

脉冲调制器机柜屏蔽效能分析测试

李长兴 谷 鸣 陈志豪 袁启兵 范学荣

(中国科学院上海应用物理研究所 上海 201800)

摘要 高功率脉冲调制器是电子直线加速器 (LINAC) 的功率源, 脉冲调制器在运行中会产生很强的电磁干扰。为了满足上海光源 LINAC 的高精度要求, 脉冲调制器必须尽量抑制这些电磁干扰。本文介绍对上海光源 150MeV 高性能 LINAC 调制器的电磁辐射抑制的分析研究和测试。分析了电磁辐射的泄漏途径, 对调制器机柜的屏蔽效能进行了定性、定量分析, 并进行了测试。验证了调制器机柜的 EMC 设计制作对电磁干扰抑制的有效性。

关键词 电子直线加速器 (LINAC), 脉冲调制器, 屏蔽效能, 电磁干扰

中图分类号 TN973.2

上海光源装置 (SSRF) 设计用 150MeV 电子直线加速器 (LINAC) 作为预注入器, 而高功率脉冲调制器是直线加速器系统的微波功率源设备。要求 LINAC 调制器不仅要达到精度指标, 同时还要要求其运行稳定可靠, 电磁噪声低。LINAC 调制器是一台高功率脉冲状态的设备, 输出脉冲为 110MW 峰值功率, 矩形脉冲宽度 5μs, 脉冲前沿 0.8μs。高功率脉冲的调制电路必然要产生很强的电磁辐射, 影响和干扰其他设备的正常运行, 因此必须对调制器功率电源电路采取有效的屏蔽措施, 抑制电磁辐射。

脉冲调制器主线路包括充电回路和放电回路两个部分。充电回路由高压直流电源、充电隔离保护元件组成; 放电回路是调制器的输出回路, 由脉冲成形网络、大功率开关管和速调管负载组成。上海光源直线加速器系统中的调制器采用氢闸流管作为开关管, 由于氢闸流管在气体放电时等离子体的不稳定性, 将产生 5—6MHz 的衰减振荡噪声, 同时, 调制器在放电回路上的脉冲电流在脉冲放电前沿会产生电磁噪声, 这些噪声通过调制器机柜的缝隙、通风孔、脉冲传输电缆以及调制器的公共地线向外辐射, 从而在机柜外部空间产生强的电磁干扰, 成为主要的辐射噪声源; 另外, 高功率电流放电还会通过电源线和地线产生传导干扰。

调制器脉冲机柜如图 1 所示, 机柜右侧板上有一个矩形通风孔, 左侧板上有二个矩形通风孔, 顶部设计有八个排风扇通风口。机柜设计时对于可能造成电磁泄漏的各个部分如缝隙、通风孔以及穿过

机柜的电缆都采取了相应的屏蔽措施, 分别对缝隙泄漏、通风孔泄漏、电缆泄漏等对调制器机柜的影响进行了定量、定性分析; 并进行了测试和分析。

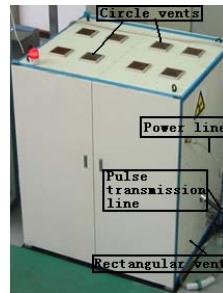


图 1 脉冲调制器机柜示意图
Fig.1 Photograph of the pulse modulator cabinet

1 机柜屏蔽效能分析

脉冲调制器机柜是由 1mm 厚的镀锌薄钢板制成的, 无限大钢板对电磁波的屏蔽效能可用下式表示^[1-6]:

$$SE = A + R + B(\text{dB})$$

其中, A 为吸收损耗, R 为反射损耗 (近场区主要为磁场的反射损耗 R_m), B 为多次反射修正系数。

$$A = 0.131t\sqrt{f\mu_r\sigma_r}(\text{dB})$$

$$R_m = 14.6 + 10\lg\left(\frac{fr^2\sigma_r}{\mu_r}\right)(\text{dB})$$

第一作者: 李长兴, 男, 1981 年出生, 2004 年毕业于吉林大学通信工程学院, 现为中国科学院上海应用物理研究所读硕士研究生, 主要从事电磁兼容的研究工作

收稿日期: 2006-08-28, 修回日期: 2006-11-07

$$B = 20 \lg \left[1 - \left(\frac{Z_s - Z_w}{Z_s + Z_w} \right)^2 \right] \times 10^{-0.1A} \times (\cos 0.23A - j \sin 0.23A) \text{ (dB)}$$

式中, t 为金属板厚度(mm), f 为电磁波频率(Hz), r 为离场源的距离(m), μ_r 金属板的相对磁导率, σ_r 金属板的相对电导率, Z_s 金属波阻抗(Ω), Z_w 空气波阻抗(Ω)。

镀锌钢板在 $f=5\text{MHz}$ 时, $\mu_r \approx 500$, $\sigma_r = 0.1$, 因此可以得到吸收损耗为:

$$A = 0.131t \sqrt{f \mu_r \sigma_r} = 2071.3 \text{ (dB)}$$

也就是说, 穿透钢板的电磁波由于钢板的吸收作用, 能量将衰减 2071.3dB。近场区主要为磁场的反射损耗 $R_m = 35.2 \text{ (dB)}$ 。在 $A > 10 \text{ dB}$ 时, 修正系数 B 可以忽略不计。由此可知无限大钢板对电磁波的屏蔽效能 SE_1 为:

$$SE_1 = 2071.3 + 35.2 = 2106.5 \text{ (dB)}$$

可见如果调制器机柜是理想屏蔽体(没有孔缝)的话, 其屏蔽效能可达两千多分贝。但是实际情况并不是这样, 调制器机柜上由于实际需要存在着缝隙、孔洞以及电缆的接入, 这些缝隙、孔洞的存在, 会造成严重的电磁泄漏, 大大降低了机柜的屏蔽效能。

1.1 缝隙

机柜的缝隙主要在机柜门与机架的接触面; 另外, 由于调制器机柜不是由一块完整的金属板制成的, 在两块金属板连接的地方, 用螺钉作为连接固件, 这样的连接方式在连接处非常容易形成缝隙段。这些缝隙段能导致非常严重的电磁能量泄漏, 大大降低了机柜的屏蔽效能。

为了避免机柜门密封不好导致的电磁泄漏, 调制器机柜设计采用附加的金属板密闭的形式, 即在机柜门内部骨架上加四块金属板密封屏蔽板, 如图 2 所示, 这四块金属板与骨架之间的缝隙用导电衬垫填充, 导电衬垫固定在骨架上的凹槽中, 如图 3 所示, 从而形成很好的密闭, 大大提高屏蔽效能。机柜侧面钢板也采用一样的结构来安装。钢板的固定螺钉间距为 12cm, 即钢板连接处形成的缝隙段长为 12cm, 缝隙深度为 2.5cm, 则缝隙的屏蔽效能 SE_2 为^[4,6]:

$$SE_2 = A_a + R_a = 27.3h/W + 20 \lg \frac{|(1+k)^2|}{4|k|}$$

其中, A_a 是缝隙的传输损耗(dB), R_a 是缝隙开口处的反射损耗(dB), h 是缝隙深度(cm), W 是缝隙长度(cm), k 是缝隙开口处波阻抗与空间入射波阻抗之比值, 入射波为平面波场时, $k = j6.69 \times 10^{-5} fW$, f 是频率, 单位为 MHz; 入射波为低阻抗磁场时, $k = W/\pi r$, r 是入射源到屏蔽体的距离, 单位为(cm)。



图 2 机柜门用钢板密闭
Fig.2 The cabinet door sealed with steel

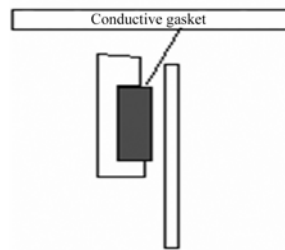


图 3 导电衬垫填充示意图
Fig.3 Sketch of conductive pad filling

调制器主要辐射源为闸流管产生的电磁噪声, 频率约为 5MHz, 波长为 $\lambda = v/f = 3 \times 10^8 / 5 \times 10^6 = 60\text{m}$, $\lambda/2\pi \approx 9.5\text{m}$, 闸流管到各缝隙的距离 r 在 0.5—3m 之间; 显然, $r < \lambda/2\pi$, 缝隙处在辐射源近场区, 入射波为低阻抗磁场, 取 $k = W/\pi r$ 。由此得到调制器机柜钢板缝隙的屏蔽效能 SE_2 为:

$$\begin{aligned} SE_2 &= 27.3 \times 2.5 / 12 + 20 \lg \frac{|(1+k)^2|}{4|k|} \\ &= 5.69 + 20 \lg \frac{|(1+k)^2|}{4|k|} \end{aligned}$$

缝隙屏蔽效能随 r 变化的曲线图如下图 4 所示, 缝隙屏蔽效能 SE_2 在 17.3—31.8dB 之间。

1.2 圆形通风孔

调制器机柜既要具有良好的屏蔽性能, 又要通

风良好。为此，在调制器机柜顶部有 8 个直径为 152mm 的圆形通风孔，其上装有风扇。通风孔的线度及通风孔间距均远小于电磁波波长。当电磁波入射到此种通风孔时，其作用相当于平面圆形口径天线的辐射，根据惠更斯原理，口径面上的分量可以看成次级子波的波源，在机柜金属板的外侧就会产生电磁能量的泄漏。为了抑制通风孔的电磁辐射，在圆形通风孔处采用了截止波导式通风孔板。这里采用的是波导结构为六角形波导、长度为 1.7cm 的蜂窝状通风孔板。蜂窝通风孔板六角形波导内壁的对边尺寸为 1/8 英寸 (3.18mm)，波导外接圆直径 $w=3.67\text{mm}$ ，由此得出六角形波导的截止频率为

$$f_c = \frac{15}{w} \times 10^9 = 40.87 \times 10^9 \text{ (Hz)}$$

脉冲调制器产生的电磁干扰在六角形波导中传播时的衰减 (即单根截止波导的屏蔽效能 $SE_{3\text{单}}$)^[2,6] 为：

$$SE_{3\text{单}} = 1.823 f_c \cdot l \times 10^{-9} \sqrt{1 - \left(\frac{f}{f_c}\right)^2} = 126.7 \text{ (dB)}$$

式中， f 是电磁波的频率(Hz)， l 是截止波导的长度 (cm)。

上面是单根波导的屏蔽效能，调制器机柜所使用的截止波导式通风孔板有 2638 个波导管，因此，总的屏蔽效能 SE_3 为：

$$SE_3 = SE - 20\lg 2638 = 58.3 \text{ (dB)}$$

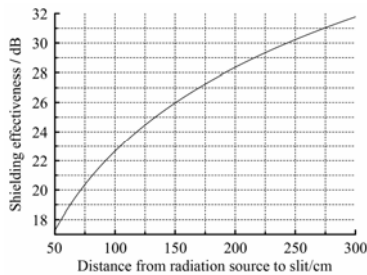


图 4 缝隙屏蔽效能变化曲线图

Fig.4 Change curve of shielding effectiveness of slit

1.3 矩形通风孔

矩形通风孔是调制器机柜两侧的进风口，是由镀锌薄钢板冲制成的矩形孔金属板，机柜左侧一个，右侧二个。矩形孔尺寸为 100mm×6mm，分为两列。电磁干扰场方向与矩形孔长边平行 (水平方向)，大大减小了磁路的横截面积，使磁阻明显增加，从而抑制了干扰场向外辐射。但是，矩形通风孔开孔仍然过大，对电磁干扰的抑制效果不能达到要求。因

此，在通风孔金属板内部采用单层金属网屏蔽。这里采用铁丝网，铁丝半径 $R=0.25\text{mm}$ ，铁丝网网距 (中心距) $c=5\text{mm}$ 。

要精确地计算出金属网的屏蔽效能是比较困难的。在工程近似的情况下，可以将电磁场用传输线路来等效，由传输线理论求出单层金属网对磁场的屏蔽效能的计算公式为^[5]：

$$SE_4 = 20\lg \left[\frac{r'}{c} \times \frac{1}{\sqrt{\left[\frac{0.38 \times 10^6}{f} X_f + 0.478 \left(\ln \frac{c}{R} - 1.5 \right) \right]^2 + \left(\frac{0.38 \times 10^6}{f} R_f \right)^2}} \right]$$

其中， f 是频率(Hz)， r' 是干扰源离金属网的距离(m)， R_f 是金属网单位长度的交流电阻(Ω/m)， X_f 是金属网单位长度的电抗(Ω/m)。上述铁丝网的 $R_f=26.5\Omega/\text{m}$ ， $X_f=26.3\Omega/\text{m}$ ，取 $f=5\text{MHz}$ ， $r'=0.5\text{m}$ ，计算得铁丝网的屏蔽效能为 $SE_4=29.4\text{dB}$ ；当 $r'=1.5\text{m}$ 时， $SE_4=38.97\text{dB}$ 。

1.4 电缆连接

在调制器机柜的右侧板上，由于实际需要，有多根电缆穿过机柜，对机柜的屏蔽效能造成极大的影响。为了减小这种影响，在信号线和电源线入口处都使用了相应的电磁干扰滤波措施，采用了穿心电容和共模扼流圈进行滤波，如图 5 所示，从而在不影响有用信号通过的同时，减小了电磁泄漏^[7]。



图 5 电缆滤波器

Fig.5 Cable filter

调制器脉冲机柜电缆辐射的主要途径是功率脉冲输出电缆，在这条脉冲传输电缆上传输 25kV/5000A 的脉冲信号，因此，电缆将以行波天线的形式向外辐射电磁噪声，对周边的设备造成极大的干扰。设计采用双层编织网屏蔽层抑制辐射。双层编织网的传输阻抗在 $1\text{m}\Omega/\text{m}$ 左右，小于实心铜和铝箔屏蔽层，屏蔽效果还是比较好的。对于芯线

直径为 0.5—1cm 的圆电缆，在地面以上 10—30cm 的高度，对于质量较好的单层编织屏蔽电缆，对 1MHz 以上干扰的屏蔽效果在 60dB 以上^[4]。LINAC 调制器与速调管之间的传输电缆的双层屏蔽电缆的屏蔽效能应该在 60dB 以上。在调制器的辐射频段（小于 15MHz），双层编织屏蔽的屏蔽效果都在 60dB 以上，是可以满足要求的。电缆在屏蔽机柜入口处采用相应规格的电缆连接器进行连接，使电缆屏蔽层环绕芯线一周与屏蔽机柜实现良好的电接触，从而使电缆与屏蔽机柜保持良好的电气连续性，构成一个完整的屏蔽体，从而保证了屏蔽的完整性。

1.5 腔体效应

设计屏蔽体时，要让屏蔽体的谐振频率远离干扰信号频率，否则，当干扰信号频率等于屏蔽体的谐振频率时，就会产生共振现象，大大降低屏蔽体的屏蔽效能。调制器机柜是一个矩形腔体，矩形腔体的谐振频率^[2]：

$$f_{\text{谐振}} = \frac{1}{2\sqrt{\mu_0\epsilon_0}} \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2 + \left(\frac{p}{c}\right)^2}$$

式中，*a*、*b*、*c* 分别为矩形谐振腔的长、宽、高，*m*、*n*、*p* 分别代表 *a*、*b*、*c* 方向上的谐振半周数，*m*、*n*、*p*=0, 1, 2, ……。调制器机柜尺寸为 *a*=1.6m，*b*=1.4m，*c*=1.95m，由此计算得到调制器机柜的主模谐振频率分别是：*f*₁₀₁=121MHz，*f*₀₁₁=132MHz，*f*₁₁₀=142MHz。可见，调制器闸流管产生的干扰频率（20MHz 以下）远小于机柜谐振频率，不会发生内部谐振。

1.6 机柜总的屏蔽效能

不考虑从不同途径发射的电磁场在传输中的相位差异，则可以按照下式计算实际屏蔽体的屏蔽效能^[3,6]：

$$SE_{\Sigma} = -20\lg\left(\sum_{p=1}^n 10^{-SE_p/20}\right)$$

在此取 *n*=5，理想屏蔽体的屏蔽效能为 *SE*₁=2106.5dB，缝隙的屏蔽效能取理论最小值 *SE*₂=17.3dB，圆形通风孔的屏蔽效能为 *SE*₃=58.3dB，矩形通风孔金属网的屏蔽效能取理论最小值 *SE*₄=29.4dB，贯穿屏蔽机柜的电缆的屏蔽效能设为 *SE*₅=60dB，计算得屏蔽机柜的对磁场的总的屏蔽效能为：

$$SE_{\Sigma} = -20\lg\left(\sum_{p=1}^5 10^{-SE_p/20}\right) = 15.3(\text{dB})$$

如果缝隙的屏蔽效能取理论最大值 *SE*₂=31.8dB，矩形通风孔金属网屏蔽效能取理论最大值 *SE*₄=38.97dB，则 *SE*_Σ=28.2dB。

2 机柜屏蔽效能测试

由于调制器为大型电子设备，难以做到在标准测试环境中测量 EMI，故测试环境限定在现有的调制器工作间进行。调制器辐射干扰抑制效能的测试装置如图 6 所示。采用直径为 5cm 的环形天线和 Agilent4395A 频谱仪来检测调制器产生的电磁干扰。调制器输出功率为 76MW 脉冲功率。首先测量没有机柜屏蔽的调制器电路的电磁辐射，然后，分别在机柜的前方（机柜前门中心、距离 10cm 处），侧面（矩形通风孔中心、距离 10cm 处）测量电磁辐射，测试结果如图 7 所示。

屏蔽前后测试结果进行比较，可以得出机柜屏蔽效能如表 1 所示。

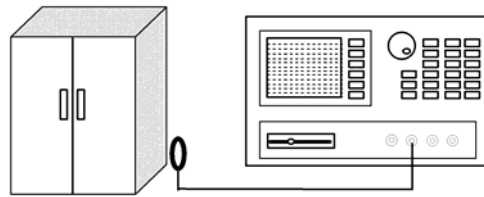


图 6 测试示意图
Fig.6 Sketch of testing shielding effectiveness of modulator cabinet

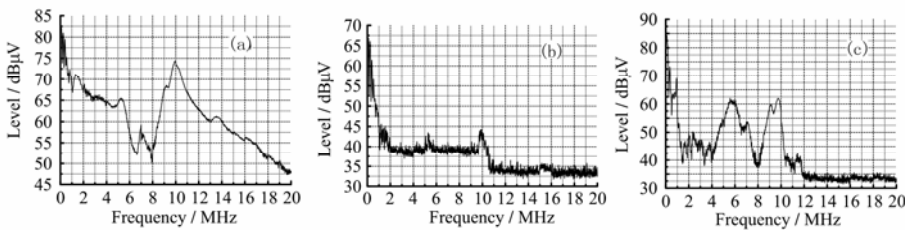


图 7 屏蔽前(a)和屏蔽后(b、c)测试结果
Fig.7 Test results before shielding (a) and after shielding(b、c)

表1 机柜屏蔽效能测试结果
Table 1 Testing results of shielding effectiveness of cabinet

频率 Frequency /MHz	屏蔽效能 Shielding effectiveness /dB	
	机柜前方 In front of cabinet	机柜侧面 At flank of cabinet
1	28.1	15.3
2	29.2	22.1
3	27.4	22.2
4	25.6	22.8
5	25.1	18.1
6	25.5	13.7
7	19.8	16.7
8	18.8	19.1
9	28.2	14.3
10	31.8	16.8
11	33.3	25.9
12	29.0	28.0
13	24.8	25.7
14	26.4	26.1
15	22.2	22.4
16	21.4	22.6
17	20.5	20.0
18	18.2	17.5
19	17.7	15.9
20	15.3	15.5

3 结论

由表1可以看出,调制器机柜屏蔽效能最低为13.7dB,最高为33.3dB,绝大部分在15.3dB—28.2dB之间,和计算值大致相吻合。由于计算屏蔽效能本身的复杂性,在进行计算时只考虑主要电磁泄漏部分的屏蔽效能,如在矩形通风孔处,只计算了金属网的屏蔽效能,而没有对矩形通风孔板和金属网两者的综合屏蔽效能进行计算,而且总是按照最差的情况进行计算。因此,在一些频段出现了测试值大于计算值的情况。

测试过程中,在缝隙附近测量时,发现某些频率点出现屏蔽效能下降,经检查发现,是因为测试时机柜板上有个别螺钉脱落,导致缝隙的长度增加一倍,对屏蔽效果造成影响。将螺钉补全后,屏蔽效能明显改善。计算和测试均表明,紧固螺钉之间的间距大小明显影响屏蔽效能,减小螺钉间距,能

有效提高屏蔽效能。截止波导的通风性能是好的,但其固定螺钉的压紧力不同对屏蔽效果影响较大。在改进设计中,应适当增加紧固螺钉,并处理好窗、柜的接触面,进一步提高其屏蔽性能。

由图7(b)和图(c)可见,屏蔽后,调制器电磁干扰主要分布在12MHz以下的频段,这说明对较高频段(12MHz以上)的电磁干扰屏蔽的效果比较好。总之,脉冲调制器机柜的屏蔽处理措施是有效的,达到了普通钢板折弯机柜的设计要求,可以对内部噪声起到很好的抑制作用。

参考文献

- 郭银景,吕文红,唐富华,等.电磁兼容原理及应用教程.北京:清华大学出版社,2004.16—119
GUO Yinjing, Lü Wenhong, TANG Fuhua, et al. Electromagnetic compatibility principles and application guide. Beijing: Tsinghua University Press, 2004. 16—119
- 沈文军.现代雷达,2002,24(3):73—76
SHEN Wenjun. Modern Radar, 2002, 24(3): 73—76
- 凯瑟 B E.电磁兼容原理.北京:电子工业出版社,1985.101—131
Kaise B E. Electromagnetic compatibility principles. Beijing: Electronics Industry Publishing House, 1985. 101—131
- 高攸纲.屏蔽与接地.北京:北京邮电大学出版社,2004.61—73
GAO Yougang. Shielding and grounding. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunication Press, 2004. 61—73
- 荒木庸夫著,赵清译.电子设备的屏蔽设计.北京:国防工业出版社,1975.95—145
Tsuneo Araki. ZHAO Qing(tran.). Shielding design of electronic equipment. Beijing: National Defense Industry Press, 1975 95—145
- 陈穷,蒋全兴,周开基,等.电磁兼容性工程设计手册.北京:国防工业出版社,1993.525—606
CHEN Qiong, JIANG Quanxing, ZHOU Kaiji, et al. EMC Engineering Design Manual. Beijing: National Defence Industry Press, 1993. 525—606
- Ott, Henry W. Noise Reduction Techniques in Electronic Systems. Washington: U.S. Government Printing Office, 1976. 138—171

Analysis and measurement of shielding effectiveness of LINAC modulator cabinet

LI Changxing GU Ming CHEN Zhihao YUAN Qibing FAN Xuerong

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

Abstract The high-power pulse modulator of LINAC will produce strong electromagnetic interference when it runs. To meet the EMC requirements for high performance LINAC operation, the pulse modulator should be shielded. This paper presents the research on electromagnetic radiation interference produced by LINAC modulators, the analysis of the possible leaky passes, the shielding efficiency and the measurement of the modulator's EMI. The results show that the EMC design of the modulator cabinet can restrain electromagnetic interference.

Key words LINAC, Pulse modulators, Shielding effectiveness, Electromagnetic interference (EMI)

CLC TN973.2