

变体飞行器头锥的运动控制性能分析*

田静怡¹, 张玉玲², 尹丹妮¹, 谷勇霞¹, 阎绍泽²

(1. 北京工商大学计算机与人工智能学院 北京, 100048)

(2. 清华大学机械工程系 北京, 100084)

摘要 为提高变体飞行器头锥在外部负载条件下的运动性能,提出一种二自由度的3RSH/3RRR变体头锥机构(R,S,H分别为转动副、球副及螺旋副),进行了位置分析和机构运动特性分析。通过Simulink/SimMechanics工具箱搭建变体头锥机构框图,并分别搭建模糊比例积分微分(proportion integration differentiation,简称PID)控制系统和BP神经网络(backpropagation networks,简称BPNN)PID控制系统。在空载、随机变化负载2种不同外部环境下,设定阶跃、正弦2种期望轨迹进行仿真,比较了常规PID、模糊PID和神经网络PID的控制性能。实验结果表明,智能控制的适应性、鲁棒性远好于常规PID,其中模糊PID控制对变体头锥机构的控制性能最好,能够满足不同工况下的控制要求。

关键词 变体头锥机构;运动性能;控制策略;控制性能

中图分类号 TH122;TP273

引言

变体飞行器是一种基于仿生机构设计、可自主改变气动外形以适应不同飞行环境的军事武器^[1],在性能上要求能够进行连续、大尺度、多自由度的主动变形^[2],因此在飞行过程中,要保证整机的姿态控制和飞行稳定性,外形上的微小变化都会影响飞行器整体的气动性能。

为了对变体飞行器的变形结构进行精确的形状控制,需要建立动力学模型,设计对应的非线性控制器。He等^[3]研究了变体飞行器在机翼变形阶段的飞行控制方式,建立了非线性动力学模型,设计了一组模态相关的动态状态反馈控制器。对于大尺度变形的变体飞行器,可以进行多刚体系统建模并进行简化和控制系统设计。Jiang等^[4]利用多面体线性变参数理论研究了全包络下变体飞行器的增益调度输出反馈控制,采用预定参数区间划分建立多目标优化模型。对于难以建立动力学模型的变体飞行器,可以结合智能方法进行控制。Wu等^[5]利用神经网络对未知非线性函数进行平滑鲁棒补偿,将动态表面控制和最小学习参数的神经网络相结合,并构造一种简单的自适应算法。Liu等^[6]以变后掠翼飞行器为研究对象,基于T-S模糊控制原理建立模糊控

制器,该控制器能有效适应变体飞行器变形过程中的非线性和时变特性,具有良好的稳定性和动态响应。Abdelmaksoud等^[7]提出了一种四轴飞行器的鲁棒控制方法,利用自调节模糊PID控制系统来提高飞行器的稳定性和抗干扰能力。

针对变体飞行器的控制方法,主要有通过动力学建模、多刚体系统建模、自适应控制、智能控制以及多种方法组合的形式。飞行器在飞行过程中通过变体头锥伸缩、弯曲变形可以减少气动阻力和气动热,对提高飞行器使用寿命、增强飞行器适应性和灵活性具有重要意义^[8]。由于外部环境复杂多变,变体头锥在外部环境影响下会产生结构热振动,造成机构运动性能不稳定,影响飞行器整体的飞行性能。

笔者研究了变体头锥机构的运动性能,分析了相关控制策略,分别建立了模糊PID控制系统和神经网络PID控制系统,并进行了仿真研究。通过比较各自控制器的控制性能,选择出最适合变体头锥机构的控制系统。

1 变体头锥机构特性

1.1 机构特点

有研究发现,蜜蜂腹部伸缩、弯曲的变形功能与

* 国家自然科学基金资助项目(52305264,52375282,51475258);中国博士后面上基金资助项目(2022M721822)

收稿日期:2023-06-11;修回日期:2023-08-20

飞行器变体头锥的变形要求相适应,因此笔者仿照蜜蜂腹部变形功能,设计了如图1所示的二自由度3RSH/3RRR变体机构模型^[9]。该变体头锥机构节与节之间为3组支链并联,每组支链包含RSH和RRR支链,其中:RSH为驱动支链,通过将螺杆的旋转运动转化成外壳的直线运动驱动前一节外壳伸缩弯曲;RRR为从动支链,主要作用是增强运动稳定性^[10]。通过计算及仿真证实该变体头锥机构共有2个自由度,分别为沿y轴的伸缩和绕x轴的弯曲,满足变体头锥机构的变形要求。

1.2 位置分析

由于变体头锥机构每节之间的连接方式相同,因此分析其中一环可等效至整体。图2为变体头锥机构的1组3RSH/3RRR并联机构运动简图,该并联机构的自由度为2,可实现沿y轴的移动和绕x轴的弯曲运动^[11]。定义大环为定平台B,小环为动平台b。定义坐标系O-xyz原点位于定平台质心,为参

$$R = R_{(x_B, \gamma)} R_{(x_B, \beta)} R_{(x_B, \alpha)} = \begin{bmatrix} \cos\beta\cos\gamma & -\cos\alpha\sin\gamma + \sin\alpha\sin\beta\cos\gamma & \sin\alpha\sin\gamma + \cos\alpha\sin\beta\cos\gamma \\ \cos\beta\sin\gamma & \cos\alpha\cos\gamma + \sin\alpha\sin\beta\sin\gamma & -\sin\alpha\cos\gamma + \cos\alpha\sin\beta\sin\gamma \\ -\sin\gamma & \sin\alpha\cos\beta & \cos\alpha\cos\alpha \end{bmatrix} \quad (1)$$

考坐标系;坐标系O'-x'y'z'原点位于动平台质心,为运动坐标系。在初始位置下,运动坐标系原点位于参考坐标系正上方,两坐标系y轴重合。

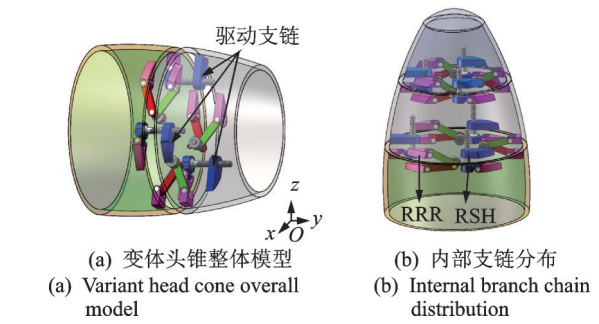


图1 变体机构模型

Fig.1 Variant mechanism model

因此,可以写出 B_i 和 b_i ($i=1,2,\dots,6$,为支链在平台上的连接点)在参考坐标系和运动坐标系的坐标,运动坐标系O'-x'y'z'相对于参考坐标系分别绕z,y,x轴进行3次有序转动,转动角度 α,β,γ 相互独立,可得到运动坐标系相对于参考坐标系的旋转变换矩阵为

因此,可以写出 B_i 和 b_i ($i=1,2,\dots,6$,为支链在平台上的连接点)在参考坐标系和运动坐标系的坐标,运动坐标系O'-x'y'z'相对于参考坐标系分别绕z,y,x轴进行3次有序转动,转动角度 α,β,γ 相互独立,可得到运动坐标系相对于参考坐标系的旋转变换矩阵为

运动坐标系O'-x'y'z'相对于参考坐标系的齐次变换矩阵为

$$T = \begin{bmatrix} R & P \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

设P为动平台质心在定平台坐标系O-xyz的位置坐标,3RSH/3RRR并联结构的运动自由度为转动(绕x轴)+移动(沿y轴), $P=(0, y, 0)$, β 和 γ 均为0,因此齐次变换矩阵为

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha & -\sin\alpha & y \\ 0 & \sin\alpha & \cos\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

根据坐标变换理论,驱动支链在动平台的连接点在参考坐标系中表示为

$$\begin{bmatrix} b'_i \\ 1 \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} b_i \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

由此,计算出变换后动平台与驱动支链连接点位置坐标为

$$\begin{cases} b'_1 = (0, -r\sin\alpha + y, r\cos\alpha) \\ b'_3 = (\frac{\sqrt{3}}{2}r, \frac{r}{2}\sin\alpha + y, -\frac{r}{2}\cos\alpha) \end{cases} \quad (5)$$

驱动支链总长 $L_i = |\overrightarrow{B_i b'_i}|$,驱动支链伸长量

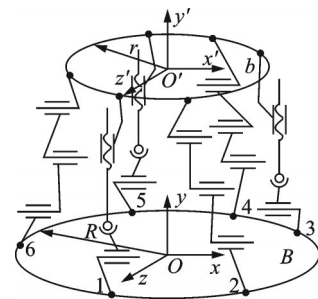


图2 3RSH/3RRR并联机构运动简图

Fig.2 Motion diagram of parallel mechanism 3RSH/3RRR

$l_i = L_i - L$,其中L为初始支链原长。位置反解为

$$\begin{cases} l_1 = \sqrt{(-r\sin\alpha + y)^2 + (r\cos\alpha - R)^2} L \\ l_3 = \sqrt{r^2 + R^2 + y^2 - \frac{Rr}{2}(3 + \cos\alpha) + r y \sin\alpha} L \end{cases} \quad (6)$$

1.3 机构运动特性分析

变体头锥在运动过程中会穿过不同外部环境的大气层,所受外载复杂多变,研究负载对变体头锥机构性能的影响对于机构控制和构件选型具有重要参考意义。除驱动方式和外部环境外,机构本身的特性对运动性能的影响也需考虑。Zhang等^[12]研究了

头锥机构中连杆的刚度对运动性能的影响,发现柔性连杆的变体头锥比刚性连杆的变体头锥加速度波动更剧烈,因此若在保证机构性能应尽可能使用刚性连杆。笔者对变体头锥机构进行了运动学分析,分别探究了外部负载和铰链刚度对机构运动性能的影响,添加均值为 2 kN 的随机变化负载,铰链分别为普通刚性铰链和扭簧模拟的柔性铰链,变体头锥机构动平台质心位移及加速度如图 3 所示。

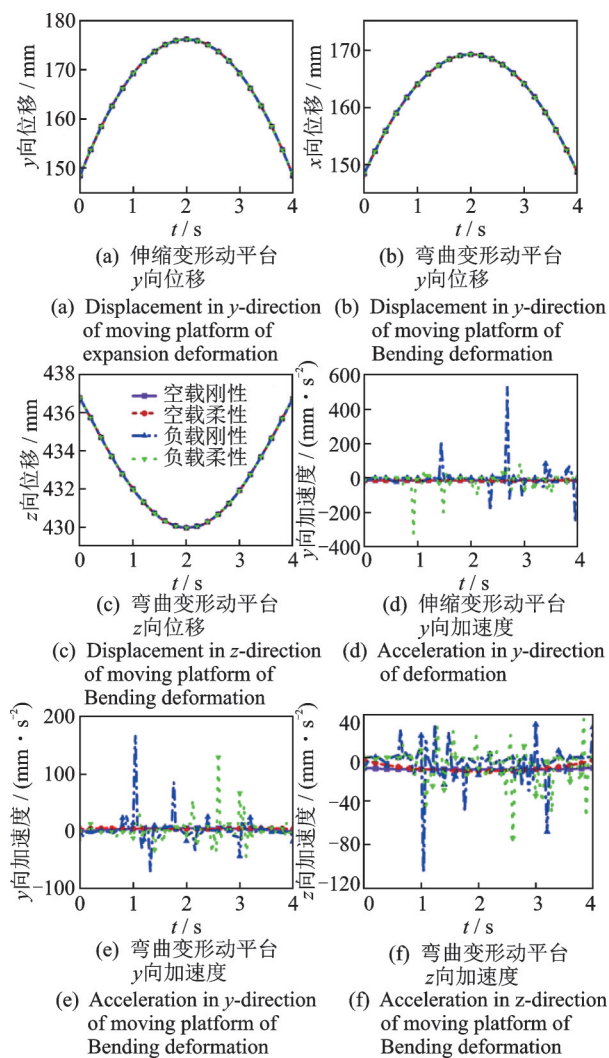


图 3 变体头锥机构动平台质心位移及加速度

Fig.3 Centroid displacement and acceleration of the moving platform of the variant head-cone mechanism

图 3(a, b, c) 分别为变体头锥伸缩变形动平台质心 y 向位移和弯曲变形质心 y, z 方向位移, 在不同外部负载和不同铰链刚度情况下, 变体头锥的变形基本一致, 均可完成所需的变形要求。图 3(d, e, f) 分别对应变形时的 y, z 方向加速度, 可以看到空载情况下加速度波动较小, 运动性能良好; 但在负载情况下加速度波动剧烈, 机构受到较大冲击。因此, 外部负载对机

构运动性能影响较大, 多变的外部环境会增大冲击, 降低机构运动稳定性。此外, 在空载情况下, 铰链的刚度对机构性能影响较小, 仅在弯曲变形 z 轴方向带有柔性铰链的变体头锥机构加速度有微小变化, 但并无冲击。其中, 伸缩变形动平台 y 向加速度波动幅值最大, 负载刚性条件下最大幅值为 790.453 mm/s², 负载柔性铰链条件下最大幅值为 408.920 mm/s²。刚性铰链的变体头锥机构加速度波动整体幅值大于柔性铰链的变体头锥加速度, 说明柔性铰链可以减少机构运动时的冲击, 起到一定的缓冲作用。

2 控制系统设计

柔性铰链对机构冲击具有一定的缓冲作用, 整体影响较小, 而驱动方式和外部负载对变体头锥运动性能影响显著。变体头锥面临的环境复杂, 为了保证其具有较高的运动精度和性能, 需要搭载性能良好的控制系统进行高精度控制。

变体头锥机构每一组均为并联机构, 并联机构常用的控制方式是 PID 控制, 核心问题就是 PID 参数的整定^[13]。PID 参数整定常用经验法和试凑法, 这些方法费时费力且定效果不佳, 常规 PID 控制不能灵活地改变参数, 当外界环境或自身条件发生改变时往往需要重新整定参数, 难以适应多变的环境和多样的任务要求^[14]。20 世纪 60 年代出现的智能控制思想, 被用来解决控制系统的随机特性和模型未知问题。将 PID 控制与智能控制相结合, 通过智能控制调节 PID 参数, 可以提高控制器的自适应性^[15]。考虑到本研究变体头锥机构支链较多且结构复杂, 因此可以选择智能控制与 PID 控制相结合的方式对变体头锥机构控制。常见的可与 PID 控制相结合的方式有模糊 PID^[16-17] 和神经网络 PID^[18-19], 下面将分别对 2 种控制方法进行建模, 通过仿真比较控制效果。智能 PID 控制原理如图 4 所示。

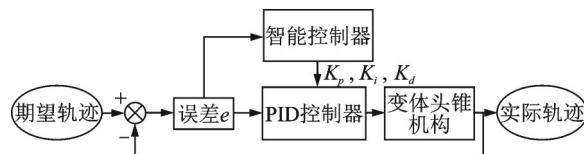


图 4 智能 PID 控制原理

Fig.4 Principle of intelligent PID control

2.1 SimMechanics 机构模型

将变体头锥机构导入 Matlab 软件进行控制策略研究。在 SolidWorks 三维制图软件中绘制

3RSH/3RRR 并联机构模型,将三维装配图进行拓扑变换,将零件转换成具有质量和转动惯量的刚体模块,使用 SimMechanics Link 接口进行转换,导入 Simulink,建立机械系统 SimMechanics 框图^[20]。任意选取其中 2 条 RSH 支链为驱动支链,其余支链为从动支链。为使机构具有一定的自锁性能,驱动方式采用螺旋驱动,驱动螺杆由电机控制转速,2 条驱动支链相互配合,共同实现整体机构的伸缩和弯曲。

添加 PID 控制器进行试凑,其参数如图 5 所示。其中: K_p 为比例调节系数,能够加快系统的响应速度,提高系统的调节精度,快速调节误差; K_i 为积分调节系数,能够消除残差,调节稳态时间; K_d 为微分调节系数,能够改善系统的动态性能,预测误差趋势,提前修正误差。比较几组仿真结果可知: K_p 过大会导致到达目标点后波动剧烈, K_p 过小则响应速度慢。 K_i 和 K_d 数值均调小,选择性能较好的一组参数: $K_p=20, K_i=2, K_d=0.04$,为后续智能控制器的设置提供参考。

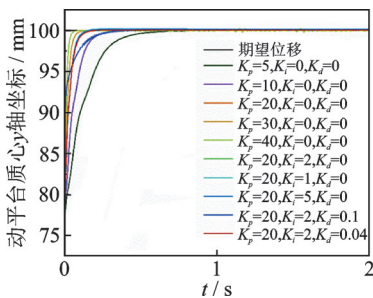


图 5 PID 试凑参数

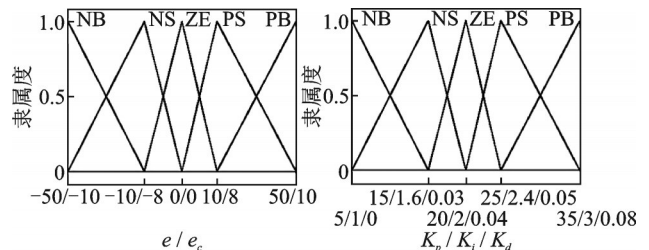
Fig.5 PID trial and error parameter

2.2 模糊 PID 控制

模糊控制以模糊数学为基础,由模糊集合、模糊语言变量、模糊规则以及模糊推理组成,能够将人类的思维、经验和模糊化语言转化成计算机可识别的控制方式,实现对被控对象的有效控制^[21-22]。通过模糊控制与 PID 控制相结合,实时调节 PID 参数,提高控制系统的控制精度和自适应性。模糊控制器模块根据反馈的位移偏差 e 及偏差变化率 e_c ,通过模糊化、近似推理及去模糊化的操作实时得到 PID 控制器 K_p, K_i, K_d 这 3 个参数,在不同偏差及偏差变化率的情况下,满足系统的控制要求。

将输入和输出语言变量分为 5 个模糊分区,分别表示为 NB, NS, ZE, PS 和 PB。输入语言变量的取值根据所设计的变体头锥机构尺寸设定,输出语言变量取值按照试凑法确定的参数值设定。隶属度

函数选择三角形隶属度函数,输入及输出隶属度函数见图 6。隶属度函数图像在靠近目标点位置时密集,控制精度更高,在远离目标点位置响应速度快。



(a) 输入隶属度函数 (b) 输出隶属度函数
(a) Input membership function (b) Output membership function

图 6 输入及输出隶属度函数

Fig.6 Input and output membership function

根据 PID 的 3 个参数对控制性能的影响,设定模糊控制规则。 K_p 增大,响应时间减小,超调量增大,稳态误差减小; K_i 增大,响应时间减小,超调量增大,稳态误差减小; K_d 增大,对响应时间影响不大,超调量减小,对稳态误差影响较小。因此,当偏差 e 较大时,应取较大的 K_p ,加快系统响应速度;为防止 e_c 过大引起超范围控制,可以选取较小的 K_d ;为避免系统超调量过大,需要限制积分环节,将 K_i 取至最小。当偏差 e 较小时,说明此时系统输出接近设定值,为提高系统稳态性能,可以选取适当的 K_p 和 K_i ;为了避免在平衡位置的振荡,提高系统的抗干扰能力,当 e_c 较大时可以选取小的 K_d ,当 e_c 较小时可以选取较大的 K_d 。 K_p, K_i, K_d 这 3 个参数关于偏差 e 、偏差变化率 e_c 的模糊控制规则分别如表 1~3 所示,按照模糊控制规则表设置模糊控制器。

表 1 K_p 模糊控制规则表

Tab.1 K_p fuzzy control rule table

e_c	e				
	NB	NS	ZE	PS	PB
NB	PB	PB	PS	ZE	ZE
NS	PB	PS	PS	ZE	NS
ZE	PS	PS	ZE	NS	NS
PS	PS	ZE	NS	NS	NB
PB	ZE	ZE	NS	NB	NB

2.3 神经网络 PID 控制

神经网络是借鉴生物神经网络和生物神经元工作机理,模仿人脑功能的信息处理系统,由数量众多的人工神经元相互连接组成^[23]。神经网络中最常用的是 BP 网络,具有极强的非线性映射能力,使用比较简单,发展较成熟,因此基于 BP 神经网络进行控制系统设计。神经网络 PID 控制器由 BP 神经网络

表 2 K_i 模糊控制规则表
Tab.2 K_i fuzzy control rule table

e_c	e				
	NB	NS	ZE	PS	PB
NB	NB	NB	NS	NS	ZE
NS	NB	NB	NS	ZE	PS
ZE	NS	NS	ZE	PS	PS
PS	NS	ZE	PS	PB	PB
PB	ZE	PS	PS	PB	PB

表 3 K_d 模糊控制规则表
Tab.3 K_d fuzzy control rule table

e_c	e				
	NB	NS	ZE	PS	PB
NB	PS	PS	PS	NS	PS
NS	ZE	ZE	ZE	NB	PS
ZE	NS	NS	NB	NS	PS
PS	NS	NB	ZE	PS	PS
PB	ZE	ZE	NS	PB	PB

络和PID控制器组成,通过神经网络调整PID参数。BP网络采用3层结构,输入层的输入信号为期望位移与实际位移之间的误差;输出神经元使用线性神经元,输出 K_p, K_i, K_d 这3个参数;隐含层选择5个节点;PID的3个参数都应该非负值,所以隐含层神经元使用非负的Sigmoid函数。

使用Matlab中的神经网络工具箱中的数据拟合图形用户界面进行收集、建立和训练神经网络,拟合的训练算法使用Levenberg-Marquardt算法。训练完毕之后可查看误差变化曲线,在 $e=8$ 时,验证集和测试集达到了最小的均方误差。点击Regression检验预测值和目标值的线性化程度,由图7所示的BP神经网络训练效果可知,系数 R 越接近1时,线性化程度越高。目前, $R=0.999\ 95$,原目标值和预测值的相关度较高,证明训练效果很好,可以进行整体控制系统的搭建,直接导出Simulink模块。

3 仿真分析

3.1 阶跃期望轨迹

动平台伸缩运动时两驱动螺杆转速相同,仅沿 y 轴方向做直线运动,因此设定期望轨迹为阶跃信号。指定 y 轴坐标点, z 轴方向期望轨迹为0,观察 y 轴方向位移曲线进行仿真。阶跃期望轨迹下动平台质心位移如图8所示。由图8(a)可知,神经网络

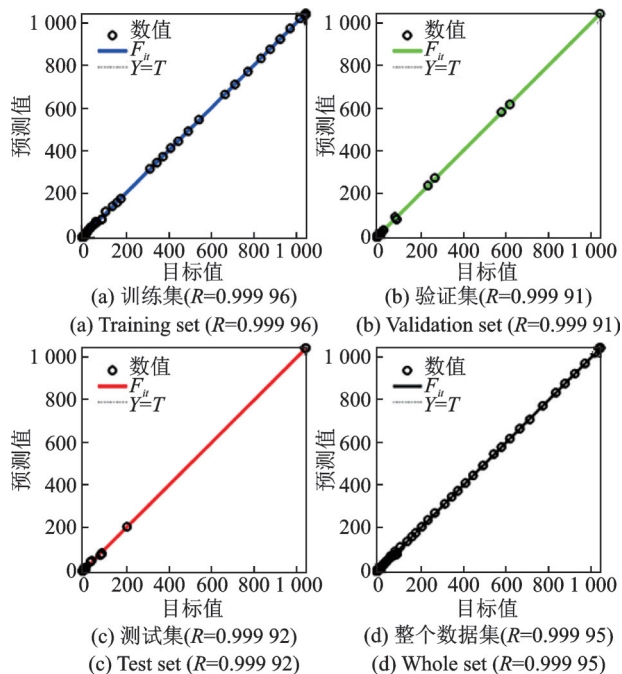


图 7 BP神经网络训练效果

Fig.7 BP neural network training effect

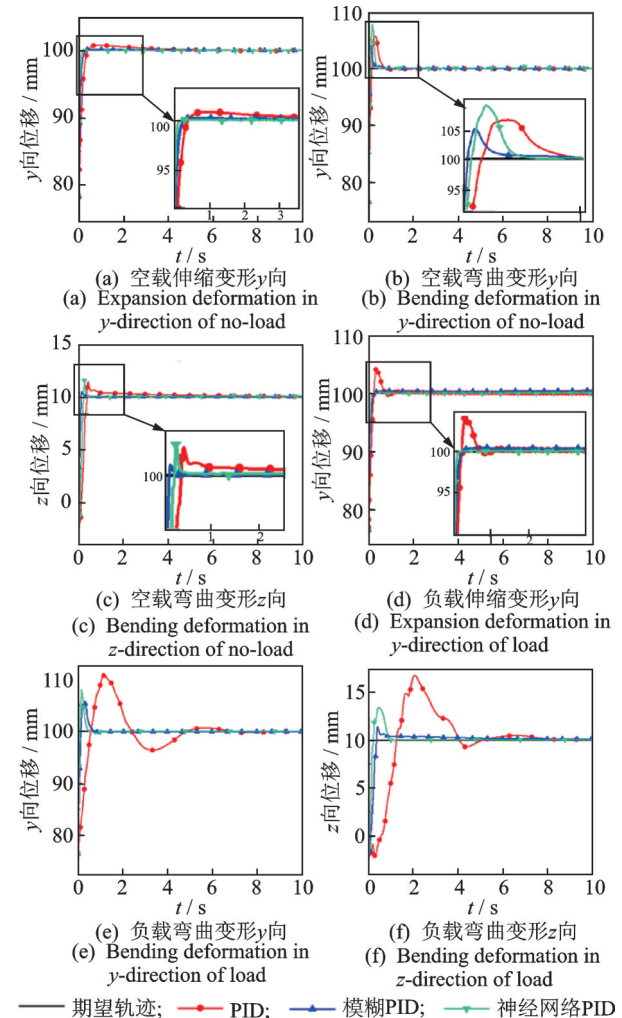


图 8 阶跃期望轨迹下动平台质心位移

Fig.8 Centroid displacement of moving platform under step expected trajectory

PID、模糊PID和PID到达期望位置时间分别为0.2、0.3和4 s,超调量分别为0.19、0.449和1.682 mm。在空载情况下变体头锥机构沿y轴伸缩变形,2种智能控制方式的控制效果差距不大,稍好于常规PID。

同时指定y和z两轴坐标点,y和z两个方向期望轨迹均设置为阶跃信号,此时动平台在做绕x轴的弯曲运动。比较仿真结果发现,3种方式的控制效果比仅做伸缩时要差,由于弯曲时两螺杆的转速不同,动平台整体波动较大。由图8(b,c)可以看出:模糊PID的响应时间、超调量均比其他2种控制要小,y轴、z轴方向达到稳定位置时间分别为0.3和0.2 s,超调量分别为4.379和0.505 mm;神经网络PID的响应速度较快,但是超调量比PID控制时还要大,y轴、z轴方向达到稳定位置的时间分别为0.4和0.7 s,超调量分别为7.805和1.628 mm;常规PID在y轴、z轴方向达到稳定位置的时间分别为0.7和2.734 s,超调量分别为5.655和1.432 mm。

添加外部负载,期望轨迹与上文所述相同,变体头锥完成指定y轴坐标点的直线伸长运动。通过比较图8(a,d)可看出:在外部负载影响下,传统PID产生了较大的超调量,最大值为4.059 mm;模糊PID仍保持着较为快速且稳定的响应;神经网络PID响应速度最快且超调量较小,但是在到达指定位置后图像有微小的波动,达到平衡后出现了振动现象。

在外部负载作用下进行弯曲运动的仿真,通过图8(e,f)可以看出,与空载时相比,弯曲变形时3种控制方式的效果均受到外部负载的影响,产生较大的超调量。常规PID波动更加剧烈,超调量较大,y轴、z轴方向达到稳定位置的时间分别为8.11和8.51 s,超调量分别为10.744 mm和6.739 mm;模糊PID是3种方式中超调量最小的,响应速度居中,y轴、z轴方向达到稳定位置的时间分别为0.72 s和1 s,超调量分别为5.31 mm和1.34 mm;神经网络PID响应速度最快,但超调量较大,y轴、z轴方向达到稳定位置的时间分别为0.5 s和0.95 s,超调量分别为8.035 mm和3.368 mm。整体来看,智能控制方式在响应速度、超调量及鲁棒性等方面远优于常规PID,而模糊PID控制方式在超调量和平衡后稳定性方面优于神经网络PID。

通过阶跃信号期望轨迹的仿真结果发现:空载进行伸缩运动时,3种控制方式效果差别不大,但是在弯曲运动中模糊PID的控制效果好于常规PID和神经网络PID;负载情况下,智能控制系统鲁棒性远好于常规PID,对于本研究变体头锥机构来说,模糊PID的控制效果优于神经网络PID,神经网络PID

的控制效果优于常规PID。

3.2 正弦期望轨迹

仅指定坐标点的阶跃期望轨迹并不符合实际运动轨迹,实际中为了减少冲击可以采用正弦图像规划伸缩、弯曲运动轨迹,使质心在y、z两轴坐标点缓慢变化。因此,将期望轨迹设定为正弦信号再次进行仿真。正弦期望轨迹下动平台质心位移如图9所示。由图可知,仅沿y轴进行伸缩运动时3种控制方式效果相近,常规PID控制方式超调量稍大,2种智能控制方式效果相近(图9(a))。对比弯曲运动,3种控制方式在y轴的轨迹差别不明显,基本沿着期望轨迹运动,仅有微小波动,可以忽略不计(图9(b))。在z轴方向,常规PID控制运动偏移量大(图9(c)),波动较多,初始反向波动,与期望轨迹最大相差2.081 mm,在弯曲恢复阶段也出现较大波

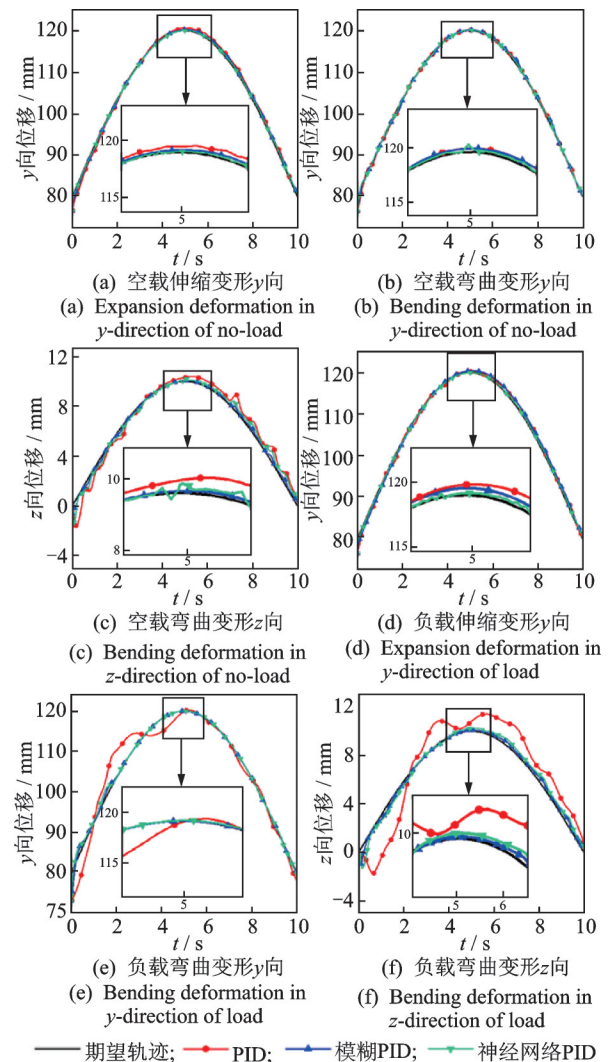


图9 正弦期望轨迹下动平台质心位移

Fig.9 Centroid displacement of moving platform under sinusoidal expected trajectory

动,与期望轨迹最大相差 1.421 mm,难以满足稳定性的控制要求;模糊PID控制时,动平台质心轨迹基本符合预期,波动偏移量较小;神经网络PID控制波动偏差介于两者之间。

添加随机负载之后,3种控制方式在直线运动时控制效果差别不大,均未出现超调或波动过大的情况。在弯曲运动时,模糊PID控制和神经网络PID的实际轨迹与y轴期望轨迹基本重合,但常规PID控制的实际轨迹在弯曲前半段波动较大,控制效果较差,在由弯曲恢复初始状态的部分实际轨迹与期望轨迹差别不大,稍有波动。3种控制方式在z轴的实际轨迹与空载情况下相比均受到了外部负载的影响,产生一定的波动,在运动初始阶段都出现了反向的波动,趋于稳定后也未能与期望轨迹完全重合。模糊PID基本维持在期望轨迹附近,z轴方向相差最大值在初始位置,约为0.737 mm;神经网络PID的差距比模糊PID稍大,z轴方向与期望轨迹最大差值约为1.782 mm;常规PID波动大,稳定所需时间长,y轴方向在5.3 s左右才靠近期望轨迹,z轴方向初始反向波动,最大值为1.713 mm,与期望轨迹相差最大值约为3.8 mm,整体未接近期望轨迹。相比之下,智能控制方式在面对复杂环境时都有较好的稳定性,其控制效果远好于传统PID;模糊PID和神经网络PID的实际轨迹趋势整体保持为正弦图像,基本满足控制要求;而传统PID实际轨迹图像偏离严重。

控制性能评估汇总表如表4所示。通过空载、随机负载、指定阶跃期望轨迹和正弦期望轨迹几种不同方式进行仿真,比较传统PID、模糊PID和神经网络PID这3种方式在不同环境、不同工作要求下对所设计的变体头锥机构的控制效果。可以看出,智能控制方式在响应速度、控制精度方面基本满足控制要求,控制效果远好于常规PID。面对复杂多变的外部环

境,智能控制方式显示出较好的鲁棒性,基本维持在期望轨迹附近,波动较小,响应较快,控制性能稳定。在正弦运动时,模糊PID控制与神经网络PID控制效果相差不大;在指定坐标点时,神经网络PID显示出优越的响应速度,但是超调量过大。综合考虑,模糊PID是性能最优、最适合变体头锥机构的控制方式。

4 结束语

为提高飞行器的适应性和灵活性,实现变体头锥伸缩和弯曲的变形功能,设计了具有二自由度的3RSH/3RRR变体头锥机构。通过对变体头锥机构控制系统的仿真,比较了3种不同方式的控制效果。结果表明:模糊PID是三者中最适合本研究变体头锥机构的控制方式,能够满足不同工况下的控制要求;神经网络PID在阶跃期望轨迹时效果稍差,但考虑到实际变形运动是近似正弦曲线逐步变化的过程,该控制方式同样能达到较好效果;本研究提出的智能控制方式在变体头锥机构控制上具有优越性,为变体头锥机构的控制策略研究提供了参考。

参 考 文 献

- [1] CHEN Y, ZHAO H, MAO J, et al. Controlled flight of a microrobot powered by soft artificial muscles[J]. Nature, 2019, 575(7782):324-329.
- [2] WANG Q, GONG L, DONG C, et al. Morphing aircraft control based on switched nonlinear systems and adaptive dynamic programming[J]. Aerospace Science and Technology, 2019, 93: 105325.
- [3] HE Y, LI C, ZHANG W, et al. Switching LPV control design with MDADT and its application to a morphing aircraft[J]. Kybernetika, 2016, 52(6): 967-987.
- [4] JIANG W, WU K, WANG Z, et al. Gain-scheduled control for morphing aircraft via switching polytopic linear parameter-varying systems[J]. Aerospace Science and Technology, 2020, 107: 106242.
- [5] WU Z, LU J, ZHOU Q, et al. Modified adaptive neural dynamic surface control for morphing aircraft with input and output constraints[J]. Nonlinear Dynamics, 2016, 87(4):2367-2383.
- [6] LIU S, YAN B, DAI P, et al. Morphing aircraft control method based on TS fuzzy control[C]//2019 IEEE 4th International Conference on Image, Vision and Computing (ICIVC). Xiamen:IEEE, 2019: 619-621.
- [7] ABDELMAKSOU S I, MAILAH M, ABDALLAH A M. Improving disturbance rejection capability for a quadcopter UAV system using self-regulating

表4 控制性能评估汇总表

Tab.4 Control performance evaluation summary sheet

评估指标	期望轨迹	控制方式		
		常规PID	模糊PID	神经网络PID
响应速度	阶跃	慢	中	快
	正弦	慢	快	快
超调量	阶跃	大	小	中
	正弦	中	小	小
控制精度	阶跃	低	高	中
	正弦	低	高	高
稳定性	阶跃	差	优	良
	正弦	差	优	良

- fuzzy PID controller [C] //2020 International Conference on Computer, Control, Electrical, and Electronics Engineering (ICCCEE). Khartoum:IEEE, 2021:1-6.
- [8] 梁友鉴, 赵杰亮, 阎绍泽. 基于蜜蜂腹部变体机制的空天飞行器仿生变体头锥设计[J]. 机械工程学报, 2020, 56(5):47-54.
LIANG Youjian, ZHAO Jieliang, YAN Shaoze. Bionic design of morphing nose cone for aerospace vehicle based on the deformable mechanism of Honeybee abdomen[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(5): 47-54. (in Chinese)
- [9] 尹丹妮, 谷勇霞, 张玉玲. 仿蜜蜂腹部变体机构设计及运动分析[J]. 机械科学与技术, 2023, 42(8): 1200-1206.
YIN Danni, GU Yongxia, ZHANG Yuling. Design and kinematic analysis of morphing structure like honeybee abdomen[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2023, 42(8): 1200-1206. (in Chinese)
- [10] 邱志成, 朱许先, 余龙焕, 等. 平面3-RRR柔性并联机构自激振动智能控制[J]. 振动、测试与诊断, 2023, 43(4): 629-636.
QIU Zhicheng, ZHU Xuxian, YU Longhuan, et al. Intelligent control of self-excited vibration of planar 3-RRR flexible parallel mechanism[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2023, 43(4): 629-636. (in Chinese)
- [11] 张英, 孙豪, 马帅帅. 基于4-UPS/CPC并联机构的多维调姿隔振平台设计[J]. 中国机械工程, 2021, 32(13): 1513-1522, 1529.
ZHANG Ying, SUN Hao, MA Shuaishuai. Design of a kind of multi-dimensional attitude adjustment and vibration isolation platform based on 4-UPS/CPC parallel mechanisms[J]. China Mechanical Engineering, 2021, 32(13): 1513-1522, 1529. (in Chinese)
- [12] ZHANG Y, ZHAO J, CHEN W, et al. Biomimetic skeleton structure of morphing nose cone for aerospace vehicle inspired by variable geometry mechanism of honeybee abdomen[J]. Aerospace Science and Technology, 2019, 92:405-416.
- [13] ZAKARIA S. A PID controller based on the processor utilization artifact within a real-time multitask control system[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering, 2023, 237(10): 1898-1908.
- [14] AYYILDIZ M, TILKI U. Adaptive sliding mode based fault tolerant control of wheeled mobile robots [J]. Automatika, 2023, 64(3): 467-483.
- [15] OKAFOR E, UDEKWE D, IBRAHIM Y, et al. Heuristic and deep reinforcement learning-based PID control of trajectory tracking in a ball-and-plate system[J]. Journal of Information and Telecommunication, 2021, 5(2): 179-196.
- [16] LIU F C, LIANG L H, GAO J J. Fuzzy PID control of space manipulator for both ground alignment and space applications[J]. International Journal of Automation and Computing, 2015, 11(4):353-360.
- [17] BELLO A, OLFE K S, RODRÍGUEZ J, et al. Experimental verification and comparison of fuzzy and PID controllers for attitude control of nanosatellites[J]. Advances in Space Research, 2023, 71(9): 3613-3630.
- [18] HAIYAN Z. Optimization algorithm for PID control parameters of electrical equipment in rural electric drainage and irrigation stations[J]. Mobile Information Systems, 2022, 2022: 4268662.
- [19] ZHAO J, ZHONG J, FAN J. Position control of a pneumatic muscle actuator using RBF neural network tuned PID controller[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2015, 2015: 810231.
- [20] 付伟庆, 李通, 史明妹, 等. PVDD装置多参数性能试验与隔震新体系控制分析[J]. 振动、测试与诊断, 2023, 43(1):37-43.
FU Weiqing, LI Tong, SHI Mingmei, et al. Multi-parameter performance tests of PVDD and control analysis of novel combined isolation system[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2023, 43(1): 37-43. (in Chinese)
- [21] PHU N D, HUNG N N, AHMADIAN A, et al. A new fuzzy PID control system based on fuzzy PID controller and fuzzy control process[J]. International Journal of Fuzzy Systems, 2020, 22(7): 2163-2187.
- [22] ZHANG C, CAO F, LI Y, et al. Fuzzy-controlled living insect legged actuator[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2016, 242:182-194.
- [23] IBRAHEEM G A R, AZAR A T, IBRAHEEM I K, et al. A novel design of a neural network-based fractional PID controller for mobile robots using hybridized fruit fly and particle swarm optimization [J]. Complexity, 2020, 2020:1-18.



第一作者简介:田静怡,女,1999年10月生,硕士生。主要研究方向为仿生机构设计与控制。

E-mail: tjytjy10@163.com

通信作者简介:谷勇霞,女,1968年6月生,副教授、硕士生导师。主要研究方向为机械系统动力学、仿生设计与控制。

E-mail: guyx@th.btbu.edu.cn