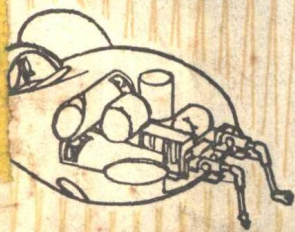


遥控主从机械手

译文集

YAO KONG
ZHU CONG
JI XIE SHOU

原子能出版社



遥控主从机械手

(译文集)

顾俊仁 译

吴景彩 校

原子能出版社

内 容 简 介

本书是一本译文集，共分九部分。各章节间内在联系性强，包括机械手的发展、展望、分类、特性、各种典型的机械连接的、电随动的、液压随动的机械手及其附件等部分，最后还对机械手的运载工具、观察系统以及机械手在各个领域的应用情况做了较详细的介绍。

机械连接的主从机械手在五十年代就已发展得很完善了，那时还只是代替人在恶劣环境中工作，如放射性、化学毒性、生物毒性等。随着电视和电子计算机的飞速发展，出现了完善的电随动机械手，它现在已扩展到海洋开发（深海勘探、采矿、深海打捞等）、星际探险（飞船对接、卫星维修等）、现代医学（显微手术等）、现代物理等领域。本书对上述内容作了详细介绍。

因此，本译文集对从事原子能事业、宇航事业、海洋开发、现代医学的研究及电子元件的研制等领域的科学工作者、大专院校有关专业的师生均有参考价值。

遥控主从机械手（译文集）

顾俊仁 译

吴景彩 校

原子能出版社出版

（北京2108信箱）

国防科委印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

☆

开本787×1092 1/16·印张19 3/4·字数 469 千字

1982年2月第一版·1982年2月第一次印刷

印数001—2,700·统一书号：15175·375

定价：2.45元

译 者 的 话

机械手是作为操作放射性物质的工具而出现的。在四十年代,美国为加快核武器的发展,研制成了一些简单的防护性操作工具,如长杆夹钳和剑式机械手。到五十年代,性能良好的机械连接的主从机械手(简称模拟机械手)已发展得相当完善了。

应用电视是电随动机械手发展、完善的有力促进者。它们的结合,使机械手的操作方式摆脱了主从间机械连接的羁绊。主从间的控制方式可用电缆加计算机进行程序控制或实时控制,同时还可用无线电进行控制,从而使这种机械手成为名符其实的遥控操作工具。

电随动的主从机械手已广泛地应用于核领域的各个部门。目前,人们正使它发展成为适于海底打捞、勘探、采矿的遥控主从机械手,并且它早已被用于星际探险了。

机械手还可以用于超净环境。在现代生物学、医学(包括空间医学)以及微型电子元件加工工艺学等领域中都要求这种超净的环境。鉴于电随动主从机械手的力反应性能(不但有利于操作大物件,更有利于精细的操作),以及可遥控操作的特性,它必然会在这些技术领域中大显身手。

利用随动机械手的灵巧特性,再配上性能良好的“行走”工具(可越野、爬障、攀登),并借助各种传感装置配以触、听、视、嗅、味以及温度等感觉和思维能力,就会制成一具完善的机器人——人工智能机器人。这种机器人降临人世的日子已越来越近了。

为使读者对机械手有一个较全面的了解,本译文集重点介绍了世界上最著名的各种型号的随动主从机械手(包括液压的),并对机械手的发展、前景、分类、特性、模拟机械手、动力机械手以及机械手的附属部件、运载装置、观察系统等作了介绍。

必须指出,本译文集所介绍的机械手与一般的工业机器人(Robot或Mobot)不同。国外所说的工业机器人,一般是指“传送臂”、“搬运机器人”、“程序操作机”等装置;在通用性和灵巧性方面它不如本译文集所介绍的这种遥控主从机械手。

本译文集可供科研、设计、高等院校和工厂等有关人员参考。

在编译过程中得到了高钧、叶信爱和安邦喜等同志的热情帮助,他们提出了许多宝贵的意见,在此表示衷心的感谢。由于本人水平有限,缺点和错误难免,希望读者批评指正。

译者 1979.10.

目 录

机械手的发展和展望	1
一、国立阿贡实验室机械手系统发展史 (1949—1964)	1
二、主从机械手向何处发展	22
机械手的分类和主要特性	29
三、机械手的分类和性能参数的选择	29
四、主从机械手的控制和力反应	38
五、机械手运动的覆盖分析	54
六、机械手灵巧性的讨论	64
七、利用机械手提高人们的灵巧能力	73
机械连接的主从机械手	78
八、在真空或惰性气氛中操作的气密剑式机械手	78
九、M8型机械连接主从机械手	79
十、伸缩式加长臂主从机械手	81
十一、气密式 CRL-A 型机械连接主从机械手	85
十二、可作前后分度摆动的 MA11 型穿墙式关节机械手	89
动力机械手	95
十三、动力机械手简介	95
电随动主从机械手	104
十四、ANL E3 型电随动主从机械手的设计和它在热室中的应用	104
十五、晶体管化的 ANL E3 型电动主从机械手的伺服系统	125
十六、电动控制的随动主从机械手	132
十七、一种电动主从机械手用的紧凑灵活的力反应伺服系统	140
十八、ANL E4A 型电动主从机械手	151
十九、高能加速器上用的电随动主从机械手的研制	159
二十、有最佳传递环节的紧凑的 BNL 双边随动主从机械手	168
二十一、MA22 型双边随动主从机械手	180
二十二、EMSM I 型电动主从机械手和核事故处理用的机械手车	187
二十三、MA23 型双边随动机械手系统	211
二十四、用于两相伺服传动主从机械手的三端双向可控硅开关输出控制系统	225
二十五、SM-229 型随动主从机械手	232
液压随动主从机械手	239
二十六、伺服臂——一种水压驱动的随动主从机械手	239
机械手的几种附属部件和去污维修装置	248
二十七、用于主从机械手的新型气密式夹具	248
二十八、用于主从机械手的双层密封伸缩套	252

二十九、用动力助动（45公斤）的主从机械手的夹紧系统	255
三十、一种主从机械手运动的气动锁紧装置	259
三十一、热室机械手的远距离去污装置和修理站	266
机械手车	270
三十二、用车运载的机械手系统	270
三十三、VIRGULE——几何形状可变的轮式遥控操作器	282
机械手操作时的观察系统	292
三十四、观察系统综述	292
三十五、头控的TV2型实验性电视系统	304

机械手的发展和展望

一、国立阿贡实验室机械手系统 发展史 (1949—1964)*

雷·戈茨(Ray Goertz)**

本文评述了国立阿贡实验室(ANL)在过去15年多的时间内,完成的通用机械手以及与它密切相关的部件方面的某些重大进展。研制成功了少数用开关控制的、没有力反应的单边机械手。大部分研究工作集中在机械连接和电连接的主从机械手方面,它们对所有的七种基本运动都有力反应。

第一只机械连接的主从机械手(简称模拟机械手)是在1949年研制成的;第一只电动主从机械手是在1954年研制成的。M8型机械连接的主从机械手是使用最广泛的一种,也是ANL所研制成的最新式的一种。E3型是一种最新式的电动主从机械手。自1960年初以来,已经有四只这种机械手投入了操作,并工作得很好。虽然在机械手研制方面已取得了相当大的进展,但采用性能良好的电动的或机械连接的主从机械手进行热室的典型操作的速度,只相当于直接用手操作速度的八分之一左右。显然,今后在发展机械手系统方面还有大量工作要做。

引 言

在略多于十五年的时间内,ANL在研制通用机械手及与之紧密相关的部件方面曾有一个连续不断的规划。虽然这个规划曾发生过一般性的和重大的变动,但总的看来规划还是相当成功的。有关这方面的研制工作的大部分资料虽有报道,然而它却是分散在许多年内报道的,而且是发表在若干不同的期刊和文献上。因此,作者感到有必要发表一篇概括这个规划要点的评论性文章,大体上按年代的先后顺序来叙述。这或许对那些致力于远距离操作而拟定技术条件或进行设计的工程师和科学家有所裨益。

在执行原子能计划的早期阶段,实验中的放射性强度很低,许多操作都可以使用长臂夹钳,有时使用这种长臂夹钳穿过活动屏蔽块进行操作。由于在动力堆中可能使用的、合适的燃料元件的研制计划不断扩大,在热实验室中操作的放射性水平也随之提高了。在某些情况下,这种放射性水平早就上升到需要在屏蔽室中进行研究的地步了。往往要为每一项实验制造一种精巧的专用的遥控设备。从事实验的科学家经常要研制和设计这类专用的设备,这就占用了他们很多的时间。明显的是,对于许多用于远距离操作和控制的通用机械手的需要在不断地增长。而这种通用机械手的研制成功,将会减少那些必须研制的专用设备的数量,从而加速实验计划的完成。

* 研究工作是在美国原子能委员会的赞助下完成的。

** Argonne National Laboratory, Argonne, Illinois.

鉴于上述一些因素, 1947年国立阿贡实验室成立了一个研制通用机械手及其相应的配套设备的研究小组(即现在的ANL 遥控工程部)。该小组研制的机械手及相应的设备能够远距离控制, 进行经济上切实可行的大量操作。当然, 曾期望所研制的这些机械手, 能完成愈来愈多的操作项目, 并且能更迅速地进行操作。

这一系列特定的研究目标之一, 是研制一些机械手及相应的观察设备和辅助工具, 以便能快速拆装任何形式的大多数设备或仪表器械, 无论这些设备是按远距离检修还是按人工直接检修设计的。

目前, 使用操作速度最快的机械手完成热实验室平时的操作时, 其操作速度也只相当于人工直接操作时的八分之一左右。对于一些比较简单的操作, 机械手的操作速度与人手操作速度更接近些; 反之, 对于一些比较复杂的操作, 机械手则需要更长的时间或者根本不能完成。当然, 目前采用的机械手, 它们在荷载能力, 有效工作半径或者是抓握荷载的持续时间等性能上, 均已超过了人手和人之手臂的能力了。

通用机械手系统的定义

我们认为, 一个通用机械手系统应包括各种机械的、机电的和电子学的部件, 以及观察系

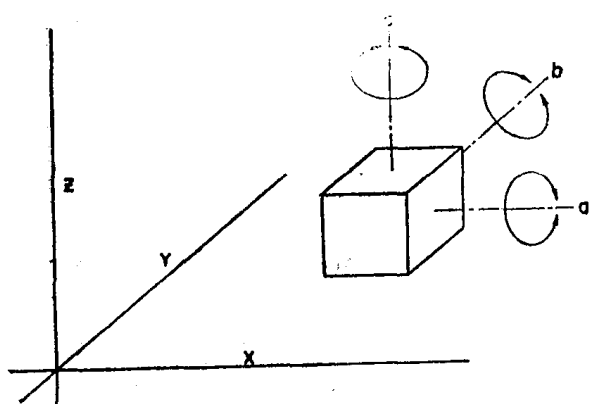


图1 在立体笛卡尔坐标系中一个固体物件的运动方式
(三种直线运动, 三种旋转运动)

统等设备, 从而构成一个操作者可远距离控制的完整的操作系统, 以便对各式各样的固体物件进行相当广泛的各种操作。因一个固体物件可能有六种独立的自由度(见图1), 所以, 机械手一定要有把握住该固体物件的能力, 并必须对该物件施加三种独立的且是双向的力以产生直线运动, 以及三种独立的且是双向的力矩以产生转动。这种机械手还应具备下述能力, 即它对被操作物件所施加的握力和力矩的范围是相当宽的, 能使被操作的物件在适当范围内进行运动, 而且还应允许所操作的物件在尺寸、重量和形状上也有很大的变化范围。

机械手工作臂一般采用可移动的形式, 其长度-周长之比(即臂长与臂的周长之比)很大, 腕关节装在臂的端部。腕关节可为被握紧的物件提供三种独立的力矩以产生转动, 及一种动作。工作臂可用开关、操作杆控制; 在许多情况下, 也可用设在操作岗位上的一种类似的手臂来控制。机械手操作者既可面对屏蔽墙操作, 也可以在安全距离处操作。

单边无力反应的机械连接的和电动的 机械手的发展情况

ANL首批制造的一些机械手, 主要是用来把小物件(常是放射性样品本身)从一个地方搬运到另一个地方, 或者调整它们的角度, 或把它们放到试验架上去。它们的放射性强度常

常是在10居里以下，能量为1兆电子伏的 γ 放射性物质，而且经常用开盖的设备室进行操作。图2所示出的机械手，就是早期制成的机械手中的一种。它具有所有的七种独立运动，其中六种由穿过屏蔽墙的机械传动装置控制，用液压系统操纵夹具。它的荷载能力比较小，操作起来比较笨拙，且不平稳，只适宜作简单操作。同时，它的刚性也不够，当夹具或机械手本身同物体相接触时，机械手会发生弹性变形。

由于上述这种机械手的荷载能力比较小，又有弹性变形问题，所以后来被图3所示出的一种刚性更大的机械手所取代了。它是一种单边的电动机械手，取名U4型。它的每一种运动，均由单独设置的电机驱动。这些电机驱动机械手移动的速度比较缓慢，所以机械手操作十分平稳。虽然它同图2所示出的机械手相比，具有更大的刚性和强度，但顺从性不好，操作比较费劲。因此增强了我们制造一种好的机械手的想法，这种机械手不仅能控制七种或七种以上的运动，而且应具有控制这些方向的力。对此曾有过许多设想，如对这七种运动的每一种均安装一台测力计，或者设置一个声响换能器，但无论采用哪种方法，都不很理想。所以，自从制成了上述U4型单边电动机械手后，阿贡遥控工程部对没有力反应的机械手几乎再没有做过进一步的研究工作。

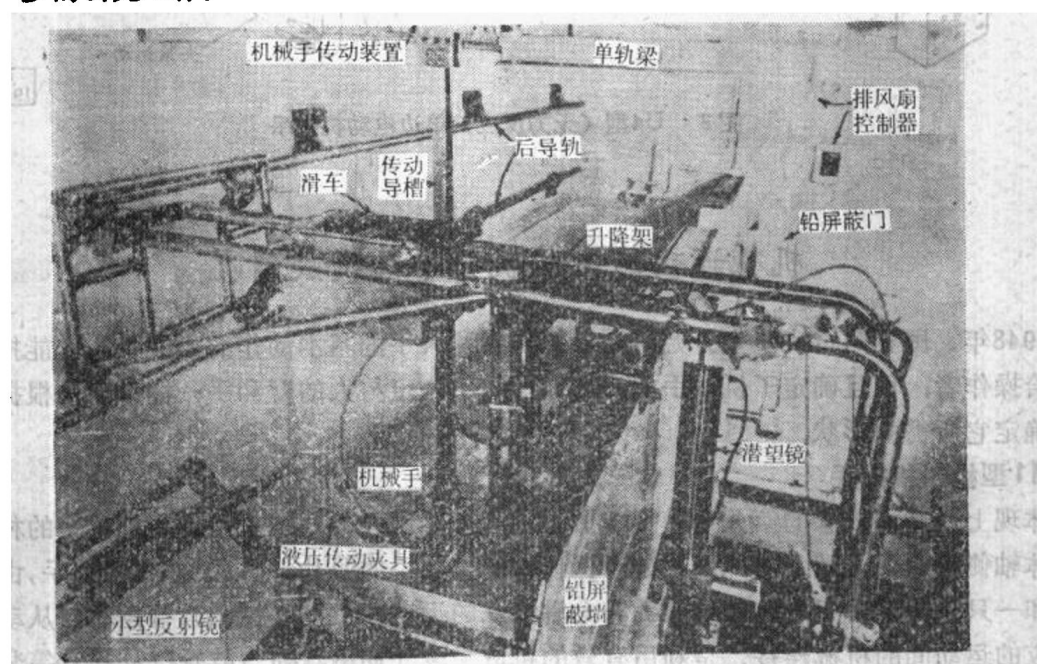


图2 ANL早期使用的一种单边机械手（主要用机械方式操纵，无力反应）

虽然阿贡停止了对单边机械手的研制，但其他部门却研制了各种不同尺寸的单边机械手。它们在许多热实验室中进行重荷载操作或粗笨的操作，成为机械连接的主从机械手的一种辅助操作工具（我们常称为动力机械手或简称动力手的操作装置——译注）。而这样的单边机械手，往往安装在桥轨运载系统上，可使它们作某些运动，和（或）使它们得到更大的工作体积。单边电动机械手，对于传递样品或其它物件以及使它们重新定位来说，都是很有用的。它们很适合将液体从一个容器倒入另一个容器的工作，因为在这类操作中，几乎不要求容器之间接触。有时也用单边机械手来完成一些其它操作任务，但是对于典型的热实验室操作而言，其操作速度只有主从机械手操作速度的 $\frac{1}{10}$ 到 $\frac{1}{100}$ 。

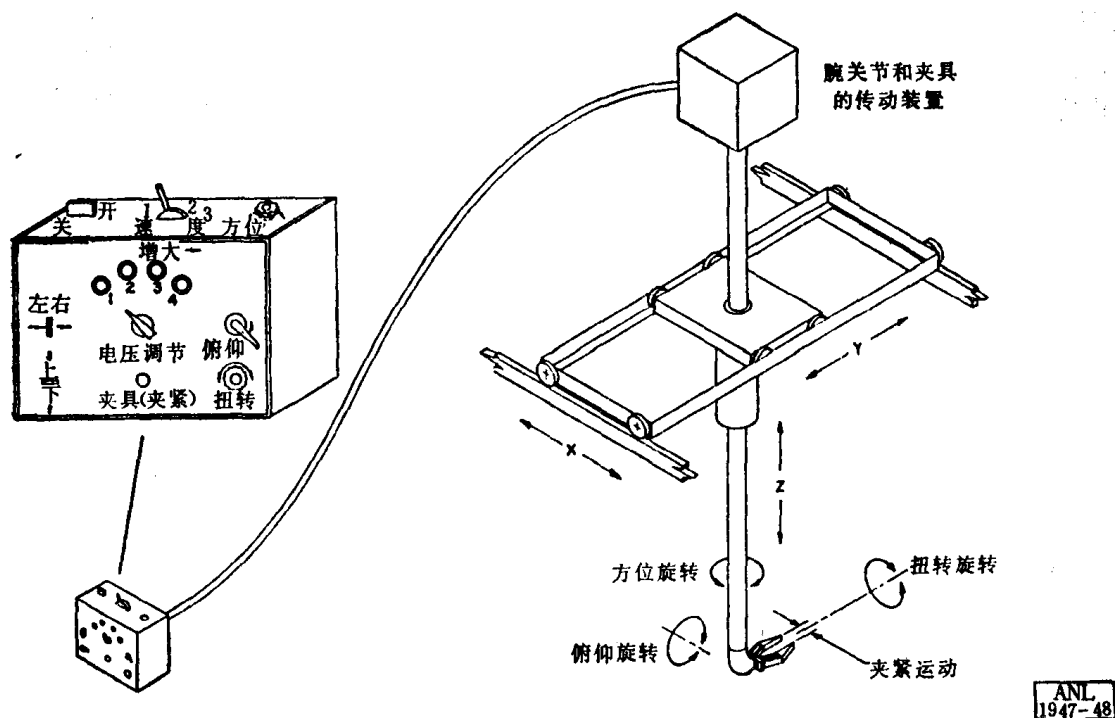


图3 U4型(无力反应)单边电动机械手

机械连接的主从机械手的发展情况

1948年, 国立阿贡实验室开始研制模拟人臂和人手的基本动作的机械手, 它能把荷载力反应给操作者; 而且确定了机械手的尺寸和形状不一定与人的臂和手一样, 而是根据操作任务来确定它所需的形状。

M1型模拟机械手

体现上述基本概念的第一台模拟机械手是1949年制成的。图4是这种机械手的相当精确的立体轴侧投影图; 图5为一副正处于操作中的机械手的照片。M1型模拟机械手, 由一只控制臂和一只工作臂所组成, 每只臂约有七种独立的运动。主动(控制)臂运动与从动(工作)臂相应的运动间的机械连接, 是利用有效的机械手段(如钢丝绳, 鼓轮以及导管等装置)来实现的。将操作把手安装在主动臂的腕关节的某一位置上, 使作用在夹具中心线左右的荷载力能反应到操作者的手心附近。把这种机械手称为主从(或谓模拟)机械手的原因, 是它的工作(从动)臂复演了控制(主动)臂的运动和力。

就我们所知, M1型机械手是曾经制造过的第一种主从机械手(它是通用电力公司所支持的潜艇反应堆研制工作的一部分, 几乎是在研制ANL M1型和M3型机械手的同时, 还研制了一种半主从机械手)。由于M1型机械手的荷载能力比较小(大约1磅左右), 而且还有其他机械上的限制, 所以只有少量投入制造和使用。

这种主-从(模拟)原理, 证实了我们所期望的一切, 甚至还可能更多一点。因而, 几乎没有再用更多的精力于无力反应的机械手上了, 而把主要精力放在研制荷载能力更大的机械连接和电连接的主从机械手上。

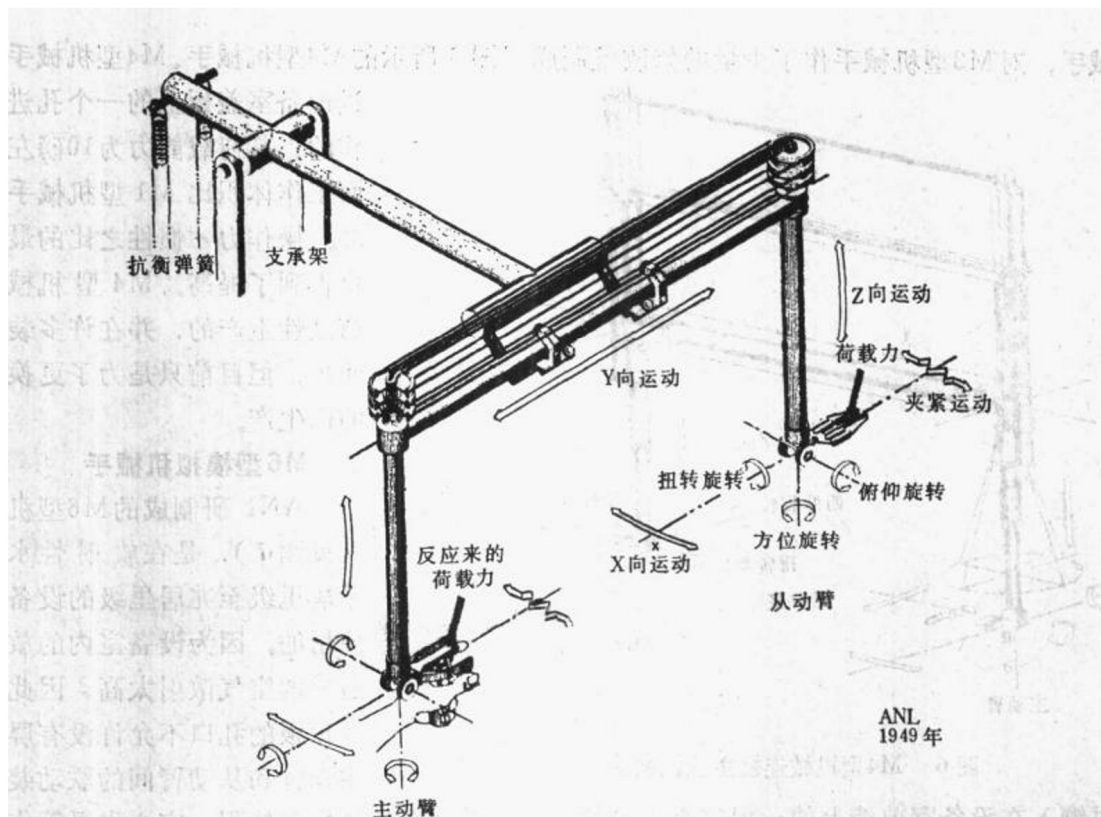


图4 M1型机械连接主从机械手 (ANL制造的第一台主从机械手)

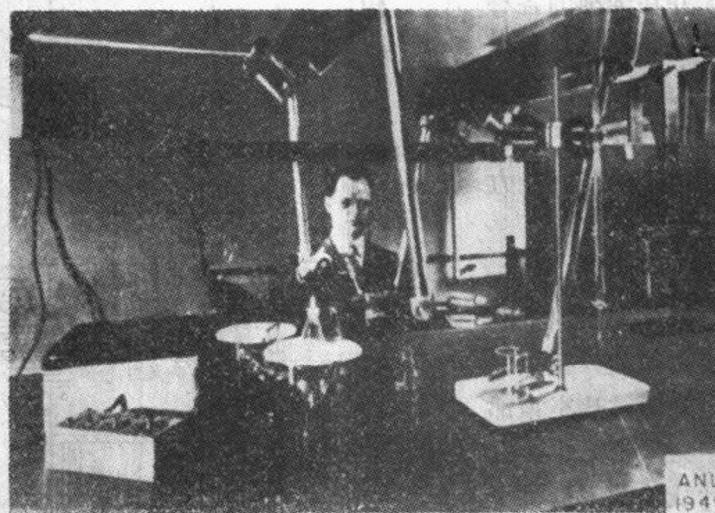
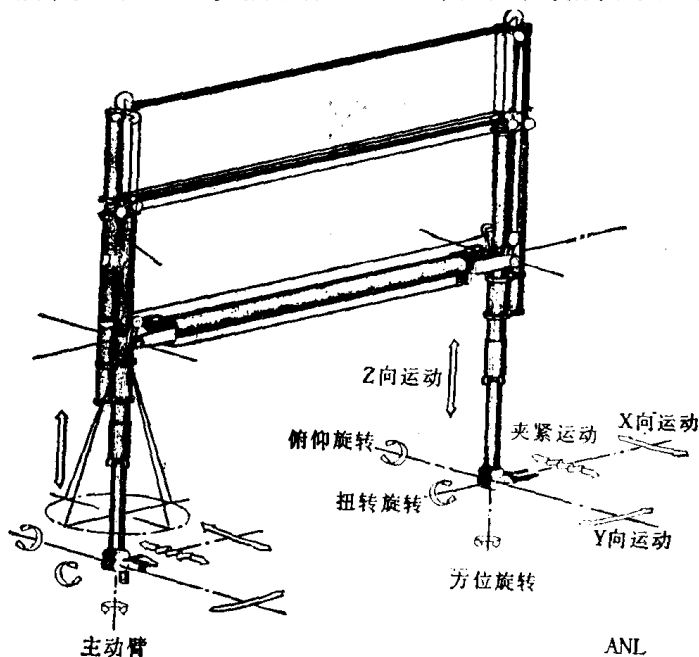


图5 正在操作中的M1型机械连接主从机械手的照片

M3型和M4型模拟机械手

当M1型机械连接主从机械手制成后不久, ANL就开始研究和设计相当大型的模拟机械手了。按实际比例放大M1型机械手可能并不现实, 因为受到如下两条限制: 其一, 需要屏蔽的放射性水平增加到开盖设备室 (原来至少有些屏蔽能力的设备室) 要求的屏蔽水平; 其次, 如果按比例放大, 则Y方向上的惯性将会太大。因此, 确定了最好的处理办法是把主动臂和从动臂都装在枢轴上, 并使两臂可做Z向伸缩运动。按上述的想法研制和设计了M3型

机械手。对M3型机械手作了少量的修改就制成了图6所示的M4型机械手。M4型机械手是通过设备室盖板上上的一个孔进行操作的，其荷载能力为10磅左右，而工作体积比M1型机械手大得多。操作力-惯性之比的最大值也得到了提高。M4型机械手有商品性生产的，并在许多装置中使用，但目前只是为了更换的目的而生产。



ANL
1949年

图6 M4型机械连接主从机械手

通过镶入在设备室前墙上的一根空心水平管。为了提供额外的覆盖体积，空心水平管作成可以转动的。已由一些制造厂生产了许多副M6型机械手，并在美国的各种装置中投入了使用。但因其体形而使安装、搬运和修理较为困难，故使用它操作的多数装置最后都换用了M8型机械手。M6型机械手的荷载能力约为10磅左右。

M7型模拟机械手

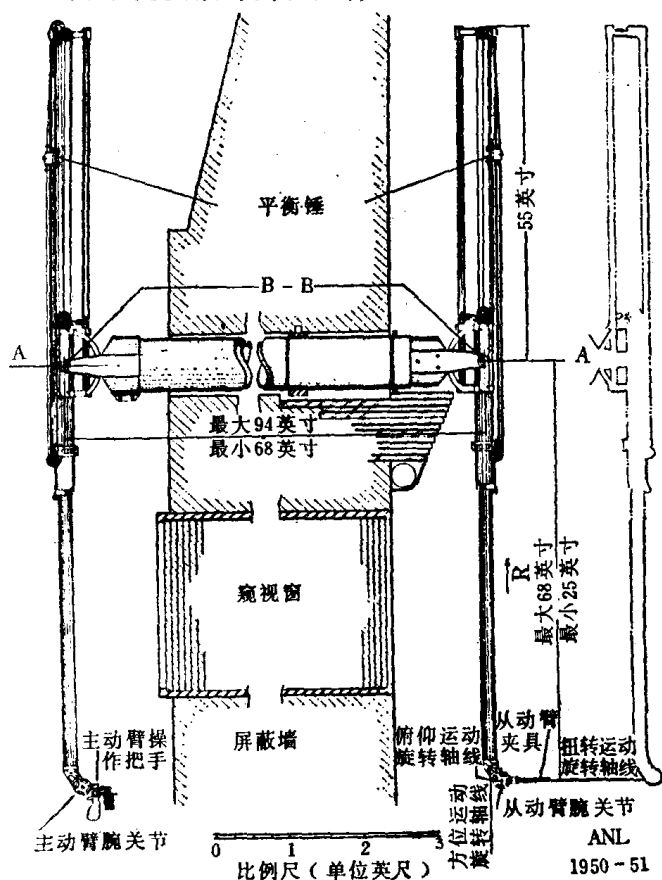
ANL研制成的M7型模拟机械手，是在小热室中使用的。它与M4型模拟机械手类似，也是通过热室顶部的一个孔口进入的。为了密封小热室以控制污染，在设计从动臂时提供了一个能固定在该热室顶部的密封套。可以使用一种特制的支架远距离更换它的夹具。所设计的机械手和密封套都能够容易地同设备脱开。直到64年为止，M7型模拟机械手仍有小批量商业性的生产，其荷载能力约为10磅左右（见图8）。

M8型模拟机械手

M6型模拟机械手

ANL研制成的M6型机械手（见图7），是在放射性水平为千居里级至兆居里级的设备室中使用的。因为设备室内的放射性造成的空气散射太高，因此设备室顶板的孔口不允许没有屏蔽。

主动臂和从动臂间的联动装置是



ANL
1950-51

图7 M6型机械连接主从机械手

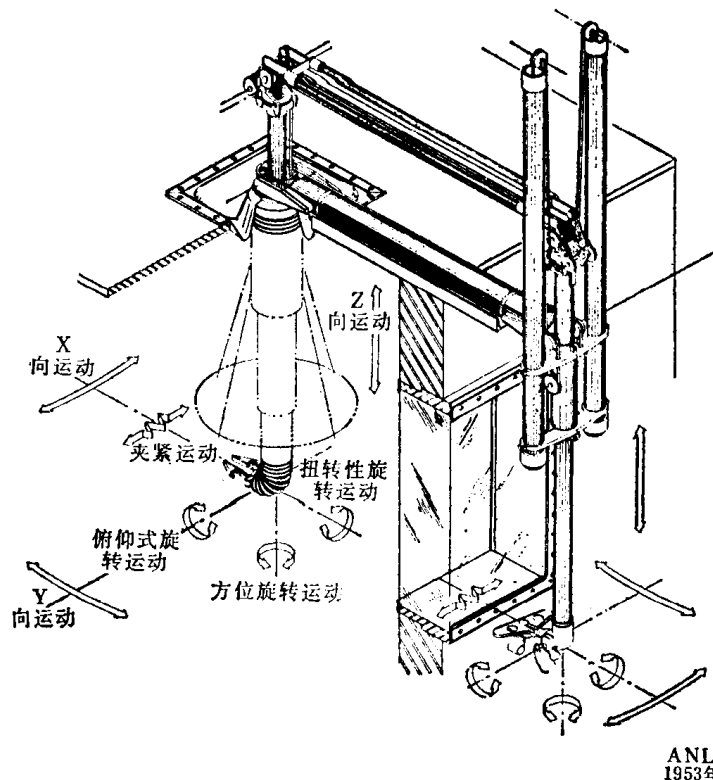


图8 在小热室中使用的M7型机械连接主从机械手（从动臂装了一个密封套）

ANL 所设计的M8型模拟机械手，是在千居里级至兆居里级的热室中使用的。它所覆盖的工作体积，比上述的任何一种模拟机械手所覆盖的都要大。为此，它采用了长的镶入管和长的主动臂及从动臂，并且把镶入管放在热室的高处，大约离地面有10英尺左右。所设计的从动臂，既可戴上密封套也可不戴密封套操作。M8型机械手所使用的夹具与M7型的相似，它们都可用一种特制夹具支架进行远距离更换。把从动臂转换到水平位置就可使机械手很容易地安在装置上或者从装置上拆下来。M8型机械手是一种商品性的机械手，它在美国和其它许多国家中都得到了广泛的使用，其荷载能力约为25磅（见图9）。

一些工业团体在M8型机械手的设计基础上，作了某些改

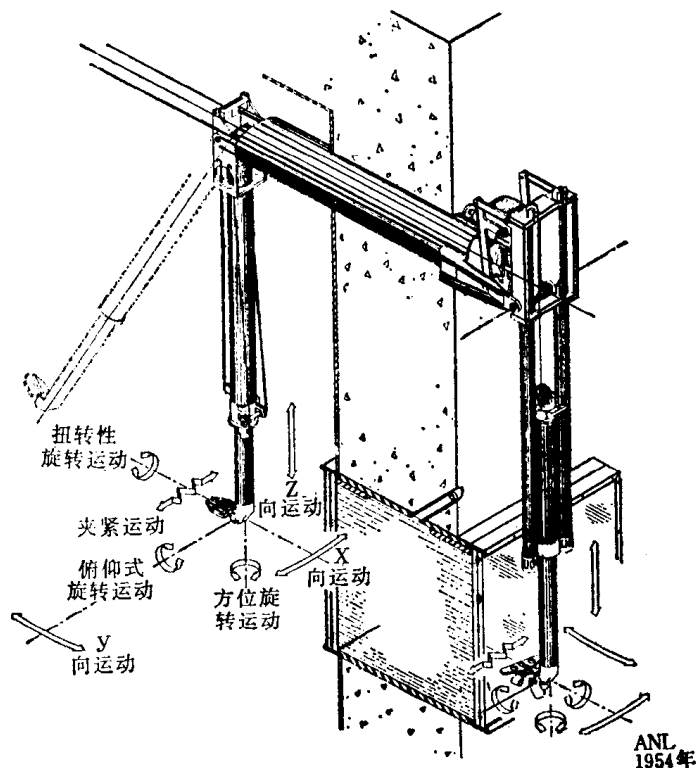


图9 按照常规方式安装的M8型机械连接主从机械手

进，制成了几种形式的机械手，也能在市场上买得到。其中有一种改进型，提供了X方向上的分度运动。在这些机械手的主要设计形式中，有一种机械手荷载能力为100磅，还有一种

是在高纯气氛中工作的气密性机械手。然而，另一种型式是在从动臂上装上了双伸缩管，以增加它的工作半径。

M9型模拟机械手

ANL机械手研制小组，由于强调研制电动主从机械手和其它工作，而没有把M9型模拟机械手的设计做完，但概念设计还是做完了。这个设计能提供比以往所有机械手都大得多的覆盖体积，而且它的从动臂可触及热室的顶板。也曾打算把它做成密封式的，以便使它能在惰性气氛条件下工作。M9型机械手的设计荷载能力为

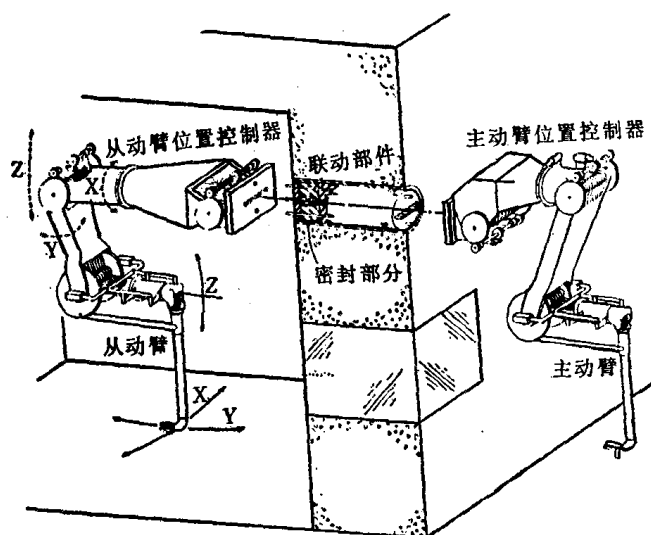


图10 M9型机械连接主从机械手的初步设计图样
(施工设计没有做完,在几何布置上它的工作体积比M8型的大得多。)
50磅(见图10)。

机械连接主从机械手的某些性能

从许多不同类型机械手的研制、试验、调整以及它们在热实验室中的使用情况，我们对模拟机械手的下列性能参数作了鉴定，得到了一些体会，现分别叙述如下。

机械连接主从机械手的可用性和局限性

从动臂和主动臂的形状相似，它们的每种运动间的相互关联是通过一些有效的机械联动装置达到的。已证明，这种主-从方式非常好，是获取良好的远距离操作性能的手段。正因为机械连接主从机械手结构简单，经济而又具有相当好的性能，所以，它们很可能会使用很多年。当然，这种机械手也有不少局限性，如(1)从动臂和主动臂彼此相连，而且同设备室也连在一起(故机动性差——译注)；(2)可覆盖的工作体积有限制；(3)因主从间的力比是1:1，加重了操作人员的负担，而且操作者有时还用两只手去操纵一只机械手；(4)对一些典型的操作方式，工作速度约为人手直接操作时的八分之一左右。虽然这类机械手可能而且也应该会有许多需要改进的地方，但，是否要改进，则取决于经济、时间以及技术能力等因素。

操纵机械手的培训问题

因为几乎所有人的手都具有一定的操作技能，所以只要经过适当时间的训练，还是很容易操纵机械手的。当一个人对机械手作了短时间的操作后(一般不到一小时)，他就会开始想到用从动夹具去作他要做的事情，而不会想到用主动把手去作些什么事情。当然对一位操纵机械手的新手来说，在从动臂只具有一副相向安装的钳指时，他还必须学习操作方法，要了解机械手在运动上有哪些局限性。根据个人的情况以及要完成的操作类别，可能要有几个星期或几个月的训练时间。

适应被操作物运动轨迹的顺从性问题

一只具有良好回动性能（有时称双边性能）的连接装置的机械连接主从机械手，它能使作用在从动臂上的力或动作以类似主动臂驱使从动臂动作的方式来驱动主动臂。机械手的这种双边性能（亦可称为可逆性），使从动臂能适应如手柄、枢轴、曲轴以及旋扭等部件运动时所经常要求的一些限制和运动轨迹。举例来说，如图5所示的那只机械手，它正在作拧动玻璃旋塞的操作。这种操作只是一种一个自由度的运动，即只是围绕着旋塞轴线的旋转运动。其它方向上的力均必须保持在安全限度之内，因为沿其它方向的运动可能会造成玻璃器皿破损。而图11示出的是正在使摇臂作旋转运动的一只机械手，它的运动轨迹将取决于摇臂，也就是说其运动轨迹应是一个以摇臂轴为轴心的完整圆弧。然而，摇臂的运动轴线未必能与机械手的任一运动轴线相重合。说明机械手顺从性的另一个例子是，用机械手把一根轴装进轴孔的操作（如图12所示）。这是一根阶梯轴，当它被装入轴孔前，它具有六个自由度，但在安装过程中，其自由度将不断减少，直到装好后只剩下一个作旋转运动的自由度了。在上述例子中，说明了机械手必须用限定的力沿着运动限定的方向顺应被操作设备的运动轨迹。

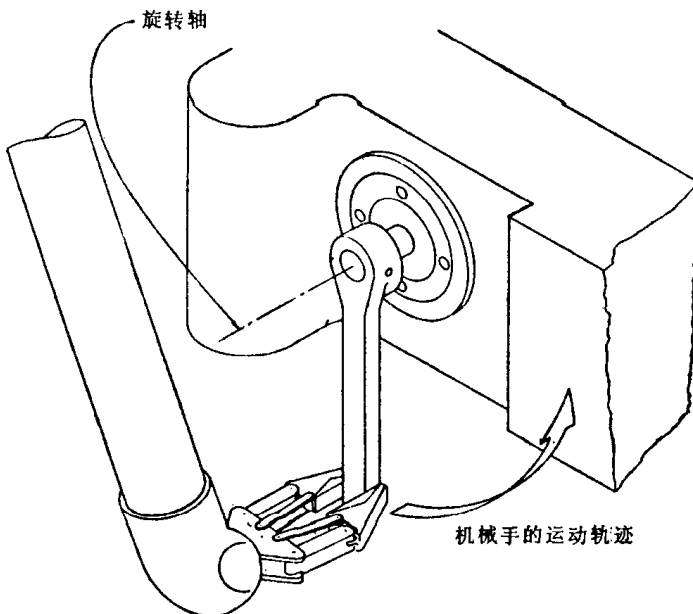


图11 机械手正在操作一根只能围绕着的旋转轴作旋转运动的摇臂

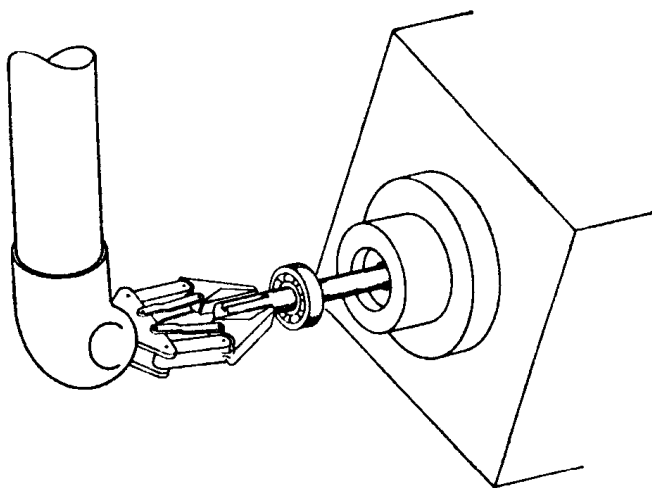


图12 正在用机械手安装的一根轴
(当该轴安装好后，其自由度就只剩一个了)

机械手的顺从性就是这样获得的。关于这一点，我们可以认为：单边电动机械手在这方面的情况很像一台铣床或压弯机。因为，它直接按照操作把手所指示的方向用力，而不顾及物件的限定轨迹，如果这时正当机械手使出最大操作力，则被操作物件就会折曲或者使某些机械部件折曲。

运动的自由度问题

除了抓握物件和定位物件需有七个独立的运动自由度外，许多机械手为了得到从动臂相

对主动臂的重新定位，还需有另一些运动自由度。也就是，往往希望采用附加的分度运动*（即开关控制的运动）来改变从动臂的位置。

七种基本运动的惯性

我们发现这七种基本运动的惯性值中，有些竟高达15到20磅左右，这是出乎我们意料之外的。机械手在作直线移动时，腕关节处的有效重量似乎对机械手的性能不会有什么严重的影响。但这并不是说惯性大就是好事，而是在没有省钱的办法保持低惯性时，还是可以允许的。腕关节运动（指俯仰和扭转——译注）的高惯性，似乎是更有害的。就整个机械手而言，其性能总是随着腕关节处的重量的增加而逐渐变坏的。

主从运动连接件的刚性问题

我们发现，在主动与从动的连接件中，弹簧的弹簧常数越大，机械手的力反应性即“感觉”性能也就越好。然而，我们也发现，当所传递的某一种移动的连接件中所用弹簧的弹簧常数低到25磅荷载下只拉长2到3英寸时，机械手的性能还是很好的。我们还进一步观察到，在角运动中弹性误差高达5度时，机械手的性能也没有受到严重的影响。所以说，主从运动连接件的刚性问题固然重要，但还不如干摩擦问题重要。

运动中的摩擦力

对一只性能良好的机械手来说，其所有的七种基本的独立运动的摩擦力应该是很小的。经验表明，摩擦力不应大于机械手最大荷载力的百分之一或百分之二。不过，经验也表明，即使摩擦力增加到机械手最大荷载力的百分之四或百分之五，模拟机械手的性能仍然远胜于单边机械手。

观察条件

我们体会到，为了能较好地使用模拟机械手进行操作，并具有较高的操作速度，必需要有良好的观察条件，而观察在热室中操作情况的最好方法之一，是在热室的屏蔽墙上安装高密度物质制成的大型屏蔽窥视窗。若能做得好，观察条件会是很好的。已经做成了能看清10到15英尺远处物件的、十分令人满意的窥视窗了。有时为了对局部作仔细的观察，还必须使用放大镜并辅以潜望镜观察。当观察出现物象色差时，那就只能采用单色光照明，有时就使用钠蒸气灯作为近似的单色光源。虽然窥视窗也会有明显的弯曲现象，但不会影响到操作。这是因为在指定的观察区附近所有物体的弯曲程度是相似的。

对电连接的或机械连接的主从机械手，均使用过三维或二维电视作过联动操作试验。如果立体电视（即三维电视——译注）对观察物的定位比较好，那也只是稍优于二维电视罢了。因此，当立体电视不能准确定位时，则采用二维电视定位更好些。

当操作者在进行一般性的热室操作时，我们发现个人的立体视觉的好坏对操作者的观察效果的影响并不大，其它方面的技术似乎更重要。对此可能有这么一种解释，即认为在一般情况下，没有立体观察手段的操作者，已经学会使用别的方法来提高判断观察深度了。因为大多数热室操作是在离操作者眼睛5至10英尺处完成的，所以在此范围内进行观察时，立体感会有所减弱。

* 参见本书第十四篇《ANL E3型电动主从机械手的设计和应用》一文中的译注。

对观察系统发展情况的回顾

在研制第一只模拟机械手样机期间，我们就认识到，要使机械手操作起来既有效而又快速，就需要具有良好的广角视野。为此，我们就开始研究获取良好的广角视野的各种方法。

研制了一种由四块反射镜组成的观察系统。这四块反射镜每两块为一组，相互连接起来，用热室外面的一个手柄操纵，能上、下搜索观察目标。这种系统经过了一段时间的使用后，觉得它的观察距离（视程）太长，操作也不太方便。

后来，就着手寻找高密度屏蔽材料的工作，这种屏蔽材料要对相当厚的屏蔽墙提供观察时所要求的条件，即足够的透明度和耐受大剂量的 γ 辐射。就在这时，橡树岭国立实验室（ORNL）使用了一种含有化学纯溴化锌溶液的小型圆形窥视窗。这种溶液抗强辐射性能并不好，而且也很贵。经过研究，除去溶液中令人讨厌的杂质，并没有明显地增加该溶液的商品出售价格。但并未就此而转用成本高得多的高纯度的溶液取代这种商品级的化学纯溴化锌溶液，同时又研制了一种还原剂，它能与溴化锌溶液受照射时分解出来的溴发生

反应。这种还原剂就是盐酸羟胺。加入大约0.1%浓度的盐酸羟胺后，就足可使充液窥视窗使用许多年。加入了上述稳定剂的溴化锌液窥视窗可耐到 5×10^4 伦琴/小时左右的剂量率，而不会使溶液中发生起泡现象。图13示出的是一种溴化锌液窥视窗，当其厚度为3英尺时对白光的透射率为40%。

在与 ORNL 研制液体窗的同时，ANL为了研制一种更耐辐照的玻璃窥视窗，而与一些玻璃制造厂合作制订了一项研制耐辐照玻璃的计划。研究结果是，用控制玻璃的成分和在玻璃中加入适量的铈作稳定剂的方法，制成了耐强辐射的玻璃。图14示出了一种5英尺厚的窥视窗的配置方式，它用在Ⅱ号钠冷实验快中子增殖堆（EBR-Ⅱ）的燃料循环装置中。因为这种窥视窗用了三种含铈量不同的玻璃，其透光性能得到了很大的改善。其具体的组装方式是这样的：在靠近操作者观察的一侧先安装三块含铈量低的厚玻璃；随后再安装两块中等含铈量的玻璃；最后安装的是一块含铈量高的玻璃。上述窥视窗的初始透光率约为16%，预计其透光率降到8%之前约可耐 10^9 伦琴的累积剂量。虽然这种窥视窗的抗辐照性能对实验性装置是合适的，但对处理生产堆元件的装置并不合适，因为处理生产堆元件的装置中的放射性强度更高些，而且操作时间也要更长些。所以，需要改进当前使用的窥视窗，使其抗辐照性能提高10倍或更高。

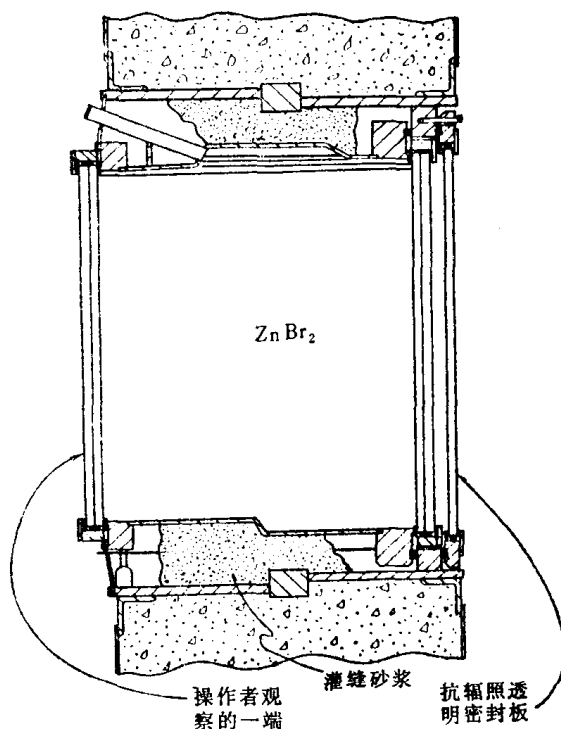


图13 溴化锌液屏蔽窥视窗
(1964年前后制成的)