

BEPC II 正电子源磁通压缩装置的研制

刘晋通 耿哲峤¹⁾ 孙献静 孙耀霖 裴国玺

(中国科学院高能物理研究所 北京 100049)

摘要 正电子磁通压缩装置(Flux Concentrator, 简称磁号)是正电子束流横向发射度的匹配装置,对提高正电子的俘获效率起非常关键的作用,是 BEPC II 正电子源的重要组成部分. 结合磁号的设计加工,用计算机软件模拟了磁号的磁场分布和共振特性,并同测量结果进行了比较.

关键词 正电子源 磁通压缩装置 发射度匹配

1 引言

BEPC II 正电子源示意图如图 1 所示,高能电子打在高原子序数的金属靶上,由于电磁级联簇射产生大量次级正电子. 正电子束流的横向发射度截面小、横向动量大,而后继加速结构的横向接收度截面大、横向动量小,两者不匹配,因此需要在正电子靶和后继加速结构之间安装一个横向相空间匹配装置来完成正电子束横向发射度的转换.

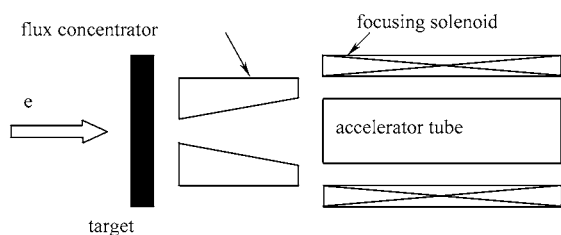


图 1 正电子源示意图

横向相空间匹配装置有两种,一种是基于四分之一波长变换(QWT)的短螺线管结构,一种是基于绝热渐变理论的磁通压缩装置^[1,2](即磁号). 二者的主要差别在于能量的接收度,前者的设计针对某一能量,属窄带匹配,适合较低能量的正电子加速器;后者设计同能量无关,可以俘获更多的正电子.

BEPC II 直线加速器的能量为 2GeV,宜采用磁号作为正电子束的相空间转换装置.

设计参考了美国 SLAC 和意大利 DAΦNE 的正电子源系统^[3]. 相对于 SLAC 和 DAΦNE 的正电子源, BEPC II 正电子源工作于不同的重复频率和能量水平,因此设计中对磁号的几何尺寸和激励电流等都做了更为详细的论证和研究. 为保证设计能够满足 BEPC II 对正电子源的要求,加工前用计算机软件对磁号的场型分布和谐振特性做了详细的模拟.

由于磁号结构特征的特殊性,对磁号的加工并没有现成的设备和经验. 加工机构通过改造现有设备,摸索加工方法,并采用多次冷做硬化等工艺,最终完成了磁号的加工制造,并达到了 BEPC II 正电子源对磁号的要求.

2 场型分布^[4]

磁号的激励电流是脉宽为 $5\mu\text{s}$ 的半正弦脉冲,因此磁号的轴向磁场是瞬态磁场. OPERA 是一个基于有限元方法的三维磁场计算软件,可用于瞬态磁场的计算. 为简化计算,结合磁号的旋转对称性,对磁号进行二维建模,OPERA 程序计算得到的磁号轴线上沿束流方向的磁场分布如图 2 中的曲线 2 所示. 结果表明,磁号入口处磁场迅速增大到最大值,

2004 - 07 - 09 收稿

1) E-mail: gengzq@mail.ihep.ac.cn

约 5.5T, 出口处缓慢变化到 0.5T, 可以满足正电子相空间转换的要求.

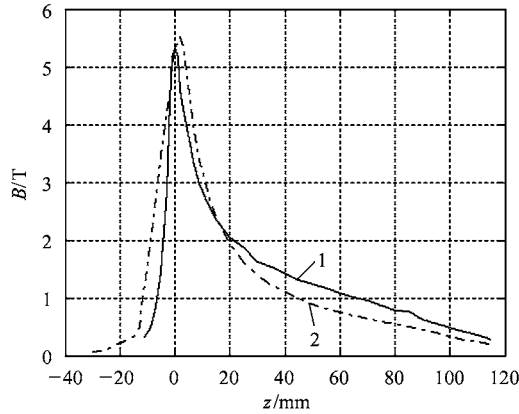


图 2 磁号轴线磁场分布
1. 测量结果, 2. OPERA 计算结果.

磁号的磁场是时变的, 可采用感应线圈法进行测量, 磁场测量装置如图 3 所示. 由法拉第电磁感应定律可知, 探测线圈输出信号的积分值同被测磁场的幅值成正比, 因此实验中采用一个密绕的长直螺线管来标定探测线圈输出和被测磁场的关系, 流过线圈的电流由电流互感器 (CT) 测量, 磁场值可由有限长螺线管磁场公式给出. 磁号磁场分布的测量结果如图 2 中的曲线 1 所示, 与 OPERA 计算结果比较一致.

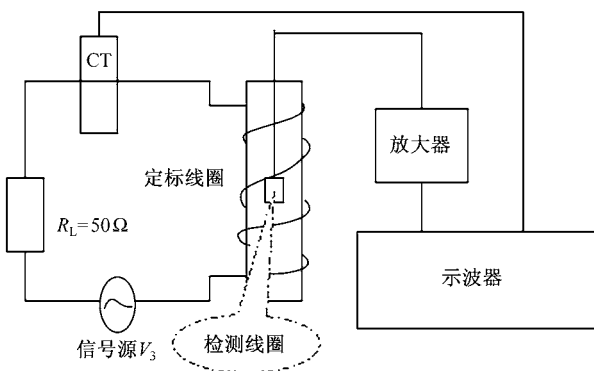


图 3 磁号磁场测量装置

3 机械设计^[5]

磁号材料为无氧铜 TU1, 经氢炉 950℃ 烧氢检验无氢病产生. 磁号形状根据磁场分布要求设计为外径 106mm, 长度 100mm, 中心锥孔内径 7—52mm 的

圆柱体, 小孔端面固定有 3 个无磁不锈钢支架. 将 12 匝可通冷却水的激励导线嵌绕于磁号表面的螺旋槽内进氢炉钎焊. 线切割后的磁号等效于一个匝数为 12 匝的张口螺线管, 相邻匝间的绝缘间隙为 0.2mm. 磁号的加工和外观分别如图 4(a), (b) 所示.

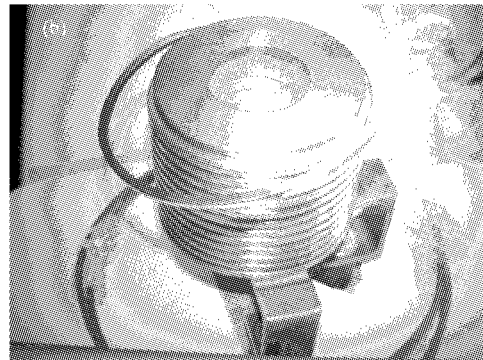
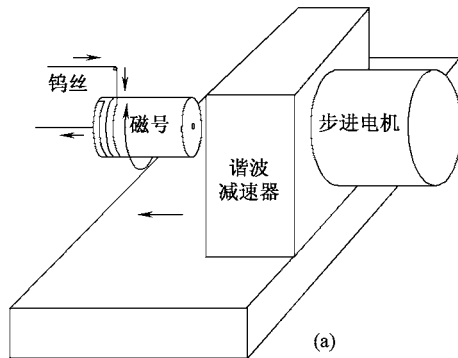


图 4 (a) 磁号线切割示意; (b) 完整磁号

钎焊后的磁号处于退火状态, 刚性较差, 考虑到当磁号中通有脉冲电流时匝间将产生相互吸引的磁力, 由于励磁电流很大 (峰值为 12kA), 为避免发生匝间短路现象, 必须对磁号进行冷做硬化处理以增强刚性. 另外, 由于励磁电流的重复频率为 50Hz, 磁号本身的固有共振频率必须避开这一范围^[4], 否则在工作时会引起共振, 后果将相当危险, 为此磁号设计须事先考虑质量因素, 对加工完成后的磁号进行严格测试确定实际的固有共振频率.

为避免磁号工作时匝间高压放电, 设计要求匝间表面的粗糙度不低于 3.2μm, 当线切割速度沿磁号表面切向保持在 0.2mm/min 左右时方可保证, 线切割过程中避免断丝, 最好用去离子水进行冷却. 加工过程中有两点需要注意: (1) 钎焊时银焊料要充分浸润, 如留有气隙将在高真空工作状态时形成有

害气源。(2)冷做硬化前应先实验找出磁号的屈服极限,否则冷做硬化难以起到作用或磁号变形后难以复原,拉伸压缩应做到 200 次以上。

为避免工作过程中共振带来的危害,需要详细研究磁号的共振特性。本文采用有限元软件 ANSYS 通过计算机模拟得到了磁号的机械共振频谱,为了得到所有的共振频率,计算时采用了三维模型,计算结果如图 5 所示,结果表明,磁号的前 3 个沿轴线方向的共振频率分别为 40.9Hz, 100.4Hz 和 164.7Hz,避开了激励电流的重复频率 50Hz,因此不会在工作时引起共振。

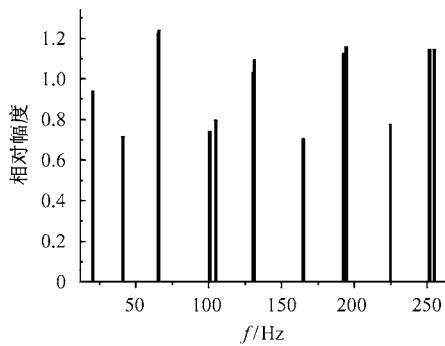


图 5 磁号共振频谱

对磁号共振性质的测量结果如图 6 所示,测量时沿轴线方向施加激励,前 3 个共振频率分别为

36.5Hz, 94.7Hz 和 159.2Hz,同 ANSYS 计算结果符合得较好,同样说明磁号的设计不会在工作时引起共振。

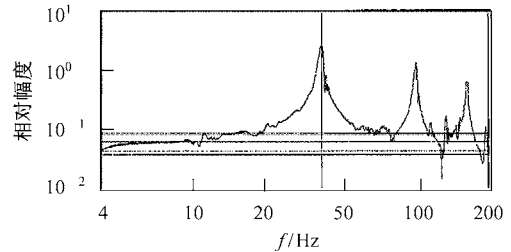


图 6 磁号共振测量结果

4 结论

磁号是 BEPC II 正电子源的关键器件之一,决定了正电子束流能否达到 BEPC II 的设计指标。本文对磁号的磁场和共振性质分别做了计算机模拟和实验测量,两者结果符合得较好,证明了磁号的设计和加工达到了系统的要求。

感谢尹兆升研究员对磁场计算方面的指导和韩谦研究员对脉冲电流测量方法的建议。

参考文献 (References)

- 1 Chehab R, Meur G, Mouton B et al. IEEE Trans. Nucl. Science NS-30, 1983, 4: 2850—2852
- 2 Alexander Mikhailichenko. To the Positron Collection at CESR Complex, CON 97-01. 1997
- 3 Clendenin J E. High-Yield Positron Systems for Linear Colliders, SLAC-PUB-4743. 1989
- 4 Kulikov A V, Ecklund S D, Reuter E M. SLC Positron Source Pulsed Flux Concentrator, SLAC-PUB-5473. 1991
- 5 Eric Reuter, Dean Mansour, Tom Porter et al. Mechanical Design and Development of a High Power Target System for the SLC Positron Source, SLAC-PUB-5369. 1991

Development of the BEPC II Positron Source Flux Concentrator

LIU Jin-Tong GENG Zhe-Qiao¹⁾ SUN Xian-Jing SUN Yao-Lin PEI Guo-Xi

(Institute of High Energy Physics, CAS, Beijing 100049, China)

Abstract The flux concentrator is a matching device for the positron beam, which matches the transverse emittance between the target and successive accelerator tubes. It is one of the most important parts of the BEPC II positron source and for improving the positron catching efficiency. Based on the design and the manufacture of the flux concentrator, we studied the distribution of the magnetic field and the resonance property of the flux concentrator by computer simulation and compared the results with those of experiment.

Key words positron source, flux concentrator, emittance matching