

## TEGAM 公司 PM 系列微波小功率校准系统

### 由 SYS II(系统 II) 到 PM

#### 1. 国内功率校准的现状

射频功率参数是无线电最基本的参数之一，根据功率大小功率参数有小功率，中功率，大功率之分，通常微波小功率功率计是最大多数使用的，所以微波小功率校准系统是最先要建立的，即 100mW 以下的功率标准。

##### 1.1. 功率传感器种类

按照测试原理，功率传感器通常分为三种：热敏电阻传感器，热电偶传感器和二极管传感器。热敏电阻功率传感器以测试精度高为特点，主要被选用在建立功率基标准和传递标准的计量和校准的应用，而热电偶和二极管传感器主要用来进行功率的测试。世界范围内，各国的射频功率基准和标准都是在热敏电阻传感器的基础上建立的，例如中国国家计量院和国防一级计量站(航天 203 所)。TEGAM 公司的功率校准里面的 F1130B、F1135B 和 2510A 等传递标准和 1830A 型功率计都是基于热敏电阻传感器的工作原理。下图为美国国家标准计量院(NIST)公布的热敏电阻和热电式传感器进行功率测试的不确定度比较。

<b>Typical Effective Efficiency Uncertainties for Coaxial Thermistor and Thermoelectric Detectors</b>			
<b>Connector Type</b>	<b>Frequency Range</b>	<b>Thermistor Uncertainties</b>	<b>Thermoelectric Uncertainties</b>
Type-N	0.1 MHz to 10.0 MHz	0.0028-0.005	N/A
	10 MHz to 18.0 GHz	0.003-0.0073	0.013-0.016
GPC7	10 MHz to 18.0 GHz	0.007-0.016	N/A
3.5 mm	0.05 GHz to 33.0 GHz	0.0067-0.017	0.017-0.022
2.92 mm	0.05 GHz to 40.0 GHz	0.007-0.023	0.018-0.023
2.4 mm	0.05 GHz to 50.0 GHz	0.007-0.028	0.016-0.031

##### 1.2. 功率传感器的校准项目

主要校准项目为：电压驻波比或反射系数模，校准因子。电压驻波比使用矢量网络分析仪进行校准。校准因子常用的校准方法共三种：交替比较法、传递标准法、六端口法。传递标准法是目前国内无线电一级计量站航天 203 所和所有二级计量实验室普遍采用的方法，因为这种方法原理简单、操作简单、溯源路径清晰、不确定度最低。

##### 1.3. 检定规程和溯源

目前国内主要遵循的功率检定规程为“GJB/J 3598-99, 小功率座检定规程”，这一规程是由航天 203 所起草的，一直执行至今。在该规程里面，对传递标准法的校准方法进行了描述和规范。

北京无线电技术研究所，即航天 203 所，作为国防无线电参数的一级计量站，负责建立射频功率参数的国防标准，并进行维护，定期对整个国防计量系统进行功率标准的传递工作，同时也受“中国合格评定国家认可委员会”CNAS 的委托，作为评定实验室的具体实施机构。每年，航天 203 所也会组织系统内的功率传递大会，届时各个计量实验室都可以将自己的标准带到会议上，由 203 所进行标准的传递工作。

## 2. TEGAM 公司 PM 微波功率校准系统

从 80 年代开始，TEGAM 公司的微波功率校准系统就陆续在国内的国防计量实验室和第三方计量实验室使用，当时的系统名称为 System II，目前国内已经有接近 100 家单位在使用。从最开始的同轴 4.2GHz 系统、18GHz 系统、26.5GHz 系统，到目前的同轴 50GHz 校准系统，TEGAM 公司一直在功率校准这个领域进行开发。基于目前的小功率校准，TEGAM 公司未来会向中大功率合高频校准系统发展。

TEGAM 公司的校准系统在世界范围内被广泛地使用，对最大多数的厂家的功率传感器和功率计进行基于传递标准法的校准。校准系统里面采用的功率测试是基于热敏电阻传感器进行的。

## 3. 传递标准法工作原理

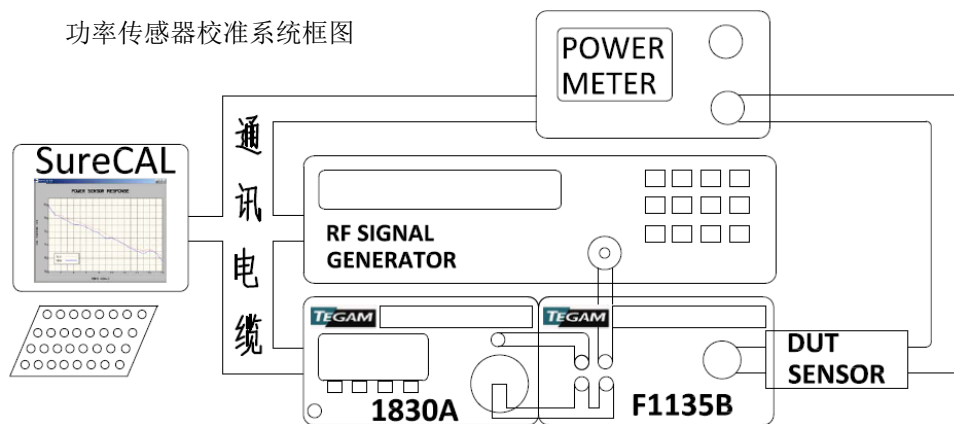
微波小功率量值传递主要指功率计传感器探头校准因子  $K$  从最高计量机构向下一级计量机构的传递过程，从而保证功率量值的准确性和一致性。在国内，就是从一级实验室(航天 203 所)向下级实验室传递。

传递标准法即利用传递标准进行校准因子传递的方法。传递标准一般由功分器，热敏电阻式功率座，标准功率计组成。目前 TEGAM 公司的传递标准已经把功分器和热敏电阻式功率座集成到一起，无须用户外接。如下图所示的微波小功率校准系统，被校准的传感器校准因子

$$k = \frac{P_{DUT} K_F}{P_{1830A}}$$

其中  $P_{DUT}$  为被校准功率传感器功率指示器的读数， $P_{1830A}$  为连接传递标准 F1130B 或者 2510A 的输出功率值，该值等于 1830A 标准功率计的读数， $K_F$  为 TEGAM 公司的传递标准 F1130B 或者 2510A 的校准因子（出厂时已得到，或从上一级计量机构溯源得到）。

上述计算只是最简单的等效公式，更详细的计算和不确定度分析需要考虑失配和仪表的不确定度等因素，可参照更详细的学习资料，例如由国防科工委科技与质量司编写的“无线电电子学计量”这一教材。



此处可为 F1130B 或 2510A

#### 4. TEGAM 功率传递标准的种类

功率传递标准按照校准目的不同，可分为通过式传递标准和终端式传递标准。

##### 4.1. 通过式传递标准

通过式标准主要用来对现场使用的各种功率探头进行校准，TEGAM 的常用通过式标准为：F1130B, F1135A, 2510A。另外还有功率可扩展至 250mW 的 F1109H 型通过式传递标准。

##### 4.2. 终端式传递标准

终端式标准主要用来对通过式标准进行校准，也称为核查标准，用来核查功率校准系统的稳定性。常用终端式标准为：M1130A, M1135A 和 1510A；这些标准对应的是 18GHz、26.5GHz 和 50GHz 的频率上限，F/M1130B 的下限频率可到 100KHz，其它的标准下限频率到 10MHz。终端式标准用处如下：

- 校准（核查）通过式传递标准（可参考 JIG447-86 同轴功率传递标准检定规程）
- 校准通过式功率计
- 配合标准功率计 1830A 进行 50M (1mW)的参考输出的校准
- 配合标准功率计 1830A 进行等效信号源的 SWR 的测试
- 进行精密功率测量

#### 5. TEGAM 公司 PM 系统主要组成部分

##### 5.1 通过式标准 F1130B 或者 F1135B 或者 2510A：1 个或者多个。

该系列传递标准，与 1830A 一起工作，校准各种功率传感器，分别覆盖 100KHz—18GHz，或者 10MHz-26.5GHz，或者 10MHz—50GHz 的频率范围。该传递标准溯源至美国 NIST(美国国家标准计量院)。

##### 5.2 1830A：1 台或者 2 台。

计量级功率计，与传递标准 F1130B，或者 F1135B 或者 2510A 工作，控制传递标准里面的温度，读取传递标准的功率值。该功率计具备很低的不确定度。

##### 5.3 连接 1830A 与 F1130B 等传递标准之间的各种加热电缆、测试电缆：多根

##### 5.4 SureCAL 软件：1 套

对信号源、功率计和矢网等进行控制，自动测试反射系数和校准因子，根据实测的反射系数值，对校准因子结果进行反射系数修正，使校准因子的结果更优化。生成动态不确定度，即根据每个频点的校准因子结果实时生成该频点校准因子的不确定度，动态不确定度最低。通过对功率传感器内部的 EPROM 进行编程 (即校准因子的读写)，修正校准因子的偏差，实现真正的校准。

##### 5.5 终端式标准 M1103A 或者 M1135A 或者 1510A：1 个或者多个

该系列传递标准主要用来进行通过式功率计的校准，和上述通过式传递标准的核查，还有就是配合 1830A 标准功率计对功率计等 50MHz/1mW 的参考输出进行校准。

##### 5.6 系统所需射频元件：射频电缆、转接头、放大器、力矩扳手、便携箱等。

#### 6. 功率指示器的校准

严格意义上，除了要对功率传感器进行检定之外，还需要对功率指示器进行检定。功率指示器的检定项目通常有：准确度和功率基准电平。在实践中，准确度可以通过功率传感器与功率指示器整体进行功率校准标定校准因子的方式进行检定，所以也可以不单独对功率指示器的量程读数进行检定。某些公司也提供“量程校准器”，用来对功率指示器的量程进行校准。而对于 1mW@50MHz 的参考输出的校准，可以使用 TEGAM 1830A 与 M1130B 配合进行校准，该装置为国家一级标准，可以提高校准准确度。



## 7. 校准系统配置方案举例(100KHz-18GHz, 100KHz-26.5GHz, 100KHz-50GHz)

### 7.1. 校准系统的基本配置

满足日常的功率传感器的校准需求，最基本的配置为：计量级标准功率计和通过式传递标准。在此基础上，可考虑增加核查标准，增加自动测试和探头 EEPROM 编程的软件，等等。当然必要的射频电缆和接头也是实验室需要考虑在内的。需要注意的是，在同样频率范围内校准因子的不确定度，18GHz 传递标准要优于 50GHz 的传递标准，因此实验室需要明确主要覆盖的是哪个频率范围，在经费允许的情况下，将多个传递标准一同考虑是最佳方案。

### 7.2. 100 KHz—18GHz 校准系统

英文名称: PMX18 RF Power Sensor Calibration System				
中文名称: PMX18 微波功率校准系统				
项目	型号	描述	数量	用途
1	1830A	计量级功率计	2	标准功率计
2	F1130B	100KHz 到 18GHz 通过式射频传递标准，带温度控制，同轴热敏电阻座内置功分器	1	传递标准 100KHz 到 18GHz
3	M1130A	100KHz 到 18GHz 核查标准，带温度控制，同轴热敏电阻座	1	做 18GHz 核查使用；校准功率指示器 50MHz/1mW 参考输出
4	1820B	双路温度控制器	1	温度控制传递标准
5	11683A	量程校准器，适用于 Agilent 功率指示器	1	校准 Agilent 功率指示器量程
6	CA-7-15	1830A 连接 F1130B/M1130A 传递标准的测试线缆	2	连接传递标准与标准功率计 1830A
7	CA-11-48	1830A 连接 F1130B 传递标准的加热线缆	1	传递标准加热线缆
8	CA-10-48	1830A 连接 M1130A 标准的加热线缆	1	传递标准加热线缆
9	CA-20-48	校准 1830A 用连接线缆	1	单独校准 1830A
10	SureCAL-PM	自动控制校准软件，支持各种射频仪表，包含 SWR 和校准因子的自动测试，并计算不确定度，对探头 EPROM 编程	1	系统自动测试软件
11	1585-1000	18GHz 射频电缆，SMA 接头，低损耗，1 米	1	连接信号源与传递标准
12	1130-911-01	力矩扳手，适用于 N 型接头	1	力矩扳手
13	1130-910-01	力矩扳手，适用于 SMA, 3.5mm 和 2.92mm 接头	1	力矩扳手
选件	F1109H	高功率通过式传递标准，功率范围扩展至 250mW	1	校准 0.1mW-250mW 功率探头

### 7.3. 100KHz—26.5GHz 校准系统

英文名称: PMX26-100K RF Power Sensor Calibration System				
中文名称: PMX26-100K 微波功率校准系统				
项目	型号	描述	数量	用途
1	1830A	计量级功率计	2	标准功率计

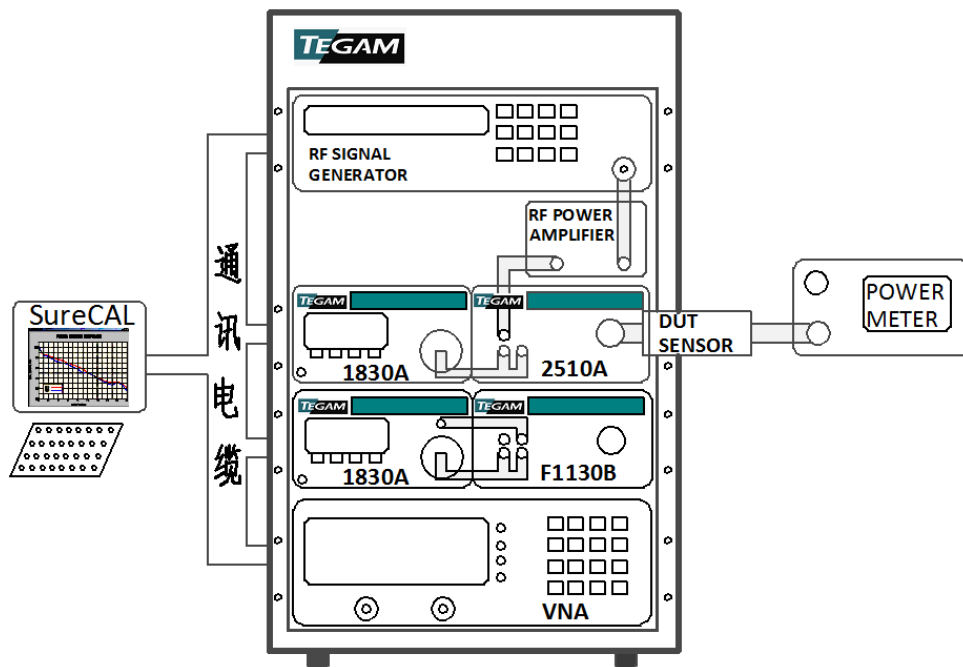
2	F1130B	100KHz 到 18GHz 通过式射频传递标准,带温度控制,同轴热敏电阻座内置功分器	1	传递标准, 100KHz 到 18GHz
3	F1135B	10MHz 到 26.5GHz 通过式射频传递标准,带温度控制,同轴热敏电阻座内置功分器	1	传递标准, 10MHz 到 26.5GHz
4	M1130A	100KHz 到 18GHz 核查标准,带温度控制,同轴热敏电阻座	1	做 18GHz 核查标准; 校准功率指示器 50MHz/1mW 参考输出
5	M1135A	10MHz 到 26.5GHz 终端式传递标准,带温度控制,同轴热敏电阻座	1	做 26.5GHz 核查使用
6	1820B	双路温度控制器	1	温度控制传递标准
7	11683A	量程校准器,适用于 Agilent 功率指示器	1	校准 Agilent 功率指示器量程
8	CA-7-15	1830A 连接 F1135B/F1130B/M1130A/M1135A 传递标准的测试线缆	4	连接传递标准与标准功率计 1830A
9	CA-11-48	1830A 连接 F1135B/F1130B 传递标准的加热线缆	2	传递标准加热线缆
10	CA-10-48	1830A 连接 M1130A/M1135A 标准的加热线缆	2	传递标准加热线缆
11	CA-20-48	校准 1830A 用连接线缆	1	校准 1830A
12	SureCAL-PM	自动控制校准软件,支持各种射频仪表,包含 SWR 和校准因子的自动测试,并计算不确定度,对探头 EPROM 编程	1	系统自动测试软件
13	1585-1000	SMA 低噪声射频电缆, DC-18GHz	1	连接信号源与 18GHz 传递标准
14	1585-1008	3.5mm 低损耗射频电缆, DC-26.5GHz	1	连接信号源与 26.5GHz 传递标准
15	1130-911-01	力矩扳手,适用于 N 型接头	1	N 型力矩扳手
16	1130-910-01	力矩扳手,适用于 SMA, 3.5mm 和 2.92mm 接头	1	SMA, 3.5mm 和 2.92mm 力矩扳手
选件	F1109H	高功率通过式传递标准,功率范围扩展至 250mW	1	校准 0.1mW-250mW 功率探头

#### 7.4. 100 KHz—50GHz 校准系统

英文名称: <b>PMX50-100K RF Power Sensor Calibration System</b>				
中文名称: <b>PMX50 微波功率校准系统</b>				
项目	型号	描述	数量	用途
1	1830A	计量级功率计	2	标准功率计
2	2510A	10MHz 到 50GHz 通过式射频传递标准,带温度控制,同轴热敏电阻座内置功分器, 2.4mm 接头	1	传递标准: 主要覆盖 18GHz 到 50GHz 频率范围
3	F1130B	100KHz 到 18GHz 通过式射频传递标准,带温度控制,同轴热敏电阻座内置功分器, SMA 接头	1	传递标准: 主要覆盖 100KHz 到 18GHz 频率范围
4	M1130A	100KHz 到 18GHz 核查标准,带温度控制,同轴热敏电阻座	1	校准功率指示器 50MHz/1mW 参考输出; 核查 F1130B
5	1510A	10MHz 到 50GHz 核查标准,带温度控制,同轴热敏	1	核查 2510A

		电阻座		
6	1820B	双路温度控制器	1	温度控制传递标准
7	11683A	量程校准器, 适用于 Agilent 功率指示器	1	校准 Agilent 功率指示器量程
8	CA-21-48	1830A 连接 2510A 传递标准的线缆, 测试和加热合二为一	1	连接 1830A 与 2510A
9	CA-7-15	1830A 连接 F1130B 传递标准和 M1130A 的测试线缆	2	连接 1830A 与 F1130A 测试线
10	CA-11-48	1830A 连接 F1130B 传递标准的加热线缆	1	传递标准加热线
11	CA-10-48	1830A 连接 M1130A 标准的加热线缆	1	传递标准加热线
12	CA-20-48	校准 1830A 用连接线缆	1	校准 1830A
13	SureCAL-PM	自动控制校准软件, 支持各种射频仪表, 包含 SWR 和校准因子的自动测试, 并计算不确定度, 对探头 EPROM 编程	1	系统自动测试软件
14	1585-1000	18GHz 低噪声射频电缆, SMA 接头, 低损耗, 1 米	1	连接信号源与 18GHz 传递标准
15	CA-23-36	50GHz 低噪声射频电缆, 2.4mm 公头, 0.9 米	1	连接信号源与 50GHz 传递标准
16	2510-911-01	计量级射频转接头, 2.4mm 公转 2.92mm 母	1	校准 40GHz 探头
17	2510-912-01	计量级射频转接头, 2.4mm 公转 3.5mm 母	1	校准 26.5GHz 探头
18	1130-911-01	力矩扳手, 适用于 N 型接头	1	N 型力矩扳手
10	1130-910-01	力矩扳手, 适用于 SMA, 3.5mm 和 2.92mm 接头	1	SMA, 3.5mm 和 2.92mm 力矩扳手

100 KHz-50GHz 完整功率校准系统框图



## 8. TEGAM 公司 PM 系统主要组成部分规格指标

### 8.1. 1830A 标准功率计/控制器

功率范围	-30 to +14 dBm (0.001 mW to 30 mW)
频率范围	100kHz~110GHz 取决于传感器
读数精度	±0.05% of reading, ±0.5 μW (0.1% at 1 mW)
校准因子分辨率	4 位半
桥电阻可变	from 50 Ω to 300 Ω (RF termination 12.5 Ω to 75 Ω)
仪器控制	Ethernet or USB



### 8.2. F1130A: 100KHz-18GHz 传递标准的规格指标

频率范围	100 kHz to 18 GHz
功率范围	0.01 to 25 mW (-20 to 14 dBm)
最大驻波比	1.06 from 100 kHz to 6 GHz 1.10 from 6 to 15 GHz 1.14 from 15 to 18 GHz
功率线性度	<0.1 % from 1 to 10 mW
插入损耗	6 dB nominal, 9 dB max
校准因子精度	+/-0.80% from 0.1 to 10 MHz +/-1.00% from 0.01 to 10 GHz +/-1.10% from 10 to 18 GHz
校准因子漂移系数	<0.5 % per year
射频输入阻抗匹配	50 Ohms
热敏电阻值加直流偏置时	200 Ohms
射频输入连接头	SMA



### 8.3. F1135B: 10MHz- 26.5GHz 传递标准的规格指标

频率范围	10MHz to 26.5GHz
功率范围	0.01 to 25 mW (-20 to 14 dBm)
最大驻波比	1.25 from 10MHz to 18GHz 1.35 from 18GHz to 26.5GHz
功率线性度	<0.1 % from 1 to 10 mW
插入损耗	6 dB nominal, 9 dB max
校准因子精度	+/-1.0% from 10MHz to 40 MHz +/-1.25% from 50MHz to 4 GHz +/-1.5% from 4.2GHz to 12 GHz +/-2.2% from 12.2GHz to 17.5 GHz +/-2.5% from 17.75GHz to 26.5 GHz
校准因子漂移系数	<0.5 % per year
射频输入阻抗匹配	50 Ohms
热敏电阻值加直流偏置时	200 Ohms
射频输入连接头	3.5mm female



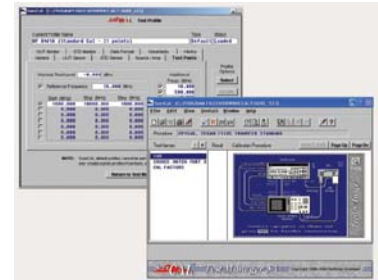
#### 8.4. 2510A: 10MHz-50GHz 功率传递标准的规格指标

频率范围	10MHz—50GHz
输入功率范围	0.1mW – 50mW (-10dBm-- + 17dBm)
校准因子漂移	<0.5% /年
典型反射系数(模值)	10 MHz to 100 MHz: 0.0147 100 MHz to 2 GHz: 0.0244 2 GHz to 12.4 GHz: 0.0430 12.4 GHz to 18 GHz: 0.0521 18 GHz to 26.5 GHz: 0.1031 26.5 GHz to 40 GHz: 0.2157 40 GHz to 50 GHz: 0.2842
功率线性度	<0.1% 1-10mW
校准因子精度	<1.98% 50MHz, <4.5% 50GHz
插入损耗	6 to 10.5 dB (典型值)
接头类型	2.4 mm Female



#### 8.5. 自动控制校准软件 SureCAL-PM

测试功能:	反射系数,校准因子
EPROM 读写:	是
不确定度计算	(1) 根据实测反射系数对校准因子进行修正 (2) 动态不确定度:即根据每个频点校准因子结果实时生成该频点校准因子的不确定度
支持的传感器:	Agilent, Anritsu, Boonton, Giga, R&S 等
支持的射频仪器:	内置多种仪器的驱动程序:功率计、信号源、矢网等
校准程序:	预置多个校准程序; 可修改, 可自定义



### 9. TEGAM 公司 PM 系统主要特点

- 唯一采用热敏电阻直流替代法进行功率测量和校准
- 唯一支持多个厂家功率探头 EPROM 编程(需配合 SureCAL 软件): Agilent, Anritsu, Giga, Boonton, R&S
- 最低不确定度。直接溯源至美国国家标准计量院、国内溯源至国防一级计量实验室
- 频率覆盖范围宽: 100KHz—50GHz
- 未来可考虑基于该系统向中、高功率校准系统升级

### 10. 国内部分客户列表 (见下页)



**航空集团:**

中航工业空空导弹研究中心  
中航工业沈飞集团  
中航工业西安阎良试飞院  
上海飞机制造有限公司

**中船集团:**

中船 701  
中船 722

**兵器工业:**

兵器工业 206 所

**中电集团:**

中电 2 所  
中电 5 所  
中电 7 所  
中电 10 所  
中电 12 所  
中电 13 所  
中电 14 所  
中电 20 所  
中电 29 所  
中电 38 所  
中电 41 所  
中电 54 所  
中电 55 所

**航天集团:**

湖北航天技术研究院  
贵州航天工业有限公司  
航天科工集团第二研究院 203 所  
航天二院 23 所  
航天二院 25 所  
航天科工集团第三研究院  
航天一院 102 所  
航天五院 504 所  
航天五院 514 所  
上海航天技术研究院 808

**总装备部:**

西昌基地  
江阴基地  
西安基地  
甘肃基地  
太原基地  
洛阳基地

海军、空军、二炮等多个计量站  
总参多个计量站  
多个省市级计量院、所  
工信部属的多个计量实验室  
富士康、RFMD 等多个工业界客户  
长岭、烽火等多家军工企业