

雷达机械工程论文集

叶尚辉 胡林祥 吴凤高 等译



雷达机械工程论文集

叶尚辉 胡林祥 吴凤高等译

西北电讯工程学院资料室

一九八〇年八月

出 版 说 明

美国电气与电子学工程师学会 (IEEE) 在 1977 年首次举办了关于雷达机械工程的国际学术会议, 参加的国家有美国、英国、日本、意大利、瑞典、以色列等。这本会议论文集内容比较广泛, 包括: 雷达总体结构、天线结构、天线罩、天线座、稳定平台、伺服机械、电子设备热设计、冲击振动隔离、电子组装技术、新型复合材料的应用和生产技术等。涉及航天、航空、海用、陆用、大型、小型雷达以及三座标雷达、合成孔径雷达、相控阵雷达等新型雷达的结构设计和生产技术问题。材料新颖, 在一定程度上反映了国际上雷达结构工艺的新动向、新技术和新水平。

目前我国雷达结构工艺还比较薄弱, 而且资料很少。也没有专门的刊物, 根据有关厂、所的意见, 我们翻译出版了这本文集, 以便吸收国外成功的经验, 促进我国电子工业的发展。本文集可供电子工业部门从事研究、设计和生产的工程技术人员以及有关专业的教师和学生参考。

参加翻译的有叶尚辉、胡林祥、吴凤高、赵惇爻、李在贵、王世萍、李泉永、严武升、杨庚辰、杨兵、施游立、张诗才同志。并由叶尚辉、胡林祥、吴凤高同志审校。由于内容较广、较新, 有些术语比较难译, 再加我们业务水平有限, 时间较紧, 一定会有不少错误和缺点, 希望读者批评指正。

在翻译出版中, 1014 所给予了大力支持和帮助, 提供了文集的原版, 本院资料室承担了编辑加工, 在此谨致深切的谢意。

目 录

一、系统设计

1. GWS-25 警戒与跟踪雷达系统的机械设计与性能研究	1
2. 展开灵活的移动式三坐标雷达天线的机械设计	9
3. 阵列天线的公差控制	17
4. 海盗雷达系统——为宇宙探测计划而设计	24
5. 相控阵的机械设计和综合	35
6. 航天飞船的 Ku 波段雷达/通讯综合子系统	43
7. 风对大型天线结构性能的影响	51
8. AN/TPS-59——一种独特的战术雷达	59
9. 地面充飞天线罩的研究	69
10. ESSCO 天线罩和天线结构设计的改进	79

二、系统要求对电子组装设计的影响

11. 军用电子设备机械设计师的作用	86
12. 用于半球视界天线的轻型雷达天线罩的设计和制造	93
13. 相控阵雷达的联接问题	99
14. 机载电子系统高电压组装问题	104
15. 现代雷达系统中先进的可维修性概念	114
16. 机载雷达上晶体振荡器的隔振	117

三、结构设计

17. 自展开极大抛物面天线及天线阵的设计	123
18. 合成孔径雷达的运动补偿对惯性测量单元相对于天线的安装要求	130
19. 直径 40 呎雷达天线指向偏差分析	138
20. 对低空飞机探测系统雷达天线桅杆的要求	147
21. 无人管理的防核爆炸雷达设备的概念研究	154
22. 抛物面反射体计算变形的分析	167
23. 用予调反射面提高天线性能	172
24. 雷达的防原子结构设计	178
25. 大型对空监视雷达天线座降低成本的途径	187

四、热控制

26. 空用雷达热设计的现状和未来	194
27. 在雷达中应用热管控制电子设备的温度	201
28. 高灵敏度电子设备的温度控制	210

29. 热管在雷达发射机中的应用.....	215
30. 相控阵天线的温度控制.....	221
31. “最佳性能”散热器的设计方法.....	227
五、天线的指向与控制	
32. E-3A 天线座转台.....	233
33. 船用雷达座架和稳定平台的冲击隔离.....	247
34. 雷达方位轴承的设计选择和应用.....	256
35. 雷达天线座的滑环组件.....	264
36. 倾斜轴结构的舰用雷达天线稳定平台.....	271
37. 采用扭转弹簧和四连杆机构的静态质量平衡装置.....	280
38. 雷达控制器齿轮传动系统的冲击载荷.....	286
39. 用于雷达天线的高精度液压马达.....	290
六、环境和材料	
40. 先进复合材料天线的研制.....	297
41. 雷达在战争中的保全性.....	303
42. 用玻璃纤维复合材料制造 Custer 喇叭.....	316
43. 军舰瞄准系统的复合结构.....	325
44. 用纤维复合材料制造的大型机械扫描平面裂缝天线阵.....	330
45. 舰载天线的防腐措施.....	340
46. 机载卡塞格伦天线的制造.....	342

GWS.25警戒与跟踪雷达系统的

机械设计与性能研究

英国 A. T. HUMPHERY

提要: GWS.25 雷达系统当前已到了环境与海上试验的最后阶段, 它为英国海军有效地增加了一个武器系统。生产金属制件所必需的研制程序需要有相当多的技术来源, 本文企图着重于设计和环境试验的某些方面, 以及各设计阶段迁到的问题。由于空间、重量及机械要求的限制, 必须研制崭新的结构型式, 这样只有利用有限元程序才能对机械性能的研究提供唯一有意义的根据。金属制件试验不可避免的将着重于需要改进设计的地方。政府与公司的试验设备提供了鉴定最后设计型式合格性的手段。

1. 引言

本文讨论 GWS.25 点防御雷达的机械设计, 该雷达不久就要安装到一系列护卫舰和驱逐舰上。为了对系统有一总的看法, 简短的叙述一下工程过程。然后对警戒和跟踪雷达的研制过程作一叙述, 包括设计和分析的各个方面以及环境试验的细节。根据各方面理论与实验研究的结果, 在整个过程的某些阶段中对设计作了修改。按照船上装配要求, 有必要对一主要制件重新进行设计。结果在保持支座刚度方面产生了问题。对全尺寸的样机进行了试验, 以肯定理论研究的成果。

2. GWS.25 系统

GWS.25 是一完全自动的反导弹海军防御系统。雷达几乎可以处理任何进攻轨道并跟踪大量的目标。雷达可全天候工作, 能在强杂乱回波下完成使命, 有效地抵消具有小反射面积的快速目标。为达到此性能, 采用适合的脉冲多卜勒雷达, 每个具有其自己的数据处理系统。警戒设备完成定位, 决定速度和距离和距离模糊, 开始跟踪, 完成其威胁性的估计, 作出交战决定, 完成攻击分配, 指定一跟踪雷达及其有关的武器群。对海狼导弹, 以视线信号命令的形式给以指向, 而跟踪以微分方式达到。跟踪设备从警戒设备收到分配的数据后, 完成快速的仰角搜索, 捕捉目标, 计算导弹截获的最佳化, 并派遣海狼导弹单射或齐射。利用撞击引信或近发引信。

在甲板上设备的载荷及环境技术条件归结如下:

冲击: 向上 30g, 向下 20g, 水平 12g;

振动: 2Hz 时 $\pm 1\text{mm}$, 33Hz 时 $\pm 0.2\text{mm}$;

工作温度: -10° 到 $+50^{\circ}\text{C}$;

冰雪、雨按照 DEF. 133 的规定;

保全风速: 120 哩/时;

工作风速: 70 哩/时。

3. 警戒系统

3.1 机械设计

警戒系统的机械全貌如图 3-1。天线用螺栓连接到由一对预紧圆锥滚子轴承来支撑的中心主轴上。固定在中心轴的一正齿轮由小齿轮驱动，减速比 3.37:1。三相 60 周 2.5 马力的马达，额定转速 1800 转/分，经过减速比 16.63:1 的正齿轮箱来驱动小齿轮。迴转装置的剖面图见图 3-2。因为要向前预测目标未来的位置，必须使速度波动最小。

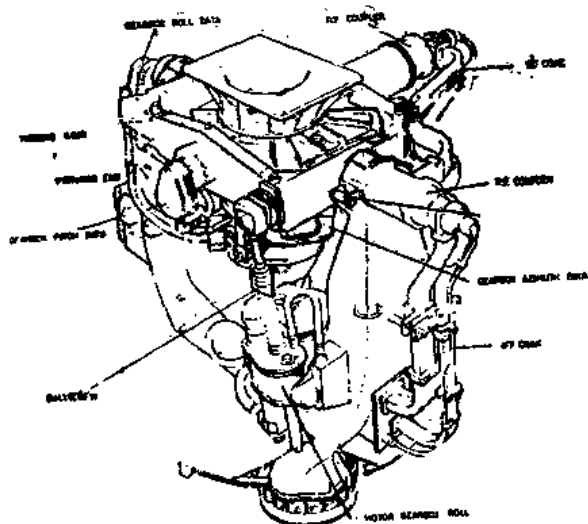


图 3-1 警戒雷达的机械外貌

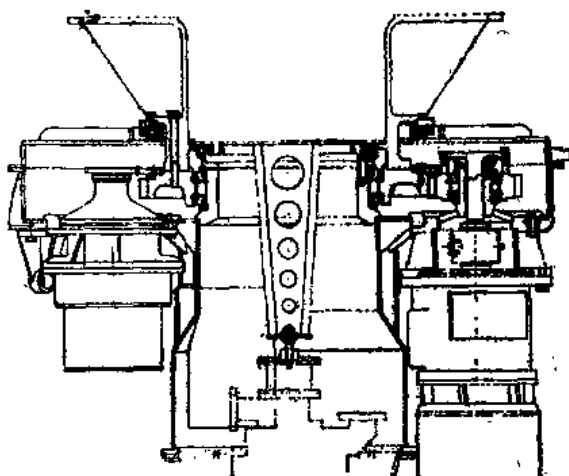


图3-2 警戒雷达的转动装置

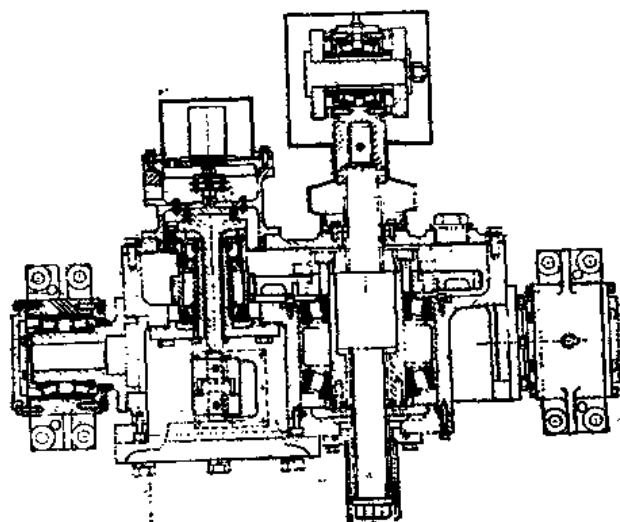


图 3-3 横摇和纵摇的驱动装置

齿轮箱通过中间的万向框架支撑在钢制叉架上。万向架的运动是由滚珠丝杠来驱动。滚珠丝杠由伺服控制的 50 伏交流马达操纵，经过一对减速比 3:1 的正齿轮，驱动滚珠丝杠的螺母，丝杠的螺距 0.5 吋。用缓冲挡板来限制超出行程。一个传动装置的剖面图如图 3-3。功率要求是：平均转矩 3 磅呎，峰值工作转矩 4 磅呎，峰值起动转矩 8 磅呎。马达必须保证

单元能跟随作纵摇和横摇的简谐运动，周期分别为 8 秒与 11 秒。并能作周期为 11 秒的修正简谐运动。

万向架的两个轴都是由一对予紧的圆锥滚子轴承来支撑。这样齿轮箱、万向框架与叉架在结构上互相作用，因为转动时反作用会通过轴承付来传递。

图 3-4 表示 X 模型正在进行系统试验，可以看到支持叉架与桅杆间的连接面相对较大。由于是装到船上，要求天线装得高，这就产生一个严重的设计问题，因为作为连接面的面积相当地小。另外修改设计重量增加 500 磅。因此要重新考察一下在结构上所有元素的重量和刚度。特别强调的是保证重量的分布要对方位轴和俯仰轴对称的布置，以消除船的运动所引起的不平衡力矩。

Y 模型作以下的主要修改：

1. 修改叉架的几何尺寸；
2. 使用予紧圆锥滚子轴承副来安装万向框架；
3. 修改作动筒的支撑结构；
4. 在转动装置使用一对予紧圆锥滚子轴承来代替原来交叉滚子轴承。

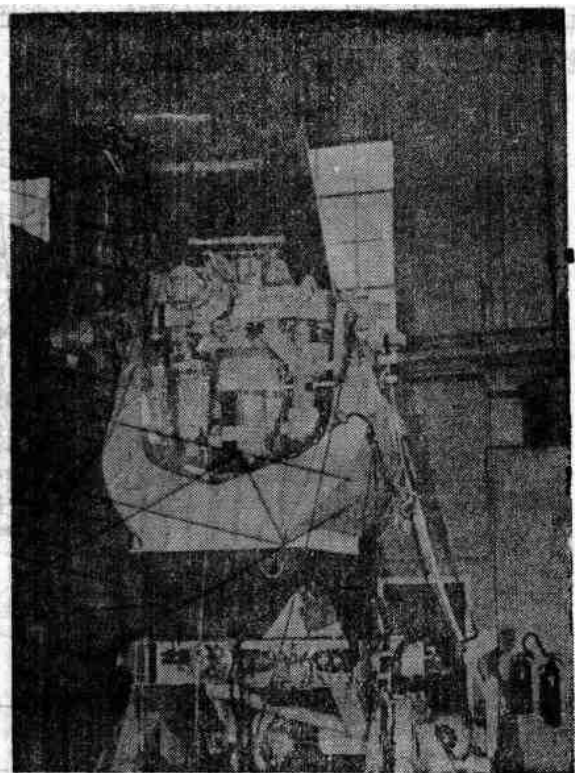


图 3-4 X 模型的伺服试验

3.2 应力和振动分析

叉架、万向框架和齿轮箱箱体通过横摇和纵摇轴上两个圆锥滚子轴承互相以超静定方式连接。带宽的限制（最大带宽 = 210）放弃了所有三个结构组件一起计算这样一个分析模型。但还是取了包含叉架、万向框架和滚珠丝杆这样一个模型。这里中心齿轮箱体的柔度用一个弹簧模拟。单独用一三维模型来计算齿轮箱体的刚度。万向框架与滚珠丝杠用杆元素组合来模拟，而叉架用壳元素组合来模拟。整个模型有 360 结点和 600 个元素。模型的方案如图 3-5。图中也绘出了底座的计算模型详图，以检查底座法兰的应力分布。

荷载情况模拟三种冲击荷载和两种风荷载。结构及非结构的质量分配到有关的结点上，视为一系列静荷情况。这种方法虽然过分简单化了，但那时处理动力荷载系统的软件尚未研制入库，而专利程序还未证明是经济的。计算出最大应力是发生在制件底部的径向角撑板

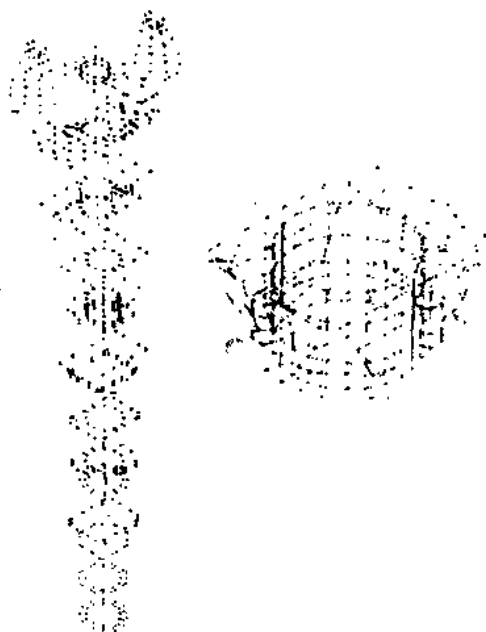


图 3-5 有限元模型——叉架

中，在水平冲击荷载时最大数值达到 9.5 吨/时²。从法兰的更详细的模型的分析结果，在角撑板内元素中心的平均应力为 11 吨/时²。这与测量出最大应力 13 吨/时² 相差不远。

初始振动分析采用了比较简单的杆元素模型，所以在模拟制件各个部分时不可避免有某些近似。使用更精细的模型，得出的解就会更有把握。动力分析十分昂贵，由于预算上的限制就不能象应力分析那样采用更精细的模型。

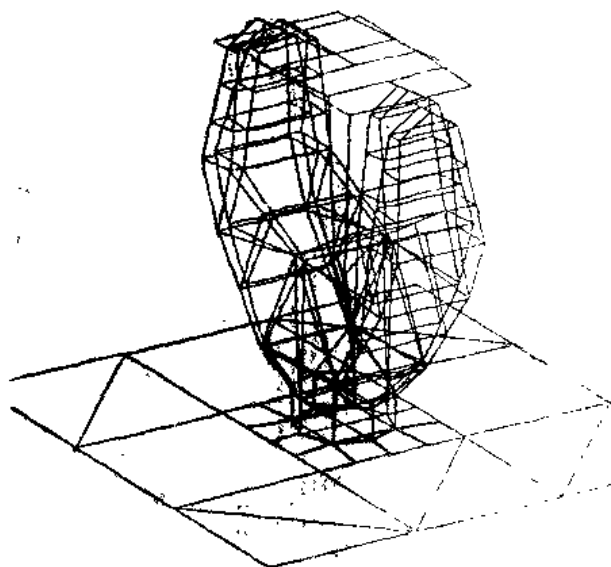


图 3-6 有限元模型——叉架动力分析

图 3-6 是用来估计动力性能模型之一。图示组件的频率是 13Hz。若对叉架底部加以约束，对于同样的振型，算出的频率是 17Hz。所以振动试验得出的结果要作某些说明是不可避免的。

3.3 结构、谐振和冲击试验

在叉架制件的 Y 模型上进行了试验，以肯定整个结构计算的位移值及应力值。天线座装在一底板上，构成整体试验框架的一个部分。用一液压千斤顶在叉架顶部加试验负荷 22 吨。一组 25 个电阻应变片贴在焊缝及法兰的垂直面与水平面上。三个法兰螺栓也贴上应变片以监视预紧拉力及负荷试验中引起的拉力。将结果绘成图，荷载作用点的挠度按理是线性的，但从 22 吨开始偏离线性。测量出的位移为 0.25 吋，与计算值相差不远。最大应力发生在分隔紧固螺栓的加强筋板上，计算最大值 13 吨/时²。这些应力值事实上在有限元分析已有一定的准确性而预计到了。在 20 吨时，某些地方开始发生屈伏，但是满载的 22 吨维持了几分钟后才卸载。在螺栓中引起的张紧拉力为 13 吨。在试验中，在荷载平面内的螺栓的拉力增到 15 吨，而在 90° 平面内的螺栓拉力减小了 1.0 吨，所以看起来螺栓有某些伸长。去掉荷载时，初始预紧力重新恢复，相差在百分之几以内。

共振搜索及功能试验，在前后方向、横向、和垂直方向上都进行了试验，频率由 2Hz 到 30Hz。每次试验都对两个正交天线位置作了试验。在 8-10Hz 频带内观察到在结构上的 Q 因子大于 3，而在天线罩上大于 10。在所有记录中，明显的存在 9Hz 的共振，指出特性是包括平台的整个系统的函数。天线罩在 28-30Hz 范围有一共振频率。对于装在平台上的设备

按理论预计,最低频率为 11 赫。平台使天线罩内某些铸铝的角撑板的结构薄弱处突出出来,所以必须重新设计。

垂直方向冲击试验的加速度如图 3-7。在一系列试验中未受到结构损坏。

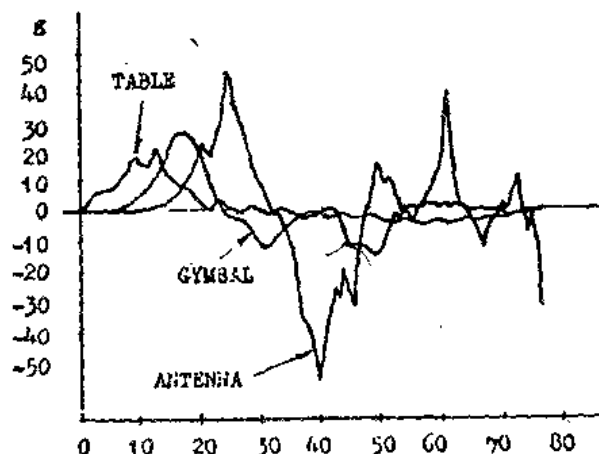


图 3-7 冲击试验——加速度值

3.4 空气动力试验

从缩小的模型及全尺寸样机测得的静方位风力矩如图 3-8。并绘出了缩小模型的动方位

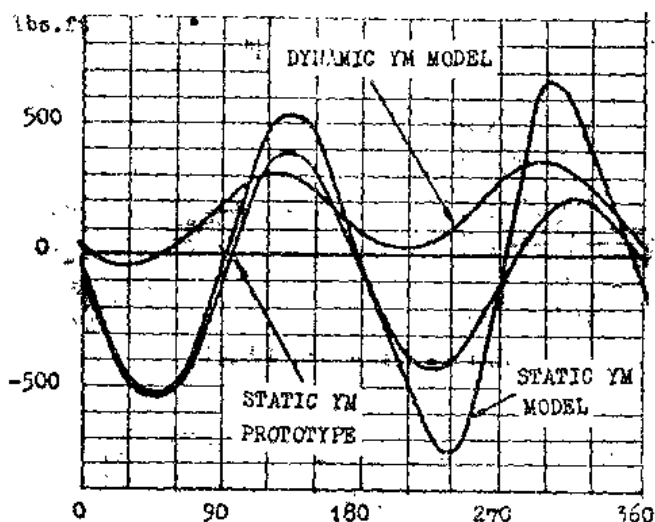


图 3-8 静和动的方位风力矩

风力矩。曲线是根据风速 70 哩/时,动方位力矩是在每分 30 转时测出的。

4. 跟踪系统

4.1 机械设计

机械全貌如图 4-1 所示。天线装在空心轴上,此轴又用预紧圆锥滚子轴承定位于钢制天线座上。轴上装一正齿轮与俯仰齿轮箱输出小齿轮相啮合。天线座布置及齿轮箱设计如图 4-2。总的齿轮比 70.8:1。一个 4.7 马力的马达,每分 1800 转,通过驱动一液压马达使俯仰轴得到必要的速度及加速度。天线座用螺栓连接到一驱动齿轮。这个齿轮用一对预紧圆锥滚子轴承来支撑。方位齿轮箱体及齿轮箱设计的细节如图 4-3。方位轮系的总速比为 88.5:1。

Y 模型作了以下的主要改进:

1. 方位轴的交叉滚子轴承用两个预紧的圆锥滚子轴承所代替;
2. 加强棱锥形底座及舱室筋板以增加刚度;
3. 重新组装天线后面的电子线路结构以改善热性能。

电缆线螺旋方向及张力在减少电缆疲劳失效上特别重要。

4.2 应力分析

仪器柜, 过渡锥及方位轴齿轮箱的结构模型是由 350 个结点连结线元素与壳元素而组成。离散化模型的分解图如图 4-4。

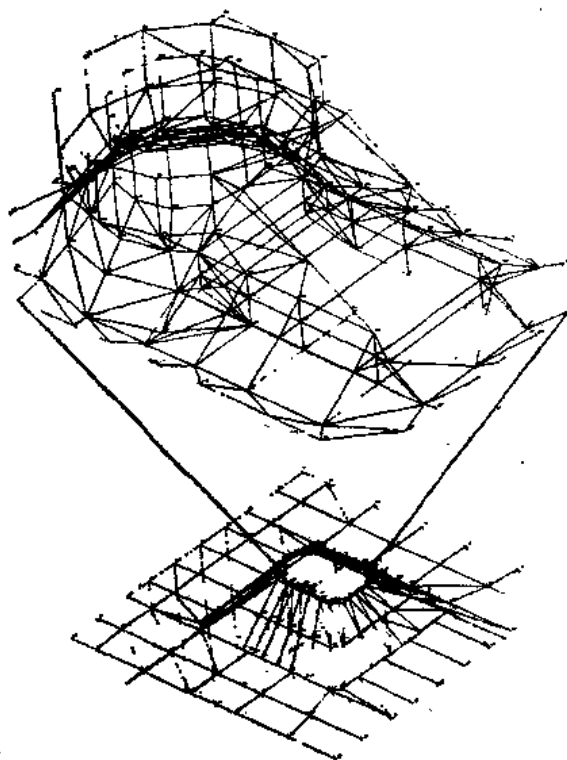


图 4-4 齿轮箱及过渡锥体的有限元模型

从分析看来, 在水平方向 12g 及垂直方向 30g 的冲击下, 仪器柜盖子的结构及过渡锥局部截面的应力过大, 算出结果应力超过屈服点。仪器柜盖子变形引起过渡锥的局部应力, 故必须额外加强。为了使变形与应力限制到允许的程度, 关于仪器柜盖子的加强筋格的最小尺寸已提出建议。

5. 冲击与振动试验设备

冲击试验机的负荷能力为 8 吨, 包括任何夹具在内。能产生的最大减速度, 水平方向 15g, 垂直方向 40g。减速冲击脉冲基本上是正弦形而没有回跳。能产生的最大冲击速度, 垂直方向为 12 呎/秒, 水平方向 7 呎/秒, 脉冲持续时间 15~20 毫秒, 根据速度及峰值的 y 来选择。

振动台在水平及垂直方向均能激起6吨负荷的振动。振幅的范围由2Hz的9mm到35Hz的 ± 0.25 mm。振动台由伺服控制的液压作动筒来驱动。四通道伺服控制既能自动频率扫描又能手控，视需要而定。

6. 应用的程序

马可尼 (Marconi) 研究实验室编出一套有限元程序，总的名称叫 MARSTRAN。这些程序是专为分析空间刚架、机械部件和轴对称结构而编制的。其中的一个程序 FIESTA 广泛用作应力分析，而 DYNAM 使用杆元素模型可作为初步的振动分析研究。FIESTA 程序里有一套元素，包括杆元素、膜元素和壳元素。为使用方便及经济起见，程序分成若干基本子程序。文本简明及格式清晰使初学者能有效地使用此程序。用 Marconi Myriad 计算机，有实时绘图设备，使数据直观明瞭。

NASTRAN 目前有一种入库能力，可以用来分析大型题目的应力分析与振动研究。

叶尚辉译

展开灵活的移动式三座标雷达 天线的机械设计

日本 MITSURU SUGIE 等

提要:在设计一种崭新的相频扫描相控阵天线中,研制了一个平面天线阵,为了展开和折叠方便而分成两个部分。这种方法使天线能用直升飞机、卡车等灵活的移动,而且保证在任何地点,不用起重设备,在一小时内展开。另外研制了一种缓冲器,使平面阵重量减轻而又能抗冲击。本文叙述在研制中机械设计的细节,以及根据在一个天线阵模型上的强度和展开试验所得的数据完成设计的细节。

引言

这个移动式三座标雷达系统,作为第一个可工作的相控阵雷达系统,已在日本研究与制造成功。现在已有两个系统在现场使用。

这个系统如图1所示,由天线、发射——接收机、信息处理机和指令控制操作中心所组成。每一个分系统被设计成能灵活的移动(用卡车、直升飞机、中等大小的运输机),到达展开地点后一小时内可以展开并投入工作。

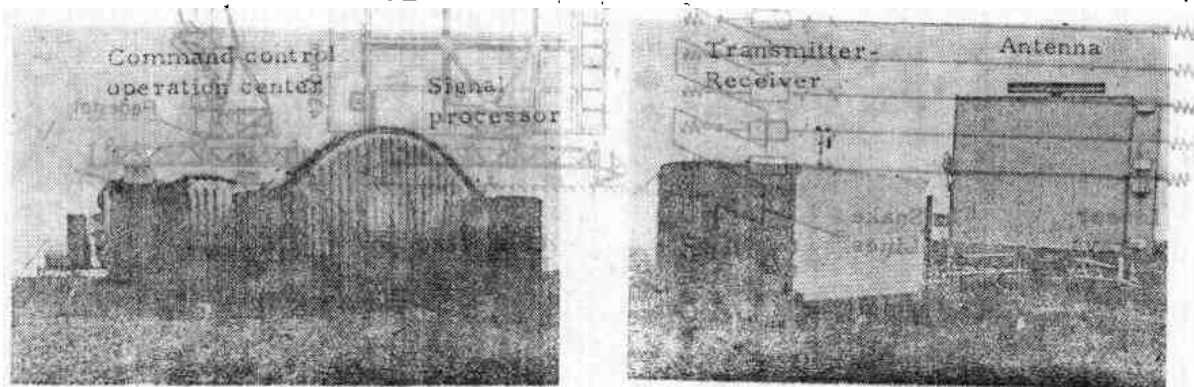


图1 移动式三座标雷达系统

作者打算集中注意于崭新的相频扫描相控阵天线分系统。这个天线阵是整个系统设计中最重要的一部分,里面含有种类广泛的灵巧的设计思想。

天线分系统的主要特点

这个天线的最显著的特点在于它是一个工作在S波段的相频扫描三座标雷达天线。射频电路的构形如图2。

频率扫描的完成是沿着蛇形线传输一系列顺序的子脉冲,在仰角上产生一系列顺序的波束,这些波束互相间隔大约1度。

此外,这个顺序的波束可以整体进行相扫,在仰角上波束移动可达24度或以上。这是利用专门为这个计划而研制的四位二进制不可逆铁氧体移相器的程序控制来实现的。

值得注意的是上面所说的方法，能够有益的利用频扫技术和相扫特点，减少所需的频带宽度和扫描时间。

为实现所需电子构型及满足机动性和易展开性的操作要求，这个天线的机械上主要特点可总结如下：

- 平面阵分成两部分，可以折叠，以利于机动性；
- 为了展开及运输简单，用一手动液压泵，很容易将平面阵展开和合拢；
- 这个平面阵用薄铝合金板及支撑管来制造，所以重量轻；
- 这个平面阵用铰链与天线座连接，在折叠躺下时，两者并不分离，这样减少了架设所需的时间；
- 天线座重量轻尺寸小，有可能利用一个小的凸轮从动件方位回转系统，及一与飞机电源相配的 400 周行星齿轮；
- 三个调水平的支腿用手动液压单元展开和收拢。三个支撑腿很容易从天线座上卸下来，用人力即可从卡车搬下或搬上去而不需要吊车，而且易于在不平的地面上架设。

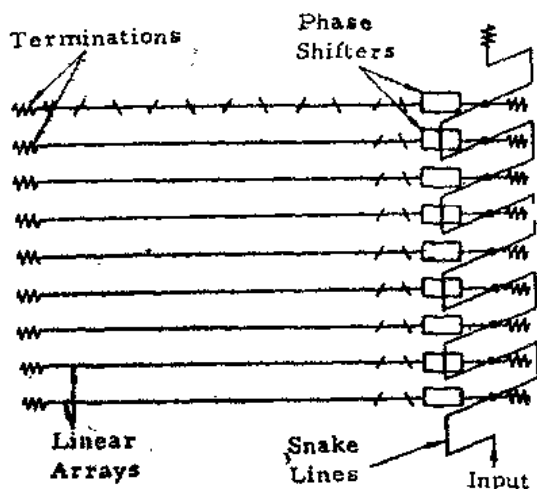


图 2 射频电路

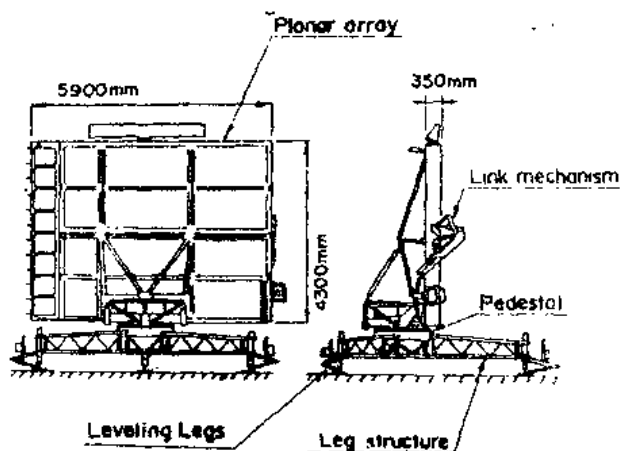


图 3 天线分系统

天线分系统如图 3。

设计准则

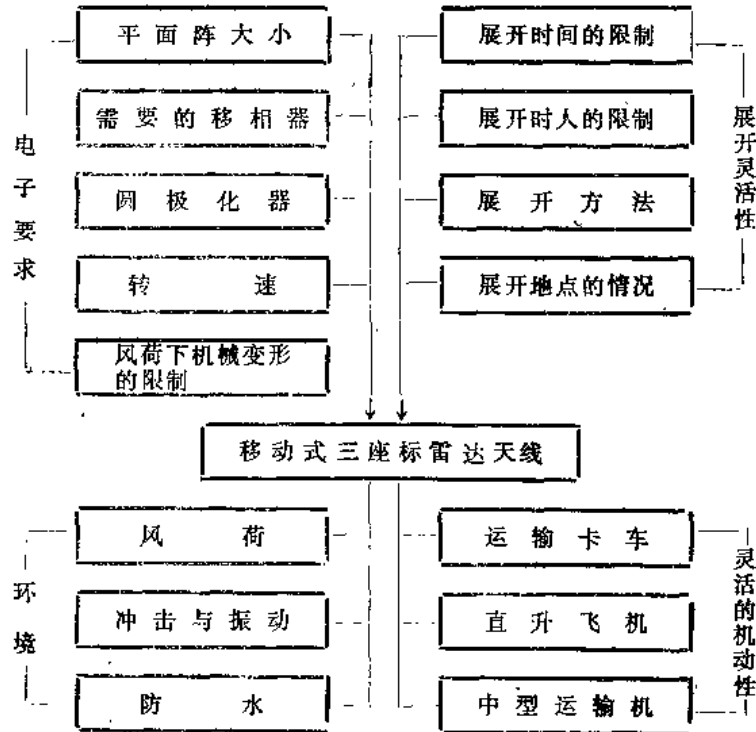
为了保证满意的性能，在天线子系统的机械设计中要满足广泛的要求，如表一所示。

满足表一的各种要求的设计准则详细情况是：

电子性能：

- 平面阵最小尺寸为 $4250 \times 5200\text{mm}$ 。
- 平面阵的平面公差小于 1.5mm ，平面阵由 64 个线阵和 77 条挡板组成。
- 高密度安装的平面阵必须易于维护，因为 64 个移相器用法兰盘与线阵的输入端相连接，而且与蛇形波导相连接。
- 为了在不利的环境条件下（特别是雨、风、砂、尘）保持可靠性，平面阵移相器及电子元件必须封闭在平板天线罩内，罩有一框架以增加强度。

表 1 天线的机械要求



为了移相器的散热，应该有一完整的冷却装置。

。天线座除了需要驱动机构、角数据发生器、滑环、旋转关节外，还需要冷却装置以及驱除潮气的加热器。它的结构应该是水密的和防尘的，应该设计成易于维修。

灵活的机动性：

。为了能由载重卡车运输，天线系统的运输尺寸应为 2200mm 高、1500mm 宽、5900mm 长。重量应小于 2500Kg。应有充分的强度能抵抗在运输中振动与冲击（最大 2.6g、2-100 周）。

。为了能由直升飞机运输，天线分系统包括支撑托架应小于 2200kg。它应有足够的强度能承受最坏的情况下着陆时的冲击（约 20g）。

。在中型运输机运输时，应该有足够的强度抵抗每一个方向的 5g 的冲击。（荷载尺寸大约与卡车运输相同）。

展开的灵活性：

。平面阵应制成能在短时间内易于折叠和展开。

。支腿结构及调平支腿的重量应小于 70kg，可允许用人力与天线座连接

平面阵设计的细节

为满足电子性能要求，平面阵应是一个网格状结构，由 64 个线阵（一根 60mm × 30mm × 5200mm 波导）和 77 条挡板（50mm × 30mm × 4200mm 矩形管）组合而成，在 4920 接触点上互相牢固的连接（图 4）。这些尺寸和数目主要决定于裂缝辐射器互相耦合及阻抗匹配的控制，以获得优良的辐射特性。

网格形平面阵本身又作为承载结构，增加了强度。

这与航线监视雷达天线（ARSR）有很大的不同，这种天线的曲面反射体通常用漏孔板成型。它需要有一个背架结构来保持曲面，但曲面本身并不增加机械强度。

然而，必须解决下列问题。为了减轻重量并保持严格限制的尺寸公差，决定用1mm板厚铝波导的浸铜焊来制造此平面阵。然而浸铜焊以后材料的屈伏强度降低到原来的1/6，如图5所示。

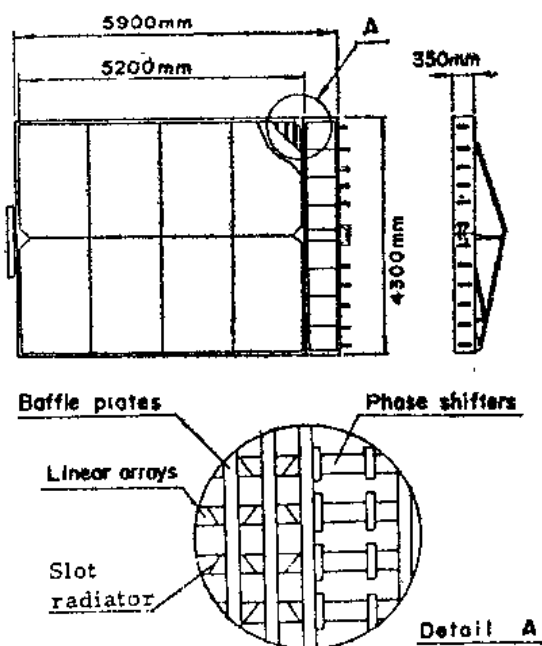


图4 平面阵

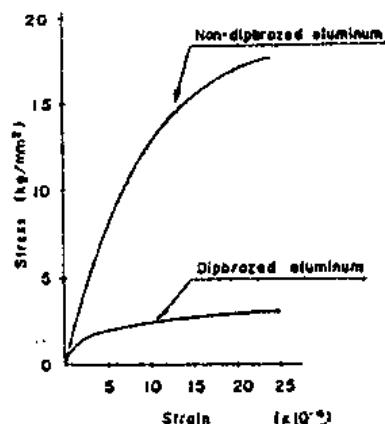


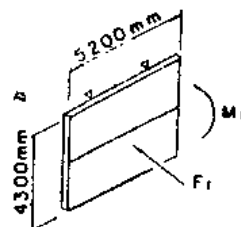
图5 平面阵铝波导的应力——应变图

这就是说平面阵本身需要大大的加强，因为利用波导的平面阵作为加强结构，很容易变形。

表2 比较了平面阵本身的强度与外载荷。

表2 平面阵的强度

荷 载	外 力	平面阵强度
F_1	风	1540kg
M_1	折弯力矩	390 kg-m



为了解决上述问题，决定采用薄铝合金板框架把平面阵围起来，并在平面阵背面增加一个背架结构，考虑到尺寸限制（运输时为 $2.15 \times 5.9\text{m}$ ）和重量限制（指标：小于1200kg），上述结构尽可能轻而尺寸小。

关于机械强度的概念如下：

风荷由平面阵的挡板承受，通过框架传递到背面的支撑。