

被控对象的 动态误差和 起伏误差



〔苏联〕A. H. 修根



国防工业出版社

19231

V448.1

2

被 控 对 象 的 动 态 误 差 和 起 伏 误 差

〔苏联〕A. H. 修根

赵 厚 君 译



國防工業出版社

1965

內 容 簡 介

本书的目的是确定被控对象相对于其理想运动弹道的偏离的数值、特性和物理实质。在设计被控对象时是以这种理想运动弹道为基础的。

本书从性质上对那些影响被控对象运动精度的主要因素作了近似的估算。同时简明叙述了包括被控对象在内的系统中所发生的基本物理过程。为了便于阅读，在第一部分简要地叙述了有关的数学方法。

本书可供制导和飞行理论方面的工程技术人员和大学师生阅读。

ДИНАМИЧЕСКИЕ И ФЛЮКТУАЦИОННЫЕ
ОШИБКИ УПРАВЛЯЕМЫХ ОБЪЕКТОВ

А. Н. Шукин

ИЗДАТЕЛЬСТВО "СОВЕТСКОЕ РАДИО" 1961

*

被控对象的动态误差和起伏误差

赵厚君 译

*

国防工业出版社 出版

北京市书刊出版业营业许可证出字第 074 号

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 $\frac{1}{32}$ 印张 5 $\frac{1}{4}$ 133 千字

1965 年 7 月第一版 1965 年 7 月第一次印刷 印数：0,001—1,800 册

统一书号：15034·899 定价：(科六) 0.80 元

目 录

緒言	5
第一章 用来解綫性微分方程的运算微积法	13
1. 拉普拉斯变换	13
2. 拉普拉斯变换的性质	15
3. 借助于拉普拉斯变换解綫性微分方程	18
第二章 綫性系統过程的頻譜分析法	24
1. 傅立叶变换、函数的頻譜、振蕩能量的頻譜分布	24
2. 諧波振蕩通过綫性系統的情形, 振幅和相位特性, 頻带的等效寬度	33
第三章 反饋迴路	38
第四章 导彈是具有反饋的迴路	42
1. 概述	42
2. 控制函数 $\varphi_{\text{BX}}(t)$	46
3. 傳遞函数 $Y(p)$	53
4. 閉环控制迴路等效系統の其它形式	65
第五章 控制函数的形式及各种控制方法的动态誤差	71
1. 导彈按指令运动	71
2. 自动寻的	81
第六章 断續訊息所造成的誤差	102
第七章 起伏干扰及其在确定对象座标时对誤差的影响 ..	110
第八章 測定方向时的起伏誤差	118
1. 面积比較法	118
2. 等强信号法	127
3. 測定方向的相位法	128
第九章 測定距离时的起伏噪声誤差	134
1. 脉冲法	134

2. 連續輻射法.....	134
第十章 座标、速度和加速度的概率值	137
1. 存在起伏干扰时对象座标的概率值.....	137
2. 測定速度和加速度时的起伏誤差.....	142
第十一章 信号起伏所引起的誤差	146
第十二章 控制迴路頻帶的等效寬度	155
参考文献	160
附录	161
附表 1 概率的积分值	161
附表 2 函数 $\Psi(t)$ 及它們的拉普拉斯象函数	162

19231

V448.1

2

被 控 对 象 的 动 态 误 差 和 起 伏 误 差

〔苏联〕A. H. 修根

赵 厚 君 译



國防工業出版社

1965

內 容 簡 介

本书的目的是确定被控对象相对于其理想运动弹道的偏离的数值、特性和物理实质。在设计被控对象时是以这种理想运动弹道为基础的。

本书从性质上对那些影响被控对象运动精度的主要因素作了近似的估算。同时简明叙述了包括被控对象在内的系统中所发生的基本物理过程。为了便于阅读，在第一部分简要地叙述了有关的数学方法。

本书可供制导和飞行理论方面的工程技术人员和大学师生阅读。

ДИНАМИЧЕСКИЕ И ФЛЮКТУАЦИОННЫЕ
ОШИБКИ УПРАВЛЯЕМЫХ ОБЪЕКТОВ

А. Н. Шукин

ИЗДАТЕЛЬСТВО "СОВЕТСКОЕ РАДИО" 1961

*

被控对象的动态误差和起伏误差

赵厚君 译

*

国防工业出版社 出版

北京市书刊出版业营业许可证出字第 074 号

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 5 $1/4$ 133 千字

1965 年 7 月第一版 1965 年 7 月第一次印刷 印数：0,001—1,800 册

统一书号：15034·899 定价：(科六) 0.80 元

目 录

緒言	5
第一章 用来解綫性微分方程的运算微积法	13
1. 拉普拉斯变换	13
2. 拉普拉斯变换的性质	15
3. 借助于拉普拉斯变换解綫性微分方程	18
第二章 綫性系統过程的頻譜分析法	24
1. 傅立叶变换、函数的頻譜、振蕩能量的頻譜分布	24
2. 諧波振蕩通过綫性系統的情形, 振幅和相位特性, 頻带的等效寬度	33
第三章 反饋迴路	38
第四章 导彈是具有反饋的迴路	42
1. 概述	42
2. 控制函数 $\varphi_{\text{BX}}(t)$	46
3. 傳遞函数 $Y(p)$	53
4. 閉环控制迴路等效系統的其它形式	65
第五章 控制函数的形式及各种控制方法的动态誤差	71
1. 导彈按指令运动	71
2. 自动寻的	81
第六章 断續訊息所造成的誤差	102
第七章 起伏干扰及其在确定对象座标时对誤差的影响 ..	110
第八章 測定方向时的起伏誤差	118
1. 面积比較法	118
2. 等强信号法	127
3. 測定方向的相位法	128
第九章 測定距离时的起伏噪声誤差	134
1. 脉冲法	134

2. 連續輻射法	134
第十章 座标、速度和加速度的概率值	137
1. 存在起伏干扰时对象座标的概率值	137
2. 測定速度和加速度时的起伏誤差	142
第十一章 信号起伏所引起的誤差	146
第十二章 控制迴路頻帶的等效寬度	155
参考文献	160
附录	161
附表 1 概率的积分值	161
附表 2 函数 $\Psi(t)$ 及它們的拉普拉斯象函数	162

緒 言

实际上，任何时候都不能使導彈准确地命中所指定的点。有許多原因会使導彈偏离目标，按其引起的原因，誤差可分为两类。

第一类誤差（或称偏差）是由于導彈不能准确地执行所获得的指令，特别是由于不能即刻地执行指令而产生的。这种偏差的产生，是因为導彈彈体本身以及整个控制設備的各种装置都具有慣性，以致对導彈运动条件所需要的变化响应迟緩的緣故。这种誤差称为动态誤差或称为动态偏差。

第二类誤差是由于指令本身不准确而引起的，指令誤差是由于目标和導彈运动的訊息中以及在傳遞指令时存在干扰而引起的。由于这种干扰是无規則的随机干扰，所以由于这种干扰所引起的誤差（或偏差）称之为起伏誤差（偏差）。

像任何其它分类一样，动态誤差与起伏誤差的区分在一定程度上是具有假定性质的。实际上，这两种誤差和引起它們的原因一样，是相互紧密交錯和相互作用的。但是，为了分析被控对象运动时所发生的过程，这种划分是十分有益的，因为这将使我们能較深刻地去理解这些过程，并且能更好地去控制它們，也就是說將动态誤差和起伏誤差的合成誤差减小到最低限度。

如果在每一瞬間都能准确地确定动态誤差及起伏誤差的数值，并从而能对導彈的实际运动彈道作出相应的修正，那么就可以得到所謂“运动学彈道”。因此，“运动学彈道”乃是導彈沿之运动曲綫，此时導彈在确定目标和導彈的位置与运动时不受随机干扰，且導彈以及产生和执行控制指令的整个設備都沒有慣性。

除运动学彈道外，还可建立一条动态彈道。后者也是導彈沿之而运动的一条曲綫，此时考虑整个系統的慣性影响，但无引起

起伏誤差的干扰作用。

在同一瞬間，运动学彈道与动态彈道上相应点之間的距离即是动态偏差值，或称为动态誤差值。运动学彈道与目标相交时的动态誤差就是脫靶距离的动态分量数值。

在同一瞬間，动态彈道与实际彈道上相应点之間的距离即是起伏偏差值或称为起伏誤差值。此誤差即确定了运动学彈道与目标相交时的脫靶距离起伏分量数值。

如果說引起动态誤差的根源是彈体和所有控制設備諸环节的慣性，那么产生起伏誤差的根源主要是电阻、电子仪器及电路中其它元件所产生的噪声干扰，这种干扰迭加在产生目标和導彈运动信息的有益信号和控制信号上。除接收装置本身所产生的起伏噪声干扰外，还有由于受控对象本身（目标及導彈）所产生的信号不稳定而引起的起伏干扰。

产生动态誤差和起伏誤差的原因不同，誤差的性质也不同。

动态誤差的符号由运动学彈道的类型来确定，因为动态誤差本身是由于彈体及整个控制系统对运动条件的变化响应迟緩所引起的。运动学彈道愈平緩，且導彈的速度愈小，則动态誤差就愈小。

起伏誤差所固有的特点是它們所造成的偏差具有随机性。因此，在沒有系統的誤差时，起伏誤差所引起的脫靶将以同样的概率偏右或偏左，偏上或偏下。

包括導彈在內的系統的慣性以各种各样的方式影响着动态誤差和起伏誤差的数值。

系統的慣性愈小，系統所产生的动态誤差愈小。但導彈对随机起伏干扰的响应却愈强烈，愈迅速。相反系統內随机扰动愈平稳，則導彈对控制指令的响应愈迟緩，动态誤差就愈大。

这些相互矛盾的影响使得选择确定系統慣性之特性参数的自由常常受到限制。此外系統参数的选择对保証整个控制系统及其元件的稳定性也有很大影响。

最不希望的是，導彈在所給指令的作用下改变其运动方向时

沿新的运动方向作长时间的减幅振荡。而且绝对不允许产生下述这样的状态，即由于被控对象对控制指令的响应迟缓而引起摆动及使导弹失去运动的稳定性。因此，为了减少动态误差及起伏误差，通常不能在较大的范围内改变系统的参数。

适当地选择控制规律，就能够在一定程度上减小动态误差。这种控制规律把目标运动与相应时刻的导弹位置及其速度方向联系起来，并且决定着导弹的运动学弹道。

任何现代自动被控对象都是一种由互相联结的元件所组成的复杂元件链。这些元件的种类很多，其中有：在运动过程中与周围环境相互作用的运动对象本身，用来控制导弹运动方向的电气、液压或气动机构（这些都是机电系统）、陀螺仪、用来接收目标运动信息并产生控制指令的弹上电子设备以及用来自动跟踪目标的电气及机械元件等。有时当用跟踪目标的雷达制导头、热力制导头或其它装置将导弹自动导向目标时，或者根据给定的程序作自主运动时，控制系统的所有元件都集中安装在导弹上。在其它情况下，控制设备的一部分不装置在运动对象上，这一部分设备用来接收目标及导弹的座标信息（或仅是其中一个座标的信息），并对这个信息进行加工整理，同时根据系统所采用的控制规律向导弹发送指令。

在一切情况下，自动控制导弹运动的特点是：信号通过控制设备的整个元件链由电信号变成机械信号，或相反地由机械信号变成电信号。作为起始信号的是运动着的导弹和目标的瞬时位置。

例如，在借助于地面雷达设备将地空导弹导向空中目标的情况下，所用的地面雷达就能测量目标和导弹的座标，并确定它们的相对位置。地面设备根据这些数据将产生指令并给导弹发送指令，迫使导弹按前面所讲过的运动学弹道运动。导弹将所接收的指令变成控制信号并作用在导弹舵面上，使导弹相对于目标转入一个新的位置。这个新位置又成为地面产生新的指令及弹上产生新的控制信号的依据。当导弹进行自动寻的时，在很多情况下控制指令是根据弹轴与目标方向之间所形成的夹角而产生的。

在有些系統中，控制指令只是根据目标的运动而产生的，此时只須周期性地观察导弹的位置，当导弹偏离規定的运动学彈道时向导弹发送补充指令。

尽管由彈体和用来自动地控制其运动的設備所构成的系統在結構原理上有着显著区别，但这些系統的原理图均如图 1 所示。

系統原理图的其它方案，我們将在后面研究，这里只較詳細地研究图 1 所示的系統原理图，

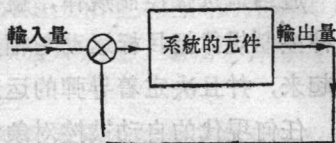


图 1

因为这一系統图能使我們非常清楚地了解导弹自动控 制迴路里所发生的过程以及弄清在这种情况下所发生的現象的一些基本关系。

导弹的实际綫座标或角座标与导弹运动学彈道的座标之間的差值是随時間而变化的。当此差值作用于图 1 所示的四端網路的輸入端时，端上同样也形成随時間而变化的导弹座标，这些座标是由于指令作用的结果而产生的，而指令则是根据实际彈道与运动学彈道座标之差而产生的。导弹的新座标值重新与运动学彈道的相应座标值比較，所得新的差值重又輸到四端網路的輸入端，如此等等。

图 1 所示的这种系統統称为带有反饋的自动調节系統。

例如，在最簡單的寻的情况下，比如在采用导弹軸綫与目标方向相重合的这种控制規律时，在表示导弹連同彈上整个控制設備的四端網路的輸出端上便产生表示导弹軸綫方向的角度。在四端網路的輸入端上同时作用着表示目标方向和导弹軸綫方向的角度。角度的差值，也就是导弹軸綫与目标方向之間的夹角的数值以电量形式或其它量的形式輸入四端網路的輸入端。在四端網路里根据此差值的大小和符号产生控制指令，此指令力图使这个差值减小到零，亦即使导弹軸綫与目标方向重合。

可以把造成被控对象相对于其平均运动彈道的无規則随机偏

离的干扰，看作是运动学弹道上相应各点与被控对象座标間之座标差数的随机变化。这种随机变化是由于有干扰时目标和被控对象的座标测定得不准确而引起的。

为了得出图 1 所示系統中所发生的过程的数学表达式并求出实际弹道座标偏离运动学弹道座标的数值，必須首先給出运动学弹道的方程，然后求出实际弹道的座标与“控制函数” $\varphi_{bx}(t)$ 之間的关系； $\varphi_{bx}(t)$ 乃是运动学弹道与实际弹道上相应各点之間的差值。問題在于确定系統的元件对运动学弹道与实际弹道之間的座标差值的响应。

为了确定整个控制机构对作用在其輸入端上的控制函数的响应，必須求出表示系統每个元件的輸入值与輸出值之間关系的数学表达式，并且必須順次地研究构成导弹控制系統的所有元件。分析这种系統的直接方法就是将构成此种系統的各个元件的輸入端数值与輸出端数值之間的关系用微分方程的形式表示出来。

在一般情况下，这些方程可能是綫性方程（可能是具有常系数或变系数的綫性方程），但也可能是非綫性方程。对整个控制机构的所有元件順序地构成一个方程組，为了求出被控对象的运动学弹道与实际弹道間座标差值的瞬时数值，就必须解出这个方程組。

因此，分析导弹系統的直接方法就是列出并求解大量的微分方程。

甚至最简单的被控对象，在其控制系統內，或者說在其控制迴路內，至少也都具有十个以上的不同的串联环节。因此，数学分析的任务可归結为求解由 10~15 个（而有时更多的）微分方程所組成的方程組。

尽管数字计算机的发展給高阶方程的数值积分带来了很大的可能性，但仍須有一种比較簡單的近似方法，以便能分析一些复杂系統（如导弹）的状态，而勿需每次都去解出全部微分方程。在进行这种近似研究时，真实系統可用比較簡單的等效系統来代替。真实系統的状态应当用許多微分方程所組成的方程組来描述，

而等效系統則可用較低階的微分方程來描述。

在這種情況下，真實系統與等效系統的狀態的基本特點在性質和數量上均應是互相近似的。

當然，在一般情況下並不能證明，8~10 階的微分方程組可以用二階方程來代替。然而，很多理由證明，儘管構成導彈真實系統的元件總體非常複雜，但這種代替是可能的。證明這種可能性的理由如下所述。

使導彈穩定和沿規定方向運動的元件所組成的各種環節大部分都在極其不同的頻譜區內工作。由於這些環節在系統內是串聯的，它們構成一個閉合控制迴路，因此某些環節（如探測目標的雷達和無線電指令控制綫）內的高頻振蕩將被濾除，像相應的控制綫在脈沖狀態下工作時的頻率振蕩一樣，而這並不影響那些具有較大時間常數的環節（如導彈彈體、導彈的控制機構、自動跟踪機械系統等）的性質。

因此，當把導彈的元件總合看成是一個統一的整体時，可不必去注意那些描述高頻環節的方程式及相應的頻譜區。這樣的簡化使我們大大地減少描述系統狀態的方程式數目。因此，如果在設計與綜合一個系統時必須計算所有環節，那麼在分析整個系統的性質時可以只考慮其低頻環節。

可以用較為簡單的等效系統來代替以高階方程描述的实际系統的第二个理由是，在任何一个适于实用的導彈系統中，導彈的運動僅取決於它本身的座標及其一階與二階導數。不可能有這樣一種導彈系統，在此種系統中導彈對加速度變化的響應與它對加速度本身或運動速度的響應是一樣的。這是因為必須保證系統能在自然起伏干擾和擾動的條件下進行工作的緣故。若系統對輸入量的高階導數的響應很強烈，那麼系統（包括導彈彈體）在高階導數數值很大的起伏干擾作用下將受到劇烈的顛簸。這種系統實際上是不適用的。

用等效系統來代替實際系統的第三个理由是，影響整個機構

功能的輸入量本身也是緩慢而平穩地随時間而变化的函数，其高阶导数并不很大。因此，在用数学方法来描述构成導彈閉合控制迴路的环节之总合体的性质时，可以仅限于較低阶的微分方程，而特别是二阶的微分方程。

在以后的叙述中我們处处都将认为对導彈的閉合控制迴路的上述这种簡化是可能的。至于等效迴路的参数数值（即相应的簡化微分方程中系数的数值），我們将在叙述过程中介紹一种根据整个系統的試驗数据来确定这些参数的可能的方法。

摆在我們面前的任务是确定由于各环节的慣性所引起的導彈动态誤差的大小，故以后我們將以下列論点作为依据：

1. 动态誤差完全由導彈的运动学彈道参数、彈体本身以及控制迴路所有环节的慣性所确定；

2. 導彈的状态可以用包括控制迴路所有环节的綫性微分方程組来描述；

3. 描述導彈控制迴路性质的綫性微分方程組可以大大地簡化并可用不高于二阶的微分方程来代替，这个方程的系数根据試驗数据来确定。在很多情况下，如果在过渡过程所引起的扰动停止后導彈在彈道上处于稳定运动，則整个方程組的求解可以簡化。

在确定随机起伏誤差的大小时，我們將认为这些誤差是由于在有随机干扰的作用下，目标及導彈的运动参数数据测得不准确而引起的。

測量設備、接收設備、电磁波或声波的傳播介质的特性以及目标的运动特性等都是产生干扰的根源。

用无綫电方法測定座标时，影响座标精确度的最重要的因素之一就是起伏干扰。測定座标时的精确度同时还与設備的誤差和无綫电波的傳播路徑有关。但我們不拟研究这些誤差的来源，而把注意力集中在起伏誤差上。

測定座标时，除由于电阻中的电荷起伏及电子管和半导体管中的电流不均匀所引起的热噪声外，这种起伏或是由于电磁波幅

射的不固定性，或是由于测量被控对象座标的反射波的不固定性而引起的，以及或是由于信号传播条件的无规则随机变化而引起的。

对起伏过程及其数学分析方法的大量研究，使我们现在已能十分精确地评价因起伏所引起的测量误差的大小，并指出从减少起伏误差的观点出发来设计较合理的系统的可能途径。但是，严格的分析方法往往要求采用复杂而笨重的数学解算装置。严格而精确的计算结果与近似的、但较简单的研究结果之间的差值，对工程设计或实验数据的分析是没有多大影响的。因此，下面我们将只对那些影响起伏误差的基本因素作一个简单的分析（这种分析是以所发生的现象的物理性质为基础的）。此外，还将推导出近似的但却足够简单的数学关系式，来说明座标测量精度与起伏干扰的能量、信号的能量和无线电设备的参数之间的关系。

为了测得具有实用精度的座标数值，必须使有用信号的强度大大超过起伏噪声的平均水平。后面我们所要研究的也正是这样一种情况。我们将不讨论关于如何确定起伏噪声中有无微弱信号这一有趣而又复杂的问题。以后在分析影响动态误差的因素和确定动态误差的大小时，我们将采用运算微积方法来解微分方程，这种方法是以拉普拉斯变换为基础的。

我们将在研究干扰和有用信号成分内的振荡频谱及导弹控制回路的频率特性的基础上，来分析起伏干扰对导弹随机误差的影响。所发生的各种过程的频谱法或频率法是以傅立叶变换为基础的。虽然大家已十分熟悉运用以拉普拉斯变换和傅立叶变换为基础的运算微积法和频率法来分析用线性微分方程描述的系统的状态，并且有关这些方法在很多文献中已有论述，但在下面仍将对这两种方法的基本原理作一个简短的叙述，以便使读者在以后引用个别公式和原理时不必去查找其它参考资料。