

少自由度并联支撑机构 动基座自动调平系统

SHAOZIYOU DU

BINGLIAN ZHICHENG JIGOU

DONGJIZUO ZIDONG TIAOPING XITONG

朱大昌 蔡进宝 著



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press

少自由度并联支撑机构 动基座自动调平系统

朱大昌 蔡进宝 著

北 京
冶金工业出版社
2012

内 容 提 要

本书针对目前动基座自动调平技术领域所存在的问题,详细阐述了采用少自由度并联机构作为动基座自动调平平台支撑结构的重要性、新型动基座自动调平平台及其控制系统的设计原则与方法,以及运用少自由度并联机构实现动基座自动调平平台机动实时调平的有关研究内容。

本书可供从事并联机构学及动基座自动调平技术研究工作的人员、大专院校机构学及智能控制专业的师生以及有意于自动调平技术领域发展的企业相关人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

239774 少自由度并联支撑机构动基座自动调平系统/朱大昌, 蔡进宝著. —北京:冶金工业出版社, 2012. 9

ISBN 978-7-5024-6028-0

I. ①少… II. ①朱… ②蔡… III. ①机械设计
IV. ①TH122

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 211615 号

出 版 人 谭学余

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009

电 话 (010)64027926 电子信箱 yjchs@cnmip.com.cn

责任编辑 杨 敏 美术编辑 彭子赫 版式设计 孙跃红

责任校对 郑 娟 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-6028-0

冶金工业出版社出版发行; 各地新华书店经销; 北京百善印刷厂印刷

2012 年 9 月第 1 版, 2012 年 9 月第 1 次印刷

148mm×210mm; 5.25 印张; 160 千字; 158 页

19.00 元

冶金工业出版社投稿电话: (010)64027932 投稿邮箱: tougao@cnmip.com.cn

冶金工业出版社发行部 电话: (010)64044283 传真: (010)64027893

冶金书店 地址: 北京东四西大街 46 号(100010) 电话: (010)65289081(兼传真)

(本书如有印装质量问题, 本社发行部负责退换)

前 言



本书是国家自然科学基金资助项目“基于少自由度并联支撑机构的动基座自动调平系统研究”（编号：50965007）及江西省自然科学基金资助项目“基于全柔顺并联支撑机构的空间微纳尺度超精密定位系统研究”（编号：20114BAB206008）的部分研究成果，主要介绍了采用少自由度并联机构作为动基座自动调平系统支撑机构及其调平性能。

自动调平技术广泛应用于工程机械、航空航天、军事等领域，其调平性能直接影响到系统的精度。目前，自动调平技术采取的支撑机构难以建立精确的数学模型，且采用单点调平方式影响了调平的快速性和准确性。本书采用四自由度并联机构 4-SPS (PS) 及六自由度并联机构 Stewart 平台作为动、静基座自动调平系统的支撑机构，并对动、静基座自动调平平台并联支撑机构运动学、动力学进行了分析；在此基础上，对静基座大负荷及动基座机动实时调平两种不同应用场合，分别采取带观测器滑模变结构控制及基于随机预测模型的变结构广义预测控制，进行了自动调平平台控制系统及自动调平特性闭环控制仿真对比研究。

本书可供从事并联机构学及动基座自动调平技术研究工作的

人员、大专院校机构学及智能控制专业的师生以及有意于自动调平技术领域发展的企业相关人员参考。

由于作者的时间和水平有限，书中不足之处，敬请读者批评指正，对此作者将不胜感谢！

作 者
2012 年 4 月

目 录

1 绪论	1
1.1 动基座自动调平技术概论	1
1.1.1 自动调平系统研究现状	1
1.1.2 现阶段自动调平系统的组成及调平原理	3
1.1.3 自动调平系统的调平性能及应用	4
1.2 自动调平系统的控制系统组成	6
1.3 现阶段自动调平系统存在的问题	8
1.4 并联机构的起源和应用现状	8
1.4.1 并联机构的起源	10
1.4.2 并联机构的应用现状	12
1.5 并联机构机构学研究进展	18
1.5.1 六自由度并联机构研究进展	18
1.5.2 少自由度并联机构研究进展	20
1.5.3 少自由度并联机构综合方法	23
1.6 并联机构控制系统研究进展	24
1.6.1 并联机构控制方法研究	24
1.6.2 滑模变结构控制发展概况	25
1.6.3 滑模变结构预测控制理论及应用	27
1.7 本书的主要研究内容	28
2 静基座自动调平系统 Stewart 平台型并联支撑机构	30
2.1 Stewart 型并联支撑机构运动学分析	30
2.1.1 Stewart 型并联支撑机构构型及坐标系建立	30
2.1.2 Stewart 型并联支撑机构位置正/反解	32
2.1.3 Stewart 型并联支撑机构速度/加速度分析	35

2.2	Stewart 型并联支撑机构动力学分析	38
2.2.1	基本概念简介	38
2.2.2	Stewart 型并联支撑机构动力学模型	40
2.3	静基座自动调平平台并联支撑机构模型	43
2.3.1	Stewart 型并联支撑机构实验参考模型	43
2.3.2	Stewart 型并联支撑机构实验仿真模型	44
2.4	静基座自动调平平台开环调平特性仿真研究	45
2.4.1	支链运动学仿真研究	46
2.4.2	支链动力学仿真研究	49
2.4.3	静基座自动调平平台调平性能仿真研究	51
2.5	本章小结	52
3	少自由度并联支撑机构自动调平系统研究	54
3.1	4-SPS (PS) 型四支撑并联机构研究	54
3.1.1	螺旋与反螺旋理论	54
3.1.2	4-SPS (PS) 型并联机构运动特性分析	56
3.1.3	支撑机构动平台位置正/反解	57
3.2	4-SPS (PS) 型并联支撑机构运动学分析	60
3.2.1	4-SPS (PS) 型并联支撑机构 Jacobian 矩阵分析 ...	60
3.2.2	结构参数约束条件	62
3.3	4-SPS (PS) 型并联支撑机构模型建立	63
3.3.1	理想 (参考) 数学模型建立	64
3.3.2	实验仿真模型建立	66
3.4	动基座自动调平系统仿真研究	68
3.4.1	自动调平平台调平控制的理论运动规划	68
3.4.2	4-SPS (PS) 型四自由度并联支撑机构支链运动仿真对比研究	68
3.4.3	动基座自动调平系统调平性能仿真研究	70
3.5	本章小结	72

4 自动调平平台液压伺服系统研究	74
4.1 液压伺服系统的数学描述	75
4.1.1 四通阀控非对称液压缸数学模型	75
4.1.2 多通道液压伺服系统解耦分析	80
4.1.3 自动调平平台液压伺服系统解耦仿真研究	82
4.2 液压伺服系统性能分析	85
4.2.1 单通道液压伺服系统稳定性分析	85
4.2.2 液压伺服系统闭环频率特性	87
4.2.3 液压伺服系统精度分析	88
4.3 静基座自动调平平台液压伺服系统开环频率特性分析	91
4.4 动基座自动调平平台液压伺服系统分析	93
4.4.1 液压伺服系统瞬态响应	93
4.4.2 液压伺服系统加速度负反馈校正	93
4.4.3 液压伺服系统加速度和速度负反馈校正	94
4.5 动基座自动调平平台液压伺服系统性能分析	95
4.6 本章小结	98
5 静基座自动调平平台控制系统研究	99
5.1 滑模变结构控制理论	99
5.1.1 滑动模态的存在和到达的条件	100
5.1.2 等效控制及滑动模态方程	100
5.1.3 滑模变结构控制器设计基本方法	102
5.1.4 仿真研究	102
5.2 静基座自动调平平台滑模变结构控制研究	107
5.2.1 静基座自动调平平台液压伺服系统模型	107
5.2.2 静基座自动调平平台控制系统设计	108
5.2.3 控制系统稳定性分析	109
5.2.4 静基座自动调平平台调平性能仿真研究	111
5.3 静基座自动调平平台带观测器滑模变结构控制研究	112
5.3.1 观测器的结构及设计方法	113

5.3.2	静基座自动调平平台带干扰观测器变结构 控制器设计	117
5.4	基于干扰观测器的静基座自动调平平台调平性能研究 ...	118
5.4.1	带干扰观测器滑模变结构控制器仿真研究	118
5.4.2	静基座自动调平系统支链运动仿真研究	119
5.4.3	静基座自动调平系统自动调平性能仿真研究	121
5.5	本章小结	122
6	动基座自动调平平台控制系统研究	124
6.1	基本原理	124
6.1.1	广义预测控制算法	124
6.1.2	广义预测控制参数选择	128
6.1.3	广义预测控制的稳定性分析	129
6.2	路面不平度随机预测模型	132
6.3	变结构广义预测控制	134
6.3.1	具有极点配置的广义预测控制	134
6.3.2	基于辅助控制量的变结构广义预测控制	136
6.4	动基座自动调平平台调平性能分析	137
6.4.1	路面不平度随机模型建立	137
6.4.2	变结构广义预测控制系统	140
6.4.3	动基座自动调平平台调平性能分析	141
6.5	本章小结	144
7	结论	146
	参考文献	148

1 绪 论

1.1 动基座自动调平技术概论

1.1.1 自动调平系统研究现状

动基座自动调平系统通过对支撑结构的调整以达到支撑平面在载体运动过程中保持水平,为被支撑物提供一个水平工作平台,提高其工作效率。自动调平技术在许多工程和国防领域都有着重要的应用,如特种工程机械^[1, 2]、机动导弹发射架^[3]、车载雷达^[4]、防空火炮^[5]等,而在这些工程应用中自动调平系统快速性和准确性是影响被支撑物工作效率的关键因素。动基座自动调平系统机动调平过程是

以其系统的误差方程为基础,在机动实时调平过程中必须对所建立的误差模型进行补偿计算,并以此作为控制信号来修正调平平台的位姿与方位。现阶段由于支撑结构的限制,通常采用静基座情况下建立的静态误差模型为基础,忽略平动误差与姿态误差的耦合,借此研究动、静基座自动调平系统的误差传播。由于在动基座自动调平系统运动中各种干扰及调平时间、调平平台上惯性元器件精度的限制,这种误差传播调平方式已无法实现较高精度的机动实时调平。西安电子科技大学盛英提出采用六自由度 Stewart 型并联机构作为静基座自动调平系统支撑机构的设计方案,对静基座条件下调平性能进行了分析,由于建立了较为精确的静基座自动调平系统运动学及动力学模型,静基座调平精度及快速性得到了进一步提高。然而,由于动基座条件下需要建立调平平台运动学及动力学误差模型,并借此进行机动实时误差模型修正。因此,选择一个合适的支撑机构,建立动基座自动调平系统运动学及动力学误差模型是研制动基座自动调平系统的关键技术之一。

目前的调平系统主要有三支撑、四支撑、六支撑等方案,通过对

支撑结构的调整以达到支撑平面在外界干扰（载体运动或支撑点变化等）的情况下保持水平。1965年，Stiffel将三支撑^[6]、四支撑^[7]结构形式用于自动调平系统并申请了专利，随后，Algonquin^[8]在其申请的自动调平系统设计中明确提出应充分考虑各支撑腿之间耦合作用所引起的运动的非同步性，这些理论的提出使自动调平系统广泛应用成为可能。Burtona等^[9]采用四支撑自动调平系统对机车主动悬挂问题进行了研究，并采用了主动控制策略试图解决由于单点调节对系统快速性的影响，Grove^[10]对航空升降设备的自动调平系统采用双液压伺服系统，通过辅助液压伺服系统的微调解决“虚腿”问题，但是由于结构的“冗余”驱动使得自动调平系统复杂，难以维护，反应速度慢。Sun^[11]等采用液压伺服同步控制技术对四支撑升降台自动调平系统进行设计。三支撑调平容易实现，但抗倾覆能力差。四支撑、六支撑虽然抗倾覆能力强，但存在静不定问题，容易产生“虚腿”，静不定次数越高，系统越复杂^[12]。目前的调平方式为了避免“虚腿”问题，大部分采用向最高支撑靠拢的方法，而这种方法使得调节的余量越来越小，不能彻底解决“虚腿”问题。

针对这一问题，郭俊岑等^[13]对支撑起的平台进行多次检测四个液压支腿压力并进行调平直至相对稳定工作状态，这一方法在相对稳定的工作状态下预防了“虚腿”现象，但却不适应环境的时变场合且不能保证快速性的要求。姜文刚等^[14]采用逐个伸展支撑的方法，在调平完成后，逐个将支撑往下伸展，通过水平传感器检测的结果判断虚腿并使其结实着地，这虽适应了环境的变化但无法满足系统的快速性。由于四点及以上支撑的工作平台是一刚性结构，其平衡处于静不定状态，多点调节时因每个支腿的位移、速度均不相同，多个支腿的运动相互制约，使得多点调节控制算法难以实现，所以在以往的系统调平中，大部分采用了单点调平的方案^[15, 16]，而这种调平方案很难满足自动调平系统的快速性和准确性。

20世纪90年代初，倪江生等^[17]实现了四点支撑的雷达天线座车全自动电液式调平，且调平精度小于6′，现装备于车载雷达的电液式自动调平系统多数是由该单位所提供。90年代中期，倪江生等^[18]又提出六点支撑液压平台的位置调平和角度调平等两种调平方法。

盛英等^[19]针对重型、高精度、六点支撑的液压平台特点,设计了实现自动调平的电液式自动调平系统,平台的最终调平精度为3'。2002年,盛英等^[12]参照 Stewart 型并联机构,将六腿支撑液压式平台的高次静不定平台结构转化为静定结构,通过对平台机构运动学和动力学分析,得到了关于腿长、液压缸速度、加速度、驱动力的计算机参数化调平算法,从而为并联机构在自动调平支撑系统中的应用提供了理论依据。与此同时,中国电子科技集团公司第14研究所某高机动雷达平台采用的电液式自动调平系统在3min内将平台的精度调整到3'以内。

李忠于^[20]针对雷达车在支撑架设、撤收过程中地面坡度对支撑腿较大弯矩的影响,对支撑腿的受力工况进行了分析。针对大型支撑平台,姜文刚等^[14]建立了大型平台支撑数学模型,提出了一种解耦控制方法,以解决调平过程中虚腿与实腿的界定问题。孙利生^[21]针对具有较大倾覆力矩的重型设备自动调平研制了一种大跨距四点支撑液压自动调平系统并讨论了液压控制原理和计算机控制策略。王平等^[22]利用双轴水平传感器实现四点追逐式调平过程,以实现雷达座车的快速机动性要求。在自动调平机动性方面,邓飙等^[3]根据发射系统横倾角、俯仰角以及四个调平液压支腿之间的距离计算出每个液压支腿的调平量,从而进行一次调平,由于各个支腿之间的耦合运动,这种方法是无法满足自动调平系统的准确性的。

综上所述,尽管研究人员采用了不同的方法和技术以提高自动调平系统调平性能,但是由于支撑结构存在静不定和支撑点的运动耦合问题,至今为止的自动调平系统在各种应用场合往往达不到所要求的快速性和准确性,并且不能实现在运动中实时调平。

1.1.2 现阶段自动调平系统的组成及调平原理

现阶段自动调平系统大部分采用液压伺服控制系统,由均载刚性平台、支撑系统以及调平控制系统所组成。传统的自动调平系统平台在移动状态下由运输工具运载,进入工作状态时,平台由支撑系统支撑并与地面脱离,在一定的时间内调平并满足一定的精度要求,自动调平系统平台一旦调平后,其位置被锁定以保证平台上的精密装置正

常工作。四支撑自动调平系统平台模型如图 1-1 所示。

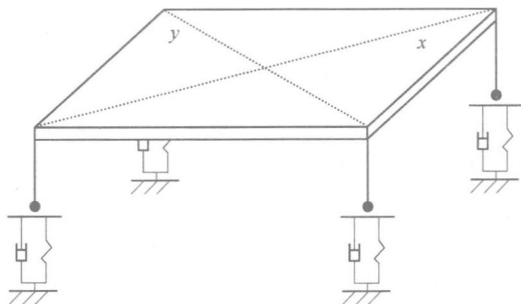


图 1-1 传统四支撑自动调平平台模型

自动调平的先决条件是要找出平面的倾斜角，因此需要在平台上装设沿纵横两方向的 α 、 β 倾斜仪，倾斜仪输出的角度信号为电压信号，经整形放大、A/D 转换、滤波后送入控制器，即可参与平台的调平算法。四点支撑的工作台的 x 、 y 轴是根据水平传感器的安装位置确定的工作平台面上互相垂直的两个轴向，一般取为如图 1-1 中虚线方向。调节一个平面到水平状态的调节过程可以有单向调节和多向调节两种方案。单向调节是控制器根据平台倾斜角度和方位，通过调整算法确定调平策略并给出信号，输出信号经驱动放大，控制平台四个支撑腿油缸电磁阀动作，调整某个或几个液压缸的伸缩量，以实现平台调平，从而达到要求的水平精度。同时控制器检测四个液压缸受力情况，并进行补油动作，以保证四个支腿油缸均匀承重，保持平台的稳定性。多点调节则是采用各支撑腿同时运动，调整到一个预定点，其特点是响应速度快，但由于四点支撑的工作平台是一刚性结构，其平衡处于静不定状态，多点调节时因每个支腿的位移、速度均不相同，四个支腿的运动相互制约，同时难以建立准确的数学模型而使得具体的控制算法难以实现。

1.1.3 自动调平系统的调平性能及应用

在现代高科技局部战争中，导弹武器被大量使用，以雷达为代表的电子战已经白热化。除雷达常规性能外，对其机动性也提出了更高

的要求。雷达的机动性是指快速隐蔽和转移阵地的能力,当雷达转移到新的阵地后,由于天线座车不可能完全置于水平状态,因而会造成雷达天线波瓣的上翘或下俯,这对发现和跟踪目标是极为不利的。目前国外已装备有大批先进的高机动雷达,能够完成天线快速架设和撤收,有的天线还能自动升高,可避免遮挡物对雷达天线阵面的影响,有相当强的阵地适应能力。雷达进入阵地后,首先必须对车厢进行水平调整,调整的基本要求是:调整和撤离的时间短,调整后在野外环境条件下要求长时间保持不变,例如炮瞄雷达一般要求 24h 内水平误差小于 $30'' \sim 40''$,调整时间不大于 $1 \sim 2\text{min}$,撤收时间不大于 $30 \sim 50\text{s}$ 。现阶段我国雷达天线采用升降折叠塔架,液压传动控制,具有自动调平功能的技术组合结构形式,升降车所具备的基本性能包括:

(1) 起升高度除车桥高度以外,净空高可达 10m,起升时间为 3min 左右;

(2) 具有调平功能,3min 以内调平到 $6' \sim 3'$;

(3) 从升高到调平的时间少于 10min;

(4) 天线架设或撤收少于 20min;

(5) 可在小于 $5'$ 的坡地架设;

(6) 自重小于 4t,抗风能力小于 8 级。

座车调平系统可分别对配备机电式和液压式支腿的座车提供快速、准确地调平自动控制。该控制系统采用可编程控制器、嵌入式单板微电脑为核心控制部件,针对机电支腿,控制交流伺服电机的运动,电机牵引滚珠丝杠运动,实现座车四条支腿的联动,从而实现座车姿态的自动调平。机电式自动调平系统具有结构紧凑、体积小、控制灵活、调平平稳、可靠性高、维护简单、造价低廉等一系列优点,当支腿采用液压形式时,该控制系统则可以控制液压马达或油缸的运动,驱动支腿的垂直升降,同样可以完成座车的水平度调节。座车调平系统,可实现如下功能及技术指标功能:单腿独立升降运动;四条支腿的同步升、降操作;四条支腿的联动、自动调平;支腿运动过程、过载保护;实时监视座车平面的动态水平度;支腿自动锁紧、解除;四条支腿的上下限位指示、运动指示及着地指示。技术指标性能为:

- (1) 调平精度小于 $3'$;
- (2) 调平时间小于 1.5min ;
- (3) 支腿行程 $0 \sim 450\text{mm}$ 。

由以上自动调平系统的典型应用场合可知：现阶段自动调平系统主要应用四支撑结构对平台进行水平基准的调节，其调平特性有如下特点：

(1) 对于支撑面固定的情况，其实质是调整 x 、 y 平面与水平基准的误差，但是由于支撑面具有不确定性的倾斜，导致支腿的伸缩不具有垂直于支撑面的特性（在以往的资料中没有涉及），而这将使得平台具有沿 z 方向存在一个转动自由度，该自由度一般而言是现场所不需要的。

(2) 各支撑腿之间的伸展运动实质是平台沿既定轴线方向（一般为水平高度）的一个移动自由度，而这个自由度是由各支撑腿经过单点或多点调节完成的。

(3) 对于三支撑、六支撑结构的自动调平系统，其调平特性完全一致，但是三支撑由于抗倾覆能力差、六支撑由于调平过程复杂而较少采用。

1.2 自动调平系统的控制系统组成

传统的自动调平系统采用液压系统作为调平系统的动力源，根据系统实际情况，调平控制有两种调平算法：开环调节和闭环调节。开环调节为计算出工作台低边与高边的垂直高度差，直接控制低边支腿上升到这一高度；闭环调节则在低边支腿上升过程中不断地测量工作台的倾斜角，且不断调整，当工作台的倾斜角符合调平要求时，支腿停止运动，完成对工作台的调平。现阶段调平控制系统主要采用以下方式：

(1) 单片机控制系统。单片机控制器根据平台倾斜角度和方位，通过调整算法确定调平策略并给出信号，输出信号经驱动放大，控制平台四个支腿油缸电磁阀动作，调整液压缸的伸缩量，以实现平台调平，从而达到要求的水平精度，并保证四支撑腿油缸均匀承重，保证平台的稳定性。单片机系统框图如图 1-2 所示。

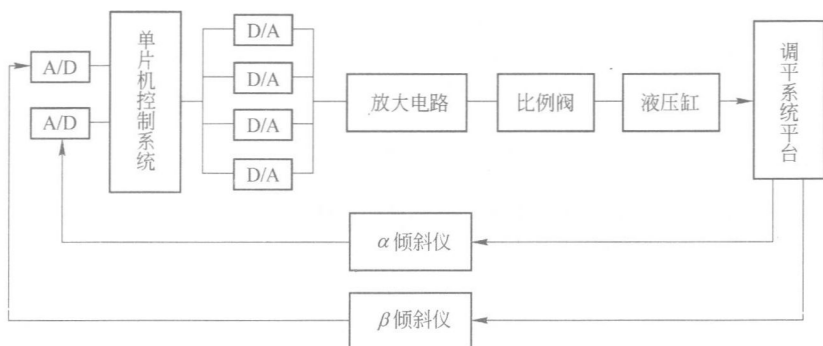


图 1-2 自动调平单片机控制系统

该系统的调平算法如下：调平过程中采用只升不降的原则，即把最高点作为基准点保持不动，其他各点上升向最高点位趋近， γ 为系统规定的水平精度，当满足条件 $s = |\alpha| + |\beta| < \gamma$ 时，再判断四个液压缸受力情况， $p_1 - p_4$ 为四个液压缸所受压力，当满足 $p_1 = p_2 = p_3 = p_4$ 时，调平过程结束。

(2) PLC 控制系统。该系统采用了较为先进的控制算法（如模糊 PID 算法等）对平台的位姿进行控制，以达到快速准确的调平目标。PLC 控制系统框图见图 1-3。

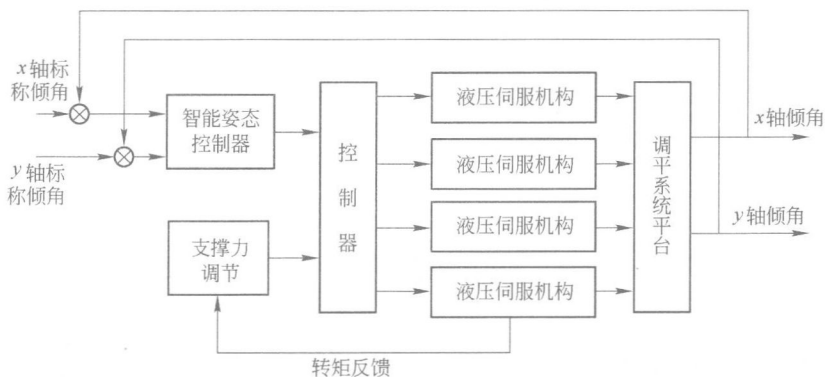


图 1-3 自动调平系统 PLC 控制系统

在调平过程中,四支撑腿均参与调平,并且遵循只上升不下降的原则。根据4个支撑腿着地后伺服电机电流变化和水平传感器的信息寻找最高点,保持最高点不动,按一定的算法控制其他低位点向高位点趋近。当满足 $\gamma \leq \sqrt{\theta_x^2 + \theta_y^2}$ 时,调平结束。

1.3 现阶段自动调平系统存在的问题

综上所述,现阶段自动调平系统虽然开始在控制手段上采用了一些较为先进的控制策略以弥补其结构上的缺陷,从而力求使系统响应满足快速准确的要求,但随着科技的发展,一些特殊的应用场合对自动调平性能提出了更高的要求,具体表现为以下几个方面:

(1) 在自动调平过程同时要求对多个自由度进行减震。如电子工业中的光刻加工,设备不仅要求六自由度的调平及调焦,还需要对周围环境所产生的震动进行减震,以保证运动平台和掩膜平台的对准套刻精度。

(2) 自动调平技术正向移动实时调平方向发展。如珍贵文物的运输需要在移动载体上进行运动实时调平,舰/车载发射台要具有在移动中对目标进行打击的能力,车载移动雷达天线的机动性,这些应用场合对运动实时调平技术提出了新的要求。

(3) 多点调节的调平技术。现阶段,虽然一些控制算法应用在单点调节的调平技术中,但是自动调平技术的快速性和准确性往往成为自动调平技术难以解决的问题。

作为新型自动调平系统的支撑结构,并联机构具备了以上传统自动调平系统所不具备的特点,因此本书将并联机构作为自动调平系统的支撑结构加以研究与应用,这将对提高自动调平系统实时调平性能无疑是一种技术上的创新。

1.4 并联机构的起源和应用现状

人类的历史就是不断认识世界和改造世界的历史,是生产力发展的历史。在生产力发展的过程中,生产工具的发展起了重要的作用。长期以来人类就幻想有一种拟人的机械,能实现如人的手、脚一样灵活自由的运动,能代替人从事各种非固定变化的复杂的劳动,从而将