

# 载人航天器操作器系统述评

朱仁璋<sup>1</sup> 王鸿芳<sup>2</sup> 泉浩芳<sup>1</sup> 王晓光<sup>1</sup>

(1 北京航空航天大学 2 中国空间技术研究院)

**摘 要** 地球轨道载人航天器的操作器系统用于支持微重力环境舱外活动运作,对空间站的组建与维护以及空间科学实验具有重要的作用。研究美国航天飞机与国际空间站及俄罗斯和平号空间站上所有的操作器系统,即美国航天飞机遥控操作器系统;国际空间站上的空间站移动服务系统、日本实验舱遥控操作器系统、欧洲自动臂、轨道更换单元搬运装置、以及改进型火箭号吊机;和平号空间站上的火箭号吊机与舱段再对接操作器系统。其中,轨道更换单元搬运装置与火箭号吊机由航天员直接手动操作,而其它操作器系统都是自动运作。每个操作器系统都有确定的应用目的,合理的设计使它们成功地执行各自所赋予的使命。

**关键词** 操作器 机械臂 航天飞机 国际空间站 和平号空间站

**分类号** V526 **文献标识码** A **文章编号** 1674-5825 (2009) 04-0011-15

## 1 前言

地球轨道载人航天器的操作器系统是舱外活动(EVA)航天员的有力助手,在大型载人空间基地(空间站)的组建、维护,以及各种运作活动中具有重要的作用。空间操作器臂是空间操作器系统必不可少的运动部件。地球轨道载人航天器上的操作器系统一般仅适用于微重力环境,按操作器臂的运作方式可分为两类:1)遥控操作器系统,这类操作器臂按控制计算机发出的指令或人员(包括乘员与地面控制人员)手动控制(应用手控器或计算机键盘)指令进行运作,因此,遥控操作器臂也称为自动臂;2)手动操作器系统,操作器臂由 EVA 航天员手动操作(航天员直接操作手动曲柄),这类“手动”臂通常称为吊机。<sup>[1-5]</sup>

遥控操作器系统包括美国航天飞机遥控操作器系统(SRMS),以及国际空间站(ISS)上的 3 套自动操作器系统(图 1):1)加拿大空间局(CSA)与美国航空与空间署(NASA)联合研制的空间站移动服务系统(SSMSS);2)日本空间开发局(JAXA)研制的日本实验舱遥控操作器系统(EMRMS);3)欧洲空间局

(ESA)与俄罗斯空间局(RSA)合作研制的欧洲自动臂(ERA)。

手动操作器系统包括下列 2 种吊机:1)俄罗斯和平号空间站上应用的火箭号吊机以及在国际空间站俄罗斯舱段上应用的改进型火箭号吊机;2)在国际空间站美国舱段上应用的轨道更换单元搬运装置(OTD)。

上述 6 种系统是通用操作器系统,可以抓取,转移,释放多种有效载荷(仪器设备,轨道更换单元等),也可以转移 EVA 航天员,并用作为 EVA 航天员的工作平台。此外,还有一种专用操作器系统,这就是在俄罗斯和平号空间站上应用的舱段再对接操作器系统,这也是自动操作器系统,其操作器臂名为 Lyappa。再对接操作器系统仅用于和平号空间站舱段的移位,这些需要移位的再对接舱段包括“晶体”号舱,“量子 2”号舱,“光谱”号舱,以及“自然”号舱。在这些舱段上都安装了小型自动臂 Lyappa。

本文阐述地球轨道载人航天器操作器系统(参见表 1 与表 2)的设计目的、性能、构造与组成、及操作控制方式,并分析操作器系统的设计与运作原则。

来稿日期:2009-10-15

作者简介:朱仁璋(1941.11-),男,博士,教授,从事航天技术与教学工作。

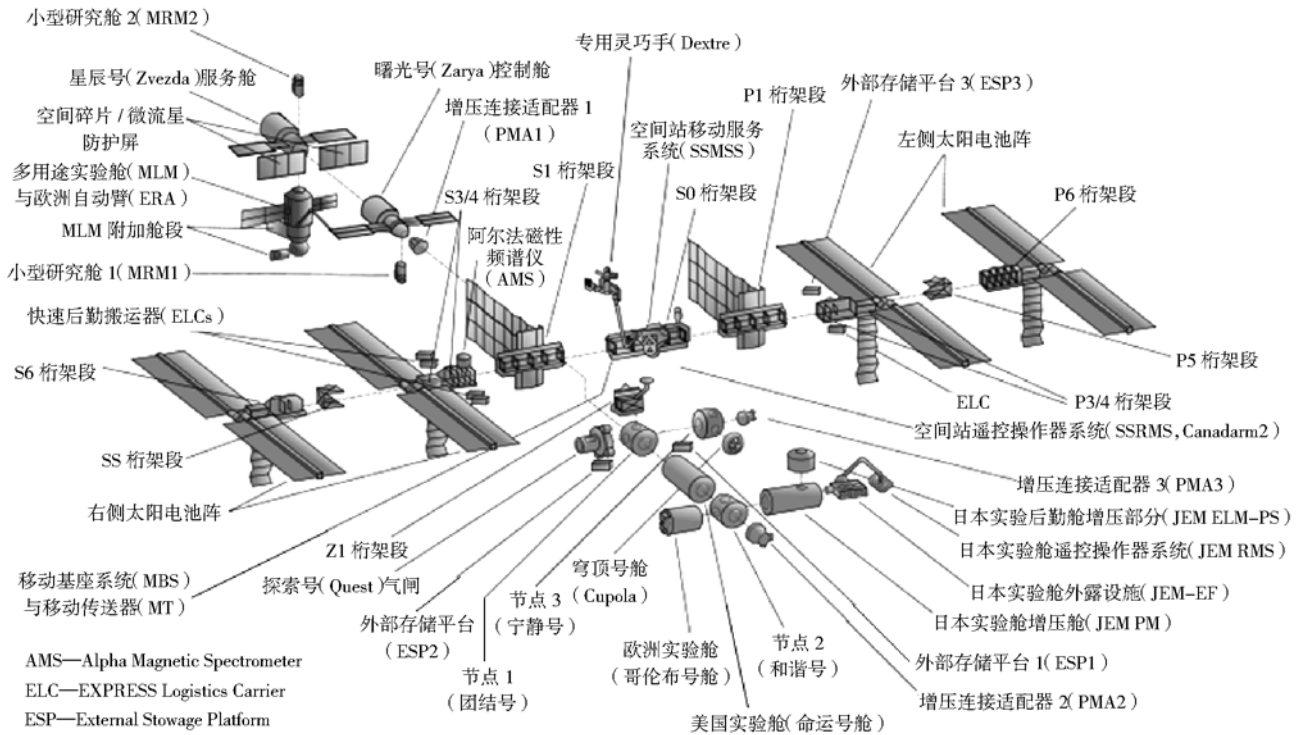


图 1 国际空间站未来的最终构型及操作器系统的安装位置[6]

表 1 地球轨道载人航天器的操作器系统

操作器系统	航天飞机遥控操作器系统	空间站移动服务系统	日本实验舱遥控操作器系统	欧洲自动臂	轨道更换单元搬运装置	火箭号吊机		舱段再对接操作器系统
						改进型	原型	
载人航天器	美国航天飞机	国际空间站				和平号空间站		
设计目的	支持舱外活动,空间站的构建与运作(通用)							舱段再对接(专用)
操作方式	遥控自动运作				直接手动操作			遥控自动运作
安装方式	固定	可移	固定	可移	固定			

## 2 航天飞机遥控操作器系统<sup>[7-14]</sup>

航天飞机遥控操作器系统(SRMS)是第一个在轨道环境中应用的自动操作器系统,SRMS 操作器臂也被称为加拿大臂(图 2,3)。SRMS 仅能够在失重(微重力)环境中运作,这是由于操作器臂直流电动机不能在地球引力影响下移动载重。1981 年 11 月,SRMS 首次在 STS-2 哥伦比亚号航天飞机上应用;之后,这个系统一直在航天飞机上运作使用。

SRMS 臂长 15.3 m,直径 0.38 m。SRMS 整个系统的质量为 452 kg,其中机械臂的质量为 410.5 kg,安装在有效载荷湾(货舱)的左侧纵梁上(图 3)。SRMS 的基本构型由 5 部分组成(图 2):1)机械臂组

件(MAA);2)显示与控制设备;3)操作器控制器接口单元(MCIU);4)操作器定位机构(MPM);5)轨道器吊杆传感器系统(OBSS)。其中,OBSS 是 2003 年 STS-107 哥伦比亚号航天飞机失事后安装的。

SRMS 具备内置测试性能,可检测与显示危急故障。SRMS 可监视臂基电子设备(ABE),显示与控制设备,以及操作器控制器接口单元(MCIU)稳定器校验设备。故障显示在面板 A8U 灯阵上及阴极射线管(CRT)上,并且可通过轨道器遥测进行下行传输。臂基电子设备(ABE)的所有主要系统都被监视。计算机检测包括每个关节行为的总检验(通过一致性检测进行),编码器数据的有效性,机械臂能达到范围的近程,软止动装置以及异常情况。





员提供工作平台与足约束装置;2)SRMS 也可用作轨道器或有效载荷表面的检测工具,应用装在 SRMS 上的电视摄像机,对轨道器或有效载荷表面的受损或故障部位进行近距离观察。

### 2.1 机械臂组件

机械臂组件(MAA)主要由下列部分组成:1)臂杆;2)肩部支架;3)电缆线束;4)关节接头;5)端点作用器;6)热防护系统;7)CCTV 相机。

#### 2.1.1 臂杆

臂杆由两节薄壁管材制成,分为上臂杆与下臂杆两部分,上下臂杆由肘关节相连(图 3)。臂杆结构设计满足刚性标准。为了达到有效的刚性/重量设计并保持结构简易,臂杆采用圆截面石墨/环氧树脂复合材料。臂杆端点法兰盘由铝合金制成,栓接在石墨/环氧树脂管材上。在下臂杆顶部,紧靠肘关节接口处,有一个夹架,用于安装肘部闭路电视(CCTV)相机与扫调/绕轴转动(pan/tilt)部件。

#### 2.1.2 肩部支架

肩部支架的设计是为减小在发射期间加在肩部俯仰齿轮系的关于俯仰轴的高转矩负载(图 4)。在轨期间,肩部支架被释放,使 SRMS 投入运作。且在轨期间,支架不可能被再接合(在再入与着陆前也无再接合支架的需求)。肩部支架向肩部偏航接头壳的嵌入是应用线性驱动器实现的。线性驱动器驱动一个柱塞在两个锥形金属体之间扩展,向外推动金属体的端点,将容座的端面楔压在肩部偏航接头的外壳上,使肩部支架嵌入壳内。肩部支架的释放由 A8U 面板上的杆锁肩部支架释放开关控制。将开关定位在 PORT,释放支架,即由电动线性制动器撤回柱塞,使锥形金属体松开并朝向对方移动,从而使支架滑出肩偏航接头外壳,将支架解锁。开关位置须保持住,直到 A8U 面板上的联络指示器显示灰色,通常需保持 8 至 10 秒时间。柱塞行程终端的微动开关控制联络指示器,将已达终端信息回馈给控制系统或操作乘员。

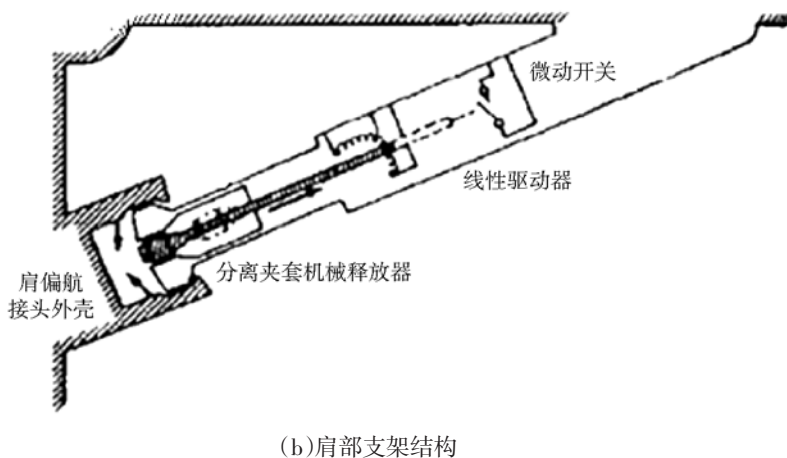
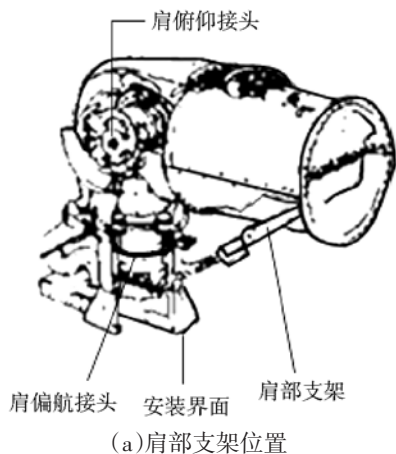


图 4 SRMS 臂肩部支架的位置与结构<sup>[9]</sup>

#### 2.1.3 电缆线束

电缆线束沿臂杆长度方向安装。电缆线束的设计需考虑减小电线交扰与电磁干扰。电缆线束装配在上下臂杆的外面,使用 Kapton 胶带,以减轻重量。考虑到电缆线束与臂杆之间的相对热伸缩以及接头运动,电缆线束应有适当的松弛。肩部电缆线束参见图 5。

#### 2.1.4 关节接头

SRMS 臂包含 6 个接头(JOD),他们是构成肩关节、肘关节与腕关节的基本元素。肩关节含俯仰与偏航 2 个接头,肘关节仅有 1 个俯仰接头,腕关节含俯仰、偏航与滚转 3 个接头。接头通过结构件连接。接

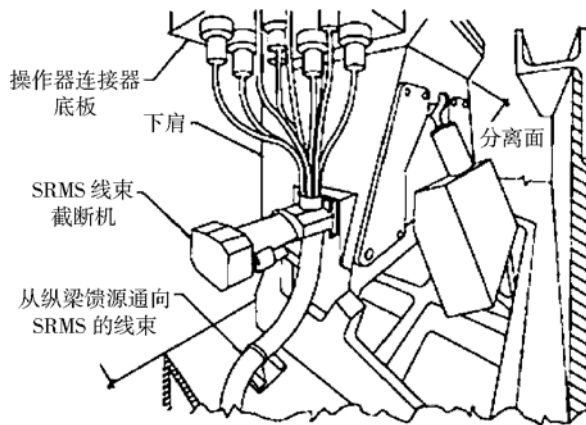


图 5 SRMS 臂肩部电缆线束<sup>[9]</sup>

头由接头壳与接头驱动系统组成。接头壳为接头连接与转动的结构部件。接头驱动系统包括下列部件：1)电动机模件(MM)与信号调制单元(SCU);2)光电编码器(EOE);3)伺服功率放大器(SPA);4)接头功率调节器(JPC)。

(1) 电动机模件/信号调制单元(MM/SCU)。MM/SCU 装在每个接头的接头壳内。电动机模件(MM)的组成如下(图 6):1)马达(电动机):在主模式与备份模式运作中,接头转动均使用相同的可逆、无刷直流电动机。2)整流扫描器组件(CSA):CSA 由电动机输入端的 2 个光学整流子组成,用以设置电动机传动轴的位置。3)传动齿轮组:除传动齿轮比不同外,所有接头的传动齿轮组是相似的。齿轮应用高精度公差齿轮与齿隙控制装置,使齿隙减至最小。在整个齿轮组中使用干膜润滑法。4)制动装置:制动装置可使驱动马达保持在静止状态,这是将制动垫作用在马达传动轴上的接触面上。为解脱制动,则需向制动装置连续应用 28V 直流电。5)转速计。6)电动机壳。

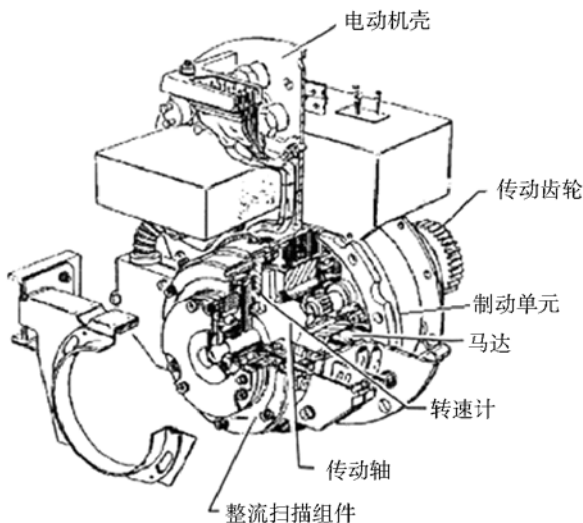


图 6 关节接头驱动系统电动机模件<sup>[9]</sup>

(2)光电编码器(EOE)。光电编码器装配在每个接头的齿轮箱的出口端,用以感知接头的角位置,因此也称为位置编码器。编码器应用发光二极管(LED)光源与单片式频闪盘。腕滚转接头的编码器在中心有一个通孔,使电缆线束可以贯穿。

(3)伺服功率放大器(SPA)。每个接头的 SPA 与电动机模件及编码器相连。SPA 的主要功能是:响应数字控制信号或直接驱动指令信号,向电动机提供驱动信号。数字控制信号由通用计算机(GPC)生成,经操作器控制器接口单元(MCIU)供给 SPA;而直接驱动指令信号来自控制面板。

(4)接头功率调节器(JPC)。与上述部件(每个接头都有 1 个)不同,JPC 仅有 2 个。一个位于肩部,为肩关节与肘关节的 3 个接头服务;另一个位于腕部,为腕关节的 3 个接头服务。JPC 的功能是:将 MN A +28V 直流电转换为二次调节电压值±15V,+10V,及+5.1V 直流电,供给 SPA,电动机整流器,以及位置编码器。

2.1.5 端点作用器

SRMS 的运作可应用标准端点作用器(SEE)或专用端点作用器(SPEE)。

标准端点作用器(SEE<sup>[9,11,36]</sup>)可抓取有效载荷,使有效载荷刚性附连在端点作用器上,按要求进行转移或其它操作,完成操作任务后再释放有效载荷。标准端点作用器驱动系统的开端有旋转网环,网环含 3 根金属套索,用于围紧安装在有效载荷上的抓杆固定器(PMGF)。SEE 用这种方法捕获或释放有效载荷。在有效载荷捕获阶段,整个套索网环在旋转围紧抓杆的同时被滑架向后(朝向 SEE 的臂杆界面)拉动,直到抓杆固定器基板紧贴端点作用器末端面。在有效载荷释放阶段,为解除连接,向前延伸滑架,直

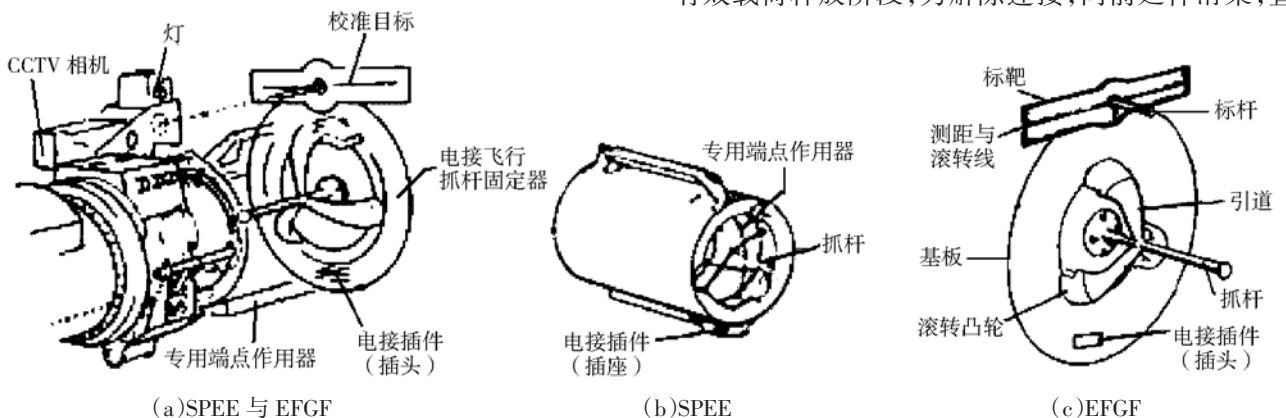


图 7 SRMS 臂专用端点作用器(SPEE)与电接飞行抓杆固定器(EFGF)<sup>[9,11]</sup>

至无轴向拉力作用于拉杆的位置,然后打开套索,抓杆便可从端点作用器中脱出。

专用端点作用器(图 7)可按现成的设计建造,并在轨道器地面检修期间装配在 SRMS 上,以代替标准端点作用器。在被抓取物件(有效载荷)上与 SPEE 匹配联结的备用件是电接飞行抓杆固定器(EFGF)。EFGF 由基板,抓杆,校准器,引道(Ramps),滚转凸轮(Roll Cams),电接插件(插头)等组成。基板直径为 36.88 cm—57.15cm,抓杆长 27.43 cm。校准器由标靶与标杆组成,标靶上标有测距与滚转线,标杆竖直安装在标靶上。自动臂操作中监视标靶与标杆的 TV 图像,并且在运作自动臂逼近目标时,保持标杆笔直朝向自动臂。如果标杆与自动臂之间的角平衡失去,可立即通过 TV 图像监测到。校准器上的标杆长 10.16cm。EFGF 上的电插头与专用端点作用器 SPEE 上的插座相连,接收电能。

2.1.6 热防护系统

SRMS 有两类热防护系统,即被动热控系统与主动热控系统。

被动热控系统由多层绝热毯和热涂层组成。绝热毯附着在机械臂结构上,用 Velcro 相粘。热涂层将太阳能从机械臂反射掉,辅助控制硬件的温度。在活动部件周围的暴露面积用专用白漆涂上。

主动热控系统由机械臂上的 26 个加热器组成,以 28V 直流电提供 520W 电能。主动系统采用冗余设计,有两个重复的加热器系统:一个由轨道器 MN A 直流电母线供电,另一系统由 MN B 直流电母线供电。对常态热控,仅需一个系统。每个系统中的加热器集中在机械臂关节与端点作用器,用以加热电子设备与电动机模件。加热器的操作由面板 A8L 上的 PORT RMS HEATER A 和 B 屏蔽开关执行。当开关朝向 AUTO 设置时,加热器由沿机械臂的 12 个热敏电阻恒温控制。加热器自动在-10℃接通,在-6.1℃断开。(又,据参考文献[2],主动热控系统自动保持关节温度在-25℃以上;当温度达到 0℃时,加热器断开。)

2.1.7 CCTV 相机

轨道器的闭路电视(CCTV)协助飞行乘员监视有效载荷布放与收回系统(PDRS)的运作。机械臂在腕关节装配了观察灯与固定的 CCTV 可变焦距相机(图 8),在肘关节靠下臂处装配了具有扫调与绕轴转动性

能的 CCTV 相机(图 9)。还有 4 个 CCTV 相机在有效载荷湾,同样具有变焦距与扫调/绕轴转动性能。此外,根据飞行使命需求,还可提供龙骨相机,可从有效载荷湾舱底向上看。在后飞行甲板站的 2 台 CCTV 显示器具有分屏性能,各自可显示 CCTV 相机视图中的任意 2 幅。这表示同一显示器可显示 2 幅视图,因此,乘员可同时监视 4 幅不同的视图。乘员也可通过后飞行站顶窗与有效载荷湾视窗观察有效载荷运作。

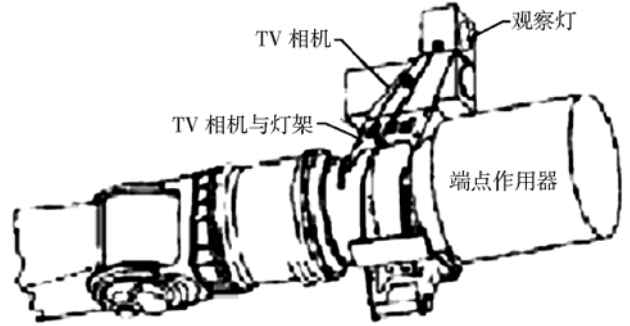


图 8 SRMS 腕部 CCTV 相机与观察灯<sup>[9]</sup>

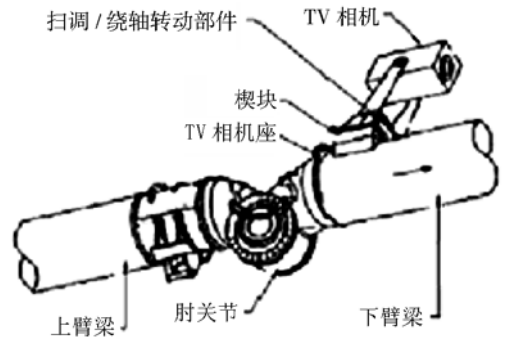


图 9 SRMS 臂肘部 CCTV 相机<sup>[9]</sup>

2.2 显示与控制系统

SRMS 的显示与控制设备包括下列部件(图 10,11):1)闭路电视监视器;2)闭路电视控制器;3)平移手控器(THC);4)转动手控器(RHC);5)通用计算机(GPC),阴极射线管(CRT)以及键盘;6)A8L 面板;7)A8U 面板;8)A14 面板。

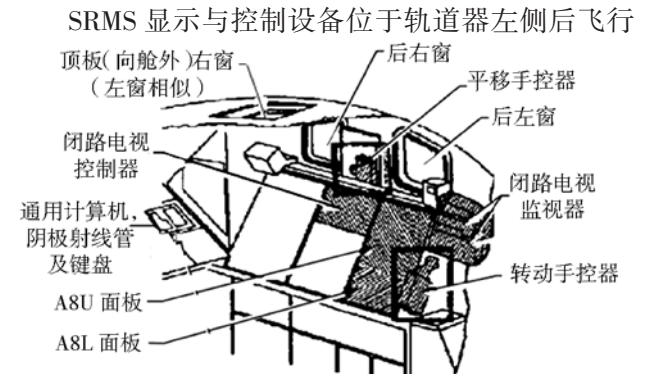


图 10 SRMS 显示与控制设备<sup>[9]</sup>



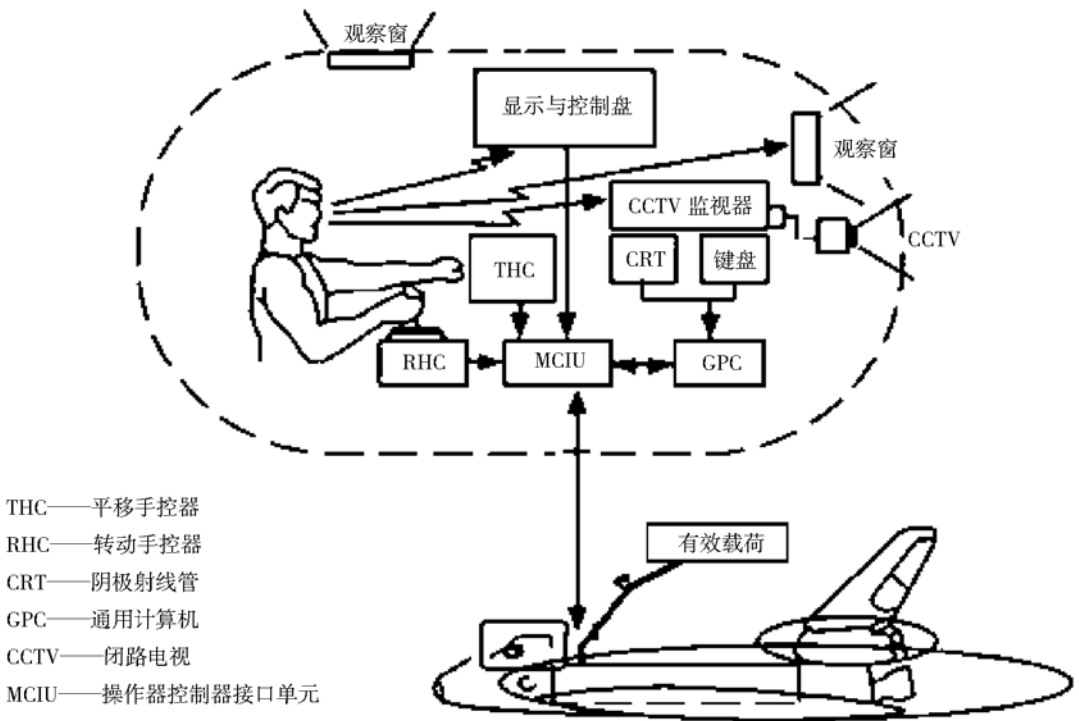


图 11 SRMS 显示与控制系统<sup>[9]</sup>

甲板乘员舱。SRMS 在轨运作总是由两名机械臂操作人员组成的小组执行。一位操作员驻在左侧后飞行甲板,控制 SRMS 实际轨迹;另一位操作员驻在右侧后飞行甲板,控制阴极射线管(CRT)输入,有效载荷固定锁组件(PRLAs),以及 TV 相机。

### 2.2.1 平移手控器

平移手控器(THC)(图 12)可使操作员用手动输入方法控制 SRMS 基准点(POR)的三维线运动。基准点(POR)是由软件确定的点,所有的平移与转动都是相对于这个点表示的。对空载的机械臂,基准点位于端点作用器(EA)的末梢。对加载机械臂,基准点一般定义在被抓取的有效载荷的几何中心,或靠近几何中心处。基准点速度需求与平移手控器的偏转成比例。手控器向操作器控制器接口单元(MCIU)提供 3 个独立的电信号输入(每个控制轴 1 个)。平移

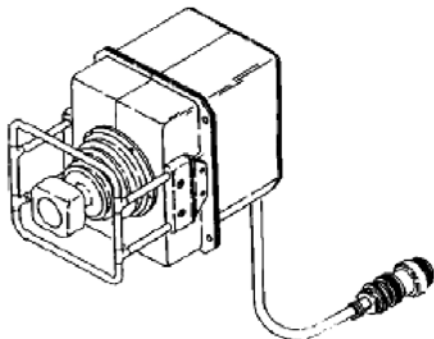


图 12 SRMS 平移手控器(THC)<sup>[9]</sup>

手控器在每个控制轴加入一个弹簧粘滞阻尼器,阻尼器提供适合的力感特性,协助操作人员运作。

### 2.2.2 转动手控器

转动手控器(图 13)是 3 轴控制器,为 SRMS 的俯仰、偏航、滚转控制提供电控制信号。控制信号与手动输入位移成比例。RHC 也可通过位于手柄组件的 3 个开关为 RHC 提供附加控制,这 3 个开关是 RATE HOLD(速率保持)按钮,RATE(速率)开关,以及 CAPTURE/RELEASE(捕获/释放)开关。

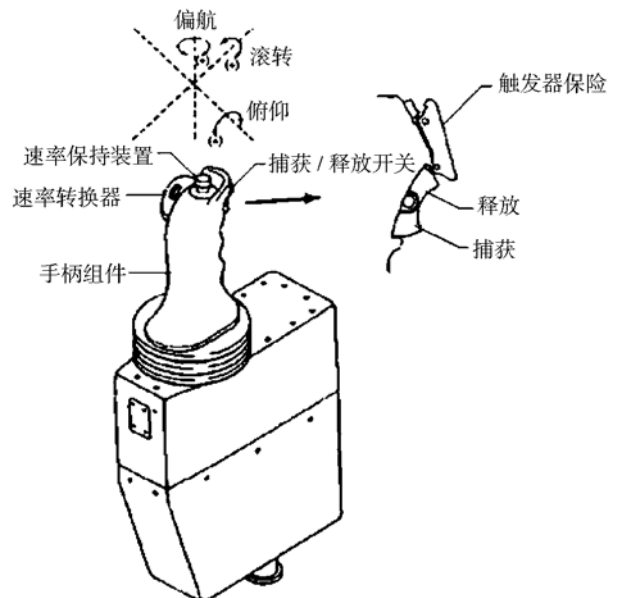


图 13 SRMS 转动手控器(RHC)<sup>[9]</sup>

(1)RATE HOLD 按钮。该按钮安装在手柄组件的顶端,用大拇指操作。按钮用于保持基准点平移与转动速率在给定的指令值。当按钮瞬间按压时,就达成了速率保持。在速率保持实现后,速率可被偏置,即第 2 次偏转手控器,使手控器转向停止状态。

(2)RATE 开关。VERNIER/COARSE RATE(微调/粗调速率)开关是一个滑动开关,用以生成 SRMS 软件所应用的信号,以在已定速率模式运作时确定 POR 速率范围,在单模式运作时确定接头速率范围。当开关推离操作者时,生成粗调指令;当开关朝向操作者推进时,生成微调速率。

(3)CAPTURE/RELEASE(捕获/释放)开关。这个波动开关安装在手柄组件的后部,用于捕获或释放有效载荷。开关下部向端点作用器发送捕获信号,而上部发送释放信号。在波动开关释放部之上有一个触发器保险(防护装置),由手指操作,用于防止 RHC 正常运作期间的误动作。

### 2.2.3 接头止动模式

机械臂每个接头都有一个运动扩展范围,即行程范围(图 14),使机械臂能够越过有效载荷湾延伸,或在乘员舱向上延伸,或到达轨道器下表面的区域。在实际机械硬止动传递给接头之前,机械臂接头行程范围被告知给飞行乘员机械臂操作人员。当机械臂搁置在支架上时,所有接头角均为  $0^\circ$ 。以腕俯仰接头为例,腕俯仰接头在达到机械硬止动前,可实际移动  $+121.4^\circ$  或  $-121.4^\circ$ 。在  $\pm 114.4^\circ$ ,软件便以多种方式警示 SRMS 操作者,机械臂正接近行程终点。若操作者继续驱动接头越过此限值,则在  $\pm 116.4^\circ$  发出软止动警示。若操作者仍继续沿此方向驱动接头,则在  $\pm 121.4^\circ$  以硬止动方式停止运动。

Safing(安全)模式与 Braking(制动)模式是机械臂止动的两种方式。位于 A8U 面板顶部的 SAFING 开关有 3 个位置,即 SAFE,AUTO 及 CANCEL。将 SAFING 开关向 SAFE 设置,即可实现 Safing 模式止动,应用伺服控制环路使机械臂止动。当 SAFING 开关向 AUTO 设置,Safing 模式就被操作器控制器接口单元(MCIU)启动,检测某些危急的内置测试设备故障。将 SAFING 开关转向 CANCEL 位置,即取消 Safing 模式。当 Safing 模式不在进行中,SAFING 联络指示器显示灰色;而当 Safing 模式正在进行中,指示器显示类似“理发店招牌柱”的图案。

在有效载荷布放与收回系统(PDRS)运作布放的最初阶段,Safing 模式被考虑为主要方法,MCIU 可快速响应故障状态,阻止机械臂运动。后来,增加了 Braking 止动模式,即由 MCIU 启动自动制动器,以响应伺服功率放大器的某些故障状态。BRAKES 开关和联络指示器也位于 A8U 面板顶部。BRAKES 开关仅有 2 个位置,即 ON 与 OFF。将 BRAKES 开关移至 OFF 位置,便以手动方式解脱制动。这种设置向 MCIU 中的制动逻辑功能发送电路信号,于是 MCIU 指令制动器提起或移去,解除对机械臂接头的约束。操作者将 BRAKES 开关放在 ON 位置,可再次应用制动器。机械臂操作者经过训练可对 SRMS 任一疑似故障状态作出反应,这就是在除了 DIRECT DRIVE 和 BACKUP 以外的任何模式中运作时,即刻将 BRAKES 开关放置在 ON 位置。在 DIRECT DRIVE 模式运作时,操作者作出的响应是将 MODE 旋转开关移向一个 Non-DIRECT DRIVE 位置。在 BACKUP 模式运作时,操作者响应是将 RMS POWER 向 OFF 放置。现在一般应用

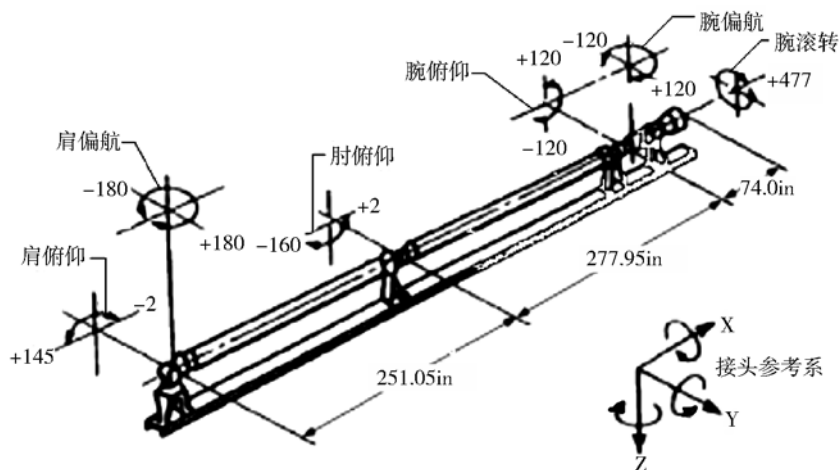


图 14 SRMS 接头行程范围<sup>[9]</sup>