雷达伺服系统

李连升　编著

国防工业出版社

需要全本请访问 www.ertongbook.com

雷达伺服系统

李连升　编著

国防工业出版社

内 容 简 介

本书系统地介绍了雷达伺服系统，包括电液伺服与机电伺服两类系统的分析与设计。在分析两类系统的共性与特性的基础上阐述雷达伺服系统的选择。并着重讨论了大型精密雷达伺服系统中存在的结构谐振与综合谐振、传动链的间隙所引起的极限环振荡等问题，以及为解决这些问题而采取的阻尼技术、消隙传动、内环路设计等技术。此外，还简要地介绍了各种雷达伺服元件、雷达伺服系统的工作状态与线路，以及结构因素对伺服系统性能的影响。最后介绍了雷达伺服系统设计的一些实例。

本书适合于雷达、自动控制、液压技术等专业的科技人员，以及高等学校有关专业师生参考。

雷达伺服系统

李连升 编著

*

国防工业出版社出版

新华书店北京发行所发行　　各地新华书店经售

国防工业出版社育年厂印装

*

850×1168 1/32　印张14 1/8　359千字

1983年6月第一版　1983年6月第一次印刷　印数：0,001—3,500册

统一书号：15034·2473　　定价：1.75元

前　言

近二十多年以来，由于火箭、导弹、航天技术的飞速发展，以及随之而来的反导弹武器的出现，需要作用距离很大、精度很高的大型精密跟踪雷达，从而给雷达伺服系统提出了许多新的课题。随着这些课题的研究和不断解决，使雷达伺服技术得到了很大的发展。大型精密雷达伺服系统的最大特点，是结构谐振频率很低，相对阻尼系数很小；传动链的间隙会引起极限环振荡，以致需要采用阻尼技术、消隙传动等技术。目前，根据这样一些特点来阐述伺服系统的分析和设计的书籍还是较少的。另一方面，电液伺服系统、机电伺服系统各具特色，都被广泛地应用于雷达伺服系统，形成互相竞争、互相促进的形势。但是，液压、机电分属两个专业，知识面较广，以往出版的书籍，一般不同时讨论这两类系统的分析与设计，对这两类系统的共性和特性的分析也不够深入，而从事这两类系统的研制人员因受专业的限制，往往会影响雷达伺服系统的正确选择与设计。

鉴于以上情况，编写本书，如能对读者有些参考价值，我将感到莫大的欣慰。

本书根据雷达伺服系统的主要特点，以作者亲自参加研制过的几种雷达伺服系统为背景，加以系统总结、提高后编写而成。同时作者力图将电液伺服和机电伺服这两个专业的内容有机地结合起来加以阐述，但又侧重于电液伺服系统的讨论。书中着眼于工程计算，因此在分析中采用了若干简化模型。另外，书中仅引述了公开发表过的主要参考资料。

伺服系统的数字化，也是雷达伺服系统的方向。有关这方面的问题，本书基本上没有涉及到，作者准备另行专门介绍。

本书在编写过程中，得到雷达专家、中国电子学会雷达学会副主任委员张志英同志的指导，他对本书逐字逐句地进行了审阅，同时还得到刘绍球同志、宋东生同志、夏福梯同志、顾珮同志以及作者所在单位的许多同志的帮助，他们为本书提出了许多宝贵的意见，作者深表感谢。

但由于作者水平有限，书中可能会出现不少缺点和错误，敬希读者批评指正。

作　者

需要全本请访问 www.ertongbook.com

目　录

第一章　绪论 …… 1
§1-1　雷达伺服系统的基本概念 …… 1
§1-2　雷达伺服技术的发展 …… 7
§1-3　雷达伺服系统的特点 …… 15
第二章　雷达伺服元件 …… 17
§2-1　雷达伺服元件的分类 …… 17
§2-2　敏感和控制元件 …… 19
2.2.1　自同步机 …… 19
2.2.2　旋转变压器 …… 22
2.2.3　电位计式误差敏感元件 …… 25
2.2.4　轴角编码器 …… 26
§2-3　变换元件 …… 32
2.3.1　调制器 …… 33
2.3.2　解调器 …… 36
§2-4　电液伺服阀 …… 38
2.4.1　力矩马达 …… 39
2.4.2　滑阀式放大器 …… 42
2.4.3　喷嘴-挡板型放大器 …… 46
2.4.4　射流元件 …… 47
2.4.5　两级电液伺服阀 …… 48
§2-5　液压伺服泵与伺服马达 …… 50
2.5.1　液压伺服泵 …… 50
2.5.2　液压伺服马达 …… 52
2.5.3　液压作动筒 …… 61
§2-6　机电伺服系统中的功率放大元件 …… 62
2.6.1　电机放大器 …… 63
2.6.2　可控硅功率放大器 …… 68
§2-7　机电执行元件 …… 78
2.7.1　对机电执行元件的要求 …… 78
2.7.2　机电执行元件的分类 …… 79

2.7.3 直流电动机的原理 ……80
2.7.4 直流电动机的静态特性 ……82
2.7.5 直流电动机的动态特性 ……84
第三章 雷达伺服系统 ……85
§3-1 阀控伺服系统 ……85
§3-2 泵控伺服系统 ……95
3.2.1 引言 ……95
3.2.2 泵控系统的静态特性 ……97
3.2.3 泵控系统的动态特性 ……102
§3-3 阀控液压闭环系统 ……108
§3-4 电机放大器-电动机系统 ……118
§3-5 可控硅-直流电动机系统 ……124
第四章 伺服系统中的结构谐振与综合谐振 ……127
§4-1 引言 ……127
§4-2 结构谐振与液压-机械综合谐振 ……128
§4-3 结构谐振与机电综合谐振 ……141
§4-4 提高结构谐振频率 ……149
§4-5 伺服系统中各参数以及反馈元件连接位置对
系统稳定性的影响 ……151
4.5.1 引言 ……151
4.5.2 系统描述 ……151
4.5.3 反馈元件的连接位置与系统的稳定性 ……157
4.5.4 阻尼系数、固有频率对系统稳定性的影响 ……159
§4-6 测试技术 ……162
§4-7 结论 ……163
第五章 伺服系统中的阻尼技术 ……165
§5-1 用并联阻尼孔的方法提高系统的液压-机械综合谐振阻尼 …166
§5-2 用并联频率敏感阻尼器来提高综合谐振阻尼 ……172
§5-3 压力反馈伺服阀 ……181
§5-4 动压反馈伺服阀 ……191
§5-5 用电的方法实现压力反馈和压力微分反馈 ……201
§5-6 复合反馈伺服阀 ……202
§5-7 采用带阻网络来削平谐振环节的振峰 ……205
5.7.1 凹口网络补偿的原理 ……206
5.7.2 凹口网络的传递函数与特征参量 ……206

5.7.3 凹口网络设计 ……207
5.7.4 速度环路的补偿 ……210
5.7.5 带阻网络的特点与应用 ……211
§5-8 串联惯性环节来提高系统的幅度贮备 ……212
§5-9 结语 ……213
第六章 结构因素对雷达伺服系统性能的影响 ……214
§6-1 天线座的轴系精度对雷达伺服系统测角精度的影响 ……214
6.1.1 俯仰轴与方位轴不正交引起的测角误差 ……215
6.1.2 方位轴不铅垂引起的测角误差 ……217
6.1.3 天线电轴与俯仰轴不垂直（即电轴与机械轴不重合）引起的测角误差 ……218
§6-2 传动链的间隙对伺服系统性能的影响 ……222
6.2.1 概述 ……222
6.2.2 闭环之内动力传动链的空回量影响系统的稳定性 ……225
6.2.3 闭环之外的数据传动链，其空回量影响数据传递精度 ……230
6.2.4 闭环之内数据传动链的空回既影响闭环系统的稳定性，又影响系统的静态精度 ……231
§6-3 传动链的传动误差对系统性能的影响 ……232
6.3.1 引言 ……232
6.3.2 闭环之外数据传动链 G_4 的传动误差的影响 ……234
6.3.3 闭环之内动力传动链 G_2 的传动误差的影响 ……234
6.3.4 闭环之内数据传动链 G_3 传动误差的影响 ……236
6.3.5 闭环之外数据传动链 G_1 传动误差的影响 ……237
§6-4 摩擦对系统的影响 ……237
第七章 伺服系统中的消隙传动 ……242
§7-1 双马达串联消隙传动 ……243
§7-2 并联双马达消隙传动 ……247
§7-3 阀控双马达消隙传动 ……251
§7-4 机电伺服系统中的电消隙传动 ……258
7.4.1 电消隙传动的基本原理 ……258
7.4.2 力矩均衡、力矩偏置和差电流负反馈环路 ……262
7.4.3 函数发生器工作原理 ……266
7.4.4 参数选择 ……269
§7-5 机械消隙传动 ……270
§7-6 雷达消隙传动方案的讨论 ……274
第八章 内环路设计 ……278

§8-1 内环路设计概述 ……278
8.1.1 用内环路减小环路内元件参数不稳定性对系统的影响 ……278
8.1.2 用内环路减小环路内各元件非线性对系统的影响 ……280
§8-2 倾斜盘环路设计 ……281
8.2.1 引言 ……281
8.2.2 倾斜盘环路设计指标及其依据 ……284
8.2.3 倾斜盘环路设计 ……287
8.2.4 倾斜盘环路设计举例 ……294
§8-3 电压反馈环路与电流反馈环路 ……297
8.3.1 概述 ……297
8.3.2 二阶闭环最佳调节系统 ……299
8.3.3 三阶闭环最佳调节系统 ……302
8.3.4 电压反馈环路、电流反馈环路等内环路的设计方法 ……308
§8-4 速度环路设计 ……311
第九章 雷达伺服系统的工作状态与线路 ……324
§9-1 概述 ……324
§9-2 手动工作状态与线路 ……326
9.2.1 手动工作状态的双读数线路 ……326
9.2.2 粗、精读数传动比的选择与假零点的消除 ……328
9.2.3 精、粗读数的转换电路 ……330
9.2.4 手动工作状态的控制电路 ……333
§9-3 主伺服驱动电路 ……333
§9-4 搜索扫描工作状态与线路 ……335
第十章 雷达伺服系统的设计 ……338
§10-1 伺服系统的品质指标 ……338
10.1.1 伺服系统的稳定性 ……338
10.1.2 伺服系统的过渡过程品质指标 ……340
§10-2 伺服系统的精度 ……342
10.2.1 雷达伺服系统误差的基本概念 ……342
10.2.2 伺服系统的静态误差 ……344
10.2.3 伺服系统的动态滞后 ……347
10.2.4 伺服噪声 ……353
10.2.5 阵风引起的力矩误差 ……354
§10-3 闭环系统的频带 ……359
§10-4 伺服系统的典型对数幅频特性（波德图） ……360
10.4.1 典型对数幅频特性的基本形式 ……361

10.4.2 具有典型开环对数幅频特性的系统参数与其闭环特性的关系 ……365
10.4.3 典型对数幅频特性中各交接频率的关系 ……366
§10-5 伺服系统的校正 ……368
10.5.1 校正的原理与意义 ……368
10.5.2 校正的分类 ……368
10.5.3 串联校正 ……369
10.5.4 并联校正 ……370
10.5.5 有源校正 ……370
10.5.6 雷达方位上的正割校正 ……374
§10-6 雷达伺服系统设计导论 ……378
10.6.1 雷达伺服系统设计的几个阶段 ……378
10.6.2 电液伺服系统与机电伺服系统的设计特点 ……380
§10-7 雷达伺服系统的静态设计 ……383
§10-8 雷达伺服系统的动态设计 ……390
§10-9 雷达伺服系统设计举例 ……390
§10-10 典型产品介绍 ……423
附录 求二阶以上代数方程式的根的林士谔方法 ……435
参考文献 ……439

第一章 绪 论

§1-1 雷达伺服系统的基本概念

雷达是一种利用它自身所发射的无线电波来探测目标的设备。其基本原理是这样的：雷达的发射机产生一种强功率的无线电波，经方向性极好的天线辐射到空间，这种无线电波如果遇到目标（例如飞机）就会被目标反射，如果我们能够接收这种被反射的回波，并根据其回波的特性，便可判断目标的位置和其他参数。为了使辐射的无线电波照射到目标，并接收到目标的回波，必须在搜索到目标以后，自动地跟踪目标。而搜索目标和自动地跟踪目标就是借助于雷达伺服系统来实现的。

所谓自动跟踪目标，就是不管目标以什么样的速度、加速度和轨迹运动，雷达天线的轴线始终能精确地对准目标。那么雷达是怎样来实现这个要求的呢？我们首先来看一个圆锥扫描的雷达。

在雷达抛物面的焦点处安装一个辐射无线电波的振子，振子在发射机的激励下产生无线电波，经抛物面的反射，就如同抛物面反射镜对光的聚焦作用一样形成一个狭窄的波束〔如图 1-1（a）〕，这个波束代表所辐射的无线电电波功率的大小，在波束的中心线上，辐射功率最大，偏离中心线后，辐射功率逐渐减小，例如 $o1$ 方向的功率就小于中心线 oo 方向的功率。在用圆锥扫描原理工作的雷达中，振子的结构作得相对抛物面的轴线略带不对称，使波束中心线偏离天线的轴线一个不大的角度（例如 $1\frac{1}{4}$ 度），并且天线振子由一个电动机以恒定的转速（例如1800转/分）驱动。换句话说，即波束围绕天线中心轴在空间旋转，这时这个狭窄的波束就会在空间描绘出一个圆锥形的表面〔如图 1-1（b）

需要全本请访问 www.ertongbook.com

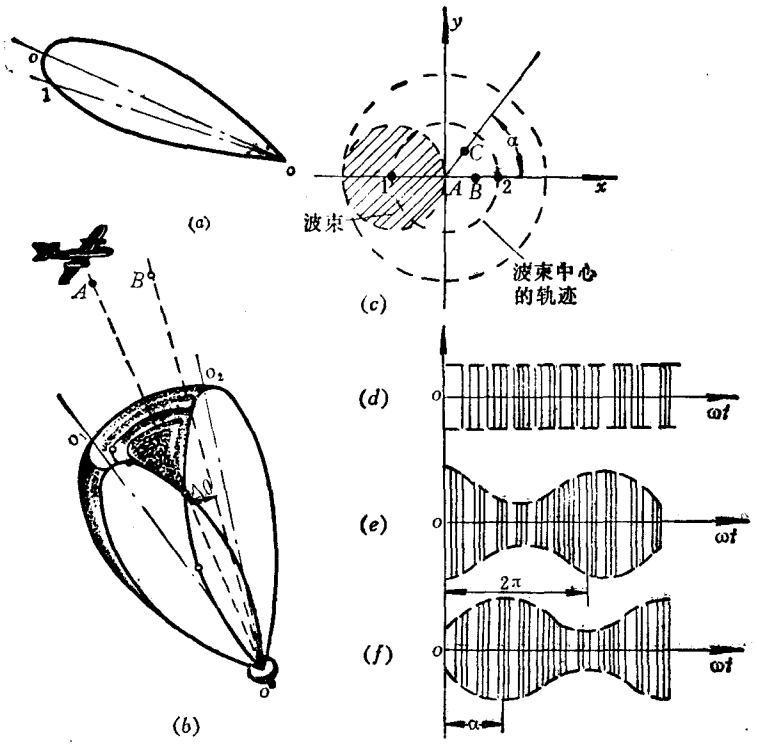


图1-1　圆锥扫描雷达原理

（a）无线电波束；（b）雷达波束绕天线中心轴旋转时所获得的辐射图形；（c）波束的横截面；（$d\sim f$）目标在不同位置下的误差波形。

所示〕。我们称波束围绕天线中心轴的圆锥形运动为圆锥扫描。而天线的这个中心轴又称为电轴。圆锥形表面的横截面如图1-1（c）所示。如目标在圆锥中心A（即天线的中心轴线正好对准目标），则当波束旋转时，目标反射信号具有不变的强度〔如图1-1(d)〕；当目标偏离中心时，反射信号的强度就要作周期的变化。譬如目标处在B点位置〔如图1-1(c)，相当于图1-1(b)的oB线上〕，则当波束中心转到“2”时，反射信号将为最大，转到“1”时，反射信号最小。反射信号强度的这种周期改变近似

正弦规律，变化的频率就是波束的旋转频率，而且反射脉冲包线的振幅比例于目标位置与天线轴线间的偏差 $\Delta\theta$〔如图 1-1(e)〕，当目标从 B 点移动一个 α 角到 C 点时，包线振荡在相位上也移动 α 角〔如图1-1(f)〕。

在直角坐标系中，横轴 x 表示方位误差，纵轴 y 表示仰角误差，目标的误差可以用矢量 oL 表示（如图1-2），这个矢量的幅模比例于包线信号的振幅，矢量的幅角 α 等于包线对某一固定位置的相移，因此回波信号包线的大小及相位完全反映了目标对天线轴线的偏差。

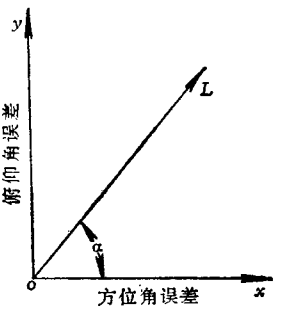


图1-2　误差矢量图

目标的反射信号经雷达接收机放大和检波以后（如图1-3），再由相敏检波器分解出一比例于 $oL\cos\alpha$ 和一比例于 $oL\sin\alpha$ 的直流电压。我们知道，前一个电压正是比例于方位角误差的；而后一个电压正是比例于俯仰角误差的。这两个电压分别加到方位角伺服系统和俯仰角伺服系统，借以转动天线，一直到天线轴线对准目标，误差消除为止。例如方位误差电压加到方位角伺服系统的输入端，经方位角电子放大器放大和校正后（这里的校正装置为了改善系统的动力学特性），推动电液伺服阀的力矩马达，力矩马达动作后，使电液伺服阀输出一个比例于力矩马达输入电流的液压流量，这种具有很大能量的液压流体通过液压马达，将液压能转换成机械能，使马达通过减速器拖动负载朝消除误差的方向旋转。为了改善系统的动力学特性，在液压马达上安置一个测速发电机，随时测量马达轴上的转速并反馈到方位角伺服系统的输入端，构成一个速度环路。

在手控状态下，雷达的误差信号不是由无线电波束产生，而是由自同步机产生。在减速器的中间轴上连接一个同步接受器，它与手轮相联接的同步发送器联接成同步变压器状态，当摇动手

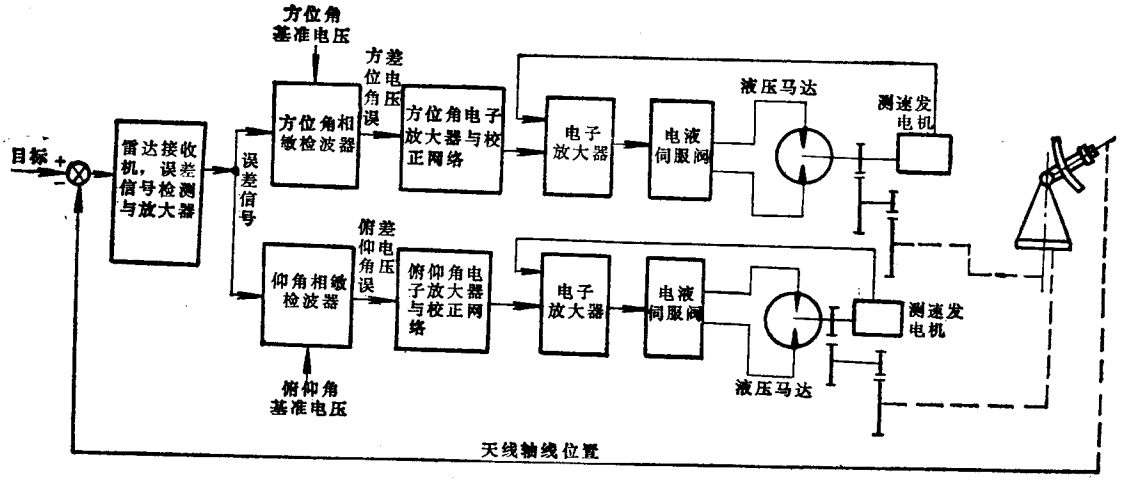


图1-3　雷达天线位置伺服系统

轮时，便会在同步机上产生一个误差电压，去控制天线转动。这时，雷达天线的运动即复现方位角手轮的运动（如图1-4）。

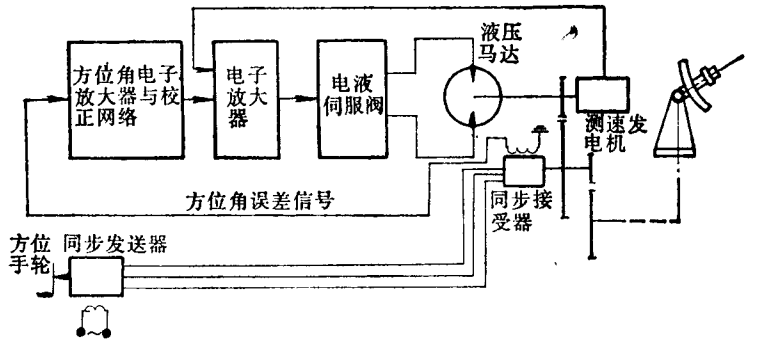


图1-4　手动控制状态下的雷达天线位置伺服系统

对于目前普遍用来跟踪导弹和卫星的单脉冲雷达，其误差信号的形成不是通过上面所述的圆锥扫描波束，而是利用交叉波束来实现的。它的作用原理是：用两个固定的交叉波束〔图1-5（a）〕，而不象图 1-1 所示圆锥扫描雷达用的是旋转波束，并且安置两个相距一定距离 d 的天线 A、B。若目标处在两个波束交叉的 oL 方向，那么两个天线接收的回波幅度相等，目标对 oL 方向的任何偏离，都将引起两个天线所接收的信号不等。当偏差角不很大时，两路信号大小的差值和偏差角成比例〔如图1-5（b）〕，此差值电压即误差电压，偏差的方向不同，误差电压的极性也相反。

另外从相位上看，由于来自远处目标的回波，对雷达接收天线而言，实际上是平面波，因此具有平行射线。那么当目标处在 oL 线的右侧〔如图1-5（c）〕，则天线 A 所接收的回波信号在相位上滞后于天线 B 所接收的信号。

$$\Delta\varphi=\varphi_A-\varphi_B=\frac{2\pi d\sin\theta}{\lambda}$$

式中　$\Delta\theta$ 为目标方向对天线几何轴线之偏差角；

$\Delta\varphi$ 为相位差；

λ 为电波的波长。

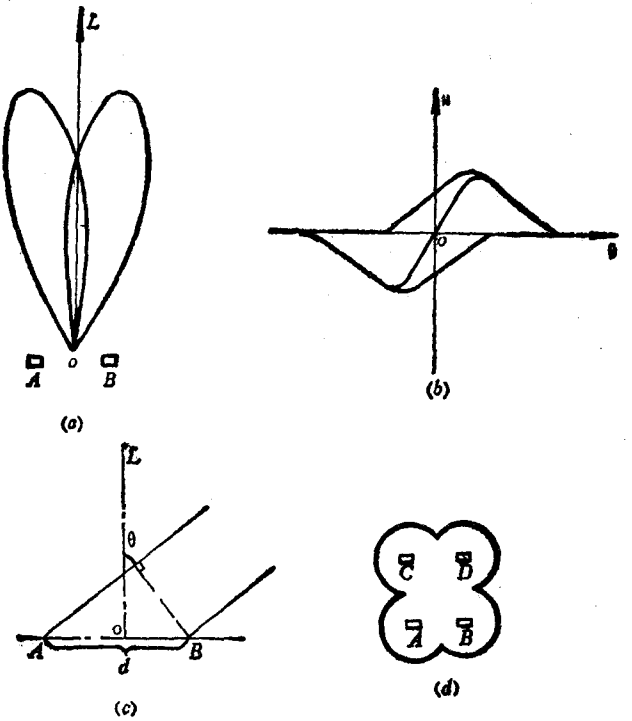


图1-5　单脉冲雷达原理

（a）天线与交叉波束；（b）误差电压的形成；
（c）误差角使接收信号产生相位差；
（d）天线配置。

显然，只有当目标正好处在oL方向时，相位差$\Delta\varphi$才等于零。目标偏离oL方向之不同，反映为相位符号（+，−）的差别；偏离的程度反映为相位差大小的不同。欲将A、B两天线接收信号的相位差通过相敏检波器，便同样可变为一个误差直流电压去控制天线伺服系统追随目标方向的变化。

根据上述原理，我们若安装四个接收天线〔如图1-5(d)〕。那么将水平方向的两个天线A与B（或$A+C$与$B+D$）接收到的回波进行比较，便可得到方位角的误差信号；将垂直方向的两个

天线A与C（或$A+B$与$C+D$）接收到的目标回波进行比较便可得到俯仰角的误差信号。此两误差信号分别通过方位和俯仰角伺服系统拖动天线来追随目标运动。

从上面的介绍我们可以看出，雷达伺服系统是一种闭环控制系统。而闭环控制系统根据其输入信号的特点可分为定值调节系统、程序控制系统和伺服系统（随动系统）三种类型。当输入信号是一个恒值时，这种系统就称为定值调节系统，如原动机的速度控制系统等。当输入信号是给定的时间函数时，这种系统便称为程序控制系统，如机床上的仿形刀架便可看成是一个程序控制系统。当输入量是不断变化的，而且其变化规律事先不能准确地决定，那么这种系统就称为伺服系统。图1-3和图1-4所示的雷达天线伺服系统就是这样的系统。

众所周知，闭环系统是依靠误差信号来进行工作的，为了形成误差信号，必须要有反馈，又要有输入信号和反馈信号之间的比较，这是和开环控制系统根本不同的，我们知道开环控制系统没有反馈，因此也不可能形成误差信号，它只是单纯地根据输入信号来改变它的输出量。而雷达伺服系统，其误差信号是怎样形成的呢？在自动跟踪状态下，是靠雷达的波束形成的；在手控跟踪状态下，是靠敏感控制元件（如自同步机）形成的。

从上面的介绍中还可以看出，雷达伺服系统是雷达的重要组成部分，它对于发现目标，跟踪目标以及精确地测量目标的位置和其它参数都起着重要的作用。特别是，雷达伺服系统的精度会直接影响雷达的测角精度。

§1-2 雷达伺服技术的发展

雷达是第二次世界大战前夕，为了防空的需要而发展起来的。第二次世界大战以前，对付敌方来袭飞机的高射火炮是用人的肉眼或者用肉眼借助于瞄准镜来进行瞄准的。不仅命中率很低，而且还会受到气候和环境条件的限制。第二次世界大战后期，指挥

需要全本请访问 www.ertongbook.com