

目 录

绪论	1
第一章 惯性制导系统导论	6
什么是惯性制导?	6
弹道导弹的惯性制导	11
工作原理	17
矢量的概念	25
牛顿运动定律	27
摘要和问题	34
第二章 坐标系和地球的影响	36
参考系	36
地球的影响	42
摘要和问题	52
第三章 惯性敏感元件	55
引言	55
陀螺仪	55
加速度计	73
摘要和问题	83
第四章 惯性测量装置	86
引言	86
平台组件	90
电子装置	100
飞行和飞行前的操作	103
摘要和问题	105
第五章 制导计算机	107

计算机的主要功能	107
计算机的类型	110
计算机的操作	116
摘要和问题	130
第六章 惯性制导系统的使用	132
准备条件	132
飞行前操作	135
飞行操作	139
展望	141
摘要和问题	142
总复习题	144

绪 论

本书详细地阐述了惯性制导的基本原理。这里采用了一种独特的介绍方法，即通过简单的比拟使得基本原理与读者所熟悉的知识联系起来。这样，读者在学习惯性制导的基本原理时就和学习电学及电子学一样不难掌握。当读者学完这本书时，就可以懂得惯性制导设备是怎样工作的，并且完全有把握去探讨这些原理的应用。

从这本书中获得的知识，将为进一步学习空间技术打下一个良好的基础。学习这门科学技术的一般方法是，先学习各个单独的部分，然后再把它们联系起来形成完整概念。经验证明，这种学习方法并不总是成功的。因此，本书只论述基本原理及其在基本装置中的直接应用，同时也概述了它们在导弹和宇宙飞船上的应用。可以这样说，本书是一本关于惯性制导的通俗易懂的“大画册”。

学习些什么

本书在讲述惯性制导系统的基本原理时，没有使用不必要的技术术语和数学公式。为了理解的完整性，回顾了有关的物理定律并且加以举例说明。

从重力场和地球旋转的角度解释了地球的影响。书中讲述了正交坐标系的概念及其与制导问题的关系。

从本书可了解到现代陀螺仪和加速度计的工作原理。书中阐述了现代陀螺仪、摆式加速度计和其他元部件的设计特

性和工作原理。通过讲述平台的基本元件（包括惯性元件、框架、导电环、力矩马达、角度传感器和辅助电子设备）介绍了稳定平台——概述了平台的工作状态，包括水平对准、方位对准以及惯性工作状态。

书中叙述了空载数字计算机的计算任务，特别强调导航回路的计算任务。用比拟的方法介绍了计算机的组织和工作情况，包括“与”门、“或”门、“非”门和触发器等结构块的作用。

最后，从飞行前的对准到发出最后指令，按步骤地说明了惯性制导系统的工作情况。讲述了这种系统在军用导弹和空间应用中工作情况的差别。书的末尾讨论了惯性制导系统的应用前景。

· 必须具备哪些知识才能学习本书

对学习这本书的基础知识的要求可以说是最低限度的。数学上只要有简单的代数知识就够了。最重要的是要发挥头脑的思维能力，理解这些知识所需要的物理概念。书中提供的各种插图可作为辅助工具。读者在具备某些关于伺服机构知识的基础上，能更快地达到更完整的理解。除此之外，本书自成一体，只要认真学习，对于广大读者来说都是不难掌握的。

为什么要选择有问题解答的自学课本的格式●

在过去几年里，学习的新概念是以循序渐进教学法为题

● Programmed Text 或 Programmed Learning Course 是美国的一种便于自学的有问题解答的教科书，此处简称问答式自学格式。——译者

展开的。对于每一种问答式自学课本的格式或文体，虽然都有赞成和反对两种意见，但这种循序渐进教学本身已被证实是合理的。看来，目前多数的教育家认为，问答式自学文体适合教授特殊课程的需要。为了帮助读者成功地通过本书取得进步，下面简要地谈谈问答式自学格式。

按照被证实能取得最好学习效果的顺序，把每一章分成许多包含一定内容的小段，有些小段很短，有的甚至只有一个单句。另一些小段则可能包括好些小节。每一小段的长短，取决于所讲概念的性质和读者所能获得知识的多少。

本书课文的设计大概是以包含一个或多个概念的叙述为一个单元，配有插图用来说明所述的内容。自学测验题列在每一单元的末尾。这些问题中的多数是要求读者以陈述的形式填入一个或多个省略掉的词，而另一些问题，或是进行多项选择，或是作一个简单论述。答案写在问题的下面，以便读者有机会检查自己的答案是否正确，并在将要继续学下去之前验证一下自己究竟学会了些什么，哪些还没有学会。当读者发现自己对问题的答复不符合所给的答案时，就该重新学习该单元的内容，并找出自己答错的原因。实践证明，这种问答的方式能帮助读者通过学习课文取得进步。谁对所学内容理解得愈好，谁的进步就愈快。

应当怎样学这本书

养成良好的学习习惯是很重要的。应该每天抽出专门的时间来学习，要求学习场所能使读者集中精力而不致受到干扰。最好是选择自己精神最好和感到最能集中精力的时间来进行学习。

下面的一些指导性意见有助于读者从书中学到最多的

知识。

1. 细致而审慎地阅读每个句子。每个句子都讲述和论证了一定的内容，它对于理解这门技术都是有用的。

2. 当需要查看或讲到某个插图时，应先把自己正在读的句子读完，然后再看图。自己对图的总内容有了一个想象的图样后，再去继续进行阅读。当需要进行详细的检验时，再回到这个图上来。插图是专供读者加深对问题的理解而设置的。

3. 在每一单元的末尾，可以看到一个或多个需要回答的问题，其中有些是要求填空的。在回答问题时，可把答案写在书上或另一页纸上。与仅用脑子想想答案比较起来，书写答案会使人们记得更牢。书写并不费事，因为书中的大部分答案都是简短的。

4. 在看答案之前，要回答该单元的所有问题并检查答案的正确性，必要时可以参考前面的有关内容，如果仍然不会回答问题，那么可先回答余下的其他问题。如果这个问题最后仍无法回答，则查看一下书中的答案。

5. 若发现自己所作的答案不对，那么可翻回到适当章节重新学习这些材料。知道问题的正确答案，要比懂得它为什么正确来得次要。新内容的每一节都以前面讲的内容为基础，如果这个链条的一个环节过于薄弱，则后面的内容就更难理解。

6. 要细致地研究每章末尾的摘要和问题。这个复习能帮助读者衡量并巩固自己对本章知识的理解。当偶然遇到一时不能完全理解的问题时，应在准备学习下章之前重读本章有关段落并再次查对这些问题和答案。

7. 要完成书后的总复习题。这样就可复习全部课文，为

读者提供一个机会来检验自己真正学到了些什么，并发现自己的弱点，以便有目的地复习书中的内容。

本书经过细致安排，力图达到易学易懂。若读者能遵照上述指导去作，那么定能收到事半功倍的效果，而且这种学习本身将是一种愉快和有趣的事情。

第一章 惯性制导系统导论

内 容 提 要

在开头这一章里，读者可以学到一些基本概念，了解惯性制导的原理，惯性制导与“控制”制导的主要区别，所用精密仪表、电子设备和其他元件的基本功能，制导系统与其他导弹分系统的相互联系。另外，在这一章里还介绍了一些必要的物理定律和关于矢量的基本概念。

什么是惯性制导？

惯性制导的基本内容，就是研究如何将一个运载器（包括导弹、飞机、潜艇和宇宙飞船）从一个地方引导至另一个地方。惯性制导与其他制导方法（如雷达制导、天文制导等）的基本区别在于：惯性制导是完全自主的。这就是说，导弹或潜艇可以在一个完全与外界条件以及电磁波隔绝的假想“封闭”空间内实现精确导航。显然，这在军事上很有价值，因为这样做可以不受气候和电子干扰。

惯性制导是这样来实现的：通过精密陀螺仪和加速度计测出运载器的旋转运动和直线运动信号，然后输送到飞行器上的模拟计算机或数字计算机中，再由计算机综合这些信号并对它们进行运算。计算机指令导弹的姿态控制系统和推进系统，以实现运载器的惯性制导。这种制导功能可参见图 1-1。

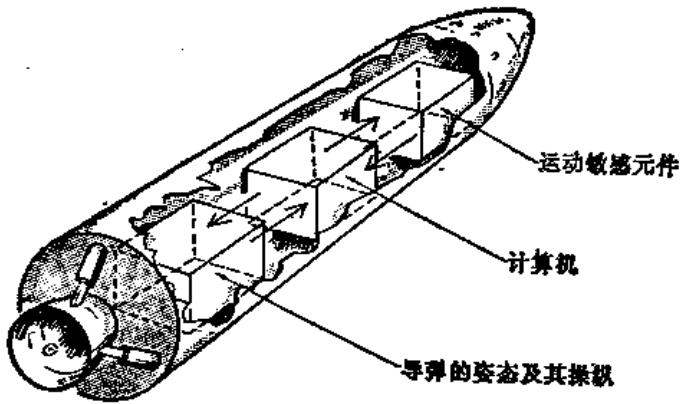


图1-1 从制导观点看导弹

对导弹制导的要求

导弹的动力飞行时间是以分计的。比如，对于“北极星”型弹道导弹（美国的一种潜对地导弹），在12分钟内飞行约1000英里（1英里约等于1.609公里）的距离，而其燃料的正常燃烧时间大约是100秒。制导（包括导航）、控制和发动机关车这些任务都必须在发动机关车之前完成，因为再入飞行器（或战斗部）在过了这一点之后就处于非制导状态。在这以后，飞行器的飞行呈弹道形式，和步枪子弹离开枪管以后的情况相类似。

导弹制导系统必须控制或引导导弹上升通过大气层，并使发动机准确地按时关机，从而使再入飞行器无需进一步控制即可击中目标。弹着点完全由发动机最后关机时的一些因素来决定，这些因素包括速度（方向和大小）、位置（包括高度与射向位移）和时间。发动机熄火条件常常以矢量形式来描述，这将在本章后面予以说明。图1-2表示导弹弹道通过大气层的各个重要阶段。

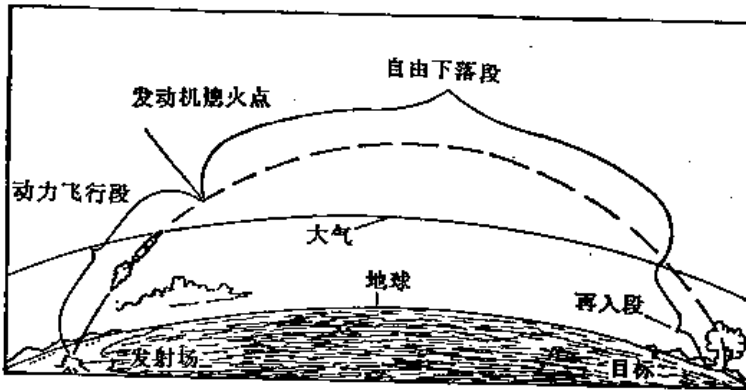


图1-2 弹道导弹的弹道

对于远程导弹（其射程一般在 200 英里以上），其制导阶段必须继续到通过地球大气层以后而终止于外层空间的极高真空区。如果制导停止于离开大气层之前，那么，由于在离开大气层之前作用在弹头上的不确定的阻力而使得制导精确度急剧地降低。在飞行中，初期产生的误差对导弹的命中率影响很大。

问 题

- 1-1 惯性制导是否需要用雷达跟踪导弹？
- 1-2 在正常情况下，弹道导弹的制导功能在什么条件下体现？
- 1-3 由于什么原因而使得惯性制导的军事意义增大？

答 案

- 1-1 惯性制导不需要用雷达跟踪导弹。
- 1-2 在正常情况下，弹道导弹的制导功能在燃料用尽的条件下体现。
- 1-3 由于惯性制导是完全自主的，因而使得其军事意义增大，

控制制导

在用来得到操纵指令的信息源方面，控制制导与惯性制导根本不同。控制制导或“指令”制导取决于导弹外部设备，如雷达跟踪站所作的测量。在这种场合，导弹名义上受自动驾驶仪控制，而控制指令即“形成”弹道的操纵指令是由地面通过无线电波发送的。操纵指令所执行的功能与开汽车的人操纵时所执行的功能相同。导弹必须沿天空中的一条路径进行制导。

外部传感器或跟踪器确定导弹的速度和位置。地面计算机将这些信息与导弹应该具有的弹道参数进行比较，其差值使用作操纵指令。当达到适当的熄火条件时，就由外部指令终止火箭推力。典型设备如图 1-3 所示。

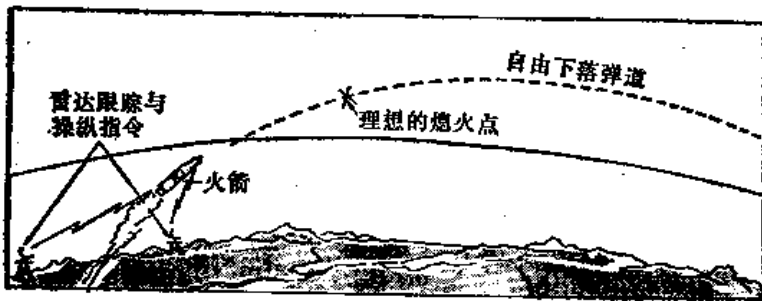


图1-3 指令制导

惯性制导

第二次世界大战期间第一种实用的惯性制导设备出现在德国的 V-2 火箭上。V-2 所用的系统很简单。导弹姿态(角方位)由直接安装在弹体上的陀螺控制。达到预定速度后便终止推力，速度是通过从起飞开始将与导弹中心线平行安装的摆式积分陀螺加速度计的输出脉冲数相加而得到的。这种加速度计做得非常精确。

现代惯性制导系统仍然采用陀螺和加速度计，但其结构更为完善。加速度计的主要功能是测量自起飞至熄火这段时间内导弹运动的所有分量。导航陀螺的主要功能是敏感导弹的旋转运动并将加速度计同任何旋转运动隔离开来。通过这些功能的实施，导弹中的飞行计算机（连同—个时钟或时间基准）就有充分的信息而在没有外部基准的情况下导引导弹。象无线电制导那样，惯性制导也是用计算机来产生指令。惯性制导计算机是空载的，而指令制导计算机始终在地面上。

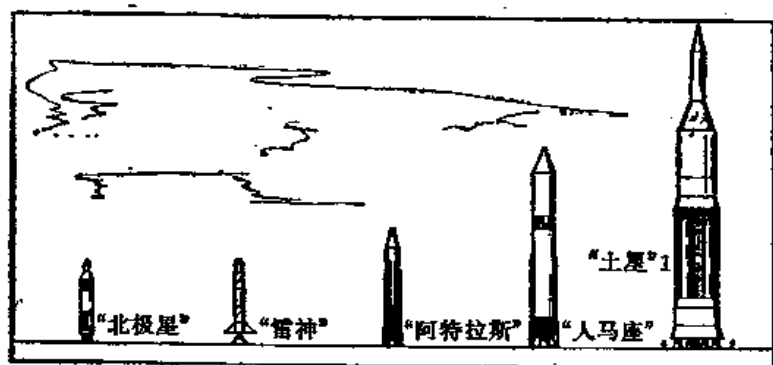


图1-4 惯性制导导弹的实例

问 题

- 1-4 控制制导（需要/不需要）同地面保持通讯联络。
 1-5 惯性制导加速度计测量____，而陀螺则检测_____。

答 案

- 1-4 控制制导需要同地面保持通讯联络。
 1-5 惯性制导加速度计测量加速度，而陀螺则检测旋转运动。

稳定轴系 图1-5所示为说明陀螺和加速度计的轴系，一个轴系包括相互成直角的三条轴。加速度计单条敏感轴平行于轴系的每条轴安装。在这种独特的布局下可以看出，不论导弹的方向如何，至少有一个加速度计可感测到导弹的运动。三个以上的加速度计是多余的，而少于三个加速度计则意味着会损失信息。同样，三个陀螺的安装方式的特点是，

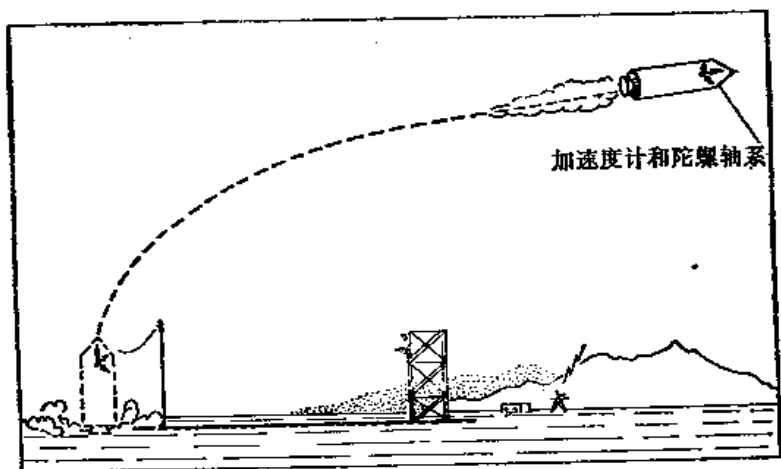


图1-5 稳定轴系

它们的输入轴与轴系的轴相平行。因此导弹绕任何轴的旋转可由一个或一个以上的陀螺检测。图 1-5 表明，不管导弹的推力、俯仰、横滚或偏航姿态如何，轴系始终保持起飞时的方位。陀螺使轴系同旋转隔离，加速度计则测量参考系中的推力与阻力。

弹道导弹的惯性制导

由于惯性制导是自主的，因此军用导弹选择惯性制导最为合适。本节还涉及惯性制导在其他方面的应用。

弹道

弹道定义为导弹由起飞到击中目标所飞过的路径。关于这一点可形象地利用步枪管、子弹和目标来说明。参看图1-6，想象有50英里长的一根曲线形枪管穿过地球大气层，枪口在外层空间的高度真空中。枪管或轨道是曲线形的，这是因为地球的重力使火箭在飞向目标的过程中产生俯仰。子弹飞经枪管表示动力与制导阶段；子弹在离开枪口的瞬间必须具有所需的方向与速度才能击中目标，因为从这点开始制导就停止，子弹纯粹沿弹道飞行。当子弹在地球大气以上飞行时，影响其飞行路径的只有重力。重力

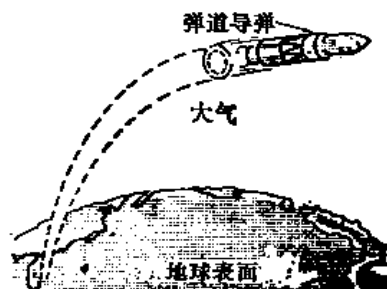


图1-6 动力飞行阶段

最终会把子弹拉回到地球的大气层之内。这一返回到大气中的过程称为“再入”，其特点是很大的减加速度（可高达70g）和短时间（30~40秒）命中。再入路径一般是非制导的（虽然也可以制导），通常称为弹道再入。

问 题

- 1-6 轴系的三条轴设置得互相成____度角。
1-7 陀螺使台体不受____的影响。

答 案

- 1-6 轴系的三条轴设置得互相成90度角。
1-7 陀螺使台体不受旋转的影响。

发射阶段的惯性制导

惯性制导是通过精密地“感觉”导弹的飞行进行工作的。这感觉与一个司机在一条弯曲的山路上开车的感受是类似的。人可以感受到汽车的加速度并感觉到沿曲线行驶时作用在身体上的横向力。从理论上说，如果司机具有完善的感测、记忆能力，而且具有时间基准，那么他就能闭上眼睛在熟悉的山路上行驶。汽车沿道路的运动情况确定作用在司机身上的加速度力——因此通过感测由此加速度所引起的力的方向、大小和随时间变化的情况，便可以控制汽车的速度和方向。

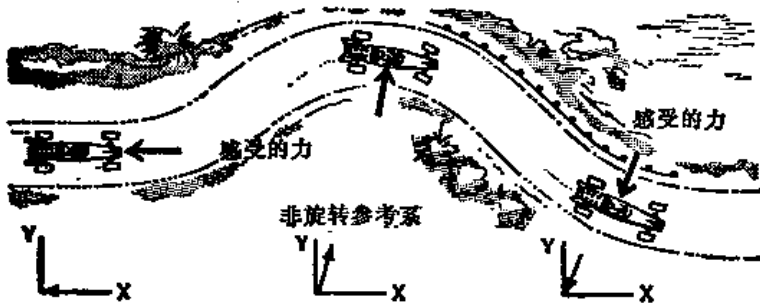


图1-7 运动感测

惯性系统的功能与此相仿。飞行计算机将系统加速度计经适当处理后得到的输出同为达到预先编程的弹道所应该具有的输出进行比较。如果这两个值不匹配，则计算机便指令导弹驾驶员改变导弹的飞行方向。计算机将加速度计输出转换成速度与位置之后，更适合于作这样的比较。当导弹的计算速度与预先编程弹道所需的速度一致时，就发出推力终止指令。

熄火点所需的精度

由于制导功能是在飞行总时间的前百分之十这段时间内完成的，因此对熄火点速度与位置有极其严格的要求。了解这一点是很重要的。最坏的情况可能是水平射向速度分量的误差。对于飞行5000英里的一枚洲际弹道导弹来说，如果熄火速度偏离正确速度（标称值为22000英尺/秒）的误差为1英尺/秒（1英尺/秒=0.68英里/小时），则战斗部将偏离目标6000英尺。熄火状态通过两个参数来评定：（1）速度误差（速度的方向和大小）；（2）熄火时的位置误差。

位置误差 为了说明问题，假如山上有一个小伙子向下面的一个目标扔石头（见图1-8）。假定这个小伙子用全身力量投掷，并假定石头以适当的方向和正确的速度脱手。现考虑位置误差的影响。如图所示，如果山太高，他会扔得太远；如果山太低，则会扔得太近。在这两种情况下都达不到目标。这就清楚地表明了弹道导弹的熄火点高度位置误差会带来什么样的后果。

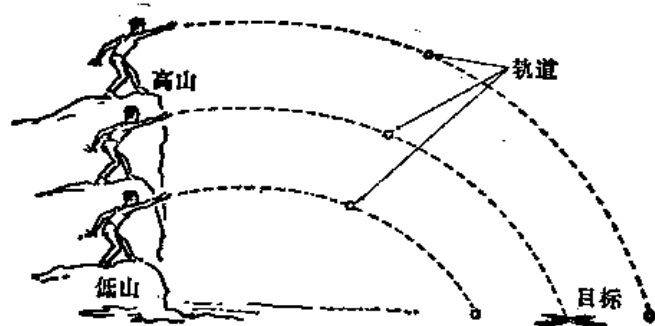


图1-8 熄火点位置误差的影响

问 题

- 1-8 加速度计输出由飞行____处理以得到制导(操纵)指令。
 1-9 熄火点高度误差会传播进入命中点处的____位置误差。

答 案

- 1-8 加速度计输出由飞行计算机处理以得到制导(操纵)指令。
 1-9 熄火点高度误差会传播进入命中点处的射向位置误差。

速度误差 拿小伙子以不正确的方向投放石头作例子。方向可以通过从垂线向下量的角度来表示。如图 1-9 所示,小伙子扔石头的方向有一个最优角度(约 45 度)。投放角太高或太低都会扔不到目标。

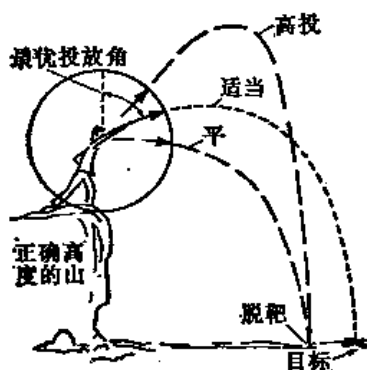


图1-9 熄火速度的角误差的影响

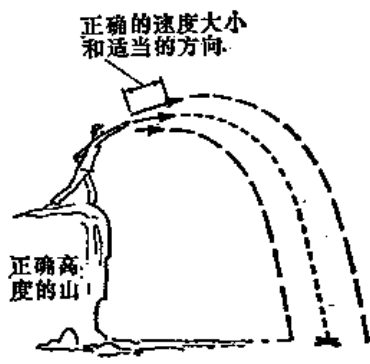


图1-10 熄火速度的幅值误差的影响

在图1-10中,一个力气较大的小伙子站在小山上的适当高度上扔石头,他以正确的方向投放。如果他给予石头的速度不够或超过所需的速度,则他就会扔得过近或过远,达不