

DOI: 10.3901/JME.2009.02.144

# 一维远程运动中心机构的型综合\*

裴旭 于靖军 毕树生 宗光华

(北京航空航天大学机械工程及自动化学院 北京 100083)

**摘要:** 一维远程运动中心机构的型综合是研究多自由度远程运动中心机构构型的基础。现有的远程运动中心机构的形式有限, 需要一种有效的方法构造出新的远程运动中心机构。对现有一维远程运动中心机构形式进行分类综合, 给出了现有一维远程运动中心机构的五种类型: 基于单个转动副、平面弧形滑轨、平行四杆、等比同向传动以及其他非严格意义上的远程运动中心机构。通过引入涵盖范围更广的平面虚拟中心机构, 提出一种将两个虚拟中心机构组合构造新型一维并联型远程运动中心机构的型综合方法。这种方法也适用于混联型远程运动中心机构的构型综合。针对不同的虚拟中心机构形式给出了具体实例, 得到若干新构型, 证明了型综合方法的有效性。

**关键词:** 远程运动中心机构 型综合 虚拟中心机构

**中图分类号:** TH112

## Type Synthesis for One-dimensional Remote-center-of-motion Mechanisms

PEI Xu YU Jingjun BI Shusheng ZONG Guanghua

(School of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University, Beijing 100083)

**Abstract:** The type synthesis for one-dimensional remote center of motion (RCM) mechanisms is the base of the study of multi-DOF RCM mechanism. Due to types of present RCM mechanisms are few, it is necessary to find an efficient way to create more new RCM mechanisms. Existing 1-DOF RCM mechanisms are classified. Five types of RCM mechanisms are given, such as single-revolute-joint, circular-prismatic-joint, parallelogram-based, synchronous-transmission-based and instantaneous RCM mechanisms. Based on a proposed concept of the planar virtual center (VC) mechanism, which is a more generalized concept than an RCM mechanism, an approach of type synthesis for 1-DOF RCM mechanisms is addressed by assembling two planar VC mechanisms. This approach can synthesize parallel or mixed RCM mechanisms. Concrete examples are given, and some new configurations are obtained, and which proves the effectiveness of the type synthesis method.

**Key words:** Remote center of motion mechanisms Type synthesis Virtual center mechanisms

## 0 前言

近年来, 对少自由度机器人机构的研究已成为机器人机构学领域的研究热点之一, 如少自由度并联机构。这是因为一旦明确了应用背景需求之后, 专用机器人机构的方案一般比通用结构更简单、易于控制且成本低廉。远程运动中心(Remote center of motion, RCM)机构就是这样一类具有特殊功用的新型少自由度机器人机构, 它越来越被认为有很广阔的应用背景。

RCM 机构可以使机构末端执行器绕其上某固定点做旋转运动, 而且该虚拟固定点在机构远端。这种机构被广泛应用于医疗外科辅助手术机器人的构型当中, 如 Da Vinci 手术机器人的末端操作装置就使用了这种结构。RCM 作为手术机器人的一部分使得手术过程中手术工具或者内窥镜有了一个相对固定的插入点, 从而增加了手术过程的安全性。

TAYLOR 等<sup>[1]</sup>首先提出了 RCM 的概念, 将其应用于外科手术辅助机器人中。在其后的研究中, 开发了多种 RCM 机构<sup>[2-4]</sup>。其他学者如 JENSEN<sup>[5]</sup>, 也对 RCM 机构进行了研究, 提出了一些种类各异的结构。王振华等<sup>[6]</sup>设计的主从式微创外科手术机器人的从操作手也采用了 RCM 机构。FARAZ 等<sup>[7]</sup>

\* 国家自然科学基金资助项目(50405007)。20080211 收到初稿, 20080911 收到修改稿

对 RCM 机构进行了初步的型综合，并对基于平行四杆的 RCM 机构进行了尺寸综合研究。但是，现有的 RCM 机构形式不多，而且对 RCM 机构的研究仍是比较初步的，大多数研究都是针对于某一种具体的机构形式进行的，很少有人对其进行系统的研究，也没有提出一种有效的型综合方法。

鉴于目前所应用的 RCM 机构多数为二维转动机构，而这些机构可以通过两个一维 RCM 机构组合得到，因此，对一维 RCM 机构的型综合研究将具有重要的意义，它是研究多自由度 RCM 机构的基础。本文在对现有一维 RCM 机构进行分类综合的基础上，着重讨论新型一维 RCM 机构的构造方法。这不仅可以扩展现有 RCM 机构的种类，也是多维 RCM 机构型综合的基础。

### 1 现有一维 RCM 机构的分类综合

#### 1.1 由单个转动副构成的 RCM 机构

如果构件的一端连接转动副，则此构件上转动副轴线外的点都绕该轴线转动。此时若将 RCM 取在转动副轴线远端的任意一点处，则可构成一维 RCM 机构。这是一类最简单的一维 RCM 机构，同时也是构造二维 RCM 机构最基本的元机构。图 1a 为这类机构的简图。图 1b 所示的 RCM 机构由多个转动副构成<sup>[8]</sup>。

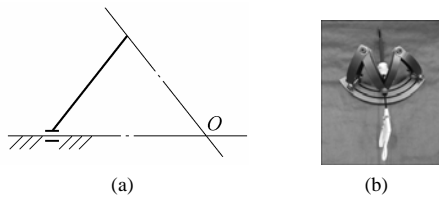


图 1 单个转动副的 RCM 机构

#### 1.2 平面弧形滑轨型 RCM 机构

有些 RCM 机构采用弧形滑轨(图 2a 为这类机构简图)，如 GUERROUAD 等<sup>[9]</sup>研制的用于眼科手术的机器人(图 2b)。这种形式结构简单，但中心固定、运动范围有限、占用空间较大、导杆加工精度需求高，而且较难解决驱动问题。

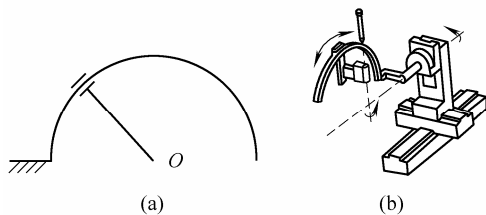


图 2 平面弧形滑轨型 RCM 机构

### 1.3 基于平行四杆的 RCM 机构

目前应用的 RCM 机构中另一种最常见的是基于平行四杆的构型<sup>[2-4, 6, 9]</sup>。图 3a 为平行四杆 RCM 机构的基本构型，机构中 BCDE 回路有冗余约束，通过去除不同的约束，可以衍生出其他几种结构形式(图 3b~3f)。其中图 3c~3e 中所示的构型由于易于加工而被经常采用。基于平行四杆的 RCM 机构具有运动范围较大、结构简单、驱动可放置在基座处等优点。此外，还可通过连杆的弯折变形灵活安排 RCM 的位置以适应不同的应用要求。缺点在于由于杆件之间的干涉以及平行四杆存在奇异位型，其运动范围受到限制；另外，由于铰链数目多造成机构刚度较差。

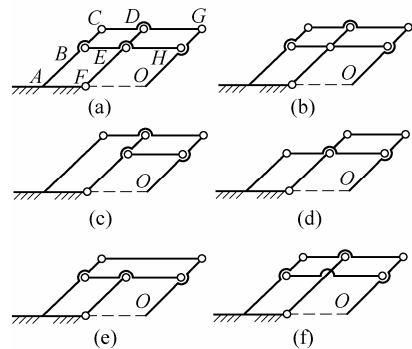


图 3 基于平行四杆的 RCM 机构

### 1.4 基于等比同向传动的 RCM 机构

如图 4a 所示同步带传动，传动比为 1，两个带轮转动方向相同。可以看出，这样一套等比同向的传动系统可以作为平行四杆机构的等效机构。任意等比同向的传动方式都可以用来代替平行四杆结构，如带传动、齿轮传动、链传动等。因此，可以使用等比同向传动机构代替基于平行四杆 RCM 构型中的一组平行四杆<sup>[2]</sup>，也可以代替全部的两组平行四杆机构。图 4b 所示为美国 John Hopkins 大学的 Mini RCM<sup>[5]</sup>，它使用了两组同步带结构。

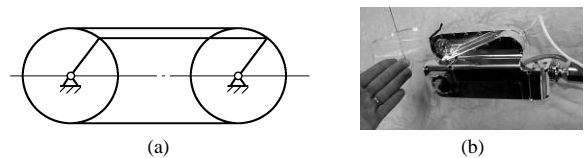


图 4 基于等比同向传动的 RCM 机构

### 1.5 其他类型的 RCM 机构

有些学者提出的 RCM 机构并不是严格符合 RCM 定义的，如 KIM 等<sup>[10]</sup>提出的 RCM 机构通过在末端杆件的两个位置安置移动副，并使其移动距离的比值等于它们到 RCM 距离的比值，这样末端杆件在绕远程中心转动的同时，还有沿轴线移动的

寄生运动,如图 5a 所示。如图 5b 所示的等腰梯形结构在杆件转动角度很小的时候,可以认为杆  $AB$  绕点  $O$  转动,即这种结构存在瞬时转动中心。当转动角度增大,误差增大,对于一般应用无法满足要求,但是在某些微动场合,可以将这种结构设计成柔性 RCM 机构。

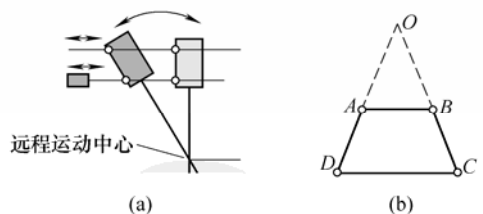


图 5 其他非完全 RCM 机构

## 2 平面虚拟中心机构

型综合的终极目标是构造新机构。为深入研究一维 RCM 机构的型综合,这里引入一种范围更广的机构形式:虚拟中心(Virtual center, VC)机构。由于研究的是一维 RCM 机构,因此这里着重讨论平面机构。

我们注意到,有一小部分平面圆周运动机构中,具有圆周运动性质的构件与其运动的圆心并非由转动副直接连接,这类机构在机构学上有一定的特殊性,这里对它们进行单独的研究。

如图 6 所示,如果平面机构中某一构件上的一点( $E$ 点)可以以平面上的一个定点  $O$  为圆心作圆周运动,且点  $O$  处并没有实际的转动副存在,即点  $E$  和点  $O$  之间存在着虚拟约束,这里称这类机构为平面 VC 机构。

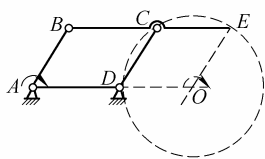


图 6 平行四杆 VC 机构

同样,如果平面机构中某一构件可以绕平面上的一个定点  $O$  转动,且点  $O$  处并没有实际的转动副存在,这里称这类机构为平面虚拟中心运动(Virtual center of motion, VCM)机构。

平面 VC 机构与平面 VCM 机构的区别在于,VC 针对的是构件上的某一点作圆周运动,而 VCM 机构中必须有一个构件绕虚拟中心转动。可以看出,如果 VC 机构构件上每个点都绕同一点进行圆周运动,那么这个构件就绕着固定中心转动。因此 VC

包含了 VCM 的范畴。

RCM 和 VCM 机构的区别只在于虚拟运动中心点相对机构的位置,因此 RCM 机构是 VCM 机构的一种特例。它们之间的关系如图 7 所示。

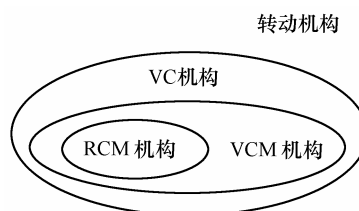


图 7 各概念关系图

鉴于平面 VC 机构是一个比平面 RCM 更加广泛的概念,因此可以考虑通过对 VC 机构进行一定的组合或者扩展来构造新的 VCM 机构。然后,在构建出的 VCM 机构中找出虚拟中心位置处于远端的那部分即为 RCM 机构。

VC 机构可以在一些机构构型手册中找到。图 8 给出了 VC 机构 4 种具体构型。

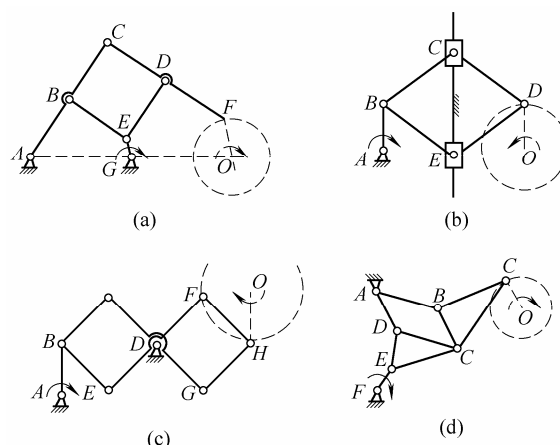


图 8 VC 机构的几种具体构型

图 8a 所示机构中各杆件的长度关系为  $l_{AC}/l_{CF}=l_{AB}/l_{BE}=l_{ED}/l_{DF}=l_{EG}/l_{FO}$ ,  $BCDE$  为平行四边形运动链。点  $A$ 、 $E$  和  $F$  位于一条直线上。虚拟中心的位置可由  $FO//EG$  和  $A$ 、 $G$ 、 $O$  三点共线来确定。当构件  $EG$  绕点  $G$  旋转时,点  $F$  绕点  $O$  转动。图 8b 所示机构左右对称,  $C$ 、 $E$  处为移动副,  $BCDE$  组成四边长度相等的平行四边形。虚拟中心点  $O$  和点  $A$  关于  $CE$  对称。图 8c 所示机构中  $CG$  和  $EF$  与机架铰接于点  $D$ , 在点  $D$  两边分别组成四边长度相等的平行四边形。虚拟中心点  $O$  和点  $A$  关于点  $D$  中心对称。图 8d 所示机构为一个 Sylvester 仿图仪,  $ABCD$  为平行四边形,  $\triangle BGC \cong \triangle DCE$ , 则点  $E$  输入的轨迹和点  $G$  输出的轨迹相似,  $FE$  和  $OG$  延长线的夹角  $\angle GAE = \angle CDE = \angle GBC$ ,  $l_{FE}/l_{OG} = l_{AE}/l_{AG} = l_{DE}/l_{DC}$ 。

### 3 一维 RCM 机构的型综合

两个 VC 机构通过组合可以构造一个 RCM 机构, 为此给出一个定理: 如果一个刚体上存在不重合的两个点, 它们的运动轨迹为绕某一固定点的同心圆, 并且, 这两点和圆心不共线, 则此刚体必然绕此固定点作圆周运动。

证明: 如图 9 所示, 设  $A_1$  和  $A_2$  为刚体上的两个不重合的点, 它们的运动轨迹为绕固定点  $C$  为圆心的圆。点  $P$  为刚体上的任意一点, 那么只需证明点  $P$  的轨迹也为圆心为  $C$  的圆, 即可得证。不失一般性, 设  $C$  为坐标原点。

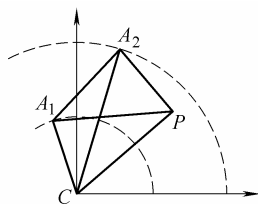


图 9 平面刚体上两点运动轨迹

由假设条件可知, 在刚体运动时,  $l_{CA_1}$ 、 $l_{CA_2}$  为常数, 又  $A_1$ 、 $A_2$  和  $P$  为刚体上的点,  $l_{A_1A_2}$ 、 $l_{A_1P}$  和  $l_{A_2P}$  也固定不变。 $\angle A_1A_2P$  和  $\angle CA_2A_1$  为常数, 可推导得  $\angle CA_2P$  为常数。同时,  $l_{CA_2}$  和  $l_{A_2P}$  为常数, 推得  $l_{CP}$  为常数, 即点  $P$  绕  $C$  作圆周运动, 证毕。

这样, 如果将两个具有相同虚拟中心的 VC 机构用一个刚体连接起来, 且刚体上两个连接点的运动轨迹为以同一点为圆心的同心圆, 则由上述定理可知此刚体绕该固定点作圆周运动。

利用上面的定理可以很简单地构造出一维并联 RCM 机构, 具体步骤如下。

(1) 选择两个 VC 机构作为元机构, 它们可以相同, 也可以不同。例如图 10a 中选择了两个相同的平行四杆 VC 机构。

(2) 调整两个 VC 机构的位姿、尺寸以及相对位置, 使它们的虚拟中心重合, 并使两个 VC 机构上绕其虚拟中心转动的点(如图 10a 中的点  $A$ 、 $B$ )的连线不通过虚拟中心。例如图 10a 中两个 VC 机构对称放置, 虚拟中心在  $O$  点重合。

(3) 在两个 VC 机构各自绕其虚拟中心转动的点处添加转动副, 并将两个铰链用构件连接, 所得到的机构为一个 VCM 机构, 新加的构件将绕着虚拟中心转动。如果构建出的 VCM 机构其虚拟中心位置处于远端即为 RCM 机构。

图 10 所示为利用上述步骤综合得到的两种新构型。其中图 10a 所示的 RCM 机构中, 构件  $AB$  绕机构外的一点  $O$  转动; 图 10b 所示的构型为两个图

10a 所示的 VC 机构对称组合而成, 这种机构的 RCM 可距离机构较远, 且运动空间较大, 可以避开平行四杆的奇异位形位置。这种方法的优点还在于可以灵活地安排 RCM 的位置, 使其变成一个可调 RCM 机构。即通过改变  $A$ 、 $B$  之间的距离, 可以改变点  $O$  相对构件  $AB$  的位置。

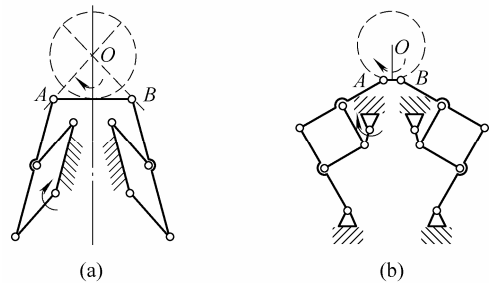


图 10 一维并联 RCM 机构

图 11 给出图 10a 所示机构的一种具体实现形式。通过驱动与底座相连的连杆, 使上部的动平台绕机构外的一点转动, 调节与动平台连接的双头螺栓, 可改变动平台到 RCM 的距离。这个机构可用作一维的调平或对准平台。

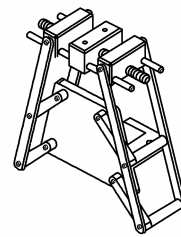


图 11 一维并联 RCM 机构的具体结构图

两个 VC 机构进行组合, 不仅可以构造一维并联 RCM 机构, 也可以构造出有闭合回路的混联式 RCM 机构, 类如第 1 节所述的基于平行四杆的 RCM 机构(图 3), 步骤如下。

(1) 选择两个 VC 机构作为元机构, 它们可以相同, 也可以不同。两个 VC 机构的驱动杆(如图 6 中的杆  $AB$ )和转动点与虚拟中心点的连线(如图 6 中的  $EO$ )在转动过程中的运动规律始终保持相同。图 12a 的元机构是两个相同的平行四杆 VC 机构, 而图 12b 的元机构为 1 个图 8a 所示的仿图仪 VC 机构和 1 个平行四杆 VC 机构。

(2) 调整两个 VC 机构的位姿、尺寸以及相对位置, 使它们的驱动杆和部分杆件重合, 且虚拟中心重合。由于这里两 VC 机构的驱动杆重合, 所以两个虚拟转动点和虚拟中心可以共线。图 12a 中两个平行四杆 VC 机构的驱动杆  $AB$  和  $A'B'$ 、杆  $CD$  和  $C'D'$  重合, 虚拟中心为  $O$  点。图 12b 中平行四杆 VC 机构的驱动杆为  $C'D'$  杆, 它与仿图仪 VC 机构的  $EG$  杆重合, 杆  $A'B'$  和  $AB$  重合。

(3) 在两个 VC 机构绕各自虚拟中心转动的点(如图 12a 中的点  $E$ 、 $E'$ ，图 12b 中的点  $F$ 、 $E'$ )处添加转动副，并将两个铰链用构件连接，同时去除具有冗余约束的杆件，所得到的机构即为一个 VCM 机构。如果构建出的 VCM 机构其虚拟中心位置处于远端即为 RCM 机构。

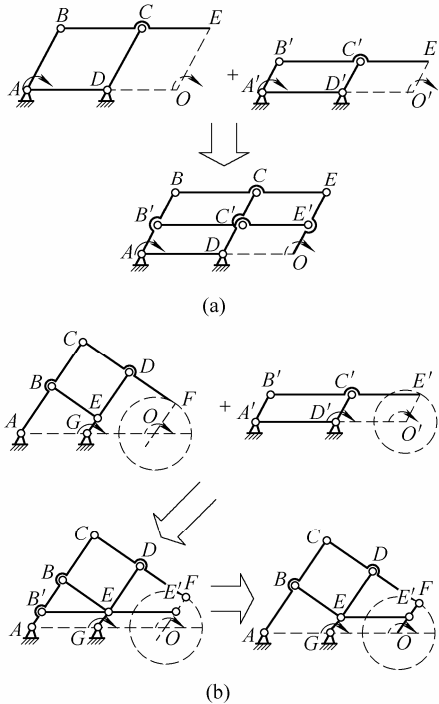


图 12 一维混联 RCM 机构

图 12 给出了两个具体 RCM 机构的型综合过程。图 12a 为基于平行四杆的 RCM 机构，而图 12b 综合出一种新的 RCM 机构。

## 4 结论

(1) 给出了 RCM 的定义，并对现有一维 RCM 机构进行了分类。

(2) 给出涵盖范围更广的 VC 机构及 VCM 机构的概念，扩展了 RCM 机构研究的范围。并找到一种通过 VC 机构构造 VCM 机构的方法。

(3) 通过这种方法，利用两个 VC 机构进行组合可以构造一个一维并联型和混联型 RCM 机构。针对不同的 VC 机构形式给出了一些例子。通过这种方法已经综合出了一些有用的 RCM 机构。

## 参 考 文 献

- [1] TAYLOR R H, FUNDA J, LAROSE D, et al. A telerobotic system for augmentation of endoscopic surgery[C]//14th IEEE Medicine & Biology Conf., October 29- November 1, 1992, Paris. USA: IEEE, 1992: 1 054-1 056.
- [2] TAYLOR R H, FUNDA J, GROSSMAN D D, et al. Remote center-of-motion robot for surgery : US, 5397323[P]. 1995-03-14.
- [3] TAYLOR R H, FUNDA J, ELDRIDGE B, et al. A telerobotic assistant for laparoscopic surgery[J]. Engineering in Medicine and Biology Magazine, 1995, 14(3): 279-288.
- [4] TAYLOR R H, JENSEN P, WHITCOMB L, et al. A steady-hand robotic system for microsurgical augmentation[J]. The International Journal of Robotics Research, 1999, 18(12): 1 201-1 210.
- [5] JENSEN J F. Remote center positioner: US, 20050119638 [P]. 2005-06-02.
- [6] 王振华, 洪鹰, 王国栋, 等. 主从式微创外科手术机器人主手设计[J]. 机械科学与技术, 2006, 25(5): 542-544. WANG Zhenhua, HONG Ying, WANG Guodong, et al. Structural design of master-slave minimally invasive surgical robots' manipulators[J]. Mechanical Science and Technology, 2006, 25(5): 542-544.
- [7] FARAZ A, PAYANDEH S. A robotic case study: Optimal design for laparoscopic positioning stands[C]// International Conference on Robotics and Automation, April 20-25, 1997, Albuquerque, New Mexico. USA: IEEE, 1997: 1 553-1 560.
- [8] LUM M. Kinematic Optimization of a 2-DOF spherical mechanism for a minimally invasive surgical robot[D]. Washington: University of Washington, 2004.
- [9] GUERROUAD A, VIDAL P. S.M.O.S.: Stereotaxical microtele-manipulator for ocular surgery[C]// The Annual Int'l Conf. of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, Nov. 9-12, Seattle, WA. USA: IEEE, 1989: 879-880.
- [10] KIM D, KOBAYASHI E, DOHI T, et al. A new, compact MR-compatible surgical manipulator for minimally invasive liver surgery[C]// 5th International Conference on Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention, September 25-28, 2002, Tokyo, Japan. Berlin: Springer, 2002: 164-169.

作者简介: 裴旭, 男, 1979 年出生, 博士研究生。主要研究方向为机器人机构学和柔性机构等。

E-mail: peixu@me.buaa.edu.cn

于靖军, 男, 1974 年出生, 博士, 副教授。主要研究方向为机器人机构学和柔性机构等。

E-mail: jjyu@buaa.edu.cn

毕树生, 男, 1966 年出生, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为机器人机构学、柔性机构和仿生机器人等。

宗光华, 男, 1943 年出生, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为机器人机构学、全柔性机构、自主移动机器人技术和机器人视觉等。