

# 天线座结构设计

吴凤高 编

西北电讯工程学院

# 目 录

|                                   |     |
|-----------------------------------|-----|
| <b>第一章 绪 言</b> .....              | 1   |
| § 1. 天线座的组成.....                  | 1   |
| § 2. 天线座的分类.....                  | 4   |
| § 3. 天线座的设计要求.....                | 5   |
| <b>第二章 天线座的结构型式</b> .....         | 7   |
| § 1. 俯仰—方位型天线座.....               | 7   |
| § 2. 天线座的其它结构型式.....              | 20  |
| § 3. 舰用天线座.....                   | 28  |
| <b>第三章 天线座的支承</b> .....           | 35  |
| § 1. 大直径滚动轴承.....                 | 35  |
| § 2. 静压轴承.....                    | 46  |
| <b>第四章 天线座上的其它部件</b> .....        | 70  |
| § 1. 弹簧平衡器.....                   | 70  |
| § 2. 滑环和电缆卷绕装置.....               | 77  |
| § 3. 安全保护系统.....                  | 91  |
| <b>第五章 天线座的轴系精度</b> .....         | 98  |
| § 1. 概 述.....                     | 98  |
| § 2. 天线座轴系误差对测角精度的影响.....         | 110 |
| § 3. 影响轴系误差的因素及调整补偿办法.....        | 116 |
| § 4. 轴系误差的测量方法.....               | 123 |
| § 5. 基准平台.....                    | 134 |
| <b>第六章 随动系统基本概念和结构因素的影响</b> ..... | 137 |
| § 1. 概 述.....                     | 137 |
| § 2. 随动系统的基本要求.....               | 140 |
| § 3. 二阶随动系统的性能分析.....             | 145 |
| § 4. 拉氏变换和传递函数.....               | 151 |
| § 5. 频率分析法.....                   | 160 |

|  |            |
|--|------------|
| § 6. 结构因素的影响 .....                     | 173        |
| <b>第七章 天线驱动系统 .....</b>                | <b>189</b> |
| § 1. 驱动系统的负载 .....                     | 189        |
| § 2. 驱动方式的选择 .....                     | 212        |
| § 3. 驱动电机的容量及总传动比的选择 .....             | 217        |
| § 4. 传动型式、级数及各级传动比的选定 .....            | 226        |
| <b>第八章 天线驱动系统的结构谐振及其对伺服系统的影响 .....</b> | <b>234</b> |
| § 1. 扭转振动及其固有频率的计算 .....               | 234        |
| § 2. 结构谐振对伺服系统的影响 .....                | 254        |

# 第一章 绪 言

天线座是天线的支撑和定位装置。现有天线座的结构型式是多种多样的，从尺寸和重量上来看，小的可以随身携带，大的天线直径100多米，重达几千吨。从结构精度要求上来看，有的搜索雷达天线座就是一个简单的支架和方位驱动系统，天线波束很宽，对支架和驱动系统的精度要求不高。一般炮瞄雷达天线波束宽度为几度，测角精度1~2密位。精密跟踪雷达用于测量导弹、卫星或其它空间飞行器的飞行轨迹，波束宽度 $2^{\circ}\sim 0.4^{\circ}$ ，测角精度高达0.3~0.05密位，对天线座的要求也比较高，要求结构刚度好，静态和动态的变形小，在各种气候条件下尺寸稳定，方位轴的垂直度和方位轴与俯仰轴的正交性误差小于几秒，在动力学方面要求转动惯量小，结构的固有频率高，间隙小、摩擦和摩擦的起伏小。大型毫米波射电望远镜波束宽度只有几分，精度要求为几秒~几十秒，对天线座的结构精度要求更高。

因此高精度天线座的设计和制造是一个复杂和艰巨的机械工程问题。在结构设计、制造工艺和测量技术方面都有一系列新的问题。

## § 1. 天线座的组成

图 1-1 所示为某炮瞄雷达的天线座，按照各部份的用途和结构特点可以划分为下列几个系统：1. 天馈系统；2. 座架；3. 方位和俯仰动力驱动系统；4. 方位和俯仰同步传动系统；5. 集流器；6. 安全保护系统。

1. 天馈系统——用于定向辐射高频电磁能量和定向接收目标的反射信号。其中包括主反射体、付反射体、馈源、馈源支架、方位和俯仰高频转动关节。

主反射体固定在支撑架上，支撑架装在桥形架上，与俯仰动力传动减速器和同步传动箱一起转动。

2. 座架——用于安装天线和其它部件。由俯仰轴、方位轴、三脚架、底盘等组成。

底盘是一块圆形的铸钢件，底盘中心有方位轴的下轴承座，方位轴的上轴承装在三脚架顶部的钟形罩里，三脚架用螺栓固定在底盘的楔形块上，利用楔形块可以调节上下轴承的同心度，使各轴承都能灵活地转动。

俯仰轴用联接盘紧固在方位轴顶部，联接盘的结合面有一点斜度，可以调节方位轴和俯仰轴的正交性。俯仰轴一端安装动力驱动减速器，另一端安装同步传动系统，两者用桥形架连接，可在俯仰轴上与天线一起转动。

3. 方位和俯仰动力驱动系统——用于驱动天线在方位和俯仰方向转动，它是天线控制系统的一个组成部份。

方位动力驱动系统包括驱动电机，联轴器，二级齿轮减速器，减速器输出小齿轮和方位大齿轮。

方位总减速比  $i = \frac{60}{12} \times \frac{96}{12} \times \frac{118}{21} = 224.8$

俯仰动力驱动系统包括驱动电机、6线蜗杆，蜗轮，和一级齿轮减速，减速器输出小齿轮经过安全离合器与扇形齿轮相啮合。

扇形齿轮装在俯仰轴上固定不动，小齿轮转动时就带动俯仰减速器，天线和同步传动箱一起绕俯仰轴转动。

俯仰总减速比为  $i = \frac{72}{6} \times \frac{85}{17} \times \frac{200}{1} = 800$

#### 4. 方位和俯仰同步传动系统——

方位同步传动系统装有：用作方位手控系统比较元件的同步变压器，用于向指挥仪传递方位角数据的精测和粗测同步发送机，以及用于环视显示器随动系统的同步发送机。

同步变压器转子与方位轴传动比  $i = \frac{200}{200} = 1$

精测同步机转子与方位轴传动比  $i = \frac{320}{16} = 20$

粗测同步机转子与方位轴传动比  $i = \frac{200}{200} = 1$

环视同步发送机转子与方位轴传动比  $i = \frac{200}{200} = 1$

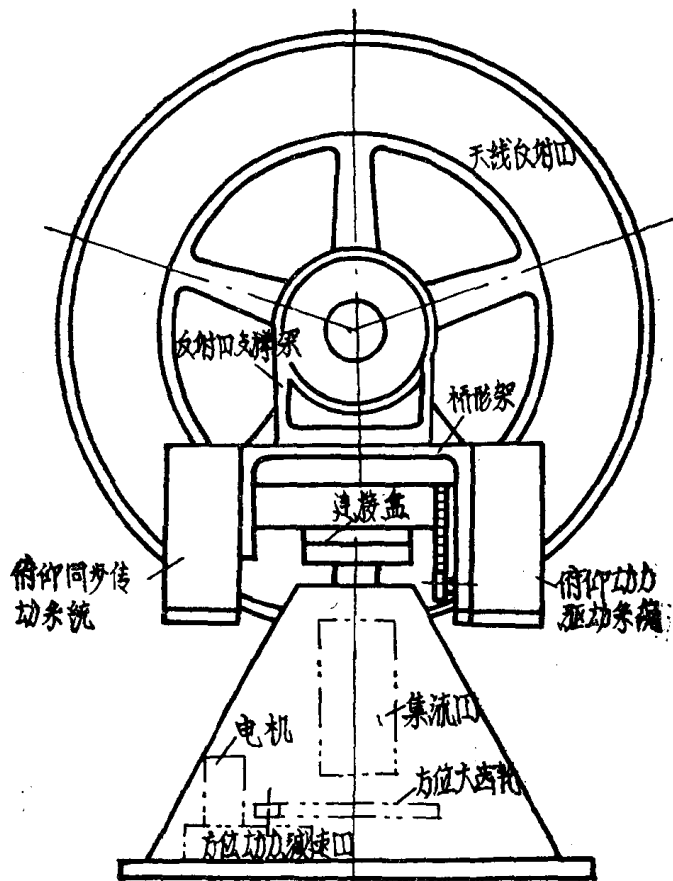
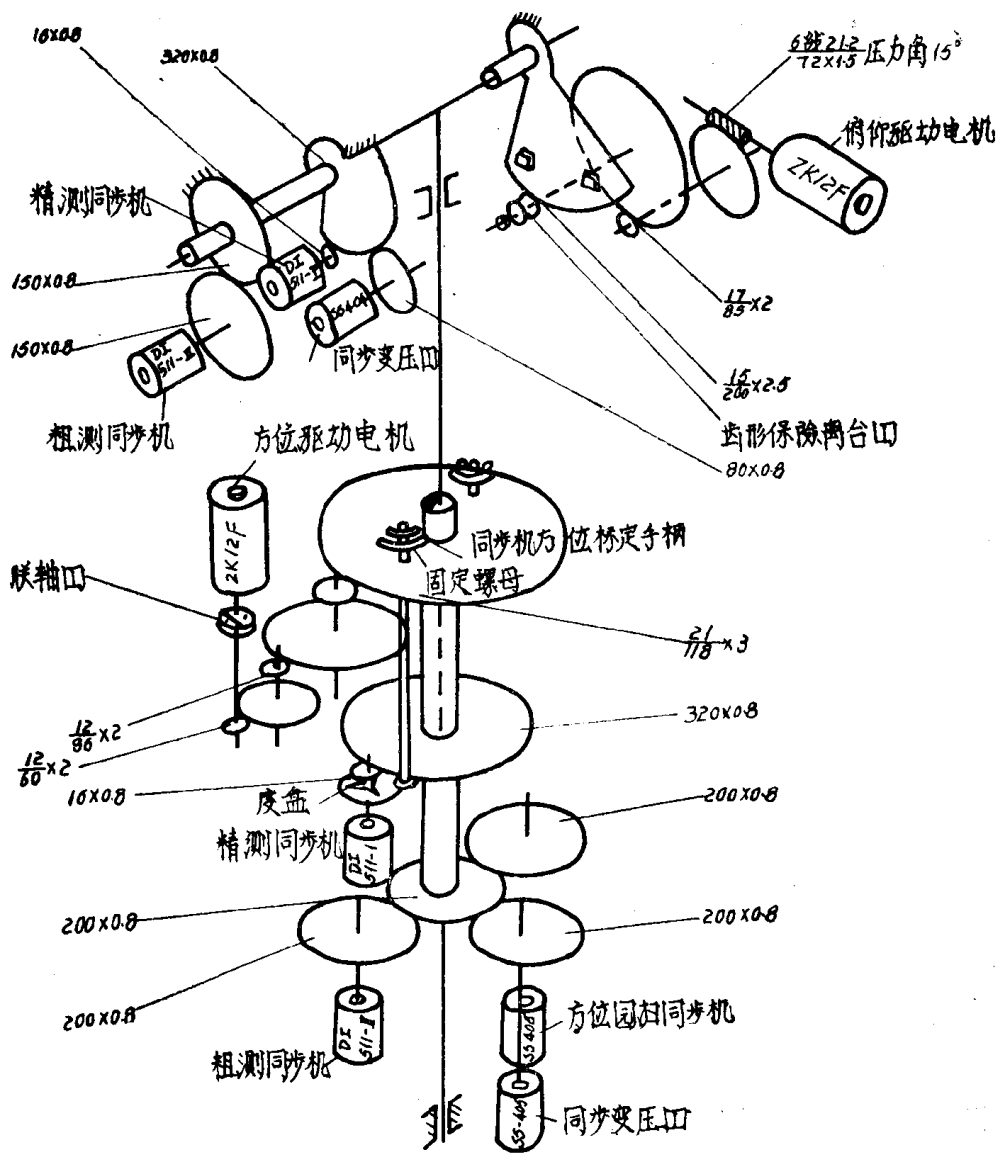


图 1-1



天线座传动图

图 1-2

同步传动的小模数双联齿轮套在方位轴上。在雷达方位标定时，天线转到正北方向，可用它来调整方位角同步机转子转到零位上，调好后，再将同步传动的双联齿轮与方位动力传动大齿轮紧固，一起转动。

俯仰同步传动系统装有：用作俯仰手控系统比较元件的同步变压器；用于向指挥仪传递俯仰角数据的精测和粗测同步发送机。

同步变压器转子与俯仰轴传动比

$$i = \frac{320}{80} = 4$$

精测同步机转子与俯仰轴传动比

$$i = \frac{320}{16} = 20$$

粗测同步机转子与俯仰轴传动比

$$i = \frac{150}{150} = 1$$

5. 集流器——用于天线座转动部份和固定部份之间传输功率电源和低频信号。

集流器共35环，环与环之间用绝缘环隔开，每个银环的内侧都焊有一根导线，从方位轴中心通到转动部份上，电刷为银编织线与固定部份相连。

6. 安全保护系统——由行程限制开关，弹簧缓冲器和安全离合器组成，当天线转到上、下极限位置时，用以保护天线、天线座和传动系统，以免损坏。

## § 2. 天线座的分类

1. 按使用条件可分为：

空用、海用、陆用。陆用又可分为车载的和固定的。

2. 按设备的用途可分为：

搜索、跟踪、通信、天文等。

3. 按天线座转轴的数目可分为：

一轴、二轴、三轴、四轴和固定不动的（电扫描）。

4. 按天线支架的形式可分为：

俯仰——方位型，x—y型，极轴型……等。

俯仰——方位型又可分为：立轴式、转台式、轮轨式。

立轴式还可再分为：“T”形、“H”形等。

转台式还可再分为：矮臂小转盘、高臂大转盘……等。

5. 按驱动方式可分为：

电力驱动、液压驱动。

6. 按精度要求可分为：

高、中、低三级。对现有跟踪雷达可大致区分为：高精度的（0.0几密位），中等精度（0.几密位），低精度（几密位）。

7. 按天线的尺寸可分为：

大（10米以上），中（3~10米），小（3米以下）。

### § 3. 天线座的设计要求

天线座的设计要求取决于雷达的用途和性能要求，对各种雷达天线座的设计要求是不同的，下面只能列举一些具有共性的设计要求：

#### 1. 保证天线的运动范围

雷达工作范围一般要求天线在方位上能 $360^\circ$ 连续转动，在俯仰上则限制在一定的扇形面内。

如某炮瞄雷达要求

方位运动范围  $360^\circ$

俯仰运动范围  $-3^\circ \sim 87^\circ$

有的雷达为了便于校正要求俯仰转动范围从 $-10^\circ \sim +190^\circ$ 。

#### 2. 在给定的工作风速下，保证方位和俯仰的角速度和角加速度。

随着目标飞行速度的提高和雷达作用距离的增大，要求雷达天线运动速度的变化范围很宽，既能快速跟踪近距离的快速飞行目标，又能平稳地跟踪远距离目标。

如有的雷达要求天线转速从 $6^\circ \times 10^{-5}/\text{秒} \sim 10^\circ/\text{秒}$ 。

这就要求驱动系统不但要有足够的动力，转动惯量小，加速性能好，而且要求有良好的低速性能、齿隙、摩擦和摩擦起伏小，以免发生低速抖动。

#### 3. 在给定的工作风速下，保证方位和俯仰的测角精度。

搜索雷达应能准确地测定捕获目标的空间坐标。跟踪雷达应能将天线准确地转到引导雷达所指引的方向（定位精度）迅速转入跟踪，并在跟踪过程中精确测定目标的数据（测角精度）送到指挥仪，带动高炮对准目标射击。

影响雷达测角精度的因素很多，有随动系统的误差，结构误差，安装调整误差，传动机械误差。属于机械结构方面的因素比较多，而且随着天线直径的增大，机械结构问题更加突出。

#### 4. 为了保证雷达的精度和动态性能、天线座必需具有足够的刚度，并尽可能减小转动惯量，使结构固有频率大于随动系统带宽的5倍。

在天线座设计中，确定结构尺寸的主要矛盾是刚度，在给定工作风速和加速度下，结构变形必须小于限定的数值，变形过大就不能保证雷达的测角精度。

惯量大，随动系统反应迟钝，动态性能差。结构固有频率与刚度成正比，与惯量成反比，惯量大，刚度差，固有频率就低，如果结构固有频率在随动系统带宽之内，阵风或者其它噪声干扰就会激起结构谐振，使天线随动系统失去稳定，通常要求

结构固有频率  $>$  随动系统带宽的5倍

#### 5. 在规定的极限风速下，保证天线座结构的强度

技术条件除了规定保精度工作风速外，还规定不损坏的极限风速，在超过工作风速时，可将天线转到比较安全的收藏位置。应按此条件校核天线座结构的强度。

#### 6. 结构紧凑，重量轻，拆装简易，运输方便。

空用设备体积重量限制最严，随着飞机速度的提高，每公斤电子设备使飞机本身增加的



重量急剧上升。地面车载雷达体积重量过大也影响机动性。还要考虑铁路公路运输的界限尺寸，天线太高在火车上运输就过不了山洞。

大型天线座需拆卸运输，各部份应有吊装和定位装置，力求拆装简单，容易掌握，运输方便。

#### 7. 材料选用合理，结构工艺性好，加工成本低，生产周期短。

材料的选择既要考虑性能要求，也要考虑经济的原则。结构设计必需考虑工艺性要求，设计时必需了解工厂的生产条件。应尽量减少高精度部件，大型部件，减少加工复杂、装配困难的部件，尽可能采用常规的技术和设备。

科学技术发展很快，如果加工困难，所需的专用工装设备很多，生产周期很长，还没有定型生产，就可能已经失去了先进性。

#### 8. 维修简便，安全可靠

对于需要经常清洗、润滑或修理的部件，应该便于操作。维修最好能不影响系统的正常工作，能带电维修。尽量采用积木化设计，必要时可更换整个单元。

机械转动部份应有机械—电安全保护系统，以免发生工伤事故，保证设备安全可靠运转。

#### 9. 三化——零件标准化，部件通用化，产品系列化。

零件标准化，部件通用化和产品系列化是采用科学分析和科学归纳的方法把各种产品的零件、部件统一化为数量有限的标准零件和通用部件，把每种产品划分为一定的系列，压缩品种减少重覆劳动，同一系列的产品可以统一设计、统一制造工艺，能用同一套基本图纸。

三化不仅是一项技术工作，而且具有重大的政治意义，是多、快、好、省的重要途径，是一项重要的技术政策。实现三化可以组织专业化生产，提高生产率，提高质量、降低成本；实现三化可以简化设计工作，把设计力量集中在新的、特殊的、关键的结构和部件上，缩短新产品的研制周期；实现三化可以提高设备的可靠性，改善使用性能，保证零、部件的互换性，简化修配工作。

实现三化的关键在于设计部门。国家标准、部颁标准都是集中了国家的先进技术及经验而制订的，设计人员必须熟悉有关的标准，遵守各种标准。如果标准零件和通用部件的确不能满足使用要求时，当然也可以采用非标准的设计。

## 第二章 天线座的结构型式

天线座的结构型式很多，按转轴的数目可以分为一轴、二轴、三轴、四轴和固定不动的。一轴天线座就是只有方位轴。主要用于搜索、引导雷达，采用截割抛物面、抛物柱面、振子天线、裂缝天线等，形成扇形波束，垂直方向宽、水平方向窄，所以俯仰可以不转动。跟踪雷达采用圆抛物面天线，是针状波束，必需有两根轴才能覆盖整个空域，地面雷达基本上都是一轴和二轴的。三轴、四轴主要用于舰用雷达，其中二个轴是用作稳定平台补偿舰艇纵横摇摆的。相控阵雷达是电扫描，用四个固定的天线阵就可覆盖整个空域。目前应用最广的是二轴天线座。

二轴天线座按照支架的结构型式可以分为：俯仰-方位型，x-y型，极轴型，下面介绍各种型式的结构和特点。

### § 1. 俯仰一方位型天线座

俯仰一方位型天线座有的称为经纬仪式或地平天线座。方位轴与地面垂直，俯仰轴与方位轴垂直。

俯仰一方位型天线座有三种基本型式：主轴式、转台式、轮轨式。

#### 1. 立轴式

如图 2-1 所示。

方位轴——要承受风载荷，惯性载荷和转动部份重力引起的轴向力  $F_T$ 、径向力  $F_R$  和倾覆力矩  $M$ 。

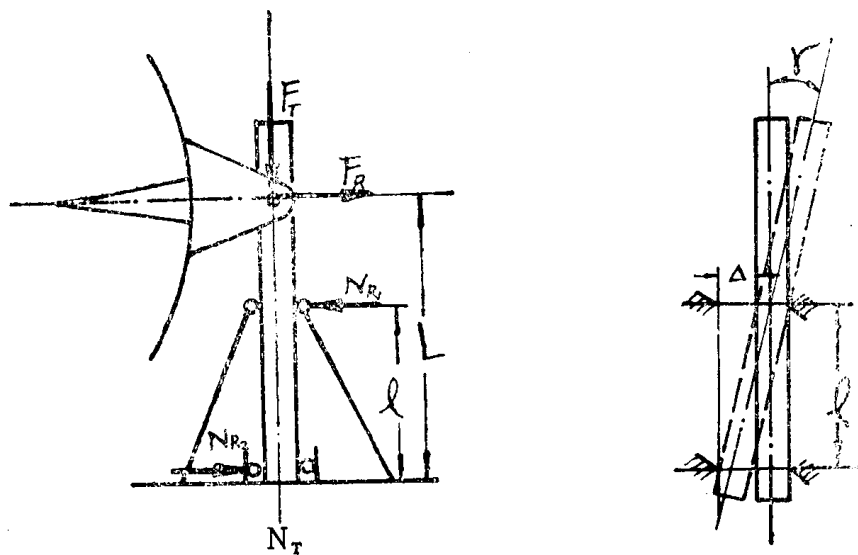


图 2-1

为了抵抗倾覆力矩，保持方位轴线的精度，不产生过大的倾斜，方位轴应有上、下两个轴承，轴承间距  $l$  需要比较大。因为轴承反力

$$N_{R1} = \frac{F_R \cdot L}{l};$$

$$N_{R2} = N_{F1} - F_R;$$

$$N_T = F_T$$

轴承间距  $l$  大，轴承径向载荷  $N_{R1}$ ， $N_{R2}$  就小。

设轴承间隙为  $\Delta$ ，则方位轴线的倾角

$$\gamma = \frac{\Delta}{l}$$

轴承间距  $l$  大，方位轴线的倾角  $\gamma$  就小。

方位轴还要承受驱动天线转动的各种阻力矩，所以方位轴应有足够的刚度和强度。

方位轴中心要通过各种传输线，一般是粗大的空心轴。

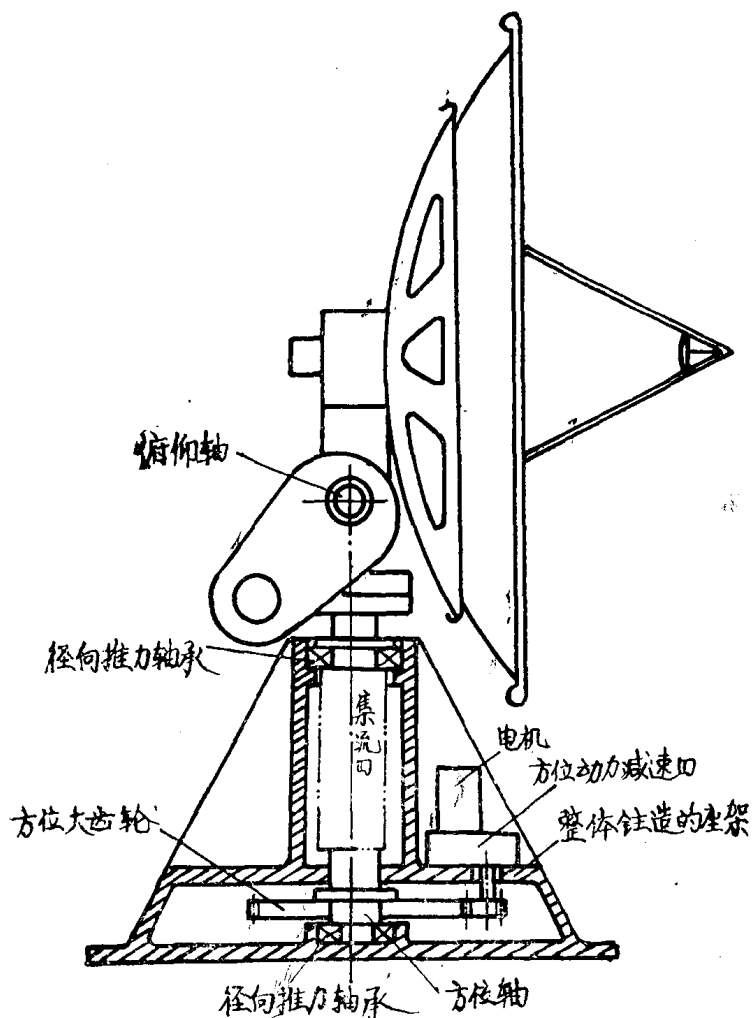


图 2-2

座架——有的采用铸钢的三脚架装配式（图 2-3），有的采用整体的铝铸件（图 2-2）。

三脚架装配式上、下轴承的同轴度是靠装配调整，因此必须采用径向球面自位轴承，止推轴承加球面垫圈，这样上、下轴承有少量不同轴度能自动调心保证正常的运转，这种结构另件加工精度可以降低，但装配调整都比较复杂，所以成本比较高，结构的刚度也比较差。

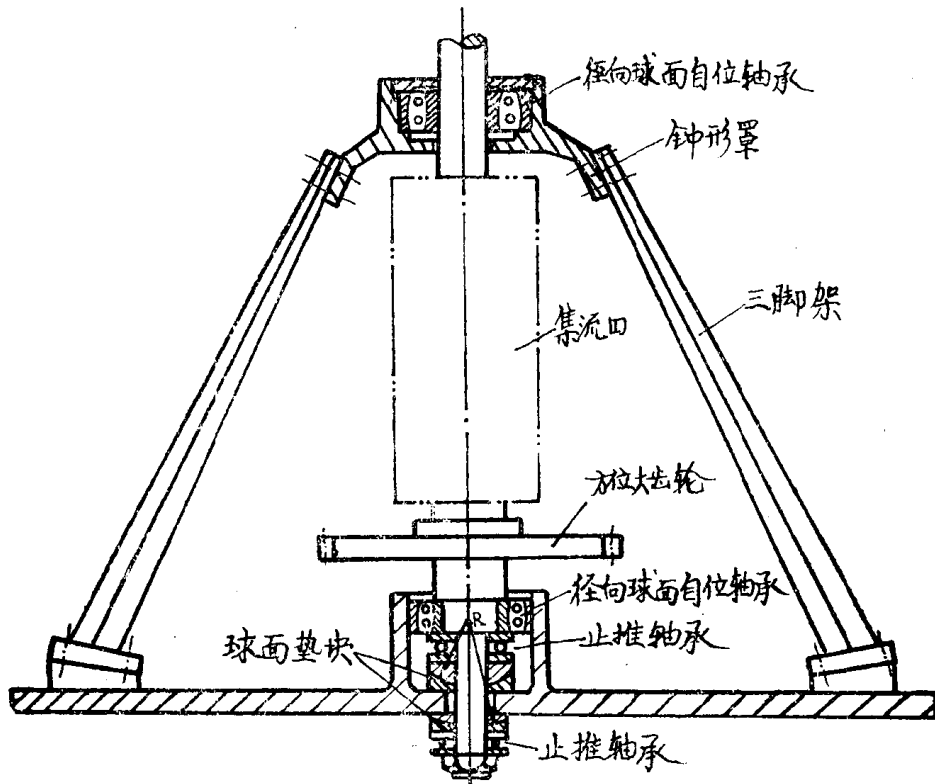


图 2-3

采用整体的铝铸件，座架的刚度比较好，上、下轴承座的同轴度由加工保证，装配调整简单。可用上、下二个径向推力轴承，或者二个径向轴承，一个推力轴承。推力轴承可以放在下端，也可以放在上部，视座架强度和刚度而确定。

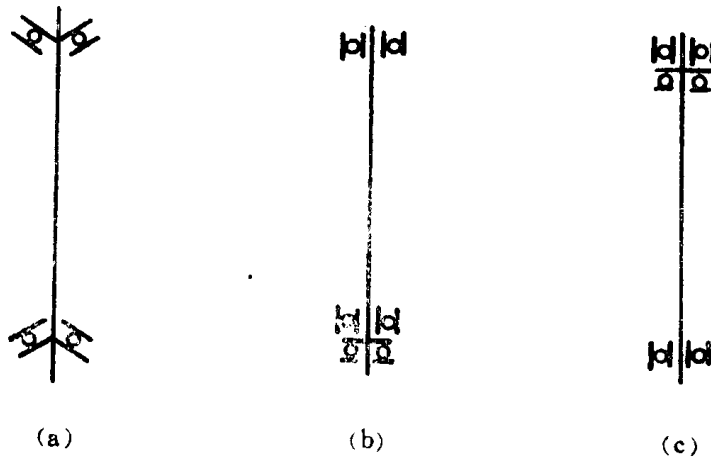


图 2-4

俯仰结构——无论圆锥扫描雷达或者单脉冲雷达，反射体背后都有一些高频系统，为使反射体背后的高频系统不妨碍天线的俯仰转动范围、在立轴式支架中有三种典型的结构：

(1) 反射体中心偏置于俯仰轴之上。如图 2-2 所示，天线可俯仰  $90^\circ$ ，但不能转  $180^\circ$ 。由于转轴偏离抛物面顶点的距离较大，风力矩、转动惯量以及天线系统对俯仰轴的重力矩都随之增大。为了平衡天线系统对俯仰轴的重力矩，将俯仰减速器和同步传动箱配置在俯仰轴的另一侧，在减速器上再加几块平衡重，使俯仰转动部分对转轴之重力矩为零，即达成静平衡。

(2) 反射体中心偏置于方位轴之一侧。如图 2-5 所示。天线座由一坚固的箱式底架组成，底架有三个对称的座臂，座臂下部有固定用的千斤顶，方位轴上装有上、下径向滚子轴承和推力轴承，方位轴顶上有一鼓形圆柱，圆柱顶上装有两个俯仰轴承，俯仰轴一端装天线系统和高频箱，另一端装光学系统(参考望远镜，电影摄影机和电视摄影机)的支架和俯仰驱动系统。

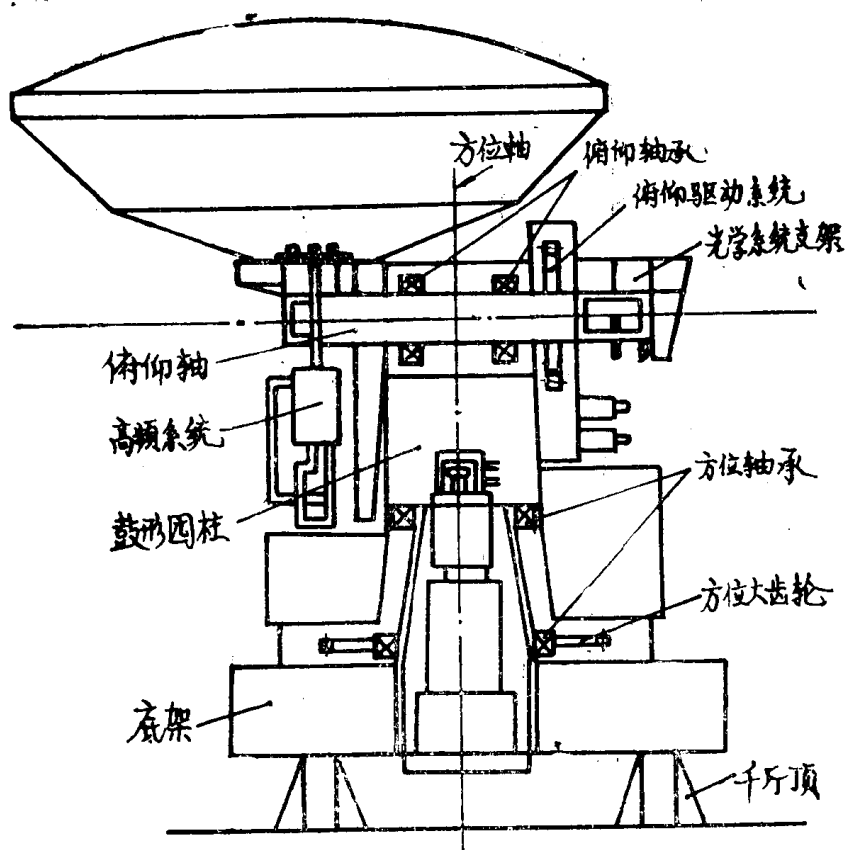


图 2-5

这种配置方法，俯仰可以转动  $180^\circ$ ，天线和高频箱的尺寸大一些、小一些都可以装，“伸缩性”较大，就是转动惯量稍大，为了减小转动惯量、各转动部件与转轴之间的距离应尽可能缩短，同时尽可能采用轻金属。

为了减小间隙，立轴采用“ $\Delta$ ”型液压预应力滚针轴承，如图 2-7 所示，轴承套圈（内圈或外圈）由两个固定支座和一个液压弹性支座支承（对称配置），利用液压弹性支座使套圈作弹性变形，从而消除了轴承间隙。

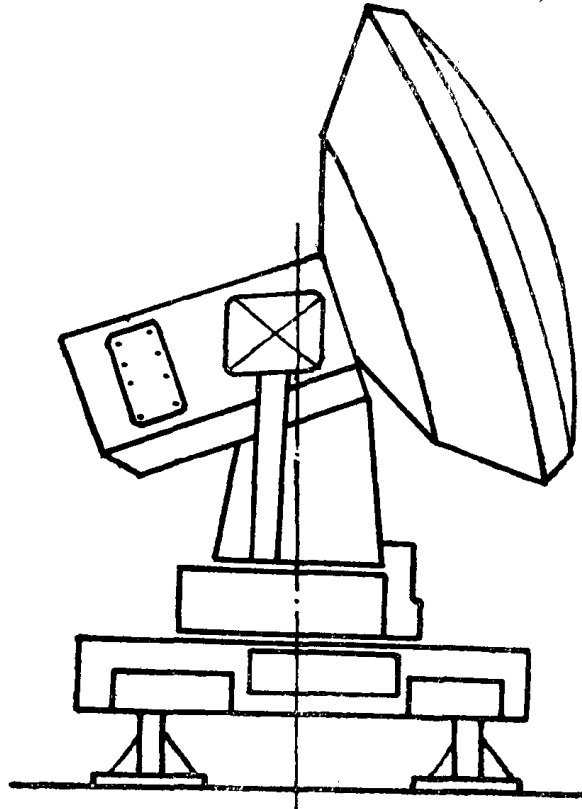


图 2-6

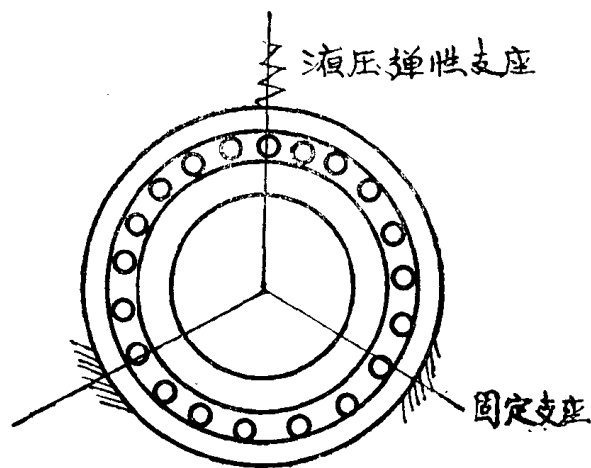


图 2-7

(3) “丫”形支架。如图 2-8 所示，方位轴上装有短叉臂，两臂的跨距和高度取决于反射体背后高频系统的体积和俯仰轴的位置。这种结构天线可以转动 $180^\circ$ 。俯仰轴偏离抛物面顶点距离小，因此风力矩、转动惯量较小。

叉臂两边的轴承孔应保证同心，并与连接盘平面平行，以保证方位轴与俯仰轴的垂直度。俯仰驱动系统和同步传动系统可装在两臂上。

对于单脉冲雷达，如果接收机高频部份也装在反射体背后，这样可以不用高频多路转动关节，通过中频滑环将信号送到中频接收机，可以减小损耗，但高频箱体积较大，需要加大叉臂的跨距和高度，因而增加了整个天线座的总高度。

## 2. 转台式

立轴式天线座为了抗倾覆力矩，保证方位轴线的精度，方位轴需有足够的长度，因而天线座必需有足够的高度，为了降低高度、提高精度有的小型雷达也采用转台式天线座。

精密跟踪雷达以及中型和大型的天线座，因为精度要求高，转动部份的重量大，风载荷大，目前广泛采用能够承受轴向、径向载荷和倾覆力矩的大直径轴承转台或静压轴承转台（这类轴承在下一章专门介绍）。

转台式天线座承载能力大，刚度好，精度高，可以省略粗大的中心轴，并可将方位大齿圈和轴承座圈做成一体，在轴承中间可以让出较大的空间安装其它的部件，使结构布置更加紧凑，更加合理；轴向尺寸小，降低了旋转部份的重心，增强了天线座的稳定性。

### (1) 静压轴承转台

图 2-9 所示为某精密跟踪雷达的天线座，天线直径 4.2 米，转台直径大约 2 米，俯仰轴离转台高度 1.6 米，抛物面顶点偏离俯仰轴 1.13 米，天线座总重 14 吨。方位可 $360^\circ$ 连续旋转，俯仰极限位置从 $-4^\circ \sim 184^\circ$ 。

为了保证天线座的结构精度，尺寸稳定，各主要构件如：底座、转盘、左右文臂、高频箱等均采用 28~48 孕育铸铁件，这种铸铁件经过自然时效和人工时效后，能保证构件有良好的尺寸稳定性。

方位采用静压轴承能获得较高的旋转精度，较大的抗风倾覆能力，静压轴承动摩擦和静

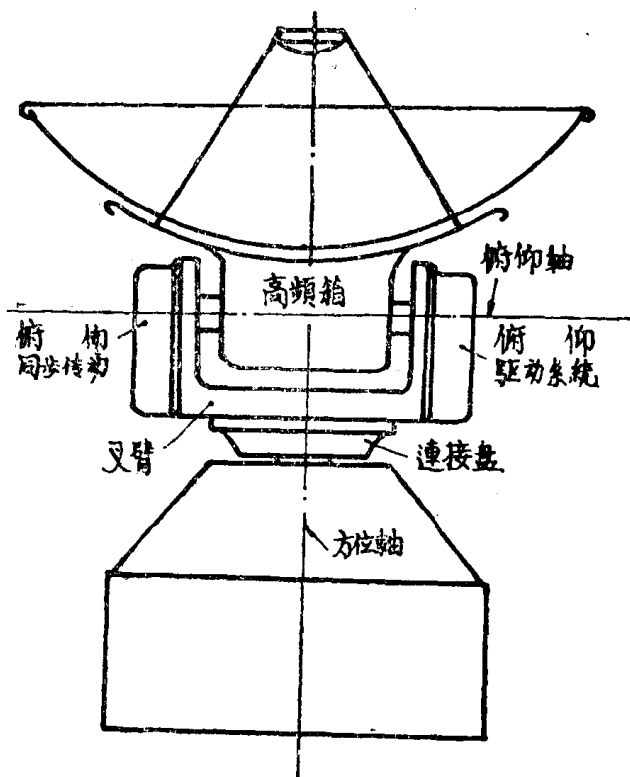


图 2-8

摩擦差别不大，摩擦起伏小，具有良好的慢动性能。轴向油膜厚度 0.05 毫米，径向油膜厚度 0.07 毫米，在 600 公斤·米的倾覆力矩作用下，转盘端面摆动不大于 2"；在 300 公斤水平推力作用下转盘径向偏摆不大于 0.005 毫米。

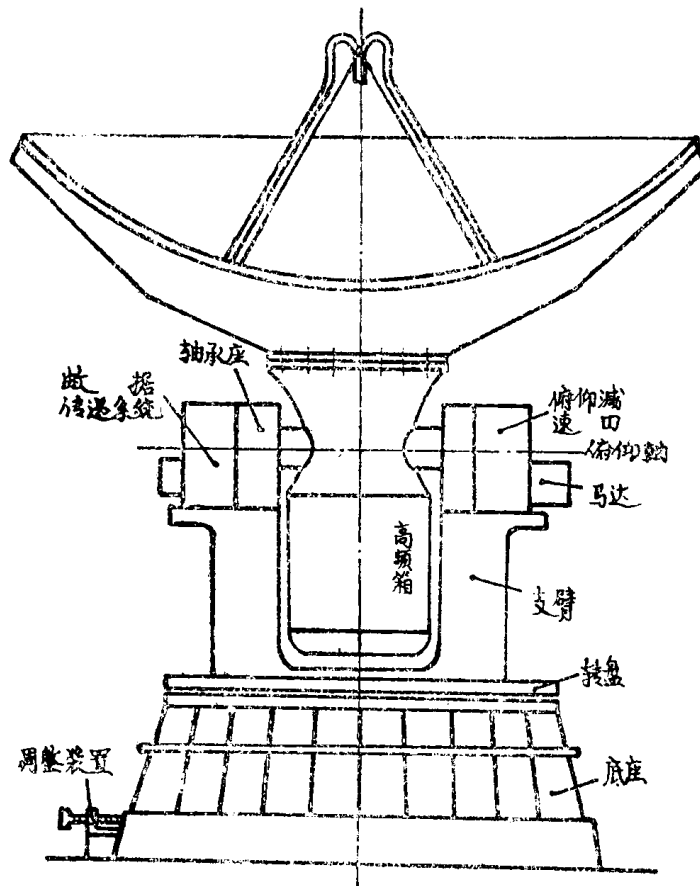


图 2-9

俯仰采用平滚道圆柱滚子轴承(图 2-10)滚子直径×长度 = 25 × 25 毫米，这种轴承有良好的工艺性和较高的承载能力，经过仔细研磨后，轴承环及轴头都可以达到锥度和椭圆度小于 0.002 毫米。并保证轴头、滚子及轴承环三者的配合间隙控制在 0.005~0.01 毫米范围内。滚子轴承两侧还有球形推力轴承，限制轴向窜动。左右轴头、推力轴承和径向轴承环等另件采用甲种 Cr15SiMn 轴承钢，经过淬火和冰冷处理后，可获得很高的硬度 HRc59~61 及良好的尺寸稳定性，所以俯仰轴能获得较高的旋转精度。

由于左右支臂和轴承材料的尺寸稳定性好，不用任何调整机构，经过精细的计量和括研组装后，俯仰轴和方位轴的正交性误差可以达到不大于 2"。

### (2) 大直径轴承转台

如图 2-11 所示的测高雷达，发射机装在车厢上与天线一起沿方位转动，天线俯仰摆动时，辐射器固定不动，这样在俯仰和方位上都不需要大功率的高频转动关节，在电设计上比较简单，但转动部份重量大，转动惯量大，采用炮架作为车厢底盘。



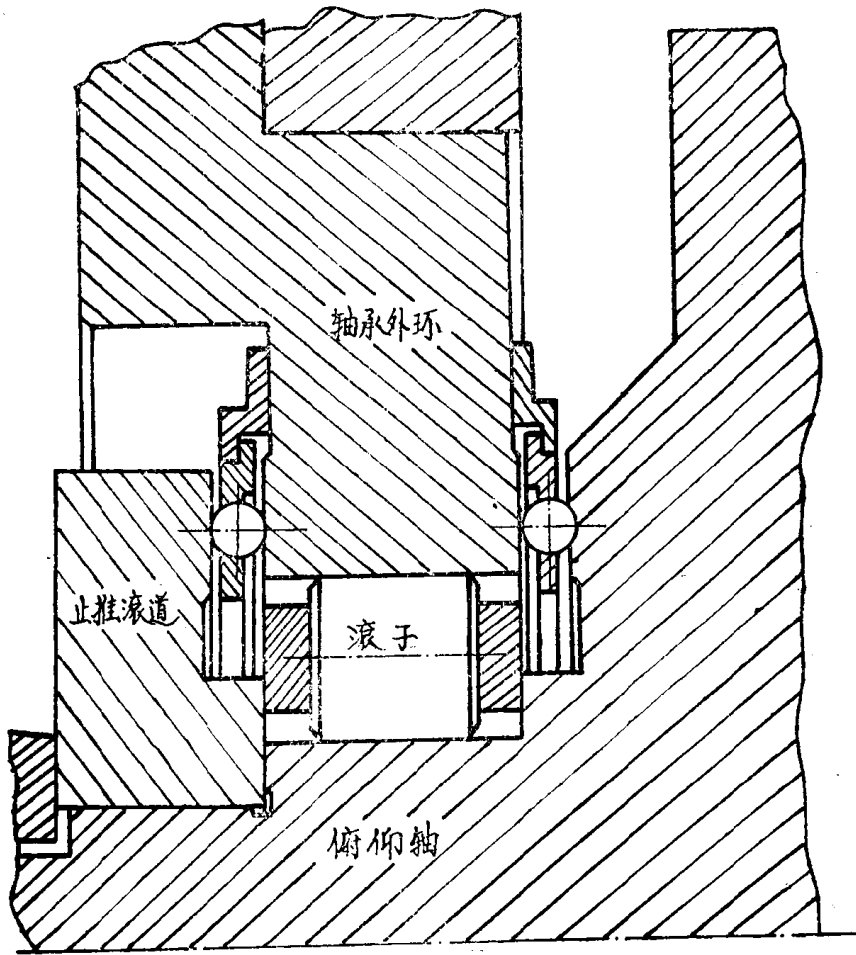


图 2-10

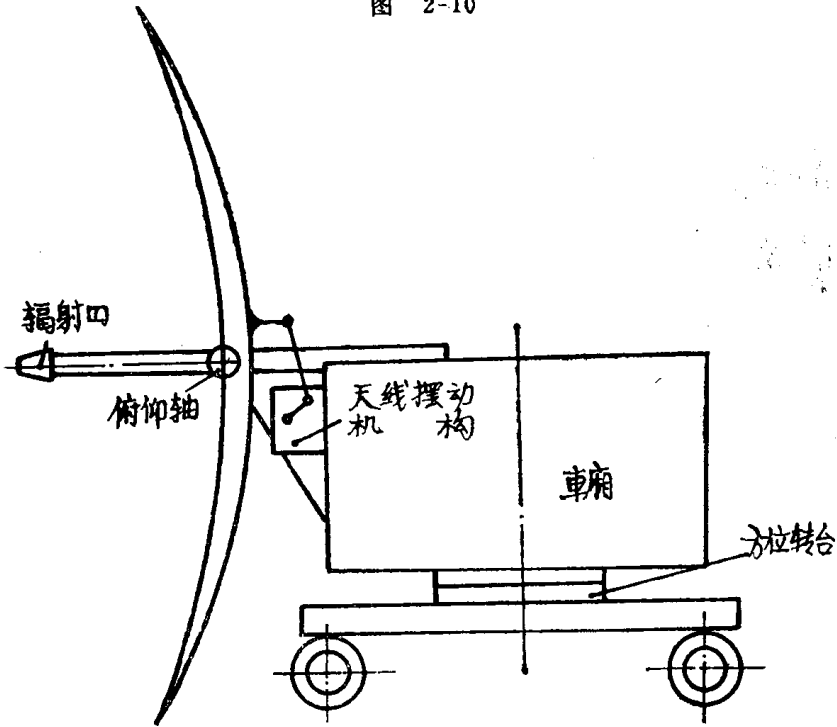


图 2-11