

# 关于 XXX 项目激光站防微震的设计方案的探索

赵学习 杨红伟 孙国营

中国电子科技集团公司第二十七研究所

DOI: 10.12238/j pm.v6i1.7637

**[摘要]** 本文提出了超精密激光器桩屏障、地面屏障、隔震沟联合并联隔振设计方案：通过在站房内外设置双排环形桩，外排桩阻隔中远距离震动；内排桩与隔震沟组合成一体，阻隔球面罩及站房受恶劣天气（如：刮风、雨雪等）产生的近距离震动波及经外排桩阻隔后剩余部分中远距离震动；通过在站房内合理设置 ATP（激光器）墩式基础（地面屏障，也称作：波阻板），地面屏障还要有一定的平面尺寸及厚度，足够大的重量及钢性，用以抵抗通过站房内外排桩及隔震沟衰减后的微震。

**[关键词]** 桩屏障；地面屏障；隔震沟联合并联隔振

## Exploration on the design scheme of laser station in XXX project

Zhao Xuexi Yang Hongwei Sun Guoying

The 27th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation

**[Abstract]** This paper puts forward the combined parallel vibration isolation design scheme of ultra-precision laser pile barrier, ground barrier and shock isolation ditch: by setting up double rows of ring piles inside and outside the station house, The outer discharge pile blocks the medium and long distance vibration; The inner row pile is combined with the isolation ditch, The close distance vibration caused by the barrier ball mask and the station room by bad weather (such as wind, rain and snow, etc.) affects the remaining medium and long distance vibration after being blocked by the external pile; By reasonably setting up the ATP (laser) pier foundation in the station room (ground barrier, Also known as: wave resistance plate), The ground barrier also has a certain plane size and thickness, Large enough for its weight and steel performance, To resist the micro-shock after the attenuation of the row pile inside and outside the station house and the isolation ditch.

**[Key words]** pile barrier, ground barrier, shock isolation ditch combined parallel vibration isolation

### 一、防微震设计的需求

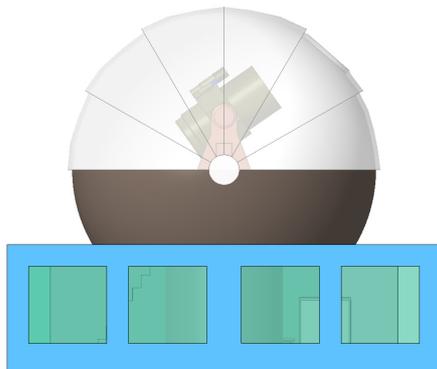


图1 天地互联激光通信设备右侧图

地面站分为上下两层，上层为光学设备房，放置 ATP、光学接收、A0 等光学设备，下层为操控房，放置机柜、操控台、测量仪器等设备，整体布局如图 1 所示。地面站外观整体上圆

下方结构。根据目前的地面站设计方案，空间设计参数如下：

房空间占地为： $\geq 10\text{m}$ （长） $\times 10\text{m}$ （宽） $\times 3\text{m}$ （高）；

圆顶罩空间占地为： $\geq 8\text{m}$ （直径） $\times 5.5\text{m}$ （高）；

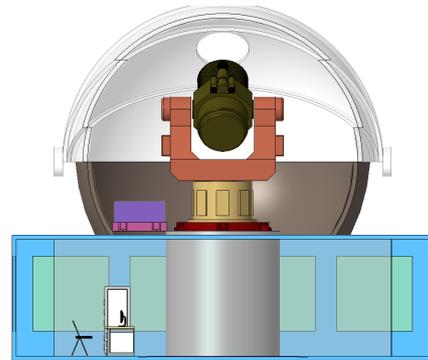


图2 天地互联激光通信设备内部正视图

地面站上层采用圆顶罩形式，圆顶在关闭状态用于保护光学设备免受太阳、雨、雪、强风、灰尘以及周围光线的影响，

如图所示是 ATP 及通信和主控单元相对于圆顶罩所处的位置。在圆顶处于完全打开状态下，终端允许 ATP 在水平面以上半球范围内任意方向上自由接近天空。圆顶罩为球型花瓣状开窗式结构，为半球结构形式。圆顶共有 6 个花瓣型罩子组成，每边三个，需要全开时，两边三个罩子分别向两侧展开，圆顶罩打开后各向视图如下图所示，根据设计要求，圆顶开启后，在方位 360°，俯仰 0° 以上范围内不能有障碍物遮挡望远镜视线。平时不进行 LEO 对地光通信试验时，花瓣型罩子是合在一起的。圆顶罩上安装防雷设施，保证整个地面站的防雷。需要说明的是，该方案设计中一个罩子中心开有圆形窗口，窗口的直径设计为 1.5 米，用于和同步轨道卫星建立光链路，该窗口开口位置处于星地链路的连线上，系统可以通过内部电动保护盖实现自动开合控制。

下图为园顶罩(15T)、激光器 ATP 基建方案(见图 1、图 2)。

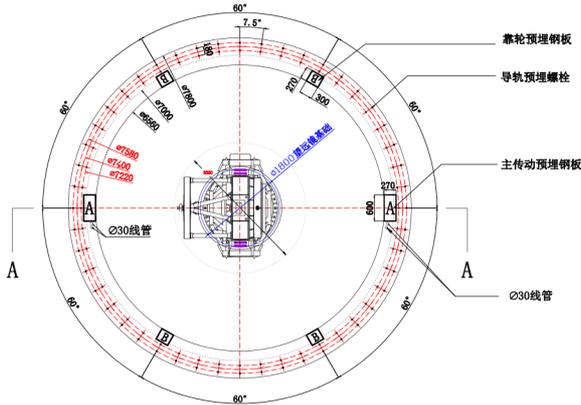


图 1

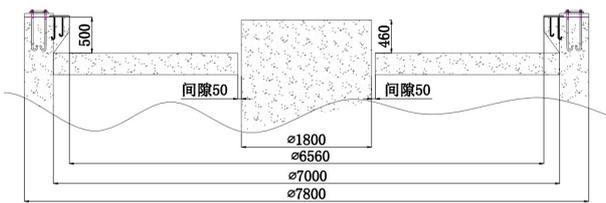


图 2

根据工艺要求，激光站核心部件 ATP(激光器)在工作时，所受外界震动而引起自身振动振幅不能超过 1μm，否则，将影响激光信号传输。为了满足上述目标值，必须对该激光站进行隔震设计。

要求振幅达到 μ 级超精密仪器的隔振设计目前在国际上是一项难题，一是目前没有一套成熟理论计算公式，二是外界震源复杂性及不确定性。为了满足该工艺的需求，比较有效的途径是借助国际、国内比较成功的案例及相关[参考文献]。

激光站外界震源分析：

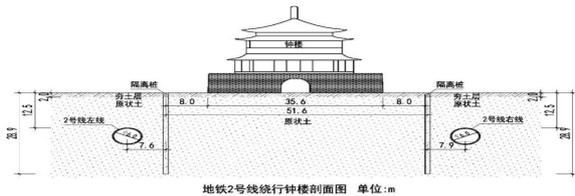
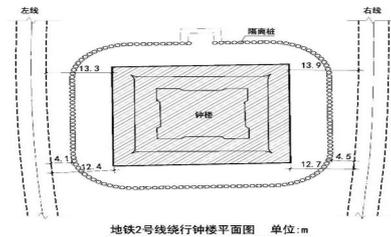
a、激光站东边 1km 紧邻南北向 s201 省道，经常有货车通过；激光站南临普通道路，场地内有时会有小车通过。

b、刮风、雨雪天气时，球面罩及站房受恶劣天气影响产生的震动传导地面及地基。

## 二、目前国内的防威震设计

国内比较成熟的案例，如下图：西安地铁二号线从钟楼绕行通过时，为了减少地铁长期运行对其震动的影响，在钟

楼台基周围设置了一圈隔离排桩，见下图。通过后期的振动监测表明，经排桩隔振后，地表水平向振动能减少 50%~70%，竖向振动能减少 40%~50%。



## 三、XXX 项目激光站防微震方案的探索

针对拟建项目的需求，结合国内已实施的其他隔震案例，为确保 ATP（激光器）的震幅在 μ 级以下，计划采用桩屏障、地面屏障、隔震沟联合并联隔振方案，具体构想及设计方案如下：

### (一) 桩屏障（排桩隔振）：

1、排桩隔振的原理：外界震源（如货车、汽车等）产生的震动通过地表进行传播。震动在地表传播的过程中，主要有三种波组成：瑞利波、s 波（横波）、p 波（纵波）。三种波的能量占比分别为：瑞利波占震动总能量的 67%，s 波（横波）占震动总能量的 26%，p 波（纵波）占震动总能量的 7%。

瑞利波是 19 世纪末，英国物理学家瑞利（Rayleigh）研究发现的，瑞利（Rayleigh）研究发现在半空间（上部接触大气层的地表面）存在一种类似于在液体表面上形成的波。这种波是由自由界面半空间内传播的纵波和横波相互迭加形成的一种特殊的震动，震动方向是以逆时针方向转动，呈椭圆形轨迹传播。通过进一步研究发现，瑞利波有如下特性：1、瑞利波沿自由表面传播的速度与横波相当，大约是横波速度的 0.9 倍，是纵波的波速的 0.5 倍。2、当瑞利波垂直自由表面向下传播时，最多传播一个波长的深度，其中大部分能量都集中在 1/2 波长范围内。3、瑞利波传播的过程中，遇到不同介质（例如土层和岩石）时，会发生散射，这种现象又叫频散。

根据上述原理，利用瑞利波频散，即弹性介质中传播的波，遇到障碍物或传播介质改变时，会发生散射及反射现象。根据相关文献，排桩作为桩屏障，是隔离中远距离环境震动（瑞利波）最有效措施。

根据附近震源分析，激光站东边 1km 紧邻南北向 s201 省道，经常有货车通过；激光站南临普通道路，场地内有时会有小车通过。货车及小车是主要震源。

根据《隔振设计标准》GB50463-2019 中有关数据，公路交通震源激励频率在 10~30HZ 之间。据该场地前期岩土工程勘察报告，场地等效剪切速度(s 波，也叫横波)介于 150m~250m 之间，覆土厚度 50m 以上。

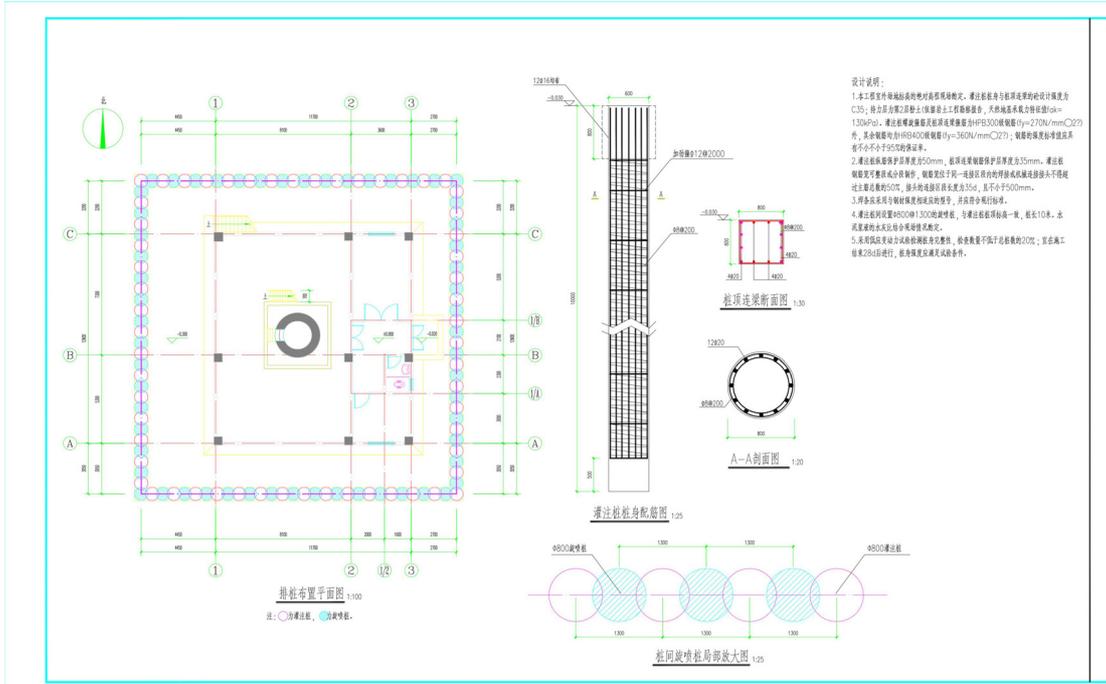
据上述数据，计算瑞利波的波长：根据公式：V 瑞=V 剪

\*0.9;  $\lambda_{瑞} * F_{频} = V_{瑞}$ 。通过上述计算， $\lambda_{瑞}$ 最大值为：13.5M， $\lambda_{瑞}$ 最小值为：7.5M。据前理论：当瑞利波垂直自由表面向下传播时，最多传播一个波长的深度，其中大部分能量都集中在 1/2 波长范围内，考虑到既能有效节省有效投资，又能有效阻断震动波，选取排桩的长度为 10m。

2、排桩设计：利用桩屏障对震动波散射及干扰现象，

采用桩屏障合围的方式屏蔽中远距离交通工具产生的震动影响。本项目排桩的具体设计如下：

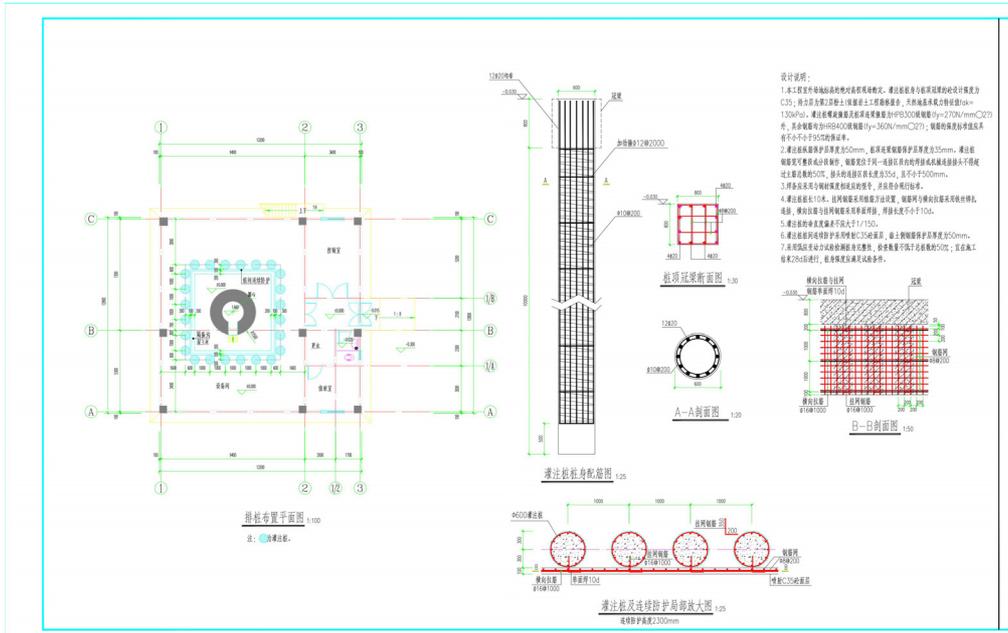
(1)、见下图一，在激光站站房外围四周 3m 左右布置 58 根排桩，四周闭合。桩径  $\phi 800\text{mm}$ ，桩长 10m，采用钢筋混凝土灌注桩，桩顶采用 800x800 冠梁四周连通。灌注桩桩间距 1300mm，灌注桩空隙处采用  $\phi 800\text{mm}$  旋喷桩，桩长 10m。



图一 站房外围四周排桩布置图

(2)、站房内部排桩布置情况：见图二，站房内，ATP（激光器）墩式基础四周布置 24 根排桩，四周闭合，桩内侧挂钢筋网喷射 C35 砼面层 100mm 厚，深 3.1m。桩径  $\phi 600\text{mm}$ ，桩长 10m，采用钢筋混凝土灌注桩，桩顶采用 600x800 冠梁四周连通。站房内布置排桩要作用：a、进一步屏蔽中远距离交

通工具产生的震动影响。b、阻隔刮风、雨雪天气时，球面罩及站房受恶劣天气影响产生的近距离震动波（主要为 s 波和 p 波）通过地面及站房地基传导 ATP（激光器）墩式基础。c、由于 ATP（激光器）墩式基础要下沉 3.1m，为后续墩式基础施工提供基坑支护，便于基坑开挖和施工。



图二 站房内四周排桩布置图

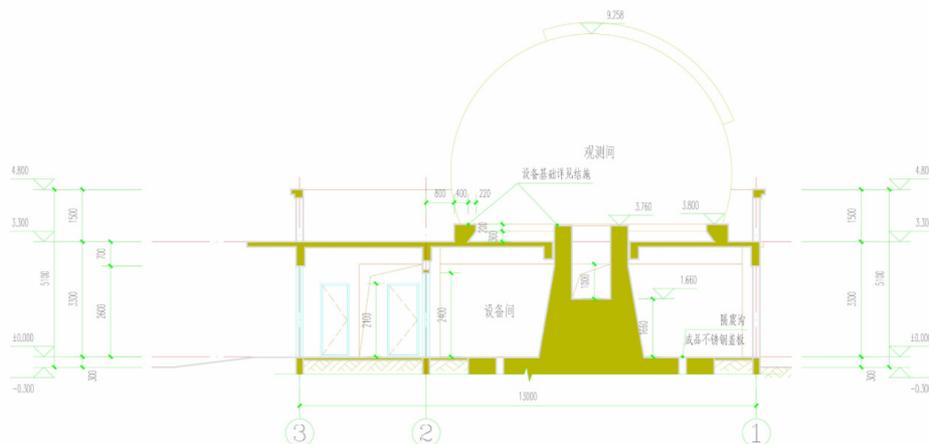
影响排桩隔振效果的因素主要包括: 桩直径、间距、深度、桩数或排长、排数、排间距以及桩身材料的性质。

为了获得较好的隔振效果, 考虑到经济性, 又能达实际效果, 本项目排桩长设计为 10m, 大约 1 倍瑞利波长, 采用了四周包围的内外双排桩。外围排桩桩间增加了旋喷处理, 内

围排桩内侧增加了 3.1m 深, 100mm 厚混凝土连续墙。根据前述案例, 由于本站房采用了内外双排桩包围的方式, 中远距离的震动能减少 70%左右。

(二) 地面屏障 (波阻板):

砂土垫层上的 ATP (激光器) 墩式基础见下图: 图 三。



1-1剖面图 1:100

图三 墩式基础

墩式基础上 ATP (激光器) 设备重量约 7t, 工艺要求: ATP (激光器) 墩式基础, 与房屋设施及球面罩相互独立, 不做任何物理硬连接, 避免振动干扰。

根据上述工艺要求, 墩式基础地面以下部分通过四周 3.1m 深, 200mm 宽减震沟与建筑物隔离, 上部 3.7m 高的圆锥台通过 50mm 环形缝隙与建筑物顶板及球面罩隔离。

根据工程经验, 置于土面上进行被动隔振的波阻板厚度越大, 被动隔振效果越好。波阻板的厚度不应小于 0.125 倍剪切波(S波)波长, 厚度过小, 隔振效率差, 也不宜大于 0.33 倍剪切波(S波)波长, 若大于此值, 投资增加很多, 而隔振效率增加甚微。根据前述公式:  $V_{瑞} = V_{剪} * 0.9$ ;  $\lambda_{瑞} = \lambda_{剪} * F_{频} = V_{瑞}$ 。通过上述计算,  $\lambda_{剪}$  最大值为: 15M,  $\lambda_{剪}$  最小值为: 8.3M, 取平均数约  $\lambda_{剪} = 12M$ 。根据前述理论, 波阻板的厚度 H 最小值为: 1.5M; 最大值为: 3.96M。考虑到减震沟要有一定的深度, 确定波阻板的厚度 H = 3.1M。由于 ATP (激光器) 要放到 3.7m 高的圆锥台上, 考虑到的圆锥台上 ATP 及地基的稳定性, 波阻板还要有一定的平面尺寸及重量, 综合考虑确定地面屏障 (波阻板) 及锥台尺寸如下述。

墩式基础下部为钢筋混凝土承台, 相当于地面屏障 (波阻板) 尺寸: 5m (长) X 5m (宽) X 3.1m (深), 重约: 220T; 上部为圆锥台 ( $\phi 3000mm \sim \phi 2100mm$ , 3.7m 高), 重 45T; ATP (激光器) 设备重量约 7T; ATP 及墩式基础总重约 272T。

本项目地面屏障 (波阻板), 其本身具有一定的刚性和重量 (基础的重量是 ATP 重量 37 倍多, 稳定性高), 根据经验公式, 可以将外界振源传来的振动屏蔽掉 70%左右。

(三) 隔震沟

根据工艺要求, ATP (激光器) 墩式基础, 与房屋设施及球面罩相互独立, 不做任何物理硬连接, 避免振动干扰。

根据前期地勘报告, 项目所在地属荒漠气候项目区属荒漠气候, 降雨少, 蒸发量大, 日照充足且温差大, 冬季有稳定降

水。年平均气温 5.7℃; 年极端最高气温 43.8℃, 极端最低气温 -41.6℃。年平均降雨量 144mm, 蒸发量 2348mm, 年平均积雪深度 19cm, 最大积雪深度 34cm。常年以西北风为主, 风速 2.2~3.4 m/s, 春夏两季最大, 冬季最小。

按上述气象资料, 风、雨、雪等对球面罩和建筑物的影响产生的近距离震动 (主要为 s 波和 p 波), 也必须考虑。而隔振沟是阻隔近距离震动最有效措施之一。

由于空沟隔震几乎不发生透射, 研究表明, 沟式屏障隔振的效果主要和深度有关, 和沟的宽度关系不大, 沟深大于 1 倍瑞利波波长时, 隔振效果可达 60%~80%。

本项目隔振沟设计方案如下 (见前图三): ATP (激光器) 墩式基础地面以下部分通过四周 3.1m 深, 200mm 宽减震沟与建筑物隔离, 上部 3.7m 高的圆锥台通过 50mm 环形缝隙与建筑物顶板及球面罩隔离。主要用来阻隔刮风、雨雪天气时, 球面罩及站房受恶劣天气影响时产生的近距离震动波 (主要为 s 波和 p 波) 通过地面及站房地基传导 ATP (激光器) 墩式基础。

#### 四、结语

由于防微震设计涉及结构力学、弹性力学、土动力学、震动波传播学、地震学等多门学科, 目前能用于工程设计比较成熟的理论比较少, 因本项目防微震方案设计时主要依据已有的, 且实际运用过程中成功的案例, 比如: 白玲、李兴磊两位老师设计的《北京机床所精密机电搬迁项目》, 通过合理的排桩、地面屏障合理的设置, 项目完工后经实测, 在不同的震源下, 震幅均达到 0.5 $\mu$  以下。

本项目隔振体系设计还充分考虑了后续施工的便利, 例如站房内排桩的设计不单为了隔振, 还考虑了站房下沉式 ATP (激光器) 墩式基础开挖时的基坑支护, 也考虑了减震沟的一并设置及站房本身基础施工时不受 ATP (激光器) 墩式基础开挖时的影响, 节省了工程造价, 而且还缩短建设了工期。