

实用惯导系统原理

任思聪 著

宇航出版社

实用惯导系统原理

任思聪 著

江苏工业学院图书馆
藏书章

宇航出版社

内 容 简 介

本书注重实际应用，避免复杂高深的数学推导，主要从系统角度讲解惯导系统的有关知识，工程性较强。在选材上注意了国内外有关技术的新发展，其中很大部分是作者的心得和研究成果。

全书共十二章，分别介绍了有关惯性导航的基础知识和关键元器件，典型系统的特性和实现低成本惯导系统的各种途径以及对系统进行测试及评价其品质的方法。

本书可供从事惯性导航系统研究、设计和使用的工程技术人员以及大专院校有关专业的师生参考。

实用惯导系统原理

任思聪 著



宇航出版社出版

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经销

天津市大邱庄印刷厂印刷



开本：850×1168 1/32 印张：17.5 字数：403千字

1988年8月第1版第1次印刷 印数1—1000册

ISBN 7-80034-125-9/TB·032 定价：5.50元

前 言

惯性导航所依据的力学原理早在三百年前牛顿时代的人们就可以说已经知道了；或者说，有了牛顿力学定律就有了惯性导航的理论基础。但是，众所周知，几乎经过三个世纪，直到第二次世界大战快要结束时，法西斯德国才首先使用了原始型的惯性基准，较为成功地发射了V—2火箭，把惯性原理第一次付诸了实际应用。

惯性导航与制导技术在过去所以发展较慢的主要原因是：陀螺仪和加速度计的精度不高，也没有能够满足要求的计算装置。然而，由于惯性导航具有其它任何导航方法所不能与之相比拟的自主性强、精度高等许多优点，也就始终吸引人们不惜花费很大精力和物力去研究、发展有关的理论和相应的技术。于是，在本世纪五十年代以后，以牛顿力学为基础的惯性导航，从理论到工程实践都得到了非常迅速的发展。到目前为止，差不多所有的新型飞机与舰艇、射程较远的导弹与人造卫星都采用了不同形式的惯性导航与惯性制导系统。

惯性技术从理论到实用阶段的发展，可以说是包括力学、数学、天文、地理、精密机械、计算机，以及光学、电磁学和近代物理等多种学科综合发展的结果。60年代初，美国麻省理工学院研制成功的单自由度液浮陀螺仪具有很大的历史意义，它使得惯导系统首先得到了实际应用，以后相继研制成功的双自由度液浮陀螺仪和静电陀螺仪等不仅扩大了惯导系统的种类，也使系统的精度得到了空前的提高。但是，由于这些陀螺仪的技术复杂，用它们所构成的惯导系统成本很高，也就使惯导系统的广泛应用受到一定的限制。于是，当70年代初出现价格较低廉的挠性陀螺仪

时，立即引起人们极大的兴趣，很快就得到了十分广泛的应用。到目前为止，在中等精度的航空用惯导系统中，挠性陀螺仪几乎取代了绝大部分的液浮陀螺仪而占据统治地位。

在惯导系统的发展过程中，首先得到实际应用的都是平台式系统，这是因为平台通过稳定回路隔离了运载器的机动运动，陀螺仪的动态范围可以很小，所以系统易于保证导航精度；但是，平台结构复杂，成本高、可靠性差是其主要缺点。为解决这些问题，也可把惯性器件直接固连在机体上构成捷联式系统。由于这类系统没有平台，结构简单、可靠性好、又能直接提供运载器的机动角速率，是综合提供导航和制导信息的理想方案。但是，惯性元件要随着机体一起运动，工作环境恶劣、动态范围要求很宽，例如采用以高速回转体为核心的角速率陀螺仪，为满足每h 1nmile的导航精度，并要求保证机体 $400^\circ/\text{s}$ 的最大机动角速率时，就要求陀螺仪具有 10° 的动态范围，这是十分困难的。正因为这样，只有在近几年，当激光陀螺仪和半球谐振子陀螺仪等新型元件被研制成功以后，高精度的捷联式惯导系统才得到了实际应用；不过它们的造价仍是相当昂贵的。

当前惯导技术继续发展的主要方面首先仍然是提高和研制性能更好的各种陀螺仪和重力梯度仪，用以进一步提高导航精度并开拓惯导系统应用的新领域；其次是进一步研究引起惯性系统误差的原因，研究包括卡尔曼滤波技术在内的各种信号检测及处理方法在惯导系统中的应用。此外，人们对惯导系统的快速对准和误差补偿以及降低系统造价而采取的各种技术措施和方法的研究也给予了足够的重视。

这本书主要是以作者前些年给有关工厂和研究所举办学习班的讲稿和近期在一些刊物上所发表的文章为基础写成的。在内容上力求兼顾已工作多年但接触导航问题较少的工程技术人员和相应专业的本科大学生及低年级研究生，既扩大导航技术的知识面，又尽量避免不必要的数学推导，着重从系统和实际应用的角度

度阐述有关问题。

全书共分十二章。第一章到第四章主要介绍关于惯性导航的基础知识以及构成惯导系统的惯性元件和惯导平台；第五章到第八章介绍惯导系统的分类和一些典型系统的工作原理及误差特性；第九章到十二章则分别阐明实现低成本惯导系统的各种途径以及对系统进行测试和评价其品质的方法。

在本书的写作过程中，曾得到有关领导和老师以及专家们的鼓励和支持，尤其是郑元熙研究员，以及其他具有丰富实际经验和相当高理论水平的高级工程师和有关的同志们，对书稿进行了全面、细致的审阅，指出了不少缺点和错误；提出了许多有益的建议，使书稿更臻完善。在此特向他们表示深切的谢意。

书稿的整理和誊清以及制图工作由王博和李光琪同志完成，在此一并致谢。

由于作者水平有限，书中有可能存在缺点和错误，恳请读者批评指正。

作 者

1987年10月

目 录

第一章 导航问题概述

- 1.1 导航的基本概念及导航技术的发展..... (1)
- 1.2 导航技术中常用的坐标系..... (4)
- 1.3 主要的导航法简介..... (10)
- 1.4 飞机的飞行过程和管理..... (36)
- 1.5 导航技术的新要求与惯性导航的关系..... (42)

第二章 惯性导航的基础知识

- 2.1 地球的形状和重力..... (45)
- 2.2 位置矢量与确定位置的数学基础..... (54)
- 2.3 地球表面的曲率半径和动坐标的转动..... (82)
- 2.4 牛顿力学定律和加速度的测量..... (91)
- 2.5 水平坐标系中的加速度和惯导系统..... (99)

第三章 惯性元件——陀螺和加速度计

- 3.1 双自由度陀螺..... (110)
- 3.2 单自由度陀螺..... (126)
- 3.3 陀螺品质的评定与漂移模型..... (139)
- 3.4 加速度计..... (145)
- 3.5 加速度计的品质评定与误差模型..... (157)

第四章 惯性导航平台

- 4.1 平台的稳定原理及稳定回路的组成..... (162)
- 4.2 稳定回路的传递函数及对其特性的综合..... (175)
- 4.3 平台的自由度和动作原理..... (184)
- 4.4 几种平台结构的改进方案简介..... (192)
- 4.5 平台的温度控制..... (196)

第五章 惯导系统的分类及半解析式系统的方案编排

- 5.1 惯导系统的分类..... (208)

5.2	人工水平面的建立和舒勒调谐	(213)
5.3	半解析式系统的典型方案	(221)
5.4	关于高度的惯性测量	(236)
5.5	各种导航和制导参数的计算	(246)
第六章 惯导系统的误差分析		
6.1	惯性导航系统的误差源	(252)
6.2	计算坐标系与 Ψ 方程	(259)
6.3	惯导系统的误差方程	(261)
6.4	误差方程的解	(269)
6.5	误差分析的结论及对惯性元件的要求	(288)
第七章 半解析式惯导系统的初始对准		
7.1	自对准的基本原理和对准方程	(291)
7.2	陀螺罗经对准法	(295)
7.3	计算罗经对准法	(307)
7.4	锁定方位环对准法	(327)
7.5	几种快速对准方法的简介	(338)
第八章 捷联式惯导系统		
8.1	捷联系统的作用原理	(341)
8.2	捷联系统的误差传播特性	(352)
8.3	捷联系统的初始对准	(358)
8.4	惯性器件的斜置布局和余度	(372)
8.5	捷联系统的特点及其有关问题	(387)
第九章 速率方位平台惯导系统		
9.1	速率方位平台的构造原理	(393)
9.2	系统的编排方程及结构方块图	(398)
9.3	速率方位平台系统定位精度的简化分析	(404)
9.4	机动飞行条件下导航误差的传播特性	(410)
9.5	速率方位平台系统的初始对准	(418)
第十章 单轴稳定捷联惯导系统		
10.1	单轴稳定捷联惯导系统的构造原理	(429)
10.2	单轴稳定捷联惯导系统的编排方程	(434)
10.3	单轴稳定捷联惯导系统的误差分析	(443)

10.4	单轴稳定捷联惯导系统的初始对准	(457)
10.5	平台结构的布局和改进方案	(475)
第十一章 组合式导航系统		
11.1	惯性-速度组合系统	(479)
11.2	惯性-位置组合系统	(483)
11.3	卡尔曼滤波简介	(489)
11.4	最优组合导航系统	(497)
11.5	有关组合导航的其它问题	(505)
第十二章 惯导系统的测试与综合误差		
12.1	按系统标准和在系统中测试惯性元件	(510)
12.2	惯导系统的标定	(514)
12.3	惯导系统的车载试验	(523)
12.4	惯导系统的机载试验	(528)
12.5	惯导系统的综合误差	(540)
参考文献		(546)

第一章 导航问题概述

运载器的导航问题是航空、航海以及航天技术非常重要的内容之一。从事导航和运载器自动控制以及惯性导航专业的工程技术人员，简单地了解一下导航问题的基本概念以及各种导航方法的基本工作原理和特点是十分必要的，对进一步研究和解决专业本身的技术问题也是有帮助的。由于航空、航海、航天技术研究及考虑的对象和问题的不同，具体的导航方法和措施也会有所不同。但是考虑到导航技术在航空方面更具有典型性，为了避免内容过于庞杂，后面将以航空或飞机的导航技术为主要结合对象加以叙述。

1.1 导航的基本概念及导航技术的发展

一架飞机从一个机场起飞，希望准确地飞到另一个机场；一艘舰艇从一个港口出发，要顺利地行驶到另一个港口；一枚导弹从一个基地发射，要精确地命中所预定的目标，就必须完全依靠导航和制导技术。

按原意来讲，导航和制导的概念是不相同的。

所谓导航，就是导引航行的意思；也就是确定航行体运动到什么地方和向那个方向运动的意思。要使飞机、舰船等成功地完成所预定的航行任务，除了起始点和目标的位置之外，主要的就是必须知道航行体所处的即时位置。因为只有确定了即时位置才能考虑怎样到达下一个目的地的问题；如果连自己已经到了什么地方，以后该到什么地方也不知道的话，那就无从谈起完成预定航行任务的问题。由此可见，导航问题对飞行来说是极为重要的。

导航工作一般是由领航员完成的。但是，随着科学技术的发展，现在越来越多地使用导航仪器，使其代替领航员的工作而自动地执行导航任务。自然，能实现导航功能的这种仪器、仪表系统也就叫导航系统。当导航系统作为独立装置并由航行体带着一起作任意运动时，其任务就是为驾驶人员提供即时位置信息和航向信息。对航行体的作用就只限于影响操作人员按需要驾驶飞机或舰船，使之到达预定的目的地。

所谓制导，则是控制引导的意思，也就是使航行体按一定的运行轨迹或根据所给指令运动，以便达到预定的目的地或攻击预定的目标。例如弹道火箭、人造卫星的运载火箭或宇宙探测器等，为了击中目标或送上一定的轨道，就必须根据测量仪器所测得的信息，使运载器准确地按时间，或按所达到的预定高度、速度、以及要保持的方位关掉发动机。此后，运载器就只受引力的作用继续飞行。实现制导功能的仪器、仪表系统也就叫制导系统。另外，如无人驾驶飞机，按事先设计的轨迹或随地面的导引信息飞向目的地，这和一般有人驾驶的情况有很大差别，因而它也是制导问题。

要使运动体按一定的轨道航行，还必须依靠运载器的操纵机构如机翼、舵面等的正确动作，并且要求运载器的运动满足一定的动态品质，这就又存在运载器机动运动的控制问题。

由于科学技术的发展，导航和制导以及控制功能都可由计算机机构和必要的仪器来执行。无人驾驶的飞机或自动运行的运载器，它实际上就把导航和制导功能混合在一起了。下面我们着重介绍导航问题。

导航可以分为自主式和非自主式两大类。在不依靠外界信息或不与外界发生联系条件下，独立完成导航任务的是自主式；而必须有地面设备或依靠其它外部信息才能完成导航任务的就是非自主式。很明显，不同的对象要求不同的导航方式。例如民用飞机，它可以充分利用地面导航设备，对自主性的要求就不如军

用飞机那样迫切。相反，对军用飞机，就不希望受地面导航设备的影响太大，而能独立自主、安全、隐蔽地去执行自己的任务。

导航科学的发展也和其它科学技术的发展一样，是适应交通运输，特别是军事上的需要而不断发展起来的。

导航问题的提出可以追溯到相当久远的年代。大家知道，中国是世界文明发达最早的国家之一。我们的祖先很早就发明了指南针这种最简单的导航仪器。远在四千多年以前，黄帝在和蚩尤作战时，为了辨明方向以便追击敌人，就曾使用了指南车。所谓指南车，实际上就是利用地磁识辨方向的最古老的导航仪器。而指南针则是指南车的简化。现在航空、航海所使用的磁罗盘，就其原理而言，也还是一个指南针。

随着社会的发展，在十七世纪初，欧洲各国开始进入资本主义社会，对外贸易的发展和掠夺殖民地的活动导致了当时航海业的迅速发展。但是，要在无边无际的大海中航行，如果不能解决导航定位问题也就谈不上航海问题。因此，确定船的位置就成了生死攸关的大问题。在当时条件下，天文科学已发展到一定水平，于是为了确定船舶的位置，人们就利用了星体在一定时候与地球的地理位置具有固定关系的原理，便发展了观测星体用以确定船舶位置的天文导航法。在航空事业发展以后，也就很自然地吧磁罗盘和天文导航仪改头换面地用到了飞机上。

但是，随着科学技术的发展和各种条件的变化，一方面，运载器的运行速度有了很大提高，另一方面，导航定位精度及其它要求也越来越高，磁罗盘和原始的天文导航法也就不能满足客观现实的要求，因而便提出了利用已有科学技术的新成果，创造发明了各种无线电导航法和航迹推算导航法。自从人造卫星上天以后，则出现了卫星导航和精度更高、用途更广以及适应性更强的导航星系统。至于为适应电子对抗、精度更高、功能更全、完全自动自主地工作而发展起来的惯性导航系统则是下面要叙述的主

要内容。

1.2 导航技术中常用的坐标系

坐标系是为描述物体所处位置及运动规律而选取的参考基准。在航空、航海及航天技术中主要的问题之一就是要知道运载器所处的位置以及以怎样的方向及运动方式才能达到所预定的目标。如果没有参考基准也就无法确定物体的位置，也谈不上物体运动的方向及运动规律。在航空、航海及航天技术中飞机、舰船、人造卫星及宇宙飞船在什么位置都是指这些物体在某一特定坐标系中的相对位置，它们从一个位置到另一位置的运动也都是指相对某一参考基准或坐标的运动。例如北京首都机场所处的位置是东经 $116^{\circ}36'$ 、北纬 $40^{\circ}05'$ ，就是指机场在地球经纬度坐标系中的位置，没有地球的经纬度坐标系作基准，也就无法确定首都机场的位置。再如一架航天飞机飞临某一星体时，其位置只有在以某星体，或以其它星体为基准的参考坐标系中直接或间接地确定下来。因此，坐标系是航空、航海及航天技术中运载器定位及描述其运动规律的主要依据。

坐标系一般由原点、基面、坐标轴方向及取值范围等要素构成。根据不同的用途和使用对象可以选取各种不同类型及不同形式的坐标系。因此坐标系具有不同的分类方法，一般最通用的是右手直角坐标系和球面坐标系。在航空、航海及航天技术的导航定位中，坐标系主要按原点的位置来分类。坐标原点与地球、金星、火星等行星以及太阳、月亮或其它天体中心相重合的坐标系叫星体中心坐标系，坐标系原点在星体表面的叫星体表面坐标系；坐标原点在星体或运载器之外某点的叫宇宙中心坐标系；而坐标系原点与飞行器结构内部或外部某点相重合的则叫牵连坐标系。各种坐标系之间都存在一定的几何关系。用球面三角和方向余弦等数学方法可以把一个坐标系中的量变换成另一个坐标系中

的量。现在把惯性导航技术中最常用的一些主要坐标系分述如下：

1. 太阳中心坐标系 X_s, Y_s, Z_s 太阳中心坐标系实际上又分日心黄道系和日心赤道系两种。日心黄道系如图1—2—1, (a)所示, 它以太阳中心为原点, 以地球围绕太阳公转运行的轨道平面即黄道面为基面, 坐标轴 X_s 指向黄道面与地球赤道平行面相交的春分点 γ , Z_s 轴通过日心垂直于黄道面, Y_s 则与上两轴构成右手直角坐标系, 各坐标轴的取值范围为 $\pm\infty$ 。

一般也用球面坐标系。该坐标系主要用于星际航行时的导航及星体观测。宇宙飞行器及其它星体的位置 P 可用春分点向东或沿地球公转方向为正量起的黄经 λ_s 、从黄道面量起向北为正、向南为负的黄纬 φ_s , 以及从太阳中心到 P 点的距离 R_s 来确定。一般 $\lambda_s = 0 \sim 360^\circ$; $\varphi_s = 0 \sim 90^\circ$; $R_s = 0 \sim \infty$ 。

日心赤道系如图1—2—1, (b)所示, 它以太阳中心为原

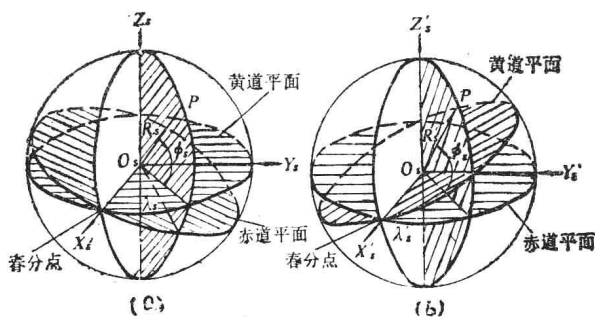


图1—2—1

点, 以地球赤道面的平行面为基面。坐标轴 X'_s 也指向春分点, Z'_s 则与地球自转轴相平行, 而 Y'_s 与前两轴构成右手直角坐标系, 各轴的取值范围也为 $\pm\infty$ 。

日心赤道系也用球面坐标系, 宇宙空间的位置 P 可用从春分

点量起向东为正, 向西为负围绕地轴的转角赤经 λ' 、从赤道面量起向北为正, 向南为负的赤纬 φ' , 以及从太阳中心到 P 点的距离 R_s' 来确定。

2. 地平坐标系 $X_h Y_h Z_h$ 地平坐标系的坐标原点在观测者所在地。如图1—2—2所示。取观测地点与铅垂线正交的平面即水平面为基面。坐标轴 X_h 与当地铅垂线正交在基面内的任意方位 α , Z_h 沿铅垂线向上为正, Y_h 则与上两轴构成右手直角坐标系。该坐标系主要用于运载器的姿态控制, 以及其它用水平面作基准的各种测量。在天文观测及天文导航中则取球面坐标系,

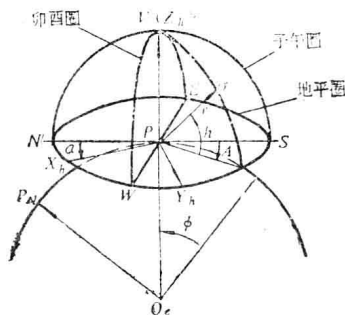


图 1-2-2

这时把地平面与以观测点为中心的任意球面相交的圆称地平圈。把垂线向上与球面的交点 V 称天顶。经天顶的任何大圆都称地平经圈，而大圆形成的面称垂直面。过极点 P 的地平经圈称子午圈，相应的大圆面称子午面。子午圈与地平圈交于南点和北点，与子午圈相垂直的地平经圈称卯酉圈，它与地平圈交于东点和西点。任意天体 σ 和地平面之间的夹角 h 称地平纬度或高度，而天体所在垂直面与子午面间习惯上从南点算起顺时针方向为正的两面角 A 称地平经度或天文方位，知道了高度 h 和天文方位 A ，再加上从原点到天体的距离 r ，天体的位置就完全确定了。

3. 地心惯性坐标系 $X_I Y_I Z_I$ 地心惯性坐标系的原点在地球中心 O_e ，以赤道面为基面。坐标轴 X_I 指向春分点； Z_I 与地球自转轴重合向北为正； Y_I 与上两轴形成右手直角坐标系。该坐标系主要用于力学分析及惯性导航。在理论上认为它与时间无关，是相对惯性空间无任何运动的一个理想坐标系，牛顿力学定律在该坐标系中成立。在技术应用中近似取地心赤道坐标系代替地心惯性坐标系时，线加速度的误差为 $1 \times 10^{-7} g$ ，角速率误差为 $1 \times 10^{-5}^\circ/h$ 。

4. 地球坐标系 $X_e Y_e Z_e$ 地球坐标系的原点和基面与地心惯性坐标系相同。坐标轴 X_e 一般取本初子午面和赤道面的交线； Z_e 与地球自转轴重合，向北为正； Y_e 与上两轴形成右手直角坐标系。该坐标系主要用于描述地球的形状及确定地球任何点的空间位置。它与地球固连，以 $\Omega = 7.292115 \times 10^{-5} \text{ rad/s}$ 的角速率相对惯性空间或地心惯性系进行转动。因此，有时也叫相对地心坐标系。

5. 经纬度坐标系 $\lambda \varphi R$ 这是以经度和纬度描述物体所处位置的球面坐标系。它以垂直于地球自转轴的赤道面为基面。地球的几何极点称北极和南极，地球自转角速率矢量的矢端指向北极。从赤道面算起，地球表面各点的法线与赤道面之间向北和向南 $0^\circ \sim \pm 90^\circ$ 的夹角 φ 分别称北纬和南纬。过两个极点，垂直于赤道面的所有大圆称经圈。如从北极看地球，按反时针和顺时针方向，从格林威治天文台所在地的经圈或本初子午面算起， $0^\circ \sim 180^\circ$ 的角度 λ 分别称东经和西经。知道了物体所处的纬度和经度，以及地球半径或从物体到地心的距离 R ，物体相对地球的位置就完全确定了。

6. 地理坐标系 NWV 该坐标系用于导航以便确定物体相对地球运动的方向。其原点随着运载器处于当地的即时位置并以通过该点的水平面为基面。坐标轴方向以地球自转角速率矢量作基本参考矢量时， N 轴与当地子午线重合指向真北； W 轴在水平

面内指向正西； V 轴则与重力矢量平行向上为正，与上两轴形成右手直角坐标系。这时 W 轴指向正西，因而就叫北、西、天坐标系。也有取 V 轴与重力矢量方向一致的右手地理坐标系。这时，如以 N 轴指北时，就变成北、东、地坐标系。另外还有按习惯取东、北、天坐标系的。这种地理坐标系如以真北为基本参考基准时，为了确定方位必须要考虑 90° 的换算关系，在导航应用上不太方便。考虑到惯导系统中方位的确定，主要依靠地球自转角速率矢量，同时，高度都是从地面向上为正，因此本书都采用北西天地理坐标系 NWV 。

7. 理想平台坐标系 $X_T Y_T Z_T$ 这个坐标系是针对平台式惯导系统中平台应处位置而言的坐标系。这个坐标系的原点与飞机相固连。对模拟水平坐标系的半解析式惯导系统来说， X_T 、 Y_T 在水平面内互成直角，但与地理坐标系在方位上相对真北可以具有任意的转角 α ，而 Z_T 则与地理坐标系的 V 轴重合。因为，在惯导系统的分析中，这个坐标系是一种假定平台没有姿态误差，处于理想状态的情况，因而就叫理想平台坐标系。

把地心惯性坐标系到理想平台坐标系之间各种坐标系的相互关系表示在图1—2—3上。

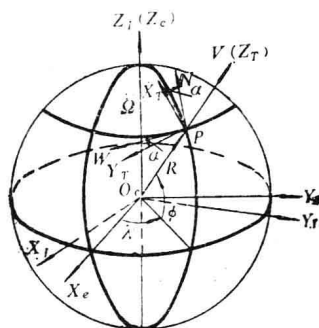


图1—2—3

8. 平台坐标系 $X_p Y_p Z_p$ 这是惯性导航系统中代表实际平台