

BESIII电磁量能器电子学前置放大器及主放大器

聂 晶

2006年4月25日

BESIII电磁量能器电子学前置放大器及主放大器

报告内容

一 前置放大器的研制与生产

二 主放大器的调试与生产

一 EMC电子学前放研制工作简介

- **EMC电子学前放主要技术难点：低噪声、低功耗、高可靠性。**在调研了多种形式的电路后，最终选定采用**KEK**分立元件的方案。在此方案的基础上，根据我们的情况做了一些必要的修改。

- **主要有以下几点考虑：**

- ① 尽可能选用成熟的电路，提高可靠性。

- ② 探测器采用**CsI**晶体和双**PIN**二极管，与**KEK**相仿。这样在结构设计上可以借鉴。

- ③ **KEK**电路的各项指标与我们前放的指标相似，可减小研制风险，节约研制时间。

- ④ 该电路的应力系数（电压、功率）很低，即可实现低失效率、低功耗。

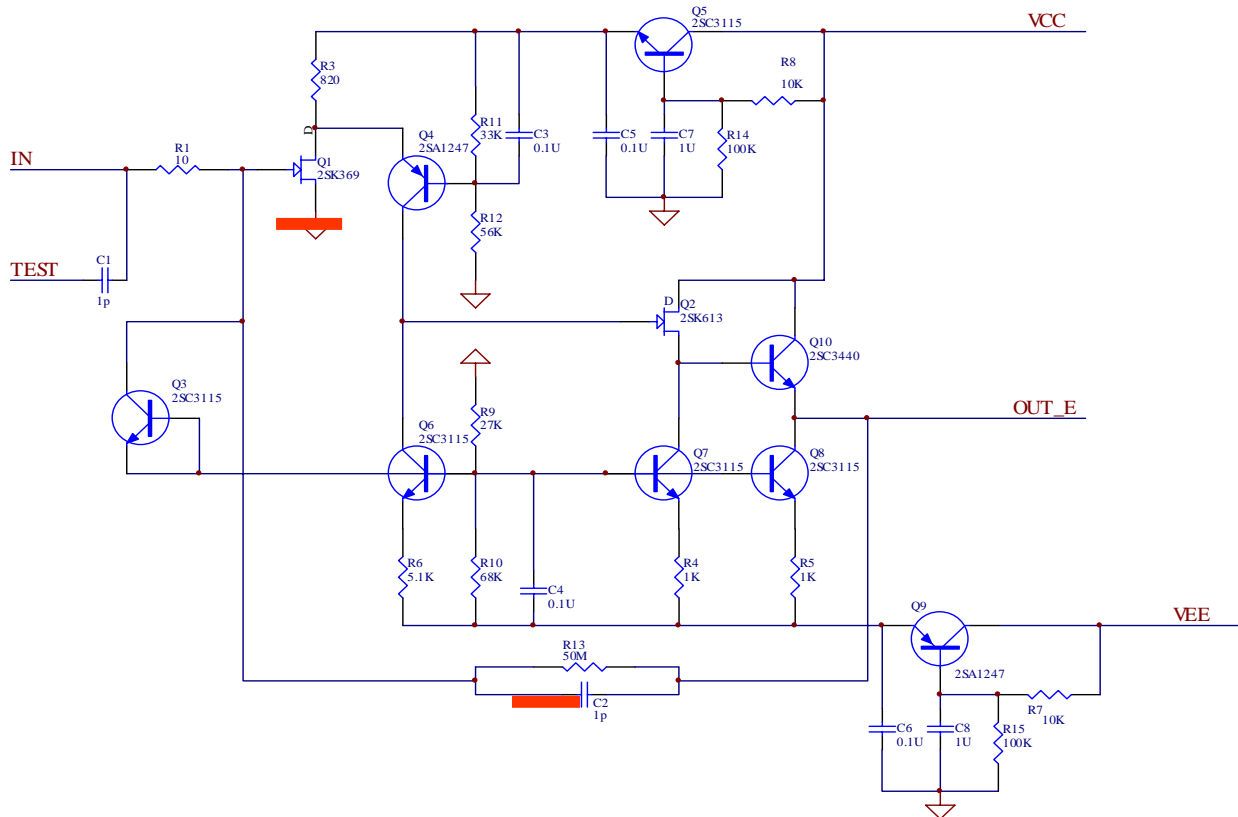
- 电磁量能器总计使用6240块CsI晶体，每块晶体上安装两个型号为S2744-08的光二极管。两个电荷灵敏前置放大器安装在光二极管的背后，通过一个屏蔽铝盒固定在晶体上。前放的低压及光二极管的偏压均由主放大器提供。前放与主放通过一根14芯屏蔽双绞线相连接。

实践证明以上想法是正确的。

EMC电子学前放原理图

EMC前放是电荷灵敏前置放大器。为了减少噪声，采用高跨导的结型场效应管2SK369作为输入级。增益由1Pf的反馈电容决定。

前放设有校准输入端。校准端电压电荷转换率为1pc/V



二 *EMC*电子学前放指标

- 等效输入端噪声电荷： 小于**1000**电子电荷
- 增益： **1V / pC**
- 最大线性输出幅度： **1V**
- 输出衰减时间常数： **50 μ s**
- 校准端输入电压电荷转换率： **1PC / V**
- 功耗： **280mw**

三 EMC电子学前放测试方法

前放噪声测试尽可能模拟将来系统运行时的实际情况，在噪声测量中：

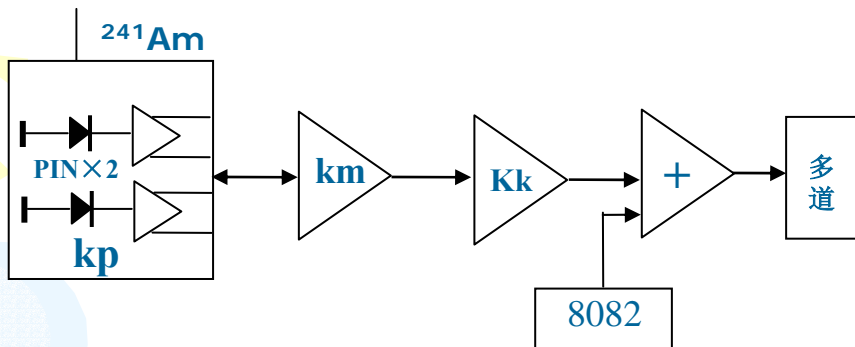
- ① 前放噪声是指两个前放噪声之和。因为实际使用中每块晶体用两只**PIN**二极管、两个前放。
- ② 两个前放均接上**PIN**二极管。（二极管的结电容和暗电流使前放噪声变大）
- ③ 主放大器采用**EMC**系统实际使用的插件。（主放大器的成形方法与时间常数与噪声指标密切相关）
- ④ 前放与主放之间采用系统实际使用的电缆连接（**18m**）。
- ⑤ 前放与**PIN**二极管的屏蔽条件与实际使用时相似，不采用其他特殊的屏蔽措施

三 *EMC*电子学前放测试方法



三 EMC电子学前放测试方法

1 等效输入端噪声电荷

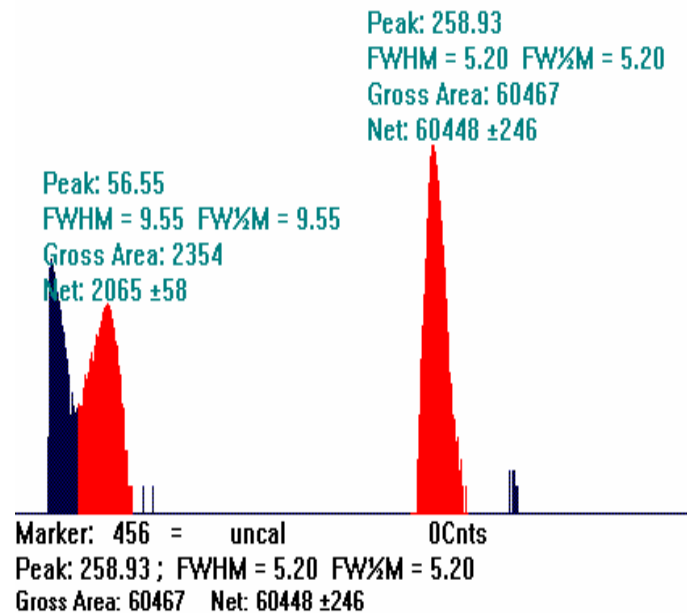


图(1) 等效输入噪声测试框图

$$\text{等效输入端噪声电荷: } q_n = \frac{16600}{p_{241}} \cdot \frac{FWHM}{2.355}$$

实质是利用²⁴¹Am峰位确定系统增益。

利用被噪声展宽了的精密脉冲产生器信号谱的半高宽FWHM来确定系统噪声。



三 EMC电子学前放测试方法

当 ^{241}Am 的 γ 击中PIN二极管时,将在I层产生电子-空穴对。产生一个电子-空穴对的能量3.2ev, 60kev的 ^{241}Am 将产生(60kev / 3.2ev) 16600个电子-空穴对。电子-空穴对在反偏电压作用下,分别漂移到二极管正、负极,形成电荷脉冲信号。这个电荷脉冲信号的电荷量为:

$$Q_{241} = 16600 \text{ 电子电荷}$$

由于 Q_{241} 是已知的,可以利用 ^{241}Am 的峰位 P_{241} 来确定多道测量系统增益。

$$\therefore \text{多道 (4096道) 输入端满量程} = 10\text{V}$$

$$\therefore P_{241} = Q_{241} \cdot K_p \cdot K_m \cdot K_k \cdot 4096 / 10\text{V}$$

测量系统增益($K_p \cdot K_m \cdot K_k$):

$$K_p \cdot K_m \cdot K_k = P_{241} / Q_{241} \times 10\text{V} / 4096 \quad (1)$$

精密信号产生器产生的单幅电压脉冲经过加法器与前放噪声相加后,其幅度谱被展宽为高斯曲线。这个曲线的半高FWHM代表了系统噪声。

多道输入端噪声电压:

$$V_{qn} = K_p \cdot K_m \cdot K_k \cdot q_n$$

半高宽相当于输入端的电压:

$$10\text{V} / 4096 \times \text{FWHM}$$

半高宽与标准偏差 σ (噪声值 V_{qn})的关系为:

$$\text{FWHM} = 2.355\sigma$$

$$\therefore 10\text{V} / 4096 \times \text{FWHM} = 2.355 V_{qn}$$

$$= 2.355 \times K_p \cdot K_m \cdot K_k \cdot q_n$$

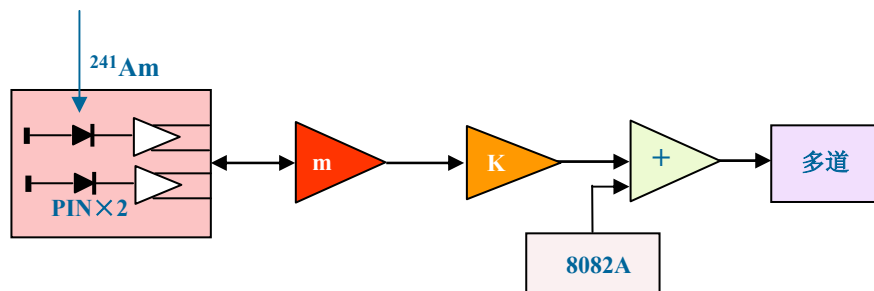
故,等效输入端噪声电荷 q_n :

$$q_n = (\text{FWHM} \times 10\text{V} / 4096) / (2.355 \times K_p \cdot K_m \cdot K_k)$$

$$= (\text{FWHM} \times Q_{241}) / (2.355 \times P_{241}) \quad (2)$$

EMC电子学前置放大器 等效输入端噪声电荷测试报告

1 测试框图:



2 测试设备:

放射源 ^{241}Am

电源 (+12V、+5V、-5V、+70V)

8082A产生器1台

多道 (4096道) 1台

计算机1台

主放大器 (EMC电子学专用) 1台

加法器+增益放大器共1台

18m电缆1根, 34芯扁带电缆1根

100MHz示波器1台

3 测试结果:

按照图中连接方法连接后, 根据多道谱 ^{241}Am 的峰位 P_{241} 及产生器信号峰的半高宽,

带入公式 $qn = 16600 \div P_{241} \times \text{FWHM} \div 2.355$

式中 P_{241} : ^{241}Am 峰位

qn : 等效输入端电子电荷数

FWHM : 8082A产生器峰位半高宽

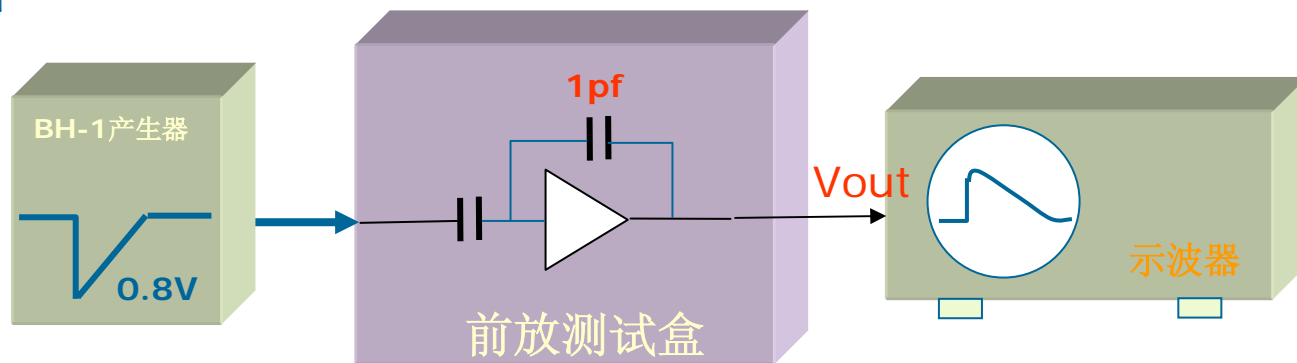
EMC电子学前置放大器 等效输入端噪声电荷测试报告

前放号	P_{241}	FWHM	Q_n (电子电荷)
13	57.61	5.51	672.74
14	57.85	5.37	652.93
15	57.52	5.41	656.67
16	55.99	5.40	678.38
17	56.88	5.27	651.69
18	57.17	5.30	652.08
19	57.98	5.41	656.32
20	56.82	5.41	669.97

三 EMC电子学前放测试方法

2 前放增益

1 测试框图



2 测试方法

由于前放校准输入电压电荷转换率为**1PC/V**，所以**0.8V**的信号在前放输入端产生的电荷为**0.8PC**。用示波器测试前放输出端的信号幅度为 **V_{out}** 。

那么，前放增益

$$K = V_{out}/0.8PC$$
$$= 1.25V_{out}(V)/PC$$

EMC电子学前置放大器 前放增益测试报告

前放号	输入信号幅度 (V)	输出信号幅度 (V)	前放增益 $k_p(V/pc)$
13	0.8V	0.79	0.98
14	0.8V	0.785	0.98
15	0.8V	0.79	0.98
16	0.8V	0.79	0.98
17	0.8V	0.785	0.98
18	0.8V	0.79	0.98
19	0.8V	0.805	1.0
20	0.8V	0.80	1.0

三 EMC电子学前放测试方法

3 前放最大线性输出及衰减时间常数的测试方法

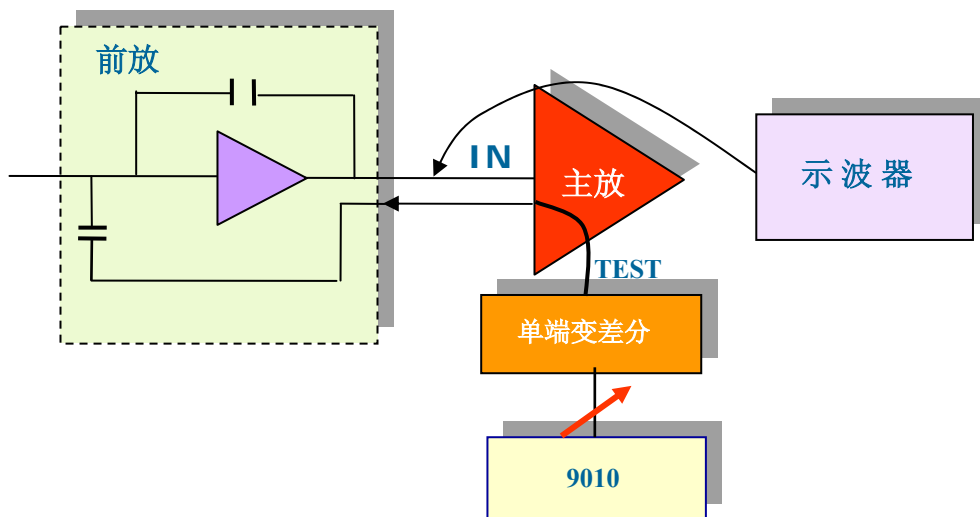


图 (3) 最大线性输出及衰减时间常数测试框图

改变9010产生器的输出幅度，用示波器探针观察主放大器输入端的波形。

当输入端波形幅度不随9010产生器输出幅度的变化而改变时，即可找到前放最大线性输出幅度。

通过对输入端信号后沿的观测，可以得到其衰减时间常数。

EMC电子学前置放大器

最大线性输出幅度及衰减时间常数测试报告

测试设备:

主放大器 (EMC专用主放) 1台
电源 (5V、+12V)
9010产生器1台
100MHZ示波器 1台
18m电缆1根, 14芯扁带电缆1根,
34芯扁带电缆1根

测试结果:

- 按照上图连接后, 改变 9010产生器信号的输出幅度, 当输入端波形不随9010产生器输出幅度的变化而改变时, 即可找到最大线性输出幅度。
- 通过对主放输入端信号后沿的观测, 可以得到其衰减时间常数。

前放号	最大线性输出幅度 (V)	前放输出衰减时间常数 (μs)
13	1.9	44
14	1.9	43
15	1.9	44
16	1.9	43
17	1.9	44
18	1.9	44
19	1.9	44
20	1.9	44

四 目前前放达到的指标

- 等效输入端噪声电荷： 小于**1000**电子电荷
- 增益： $0.98\text{V} / \text{pc}$
- 最大线性输出幅度： 不小于**1.8V**
- 输出衰减时间常数： $40\ \mu\text{s}$
- 校准端输入电压电荷转换率： $0.98\text{pc} / \text{V}$
- 功耗： 230mw

五 两次束流测试结果

2004年至2005初，EMC电子学系统前后进行了二次束流测试。

第一次束流测试验证了系统增益是合适的。同时也发现了系统抗干扰能力差，在实验束现场系统噪声比在实验室增大了2倍。

经过对前放、主放等部件的改进，系统的抗干扰能力得到了很大的提高。第二次束流测试验证了前放、主放的改进效果。在实验束现场系统噪声与在实验室现场的噪声没有什么变化。

两次EMC电子学抗干扰能力实验结果比较：

♣ 第一次束流测试

在物理楼实验室测得的噪声为**1200**电子电荷。

在束流测试处测得的噪声为**3700**电子电荷。

增大倍数 = $(3700 - 1200) / 1200 = 2.083$

♣ 第二次束流测试

在物理楼实验室测得的噪声为**957.3**电子电荷。

在束流测试处测得的噪声为**985.15**电子电荷。

增大倍数 = $(985.15 - 957.3) / 957.3 = 0.029$

♣ 系统的抗干扰能力改善了

EMC电子学抗干扰措施是成功的。

六 可靠性的粗略估算

EMC前放安装到谱议后，维修的可能性不大。所以，前放的可靠性是一个很严重的问题。为了提高前放的可靠性，除了采用成熟的电路，降低元器件的应力系数等措施外，还采用了冗余的办法（通过在主放大器采用两挡增益来实现）。

前放所用的元器件种类不多，主要有电容、电阻、双极晶体管、接插件等。由于这些元器件没有给出可靠性指标（价格所限，不可能购买高可靠性的产品），对前放的可靠性只能做出粗略的估算。对前放的可靠性估算主要根据我国军标GJB/Z 299B-98《电子设备可靠性预计手册》给出的公式、参数做出计算。

$$\lambda_{\text{前放}} = \sum_{i=1}^n \lambda_{\text{三极管 } i} + \sum_{i1=1}^m \lambda_{\text{电阻 } i1} + \sum_{i2=1}^k \lambda_{\text{电容 } i2} + \lambda_{pcb} + \lambda_{\text{接插件}}$$

根据前放元器件的数量、工作条件及GJB/Z 299B-98《电子设备可靠性预计手册》给出的相应数据，可以得到：

$$\begin{aligned}\lambda_{\text{前放}} &= 0.53 \times 10^{-6} + 0.0185 \times 10^{-6} + 0.04 \times 10^{-6} + 0.017 \times 10^{-6} + 0.0067 \times 10^{-6} \\ &= 0.6122 \times 10^{-6}\end{aligned}$$

由于两块前放采用冗余的接法（完全独立），前放在时间 t 内的故障率为：

$$R_s(t) = (\lambda t)^2$$

估算前放10年内的故障率：

$$R_s(t) = (0.6122 \times 10^{-6} \times 87600)^2 \approx 0.276\%$$

对于6272个通道的EMC电子学前放，10年内失效数约为18个。

为了进一步消除早期失效，对每块前放采用了加温老化。老化条件为55℃下80小时。

七 前放的批量生产

前放的量产是从**2005年4月**开始进行的。生产过程中，我们同心协力，克服了时间紧、工作量大等困难，加班加点，随时解决出现的技术问题。我们紧紧把握一个原则：在现有的条件下，做到保质保量。具体做法如下：

1 单个电荷灵敏放大器的测量

加入固定幅度的脉冲信号，用示波器测量电荷灵敏放大器的输出幅度、输出顶降。同时作出记录

2 增益配对

一个前放内要求两个电荷灵敏放大器的增益相同，因此，根据单个电荷灵敏放大器的测量记录进行配对，误差小于**3%**。

3 前放组装

- 焊接前放子板、母板并在关键元件上涂三防漆，保证前放指标。
- 焊好的母板固定在前放盒内并在关键连接部位点胶，防止断线。

七 前放的批量生产

4 前放测量

- 在前放检测端加测试脉冲，用示波器观测两个前放的输出波形
- 前放加上**PIN**光二极管，在前放检测端加入精密幅度脉冲信号。用多道测试其输出脉冲幅度谱。通过幅度谱的峰位及半高宽可以推算出前放的增益和噪声。

5 前放老化

在**55℃**环境温度下老化**72**小时，老化后用多道对前放噪声、增益进行复测

6 筛选

- 根据老化前后两次测量的数据进行对比，去除指标不合格的前放
- 根据老化后的测量数据进行计算和排序，去除指标不合格的前放
- 提供**EMC**探测器组使用

七 前放的批量生产

为了确保前放的质量，所有元器件均从正规厂家进货。**PCB**生产厂和焊接厂也是经过多次挑选，具有**ISO9000**认证的企业。从前放盒的验收到前放子、母板的焊接，设计了许多专用的工装设备用以保证质量。

经过了**2**年多时间的设计和试制工作，已经具备了批量生产的条件。现在，每个月可以生产**600**块。

目前已生产出**5900**多块前放。成品率很高，大于**99%**。

前放的全部完成需要到**7**月底。

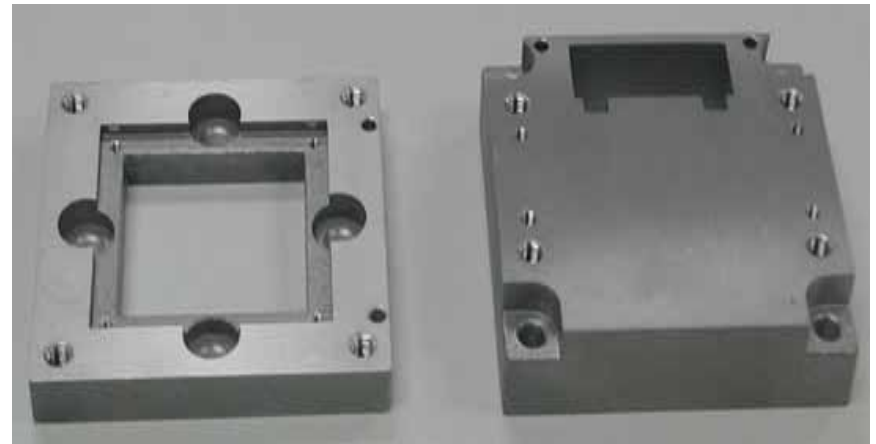
目前前放存在的问题

- 600块前放没有配对（一个盒内对2块前放增益的挑选）
- 1300块前放没有涂三防漆
- 3800块前放上接二极管的连线处没有点胶加固。
- 是否需要返工修复？吕军光的意见是：前放已经测试过并且已经装到晶体上了，不要再做变更。

前置放大器



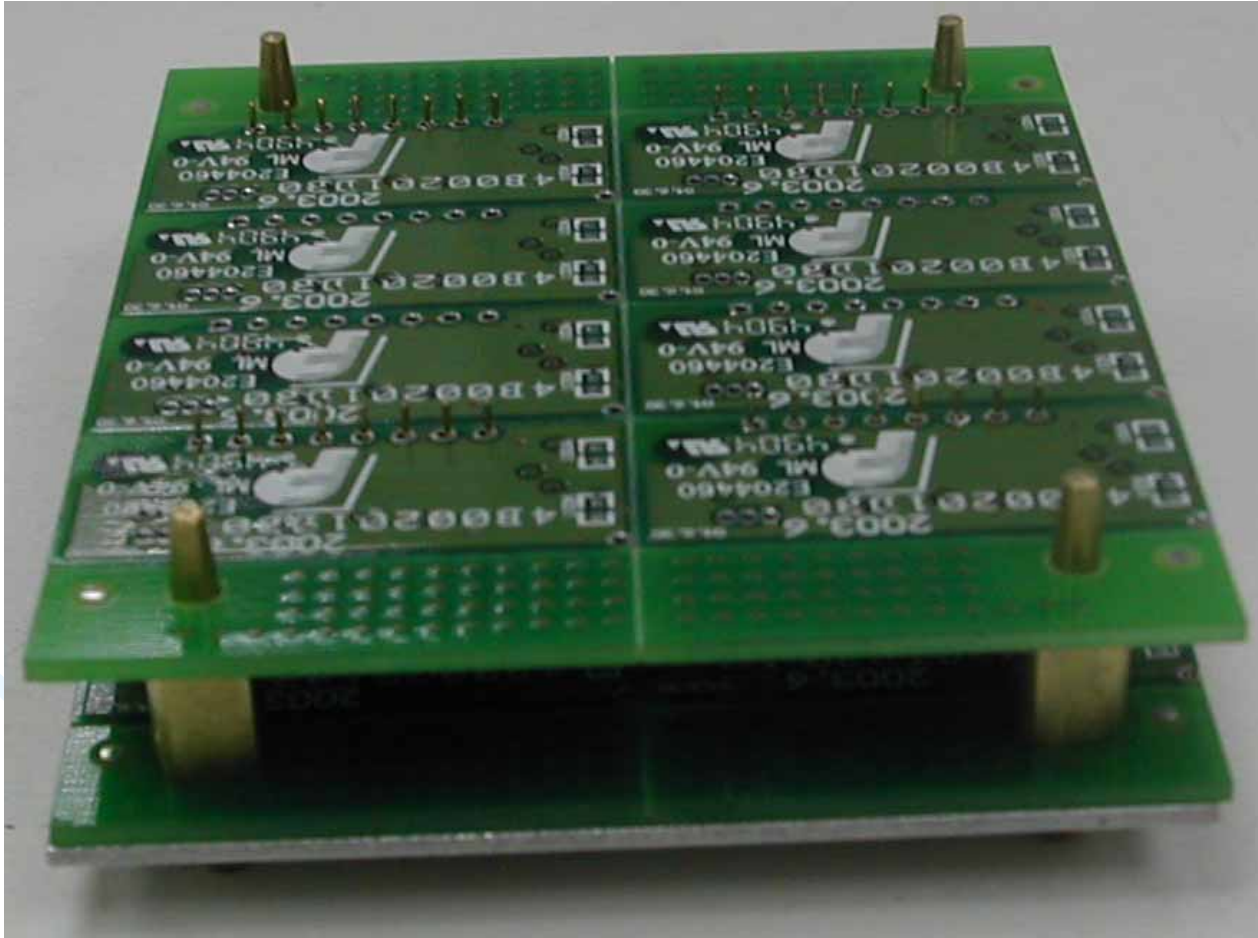
前置放大器屏蔽盒



前置放大器屏蔽盒检测工装



前置放大器子板插针焊接工装



前置放大器老化台



主放大器研制调试与生产

主放大器历经了**3**个版本的设计修改和**4**个版本的**PCB**设计以及对插件结构的多次修改后，又经过大量的调试工作，现在已经进入批量生产阶段。

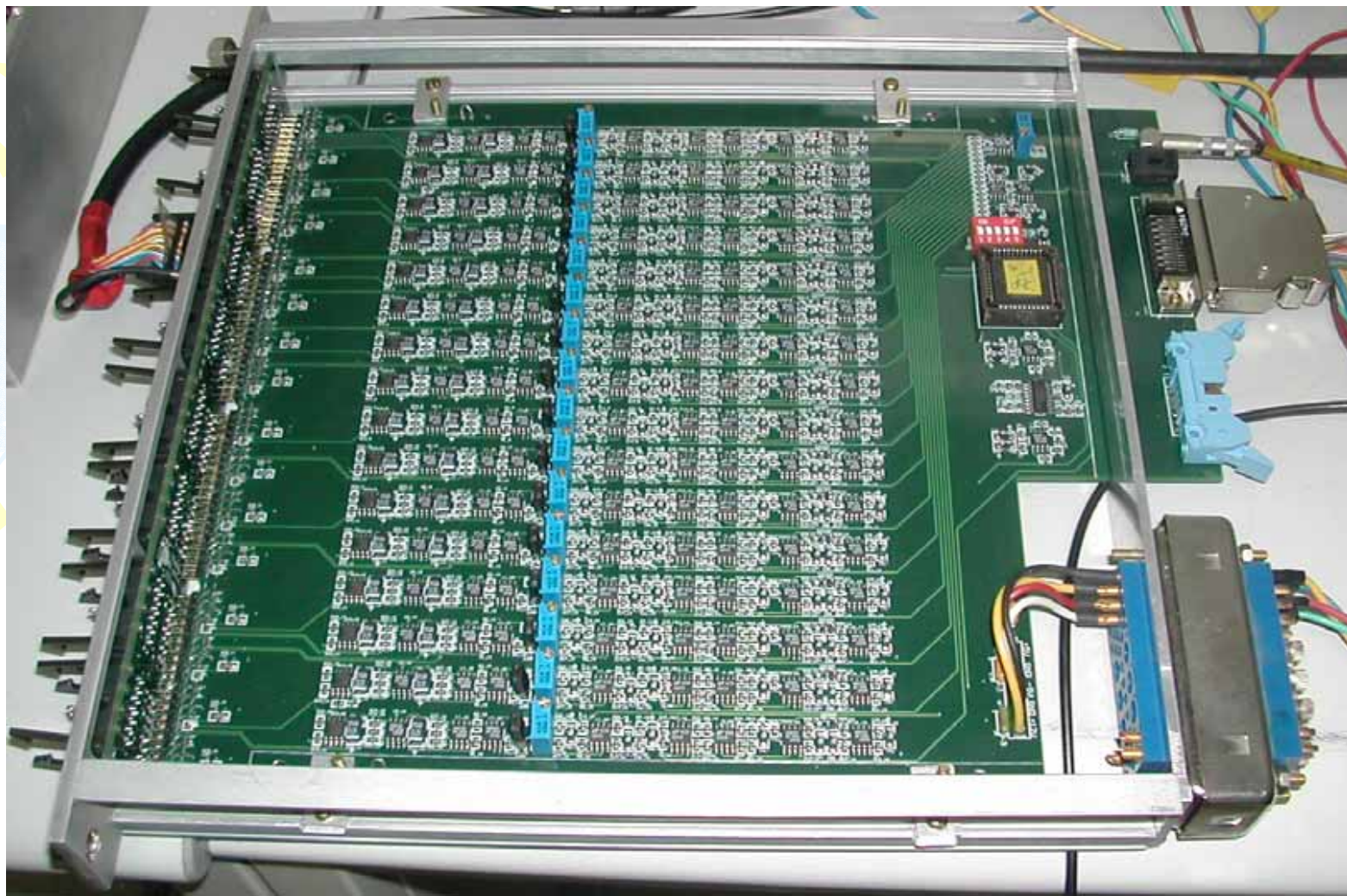
我们的具体做法：

- 1** 完成难度很大的实验室插件安装、焊接工作。
- 2** 用**DAC**信号对每一个主放插件（**6U NIM** 单宽）上的**16**个通道分别逐级进行调试，使其达到设计要求。同时剔除损坏的器件和解决出现的其他问题。
- 3** 在主放专用的小系统（前放+主放+测试控制插件+**Q**插件）上通过改变**DAC**（刻度）信号的大小，完成每个主放大器插件的测试
- 4** **EMC**电子学主放大器共计需有**460**个插件。目前，经过了**2**批的生产，已经完成了**35**台，此项工作正在紧张的进行。

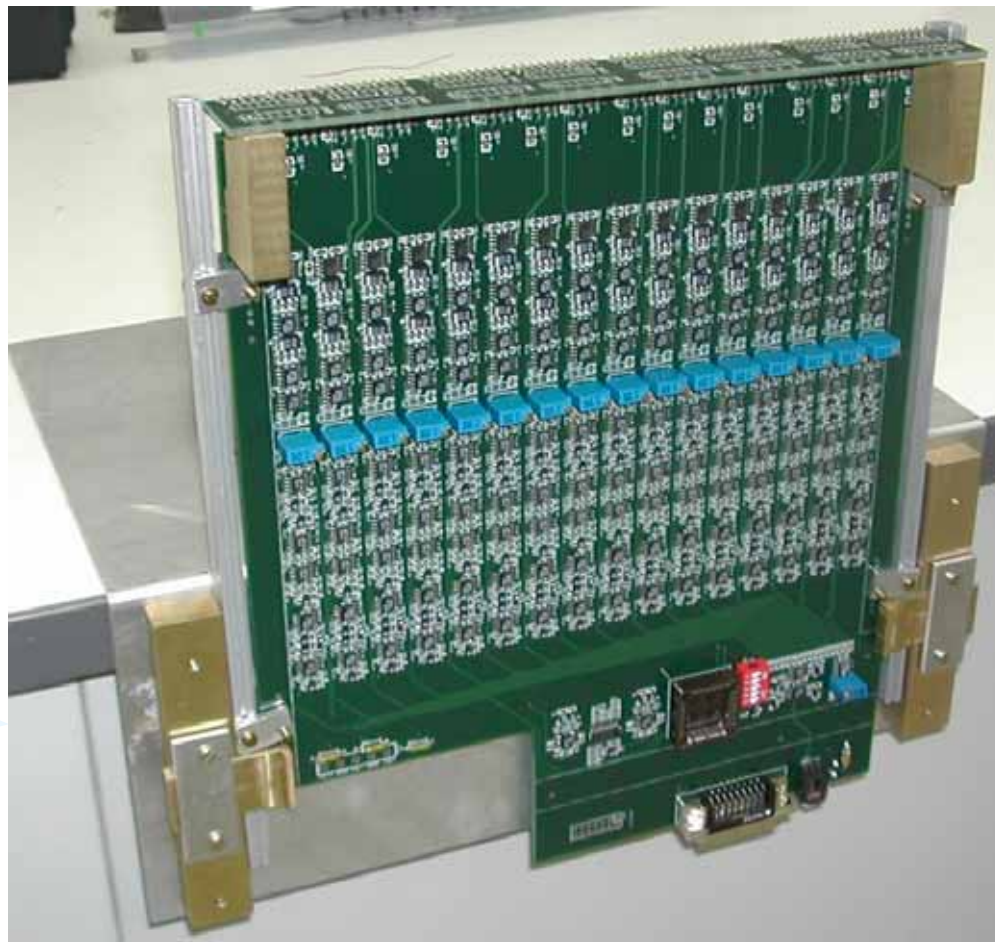
主放大器研制调试与生产

现在看来，主放的安装、调试工作量很大。按照目前的速度，全部插件（**460**个）的安装、调试需要**3**个月的时间，而大批量**PCB**制板需要**25**天，大唐厂焊接需要**15**天，在实验室的辅助焊接也需要不少的时间。按此计算，主放插件的生产须要**5**个月的时间，到**9**月底才能完成。

主放大器设计调试与生产



主放大器设计调试与生产



主放大器设计调试与生产



谢谢!

