

控制与决策

Control and Decision

基于复杂网络的多电机同步控制系统 故障诊断与切换容错研究

毛海杰, 李炜, 蒋栋年

引用本文:

毛海杰, 李炜, 蒋栋年. 基于复杂网络的多电机同步控制系统 故障诊断与切换容错研究[J]. 控制与决策, 2020, 35(4): 843–851.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.0733>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于正多胞体线性规划的滤波故障诊断方法

Orthotopic linear programming filtering based fault diagnosis method

控制与决策. 2020, 35(4): 807–815 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.0857>

能量和带宽受限下的分布式一致性融合估计器

Consensus-based distributed fusion estimator with energy and bandwidth constraints

控制与决策. 2020, 35(1): 16–24 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.0492>

基于区间观测器的动态系统故障诊断技术综述

Review of interval observer based fault diagnosis techniques for dynamic systems

控制与决策. 2018, 33(5): 769–781 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2017.1597>

一种基于时变干扰观测器的高超声速飞行器容错控制策略设计

A FTC scheme for hypersonic vehicle based on adaptive disturbance observer

控制与决策. 2018, 33(10): 1893–1900 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2017.0645>

基于LMI的一体化鲁棒主动容错控制器设计

Integrated robust active fault tolerance controller design based on linear matrix inequality

控制与决策. 2018, 33(1): 53–59 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2016.1311>

基于网络的离散切换时滞系统故障检测和控制器协同设计

Fault detection and control co-design for networked-based discrete-time switched systems with time-varying delays

控制与决策. 2017, 32(10): 1810–1816 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2016.1187>

连续系统故障可诊断性评价方法综述

Overview of fault diagnosability evaluation methods for continuous systems

控制与决策. 2016, 31(12): 2113–2121 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2015.1483>

基于Rollout算法的序贯多故障诊断策略

Sequential multiple fault diagnosis strategy based on Rollout algorithm

控制与决策. 2015(3): 572–576 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2013.1754>

基于复杂网络的多电机同步控制系统 故障诊断与切换容错研究

毛海杰, 李 炜[†], 蒋栋年

(1. 兰州理工大学 电气工程与信息工程学院, 兰州 730050; 2. 甘肃省工业过程先进控制重点实验室, 兰州 730050; 3. 兰州理工大学 电气与控制工程国家级实验教学示范中心, 兰州 730050)

摘要: 针对多电机同步控制系统的传感器故障问题, 受复杂网络同步输出耦合矩阵概念的启发, 基于其中的信息和结构冗余, 设计表征不同传感器输出数据一致性的相似度矩阵, 通过在线对矩阵中元素大小及特征值的判断实现对故障传感器的检测、定位与估计; 依据故障诊断结果, 通过引入可靠系数对均值反馈的加权修正, 实现对故障传感器的隔离与系统的切换容错. 所提方法的创新之处在于充分利用了数据驱动方法中便利的数据获取与基于模型方法中能反映机理特征的各自优势, 实现了基于模型与基于数据方法的有机融合, 避免了繁杂的理论推导, 具有算法简单、不需要改变系统原有的拓扑结构、易于工程实现等特点, 同时适用于多故障情形. 仿真实验验证了所提方法的有效性.

关键词: 多电机同步控制; 故障诊断; 容错控制; 传感器故障; 复杂动态网络; 相似度矩阵

中图分类号: TP273

文献标志码: A

Fault diagnosis and switching tolerance for multi-motor synchronous control based on complex dynamical network

MAO Hai-jie, LI Wei[†], JIANG Dong-nian

(1. College of Electrical and Information Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 2. Key Laboratory of Gansu Advanced Control for Industrial Processes, Lanzhou 730050, China; 3. National Demonstration Center for Experimental Electrical and Control Engineering Education, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: In view of the problem of sensor fault in the multi-motor synchronous control system, the similarity matrix which characterizing the consistency of different sensors output is designed, which is enlightened by the concept of the coupling matrix of complex network synchronous output based on the information and structural redundancy in synchronous control. The fault sensor is detected, located and estimated by judging the related elements and eigenvalues in the similarity matrix. And the fault sensors can also be isolated and the system is achieved fault-tolerance by improving the weighted mean feedback mechanism. The innovation of the method is to make full use of the advantages of the convenience online data acquisition in the data driven method and the characteristics of the mechanism based on the model method, realizes the integration of the model and the data method, and avoids complex theoretical derivation. It is also applicable to multiple faults situations and has the characteristics of simple algorithm, high execution efficiency and easy engineering implementation. There is no need to change the original topology of the system. Simulation experiments verifies the effectiveness of this method.

Keywords: multi-motor synchronous control; fault diagnosis; fault tolerant control; sensor fault; complex dynamical network; similarity matrix

0 引言

随着传动技术的不断发展, 多电机同步协调系统可提供更大的负载驱动能力和更灵活的运动方式, 已广泛应用于冶金、机器人、雷达、造纸、舞台设备

等领域^[1-3]. 例如, 在舞台机械系统中, 为实现特定的演艺效果, 常常要求由多个电机驱动的多个吊杆实现保持或追击同步; 对于大惯量台体, 常由多个电机共同驱动, 以实现旋转或升降的同步或协调运动; 在烟

收稿日期: 2018-05-28; 修回日期: 2018-10-10.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61763027, 61873116).

责任编辑: 方华京.

[†]通讯作者. E-mail: liwei@lut.cn.

支卷接设备中,为提高生产效率和产品质量,许多部位均有同步控制要求,如卷烟机劈刀与刀头的同步、钢印辊与切刀的同步、接装机与卷烟机的同步等。这些不同应用中的同步控制其实质均是保证不同电机间转速或位移同步。

在多电机同步控制中,主要存在以下两个问题:一是同步控制效果欠佳。由于每台电机的技术参数不同,同时受负载变化、电机参数漂移、传动机构尺隙不确定等因素影响,如何保持多台电机高精度同步运行是首要问题。二是传感器的故障问题。由于用以测量速度或位置的传感器分布较多,且工作环境多数相对恶劣,受老化、碰撞、电磁干扰等因素影响,较易发生故障。这些传感器大多直接参与系统的反馈控制,一旦发生故障,轻则影响系统的同步控制性能,重则会对系统造成灾难性的后果。因此,如何及时有效地识别这类故障并进行容错,对保证产品质量、确保系统的安全性和可靠性意义重大^[4-5]。针对问题一,已有很多学者对同步控制结构和控制算法进行了广泛深入的研究^[1-3,6-7],理论与技术相对而言已较为成熟;而针对问题二,目前已有成果还较少。因此,本文更关注对问题二的解决。

基于解析冗余的动态系统故障诊断(fault detection and diagnosis, FDD)与容错控制技术(fault tolerant control, FTC)的发展为保障系统的安全性提供了有力的支撑。针对运动控制系统的传感器故障问题,已有大量文献对其进行了研究^[8-14]。研究大体可分为2类,即基于数学模型的方法和基于数据驱动的方法^[8]。其中,基于数学模型方法的关键是各类观测器的设计。如文献[9]通过转速外环采用ADRC、电流内环采用ESO对转速估计,提高了多电机同步效果,并基于矢量控制原理,实现了对传感器故障的切换容错;文献[10]通过设计对转子电阻估计的自适应电流观测器,解决了针对感应式电机的电流、电压及转速3种传感器故障的诊断与隔离问题;文献[11]针对感应式电机的速度传感器故障问题,设计了自适应观测器,在线检测传感器故障,并基于间接磁场定向控制实现了对系统的容错。近年来,针对数学模型方法存在建模困难等问题,基于数据驱动的方法逐渐成为新的研究热点,受到了人们的广泛关注^[12-14],已成为目前较为实用的诊断技术之一。其核心思想是以系统中存在的大量在线和离线监测数据为基础,利用数据挖掘等技术获取其中隐含的有用信息,以表征系统运行的正常及故障模式,文献[12]采用基于数据驱动的两层贝叶斯网络,通过采集线电压信号并进行快

速傅里叶变换得到故障特征,实现了对PMSM中逆变器的故障诊断;文献[13]利用基于离线数据的等价空间辨识方法,构建残差信号,实现了对船舶横向运动系统异常状况的故障诊断。

纵观现有成果,更多的是针对单电机驱动方式,尽管上述方法大多也适用于多电机同步驱动方式下的故障诊断和容错控制,但从工程实现的便利性等角度考虑,仍然具有算法复杂、实现难度大等问题。此外,基于模型与基于数据驱动方法相结合的研究成果也较少,二者的优势尚未得到充分的发挥。冗余是故障诊断与容错的基础,由于控制方式的特殊性,多电机同步控制中存在固有的结构和信息冗余,这为实现系统容错提供了天然、便利的条件。

复杂网络是当今科学和技术的前沿研究领域。复杂网络模型在兼顾节点个体属性的同时,能够将节点间的关系这一结构属性纳入认识问题的范畴。而复杂网络的同步研究即是这一关系的典型代表,也是复杂网络领域的重要研究方向之一。针对复杂网络同步系统中的传感器或执行器故障问题,已有很多学者进行了关于拓扑网络结构及容错控制器的设计研究^[15-17]。显见,多电机同步控制是典型的复杂网络系统,而不同电机间的转速或位移同步,又是复杂网络同步控制的具体体现。

本文受复杂网络系统中耦合矩阵概念的启发,充分利用多电机同步控制中的结构和信息冗余,借助于传感器的输出信号,巧妙地设计构造了能够表征不同传感器输出数据一致性的相似度连接矩阵;通过在线对矩阵元素及特征值的分析和判断,实现对故障传感器的检测、定位与估计;依据故障诊断结果,通过对均值反馈的加权修正,借助于结构冗余,采用切换策略,实现对故障传感器的隔离和系统容错,最终提高系统的安全性和可靠性。

1 基于自抗扰的偏差耦合同步控制结构

在多电机同步控制策略研究中,主要包括同步控制结构和同步控制算法两方面内容。在控制结构方面,主要有串联主从控制^[18]、虚拟主轴控制^[19]、交叉耦合控制^[20]及偏差耦合控制^[21]等。其中,偏差耦合采用补偿控制策略,从启动特性、扰动抑制能力、适用范围、工程实现的便利性等多方面综合效果较优,实际应用也最为广泛。在控制算法方面,主要针对负载的不确定性和未知干扰等影响,采用各种鲁棒性强的控制算法,如滑模变结构控制、内模控制、自抗扰控制等^[9,21-22]。由于本文的研究重点在于对多电机同步控制系统中的传感器故障进行诊断和容错,结合

已有工作基础,采用文献[9]的基于自抗扰控制策略(ADRC)的偏差耦合同步控制结构. 其控制原理如图1所示.

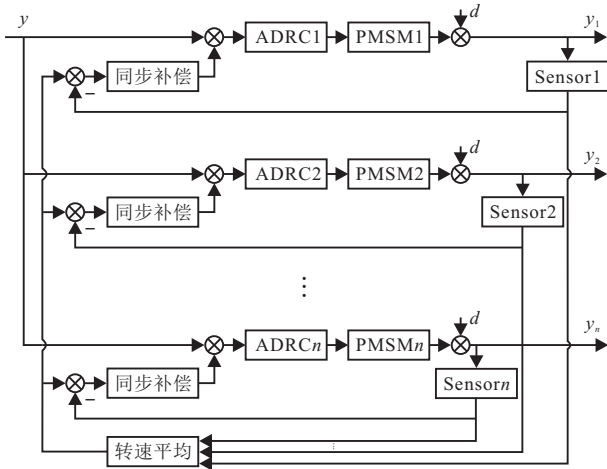


图1 基于ADRC的偏差耦合同步控制结构

由图1可以看出,当某一传感器发生故障时,除了对本台电机的控制性能产生影响外,通过偏差耦合的连接关系,故障的影响定会蔓延到其他正常子系统,进而造成整体同步性能的失控,严重时对设备或人员可能产生灾难性后果. 因此,研究便捷有效的故障诊断与容错策略,对故障传感器进行及时有效的处理是十分必要的.

2 基于复杂网络相似度矩阵的多电机同步控制系统传感器故障FDD与FTC设计

2.1 复杂网络相似度矩阵的建立

2.1.1 复杂网络耦合矩阵

基于图论理论,对于一般的满足耗散条件的复杂网络系统^[23]如下所示:

$$\dot{x}_i = f(x_i(t)) + \sigma \sum_{j=1}^N a_{ij} H(x_j(t)). \quad (1)$$

其中: $x_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in})^T \in R^n$ 为节点的状态, $i = 1, 2, \dots, N$; $f \in C[R^n, R^n]$; $\sigma > 0$ 为耦合强度; $A = (a_{ij})_{N \times N}$ 为网络的耦合矩阵; $H \in C[R^n, R^n]$ 为内连函数.

当耦合矩阵 A 满足

$$\begin{cases} a_{ij} > 0, i \neq j; \\ a_{ii} = - \sum_{j=1, j \neq i}^N a_{ij}, i = j \end{cases} \quad (2)$$

且 $\text{rank}(A) = N - 1$ 时,依据文献[24-25],则矩阵 A 零特征值的左特征相量 $\xi = (\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_N)^T$ 非负,即 $\xi_i \geq 0, 1 \leq i \leq N$. 进一步,若矩阵 A 不可约,则 ξ 为正,即 $\xi_i > 0, 1 \leq i \leq N$.

在此基础上,设 $\sum_{j=1}^N \xi_j = 1$, 则 $\bar{x} = \sum_{j=1}^N \xi_j x_j$ 称为网络的加权平均态. 此时,网络同步的充要条件是:当 $t \rightarrow \infty$ 时,每一个节点的状态 x_i 趋于同步及加权平均态,且不依赖于初始条件,也即有

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \|x_i(t) - x_j(t)\| = \lim_{t \rightarrow \infty} \|x_i(t) - \bar{x}(t)\| = 0. \quad (3)$$

具体证明过程可参考文献[23].

由上述结论可以看出,对于由复杂网络结构所确定的耦合矩阵 A 反映了网络的同步或一致性属性.

受此启发,接下来的问题是:能否构造出一个具有上述性质的耦合矩阵,在系统正常时可以表征系统的同步或一致性;而当系统出现异常时,一致性被破坏,异常的结果也必然会反映在耦合矩阵中,从而依据矩阵元素变化和相互关系进行故障诊断.

2.1.2 基于数据驱动的相似度矩阵构建

分析图1的构成可以明显看出,多电机同步控制是一典型的复杂网络系统,考虑到其控制目标,本文更关注对该复杂网络一致性的判断. 为便于评价复杂网络中不同节点间的一致或相似性,在此保持上述耦合矩阵的构成方式不变,将耦合矩阵更名为相似度矩阵,则构造相似度矩阵 A 的过程可归结如下.

设图1所示的多电机同步复杂网络系统 N 个节点中的输出,经由 N 个传感器测量并构成集合 $Y = [y_1, y_2, \dots, y_N]$. y_i 与 y_j 之间的关联用相似度 a_{ij} 表示, a_{ij} 越大,表示 y_i 与 y_j 之间的相似度越高,反之越低. 由于两个不同节点之间相似度相同,故有 $a_{ij} = a_{ji}$, 因此矩阵 A 为对称矩阵. 如何构建 A , 对于有效区分 y_i 与 y_j 之间相似度至关重要,一般将其设置为 y_i 与 y_j 之间距离的函数. 本文采用欧氏距离,构造形式如下所示:

$$A(k) = \begin{cases} a_{ij} = \frac{1}{1 + (y_i(k) - y_j(k))^2}, i \neq j; \\ a_{ij} = - \sum_{i=1, i \neq j}^N a_{ij}, i = j. \end{cases} \quad (4)$$

其中: $y_i(k)$ 为第 i 个节点的传感器在第 k 个采样时刻的输出数据, $i, j = 1, 2, \dots, N$. 可见,由此构造的矩阵 A 满足耦合矩阵的条件,即 $a_{ij} = a_{ji} > 0, i \neq j$, $\text{rank}(A) = N - 1$,亦具备耦合矩阵的性质.

注1 构造的矩阵 A 元素的数值完全由传感器的输出数据在线产生,因此可以认为是一种数据驱动的方法. 同时, A 的构造体现了传感器测量数据之间距离矢量的关联关系,反映了网络节点间输出的同一属性或相近对象的空间特征. 因此,从这一角度来看, A 又兼具网络机理模型的特征. 对网络同步而言,

某一节点的输出异常必然会引起与其他节点之间的距离增大,相似度减小,而这一变化又会直接反应在矩阵 A 中的相应位置处,从而为判断数据偏离、追溯偏离原因并定位故障奠定了基础.

2.2 基于相似度矩阵的传感器故障诊断

2.2.1 传感器正常/故障情形下相似度矩阵属性分析

基于上述相似度矩阵的设计,对多电机同步控制系统而言,假设有 N 台电机需实现同步,每个子系统的输出可以看作是复杂网络的一个节点,不同节点间采用图1所示的基于偏差耦合的同步控制结构进行连接,且在控制算法作用下,假设系统已具备了良好的同步控制性能.

由构造的 A 矩阵可以看出,在系统达到稳态,且具有良好同步精度前提下,因 $y_i \approx y_j$,故有 $a_{ij} \approx 1$, $a_{ii} \approx -(N - 1)$. 且由矩阵理论可以容易得到,此时 A 特征根为 $\lambda_1 = \lambda_2 = \dots = \lambda_{N-1} = -N$ 及 $\lambda_N = 0$. 而当某一传感器(如第 i 个)发生故障时,其输出必然会偏离其他输出,即与其他输出之间的距离增大,相似度减小. 反映在 A 中,即与 x_i 相关的第 i 行和第 j 列的元素会表现出 $a_{i*} < 1$ 和 $a_{*i} < 1$ (对角线除外),且随着故障幅值的增大,有 $a_{i*} \ll 1$ 和 $a_{*i} \ll 1$,而其他位置的值基本保持不变,此时矩阵 A 对应的特征根分布较无故障时也会发生变化.

2.2.2 基于相似度矩阵的传感器故障检测与定位

依据构造的矩阵 A 所具有的性质,通过对其中的元素在故障发生前后的性能分析,利用 A 进行故障检测可有以下3种方法.

方法1 取数据窗口长度为 l ,生成 $A(k), A(k - 1), \dots, A(k - l)$,并将对应位置处的元素两两进行比较. 当偏差矩阵中某一行或一列元素均超出阈值时,即可认为故障发生,且根据超出阈值的元素所在的行数或列数即可定位故障传感器.

方法2 $A(k)$ 元素自身与1进行比较. 正常时有 $A_{ij} \approx 1$,而当第 i 个传感器故障时, $A(k)$ 中的第 i 行和第 i 列元素均远远小于1,以此可检测并定位故障.

方法3 利用 $A(k)$ 特征根的变化. 由于故障前后, $A(k)$ 的特征根会发生变化,正常时特征根近似为 $-N$ 和0,而发生故障后,除0特征根外,其他特征根的分布会发生变化,以此检测故障发生.

对于上述3种方法,均是利用构造的矩阵 $A(k)$ 来实现故障诊断,但从实现的快速性和准确性角度,又各有优缺点. 方法1相当于采用 $l + 1$ 个样本的数据窗检验,随着样本数量的增多,检测的可靠性会增加,但随之会产生一定的检测延迟;方法2具有较快的诊断

速度,实时性较好,但抗扰性能较差,可能会产生误报;方法3本质上与方法2相同,都是基于 $A(k)$ 自身元素或特征根来进行故障检测,但该方法不能进行故障传感器的定位.

综合以上3种方法的特点分析,为提高诊断的效率和可靠性,可以将方法1和方法2进行结合. 也即在程序实现时,主要采用方法2进行,在判断发生故障后,再结合后几步 $A(k)$ 比较,即方法1进行进一步的确认,从而在提高诊断速度的基础上,保证诊断的可靠性,节约计算资源,提高效率.

2.2.3 基于相似度矩阵特征值的故障估计

上述算法除了能够实现对故障传感器的检测与定位外,通过进一步研究矩阵 A 的性能,还可以实现对故障大小的估计. 具体过程如下:

当第 i 个传感器发生故障时,若忽略噪声及同步偏差,矩阵 A 可近似写为

$$A^f \approx \begin{bmatrix} -(N - 2 + \beta) & 1 & \dots \\ 1 & -(N - 2 + \beta) & \dots \\ \vdots & \vdots & \ddots \\ \beta & \beta & \dots \\ \vdots & \vdots & \ddots \\ 1 & 1 & \dots \\ \beta & \dots & 1 \\ \beta & \dots & 1 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ -(N - 1)\beta & \dots & \beta \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \beta & \dots & -(N - 2 + \beta) \end{bmatrix}.$$

其中 β 为故障传感器与其他正常传感器之间的相似度, $\beta < 1$. 由于该形式的矩阵其特征根的分布与故障大小无直接对应关系,为实现对故障大小的估计,将上述矩阵变形为

$$A^{f*} \approx \begin{bmatrix} -(N - 2 + \beta) & 1 & \dots \\ 1 & -(N - 1) & \dots \\ \vdots & \vdots & \ddots \\ \beta & 1 & \dots \\ \vdots & \vdots & \ddots \\ 1 & 1 & \dots \\ \beta & \dots & 1 \\ 1 & \dots & 1 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ -(N - 2 + \beta) & \dots & 1 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & \dots & -(N - 1) \end{bmatrix}.$$

即除了 $a_{1i} = a_{i1} = \beta$ 外, 对角线元素仍然保持原规则不变, 其他位置的元素均为1. 此时, 容易得到经变形后的矩阵 A^{f*} 所对应的特征根, 分别为

$$\lambda_1 = \lambda_2 = \dots = \lambda_{N-2} = -N,$$

$$\lambda_{N-1} = -(N - 2 + 2\beta), \lambda_N = 0.$$

可见, 相比于故障前的矩阵 A , 经过变换后唯一发生改变的特征根是一个与故障相关的量, 即为 $\lambda_{N-1} = -(N - 2 + 2\beta)$. 因此, 通过求取矩阵 A^{f*} 的特征根, 即可得到与故障相关的相似度, 进而得到对故障大小的估计, 即

$$\beta^* = -\frac{N - 2 + \lambda_{N-1}^*}{2}, \quad (5)$$

$$|y_1 - y_i| = \sqrt{-1 + \frac{1}{\beta^*}}. \quad (6)$$

其中: 考虑到 A^f 为奇异矩阵, 为得到 A^{f*} , 可采用 A^f 的广义逆得到变换阵, 即 $P = A^{f*} \cdot (A^f)^+$.

值得一提的是, 该诊断方法同样适用于多故障情形, 也即当多个传感器同时发生故障时, 相似矩阵中相应位置处必然会出现多个行和多个列元素值满足 $a_{ij} < 1$, 诊断方法与单故障情形类似. 但需要指出的是, 随着故障传感器个数的增多, 故障类型多样, 判断的元素个数增多, 诊断时间延长, 加之不同传感器, 尤其是故障传感器之间的距离大小变得复杂, 使得在单一故障诊断阈值下, 该方法整体的诊断可靠性会有一定程度的下降.

注2 借鉴复杂网络耦合矩阵所构建的多电机同步系统的相似度矩阵, 只需在线判断其中各元素大小, 即可实现对相应传感器的故障检测与定位, 并通过简单的矩阵变换与特征值判断, 同时实现对故障大小的估计.

注3 该方法完全由传感器输出数据进行驱动, 避免了繁杂的公式推导, 同时 A 的构建又反映了网络的一致属性, 兼具机理模型特征, 因此该方法可谓是机理模型与数据驱动方法的有机结合, 且适用于单故障及多故障情形. 相比于传统基于模型的方法, 省去了建模、观测器设计、参数优化等繁杂过程, 具有计算简单、实现便捷、物理意义明确等优点.

2.3 基于修正加权均值反馈的传感器故障隔离与系统容错

在诊断出故障后, 对故障传感器进行及时有效的隔离和容错, 对保证系统的安全稳定运行至关重要. 分析基于偏差耦合的同步控制结构, 传感器采集的信号除了用于自身反馈外, 还作为均值反馈的输入信号, 因此, 在检测出故障后, 应重点围绕这两种信号进行隔离与重构, 以保证系统的安全性. 为此, 针对均

值反馈部分, 修正其均值反馈形式为如下所示的加权平均形式:

$$\bar{y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \alpha_i y_i. \quad (7)$$

其中: y_i 为各传感器输出信号, α_i 可定义为第 i 个传感器的可靠系数. 基于上述故障诊断结果, 当传感器正常, 即完全可靠时, 有 $\alpha_i = 1$; 而当传感器故障时, 有 $\alpha_i = 0$. 即

$$\alpha_i = \begin{cases} 1, & \text{正常;} \\ 0, & \text{故障.} \end{cases} \quad (8)$$

可以看出: 当传感器正常时, 该反馈信号为传统均值信号 $\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i$; 而当传感器故障时, 因为可靠系数的引入, $\alpha_i = 0$, 相应传感器信号被切断, 自动实现了对故障传感器的隔离, 同时不影响均值信号的产生, 亦不改变原网络的拓扑结构. 由此, 在反馈均值中实现了对故障传感器隔离与系统容错.

针对自身反馈部分, 可采取切换临近正常传感器输出或均值输出形式. 考虑到临近传感器仍有发生故障的可能, 为安全起见, 这里采用切换均值信号的方式加以实现, 即利用已隔离了故障传感器后的均值信号 \bar{y} 代替故障传感器的输出 y_i 作为自身反馈信号. 这意味着, 对故障传感器所在的子系统而言, 因偏差恒为0, 故同步补偿不再起作用, 此时系统的输出保持当前值不变即可.

基于上述分析, 针对多电机同步控制系统中的传感器故障问题, 具有故障诊断与切换容错功能的改进偏差耦合的同步控制结构如图2所示.

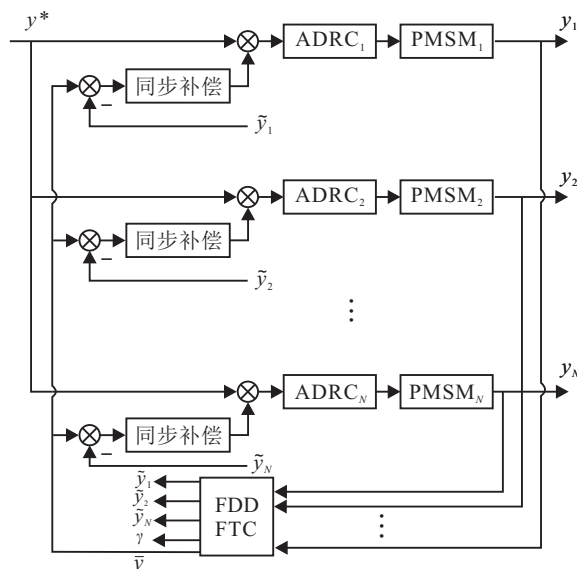


图2 具有FDD与FTC功能的改进结构

图2中,FDD与FTC模块的输出分别代表经过处理的传感器1至传感器 N 的输出 $\tilde{y}_1, \tilde{y}_2, \dots, \tilde{y}_N$,故障指示输出 γ 及均值反馈输出 \bar{y} .传感器正常时,有 $\tilde{y}_i = y_i$,而当某一传感器故障时,对应输出 $\tilde{y}_i = \bar{y}_i$.

注4 通过引入可靠系数对原均值进行加权修正,并据此进行均值反馈设计,使得当某一传感器发生故障并被成功诊断出后,该方法会在不影响均值反馈输出及系统拓扑结构的前提下,方便地实现对故障传感器的隔离和容错,保证系统的同步与安全性能.

2.4 传感器故障诊断、隔离与容错的步骤

综合以上分析,针对多电机同步控制系统发生单一传感器故障情形,基于复杂网络相似度矩阵及修正的加权均值反馈,其故障诊断、隔离与容错过程如下.

step 1: 初始化. 设置系统运行的采样周期 T_s 及诊断阈值 th ,并对多电机同步系统中的传感器从1到 N 进行标号,同时令 $\alpha_i = 1 (i = 1, 2, \dots, N)$,故障指示输出 $\gamma = 0$.

step 2: 生成矩阵 $A(k)$. 由各子系统的输出,根据式(4)确定相似度矩阵 $A(k)$.

step 3: 故障诊断. 判断 $A(k)$ 中各元素是否满足 $a_{ij} < th$,若是,则故障发生,置 $\gamma = 1$,转向Step 4;否则转向Step 2,生成下一次矩阵 $A(k+1)$,再次进行判断.

step 4: 切换容错. 依据Step 3诊断结果,若第 j 个传感器故障,则置 $\alpha_j = 0, y_j = \bar{y}$,实现对故障传感器的隔离与系统容错.

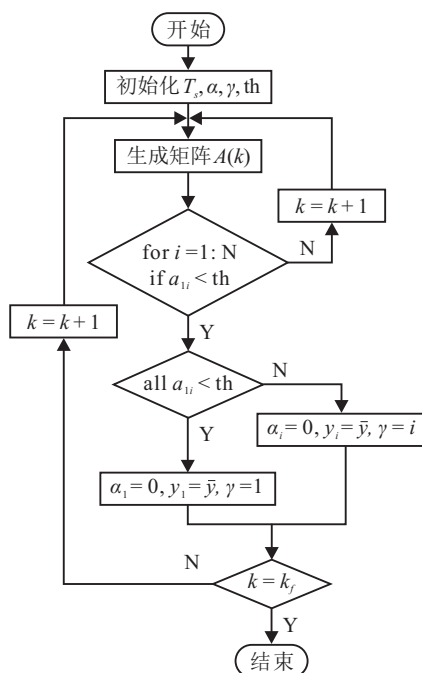


图3 FDD与FTC流程

需要说明的是,在对矩阵 $A(k)$ 进行行扫描或列

扫描时,为提高诊断的效率,可以只判断第一行或第一列即可.判断的结果无外乎有以下3种情况:1)若第一行或第一列的值全部满足 $a_{1i} < th$ 或 $a_{i1} < th$,则第一个传感器发生故障,故障指示输出为 $\gamma = 1$;2)若仅其中一个值满足 $a_{1i} < th$,则第 i 个传感器发生故障,故障指示输出为 $\gamma = i$;3)全部不满足,则无故障发生,故障指示仍保持 $\gamma = 0$ 不变.

根据上述故障诊断与容错过程,对应的流程如图3所示.

3 仿真实验分析

为验证本文所提出的故障诊断与容错切换方法的有效性,采用Matlab/Simulink软件,CPU为Intel i5 2.5 GHz处理器、内存为4 GB的硬件环境下,基于图2所示的控制结构,考虑到多电机同步控制系统中,针对单个传感器故障,以3台永磁电机(电机台数的增多,对验证本文方法的有效性影响不大)的同步控制为例,将其与适合单电机驱动的基于数学模型方法中较为经典的扩展Kalman滤波(EKF)进行仿真对比实验.在不同期望转速输入下,模拟子系统1~子系统3的传感器分别发生恒偏差、卡死、恒增益等3种不同类型的故障.其中,永磁同步电机采用 $d-q$ 坐标系下的数学模型如下所示:

$$\dot{i}_d = \frac{1}{L_d}(u_d - R_s i_d + \omega L_q i_q), \quad (9)$$

$$\dot{i}_q = \frac{1}{L_q}(u_q - R_s i_q - \omega L_d i_d - \omega \varphi_f), \quad (10)$$

$$\dot{\omega} = \frac{1}{J}(P_n T_e - P_n T_l - B\omega), \quad (11)$$

电磁转矩方程为

$$T_e = 1.5 P_n \varphi_f i_q. \quad (12)$$

其中: i_d, i_q 为定子电流 d, q 轴分量; u_d, u_q 为定子电压 d, q 轴分量; ω 为转子角速度; L_d, L_q 为 d, q 轴自感; φ_f 为转子磁链; J 为转动惯量; T_l 为负载转矩; T_e 为电磁转矩; B 为阻力系数; P_n 为极对数; R_s 为定子绕组电阻.

各电机参数如表1所示.仿真时间为35 s,仿真步长 $T_s = 0.001$ s, $th = 0.1$,EKF方法中参数的选取依据文献[26].在系统发生故障后,对分别采取两种方法的同步输出进行对比.

首先,为体现故障的影响,先将表2所示的3种类型的故障分时施加到子系统1中.图4给出了发生故障后,不采取任何措施的结果.可以看出,此时传感器1的故障已经严重影响到了子系统2和子系统3的输

表 1 3 电机机械参数

变量	符号	电机 1	电机 2	电机 3
额定转速 /rpm	N	1500	1500	1500
额定转矩 /N·m	T	3	3.3	4.5
d 轴自感 /mH	L_d	3.5	3.7	4.1
q 轴自感 /mH	L_q	3.2	3.8	4.4
定子电阻 / Ω	R_s	0.9	0.94	1.32
转动惯量 /kg·m ²	J	0.01	0.007	0.005
极对数	p	2	2	2

出,在故障发生及结束后的一段时间内,系统整体已无法保持同步。

表 2 传感器故障信息

传感器	故障类型	数学描述	故障时间 /s
1	恒偏差	$\tilde{y}(k) = y(k) + c_1$	5~6
2	卡死	$\tilde{y}(k) = c_2$	15~16
3	恒增益	$\tilde{y}(k) = c_3 y(k)$	25~26

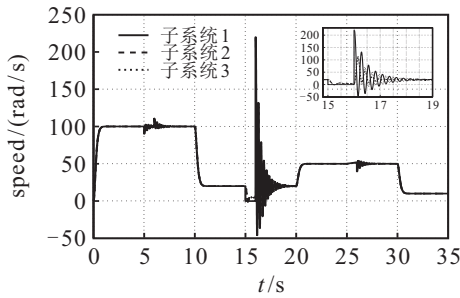


图 4 发生故障后无 FDD 同步输出

其次,为验证本文所提方法的故障诊断效果,将其与 EKF 方法进行对比,分别对 3 个传感器在不同时间施加了不同类型(如表 2 所示)的故障. 图 5 给出了两种方法对故障进行检测和定位的结果. 由故障指示的时间和幅值可以看出,本文所提方法因算法简单、执行效率高,检测更加及时,定位更加准确,效果是令人满意的;而 EKF 方法出现了检测延迟,由细节图可以看出,最大延迟时间约为 0.3s,且在约 16.35s~16.43s 区间出现了误报. 图 6 是采用本文方法进行故障估计的结果,通过对细节部分放大可以看出,估计误差最大处约为 3 rad/s,而 EKF 方法并不能实现对故障大小的估计.

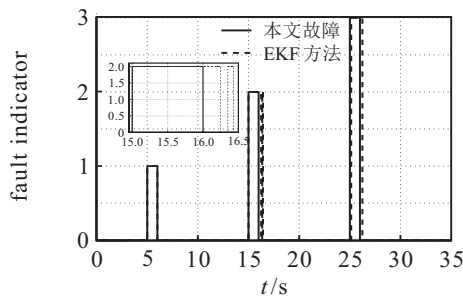


图 5 两种方法的故障指示输出

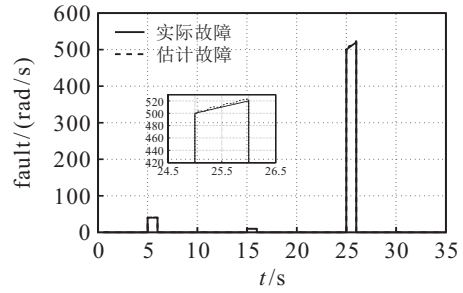


图 6 本文方法的故障估计

再次,基于上述诊断结果,分别采用本文的基于可靠系数的修正加权均值反馈与基于 EKF 转速估计的直接切换,对故障传感器进行隔离与系统容错,结果如图 7~图 10 所示.

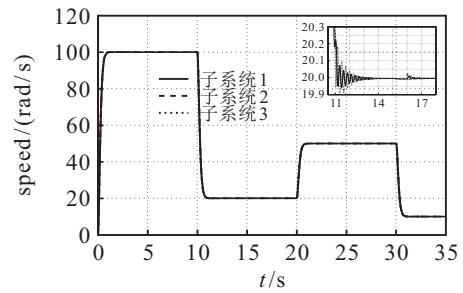


图 7 采用本文方法的同步输出

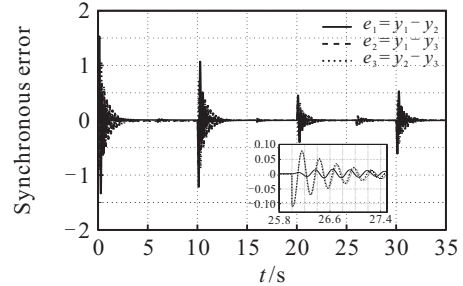


图 8 采用本文方法的同步输出误差

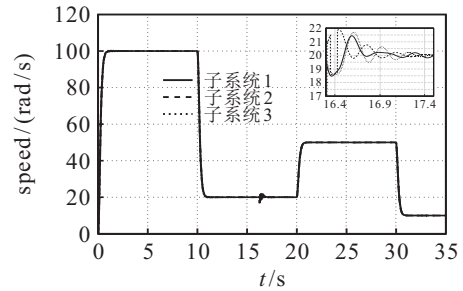


图 9 采用 EKF 方法的同步输出

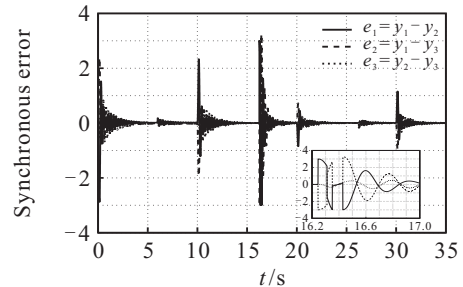


图 10 采用 EKF 方法的同步输出误差

由图7可以看出,本文方法除了在切换后的短时间内,系统因控制器的调整而产生了微小的波动外,在其他时间保持了满意的同步效果.进一步从图8的同步输出误差可以看出,因故障而进行切换所产生的误差远远小于期望转速改变时系统的同步误差,最大切换误差约为 0.1 rad/s .在图9所示的EKF方法中,受转速估计精度影响(尤其在低速时估计误差较大),切换后系统整体同步效果欠佳.由图10所示的误差曲线可以看出,同步误差最大处接近 4 rad/s .

综合以上仿真实验结果可以看出,本文所提方法较EKF具有更好的诊断精度和容错效果,且从计算量、需整定参数个数及实现效率方面,本文方法更具有计算量小、整定参数少、实现便利的优点.

4 结论

针对多电机同步控制这一典型复杂网络系统,本文受复杂网络同步中耦合矩阵思想的启发,基于距离设计了能够体现不同传感器输出数据一致性的相似度矩阵,通过在线对矩阵中相关元素及特征值的判断,实现了对故障传感器的检测、定位与估计;依据故障诊断信息,通过引入可靠系数得到修正加权均值反馈而设计的基于诊断结果的容错切换机制,实现了对故障传感器的有效隔离与系统容错,具有原理简单,计算量小,不需要改变原有网络的拓扑结构,易于工程实现的优点,且适合多故障情形.相比于已有理论和现有技术,所提方法的新颖之处在于将复杂网络系统中耦合矩阵的构造机理与实时传感器数据进行了有机融合,从而使得相似度矩阵的构建及基于相似度矩阵元素判断的故障诊断方法兼具了便利的数据获取与反映网络模型机理特征的优点,实现了基于数据驱动与基于模型方法的有机结合.仿真实验验证了结论的有效性.针对该方法随故障传感器个数增多,可靠性降低的问题,研究故障诊断的可靠性定量评价方法,并进行基于可靠性量化评价的容错控制集成设计是接下来的主要工作.

参考文献(References)

[1] 姜晓平, 朱奕, 伞冶. 大功率随动试验台多永磁同步电机同步控制[J]. 电机与控制学报, 2014, 18(4): 88-95. (Jiang X P, Zhu Y, San Y. Synchronization control of multiple permanent magnet synchronous motors in high-power servo test stands[J]. Electric Machines and Control, 2014, 18(4): 88-95.)

[2] 侯海良, 年晓红, 王忠, 等. 带有不确定性多电机卷绕系统的分散最优保性能控制[J]. 控制与决策, 2017, 34(3): 487-494.

(Hou H L, Nian X H, Wang Z, et al. Decentralized optimal guaranteed cost control for multi-motor winding system with uncertainties[J]. Control and Decision, 2017, 34(3): 487-494.)

[3] 李炜, 公茂利, 毛海杰, 等. 升降舞台系统中多电机同步控制方法研究[J]. 兰州理工大学学报, 2014, 40(2): 81-85. (Li W, Gong M L, Mao H J, et al. Synchronous control of multiple motors in lifting stage systems[J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2014, 40(2): 81-85.)

[4] 王鹏飞. 电动汽车用五相永磁容错电机的设计及运行控制研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学电气工程及自动化学院, 2015. (Wang P F. Research on design and operation control of five-phase fault-tolerant permanent magnet machine used for electric vehicles[D]. Harbin: School of Electrical Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology, 2015.)

[5] 丁信忠, 张承瑞, 李虎修, 等. 永磁同步电机的转动惯量辨识及状态估计[J]. 山东大学学报, 2012, 42(2): 70-76. (Ding X Z, Zhang C R, Li H X, et al. Identification of inertia and state estimation for PMSM[J]. Journal of Shandong University, 2012, 42(2): 70-76.)

[6] 韩仁银, 郭阳宽, 祝连庆, 等. 多电机同步控制综述[J]. 电机与控制应用, 2017, 4(6): 8-12. (Han R Y, Guo Y K, Zhu L Q, et al. Review of multi-motor synchronization control[J]. Electric Machines & Control Application, 2017, 4(6): 8-12.)

[7] Wang M L, Ren X M, Chen Q. Robust tracking and distributed synchronization control of a multi-motor servomechanism with H-infinity performance[J]. ISA Transactions, 2018, 72: 147-160.

[8] Bourogaoui M, Ben Attia Sethom H, Slama Belkhdja I. Speed/position sensor fault tolerant control in adjustable speed drives-a review[J]. ISA Transactions, 2016, 64: 269-284.

[9] 毛海杰, 李炜, 王可宏, 等. 基于自抗扰的多电机转速同步系统传感器故障切换容错策略[J]. 山东大学学报, 2017, 47(5): 64-70. (Mao H J, Li W, Wang K H, et al. Sensor fault tolerant switch strategy study for multi-motor synchronous system based on ADRC[J]. Journal of Shandong University, 2017, 47(5): 64-70.)

[10] Tooraj A N, Farzad R S, Parviz J M. Detection and isolation of speed-, DC-Link voltage- and current-sensor faults based on an adaptive observer in induction-motor drives[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(5): 1662-1672.

[11] Marino R, Scalzi S, Tomei P, et al. Fault-tolerant cruise

- control of electric vehicles with induction motors[J]. *Control Engineering Practice*, 2013(21): 860-869.
- [12] Cai B P, Zhao Y B, Liu H L, et al. A data-driven fault diagnosis methodology in three-phase inverters for PMSM drive systems[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2017, 32(7): 5590-5600.
- [13] 孙春芝. 基于数据驱动的船舶横向运动故障诊断与容错控制[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学自动化学院, 2015.
(Sun C Z. Fault diagnosis and fault-tolerant control of ship lateral motion based on data-driven[D]. Harbin: College of Automation, Harbin Engineering University, 2015.)
- [14] 赵博, 李元春. 考虑多传感器故障的可重构机械臂主动取代分散容错控制[J]. *控制与决策*, 2014, 29(2): 226-230.
(Zhao B, Li Y C. Active substituting decentralized fault-tolerant control for reconfigurable manipulators with multi-sensor failures[J]. *Control and Decision*, 2014, 29(2): 226-230.)
- [15] Li X J, Yang G H. Adaptive fault-tolerant synchronization control of a class of complex dynamical networks with general input distribution matrices and actuator faults[J]. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 2017, 28(3): 559-569.
- [16] Ye D, Yang X, Su L. Fault-tolerant synchronization control for complex dynamical networks with semi-Markov jump topology[J]. *Applied Mathematics and Computation*, 2017, 312: 36-48.
- [17] Zhang C X, Wang J H, Zhang D X, et al. Fault-tolerant adaptive finite-time attitude synchronization and tracking control for multi-spacecraft formation[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2018, 73: 197-209.
- [18] Tomizuka M, Hu J, Chiu, Kamano T. Synchronization of two motion control axes under adaptive feed-forward control[J]. *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, 1992, 114: 3234-3245.
- [19] Perez-Pinal F, Caladron G, Alvarez R, et al. Comparison of multi-motor synchronization techniques[C]. *Proceedings of the 30th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. Busan: IEEE, 2004: 1670-1675.
- [20] Shi T N, Liu H, Geng Q, et al. Improved relative coupling control structure for multi-motor speed synchronous driving system[J]. *IET Electric Power Applications*, 2016, 10(6): 451-457.
- [21] Lin F J, Chou P H, Chen C S, et al. DSP-based cross-coupled synchronous control for dual linear motors via intelligent complementary sliding mode control[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2012, 59(2): 1061-1073.
- [22] Li M W, Fei H. Research on synchro drive technique of dual motor based on decoupling control and internal model control[C]. *Proceedings of 2009 Chinese Control and Decision Conference*. Guilin: IEEE, 2009: 5334-5337.
- [23] 陈娟, 陆君安, 周进. 复杂网络同步态与孤立节点解的关系[J]. *自动化学报*, 2013, 39(12): 2111-2120.
(Chen J, Lu J A, Zhou J. On the Relationship between the synchronous state and the solution of an isolated node in a complex network[J]. *Acta Automatic Sinica*, 2013, 39(12): 2111-2120.)
- [24] Arenas A, Diaz-Guilera A, Kurths J, et al. Synchronization in complex networks[J]. *Physics Reports*, 2008, 469(3): 93-153.
- [25] Wu C W. Synchronization in networks of nonlinear dynamical systems coupled via a directed graph[J]. *Nonlinearity*, 2005, 18(3): 1057-1064.
- [26] Shi K L, Chan T F, Wong Y K, et al. Speed estimation of all induction motor drive using an optimized extended Kalman filter[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2002, 49(1): 124-133.

作者简介

毛海杰(1978—), 女, 副教授, 博士, 从事动态系统故障诊断与容错控制的理论与应用的研究, E-mail: gsmaohj@163.com;

李炜(1963—), 女, 教授, 博士生导师, 从事工业工程先进控制、动态系统故障诊断与容错控制等研究, E-mail: liwei@lut.cn;

蒋栋年(1984—), 男, 副教授, 博士, 从事动态系统故障可诊断性量化评价的研究, E-mail: dreamjdn@126.com.

(责任编辑: 齐 霖)