

# 基于目标面的开关阀控液压系统智能调平技术\*

高 强, 潘宏侠, 何 臻

(中北大学机械工程与自动化学院, 太原 030051)

**摘 要:** 液压调平系统广泛的应用在现代国防与民用技术中, 而调平系统是一复杂的非线性时变系统, 且在调平过程中会出现液压支腿之间、支腿与倾角之间的“牵连耦合”问题。针对这一问题采用基于目标面的调平方法, 提出“以面调面”的面调平技术, 通过调平平面与目标平面的相对位置输出控制量, 设计了多输入多输出的MIMO非线性动态解耦模糊控制器。在调平过程中解决了耦合问题, 实现多点调节。通过某型特种车辆和某型雷达车的现场应用和实验验证, 很好实现了液压平台的精确快速调平。

**关键词:** 液压系统; 目标面; 解耦; 模糊控制; 面调平

**中图分类号:** TH137 **文献标志码:** A

## Intelligent Leveling Technology Based on Target Surface of Hydraulic System Controlled by Switch Valve

GAO Qiang, PAN Hongxia, HE Zhen

(School of Mechanical Engineering and Automatization, North University of China, Taiyuan 030051, China)

**Abstract:** Hydraulic leveling system has been widely used in modern national defense and civilian technologies. The control of hydraulic automatic leveling is a complex nonlinear time-varying system, and during hydraulic leveling, the “implicated coupling” problems between hydraulic legs as well as between the angle and legs would occur to the system. To solve this problem, the “surface-adjust-surface” leveling technique was proposed by the leveling method. The method is based on the target surface with multi-point and multi-direction control by outputting control variables from leveling the relative position between leveling surface and target surface. The decoupling fuzzy controller of MIMO (multiple input multiple output) nonlinear dynamic solution was designed. In the leveling process, the coupling problem was solved and the multi-point adjustment was realized. Online application and experimental verification were in a certain type of special vehicle and a certain type of radar vehicle. The result shows that precise and rapid leveling of hydraulic overloading platform is perfectly realized.

**Keywords:** hydraulic system; target surface; decoupling; fuzzy control; surface leveling

### 0 引言

在现代国防与民用技术中, 常常需要把一个装载某些设备的承载平台精确地调整到水平位置, 以提高系统的工作性能, 而且要求时间短、速度快、精度高、稳定性好。调平系统是一非线性时变系统, 很难建立一个精确的数学模型; 且在调平过程中会出现液压支腿之间、支腿与倾角之间的“牵连耦合”问题, 多支撑的“虚腿”问题, 不同的液压缸在调平系统中的机械特性、运动特性差别较大等问题, 这需要采用自适应控制技术或者智能控制方法才能得以解决。液压调平系统广泛应用于军用机动雷达、导弹战车、激光武器发射平台以及工业过程中的静力压桩机、液压支架、

大型钻机等领域, 建立高精度快速的自动调平技术就显得至关重要了。

### 1 平面调平技术数学模型

重载大跨距支撑液压平台都是刚性平台, 且液压支腿与平台之间都是固定链接的, 平台模型如图 1。

液压支腿只有一个自由度, 这点和 Stewart 液压平台有根本的不同, 在调平的过程中, 各支撑点不是固定不动, 在伸长动作过程中, 支腿受平台的牵

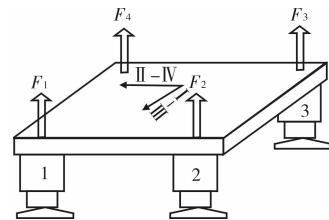


图 1 自动调平系统平台模型

引。

\* 收稿日期: 2010-09-05

基金项目: 山西省高校科技基金(20091125); 山西省“先进制造技术”重点实验室基金(SZZ0708); 中北大学科学基金资助  
作者简介: 高强(1975-), 男, 山西太原人, 讲师, 研究方向: 机械电子。

引在地面上有移动,且这种位移是随机的,无法计算和衡量,其运行轨迹实际是一条复杂的空间曲线,这样就很难建立精确的数学模型。

平台坐标关系如图 2 所示。平台 X 轴方向的倾角为  $\alpha$ , Y 轴方向的倾角为  $\beta$ , OXYZ 为水平坐标系, OX'Y'Z' 为平台坐标系。

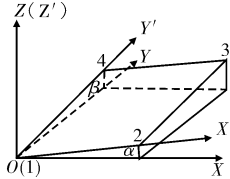


图 2 平台倾斜示意图

通过空间坐标变换可得:

$$(X \ Y \ Z)^T = \begin{bmatrix} \cos\alpha & 0 & \sin\alpha \\ -\sin\beta\sin\alpha & \cos\beta & \sin\beta\cos\alpha \\ -\cos\beta\sin\alpha & -\sin\beta & \cos\beta\cos\alpha \end{bmatrix} (X' \ Y' \ Z')^T$$

$$X = (x_1 \ \dots \ x_n)$$

$$Y = (y_1 \ \dots \ y_n)$$

$$Z = (z_1 \ \dots \ z_n)$$

$$X' = (x'_1 \ \dots \ x'_n)$$

$$Y' = (y'_1 \ \dots \ y'_n)$$

$$Z' = (z'_1 \ \dots \ z'_n)$$

$n$  为液压支腿的个数。

由上面的数学推导也可以看到支撑点在 X、Y、Z 平面内都有位移,尤其是在大跨度大角度的时候 3 个位移都比较大。因此,要想建立初始平面到最后的调平平面的数学模型是不现实的,之前有很多文献在建模时作了很多的假设这已经偏离了平台的实际情况。

借助微分的思想将承载平台的复杂的空间运动进行离散,在局部坐标系中建立了调平的数学模型。初始平面到最后的调平平面插入若干目标平面对调平过程进行离散,而在两个相邻的平面即局部建立精确的调平模型,对于每一次调节来说,把研究对象从绝对坐标系移到相对坐标系内进行分析,在相对坐标系内水平倾角  $\alpha$ 、 $\beta$  不再是变量而是常量,在两相邻平面可以建立较准确的数学模型如图 3,在 X、Y 方向在相对坐标系中没有位移差,而在 Z 方向可以得到下面的比例关系:

$$\lim_{\alpha, \beta \rightarrow \epsilon} \Delta Z_1 : \lim_{\alpha, \beta \rightarrow \epsilon} \Delta Z_2 : \lim_{\alpha, \beta \rightarrow \epsilon} \Delta Z_3 : \lim_{\alpha, \beta \rightarrow \epsilon} \Delta Z_4 = h_1 : h_2 : h_3 : h_4$$

在某一个瞬时平面时,平台倾斜面如图 3 所示,其中 1234 为倾斜时的平台平面, 1'2'3'4' 为水平状态时平台平面,假设此时 1 点为最

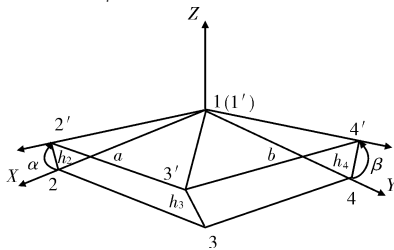


图 3 极限位置数学模型

高点,则可以近似的认为  $22' \perp 12'$ ,  $44' \perp 14'$ 。另外,假设平台 X、Y 方向的边长分别为  $a$ 、 $b$ ,传感器又可测得平台在 X、Y(II-IV 和 I-III) 方向的倾斜角  $\alpha$ 、 $\beta$ ,

于是有 2、3、4 各点相对 1 点的相对高度分别为:

$$h_2 = a \sin\alpha$$

$$h_3 = a \sin\alpha + b \sin\beta$$

$$h_4 = b \sin\beta$$

## 2 模糊解耦调平控制技术

结合上述的平面调平技术和数学模型,支腿充分展开达到稳定状态后可以检测到两个水平倾角值  $\alpha$  和  $\beta$ ,从而可以判断出此时的最高点,将平台的倾斜平面和最高点所在的水平平面按追踪周期分为  $n$  个离散平面,对于模糊控制器来说,将每个离散平面所对应的角度值  $\alpha_i$ 、 $\beta_i$  ( $i = 1, 2, 3, \dots, n$ ) 作为给定值,因此是个随动模糊控制器。另外,对于四点支撑调平系统来说,哪一点最高是随机的,这样在设计中针对不同高点分别设计 4 个模糊控制器,这里以 1 点最高为例来介绍,控制结构图如图 4。

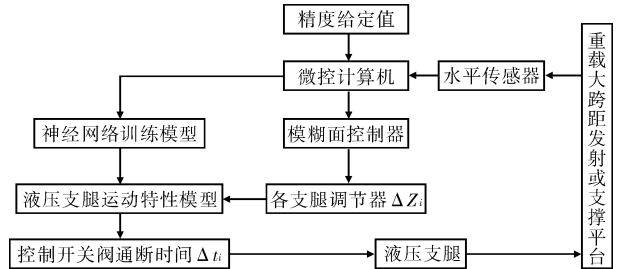


图 4 控制结构图

在面调平控制系统中,只调整除最高支腿外的其他 3 条支腿,通过控制动作时间来调节支腿的高度,从而调整平台水平度。以两个角度值的偏差  $E_\alpha$ 、 $E_\beta$  和偏差变化率  $EC_\alpha$ 、 $EC_\beta$  作为输入,3 条支腿的行程调节量  $\Delta h_2$ 、 $\Delta h_3$ 、 $\Delta h_4$  作为输出,为多输入-多输出(MIMO)控制系统,要直接设计一个这样的多变量模糊控制器是相当难的。如果把系统分成  $\alpha$ 、 $\beta$  子系统,分别设计两个模糊控制器,设计上变得简单,但难以解决  $\alpha$ 、 $\beta$  之间的非线性耦合问题。根据模糊控制器自身的解耦性特点,通过模糊关系方程分解,在控制结构上实现解耦,即将多输入-多输出的模糊控制器分解成若干个多输入-单输出(MISO)的模糊控制器。如图 5 所示,本系统控制器由 3 个多输入单输出的模糊控制器组成。

在模糊控制中,确定的实测信息在进入模糊逻辑推理过程之前,必须对其进行模糊化处理,即将确定的实测量转换为模糊推理论域上模糊集合。增加论域中的元素个数,可以提高控制精度,但也带来了计算量增大,占用内存增多等不利因素。因此,确定  $E_\alpha$  和  $E_\beta$  的模糊子集分为 5 个模糊量级(语言值),选择为负大(NB)、负小(NS)、零(O)、正小(PS)、正大(PM),有实验经验得论域为  $[-0.1^\circ, 0.1^\circ]$ ; 偏差变化  $EC_\alpha$ 、

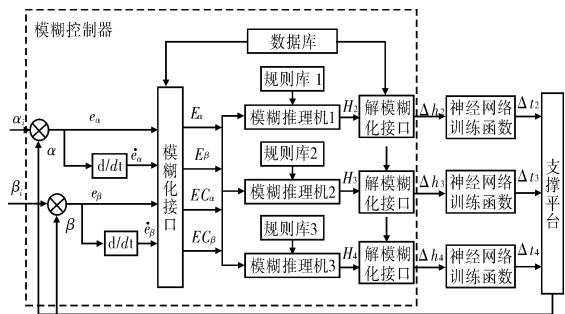


图5 模糊解耦控制器

$EC_\beta$  分为负(N)、零(O)、正(P)3个模糊量级,论域为 $[-0.05^\circ, 0.05^\circ]$ ;将3条支腿的调节量(即模糊输出变量  $H_2$ 、 $H_3$  和  $H_4$ ) 均分为7个模糊量级,负大(NL)、负中(NM)、负小(NS)、零(O)、正小(PS)、正中(PM)、正大(PL),论域为 $[-7, -6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7]$ 。为了运算简单高效,并将内积控制在一个较好的范围,输入和输出变量的语言值模糊子集均采用三角形隶属函数,隶属函数曲线分别如图6、图7所示。语言赋值表如表1所示。

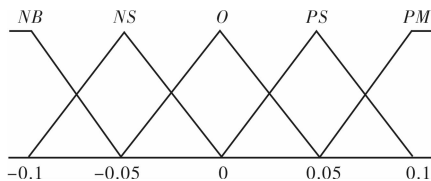


图6 角度偏差输入隶属函数

建立模糊控制规则基本思想:先考虑误差为负的情况。当误差为负大而误差变化为负时,误差有增大的趋势,为尽快消除已有的负大误差并抑制误差变大,所以控制量的变化取正大;若误差变化为正小时,控制量的变化取为正小;若误差变化为正大时,控制量不宜增加,否则造成超调会产生正误差,因此这时控制量变化取为零等级。当误差为负中而误差变化为负时,控制量的变化应该使误差尽快消除,基于这种原因,控制量的变化选取同误差为负大时基本相似。当误差为负小时,系统接近稳定,若误差变化为负时,选取控制量变化为正中,以抑制误差往负方向变化;若误差变化为正中或正大时,系统本身有消除负小误差的趋势,因此,选取控制量变化为负小即可。误差为正时与误差为负时相类似,相应的符号都要变化,在此不再阐述。

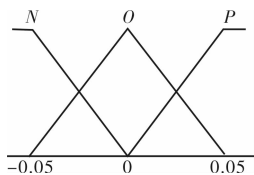


图7 角度偏差变化输入隶属函数

上述选取控制量变化的原则是:当误差大或较大时,选择控制量以尽快消除误差为主;而当误差较小时,选择控制量要注意防止超调,以系统的稳定性为主要出发点。

表1 模糊输出的语言变量赋值表

$\mu(x)$	PL	PM	PS	O	NS	NM	NL
-7	0	0	0	0	0	0	1.0
-6	0	0	0	0	0	0.2	0.8
-5	0	0	0	0	0.1	0.7	0.4
-4	0	0	0	0	0.4	1.0	0.1
-3	0	0	0	0	0.8	0.7	0
-2	0	0	0	0	1.0	0.2	0
-1	0	0	0	0.5	0.4	0	0
0	0	0	0.4	1.0	0	0	0
1	0	0	1.0	0.5	0	0	0
2	0	0.2	0.8	0	0	0	0
3	0	0.7	0.4	0	0	0	0
4	0.1	1.0	0.1	0	0	0	0
5	0.4	0.7	0	0	0	0	0
6	0.8	0.2	0	0	0	0	0
7	1.0	0	0	0	0	0	0

自动调平系统是一个非线性耦合系统,即调节某支腿动作时,由于耦合作用会影响到两个方向的角度值。所以模糊控制规则应采取3个低支腿协调控制的方法,同时3条液压支腿调节量应控制在允许的较小范围内,才能达到最佳的效果。

这里的控制规则库根据现场调试以及操作人员和专家的实际经验制定出来。1个四输入单输出的模糊控制规则共 $5 \times 5 \times 3 \times 3 = 225$ 条,3个四输入单输出模糊控制器的控制规则共 $3 \times 225 = 675$ 条。其中,第1个四输入单输出模糊控制规则(规则库1)的具体形式如下:

- 1) IF  $Ea = PM$  AND  $E\beta = PM$  AND  $ECa = P$  AND  $EC\beta = P$ , THEN  $H_2 = PL$ ;
- 2) IF  $Ea = PM$  AND  $E\beta = PM$  AND  $ECa = P$  AND  $EC\beta = O$ , THEN  $H_2 = PM$ ;
- 3) IF  $Ea = PM$  AND  $E\beta = PM$  AND  $ECa = O$ , AND  $EC\beta = P$ , THEN  $H_2 = PS$ ;
- 4) IF  $Ea = PM$  AND  $E\beta = PM$  AND  $ECa = O$  AND  $EC\beta = O$ , THEN  $H_2 = O$ ;
- 5) IF  $Ea = PS$  AND  $E\beta = PS$  AND  $ECa = N$  AND  $EC\beta = N$ , THEN  $H_2 = NS$ ;
- .....
- 223) IF  $Ea = NM$  AND  $E\beta = O$  AND  $ECa = N$  AND  $EC\beta = O$ , THEN  $H_2 = O$ ;
- 224) IF  $Ea = NS$  AND  $E\beta = PM$  AND  $ECa = P$  AND  $EC\beta = N$ , THEN  $H_2 = NM$ ;
- 225) IF  $Ea = O$  AND  $E\beta = O$  AND  $ECa = O$  AND  $EC\beta = O$ , THEN  $H_2 = O$ 。

同理可得到其他两支腿的2个模糊控制规则(规则库2和规则库3)。最后采用重心法(加权平均法)进

行解模糊,通过判决方法计算出的是一个精确量,仅仅是一个档数,不能作为直接控制执行器的实际控制量,还要将这变量进行最后一次变换。若通过模糊判决方法换算得出档数为  $x_0$ ,  $x_0$  的变化范围为  $[x_{\min}, x_{\max}]$ ,实际控制量的变化范围为  $[u_{\min}, u_{\max}]$ ,采用线性变换,则:

$$u = \frac{u_{\max} + u_{\min}}{2} + k(x_0 - \frac{x_{\max} + x_{\min}}{2})$$

式中: $k$ 为比例因子,这里比例因子由专家经验而定; $u$ 为控制执行结构的实际控制量。

### 3 实例分析

表 2~表 4 是在调试现场记录的试验数据。表 2 和表 3 是只采用了面调平技术的数据,表 4 是采用了基于模糊解耦调平技术的数据。

表 2 试验数据 1

角度值采集次序	II-IV方向角度 $\alpha/(^\circ)$	I-III方向角度 $\beta/(^\circ)$
1	11	67
2	12	44
3	7.1	-0.1
4	2.7	0.3
5	-0.4	1.2

表 3 试验数据 2

角度值采集次序	II-IV方向角度 $\alpha/(^\circ)$	I-III方向角度 $\beta/(^\circ)$
1	59	27
2	10	21
3	61	0.9
4	30	-10
5	27	9.3
6	8.1	6.9
7	5.6	5.4
8	2.8	3.1
9	3.1	1.5
10	15	0.2
11	6.1	-5.6
12	2.8	-19
13	2.6	-8.9
14	0.3	3.2

表 4 试验数据 3

角度值采集次序	II-IV方向角度 $\alpha/(^\circ)$	I-III方向角度 $\beta/(^\circ)$
1	-85	56
2	-73	49
3	-62	43
4	-50	36
5	-40	30
6	-29	23
7	-19	17
8	-10	12
9	-7.6	9.2
10	-4.8	7.1
11	-2	4.7
12	0.9	2.3
13	0.2	0.3

由此组数据分析可得:当只使用面调平技术时,由于对支腿的行程没有进行训练,同时也没有对控制

的偏差进行在线的修正,所以可控性较差,如表 2 只用了 4 次就调平了,而表 3 却出现了震荡,没有调平;表 4 采用了基于模糊解耦的智能调平技术,平面按照设定的目标( $m=12$ )进行调平,对偏离目标面的动作进行了实时的修正。

平台的起始角度  $\alpha$ 、 $\beta$  分别为  $-85'$ 、 $56'$ ,通过分析计算控制各条支腿动作,动作完成后进行第二次角度值的采集,此时的  $\alpha$ 、 $\beta$  为  $-73'$ 、 $49'$ ,依次循环控制平台逐渐趋于水平位置。可以看到,在经过 12 次调整后,平台达到了近似水平状态,倾斜角度  $\alpha$ 、 $\beta$  分别为:  $0.2'$ 、 $0.3'$ ,用时 1min45s,满足了调平时间小于 2min、调平精度小于  $\pm 2'$  的指标要求。

### 4 结论

基于模糊解耦的智能调平方法丰富和扩充了多点调平领域的调平理论、调平算法以及调平解耦算法,为提高调平的精度和调平速度提供了新的技术和方法。如果大量装备大型工程车辆和军用车辆,可大大提高车辆的机动性和适用性。

#### 参考文献:

[1] 盛英,仇原鹰. 6 腿支撑液压式平台自动调平算法[J]. 西安电子科技大学学报(自然科学版),2002,29(5):593-596.

[2] Dinh Quang Truong, Kyoung Kwan Ahn. Force control for hydraulic load simulator using self-tuning grey predictor-fuzzy PID[J]. Mechatronics, 2009, 19(2): 233-246.

[3] R Amirante, A Innone, L A Catalano. Boosted PWM open loop control of hydraulic proportional valves[J]. Energy Conversion and Management, 2008, 49(8): 2225-2236.

[4] Muhammad Babar Nazir, Wang Shaoping. Optimization based on convergence velocity and reliability for hydraulic servo system[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2009, 22(4): 407-412.

[5] 张艳兵,姚舜才,任作新. PLC 控制的 4 点调平系统[J]. 华北工学院学报, 2004, 25(3): 198-200.

[6] 何臻,潘宏侠,高强. 一种针对液压系统的四点调平方法研究[J]. 弹箭与制导学报, 2008, 28(3): 284-286.