理研究所刘玉魁任主编,杨建斌、肖祥正为副主编,闫格、石芳录、柏树、魏迎春、刘伟成、颜昌林、高俊旺、张英明参加编写的《真空工程设计》一书已由化学工业出版社出版发行。

《真空工程设计》是近十几年来国内真空领域又一部大型工具书,内容丰富,资料新颖,文字精炼,信息量大,全面系统地反映出现代真空工程设计的新思路,具有很强的实用性。

该书共 25 章,约 300 万字,涵盖了真空工程设计的各个领域,包括真空;真空技术的物理基础;真空获得与测量,以及气体分析;真空管路设计,真空系统设计,真空与低温容器设计,容器的有限元分析;真空与低温法兰及阀门;真空与低温工程元件,真空与低温工程材料;真空工程中制冷与低温技术,低温测量技术;真空与低温中的热计算基础;真空容器制作时的检漏、焊接、清洗技术;航天器空间环境模拟,以及各类真空应用装置。

《真空工程设计》以崭新的面貌呈现在读者面前,其特点是:

- (1) 书中较全面系统地论述了真空工程设计思想、设计方法,且在实践中得到验证是行之有效的;
- (2) 近十几年来真空应用领域出现的大量新产品、新的真空元件、新型材料,特别是国外的产品也在书中得到了反映,增加了该书的实用性;
- (3) 现代真空工程学科与其它学科息息相关,尤其与低温技术更为密切。书中有关制冷技术、低温元件、低温材料,以及低温测试手段等方面用了大量笔墨,做了详尽阐述,给读者以启迪,使两者融会贯通;
- (4) 在真空应用装置中,传热问题触目皆是,如金属真空冶炼,各种真空镀膜加热手段,真空干燥,真空热处理领域,航天器热真空环境模拟试验更是如此。因而,书中对真空环境下的换热,用了一定的篇幅进行了论述,使读者耳目一新;
- (5) 在以往相关的真空工程书籍中,对真空容器设计,均以传统的力学公式进行分析计算。而该书中容器设计引入了有限元分析,以此确定容器失稳及应力分布,为真空容器的可靠性设计提供了一种新方法;
- (6) 真空容器制造中的三大重要工艺,即真空检漏、真空焊接、真空清洗在书中均以重要章节进行了精辟陈述,并弥补了以往相关真空书籍的不足,具有较强的实用价值。

该书可供各种科学技术领域从事真空工程设计、研究、应用的科技人员使用,亦可作为高等院校相关专业师生参考。

购书联系方式如下

出版社名称:化学工业出版社 地址:北京市东城区青年湖南街 13 号 邮编:100013

联系人:化工书店(读者服务部) 电话:010-64518899;64518888

E-mail: 1651738679@qq.com

(沈阳真空杂志社)