

交叉滚柱直线导轨装配技术研究

吕 宠 吴 杰

(北京空间机电研究所, 北京 100094)



摘要: 研究了交叉滚柱导轨的结构特点, 分析了其在光学遥感器调焦机构中应用存在的问题。针对 VR 型交叉滚柱导轨进行了滑动特性试验研究, 分析了不同侧向预紧力对滑动阻力、运动精度和导轨固体润滑涂层的影响, 为导轨装配过程中侧向预紧力的确定提供了依据。并总结了交叉滚柱导轨的装配工艺技术措施。

关键词: 交叉滚柱导轨; 装配; 工艺技术

Research on Assembly Technology of Cross Roller Linear Guide

Lv Chong Wu Jie

(Beijing Institute of Space Mechanics Electricity, Beijing 100094)

Abstract: This paper studies the structural characteristics of cross roller guide, and analyzes the problem in the application of focusing mechanism of optical remote sensor. According to the VR type cross roller guide, the experimental study of sliding characteristics is carried out. The influences of different lateral pretightening force on the sliding resistance, motion precision and the solid lubricant coating of the guide rail are analyzed. It provides the basis for the determination of the lateral pretightening force in the assembly process of the guide rail, and the assembly technology and measures of cross roller guide are summarized.

Key words: cross roller guide; assembly; technology

1 引言

交叉滚柱直线导轨是一种典型滚动支承, 其刚性好、精度高、结构简单紧凑、承载力大, 目前被广泛应用在各种办公设备、精密测量设备和光学工作台的滑动机构中^[1]。由于具有众多优点, 交叉滚柱导轨在航天光学遥感器的调焦机构中获得了应用。但是, 与在地面设备中应用相比, 空间应用环境更加严苛, 需要承受较大的冲击载荷, 并且运动精度要求更高, 这给交叉滚柱导轨在调焦机构中的应用带来了一定的挑战, 对新型调焦机构的结构设计和装配工艺技术都提出了更高的要求。尤其是交叉滚柱导轨的装配, 按照传统的地面设备中的装配方法, 已经不能满足航天使用要求。所以需要分析交叉滚柱导轨的结构特点和安装方式, 结合其在空间相机调焦机构中应用存在的

问题, 对交叉滚柱导轨进行滑动特性试验研究和装配试验研究, 致力于精确控制交叉滚柱导轨的装配过程, 细化、量化装配方法, 满足空间相机调焦机构的性能要求。

2 交叉滚柱导轨的结构特点

交叉滚柱直线导轨的结构形式如图 1 所示, 主要由轨道、滚柱、滚柱保持器、挡板组成, 精密滚柱相互直交地组合在一起, 借助保持器等距分布在 90°V 形沟槽内, 通过将 2 列交叉滚柱导轨平行的装配, 使导轨系统能够承受 4 个方向的负荷。使用时, 向交叉滚柱导轨侧向施加预压, 可以使导轨获得无间隙且高刚性、动作轻快的直线滑动。

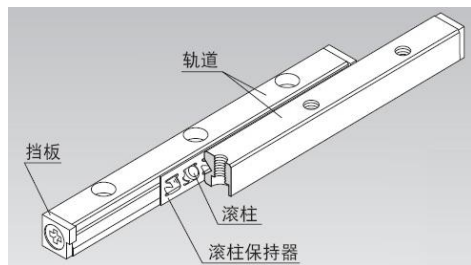


图1 交叉滚柱直线导轨

交叉滚柱直线导轨的侧向预紧方式主要有三种,如图2所示。图2a为侧向螺钉直接推压导轨提供预紧力,侧向螺钉规格和数量根据导轨型号和长度决定,螺钉均布在导轨长度方向上,钉头直接作用在导轨表面,提供多点压力。这种侧向预紧方式会受到各

螺钉预紧力不一致的影响,导致导轨长度方向上各处受力不均,影响运动精度,因此该预紧方式适用于对结构刚度、运动精度要求不高的场合。图2b为侧向螺钉与压板推压导轨提供预紧力,与图2a相比,其钉头不直接与导轨表面接触,而是作用于压板,将多点压力转化为压板的面压力,从而有效消除了由于各螺钉预紧力不一致导致的导轨受力不均的现象,该预紧方式适用于对结构刚度、运动精度有较高要求的场合。图2c为组合楔块推压导轨提供预紧力,该方法通过调节楔块1、2的相对位置消除导轨游隙,调节方法简便,预紧力施加均匀,同样适用于对结构刚度、运动精度有较高要求的场合,但如果承受较大的振动和冲击载荷,组合楔块需要增加必要的防松措施。

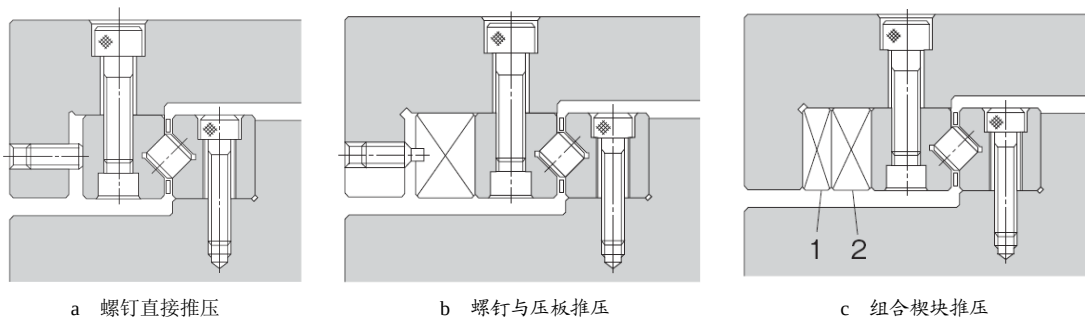


图2 交叉滚柱导轨的侧向预紧方式

3 应用于调焦机构存在的问题

调焦机构是航天光学遥感相机中的重要部件。遥感相机送入太空前,在地面模拟环境中会进行焦面装定工作(定焦),进入空间环境后,由于模拟环境与空间实际环境的差异,常出现“离焦”,导致图像质量退化,需要在轨精确调焦,以获得最佳焦面位置,保证图像质量。由调焦机构执行在轨调焦的动作,其调焦精度直接影响最终的图像质量。

近年来,随着遥感相机的不断发展,出现了新型的导轨式调焦机构。这种新型调焦机构用交叉滚柱直线导轨取代了传统的滑动轴、直线轴承,成为保证机构运动精度的导向部件。使用交叉滚柱直线导轨的调焦机构结构更加紧凑,有利于机构的小型化、轻量化。滑动部件不需要自主研发生产,从而缩短了产品研制周期。但空间相机需要承受较大的振动和冲击载荷,需要较高的导轨运动精度满足调焦精度要求,所以交叉滚柱导轨的装配技术直接决定着调焦机构的性能。

交叉滚柱导轨的装配性能由导轨安装面的形位

精度、导轨的润滑情况、导轨的侧向预紧方式和预紧力决定。其中,导轨安装面的形位精度可以通过精密机械加工保证,空间环境中应用的导轨通常采用固体润滑,在装配前导轨已进行过处理,所以在交叉滚柱导轨的装配过程中,侧向预紧方式和预紧力的大小对导轨在调焦机构中的使用性能有较大影响,相比于地面设备更加敏感。

侧向预紧力过小会导致:导轨直线运动精度降低,出现垂直于运动方向的窜动;导轨接触刚度下降,无法承受较大冲击载荷。导轨侧向预紧力过大会导致:导轨V型沟槽表面的润滑膜层破坏,润滑效果下降,有真空冷焊的风险;导轨滑动阻力增大,产生附加载荷;导轨V型沟槽和滚柱受挤压变形,可能造成运动精度降低。

因此,根据调焦机构具体结构特点和不同型号的交叉滚柱导轨,选择合适的侧向预紧方式,确定合理的预紧力大小,成为交叉滚柱导轨装配过程中的关键环节。

4 滑动特性试验研究

本文研究的交叉滚柱直线导轨的滑动特性主要指在不同侧向预紧力的情况下,交叉滚柱导轨的滑动阻力大小和直线运动精度。用驱动导轨运动的牵引力来表征其滑动阻力,用导轨运动过程中垂直于运动方向的窜动来表征其直线运动误差。分别进行试验研究,定量分析了不同类型交叉滚柱导轨的滑动特性。试验原理如图3所示,根据交叉滚柱导轨三种侧向预紧方式的特点和应用场合,在调焦机构中优先选用螺钉与压板推压的方式提供侧向预紧力,预紧力 F 的定量控制由侧向螺钉拧紧力矩 T 决定,螺钉拧紧力矩如下所示^[2]:

$$T = T_1 + T_2 = Ftg(\varphi + \rho_v) \frac{d_2}{2} + Ff_c \frac{d_2}{3}$$

得到单个螺钉预紧力为:

$$F = \frac{6T}{d_2(3tg(\varphi + \rho_v) + 2f_c)} \quad (1)$$

其中: T_1 ——螺纹副的螺纹阻力矩, N mm;
 T_2 ——螺钉头与压板间的端面摩擦力矩, N mm;
 T ——螺钉拧紧力矩, N mm; F ——螺钉提供的预紧力, N; φ ——螺纹升角, $\varphi = \arctg(p/\pi d_2)$; ρ_v ——螺纹当量摩擦角, $\rho_v = \arctgf_v$; f_v ——螺纹当量摩擦系数; d_2 ——螺纹中径, mm; f_c ——螺钉头与压板间的端面摩擦系数; 由于结构件和所用螺钉均为钢制,查表得螺纹当量摩擦系数 $f_v \approx 0.13$, 螺钉头与压板间为干燥的机加工表面,查表得 $f_c \approx 0.15$ 。

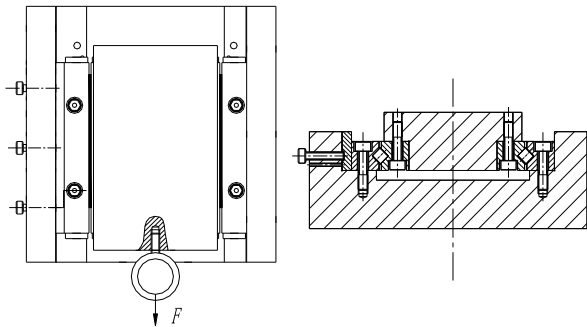


图3 滑动阻力试验原理图

4.1 侧向预紧力对滑动阻力的影响

不同型号导轨、不同侧向预紧力与滑动阻力的关系曲线如图4所示。导轨均采用THK公司生产的VR型交叉滚柱导轨,型号分别为VR6-100×7Z、VR4-120×11Z、VR2-105×18Z,其中VRx表示导轨公

称尺寸, x 越大, 导轨尺寸越大, 这三类导轨已经分别在相关型号产品中获得应用。

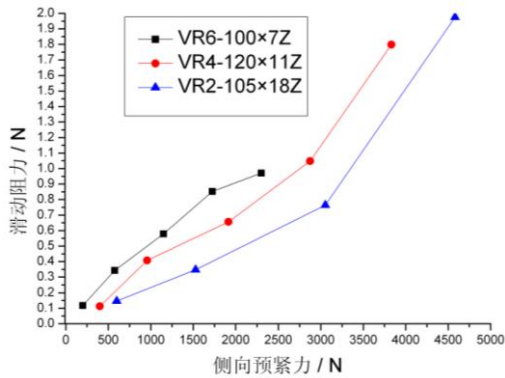


图4 导轨侧向预紧力与滑动阻力的关系曲线

试验结果表明, 导轨侧向预紧力越大, 其滑动阻力越大, 并且随着侧向预紧力的增大, 其滑动阻力增大幅度明显增加。对于不同型号的导轨, 在侧向预紧力相同的条件下, 其滑动阻力不同, 导轨公称尺寸越大, 其滑动阻力越大。

4.2 侧向预紧力对运动精度的影响

导轨的运动精度是调焦机构最重要的性能指标, 也是用于检验导轨是否装配合格的关键评判标准。下面给出了不同型号导轨, 不同侧向预紧力与运动精度的关系曲线, 如图5所示, 运动行程为7mm。导轨的运动精度通过经纬仪进行测量, 即在试验设备的活动座上粘贴靶标, 在导轨运动过程中, 使用经纬仪跟踪靶标, 记录过程中靶标的偏转数据, 由水平偏转角和竖直偏转角组成, 取两者最大值作为导轨直线运动误差。

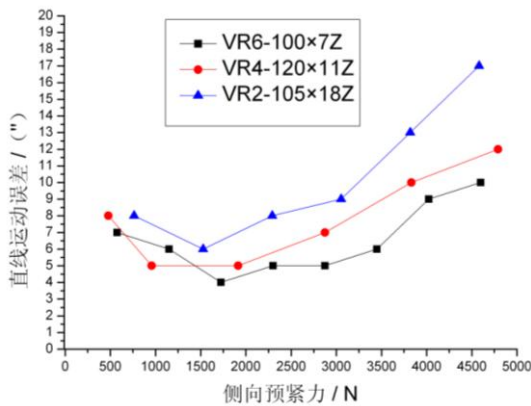


图5 导轨侧向预紧力与直线运动误差的关系曲线

试验结果表明, 不同型号导轨有相似之处, 即侧向预紧力过小或过大, 都会造成交叉滚柱导轨运动精

度的下降。导轨运动误差最小时对应的侧向预紧力，称为最佳侧向预紧力。

不同型号导轨的最佳侧向预紧力有所不同，其运动精度对侧向预紧力的敏感程度也不同，导轨尺寸越大，其运动精度变化受侧向预紧力的影响越小。

4.3 侧向预紧力对导轨固体润滑涂层磨损的影响

在空间相机调焦机构中应用的交叉滚柱直线导轨需要进行润滑设计，主要作用是减小摩擦力，保证调焦精度，防止在真空环境下接触面之间的冷焊，保证活动部件正常工作。考虑到润滑油在高真空环境下挥发会污染光学表面，自润滑需要更换活动部件材料等因素，其润滑方式多采用固体润滑，即在导轨V型沟槽表面镀覆一层具有润滑作用的固体膜，材料多为二硫化钼，从而在滚柱滚动过程中起到润滑作用。

但是，交叉滚柱导轨的固体润滑涂层厚度一般只有0.001mm，该涂层可承受的正压力不大于800MPa，所以在装配过程中，侧向预紧力的大小直接影响着导轨在运动中固体润滑涂层的磨损情况。

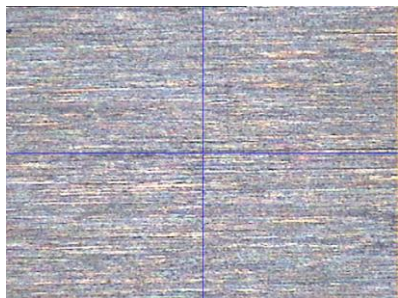


图6 磨损前导轨固体润滑涂层照片(×120)

该试验采用THK公司的VR4-120×11Z型导轨作为试验对象，预先进行了固体润滑涂层的镀覆，其120倍显微照片如图6所示。然后分别施加不同的侧向预紧力，相同的往复运动次数(>50次)，得到导轨固体润滑涂层磨损情况照片，如图7所示。从图中可以看出，侧向预紧力越大，滑动过程中，导轨固体润滑涂层磨损越严重。所以从保护固体润滑涂层方面考虑，导轨侧向预紧力应该尽可能小。

综合上述导轨滑动特性试验结果可知，导轨侧向预紧力的确定是一个复杂的过程，主要受滑动阻力、导轨运动精度和固体润滑涂层耐磨性三方面因素制

约。所以，交叉滚柱导轨装配过程中应该综合考虑这三方面因素，以控制运动精度和保护固体润滑涂层为主，兼顾滑动阻力的原则，确定侧向预紧力。

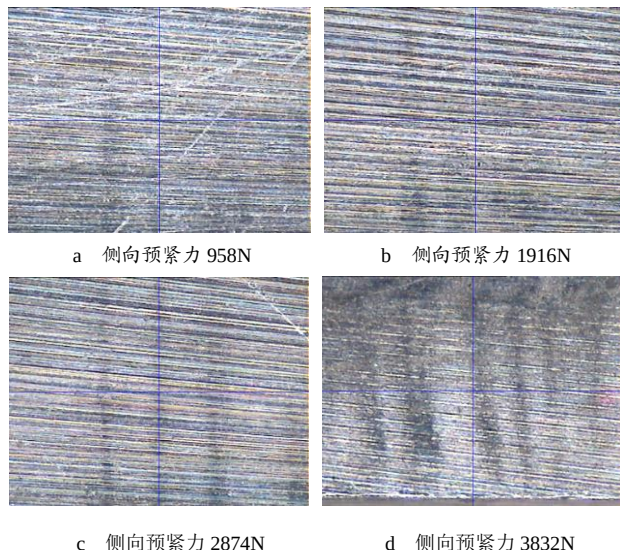


图7 导轨固体润滑涂层磨损情况照片(×120)

5 结束语

通过分析交叉滚柱导轨的结构特点和安装方式，结合其在空间相机调焦机构中应用存在的问题，对交叉滚柱导轨进行了滑动特性试验研究。

a. 交叉滚柱导轨侧向预紧力对滑动阻力、运动精度有较大影响，保证运动精度是确定侧向预紧力的主要因素。

b. 对于采用固体润滑的导轨，在装配过程中，应控制侧向预紧力，避免固体润滑涂层被压溃。

c. 交叉滚柱导轨的侧向预紧方式尽量避免选用螺钉直接推压导轨的方式。

参考文献

- 1 尹承秀. 两种长径比的交叉滚子滚动导轨支承的结构特点[J]. 哈尔滨轴承, 2007(3): 4~5
- 2 张振华. 螺栓拧紧力矩的确定方法及相关探讨[J]. 化学工程与装备, 2009(8): 105~107
- 3 马文坡. 航天光学遥感技术[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2011