

上海光源 150 MeV 直线加速器传输波导相 长度测量与调整

钟少鹏 赵明华 林国强 汪宝亮 刘为红 张俊强 缪国灿

(中国科学院上海应用物理研究所 上海 201800)

摘要 上海光源直线加速器加速器主体由电子枪、次谐波束聚器、基波聚束器及四台加速管组成,其功能是通过低能输运线向增强器注入 150 MeV 能量的电子束。直线加速器 2006 年 12 月开始安装,2007 年 5 月出束,10 月完成束流调试,向增强器供束,束流指标达到设计目标。传输波导相长度的测量与调整是微波系统及加速器建设安装过程中的关键环节,调试结果直接关系到直线加速器的升能效果,影响到束流其它相关参数。本文阐述了上海光源直线加速器波导相长度测量与调整过程,给出了加速器束流调试的相关指标结果。

关键词 电子直线加速器,相长度,波导,加速管,加速相位

中图分类号 TN124

上海光源直线加速器为能量 150 MeV 的电子直线加速器,其加速主体结构包括 100 keV 电子枪、500 MHz 预聚束器、聚束器和四台 SLAC 型等梯度加速管^[1,2]。与上海光源同期建设的英国 Diamond 光源及法国 SOLEIL 光源的直线加速器均采用两台微波功率源两只加速管结构^[3,4],相比而言,前者结构简洁,两台加速管的微波相位可通过低电平回路上的移相器来调节,安装上不必测量调整波导相长度,为满足加速器总体在物理上对直线加速器的注入要求,上海光源直线加速器采用四台加速管,从而使直线加速器有更高的电子能量、中心能量稳定性及较好的束流能散指标。

上海光源直线加速器中的聚束段采用次谐波预聚束器对束流预聚束,力求将电子枪出来的相对次谐波周期相宽 360°的电子束压缩到 60°以内,随后基波聚束器对束流进一步聚束产生预期的聚束效果。预聚束器由一台 2 kW 的脉冲固态放大器提供射频功率,两台 45 MW 脉冲功率速调管分别向聚束器和加速管提供微波功率。电子枪出口处电子能量为 100 keV,半高宽为 1.2 ns,经过次谐波腔聚束后束流半高宽达到 0.5 ns,能量为 30 keV,电子束进入聚束器进一步聚束,再进入加速管加速,能量最后达到 150 MeV。图 1 为上海光源直线加速器的结构示意图。

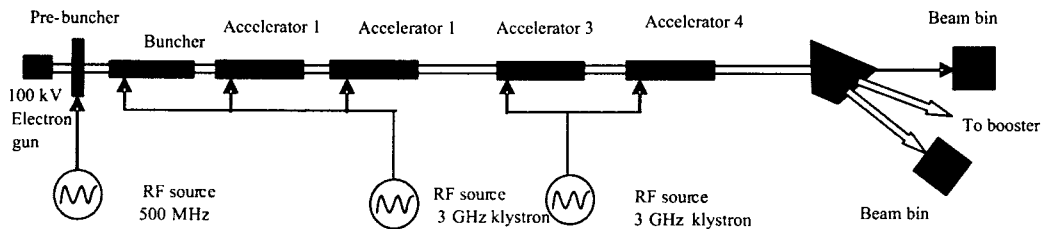


图 1 上海光源直线加速器的结构示意图

Fig.1 Structure of the linac at SSRF.

1 直线加速器波导结构与微波系统

加速器要求的电子能量为 150 MeV,设计直线加速器微波功率源采用两台 45 MW 速调管,第一

台速调管工作在输出功率 32 MW,经 6 dB 耦合器和 3 dB 功分器分别向聚束器和第一、第二台加速管提供微波功率,考虑微波功率的传输损耗,微波到达聚束器的功率为 8 MW,到达第一第二加速管的

第一作者:钟少鹏,男,1968 年出生,1991 年毕业于四川大学,高工,主要从事直线加速器微波功率源研究

收稿日期:2008-12-30,修回日期:2009-05-18

功率为 11 MW；第二台速调管工作在输出功率为 25 MW，经 3 dB 功分器分别向第三、第四台加速管提供 11 MW 微波功率。

由式(1)算出电子经过各加速管的能量增益为 35 MeV，再加上聚束器电子能量增益，电子最后总

能量可达到 150 MeV。直线加速器波导结构如图 2。

$$E=10.7\sqrt{P} \tag{1}$$

式中， E 为能量增益， P 为加速管得到的微波功率。加速器对微波系统的物理要求如表 1。

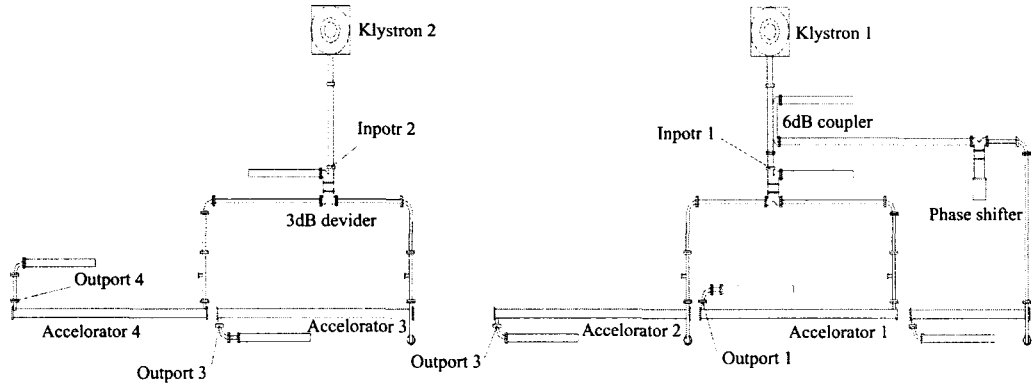


图 2 直线加速器波导结构
Fig.2 Waveguide structure of the 150 MeV linac.

表 1 加速器(工作频率 2997.924 MHz)对微波系统的物理要求 (部分参数)
Table 1 Some physical requests to the microwave system operating at 2997.924 MHz

聚束器 Buncher	输入微波功率 Input power	7 MW
	输出电子能量 Electron energy	>10 MeV
加速管 Accelerator	输入微波功率 Input power	10 MW
	最大能量增益 Maximum energy gain	34 MeV
波导传输系统 Waveguide transport system	承受功率 Power capacity	>45 MW
	相位误差(4 根加速管入口处) Phase error(4 accelerator's input port)	$\pm 1^\circ$
	控制精度 Phase precision	0.1°
	相对位置显示 Relative location display	

2 波导相长度测量与调整^[5,6]

四台加速管结构一样，长 3 m，输入耦合腔与输出耦合腔为半腔结构，其间 89 个腔，模式结构。四根加速管耦合腔的耦合波导轴线均处于水平面内，方向上用 ABBA 顺序方式排列， A_1 与 A_4 的输入耦合器朝同一方向， A_2 与 A_3 输入耦合器朝相反 180° 的另一方向。 A_1 管输入腔波导中线到 A_2 管输入腔的波导中线距离为 3200 mm，由于光速 $c=2.997924 \times 10^{11}$ mm/s，工作频率 2997.924 MHz 的微波信号波长 $\lambda=100$ mm，中线距离正好是微波波长的 32 倍，则电子以光速从 A_1 管输入耦合器到达 A_2 管用的时间正好是微波信号周期的 32 倍，这样当微波信号到达两台加速管输入耦合器的相位相同即微波功率源到两台加速管耦合器的电长度相等

时，调节电子束在 A_1 输入耦合器落在加速相位上，那么它到达 A_2 加速管输入耦合时也必然落在加速相位上。加速管工作在行波状态，其工作频率下的 $VSWR < 1.02$ ，四加速管的结构完全一致，腔间相移为 $2\pi/3$ ^[2]，总的相长度差 $< 0.2^\circ$ 。波导结构的设计可满足上述要求，由于波导在加工和安装过程中必然存在尺寸误差，在波导安装后需测量并调整功率源到两台加速管的电长度，使二者保持一致。

采用反射法测量相长度^[5]。相长度测量示意图见图 3。测量过程中，温度影响非常大，我们控制空气温度在 $(25 \pm 1)^\circ\text{C}$ ，加速管水温 $(45 \pm 0.1)^\circ\text{C}$ ，波导水温 $(45 \pm 0.5)^\circ\text{C}$ 。按方案图测量时，以 3 mm 为间距移动短路活塞，分别测量 A_1 、 A_2 分支在活塞移动到各个位置点下的相位，作相长度 VS 活塞位置散点图，将各点连成曲线并拟合为直线，计算直线的

截距，即反射时分支的相长度。为使两分支的相长度相等，调整长度较小的一支，在该分支波导两窄壁中心线上用夹具两点对齐，控制深度在 4 mm 以内，点与点间距保持 34.7 mm，尽量减小系统驻波。挤压一点深度 1 mm 时，相长度减小 2°-3°。调整后测量结果为：A₁ 与 A₂ 分支的相差为 1.4°，考虑反射测量，实际相长度相差 0.7°；相长度的测量结果见图 4。同样的方法得到 A₃ 与 A₄ 分支的相长度差为 0.4°。

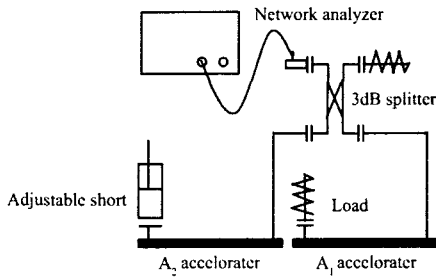


图 3 相长度测量示意图
Fig.3 Phase measurement schematic.

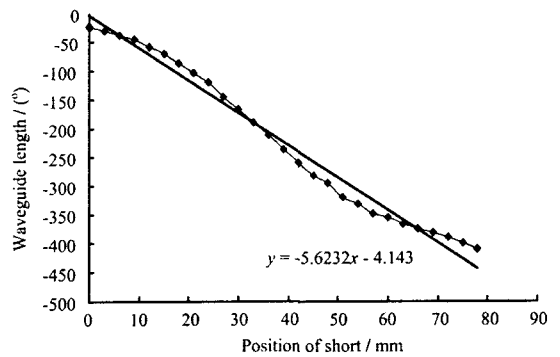


图 4 A₁、A₂ 相长度测量
Fig.4 A₁、A₂ phase measurement.

用传输法测量。安装前分段单独测量及调整后测结果见表 2。加速管输入波导相长度 64.2°。加速管 90 个腔的相移量 360°的整数倍。整个加速管及输入输出耦合器的相移量为 128.6°左右。

表 2 A₁、A₂、A₃ 与 A₄ 分支的测量与调整
Table 2 The measurement and adjustment of A₁, A₂, A₃ and A₄ branches

名称 Name	A ₁ /°	A ₂ /°	A ₃ /°	A ₄ /°
3dB 功分器 3dB splitter	0	89.6	0	89.6
直波导 Straight waveguide	85.6	-6.1	95.6	4.3
加速管 Accelerator	128.1	128.6	128.5	128.8
合计 Total	213.5	211.2	224.1	224.7
调整后的实测值 Last measurement	212.6	212.1	224.6	224.1

A₁ branch phase length - A₂ branch phase length = 0.5°
A₃ branch phase length - A₄ branch phase length = 0.5°

3 束流调试结果

直线加速器的调束过程中，当加速器达到总体要求的 150 MeV 电子能量时，实验发现当只有第一台速调管工作，输出微波功率 32 MW 时，测量得到电子束能量为 83 MeV；再开启第二台速调管，输出功率 25 MW，束流能量提高到 153 MeV，中心能量称定度为 0.093%，能散小于 1‰。结果表明，波导系统相长度的测量和调整满足了机器对微波系统的要求，电子能量与理论计算结果相符合。

作为对照，我们给出前述两台国外光源的直线加速器束流指标。Diamond 光源^[3]：电子束能量，

100 MeV；能量变化 0.1%；能散度±0.2%。SOLEIL 光源^[4]：电子束能量 100 MeV；能散度 <±0.5%。

参考文献

- 1 姚充国. 电子直线加速器. 北京: 科学出版社, 1986
YAO Chongguo. Electron linear accelerator. Beijing: Science Press, 1986
- 2 Westbrook E. Microwave Impedance Matching of Feed Waveguide to the Disk-Loaded Accelerator Structure Operating in the 2π/3 Mode. SLAC-TN-63-103, 1963
- 3 COMMISSIONING OF THE DIAMOND PRE-INJECTOR LINAC Christou C, Kempson V C, Diamond Light

- Source, Oxfordshire, UK K. Dunkel, C. Piel Accel Instruments, Bergisch Gladbach, Germany Proceedings of EPAC 2006, Edinburgh, Scotland
- 4 Present design of ELIOS electron linac injector of SOLEIL SR ring. Chaput R and Tordeux M A for the Linac Group LURE, Centre Universitaire Paris-Sud, B.P. 34, 91898 Orsay Cedex, France C. Bourat THOMSON-CSF AIRSYS-HEA Parc technologique GEMINI II 91195 Saint Aubin Cedex, France
- 5 李广林, 颜斌山. 原子能科学技术, 1994, 28(5): 475-480
- 6 LI Guanglin, YAN Binshan. At Energy Sci Technol, 1994, 28(5): 475-480
- 中国科学院高能所电子直线室. 1.1/1.4GeV 电子直线加速器的模型段及预加速器的测试和调配. 见: 全国直线加速技术及应用学术交流会文集. 北京, 1985
- Electron Linac Group of IHEP. Measurement and tuning the model of 1.1/1.4GeV electron linac and pre-accelerating accelerator. In: Proceeding of linac Technology and Application Symposium. Beijing, 1985

Waveguide phase length measurement and adjustment of 150 MeV Linac, SSRF

ZHONG Shaopeng ZHAO Minghua LIN Guoqiang WANG Baoliang
LIU Weihong ZHANG Junqiang MIAO Guocan

(Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract The linac of Shanghai Synchrotron Radiation Facility (SSRF) includes an electron gun, a sub-harmonic cavity, a fundamental buncher and four accelerators. It provides 150 MeV electron beams to the booster through the low energy transport line. Installation of the linac started in December 2006, the first beam was obtained in May 2007, and it achieved the designed specification in October 2007. In this paper, we present the installation of waveguide for the linac, the measurement and adjustment of waveguide phase length, and the beam parameters.

Key words Linac, Phase length, Waveguide, Accelerating structure, Accelerating phase

CLC TN124