

# 坐标测量机的新发展 —— 并联运动机构坐标测量机

刘得军, 车仁生, 罗小川, 黄庆成

(哈尔滨工业大学自动化测试与控制系 305 信箱 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要:**从空间机构学的角度出发,可将坐标测量机分为串联机构坐标测量机和并联机构坐标测量机两大类。由于并联机构坐标测量机测量精度高,测头位姿灵活,同时又具有“硬件”简单,“软件”复杂的特点,因而,正在成为坐标测量机领域研究的新热点。文章首先分析了普通笛卡尔串联机构坐标测量机的发展现状及存在问题,然后介绍了并联机构坐标测量机的结构及特点,并对国内外有关并联运动机构理论及其在坐标测量机领域的研究现状与发展趋势进行了综述,最后,对并联机构坐标测量机研究过程中应注意的主要问题进行了探讨。

**关键词:**坐标测量机; 并联机构; 串联机构; CMM

中图分类号:TB92 文献标识码:A

## 1 引言

坐标测量机 CMM (Coordinate Measuring Machine) 是一种集机械、光学、电子、数控技术和计算机技术为一体的大型精密智能化仪器,是现代工业检测、质量控制和制造技术中不可缺少的重要测量设备,其技术水平是现代测量技术和制造技术水平高低的一个重要标志,因此,对 CMM 理论和技术的研究一直是国内外学术界和工业界关注的热点<sup>[1-4]</sup>。

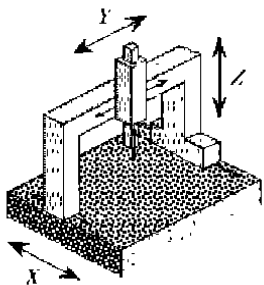


Fig. 1 Sketch of conventional CMM

目前,市场上广泛应用的坐标测量机主要是以笛卡尔坐标系结构为主的直角坐标测量机(如图1所示)。传统的直角坐标测量机通常是由三个相互正交的移动导轨构成X、Y、Z空间坐标,由于

这种机构中三个导轨的移动过程是相互分立的,因而其测量进程一般是从测头初始位置开始,并分别沿X、Y、Z三轴移动,最后到达测点位置,由此可将具有这种结构的坐标测量机称为串联运动机构坐标测量机。

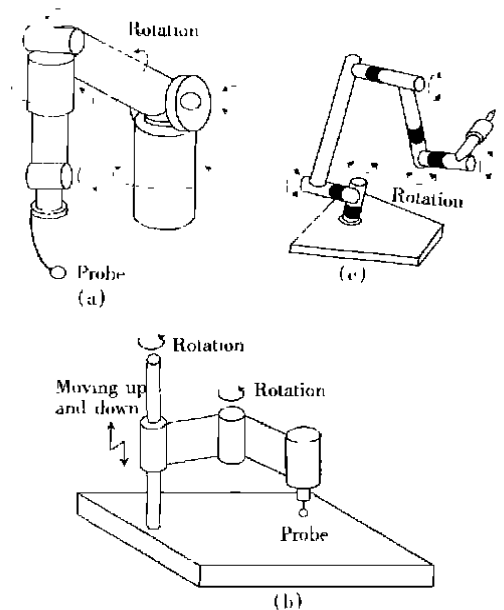


Fig. 2 Sketches of several serial mechanism CMMs

目前,串联机构坐标测量机已走过了四十年来的发展时期。期间,人们针对这种坐标测量机开展

了大量的研究工作<sup>[5-8]</sup>,使其在设计、制造、标定、检验、误差补偿、自动化、智能化及系统集成等方面均达到了很高水平,特别是其测量精度及测量效率已接近理论极限,若再想提高已感到十分困难。因此,为了进一步改善坐标测量机的综合性能,拓宽其应用领域,人们又相继提出许多新的设计思想。例如,1986年由日本小坂研究所提出的关节式坐标测量机<sup>[9]</sup>(图2(a)),1996年W. Lotze提出的ScanMax型坐标测量机<sup>[10]</sup>(图2(b))以及1997年由哈尔滨工业大学CAQ/CAT研究室研制的新型关节式坐标测量机<sup>[11-13]</sup>(图2(c))等等。但这些坐标测量机均属于串联运动机构坐标测量机范畴。

近年来,以并联机构学为理论依据的智能机器人技术及计算机数控加工技术的研究引起了各国学者的极大兴趣,现已成为新的研究热点,并被认为是二十一世纪极具发展前景的先进技术<sup>[14-18]</sup>。由于并联运动机构具有结构刚性大、运动速度快、误差不叠加等特点,因而若将其应用于坐标测量机中,将有可能使坐标测量机的测量精度及测量效率等性能得到很大程度的改善。由此可以看出,开展并联运动机构坐标测量机的研究工作是非常必要的。

## 2 普通串联式三坐标测量机的发展过程及其存在的主要问题

1959年夏季,在法国巴黎召开的国际机床博览会上,英国Ferranti Ltd.向世人展出了第一台坐标测量机样机。该原型机的结构非常简单,只在X轴和Y轴方向设置了两个可移动导轨和相应的数据读出装置,而在Z方向上则简单地放置一个量程很小的位移传感器。因此可以看出,该坐标测量机样机实质上只是一个准三维坐标测量机,其测量精度仅为0.001inch<sup>[1]</sup>。

为了扩大Z轴的量程,美国Sheffield公司于1965年推出了一种新型坐标测量机。该坐标测量机由三个相互垂直的可移动导轨分别构成X轴、Y轴和Z轴,并在每一坐标轴上配置相应的数据读出装置,从而构成了串联式笛卡尔三坐标测量机的基本结构形式。随后,该公司又将计算机技术应用于坐标测量,并于1969年在美国制造工程学会(ASME)产品展示会上展出具有计算机辅助控制功能的坐标测量机,从而实现了真正意义上的“三维空间坐标测量”。

70年代中期,英国的Renishaw公司开发出一种三维电触式测头并广泛应用于坐标测量机中<sup>[1]</sup>,从而使坐标测量技术进一步得到完善。这以后,随着微处理器和微计算机技术的逐渐成熟及其在坐标测量机上的普遍应用,使得坐标测量机的数据处理能力得到加强,生产成本急剧下降,从而提高了其市场竞争力,并迅速成为现代测量技术的主流产品。

80年代以后,随着柔性制造系统(FMS)和计算机集成制造系统(CIMS)的出现和发展,使得三坐标测量机从计量室进入到车间现场,并与CAD/CAM系统和数控加工中心构成一个紧密耦合的先进的设计与制造一体化系统。为克服车间恶劣的环境影响,三坐标测量机精度检测及补偿技术得到发展,从而使测量精度有了较大的提高<sup>[19-21]</sup>;同时,为了满足FMS或CIMS对效率和柔性的需要,又先后开发出接触式扫描测头和非接触式激光扫描测头<sup>[22-24]</sup>;另外,为实现与CAD/CAM系统的集成,坐标测量机的软件接口技术(DMIS)和计算机辅助检测规划(CAIP)技术又得到了发展<sup>[25-27]</sup>。

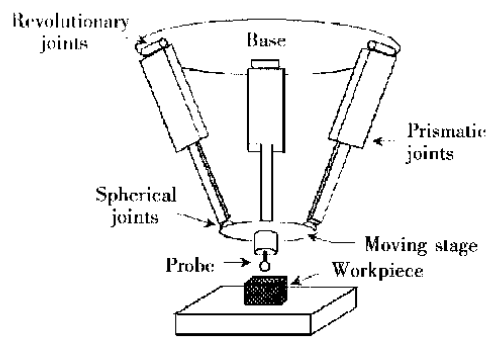


Fig. 3 Sketch of parallel mechanism CMM

综上所述,可以看出,到目前为止,人们对串联机构坐标测量机的结构及特点已十分熟悉,对其各方面的研究工作也已达到了很高的技术水平,但因串联结构自身所固有的一些缺陷,使得在中等尺寸测量领域内,测量精度及测量效率的进一步提高已感到十分困难。这些缺陷主要表现在:①串联结构中的横梁部件很容易受到弯曲力的影响而产生偏斜,从而产生动态误差;②由于采用串联的方法,因而整个运动误差是每一坐标轴运动误差的累加;③由于结构部件质量较重,致使坐标测量机的运行速度受到限制,从而影响了测量效率;④串联式坐标测量机本身违背Abbe原则,因而必将产生一些无法回避的误差;⑤由于受X、

Y、Z 相互垂直导轨的约束, 测头的空间位姿不够灵活。

与常用的串联运动机构坐标测量机相比, 并联机构坐标测量机(如图 3 所示)具体表现在: ① 并联坐标测量机中的可动平台同时经由 3 根(或 6 根)可沿各自轴向伸缩的连杆支撑, 从而使整个系统的刚度较串联机构坐标测量机相比有较大程度的提高; ② 各并联杆件只承受沿轴向的线性调节力的作用, 因而其运动误差小, 不易变形; ③ 并联机构中, 各杆件间不存在误差累积和放大关系, 容易实现高精度测量; ④ 由于系统中运动部件的惯性质量小, 刚度大, 因而有望实现高速、高效率测量; ⑤ 并联坐标测量机测头的空间位姿灵活, 可从任何角度进入工作表面, 因而对表面形状复杂, 孔隙方位多的零件测量比较方便。由此可以看出, 并联机构坐标测量机恰好对串联机构坐标测量机的应用局限具有很好的补充作用, 这无疑为新一代坐标测量机的开发与研制带来了希望, 从而为拓宽坐标测量机的应用领域, 促进产品的多样化, 提高产品的市场竞争力奠定了坚实的理论基础。

### 3 并联运动机构理论及应用的研究现状分析

国际上有关并联运动机构的提出最早可追溯到 1813 年(Cauchy A.)<sup>[28]</sup>和 1897 年(Bricard R.)<sup>[29]</sup>。

1965 年, Stewart 将一种 6 自由度的空间并联机构应用于飞行模拟器<sup>[30]</sup>, 这就是著名的“Stewart 平台”机构。1978 年, 澳大利亚著名的机构学教授 Hunt 又提出可将“Stewart 平台”用做并联机器人的主要机构<sup>[31]</sup>, 但该设想并未得到及时响应。进入到 80 年代中期, 国际上进行并联机器人研究的学者还寥寥无几, 有关的文献及研究成果也非常有限。但到了 80 年代末期, 特别是进入到 90 年代以来, 有关并联机器人机构学理论研究才引起同行学者的广泛关注, 并成为新的研究热点(如图 4 所示)。

1994 年, 在美国芝加哥国际机床博览会(IMTS94)上展出了一台被称为“八面体六足虫”的 VARIAX 并联加工中心<sup>[18]</sup>, 该加工中心的出现引起与会学者的极大兴趣, 由此掀起并联机构学研究的新热潮, 且发展迅猛, 令人吃惊, 并在 1997 年的 EMO97 博览会上再次展出十多台各种形式的六杆并联机床<sup>[32]</sup>。

1998 年 8 月 31 日至 9 月 1 日在意大利米兰

召开了首届欧美并联运动机构理论和应用研讨会。会上, 各国学者充分交流了近年来各自的研究成果, 讨论了并联机构研究过程中所存在的问题, 同时还详细制定了 1998—2002 年的 5 年研究规划<sup>[18]</sup>。

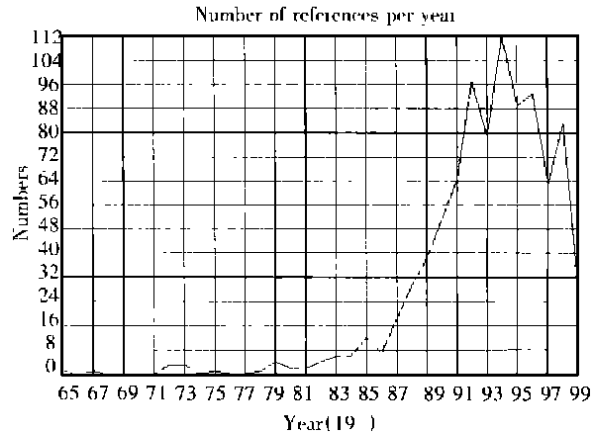


Fig. 4 Number of references per year

我国对并联运动机构理论和应用的研究开始于 80 年代末期, 其中燕山大学黄真教授对并联机器人机构学理论进行了系统的研究, 并于 1990 年和 1994 年分别研制出我国首台并联机器人样机和机器人误差补偿器, 1995 年又开始对并联数控机床进行研究<sup>[33]</sup>; 1996 年, 清华大学精仪系在国家 863 计划和学校 211 工程的支持下, 开展了并联机构数控机床的研制工作, 并于 1997 年中国国际机床展览会上展出第一台样机; 1995 年, 哈尔滨工业大学机器人研究所研制成功压电陶瓷驱动六自由度并联微动机器人<sup>[34]</sup>; 1996 年, 哈尔滨工业大学机械工程系的王知行教授也开始六自由度并联机床的研究工作, 并于 1998 年末研制出样机, 1999 年 8 月通过鉴定, 并在 99 北京国际机床博览会上展出。

### 4 基于并联机构的新型坐标测量机的研究现状及其发展趋势

有关并联运动机构在测量方面的首次应用可追溯到 50 年代末期。当时 Gough 开始设想采用并联机构来检测汽车的稳定性及轮胎性能<sup>[35]</sup>, 并在 1962 年同 Whitehall 一起设计出第一台并联机构万能轮胎测试机<sup>[36]</sup>。但由于当时的技术及应用条件的限制, 该设计思想并未引起人们广泛的关注。

到了 1996 年, 日本静冈大学的大岩孝彰等人

在日本政府高度自动化技术振兴团的资助下,开始进行并联运动机构坐标测量机的研究工作,并于1997年至1999年间,连续发表文章介绍其研究成果<sup>[37-39]</sup>。几乎与此同时,日本东京大学的高增和平木雅彦,美国 Florida Atlantic 大学的庄汉歧和王英立等人也在开展这方面的研究工作<sup>[40-42]</sup>。这些工作是自50年代首次将并联机构应用于轮胎测试机以来,历经40余年的漫长岁月后,该机构在测量领域的又一次重要的应用,其意义不仅仅是拓宽了并联运动机构的应用领域,而且还预示着新一代非笛卡尔坐标测量机的研究高潮即将到来。

国内方面,有关并联机构坐标测量机的相关研究报道还很少。其中,文献<sup>[2]</sup>对这种坐标测量机的基本结构进行了简单的介绍;另外,哈尔滨工业大学自动化测试与控制系CAT/CAQ研究室在车仁生教授的倡导下,于1997年开始进行这方面的研究工作,并先后在英国的《Measurement Science & Technology》<sup>[43]</sup>、《中国机械工程》<sup>[44]</sup>等学术刊物及首届国际仪器科学与技术学术会议论文集(ISIST'99)中发表了几篇研究论文<sup>[45]</sup>。

## 5 并联机构坐标测量机研究过程中应注意的主要问题

综上所述,不难看出,无论是国内还是国外,

对并联运动机构坐标测量机的研究工作都是刚刚开始,因而,与之相关的一系列理论和技术问题,都需要进行系统和深入的研究。这些问题主要包括运动机构模型的建立、测头位姿的求解、测量空间的计算、测量误差模型的建立及其分布规律、测量误差的补偿、测量机的标定、测量系统数据采集与处理、测量机的性能评价等等。在所有这些问题中,测量模型和误差模型的准确建立是确保坐标机测量性能的关键所在。对于并联机构坐标测量机来说,其测量模型的建立属于并联机构的正解问题,因而其求解过程十分复杂,所以在研究过程中,应力求通过优化并联机构的布局结构,使各运动副之间的相互关系简洁化,从而使整个模型的求解简单化,然后,再充分利用机构的运动约束和几何约束,使得求解问题一一对应化。

## 6 结 束 语

本文从空间机构学的角度出发,将坐标测量机分为串联和并联两大类。由于并联机构坐标测量机在测量精度、测量效率和测量灵活性方面,在中等尺寸空间测量范围内,比串联机构坐标测量机具有更大的开发潜力;同时又由于这种坐标测量机具有“硬件”简单,“软件”复杂的特点,是一种技术附加值很高的机电一体化产品,因而,正在成为坐标测量机领域研究的新热点。

### 参考文献:

- [1] Bosch John A. Coordinate Measuring Machines and Systems[M]. New York: Marcel Dekker Inc., 1995.
- [2] 张国雄. 三坐标测量机[M]. 天津: 天津大学出版社, 1999.
- [3] 张国雄. 三坐标测量机的发展趋势[J]. 中国机械工程, 2000, 11(1-2): 222-226.
- [4] 叶东, 黄庆成, 车仁生. 多关节坐标测量机的误差模型[J]. 光学精密工程, 1999, 7(2): 91-96.
- [5] Choi Woncheol, et al. Sampling uncertainty in coordinate measurement data analysis[J]. Precision Engineering, 1998, 22: 153-167.
- [6] Farzan, et al. Coordinate measurement and inspection methods and apparatus[P]. USA Patent: 5 198 990, 1998.
- [7] 中村哲夫. 三坐标测量机测量误差的评价方法[J]. 国外计量, 1994, 2: 8-13.
- [8] 林璨. 三坐标测量机的精度检定与位置误差补偿[J]. 现代计量测试, 1995, 2: 21-24.
- [9] 小美浓武久, ほか. 多关节型三次元测定机の精度向上[J]. 精密工学会志, 1986, 52(8): 1300-1304.
- [10] Lotze W. ScanMax - A novel 3D coordinate measuring machine for the shop-floor environment[J]. Measurement, 1996, 8(1): 17-25.
- [11] 付中正, 叶东, 等. 新型关节式三坐标测量机的研究[J]. 工具技术, 1997, 31(1): 38-40.
- [12] 叶东, 车仁生. 仿人多关节坐标测量机的数学建模及其误差分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 1999, 31(2): 28-32.
- [13] 叶东, 等. 六自由度关节式坐标测量机关节零位偏差的标定算法[J]. 工具技术, 1999, 33(4): 34-36.
- [14] Lauffer J P, et al. Milling machine for the 21st century, goals, approach, characterization and modeling[J]. Proc. of the SPIE, 1996, 2721: 326-340.
- [15] Dohner J L. Active chatter suppression in an octahedral hexapod milling machine[J]. Proc. of the SPIE, 1996,

2721: 316– 325.

- [16] Gosselin C, et al. Development and experimentation of a fast 3-dof orienting device[J]. *Int. J. of Robotics Research*, 1997, 16(15): 619–630.
- [17] Huang T, et al. Closed form solution of hexapod-based virtual axis machine tools[J]. *ASME J. of Mechanical Design*, 1999, 121: 26– 31.
- [18] 汪劲松, 黄田. 并联机床——机床行业面临的机遇与挑战[J]. *中国机械工程*, 1999, 10(10): 1103– 1107.
- [19] Chen J S, Ling C C. Improving the machine accuracy through machine tool metrology and error correction[J]. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 1996, 11: 198– 205.
- [20] 宋开臣, 等. 三坐标测量机动态误差补偿的研究[J]. *仪器仪表学报*, 1999, 20(1): 23– 25.
- [21] Quinian J C. Renaissance of the CMM[J]. *Tooling and Production*. 1995, 4: 37– 41.
- [22] Stovicek D R. Non-contact Metrology[J]. *Tooling and Production*. 1993, 9: 53– 56.
- [23] Shen Y L, et al. Modeling of pretravel for touch trigger probes on indexable probe heads on coordinate measuring machine[J]. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 1997, 13: 206– 213.
- [24] 肖贵福. 对三坐标测量机测头的新思考[J]. *现代计量测试*, 1995, 4: 4– 9.
- [25] Tang X Q, Davies B J. Integration of inspection planning system and CMM via DMIS[J]. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 1995, 10: 422– 426.
- [26] Lu E, et al. An algorithm for the generation of optimum CMM inspection path[J]. *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Transaction of the ASME*. 1994, 116(9): 396– 404.
- [27] Roy U. Development of intelligent inspection planning system in an object-oriented programming environment [J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*. 1994, 7(4): 240– 246.
- [28] Cauchy A. Deuxième mémoire sur les polygones et les polyèdres[J]. *Journal de l'école Polytechnique*, 1813: 87– 98.
- [29] Bricard R. Mémoire sur la théorie de l'octaèdre articulé[J]. *Journal de Mathématiques pures et appliquées, Liouville*, 1897, 3: 113– 148.
- [30] Stewart D. A platform with 6 degrees of freedom[J]. *Proc. of the Institution of mechanical engineers*, 1965, 180 (Part 1, 15): 371– 386.
- [31] Hunt K H. *Kinematic Geometry of Mechanisms*[M]. Oxford: Clarendon Press, 1978.
- [32] 中国机床工具工业协会赴EMO97工作组. EMO97新技术系列报道——六条腿机床取得重大进展[J]. *世界制造技术与装备市场*, 1998, 1: 17– 22.
- [33] 黄真, 孔令富, 方跃法. 并联机器人机构学理论及控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 1997.
- [34] 安辉. 博士学位论文[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 1995.
- [35] Gough V E. Contribution to discussion of papers on research in automobile stability, control and tyre performance[C]. *Proc. Auto Div. Inst. Mech.*, England: 1956.
- [36] Gough V E, et al. Universal tire test machine[J]. *Proceedings 9th Int. Technical Congress F.I.S.I.T.A.*, 1962, 117: 117– 135.
- [37] Oiwa T. New coordinate measuring machine featuring a parallel mechanism[J]. *Int. J. Japan Soc. Precision Engineering*. 1997, 31: 232– 233.
- [38] Oiwa T. New coordinate measuring machine using parallel mechanism— fundamentals and kinematics[J]. *Journal of the Japan Society for Precision Engineering*, 1998, 64(12): 1791– 1795.
- [39] Oiwa T, et al. New coordinate measuring machine using parallel mechanism— link layout design and error[J]. *Journal of the Japan Society for Precision Engineering*, 1999, 65(2): 288– 292.
- [40] Masahico Hiraki, et al. Parallel-CMM (Parallel-Coordinate Measuring Machine)[J]. *Proc. 9th IPES, Germany*, 1997, 1: 363– 366.
- [41] Takamasu K, Hiraki M. Parallel CMM (Coordinate Measuring Machine) Using Parallel Mechanism[J]. *Journal of the Japan Society for Precision Engineering*, 1997, 63(12): 1676– 1679.
- [42] Zhuang Hanqi, Wang Yingli. A coordinate measuring machine with parallel mechanisms[A]. *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*[C]. Albuquerque: April 21– 28, 1997. 3256– 3261.
- [43] Liu Dejun, et al. A measuring model study of a new coordinate-measuring machine based on the parallel kinematic mechanism[J]. *Measurement Science & Technology*. 1999, 10(11): 1020– 1024.

- [44] 刘得军, 等. 三自由度并联机构坐标测量机及其虚拟原型研究[J]. 中国机械工程, 2000, 11(3): 252- 254.
- [45] Liu Dejun, et al. Modeling of a new type of CMM using parallel-link mechanism[A]. Proceedings of 1<sup>st</sup> ISIST'99[C]. Luoyang, China: 1999.92- 98.

## New type of CMM — Parallel mechanism coordinate measuring machine

LIU De-jun, CHE Ren-sheng, LUO Xiao-tuan, HUANG Qing-cheng

*(Dept. of Automatic Measurement and Control, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)*

**Abstract:** According to the theory of spatial mechanics, CMM (Coordinate Measuring Machine) can be classified as two groups, that is the serial-mechanism CMM and the parallel-mechanism CMM. Generally, the parallel-mechanism CMM has higher measuring accuracy and more flexible probe posture than the serial-mechanism CMM. Secondly, the parallel-mechanism CMM is of high technical additional value because its 'hardware' is simple and the 'software' is complex. Therefore, theoretical and experimental research for this new kind of CMM has currently become a hot topic for both industry and academia. In this paper, the state-of-the-arts and the drawbacks of Cartesian CMM are discussed and the characteristics of the parallel-mechanism CMM are introduced. Then the theoretical base, the research situation and the trend about the parallel-mechanism CMM around the world are synthesized. Finally, the problems, which should be noticed in researching the new CMM, are discussed.

**Key words:** coordinate measuring machine; parallel mechanism; serial mechanism; CMM

**作者简介:** 刘得军(1965—), 男, 河北迁安人, 哈尔滨工业大学计算机与电气工程学院自动化测试与控制系博士研究生。大庆石油学院电子工程系副教授。主要研究方向为智能仪器与自动测量系统, 计算机辅助测试技术和现代坐标测量技术。获国家专利 1 项, 发表论文 20 余篇。E-mail 地址: liudj@dqpi.edu.cn。

车仁生(1939—), 男, 教授, 博士生导师。主要从事仿生计量学, 智能仪器与虚拟仪器, 计算机辅助测试和集成质量系统方面的研究工作。