

变胞原理和变胞机构类型*

戴建生

(伦敦大学国王学院机械工程系 伦敦 WC2R 2LS 英国)

丁希仑

(北京航空航天大学机器人研究所 北京 100083)

邹慧君

(上海交通大学机械工程与动力学院 上海 200030)

摘要: 追述了变胞机构的发展,首次阐述了变胞原理及其在变胞机构的应用。进一步探讨了变胞机构与其他机构的区别,提出了变胞机构的延伸和分类,有助于挖掘具有变胞特性的原有机构和设计构造新的变胞机构。探讨了变胞方式,阐明了数学模型在变胞构态演变中的运用。并进一步运用各种例子,探讨了变胞机构在国内外的发展和在机器人以及制造业的应用,尤其是变胞原理在机器人及机器手的应用。该研究奠定了变胞机构的理论基础,为变胞机构新的研究和发展开拓了道路。

关键词: 变胞机构 原理 数学模型 应用

中图分类号: TH112

0 前言

机构是机器和机器人的基本组成。机构学奠定了机械工程、仪器工程和控制工程等多种学科的理论基础,并广泛采用了各种数学工具,数学背景雄厚。从最古老的杠杆原理到 18 和 19 世纪盛行的应用数学^[1]都延伸到机构分析与综合。20 世纪下半叶兴起的现代机构研究和机器人的发展,使机构学已经发展成一门成熟的科学。随着机构学的发展,应用于机构研究的旋量理论、代数、影射几何、群论以及图论也有了新的含义和发展。

然而,机构的发掘和机构学的发展没有停止。尤其在 20 世纪 90 年代至今,一些老机构的新含义被开掘,一些新型机构出现。其中具有代表性的是基于机构的自我组合和自我重构而出现的新机构。其是源于人类开发大自然和开拓外空间的实际需求,是对传统的定自由度和定拓扑结构的机构的一个新的突破和拓宽。

变胞机构^[2,3]是在这一机构学的新的发展下于 1998 年提出的。这一新类型机构能够根据环境和工况的变化和任务需求,进行自我重组和重构,具有极其广泛的应用。介绍了变胞机构的提出过程和目前国内外的的发展状况,引出了变胞机构的各种方式,

进而提出变胞机构的几种类型和变胞的几种方式,由此展示了开发变胞机构的新途径。并进一步阐述了变胞机构原理,阐明了变胞机构与其他机构的区别以及新变胞机构的开发途径。

1 变胞机构的发展

变胞机构的研究可以追述到 1995 年。这一研究起源于应用多指手进行装潢式礼品纸盒包装的研究^[4]。礼品纸盒类似于花样折纸可用于衍伸出新的机构^[5,6]。用折纸来研究机构可追述到 Cundy 和 Rollett^[7]在 1952 年的研究。借用折痕为旋转轴,连接纸板为杆件,折纸可以构造出一个机构。其典型的例子可见图 1 纸折的 Sarrus 机构。

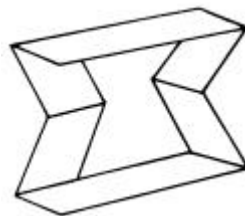


图 1 折纸作出的 Sarrus 机构

这一机构是在“L”纸板条上作折痕,折叠并连接纸板条尾端而成。在研究折纸式装饰性纸盒和研制自动操作多指手的过程中,戴建生和 J. J. Rees^[2,3]发现了新一类机构。这一新类型机构除了具有类似可展式机构的高度可缩和可展性外,还可改变杆件数,改变拓扑图并导致变自由度。用进化论和生物

* 国家自然科学基金资助项目(50075009)。20040512 收到初稿,20050107 收到修改稿

学细胞分裂重构和胚胎演变的观点来解释,这一机构具有变胞功能。由此,一些机构由装饰性折纸抽象演变并脱颖而出。

典型的球面变胞机构可以从一常见的折纸抽象演变而生,见图 2 和图 3。

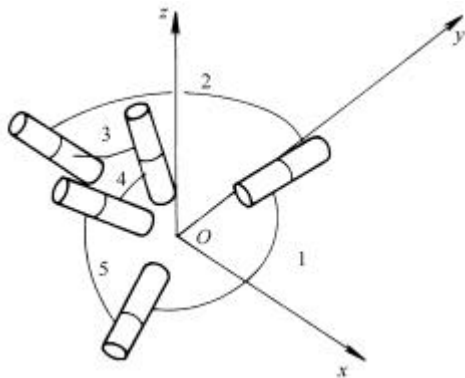


图 2 球面变胞机构

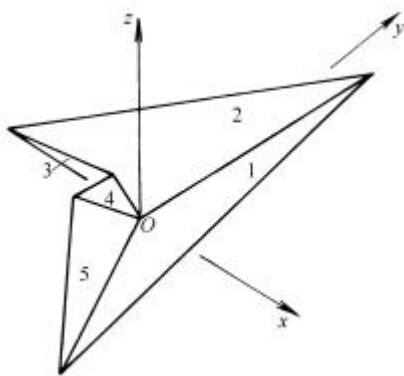


图 3 相应的花样折纸

这一研究于 1998 年在亚特兰大召开的第 25 届 ASME 机构学双年会上发表^[2],并获得了 ASME 机构学委员会的双年度最佳论文奖,从而列入 20 世纪 90 年代获奖的唯一的四篇学术论文。

继此之后, J. S. Dai 和 J. J. Rees^[8]在 1999 年探讨了变胞机构的构态变换问题。J. S. Dai 和 Q. X. Zhang^[9]在 2000 年提出了构态变换的矩阵演变。由此引起了广泛的学术研究兴趣。Brigham Young 大学的 J. J. Parise 等于 2000 年引伸出了变胞正交机构^[10]。该机构可运用于正交平面并有变胞特性。

2001 年 Lee 和 J. M. Hervé^[11]提出了断续自由度连杆机构。该机构延伸于魔方原理,具有变杆件数和变自由度的变胞原理。这一机构扩充了变胞机构文库,成为变胞机构的一个分支—变胞运动限定机构。2002 年,李端玲,戴建生和张启先^[12]应用拓扑学研究变胞机构,探讨了变胞机构的综合,提出了变胞机构的综合算法。2003 年, D. W. Carroll 等进一步提出了柔性变胞机构^[13],在变胞过程中杆件柔

度完成变胞过程。2004 年, C. H. Liu 和 T. L. Yang^[14]研究了变胞机构的变胞方式,提出了利用杆件的耦合,利用杆件连接关系的变化和运动副的特性变化,以达到变胞,同时提出了一些值得深思的问题包括挖掘一些具有变胞特性的现有机构。在这一年, D. L. Li, J. S. Dai 等^[15]从邻接矩阵演算出发,推出了一变胞机构综合的规律,提出从拓扑理论^[16]开掘新的变胞机构。同年, J. S. Dai 和 J. J. Rees^[17]进一步推广了变胞机构拓扑变化的数学模型,为其推广和应用奠定了基础。

2 变胞原理和变胞特性

变胞原理就是采用特定方法,使机构的拓扑结构加以变化,以实现机构自由度的变化。通常该机构在至少一次自由度变化以后,仍然具有运动能力。所谓的特定方法是采用机构自身的物理限定,转换和运动。不同的特定方法决定了变胞机构的分类。这一原理还体现在机构构件数目变化,从而引起机构外形变化以达到变胞,自我重组和重构是变胞机构一个特性。

这一原理区分了变胞机构与一般的可展式机构^[18]。可展式机构广泛用于航空航天,诸如卫星天线和太阳能帆板。该机构具有一次自由度变化,但在自由度变化以后,机构处于零自由度状态。虽然某些机构在终态也处于零自由度状态,但变胞机构至少在一次自由度变化以后仍可继续运行。如图 2 中的典型的球面变胞机构,其自由度可由 2 变到 1 进而由 1 变到零。

变胞原理也区分了变胞机构与运动转向机构^[19]。运动转向机构是当机构超过某一点后,运动空间发生变化,自此引起新的约束,从而自由度发生变化。但变化前后,杆件数目不变,从而机构的拓扑结构不变。典型的运动转向机构可见图 4。图 4a 给出转向前的机构,自由度为 3。图 4b 给出转向后的机构。虽杆件数不变,但转动副 K 旋转后的方位变化引起了对杆组的新约束,从而自由度减为 2。

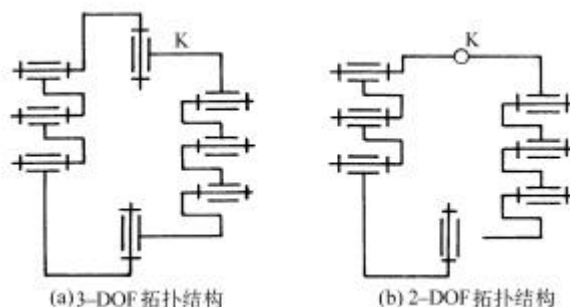


图 4 运动转向机构

如果将运动转向机构延伸到运动限定机构^[20]，这就变成了变胞机构的一个分支。这一机构在 2001 年提出，符合变胞原理。机构运行造成杆件数变化，从而引起自由度变化。

变胞正交机构^[10]是变胞机构在特定活动空间的分支。因此，基于变胞机构的原理，变胞机构的研究在延伸，变胞机构的特征正在被开发^[8,15,17]，变胞的原理也在发展。

3 变胞机构构态及演变的数学描述

变胞机构的特征是构态变化。变化前后的构态是不同构的，这可由图 2 发展出的不同构态发现。每一构态可用拓扑图 G 和邻接矩阵 A 描述，邻接矩阵 A 给出了机构杆件间相互关系和每一杆件的邻接特征，每行和相应的列代表一杆件。

$$A_0 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

不同构态可以通过变胞方式进行变化，不同构态的拓扑图 G 和邻接矩阵 A，可以通过数学演变而实现。这一数学演变由三个初等变换矩阵完成。第一个初等变换矩阵 U_1 ，通过行列相加将一杆件特征传递到另一杆件。第二个初等变换矩阵 U_2 通过行列交换进行杆件变化。第三个初等变换矩阵 E_3 ^[17, 21] 通过消除行列以达到去除变胞合并后的杆件。因此，变胞可分解成三步完成。每一步由一个初等交换矩阵完成，这可表示为下列方程

$$A_2 = (E_{13}U_{12}U_{11})A_1(E_{13}U_{12}U_{11})^T \quad (2)$$

矩阵变换中，前乘初等变换矩阵用于变换行，后乘初等变换矩阵用于变换列。对于任一构态的变换，上式可写为

$$A_{i+1} = (E_{i3}U_{i2}U_{i1})A_i(E_{i3}U_{i2}U_{i1})^T \quad (3)$$

对于连续构态变换，上式可写为

$$A_n = \prod_{i=n-1}^1 E_{i3}E_{i2}E_{i1}A_1 \prod_{i=n-1}^1 (E_{i3}E_{i2}E_{i1})^T \quad (4)$$

矩阵变换中采用模数 2 算法^[21]。

4 变胞机构的类型

变胞机构是新一类具有自我重组和重构特征的

机构，机构的类型正在不断被发现和完善。

按所属的运动空间划分，机构可分为平面机构，球面机构和空间机构。典型的球面机构可体现在伦敦大学国王学院戴建生开发的变胞手^[17, 22]基于图 2 的变胞机构，其变胞过程可描述为

$$A_1 = (E_{03}U_{02}U_{01})A_0(E_{03}U_{02}U_{01})^T \quad (5)$$

式中

$$U_{01} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$U_{02} = I \quad (7)$$

$$E_{03} = [I_4 \quad \theta] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

典型的球面机构可展现在复合折六面体机构^[17]，见图 5。转动副 $S_{1,2}$ 、 $S_{2,3}$ 、 $S_{3,4}$ 、 $S_{4,10}$ 和 $S_{10,1}$ 组成球面四杆机构外联三运动链。

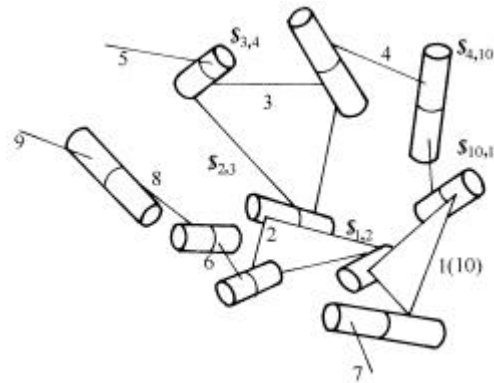


图 5 复合折六面体机构

连杆 5 在运动中与杆 6 合并，该机构拓扑结构改变，变成如图 6 所示。

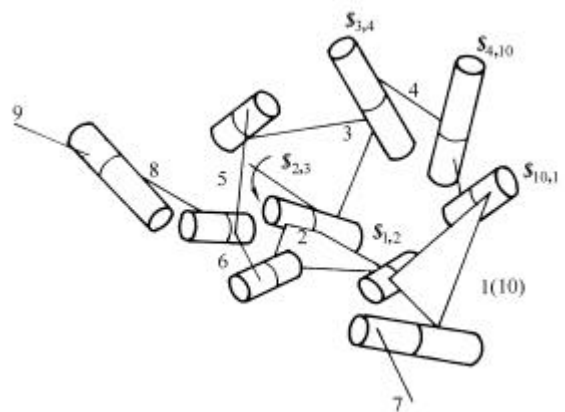


图 6 球面四杆外联三运动链机构

变胞过程可描述为

$$A_2 = (E_{10}U_{1,10})A_{1c}(E_{10}U_{1,10})^T \quad (9)$$

根据机构的变胞方式,机构可分为锁定变胞、单向限定变胞和共件变胞。锁定变胞可使转动构件锁定^[17]。典型的单向限定变胞可使位置和运动限定^[2,8,20]。共件变胞^[8,17]如图2转化出的四杆球面机构。

除此,多种变胞方式可以组合应用产生一新的变胞机构,不同组合给予机构不同的拓扑结构和自由度。

根据变胞机构的运动副,机构可分为纯旋转副和非纯旋转副机构。前者可由叠纸抽象而出,其变胞方式一般由邻接杆件的合并来实现自由度的变化,后者可由邻接杆件或旋转副特性变化以完成变胞。

非机构变化引起的自由度变化的机构不应当列入变胞机构。

变胞机构还可以有更细的分类。变胞机构可以从原有机具有变胞原理中开发出来,可以从复杂的生活点缀品中提炼出来,可以从装饰纸盒中衍伸出来,也可以从拓扑综合基于变胞原理构造出来。

在变胞机构的研究中,拓扑分析和综合是开发新变胞机构的手段^[15,16];几何分析是研究变胞机构规律的途径^[23~25];群论和旋量理论是分析变胞机构的有力工具^[5,26~29]。

5 变胞机构的应用

变胞机构有着广泛的应用前景,尤其在机器人和制造业中。在机器人结构研究中,变胞机构带来了新的发展。伦敦大学国王学院利用变胞原理开发研制出变胞手^[22]。其结构和自由度在运行中变化,由此向三指手提供了额外的自由度,便于控制手指抓持方位和灵巧度。北京航空航天大学丁希仑等开发了火星变胞探测车^[30]。该车利用变胞原理,采用杆件变换,使其变形并变换不同的行走方式以适应不同的需求和不同的环境。新加坡南洋理工大学Y. M. Chen^[31]等开发了变胞水下车。利用变胞概念,变换车形来完成所需的工作任务。

除了应用于机器人结构演变和发展,变胞原理已逐渐应用于制造业中。Brigham Young 大学的D.W.Carroll 等提出了机械制造业中变胞原理^[13]。这一过程是基于正交机构,变胞机构和柔性机构的交集,在加工制造中进行机构的演变。这种演变提供了合理的加工工艺和优化了夹具的应用,有利于简化和加速加工制造,缩短加工周期。

6 结论

在回顾了变胞机构的起源及发展的基础上,阐明了变胞原理,引进了机构构态变换和自由度变化的相关性。根据变胞机构的拓扑及自由度变化的特征,给出了变胞机构与展开式机械,并与运动转向机构区别,给出了变胞机构的分支和分类。进而给出了变胞机构构态演变的数学模型,提出了变胞机构的若干方式。新变胞机构由此脱颖而出,具有变胞原理的现有机构也由此挖掘出来。进一步探讨了变胞机构在机器人机构上的应用并探讨了变胞原理在加工制造中的新应用。开拓了新的研究思路,提供了研究变胞机构的基础和方法,从而为变胞机构进一步发展和应用开发奠定了理论和实践的基础。

参 考 文 献

- 1 Dai J S. From Rodrigues' parameters to the finite twisting motion of a rigid body. In : Proc. 11th World Congress in Mechanism and Machine Science, Tianjing, 2004, China : Mechanical Engineering Press, 2004 : 944~947
- 2 Dai J S, Rees J J. Mobility in metamorphic mechanisms of foldable/erectable kinds. In : 25th ASME Biennial Mechanisms and Robotics Conference, Baltimore, 1998, New York : ASME, 1998
- 3 Dai J S, Rees J J. Mobility in metamorphic mechanisms of foldable/erectable kinds. ASME Transaction, Journal of Mechanical Design, 1999, 121(3) : 375~382
- 4 Dai J S. Conceptual study of the dexterous reconfigurable assembly and packaging system. Science and Technology Report : PS 960326, Port Sunlight : Unilever Research, 1996
- 5 Dai J S, Rees J J. Kinematics and mobility analysis of carton folds in packing manipulation. Journal of Mechanical Engineering Science, Proc IMechE, 2002, 216(C10) : 959~970
- 6 Dai J S, Rees J J. Structure and mobility of cartons in a packaging process. Science and Technology Report : PS 970067, Port Sunlight : Unilever Research, 1997
- 7 Cundy H M, Rollett A P. Mathematical Models. New York : Tarquin Publications, 1951
- 8 Dai J S, Rees J J. Configuration transformations in metamorphic mechanisms of foldable/erectable kinds. In : Proc of 10th World Congress on the Theory of Machines and Mechanisms, Finland, 1999, Oulu : University of Oulu, 1999 : 542~547

- 9 Dai J S, Zhang Q X. Metamorphic mechanisms and their configuration models. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2000, 13(3) : 212~218
- 10 Parise J J, Howell L L, Magleby S P. Ortho-planar mechanisms. In : Proc. 26th Biennial Mechanisms and Robotics Conference, Baltimore, 2000, New York : ASME, 2000
- 11 Lee C C, Hervé J M. Discontinuous mobility of Four-link mechanisms with revolute, prismatic and cylindrical pairs through the group algebraic structure of the displacement set. In : 8th International Conference on the Theory of Machines and Mechanisms, 2001, Czech Republic : Liberec Elsemere, 2001 : 5~7
- 12 李端玲, 戴建生, 张启先, 等. 基于构态变换的变胞机构综合. *机械工程学报*, 2002, 38(7) : 12~16
- 13 Carroll D W, Magleby S P, Howell L H. Simplified manufacturing through a metamorphic process for compliant Orthoplanar mechanisms. In : 2003 ASME Design Engineering Technical Conference, Chicago, 2003, New York : ASME, 2003
- 14 Liu C H, Yang T L. Essence and characteristics of metamorphic mechanisms and their metamorphic ways, In : Proc. 11th World Congress in Mechanism and Machine Science, Tianjing, 2004, China : Mechanical Engineering Press, 2004 : 1 285~1 288
- 15 Li D L, Dai J S, Sun H. Configuration based synthesis of a Carton-like metamorphic mechanism of foldable and erectable. *Journal of Engineering Design*, 2005. 16(4) : 375~386
- 16 杨廷力. 机器人机构拓扑结构学. 北京 : 机械工业出版社, 2003
- 17 Dai J S, Rees J J. Matrix representation of topological changes in metamorphic mechanisms. *ASME Transaction, Journal of Mechanical Design*, 2005, 127(4) : 675~682
- 18 Costabile V, Lumaca F. New antenna deployment, pointing and supporting mechanism. In : Proc. 30th Aerospace Mechanisms Symposium, Los Angeles, 1996, California : NASA Conference Publication, 1996 : 65~76
- 19 Wohlhart K. Kinematotropic linkages. In : Lenarcic and Parenti-Castelli eds, Recent Advances in Robot Kinematics, 5th International Symposium on Advances in Robot Kinematics, Czech Republic, 1996, Liberec : Kluwer Academic Publishers, 1996 : 59~368
- 20 Lee C C, Hervé J M. Discontinuous mobility of one family of spatial 6R mechanisms through the group algebraic structure of displacement set. In : 27th ASME Biennial Mechanisms and Robotics Conference, Montreal, 2002, New York : ASME, 2002
- 21 Gillie A C. *Binary Arithmetic and Boolean Algebra*. New York : McGraw-Hill, 1965
- 22 Dai J S. The metamorphic robotic hand, UK patent application GB04/09548.1, 2003-04-10
- 23 Dai J S, Kerr D R. Geometric analysis and optimisation of symmetrical watt 6-bar mechanisms. *Journal of Mechanical Engineering Science, Proc IMechE*, 1991, 205(3) : 275~280
- 24 张启先. 空间机构的分析与综合. 北京 : 机械工业出版社, 1984
- 25 Dai J S, Sodhi C, Kerr D R. Design and analysis of a new six-component force transducer using the concept of parallel mechanisms for robotic grasping. In : Proc of 2nd Biennial European Joint Conf on Engr Systems Design and Analysis, London, 1994, London : ASME, 1994 : ASME PD 64(8~3) : 809~817
- 26 Dai J S, Rees Jones J. Null space construction using cofactors from a screw algebra context. *Proc Royal Soc Lond A : Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2002, 458 (2024) : 1 845~1 866
- 27 Dai J S, Kerr D R. A Six-component contact force measurement device based on the stewart platform. *Journal of Mechanical Engineering Science, Proc of IMechE*, 2000, 214(C5) : 687~697
- 28 Dai J S, Rees Jones J. Interrelationship between screw systems and corresponding reciprocal systems and applications. *Mechanism and Machine Theory*, 2001, 36(5) : 633~651
- 29 Dai J S, Huang Z, Lipkin H. Screw system analysis of parallel mechanisms and applications to constraint and mobility study. In : Proc 28th Biennial Mechanisms and Robotics Conference, Salt Lake City, 2004, New York : ASME, 2004
- 30 丁希仑, 田娜, 戴建生. 变结构腿轮式探测机器人. 国家发明专利 200310117170X, 2003-12-04
- 31 Chen I M, Li H S, Cathala A. Mechatronic design and locomotion of amoebot – A metamorphic underwater vehicle. *Journal of Robotic Systems*, 2003, 20(6) : 307~314

FUNDAMENTALS AND CATEGORIZATION OF METAMORPHIC MECHANISMS

Dai Jiansheng

*(Department of Mechanical Engineering, King's
College, University of London,*

London WC2R 2LS, UK)

Ding Xilun

*(Institute of Robotics, Beijing University of
Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083)*

Zou Huijun

*(School of Mechanical and Power Engineering,
Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030)*

Abstract : The historical development of metamorphic mechanisms and for the first time explains the fundamentals of metamorphic mechanisms based on metamorphosis are reviewed. It distinguishes metamorphic mechanisms from deployable mechanisms and from kinematotropic mechanisms. The topological configuration changes of the mechanisms and their mathematical models are further introduced. A general categorization of metamorphic mechanisms is then proposed based on mechanism types, metamorphic ways and topological

combinations that are expected to be further investigated, presenting a new way of developing new metamorphic mechanisms. Various applications in robotics, vehicles and manufacturing are concluded. A new horizon in both development and applications of metamorphic mechanisms is hence presented, leading to a new era of mechanism development that automatically adapts mechanisms for different environments and various task demands.

Key words : Metamorphic mechanisms Principle

Mathematical model Application

作者简介:戴建生,男,1954年出生,教授。主要研究领域为旋量理论、抓举理论、机构分析和研究、自动重组重构机构、串并联机器人机构理论、多指灵巧手在包装业、康复工程和家用机器人中的研究和应用。共主持完成英国和欧盟科研项目 20 余项。发表论文 120 余篇,包括 60 余篇国际杂志论文。获得美国 ASME 机构学委员会 1998 双年度最佳论文奖。

E-mail : jian.dai@kcl.ac.uk