

一种基于聚类融合解耦降维的控制方法

刘志勇¹, 王小红², 刘小英¹

(1. 咸阳职业技术学院, 陕西 咸阳 712000; 2. 陕西省委党校, 陕西 西安 710061)

摘要:针对含有不确定性多变量耦合控制系统, 研究了一种聚类融合解耦降维控制方法。该方法通过求解被控系统的最优解耦矩阵, 将一个多变量耦合系统转化为多个简单子系统。其次利用 K 均值聚类 (k -means) 算法对不确定性多变量耦合控制矩阵中的数据进行分析处理, 进而得到行向量数据的聚类中心, 并依据最优二次型理论计算出融合函数参数, 将高维控制系统近似分解为低维控制系统。最后, 通过控制仿真验证, 该方法可以实现对不确定性多变量耦合系统的高精度控制。

关键词:不确定性; 多变量耦合系统; 模糊聚类; 融合函数; 解耦降维

中图分类号: TP273⁺.4

文献标志码: A

文章编号: 1003-7241(2025)12-0022-05

Decoupling dimension reduction control method based on cluster and fusion

LIU Zhiyong¹, WANG Xiaohong², LIU Xiaoying¹

(1. Xianyang Polytechnic Institute, Xianyang 712000, China; 2. Shaanxi Provincial Party School of the CPC, Xi'an 710061, China)

Abstract: A decoupling dimension reduction control method is studied for the multivariable coupled control systems with uncertainty in this paper. Firstly, the diagonal decoupling method is used to solve the optimal decoupling matrix, and a multivariable coupling system is transformed into many simple subsystems. Secondly, the k -means clustering algorithm is used to analyze and process the data in the uncertain multivariable coupling control matrix to obtain the cluster center of row vector data. According to the coupling strength between subsystems, the high-dimensional control system is decomposed into low-dimensional control system approximately. Finally, the simulation is verified that this method can realize high-precision control of uncertain multivariable coupling system.

Keywords: uncertainty; multivariable coupling system; fuzzy clustering; fusion function; decoupling dimension reduction

0 引言

在现代控制理论中, 完全意义上的单变量系统是很难存在, 大多数被控系统都属于多输入多输出系统 (multiple input multiple output, MIMO)。而对于 MIMO 控制系统, 由于系统变量众多, 这些系统变量之间除了存在耦合关系外, 还存在着一定的不确定性扰动和干扰, 这就使得对不确定性多变量耦合系统的最优控制变得尤为艰难。多年以来, 对不确定性多变量耦合系统的高精度控制也一直是控制理论研究的重点和难点^[1-2]。近年来, 针对不确定多变量耦合系统的高精度控制也出现了一些较为成熟的控制方法^[3-6]。而这些控制方法均通过每个子回路的配对结果来设计传递函数, 以此来提高对被控系统的控制精度。从实质上来讲, 它们都忽略了被控系统各变量之间存在的耦合作用。因此, 对于耦合度较高的控制系统^[7-8], 在设计控制器前, 应该设计合适的解耦器对其进行解耦, 将其分解为单输入单输出子系统, 以此来减弱各变量之间的干扰和影响, 进而提高对被控系统的控制精度^[9]。在实际应用中, 由于解耦器的加入会使被控系统结构变得尤为复杂, 同时也会增加被控系统的复杂度和维度, 进而使得

控制器设计难度进一步加大。因此, 针对不确定多变量耦合控制系统, 设计一种简易的解耦降维控制器变得尤为重要。

本文针对不确定性多变量耦合控制系统, 研究了一种聚类融合解耦降维的控制方法, 实现了对多变量耦合系统的解耦控制。与现有方法相比, 本论文的贡献点就在于: 1) 求解了不确定多变量被控系统的最优解耦矩阵, 实现了将一个多变量耦合系统分解为若干个简单子系统; 2) 提出了融合函数降维理论, 对融合参数进行求解, 实现了将高维控制系统分解为低维控制系统。

1 不确定性多变量耦合系统解耦

针对含有不确定性多变量耦合控制系统, 其含有不确定性的离散控制方程可以表示为^[10]

$$\begin{cases} \mathbf{x}(k+1) = \mathbf{A}\mathbf{x}(k) + (\mathbf{B} + \Delta\mathbf{B})\mathbf{U}(k) \\ \mathbf{y}(k) = \mathbf{C}\mathbf{x}(k) \end{cases} \quad (1)$$

其中, $\mathbf{x}(k) = [x_1(k), x_2(k), \dots, x_n(k)]^T$ 为控制系统的高维状态向量, k 为离散时间, \mathbf{B} 为非奇异的关系控制传递矩阵, $\Delta\mathbf{B}$ 为控制系统存在的不确定性扰动矩阵, $\mathbf{U}(k) \in R^n$ 为控制系统的已知输入, \mathbf{A}, \mathbf{C} 分别表示时变实矩阵。 $\mathbf{y}(k)$ 为观测输出。

上式中, 由于关系控制矩阵 \mathbf{B} 的影响, 控制系统各

* 基金项目: 咸阳职业技术学院 2021 教学改革研究项目 (2021JYA03)

收稿日期: 2023-12-26

输入向量之间存在着耦合作用,为了实现对上述控制系统的高精度控制,可以设计一个补偿矩阵来对其进行解耦。对角解耦法是一种原理较为简单,实用性价值很高的解耦方法,进而在实际工程中使用率很高。

在式(1)中,由于传递矩阵 \mathbf{B} 为满秩矩阵。因此,可以假设 $\mathbf{W}(s)$ 是不确定多变量耦合系统控制方程的传递函数矩阵,则将其可以进一步定义为

$$\mathbf{W}(s) = \mathbf{C}(\mathbf{S}\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}\mathbf{B} \quad (2)$$

其中, \mathbf{I} 为适合维数的单位阵。

根据现代控制理论^[11],可以设计一个传递函数矩阵的前馈补偿矩阵 $\mathbf{W}_p(s)$,使得下式成立为

$$\mathbf{W}_p(s)\mathbf{W}(s) = \mathbf{I} \quad (3)$$

将式(2)代入式(3),经过计算可以进一步得到传递函数的前馈补偿矩阵为

$$\mathbf{W}_p(s) = \mathbf{W}^{-1}(s) = \mathbf{B}^{-1}(\mathbf{S}\mathbf{I} - \mathbf{A})\mathbf{C}^{-1} \quad (4)$$

根据上式,由于矩阵 \mathbf{B} 为非奇异阵,则 \mathbf{B}^{-1} 可以视为控制系统的前馈补偿输出矩阵,则前馈补偿器的输出方程可以进一步表示为

$$\mathbf{Z}(k) = \mathbf{B}^{-1}\mathbf{x}(k) \quad (5)$$

给上式两边同乘以 \mathbf{B} ,则可以进一步得到控制方程状态向量与前馈补偿器的输出之间的关系为

$$\mathbf{x}(k) = \mathbf{B}\mathbf{Z}(k) \quad (6)$$

将上式代入含不确定性多变量耦合系统离散控制方程(1)中,则将其可以进一步改写为

$$\begin{cases} \mathbf{Z}(k+1) = \mathbf{Z}(k) + \mathbf{U}(k) + \mathbf{B}^{-1}\Delta\mathbf{B}\mathbf{U}(k) \\ \mathbf{Y}(k) = \mathbf{B}\mathbf{Z}(k) \end{cases} \quad (7)$$

其中, $\mathbf{Z}(k) = [z_1(k), z_2(k), \dots, z_n(k)]^T$ 作为解耦系统的状态向量。 $\mathbf{B}^{-1}\Delta\mathbf{B}$ 为控制系统中的未建模动态矩阵。

上式中,假设 $\mathbf{G} = \mathbf{B}^{-1}\Delta\mathbf{B} = [\mathbf{G}_1^T, \mathbf{G}_2^T, \dots, \mathbf{G}_n^T]^T$,进而,不确定性离散多变量解耦系统的状态方程可以进一步表示如下。

$$\begin{cases} \mathbf{Z}(k+1) = \mathbf{Z}(k) + \mathbf{U}(k) + \mathbf{B}^{-1}\Delta\mathbf{B}\mathbf{U}(k) \\ \mathbf{Y}(k) = \mathbf{B}\mathbf{Z}(k) \\ \mathbf{G} = \mathbf{B}^{-1}\Delta\mathbf{B} = [\mathbf{G}_1^T, \mathbf{G}_2^T, \dots, \mathbf{G}_n^T]^T \end{cases} \quad (8)$$

根据上式可以观察到,通过引入控制系统的辅助状态变量,将含有不确定性扰动的多变量耦合系统分解为若干个相互独立的子系统,同时每一子回路都将其他回路的耦合作用及不确定性扰动归结为未知向量 \mathbf{G} ,从而达到了对多变量耦合系统的近似解耦。

由于上述控制方程中的未知量 \mathbf{G} 构成比较复杂,利用一般控制方法是无法获得未知扰动。在现代控制理论中,模糊控制理论可以用来估计被控系统的不确定性扰动项。因此可以通过利用模糊理论来对多变量控制系统中的未知扰动项 \mathbf{G} 进行估计。但由于模糊规则数是根据模糊系统的输入维数呈指数增长的,而由于本文所研究的不确定性多变量耦合控制系统有若干个输入变量,高维输入不利于模糊观测器设计。因此,在进行模糊干扰观测器设计时,就有必要对高维系统进行降维处理。在控制模型

中,由于关系控制矩阵 \mathbf{B} 中的行、列元素从某种意义上能够反映多变量控制系统中,各输入变量之间的耦合程度与相互关系。 K 均值聚类(K -means)算法是一种简单高效的无监督学习聚类方法^[12-13],它可以根据距离函数和给定的聚类数目 m ,按照相似度高将给定的数据分配到 m 个聚类中去,并可以得到 m 个聚类中心。因此,本文下节将通过利用改算法对控制系统传递矩阵 \mathbf{B} 中的数据进行分析处理,可以得到有限个数据聚类中心,并依据主动调整机构子系统之间耦合强度的大小,将高维控制系统近似分解为低维控制系统。

2 不确定性多变量耦合系统的降维

对于不确定性多变量耦合系统控制方程,由于其变量众多,很难直接设计出由单系统输出到输入的单级模糊控制器。因此本文设计如下式(9)所示的融合控制策略,将多维的控制策略转化为低维多级控制策略的嵌套。

$$\mathbf{Z}_i(k) \xrightarrow{f_1(\cdot)} \tilde{\mathbf{Z}}_i(k) \xrightarrow{f_2(\cdot)} \mathbf{Y} \quad (9)$$

式中, $f_1(\cdot)$ 为融合函数,它利用控制系统状态量之间的耦合性和可融合性进行组合,通过融合函数对控制系统的多个输入变量进行初步处理; $\mathbf{Z}_i(k)$ 为控制系统第 k 时刻第 i 个输入, $\tilde{\mathbf{Z}}_i(k)$ 为融合函数输出; \mathbf{Y} 为被控系统输出向量。

在不确定性多变量耦合系统控制方程中,控制关系传递矩阵 \mathbf{B} 是用来描述控制系统中任一控制输入与其他子系统之间的逻辑关系,表中的数值也直观地表示了子系统之间耦合强度的大小。因此,本节拟利用 K -means 数据分析算法对控制传递矩阵 \mathbf{B} 中的数据进行处理,以获得各作动器子系统之间的耦合关系,将聚类数目设定为 m 个,选择聚类质点如下式所示。

$$\mathbf{H} = [h_1, h_2, \dots, h_m] \quad h_i \in \mathbf{Z}(k), i = 1, 2, \dots, m \quad (10)$$

其中, \mathbf{H} 为聚类中心集合, h_i 为聚类质点。

在进行数据聚类中心选择时,为提高其选择的自适应度和准确度,定义如下的聚类中心迭代函数式为

$$h_i = \frac{\sum_{i=1}^m (z_i(k) u(z_i(k)))}{\sum_{j=1}^n u(z_j(k))} \quad (11)$$

其中, $u(z_i(k))$ 为第 i 条模糊规则的隶属度函数。为保证对多变量数据进行模糊聚类的精度与准确度,定义了如下的最优聚类目标函数为

$$J = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n u(z_j(k)) \|z_j(k) - h_i\|^2}{\sum_{j=1}^n \mu(z_j(k))}, j \neq i \quad (12)$$

其中, $\|z_j(k) - h_i\|$ 为各质点到聚类中心的欧式距离。

进而,将任意选定的聚类质点作为聚类主元,与聚类质点相似度最高的输入变量为辅元,并将其可以通过融合

系数进行线性融合,则不确定性多变量耦合系统控制方程的输入可以表示为

$$U = (\lambda_1 h_1 + \lambda_4 z_4 + \lambda_9 z_9 + \dots + \lambda_{14} z_{14}) + (\lambda_2 h_2 + \lambda_5 z_5 + \lambda_{11} z_{11} + \dots + \lambda_{n-1} z_{n-1}) + (\lambda_3 h_3 + \lambda_{10} z_{10} + \lambda_{15} z_{15} + \dots + \lambda_{23} z_{23}) + \dots + (\lambda_m h_m + \lambda_{19} z_{19} + \lambda_{21} z_{21} + \dots + \lambda_n z_n) \quad (13)$$

其中, λ_i 为融合系数,且 $i = 1, 2, 3, \dots, n$ 。为方便后续融合系数的求解,根据系统状态向量的聚类结果,将融合系数书写为如下的向量式为

$$\begin{cases} \mathbf{K}_1 = [\lambda_1 \lambda_4 \lambda_9 \dots \lambda_{14}] \mathbf{z}_{r1} = [c_1 z_4 z_9 \dots z_{14}] \\ \mathbf{K}_2 = [\lambda_2 \lambda_5 \lambda_{11} \dots \lambda_{n-1}] \mathbf{z}_{r2} = [c_2 z_5 z_{11} \dots z_{n-1}] \\ \mathbf{K}_3 = [\lambda_3 \lambda_{10} \lambda_{15} \dots \lambda_{23}] \mathbf{z}_{r3} = [c_3 z_{10} z_{15} \dots z_{23}] \\ \vdots \\ \mathbf{K}_m = [\lambda_m \lambda_{19} \lambda_{21} \dots \lambda_n] \mathbf{z}_{rm} = [c_m z_{19} z_{21} \dots z_n] \end{cases} \quad (14)$$

根据式(14),不确定性多变量耦合系统控制方程的输入可以进一步表示为

$$U = \mathbf{K}_1 \mathbf{z}_{r1} + \mathbf{K}_2 \mathbf{z}_{r2} + \mathbf{K}_3 \mathbf{z}_{r3} + \mathbf{K}_4 \mathbf{z}_{r4} + \mathbf{K}_5 \mathbf{z}_{r5} \quad (15)$$

由于融合系数为一组向量形式,这使得传统根据经验通过调试确定融合参数的方法工作量烦琐,计算量大,而且在实际应用中难以实现。本节内容将会设计一种基于多变量系统状态反馈的离散 LQR 控制设计方法来确定所设计的融合函数参数矩阵。

为进一步精确计算融合系数,根据 LQR 控制原理,定义满足不确定性多变量耦合系统的二次型性能泛函如下。

$$J = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} (\mathbf{z}^T(k) \mathbf{Q} \mathbf{z}(k) + \mathbf{u}^T(k) \mathbf{R} \mathbf{u}(k)) dk \quad (16)$$

其中, \mathbf{Q} 为半正定矩阵, \mathbf{R} 为对称正定矩阵。通过选择合适的加权矩阵 \mathbf{Q} 和 \mathbf{R} , 再求解如下的 Riccati 方程。

$$-\mathbf{P} \mathbf{A} - \mathbf{A}^T \mathbf{P} + \mathbf{P} \mathbf{B} \mathbf{R}^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{P} - \mathbf{Q} = 0 \quad (17)$$

根据上式,则可以求得最佳状态反馈控制矩阵为

$$\mathbf{K}^T = \mathbf{R}^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{P} \quad (18)$$

其中 $\mathbf{K} = [\mathbf{K}_1, \mathbf{K}_2, \dots, \mathbf{K}_{25}]^T$, $\mathbf{K}_i, i = 1, 2, 3, \dots, n$ 为常数矩阵, \mathbf{P} 为正定常数矩阵。至此,通过 LQR 控制设计确定了所设计的融合函数参数矩阵。进而根据式(15),式(18),则可以得到融合函数的输出方程可以表示为

$$f_1(z) = \begin{bmatrix} \mathbf{K}_1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{K}_2 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & \mathbf{K}_{m-1} & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & \mathbf{K}_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_{r1} \\ z_{r2} \\ \vdots \\ z_{rm-1} \\ z_{rm} \end{bmatrix} \quad (19)$$

通过上式可以看到,通过融合函数 $f_1(z)$ 可以将系统的 n 个输入变量降维为 m 个输入,实现了系统降维,其次将融合函数计算的结果作为输入变量到被控系统,实现不确定性多变量耦合控制系统中主元到控制输入的非线性映射。

3 不确定性多变量耦合系统的解耦降维控制仿真

在本节中,假设该不确定性多变量耦合系统为 25 输

入 25 输出的 MIMO 控制系统。为简便控制仿真,假设 \mathbf{A} , \mathbf{C} 分别为单位阵,关系传递矩阵 \mathbf{B} 为

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_{11} & \mathbf{B}_{12} \\ \mathbf{B}_{21} & \mathbf{B}_{22} \end{bmatrix} \quad (20)$$

式中, $\mathbf{B}_{11}, \mathbf{B}_{12}, \mathbf{B}_{21}, \mathbf{B}_{22}$ 分别为传递矩阵的分块矩阵。离散 LQR 控制性能指标函数参数 \mathbf{R}, \mathbf{Q} 表达式为

$$\mathbf{Q} = \text{diag}[\mathbf{Q}_1 \mathbf{Q}_2 \mathbf{Q}_3 \mathbf{Q}_4 \mathbf{Q}_5], \mathbf{R} = \mathbf{I}_{25 \times 25} \quad (21)$$

其中, $\mathbf{Q}_1 = \text{diag}[100 \ 240 \ 200 \ 100 \ 150]$

$$\mathbf{Q}_2 = \text{diag}[100 \ 500 \ 100 \ 230 \ 100]$$

$$\mathbf{Q}_3 = \text{diag}[200 \ 150 \ 500 \ 200 \ 200]$$

$$\mathbf{Q}_4 = \text{diag}[100 \ 100 \ 200 \ 100 \ 200]$$

$$\mathbf{Q}_5 = \text{diag}[100 \ 150 \ 200 \ 100 \ 100]$$

对于 25 输入 25 输出的 MIMO 控制系统,在进行控制仿真时,基于式(2)~(8)对该多变量耦合系统进行解耦,将其他回路的耦合作用及不确定性扰动归结为未知向量。其次,为准确获得不确定扰动向量,在模糊观测器设计时,利用式(10)~(13),对多变量耦合系统的传递矩阵 \mathbf{B} 进行分析,结果如图 1 所示。在图 1 中,黑色实心圈表示 5 个聚类质点,在 5 个聚类中其他空心点为和中心质点耦合关系最强点,其他聚类外的节点耦合性较小。

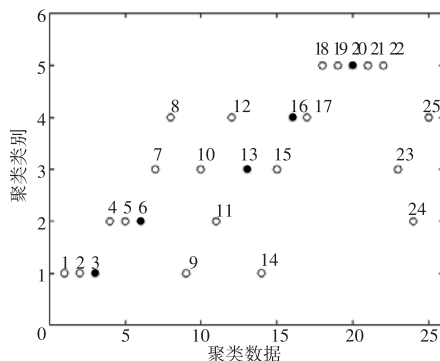


图 1 输入变量聚类分析图

因此,后续数据融合降维,可以将第 3、6、13、16、20 号主动调整机构作为主元,其余相关作动器系统为辅元来进行数据融合设计。并基于式(14)~(18),可以进一步计算出融合函数的系数矩阵,如表 1~5 所示。

表 1 融合函数系数表 (\mathbf{K}_1)

K_1	1	2	3	4	5
1	3.311 9	-4.621 9	-2.404 2	3.274 2	7.251 6
2	-2.066 9	1.182 2	-0.474 2	-1.126 4	3.061 63
3	1.868 9	-1.595 8	-2.997 8	0.844 8	-10.736 3
4	-1.440 9	-1.555 1	1.939 0	-4.037 3	-8.127 8
5	3.204 97	-1.042 4	-3.644 7	3.520 6	-14.237 1

表 2 融合函数系数表 (\mathbf{K}_2)

K_2	1	2	3	4	5
1	-2.497 3	3.712 4	-3.602 4	-4.851 0	-0.952 8
2	1.393 7	0.698 0	1.665 3	3.707 8	0.228 4
3	-3.062 8	0.778 5	-0.116 2	-13.148 3	3.550 4
4	3.593 5	0.101 1	-0.576 9	-5.981 1	3.487 8
5	-5.929 6	0.186 6	2.405 2	-6.155 5	0.596 8

表3 融合函数系数表 (K_3)

K_3	1	2	3	4	5
1	5.304 8	7.287 4	6.378 7	12.726 5	-3.016 7
2	-3.799 8	-9.702 0	-3.039 1	-20.556 2	-6.745 2
3	-3.094 0	3.720 3	0.077 2	1.324 4	3.361 6
4	-7.194 2	12.709 3	-1.520 7	5.663 8	-1.450 0
5	-1.373 8	1.414 6	-2.090 2	-3.862 4	-1.724 8

表4 融合函数系数表 (K_4)

K_4	1	2	3	4	5
1	4.585 0	-3.174 0	6.716 0	-3.172 9	-8.271 6
2	6.053 4	-7.418 0	8.386 7	-2.293 2	-5.406 5
3	6.828 8	-7.815 4	10.494 6	0.228 4	-9.505 1
4	9.459 5	-4.073 4	3.164 5	0.090 3	-1.155 5
5	-0.002 8	0.258 6	-1.769 1	4.685 5	7.429 1

表5 融合函数系数表 (K_5)

K_5	1	2	3	4	5
1	-2.504 7	-2.145 1	-2.924 7	2.583 8	3.676 9
2	0.752 5	2.351 5	-0.907 6	-5.878 4	-3.966 5
3	-1.857 1	4.429 6	8.424 8	-3.592 3	0.793 7
4	-2.732 7	-0.067 7	-5.383 1	-0.576 0	-4.079 1
5	4.541 3	4.120 0	-3.253 2	-1.236 3	-3.948 0

根据上述参数可以进一步得到融合函数的表达式为

$$f_1(z) = \begin{bmatrix} K_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & K_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & K_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & K_5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_{r1} \\ z_{r2} \\ z_{r3} \\ z_{r4} \\ z_{r5} \end{bmatrix} \quad (22)$$

其中, $Z_{r1} = [1.413 \ 2.668 \ 1.552 \ -3.986 \ 1.122]^T$

$Z_{r2} = [1.782 \ 0.675 \ -3.213 \ -1.413 \ -1.126]^T$

$Z_{r3} = [0.196 \ 0.129 \ 0.646 \ -9.329 \ -1.429]^T$

$Z_{r4} = [3.079 \ 1.016 \ 0.293 \ 1.18 \ 0.611]^T$

$Z_{r5} = [2.271 \ 1.426 \ -2.134 \ -13.129 \ -1.256]^T$

根据上述参数,对25输入25输出的不确定性多变量耦合系统进行控制,则第一组聚类输入变量控制效果如图2所示。

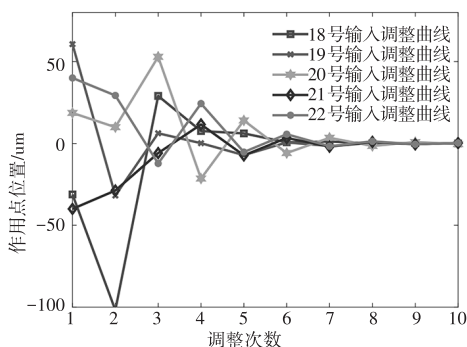


图2 第一组聚类输入变量控制效果图

依据图2可知,在对不确定多变量控制系统中,在6次调整之前,各子系统的调整曲线出现了不同程度的振荡,说明各子系统之间存在着相互影响与耦合作用。但由于采用了解耦降维控制方法,能够对各子系统之间存在的耦合和

不确定影响进行估计,使得各子系统能够在6次调整之后,克服了其他子系统的影响,进而出现了一致收敛。为研究某子系统对其他聚类中系统控制效果影响,在上述聚类中加入了1号子系统的输入,最终控制效果如图3所示。

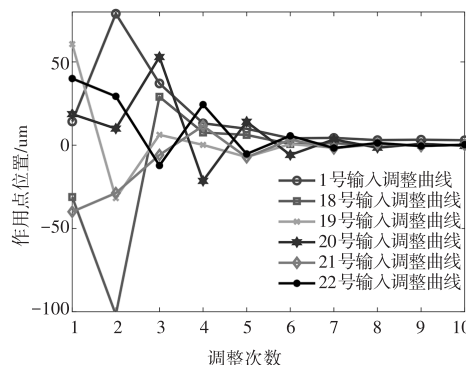


图3 不同聚类输入变量影响控制效果图

根据图3中第1号输入曲线可知,由于其受到同组其他子系统的耦合及外界干扰影响,输入调整曲线出现了不规则振荡。但通过对比图2、图3中的第18-22号输入曲线可以发现,它们并没有因为第1号输入曲线的加入而受到影响,这就进一步说明了该聚类融合解耦降维方法的有效性和实用性。

4 结束语

本文针对不确定性多变量耦合系统,研究了一种聚类融合解耦降维控制方法。该方法在不增加控制系统复杂度的情况下,不但实现了对多变量耦合系统的近似解耦,而且也可以降低高维控制系统的维度,方便了控制器设计,提高了对被控系统的控制精度。由于在系统解耦降维过程中,没有考虑聚类系统中其他参数的变化,后期研究应进一步利用自组织模糊系统对控制系统传递矩阵的数据进行分析。

参考文献

- [1] 金雨, 张霄, 丁锋. 多变量系统高效耦合递推最小二乘辨识算法及计算量分析[J]. 控制理论与应用, 2025, 44(2):364-372.
- [2] 黄帅, 王昕, 王振雷. 一类非线性多变量系统的多模型自适应控制[J]. 控制理论与应用, 2020, 37(4):829-836.
- [3] A. DVPAA, S. GLL, GEORGE J A, et al. Inverted decoupling PID control applied to the reactors of a diesel hydrotreating unit[J]. Journal of Control, Automation and Electrical Systems, 2022, 34(2):315-323.
- [4] JU G, LIU S, WEI K, et al. A parameter self-tuning decoupling controller based on an improved ADRC for tension systems [J]. Applied Sciences, 2023, 13(19):1-12.
- [5] 刘豹, 唐万生. 现代控制理论[M]. 北京:机械工业出版社, 2006:204-205.
- [6] 任正帅, 常伟, 周发轩. 前馈解耦控制380V电网不平衡补偿的优化方法[J]. 江西电力职业技术学院学报, 2022, 35(12):9-11.
- [7] 王志梁, 严立辰, 夏宇栋, 等. 直膨空调系统动态建模及温湿度解耦控制[J]. 低温与超导, 2023, 51(7):63-70.

(下转第55页)