

文章编号:1002-2082(2008)01-0018-05

多环架视轴稳定跟踪结构的运动学分析

李 岩, 范大鹏

(国防科学技术大学 机电工程与自动化学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 根据视轴稳定跟踪的运动学原理, 分析多环架结构的运动特点, 指出结构形式的选择依据。采用PIOGRAM图方法, 对两轴、三环两轴以及四环两轴结构分别进行讨论, 通过角度和角速度的变换关系对环架自锁、跟踪盲区等现象作了运动学阐述, 最终得出了各自适用的载体以及目标运动环境。该研究方法同样适用于其他多轴结构, 对多环架结构的几何误差分析等也具有参考价值。

关键词: 多环架; 视轴; 稳定跟踪; 运动学; PIOGRAM图

中图分类号: TP273

文献标志码: A

Kinematics analysis of multi-gimbal structure for stabilization and tracking of LOS

LI Yan, FAN Da-peng

(College of Electromechanical Engineering & Automation, National

University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: The characteristics of the multi-gimbal structures were analyzed based on the kinematics theory of LOS stabilization and tracking, and the selection principle for gimbal structures was given. Using the PIOGRAM method, a typical two-axis gimbal structure, three axes two-gimbal structure and two axes four-gimbal structure were discussed. The problems such as gimbal lock and the blind area of tracking were expatiated by the relationship of angle and rate. The requirements for different platforms and target motions were obtained and they could be used for selecting proper gimbal structure for specific application. The method is also applicable to other multi-axis structure and can be used for analyzing geometric.

Key words: multi-gimbal; line of sight; stabilization and tracking; kinematics; PIOGRAM method

引言

多环架多轴的结构形式在光电稳定跟踪结构中的应用相当广泛, 主要有两轴、三轴、三环两轴、四环两轴、四环三轴等形式, 不论是整体稳定还是元件(反射镜、棱镜等)稳定中都有采用。作为稳定跟踪理论的重要组成部分, 多环架结构的运动学分析是装置动力学及控制方法研究的基础。许多学者

也对此进行过研究, W. L. Casey 对两轴结构的各种具体形式进行了原理介绍, 并指出了它们的主要特点^[1]; 纪明等人分析了四环两轴的结构在运动学和控制方面相比两轴结构的优越性^[2-3]; 郭富强等人对四环三轴结构形式也进行过原理分析^[4-5]。然而对于稳定跟踪结构而言, 结构形式的选择必须结合光电传感器的特定功能、载体和目标的运动特点

收稿日期:2007-01-09; 修回日期:2007-03-02

基金项目:“十·五”国防预研项目(18YXGFKD118)

作者简介:李岩(1978—),女,吉林人,博士研究生,主要从事精密稳定跟踪平台先进设计和控制理论的研究。

E-mail:yanli_78@sina.com.cn

综合考虑^[6],而上述研究对此并未作全面分析。本文试图从视轴(LOS, Line of sight)稳定跟踪的运动学角度,阐述各种结构形式的不同特点,并选取应用广泛的结构形式为主要研究对象,得出结构选择的依据。

1 两轴稳定跟踪结构的运动学分析

两轴结构是视轴稳定跟踪装置中最为普遍的结构形式,故首先对此进行分析,并以方位-俯仰式(由外及内,以下同)结构为具体实例,通过光电传感器视轴传递载体的干扰角运动,分析角度和角速度的具体关系,进而揭示两轴结构形式的特点。为了对结构的运动特点作清晰的阐述,需建立如下运动关系的坐标系。

1.1 坐标系的建立

建立惯性系(系*{i}*)、载体系(系*{b}*)、方位轴系(系*{a}*)、俯仰轴系(系*{f}*)和指向系(系*{p}*),令坐标原点都位于俯仰轴与视轴的交点处(点*o*),如图1所示(为清晰起见,坐标系分开表示)。其中令系*{b}*的轴*ox_b*,*oy_b*正向分别沿着载体的纵轴向前和横轴向左,*oz_b*与之成右手法则,用此系的运动代表载体在惯性空间中的干扰运动;系*{i}*与系*{b}*的初始方位相同,并相对惯性空间固定;系*{a}*中

*oz_a*方向与轴*oz_b*相同,相对系*{b}*的方位回转角度为 θ_a ;系*{f}*中*oy_f*方向与轴*oy_a*相同,相对系*{a}*的俯仰回转角度为 θ_f 。指向系*{p}*中*ox_p*沿视轴方向,其他2个轴向则定义为直接承载传感器的轴向及与此两轴成右手关系的轴向。

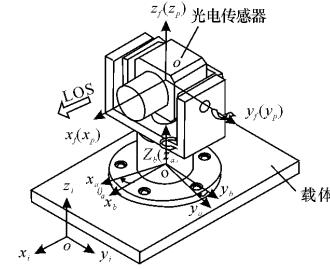


图1 两轴稳定跟踪机构坐标系设置

Fig. 1 Coordinate setup of two-axis stabilization/tracking mechanism

1.2 角度关系

通过多轴机构回转运动补偿载体扰动造成的视轴在惯性空间的偏转,并在此基础上对目标或指令信号进行跟踪,这就是稳定跟踪机构的基本工作原理。稳定跟踪的控制框图如图2所示。速率陀螺敏感负载(包括光电传感器在内)相对惯性空间的角速率形成稳定环路(称速率环),并与跟踪器等

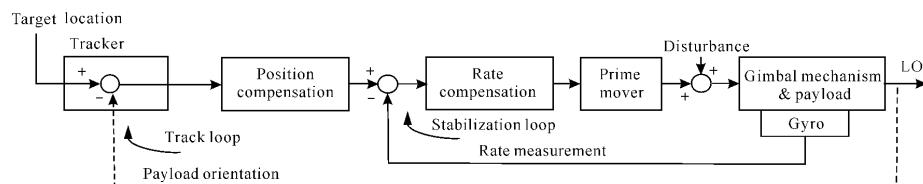


图2 直接式视轴稳定跟踪控制示意图

Fig. 2 Functional block diagram of direct LOS stabilization/tracking

构成跟踪环路(称位置环)。

相对机构的运动特征而言,载体相对惯性系发生的任一角运动,均可采用绕各轴按次序的角运动描述。故视轴相对惯性系的稳定性可通过垂直于视轴的2个轴向执行回转运动,并依次补偿干扰运动来获得。在理想情况下,指向系和惯性系的方向应该是完全一致的。采用PIOGRAM图可表示此运动学关系,如图3所示。图3即为方位-俯仰式结构的稳定机理。载体的任意旋转运动,均可通过系*{b}*

相对系*{i}*依次绕*x_i*,*y_i*和*z_i*轴的旋转变换描述,角度分别采用 ρ , ϵ 和 η 表示。其中*y_i*和*z_i*分别代

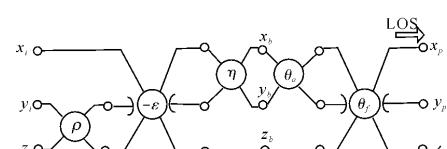


图3 实现视轴稳定的PIOGRAM图

Fig. 3 PIOGRAM method of LOS stabilization

表旋转后的坐标系轴向,只要使 $\theta_a = -\eta$ 和 $\theta_f = -\epsilon$ 就能保证视轴的惯性稳定,如图 4(b)所示。

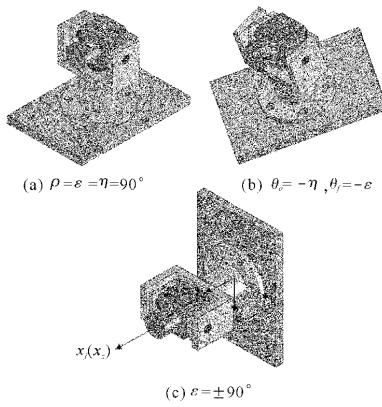


图 4 视轴稳定机构的运动示意图

Fig. 4 Kinematics of LOS stabilization mech

但是当 $\epsilon = \pm 90^\circ$ 时,会造成 $\theta_f = \mp 90^\circ$,如图 4(c)所示,此时方位轴的执行方向(oz_a)同视轴方向(ox_p)重合。此时若载体有沿 ox_b 轴向的干扰运动,则视轴会失去惯性稳定。因为此时视轴稳定机构已失去了保持视轴稳定的一个运动自由度,对目标进行跟踪时,目标过顶造成俯仰角度过大也会发生这种现象,如图 5 所示。图中的 PIOGRAM 图在 $\theta_f = 90^\circ$ 时, $oz_a = ox_p$,这种现象即是通常所说的“自锁”现象。

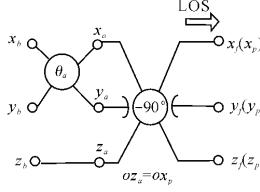


图 5 两轴稳定机构的角度关系

Fig. 5 Angle relationship of two-axis stabilization mechanism

1.3 角速度关系

正如前述,视轴稳定跟踪结构通常是利用陀螺敏感光电装置的惯性角速度反馈形成速率环路,从而对视轴进行稳定的。因此,必须研究载体及其结构对视轴的惯性角速度所造成的影响,并以此为基础分析视轴结构特点,如图 6 所示。同样可利用 PIOGRAM 图分析光电装置的角速度,即

$$\omega_{ifx} = -\dot{\theta}_a \sin \theta_f + \omega_{ibx} \cos \theta_f \cos \theta_a + \omega_{iby} \cos \theta_f \sin \theta_a - \omega_{ibz} \sin \theta_f \quad (1)$$

$$\omega_{ify} = \dot{\theta}_f - \omega_{ibx} \sin \theta_a + \omega_{iby} \cos \theta_a \quad (2)$$

$$\omega_{ifz} = \dot{\theta}_a \cos \theta_f + \omega_{ibx} \sin \theta_f \cos \theta_a + \omega_{iby} \sin \theta_f \sin \theta_a + \omega_{ibz} \cos \theta_f \quad (3)$$

式中: ω_{ifx} 、 ω_{ify} 和 ω_{ifz} 分别表示系 $\{f\}$ 相对系 $\{i\}$ 的 3 个轴向的角速度分量; $\dot{\theta}_a$ 和 $\dot{\theta}_f$ 则分别代表方位和俯仰电机的输出角速度; ω_{ibx} 、 ω_{iby} 和 ω_{ibz} 表示系 $\{b\}$ (即载体)在惯性系中的角速度分量。

当稳定机构工作在视轴稳定状态时,在控制系统产生的 θ_a 和 θ_f 作用下, ω_{ify} 和 ω_{ifz} 趋于零。由(2)式和(3)式可明显看出, θ_f 和 $\theta_a \cos \theta_f$ 可直接平衡干扰角速度。稳定机构工作于跟踪状态时,目标的运动决定了视轴必须具备的速度,即 ω_{ify} 和 ω_{ifz} ; 若载体无干扰运动,即 $\omega_{ibx} = \omega_{iby} = \omega_{ibz} = 0$ 时,则 $\omega_{ify} = \theta_f$, $\omega_{ifz} = \theta_a \cos \theta_f$ 。这说明对于方位电机而言,输出角速度 θ_a 必须耦合 $\cos \theta_f$ 才能用于平衡载体的干扰运动,或跟踪目标或执行指令。

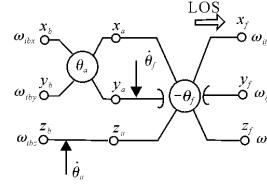


图 6 两轴稳定机构的角速度传递关系

Fig. 6 Rate relationship of two-axis stabilization mechanism

当 $\theta_f = \pm 90^\circ$ 时,即使 $\dot{\theta}_a$ 无限大,稳定机构提供给视轴的角速度分量同样趋于零,对于跟踪目标而言,这就是所谓的“天顶盲区”,即对此空域附近的目标不能够及时跟踪。在稳定机构对视轴进行稳定时,也会因此发生视轴失稳现象。具体来说,若 $\theta_f = \pm 90^\circ$,考虑 $\omega_{ifz} = -\omega_{ibx} \cos \theta_a - \omega_{iby} \sin \theta_a$,当 ω_{ibx} 和 $\omega_{iby} \neq 0$ 时, $\dot{\theta}_a$ 无论如何也弥补不了载体运动的影响。因此发生的“自锁”或“天顶盲区”问题均是视轴的运动缺少一个自由度的情况下形成的。所以多环架结构的运动学设计首先就是要避免这种现象,同时结合载体、目标的运动特点选择合理的结构形式。

2 三环两轴结构的运动学分析

三环两轴的结构分为方位-俯仰-方位和俯仰-方位-俯仰 2 种,下文以前者为例分析这种结构形式的运动特点。

如图 7 所示,建立各坐标系: 惯性系(系 $\{i\}$)、载体系(系 $\{b\}$)、外方位轴系(系 $\{A\}$)、俯仰轴系(系 $\{f\}$)、内方位轴系(系 $\{a\}$)和指向系(系 $\{p\}$),系 $\{i\}$ 至系 $\{f\}$ 的建立方法同上,系 $\{a\}$ 的轴向 oz_a 同

内方位轴,此时系 $\{p\}$ 与系 $\{a\}$ 重合。在这种结构下,通常直接将俯仰和内方位轴系作为对视轴进行稳定和跟踪控制的执行轴,而外方位随动于内方位轴系,也就是俯仰和内方位轴系组成了俯仰-方位式两轴结构。正如上述对两轴结构“自锁”问题的分析,该结构考虑了是否有特定情况下的载体运动,即使此两轴结构失去对视轴稳定的某一个自由度的问题。

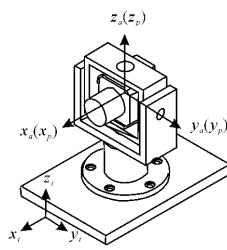


图7 三环两轴结构坐标系示意图

Fig. 7 Coordinate setup of three-gimbal mechanism with two axes

由于载体直接连接的是方位轴系,因此载体若进行大幅度的俯仰运动,那么在 $\theta_f = \pm 90^\circ$ 时完全失去方位方向的自由度,此时载体相当于俯仰轴系。若载体相对于系 $\{i\}$ 进行方位运动,则在 $\theta_a = \pm 90^\circ$ 时也会失去俯仰方向的自由度。这种结构的运动过程如图8(b)和8(c)所示,采用PIogram图表

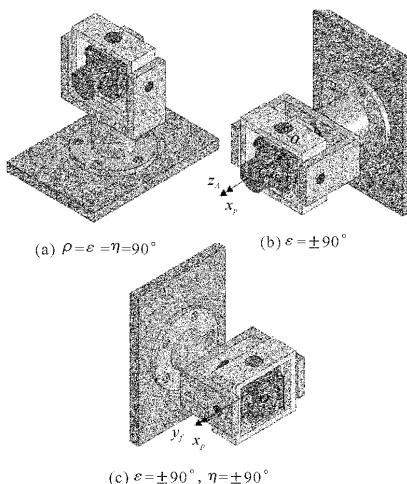


图8 三环两轴稳定跟踪机构自锁现象示意图

Fig. 8 Lock problem of three-gimbal stabilization/tracking mechanism with two axes

示的结果如图9所示。

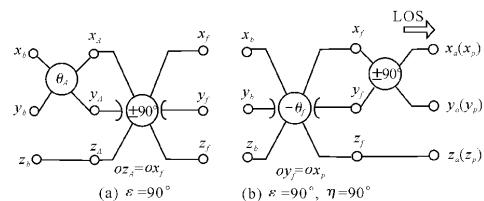


图9 三环两轴稳定跟踪结构的PIogram图

Fig. 9 PIogram method of three-gimbal stabilization/tracking mechanism with two axes

3 四环两轴结构的运动学分析

同理,以方位-俯仰-方位-俯仰式结构为例,我们分析四环两轴结构形式的运动特点。载体依次进行相对惯性系的俯仰、方位大幅度运动,如图10所示。此时载体直接相连的外方位和外俯仰轴系虽然失去了运动的自由度,但对于视轴而言,仍存在与其垂直的2个执行轴向,因此不会发生视轴的失稳现象。

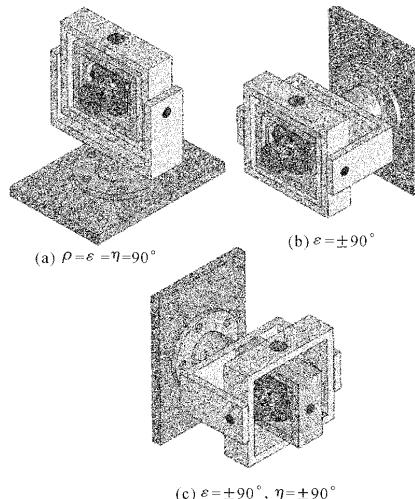


图10 四环两轴稳定跟踪机构运动示意图

Fig. 10 Kinematics of LOS stabilization/tracking mechanism with two axes

总结上述几种多环架视轴稳定跟踪结构,适合载体和目标的运动环境如表1所示。但表1中所列项均不考虑结构空间限制等情况下得到的结果,如图8(c)和图10(c)所示。实际应用中对此必须有所考虑。

表1 多环架视轴稳定跟踪结构形式运动环境

Table 1 Kinetic environment of multi-gimbal LOS stabilization/tracking

环境	两轴结构		三环两轴结构		四环两轴结构	
	方位-俯仰式	俯仰-方位式	方位-俯仰-方位式	俯仰-方位-俯仰式	方位-俯仰-方位-俯仰式	
载 体	方位运动	无限制 $<\pm 90^\circ$, 等于 $\pm 90^\circ$ 时“自锁”	$<\pm 90^\circ$, 等于 $\pm 90^\circ$ 时“自锁”	不能出现先俯仰 $\pm 90^\circ$ 90°后 方位再 $\pm 90^\circ$	不能出现先方位 $\pm 90^\circ$ 90°后 俯仰再 $\pm 90^\circ$	无限制
	俯仰运动	$<\pm 90^\circ$, 等于 $\pm 90^\circ$ 时“自锁”	无限制	的情况, 否则“自锁”	的情况, 否则“自锁”	
目 标	方位运动	无限制 $<\pm 90^\circ$, 等于 $\pm 90^\circ$ 时为“盲区”	$<\pm 90^\circ$, 等于 $\pm 90^\circ$ 时为“盲区”	无限制	无限制	无限制
	俯仰运动	$<\pm 90^\circ$, 等于 $\pm 90^\circ$ 时为“盲区”	无限制			

4 结论

多环架结构在视轴稳定跟踪结构中具有广泛的应用, 对此进行运动学分析是多环架结构形式选择的重要依据。本文针对多环架结构形式, 考虑载体环境和跟踪目标的要求, 分析了两轴、三环两轴以及四环两轴结构的运动特点, 并对多环架结构特有的环架自锁、跟踪盲区等问题进行了讨论。对用于图像稳定跟踪等领域的三轴结构, 同样可以依此讨论适用多环架结构的运动环境和要求。

参考文献:

- [1] CASEY W L, PHINNEY D D. Representative pointed optics and associated gimbal characteristics[J]. SPIE, 1988, 887: 116-123.
- [2] 纪明. 二种光电稳定器的比较及分析[J]. 火力与指挥控制, 1993, 19(3): 60-65.
- JI Ming. Comparison and analysis of two optoelectronic stabilizers [J]. Fire Control & Command Control, 1993, 19(3): 60-65. (in Chinese)
- [3] 成刚. 光电稳定跟踪的机械结构分析与研究[D]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2000.

安: 西安电子科技大学出版社, 2000.

CHENG Gang. Analysis and research on mechanical structure for electro-optical stabilizing and tracking [D]. Xi'an: Xi'an University of Electronic Science and Technology Press, 2000. (in Chinese)

- [4] 郭富强, 于波, 汪叔华. 陀螺稳定装置及其应用[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 1995.

GUO Fu-qiang, YU Bo, WANG Shu-hua. Gyro stabilization equipment and its application [M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University of China Press, 1995. (in Chinese)

- [5] 金毅民, 陶忠, 孙治家. 轴系运动的数学仿真与轴系误差[J]. 应用光学, 2002, 23(增刊): 37-46.

JIN Yi-min, TAO Zhong, SUN Zhi-jia. Mathematical simulation and shafting errors of shafting movement[J]. Journal of Applied Optics, 2002, 23 (Sup.): 37-46. (in Chinese)

- [6] ROYALTY J. Development of kinematics for gimballed mirror systems[J]. SPIE, 1990, 1304: 262-274.