

Stewart 机器人用作天线支撑的分析

华为实*

(四川轻化工学院电子工程系 自贡 643033)

【摘要】 分析了卫星通信中几种常见的天线支撑方式及钥匙孔问题,讨论了用 Stewart 机器人机构作微波天线支撑解决钥匙孔问题的方案,特别指出了将 Stewart 机构用于空间光通信的可能性。

关键词 Stewart 机器人; 卫星通信; 空间光通信; 天线支撑
中图分类号 TP242.3

微波卫星通信是当今广泛采用的一种通信方式。由于在卫星和地球站之间传送的微波信号,经长距离传输的衰减已变得很微弱,而当地球站的天线指向发生偏差时,会使天线的有效工作增益降低,偏差大时甚至造成对轨道上邻近卫星的干扰,因此必须保证地球站的天线能够稳定可靠地跟踪和瞄准卫星,使系统保持正常工作。特别当地球站是移动站的情况,如利用卫星和海洋上航行的船只进行通信,船只的摇摆和俯仰改变着天线对卫星的指向,对天线的跟踪性能提出了更高的要求。

空间光通信与微波、毫米波通信相比是一种新兴的通信技术,它利用激光束作为载体进行通信,包括同步轨道、低轨道、中轨道卫星间的光通信,卫星、飞机与地面站之间的光通信等。目前尽管微波卫星通信取得了飞速发展,但其在码速和带宽等方面已不能满足当今世界对通信日益增长的需要,因而空间光通信被认为是未来卫星通信的主要手段,是今后卫星高码率通信的最佳方案,引起了世界各国的广泛重视^[1]。在空间激光通信系统中对空间光束的捕获、跟踪、瞄准技术(ATP—Acquisition, Tracking, Pointing),是其关键技术之一,必须使光学天线能快速、精确地瞄准和跟踪空间目标。

在上述的两种通信方式中,拖动天线对空间目标实施精确跟瞄的天线支撑结构,是一个值得关注的重要问题。本文通过微波卫星通信的情况分析了常规天线支撑方式的钥匙孔(key hole)问题,讨论了 Stewart 机器人机构用作微波天线支撑的方案,特别指出了将 Stewart 机构用作空间激光通信的天线支撑的可能性。

1 常规的天线支撑方式及钥匙孔问题

在卫星通信中卫星相对于地球站的几何位置可以用方位角和仰角来表示。通信过程中天线支撑按卫星的方位角和仰角来转动天线,使天线波束中心对准通信卫星,为此有三种两自由度的支撑方式,即方位角—仰角支撑、 $X-Y$ 支撑和极轴支撑^[2],如图 1 所示。

图 1(a)为方位角—仰角支撑,这是地球站天线普遍采用的一种支撑方式。跟踪卫星时,天线支撑的垂直轴从北极起旋转一方位角,接着由水平轴旋转一仰角,使天线对准卫星。这种结构的支撑方式,在天顶具有奇异性。如果被跟踪的卫星穿过天顶及其附近区域仰角达 90° 时,支撑系统的方位角不得不旋转 180° 以避免此奇异点。在这 180° 的方位角旋转过程中,地球站可能失去和卫星的通信联系,这就是所谓的钥匙孔问题。当跟踪系统是安装在航行的船只上时,问题将变得更严重,由于船只的俯仰和摇摆,使钥匙孔的有效范围增大,在此区域的通信将变得不可靠。类似的情况在大型天线加上风力载荷时也会发生。

为了克服上述在垂直轴上方的钥匙孔的影响,可以采用图 1b 所示的 $X-Y$ 支撑。这种支撑具有与地面平行的 X 轴和与 X 轴垂直的 Y 轴,并能环绕这些轴转动。它在垂直方向上没有钥匙孔,但

却在水平的 X 轴两端各有一个, 适合跟踪在天顶附近高速运动的低高度卫星。为了克服钥匙孔问题, 可以安装两个 $X-Y$ 支撑天线, 使两天线的水平轴 X 轴相互垂直, 于是一个天线的钥匙孔就被另一天线遮盖了, 这是一个有效然而昂贵的解决办法。

图 1c 为极轴支撑, 它具有与地球自转轴平行的固定轴和与固定轴成直交的可动轴, 并能环绕这些轴转动。这种支撑方式的钥匙孔位于固定轴方向上。

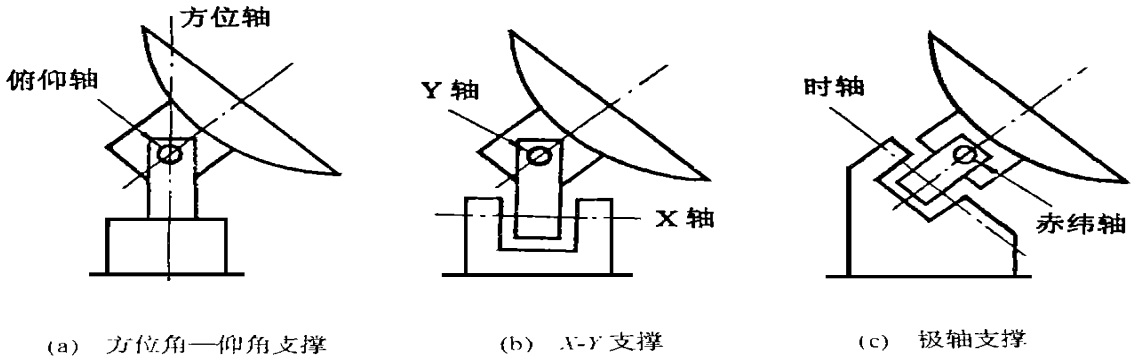


图 1 常规的天线支撑方式

在海上卫星通信系统中由于需要天线大范围转动, 如仰角从 20° 到 90° , 以便与不同纬度和经度的卫星保持联系, 普遍的作法是引入第三轴甚至第四轴来克服两轴支撑在钥匙孔附近的限制, 然而使机构的复杂性和花费都大为增加。

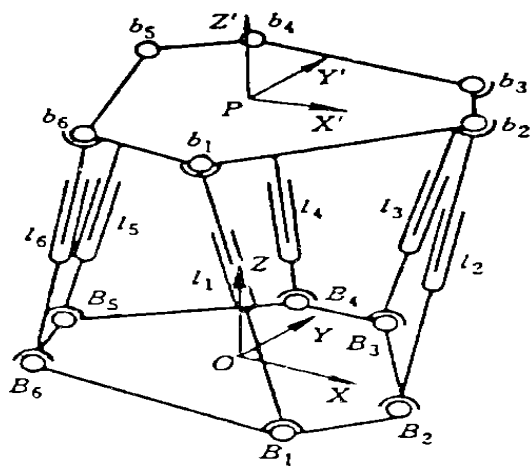
2 Stewart 机器人用作微波天线支撑

Stewart 机器人又叫 Stewart 平台, 是一个具有 6 个自由度的并联机构, 如图 2 所示。

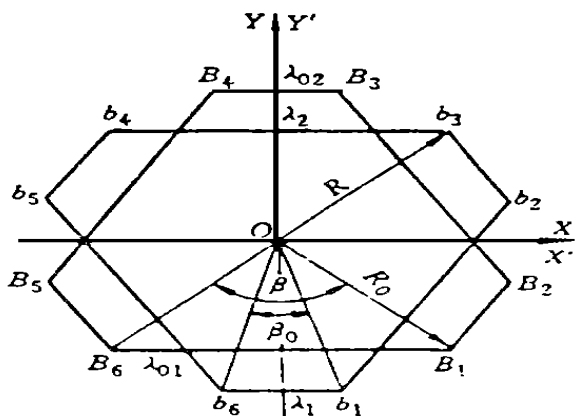
机构的上平台为输出平台, 下平台为固定的基座。上、下平台是两个六边形平板, 六边形的顶点固连着球铰或虎克铰, 然后用 6 个可伸缩的杆件将其对应地联接起来, 杆件的长度变化由杆件中部的一滑动关节在驱动器的推动下完成。由于 6 个杆件都可以独立地自由伸缩, 这样上平台可进行 6 个独立运动, 即有 6 个自由度, 在三维空间可以作任意方向的移动和绕任何方向、位置的轴线转动。这种机构在 1965 年由 Stewart 提出^[3], 原是作为飞行模拟器用于训练飞行员的。1978 年澳大利亚学者 Hunt 提出 Stewart 平台可用作并联机器人机构, 于是这方面的研究开始引起人们的注意。1980 年 Fichter 和 McDowel 指出可利用此并联机构作为天线支撑^[4]。实际上, Stewart 机器人若用作微波天线的支撑, 可以很好解决常规的天线支撑的钥匙孔问题, 特别适合海上卫星通信等场合使用。

Stewart 机器人机构的上部是一个平台, 其大小可以根据需要来设计, 因此可方便地安装微波天线, 如图 3 所示。另外, 这种机构的上平台由 6 根杆件并联支撑, 结构稳定、刚度大、承载能力强。由于这种机构自一开始就是作为飞行模拟器等大负载用途提出来的, 6 根杆件的长度变动可以通过驱动 6 个液压油缸或滚珠丝杠等来实现, 完全可以设计出能承载和拖动各种不同重量微波天线的精密的 Stewart 机器人机构。

要利用 Stewart 机器人带动天线跟踪和瞄准空间的运动目标, 必须实时控制, 这需要计算其位置反解。当给定上平台在空间的位置和姿态, 求各杆件的长度, 即求位置反解。求解时先在上、下平台的中心 P 和 O 点各确定动坐标系 $P-X'Y'Z'$ 及固定坐标系 $O-XYZ$, 如图 2 所示, 其中 Z' 轴及 Z 轴分别垂直于上、下平台。在动坐标系中的任一向量 R' 可通过坐标变换方式变到固定坐标系中的 R 。



(a) 机构简图



(b) 坐标示意图

图 2 Stewart 机器人机构

$$R = TR' + P \tag{1}$$

式中

$$T = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} \end{bmatrix}$$

$$P = \{X_p \ Y_p \ Z_p\}^T$$

式中 T 为上平台姿势的方向余弦矩阵, 其中的第 1、2、3 列分别为动坐标系的 X' 、 Y' 和 Z' 在固定坐标系中的方向余弦, P 为上平台动坐标系的原点在固定坐标系中的位置矢量。当给定机构的各个结构尺寸后, 利用几何关系, 可以容易地求得上下平台各铰链点 ($b_i, B_i, i=1, 2, \dots, 6$) 在各个坐标系中的坐标值, 由式(1)即可求得上下平台铰链点在固定坐标系 $O-XYZ$ 中坐标值。于是 6 个驱动器杆件长度矢量 $l_i (i=1, 2, \dots, 6)$ 可在固定坐标系中表示为

$$l_i = b_i - B_i \quad i=1, 2, \dots, 6 \tag{2}$$

或

$$l_i = \begin{bmatrix} d_{11}b'_{ix} + d_{12}b'_{iy} + X_p - B_{ix} \\ d_{21}b'_{ix} + d_{22}b'_{iy} + Y_p - B_{iy} \\ d_{31}b'_{ix} + d_{32}b'_{iy} + Z_p \end{bmatrix} \tag{3}$$

于是相应的杆件长度为

$$l_i = \sqrt{l'^2_{ix} + l'^2_{iy} + l'^2_{iz}} \quad i=1, 2, \dots, 6 \tag{4}$$

可见 Stewart 机构的位置反解求解容易, 这对实时控制是十分有利的。

Stewart 机器人的位置正解, 即已知 6 个杆件的长度要求上平台的位姿, 求解比较困难, 且其解不是唯一的, 通常用数值计算方法求解^[5]。

Stewart 机器人机构也有奇异性问题。当机构处于某些特定的形位时, 其 Jacobian 矩阵成为奇异阵, 行列式为零, 这时机构的速度反解不存在, 称此种形位为奇异形位。若并联机构位于奇异形位上, 其操作平台具有多余的自由度, 于是机构失去了控制, 因此在设计和应用并联机器人时须避开奇异形位。Stewart 平台在上半球范围有 8 个奇异形位, 但由于它有 6 个自由度而卫星跟踪只需 2 个

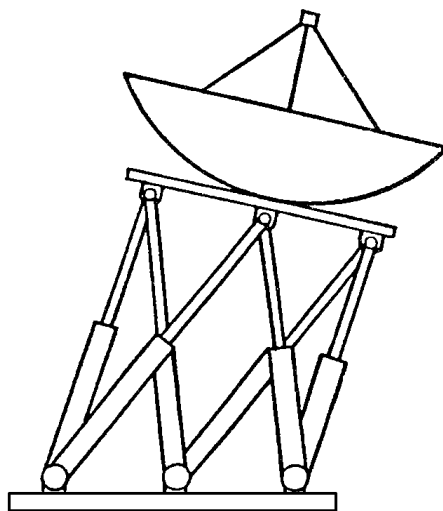


图 3 Stewart 机构用作天线支撑

自由度,因此多余的 4 个自由度可以用来避开这些奇异形位。这样,当 Stewart 机器人用作卫星通信的天线支撑时,它在上半球内是无钥匙孔的。加上这种机构具有刚度大、误差小、精度高、易控制等特点,很适于作海上卫星通信等场合的天线支撑。

3 用作空间激光通信的跟瞄机构

信息时代的飞速发展要求建立传输速率快、信息量大、覆盖空间的通信网络系统。在这种情况下,大力推动和发展空间激光通信技术势在必行。由于空间光通信是利用极窄的光束进行通信,光束辐射的束散角约为几十 μrad ,比微波通信辐射低 3 ~ 4 个数量级,而通信的目标又往往是卫星、飞机、舰船之类运动物体,其运动轨迹具有不确定性,显然 ATP 技术是空间光通信中最关键的技术。目前较成熟的系统均采用机电式的跟瞄控制,其中拖动光学天线瞄准和跟踪运动目标的机械支撑结构,和图 1 所示的微波天线的支撑结构类似。不论采用图 1 的哪一种结构,都会遇到相应的钥匙孔问题。比如地面站和舰船要与卫星和飞机等空间运动物体之间实现激光通信,则地面站和舰船上的天线支撑机构应该能对上半球范围的目标实现无钥匙孔跟瞄。如前所述,Stewart 机器人机构能很好满足这个要求,可用做光学天线的支撑,在上半球内能做到无钥匙孔跟瞄。此外,Stewart 机构上平台的尺寸可以根据需要放大或缩小,因而可将光学天线、激光器及附属电子设备全部装置于上平台上,使激光通信机结构紧凑可靠,给整机设计带来很大的方便。这种应用的关键是要设计制造出极精密的 Stewart 平台和相应的控制系统,以满足空间光通信高达微弧度量级的对准精度要求。Stewart 平台因其并联式结构具有高刚度和高精度,为达到这个要求创造了条件,是一个有希望的选择方案。然而要做到这点,无论在理论分析和设计制造方面还有一系列的工作要做。

4 结束语

Stewart 机器人机构具有刚度大、承载能力强、误差小、精度高等优点,若用作微波天线的支撑,可以避免常规的天线支撑方式的钥匙孔问题。在空间光通信系统中,也可以考虑将 Stewart 机构用作光学天线的支撑,以便实现上半球范围的无钥匙孔跟瞄,这对地面站和舰船与卫星和飞机等空间运动物体之间的光通信是十分有益的,是一种值得探讨和关注的支撑方式。另外,它也可用作空间激光武器的支撑系统。

参 考 文 献

- 1 胡 渝,刘 华. 空间激光通信技术及其发展. 电子科技大学学报, 1998, 27(5): 453 ~ 461
- 2 川桥猛. 卫星通信. 北京: 人民邮电出版社, 1984
- 3 Stewart D. A platform with six degrees of freedom. Proc IME, 1965, 180(15): 371 ~ 378
- 4 Fighter E F, McDowel J. A novel design for a robot arm. Proc Int Computer Tech Conf, New York, ASME, 1980; 250 ~ 256
- 5 黄 真,孔令富,方跃法. 并联机器人机构学理论及控制. 北京: 机械工业出版社, 1997

Analysis of Using Stewart Robot for Antenna Mounting

Hua Weishi

(Dept. of Electron. Eng., Sichuan Institute of Light Ind. & Chem. Tech. Zigong 643033)

Abstract In this paper, some current antenna mounting systems used in the satellite communication and their corresponding key holes are described. A method of using Stewart robot for antenna mounting to solve key hole Problem is discussed. The possibility of using it in space laser communication is also considered.

Key words Stewart robot; satellite communication; space laser communication; antenna mounting