

一种超短波八木天线

作品说明书

作者声明：不准把本文件上传到（包括但不限于）百度文库、道客巴巴、豆丁网、新浪共享、CSDN、PUDN 等积分文档分享平台。

2015/3/31

宋佳驹
BG3ILA
bg3ila@foxmail.com

一种超短波八木天线

目录

- 一种超短波八木天线..... i
- 目录..... i
- 1 设计要求..... 1
- 2 电气设计..... 2
 - 2.1 主梁设计：增益与长度..... 2
 - 2.2 振子设计：位置与尺寸..... 2
 - 2.3 馈电设计：变换与匹配..... 6
- 3 机械设计..... 10
 - 3.1 风载预算：安全第一..... 10
 - 3.2 主梁连接：平衡增益尺寸..... 10
 - 3.3 振子安装：选择极化方式..... 11
- 4 数值仿真与天线制作..... 13
 - 4.1 矩量法软件计算..... 13
 - 4.2 制作天线..... 15
 - 4.3 性能测试..... 16
- 附录..... 21
 - A、天线装配图和零件图..... 21
 - B、2m 波段实测电压驻波比特性..... 21
 - C、70cm 波段实测电压驻波比特性..... 23
- 参考文献..... 24
- 设计图纸..... 24

1 设计要求

八木天线具有优良的电气性能，广泛应用于超短波固定电台通信，也是广受业余无线电爱好者（HAM）欢迎的高性能天线。

1、通过不同的组装方式，可以部署工作在超短波频率范围中全部四个业余波段上，具有一定的宽带工作性能；

2、天线的主梁长度可变，在频率较高的三个波段上各提供三种不同增益-体积的组合方式，以适应不同的环境；

3、可以组装为适合卫星业余业务和跨段中继器的 2m/70cm 双波段天线；

4、此外通过一些必要的计算与调节，天线还可以工作在超短波非业余波段的其它频率上，例如可用来接收广播、电视；

5、天线拆卸后须为杆状部件，最长部件不超过 2m（实际设计结果不超过 1.9m），可装在便携布袋中；组装后主梁长度为限制在 5m 以内（实际设计选为 4.5m），最大重量不超过 10kg，单人就可以轻易搬运安装。

世界电联（ITU）规定的超短波（VHF）波段四个业余业务、业余卫星业务频段为^[1]：

6m 波段：50-54 MHz 业余业务划分给 2 区和 3 区。

2m 波段：144-146 MHz 业余业务、卫星业余业务划分给全球；

146-148 MHz 业余业务划分给 2 区和 3 区。

1.25m 波段：220-225 MHz 业余业务划分给 2 区。

0.7m 波段：430-440 MHz 业余业务划分给全球。卫星业余业务使用本波段需要干扰协调。

以上四个波段为本天线主要优化设计保证性能的波段。中国处于 ITU 第三分区，故其中 1.25m 波段在中国不用做业余业务。

^[1] ITU 《无线电规则》2012 版，《频率划分》

2 电气设计

2.1 主梁设计：增益与长度

理论和实际测量表明，更长的八木天线可以得到更高的前向增益。对于天线梁长大于波长的1~2倍的八木天线，称为长八木天线；反之为传统八木天线。美国无线电传播联盟（ARRL）的《天线手册》给出了长八木天线梁长与最大前向增益的关系如图所示^[1]。横轴表示主梁长度与工作波长的比值，纵轴是以 dBi 为单位的最大前向增益。

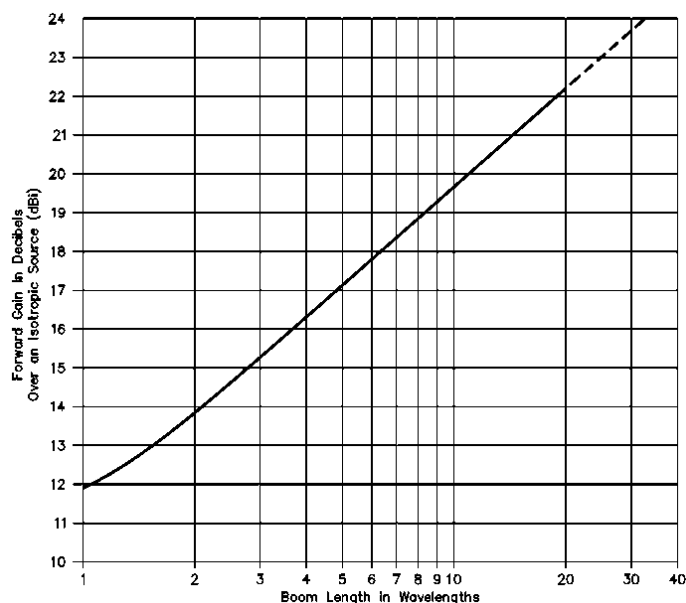


图 1 八木天线梁长/波长比和最大增益的关系

根据第一节中提到的设计要求，选择可以接受的八木天线主梁最大长度为 4.5m。对于 2m、1.25m、0.7m 四个波段，这一长度的梁长波长比分别为 2.25、3.6、6.42，由图可知，能获得的最大增益为 14dBi、15.5dBi、18dBi。

对于 6m 波段，4.5m 的梁长不满 1 个波长，只能用传统八木天线设计方法。本设计中采用已有的传统四单元 6m 八木天线结构尺寸。传统八木天线方向系数 D 可以采用经验公式

$$D \approx 10 \frac{L}{\lambda} \text{ 估计，其中 } L \text{ 为梁长，} \lambda \text{ 为波长，约为 } 7.5, \text{ 相当于 } 8\text{dBi}。$$

为了便携，4.5m 长的主梁被分为三段。安装时选择是否连接更远端的引向器和主梁就实现了三种不同的增益。主梁的材料选用铝管，考虑到供货情况，最后制作的三段主梁中间一段（主梁 B）外径 38mm，内径 34mm；两侧的两段（主梁 A、C）外径 30mm，内径 26mm。

振子长度与主梁直径有关，详情 2.2.4 节：主梁直径修正。

主梁连接的细节参见下文：3.1 增益与主梁连接。

2.2 振子设计：位置与尺寸

对于长八木天线，增加引向器的数量可提高天线增益，而采用多激励振子对改善天线性能影响不大。多反射器或使用金属网、金属板材做反射器可以减少接收时的背向噪声，但会显著地增加天线风载。在本设计中，采用单反射振子、单激励振子、数量可调的多引向振子的天线结构。

通常选用质轻、导电性能好的铝材作为振子。应避免铜材太重的铜材，而不锈钢材料引起的损耗较大。

由于高频电磁波的趋肤效应，用铝管代替铝棒可以取得更轻的重量和相近的电气特性。

2.2.1 反射振子

反射振子的长度

当无源振子比有源振子（激励振子）长时，辐射将在该振子方向减弱，该振子称为反射振子。由于振子的缩短效应，反射振子的长度通常选择工作频率波长的 0.5~0.6 倍之间，必须大于工作频段最低频率相应的波长的一半（ $\lambda/2$ ）。

本设计中涉及的两个波段最低工作波长为 2.082m、1.363m 和 0.697m。

反射振子的位置

反射振子和激励振子之间的距离会影响天线前后比和输入阻抗。当距离为 $(0.15\sim0.17)\lambda$ 时，前后比较高，天线阻抗小，约 $15\sim20\Omega$ ；当距离为 $(0.2\sim0.23)\lambda$ 时，前后比下降，天线输入阻抗增加到 $50\sim60\Omega$ 。

在本设计中，选取较小的输入阻抗，采用的折合振子提升阻抗，以匹配传输线。直接选择 0.15λ 作为 2m、1.25m 和 0.7m 波段的反射振子位置。估计输入阻抗在 15Ω 左右。

反射振子的直径

无源振子的直径通常选在波长的 $1/40\sim1/250$ 范围内，与工作带宽有关。通过计算机软件可模拟振子直径的影响。为了保证机械性能和结构的坚固，在超短波波段，任何频率的八木天线中，都不要使用小于 5mm 的无源振子。

本设计中考虑铝材的供应，直接选择 6mm 直径的铝棒做无源振子。

2.2.2 激励振子

为了获得良好的匹配，激励振子的尺寸需进行计算。作为高增益的八木天线，对方向图的要求很高，为了避免馈电不平衡造成方向图退化，要选择一种平衡馈电的激励振子。设计中反射振子与激励振子间距离较近，导致输入阻抗很低，故选择可以提升阻抗的折合振子。

综上，在常用的馈电匹配模式中，平衡 T 型馈电是最合适的。具体激励振子及其匹配计算与实现见 2.3 节：馈电匹配。

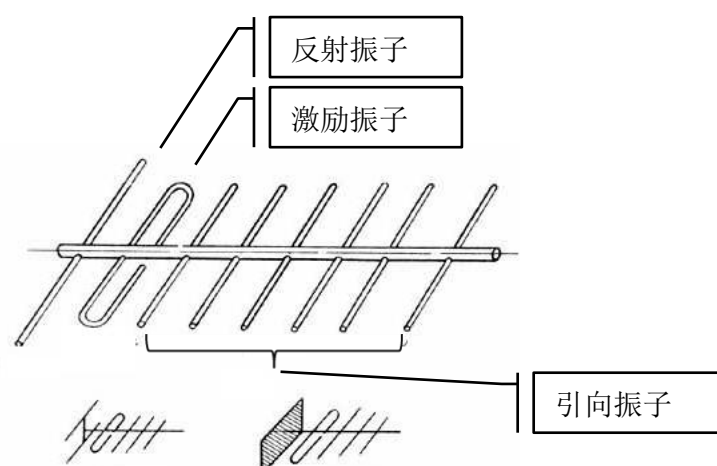


图 2 八木天线的结构

2.2.3 引向器

引向器的位置和长度

传统八木天线振子位置选择方案有两种，一种简单地让所有引向器间隔和长度都相等；另一种采用 0.6~0.7 的线性系数逐个缩短引向振子的长度。本设计并不直接采用传统的引向器位置，而采用了计算机优化得到的对数变化的引向器参数。

在 ARRL《天线手册》中，提供了 6m 八木天线的优化数据^[2]，和 144MHz、222MHz、432MHz 三个频率上优化的 K1OF 天线的计算机优化的尺寸实例^[3]。

以此为基础，利用 MMANA-GAL^[4]软件，以及经验曲线、经验公式进行优化，得到最终的天线引向器尺寸和分布。

对于 MMANA-GAL 软件的介绍，见下文 4.1 节：矩量法软件计算。

对于经验曲线优化的细节，将在下文中论述：2.2.4 梁直径修正、2.2.5 振子直径修正、2.2.6 频率修正。

引向器的直径

便于机械加工，选择和反射器相同的型号的铝材，即直径 6mm 的铝棒。

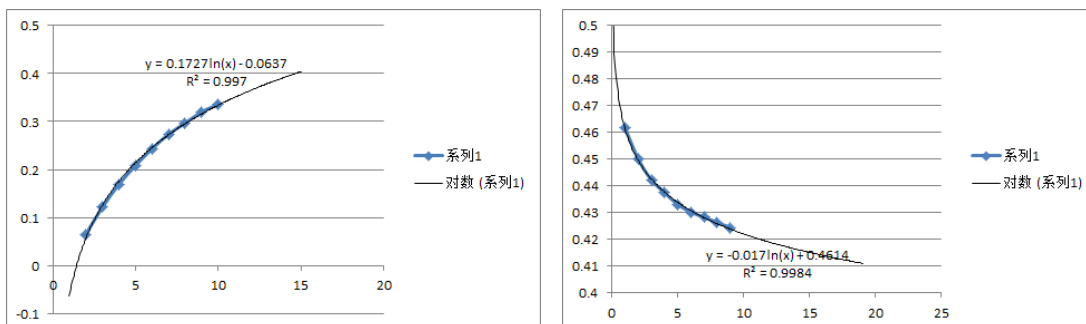


图 3 引向振子长度/波长比（左）和 间距/波长比（右）与引向器序号的关系

2.2.4 梁直径修正

由于偶极振子中点电位为零，主梁和振子中点并不需要电气绝缘，故连接方法很灵活。主梁的材料可以选用电导的金属或不导电的木材；振子可以以穿过主梁或采用在主梁上方的机械连接；当主梁导电时，振子可以与主梁绝缘或不绝缘。

当主梁采用绝缘材料时，振子长度可直接使用自由空间长度。否则要对振子的长度进行修正。ARRL 天线手册提供了梁直径修正曲线。曲线横轴是主梁直径和工作波长的比值，纵轴是要加在自由空间优化后振子长度上的修正值。曲线 A 是单元非绝缘穿过导电梁的修正值，曲线 B 上绝缘穿过导电梁的修正值。

本设计中采用尼龙螺栓绝缘穿过导电梁，采用曲线 B 的修正值。

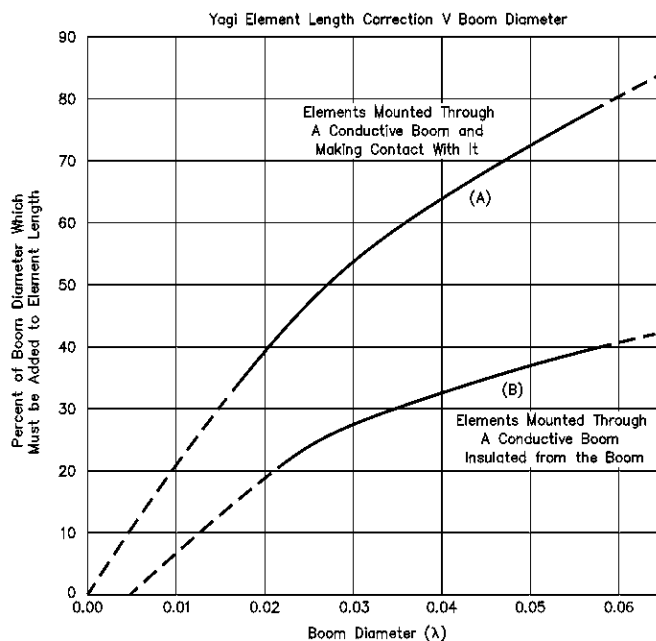


图 4 梁直径/波长比和振子长度修正值的关系

2.2.5 振子直径修正

振子直径和振子电气长度缩短系数有关。一定范围内，保持谐振频率不变，更粗的振子所需的长度更短。虽然缩短系数可以使用电磁理论精确地计算出来，但实践中仍采用经验值。

改变振子直径时，一个修正值被加在振子长度上。本设计中，首先采用 6mm 铝管材计算自由空间尺寸。在此基础上，若使用 5mm 铝材，将所有无源振子加长 6mm；使用 9mm 管材时将振子缩短 3mm。

改变振子直径后，新的振子长度还可以使用矩量法天线计算软件的优化功能得到。

2.2.6 频率修正

在同一个波段内，小范围移动天线的设计中心频率可以采用比例缩放的方法。对于设计中心频率 f_0 的天线，如果要修改设计中心频率为 f ，可以将振子长度按照 f_0 / f 的比值缩放。

2.2.7 制作与调整

分析表明，长八木天线在设计最优化频率较低一侧的很长一段频率范围都保持较好的特性，驻波-频率变化比较平缓。在最优化点较高一侧，驻波比会随着频率增加迅速增加。所以设计时，应当使用设计频带较高一端的频率作为最优化点。在优化引向振子位置和长度时，在 2m 波段选取的工作频率范围为 144-148MHz，以 147MHz 为最优点计算；在 1.25m 波段 222-225MHz 以 225MHz 计算；而在 70cm 波段 430-440MHz 以 439MHz 计算。

通过一系列的修正，得到了各个振子的理论值。机械加工振子长度公差应保持在 0.5mm 以内，而振子安装在主梁上后应处于同一平面内，每个振子的偏离平面不应超过 3 度。

按照理论结果加工制作的天线振子，可以直接使用。但要想发挥最好的性能，则在实际安装后还要经过调整。实践说明，影响天线驻波性能的振子主要为反射振子、激励振子和第一引向振子，而且这些影响和架设环境之间有关系。所以对于有经验的操作者，可以在这三根振子的末端安装一段长度 20cm 左右的拉杆天线。在天线组装架设后，通过驻波比仪表或便携式天线分析仪，调整振子末端的拉杆天线，得到最优性能。

2.3 馈电设计：变换与匹配

2m 波段、0.7m 波段和 1.25m 波段

- (1) 采用折合振子提升馈电点阻抗；
- (2) 平衡 T 型匹配；
- (3) U 形 1:4 平衡-不平衡变换。

整个馈电匹配系统先通过 1:4 U 形平衡-不平衡变换器（巴伦，BALUN）将传输线的 50 欧不平衡阻抗先变换为 200 欧平衡，再通过平衡 T 匹配向激励振子馈电，同时平衡 T 型匹配振子与激励振子组成的折合振子将 200 欧平衡阻抗以 1:10 的比例变换到 20 欧左右，等于八木天线的输入阻抗。

6m 波段

- (1) 使用偶极振子；
- (2) 发卡匹配（并联单支节短路线）；
- (3) U 形 1:4 平衡-不平衡变换。

6m 波段采用两臂直流绝缘的偶极振子而非折合振子。与收发信机相连的 50 欧同轴电缆先经过 U 形巴伦，得到 200 欧平衡阻抗，再通过并联短路支节，即“发卡匹配器”与偶极振子相连。

2.3.1 折合振子阻抗变换与平衡 T 匹配

在 2.2.1 节中，选择了较近的反射振子与激励振子间距，这导致天线馈电点阻抗很低。为了提升阻抗，采用折合振子阻抗变换技术。折合振子匹配决定了激励振子的长度、匹配振子的长度和两者的直径。

激励振子长度

激励振子长度略短于工作波长的一半。对于拥有天线调试仪器（如驻波表、天线分析仪）的用户，还可在激励振子两段安装拉杆天线，以便于调整，并可改变最优化工作频率。

匹配振子长度

匹配振子长度为激励振子长度的 70%。理论和试验表明，随着短路滑片之间间距变大，折合振子对阻抗的提升逐渐上升。当滑片位于大约激励振子长度 60%处时，阻抗达到最大。

激励振子与匹配振子间距

这一间距对匹配影响不大。选取为 80mm 左右。短路滑片的长度就是这一间距。调试时在两根振子上滑动短路滑片，找到驻波比最小的点。

激励振子和匹配振子的直径

两根振子的直径比值决定了折合振子最大阻抗变化比。

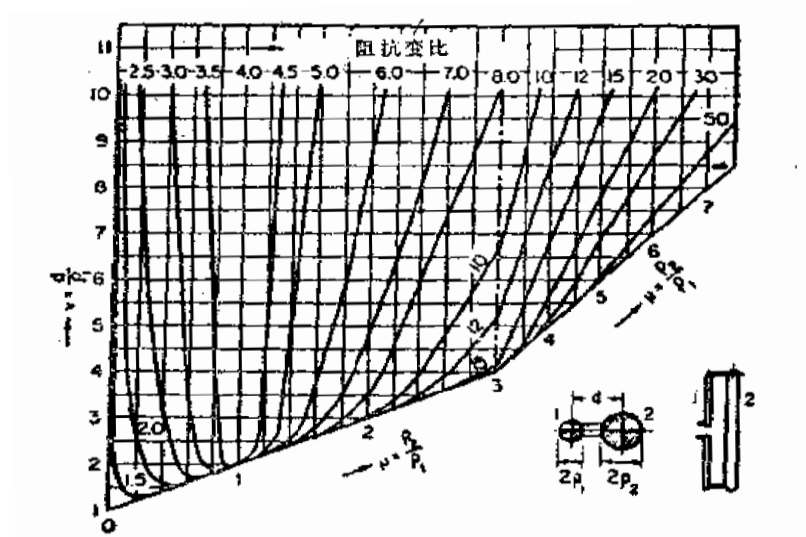


图 5 直径比、振子距离与阻抗变比的关系

对于 2m 波段，激励振子直径 9mm，为了得到 10 左右的阻抗变比，匹配振子直径应在 9/4 左右。可使用直径 3mm~4mm 的黄铜棒做匹配振子。

对于 0.7m 波段，激励振子直径 6mm，选用直径 1.5~2mm 的多芯铜导线作为匹配振子，而导线较软，必须固定在玻璃纤维支撑杆上。

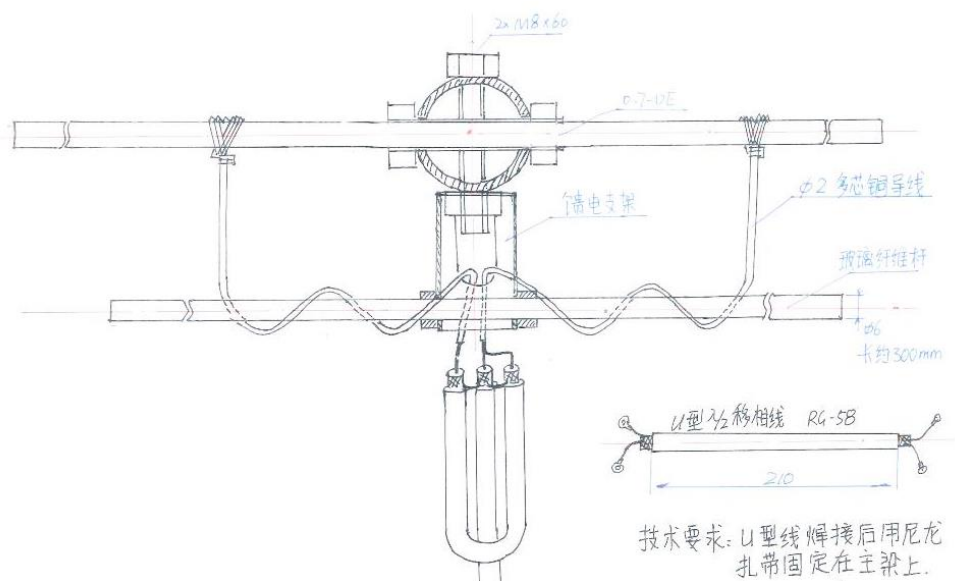


图 6-1 0.7m 波段激励振子与匹配系统

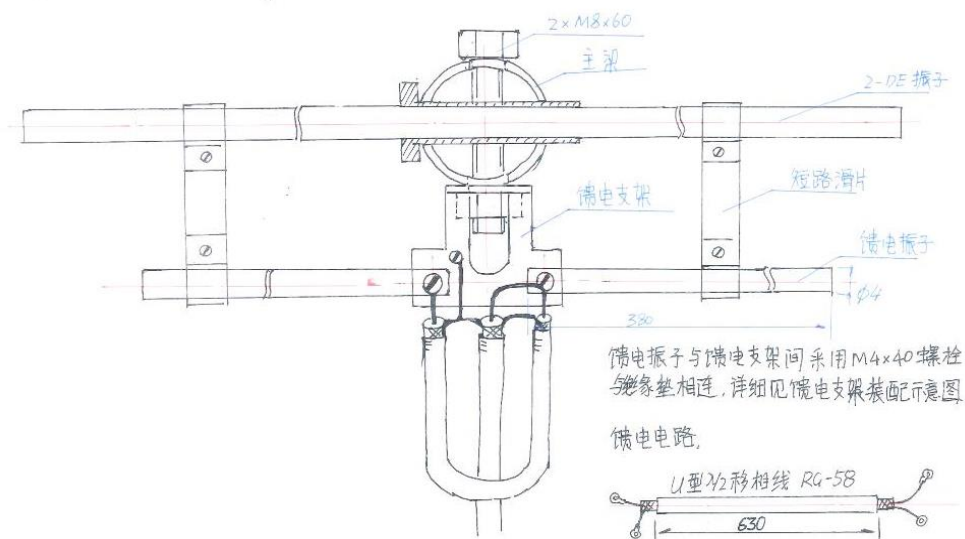


图 6-2 2m 波段激励振子与匹配系统

2.3.2 发卡匹配

发卡匹配是并联单支节匹配器的通俗名称，其宽度与直径与传输线阻抗有关，可利用双线阻抗公式计算；而其长度与需要匹配的天线阻抗相关，通常需要利用天线分析仪测量天线馈电点阻抗，再利用史密斯圆图计算。

本设计的 6m 波段，直接采用一种公开发表的 6m 八木天线设计图中的匹配参数。

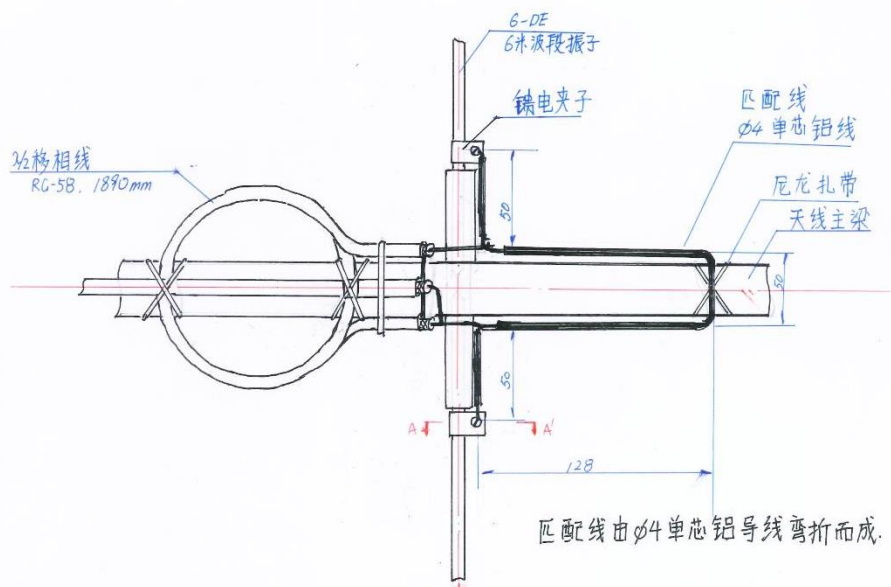


图 7 6m 波段采用的发卡匹配

2.3.3 传输线阻抗匹配和平衡-不平衡变换

现代业余无线电设备的天线输出接口均为 50 欧不平衡的同轴电缆输出。U 形匹配器是一段 1/2 波长同轴电缆，可将 50 欧不平衡接口变换为 200 欧平衡形式。

匹配器选用 RG-58A/U 同轴电缆，厂家提供的缩短系数约为 60~66%，1/2 波长传输线的物理长度为 0.30~0.33 倍波长。

选取匹配器的中心频率选为工作带宽的频率中心，以在其两侧得到最宽的可用带宽。四个波段 U 型匹配线的参数如下表，具体电气连接方式见所附图纸。

波段	频率范围 (MHz)	中心频率 (MHz)	中心波长 (m)	匹配线长度 (约)(mm)
6 米	50 ~ 54	52	5.76	1890
2 米	144 ~ 148	146	2.05	646
1.25 米	220 ~ 225	223	1.34	423
70 厘米	430 ~ 440	435	0.69	217

表 1 各波段半波长匹配线理论长度

[1] 《The ARRL Antenna Book》第 19 版，第 18 章 21 页。

[2] 《The ARRL Antenna Book》第 19 版，第 18 章 19 页

[3] 《The ARRL Antenna Book》第 19 版，第 18 章 21~32 页。

[4] MMANA-GAL 官方网站 <http://hamsoft.ca/pages/mmana-gal.php>

3 机械设计

3.1 风载预算：安全第一

2m/70cm 振子全部安装时具有最大的迎风截面。2m 振子直径 6mm，平均长度 1m，共 11 根；0.7m 振子直径 6mm，平均长度 350mm，共 22 根。总迎风截面积为：

风向平行于主梁，迎风截面积：

$$1 \times 0.006 \times 12 + 0.35 \times 0.006 \times 22 = 0.118 \text{ m}^2$$

对于小型摄像云台（以 301 型号云台为例），承重 20kg，天线自重 10kg。取余量最大承载 10kgf，等于 0.098kN 带入通用风压公式：

$$wp = \frac{0.098 \text{ kN}}{0.118 \text{ m}^2} = \frac{v^2}{1600}$$

得到承载最大风速 $v = 36\text{m/s}$ ，相当于 6 级风。

同理可计算对于承重 60kg 的重型旋转云台，最大风速 82m/s，相当于 9 级风。

业余无线电天线旋转云台承重可达到 300kg。在大风天气中，应当降低天线高度、拆减主梁减少天线长度、或者将天线拆卸下来以确保安全。

架设天线还需考虑防雷、防水等安全因素。

3.2 主梁连接：平衡增益尺寸

与传统固定主梁长度与振子位置的天线不同，本天线主梁分 A、B、C 三段，均采用 6010 铝合金管材制造。不同的主梁长度可以得到不同的增益。主梁越长，天线物理尺寸越大，增益越高。在实际使用中可按需选择天线尺寸。中间段主梁（主梁 B）两端开有压紧槽，前后主梁（主梁 A、C）插入其中，通过四只 M8 螺栓连接前后两段主梁。

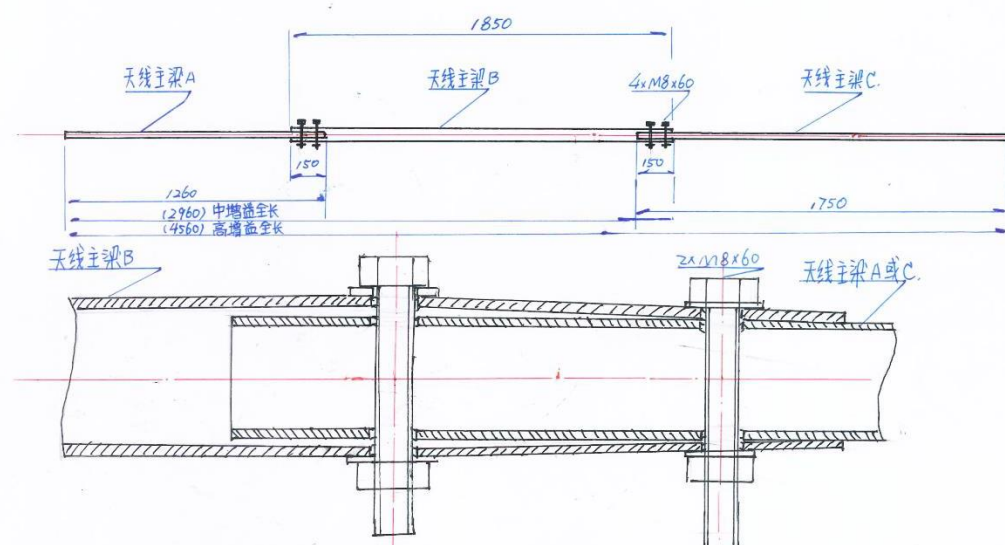


图 8 主梁与主梁连接

3.3 振子安装：选择极化方式

按照优化的振子位置加工各个波段的振子安装孔,安装孔位置公差应小于 1mm,垂直度偏差应小于 2 度。

设计要求中提到,天线可以同时工作在 2m/70cm 两个波段,以满足跨段中继和卫星通信的需求。即可以组装为 U/V 双波段天线。故 2m 波段和 70cm 波段的振子要互垂直正交。

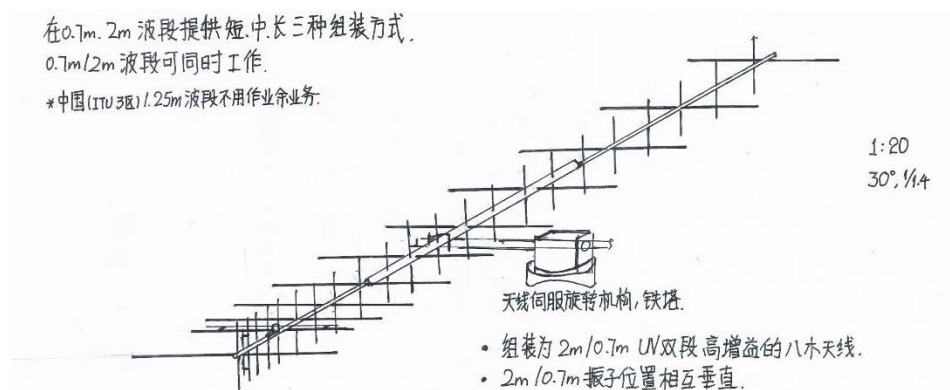


图 9 2m/70cm 双段工作方式组装示意图(高增益)

天线辐射的极化方向与振子朝向相同。图示安装方法将在 2m 波段产生水平极化波,而在 70cm 波段是垂直极化的。在本地移动通信中通常使用垂直极化,而广播电视信号则通常采用水平极化。

主梁上可开宽度为 10mm 的安装槽,便于自由移动振子位置,同时减轻主梁重量。安装槽配合长度可变的拉杆振子,通过一些计算,就可以覆盖其他(非业余业务)工作频率。利用这些安装槽,无线电爱好者还可以计算组装圆极化天线。

振子通过尼龙螺栓固定在主梁上的安装孔或安装槽中,安装拆卸方便快捷。拆卸后所有零件均为杆状零件,可捆扎打包,便于收纳、运输。

激励振子和无源振子一样,通过尼龙螺栓与主梁相连。馈电振子安装在馈电支架上。每个馈电支架通过两枚 M10×40 螺栓固定在主梁上。注意安装 UV 双段天线时,U 段第四振子 0.7-4 安装在 2m 波段馈电支架的第一个安装孔中,取代一个 M10×40 固定螺栓。

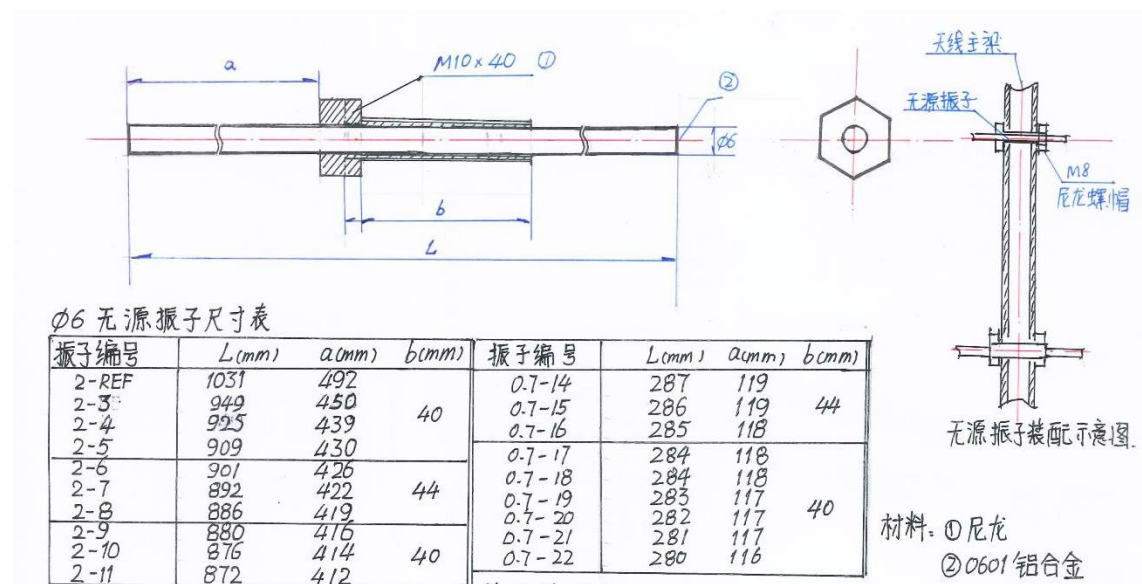


图 10 振子通过尼龙螺栓安装在主梁

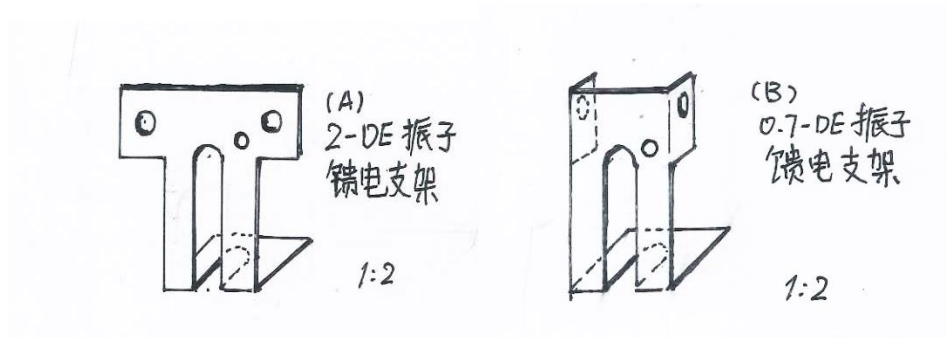


图 11 激励振子支撑装置

4 数值仿真与天线制作

4.1 矩量法软件计算

MMANA-GAL 是一款基于矩量法的天线分析工具软件。矩量法从 MININEC 第 3 版导入，计算引擎的程序基础源代码以 PDS in MININEC 的形式公布。2.03 及以上版本，均采用德国业余无线电爱好者 Alexandre Schewelew, DL1PBD 改编的 MININEC-3 计算引擎，并以 Borland C++ Ver. 4.0 编译。^[1]

MMANA-GAL 使用导线网表来描述天线构造，并提供了一个三维的可视化查看器。建立好的 2m 波段 11 单元天线模型如图所示。

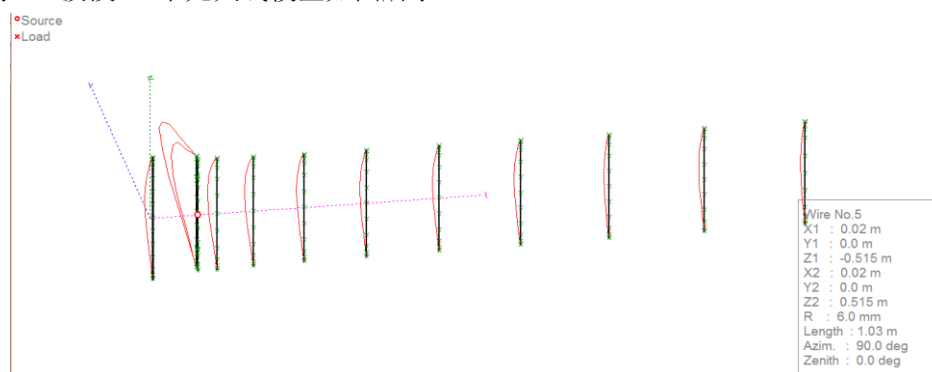


图 12 2m 波段 11 单元（高增益）天线仿真模型

软件通过矩量法计算天线的驻波比、增益和方向图，并可在给定的约束条件下优化天线振子长度。

下页给出了

(1) 2m 波段 3 段主梁 11 单元

(2) 0.7m 波段 2 段主梁 17 单元

两种天线组装方式的软件计算结果。

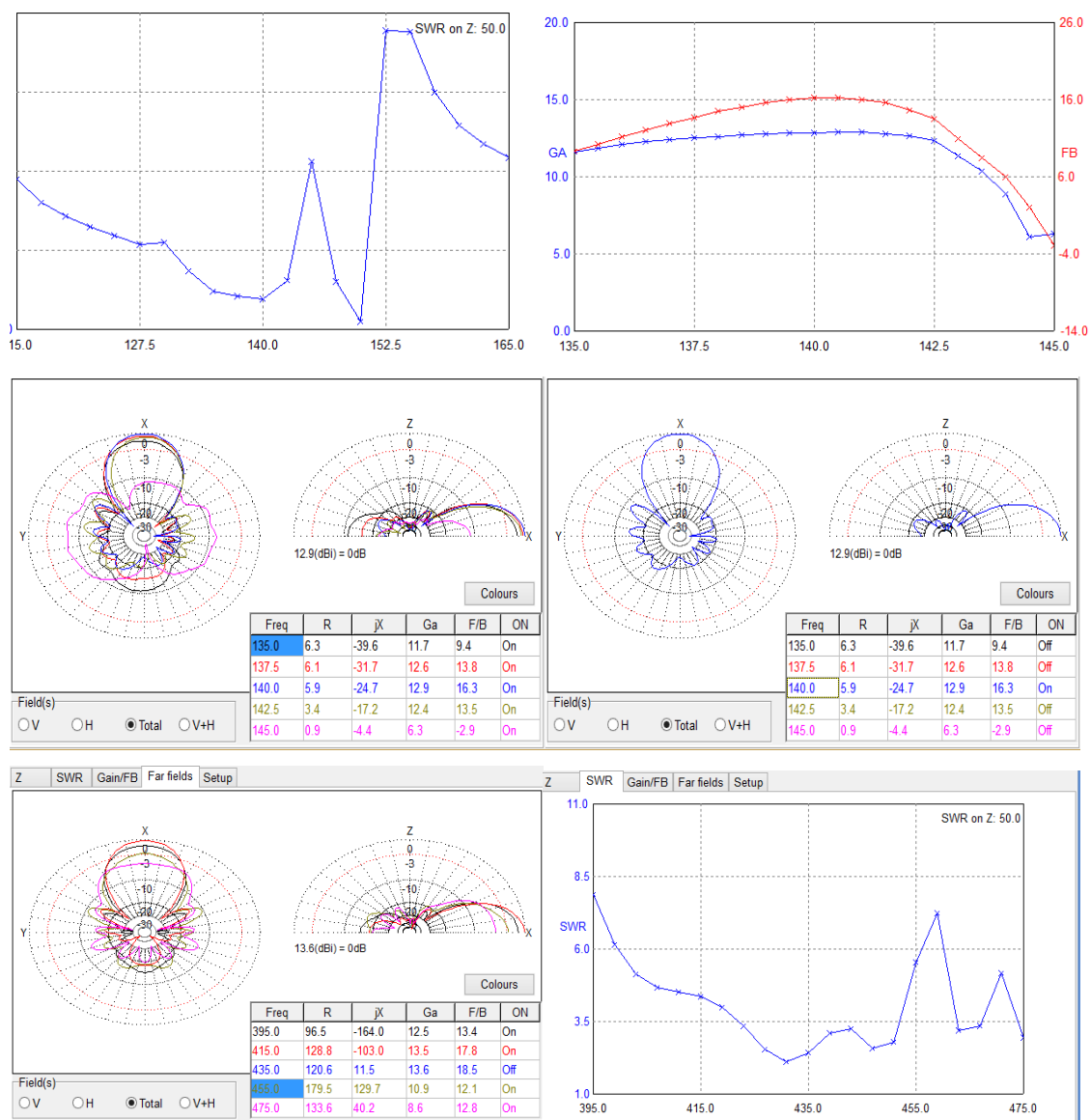


图 13 矩量法计算结果

左上: 11 单元 2m 天线电压驻波比-频率曲线

右上: 11 单元 2m 天线增益、前后比-频率曲线

左中: 11 单元 2m 天线 135-145MHz 方向图

右中: 11 单元 2m 天线中心频率方向图

左下: 17 单元 0.7m 天线 396-475MHz 的方向图

右下: 17 单元 0.7m 天线电压驻波比-频率曲线

4.2 制作天线

按照所附图纸在车间加工天线，振子安装孔位置如表 2 所示。

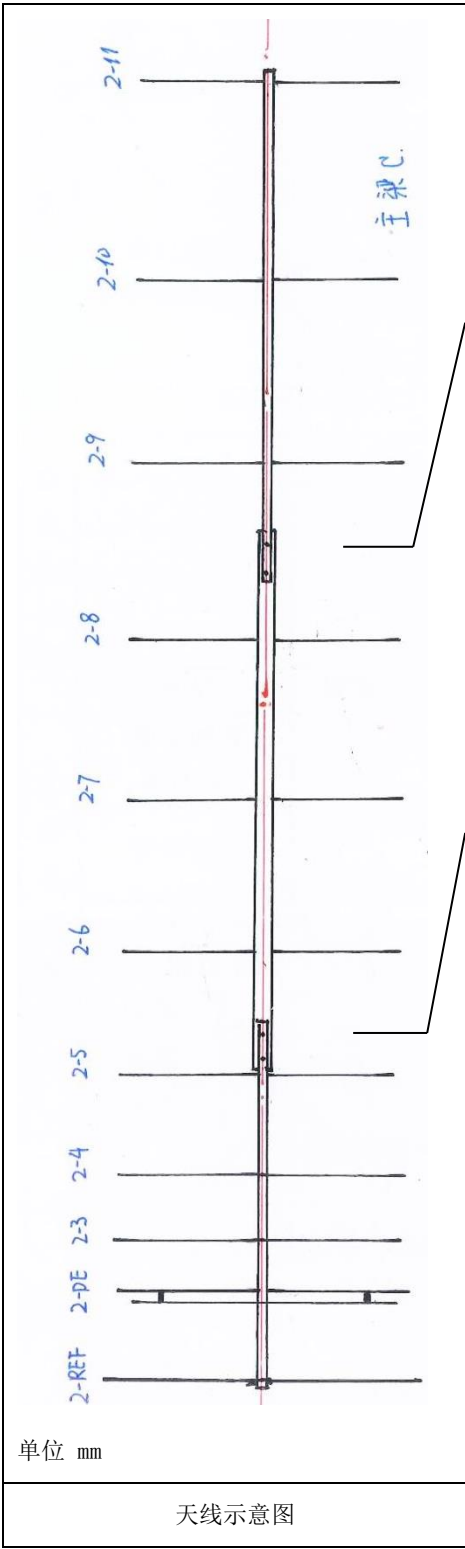
	4547/872 2-11	4312/280 . 7-22		C 梁
	3851/876 2-10	4037/281 . 7-21		
		3763/282 . 7-20		30
		3492/283 . 7-19	3481/390x2 6-5	26
	3188/880 2-9	3224/284 . 7-18		1750
		2960/284 . 7-17		B 梁
	2573/886 2-8	2699/285 . 7-16		
		2443/286 . 7-15		外径
		2192/287 . 7-14	2036/463x2 6-4	38
	2006/892 2-7	1959/288 . 7-13		内径
		1652/290 . 7-12		34
	1502/901 2-6	1524/291 . 7-11		长度
		1266/293 . 7-10		1850
	1070/909 2-5	1160/295. 7-9	928/1828+492x2 6-3	A 梁
		868/297 . 7-8		
	739/925 2-4	692/299 . 7-7	624/914x2+435x2 6-DE	
	467/949 2-3	536/303 . 7-6		
	322/944 2-DE	402/307 . 7-5		
		294/313 . 7-4		
		216/323 . 7-3		
		174/342 . 7-DE		
	20 /1031 2-REF	70/348 . 7-REF	15/1828+600x2 6-REF	
	位置/振子长度	位置/振子长度	位置/振子长度	
单位 mm				
天线示意图	2m 波段	0.7m 波段	6m 波段	主梁

表 2 天线尺寸表

4.3 性能测试

4.3.1 电压驻波比测试

测试设备

纳胜 RX-503 驻波功率表。仪表主要参数如下：

频率范围 1.8-525MHz。功率范围 $\leq 200\text{W}$ 。5W 输入测量精度：平均功率 P_{AVG} ： $\pm 10\%$ ；

峰包功率 P_{PEP} ： $\pm 15\%$ 。20~200W 输入测量精度：平均功率 P_{AVG} ： $\pm 5\%$ ；峰包功率 P_{PEP} ：

$\pm 10\%$ 。驻波测量使用的最小功率：1W。

泉盛 TG-UV2 调频手持电台。设备主要参数如下：发射频率范围：136-174MHz、400-470MHz。最大发射功率：2m 波段 5W，0.7m 波段 4W。

测试方法

使用 50 欧同轴电缆连接天线、驻波功率表和手持电台。驻波表与天线馈电点之间的电缆长度不大于 50cm。测试过程符合国家无线电管理相关法律法规、国家标准^[2]。

对于执照许可的业余波段，即 144-148MHz、430-440MHz，在开阔地以 5W 的功率、0.25~0.5MHz 的频率间隔测试天线电压驻波比。实测条件天线距离电气地面高 1m。

对于其他频率范围，在车间走廊中以 1MHz 的频率间隔做室内测试，测试时注意天线前方距离墙壁尽量远。实测条件下走廊宽约 3m，高约 4m，长约 25m。

电压驻波比的数值可以从驻波功率表上直接读取，也可以通过从驻波功率表上读取的前向功率和反向功率计算得到。由于表盘刻度间隔的原因，当驻波比较小时，计算得到的驻波比值精度更高。

测试项目

1、2m 波段 5、8、11 单元天线，136~155MHz 频率范围内测量电压驻波比。

2、UV 双段天线，V 段 8 单元 U 段 17 单元，V 段 5 单元 U 段 10 单元在 70cm 波段 400~470MHz 频率范围内测量电压驻波比。

测试结果

1、2m 波段 5、8、11 单元电压驻波比频率曲线

频率范围 135~155MHz，带宽 20MHz。

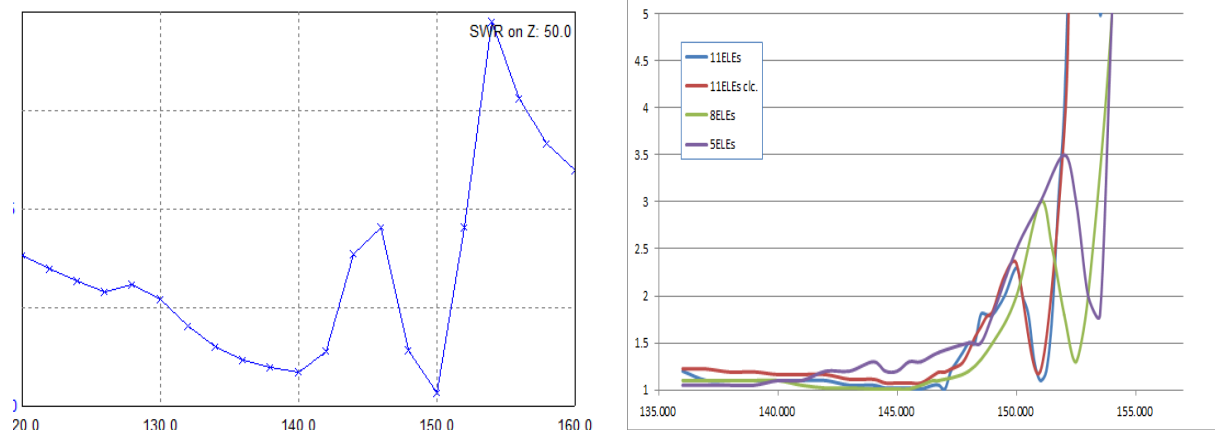


图 14 2m 波段驻波比计算结果（左）与实测结果（右）

左图为增加地面环境（普通干燥混凝土地面，天线高 1m）后 2m 波段 11 单元天线的电压驻波比计算结果。

右图四条曲线分别为：

11ELEs 在驻波功率表上直读的 11 单元天线电压驻波比。

11ELEsclc 从驻波功率表上分别读取前向功率和反射功率，再通过公式计算得到的 11 单元天线电压驻波比。这条曲线与 11ELEs 曲线基本重合，且精度比 11ELEs 略高。

8ELEs 在驻波功率表上直接读取的 8 单元天线电压驻波比。

5ELEs 在驻波功率表上直接读取的 5 单元天线电压驻波比。

11ELEs 和 11ELEsclc 两条曲线与左图计算结果吻合良好。

在 144~148MHz 业余频率范围内，驻波比均小于 1.5。

三种增益的天线都表现出在 135-145MHz 比较平坦的低驻波比工作区，和之后出现一个驻波比峰值。随后在 150~155MHz 附近再次下降到一个最低值，这个最低值的频率随着单元数目增加而降低。最后大于 155MHz 后电压驻波比急剧上升。

2、UV 双段天线，0.7m 波段 10、17 单元电压驻波比频率曲线 频率范围 400~470MHz，带宽 70MHz

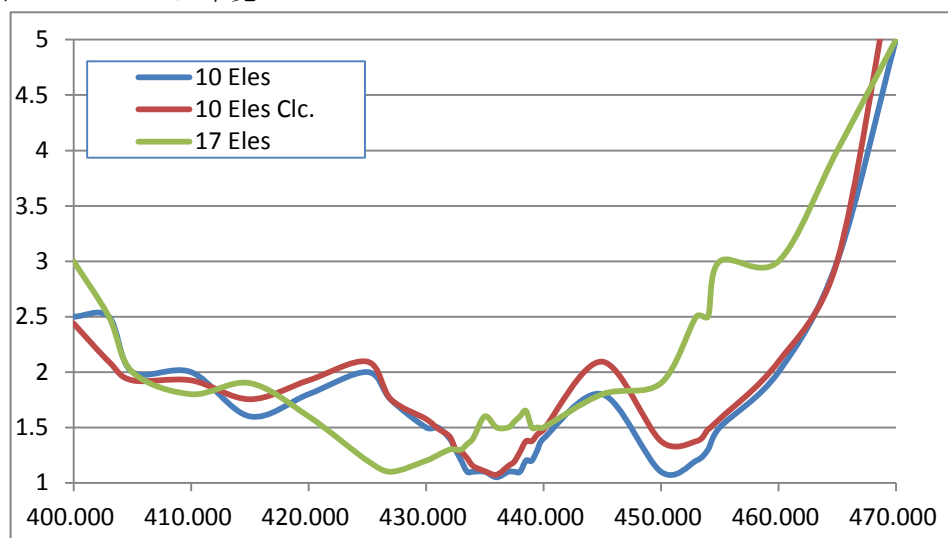


图 15 0.7m 波段驻波比-频率曲线

10ELEs 曲线和 10ELEsClc 分别为 10 单元天线直读驻波比值和利用功率计算的驻波比值。17ELEs 为 17 单元天线直读驻波比。

10 单元天线在 430~440MHz 内保持者低于 1.5 的电压驻波比，而在振子数量增加到 17 单元后，这一工作区前移到 420~430MHz。产生这种现象的原因在于，相比 2m 波段 0.7m 波段天线振子尺寸更小，在相同的制造组装公差下更难以保证电气性能。将激励振子的长度减小 5-10mm，工作区后移到 430-440MHz。

4.3.2 天线试用测试

2015年3月29日11时46分（北京时间），利用本设计样机，组装为UV双段，仅使用主梁A，U段10单元，V段5单元（U10V5）的八木天线，试验接收希望一号卫星（HO-68）的信标机信号，以测试天线性能。希望一号是2009年我国发射的一颗业余无线电卫星。

希望一号卫星信标机工作在439.795MHz，CW连续波，信标发射功率不大于200mW。测试地点为西安，选择当天上午希望一号卫星第三次过境时进行测试。此次卫星过境最高仰角11.1度，从正北方进入视野，沿地平线运动到西偏南10度位置降到地平线下。仰角较低，接收难度比较大。整个过境过程中卫星到接收机距离为3070~3850km。接收机为YAESU FT-817便携式电台。

手持天线指向正北方，根据提前计算的多普勒频移，以USB上边带模式在435.795MHz搜索卫星信号。在理论卫星地平仰角3度的时候，成功接收到莫尔斯码发送的信标信号。手持天线跟踪卫星向西方运动，同时逐渐调整接收机频率，直到卫星仰角再次减少到3度的时候，信号消失。

本次实际试用测试说明天线性能良好。根据希望一号卫星的设计指标和过境条件，以及接收机性能参数可估计此次成功接收其信号的天线增益应大于7dBi。



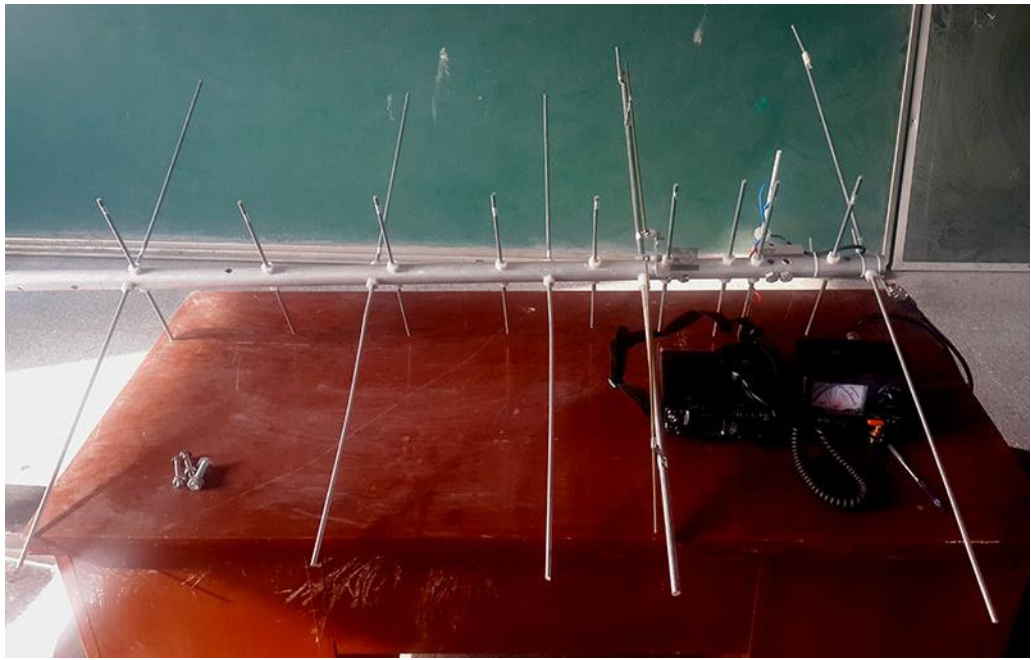


图 15 左上：组装为 U8 的天线和剩余部件；右上：组装为 V11 的天线；下：组装 U10V5 的天线和接收机 FT-817。

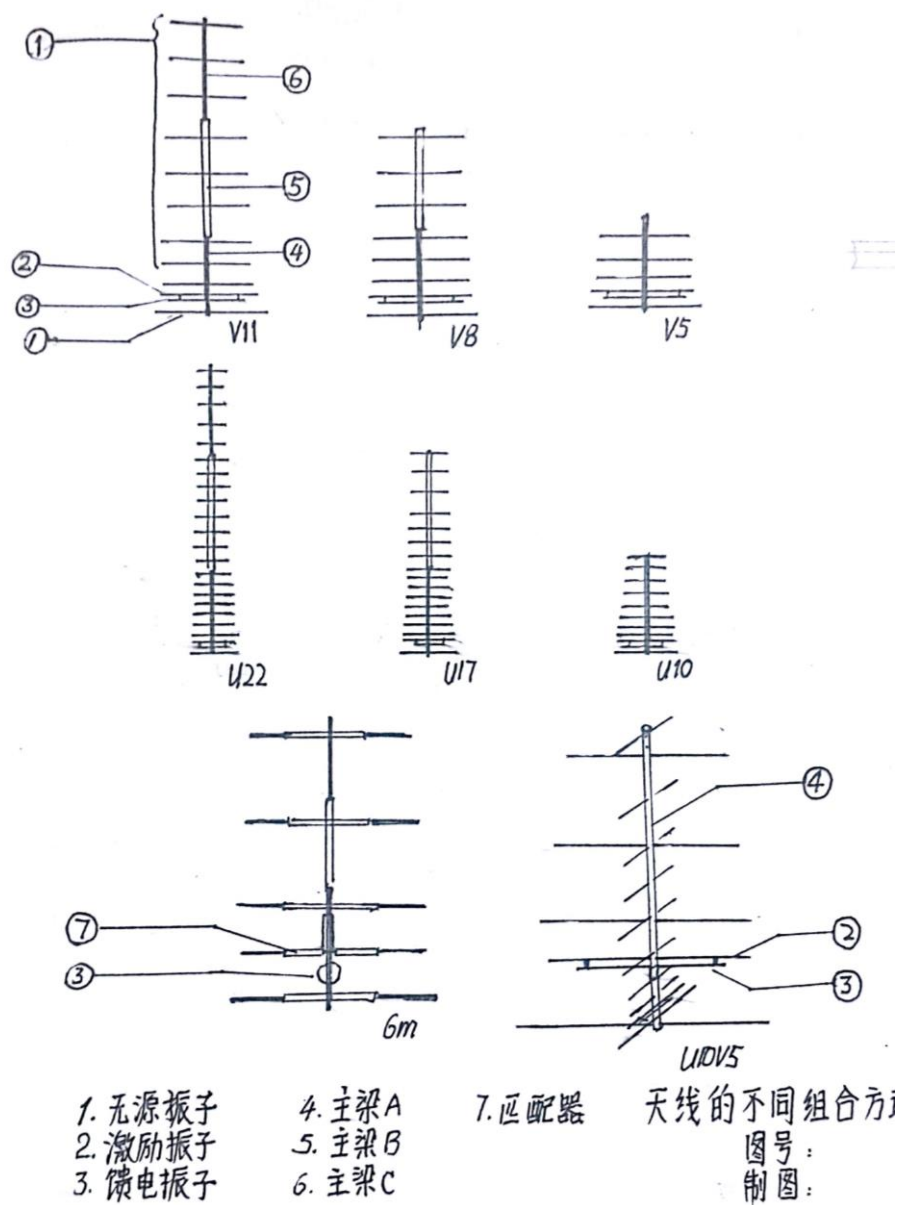


图 16 天线不同的组装方式

^[1] MMANA-GAL 天线分析软件手册，吴杰，BG3NTQ 翻译。

^[2] 相关法律、法规标准指

《中华人民共和国无线电管理条例》

《业余无线电台管理办法》（工业和信息化部 22 号令）

《电磁环境控制限值》（GB 8702-2014）

附录

A、天线装配图和零件图

装配图和零件图 A4 幅面共 17 张，附在本文最末。

图号	图名	比例尺	备注
1-ZP1	天线装配图（轴测）	1:20	封面，U22V11 双段天线装配效果图
2-ZP2	天线装配图（I）	1:20	2m 波段、0.7m 波段装配图
3-ZP3	天线装配图（II）	1:20	6m 波段装配图
4-ZP4	天线主梁装配图	1:20/1:1	
5-LJ1	天线主梁 A	1:5	
6-LJ2	天线主梁 B	1:5	
7-LJ3	天线主梁 C	1:5	
8-ZP5	0.7 米振子馈电装配图		玻璃纤维杆 没有单独零件图
9-ZP6	2 米振子馈电装配图		馈电振子 没有单独零件图
10-ZP7	6 米波段匹配器装配图		馈电夹子、匹配线没有单独零件图
11-LJ4	Φ9 振子（2-DE 振子）	1:1	铝合金杆、尼龙套筒没有单独零件图
12-LJ5	Φ6 无源振子	1:1	铝合金杆、螺栓没有单独零件图 附无源振子和主梁的装配图
13-LJ6	六米无源振子	1:1	铝合金管没有单独零件图
14-LJ7	六米驱动振子	1:1	铝合金管、绝缘子、加固套筒没有单独零件图
15-LJ8	馈电支架	1:1	
16-LJ9	绝缘垫	5:1	附 2-DE 振子馈电绝缘垫装配图 附 0.7-DE 振子馈电玻璃纤维杆装配图
17-LJ10	短路滑片	1:1	

B、2m 波段实测电压驻波比特性

Freq: 频率（兆赫兹）

VSWR app.: 直读的电压驻波比

VSWR clc.: 利用功率计算的驻波比

P FOW: 前向功率

P REF: 反射功率

ELEs: 天线振子单元数目

	11 ELEs					11ELEs clc	8 ELEs	5 ELEs
Freq.	VSWR	P FOW	P REF	$RL=10\log P/P$	a	VSWR	VSWR	VSWR
MHz	app.	PEP W	PEP W			clc.	app.	app.
+/-0.5kHz		+/-0.1W	+/-0.01W					
Freq.MHz	VSWR							
136.000	1.2	3.9	0.04	19.89004616	0.1013	1.2253722	1.1	1.05
137.000	1.1	4	0.04	20	0.1	1.22222222	1.1	1.05
138.000	1.1	4	0.03	21.24938737	0.0866	1.18962729	1.1	1.05

139.000	1.1	3.9	0.03	21.13943352	0.0877	1.19227526	1.1	1.05
140.000	1.1	3.5	0.02	22.43038049	0.0756	1.16354893	1.1	1.1
141.000	1.1	3.5	0.02	22.43038049	0.0756	1.16354893	1.05	1.1
142.000	1.1	3.5	0.02	22.43038049	0.0756	1.16354893	1.02	1.2
143.000	1.05	3.5	0.01	25.44068044	0.0535	1.11294147	1.02	1.2
144.000	1.05	3.5	0.01	25.44068044	0.0535	1.11294147	1.01	1.3
144.500	1.02	4	0.005	29.03089987	0.0354	1.07330231	1.01	1.2
145.000	1.02	4	0.005	29.03089987	0.0354	1.07330231	1.01	1.2
145.500	1.02	4	0.005	29.03089987	0.0354	1.07330231	1.01	1.3
146.000	1.01	4	0.005	29.03089987	0.0354	1.07330231	1.05	1.3
146.500	1.05	4	0.02	23.01029996	0.0707	1.15218227	1.1	
146.750	1.05	4	0.03	21.24938737	0.0866	1.18962729	1.1	1.4
147.000	1.01	4	0.03	21.24938737	0.0866	1.18962729		
147.250	1.2	4	0.04	20	0.1	1.22222222		
147.500	1.3	4.1	0.05	19.13813852	0.1104	1.24828111		
147.750	1.4	4.3	0.07	17.88370416	0.1276	1.29249866		
148.000	1.5	4.5	0.13	15.39269161	0.17	1.40954367	1.2	1.5
148.250	1.5	4.2	0.2	13.22219295	0.2182	1.55825757		
148.500	1.8	4	0.25	12.04119983	0.25	1.66666667		1.5
148.750	1.8	3.8	0.3	11.02662342	0.281	1.78154733		
149.000	1.8	3.8	0.33	10.61269657	0.2947	1.83563194	1.5	1.8
149.500	2	3.5	0.5	8.4509804	0.378	2.21525044		
150.000	2.3	3.1	0.5	7.923916895	0.4016	2.34229997	2	2.5
150.250	2							
150.500	1.8							
150.750	1.3							
151.000	1.1					1.2	3	3
151.250	1.2							
151.500	1.8						2.5	
151.750	3							
152.000	4	3	1	4.771212547	0.5774	3.73205081	1.8	3.5
152.250	6	3	1.5	3.010299957	0.7071	5.82842712		
152.500	8	3	1.7	2.466723333	0.7528	7.08971994	1.3	3
152.750	10	3	2	1.760912591	0.8165	9.89897949		
153.000	10	3.2	2.2	1.627272975	0.8292	10.7065997	2	2
153.500	5	3	1.9	1.983676538	0.7958	8.79539505		1.8
154.000	8	3.2	2	2.041199827	0.7906	8.54970355	5	5
154.500	20	3	2.5	0.79181246	0.9129	21.9544512		8
155.000	20	3	2.5	0.79181246	0.9129	21.9544512	10	10
156.000							20	20
157.000							20	20

C、70cm 波段实测电压驻波比特性

Freq: 频率 (兆赫兹)

P FOW: 前向功率

VSWR app.: 直读的电压驻波比

P REF: 反射功率

VSWR clc.: 利用功率计算的驻波比

ELEs: 天线振子单元数目

	10 ELEs					10ELEs clc	17 ELEs
Freq.	VSWR	P FOW	P REF	RL=10logP/P	a	VSWR	VSWR
MHz	app.	PEP W	PEP W			clc.	app.
+/-0.5kHz		+/-0.1W	+/-0.01W				
Freq. (MHz)	VSWR						
400.000	2.5	4	0.7	7.56962	0.41833	2.4383758	3
403.000	2.5	4	0.5	9.0309	0.353553	2.0938363	2.5
405.000	2	4	0.4	10	0.316228	1.9249506	2
410.000	2	4	0.4	10	0.316228	1.9249506	1.8
415.000	1.6	4	0.3	11.24939	0.273861	1.7542947	1.9
420.000	1.8	4	0.4	10	0.316228	1.9249506	1.6
425.000	2	4	0.5	9.0309	0.353553	2.0938363	1.2
427.000	1.75	4	0.3	11.24939	0.273861	1.7542947	1.1
430.000	1.5	4	0.2	13.0103	0.223607	1.5760143	1.2
431.000	1.5	4	0.155	14.11728	0.19685	1.4901955	1.25
432.000	1.4	4	0.12	15.22879	0.173205	1.4189795	1.3
432.500	1.3	4	0.07	17.56962	0.132288	1.3049111	1.3
433.000	1.2	4	0.06	18.23909	0.122474	1.279136	1.3
433.500	1.1	4	0.04	20	0.1	1.2222222	1.35
434.000	1.1	4	0.02	23.0103	0.070711	1.1521823	1.4
435.000	1.1	4	0.01	26.0206	0.05	1.1052632	1.6
436.000	1.05	4	0.005	29.0309	0.035355	1.0733023	1.5
437.000	1.1	4	0.02	23.0103	0.070711	1.1521823	1.5
437.500	1.1	4	0.03	21.24939	0.086603	1.1896273	1.55
438.000	1.1	4	0.06	18.23909	0.122474	1.279136	1.6
438.500	1.2	4	0.1	16.0206	0.158114	1.3756182	1.65
439.000	1.2	4	0.1	16.0206	0.158114	1.3756182	1.5
439.500	1.3	4	0.13	14.88117	0.180278	1.4398503	1.5
440.000	1.4	4	0.15	14.25969	0.193649	1.48031	1.5
445.000	1.8	4	0.5	9.0309	0.353553	2.0938363	1.8
450.000	1.1	4	0.1	16.0206	0.158114	1.3756182	1.9
453.000	1.2	4	0.1	16.0206	0.158114	1.3756182	2.5
454.000	1.3	4	0.15	14.25969	0.193649	1.48031	2.5
455.000	1.5	4	0.2	13.0103	0.223607	1.5760143	3
460.000	2	4	0.5	9.0309	0.353553	2.0938363	3
465.000	3	4	1	6.0206	0.5	3	4
470.000	5	4	2	3.0103	0.707107	5.8284271	5

参考文献

- [1] R. Dean Straw etc. The ARRL Antenna Book [M]. 19th Edition, The American Radio Relay League (ARRL), 2000
- [2] 林昌禄 等. 近代天线设计 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 1990
- [3] Schewelew Alexander, Makoto Mori 等著. 吴杰 译. MMANA GAL 天线分析系统 [Z]. 2006
- [4] 于臻, 冉小英. 一种参数可调的八木天线设计 [J]. 实验室研究与探索 2012.7: 289-292

设计图纸

见下页

灵活部署的八木天线.

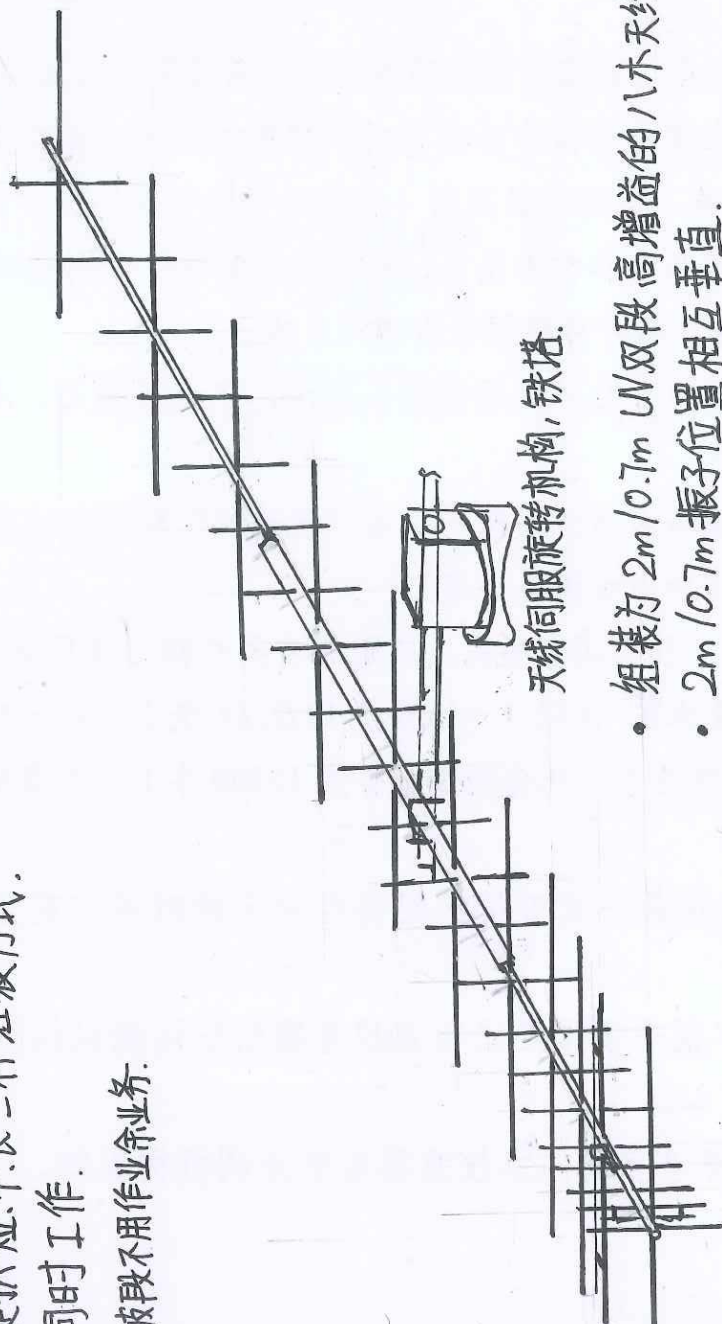
可工作于6m, 2m, 0.7m 三个波段.

1.25m 波段选配*.

在0.7m, 2m 波段提供短, 中, 长三种组装方式.

0.7m/2m 波段可同时工作.

*中国(ITU 3区)1.25m 波段不用作业余业务.



1:20

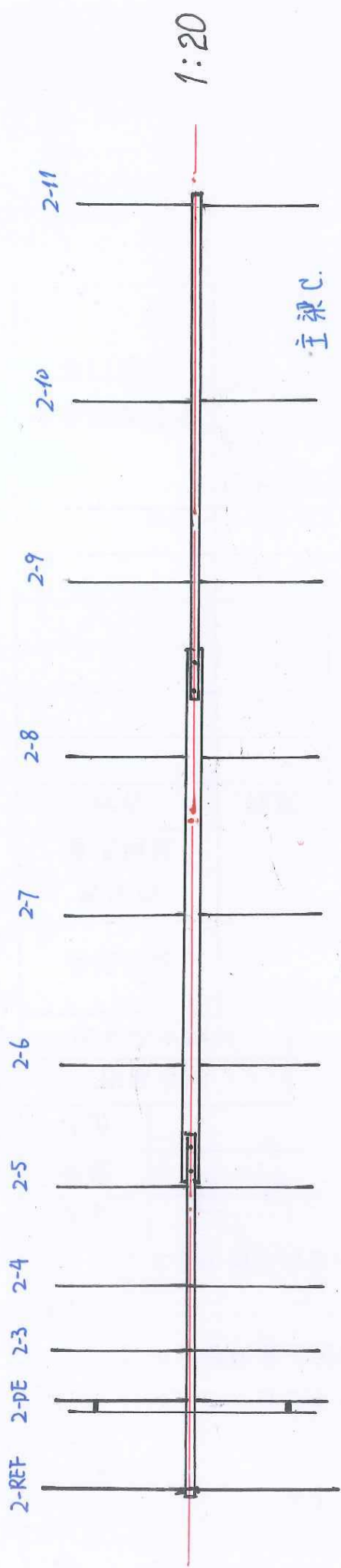
30° 1/4

天线伺服旋转机构, 铁塔.

- 组装为 2m/0.7m UN 双段高增益的八木天线.
- 2m/0.7m 振子位置相互垂直.
- 单独使用梁 A, 可获得增益较低, 更轻便的天线.
- 可用于手持卫星通信. 总长 1.3 米, 也可用于一般中继.
- 使用梁 B, 天线长度 3 米, 中等增益. 适用于轻型云台.
- 同时安装 A, B, C 三根主梁, 总长 4.5 米, 高增益. 可用于 EME 通信.

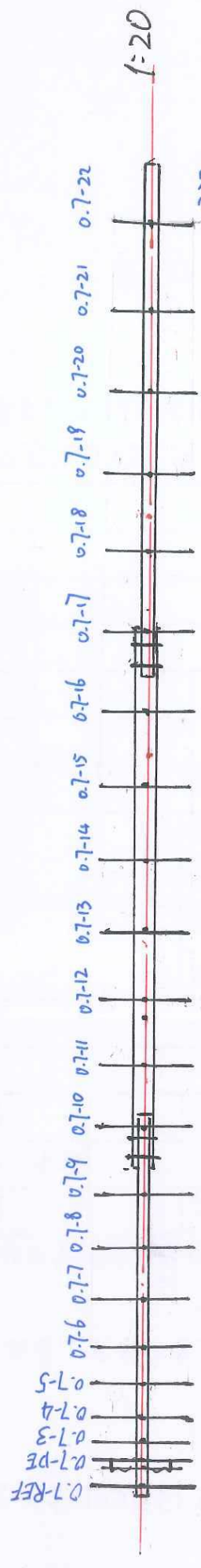
天线装配图 (轴测)

图号: 1-24
制图: 宋佳



(A) 2米波段组装方式.
 仅用梁A. 使用梁A.B. 同时使用梁A.B.C
 分别对应5. 8. 11单元长八木天线, 增益
 随单元数目增加而增加, 同时带宽减少.

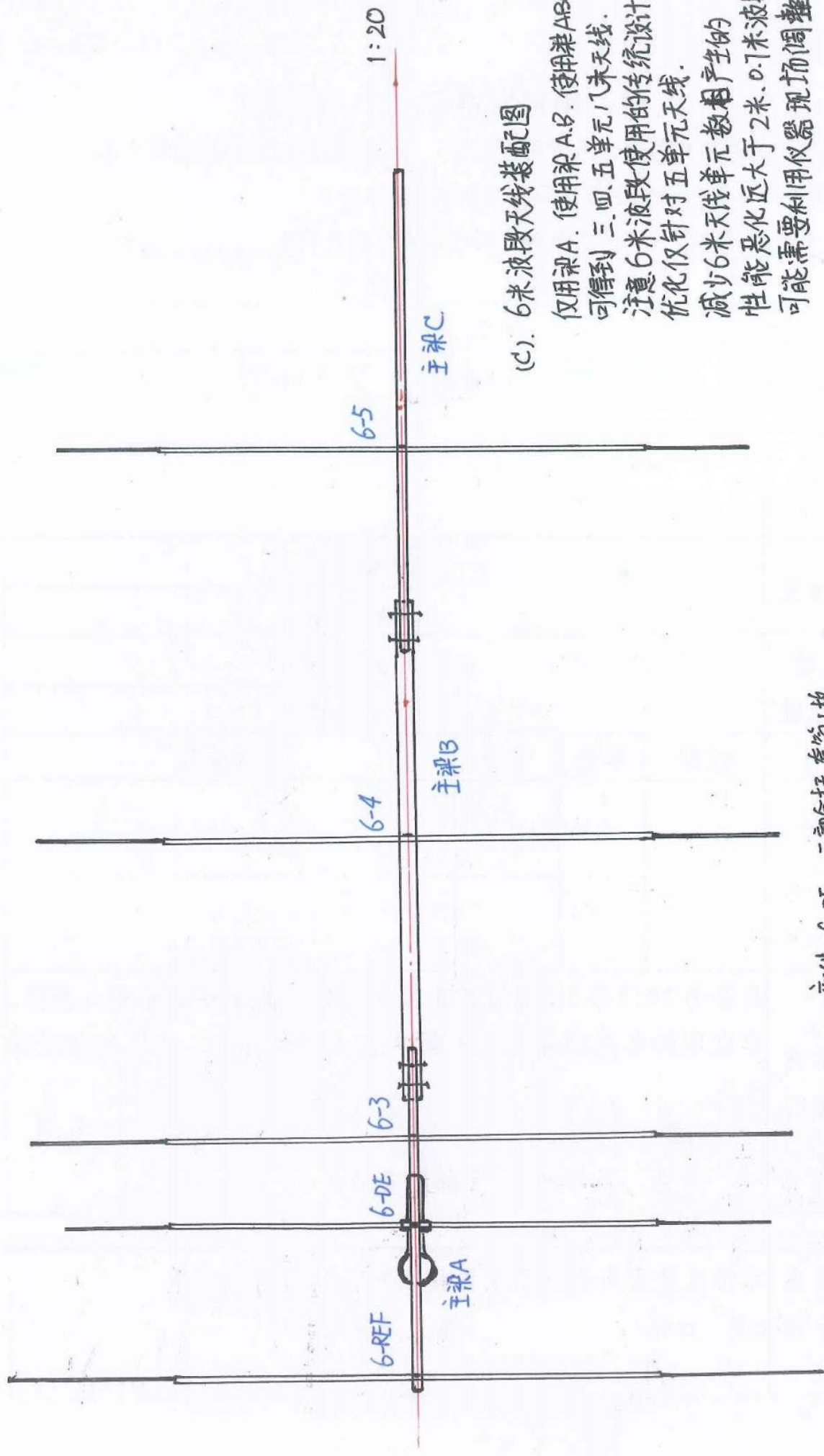
使用部件: 2-REF~2-11, A.B.C梁.
 2m 匹配线, 馈电支架, 绝缘垫,
 M8x60 4枚, M8螺母 4枚,
 M10尼龙螺帽 11枚, 短路滑片.



(B) 0.7米波段组装方式.
 分别使用梁A. 梁AB. 梁ABC可获得
 三种增益, 为10. 17. 22单元长八木天线.

使用部件: 0.7-REF~0.7-22, ABC梁
 0.7 1/2 线, 馈电支架,
 玻璃纤维棒, 绝缘垫, 套筒,
 M8x60 4套, M10尼龙螺帽 22枚,
 匹配线 2根

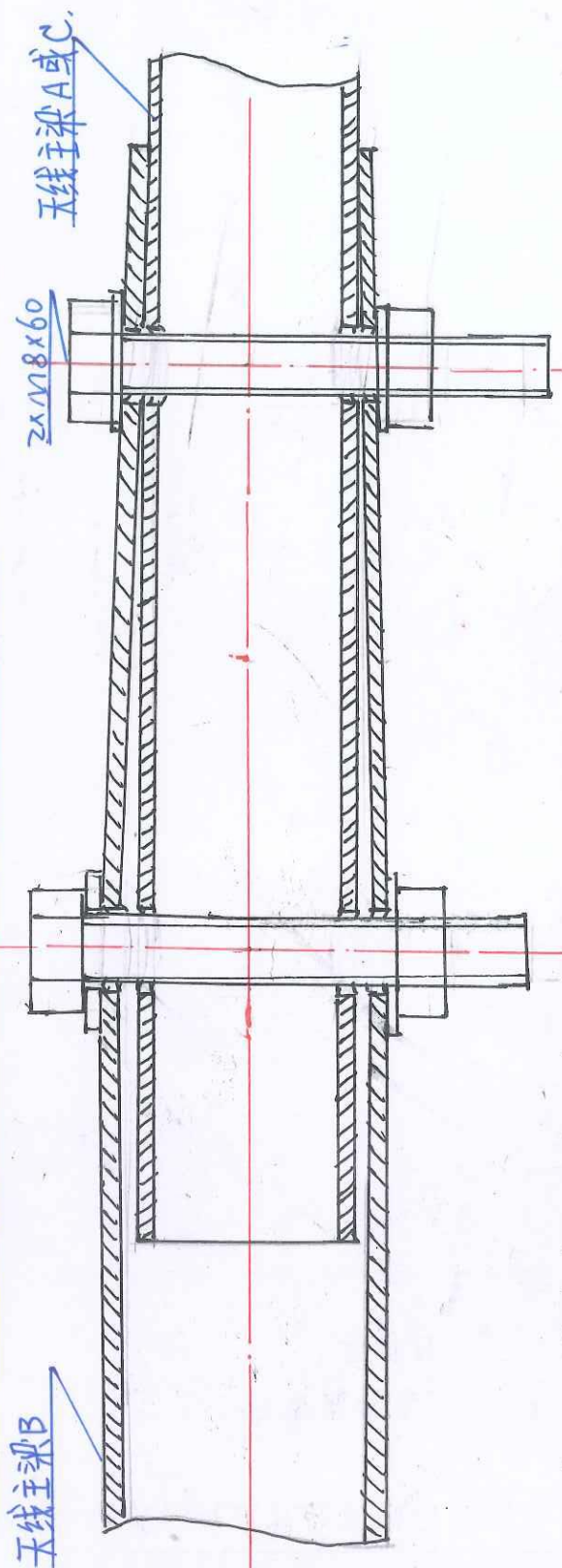
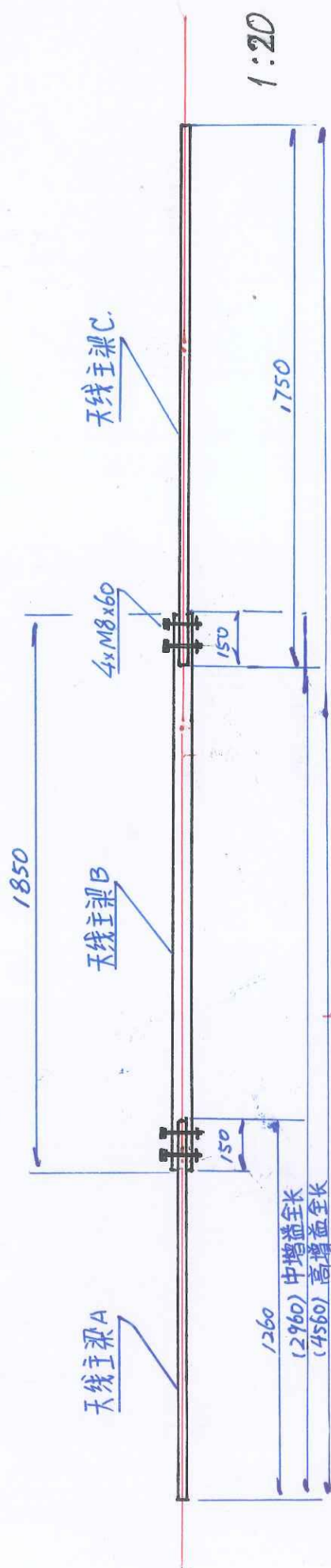
0.7-10 振子安装在梁B的插槽内.
 若使用A.B两梁, 0.7-17振子在梁B槽
 槽的顶端.



(C). 6米波段天线装配图

仅用梁A. 使用梁A.B. 使用梁A.B.C
 可得三、四、五单元八米天线。
 注意6米波段使用的传统设计，
 优化仅针对五单元天线。
 减少6米天线单元数相产生的
 性能恶化远大于2米、0.7米波段，
 可能需要利用仪器现场调整。

部件, 6-DE: 三部介杆, 套筒1枚。
 6-REF, 6-3, 6-4, 6-5: 中间振子3支。
 各自正长振子共8支, 套筒四支。
 6米 $\lambda/2$ 线一根, 匹配器一副。
 108x60 四套。



对于低增益应用,可仅使用主梁A.
 对于中增益应用,可使用主梁A、B,并依图连接.
 对于高增益应用,应同时连接使用三根主梁.

天线主梁装配图

1:20

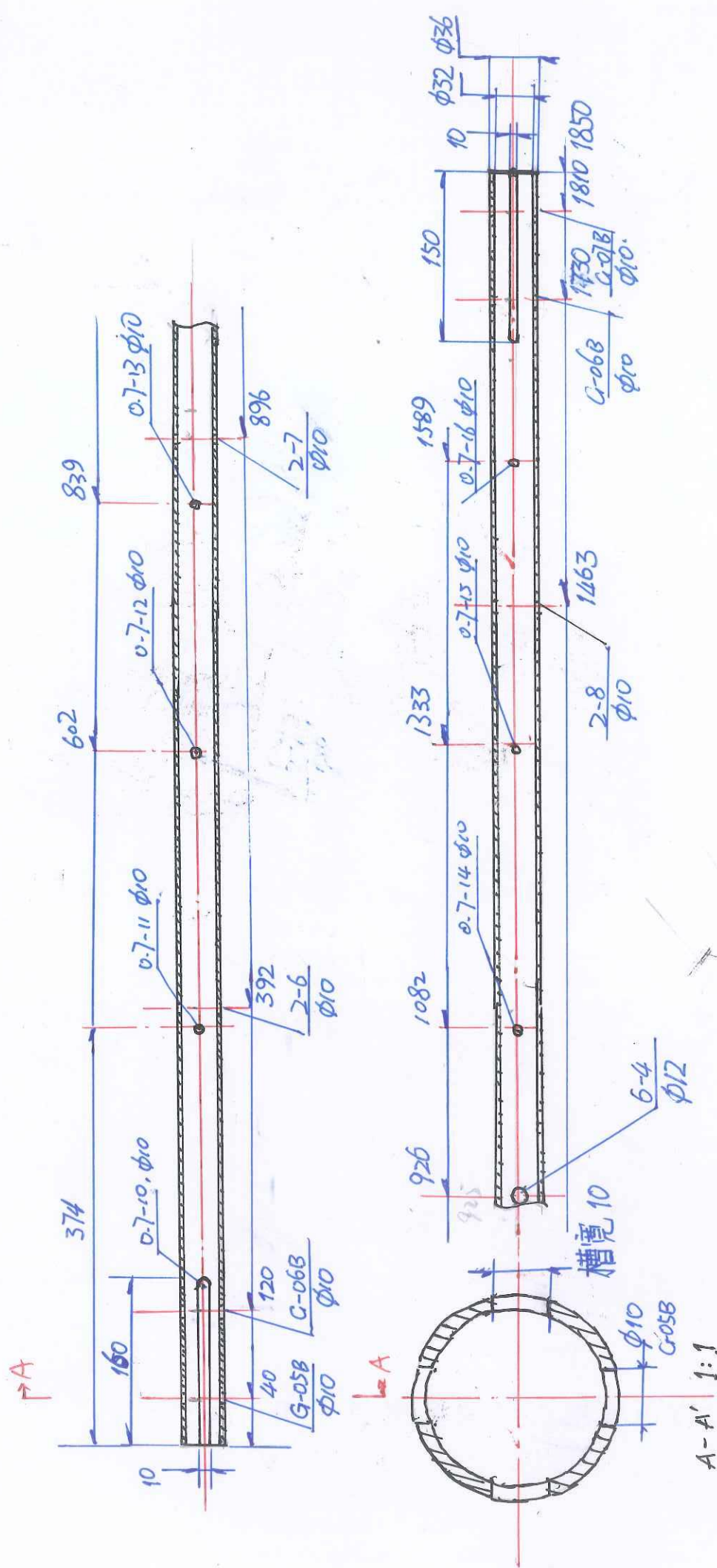
1:1

图号:

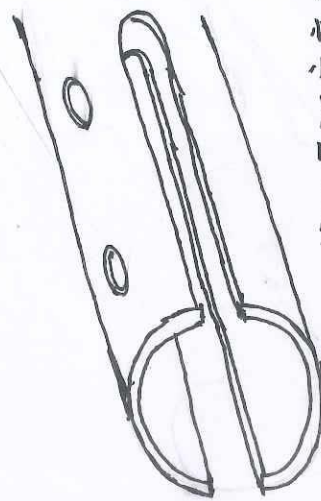
制图:

4-ZP4

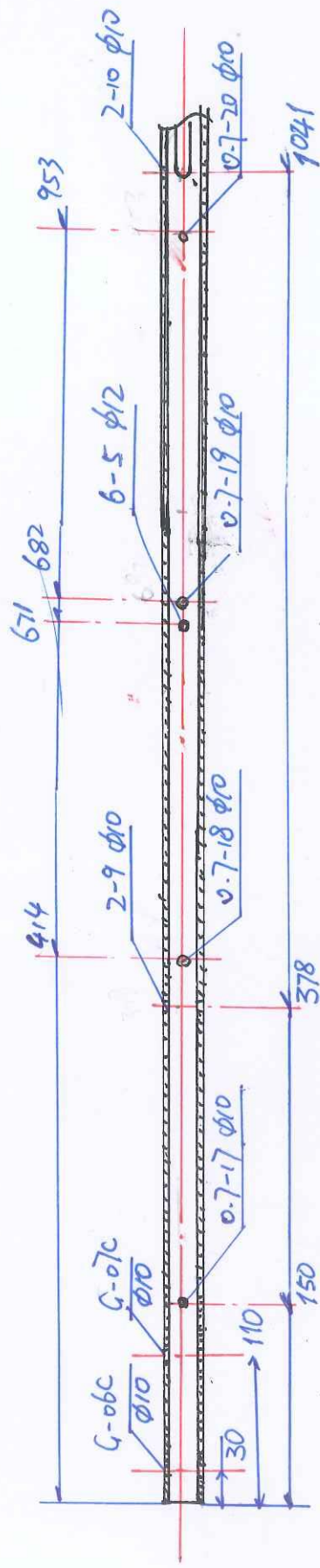
宋俊卿



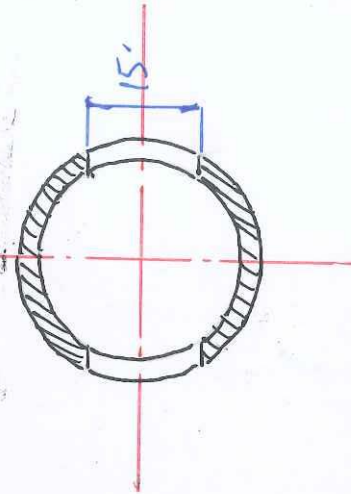
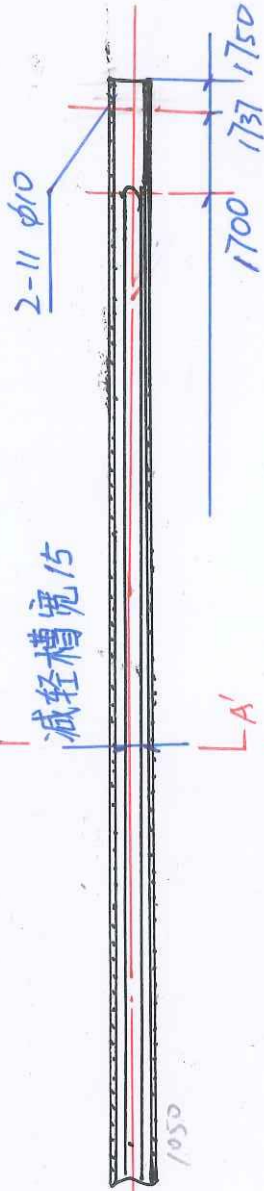
天线主梁 B 1:5
材料: 6010 铝合金
数量: 1



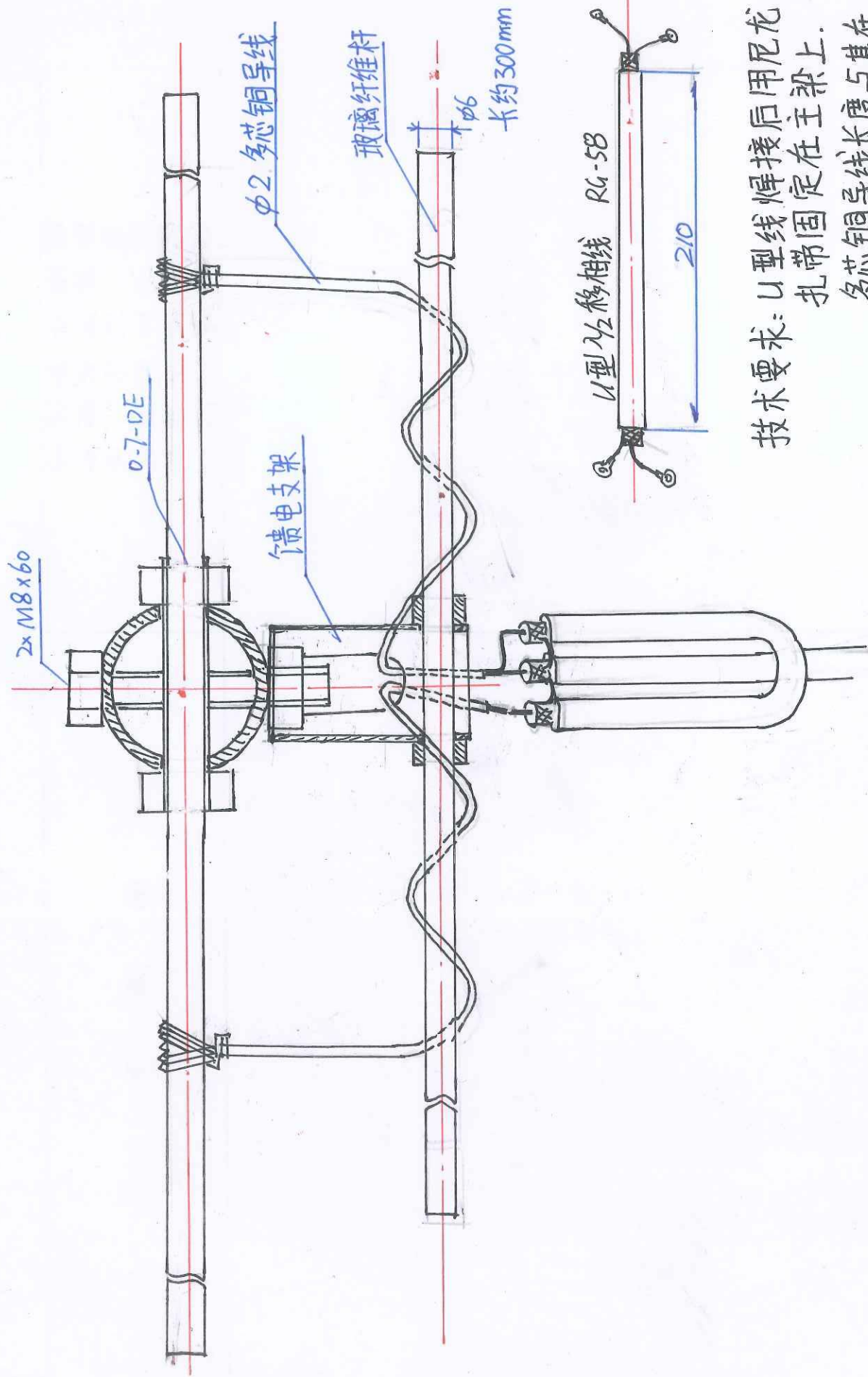
接头透视图



减轻槽宽15



天线主梁 C 1:5
 材料: 6010 铝合金
 数量: 1



技术要求: U型线焊接后用尼龙扎带固定在主梁上.

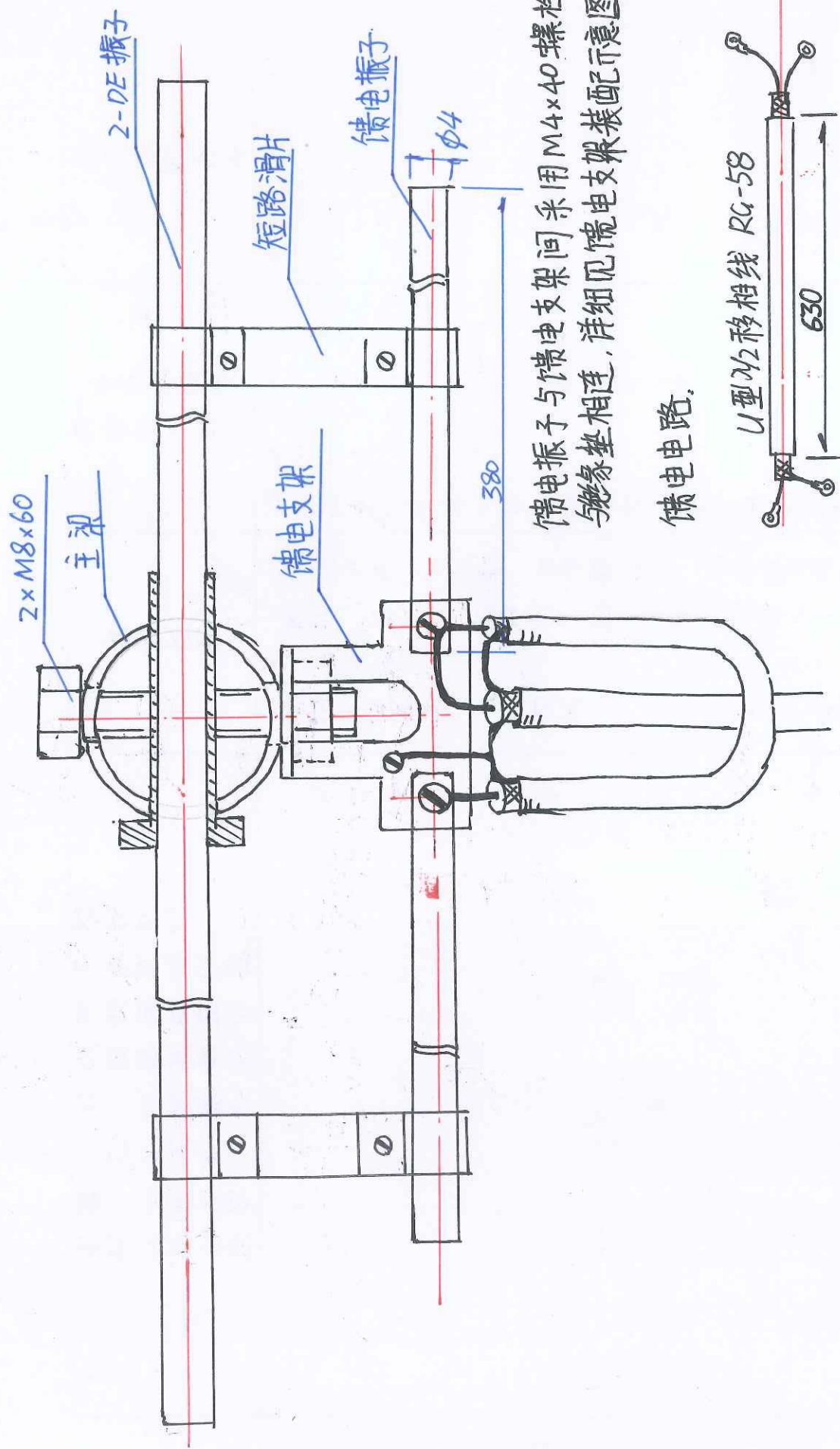
多芯铜导线长度与其在

0.7-DE上位置由驻波测试确定.

0.7米振子馈电装配图

图号 8-ZP5

制图 宋佳驹



馈电振子与馈电支架间采用M4x40螺栓与绝缘垫相连, 详细见馈电支架装配示意图

馈电电路.



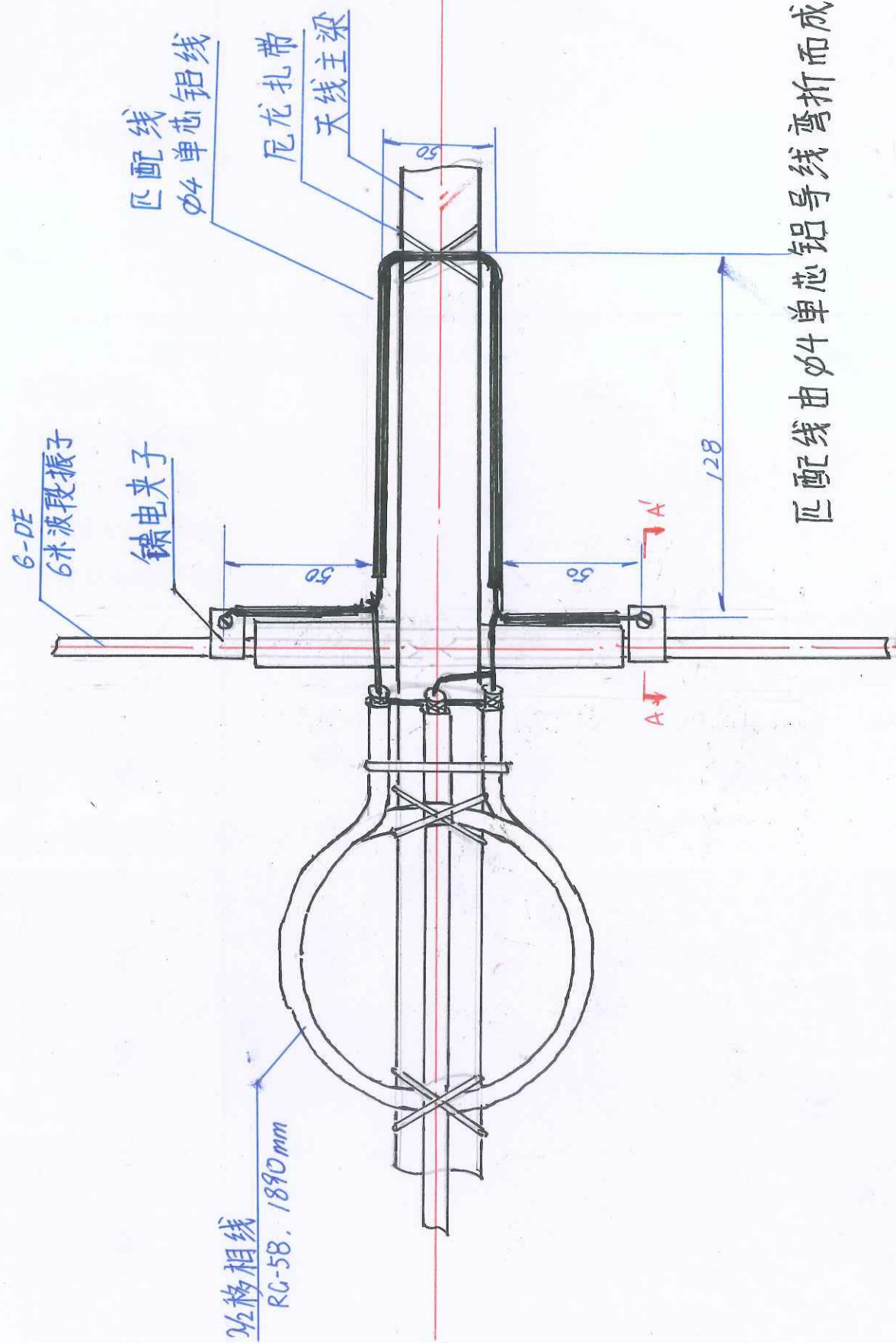
技术要求: U型线焊接后用尼龙扎带固定在主梁上.

短路滑片位置由驻波测试确定.

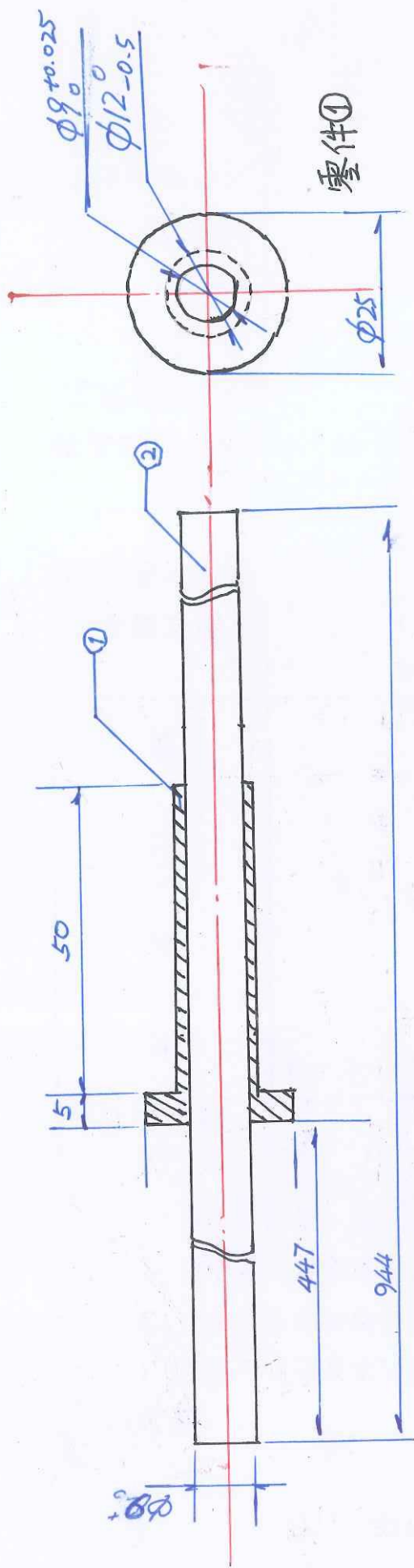
2米振子馈电装配图

图号 9-ZH6

制图 宋佐驹



匹配线由φ4单芯铝线弯折而成.



材料: ①尼龙. ②0601铝合金

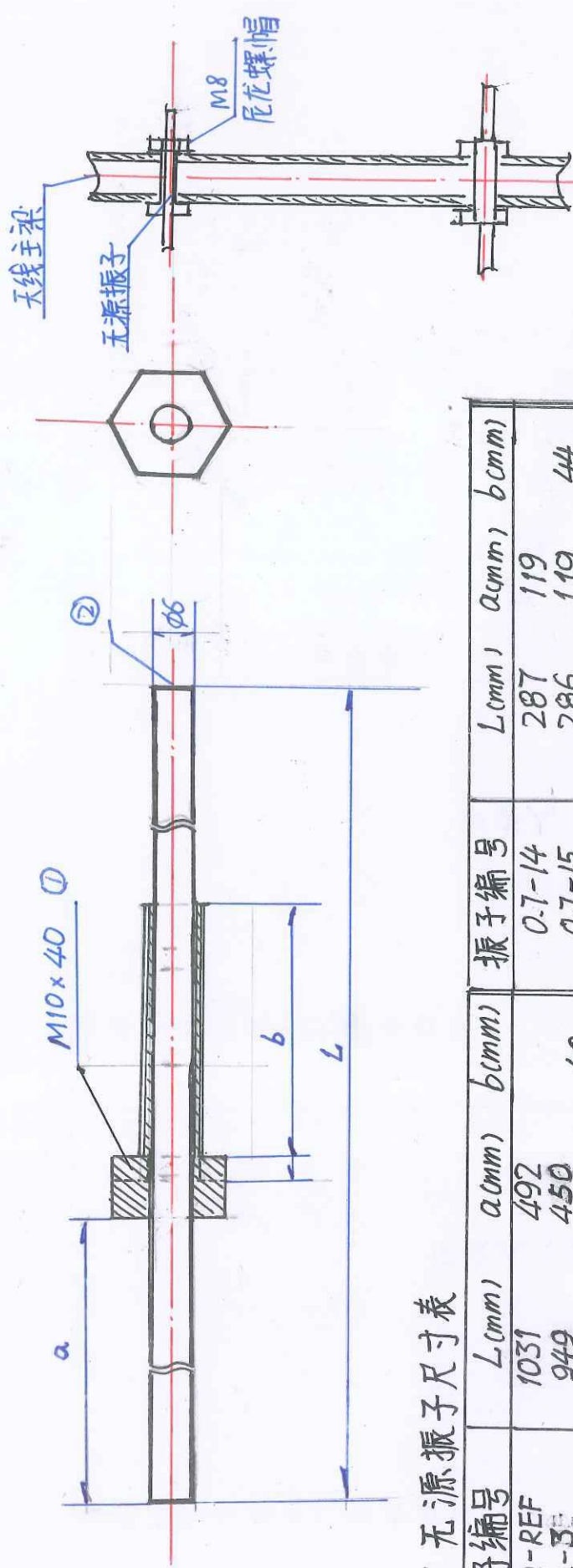
数量: 1
技术要求:

零件①. ②间不得有相互滑动.
若公差原因产生滑动应用胶粘合.

φ9 振子 (2m 驱动 L-DE 振子)

图号 11-474

制图 宋维驹



无源振子装配示意图

材料: ①尼龙
②0601铝合金

φ6 无源振子尺寸表

振子编号	L(mm)	a(mm)	b(mm)	振子编号	L(mm)	a(mm)	b(mm)
2-REF	1031	492	40	0.7-14	287	119	44
2-3	949	450		0.7-15	286	119	
2-4	925	439		0.7-16	285	118	
2-5	909	430	44	0.7-17	284	118	40
2-6	901	426		0.7-18	284	118	
2-7	892	422		0.7-19	283	117	
2-8	886	419	40	0.7-20	282	117	
2-9	880	416		0.7-21	281	117	
2-10	876	414		0.7-22	280	116	
2-11	872	412					
0.7-REF	348	150	40				
0.7-DE	342	147					
0.7-3	323	138					
0.7-4	313	132					
0.7-5	307	130					
0.7-6	303	127					
0.7-7	299	125					
0.7-8	297	124					
0.7-9	295	123					
0.7-10	293	123	44				
0.7-11	291	121					
0.7-12	290	121					
0.7-13	288	120					

技术说明

1. 采用 M10x40 尼龙螺栓打 φ6 中心孔 φ6^{+0.025}₋₀ 制成零件①。
2. b 长度为 44 时为将螺栓头车削 4mm 得到。
3. 零件①与零件②装配后不得有相对滑动。若配合滑动可用胶粘合固定。

数量: 各 1, 共 32 支。

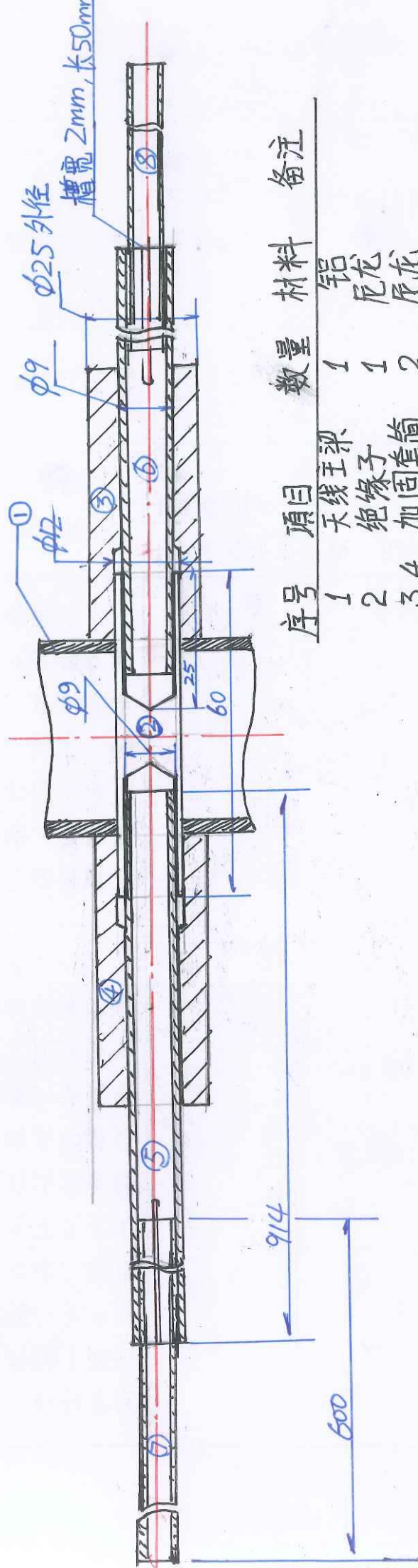
φ6 无源振子 1:1

φ6 无源振子

图号 12-LJS

1:1

制图 宋伟强

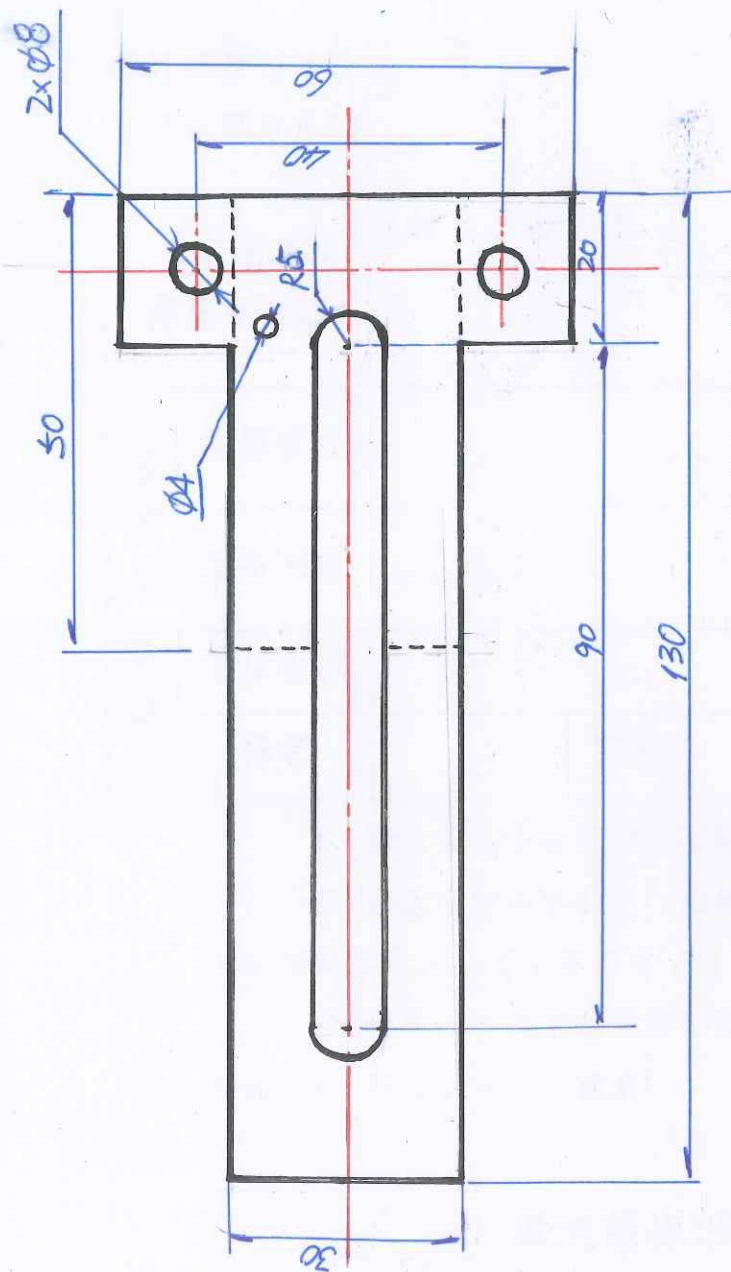


序号	项目	数量	材料	备注
1	天线主梁	1	铝	
2	绝缘子	1	尼龙	
3、4	加固套筒	2	尼龙	
5、6	左右一级振子	2	铝	内径 $\phi 6$, 外径 $\phi 9$
7、8	左右二级振子	2	铝	内径 $\phi 3$, 外径 $\phi 6$

六米驱动振子尺寸

技术要求

1. 零件 5、6 末端开槽, 与零件 7、8 插接。
2. 零件 5、4、2、6 用胶粘合。
3. 零件 3 可拆卸。
4. 左右振子之间绝缘。



材料 铝板材

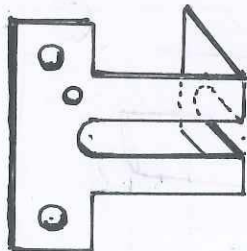
厚度 1mm

数量 2

φ4孔位置无严格要求。

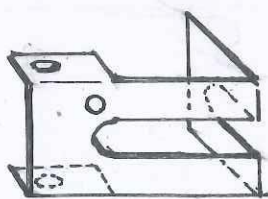
(A)
2-DE 振子
馈电支架

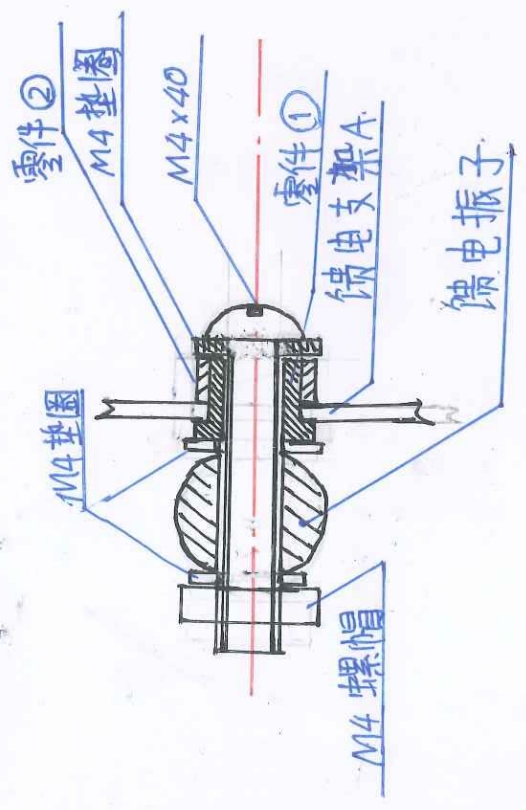
1:2



(B)
0.7-DE 振子
馈电支架

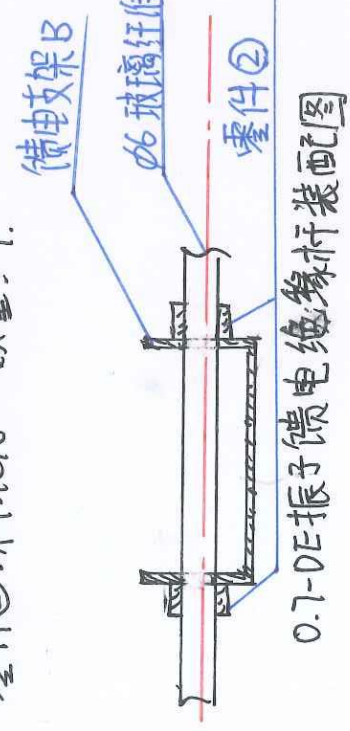
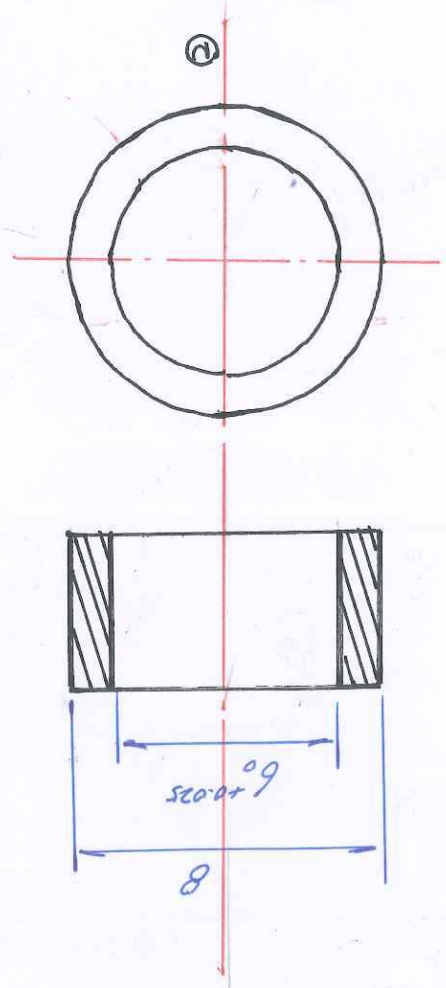
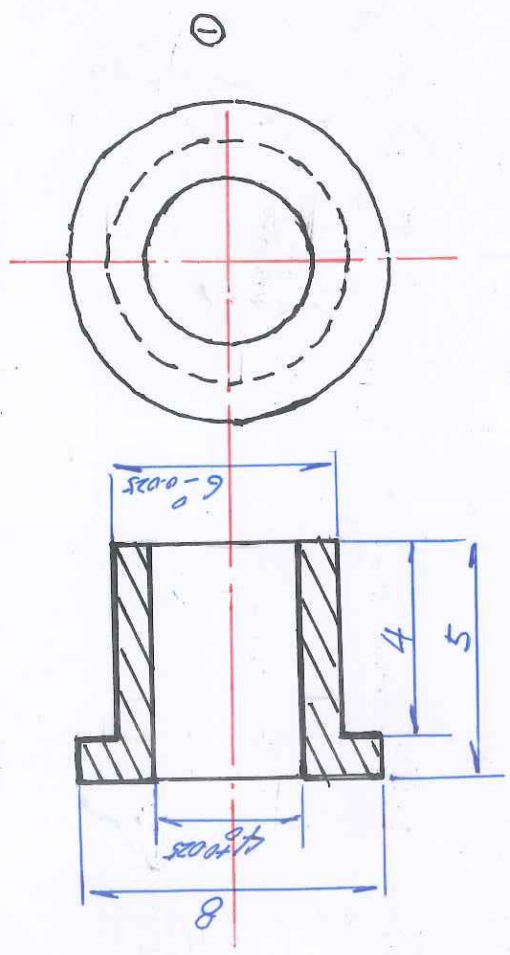
1:2



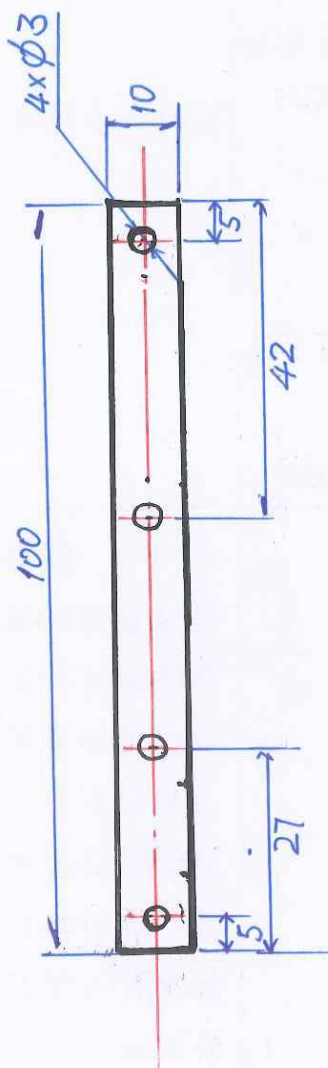


2-DE 振子 馈电绝缘垫安装装配图

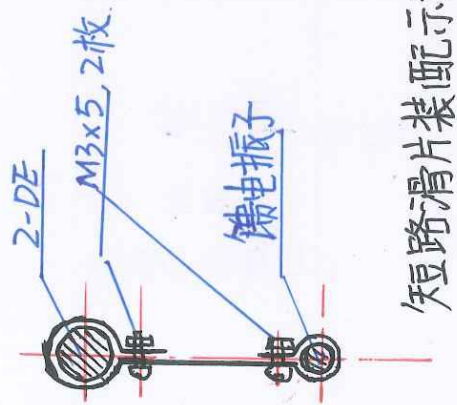
零件①: 料: 尼龙. 数量: 2.
零件②: 料: 尼龙. 数量: 4.



0.7-DE 振子 馈电绝缘杆装配图



厚度 0.5mm
材料 铝
短路滑片



短路滑片装配示意图