

陀螺仪原理

1. 1. 引言

陀螺仪可算是非常复杂的物体，因为它们以独特的方式运动，甚至像在抵抗重力。正是这些特殊属性使其在各个方面（包括[自行车](#)和[宇宙飞船](#)上的先进导航系统）都有极为重要的用途。一般的[飞机](#)要用约 10 多个陀螺仪，遍布在[罗盘](#)和自动驾驶仪等各个地方。俄罗斯米尔空间站（Russian Mir space station）曾使用 11 个陀螺仪保持其方向对准[太阳](#)。[哈勃太空望远镜](#)也安装了大量导航陀螺仪。同样，陀螺效应对[溜溜球](#)和飞盘等玩具也至关重要。

在本文中，我们将了解陀螺仪的应用为何如此广泛，以及它们的奇妙运动的成因！

2. 2. 陀螺效应：进动

如果您玩过陀螺玩具，就知道它能表演各种各样有趣的绝技。陀螺能在细线或手指上保持平衡；能以非常奇妙的方式抵制自转轴运动；但最有趣的陀螺效应还数**进动**。这是陀螺仪抵抗重力的表现。

根据这一原理，回转的自行车轮能够像下图所示的那样悬在空中：



陀螺仪“抵抗重力”的能力令人莫名惊诧！

它是怎么做到的？

这种神秘的效应就是“进动”。一般情况下，进动的发生过程是：如果有一个陀螺仪正在旋转，而您施力转动它的自转轴，则陀螺仪反而会围绕与力轴成直角的轴转动，如下列图形所示：

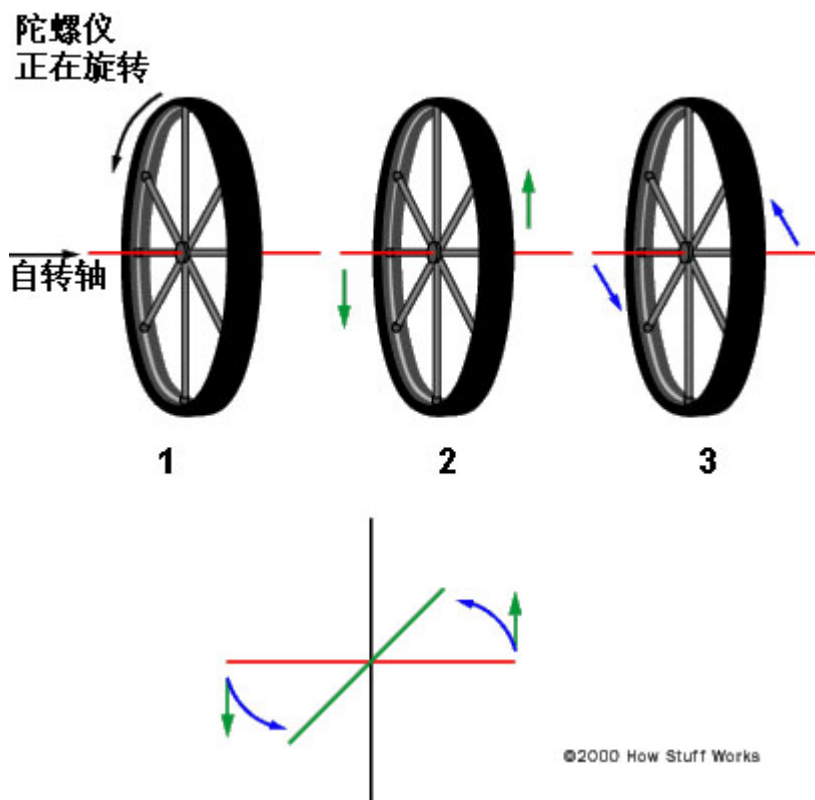


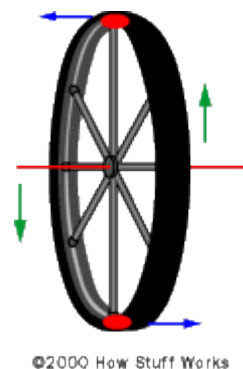
图 1 中，陀螺仪正围绕自己的轴旋转。图 2 中，施力转动陀螺仪的自转轴。图 3 中，陀螺仪沿着与输入力方向垂直的轴对输入力做出反应。

那么，为何会发生进动呢？

3. 进动产生的原因

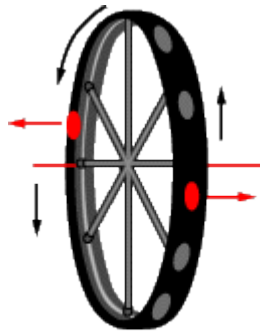
陀螺仪为何会发生这种运动？自行车车轮的轮轴居然能像前面图形所示的那样悬在空中，看上去简直不可思议。不过，只要想想陀螺仪在旋转时不同部位实际上都发生了什么，就会明白这种运动完全正常！

让我们研究一下陀螺仪旋转时的两个小部位——顶端和底端，如图所示：



向轮轴施力时，标示的两点会倾向于朝图中指示的方向运动。

如图所示，在向轮轴施力时，陀螺仪的顶端部位将试图向左运动，而底端部位则试图向右运动。如果陀螺仪没有旋转，则车轮会倒下。如果陀螺仪正在旋转，那么试想一下这两个部位都发生了什么：牛顿第一运动定律指出，运动中的物体会持续沿直线匀速运动，直到受到不平衡力的作用为止。因此，陀螺仪顶点受施加到轮轴的力的作用，开始向左运动。根据牛顿第一运动定律，它会继续向左运动，但在陀螺仪的自转作用下又开始旋转，如下图所示：



©2000 How Stuff Works

两个点一边旋转，一边继续原来的运动。

这种效应就是进动的成因。陀螺仪的不同部位在同一点受力，但随后又转动到新的位置！当陀螺仪顶端的部位向一侧转动 90 度时，会由于惯性而继续保持向左运动的状态。底端的部位也是如此——向一侧转动 90 度时，会由于惯性而继续保持向右运动的状态。这些力沿进动方向转动车轮。当标示的点继续转动的角度超过 90 度时，原来的运动就停止了，于是陀螺仪的轴悬在空中并开始进动。经过这样一番研究，您就明白进动一点都不神秘了，它完全符合物理定律！

4. 4. 陀螺仪的应用

总的来说，进动效应就是一旦开始旋转陀螺仪，它的轴就总是试图指向同一方向。的确，只要将陀螺仪放在一套平衡环中，它就能持续指向同一方向。这也是**陀螺罗经**的基本原理。

如果在一个平台上装两个陀螺仪，并让它们的轴互成直角，然后把平台放入一套平衡环中，那么无论平衡环怎样转动，平台都将完全保持稳定。这是**惯性导航系统**（inertial navigation systems，即 INS）的基本原理。

在 INS 中，平衡环轴上的传感器会探测平台的转动。INS 通过这些信号获悉交通工具相对于平台的转动。如果为平台添加一套带有三个敏感加速计的装置，就能准确辨别交通工具驶向何方，及其在所有三个方向的运动变化。有了此信息，飞机的自动驾驶仪就能使飞机沿航线飞行，火箭的导航系统就能让火箭进入理想轨道！

有关陀螺仪及其应用的更多信息，请查看下一页的链接。

- 5. [了解更多信息](#)
- 6. [阅读所有物理学类文章](#)

罗盘工作原理

本文包括：

- 1. [罗盘工作原理](#)

无论站在地球上什么位置，手拿一个**罗盘**时，罗盘都将始终指向北极。这真是不可思议且奇妙的事情！想像一下您位于海洋的中央，环顾四周全是一望无际的海水，而且阴云密布看不到[太阳](#)……如果没有罗盘告诉您哪个方向是“北”，究竟怎么才能知道应该向哪个方向行进？在[GPS 卫星](#)和其他高科技**导航**辅助工具出现之前的很长时间内，罗盘向人类提供了一种简单而且不太昂贵的方法来帮自己定位。

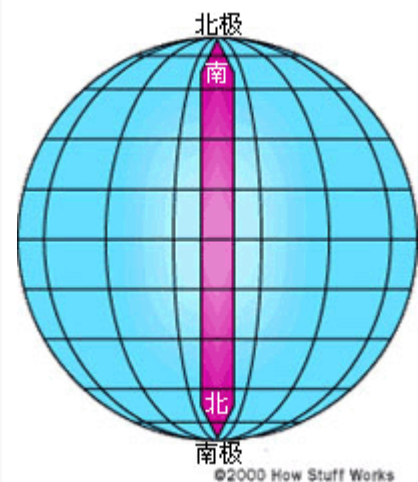


© 2002 HowStuffWorks

但是罗盘可以这样工作的原理是什么呢？为什么对于检测小型磁场非常有用，正如我们在[电磁体工作原理](#)中看到的那样？本文中，我们将为您解答所有的这些问题，并将探讨如何从零开始制作罗盘！

罗盘是一种极其简单的装置。磁性罗盘（与陀螺罗盘相反）由很小、很轻的磁铁平衡放置在几乎没有摩擦的支点上。磁铁通常称为指针。在指针的一端标记有“N”意思是北，或涂成其他颜色以表示指向的是北。从表面看来，这就是罗盘的全部了。

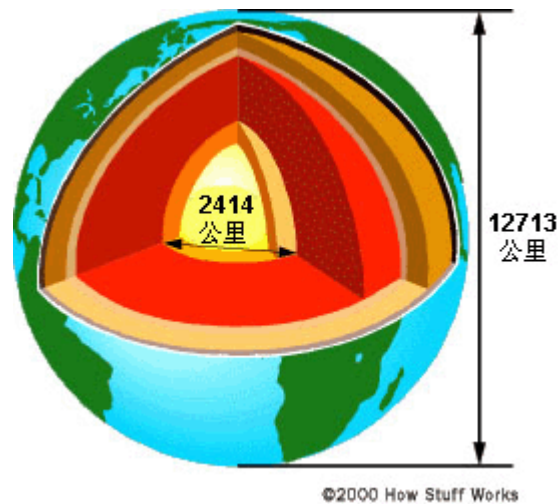
罗盘能如此工作的原因则有趣得多。可以想像成在地球里面埋了一个巨大的条形磁铁。为了使罗盘的北端指向北极，需要假设埋下的条形磁铁的南端在北极，如右图所示。如果这样理解世界，您就会发现电磁通用的“**异性相吸**”的规律会使罗盘指针的北端指向所埋条形磁铁的南端。因此罗盘就会始终指向北极。



准确而言，条形磁铁与地球的旋转轴心并不是完全重合的，而是轻微地偏离中心。此偏离称为偏差，大多数优质地图都会指出不同的区域偏差是多少（因为根据地球上位置的不同会有微小的差异）。

地球的磁场在地球表面相当的微弱。毕竟，地球这颗行星直径几乎有1.3万多公里，因此磁场需要经过很长的距离才能影响到罗盘。这就

是为什么罗盘需要用重量很轻的磁铁和无摩擦支撑的原因。否则，地球表面的磁场强度就不足以转动指针。



尽管“埋在核心的巨大条形磁铁”这个比喻很好地解释了为什么地球具有磁场，但显然真实情况并非如此。那么真实情况是什么呢？

没有人确切地知道，但是当前有一种工作原理的说法正广为流传。如上所述，人们认为地球的核心大部分是由熔化的铁（红色的）组成。但在其最核心处，压力非常大以致于使那些超高温度的铁结晶成固体。从核心放射出来的热所产生的对流以及地球的旋转，使液体铁进入到旋转模式。人们认为正是液体铁层中这些旋转的力量减弱了旋转轴周围的磁力。

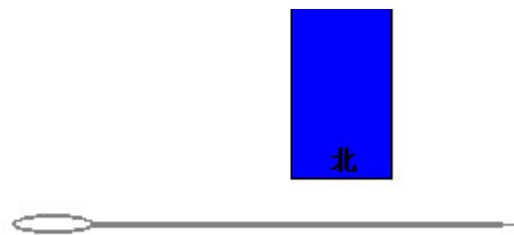
事实是因为地球的磁场如此微弱，而罗盘只是检测器，可以检测任何事物产生的微弱磁场。这也就是为什么我们可以用罗盘来检测带电金属丝产生的小型磁场（请参阅[电磁体工作原理](#)）。

自制罗盘

如果您还没有罗盘，可以采用人们数百年前的方法来制作自己的罗盘。要制作自己的罗盘，需要以下材料：

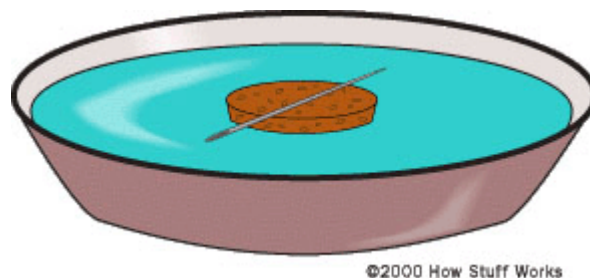
- 一根针或其他金属丝一样的[铁](#)片（例如，弄直的曲别针）
- 能够浮起的小东西——一块软木、聚苯乙烯泡沫塑料[咖啡](#)杯底、一块塑料片、牛奶罐的盖……
- 一个盘子，最好是饼形盘，直径 23-30 厘米，装上大约 2.5 厘米深的水

第一步是使针带上磁性。最简单的方法就是用另一个**磁铁**——用磁铁在针上划动 10 或 20 次，如下图所示。



如果在家里找不到磁铁，还有两个资源可以利用：开瓶器和自制[电磁铁](#)（请参阅[电磁体工作原理](#)）。

将浮体放在那盘水的中间，如下所示。



“水上的浮体”技术是一种简单的制作无摩擦[支撑](#)的方法。将带了磁性的针放在浮体上。它会缓慢地指向北方。这样您就制成了一个罗盘！

像上一页中制作的磁性罗盘在移动的平台（如船和[飞机](#)）上使用时会出现一些问题。因为它必须是水平的，而且当平台转动时会缓慢地校正自己。因为这种趋势，所以大多数轮船和飞机使用的是陀螺罗盘。

旋转的[陀螺](#)，如果由装有万向节的支架支撑并旋转，即使支架移动或旋转它也会保持所指向的方向。在陀螺罗盘中，正是利用这种趋势来仿效磁性罗盘。在开始旅行之前，用磁性罗盘作为参考使陀螺罗盘的轴指向北方。陀螺罗盘中的[马达](#)能使陀螺罗盘保持旋转，因此陀螺罗盘将持续指向北方并可以快速准确地调整自己，即使船是在波涛汹涌的海水中前进或是飞机遇到了湍流也不会受到影响。此外还应该使用磁性罗盘定期地校准陀螺罗盘，以纠正可能出现的任何错误。

有关罗盘、导航及相关主题的更多信息，请查看下一页的链接。

- 2. 2. [了解更多信息](#)
- 3. 3. [阅读所有旅行器具类文章](#)

GPS 接收机工作原理

本文包括：

- 1. 1. [引言](#)

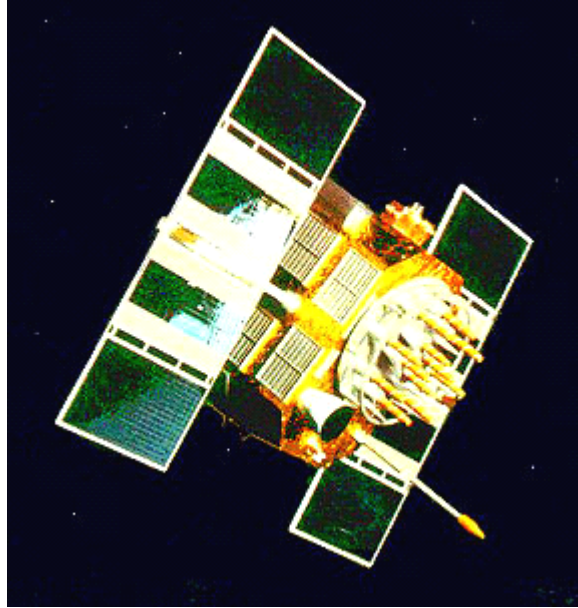
为了不迷路，我们的祖先不得不进行非常艰苦的测量工作。他们所采

取的方式包括树立里程碑，进行艰苦的地图绘制工作以及学习如何利用夜空中的[星星](#)辨别方向。

如今，一切变得非常简单。您只需花费不到 100 美元就可以获得一个可以装在口袋里的小工具，它在任何时候都可以告诉您在地球上的确切位置。只要您有一个 GPS 接收机并能使它无遮掩地对准天空，您就永远不会再迷路。

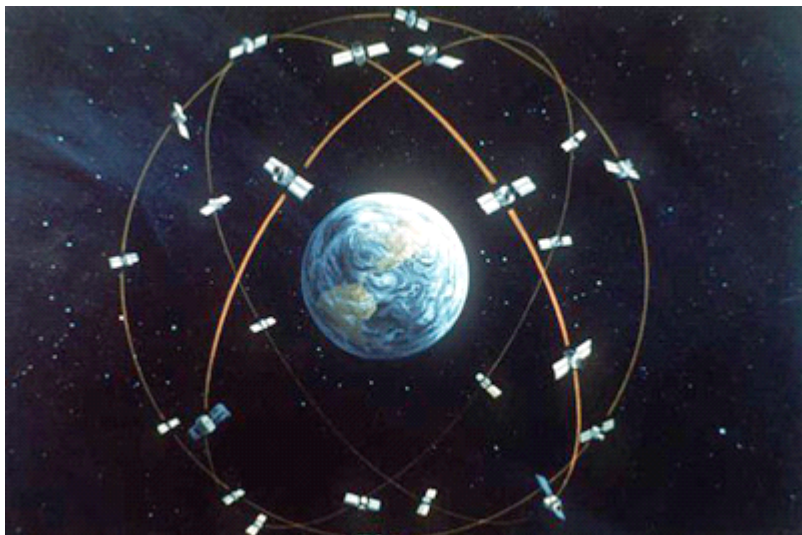
在本文中，我们将了解到这些便携式指南装置如何实现这个令人称奇的功能。正如我们所知道的，虽然全球卫星定位系统十分庞大、昂贵并且融入了许多技术发明，但它的工作原理却非常简单明了。

当人们谈到“GPS”时，通常是指 GPS 接收机。**全球卫星定位系统**（GPS）实际上是一个卫星群，由 27 颗沿环地球轨道运行的[卫星](#)（24 颗为工作卫星，另外三颗为备用卫星）组成。虽然这一卫星网络由美国军方研发并作为军用导航系统而使用，但很快这一系统就进入了普通百姓的生活中。



NASA 供图
NAVSTAR GPS 卫星

每一颗由太阳能提供动力的卫星的造价在 3,000-4,000 英镑之间，并且在地球上空大约 19,300 千米的高度绕地球运行，每天绕地球运转两周。它们的运行轨道是经过特殊安排的，所以在任何时候，地球上任何地方的上空都至少可以“见到”四颗卫星。



美国国防部供图
GPS 卫星群的示意图

GPS 接收机的任务就是确定四颗或更多卫星的位置，并计算出它与每颗卫星之间的距离，然后用这些信息推算出自己的位置。这一计算过程的基础是一条被称为**三边测量法**的简单数学定理。三维空间的三边测量法稍微复杂一点，所以我们先从简单的二维三边测量法进行说明。在这之前，我们先看一些有关 GPS 的精彩实录。

2. 2. GPS 概览

第一颗 GPS 卫星于 1978 年发射。

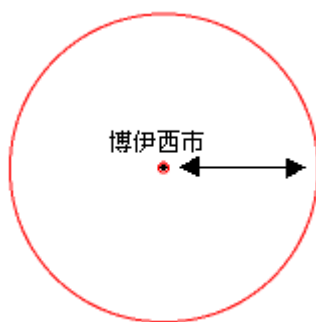
- 目前使用的系统是由第二代 GPS 卫星组成的，称为 Block II。
- 第一颗 Block II 卫星于 1989 年发射。
- 美国国防部于 1995 年宣布 GPS 全面运作。
- 当该系统刚刚推出时，GPS 信号传输中存在故意计算错误的做法，以此限制非军用 GPS 接收机的精确度。2000 年 5 月份，相关部门停止了这一做法。
- 这时，已有 24 颗 GPS 卫星运行在轨道上。
- 这 24 颗卫星的建造和发射总共花费了约 120 亿美元。
- 每颗卫星重约 787 公斤。
- 这些卫星运行在地球上空约 2 万公里的轨道上。
- 卫星沿轨道绕地球运行一周的时间为 12 小时。
- 俄罗斯也有一套与美国一样的系统，被称为 GLONASS 系统。

3. 3. 二维三边测量法

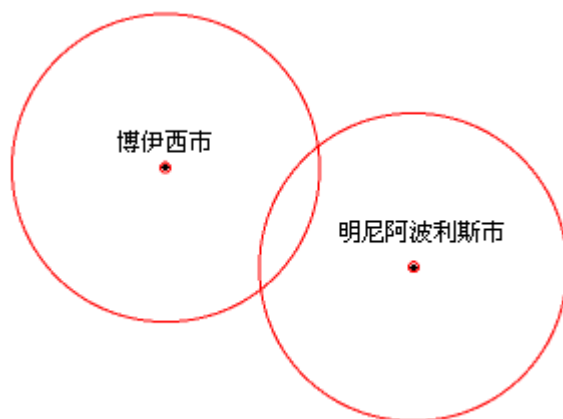
二维三边测量法

想象一下，您正身处美国的某地并且完全迷了路——由于某种原因，您完全没有任何线索来确定位置。您找到一位友善的当地人问道：“我在哪儿？”他回答说，“这里是距离爱达荷州（Idaho）博伊西市（Boise）约 1005 千米的地方。”

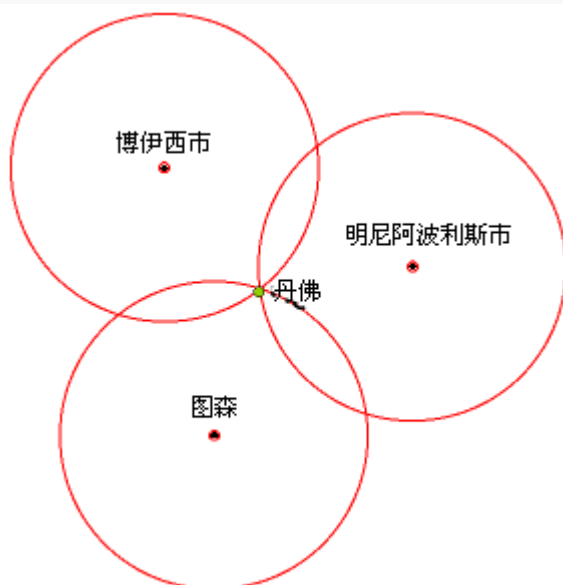
这是一个表面上看似精确，但对您来说没有什么实际用处的答案。您可能在以博伊西市为中心半径 1005 千米的圆周上的任何地方，比如：



当您再次向某人问路时，她回答说，“这里是距离明尼苏达州（Minnesota）明尼阿波利斯市（Minneapolis）约 1110 千米的地方。”现在您就有了些头绪。如果您把这一信息与前面得到的关于博伊西市的信息结合起来分析，您就会得到两个相交的圆。如果您距离博伊西市 1005 千米而且距离明尼阿波利斯市 1110 千米，那么就可以知道您现在处在这两个交点中的一个上。



如果第三个人告诉您现在位于距离亚利桑纳州（Arizona）图森市（Tucson）约 990 千米的地方，那么您就可以排除其中的一个位置，因为第三个圆只会与上面提到的两个交点中的一个相交。现在您可以确定自己的位置在科罗拉多州（Colorado）的丹佛（Denver）市了。



这一原理同样适用于三维空间，但您要计算的是球面而不是平面的圆。在下一节，我们将了解这种三边测量法。

4. 4. 三维三边测量法

本质而言，三维三边测量法不会比二维三边测量法难太多，但需要较高的空间想象力。试想一下，前面例子中的半径突破平面的局限，开始向四面八方伸展。于是您得到的是一系列的球面而非一系列的圆。

如果您距离太空中的 A 卫星约 16 千米，您所处的位置就有可能是一个很大的面上的任何一点，设想一下这可是一个半径约为 16 千米的球面。如果您知道自己距离 B 卫星约 24 千米，您就可以得到另一个很大的球面，并且与前一个球面相交。两个球面相交处形成一个正圆。如果您还知道与第三颗卫星的距离，就可以得到第三个球面，与上面的正圆相交于两点。

地球本身就是第四个球面——所以两个交点中只有一个位于地球的表面，而另一个位于太空的交点就可以排除掉了。然而，接收机一般会寻找四颗或更多的卫星，以提高精度并提供精确的海拔信息。

为了进行这个简单的计算, GPS 接收机必须知道下面两个方面的数据:

- 您上方至少三颗卫星的位置
- 您与这些卫星之间的距离

GPS 接收机通过分析 GPS 卫星发出的高频低功率无线电信号来计算这些数据。较好的装置通常有好几个接收机, 因此可以同时接收到来自多颗卫星的信号。

[无线电波](#)是一种电磁能量, 这意味着它们是以光速(真空中的速度约为每秒 30 万公里)传播的。接收机根据信号到达的时长计算其传播的距离。在下一节, 我们将了解接收机和卫星如何协同进行这一测量。

在上一页中，我们了解到 GPS 接收机是通过计量信号在卫星和接收机之间的往返时间来计算距离的。事实证明，这是一个相当精细的过程。

在某一时刻（假定是午夜），卫星开始发送一长串称为**伪随机码**的数字序列。同样，接收机也在午夜开始发出相同的数字序列。当卫星信号到达接收机时，数字序列的传送会比接收机发出信号的时间稍稍滞后。



美国陆军供图
GPS 卫星

时间延迟的长度就是信号传送的时间。接收机将这一时间乘以光速就可以计算出信号传送的距离。假设信号是以直线传送的，则这一结果即为接收机到卫星的距离。

为了使这一测量法准确有效，接收机和卫星都需要可以精确到纳秒的同步时钟。为了使卫星定位系统使用同步时钟，我们需要在所有卫星

以及接收机上都安装[原子钟](#)。但原子钟的价格在 5-10 万美元之间，对于普通消费者而言有点太贵了。

全球卫星定位系统使用了一个巧妙而有效的方案解决了这一难题。每一颗卫星上仍然使用昂贵的原子钟，但接收机使用的是经常需要调校的普通[石英钟](#)。简言之，接收机接收来自四颗或更多卫星的信号并计算自身的误差。换句话说，接收机使用的“当前时间”必须是唯一值。正确的时间值的意义在于，使接收机收到的所有信号就好像都来自太空中的单一点。这一时间值是所有卫星上原子钟的统一时间。因此接收机就可以将自身的时钟调整到这一时间值，进而使接收机的时间与所有卫星上的原子钟相同。GPS 接收机就可以“免费”获得原子钟的精确度。

当测量到四颗定位卫星到您所处位置的距离时，您就可以画出相交于一点的四个球面。即使您的数字有误差，三个球面仍然可能相交，但如果您的测量有误，四个球面就不可能相交于一点。由于接收机利用自身内置的时钟来测量所有的距离，距离测量会呈现一定的比例误差。

接收机可以轻易地计算出使四个球面相交于一点所进行的必要调整。基于此，接收机需要重新设置自身的时钟以便和卫星原子钟同步。接收机只要开启就处在不断的调整中，这也意味着接收机几乎与卫星中昂贵的原子钟一样精确。

要使用距离信息进行定位，接收机还必须知道卫星的确切位置。这并不是特别难办到的事，因为卫星运行在很高的既定轨道上。GPS 接收机储存有星历，其作用是告诉接收机每颗卫星在各个时刻的位置。虽然一些外在因素，如月球和[太阳](#)的引力作用，会缓慢地改变卫星运行的轨道，但美国国防部会不断监控卫星的精确位置，并把任何调整信息都作为卫星信号的一部分传送给所有的 GPS 接收机。

虽然这一系统工作性能不错，但错误还是会不时发生。其中一个原因是，这一测量方式是建立在一种假设上的，即无线电信号会匀速（光速）穿过大气层。事实上，地球大气层在一定程度上减慢了电磁能量的传播速度，特别是当电磁信号进入电离层和对流层时。延迟状况因您在地球上所处地点的不同而不同，这意味着很难将这一因素准确地纳入距离的计算中去。难题还在于无线电信号可能被大型物体反弹回去，例如[摩天大楼](#)，这将导致接收机计算出的与卫星的距离比实际的要远。最糟的情况是，有时卫星会发送错误的星历数据，误报自己的位置。

差分 GPS（DGPS）有助于纠正此类错误。其基本原理是用一个已知位置的固定接收机站来测算 GPS 的误差。由于机站的 DGPS 硬件已经知道它自己的位置，它可以很容易地计算出它覆盖范围内的接收机的误差。该机站会向所在区域内所有装配 DGPS 的接收机发送无线电信号，为这一区域提供信号纠正信息。一般而言，能获得这些纠正信息使 DGPS 接收机比普通的接收机要精确得多。

GPS 接收机最基本的功能就是接收来自至少四颗卫星的信号，并且将这些信号中的信息与电子星历的信息相结合以计算出接收机在地球上的位置。

一旦接收机计算完毕，它就可以告诉您它目前所处位置的经度、纬度和海拔（或与之类似的测量信息）。为了使导航更加人性化，大多数接收机会把这些原始数据标注在存储于[内存](#)中的地图文件上。



[Garmin](#) 供图

StreetPilot II，附带驾驶员用的内置地图的 GPS 接收机

您可以使用接收机内存中存储的地图，也可以把接收机连接到一台内存中存有更多详尽地图的[计算机](#)，或者您直接买一张所在区域的详细地图，再根据接收机提供的经度和纬度信息找到自己的位置。部分接收机可以让您将详细的地图下载到内存中，或通过插件式地图存储装置提供详细的地图。

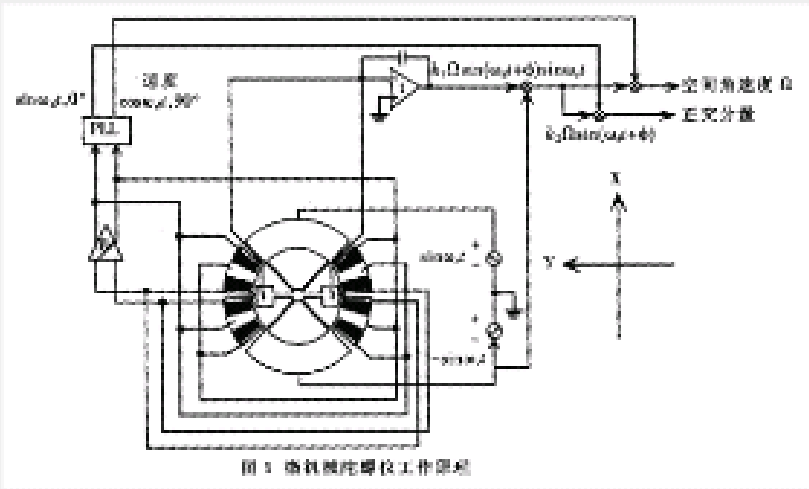
标准的 GPS 接收机不仅可以把您的确切位置标注在地图上，也可以把您移动的路线显示在地图上。如果您让接收机一直开着，它就会一直保持与 GPS 卫星之间的通讯联络，这样您就能看到您位置的变化情况了。有了这一信息和内置的时钟，接收机可以为您提供以下几条有价值的信息：

- 您移动了多远的距离（里程表）
- 您移动了多久
- 您当前的速度（速度计）
- 您的平均速度
- 虚线准确地显示出您在地图上到过的地方
- 如果您维持目前的速度，您到达目的地还需多少时间

有关 GPS 接收机及相关主题的更多信息，请查看下一页上的链接。

6. [了解更多信息](#)
7. 阅读所有[电子玩意](#)类文章

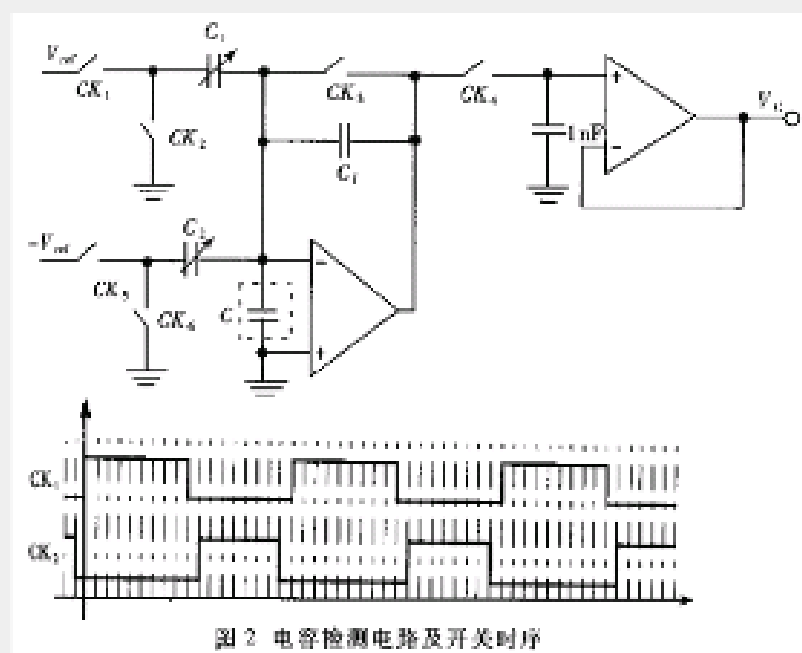
1. 摘要：一种用于微机械惯性传感器研制与开发的检测平台，介绍电容式惯性传感器微电容信号的检测原理、该系统的总体结构、各个组成部分的工作原理及自动检测方法。
2. 关键词：微机电系统（MEMS） 微机械陀螺（MMG） 检测
3. 随着科学技术的发展，许多新的科学领域相继涌现，其中微米/纳米技术就是诸多领域中引人注目的一项前沿技术。20 世纪 90 年代以来，继微米/纳米技术成功应用于大规模集成电路制作后，以集成电路工艺和微机械加工工艺为基础的各种微传感器和微机电系统（MEMS）脱颖而出，平均年增长率达到 30%。微机械陀螺是其中的一个重要组成部分。目前，世界各个先进工业国家都十分重视对 MMG 的研究及开发，投入了大量人力物力，低精度的产品已经问世，正在向高精度发展。



1 微机械振动陀螺仪的简要工作原理

4. 陀螺系统组成见图 1，它由敏感元件、驱动电路、检测电路和力反馈电路等组成。在梳状静电驱动器的差动电路上分别施

加带有直流偏置但相位相反的交流电压，由于交变的静电驱动力矩的作用，质量片在平行于衬底的平面内产生绕驱动轴 Z 轴的简谐角振动。当在振动平面内沿垂直于检测轴的方向（X 方向）有空间角速度 Ω 输入时，在哥氏力的作用下，检测质量片便绕检测轴（Y 轴）上下振动。这种振动幅度非常小可以由位于质量片下方、淀积在衬底上的电容极板检测，并通过电荷放大器、相敏检波电路和解调电路进行处理，得到与空间角速度成正比的电压信号。



在科研及加工过程中，一个重要的内容就是检测陀螺仪的特性，如工作状态谐振频率、带宽增益、Q 值等，于是就提出了微机械惯性传感器检测平台的研制任务。根据陀螺仪的工作原理，整个仪器包括两大部分：驱动信号发生部分和表头的输出信号检测部分。驱动信号发生部分对待测的惯性传感器给予适当的驱动信号，使传感器处于工作状态。信号检

测部分要求检测出微小电容变化，经过放大、解调处理后，将模拟量转换成数字量采集到PC机中，分析输出信号，以确定惯性表的特性。

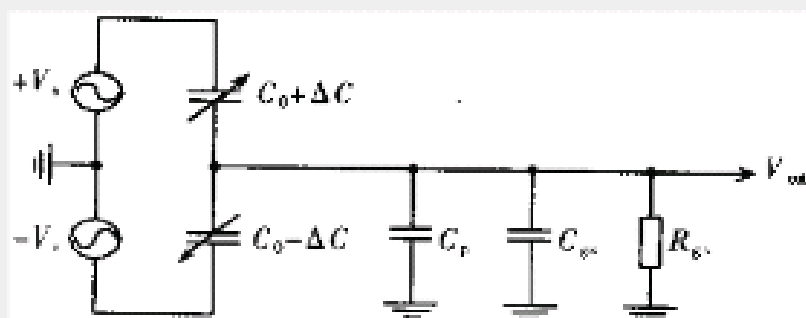


图3 单位增益放大器等效电路

2 微电容检测技术

5. 在MMG检测技术中，利用电容传感器敏感试验质量片在哥氏力作用下的振动角位移，获取输入角速率信号。由于陀螺仪的尺寸微小，为了得到 $10^\circ/\text{h}$ 的中等精度，要求电容测量分辨率达到 $(0.01 \times 10^{-15}) \sim (1 \times 10^{-18})$ 法拉。因此，对于微机械加速度计和向机械陀螺仪来说，检测试验质量和基片之间的电容变化是一个关键技术。目前在MMG中采用的微电容检测方案有三种：开关电容电路、单位增益放大电路和电荷放大电路。

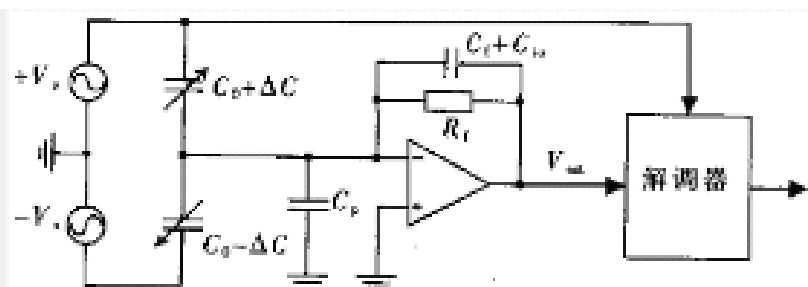


图 4 电荷放大器原理图

2.1 开关电容电路

6. 其基本原理是利用电容的充放电将未知电容变化转换为电压输出。该测量电路包括一个电荷放大器、一个采样保持电路以及控制开关的时序，如图 2 所示。

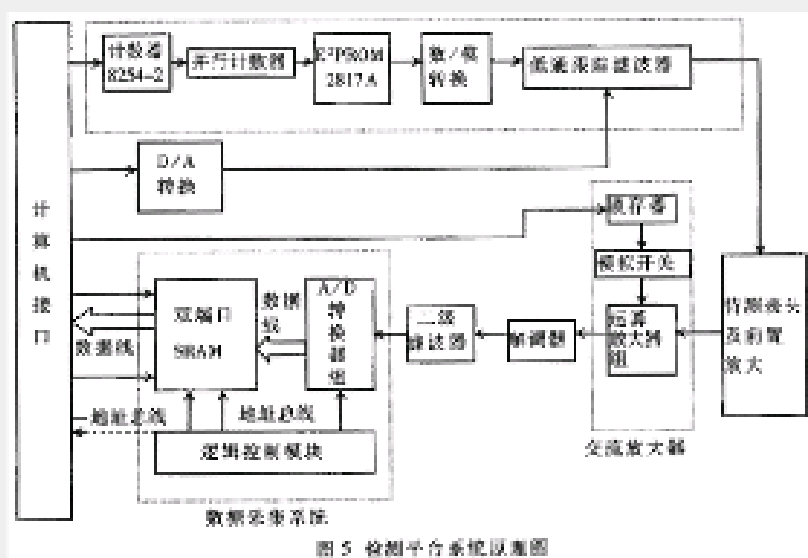


图 5 检测平台系统原理图

在测量过程中，先将未知电容（ C_1 、 C_2 ）充电至已知电压 V_{ref} ，然后让其放电。充、放电过程由一定时序控制，不断重复，使未知电容总处于动态的充放电过程。 C_1 、 C_2 连续地放电，电流脉冲经过电荷放大器转换为电压。再经过采样保持器，得到输出 V_c 。将公式 $\Delta C = 2C_0 \cdot x/d_0$ 代入，可得电容检测

电路的传递函数为：

$$7. V_c/x = -[2V_{ref}C_0/C_{fd0}]$$

8. 2. 2 单位增益放大器电路

9. AD 公司与 U. C. Berkeley 联合开发的 ADXL50 (5g 的微机械加速度计) 采用了单位增益放大电路。

10. 图 3 是单位增益放大器的等效电路。图 3 中, C_p 为分布电容 C_{gs} 为前置级输入电容, R_{gs} 为输入电阻。当载波频率在放大器的通频带以内时, 前置级输入电阻可忽略不计。由图 3 可
午, 前置级有用信号输出为:

$$11. (V_s - V_{out}) j\omega (C_0 + \Delta C) + (-V_s - V_{out}) j\omega (C_0 - \Delta C)$$

$$12. = V_{out} j\omega (C_p + C_{gs}) + V_{out} / R_{gs}$$

$$13. \because R_{gs} \rightarrow \infty$$

$$14. \therefore V_{out} = (2\Delta C / 2C_0 + C_p + C_{gs}) V_s$$

15. 分布电容 C_p 约为 10pF,

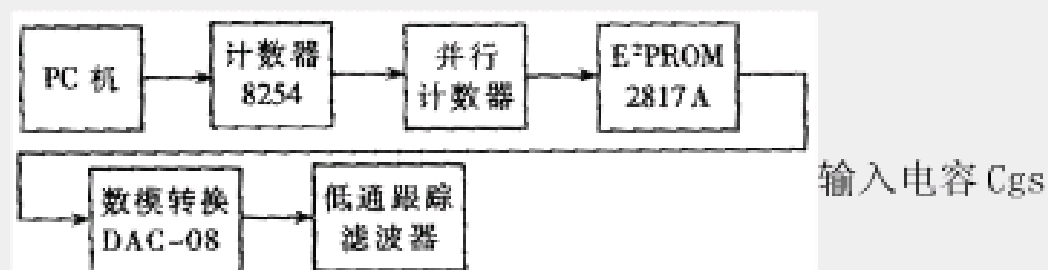


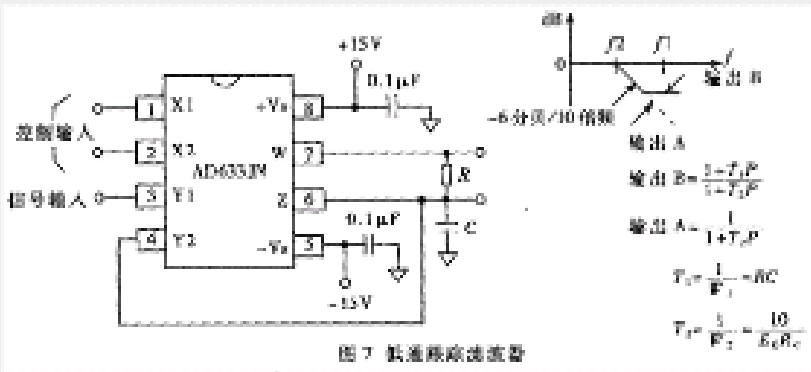
图 6 数字信号发生器原理框图

约为 1~10pF, 一般都大于传感器标称电容 C_0 (1pF 左右)。可以看出, 它们的存在都极大地降低了电容检测灵敏度。要提高电路灵敏度, 就必须消除 C_p 、 C_{gs} 的影响, 通常采用的措施等电位屏蔽。

16. 2. 3 电荷放大器电路

17. 电荷放大器电路如图 4 所示。它采用具有低输入阻抗的反相输入运算放大器。其中 C_p 表示分布电容， C_f 为标准反馈电容。 R_f 用来为放大器提供直流通道，保持电路正常工作。应选取 R_f ，使时间常数 $R_f C_f$ 远大于载波周期，以避免输出波形畸变。但 R_f 过大为今后电路集成带来不便。可以使用小阻值的电阻组成 T 型网络，替代大阻值电阻。
18. 若运算放大器具有足够的开环增益，反相输入端为很好的虚地，那么，两输入端点之间的电位差为零。因此，反相输入端对地的分布电容 C_p 和放大器的输入电容 C_{gs} 对电路测量不会造成影响。电荷放大电路相对于单位增益放大电路来说，结构要简单，不需考虑等电位屏蔽问题；只需将杂散电容的影响转化为对地的分布电容，即进行合理的对地屏蔽，就能获得较好的效果。
19. 尽管在电荷放大电路中，可以忽略掉输入电容及反相输入端对地的分布电容，但是在检测微小电容变化时，输出还是有很大的衰。这是由放大器输入输出端分布电容 C_{io} 造成的。当载波电压频率大于 $1/(2\pi R_f C_f)$ 和小于放大器的截止频率时，输出电压 V_{out} 应该表示为：

$$20. V_{out} = -[(C1-C2) / (C_{io}+C_f)] V_s = -[(2\Delta C) / (C_{io}+C_f)] V_s$$



3 检测平台的系统构成及工作原理

21. 该系统的工作原理如图 5 所示。对惯性传感器施以适当的激励信号后，传感器的动片即处于振动状态，上下极板间的电容发生周期变化，采用电荷放大器电路将该信号提取出来，经交流放大、解调后通过 A/D 转换变成数字量采集到微机中。观察传感器的输出响应，为下一步利用软件方法分析微机械惯性传感器的时域、频域特性打下基础。

22. 3. 1 激励信号发生器

23. 根据微机械轮式振动陀螺仪的工作原理，最多需要 4 路激励信号。激励信号为正弦波，每两路相位相反。为了测量陀螺仪的频率特性，需要不断改变激励信号的频率。目前不同设计的陀螺仪谐振频率在几百赫兹到 10 千赫兹之间，激励信号也需要在这个范围内进行调节。另外，陀螺仪的驱动力矩等于驱动信号的交流分量与直流分量的乘积，所以还要施加正或负的直流偏置，使陀螺能处于正常工作状态。交流相位和直流偏置组合见表 1。

表 1 交流相位和直流偏置组合

24. 直流偏置:	25. +	26. +	27. -	28. -
29. 交流信号:	30. +	31. -	32. +	33. -

34. 一般的 RC 振荡电路生成的正弦波频率靠改变 R、C 值来调节，不能连续大范围调节。所以，设计中采用数字方法合成模拟波形，其原理见图 6。图 6 中 8254 为软件可编程计数器。其包含 3 个独立的 16 位计数器，计数最高频率可达 8MHz，设计中输入 3MHz 的时钟，将 2 个计数器串连使用，这样可以增加频率控制范围。8254 产生的方波信号作为后面并行计数器的计数脉冲输入。并行计数器由 2 片 74LS161 组成 8 位二进制循环计数器。74LS161 计数到最大值时会自动清零，重新开始计数，其输出可作为 E2PROM 2817A 的地址信号（即每个正弦周期内采样点数为 256 个）。2817A 的数据读取时间为 150ns。设计电路时将它的片选和读信号均设为有效，以提高数据读取速度。D/A 转换采用 DAC-08 电流输出型 D/A 转换器。电路输出时间 85ns，放大器采用高速高精度运放 OP-37，同理，D/A 转换器的片选和转换开始信号总为有效，其输出跟随输入变化，提高转换速度。实验结果表明，此信号发生器完全可以生成 10kHz 以内可调频的正弦波。而且使用可编程计数器 8254，输出正弦波的频率可以用软件方法调节。如果想输出非正弦波形，只要修改 E2PROM 的数据，就可以输出

任意形状的周期波形。

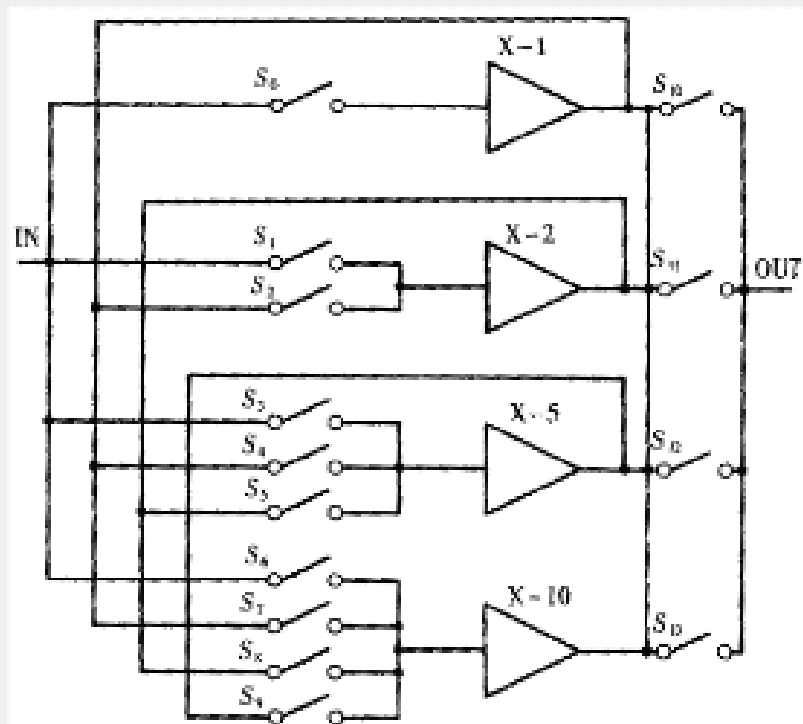


图 8 交流放大器原理

3.2 低通跟踪滤波器

35. 数字信号发生器具有控制灵活的优点，但是输出信号不够平滑，其中会有台阶波。在对信号要求比较高的场合，还需要进行滤波。本设计中信号的频率变化范围很大：几百赫兹到 10 千赫兹。为了进一步提高信号质量，采用 AD633 模拟乘法器构成低通跟踪滤波器，其原理如图 7。

36. 通带的截止频率是由电压 E_c 控制的，输出是 OUTPUTA，截止频率：

$$37. f_c = E_c / [(20V) \pi RC]$$

38. OUTPUTB 处是乘法器的直接输出端，截止频率与 RC 滤波器相同：

$$39. f_1=1/(2\pi RC)$$

40. 这种滤波器结构简单，没有开关电容，噪声小，一般采用数模转换器控制 E_c ，控制通带频率也比较容易。

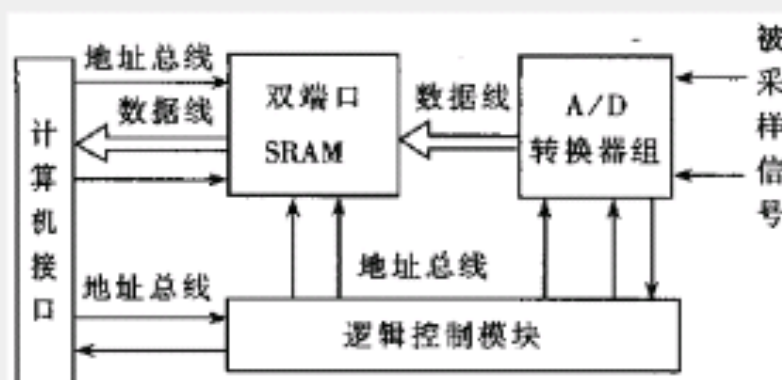


图9 数据采集系统基本组成框图

3.3 交流放大器

41. 微机械惯性传感器在施加激励信号后，即处于振动状态。传感器有差动微电容量变化 $C_0+\Delta C$ 和 $C_0-\Delta C$ 。采用电荷放大器电路提取出 ΔC ，此电压信号仍然很弹，需要进一步放大处理，于是采用图8所示的交流放大器。

42. 交流放大器由4个放大倍数为-1、-2、-5、-10的运算放大器级联组成，进一步放大被测信号，同时调整幅值以便适应解调器的输入。图8中的开关选用ADG211模拟开关，通过控制模拟开关的开合，可以任意选择某级或某几级放大器参加工作，实现对放大倍数正负1、2、5、10、20、50、100的整倍数调整。例如，将模拟开关 S_0 、 S_2 、 S_8 、 S_{13} 闭合，其他开关全部打开，

交流放大器的总放大器数即为：

$$(-1) \times (-2) \times (-10) = -20。$$

43. 3.4 数据采集系统

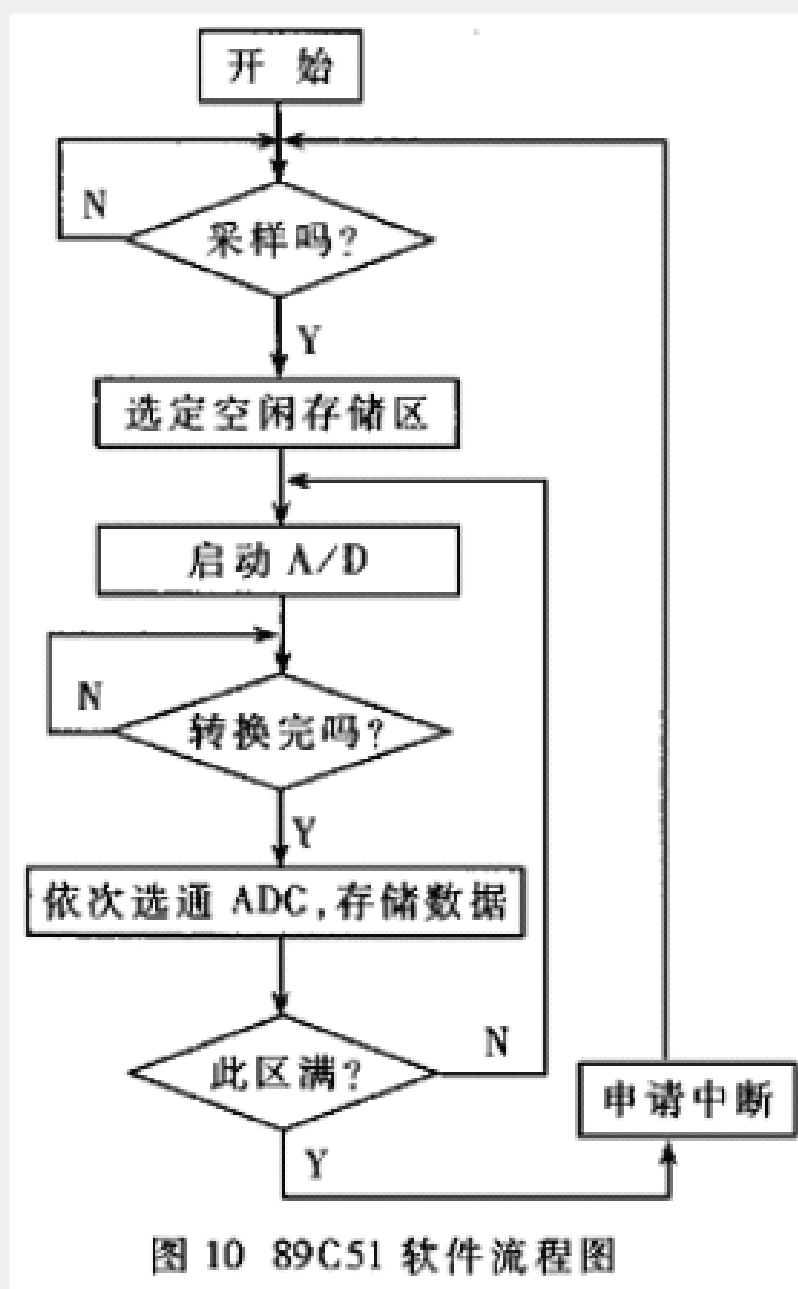


图 10 89C51 软件流程图

44. 使用计算机总线，与外设之间必须有接口。本系统采用双端口 RAM 作为数据缓存。先将信号采样并存储其中，然后成组地向主机传送，从而有效地发挥了主、从、资源的效率，且设计也相对简单。

45. 3.4.1 系统工作原理

46. 系统基本组成原理如图 9。主要有双端口 RAM、逻辑控制模块 A/D 转换器组、计算机接口。机通过接口启动逻辑控制模块后 CPU 资源向其他请求开放，逻辑控制模块发控制信号启动 A/D 转换器并进行采样，并将转换结果存入双端口 RAM。当 RAM 中的数据达到一定数量时，逻辑控制模块向计算机发出中断请求。主机接到请求后进入中断服务程序，向逻辑控制模块发出命令，决定是否继续采样，并将 RAM 内的数据读入内存。

47. 3. 4. 2 硬件设计

48. 本设计使用 Cypress 公司的 CY7C136 (2k×8bit) 双端口 RAM。其两个端口都有独立的控制信号、片选 CE、输出允许 OE 和读写控制 R/W。这组控制信号使得两个端口可以像独立的存储器一样使用。使用这种器件要注意当两个端口访问同一个单元时，有可能导致数据读出结果不正确。解决这个问题的方法有两个：一种是监测 busy 信号输出，当检测到 busy 信号有效，就使访问周期拉长，这是从硬件上解决；另一种方法是软件上保证两个端口不同时访问一个单元，即将双端口 RAM 进行分块。本系统采用后者，将 busy 信号输出通过上拉电阻接到电源正极。

49. 在系统中，逻辑控制模块的作用非同小可，是控制采样、存储、与计算机接口的核心。本系统为方便对采样速率等参数进行设置，在该模块中采用了 MCS-51 单片机。这样可以通过编程设定采样速率。

50. 与主机的信息交换包括:

a) 接收主机控制信号, 以决定是否开始采样;

b) 在存储区满后, 向主机发中断请求。

51. 本系统使用 AT89C51 的地址总线来选通 RAM 的存储单元, 对其进行写操作, 将采样结果存入相应的单元。

52. 3. 4. 3 软件设计

53. 系统软件包括主机程序和逻辑控制模块中 89C51 程序。软件的关键是单片机控制 A/D 转换器和存储器部分, 软件流程见图 10。

54. 至于系统的采样速率, 一般通过调用定时中断来实现。

55. 微机械惯性通用检测系统针对性强 (专用于微机械陀螺仪和加速度计), 可实现敏感元件的自动测试, 自动扫频测出传感器的谐振频率、Q 值等, 并且还可以在在一定程度上实现硬件功能再调整, 在实际检测中取得了较好的效果。

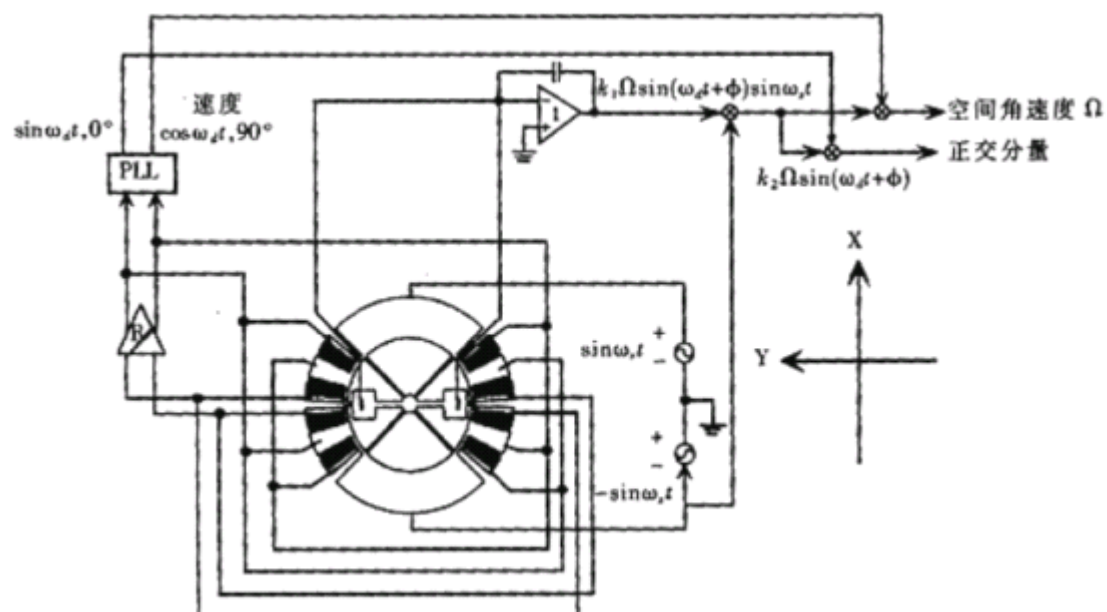


图 1 微机械陀螺仪工作原理

