

文章编号 1004-924X(2024)15-2401-17

并联坐标测量机研究进展

欧阳凯, 付 饶, 杨 龙, 胡鹏浩*

(合肥工业大学 仪器科学与光电工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要: 并联机构具有刚度大、承载力强、动力性能好、支链间误差平均效应等优势, 在机器人、机床、微动器件等领域得到了广泛应用。然而, 传统直角式坐标测量机和关节式坐标测量机采用串联结构, 存在误差累积的固有缺陷。鉴于并联机构具有的互补优势, 近二十年来并联坐标测量机得到了快速的发展。结合国内外技术现状和团队的研究成果, 对并联坐标测量机构学、运动学、动力学、机构性能和控制策略等方面进行了系统的回顾和分析, 总结了目前并联坐标测量机研究中存在的主要问题, 提出了进一步的解决方法与思路, 并展望了未来的发展趋势。

关键词: 并联机构; 坐标测量机; 测量精度; 自由度; 运动学

中图分类号: TH721 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/OPE.20243215.2401

Research progress of parallel coordinate measuring machine

OUYANG Kai, FU Rao, YANG Long, HU Penghao*

(School of Instrument Science and Opto-electronics Engineering, Hefei University of Technology,
Hefei 230009, China)

* Corresponding author, E-mail: hupenghao@hfut.edu.cn

Abstract: Parallel mechanisms offer benefits like high stiffness, strong load capacity, excellent dynamic performance, and error averaging between branches, making them popular in robotics and machine tools. In contrast, serial coordinate measuring machines, such as portable versions, suffer from error accumulation. Due to the advantages of parallel mechanisms, parallel coordinate measuring machines have rapidly advanced over the past twenty years. Current research covers their mechanisms, kinematics, dynamics, mechanical performance, and control strategies. Key issues in current research are identified, with proposed solutions and ideas. Future development trends in this field are also discussed.

Key words: parallel mechanism; coordinate measuring machine; measurement accuracy; degree of freedom; kinematics

1 引 言

20 世纪 60 年代, STEWART 将并联机构应用于飞行模拟器^[1], 到 70 年代 HUNT^[2] 提出并联机器人, 经过几十年的发展, 并联机构以刚度大、

承载力强、误差小精度高、动力性能好等优点^[3], 在机床、工业机器人、3D 打印、微动器件等领域得到了广泛的研究和应用。

20 世纪 90 年代末, 国内外学者开始了并联坐标测量机的研究。并联坐标测量机是并联

收稿日期: 2024-03-18; 修订日期: 2024-04-11.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 51175140, No. 52175505)

机构理论与坐标测量机技术的综合应用,同时兼顾并联机构的优势和坐标测量机的用途。相较于以直角式测量机和关节式测量机为代表的串联坐标测量机,并联坐标测量机的优势体现在:(1)并联测量机采用多支链连接支撑动平台及测头,具有更大刚度,结构稳定,便于实现稳定的高精度测量;(2)各支链自重负荷比小,支链短,因此挠曲等形变更小,单支链内的误差累积更小;(3)支链间不仅不存在误差累积且具有误差平均效应,有利于提高测量精度^[4]。

本文结合团队的研发经验,在调研国内外并联坐标测量技术二十年发展的基础上,对并联测量机机构学、运动学、动力学和控制策略等方面进行了系统的概括和总结。

2 结构设计与分类

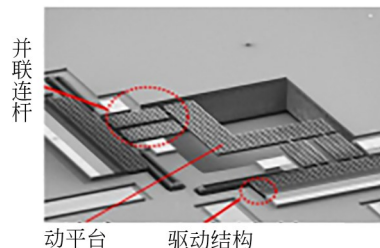
并联坐标测量机主要由基础平台、若干支链以及动平台与测头组成,测头安装在动平台上。并联坐标测量机主要按驱动形式和自由度两种方式分类。图 1(a)为并联机床,图 1(b)为并联机器人,图 1(c)为并联微动器件。



(a) 并联机床
(a) Parallel machine tool



(b) 并联机器人
(b) Parallel robot



(c) 并联微动器
(c) Parallel microactuators

图 1 并联机构应用

Fig. 1 Application of parallel mechanism

2.1 按驱动形式分类

如图 2 所示,并联坐标测量机按驱动形式不同主要分为四类:变杆长驱动型、旋转驱动型、滑块驱动型以及混合驱动型。旋转驱动型在机构本质上是转动副,而变杆长驱动型与滑块驱动型虽在机构本质上皆属于移动副,但驱动移动副在支链中位置不同,因此划分成不同类型。混合驱动型是不同的组合驱动形式。

2.1.1 变杆长驱动构型

变杆长驱动型并联坐标测量机最初源于 Stewart 并联机构^[1],Stewart 是最典型的六支链变杆长型并联机构。图 3 所示是德国 PI 公司小型商品化 Stewart 平台,能实现完整的六自由度运动。以 Stewart 机构为基础,诸多六支链变杆长型测量机变型,甚至更拓展到五支链、三支链等构型被提出。

俄罗斯 LAPIC 公司研制的 TM-1000 是世界第一台六支链变杆长驱动型并联测量机^[5],也是最典型基于 Stewart 机构的并联测量机,如图 4 所示。六副配备光栅尺的变杆长件共同组成驱动系统,带动测头实现坐标测量,测量精度最优在 $20\ \mu\text{m}$ 以内,工作空间为 $750\ \text{mm} \times 550\ \text{mm} \times 450\ \text{mm}$ 。此六自由度测量机可在不依赖旋转式测头情况下直接实现斜孔等测量,既保留固定式测头的测针携带能力,又能完成不同方向角度测量,能满足复杂形貌零件的测量需求。

车仁生等^[6]在六支链变杆长驱动型测量机上没有直接采用传统 Stewart 机构,而是采用演化变型,在动平台上采用复合球铰链代替两个独立球铰链,如图 5 所示。相比基于传统 Stewart 机构测量机的近 40 组正解,此变型测量机的测量模型只有唯一解,模型更简明。

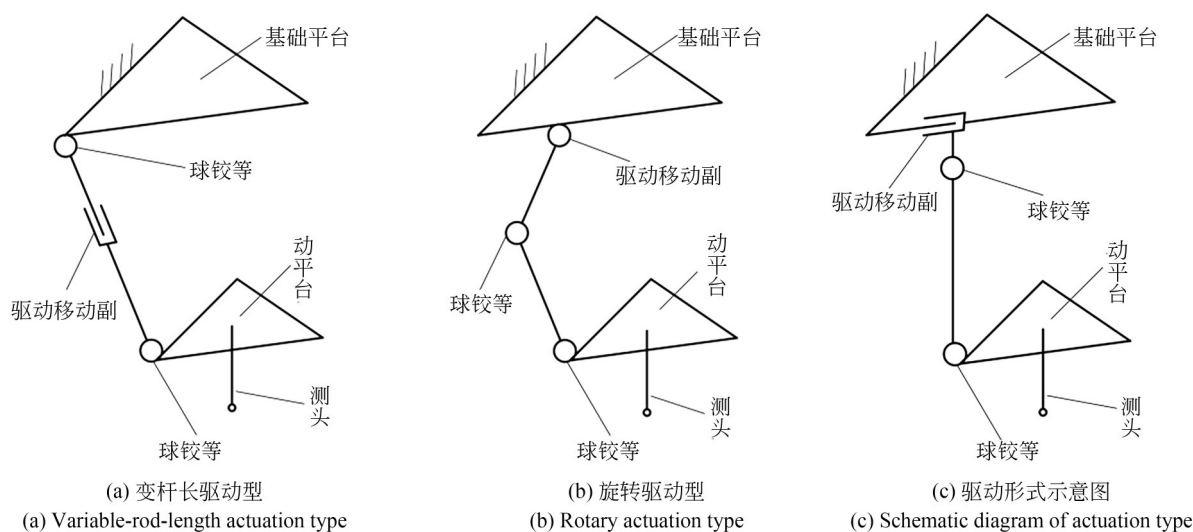


图 2 驱动形式示意图

Fig. 2 Schematic diagram of actuation type

图 3 PI微动台^[1]Fig. 3 PI micromotion table^[1]

孝彰等^[7]率先开展三支链变杆长驱动型测量机研究,如图 6 所示,基于三副变长杆驱动、由长光栅测量杆长伸缩量,实现坐标测量。此测量机的工作空间约为 $200\text{ mm} \times 200\text{ mm} \times 200\text{ mm}$,测量精度可达 $10\text{ }\mu\text{m}$ 。三支链结构决定此测量机只具备三自由度运动能力,相较六支链型,此类测量机结构简单但测头运动不够灵活。

陈修龙设计出五支链变杆长型测量机^[8],如图 7 所示,具有 4 条同型 UPS 型支链,附加一条

图 4 TM-1000 并联测量机^[5]Fig. 4 TM-1000 CMM^[5]

UPU 型支链,测量机具有五自由度测量灵活性(P 移动副,R 转动副,S 球铰链,U 虎克铰链,下文同此)。相比六支链测量机,此测量机精简支链且能保证充足测量灵活性。

2. 1. 2 旋转驱动型

CLAVEL 在 1988 年将 4S 型平行四边形机构应用于并联机构支链,诞生经典的“Delta 并联机构”^[9]。旋转驱动型并联坐标测量机常采用 Delta 并联机构,由三个同型支链构成,三个旋转驱动杆共同控制测头运动实现测量,各支链皆含有平行四边形子链。此子链按运动副差别可分为三种:4S 型平行四边形子链、4U 型平行四边形子链和 4R 型平行四边形子链^[9],各型都能限制机构一定自由度,4S 型与 4U 型占主流,4R 型因灵

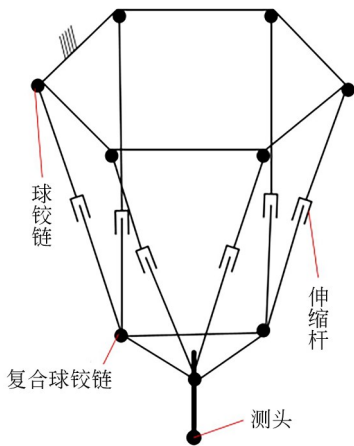


图 5 车仁生提出的并联测量机^[6]
Fig. 5 CHE's parallel CMM^[6]

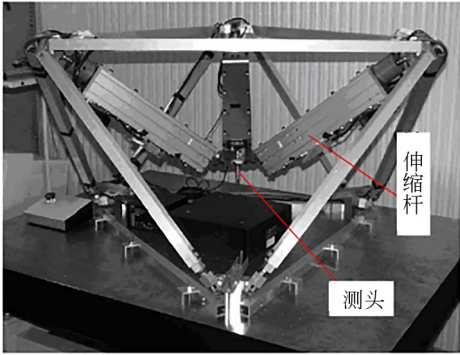


图 6 大岩孝彰提出的并联测量机^[7]
Fig. 6 QI's parallel CMM^[7]

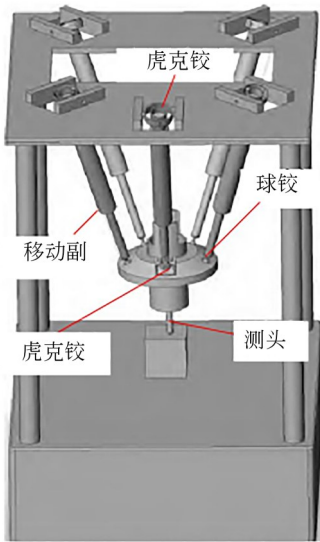


图 7 陈修龙提出的并联测量机^[8]
Fig. 7 CHEN's parallel CMM^[8]

活性较差应用较少。

江苏大学马履中三支链旋转驱动型测量机^[10]中采用了 4R 型平行四边形机构子链,并调整各支链 4R 型平行四边形子链的位置,构造非对称异型支链,使测量机具有三平移自由度,如图 8 所示。此测量机的测量模型简单,只有两个解析解,但支链结构较复杂,工作空间小。

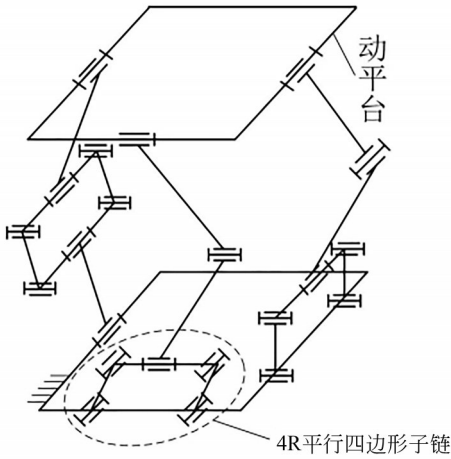


图 8 马履中提出的并联测量机^[10]
Fig. 8 MA's parallel CMM^[10]

英国 RENISHAW 公司商用 Equator 系列比对仪^[11]如图 9 所示,这是目前为数不多的商业化并联测量机,此比对仪的三支链均采用 4S 型平行四边形子链,但更鲜明的特点在于测量系统与



图 9 Equator300^[11]
Fig. 9 Equator300^[11]

驱动系统的相对独立性,驱动由包含主动杆与4S型平行四边形被动杆的支链提供,而测量功能的实现是通过额外配置三幅测量杆连在动平台上,三幅测量杆在方槽内跟随动平台移动,测量杆上贴有光栅尺,方槽内配有光栅读数头。此系列对比仪具有多个尺寸的型号产品,能在一定程度上满足中小型尺度测量需求,此外测量速度快、效率高,但结构相对复杂。

本课题组对 RENISHAW 对比仪进行结构优化设计^[12],如图 10 所示,采用典型 Delta 机构将测量机构与驱动机构一体化,主动杆的回转角度通过同轴安装的圆光栅传感器测得,由 3 个圆光栅同步测得的角度值得出测头的空间位置坐标。

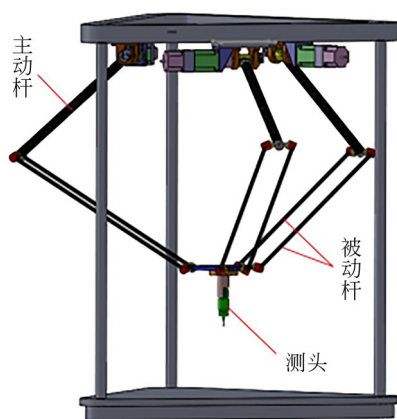


图 10 Delta 并联测量机^[12]

Fig. 10 Delta parallel CMM^[12]



图 11 MAHBOUBKHAH 并联测量机^[13]

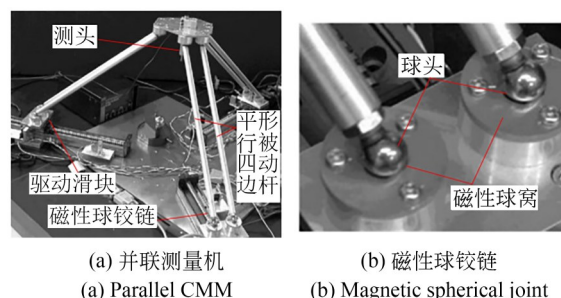
Fig. 11 MAHBOUBKHAH's parallel CMM^[13]

相比多数三支链旋转驱动型测量机,MAHBOUBKHAH 等^[13]研究了四支链新构型,如图 11 所示。测量机主体空间均布含“4S 型平行四边形子链”四支链,能够实现三平移一回转共 4 个自由度,所装配旋转工作台额外提供一回转自由度,可实现五自由度测量,测量精度最优可达 $4\ \mu\text{m}$ 。

2.1.3 滑块驱动型

相比上述并联测量机,滑块驱动型测量机既综合移动副驱动的机构本质,同时普遍采用旋转驱动型的平行四边形子链结构。滑块驱动型测量机由多组导轨滑块副共同驱动,实现测头运动并完成测量。采用三滑块副三支链结构为主流,能以三平移自由度实现三维坐标测量,也便于建立测量模型。

高增等^[14]研制的滑块驱动型测量机,滑块副采用共面三角均布式布局,支链仍采用 4S 型平行四边形子链,此外动平台和测头相对固定平台倒置,这种布局测量空间小,且放置被测工件不方便。该方案采用开放式磁性球铰链,增加球铰链的转动范围,以扩展测量空间,如图 12 所示。



(a) 并联测量机
(a) Parallel CMM

(b) 磁性球铰链
(b) Magnetic spherical joint

图 12 高增并联坐标测量机^[14]

Fig. 12 TAKAMASU's parallel CMM^[14]

相比于高增的测量机采用三角均布式布局,本课题组研制的测量机^[15]特点在于三滑块副同轴式布置,并共用一副精密导轨和一根光栅尺,三面对外敞开,精简结构的同时扩大工作空间,三组 4U 型平行四边形子链,使测量机具备三平移自由度运动能力,如图 13 所示。

RUGBANI^[16]滑块驱动型测量机采用空间型三角均布式布局,但并未采用平行四边形子链结构,而是通过双层导轨滑块副结构,两层导轨滑块副之间使用球铰链连接,测量机具有三平移自由度,测量空间约为 $100\ \text{mm} \times 100\ \text{mm} \times 100\ \text{mm}$,

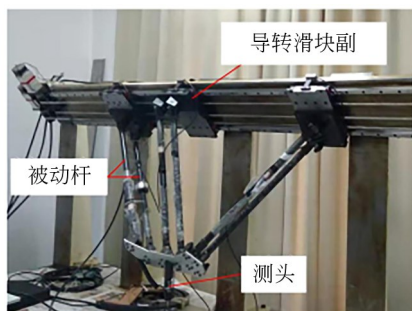


图 13 3-PUU 并联测量机^[15]
Fig. 13 3-PUU parallel CMM^[15]

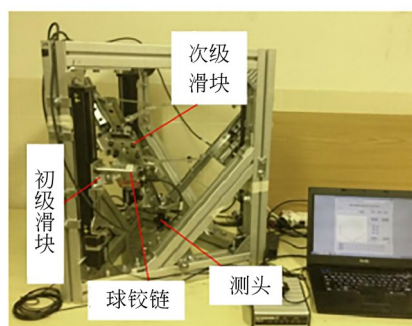


图 14 RUGBANI 研制的测量机^[16]
Fig. 14 RUGBANI's CMM^[16]

如图 14 所示。

2.1.4 混合型构型

上述三类驱动构型已基本囊括各式并联坐标测量机,但是将三类驱动形式结合形成驱动混合构型,或者将串联机构和并联机构结合形成串并联混合构型,也是并联坐标测量机的发展方向和技术特色。

余晓流等提出串并联式位姿测量机^[17],原理如图 15(a)所示,采用初级三移动自由度串联机构与次级三旋转自由度并联机构,可实现对被测工件六自由度参数的综合测量。此测量机一定程度上克服了串联机构误差累积和并联机构工作空间小的缺点,但在结构上只是简单的串联机构与并联机构的嫁接,后续提出混合性能更好的测量机结构^[18],原理如图 15(b)所示。A 指串联机构部分,B,C 指并联机构部分,A 与 B 共同提供位置测量能力,C 提供姿态测量能力,整机具有六自由度测量能力。

沈惠平早期提出一种特殊非对称型三支链滑块驱动型测量机^[19],包含 PS,PRS 以及 PSS 三类滑块型支链。此测量机具有一平移两转动自

由度,但工作空间内部存在奇异点而影响测量,后续对此结构进行改进,将两滑块型 PRS,PSS 支链调整成变杆长型 RPS 和 SPS 支链,与初始 PS 滑块型支链共同构成混合型并联测量机^[20],此测量机与前者相比自由度保持不变,奇异性改善,测量性能得到优化,测量空间约为 $300\text{ mm} \times 300\text{ mm} \times 300\text{ mm}$ 。

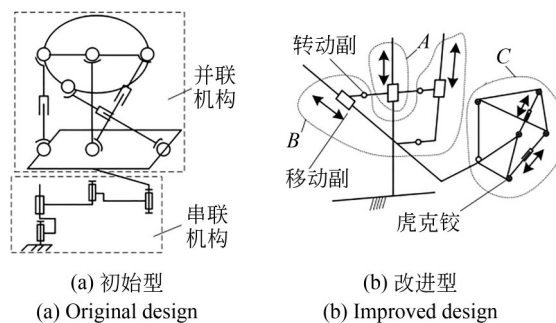


图 15 余晓流提出的串并联位姿测量机^[17-18]

Fig. 15 YU's serial-parallel CMM^[17-18]

2.2 按自由度分类

不同自由度的测量机设计,是为了满足不同坐标参数的测量需求。从机构学角度而言,机构原动件数必须等于自由度数,才能具有稳定的确定性运动^[21];此外,并联坐标测量机中各支链常具有特定单自由度,因此测量机自由度数决定了驱动支链数,以保证测量运动过程的确定性和稳定性,这也是并联测量机的重要性能指标。目前,并联测量机以六自由度测量机为主,还有少自由度构型,其中五自由度与三自由度为主要发展方向。

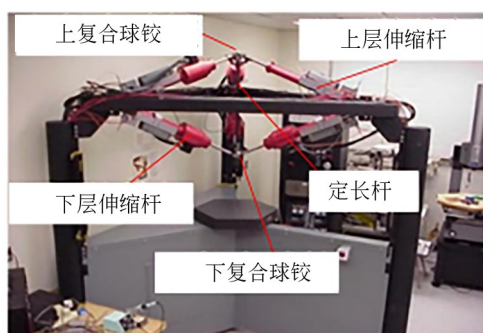
2.2.1 六自由度型

TM-1000^[5]、车仁生提出的测量机^[6]皆属于六自由度并联测量机。此外,KOSUKE^[22]、刘延斌^[23]、刘冰^[24]、陈东^[25]、刘得军^[26]等提出的并联坐标测量机亦属于六自由度型。其中,KOSUKE、陈东、刘得军采用 SPS 支链,刘延斌、刘冰采用 UPS 支链,虽然连接铰链略有区别,但在测量功能上基本相同。

2.2.2 五自由度型

ZIEGERT 等^[27]研制一种变型六支链并联测量机,虽在结构上是六支链,但只具有五自由度测量能力,主体结构如图 16 所示。测量机支链采用上下两层结构,上下层均由三变杆长构成并以

复合球铰链连接,上下复合球铰以定长杆连接,测头装配在下层复合球铰下方。六变杆长皆安装位移传感器,但仅5个拥有主动驱动功能,额外一被动变杆长的位移数据可与五驱动杆位移数据形成冗余信息。因此,测量机不仅能实现五坐标参数测量,而且配合定长杆能起到自标定效果,有利于减小力变形、热变形等误差的影响,从而提高测量精度,测量空间呈直径400 mm、高400 mm的圆柱形区域。

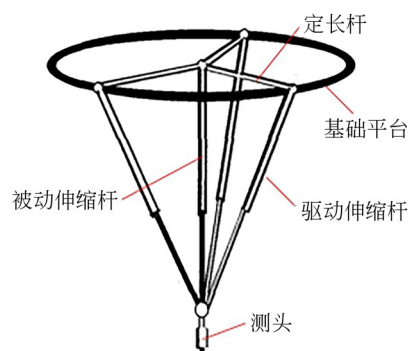
图 16 ZIEGERT 提出的测量机^[27]Fig. 16 ZIEGERT's CMM^[27]

2.2.3 三自由度型

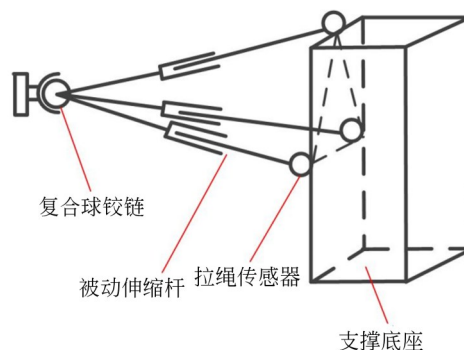
六自由度、五自由度测量机能满足多参数测量需求,但在诸多场合,三自由度测量机更加实用。变杆长驱动、旋转驱动和滑块驱动皆应用在三自由度测量机上,并且从自由度差异性出发,此类型可进一步细分为三平移自由度型以及一平移两旋转自由度型。

庄汉歧等^[28]考虑在一些场合中三平动自由度已能满足测量需求,因此对六支链上下分层型测量机^[27]进行改进,上层三变杆长改换成水平定长杆且与基础平台固联,中间定长杆改换成被动变杆长,下层三变杆长保持主动驱动能力,在机构本质上属于三支链伸缩驱动型并联测量机,如图 17 所示。此测量机四边杆长皆安装位移传感器,延续了六支链测量机冗余传感器的设计思路,同样具备一定的自标定能力。

果金龙基于变杆长结构提出“四面体”并联坐标测量机^[29],如图 18 所示。测量机动平台端采用复合球铰链,测量过程需要将测量机末端动平台与被测目标固联或者手持实现被动式接触,测量过程中被测目标带动测量机动平台运动,测量

图 17 庄汉歧提出的并联测量机^[28]Fig. 17 ZHUANG's CMM^[28]

机中拉绳位移传感器感知三支链的杆长变化量,经过计算测量出被测目标的空间位置。此四面体测量机具有三平移测量能力,结构更精简,建模更简洁,有明确的运动学显式解析测量模型。缺点在于所采用的柔索机构属于“被动式测量机”,类似于常见的拖拽式关节臂测量机。徐志刚等^[30]提出的测量机与此型测量机类似。

图 18 果金龙提出的并联测量机^[29]Fig. 18 GUO's CMM^[29]

HARADA 等^[31]研制了滑块驱动型并联机构,三滑块副皆按竖直向布置,并且三者间呈三角式均布,机构具备三自由度测量能力,虽最初的设计目的并没有将它作为整体坐标测量机,但它在功能上具备完整坐标测量功能,因此可作为独立测量机使用,也可便捷地安装于机床等运动机构末端,如图 19 所示。

刘得军^[32],沈惠平等^[18-19]提出的测量机具有特殊一平移两转动自由度。这种测量机结构相对简单,具有显示解析式测量模型,但是测量灵

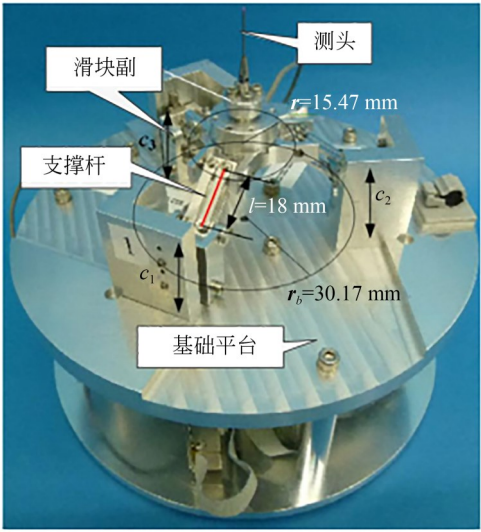


图 19 HARADA 并联测头^[31]

Fig. 19 HARADA's CMM^[31]

活性较差,测量空间也较小。周文祥提出的并联测量机^[33]如图 20 所示,主支链采用 UP 支链实现末端固联测头的竖直向悬挂,两侧采用 SPS 辅助支链,同样具有一平移两旋转测量自由度。

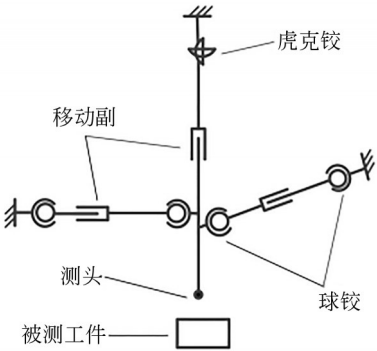


图 20 周文祥提出的并联测量机^[33]

Fig. 20 ZHOU's CMM^[33]

2.2.4 其他的自由度型

赵新华^[34]没有采用平行四边形结构,而是在平面内采用简易连杆结构构成的三支链旋转驱动构型,本质是使测量机主体具备水平面内两移动自由度,再补偿配置可升降工作台以提供竖直向移动能力,如图 21 所示。MAHBOUBKHAH 的四支链旋转驱动型并联测量机^[13],能够实现三平移一回转共 4 个自由度的测量功能。

并联坐标测量机在不同自由度上的选择对

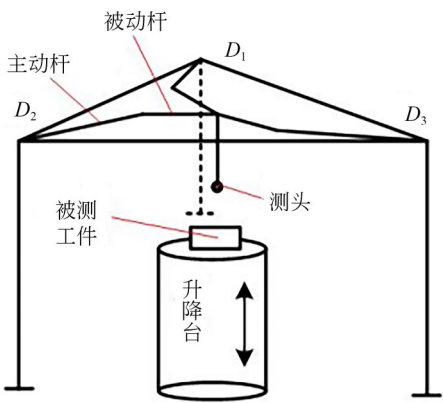
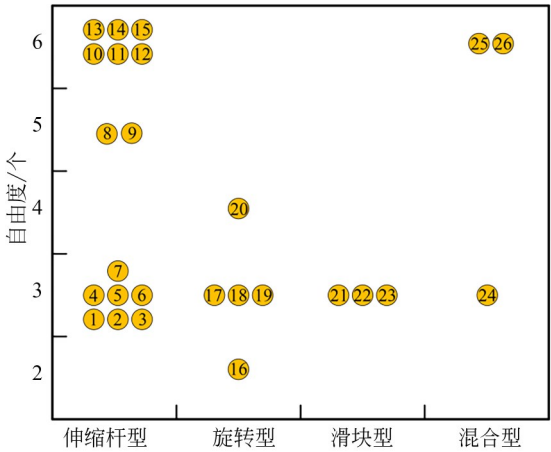


图 21 赵新华提出的并联测量机^[34]

Fig. 21 ZHAO's CMM^[34]

测量机特性的决定和影响比较大,驱动类型的不同选择对测量机特性的影响比较小。对于六自由度并联测量机,测头的空间位姿比较灵活,各驱动间耦合性更强,测量模型求解更复杂,运动控制更困难。少自由度并联测量机虽然测头空间位姿灵活性较差,但却适用于多数测量场合,同时测量模型求解更简单便捷,运动控制更简单、成本更低。

由图 22 可知,目前的研究成果已基本囊括



1. 庄汉歧 2. 果金龙 3. HARADA 4. 刘得军 3-RPS
5. 沈惠平 6. 周文祥 7. 大岩孝彰 8. ZIEGERT 9. 陈修龙
10. LAPIC 11. 车仁生 12. KOSUKE 13. 刘延斌 14. 陈东
15. 刘得军 16. 赵新华 17. Equator 18. 马履中 19. Delta 型
20. MAHBOUBKHAH 21. 高增 22. 3-PUU 型 23. RUG-BANI 24. 沈惠平 25. 余晓流 26. 余晓流改进型

图 22 并联坐标测量机构型统计

Fig. 22 Configuration statistics of parallel CMMs

大部分构型并联坐标测量机,因此,仅从构型方面出发设计并联测量机,创新性是有限的。

3 运动学与动力学研究

运动学关系是并联坐标测量机研究的首要内容,主要包括输入输出位置关系、速度和加速度关系等。其中,位置关系是测量机运动分析的基本内容,也是测量机速度加速度、奇异形位、工作空间以及动力学分析等的基础。

3.1 位置关系分析

并联测量机位置关系包含位置正解、逆解两个子内容。已知驱动副的输入,求解测头位置为位置正解,称为测量模型;反之为逆解,逆解是运动控制的前提与基础,称为控制模型。并联坐标测量机位置关系求解常采用闭环矢量法,依据支链数目不同建立相应数目的闭环运动链方程^[2]。并联测量机逆解位置可经建立的运动方程直接推导出显示表达式,求解过程简单直观。相比位置逆解,并联测量机位置正解常采用解析法与数值法两类求解方法,位置正解推导计算复杂,难度要远大于位置逆解。解析法依据建立的运动方程推导得到显示表达式,但解一般并不唯一,多适用于特殊构型;数值法依据建立的运动方程组也即非线性方程组,采用数值迭代法求解出局部最优解,适用于任何构型且建立的数学模型相对简单,但数值解易受限于局部最优且与初值选取密切相关。

在并联测量机位置解析正解方面,一般基于运动方程组可建立测量模型^[4-9,16-18]。但对于部分特殊构型,需要采用特殊方法推导测量模型,如车仁生^[6]采用等效机构法将三角动平台等效简化成三棱锥,从而推导出测量模型。

在数值法方面,常规迭代法^[5,35]在并联坐标测量机中也有一定程度的应用,并且为进一步提升求解速度,可采用多类数学工具。黄真提出降维法^[2],包括一维搜索法与三维搜索法等,适用于多类并联机构,旨在降低运动方程组中未知数个数以提高迭代效率。车仁生等采用三维搜索法提升求解效率^[6]。此外,部分学者探索并论证了遗传算法、蚁群算法、粒子群算法甚至神经网络等高级算法在并联测量机上的适用性^[36-38]。

需要指出的是,一般并联机构因存在多组位置解析正解或者无解析正解,常采用数值法求解位置正解,此性质不利于测量模型的求取。因此,并联测量机在选择构型时通常采用唯一解析正解或少数解析正解的构型,或者采用复合铰链或者特殊布局设计合理构型,使并联测量机尽可能具有唯一位置解析正解。

3.2 速度与加速度分析

并联机构速度和加速度分析的常用方法包括矢量法、网络法、求导法与影响系数法等^[39-43]。理论上,一般对输入输出位置方程求导数即可推导出速度与加速度关系式,但由于位置方程的复杂性,多数情形下,很难实现一阶、二阶微分方程的求解。因此,基于一阶运动影响系数矩阵与二阶运动影响系数矩阵的影响系数法^[2],成为目前并联坐标测量机运动学研究的主要方法。一阶运动影响系数矩阵就是经典的雅各比矩阵(Jacobian 矩阵),二阶运动影响系数矩阵指黑塞矩阵(Hessian 矩阵)。并联测量机的速度、加速度关系可分别由一阶、二阶影响系数矩阵表征。除速度、加速度外,影响系数法在误差、动力学和受力分析以及奇异形位、工作空间等问题中,表现出显著的优越性。陈修龙等采用雅各比矩阵对 4-UPS-UPU 并联测量机^[8]进行速度分析,揭示了测头六维速度矢量与输入运动副速度矢量间的映射关系。

3.3 动力学分析

并联测量机动力学研究包括惯性力计算、受力分析、动力学模型的建立、弹性动力分析等方面,而动力学模型的建立是处理诸多动力学问题的基础。并联测量机结构决定其动力学模型是一个多自由度、多变量、多参数耦合的高度非线性复杂系统^[2]。动力学研究测量机各关节间力与运动的关系,已知并联测量机驱动力或力矩的变化规律,求解测头在工作空间内的位移、速度与加速度,称正动力学;反之,称逆动力学。正动力学对测量机仿真具有重要意义,逆动力学则是控制器设计与动态性能指标优化的基础。并联测量机动力学研究以刚体动力学与刚柔耦合动力学为主。

并联测量机的刚体动力学分析常用的建模法有 Newton-Euler 法^[44]、Lagrange 法^[45]等。这些

方法虽模型方程不同,但在描述并联测量机动力学特性上具有等价作用^[46]。Newton-Euler法的物理意义简单明确,但需求出支链内力,不利于求解;Lagrange法无需研究测量机运动过程,但涉及大量推导计算。

目前,高速和低惯性要求使得愈来愈多并联测量机采取轻量化设计,如采用碳纤维从动杆的测量机^[15]。轻量化导致机构柔性增大,固有频率下降,高速化使得惯性力激振频率升高,易产生弹性振动和测量误差等,因此,含柔体结构的刚柔耦合动力学研究非常必要。

近年来,随着并联坐标测量机的柔体动力学的发展,多柔体系统动力学法适用于并联测量机的刚柔耦合动力学分析。多柔体系统动力学法综合考虑机构刚性和弹性运动间的耦合,模型为非线性时变、刚弹耦合微分方程,此类模型虽较复杂但精度高。陈修龙^[45,47]、赵新华^[48-49]都基于柔性连杆假设进行并联测量机刚柔耦合动力学分析。

鉴于并联测量机动力学模型的复杂性,研究人员希望能在不建立数学模型的情况下,实现并联测量机的动力学分析。近年来,以ANSYS, ADAMS等软件为代表的三维建模与数值模拟技术的迅速发展,正满足这种需求。此类技术避免了繁琐的建模过程,又能有效地提供动力学分析,具有高效、便捷、准确的优点,因而得到广泛应用。文献[17, 25, 44]采用Solidworks, ADAMS等建立测量机刚柔耦合三维模型,实现运动输出相应、动应力、固有频率等动力学特性的仿真研究。

4 机构性能与优化设计

性能指标是评价测量机性能优劣的重要依据,主要包括奇异形位、工作空间、误差和测量精度等。

4.1 奇异形位

奇异形位是机构的固有性质,当并联测量机处于某些特殊形位时,其雅各比矩阵(Jacobian矩阵)的行列式等于零,速度反解不存在,称此类形位为奇异形位^[2]。当并联坐标测量机处于奇异形位时,测头的运动自由度瞬时改变,测量机受力状态会发生突变,测量机失去稳定的传动与承载

能力,甚至会出现运动死点。因此,避免测量空间内出现奇异形位成为并联坐标测量机设计和性能评定的关键依据之一。Grassmann几何法是分析并联坐标测量机奇异形位的经典方法,该方法易于理解和实施,具有通用性,但依赖观察分析,存在不够严密、过程繁琐的缺点。国内外关于各构型并联坐标测量机的奇异性研究已有很多^[7,15,18]。沈惠平测量机^[19]前期采用PS,PRS以及PSS支链,此测量机的工作空间内部存在奇异形位而影响测量,后续对此结构进行改进,将PRS,PSS支链调整成RPS和SPS支链,奇异性改善,测量性能提升。因奇异性分析常基于Jacobian矩阵,运算量大,为解决此难题,赵新华等^[34]将奇异形位问题转化成线性矩阵不等式(LMI)极值问题,利用归一化遗传(GA)算法通过15代计算可实现奇异形位求解,具有求解精度高、收敛速度快的优势。

4.2 工作空间

并联坐标测量机的工作空间是测头所能到达测量点的集合,属于可达工作空间^[2]。并联测量机的工作空间求解也可分为解析法与数值法,但解析法求解是一项复杂任务,在相当大程度上依赖测量机位置解的研究结果,至今仍未有完善的通用方法,此方面研究成果有限。相对而言,数值法因其通用性与简便性而得到广泛应用,极限边界搜索法成为其代表^[32]。极限边界搜索法常采用基于截面极坐标的增量搜索原则,再依据各关节转角约束、连杆杆长限制以及构件干涉等来确定工作空间边界,此方法效率高且可直接计算出工作空间。

此外,工作空间虽表征了测量机的测量区域,但未考虑与测量误差的联系。具体表现为:在工作空间不同空间位置处,结构参数偏差等引起的测量误差分布不同,且工作空间中央区域的测量误差普遍更小。基于此,本团队采用测量空间概念^[50]来描述工作空间内满足一定精度要求的子工作空间。在适当的测量空间内进行测量,有利于进一步提高测量精度。

4.3 误差与测量精度

测量精度是衡量测量机性能的主要技术指标之一,现代工业对坐标测量机的测量精度要求日益提高。深入研究测量机各项误差的产生机

理,掌握误差传递与合成规律,并设法减小或消除各项误差是提高测量精度的主要途径和方法。

并联坐标测量机误差,按来源可分为结构参数偏差与输入参数偏差等;按误差特点性质可分为系统误差和随机误差;按组成系统可分为主体运动系统误差、触测系统误差等。并联坐标测量机的误差组成复杂,影响因素众多,既有测量机自身系统的原因,又有环境因素的影响。不同于传统串联坐标测量机,并联坐标测量机的各项结构参数偏差和输入参数偏差,通过各条支链传递到测头处会产生综合作用,具体表现为误差平均效应,有利于减小误差累积,提高测量精度。本团队基于 3-PUU 型并联坐标测量机,采用全微分方法求解运动学的雅各比矩阵,从数学理论上解析出各支链间误差传递系数具有平均互补性,验证了并联坐标测量机的误差平均效应^[14]。对并联坐标测量机,基于测量模型的结构参数标定是至关重要的,能很大程度上减小结构参数偏差产生的系统误差,提高测量机的测量精度。并联坐标测量机标定可分为外部标定法与自标定法,其中外部标定法是最常用的方法。外部标定法采用高精度外部仪器装置(如高精度坐标测量机、激光跟踪仪、球杆仪)或高精度标准件(如标准量块、标准球)实现结构参数标定,具有技术路线成熟、标定精度高、标定便捷等优点。如 RUGBA-NI 测量机^[16]采用蔡司激光跟踪仪完成标定。自标定法采用测量机内部冗余传感器或施加内部特殊约束,获取测量信息并进行比对以实现实时标定,具有可实时在线标定优点,缺点是测量机结构更复杂、成本更高。ZIEGERT 测量机^[27]采用内部冗余传感器与定长杆,与测量信息比对以实现实时自标定。庄汉奇在^[28]对 ZIEGERT 测量机机构简化的基础上沿用了冗余传感器的自标定法。

在并联坐标测量机中,输入参数偏差主要来源于触测系统的误差,主要包含运动控制误差、位置识别误差,以及读数阿贝误差。运动控制误差是测量机的测头被触发后,运动控制系统控制运动停止并读数,控制滞后性所产生的运动误差,也称为控制误差或控制精度。因此,控制精度作为输入参数偏差的组成部分。采用高性能、高响应速度的测头系统与控制系统可以有效减小控制误差,提高控制精度,从而提升测量精度。

对于位置识别误差,比如采用高精度直线光栅系统,可显著减小此项误差。读数阿贝误差是由于位置识别系统不满足阿贝原则,测量运动过程中出现的阿贝误差。本团队基于三自由度滑块驱动型并联坐标测量机,详细研究并揭示了直线光栅轴线与位移传感器轴线存在阿贝臂偏差时,滑块运动误差产生阿贝误差而引起的输入参数偏差对测量精度的影响规律^[14]。

以张国雄为代表的国内外学者还研究了力变形、热变形、环境湿度等因素对传统直角式或关节式测量机测量精度的影响规律,并对测量机进行了误差修正和补偿,进一步提高了测量机的测量精度^[51-54]。但目前有关并联坐标测量机力变形、热变形的研究还较缺乏。

上述并联坐标测量机因为制造装配精度较低、误差分析与修正工作的不足,目前多数的测量精度在 0.1 mm 以上,仅 TM-1000 并联坐标测量机^[5]和 RENISHAW 商用 Equator 系列对比仪^[11]的测量精度在数十微米。因此,对于并联坐标测量机误差和测量精度的改进还有待更深入的研究。

5 控制策略

并联坐标测量机的运动控制精度要求高,为保证高精度的测量,测量运动要平稳,无爬行、无冲击。同时测量机运动控制的响应速度要快,测量过程中存在许多往复运动,运动与控制系统在启动与停止,正向运动与反向运动,高速运动与低速运动间要频繁地切换。这些高要求对高度非线性的并联坐标测量机的运动控制构成了巨大挑战,研究高性能、高精度、高响应的运动控制系统以及更优的控制策略成为必然。

并联坐标测量机的运动由各支链的空间运动综合而成,作为多变量、多自由度、多参数耦合的高度非线性系统,其控制策略与方法一直是研究的重点与难点。并联坐标测量机控制按自动化程度可分为手动型和自动型。手动型是由操作者通过操作杆来实时控制测头的运动以实现坐标测量;自动型是全部通过计算机程序来控制测头的自动运动以实现测量,涉及定点控制和测量轨迹规划。对于不同构型的并联坐标测量机,无论是按预定轨迹运动的自动型测量,还是实时

操作的手动型测量,各支链间的运动耦合程度越低的测量机,控制复杂度越低,更有利于测量控制。

自动型控制可进一步分类为运动学控制与动力学控制。运动学控制不考虑测量机的动力学特性,只根据实际运动轨迹和与预定轨迹间偏差进行负反馈控制,常采用经典的 PD 或 PID 控制,依靠位置反馈、速度反馈可以实现良好的控制效果。运动学控制的主要优点在于控制律简单,易于实现。动力学控制是根据测量机的动力学模型设计出更精细的非线性控制策略。动力学模型虽然在一定场合有望提高测量效率和测量精度,但并联测量机作为多变量、强耦合的高度非线性系统,巨大的在线计算量,给实时控制带来困难。因此,运动学控制仍然是主流。

随着控制理论的发展,并联坐标测量机控制策略又分为传统控制、现代控制和智能控制。本团队针对 3-PUU 并联坐标测量机的轻负载中低速测量的应用,采用基于运动学的传统 PID 控制器,控制效果较好^[55]。

并联坐标测量机作为高度非线性系统,也常采用自适应控制,滑模变结构控制等现代控制方案。此外,智能控制理论也蓬勃发展起来,如模糊控制与神经网络控制。模糊控制与神经网络控制的优点是不需要建立被控对象的精确数学模型,能对复杂、不确定的非线性系统实行有效控制。刘延斌等^[56]提出自适应的神经网络-滑模变结构控制法,基于 6-TPS 并联测量机采用 RBF 神经网络与滑模变结构联合控制方法。此控制器既考虑耦合特性和未确定性,实现简单便捷,控制精度高,具有自适应和高稳定性。本团队将 PID 控制结合神经网络,对比研究 BP 神经网络 PID 控制和 RBF 神经网络 PID 控制以及传统 PID 控制^[55],研究表明,两种神经网络控制算法优于传统 PID 控制,BP 神经网络 PID 控制优于 RBF 型。对于并联测量机此类高度非线性系统,很难建立完善的模糊控制规则,因此,模糊控制必须同其他控制策略相结合,才能取得理想的控制效果。周围等^[57]基于六支链伸缩驱动型测量机采用模糊 PID 控制策略,相比于传统 PID 控制,具有更好的控制效果,控制速度和精度都得到改善。

6 结论与展望

在并联坐标测量机测头误差、测量策略等方面,MAHBOUBKHAH 研究了四自由度并联测量机在采用接触式测头时测球直径误差引起的测量误差,同时提出并采用自适应路径规划以选取最优测量位姿减小此项误差的方法,取得较好效果^[58]。

6.1 需进一步研究的问题

(1)驱动关节的误差分析与修正。并联坐标测量机具有多条运动支链,多个驱动关节,无论是直线驱动关节还是角驱动关节,都有运动误差,属于输入参数误差的重要组成部分,需要建立完善的误差模型予以分析和修正。

(2)力变形、热变形误差的分析与修正。并联坐标测量机的复杂结构,使得力变形误差、热变形误差的规律更复杂,需要设法减小以提高测量精度。

(3)运动控制的非线性。并联坐标测量机由多条支链共同驱动,其动力性能好,但也是高度非线性的运动测量系统,要在尽量保证运动测量平稳性和高响应速度条件下具有高的测量精度和测量效率。

(4)测量策略。在并联坐标测量机的测量区间内,各处的测量精度都不同,测量区间边缘区域测量精度最差,因此不同测量策略对被测参数的测量精度有较大影响,目前对于测量策略的研究还很不够。

6.2 解决思路与方法

(1)减小驱动关节误差。在结构上可采用更精密的驱动系统,在算法上可建立完善的驱动关节误差模型,再进行测量和修正。如直线驱动关节,可建立包含额外两平移自由度和三转动自由的运动误差模型,采用自准直仪或激光干涉仪进行测量然后修正,能有效地提高测量精度。

(2)减小力变形、热变形引起的误差。从结构、环境控制、标定三方面采取措施。采用平衡性设计,平衡好并联结构的高刚度和大质量间的关系,如采用轻质高强度材料代替杆件等零部件;控制好环境温度,采用膨胀系数低或者膨胀系数相近的材料;对力变形和热变形引起的误差

进行标定。这些措施可在一定程度上提高测量精度。

(3)从构型设计、控制策略两方面采取措施,减小非线性对运动测量的影响。平衡好并联结构动力性能好和控制复杂的特性,并采用更优的控制方案,使得并联坐标测量机能同时具备高测量精度和测量效率。

(4)根据不同并联坐标测量机的构型特点,加强测量策略研究,建立相应模型,使测量机具备自适应测量功能,能针对不同被测目标和参数,采取对应的最佳测量策略。

6.3 结 论

鉴于并联机构具有的刚度大、承载力强、动力性能好、支链间误差平均效应等优势,近二十年来并联坐标测量机得到了快速发展。并联坐标测量机研究包括构型设计、测量模型建立、奇异形位与工作空间求解、误差分析与补偿、传感检测以及控制策略等内容。其中,构型设计是基石,构型决定了测量模型建立的简便性、工作空间与奇异形位的优异性。误差分析与补偿、控制策略是重点和难点,决定着并联坐标测量机最重要的性能——测量精度。

综合国内外研究进展,并联坐标测量机是并联机构理论与坐标测量机技术的综合应用,兼顾并联机构的优势和坐标测量机的用途,但在测量

机的两个最重要性能指标上(工作空间与测量精度),并未比传统直角式坐标测量机和关节式坐标测量机表现更优异。究其根本,并联结构限制了并联坐标测量的工作空间。而测量精度不足,一方面是近二十年来国内外多数研究成果集中在最基础的构型设计上,在误差分析与修正、运动控制、测量策略等方面,缺乏更深入的研究;另一方面,虽然并联机构具有支链间误差平均效应的优势,但更复杂的结构也造成了误差分析与修正的成本和难度增加,而并联机构承载力强、运动性能好等优势并未在并联坐标测量机上得到全面的发挥。

6.4 展 望

并联坐标测量机拓宽了并联机构的应用领域,同时丰富和发展了坐标测量技术。但目前工业领域中成熟的商品化并联坐标测量机仍然比较少,仅RENISHAW的Equator系列比对仪,工业应用的不足也在一定程度上阻碍了学术界对并联坐标测量机的研究。综合考虑并联坐标测量机优、劣势,充分发挥好刚度大、动力性能好、支链间误差平均效应的优势,规避好工作空间相对小的劣势,从提高测量精度和测量效率两方面入手,研制可实现中小型工件实时在线、快速自动批量化检测的高精度并联坐标测量机是未来研究和应用的可能方向。

参考文献:

- [1] STEWART D. A platform with six degrees of freedom[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 1965, 180(1): 371-386.
- [2] HUNT K H. *Kinematic Geometry of Mechanisms* [M]. Oxford: Clarendon Press, 1978.
- [3] 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: 1-3.
HUANG Z, KONG L F, FANG Y F. *Mechanism Theory and Control of Parallel Robot* [M]. Beijing: China Machine Press, 1997: 1-3. (in Chinese)
- [4] 刘得军,车仁生,罗小川,等. 坐标测量机的新发展: 并联运动机构坐标测量机[J]. 光学精密工程, 2000, 8(5): 497-502.
LIU D J, CHE R SH, LUO X CH, et al. New type of CMM-Parallel mechanism coordinate measuring machine[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2000, 8(5): 497-502. (in Chinese)
- [5] 张曙, U. Heisel. 并联运动机床[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003: 24-26.
ZHANG SH, HEISEL U. *Parallel Kinematics Machine Tool* [M]. Beijing: China Machine Press, 2003: 24-26. (in Chinese)
- [6] 孟焯, 车仁生. 并联六坐标测量机测量模型的研究[J]. 中国机械工程, 2003, 14(6): 459-461.
MENG CH, CHE R SH. Research on measuring model for six degree of freedom parallel mechanism CMM[J]. *China Mechanical Engineering*, 2003, 14(6): 459-461. (in Chinese)
- [7] OIWA T, YAMAGUCHI K. Coordinate Measuring Machine using Parallel Mechanism (3rd Report). Abbe's Principle [J]. *Journal of the Japan Society for Precision Engineering*, 2000, 66(9): 1378-1382.
- [8] 陈修龙, 高庆, 赵永生. 4-UPS-UPU 并联坐标测

- 量机的灵巧度研究[J]. 计算机集成制造系统, 2012, 18(6): 1200-1208.
- CHEN X L, GAO Q, ZHAO Y SH. Dexterity measures of 4-UPS-UPU parallel coordinate measuring machine[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2012, 18(6): 1200-1208. (in Chinese)
- [9] BOURI M, CLAVEL R. The Linear Delta: Developments and Applications [C]. *41st International Symposium on and 2010 6th German Conference on Robotics. German: IEEE*, 2010: 124-133.
- [10] 高国琴, 尹小琴, 马履中, 等. 新型虚拟轴三维坐标测量机构及其运动控制[J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(1): 49-53.
- GAO G Q, YIN X Q, MA L, *et al.* A novel virtual coordinate measuring machine and its motion control [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2006, 27(1): 49-53. (in Chinese)
- [11] Renishaw. *Equator Series* [EB/OL]. (2014-01-01) [2024-02-26] <http://www.renishaw.com.cn>.
- [12] 胡鹏浩, 欧阳凯, 黄慧娟. 一种基于 Delta 并联机构的三坐标测量机及测量方法: CN110231010B [P]. 2021-07-13.
- HU P H, OUYANG K, HUANG H J. A Delta parallel mechanism-based three-coordinate measuring machine and measurement method: China, 201910667699. X [P]. 2021-07-13. (in Chinese)
- [13] MAHBOUBKHAH M, BARARI A. Design and development of a novel 4-DOF parallel kinematic coordinate measuring machine (CMM) [J]. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 2019, 32(8): 750-760.
- [14] TAKAMASU K, HIRAKI M, ENAMI K, *et al.* Development of nano-CMM and parallel-CMM-CMM in the 21th century [C]. *International Dimensional Metrology Workshop. Tennessee, USA: IEEE*, 1999: 1225-1234.
- [15] HU P H, YU C W, FAN K C, *et al.* Error averaging effect in parallel mechanism coordinate measuring machine [J]. *Applied Sciences*, 2016, 6(12): 383-394.
- [16] RUGBANI A, SCHREVE K. The kinematics and error modelling of a novel micro-CMM [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015, 78(5): 961-969.
- [17] 储刘火, 余晓流. 六坐标位姿测量机的设计与研究[J]. 工具技术, 2005, 39(10): 62-65.
- CHU L H, YU X L. Design & study on 6-coordinate measuring machine [J]. *Tool Engineering*, 2005, 39(10): 62-65. (in Chinese)
- [18] 马欣艺, 余晓流, 储刘火. 基于 UG 的串并联机构坐标测量机虚拟样机设计与仿真[J]. 机械设计与制造, 2006(12): 69-71.
- MA X Y, YU X L, CHU L H. Virtual design and simulation of the series-Parallel coordinate measure machine based on UG software[J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2006(12): 69-71. (in Chinese)
- [19] 朱小蓉, 沈惠平, 杨廷力, 等. 可用作虚轴坐标测量机的全解耦并联机构运动学分析[J]. 机械设计, 2005, 22(11): 23-26.
- ZHU X R, SHEN H P, YANG T L, *et al.* Kinematics analysis of complete decoupling parallel mechanism applicable to coordinates measuring machine with virtual axis[J]. *Journal of Machine Design*, 2005, 22(11): 23-26. (in Chinese)
- [20] 朱小蓉, 沈惠平, 余竹青, 等. 三自由度并联机构坐标测量机的样机研制[J]. 制造技术与机床, 2010(1): 67-71.
- ZHU X R, SHEN H P, YU Z Q, *et al.* Study and development of A coordinate measuring with 3-DOF parallel link[J]. *Manufacturing Technology & Machine Tool*, 2010(1): 67-71. (in Chinese)
- [21] 裘祖荣. 精密机械设计基础[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.
- QIU Z R. *Fundamentals of Precision Mechanical Design* [M]. Beijing: China Machine Press, 2007. (in Chinese)
- [22] IIMURA K, KATAOKA E, OZAKI M, *et al.* The uncertainty of parallel model coordinate measuring machine [J]. *MAPAN*, 2011, 26(1): 47-53.
- [23] 刘延斌, 韩秀英. 6-TPS 并联坐标测量机误差建模与仿真[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(20): 6364-6367, 6372.
- LIU Y B, HAN X Y. Error modeling and simulation of 6-TPS parallel mechanism coordinate measuring machine[J]. *Journal of System Simulation*, 2009, 21(20): 6364-6367, 6372. (in Chinese)
- [24] 刘冰, 李剑锋, 吴光中, 等. KUM-750 型并联结构测量机的运动性能分析[J]. 机械科学与技术, 2006, 25(11): 1369-1372.
- LIU B, LI J F, WU G ZH, *et al.* Kinematics performance analysis of KUM-750 type parallel measurement machines [J]. *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*, 2006, 25

- (11): 1369-1372. (in Chinese)
- [25] 陈东, 常德功. 并联测量机控制系统研究[J]. 制造业自动化, 2014, 36(17): 7-9, 19.
CHEN D, CHANG D G. Study of control system for parallel mechanism coordinate measuring machine [J]. *Manufacturing Automation*, 2014, 36(17): 7-9, 19. (in Chinese)
- [26] 刘得军, 陈晓晖, 王世营, 等. ADAMS 环境下并联坐标测量机运动分析与仿真[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2007(11): 18-21.
LIU D J, CHEN X H, WANG SH Y, *et al.* Kinematic analysis and simulation for a parallel-link coordinate measuring machine based on ADAMS environment[J]. *Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique*, 2007(11): 18-21. (in Chinese)
- [27] ZIEGERT T. Design and testing of a high speed, 5-DOF coordinate measuring machine with parallel kinematic structure[C]. *15th American Society for Precision Engineering Annual Meeting. Florida, USA: IEEE*, 2000: 547-550.
- [28] ZHUANG H Q, WANG Y L. Coordinate measuring machine with parallel mechanisms[J]. *Computer Standards & Interfaces*, 1999, 21(2): 200.
- [29] 果金龙, 李开明. 四面体三坐标测量机精度分析[J]. 机床与液压, 2015, 43(17): 72-75, 92.
GUO J L, LI K M. Accuracy analysis of tetrahedron CMM [J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2015, 43(17): 72-75, 92. (in Chinese)
- [30] 徐志刚, 赵明扬, 房立金, 等. 基于三自由度并联机构的六自由度并串联位姿测量机: CN1207130 C[P]. 2005-06-22.
XU ZH G, ZHAO M Y, FANG L J, *et al.* Six-degree-of-freedom pose measurement machine based on a three-degree-of-freedom parallel mechanism: China, 1393321A [P]. 2005-06-22. (in Chinese)
- [31] HARADA T, DONG K, ITOIGAWA T. Design optimization of active scanning probe using parallel link mechanism[J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2012, 13(8): 1387-1394.
- [32] LIU D J, CHE R S, LI Z F, *et al.* Research on the theory and the virtual prototype of 3-DOF parallel-link coordinate-measuring machine [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2003, 52(1): 119-125.
- [33] 周文祥, 涂军. 一种新型三坐标测量机构模型的研究[J]. 中国机械工程, 2003, 14(17): 1457-1460.
ZHOU W X, TU J. Study on model of a new type coordinate measuring mechanism [J]. *China Mechanical Engineering*, 2003, 14(17): 1457-1460. (in Chinese)
- [34] 赵磊, 赵新华, 王收军, 等. 高速 6 杆并联测量机的运动学建模与奇异性求解[J]. 机械传动, 2016, 40(2): 54-58.
ZHAO L, ZHAO X H, WANG SH J, *et al.* Singularity calculation and kinematics modeling of high speed six-bar parallel measuring machine[J]. *Journal of Mechanical Transmission*, 2016, 40(2): 54-58. (in Chinese)
- [35] 王世营, 刘得军, 艾清慧, 等. 基于遗传算法的六自由度并联坐标测量机测量建模[J]. 计量技术, 2006(12): 3-6.
WANG SH Y, LIU D J, AI Q H, *et al.* Modeling of 6-DOF parallel-link coordinate measuring machine based on genetic algorithm[J]. *Metrology Science and Technology*, 2006(12): 3-6. (in Chinese)
- [36] 刘得军, 刘彩平, 韦荣方. 基于粒子群算法的 6-DOF 并联坐标测量机的测量建模[J]. 光学精密工程, 2008, 16(1): 76-81.
LIU D J, LIU C P, WEI R F. Measurement modeling for 6-DOF parallel-link coordinate measuring machine based on particle swarm optimization[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(1): 76-81. (in Chinese)
- [37] 马丽芹, 冯宇. 基于蚁群算法的六自由度并联坐标测量机测量建模[J]. 自动化信息, 2009(1): 47-49.
MA L Q, FENG Y. Measuring modeling for 6-DOF parallel coordinate measuring machine based on ant colony algorithm[J]. *Automation Information*, 2009(1): 47-49. (in Chinese)
- [38] 王娟. 基于虚拟样机的并联坐标测量机运动建模与仿真[D]. 大庆: 大庆石油学院, 2006.
WANG J. *Motion Modeling and Simulation of Parallel Coordinate Measuring Machine Based on Virtual Prototype* [D]. Daqing: Daqing Petroleum Institute, 2006. (in Chinese)
- [39] TSAI L W. *Robot Analysis: The Mechanics of Serial and Parallel Manipulators* [M]. New York: Wiley, 1999
- [40] AQUINO G, DE JESUS RUBIO J, PACHECO

- J, *et al.* Novel nonlinear hypothesis for the delta parallel robot modeling [J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 46324-46334.
- [41] DI GREGORIO R. Determination of singularities in delta-like manipulators [J]. *The International Journal of Robotics Research*, 2004, 23(1): 89-96.
- [42] PIERROT F, NABAT V, COMPANY O, *et al.* Optimal design of a 4-DOF parallel manipulator: from academia to industry [J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2009, 25(2): 213-224.
- [43] NABAT V, DE LA O RODRIGUEZ M, COMPANY O, *et al.* Par4: very high speed parallel robot for pick-and-place [C]. 2005 *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. August 2, 2005. *Edmonton, Alta., Canada*. IEEE, 2005: 553-558.
- [44] 贾帅帅. 并联坐标测量机刚柔耦合动力学研究 [D]. 青岛: 山东科技大学, 2011.
- JIA S S. *Study on Rigid-flexible Coupling Dynamics of Parallel Coordinate Measuring Machine* [D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2011. (in Chinese)
- [45] CHEN X L, WU L K, DENG Y, *et al.* Dynamic response analysis and chaos identification of 4-UPS-UPU flexible spatial parallel mechanism [J]. *Nonlinear Dynamics*, 2017, 87(4): 2311-2324.
- [46] YIU Y K, CHENG H, XIONG Z H, *et al.* On the dynamics of parallel manipulators [C]. *Proceedings 2001 ICRA. IEEE International Conference on Robotics and Automation* (Cat. No. 01CH3716 4). *Seoul, Korea*. IEEE, 2001: 3766-3771.
- [47] CHEN X L, LIANG X X, SUN X Y, *et al.* Workspace and statics analysis of 4-UPS-UPU parallel coordinate measuring machine [J]. *Measurement*, 2014, 55: 402-407.
- [48] 赵磊, 范梦然, 赵新华, 等. 柔性并联机器人非线性摩擦动力学建模与速度规划 [J]. *农业机械学报*, 2017, 48(5): 390-396.
- ZHAO L, FAN M R, ZHAO X H, *et al.* Nonlinear friction dynamic modeling and velocity planning of flexible parallel robot [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(5): 390-396. (in Chinese)
- [49] 赵磊, 赵新华, 周海波, 等. 并联测量机柔性动力学建模与误差耦合 [J]. *光学精密工程*, 2016, 34(10): 2471-2479.
- ZHAO L, ZHAO X H, ZHOU H B, *et al.* Flexible dynamic modeling and error coupling of parallel measuring machine [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 34(10): 2471-2479. (in Chinese)
- [50] LI S Y, HU P H. Analysis and optimization of measuring space for the 3-PSS parallel CMM [C]. 2012 *International Conference on Optoelectronics and Microelectronics*. August 23-25, 2012. *Changchun, Jilin, China*. IEEE, 2012: 437-442.
- [51] 张国雄. 三坐标测量机 [M]. 天津: 天津大学出版社, 1999.
- ZHANG G X. *Coordinate Measuring Machines* [M]. Tianjin: Tianjin University Press, 1999. (in Chinese)
- [52] ZHAO Y J. Error compensation of coordinate measuring machines with low stiffness [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering (English Edition)*, 2000, 13(2): 159.
- [53] 胡毅, 费业泰, 程文涛. 关节式坐标测量机热变形误差及修正 [J]. *机械工程学报*, 2011, 47(24): 15-19.
- HU Y, FEI Y T, CHENG W T. Thermal deformation error and correction for articulated arm coordinate-measuring machines [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2011, 47(24): 15-19. (in Chinese)
- [54] HENNEBELLE F, COOREVITS T, ASMAI SEL, *et al.* Impact of thermal gradients on the geometry correction of a bridge coordinate measuring machine [J]. *Measurement Science and Technology*, 2021, 32(2): 025002.
- [55] 黄慧娟. 3-PUU 并联坐标测量机轨迹控制策略研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2020.
- HUANG H J. *Research on Trajectory Control Strategy of 3-PUU Parallel Coordinate Measuring Machine* [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2020. (in Chinese)
- [56] 刘延斌, 韩秀英. 并联坐标测量机神经网络滑模控制 [J]. *机床与液压*, 2009, 37(8): 125-128.
- LIU Y B, HAN X Y. Adaptive neural network sliding mode control method of a parallel coordinate measuring machine [J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2009, 37(8): 125-128. (in Chinese)
- [57] 周围. 并联坐标测量机模糊 PID 控制系统研究 [J]. *机械与电子*, 2010, 28(2): 54-56.
- ZHOU W. Research on the fuzzy-PID control system for a 6-DOF parallel-link CMM [J]. *Machinery*

- & *Electronics*, 2010, 28(2): 54-56. (in Chinese)
- [58] ALIAKBARI M, MAHBOUBKHAH M. An adaptive computer-aided path planning to eliminate

errors of contact probes on free-form surfaces using a 4-DOF parallel robot CMM and a turn-table[J]. *Measurement*, 2020, 166: 108216.

作者简介:



欧阳凯(1994—),男,湖南邵阳人,博士研究生,2017年、2020年于合肥工业大学分别获得学士和硕士学位,主要从事坐标测量技术和并联机器人技术的研究。E-mail: 2020010001@mail.hfut.edu.cn

通讯作者:



胡鹏浩(1968—),男,安徽合肥人,博士,教授,博士生导师,1989年、1992年、2001年于合肥工业大学分别获得学士、硕士和博士学位,主要从事精密测试技术方面的研究。E-mail: hupenghao@hfut.edu.cn