现代雷达伺服控制

李连升 张志英 刘绍球 编著

国防工业出版社

现代雷达伺服控制

李连升　张志英　刘绍球　编著

国防工业出版社

内容简介

作者在《雷达伺服系统》一书中曾经系统地介绍了用古典理论来分析、设计模拟量雷达伺服系统的方法。本书则系统地介绍：一、现代控制理论及其在雷达伺服系统中的应用；二、雷达伺服系统的数字化；三、建立在现代控制理论和计算机基础上的最新雷达伺服技术。本书除阐述有关基本理论外，着重介绍如何应用这些理论来解决工程实际问题。

本书适合于雷达、自动控制等专业的科技人员以及高等学校有关专业师生参考。

现代雷达伺服控制

李连升　张志英　刘绍球　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

国防工业出版社印刷厂印装

*

850×1168 1/32　印张 12 3/4　335千字

1987年9月第一版　1987年9月第一次印刷　印数：00,001— 1,150册

统一书号：15034·3198　　定价：2.85元

前 言

1983年《雷达伺服系统》一书出版后，得到读者和有关方面专家的鼓励，在领导和国防工业出版社的支持下，决定撰写本书作为《雷达伺服系统》的续集。

由于计算机技术的飞速发展，计算机价格迅速下降，微处理机日渐普及，预计不久，大部分雷达伺服系统将采用计算机（主要是微处理机）控制。另一方面，六十年代前后发展起来的现代控制理论，适应计算机的发展，具有许多古典理论无法比拟的优点，成为分析、设计雷达伺服系统的新的重要工具，并且已经在雷达伺服系统中得到了广泛的应用。鉴于这种情况，本书内容包括：一、系统地介绍现代控制理论及其在雷达伺服系统中的应用；二、雷达伺服系统的数字化；三、建立在现代控制理论和计算机基础上的最新雷达伺服技术。对于第一部分内容共用了四章，其中第二、三、四章介绍系统的状态空间分析、能控性与能观测性等基本理论，以及应用状态空间法对伺服系统进行设计、综合的方法；第五章综合应用第二、三、四章的基本理论对一个典型的大型精密雷达伺服系统进行了分析。第二部分的内容共四章，其中第六章雷达伺服系统数字化基础；第七章采样系统的性能分析；第八章、第九章介绍数字计算机控制雷达伺服系统的综合，包括古典理论和现代控制理论中的极点配置、最优控制、卡尔曼滤波等章节。第三部分内容共两章，其中第十章介绍各种便于计算机控制的雷达伺服元件；第十一章详细介绍了现代雷达伺服系统中的复合控制、再生反馈、计算机辅助跟踪、共轴跟踪等系统，以及舰载雷达的两轴稳定技术；此外，作为一种预备知识，还在第一章里简要地介绍了线性代数方面的知识。

本书着眼于工程应用，在阐述有关基本理论和定理时，力求

简单明了，使读者易于理解，而不追求严格的数学证明，同时结合雷达伺服系统，通过大量的例子着重说明如何应用这些基本理论来解决雷达伺服系统分析和设计的实际问题。

由于时间和篇幅的关系，有关相控阵雷达的伺服问题，以及近年来日渐引人重视的Robust调节，Bang-Bang控制等问题，本书未曾论及，准备以后有机会再另行介绍。

本书经作者所在单位的许多同志，特别是李根祥、夏福梯等同志细心审校，提出了许多宝贵意见，作者深表感谢。

由于作者水平有限，书中可能出现不少缺点和错误，恳请读者批评指正。

作　　者

目　　录

绪　论

展望未来雷达伺服技术的发展，概括起来有两点：一是现代控制理论在雷达伺服系统中的广泛应用；其二是计算机在雷达伺服系统中的普遍应用，各种雷达伺服元件向着便于计算机控制的方向发展[1]。作为雷达伺服技术工作者，把握这个大方向，对于促进我国雷达事业的发展是至关重要的。

§0-1　现代控制理论在雷达伺服系统中的广泛应用

多少年来一直沿用古典理论来进行雷达伺服系统的分析与设计，并为广大技术人员所掌握，无疑这是一种有力的工具，今后仍将被广泛使用。但是，六十年代前后发展起来的现代控制理论适应计算机的发展，具有许多古典理论难以比拟的优点，在雷达伺服系统中得到了广泛的应用。

现代控制理论中的重要部分——线性系统、最优控制、卡尔曼滤波、系统辨识等重要理论都是分析、设计雷达伺服系统的新的重要工具。

众所周知，在分析和设计时，首先必须建立系统的数学模型。应用古典理论来分析伺服系统时，一般根据牛顿定律、基尔霍夫定律等基本定律来建立雷达伺服系统的数学模型的。但是由于许多因素难以一一考虑，许多参数难以精确确定，这种数学模型常常不能很好地反映系统的实际情况。若根据系统的输入-输出，应用系统辨识的方法，有可能建立更加符合实际而又比较简单的数学模型。这种数学模型毋须通过动力学理论进行严格推导，只要使输入、输出关系得到良好的拟合即可。

通过本书第三章的分析，我们将看到，一个控制系统通常可分解为完全能控完全能观测、不完全能控不完全能观测、完全能

控不完全能观测、不完全能控完全能观测等四个子系统，而古典理论所描述的仅仅是完全能控完全能观测的子系统，因此这种理论具有很大的局限性。事实上，在雷达伺服系统中常常存在这样的情况：从传递函数看，系统是稳定的，但实际上还产生振荡。这是由于所研究的系统不是完全能控和完全能观测的，还包含有其他的子系统。在这些子系统中，含有振荡和不稳定的因素。例如第五章中分析的那种雷达，为了消除传动链的间隙，采用双电机并联消隙驱动，这种系统常常产生所谓差速振荡，若用古典理论来分析，是难以找到恰当解释的，但是用现代控制理论来分析，便不难发现，在一定条件下，这个系统存在一个不能控不能观测的子系统，正是这个子系统引起了振荡。

雷达的测角精度和伺服系统的好坏密切相关。应用现代控制理论中的滤波技术，对于提高雷达的测角精度、提高伺服系统的精度具有重要意义。在第十一章中将看到，在雷达测角系统中采用滤波和数字技术，将滤波和伺服两者分离，使整个系统由一个窄频带的接收滤波部分和一个宽频带的伺服驱动部分组成，前者提供精确的雷达输出数据，后者只承担对目标的指向跟踪，则可大大提高伺服系统的精度。这种方法就是人们所说的计算机辅助跟踪。当所用的滤波器是最优滤波器时，还可实现最优控制。

从上面的介绍，足以看出应用现代控制理论来分析、设计雷达伺服系统的重要性。

§0-2 计算机在雷达伺服系统中的普遍应用

计算机在雷达伺服系统中的应用包括两个方面：一是计算机辅助设计，二是雷达伺服系统的数字化，将计算机（主要是微处理机）作为雷达伺服系统的一个环节来进行系统的控制。

过去在研制雷达伺服系统时，初步设计后，一般需要建立和实物相近的试验台（至少是缩小比例的试验台），反复进行调整试验来达到系统指标。这样，需要大量的硬件，因此研制周期很长。如果建立一套专用的程序包，进行计算机仿真，不仅能够节省大

量的专用试验设备，而且能够在很短的周期内找到最佳设计。

由于计算机、大规模集成电路的飞速发展，计算机的性能不断提高，价格迅速下降，8位、16位微处理机逐渐普及，为雷达伺服系统数字化提供了物质基础。伺服系统中数字计算机主要完成的工作包括通过软件来实现正割、PID等各种补偿；进行方位和俯仰位置环、速度环的闭合；工作状态的转换；变带宽；改变系统的型次（例如一阶无静差系统和二阶无静差系统的相互转换）；变增益；消摆；进行滤波、预测、提供精确的雷达输出数据来实现复合控制、最优控制等等。采用数字计算机后，对于提高测角系统的测角精度；提高伺服系统的精度；提高自动化程度、减少操纵人员；缩短雷达的反应时间；减少硬件装置、提高可靠性、可维护性；使雷达适应不同用户需要而具有的灵活性方面都具有重要意义。

雷达的测角误差包括随机误差和系统误差两个分量。利用计算机的威力，采用计算机辅助跟踪，是减小随机误差和伺服系统动态滞后的一个十分有效的措施。但是影响测角精度和伺服系统精度的系统误差分量往往比随机误差分量大，因此如何减小系统误差分量是提高伺服系统精度和提高雷达测角精度的关键。靶场测量雷达中，应用的共轴跟踪技术是解决这一困难的有效方法。它可以使测角精度比传统的跟踪方式提高一个数量级。例如FPQ-13采用这种技术后使测角起伏误差降到0.025密位，系统误差降到0.05密位。

在共轴跟踪系统中，除了采用滤波技术外，为了修正误差，需要标校，并进行多种坐标的变换和反变换，这些都需要在数字计算机内进行，如果没有计算机参与，可以说，共轴跟踪是无法实现的。

对于舰载雷达、机载雷达等，由于载体的运动，给雷达伺服系统的设计带来一些特殊问题。近年来一方面由于计算技术的发展，另一方面由于平台增加了处于桅杆上雷达的重量，对舰船的稳定产生严重影响；还因为平台结构复杂，难以提高系统的精度，

因此对于舰载雷达、机载雷达，已趋于不采用平台，而在天线座上安装速度陀螺进行反馈来稳定天线，使之不受舰船摇摆或飞机姿态的影响。这类系统同样可采用计算机辅助跟踪实现最优控制。同时还可通过计算机对船摇进行补偿，进一步提高系统的精度，这些问题都将在第十一章讨论。

§0-3 发展便于计算机控制的雷达伺服元件

随着微处理机在雷达伺服系统中的普遍应用，雷达伺服元件向着便于计算机控制的方向发展。

（1）测量元件的数字化、集成化

位置测量元件常采用光电编码器、感应式编码器、适合于与计算机连接的同步机、旋转变压器，它们的相应电路趋于大规模集成化。

测速元件趋于采用数字式元件。它有一个类似编码盘的东西，连接在被测轴上，组成一个脉冲发生器，随着被测轴的转动产生一系列的脉冲，通过对脉冲的计数来获得被测系统的速度。

数字式测量元件比模拟式元件噪声更小，精度更高。

（2）功率放大元件

为了提高可靠性，趋于采用静止的功放元件，如用微处理机进行非线性和负载效应补偿的可控硅整流器和大功率晶体管等，较少采用旋转型的电机扩大机。

（3）执行元件

用于直接数字控制的步进电机和带步进电机的液压扭矩放大器已广泛应用于伺服系统，但功率小而受到限制，所以用得最多的还是各种直流电动机和液压马达。交流电动机由于成本低廉，没有碳刷、整流子引起的噪声干扰，而且可靠性高，可维护性好，因而日渐引起重视。

有关便于计算机控制的伺服元件，我们将在第十章介绍。

第一章　线性代数基础

线性代数是现代控制理论的数学基础，本章予以简要介绍。

§1-1　矩阵及其运算法则[2]

1.1.1　矩阵的基本定义

矩阵　矩阵是 mn 个元素排成 m 行 n 列的一张表，如

$$A=\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \cdots & a_{mn} \end{bmatrix}$$

称为 $m\times n$ 矩阵。它的元素可能是实数、复数、函数或算子。

a_{ij} 表示第 i 行第 j 列的一个元素。

当 $m=n$，即行数等于列数时，称该矩阵为 n 阶方阵。

一个 $m\times 1$ 矩阵，即只有一列的矩阵称为列向量。

一个 $1\times n$ 矩阵，即只有一行的矩阵称为行向量。

对角形矩阵。对角形矩阵是一种除主对角线以外的所有元素均为零（即 $i\neq j$ 时，$a_{ij}=0$）的方阵。如

$$A=\begin{bmatrix} a_{11} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & a_{22} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix}$$

简写为

$$A=\begin{bmatrix} a_{11} & & & 0 \\ & a_{22} & & \\ & & \ddots & \\ & 0 & & a_{nn} \end{bmatrix}$$

或

$$A=\mathrm{diag}(a_{11},\ a_{22},\ \cdots,\ a_{nn})$$

当 $a_{11}=a_{22}=\cdots=a_{nn}=k$，$k$ 为一个数时，这样的对角形 矩

阵称为数量矩阵。

单位矩阵 单位矩阵 $\boldsymbol{I}$ 是对角线元素均等于 1 的对角形矩阵（即 $i=j$ 时，$a_{ij}=1$； $i\neq j$ 时，$a_{ij}=0$）。

$$\boldsymbol{I}=\begin{bmatrix} 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 1 \end{bmatrix}$$

零矩阵 零矩阵是所有元素均等于零的矩阵。

$$\boldsymbol{0}=\begin{bmatrix} 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix}$$

矩阵的转置 矩阵 $\boldsymbol{A}$ 的转置是将$\boldsymbol{A}$的行变成相应的列，或将$\boldsymbol{A}$的列变成相应的行而形成的矩阵。用 $\boldsymbol{A}^T$ 表示。

设

$$\boldsymbol{A}=\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \cdots & a_{mn} \end{bmatrix}$$

则

$$\boldsymbol{A}^T=\begin{bmatrix} a_{11} & a_{21} & \cdots & a_{m1} \\ a_{12} & a_{22} & \cdots & a_{m2} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{1n} & a_{2n} & \cdots & a_{mn} \end{bmatrix}$$

转置具有下列性质：

（1）$(\boldsymbol{A}^T)^T=\boldsymbol{A}$

（2）$(\boldsymbol{A}+\boldsymbol{B})^T=\boldsymbol{A}^T+\boldsymbol{B}^T$

（3）$(k\boldsymbol{A})^T=k\boldsymbol{A}^T$

（4）$(\boldsymbol{AB})^T=\boldsymbol{B}^T\boldsymbol{A}^T$

对称矩阵 若一个方阵等于它的转置矩阵，即

$$\boldsymbol{A}=\boldsymbol{A}^T$$

则此方阵称为对称矩阵。

例如

$$A=\begin{bmatrix}3 & -2 & 1\\ -2 & 6 & 4\\ 1 & 4 & 8\end{bmatrix}$$

就是对称矩阵。

反对称矩阵 若一个矩阵等于它的负转置矩阵，即

$$A=-A^T$$

则此方阵称为反对称矩阵。例如

$$A=\begin{bmatrix}0 & 1 & -3\\ -1 & 0 & -2\\ 3 & 2 & 0\end{bmatrix}$$

即为反对称矩阵。

矩阵的迹 n 阶矩阵

$$A=\begin{bmatrix}a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n}\\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n}\\ \vdots & \vdots & & \vdots\\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn}\end{bmatrix}$$

的对角线元素之和称为矩阵A的迹，记作

$$迹\ (A)=a_{11}+a_{22}+\cdots+a_{nn}$$

矩阵的行列式 取矩阵的元素按原来矩阵的顺序排列而形成的行列式。例如

$$A=\begin{bmatrix}3 & -2 & 1\\ -2 & 6 & 4\\ 1 & 4 & 8\end{bmatrix}$$

那么

$$\det(A)=|A|=\begin{vmatrix}3 & -2 & 1\\ -2 & 6 & 4\\ 1 & 4 & 8\end{vmatrix}$$

子式 若在n阶行列式A中选取某k个行和某k个列（$1\leqslant k\leqslant n$），由这些行与列相交处的元素构成一个k阶行列式，称作A的k阶子式。

主子式 若$|\boldsymbol{A}|$的子式，其对角线元素也是$|\boldsymbol{A}|$的元素，则称这个子式为$|\boldsymbol{A}|$的主子式。

余子式 若抽去n阶行列式A的第i行和第j列，剩下的（$n-1$）行和（$n-1$）列构成一个行列式M_{ij}，则这个行列式称为元素a_{ij}的余子式。

代数余子式 矩阵$\boldsymbol{A}$之元素a_{ij}的代数余子式A_{ij}定义为

$$A_{ij}=(-1)^{i+j}M_{ij}$$

式中 M_{ij}是矩阵$\boldsymbol{A}$之元素a_{ij}的余子式。

拉普拉斯展开式 矩阵$\boldsymbol{A}$的行列式值可用拉普拉斯展开公式求得

$$|\boldsymbol{A}|=\sum_{j=1}^{n}(-1)^{i+j}a_{ij}M_{ij} \quad i\text{ 为任意整数；}\ 1\leqslant i\leqslant n。$$

$$=\sum_{i=1}^{n}(-1)^{i+j}a_{ij}M_{ij} \quad j\text{ 为任意整数；}\ 1\leqslant j\leqslant n。$$

式中 M_{ij}为元素a_{ij}的余子式。

伴随矩阵 用方阵$\boldsymbol{A}$的代数余子式A_{ij}代替矩阵$\boldsymbol{A}$的每个元素a_{ij}，而后转置所得的矩阵称为$\boldsymbol{A}$的伴随矩阵。即若A_{ij}是矩阵

$$\boldsymbol{A}=\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix}$$

中元素a_{ij}的代数余子式，则矩阵

$$\mathrm{adj}\,\boldsymbol{A}=\begin{bmatrix} A_{11} & A_{21} & \cdots & A_{n1} \\ A_{12} & A_{22} & \cdots & A_{n2} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ A_{1n} & A_{2n} & \cdots & A_{nn} \end{bmatrix}$$

称为$\boldsymbol{A}$的伴随矩阵。

奇异矩阵与非奇异矩阵 如果方阵的行列式值为零即称这个方阵为奇异矩阵。如果方阵的行列式值不为零，则称这个方阵为

非奇异矩阵。

共轭矩阵 矩阵A的共轭矩阵A^*是其每个元素为A的对应元素的共轭复数。例如

$$A=\begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 1+j & 2-j & 3+2j \\ 5 & 6+j & 2+j \end{bmatrix}$$

则

$$A^*=\begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 1-j & 2+j & 3-2j \\ 5 & 6-j & 2-j \end{bmatrix}$$

共轭转置矩阵 矩阵A的共轭转置矩阵$\bar{A}$是矩阵A的转置矩阵的共轭。

$$\bar{A}=\begin{bmatrix} 1 & 1-j & 5 \\ 2 & 2+j & 6-j \\ 3 & 3-2j & 2-j \end{bmatrix}$$

实数矩阵 若$A=A^*$，即矩阵A的所有元素均为实数，则称A为实数矩阵。

1.1.2 矩阵的运算法则

两个矩阵的相等 若两个矩阵A和B，它们的行数和列数相同，且对应元素相等，我们就说这两个矩阵相等。

矩阵的加减法 两个矩阵A和B相加得到一个新的矩阵C，C的元素c_{ij}等于对应元素a_{ij}和b_{ij}之和。即若

$$A=\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \cdots & a_{mn} \end{bmatrix}$$

$$B=\begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \cdots & b_{1n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ b_{m1} & b_{m2} & \cdots & b_{mn} \end{bmatrix}$$