

控制系统可诊断性的内涵与研究综述

王大轶¹ 符方舟^{2,3} 刘成瑞^{2,3} 李文博^{2,3} 刘文静^{2,3} 何英姿^{2,3} 邢琰^{2,3}

摘要 作为表征控制系统故障诊断能力的属性,故障可诊断性揭示了故障诊断深层次的内涵.将可诊断性分析纳入控制系统与诊断方案的设计环节,可以从根本上提高系统对故障的诊断能力,为研究故障诊断提供新的思路.本文分别从可诊断性的内涵、研究现状以及潜在发展趋势三个角度系统地分析可诊断性.首先,从定义、影响因素、与已有概念的关系以及应用四个方面剖析了控制系统可诊断性的内涵和研究意义.其次,分别从可诊断性评价与设计两个方面对可诊断性的研究现状进行分析.最后,通过对可诊断性已有成果进行总结归纳,探讨了可诊断性研究存在的不足以及未来发展的趋势.

关键词 控制系统,可诊断性,可诊断性评价,可诊断性设计,诊断难度

引用格式 王大轶,符方舟,刘成瑞,李文博,刘文静,何英姿,邢琰.控制系统可诊断性的内涵与研究综述.自动化学报,2018,44(9):1537-1553

DOI 10.16383/j.aas.2018.c170618

Connotation and Research Status of Diagnosability of Control Systems: A Review

WANG Da-Yi¹ FU Fang-Zhou^{2,3} LIU Cheng-Rui^{2,3} LI Wen-Bo^{2,3} LIU Wen-Jing^{2,3} HE Ying-Zi^{2,3} XING Yan^{2,3}

Abstract As a property describing fault diagnosis ability of control systems, diagnosability reveals deep insight into fault diagnosis. The fault diagnosis ability can be fundamentally improved by incorporating diagnosability analysis into the designs of control systems and diagnosis programs, which provides a new way for the study of fault diagnosis. To systematically analyze the diagnosability, the connotations, research status and potential research tendencies of diagnosability are discussed. First of all, the concept and research significance of diagnosability are summarized from four sides, definition, influence factors, relationships between diagnosability and other concepts, and applications. Moreover, the current research status of diagnosability is discussed in terms of diagnosability evaluation and design. Finally, the deficiency and prospects of diagnosability study are predicated based on existing results.

Key words Control systems, diagnosability, diagnosability evaluation, design of diagnosability, difficulty in diagnosis

Citation Wang Da-Yi, Fu Fang-Zhou, Liu Cheng-Rui, Li Wen-Bo, Liu Wen-Jing, He Ying-Zi, Xing Yan. Connotation and research status of diagnosability of control systems: a review. *Acta Automatica Sinica*, 2018, 44(9): 1537-1553

随着工业技术的不断发展,控制系统的结构和功能日益复杂,故障发生的概率也随之增加.因此,为提高系统的使用寿命、安全性和运行质量,降低故障风险,国内外学者进行了一系列的研究^[1-5].在以往的研究中,大多是通过提高零部件可靠性和提高系统的故障诊断能力两种方式来提高系统安全性.然而,一方面,前者受加工、制造和装配等客观因素影响,提升零部件的能力有限.另一方面,提高零部件可靠性只能降低故障概率,无法有效地对已发生

的系统故障进行处理.因此,在保证产品可靠性的基础上,提高系统的故障诊断能力有利于提高系统的运行质量.

传统的提高系统故障诊断能力的主要方式是提高诊断算法的性能,例如提高算法诊断精度^[6-7]和提高算法的适用性^[8]等.然而,由于系统结构的日益复杂,诊断算法的设计与改进变得更加困难^[9].同时,故障可以被诊断是诊断算法设计的前提^[10-11].换言之,若缺少必要的可测信息,使得系统无法获得诊断所需的故障信息,则无法通过设计或改进诊断算法达到诊断故障的目的.可以看出,改进诊断算法无法从根本上提高系统的诊断能力.

综上所述,传统的提升系统的故障诊断能力的方法存在一定的局限性.因此,为了从根本上提高故障的诊断能力,亟需从更深层次研究故障诊断.

故障可诊断性是一种表征控制系统诊断故障能力的属性,该属性从本质上揭示了故障诊断的内涵.可诊断性的分析结果不仅可以回答“故障是否可以被诊断”等必要问题,还可以进一步回答“诊断故障

收稿日期 2017-11-07 录用日期 2018-03-07
Manuscript received November 7, 2017; accepted March 7, 2018
国家自然科学基金(61690215, 61640304, 61573060, 61203093), 国家杰出青年科学基金(61525301)资助
Supported by National Natural Science Foundation of China (61690215, 61640304, 61573060, 61203093) and National Science Fund for Distinguished Young Scholars (61525301)
本文责任编辑 赵旭东
Recommended by Associate Editor ZHAO Xu-Dong
1. 北京空间飞行器总体设计部 北京 100094 2. 北京控制工程研究所 北京 100190 3. 空间智能控制技术重点实验室 北京 100190
1. Beijing Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing 100094 2. Beijing Institute of Control Engineering, Beijing 100190 3. Science and Technology on Space Intelligent Control Laboratory, Beijing 100190

的难度有多大”或“诊断故障需要付出多大的代价”等关键问题。

故障可诊断性研究为提高系统的故障诊断能力提供了新的思路。通过分析系统可诊断性,在系统设计阶段对配置进行优化,使得系统天生具有较强的获取故障信息的能力,可以从根本上提高故障诊断能力。同时,将可诊断性评价纳入诊断方案的设计阶段,利用评价结果指导诊断方案设计,可以有效地对诊断代价与诊断性能进行权衡,并通过设计合适的残差,更有针对性地实现诊断方案优化。可以看出,将可诊断性分析纳入系统、诊断方案设计阶段,可以从“先天”和“后天”两个方面同时提高系统诊断故障的能力。

除此之外,可诊断性研究还可以与传统的提升系统安全性的方法相结合,即将已有的可靠性设计与可诊断性设计纳入系统设计环节,从提高故障诊断与处理能力和降低故障率两方面同时提升系统运行质量。

鉴于此,有必要对控制系统的故障可诊断性进行深入地研究、归纳和总结。

本文通过对可诊断性定义、影响因素、与现有概念之间的关系以及应用等方面进行分析,深入挖掘可诊断性的内涵。通过对可诊断性研究现状进行归纳分析,针对目前可诊断性研究领域存在的问题提出了未来可能的发展方向,为进一步研究建立必要的概念和理论框架。

1 内涵

本节从基本定义和影响因素两个角度对可诊断性进行分析,给出可诊断性的基本内涵;然后,通过对比可诊断性与已有相似概念的异同,深入剖析可诊断性的特点;最后,通过对可诊断性应用层面进行分析,明确可诊断性的应用范围及应用前景。

1.1 可诊断性的基本定义

由 IEEE 发布的 1522 标准可以得到可诊断性的定义^[12]:系统故障能够被确定地、有效地识别的程度。其中,“确定地”要求每次系统发生故障时都能准确地对故障进行检测与隔离,实质上强调的是诊断系统完成诊断任务的能力;“有效地”考虑的是诊断系统完成诊断任务的资源利用效率,即要求对隔离故障所需的资源进行优化。

值得注意的是,故障可诊断性不等于故障诊断。由文献 [13] 可知,故障诊断是故障检测、故障隔离与故障辨识的统称(部分文献,如文献 [14],将故障隔离与故障辨识统称为故障诊断)。换句话说,故障诊断是对系统故障进行检测、隔离与辨识的过程。而由可诊断性定义可知,可诊断性则主要用于衡量故

障识别的准确程度和识别效率。因此,可诊断性是衡量故障诊断能力的指标。

通过对近年来可诊断性研究成果的分析可知,针对不同的研究需要,可诊断性研究考虑的因素也不尽相同,文献 [15–16] 将可诊断性视为与故障大小和种类无关的内部属性,文献 [17] 考虑噪声以及故障大小等因素对可诊断性的影响。鉴于此,为了更深入地对可诊断性的内涵进行分析,本节将可诊断性分为固有可诊断性与实际可诊断性,并给出定义。

固有可诊断性的定义为:由系统固有结构决定的系统检测、隔离与辨识故障的能力。由于在固有可诊断性分析的过程中,仅考虑系统结构对诊断的影响,不涉及具体的诊断算法等实际因素,因此,固有可诊断性的研究更能反映系统的内部结构性质。综上所述,固有可诊断性分析主要用于在系统设计阶段对系统配置与系统构型进行优化。

实际可诊断性的定义为:由系统固有结构与实际因素决定的系统检测、隔离与辨识故障的能力。实际因素包括诊断方法,诊断系统计算能力,甚至包括输入信号^[18]与故障建模程度^[19]等。系统在实际运行过程中不可避免地会受到实际因素的影响,而实际因素又直接影响着诊断故障的难度。因此,实际可诊断性的研究可以为诊断方案设计提供必要的信息。鉴于此,不同于固有可诊断性,实际可诊断性的分析结果主要用于指导诊断方案的设计。

从定义可以看出,实际可诊断性是在固有可诊断性的基础上考虑实际因素的影响。然而,对于不同类型的可诊断性,在研究中考量的影响因素不同,两者的适用范围不尽相同,从而导致研究方法也存在巨大的差异。因此,在理论分析中,不能简单地固有可诊断性视为实际可诊断性的退化形式。

1.2 影响因素

本小节对固有可诊断性与实际可诊断性的影响因素进行分析,为后续的可诊断性评价与设计提供思路。

1.2.1 固有可诊断性

固有可诊断性仅考虑了系统固有结构对系统诊断能力的影响。因此,固有可诊断性的影响因素通常可以归纳为如下几类:

1) 系统配置和系统构型

故障诊断系统的性能极大地依赖于可测信息的优劣程度,而系统配置和系统构型直接影响着信息的测量。因此,系统配置和构型与系统的固有可诊断性息息相关。

系统配置主要考虑系统部件个数和测点个数等参数,系统构型主要考虑部件和测点的位置和安装方式。目前,部分学者已经针对系统配置和系统构

型对可诊断性的影响进行了深入的分析. Krylander等在文献[20]中提出了一种基于模型结构信息的传感器配置方法. 该方法利用故障可检测性与可隔离性作为评价指标, 对不同配置的传感器进行分析, 得到所需代价最小的传感器配置最优解. 除此之外, 由于该方法只利用了模型的结构信息, 因此该传感器配置方法可以用于处理高维非线性微分代数模型. 与文献[20]不同, 文献[21]提出了一种用于分析连续系统可诊断性的方法. 该方法主要利用遗传算法得到系统的解析冗余关系, 从而对给定系统的可诊断性进行分析, 并通过分析结果对传感器配置进行优化.

2) 动力学特性

针对不同的实际要求, 不同系统的动力学特性往往具有较大差异, 例如机械臂^[22-23]与移动机器人^[24]. 与系统配置和系统构型相似, 动力学特性也会直接影响系统的固有可诊断性. 在系统设计阶段, 通过改变动力学特性, 在保证系统正常运行的前提下, 提升可测信息对故障的反映能力, 可以更加有效地获取故障信息并提高系统可诊断性.

然而, 现有的可诊断性研究成果大都集中于对系统配置和系统构型的优化. 针对动力学特性优化的研究, 更多的是从提升系统控制性能的角度出发. 如何在设计过程中同时考虑控制性能和可诊断性是未来研究中值得考虑的问题.

3) 诊断要求

诊断要求通常分为故障检测、故障隔离和故障辨识三个部分^[15]. 故障检测主要用于分析系统是否发生故障, 故障隔离主要对故障部位进行分析, 故障辨识是通过利用系统的可测数据重构系统故障. 针对不同的诊断目标, 往往需要设计不同的诊断算法. 通常而言, 相对于故障辨识, 故障检测与故障隔离具有更重要的意义^[25]. 事实上, 现有的关于故障诊断与系统可诊断性的研究也主要集中在可检测性与可隔离分析与设计^[26-30].

显然, 不同的诊断级别对应不同的系统建模程度. 因此, 根据诊断深度要求的不同, 可诊断性可以分为功能模块级、部件级和系统级可诊断性. 不同的可诊断性对应的具体故障诊断深度要求如表1所示.

4) 故障模式

故障模式指故障的表现形式^[31]. 根据故障部位的不同, 故障通常分为执行机构故障、传感器故障和被控对象故障. 根据故障对系统影响的方式不同, 分为加性故障和乘性故障.

1.2.2 实际可诊断性

由实际可诊断性的定义可知, 与固有可诊断性

不同, 实际可诊断性还需要考虑除了固有结构外的实际因素的影响. 实际因素可以分为诊断算法、限制因素和诊断代价三部分. 本节对上述实际因素对可诊断性的影响进行深入分析, 为后续实际可诊断性的研究奠定基础.

表1 不同的可诊断性对应不同故障诊断深度
Table 1 Different kinds of diagnosabilities correspond to different degrees of fault diagnosis

可诊断性分类	故障诊断深度要求
功能模块级可诊断性	确定发生故障的功能模块
部件级可诊断性	确定发生故障的部件
系统级可诊断性	确定系统是否发生故障

1) 诊断算法是故障诊断的主要影响因素之一, 直接影响诊断难度和诊断精度.

1990年, Frank将故障诊断算法分为基于信号处理的方法、基于知识的方法和基于解析模型的方法^[32]. 然而, 随着故障诊断理论不断发展以及学者们对故障诊断认识的不断深入, 已有的诊断算法分类渐渐不能适应已有的理论体系. 2003年, Venkatasubramanian等将控制系统故障诊断方法分为基于定量模型的方法、基于定性模型的方法和基于历史数据的方法^[33-35]. 2012年, 文献[36]通过将已有诊断算法的研究成果与微小故障的特点有机结合, 提出了微小故障诊断方法的分类框架. 显然, 相对以往的分类方法, 该分类方法能更好地反映并容纳最新的研究成果. 而针对于动态系统的间歇故障, 2014年周东华等给出了与上述方法不同的诊断方法分类准则^[37]. 可以看出, 不同的诊断算法, 适用范围不同性能也不尽相同, 根据具体的情况选择合适的诊断算法可以有效地提升系统的可诊断性. 实质上, 诊断算法对可诊断性影响的分析结果已经被广泛用于可诊断性设计过程.

2) 限制因素指分析不同的实际系统所需考虑的实际影响, 主要包括不确定性和资源约束等.

控制系统在实际中不可避免地会受到不同类型不确定性的影响^[38-39], 例如外部干扰, 模型不确定性等. 不确定性直接影响着系统故障的诊断难度^[40]. 随着模型参数不确定性的增大, 诊断算法精度会相应降低, 同时, 不同程度的外部干扰也会对误报率和漏报率产生不同的影响^[41]. 因此, 将不确定性纳入可诊断性的研究范围具有重要的意义.

在实际中, 运行环境或功能不同的系统通常存在不同的资源约束、例如传感器体积约束, 计算机存储空间约束和计算能力约束等. 资源约束极大地限制了系统的故障诊断性能的提升. 目前已有不少文

献针对不同的资源约束问题提出了相应的解决方法,在有限的条件下对诊断系统进行优化.为了解决无线传感器网络中无线电带宽、计算能力和电池能量等实际资源约束问题,文献[42]给出了一种用于工业机器人状态监测和故障诊断的新型工业无线传感器网络.针对航天器资源受限的问题,文献[43]利用加权算法对得到的信息进行处理并提出了一种天地一体化的故障诊断方法.文献[44]考虑了一种用于低成本资源受限分布式嵌入系统的自适应故障诊断算法,提出的算法可以检测出控制器区域网络的所有故障点.鉴于航天器计算机存储空间和计算能力有限等资源受限的特点,文献[45]利用基于互质分解与 Youla 参数化方法研究了控制信号与控制误差与残差的关系,给出了相关的残差设计方法,有效地减少了检测过程中所需的计算量.

除了上述因素外,在实际中控制系统还会受到多种其他因素的影响,例如输出饱和、时延^[46]等,学者们也给出了相应的故障诊断方法^[47-49],有效地抑制了约束因素对可诊断性的不良影响.

综合上述分析可以看出,限制因素广泛存在于各类控制系统中,直接影响着故障诊断的难度,并受到了设计人员的重视.

3) 诊断代价是衡量资源利用效率的有效指标,也是系统故障可诊断性的一个重要的影响因素.在满足所需诊断能力的前提下,诊断代价越小,表示诊断系统完成诊断任务的资源利用效率越高,换言之,此时系统具有较高的可诊断性.诊断代价通常包括诊断时间和诊断计算量等因素.

系统发生故障后,诊断系统需要一定的时间对故障进行诊断,诊断时间直接影响着控制系统的性能^[50].因此,在保证诊断精度的前提下,降低诊断时间可以有效提高系统的安全性.除此之外,对于在线故障诊断系统而言,诊断的实时性也是衡量诊断算法的一个重要指标.文献[51]通过分析并利用数据序列的相关性,有效地提高了系统的故障检测速度.为了提高诊断效率,文献[52]提出了一种基于改进的快速独立成分分析算法与小波包能量谱的特征提取方法,通过利用三阶牛顿法对算法进行优化,提高算法的收敛速度,有效减少了诊断需要的时间.文献[53]分别利用检测、定位和隔离故障所需的最大时间定义故障的可检测性、可定位性与可隔离性,提出了一种传感器布置的优化方法,有效地降低了经济成本并减少诊断所需的时间.

诊断计算量与诊断时间密切相关,目前大部分文献都从降低诊断时间的角度对诊断计算量进行分析.文献[54]为了处理复杂系统的故障诊断问题,将诊断问题转换为路径搜索问题,并通过定义合适的评价函数达到优化多目标 Pareto 集的目的,有效提

高了故障的诊断速度.然而,由于不同的诊断系统检测、隔离和辨识故障需要的计算量不同,而不同类型的系统拥有的计算能力也不尽相同,特别地,从诊断时间的角度对可诊断性进行分析的结果不适用于计算资源受限的系统.因此,诊断计算量是评价系统可诊断性时不可忽略的影响因素,而降低诊断所需的计算量有利于降低系统负担、增大诊断算法的适用性^[55-56].

1.3 与已有概念的关系

本节通过对比可诊断性与已有概念的异同,分析不同概念之间的关系,以此明确可诊断性的特点.

1.3.1 与可测试性的关系

目前可诊断性与可测试性之间界线较为模糊^[57],在不同的研究领域或针对不同的研究对象,两者之间关系也不尽相同,如等价关系^[58-61],并列关系^[62-63]及互补关系^[64]等.

可测试性与可诊断性都可用于提升系统的运行质量,且相互之间存在一定的联系.本节从多个角度对可测试性与可诊断性进行分析,通过比较两者的异同,给出不同概念之间的界线.首先,给出可测试性的定义:有效确定系统运行状态(可工作、不可工作、性能下降),隔离内部故障的设计特性^[12, 65].

由定义可知,可测试性与可诊断性均属于系统设计特性,两者均将研究重点放在故障的处理阶段,这是两者之间显著的相同点.

从研究方法来看,可测试性主要采用多信号流程图等方法对系统进行分析,而在可诊断性的研究过程中,除了常见的多信号流程图方法,基于数据、统计特征相似度等度量方法也被广泛采用.

从度量指标的角度对两者进行对比,系统的可测试性通常由故障检测率(Fault detection rate, FDR)、故障隔离率(Fault isolation rate, FIR)和故障虚警率(False alarm rate, FAR)等具有统计意义的指标描述.因此,可测试性主要分析的是能被检测(能被隔离/引起虚警)的故障占总故障的比例,即本质上回答的是“故障能否被检测(隔离)”或“是否存在虚警”的问题.与可测试性的研究内容不同,可诊断性主要研究系统对故障的可检测性、可隔离性与可辨识性.针对不同的描述形式,可诊断性的评价结果既可用于回答“故障能否被诊断”的问题,又可用于分析故障的诊断难度.

从应用范围的角度对两者进行分析,可以看出,目前可测试性的研究大多集中于对系统进行优化,而可诊断性研究不仅可以作用于系统设计阶段,还可以指导诊断方案设计,这也是两者的不同之一.

上文通过研究方法、度量指标和应用范围三个方面对两者进行了对比.与此不同,文献[66]从可

测试性与可诊断性的概念等方面对两者进行了分析, 给出了可测试性与可诊断性的关系, 如图 1 所示. 从图 1 可以看出, 相对于可测试性, 可诊断性具有更加广泛的内涵, 即在系统设计阶段与诊断方案设计阶段, 可诊断性研究可以为设计者提供更多可利用的系统信息, 从而更全面地提高系统安全性.

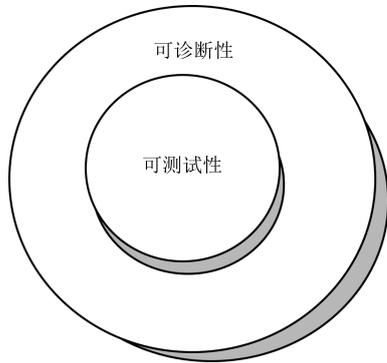


图 1 可诊断性与可测试性之间的关系
Fig.1 Relationship between diagnosability and testability

然而, 随着可测试性术语使用范围的不断扩展以及学者对可测试性研究的不断深入, 可测试性与可诊断性之间的区别不断减小, 两者之间的界线也越来越模糊. 但毫无疑问地, 可测试性与可诊断性并非等价的关系.

表 2 是可诊断性与可测试性之间的对比结果.

1.3.2 与能观测性、可重构性的关系

可诊断性用于衡量系统可测信息对故障的反映程度. 因此, 自然地, 可以将故障视为系统的扩展状态, 通过分析故障对应的系统状态的能观测性判断故障是否可检测. 基于此, 不少学者将系统能观测性与故障可诊断性相结合, 取得了令人满意的研究成果^[67-69]. 然而值得注意的是, 能观测性分析仅是可诊断性研究的方法之一, 不能简单地将故障可观测性视为可诊断性.

可重构性反映的是系统在发生故障后, 利用故障诊断结果对系统进行重构, 使之恢复既定功能的能力^[70-71]. 可以看出, 故障诊断是系统重构的前提, 而系统重构是保证系统运行质量的重要手段. 因此,

可诊断性与可重构性是处理故障的不同阶段所对应的两个不同性质.

表 2 可诊断性与可测试性之间的对比分析
Table 2 The comparative analysis of diagnosability and testability

	可测试性	可诊断性
本质		设计特性
研究目标		处理故障
研究方法	主要采用多信号流图方法	多信号流图, 基于数据、统计特性相似度度量等方法
度量指标	故障检测率, 故障隔离率, 故障虚警率	可检测性, 可隔离性, 可辨识性
应用范围	优化系统配置	优化系统配置, 优化诊断方案
关系	可诊断性包含可测试性	

表 3 是可诊断性与能观测性、可重构性之间的对比结果.

1.4 可诊断性的应用

1.4.1 可诊断性的应用范围

在实际工程中, 可诊断性主要应用于系统设计和诊断方案设计两大阶段.

在系统设计阶段, 可诊断性分析结果主要用于指导系统设计与改进, 即从结构上提高系统诊断故障的能力. 具体地说, 是将可诊断性评价结果与已有的设计指标相结合, 在保证控制系统满足所需控制性能指标的前提下, 通过多目标优化的方式对系统结构进行优化, 在提高系统对潜在故障的反映能力的同时提高配置效率, 从而提高系统的可诊断性.

在诊断方案设计阶段, 可诊断性分析结果主要用于指导方案的设计与改进, 提高诊断算法的性能. 具体地说, 是在可诊断性评价过程中同时考虑系统结构以及实际因素的影响, 并以评价结果为依据, 通过优化诊断算法残差、调整阈值等方式, 提高诊断方案与系统结构、实际诊断环境的契合程度, 从而科学地、更有针对性地提高诊断性能.

对系统进行可诊断性设计是通过先天设计提高

表 3 可诊断性与能观测性、可重构性之间的对比结果

Table 3 The comparisons of diagnosability, observability and reconfigurability

	能观测性	可诊断性	可重构性
基本概念	系统状态运动可由输出完全反映的属性	系统故障能够被确定和有效地识别的程度	发生故障时, 系统克服故障恢复既定功能的能力
两者关系	能观测性分析是研究可诊断性的一种方法		处理故障的不同阶段所对应的性质

后天能力,对诊断方案进行可诊断性设计是通过后天设计进一步提高系统的故障诊断能力.相对于传统方法,在提升系统诊断能力方面,可诊断性设计更具有针对性与有效性.

1.4.2 可诊断性的应用前景

提升系统安全性是提高控制系统运行质量的关键途径.对控制系统与诊断方案进行可诊断性设计,可以从系统层面提高故障诊断能力,从根本上提升系统安全性,具有较强的通用性与适用性.目前,可诊断性设计已在汽车工业^[72]、航海^[73]、航空^[74]、航天^[75-76]和电力生产^[77]等领域得到了广泛应用.

随着对可诊断性理论研究的不断深入,可诊断性设计具有越来越广阔的应用前景.特别地,对于安全性要求较高但运行环境复杂的系统,可诊断性设计将发挥不可或缺的作用.以航天器控制系统为例,一方面,航天器结构复杂、运行环境恶劣,大大提高了在轨故障发生的概率;另一方面,航天器研究及制造成本高昂,一旦发生严重故障,将造成巨大的经济损失^[71].因此,航天器安全性受到了学者们的高度重视.

目前大多数航天器都采用天地大回路的方式进行故障诊断,即在航天器诊断系统检测到故障后,通过人工判读的方法对故障进行诊断.然而,随着航天技术的不断发展,传统的专家会诊的诊断方式已经无法满足如信息传递时延大、运行环境复杂的深空探测以及战时不依赖于地面自主生存的军事应用等航天器新任务的要求.除此之外,航天器还受到星上资源受限及在轨故障难以维修等限制.因此,自主运行已经成为新一代航天器的发展趋势.

航天器具备自主故障诊断能力是安全自主运行的重要保证,而提升诊断系统的诊断精度及诊断可靠性是将传统的地面站人工判读转变为诊断系统自主决策、实现航天器自主运行的关键途径.一方面,对航天器控制系统进行可诊断性评价与设计,既能在系统设计阶段有效地提高配置效率,缓解航天器星上资源受限带来的影响,又能为诊断方案设计提供理论指导,降低设计难度并提高诊断算法性能,从系统层面弥补航天器固有可靠性不足以及在轨故障难以维修等缺陷,从根本上提高航天器的自主故障诊断能力.另一方面,在航天器运行阶段,若诊断系统检测到由于系统结构等限制而被判定为不可检测的故障,则可确定诊断系统发生误报并及时启动诊断系统自检程序,以此提高航天器的自主故障诊断能力.因此,可诊断性评价结果还可以在航天器在轨运行阶段对诊断结果进行辅助矫正,提高诊断结果的准确性.综上所述,可诊断性在未来的航天器研制中将有着举足轻重的地位.

2 控制系统可诊断性研究现状

控制系统可诊断性的研究分为可诊断性评价与可诊断性设计两部分.前者为后者提供理论基础,在工程实践中,可诊断性的设计又促进评价方法的研究.本节从控制系统可诊断性两部分内容的研究现状出发,对可诊断性进行更深入的分析.

2.1 可诊断性评价的研究现状

可诊断性评价指衡量系统故障能够被确定地、有效地识别的程度的过程.通常,可诊断性评价分为可诊断性定性评价和定量评价两部分.前者定性分析故障能否被检测(隔离/辨识),后者量化给出故障被检测(隔离/辨识)的难度^[78].显然地,相对于定性的评价结果,定量的评价结果可以为设计者提供更多可用信息^[79-81].

由前文可知,控制系统的可诊断性主要受到系统结构的影响.因此,对于大部分可由模型描述的系统,可以通过分析系统结构,得到故障与可测信息之间的关系,并利用两者的关系研究系统的可诊断性;相反,对于难以由模型描述的系统,则可以通过利用已有的可测信息分析系统的可诊断性.鉴于此,将现有的可诊断性评价归纳为基于结构模型和基于数据的可诊断性评价方法分别进行分析.

2.1.1 基于结构模型的可诊断性评价

1) 基于定量模型的可诊断性评价

定量模型在故障诊断与故障可诊断性评价方面都有着广泛应用,通常分为输入输出模型、状态空间模型等.

输入输出模型是以系统输入输出变量描述系统特性的模型,通常包括传递函数、微分代数方程和差分方程等.

传递函数是研究经典控制理论的主要工具之一,主要用于描述线性系统的动态特性.可诊断性研究的基本思路是通过分析故障对可测信息的影响评价系统的可诊断性.给出一般的线性系统传递函数为^[82]

$$y^{(i)}(\lambda) = G_{yu}^{(i)}(\lambda)u^{(i)}(\lambda) + G_{yd}^{(i)}(\lambda)d^{(i)}(\lambda) + G_{yw}^{(i)}(\lambda)w^{(i)}(\lambda) + G_{yf}^{(i)}(\lambda)f^{(i)}(\lambda) \quad (1)$$

其中, $y^{(i)}(\lambda)$, $u^{(i)}(\lambda)$, $d^{(i)}(\lambda)$, $w^{(i)}(\lambda)$ 和 $f^{(i)}(\lambda)$ 分别表示输出向量、输入向量、未知扰动向量、噪声向量和加性故障向量的拉氏变换(连续时间)或 Z 变换(离散时间);考虑乘性故障和模型不确定性时均会使系统参数发生改变,因此,系统参数上标 (i) 表示系统参数发生变化后对应的第 i 个系统的参数.特别地, $i = 0$ 表示未发生乘性故障且不考虑模型不确定性时系统的传递函数.

通过上述分析可知, 根据不同的实际研究对象, 模型 (1) 可以退化为不同的形式. 文献 [83] 通过对模型 (1) 中故障矩阵 $G_{yf}(\lambda)$ 的列元素进行分析, 给出了只考虑加性故障情况下的可诊断性定性评价方法. 对于存在干扰的情况, 即 $d \neq 0$, 文献 [84] 在频域内给出了线性时不变系统可检测性的判据, 即如果至少有一个故障对输出的影响大于扰动对输出的影响, 则认为系统在这个时间段内是可检测的. 该判据最大的优势在于评价结果不基于故障检测算法. 因此, 该评价结果可用于系统的可检测性设计. 不同于文献 [84], Varga 通过秩判据给出了故障可诊断性的评价标准, 并根据不同的系统特征, 进一步提出了强可检测 (可隔离) 的概念^[85]. 在故障可隔离性研究方面, 文献 [86] 给出了基于二值诊断矩阵的故障可隔离性评价标准, 并将该评价方法用于诊断算法残差的设计过程. 文献 [87] 通过理论推导对故障检测性和故障强检测性进行分析, 给出了基于传递函数的可检测性定性评价的新判据. 还系统地对不同判据进行对比并给出相应的适用范围.

考虑一般的微分代数方程

$$H(p)x + L(p)z + F(p)f = V(p)v \quad (2)$$

其中, $H(p)$, $L(p)$, $F(p)$ 和 $V(p)$ 为关于微分算子 p 的多项式矩阵; x 为包含系统内部状态和未知输入在内的所有未知信号向量; z 表示包含控制信号与可观测信号在内的所有已知信号向量; f 表示需要被诊断的故障信号向量, 该向量中每个元素对应一个具体故障, 若故障 i 未发生, 则此时 $f_i = 0$, 其中 f_i 为向量 f 的第 i 个元素; 向量 v 表示系统噪声.

针对不同的系统微分代数方程, 学者们提出了相应的可诊断性评价方法. 在不考虑噪声的情况下 ($v = 0$), 文献 [88] 通过分析发生故障情况下的已知信号向量与无故障情况下所有已知信号向量集合之间的从属关系, 给出故障可检测性判别方法: 若故障引起的可观测量的变化能由未知信号表示, 则认为故障是不可检测的. 与文献 [87] 相似, 文献 [89] 在考虑噪声影响的情况下 ($v \neq 0$), 利用一致性检验给出了基于微分代数方程的可诊断性的评价方法, 扩大了评价算法的适用范围.

与输入输出描述相反, 状态空间描述主要用于描述系统的内部状态. 以离散情况为例, 一般的离散时变状态空间描述的表达式为

$$\begin{cases} x(k+1) = \bar{A}(k)x(k) + \bar{B}_u(k)u(k) + \\ \quad \bar{B}_d(k)d(k) + \bar{B}_f(k)f(k) + \bar{B}_w(k)w(k) \\ y(k) = \bar{C}(k)x(k) + \bar{D}_u(k)u(k) + \bar{D}_d(k)d(k) + \\ \quad \bar{D}_f(k)f(k) + \bar{D}_v(k)v(k) \end{cases} \quad (3)$$

其中, x , u 和 d 分别表示系统状态、控制输入和未知扰动; f 表示系统故障, 当系统未发生故障时, 有 $f = 0$; w 和 v 分别表示过程噪声和测量噪声, 矩阵 Σ_w 和 Σ_v 分别为噪声向量对应的协方差矩阵; $\bar{A} = A + \Delta A$ 表示实际系统的参数矩阵, A 表示标称系统的参数矩阵, ΔA 表示模型不确定性, 矩阵 \bar{B}_u , \bar{B}_d , \bar{B}_f , \bar{B}_w , \bar{C} , \bar{D}_u , \bar{D}_d , \bar{D}_f 和 \bar{D}_v 与 \bar{A} 含义相似.

由于状态空间描述在线性系统中的广泛应用, 线性系统可诊断性的研究成果多集中于此. 文献 [90] 在不考虑不确定性、未知输入以及噪声的前提下 ($d = 0$, $w = v = 0$, $\Delta A, \dots, \Delta D_v = 0$), 利用全维观测器对多重故障的检测与隔离问题进行分析, 给出了故障可隔离性的条件. 在考虑噪声的情况下, Ding 等在文献 [91] 中对多阶段制造过程的可诊断性进行分析, 给出了可诊断性的量化指标. 然而, 由于该指标实质上是定性指标的量化表示, 即考虑的是可诊断故障占总故障的比重, 因此, 该指标无法对诊断难度进行量化. 鉴于此, 文献 [17] 通过对一段时间内的解析冗余方程进行整理, 将系统状态空间模型重构为滑动窗口模型, 使故障可诊断性量化问题转换成多元分布相似性对比问题, 并利用 Kullback-Leibler 散度量不同故障所对应的多元分布的相似性, 给出了量化的可诊断性评价算法. 除此之外, 通过分析所提出量化指标与残差生成器故障比 (Fault to noise ratio, FNR) 之间的关系, 给出了设计具有最大故障比残差生成器的方法. 相似地, 文献 [92] 利用巴氏距离对不同的故障多元分布进行量化, 并应用于卫星姿态控制系统. 非完全失效故障是控制系统的典型故障之一, 针对缺乏非完全失效故障的量化评价方法的现状, 文献 [93] 提出一种基于距离相似度的系统非完全失效故障的实际可诊断性评价方法求取非完全失效故障的最大可诊断效能系数. 不同于文献 [17, 92-93] 利用距离相似性对系统可诊断性进行评价的方法, 文献 [94] 基于方向相似性给出了可检测性与可隔离性的量化评价方法, 有效地衡量了诊断故障所需代价.

由于非线性系统的复杂程度较高, 在工程实践中, 人们往往倾向于在工作点处进行线性化处理. 然而, 一方面, 并不是所有经线性化处理的非线性系统都能满足实际需要^[95]; 另一方面, 当非线性系统发生故障时, 其复杂性大大加剧了故障诊断的难度. 因此, 研究基于非线性系统的可诊断性评价具有重要意义.

由于非线性系统复杂的特性以及多样的形式, 使得目前缺乏通用的非线性系统分析工具. 因此, 已有的非线性系统的可诊断性分析的研究结果较为分散. 文献 [96] 通过一致性关系与残差生成器的故障敏感度对非线性系统的可检测性进行分析, 并给

出了相应的定性评价标准. 为了处理非线性多输入多输出 (Multi-input-multi-output, MIMO) 不确定系统的传感器偏移故障的检测与隔离问题, Zhang 提出了包含一个故障检测估计器和一组隔离估计器的故障诊断算法^[97], 并根据该算法给出了故障可检测与可隔离的条件. 文献 [98] 进一步扩展了文献 [97] 的研究内容, 有效地增大了故障可检测与可隔离的判据适用范围. 针对高维离散时间非线性系统, Ferrari 等提出了依赖于自适应近似算法的故障可检测性与可隔离性的判据^[99].

与上述依赖于诊断算法的可诊断性评价方法不同, 文献 [100] 针对一类仿射非线性系统给出了不依赖于任何诊断算法的故障可检测性与可隔离性判据, 并利用可诊断的故障数与总故障数之间的比值量化系统的可诊断性. 相似地, 文献 [101] 考虑了带有未知输入的仿射非线性系统, 利用故障与未知输入对输出的不变性, 给出了故障可诊断性的定性评价准则. 为了准确地反映系统故障检测与隔离的难度, 文献 [102–103] 分别利用子空间相似度与 Kullback-Leibler 散度对非线性系统检测与隔离难度进行分析, 给出了定量描述的可诊断性评价方法, 为优化非线性系统结构和诊断方案奠定了理论基础.

2) 基于定性模型的可诊断性评价

由于部分系统结构复杂, 难以用定量模型表示, 此时, 可通过定性模型描述所研究对象的主要特征. 基于定性模型的可诊断性分析方法一般分为因果模型法和抽象层次法^[34].

因果模型法通常包括有向图法和故障树分析法等, 最大的特点是能够简洁地表示复杂系统中各变量之间相互作用的关系.

近年来, 基于因果模型的可诊断性研究取得了一系列的成果. 为了对有界 Petri 网的可诊断性进行分析, Cabasino 等在文献 [104] 中给出了可诊断性的充分必要条件, 并利用提出的基本可达性诊断器对系统进行分析, 提出了测试系统可诊断性的方法. 文献 [105] 利用 Petri 网对离散事件系统的可诊断性进行分析, 并给出了强可诊断性与弱可诊断性的定义. 文献 [106] 通过建立故障与可测点之间的矩阵对故障可检测性进行分析, 并针对故障分离问题提出了条件可分离性的定义及相关的判据. 与文献 [106] 利用多值表示故障对可测信息的影响进行评价的思路相似, 针对航天器故障多发的特点, 文献 [107] 将符号有向图与故障时态信息相结合, 在特征矩阵中利用多值评价方法描述集中典型故障的不同特征和时间序列, 实现了对航天器可诊断性的定性分析. 为了解决切换系统单发故障的诊断问题, 文献 [108] 提出了一种定性的诊断方法, 并分析了不同模式下系统的可诊断性与可隔离性.

抽象层次法是通过利用不同的抽象程度对待诊断系统进行分层描述, 并对不同层次之间都会出现的故障模式或系统行为进行重新划分与合并的分析方法^[109].

相对于基于定量模型的可诊断性评价研究, 现有的关于利用抽象层次法的可诊断性评价研究的文献较少. 文献 [110] 通过抽象层次法降低基于模型的故障诊断所需的代价, 并提出了信息丢失对于抽象描述诊断性的影响. 文献 [111] 主要研究了可诊断性分析问题, 设计者可以通过分析结果对给定系统的基于模型的诊断算法的性能进行评价. 该文献的最大创新点在于所提出的可诊断性分析算法解放了对故障模型的约束.

2.1.2 基于数据的可诊断性评价

基于数据的故障诊断算法实质上是利用在线、离线数据对系统故障进行诊断. 一方面, 定量模型不可能表示出复杂系统的每一个细节, 而建立定性模型又要求工程师具有复杂高深的专业知识以及长期积累的经验; 另一方面, 多数复杂系统在经过长时间的运行后, 都会储存大量的运行数据. 因此, 基于数据驱动的故障诊断算法的研究具有重要的实用意义. 通过分析已有数据对复杂系统进行诊断, 可以有效解决上述基于定量、定性模型的诊断算法设计的问题^[112], 这是基于数据的故障诊断算法的一个重要优势. 在对该类故障诊断算法性能不断优化过程中, 基于数据驱动的可诊断性研究也引起了学者们的广泛关注.

文献 [113] 研究了多维故障的可检测性, 可重构性以及可隔离性的问题, 并基于模型基础、故障方向和故障幅值给出了相应的可诊断充分条件和必要条件. 以故障可检测性为例, 给出的可诊断判定条件主要取决于模型子空间与故障子空间之间的差异, 两个子空间差异越大, 则代表故障越容易被检测. 除此之外, 文献 [113] 还给出了基于平方预测误差 (Squared prediction error, SPE) 的故障可辨识性指标, 可以用于分析实际故障的辨识过程. 文献 [114] 进一步拓展了文献 [113] 的研究内容, 结合 SPE 和 T^2 对多维故障可检测性条件进行分析, 并利用新的组合指标对故障可重构性与可辨识性进行分析. Charbonnier 等在文献 [115] 中给出了故障可诊断性的定义, 并根据算法权值提出了评价故障可诊断性的策略. 不同于上述文献, 文献 [116] 利用模糊集相似度对故障可诊断性进行分析并给出了相应的可诊断性量化指标. 两个不同故障状态之间的模糊集差别越大, 则两者越容易被隔离. 针对于传感器早期故障, 文献 [117] 给出了基于滑动窗口重构贡献的故障诊断算法与基于该算法的故障可检测性与可

隔离性的严谨的理论分析,并给出了窗口长度对故障可诊断性的影响,即随着窗口长度的增加,诊断系统可以诊断更小的初期故障,同时也会增加诊断所需的计算量和诊断延迟时间.因此,在选取诊断故障所需窗口长度时,需要对准确性和计算量进行权衡.

2.1.3 各种可诊断性评价方法的对比

通过上述分析可知,不同的可诊断性评价方法都有各自的适用范围.

定量模型作为故障诊断中最常见的模型,适用于物理意义明确、已知模型信息充足的系统;与定量模型相对应,定性模型更多被用于运行机理复杂,难以建立机理模型的系统;基于数据的可诊断性评价方法则更适用于已知大量运行数据的复杂系统.不同的可诊断性评价方法的优越性以及局限性具体分析结果如表4所示.

表4 不同可诊断性评价方法的优越性及其局限性
Table 4 The superiority and limitation of different kinds of diagnosability evaluation methods

评价方法	优越性	局限性
基于定量模型	物理意义明确	难以获得精确模型
基于定性模型	宏观描述系统	对专业知识及经验要求较高
基于数据	不需要建立系统模型	运算量大,难以评价未知故障

2.2 可诊断性设计及其研究现状

系统可诊断性设计指在系统、诊断算法设计阶段,将可诊断性作为优化指标的设计技术.

值得注意的是,可诊断性是表征系统诊断故障能力的一种基本属性,控制系统的可诊断性并不是可诊断性设计所赋予的,系统配置一旦固定,则系统本身就具备了一定的可诊断性.

本节从系统结构设计与诊断方案设计两个方面对可诊断性设计的研究内容与现状进行分析.

2.2.1 系统结构设计

基于可诊断性分析的系统结构设计指的是在保证控制系统满足所需性能指标的前提下,在设计过程中对系统进行优化,从结构上提高系统对潜在故障的反映能力,从而提高系统的诊断能力的过程.

在线故障诊断系统的性能极大地依赖于可用的测量信息.因此,传感器最优配置问题是系统设计过程中需要考虑的重要问题^[118].目前,可诊断性设计中针对系统结构设计的研究与应用也都集中在传感器配置的优化.在选择测点时,除了需要考虑诊断系统的性能之外,还需要考虑实际的限制约束,例如传感器体积、价格和测量数据获取的难易程度等^[119].如何利用尽可能少的传感器获取尽可能多的

故障信息是其中最重要的待解决的问题之一.

为了提高燃气涡轮机的运行安全性,文献[120]提出了一种有效的传感器布置方法.在系统的设计阶段,通过分析系统部件的冗余关系对系统可诊断性进行评价,利用得到的评价结果优化传感器布置.目前,该方法已成功应用于燃气涡轮机的设计.与文献[120]相似,文献[121]在系统设计阶段利用解析冗余关系对可诊断性进行研究,分析了增加传感器与可诊断性之间的关系,根据分析结果确定满足实际诊断性能需求的最小传感器集合,有效提高了配置效率,并将该方法应用于工业智能执行机构.由文献[122]可知,传感器布置代价通常包括实际经济成本和能量消耗两部分.实际经济成本主要包括传感器价格、安装难度等;能量消耗主要考虑诊断所需能量问题.此时,优化传感器布置问题转换成一个求取诊断所需能量最小的传感器集合的问题.通过求解诊断能量最小问题,该文献给出了一种新的传感器布置方法.与文献[122]不同,文献[123]对线性微分代数系统的传感器配置问题进行了研究,提出了基于解析表达式的系统优化算法.若由于实际条件的约束,使得该系统无法通过调整传感器配置达到所要求的可诊断性能,则该优化算法可以给出最接近于目标的传感器配置方案,即通过对系统配置进行优化,得到最大的可诊断性能.相对于文献[20]只考虑模型结构的传感器配置方法,文献[123]提出的方法具有更强的适用性.文献[124]将量化的可检测性与可隔离性的评价价值视为约束条件,将所有传感器个数视为目标函数,从而把传感器配置问题转换为优化问题.通过求解优化问题,可以得到系统在满足可诊断性能要求下所需传感器个数最小的配置方案.同时,该文献还利用贪心算法拓展了设计方案的适用范围.

值得注意的是,可诊断性设计中系统结构优化问题不等于传感器配置问题.传感器配置仅仅是可诊断性设计的一部分.实质上,系统配置、系统构型和动力学特性均直接影响着系统的可诊断性.因此,在系统设计过程中,可以同时考虑系统的控制性能与可诊断性,将可诊断性设计问题转换成多目标优化问题,即在保证系统控制性能满足要求的前提下,尽可能通过改变系统构型提升可诊断性能力,这将是可诊断性研究的未来发展趋势之一.

2.2.2 诊断方案设计

基于可诊断性分析的诊断方案设计是通过分析系统结构以及实际因素对可诊断性的影响,提高诊断方案与系统结构、实际诊断环境的契合程度,从而优化诊断方案目的的过程.

目前,基于可诊断性分析的诊断方案设计的研

究已经取得了较多的成果. 针对引擎失火的实际问题, 文献 [125] 提出了一种基于模型的故障检测算法, 可以在不同运行条件下检测系统故障并辨识出故障气缸. 在故障检测算法的设计过程中, 通过利用基于 Kullback-Leibler 散度的故障可诊断性量化指标选取合适的速度区间, 有效地分隔故障数据与无故障数据, 提高诊断算法的性能. 为了更好地满足半导体制造过程中对于故障诊断的实际需求, 文献 [126] 将快速性、可隔离性和鲁棒性等纳入诊断方案评价指标. 利用提出指标对不同诊断方法的性能进行对比分析, 选出性能更优的方案, 并最终应用于芯片晶圆生产过程. 文献 [127] 对包含不确定性的系统可诊断性进行理论推导, 给出一种量化分析系统级的故障可诊断性的方法, 并将结果应用于蒸汽压缩制冷系统. 通过对影响可诊断性的因素进行分析可知, 故障可诊断性极大地受到观测维数的影响, 即使只增加一个传感器或测试点都有可能使得原先不可诊断的故障变得可以诊断, 反之则会导致可诊断性的下降. 除此之外, 文献 [127] 还利用故障可诊断性在线分析结果选择合适的诊断方案, 当故障可诊断性较小时, 选择精度较高的诊断算法保证诊断结果的准确性, 当可诊断性较大时, 通过选择精度较低的诊断算法降低诊断系统的计算负担、提高诊断效率. 文献 [128] 提出一种用于检测与隔离分布式系统传感器故障的诊断算法. 为了在增强诊断算法故障检测能力的同时, 有效地抑制算法的复杂度的增加, 该文献将量化的故障可诊断性指标用于指导诊断算法在每一个节点处的可测信息的选择. Ding 在文献 [129–130] 中给出了 K-gap 的定义, 利用该定义给出故障检测与隔离 (Fault detection and isolation, FDI) 的性能指标, 并用于 FDI 性能分析. 文献 [131] 利用 Kullback-Leibler 散度作为可诊断性评价指标对诊断算法残差生成器进行分析. 选取不同的残差生成器的加权和作为最终的诊断残差生成器, 并利用提出的量化指标求出使可诊断性能最大的权值, 以达到优化诊断方案的目的. 由于传感器故障可能会导致诊断系统发生误报, 同时大多数的诊断方案研究都集中于传感器故障或过程故障, 很少同时考虑两者对故障诊断的影响. 因此, 文献 [132] 提出一种用于物理系统的分布式诊断框架. 提出的诊断方法可以同时用于诊断传感器故障和过程故障. 除此之外, 该诊断方法可以在全局诊断性分析结果的指导下, 利用最小数量的残差得到最大的系统可诊断性.

3 展望

目前为止, 对故障可诊断性评价与设计的研究已经取得了一定的成果. 然而, 关于可诊断性的理论

研究还未能建立起较为完善的研究体系. 针对目前可诊断性研究存在的不足, 给出如下可能的发展方向:

1) 考虑实际约束因素的系统可诊断性量化评价
一方面, 由于运行环境或实现功能不同, 实际系统不可避免地会受到不同因素的约束, 例如航天器系统存在资源约束等. 为了提高可诊断性评价的准确性和有效性, 使评价结果能更好地指导系统配置和诊断方案设计, 需要在评价过程中考虑实际系统中存在的约束因素, 扩大已有评价方法的适用范围. 另一方面, 在可诊断性设计阶段, 目前大多数文献仅参考了可诊断性的定性评价结果^[133–135], 即通过优化系统结构和诊断方案, 增加可被诊断的故障个数. 然而, 利用量化的可诊断性评价结果指导可诊断性设计, 可以有针对性地对可诊断故障数量和故障诊断难度进行权衡, 使设计结果能更好地满足实际需求^[136]. 综上所述, 在未来的研究中, 可以根据不同实际约束因素设计不同的可诊断性量化评价方法, 并最终给出一个通用的可处理多种实际约束因素的可诊断性量化评价方案.

2) 非线性系统的可诊断性的通用性研究

根据实际经验, 在保证足够精度的情况下, 许多工业过程可以被近似地简化为一个有限维的线性时不变系统^[121]. 然而, 对线性化后的非线性系统进行可诊断性评价只能得到局部的评价结果, 且线性化模型难以准确描述系统的非线性以及故障特性. 特别地, 线性化处理会导致一些由非线性因素引起的故障 (例如摩擦等) 被忽略. 因此, 研究非线性系统的可诊断性具有重要意义. 由于非线性系统的复杂性以及形式的多样性, 目前尚未给出一个通用的非线性系统可诊断性评价指标. 鉴于此, 在未来的研究中可以着重对不同非线性系统的可诊断性进行研究, 并给出较为通用的评价与设计方法.

3) 控制系统故障可辨识性

目前的可诊断性研究结果主要集中于故障可检测性与可隔离性两方面^[137], 对于故障可辨识性的研究较少, 如文献 [138–139]. 实质上, 故障辨识的结果直接影响着故障发生后控制系统自主处理故障的能力. 鉴于此, 有必要对控制系统故障可辨识性进行研究, 为诸如航天器控制系统自主重构等自主故障处理奠定理论基础.

4) 多目标优化的可诊断性设计

将可诊断性纳入系统设计阶段, 可以从根本上提高系统对故障的诊断能力. 目前可诊断性设计已经取得了一定的成果^[140–142]. 然而, 大多数文献在系统设计阶段仅考虑了系统可诊断性, 实质上, 在评价过程中应综合考虑控制系统功能、成本和结构等因素. 特别地, 对于包括航天器在内的运行阶段故障

不可维修的系统, 需要充分考虑自主故障处理能力, 即需要同时考虑系统的可靠性、可诊断性与可重构性, 有机地将两者结合, 充分发挥各自的优势。

5) 基于人工智能的可诊断性评价与设计

作为计算机学科的一个分支, 人工智能在近三十年取得了迅速发展, 并且在包括控制论在内的许多学科得到了广泛应用。近年来, 学者们将故障诊断与人工智能的研究相结合并取得了较大的进展^[143-145]。通过分析可知, 目前基于人工智能的故障诊断多是利用神经网络等方法对采集数据的特征进行提取分析, 并最终给出诊断结果。其中, 学习样本的选取及实时测量数据直接影响着诊断算法的性能。一方面, 如何选取学习样本从而提高算法诊断能力, 用于诊断的测量数据是否携带足够的故障信息以及该如何权衡数据与效率之间的关系等问题的研究对提高诊断性能具有重要意义。另一方面, 通过上文分析可知, 对系统进行可诊断性分析需要处理大量数据且在设计过程中需对包括控制性能在内的多个方面进行权衡。因此, 若将人工智能方法与可诊断性分析相结合, 发挥人工智能在数据统计、计算、分析和学习等方面的优势, 有利于提高数据的利用效率, 减小设计周期并降低经济成本, 有效地提高设计效率。随着对可诊断性研究的不断深入, 学者们开始尝试着利用人工智能对可诊断性进行分析。目前, 基于人工智能模型的可诊断性分析与传感器布置的研究已经取得了一定的成果^[146-148]。然而, 如何充分地发挥人工智能的优势, 将人工智能与可诊断性设计有机地结合起来, 仍然值得我们进一步研究。

4 结束语

本文从多个角度对控制系统可诊断性的内涵进行了分析, 并对可诊断性的研究现状进行了全面综述。通过分析可知, 故障可诊断性揭示了故障诊断深层次的内涵, 为从根本上提升控制系统对故障的诊断能力的研究提供了理论依据。对系统可诊断性进行分析设计, 从系统层面对系统结构进行优化, 可以提高系统对故障信息的获取和分析能力, 更加有效地提升系统的安全性。因此, 可诊断性评价与设计具有十分重要的理论意义与广阔的应用前景。

然而, 目前关于可诊断性的研究也存在一定的不足。一方面, 现有的可诊断性评价的研究成果大都集中在可诊断性定性评价, 定性评价结果无法有效地衡量系统诊断故障的难度以及所需要的代价, 而这些信息往往是设计者们在优化系统结构、诊断算法的过程中所需要的; 另一方面, 现有的可诊断性系统设计主要考虑的是测点的优化问题。通过分析可知, 系统配置、系统构型和动力学特性都会直接影响着系统的可诊断性, 如何在保证系统能够完成指定

任务的前提下, 增加系统对故障的可诊断性, 是未来值得研究的问题。综上所述, 已有的可诊断性研究已经取得了一定的成果, 然而同时也存在许多问题值得我们进一步研究并最终形成一套完善的控制系统可诊断性研究体系。

References

- 1 Biswal M, Brahma S M, Cao H P. Supervisory protection and automated event diagnosis using PMU data. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2016, **31**(4): 1855-1863
- 2 Teixeira A, Shames I, Sandberg H, Johansson K H. A secure control framework for resource-limited adversaries. *Automatica*, 2015, **51**: 135-148
- 3 Keliris C, Polycarpou M M, Parisini T. An integrated learning and filtering approach for fault diagnosis of a class of nonlinear dynamical systems. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 2017, **28**(4): 988-1004
- 4 Gao Z W, Ding S X, Cecati C. Real-time fault diagnosis and fault-tolerant control. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2015, **62**(6): 3752-3756
- 5 Jiang B, Staroswiecki M, Cocquempot V. Fault accommodation for nonlinear dynamic systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2006, **51**(9): 1578-1583
- 6 Wang T Z, Qi J, Xu H, Wang Y D, Liu L, Gao D J. Fault diagnosis method based on FFT-RPCA-SVM for cascaded-multilevel inverter. *ISA Transactions*, 2016, **60**: 156-163
- 7 Tang B P, Song T, Li F, Deng L. Fault diagnosis for a wind turbine transmission system based on manifold learning and Shannon wavelet support vector machine. *Renewable Energy*, 2014, **62**: 1-9
- 8 Yin S, Zhu X P. Intelligent particle filter and its application to fault detection of nonlinear system. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2015, **62**(6): 3852-3861
- 9 Sun F C, Liu H P, He K Z, Sun Z Q. Reduced-order H_∞ filtering for linear systems with Markovian jump parameters. *Systems and Control Letters*, 2005, **54**(8): 739-746
- 10 Hua Yong-Zhao, Li Qing-Dong, Ren Zhang, Liu Cheng-Rui. Overview of fault diagnosability evaluation methods for continuous systems. *Control and Decision*, 2016, **31**(12): 2113-2121
(化永朝, 李清东, 任章, 刘成瑞. 连续系统故障可诊断性评价方法综述. *控制与决策*, 2016, **31**(12): 2113-2121)
- 11 Liu Wen-Jing, Liu Cheng-Rui, Wang Nan-Hua. Overview of fault diagnosability evaluation and design. *Aerospace Control*, 2011, **29**(6): 72-78, 87
(刘文静, 刘成瑞, 王南华. 故障可诊断性评价与设计研究进展. *航天控制*, 2011, **29**(6): 72-78, 87)
- 12 IEEE Trial-Use Standard for Testability and Diagnosability Characteristics and Metrics, IEEE Standard 1522, 2004.
- 13 Wang D W, Yu M, Low C B, Arogeti S. *Model-based Health Monitoring of Hybrid Systems*. New York: Springer, 2013. 2-16

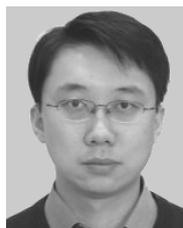
- 14 Gertler J. *Fault Detection and Diagnosis in Engineering Systems*. New York: Marcel Dekker, 1998. 1–22
- 15 Ding S X. *Model-based Fault Diagnosis Techniques: Design Schemes, Algorithms and Tools*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2008. 51–68
- 16 Chi G Y, Wang D W, Zhu S Q. An integrated approach for sensor placement in linear dynamic systems. *Journal of the Franklin Institute*, 2015, **352**(3): 1056–1079
- 17 Eriksson D, Frisk E, Krysander M. A method for quantitative fault diagnosability analysis of stochastic linear descriptor models. *Automatica*, 2013, **49**(6): 1591–1600
- 18 Scott J K, Findeisen R, Braatz R D, Raimondo D M. Design of active inputs for set-based fault diagnosis. In: *Proceedings of the 2013 American Control Conference*. Washington, DC, USA: IEEE, 2013. 3561–3566
- 19 Düşteğör D, Frisk E, Cocquempot V, Krysander M, Staroswiecki M. Structural analysis of fault isolability in the DAMADICS benchmark. *Control Engineering Practice*, 2006, **14**(6): 597–608
- 20 Krysander M, Frisk E. Sensor placement for fault diagnosis. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part A: Systems and Humans*, 2008, **38**(6): 1398–1410
- 21 Leal R, Aguilar J, Travé-Massuyés L, Camargo E, Ríos A. An approach for diagnosability analysis and sensor placement for continuous processes based on evolutionary algorithms and analytical redundancy. *Applied Mathematical Sciences*, 2015, **9**(43): 2125–2146
- 22 Sun F C, Li L, Li H X, Liu H P. Neuro-fuzzy dynamic-inversion-based adaptive control for robotic manipulators — discrete time case. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2007, **54**(3): 1342–1351
- 23 Sun F C, Li H X, Lei L. Robot discrete adaptive control based on dynamic inversion using dynamical neural networks. *Automatica*, 2002, **38**(11): 1977–1983
- 24 Zheng W H, Jia Y M. Leader-follower formation control of mobile robots with sliding mode. *Journal of Robotics, Networking and Artificial Life*, 2017, **4**(1): 10–13
- 25 Gertler J J. Survey of model-based failure detection and isolation in complex plants. *IEEE Control Systems Magazine*, 1988, **8**(6): 3–11
- 26 Kouadri A, Bensmail A, Kheldoun A, Refoufi L. An adaptive threshold estimation scheme for abrupt changes detection algorithm in a cement rotary kiln. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 2014, **259**: 835–842
- 27 Fu Fang-Zhou, Wang Da-Yi, Li Wen-Bo. Multiple fault detection and isolation based on Kalman filters. *Control Theory and Applications*, 2017, **34**(5): 586–593
(符方舟, 王大轶, 李文博. 基于卡尔曼滤波器组的多重故障诊断方法研究. *控制理论与应用*, 2017, **34**(5): 586–593)
- 28 Niu G, Zhao Y J, Tran V T. Fault detection and isolation based on bond graph modeling and empirical residual evaluation. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 2015, **229**(3): 417–428
- 29 Chilin D, Liu J F, Chen X Z, Christofides P D. Fault detection and isolation and fault tolerant control of a catalytic alkylation of benzene process. *Chemical Engineering Science*, 2012, **78**: 155–166
- 30 Fu Fang-Zhou, Wang Da-Yi, Li Wen-Bo. Sensor fault detection based on hierarchical stochastic gradient identification algorithm. *Aerospace Control and Application*, 2016, **42**(4): 12–17
(符方舟, 王大轶, 李文博. 基于分层随机梯度辨识算法的传感器故障检测方法. *空间控制技术与应用*, 2016, **42**(4): 12–17)
- 31 National Standard. GJB 451A-2005 Reliability, Maintainability and Supportability Terms, 2005.
(国家标准. GJB 451A-2005 可靠性维修性保障性术语, 2005.)
- 32 Frank P M. Fault diagnosis in dynamic systems using analytical and knowledge-based redundancy: a survey and some new results. *Automatica*, 1990, **26**(3): 459–474
- 33 Venkatasubramanian V, Rengaswamy R, Yin K, Kavuri S N. A review of process fault detection and diagnosis, Part I: quantitative model-based methods. *Computers and Chemical Engineering*, 2003, **27**(3): 293–311
- 34 Venkatasubramanian V, Rengaswamy R, Kavuri S N. A review of process fault detection and diagnosis, Part II: qualitative models and search strategies. *Computers and Chemical Engineering*, 2003, **27**(3): 313–326
- 35 Venkatasubramanian V, Rengaswamy R, Kavuri S N, Yin K. A review of process fault detection and diagnosis, Part III: process history based methods. *Computers and Chemical Engineering*, 2003, **27**(3): 327–346
- 36 Li Juan, Zhou Dong-Hua, Si Xiao-Sheng, Chen Mao-Yin, Xu Chun-Hong. Review of incipient fault diagnosis methods. *Control Theory and Applications*, 2012, **29**(12): 1517–1529
(李娟, 周东华, 司小胜, 陈茂银, 徐春红. 微小故障诊断方法综述. *控制理论与应用*, 2012, **29**(12): 1517–1529)
- 37 Zhou Dong-Hua, Shi Jian-Tao, He Xiao. Review of intermittent fault diagnosis techniques for dynamic systems. *Acta Automatica Sinica*, 2014, **40**(2): 161–171
(周东华, 史建涛, 何潇. 动态系统间歇故障诊断技术综述. *自动化学报*, 2014, **40**(2): 161–171)
- 38 Zhang B, Jia Y M, Matsuno F, Endo T. Task-space synchronization of networked mechanical systems with uncertain parameters and communication delays. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2017, **47**(8): 2288–2298
- 39 Apkarian P, Gahinet P. A convex characterization of gain-scheduled H_∞ controllers. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1995, **40**(5): 853–864
- 40 Park S, Park Y, Park Y S. Degree of fault isolability and active fault diagnosis for redundantly actuated vehicle system. *International Journal of Automotive Technology*, 2016, **17**(6): 1045–1053
- 41 Du Y C, Duever T A, Budman H. Fault detection and diagnosis with parametric uncertainty using generalized polynomial chaos. *Computers and Chemical Engineering*, 2015, **76**: 63–75

- 42 Hou L Q, Bergmann N W. Novel industrial wireless sensor networks for machine condition monitoring and fault diagnosis. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2012, **61**(10): 2787–2798
- 43 Liu W J, Teng B Y. Application of weighted evidence theory in the space-earth fault diagnosis result fusion of spacecraft. In: Proceedings of the 12th World Congress on Intelligent Control and Automation. Guilin, China: IEEE, 2016. 1742–1748
- 44 Kelkar S, Kamal R. Adaptive fault diagnosis algorithm for controller area network. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2014, **61**(10): 5527–5537
- 45 Liu Wen-Jing, Wang Nan-Hua. FD for spacecraft control system with resource constraint. *Journal of Astronautics*, 2011, **32**(7): 1527–1533
(刘文静, 王南华. 面向资源约束航天器控制系统的故障检测研究. 宇航学报, 2011, **32**(7): 1527–1533)
- 46 Jia Y M. General solution to diagonal model matching control of multiple-output-delay systems and its applications in adaptive scheme. *Progress in Natural Science*, 2009, **19**(1): 79–90
- 47 Yang F W, Li Y M. Set-membership filtering for systems with sensor saturation. *Automatica*, 2009, **45**(8): 1896–1902
- 48 Wang H, Huang Z J, Daley S. On the use of adaptive updating rules for actuator and sensor fault diagnosis. *Automatica*, 1997, **33**(2): 217–225
- 49 Ding S X, Zhong M Y, Tang B Y, Zhang P. An LMI approach to the design of fault detection filter for time-delay LTI systems with unknown inputs. In: Proceedings of the 2001 American Control Conference. Arlington, VA, USA: IEEE, 2001. 2137–2142
- 50 Shen Q K, Jiang B, Shi P. Active fault-tolerant control against actuator fault and performance analysis of the effect of time delay due to fault diagnosis. *International Journal of Control Automation and Systems*, 2017, **15**(2): 537–546
- 51 Russell E L, Chiang L H, Braatz R D. Fault detection in industrial processes using canonical variate analysis and dynamic principal component analysis. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 2000, **51**(1): 81–93
- 52 Han L, Li C W, Guo S L, Su X W. Feature extraction method of bearing AE signal based on improved FAST-ICA and wavelet packet energy. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2015, **62–63**: 91–99
- 53 Sun J W, Xi L F, Pan E S, Du S C, Xia T B. Design for diagnosability of multistation manufacturing systems based on sensor allocation optimization. *Computers in Industry*, 2009, **60**(7): 501–509
- 54 Wang X Q, Zhao Y, Wang D, Zhu H J, Zhang Q. Improved multi-objective ant colony optimization algorithm and its application in complex reasoning. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2013, **26**(5): 1031–1040
- 55 Lee J M, Qin S J, Lee I B. Fault detection and diagnosis based on modified independent component analysis. *AIChE Journal*, 2006, **52**(10): 3501–3514
- 56 Ye H, Wang G, Ding S X. A new parity space approach for fault detection based on stationary wavelet transform. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2004, **49**(2): 281–287
- 57 Kaufman M, Sheppard J. P1522: a formal standard for testability and diagnosability measures. In: Proceedings of the 1999 IEEE Systems Readiness Technology Conference. San Antonio, Texas, USA: IEEE, 1999. 411–418
- 58 Provan G. System diagnosability analysis using model-based diagnosis tools. In: Proceedings of the 2001 Aerospace/Defense Sensing, Simulation, and Controls. Orlando, FL, USA: SPIE, 2001. 93–101
- 59 Pattipati K R, Raghavan V, Shakeri M, Deb S, Shrestha R. TEAMS: testability engineering and maintenance system. In: Proceedings of the 1994 American Control Conference. Baltimore, Maryland, USA: IEEE, 1994. 1989–1995
- 60 Wey C L. Design of testability for analogue fault diagnosis. *International Journal of Circuit Theory and Applications*, 1987, **15**(2): 123–142
- 61 Simpson W R, Sheppard J W. *System Test and Diagnosis*. US: Springer, 1994. 139–190
- 62 Li K S M, Chang Y W, Lee C L, Su C, Chen J E. Multi-level full-chip routing with testability and yield enhancement. *IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems*, 2007, **26**(9): 1625–1636
- 63 Ungar L Y. Economic evaluation of testability and diagnosability for commercial off the shelf equipment. In: Proceedings of the 2010 AUTOTESTCON. Orlando, USA: IEEE, 2010. 1–5
- 64 Le Traon Y, Ouabdesselam F, Robach C, Baudry B. From diagnosis to diagnosability: axiomatization, measurement and application. *Journal of Systems and Software*, 2003, **65**(1): 31–50
- 65 National Standard. GJB 3385-98 Terms for Testing and Diagnostics, 1998.
(国家标准. GJB 3385-98 测试与诊断术语, 1998.)
- 66 Sheppard J W, Kaufman M. Formal specification of testability metrics in IEEE P1522. In: Proceedings of the 2001 IEEE Systems Readiness Technology Conference, AUTOTESTCON. Valley Forge, PA, USA: IEEE, 2001. 71–82
- 67 Magni J F, Mouyon P. On residual generation by observer and parity space approaches. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1994, **39**(2): 441–447
- 68 Diop S, Martínez-Guerra R. On an algebraic and differential approach of nonlinear systems diagnosis. In: Proceedings of the 40th IEEE Conference on Decision and Control. Orlando, Florida, USA: IEEE, 2001. 585–589
- 69 Huber J, Kopecek H, Hofbauer M. Sensor selection for fault parameter identification applied to an internal combustion engine. In: Proceedings of the 2014 IEEE Conference on Control Applications. Juan Les Antibes, France: IEEE, 2014. 89–96

- 70 Wu N E, Zhou K M, Salomon G. Control reconfigurability of linear time-invariant systems. *Automatica*, 2000, **36**(11): 1767–1771
- 71 Wang Da-Yi, Tu Yuan-Yuan, Liu Cheng-Rui, He Ying-Zi, Li Wen-Bo. Connotation and research of reconfigurability for spacecraft control systems: a review. *Acta Automatica Sinica*, 2017, **43**(10): 1687–1702
(王大轶, 屠园园, 刘成瑞, 何英姿, 李文博. 航天器控制系统可重构性的内涵与研究综述. *自动化学报*, 2017, **43**(10): 1687–1702)
- 72 Svärd C, Nyberg M, Frisk E. Realizability constrained selection of residual generators for fault diagnosis with an automotive engine application. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2013, **43**(6): 1354–1369
- 73 Cocquempot V, Izadi-Zamanabadi R, Staroswiecki M, Blanke M. Residual generation for the ship benchmark using structural approach. In: Proceedings of the 1998 UKACC International Conference on Control. Swansea, UK: IET, 1998. 1480–1485
- 74 Izadi-Zamanabadi R. Structural analysis approach to fault diagnosis with application to fixed-wing aircraft motion. In: Proceedings of the 2002 American Control Conference. Anchorage, USA: IEEE, 2002. 3949–3954
- 75 Bozzano M, Cimatti A, Katoen J P, Nguyen V Y, Noll T, Roveri M. The COMPASS approach: correctness, modelling and performability of aerospace systems. In: Proceedings of the 28th International Conference on Computer Safety, Reliability, and Security. Heidelberg, Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2009. 173–186
- 76 Roychoudhury I, Biswas G, Koutsoukos X. Designing distributed diagnosers for complex continuous systems. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2009, **6**(2): 277–290
- 77 Svärd C, Nyberg M. Automated design of an FDI system for the wind turbine benchmark. *Journal of Control Science and Engineering*, 2012, **2012**: Article ID 989873
- 78 Eriksson D, Krysander M, Frisk E. Quantitative fault diagnosability performance of linear dynamic descriptor models. In: Proceedings of the 22nd International Workshop on Principles of Diagnosis. Murnau, Germany, 2011. 1–8
- 79 Hao J J, Kinnaert M. Sensor fault detection and isolation over wireless sensor network based on hardware redundancy. *Journal of Physics: Conference Series*, 2017, **783**(1): 012006
- 80 Chen J L, Sun H L, Wang S, He Z J. Quantitative index and abnormal alarm strategy using sensor-dependent vibration data for blade crack identification in centrifugal booster fans. *Sensors*, 2016, **16**(5): 632
- 81 Sharifi R, Langari R. Sensor fault diagnosis with a probabilistic decision process. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2013, **34**(1–2): 146–155
- 82 Varga A. *Solving Fault Diagnosis Problems*. New York: Springer, 2017. 9–25
- 83 Patton R J, Chen J. Observer-based fault detection and isolation: robustness and applications. *Control Engineering Practice*, 1997, **5**(5): 671–682
- 84 Del Gobbo D, Napolitano M R. Issues in fault detectability for dynamic systems. In: Proceedings of the 2000 American Control Conference. Chicago, Illinois, USA: IEEE, 2000. 3203–3207
- 85 Varga A. Design of fault detection filters for periodic systems. In: Proceedings of the 40th IEEE Conference on Decision and Control. Nassau, Bahamas: IEEE, 2004. 4800–4805
- 86 Kósciely J M, Syfert M, Rostek K, Szyber A. Fault isolability with different forms of the faults-symptoms relation. *International Journal of Applied Mathematics and Computer Science*, 2016, **26**(4): 815–826
- 87 Nyberg M. Criteria for detectability and strong detectability of faults in linear systems. *International Journal of Control*, 2002, **75**(7): 490–501
- 88 Heintz F, Krysander M, Roll J, Frisk E. FlexDx: a reconfigurable diagnosis framework. In: Proceedings of the 19th International Workshop on Principles of Diagnosis DX. Blue Mountains, Australia, 2008. 79–86
- 89 Nyberg M, Frisk E. Residual generation for fault diagnosis of systems described by linear differential-algebraic equations. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2006, **51**(12): 1995–2000
- 90 Liu B, Si J. Fault isolation filter design for linear time-invariant systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1997, **42**(5): 704–707
- 91 Ding Y, Shi J J, Ceglarek D. Diagnosability analysis of multi-station manufacturing processes. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 2001, **124**(1): 1–13
- 92 Li Wen-Bo, Wang Da-Yi, Liu Cheng-Rui. Quantitative fault diagnosis ability evaluation for control systems with disturbances. *Control Theory and Applications*, 2015, **32**(6): 744–752
(李文博, 王大轶, 刘成瑞. 有干扰的控制系统故障可诊断性量化评估. *控制理论与应用*, 2015, **32**(6): 744–752)
- 93 Fu Fang-Zhou, Wang Da-Yi, Li Wen-Bo. Quantitative evaluation of actual LOE fault diagnosability for dynamic systems. *Acta Automatica Sinica*, 2017, **43**(11): 1941–1949
(符方舟, 王大轶, 李文博. 复杂动态系统的实际非完全失效故障的可诊断性评估. *自动化学报*, 2017, **43**(11): 1941–1949)
- 94 Li Wen-Bo, Wang Da-Yi, Liu Cheng-Rui. Quantitative evaluation of actual fault diagnosability for dynamic systems. *Acta Automatica Sinica*, 2015, **41**(3): 497–507
(李文博, 王大轶, 刘成瑞. 动态系统实际故障可诊断性的量化评价研究. *自动化学报*, 2015, **41**(3): 497–507)
- 95 Huang Lin, Geng Zhi-Yong, Wang Jin-Zhi, Duan Zhi-Sheng, Yang Ying. Problems in control and intrinsic nonlinearities. *Acta Automatica Sinica*, 2007, **33**(10): 1009–1013
(黄琳, 耿志勇, 王金枝, 段志生, 杨莹. 控制与本质非线性问题. *自动化学报*, 2007, **33**(10): 1009–1013)
- 96 Frisk E, Åslund J. Lowering orders of derivatives in nonlinear residual generation using realization theory. *Automatica*, 2005, **41**(10): 1799–1807

- 97 Zhang X D, Parisini T, Polycarpou M M. Sensor bias fault isolation in a class of nonlinear systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2005, **50**(3): 370–376
- 98 Zhang X D. Sensor bias fault detection and isolation in a class of nonlinear uncertain systems using adaptive estimation. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2011, **56**(5): 1220–1226
- 99 Ferrari R M G, Parisini T, Polycarpou M M. Distributed fault detection and isolation of large-scale discrete-time nonlinear systems: an adaptive approximation approach. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2012, **57**(2): 275–290
- 100 Peng X F, Lin L X, Zhong X Y, Liu C R. Methods for fault diagnosability analysis of a class of affine nonlinear systems. *Mathematical Problems in Engineering*, 2015, **2015**: Article ID 409184
- 101 Xing Z R, Xia Y Q. Evaluation and design of actuator fault diagnosability for nonlinear affine uncertain systems with unknown indeterminate inputs. *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, 2017, **31**(1): 122–137
- 102 Li Wen-Bo, Wang Da-Yi, Liu Cheng-Rui. An approach to fault diagnosability quantitative evaluation for a class of nonlinear systems. *Journal of Astronautics*, 2015, **36**(4): 455–462
(李文博, 王大轶, 刘成瑞. 一类非线性系统的故障可诊断性量化评价方法. *宇航学报*, 2015, **36**(4): 455–462)
- 103 Jiang Dong-Nian, Li Wei, Wang Jun. Fault diagnosability quantitative evaluation and method of fault diagnosis for nonlinear system. *Journal of Huazhong University of Science and Technology: Natural Science Edition*, 2016, **44**(12): 102–108
(蒋栋年, 李伟, 王君. 非线性系统故障可诊断性量化评价及诊断方法. *华中科技大学学报: 自然科学版*, 2016, **44**(12): 102–108)
- 104 Cabasino M P, Giua A, Seatzu C. Diagnosability of discrete-event systems using labeled Petri nets. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2014, **11**(1): 144–153
- 105 Haar S, Benveniste A, Fabre E, Jard C. Partial order diagnosability of discrete event systems using petri net unfoldings. In: Proceedings of the 42nd IEEE Conference on Decision and Control. Maui, HI, USA: IEEE, 2003. 3748–3753
- 106 Kościelny J M, Bartyś M, Rzepiejewski P, Sada Costa J. Actuator fault distinguishability study for the DAMADICS benchmark problem. *Control Engineering Practice*, 2006, **14**(6): 645–652
- 107 Liu J, Hua Y Z, Li Q D, Ren Z. Fault diagnosability qualitative analysis of spacecraft based on temporal fault signature matrix. In: Proceedings of the 2016 IEEE Chinese Guidance, Navigation and Control Conference. Nanjing, China: IEEE, 2017. 1496–1500
- 108 Mekki T, Triki S, Kamoun A. A qualitative approach to single fault isolation in switching systems. In: Proceedings of the 14th International Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering. Sousse, Tunisia: IEEE, 2013. 220–224
- 109 Chittaro L, Ranon R. Hierarchical model-based diagnosis based on structural abstraction. *Artificial Intelligence*, 2004, **155**(1–2): 147–182
- 110 Genesereth M R. The use of design descriptions in automated diagnosis. *Artificial Intelligence*, 1984, **24**(1–3): 411–436
- 111 Pucel X, Mayer W, Stumptner M. Diagnosability analysis without fault models. In: Proceedings of the 20th International Workshop on Principles of Diagnosis. Stockholm, Sweden, 2009. 67–74
- 112 Li Han, Xiao De-Yun. Survey on data driven fault diagnosis methods. *Control and Decision*, 2011, **26**(1): 1–9
(李晗, 萧德云. 基于数据驱动的故障诊断方法综述. *控制与决策*, 2011, **26**(1): 1–9)
- 113 Dunia R, Joe Qin S. Subspace approach to multidimensional fault identification and reconstruction. *AIChE Journal*, 1998, **44**(8): 1813–1831
- 114 Yue H H, Qin S J. Reconstruction-based fault identification using a combined index. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 2001, **40**(20): 4403–4414
- 115 Charbonnier S, Bouchair N, Gayet P. Fault template extraction to assist operators during industrial alarm floods. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2016, **50**: 32–44
- 116 Hua Y Z, Li Q D, Ren Z, Liu C R. A data driven method for quantitative fault diagnosability evaluation. In: Proceedings of the 2016 Chinese Control and Decision Conference. Yinchuan, China: IEEE, 2016. 1890–1894
- 117 Ji H Q, He X, Shang J, Zhou D H. Incipient sensor fault diagnosis using moving window reconstruction-based contribution. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 2016, **55**(10): 2746–2759
- 118 Basseville M, Benveniste A, Moustakides G V, Rougee A. Optimal sensor location for detecting changes in dynamical behavior. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1987, **32**(12): 1067–1075
- 119 Daigle M, Roychoudhury I, Bregon A. Diagnosability-based sensor placement through structural model decomposition. In: Proceedings of the 2nd European Conference of the Prognostics and Health Management Society. Nantes, France, 2014. 33–46
- 120 Travé-Massuyés L, Escobet T, Milne R. Model-based diagnosability and sensor placement application to a frame 6 gas turbine subsystem. In: Proceedings of the 17th International Joint Conference on Artificial Intelligence. Seattle, WA, USA: Morgan Kaufmann Publishers Inc., 2001. 551–556
- 121 Travé-Massuyés L, Escobet T, Olive X. Diagnosability analysis based on component-supported analytical redundancy relations. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part A: Systems and Humans*, 2006, **36**(6): 1146–1160
- 122 Debouk R, Lafortune S, Teneketzis D. On an optimization problem in sensor selection. *Discrete Event Dynamic Systems*, 2002, **12**(4): 417–445

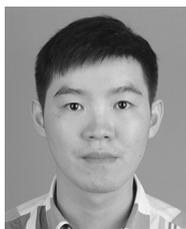
- 123 Frisk E, Krysander M, Åslund J. Sensor placement for fault isolation in linear differential-algebraic systems. *Automatica*, 2009, **45**(2): 364–371
- 124 Eriksson D, Krysander M, Frisk E. Using quantitative diagnosability analysis for optimal sensor placement. *IFAC Proceedings Volumes*, 2012, **45**(20): 940–945
- 125 Jung D, Eriksson L, Frisk E, Krysander M. Development of misfire detection algorithm using quantitative FDI performance analysis. *Control Engineering Practice*, 2015, **34**: 49–60
- 126 Nguyen D T, Duong Q B, Zamai E, Shahzad M K. Fault diagnosis for the complex manufacturing system. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability*, 2016, **230**(2): 178–194
- 127 Cui Y Q, Shi J Y, Wang Z L. System-level operational diagnosability analysis in quasi real-time fault diagnosis: the probabilistic approach. *Journal of Process Control*, 2014, **24**(9): 1444–1453
- 128 Kinnaert M, Hao J J. Distributed sensor fault detection and isolation over network. *IFAC Proceedings Volumes*, 2014, **47**(3): 11458–11463
- 129 Ding S X. Application of factorization and gap metric techniques to fault detection and isolation, Part I: a factorization technique based FDI framework. *IFAC-PapersOnLine*, 2015, **48**(21): 113–118
- 130 Ding S X. Application of factorization and gap metric techniques to fault detection and isolation, Part II: gap metric technique aided FDI performance analysis. *IFAC-PapersOnLine*, 2015, **48**(21): 119–124
- 131 Eriksson D, Sundstrom C. Sequential residual generator selection for fault detection. In: Proceedings of the 2014 European Control Conference. Strasbourg, France: IEEE, 2014. 932–937
- 132 Bregon A, Daigle M, Roychoudhury I. An integrated framework for distributed diagnosis of process and sensor faults. In: Proceedings of the 2015 IEEE Aerospace Conference. Big Sky, MT, USA: IEEE, 2015. 1–11
- 133 Daigle M J, Bregon A, Koutsoukos X, Biswas G, Pulido B. A qualitative event-based approach to multiple fault diagnosis in continuous systems using structural model decomposition. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2016, **53**: 190–206
- 134 Daigle M, Bregon A, Biswas G, Koutsoukos X, Pulido B. Improving multiple fault diagnosability using possible conflicts. *IFAC Proceedings Volumes*, 2012, **45**(20): 144–149
- 135 Khorasgani H, Jung D, Biswas G. Structural approach for distributed fault detection and isolation. *IFAC-PapersOnLine*, 2015, **48**(21): 72–77
- 136 Basseville M. On fault detectability and isolability. *European Journal of Control*, 2001, **7**(6): 625–637
- 137 Jiang B, Chowdhury F N. Fault estimation and accommodation for linear MIMO discrete-time systems. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2005, **13**(3): 493–499
- 138 Joshi S M, González O R, Upchurch J M. Identifiability of additive actuator and sensor faults by state augmentation. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2014, **37**(3): 941–946
- 139 Upchurch J M, González O R, Joshi S M. Identifiability of Additive, Time-Varying Actuator and Sensor Faults by State Augmentation, Technical Report NASA/TM-2014-218669, L-20505, NF1676L-20305, NASA Langley Research Center, Hampton, VA, USA, 2014.
- 140 Ding Y, Kim P, Ceglarek D, Jin J. Optimal sensor distribution for variation diagnosis in multistation assembly processes. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 2003, **19**(4): 543–556
- 141 Wani M F, Gandhi O P. Diagnosability evaluation of systems using bipartite graph and matrix approach. *AI EDAM-Artificial Intelligence for Engineering Design Analysis and Manufacturing*, 2000, **14**(3): 193–206
- 142 Liu Z T, Ahmed Q, Zhang J Y, Rizzoni G, He H W. Structural analysis based sensors fault detection and isolation of cylindrical lithium-ion batteries in automotive applications. *Control Engineering Practice*, 2016, **52**: 46–58
- 143 de Kleer J, Williams B C. Diagnosing multiple faults. *Artificial Intelligence*, 1987, **32**(1): 97–130
- 144 Feldman A, van Gemund A. A two-step hierarchical algorithm for model-based diagnosis. In: Proceedings of the 2006 Aational Conference on Artificial Intelligence. Boston, USA: AAAI Press, 2006. 827–833
- 145 De Kleer J. Hitting set algorithms for model-based diagnosis. In: Proceedings of the 22nd International Workshop on Principles of Diagnosis. Murnau, Germany, 2011. 1–6
- 146 Console L, Picardi C, Ribaudo M. Diagnosis and diagnosability analysis using process algebras. In: Proceedings of the 14th European Conference on Artificial Intelligence. Berlin, Germany, 2000. 131–135
- 147 Dressler O, Struss P. A toolbox integrating model-based diagnosability analysis and automated generation of diagnostics. In: Proceedings of the 14th International Workshop on Principles of Diagnosis. USA, 2003. 99–104
- 148 Struss P, Rehfus B, Brignolo R, Cascio F, Console L, Dague P, et al. Model-based tools for the integration of design and diagnosis into a common process — a project report. In: Proceedings of the 13th International Workshop on Principles of Diagnosis. Semmering, Austria, 2002. 25–32



王大轶 北京空间飞行器总体设计部研究员。主要研究方向为航天器的自主制导、导航与控制, 故障诊断与容错控制。
E-mail: dayiwang@163.com

(WANG Da-Yi Professor at Beijing Institute of Spacecraft System Engineering. His research interest covers autonomous guidance, navigation and

control, fault diagnosis and tolerant control for spacecrafts.)



符方舟 北京控制工程研究所博士研究生. 2015 年获得哈尔滨工业大学深圳研究生院硕士学位. 主要研究方向为控制系统的故障诊断, 可诊断性评价. 本文通信作者. E-mail: ffzssg@163.com

(**FU Fang-Zhou** Ph. D. candidate at Beijing Institute of Control Engineering. He received his master degree from

Shenzhen Graduate School, Harbin Institute of Technology in 2015. His research interest covers fault diagnosis and fault diagnosability evaluation. Corresponding author of this paper.)



刘成瑞 北京控制工程研究所高级工程师. 2006 年获得北京航空航天大学博士学位. 主要研究方向为卫星控制系统的故障诊断与容错控制.

E-mail: liuchengrui@gmail.com

(**LIU Cheng-Rui** Senior engineer at Beijing Institute of Control Engineering. He received his Ph. D. degree from

Beijing University of Aeronautics and Astronautics in 2006. His research interest covers fault diagnosis and tolerant control for spacecrafts.)



李文博 北京控制工程研究所高级工程师. 2012 年在获得哈尔滨工业大学博士学位. 主要研究方向为故障诊断与容错控制, 卫星控制系统的可诊断性评价与设计. E-mail: liwenbo_bice@163.com

(**LI Wen-Bo** Senior engineer at Beijing Institute of Control Engineering. He received his Ph. D. degree from

Harbin Institute of Technology in 2012. His research interest covers fault diagnosis and tolerant control, fault diagnosability evaluation and design for satellite control systems.)

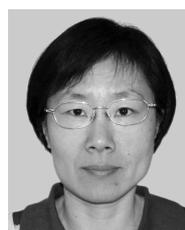


刘文静 北京控制工程研究所高级工程师. 2009 年获得天津大学博士学位. 主要研究方向为故障诊断与容错控制, 卫星控制系统的可诊断性评价与设计.

E-mail: lwjingbice@163.com

(**LIU Wen-Jing** Senior engineer at Beijing Institute of Control Engineering. She received her Ph. D. degree

from Tianjin University in 2009. Her research interest covers fault diagnosis and tolerant control, fault diagnosability evaluation and design for satellite control systems.)



何英姿 北京控制工程研究所研究员. 主要研究方向为航天器制导与控制.

E-mail: heyz1970@163.com

(**HE Ying-Zi** Professor at Beijing Institute of Control Engineering. Her research interest covers guidance and control for spacecrafts.)



邢琰 北京控制工程研究所研究员. 主要研究方向为航天器故障诊断与容错控制. E-mail: xingyan_bice@163.com

(**XING Yan** Professor at Beijing Institute of Control Engineering. Her research interest covers fault diagnosis and tolerant control.)