

空间机械在卫星姿控中的作用

楼 岳 于绍华 杨林娜

(空间中心总体部)

一、引 言

在卫星姿态控制系统里，空间机械学具有很重要的作用。姿控系统实际上是机——电系统。它包括姿态信号检测、处理、形成控制指令、姿态执行机构以及卫星本身的动力学及运动学。

根据卫星任务不同，就有不同的姿态检测仪器，例如星跟踪仪、太阳跟踪仪、机械扫描式红外地平仪等等。这一类仪器都是测量卫星相对于外天体、太阳或地球的相对姿态，我们暂称之为外姿态测量仪。另外在卫星姿控中，普遍采用的陀螺装置，则可以不依赖于其他天体，而直接测出卫星的角速度或角度。显然后一类仪器具有较大的自主性。因而也就有较大的优越性，由于陀螺的漂移，其输出误差随着时间逐渐增大。因此目前在卫星姿控系统中，采用陀螺作为实时控制的信号测量仪，而用外姿态测量仪来修正陀螺的长期漂移。

作为卫星姿控的执行机构，飞轮是一种典型的空间机械，我们把它称为空间机械，不仅是指它将被放在空间环境里进行工作。在地面条件下设计和试验过的飞轮，一旦进入空间，还会出现一些特殊的机理问题。例如为什么在德——法的交响乐卫星的动量飞轮和在荷兰的天文卫星的反作用飞轮在进入空间的初期，却发生了不可预测到的摩擦力突然变化，以致引起卫星本身的起旋。

由以上看来，空间机械学对卫星姿态的关系是十分密切和重要的。我们作为从事姿控系统的专业，对空间机械学了解很少。这里仅从姿控系统的观点和我们工作中遇到的一些问题作个介绍，仅供大家参考，并希指正。以下我们将举出一些姿控系统，来看看有些空间机械是如何工作的以及它们对系统的影响，而重点放在飞轮和陀螺方面。

二、飞 轮

如果把卫星看作为一个刚体，它的三个轴在空间如何定向，及卫星绕各轴的角速度，就构成了卫星的姿态控制。例如天文卫星的一个轴指向太阳，整星绕该轴有恒速旋转，以扫描宇宙中的天体目标，地球资源卫星的标称轨道为圆，其俯仰轴与轨道平面法线平行，卫星绕俯仰轴以轨道角速度 ω 旋转，这样就可保证偏航轴指向地心，滚动轴沿前进飞行方向。

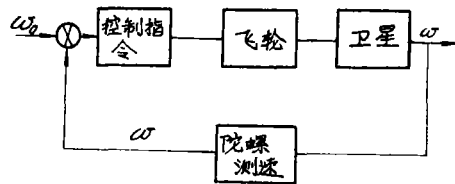


图 1

由以上看出，这些卫星都有一个指向轴的定向控制以及整星绕该轴的旋转控制。

卫星的旋转控制是通过设定陀螺的输出和用反作用飞轮来实现的。卫星的旋转速度 ω 可由陀螺测出，取其与设定转速 ω_0 的偏差 $\omega_0 - \omega$ 作为输入信号，形成控制指令，驱动飞轮改变卫星转速，以便使 $\omega_0 - \omega$ 变为零，即使卫星转速 ω 等于设定转速 ω_0 。（见图1）

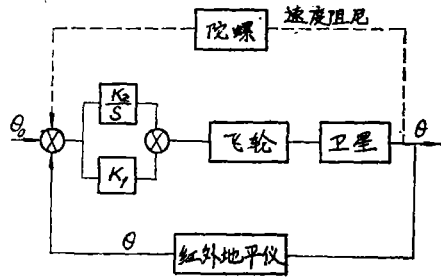


图2

与天文卫星不同，地球资源卫星的旋转控制是由红外地平仪及反作用飞轮来实现的。红外地平仪测出俯仰姿态偏差角，形成控制指令，驱动飞轮，以使它变为零。（见图2）

指向轴的定向控制是两个轴的相互耦合运动控制。这是比较复杂的情况，采用图3所表示的控制方法。（1）

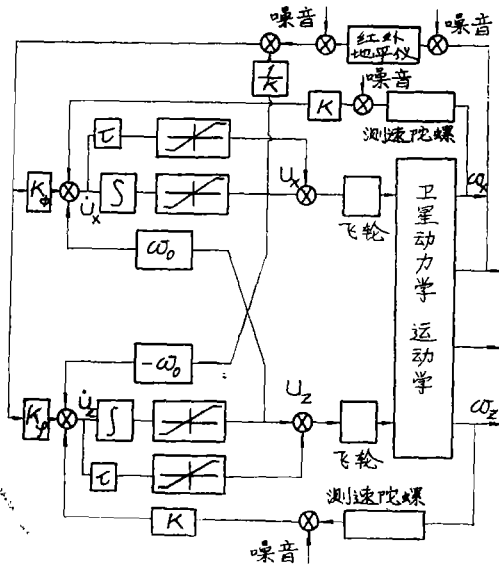


图3

在上边列举的姿控方案中，作为执行机构的部件都是反作用飞轮。反作用飞轮在正常工作时，其动量变化范围不大，在几个牛顿·米·秒以内，且允许过零，就其工作方式不同，可分为两种；

1. 力矩控制式飞轮

如果在图1中控制指令取为简单的比例环节，则可采用力矩控制式飞轮。所谓力矩控制式飞轮是指飞轮的输出反作用矩 M ，即动量微分 \dot{H} ，正比于输入控制信号 U_c ，其原理方框图见图4。

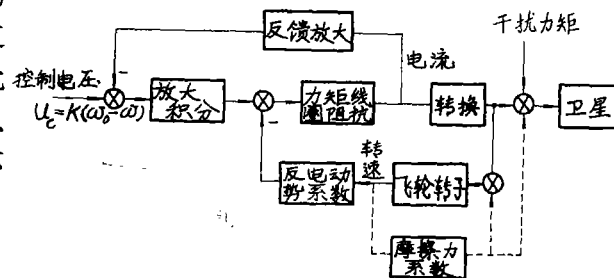


图4

力矩控制式飞轮的优点是线路结构简单，不需要有自身测速装置，但其缺点是摩擦力矩

对卫星的姿态有较大影响，在设计时必须考虑到这一点。

2. 速度控制式飞轮

所谓速度控制式飞轮是指飞轮的输出动量 H 正比于输入控制信号。尽管这类飞轮的线路比较复杂，又需要安装飞轮的测速装置，但是由于它们有较好的控制性能，原则上不受摩擦力的影响，所以在大多数卫星控制系统里，尤其在高精度控制系统，都采用这一类飞轮，其原理方框图。(见图 5)

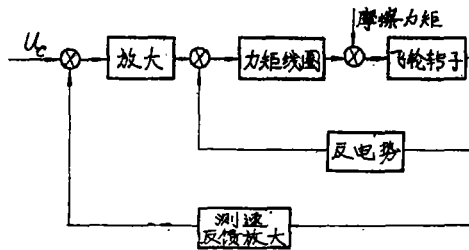


图 5

除反作用飞轮外，在地球同步卫星中还常常采用动量飞轮。动量飞轮是指飞轮有一个较大的予置动量 (20 牛顿·米·秒或更大)，而飞轮动量变化范围仅为予置动量的十分之一左右。这类飞轮的优点是通通过动量耦合，可以在别的轴上产生抗干扰作用，而自动得到控制作用。但是这类卫星的动力学就显得复杂了，有时须加阻尼器，而且在低轨道上精度是不高的。

三、陀螺及姿态测量

显然，对任何控制系统，其先决条件是取得控制信号。控制信号由姿态误差信号形成而来，而姿态误差是需要测量的。外姿态测量及陀螺都是为此目的而采用的。然而其区别在于陀螺有自主性特点，而外姿态测量仪不象陀螺那样有漂移误差。通过这两种仪器的相互取长补短，可以得到较为先进的姿态测量系统。例如近十多年发展起来的姿态估值系统，就是由陀螺，外姿态测量仪及计算机装置组成的硬——软件结合起来的。而系统软件，即估值方法，例如卡尔曼滤波器，确实起着重要作用。然而不管方法如何好，陀螺性能仍是至关重要的。例如在美国资源卫星姿态测量系统中，由于无法利用外姿态测量测出卫星的偏航角误差，利用估值方法则可以得到偏航角的估值。不过偏航角估值精度取决于滚动轴陀螺的漂移量，以及未知的外界干扰力矩。

陀螺在卫星姿态控制系统中的应用是很广泛的，大致可以分为几个方面。

1. 制导与导航
2. 姿态基准和稳定
3. 跟踪和指向
4. 数据分析

总之陀螺是一个关键元件，其性能的好坏，会极大地影响姿控系统的性能，它在卫星控制系统中的作用也是各种各样的，特别是姿态测量系统中，自从出现了根据陀螺罗盘原理敏感偏航姿态以来，对陀螺漂移的研究有较多的兴趣，其目的是为了提高测量偏航的精度。

(一) 由两只二自由度陀螺 (例如用挠性陀螺) 和两个红外地平仪组成的测量系统 (见图 6):^[2]它是用一个二自由度的水平陀螺的外框轴跟踪红外地平仪，水平陀螺的外框轴沿卫星的 Y_b 轴 (俯仰轴) 安装。转子轴在基准系 X_r ，内框轴工作在 Z_r 轴附近。外框轴跟踪俯仰轴红外地平仪的结果，保证内框轴给出俯仰姿态角零，由于俯仰红外地平仪测出的是姿态偏差角 $\hat{\phi}$ ，不是直接给水平陀螺 Y_r 轴基准信号，因此为了不断使陀螺内框轴始终在当地地

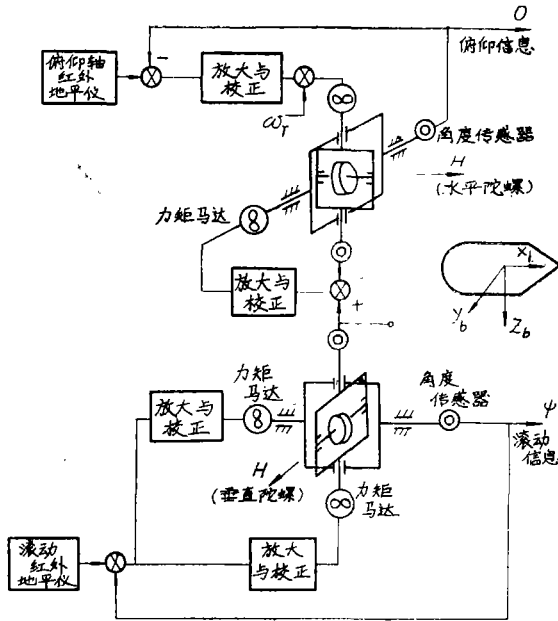


图 6

垂线 (Z 轴) 附近, 可以在内框的力矩马达中加入一个正比于轨道角速度的 ω_r 的信号, 使外框产生进动, 外框的漂移由俯仰红外跟踪回路可以克服, 对于内框轴的漂移始终存在的, 我们为了克服这点, 使内框轴跟踪陀螺罗盘所提供偏航角 ψ 。

当然亦可以采用两只单自由度液浮速率——积分陀螺组成陀螺罗盘⁽³⁾

(见图 7)

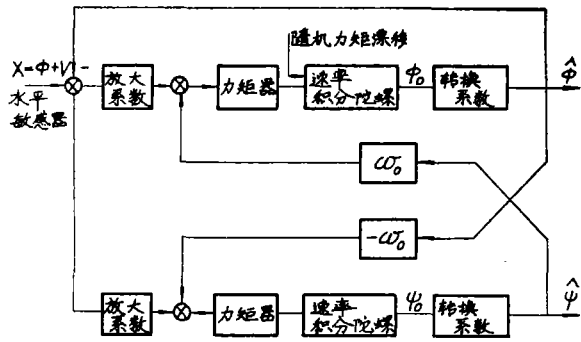


图 7 滚动——偏航滤波器用速率积分陀螺

(二) 卫星姿态捕获及保持: 在卫星入轨及和运载工具分离时, 会有残余的角速度, 而卫星姿态指向也是随机的。把卫星的这一初始随机误差姿态引渡到所需的正常姿态, 叫做姿态捕获。捕获往往分为二步进行, 先是通过陀螺测量, 启动执行机构, 消除残余角速度 (即消旋), 然后通过外姿态测量仪的测量, 校正卫星的姿态, 以便建立起正常工作姿态。在正常工作姿态的保持时, 陀螺一方面可提供所需的姿态信号, 也可提供阻尼信号, 改善系统动态品质⁽⁴⁾。(作用框图可参见图 4、图 5)。

由于计算机的发展, 出现捷联式的卫星姿态测量系统, 陀螺亦可分为平台式和捷联式的两种, 众所周知, 所谓平台式即由陀螺、常平架及其他装置组成陀螺平台用在飞行器 (卫星) 上实体重现某一参考基准, 由于常平架的隔离作用, 使陀螺不直接敏感飞行器的角运动, 因而陀螺较为容易满足系统对它的要求, 而捷联式系统中, 陀螺是直接安装在飞行器上, 直接敏感其角运动, 而其参考基准的座标变换完全由计算机来完成, 因而在可靠性、精度稳定性、加矩速率能力, 通频带方面, 系统对陀螺提出的要求是较高的。可是由于卫星在轨道中运行的力学环境被认为很好的 (零 g 状态及小量的干扰), 因而对捷联式陀螺的看法,

应有区别于用在弹上的情况，所以在卫星姿控系统中，捷联式陀螺的应用是愈来愈多。因为它省去了平台常平架，减轻了重量，因而降低了功耗，导致长寿命的可能，这是长寿命卫星所需要的主要之点。目前从文献报导，仅仅在一些载人飞船上的某些科学观察仪器，由于对惯性空间某天体有精确对准要求时，才使用了平台方案。总之多数已采用捷联式的方案。随之而来的，单自由度液浮积分陀螺或是单自由度速率陀螺，作为空间机械的应用也就十分广泛，因而亦可以看出，由滚珠轴承组成的陀螺，作为空间中的应用，不因为出现一系列动压、激光、静电陀螺，而失去其生命力，特别在卫星姿态测量系统中是十分有前途的。

参 考 文 献

1. 于绍华，姿态解调式卫星姿态控制
2. 科技大学讲义：卫星姿态控制基础（一）
3. A. E. Bryson, W. Kortum, *automatica* 1971, 7, №2 March.
4. NASA SP—8096“陀螺敏感器在空间飞行器上的应用”