

ZHUANZHU

Gough-Stewart平台的分析与优化设计

刘国军 编著

ZHUANZHU

西北工业大学出版社

Gough-Stewart PINGTAI DE FENXI YU YOUHUA SHEJI
Gough-Stewart 平台的分析与优化设计

刘国军 编著

西北工业大学出版社

西 安

【内容简介】 本书是根据作者 10 余年积累的文献资料,以及在攻读博士学位期间所作研究的基础上编写而成的。本书首先简单介绍 Gough - Stewart 平台的历史以及应用领域,然后进行运动学和动力学建模分析、固有频率的求解、奇异性的分析、性能指标的比较以及结构参数的优化。

本书可供高等学校的教师、学生和研究生,企业的工程技术人员,以及关注 Gough-Stewart 平台的各界人士阅读。

图书在版编目 (CIP) 数据

Gough - Stewart 平台的分析与优化设计 / 刘国军编著
—西安:西北工业大学出版社, 2019. 1
ISBN 978 - 7 - 5612 - 6376 - 1

I. ①G… II. ①刘… III. ①机器人—运动模拟器—
研究 IV. ①TP242

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 302489 号

策划编辑: 季 强
责任编辑: 孙 倩

出版发行: 西北工业大学出版社
通信地址: 西安市友谊西路 127 号 邮编: 710072
电 话: (029)88493844 88491757
网 址: www.nwpup.com
印 刷 者: 陕西金德佳印务有限公司
开 本: 787 mm×960 mm 1/16
印 张: 8.5
字 数: 173 千字
版 次: 2019 年 1 月第 1 版 2019 年 1 月第 1 次印刷
定 价: 28.00 元

前 言

Gough-Stewart 平台属于典型的六自由度并联机器人,由于其刚度大、承载能力强、精度高,被广泛地用作汽车运动模拟器、坦克运动模拟器、舰船运动模拟器、飞行模拟器等运动模拟平台,也被用作并联机床、定位装置等。Gough-Stewart 平台用作运动模拟平台,这是并联机器人广泛成功应用的领域。

国内外很多学者对 Gough-Stewart 平台进行了研究。现在国内越来越多的科技工作者进入了 Gough-Stewart 平台这个领域。但 Gough-Stewart 平台属于空间闭环机构,它的分析方法与传统的机械分析方法不一样,也与串联机器人分析方法不一样。关于 Gough-Stewart 平台的文章很多,但对于一个想进入这一领域的新人来说,要花费很长的时间从浩瀚的文献资料中才能找到所需要的知识。

笔者于 2006—2009 年攻读硕士研究生期间,就开始接触 Gough-Stewart 平台的知识,但当时只是很简单的了解。笔者 2009 年下半年进入哈尔滨工业大学电液伺服仿真及试验系统研究所攻读博士学位,师从哈尔滨工业大学电液伺服仿真及试验系统研究所所长——力学环境模拟设备方面的专家韩俊伟教授。哈尔滨工业大学电液伺服仿真及试验系统研究所研制了国内第一台空中对接机构综合试验台运动模拟器,并已经为国内外等多个工程领域的用户提供了几十台 Gough-Stewart 平台产品。在研究所已有项目和知识积累的基础上,在研究所和机电工程学院多位老师和师兄们的帮助下,笔者对 Gough-Stewart 平台的分析和优化设计进行了研究。2014 年笔者博士毕业参与工作后,也在不断地关注 Gough-Stewart 平台分析和优化设计等方面的文章。

本书是根据笔者 10 余年积累的文献资料,以及在攻读博士学位期间研究的基础上编写而成的。本书首先简单介绍 Gough-Stewart 平台的历史以及应用领域,然后进行运动学和动力学建模分析、固有频率的求解、奇异性的分析、性能指标的比较以及结构参数的优化。希望对刚进入这一领域的读者提供一些帮助。

由于水平有限,本书可能存在不少的不妥之处,也真诚希望读者、朋友和各方面的专家给予批评指正。笔者邮箱:liuguojun_iest@163.com。

刘国军

2018 年 5 月于湖南理工学院

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 Gough-Stewart 平台的提出	1
1.2 Gough-Stewart 平台的结构形式	4
1.3 Gough-Stewart 的应用	4
1.4 本书内容	13
参考文献	13
第 2 章 6-UPS 型 Gough-Stewart 平台简化运动学与动力学反解分析	16
2.1 运动学反解分析	16
2.2 动力学反解分析	22
2.3 仿真分析与验证	23
2.4 补充说明	24
参考文献	25
第 3 章 6-UCU 型 Gough-Stewart 平台完整运动学与动力学反解分析	27
3.1 引言	27
3.2 系统描述	28
3.3 完整运动学反解分析	30
3.4 完整动力学反解分析	37
3.5 模型验证	39
3.6 两种动力学模型的对比分析	44
3.7 本章小结	54
参考文献	55

第 4 章 Gough-Stewart 平台的位置正解与固有频率求解	56
4.1 位置正解	56
4.2 固有频率求解	60
参考文献	64
第 5 章 6-UCU 型 Gough-Stewart 平台的奇异性分析与检测	65
5.1 引言	65
5.2 奇异性分析	66
5.3 奇异性检测	70
5.4 奇异性检测实例分析	74
5.5 补充说明	80
参考文献	81
第 6 章 非冗余并联机器人奇异性分析与检测的一种工程方法	84
6.1 引言	84
6.2 奇异性分析	84
6.3 奇异性检测	89
6.4 实例分析	90
6.5 补充说明	91
参考文献	91
第 7 章 Gough-Stewart 平台的性能指标函数	93
7.1 引言	93
7.2 常用性能指标函数介绍	93
7.3 新建性能指标函数	101
7.4 本章小结	103
参考文献	104
第 8 章 六自由度运动模拟平台结构参数优化	106
8.1 引言	106

8.2	性能指标函数选择	107
8.3	多目标进化算法 NSGA-II	108
8.4	结构参数优化	109
8.5	设计实例分析	113
8.6	本章小结	119
	参考文献.....	120
第9章	考虑精度要求的六自由度运动模拟平台的运动学优化设计.....	123
9.1	引言	123
9.2	误差模型	123
9.3	优化设计算法	124
9.4	设计实例分析	125
9.5	补充说明	127
	参考文献.....	127

第 1 章 绪 论

Gough-Stewart 平台机构由 1 个动平台、1 个静平台和 6 条支路组成,如图 1-1 所示。每条支路通过铰链把线性作动器(如电动缸、液压伺服缸)连接于动平台与静平台上。

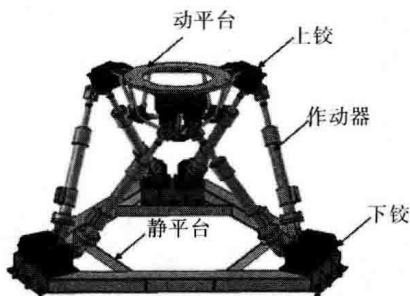


图 1-1 Gough-Stewart 平台机构

1.1 Gough-Stewart 平台的提出

世界上第一台 Gough-Stewart 平台是由 Gough 等人在 1947 年制定方案,于 1949 年开始设计,并于 1955 年制造完成的轮胎检测系统^[1],但很多学者称其为 Stewart 平台^[2]。为了体现 Gough 的贡献,现在一般采用名称为 Gough-Stewart 平台^[2]。为了正确评价早期各个学者对 Gough-Stewart 平台做出的贡献,现陈述 Gough-Stewart 平台早期发展的历史。在 1962 年,Gough 与 Whitehall 在文献^[3]中,对基于 Gough-Stewart 平台的轮胎检测系统进行了详细描述,实物照片如图 1-2 所示。他们提到^[3]:“主动副采用螺旋起重器(screwjacks),主动副通过两虎克铰分别连接于底座与上平台上”。

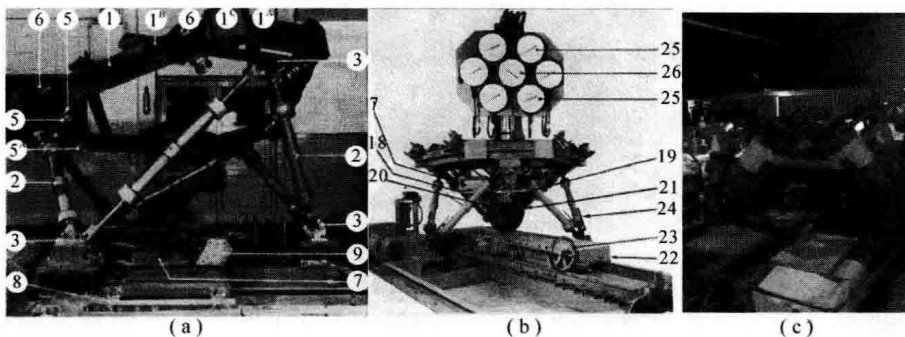


图 1-2 Gough 与 Whitehall 制造的轮胎检测系统

(a)局部图^[3]; (b)整体图^[3]; (c)产品实物图^[4]

1965年, Stewart 发表了关于并联机器人的著名文章 *A Platform with Six Degrees of Freedom*^[5], 引起了学术界的广泛关注。在文献[5]中, Stewart 与审阅者共同讨论时, 他们提出将六自由度并联机器人用于飞行模拟系统、海况模拟系统、加工机床等, Stewart 设想的机构如图 1-3 所示, 但并没有实际制造过。Gough 作为 Stewart 的文献[5]中的审阅者之一, 在讨论中提到了他们已经建造完成的六自由度轮胎检测系统, 并提供了实物照片(见图 1-4), 但 Stewart 回答说以前并不知道 Gough 他们已制造的机构。并且 Gough 在文献[5]中也明确指出“*In point of fact, the universal joint systems attaching the jacks to the platform are identical to those attaching the jacks to the foundation.*”, 即作动器通过两虎克铰分别连接于底座与上平台上(Fichter, Kerr 和 Rees-Jones 在文献[1]中把 Gough 与 Whitehall 的文献[3]和 Stewart 的文献[5]附在后面)。

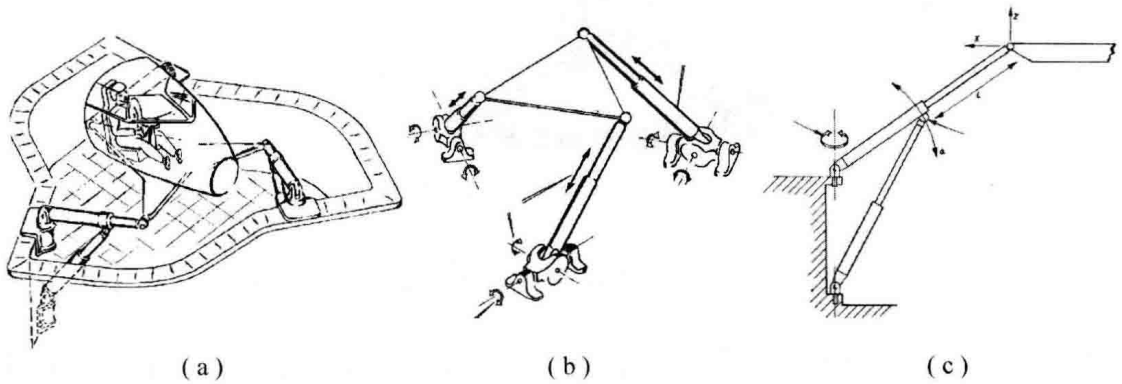


图 1-3 Stewart 提出的机构^[5]

(a)示意图;(b)整体布置;(c)支路布置

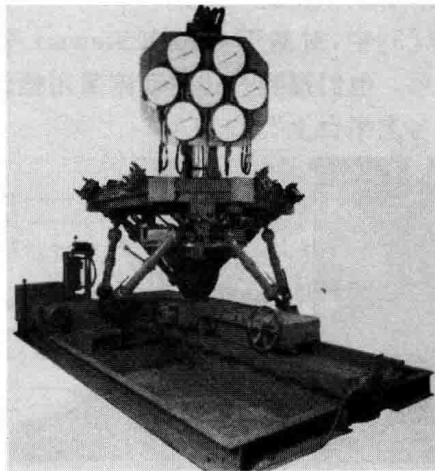


图 1-4 Gough 提供的照片^[5]

20 世纪 60 年代初, 其他研究人员也独立发明设计了类似的机构^[1]。美国的 Cappel 在

2002年给编辑的信中指出,他在1961年发明了用作飞行模拟器的平台系统,后来才了解到 Stewart 的设备,直到2003年才知道 Gough 等人制造的轮胎检测系统^[1]。Cappel 于1964年12月7日向美国专利商标局对他独立发明的运动模拟器提出了专利申请,并于1967年1月3日得到专利颁证^[6]。Cappel 发明的运动模拟器结构示意图如图1-5(a)^[6]所示,即为现在通常所说的 Gough-Stewart 平台。在他的专利说明书中也提供了单个支路液压驱动系统图^[6](见图1-5(b))。Cappel 在专利说明书中指出^[6]:“用两虎克铰分别把线性伸缩作动器连接于地基与平台上”。基于联合技术公司西科斯基飞机部对六自由度直升机飞行模拟器的设计与建造需求,Cappel 建造了有史以来第一台基于 Gough-Stewart 平台的飞行模拟器,如图1-6所示^[2]。

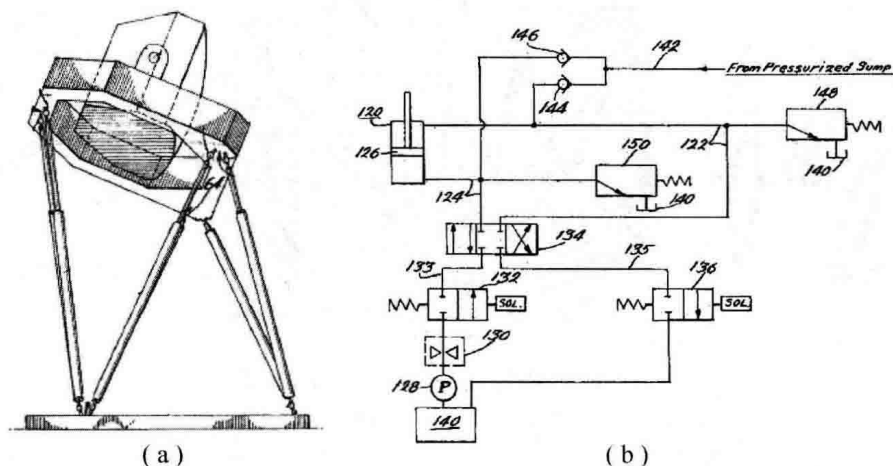


图1-5 Cappel发明的运动模拟器^[6]

(a)示意图;(b)单个支路液压驱动系统图

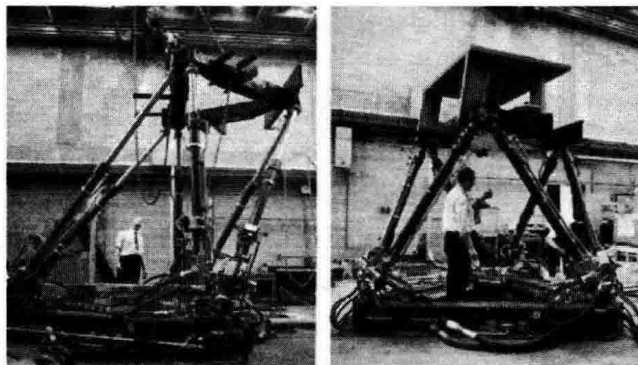


图1-6 第一台基于 Gough-Stewart 平台的飞行模拟器

由这些历史资料的分析中可得到:Gough 与 Cappel 分别都发明设计了 Gough-Stewart 平台,他们发明设计的 Gough-Stewart 平台两端都是采用虎克铰,且 Gough 是最早提出、发明、设计和实际制造 Gough-Stewart 平台的。

1.2 Gough-Stewart 平台的结构形式

Gough-Stewart 平台按上、下铰点连接方式的不同可分为 6-6, 6-3 和 3-3 等结构形式^[7]。6-6 形式的 Gough-Stewart 平台是最常用的结构, 它的上、下铰点分别连接于上、下平台不同的 6 个点上, 如图 1-7(a)^[7]所示。6-3 形式的 Gough-Stewart 平台是把 6-6 形式的 Gough-Stewart 平台的上平台中 3 条短边分别合为 1 点, 如图 1-7(b)^[7]所示。3-3 形式的 Gough-Stewart 平台是把 6-3 形式的 Gough-Stewart 平台的下平台中 3 条短边各自合为 1 点, 如图 1-7(c)^[7]所示。为了制造安装方便, 六自由度运动模拟平台一般采用 6-6 结构。

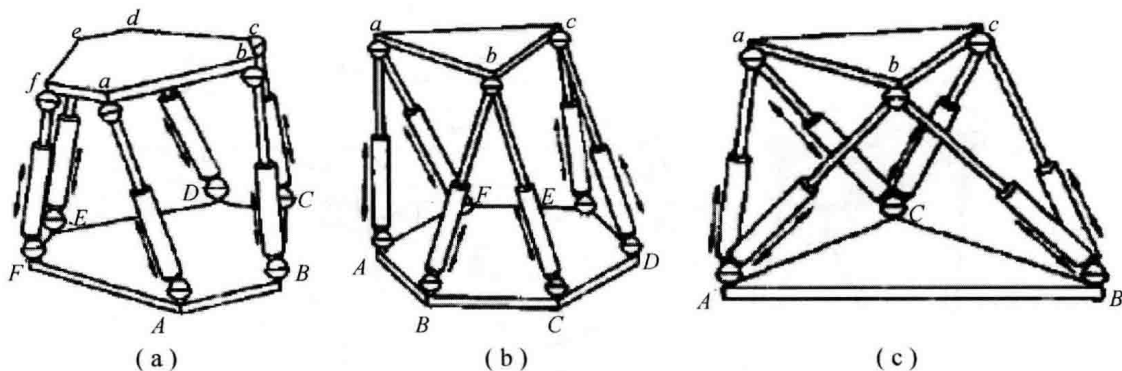


图 1-7 Gough-Stewart 平台的不同结构形式
(a) 6-6 结构; (b) 6-3 结构; (c) 3-3 结构

Gough-Stewart 平台按支路中运动副的连接形式不同, 又可以分为 6-SPS(球铰-移动副-球铰)、6-UPS(虎克铰-移动副-球铰)、6-UCU(虎克铰-圆柱副-虎克铰)、6-SCS(球铰-圆柱副-球铰)结构^[8]。当 Gough-Stewart 平台采用 SPS, SCS 结构的支路时, 构成了冗余的被动运动奇异(redundant passive motion singularity)^[9], 这些奇异结构要避免^[9]。

1.3 Gough-Stewart 的应用

Gough-Stewart 平台属于典型的六自由度并联机器人, 由于其刚度大、承载能力强、精度高, 被广泛地用作汽车运动模拟器、坦克运动模拟器、舰船运动模拟器、飞行模拟器等运动模拟平台以及用作并联机床和定位装置等^[9]。

1.3.1 六自由度运动模拟平台

由于具有精度高、承载能力大等优点, Gough-Stewart 平台被广泛用作各种六自由度运动模拟平台^[9]。如基于联合技术公司的西科斯基飞机部对六自由度直升机飞行模拟器的设计与建造需求, Cappel 建造了有史以来第一台基于 Gough-Stewart 平台的飞行模拟器, 如图 1-6^[2]所示; 全球著名飞行模拟器制造商——加拿大 CAE 公司制造的 3000 系列全动直升机飞行模

拟器与 7000 系列 D 级全动飞行模拟器分别如图 1-8^[10] 和图 1-9^[10] 所示。

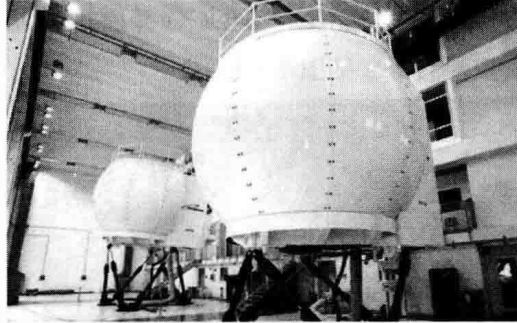


图 1-8 CAE 3000 系列全动直升机飞行模拟器



图 1-9 CAE 7000 系列 D 级全动飞行模拟器

由于虎克铰比球铰的受拉性能好^[7]，六自由度运动模拟平台一般采用虎克铰，又由于中间电动缸与液压缸作动器的活塞杆不仅能沿轴线方向进行伸缩运动，还能绕其轴线方向转动，从而成为 6-UCU 并联机器人。如 Ma Ou 在其博士学位论文^[11]中提到现代商用飞行模拟器一般采用 Gough-Stewart 平台结构，其单个支路结构如图 1-10 所示^[11]：两端用虎克铰把圆柱副分别连于上、下平台上，由于活塞杆不仅能沿轴线方向进行伸缩运动，还能绕其轴线方向转动^[11]，从而为 6-UCU 并联机器人，而不是 6-UPS 并联机器人。

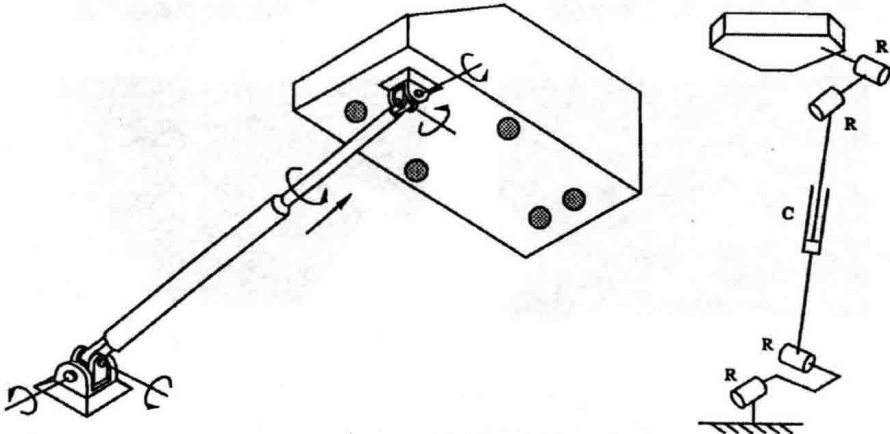


图 1-10 商用飞行模拟器支路结构

全球著名运动模拟平台制造商穆格 (Moog) 公司^[12] 制造的非冗余六自由度运动模拟平台, 不论是液压驱动的还是电动的, 一般都采用 6-UCU 并联机器人, 如 Moog 公司生产的采用电动缸驱动的 5000E 运动模拟平台^[13] (见图 1-11)。

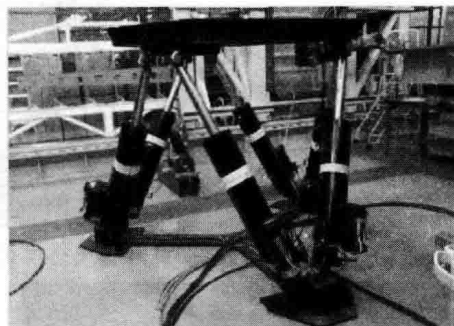


图 1-11 Moog 公司 5000E 电动缸驱动运动模拟平台

世界上领先的运动赛车和车辆模拟器设计者和制造商克鲁登 (Cruden) 公司生产的 Cruden Hexatech 终极赛车模拟器^[14] (见图 1-12), 能够模拟真实的 F1, NASCAR, WRC 和 LeMans 等比赛。Cruden Hexatech 终极赛车模拟器^[14] 也是采用电动缸驱动的 Gough-Stewart 平台, 且上、下铰都分别采用虎克铰, 即为 6-UCU 并联机器人。

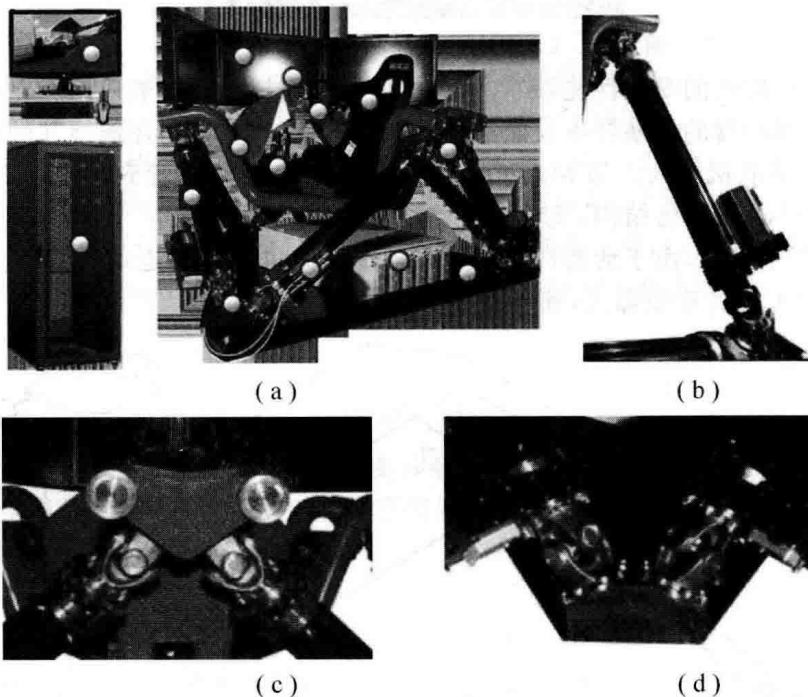
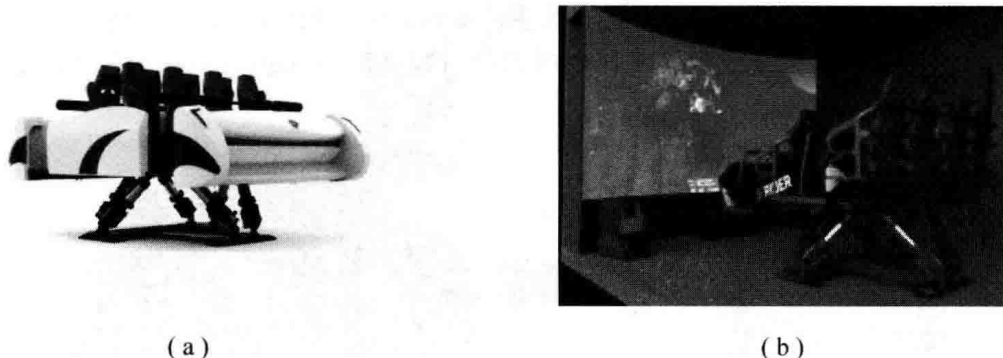


图 1-12 Cruden Hexatech 终极赛车模拟器

(a) 整体图; (b) 支路图; (c) 上铰; (d) 下铰

4D-7D 影院六自由度运动座椅一般也采用 Gough-Stewart 平台,如世界最大的游戏超级商店——BMI Gaming 公司官网上提供的 VALKYRIE 和 X-Rider 影院运动座椅如图 1-13 所示^[15]。



(a)

(b)

图 1-13 4D-7D 影院六自由度运动座椅

(a) VALKYRIE 影院运动座椅;(b) X-Rider 影院运动座椅

Gough-Stewart 平台还用作空间对接机构综合试验设备。如为了实现“神舟八号”和“天宫一号”的空间对接试验,哈尔滨工业大学电液伺服仿真及试验系统研究所为中国航天科技集团公司研制了空中对接机构综合试验台运动模拟器(验收时间:2008年,如图 1-14 所示,为国内第一台空间对接机构半物理仿真系统)^[16]。运动范围大:纵向位移 3m,横向位移 1.7m,绕任意轴转角为 50° ;精度高:静态误差小于 1mm, 0.1° ,重复定位精度 0.2mm;频率高:12Hz (-2dB , 70°);安全保护:故障情况下作动器快速锁紧,锁紧时间 10ms,锁紧位移 10mm^[16]。图 1-15 所示为俄罗斯“能源”联合体对接机构综合试验设备^[17]。

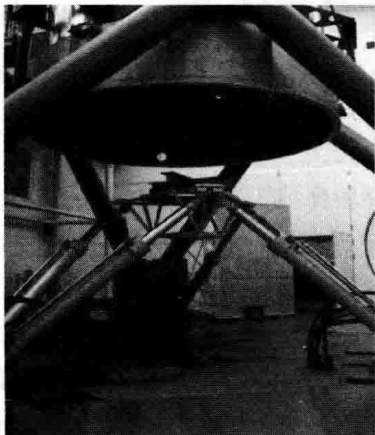


图 1-14 哈尔滨工业大学研制的空中对接机构综合试验台运动模拟器

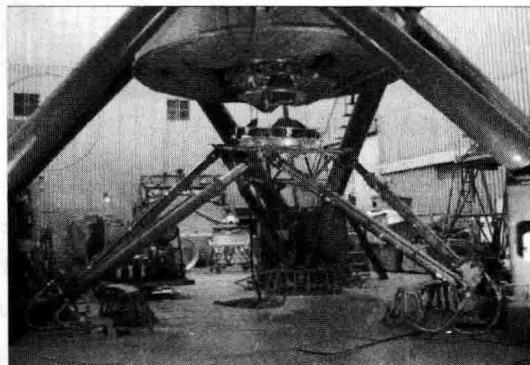


图 1-15 俄罗斯“能源”联合体对接机构综合试验设备

从 2000 年开始,哈尔滨工业大学电液伺服仿真及试验系统研究所对 Gough-Stewart 平台的理论展开了深入的研究,并为国内外多个工程领域用户提供了几十台 Gough-Stewart 平台

产品,如空中对接半物理仿真试验大回路攻关试验台(见图 1-14)、船舶运动模拟器(见图 1-16)、两栖战车驾驶模拟系统(见图 1-17,负载:10t)^[18]、车端关系综合试验台(见图 1-18)^[19]等。但不管是电动缸驱动还是液压缸驱动的 Gough-Stewart 平台,上、下铰都采用虎克铰。由于电动缸和液压缸不仅能提供沿轴线方向的直线主动运动,还能绕轴线方向被动地转动,所以哈尔滨工业大学电液伺服仿真及试验系统研究所以往所制造的 Gough-Stewart 平台都是 6-UCU 并联机器人。

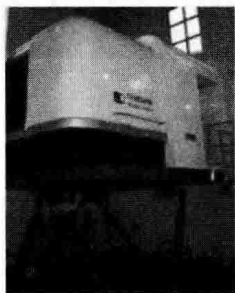


图 1-16 船舶运动模拟器

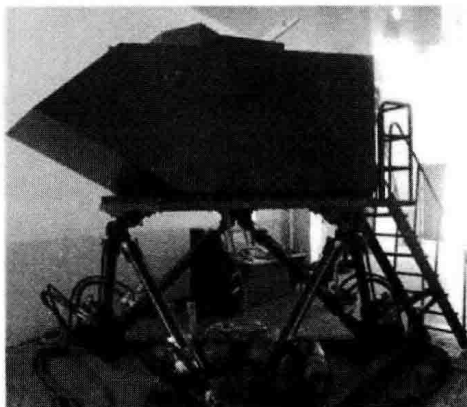


图 1-17 两栖战车驾驶模拟系统



图 1-18 车端关系综合试验台

以往大负载六自由度运动模拟平台主要采用液压运动系统,但随着大功率直流电机和矢量控制技术的发展和,电动运动系统开始逐步替代液压运动系统,它具有噪声低、无污染、维护和使用成本低等特点^[20]。Moog 公司的电动运动平台 MB-E-6DOF/60/14000kg(见图 1-19)和电动缸内置空气弹簧支撑系统运动平台 MB-EP-6DOF/60/14000kg(见图 1-20)的最大动负载都可达到 14t^[12],采用电伺服驱动及气动辅助平衡机构的炮塔测试系统(Tank Turret Test System,见图 1-21)有效载荷可达到 24t^[21]。国内哈尔滨工业大学电液伺服仿真及试验系统研究所采用电伺服驱动及气动辅助平衡机构研制了目前国内承载能力最大的电伺服驱动六自由度运动平台(见图 1-22),有效载负荷可达 15t^[22]。

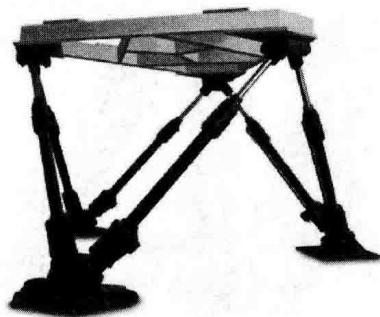


图 1-19 Moog 公司的电动运动平台 MB-E-6DOF/60/14000kg

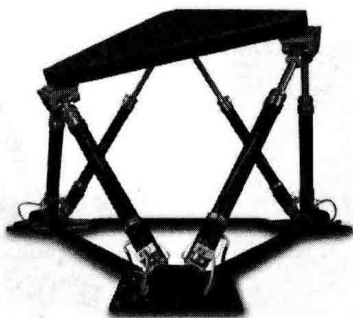


图 1-20 Moog 公司的运动平台 MB-EP-6DOF/60/14000kg

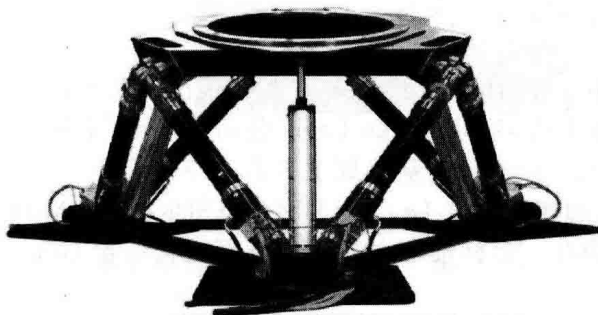


图 1-21 Moog 公司的炮塔测试系统

图 1-22 哈尔滨工业大学研制的大承载能力
电伺服驱动六自由度运动平台

以六自由度运动模拟平台为基础,加上其他的设备或装置,可以构成自由度多于六的运动模拟平台,如哈尔滨工业大学电液伺服仿真及试验系统研究所研制的七自由度运动模拟平台(见图 1-23),模拟负载的俯仰、横滚、偏航三个角运动最高频率可达 15Hz,偏航最大角位移达到 $\pm 90^\circ$,角速度达到 $100^\circ/\text{s}$,角加速度达到 $800^\circ/\text{s}^2$ ^[24]。博世力士乐为同济大学提供的八自由度驾驶模拟器(见图 1-24),凭借同济大学实验室里的模拟驾驶舱,人们也能精准地感受到车辆驾驶过程中的真实体验^[25]。Moog 公司以六自由度运动模拟平台为基础,加上一个两自由度(旋转角 roll 和俯仰角 pitch)的倾斜平台,构成了一个八自由度的平台(见图 1-25)^[26]。两自由度平台旋转角和俯仰角分别能达到 30° 。整个八自由度运动平台旋转角和俯仰角分别能超过 50° ^[26]。



图 1-23 哈尔滨工业大学研制的七自由度运动平台



图 1-24 同济大学的八自由度驾驶模拟器

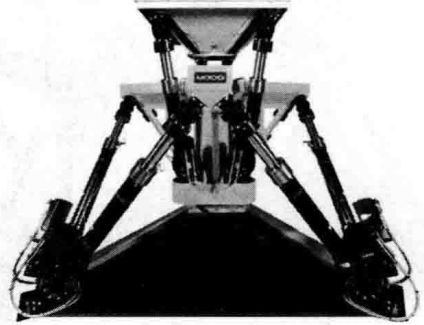


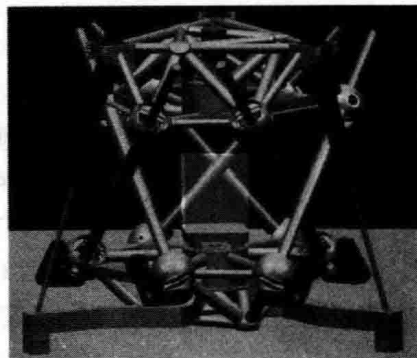
图 1-25 Moog 公司的八自由度运动模拟平台

1.3.2 其他应用

国外对并联机床的研究是从 20 世纪 80 年代开始的,并于 90 年代相继推出了形式多样的产品化样机。1994 年美国芝加哥 IMT 博览会上的 Giddings & Lewis 公司 Variax 并联机床如图 1-26 所示^[27]。每条支路通过万向接头(gimberls)分别连到上平台和下平台上^[27]。加工精度达到 $10\mu\text{m}$,最大速度为 $66\text{m}/\text{min}$,最大加速度超过 $1g$ 。OKUMA 公司生产的 PM-600 并联机床如图 1-27 所示^[28]。图 1-28 所示为在一台标准的立式铣床下面配置一台 Gough-Stewart 平台,可以变成一个五轴加工中心^[29]。



(a)



(b)

图 1-26 Giddings & Lewis 公司的 Variax 并联机床
(a)样机;(b)万向接头布置图