1. 拟留学专业在国内外的研究情况及水平：

近二十年来，为了保证工业自动化过程的安全性和可靠性，人们对容错控制（Fault-Tolerant Control , FTC）方法进行了广泛的研究。相应的参考文献见[3,12-16]。基本上，容错控制可以分为被动FTC和主动FTC。被动FTC的基本思想是从鲁棒控制的角度设计控制系统，不改变控制器和系统的结构，使其对故障不敏感，而主动FTC则是根据故障配置控制器的参数，甚至改变控制器的结构。一种成功的面向控制性能的容错控制方案及其在工业系统中的应用见[17]。

jìn近 èr二 shí十 nián年 lái来 ， wèi为 le了 bǎo保 zhèng证 gōng工 yè业 zì自 dòng动 huà化 guò过 chéng程 de的 ān安 quán全 xìng性 hé和 kě可 kào靠 xìng性 ， rén人 men们 duì对 F T C fāng方 fǎ法 jìn进 xíng行 le了 guǎng广 fàn泛 de的 yán研 jiū究 。 xiāng相 yìng应 de的 cān参 kǎo考 wén文 xiàn献 jiàn见 [ 3 , 1 2 - 1 6 ] 。 jī基 běn本 shang上 ， róng容 cuò错 kòng控 zhì制 kě可 yǐ以 fēn分 wéi为 bèi被 dòng动 F T C hé和 zhǔ主 dòng动 F T C 。 bèi被 dòng动 róng容 cuò错 kòng控 zhì制 de的 jī基 běn本 sī思 xiǎng想 shì是 cóng从 lǔ鲁 bàng棒 kòng控 zhì制 de的 jiǎo角 dù度 shè设 jì计 kòng控 zhì制 xì系 tǒng统 ， bù不 gǎi改 biàn变 kòng控 zhì制 qì器 hé和 xì系 tǒng统 de的 jié结 gòu构 ， shǐ使 qí其 duì对 gù故 zhàng障 bù不 mǐn敏 gǎn感 ， ér而 zhǔ主 dòng动 róng容 cuò错 kòng控 zhì制 zé则 shì是 gēn根 jù据 gù故 zhàng障 pèi配 zhì置 kòng控 zhì制 qì器 de的 cān参 shù数 ， shèn甚 zhì至 gǎi改 biàn变 xì系 tǒng统 de的 zhuàng状 tài态 。 kòng控 zhì制 qì器 jié结 gòu构 。 yī一 zhǒng种 chéng成 gōng功 de的 miàn面 xiàng向 kòng控 zhì制 xìng性 néng能 de的 róng容 cuò错 kòng控 zhì制 fāng方 àn案 jí及 qí其 zài在 gōng工 yè业 xì系 tǒng统 zhōng中 de的 yìng应 yòng用 ， jiàn见 [ 1 7 ] 。

In order to achieve higher control performance, the feedback controllers have been well studied based on the Youla parameterization which was first introduced by Youla et al [18,19]. By directly applying the Youla parameterization of all stabilizing controllers, an observer-based realization of the Youla parameterization controller is proposed by Professor Ding in [20,21] as a Fault-Tolerant Control Architecture (FTCA), which results a much simpler and reliable realization. Based on the certain component reliability parameters, appropriate FTC strategies can be developed to reconfigure the controller to meet the required control performance.

为了获得更高的控制性能，Youla等人首次在引入的Youla参数化基础上，对反馈控制器进行了深入研究[18,19]。通过直接应用所有稳定控制器的Youla参数化，丁教授在[20,21]中提出了一种基于观测器的Youla参数化控制器的实现方案，作为容错控制体系结构（Fault-Tolerant Control Architecture, FTCA）。这种体系结构更简单可靠，它根据某个部件的可靠性参数，可制定适当的FTC控制策略，来重新配置控制器，以满足所需的控制性能。

wèi为 le了 huò获 dé得 gèng更 gāo高 de的 kòng控 zhì制 xìng性 néng能 ， zài在 Y o u l a děng等 rén人 [ 1 8 , 1 9 ] shǒu首 cì次 yǐn引 rù入 de的 Y o u l a cān参 shù数 huà化 jī基 chǔ础 shàng上 ， duì对 fǎn反 kuì馈 kòng控 zhì制 qì器 jìn进 xíng行 le了 shēn深 rù入 yán研 jiū究 。 tōng通 guò过 zhí直 jiē接 yīng应 yòng用 suǒ所 yǒu有 wěn稳 dìng定 kòng控 zhì制 qì器 de的 Y o u l a cān参 shù数 huà化 ， dīng丁 jiào教 shòu授 zài在 [ 2 0 , 2 1 ] zhōng中 tí提 chū出 le了 yī一 zhǒng种 jī基 yú于 guān观 cè测 qì器 de的 Y o u l a cān参 shù数 huà化 kòng控 zhì制 qì器 de的 shí实 xiàn现 fāng方 àn案 ， zuò作 wéi为 róng容 cuò错 kòng控 zhì制 tǐ体 xì系 jié结 gòu构 （ F T C A ） ， shí实 xiàn现 jiǎn简 dān单 kě可 kào靠 。 gēn根 jù据 mǒu某 gè个 bù部 jiàn件 de的 kě可 kào靠 xìng性 cān参 shù数 ， kě可 zhì制 dìng定 shì适 dàng当 de的 kě可 zhé折 dié叠 chē车 dǐng顶 kòng控 zhì制 cè策 lvè略 ， yǐ以 chóng重 xīn新 pèi配 zhì置 kòng控 zhì制 qì器 ， yǐ以 mǎn满 zú足 suǒ所 xū需 de的 kòng控 zhì制 xìng性 néng能 。

It is noticeable that a novel data driven scheme was proposed by Professor Ding [22,23]. In these works, the history process data are used to construct the process system which is represented by Stable Image Representation (SIR) and Stable Kernel Representation (SKR).

值得注意的是，丁教授提出了一种新的数据驱动方案[22,23]。在这些工作中，利用历史过程数据构建了以稳定图像表示（Stable Image Representation, SIR）和稳定核表示（Stable Kernel Representation, SKR）为代表的过程系统。

zhí值 dé得 zhù注 yì意 de的 shì是 ， dīng丁 jiào教 shòu授 tí提 chū出 le了 yī一 zhǒng种 xīn新 de的 shù数 jù据 qū驱 dòng动 fāng方 àn案 [ 2 2 , 2 3 ] 。 zài在 zhè这 xiē些 gōng工 zuò作 zhōng中 ， lì利 yòng用 lì历 shǐ史 guò过 chéng程 shù数 jù据 gòu构 jiàn建 le了 yǐ以 wěn稳 dìng定 tú图 xiàng像 biǎo表 shì示 （ S I R ） hé和 wěn稳 dìng定 hé核 biǎo表 shì示 （ S K R ） wéi为 dài代 biǎo表 de的 guò过 chéng程 xì系 tǒng统 。

In an internally stable standard feedback system, with the coprime factorization techniques, one reference signal for SIR of system can be constructed by the external excitation signa and left coprime factors of the controller. Collecting the reference signal and building the Hankel matrix, the SIR of system can be realized by the so called subspace projection technique. Based on the SIR of system and SKR of controller, the stability margin in a closed-loop system is realized by the data-driven method in [24], which gives a quantitative index to measure the stability of a system. Furthermore, The optimal stability margin, which givens the supreme stability margin over all controllers that stabilize the system, is achieved by the data-driven method in [25].

在一个内部稳定的标准反馈系统中，利用互质因子分解技术，可以通过控制器的外部激励信号和左互质因子构造一个系统SIR参考信号。采集参考信号，建立汉克尔矩阵，利用子空间投影技术实现系统的SIR。基于系统的SIR和控制器的SKR，采用[24]中的数据驱动方法，实现了闭环系统的稳定裕度，给出了系统稳定性的定量指标。此外，通过[25]中的数据驱动方法，得到了系统稳定的最优稳定裕度，为所有控制器提供了最高的稳定裕度。

zài在 yī一 gè个 nèi内 bù部 wěn稳 dìng定 de的 biāo标 zhǔn准 fǎn反 kuì馈 xì系 tǒng统 zhōng中 ， lì利 yòng用 hù互 zhì质 yīn因 zǐ子 fēn分 jiě解 jì技 shù术 ， kě可 yǐ以 lì利 yòng用 kòng控 zhì制 qì器 de的 wài外 bù部 jī激 lì励 xìn信 hào号 hé和 zuǒ左 hù互 zhì质 yīn因 zǐ子 gòu构 zào造 yī一 gè个 xì系 tǒng统 S I R cān参 kǎo考 xìn信 hào号 。 cǎi采 jí集 cān参 kǎo考 xìn信 hào号 ， jiàn建 lì立 hàn汉 kè克 ěr尔 jǔ矩 zhèn阵 ， lì利 yòng用 zǐ子 kōng空 jiān间 tóu投 yǐng影 jì技 shù术 shí实 xiàn现 xì系 tǒng统 de的 S I R 。 jī基 yú于 xì系 tǒng统 de的 S I R hé和 kòng控 zhì制 qì器 de的 S K R ， cǎi采 yòng用 [ 2 4 ] zhōng中 de的 shù数 jù据 qū驱 dòng动 fāng方 fǎ法 ， shí实 xiàn现 le了 bì闭 huán环 xì系 tǒng统 de的 wěn稳 dìng定 yù裕 dù度 ， gěi给 chū出 le了 xì系 tǒng统 wěn稳 dìng定 xìng性 de的 dìng定 liàng量 zhǐ指 biāo标 。 cǐ此 wài外 ， tōng通 guò过 [ 2 5 ] zhōng中 de的 shù数 jù据 qū驱 dòng动 fāng方 fǎ法 ， dé得 dào到 le了 xì系 tǒng统 wěn稳 dìng定 de的 zuì最 yōu优 wěn稳 dìng定 yù裕 dù度 ， wèi为 suǒ所 yǒu有 kòng控 zhì制 qì器 tí提 gōng供 le了 zuì最 gāo高 de的 wěn稳 dìng定 yù裕 dù度 。

Dually, through coprime factorization, the transfer function matrix which describe the relations from external signal to system inputs outputs can also be represented by the SIR of controller and SKR of system. Hence another realization method of the stability margin can be given by data-driven SKR of system and SIR of controller [26].

同时，通过互质因子分解，可以用控制器的SIR和系统的SKR来表示描述外部信号与系统输入输出之间关系的传递函数矩阵。因此，系统的数据驱动SKR和控制器的SIR可以给出稳定裕度的另一种实现方法[26]。

tóng同 shí时 ， tōng通 guò过 hù互 zhì质 yīn因 zǐ子 fēn分 jiě解 ， kě可 yǐ以 yòng用 kòng控 zhì制 qì器 de的 S I R hé和 xì系 tǒng统 de的 S K R lái来 biǎo表 shì示 miáo描 shù述 wài外 bù部 xìn信 hào号 yǔ与 xì系 tǒng统 shū输 rù入 shū输 chū出 zhī之 jiān间 guān关 xi系 de的 chuán传 dì递 hán函 shù数 jǔ矩 zhèn阵 。 yīn因 cǐ此 ， xì系 tǒng统 de的 shù数 jù据 qū驱 dòng动 S K R hé和 kòng控 zhì制 qì器 de的 S I R kě可 yǐ以 gěi给 chū出 wěn稳 dìng定 yù裕 dù度 de的 lìng另 yī一 zhǒng种 shí实 xiàn现 fāng方 fǎ法 [ 2 6 ] 。

Similar to the estimation of stability margin, the H infinity norms of the sub-matrices of transfer function describe the maximum gain from the corresponding input to output. Together with stability margin, these characters of system can be used to design fault diagnosis algorithm by a machine learning classifier such as Support Vector Machine (SVM) and k-Nearest Neighbor (kNN). A successful application to double loop DC motor system can be seen in [27].

传递函数子矩阵的H无穷范数与稳定裕度的估计相似，描述了相应输入到输出的最大增益。结合系统的稳定性裕度，利用支持向量机（Support Vector Machine, SVM）和K最近邻（k-Nearest Neighbor, KNN）等机器学习分类器来设计故障诊断算法。双回路直流电机系统的成功应用见[27]。

chuán传 dì递 hán函 shù数 zǐ子 jǔ矩 zhèn阵 de的 H wú无 qióng穷 fàn范 shù数 yǔ与 wěn稳 dìng定 yù裕 dù度 de的 gū估 jì计 xiāng相 sì似 ， miáo描 shù述 le了 xiāng相 yìng应 shū输 rù入 dào到 shū输 chū出 de的 zuì最 dà大 zēng增 yì益 。 jié结 hé合 xì系 tǒng统 de的 wěn稳 dìng定 xìng性 yù裕 dù度 ， lì利 yòng用 zhī支 chí持 xiàng向 liàng量 jī机 （ S V M ） hé和 K zuì最 jìn近 lín邻 （ K N N ） děng等 jī机 qì器 xué学 xí习 fēn分 lèi类 qì器 shè设 jì计 gù故 zhàng障 zhěn诊 duàn断 suàn算 fǎ法 。 shuāng双 huí回 lù路 zhí直 liú流 diàn电 jī机 xì系 tǒng统 de的 chéng成 gōng功 yìng应 yòng用 jiàn见 [ 2 7 ] 。

Recently, a novel Plug-and-Play based process monitoring and performance optimization method was proposed by Professor Luo in [17]. It can give performance optimization by plug in the fault tolerant control module and resume the original performance by unplug the module without effects the predesigned controller. It provides a safe and reliable example for the fault diagnosis and fault tolerant control of the large-scale industrial system. Based on its architecture, the system’s SIR was first identified in [28] and it provides the basic data-driven system description under the PnP monitoring and control architecture.

近年来，罗教授在[17]中提出了一种新的基于即插即用的过程监控和性能优化方法。它可以通过插入容错控制模块来优化性能，并通过拔下模块来恢复原始性能，而不影响预先设计的控制器。为大型工业系统的故障诊断和容错控制提供了一个安全可靠的实例。基于其体系结构，系统的SIR在[28]中首次被识别，它在PNP监控体系结构下提供了基本的数据驱动系统描述。

jìn近 nián年 lái来 ， luó罗 jiào教 shòu授 zài在 [ 1 7 ] zhōng中 tí提 chū出 le了 yī一 zhǒng种 xīn新 de的 jī基 yú于 jí即 chā插 jí即 yòng用 de的 guò过 chéng程 jiān监 kòng控 hé和 xìng性 néng能 yōu优 huà化 fāng方 fǎ法 。 tā它 kě可 yǐ以 tōng通 guò过 chā插 rù入 róng容 cuò错 kòng控 zhì制 mó模 kuài块 lái来 yōu优 huà化 xìng性 néng能 ， bìng并 tōng通 guò过 bá拔 xià下 mó模 kuài块 lái来 huī恢 fù复 yuán原 shǐ始 xìng性 néng能 ， ér而 bù不 yǐng影 xiǎng响 yù预 xiān先 shè设 jì计 de的 kòng控 zhì制 qì器 。 wèi为 dà大 xíng型 gōng工 yè业 xì系 tǒng统 de的 gù故 zhàng障 zhěn诊 duàn断 hé和 róng容 cuò错 kòng控 zhì制 tí提 gōng供 le了 yī一 gè个 ān安 quán全 kě可 kào靠 de的 shí实 lì例 。 jī基 yú于 qí其 tǐ体 xì系 jié结 gòu构 ， xì系 tǒng统 de的 S I R zài在 [ 2 8 ] zhōng中 shǒu首 cì次 bèi被 shí识 bié别 ， tā它 zài在 P N P jiān监 kòng控 tǐ体 xì系 jié结 gòu构 xià下 tí提 gōng供 le了 jī基 běn本 de的 shù数 jù据 qū驱 dòng动 xì系 tǒng统 miáo描 shù述 。

Furthermore, according to the SIR identification method, a stability margin data-driven estimation method under PnP monitoring and control architecture was realized by Professor Luo et al. By recursive least square method and subspace projection, it provides a data-driven real-time key index estimation method, which can reflect the stability of the entire closed-loop system. Further research of the supervised performance fault diagnosis and fault tolerant control can be conducted based on it.

此外，根据SIR识别方法，罗教授等人实现了PNP监控架构下的稳定裕度数据驱动估计方法。通过递归最小二乘法和子空间投影，给出了一种数据驱动的实时关键指标估计方法，能够反映整个闭环系统的稳定性。在此基础上，还对监控性能故障诊断和容错控制进行了进一步的研究。

1. 选择的留学国别、留学单位及选择原因
2. 达到本次出国预期目标的可行性

在哈尔滨工业大学学习期间，申请人具备了足够的数据驱动故障诊断技术、容错控制方法理论等方面的知识，并通过参与实际工程项目学习和实现了实际复杂系统的理论问题。在尹教授的指导下，他还熟悉了本课题的相关最新学术论文和复杂系统容错控制的专著，在相关领域发表了9篇文章，为本课题的顺利开展提供了坚实的支撑。

1. 出国学习的目的、预期目标、计划、实施方法及所需时间

**出国学习目的：**在博士阶段拟在性能监控故障诊断和容错控制技术方向进行研究，并将其应用于工业系统，为复杂工业环境下的工厂提供安全和经济效益。

**预期目标：** 在Steven X.Ding教授的指导下，通过在杜伊斯堡埃森大学的4年学习，申请人将充分利用其所能获得的所有资源和设备，发展自己的研究能力。预期目标主要如下：1）采用基于模型的方法开发故障诊断和容错控制算法；2）根据历史数据，提出数据驱动的故障诊断理论和方法；3）基于实时过程数据，对递归容错控制方案进行研究；4）验证在工厂仿真模型和实际工业系统中开发的故障诊断和容错控制算法；5）总结重要的研究成果，并在国际期刊上发表文章。

**计划**（要写拟解决的关键问题还是时间安排，还是要写别的？）：1）基于机器学习方法，给出系统关键指标在线辨识的解决方案，以反映系统的控制性能和经济性能；2）根据闭环系统的关键指标，开发一种数据驱动的故障诊断方法，并给出进一步容错控制的决策逻辑；3）基于所提出的数据驱动故障诊断方案，开发一种数据驱动容错控制方法，动态提高控制性能和经济性能，在故障发生时达到最佳性能。 本研究将发展一个数据驱动的故障检测和容错控制方法。利用工厂数据对闭环系统在异常情况下的稳定性等控制性能进行监控，为进一步的容错算法提供决策逻辑。此外，该算法与容错控制相适应，保证了在异常工况下对生产率的影响不大。

* 2019.09 --- 2020.08
* 通过研究基于模型的故障诊断和容错控制的现有方法，对相关问题进行分析和总结。
* 研究现有的强化学习方法和机器学习方法。
* 2020.09 --- 2021.08
* 在机器学习方法的基础上，开发一种监督性能的在线学习方法。
* 根据工厂实际数据，采用数据驱动技术建立故障诊断和容错控制架构。
* 2021.09 --- 2022.08
* 在提出的故障诊断和容错控制架构下，开发一种基于强化学习方法的控制和经济性能监控容错控制方法。
* 2022.09 --- 2023.08

验证性能监控故障诊断和容错控制方法在工厂仿真模型和实际工业系统中的有效性。总结理论成果并发表论文。

**实施方法：**在前期研究中，申请人计划在数据驱动稳定裕度估计理论的基础上，对面向控制性能的容错控制进行进一步的研究。本课题可采用以下理论和工具：

· tōng通 guò过 kāi开 fā发 de的 róng容 cuò错 kòng控 zhì制 suàn算 fǎ法 ， tōng通 guò过 fǎng仿 zhēn真 mó模 xíng型 hé和 gōng工 chǎng厂 de的 shí实 jì际 kòng控 zhì制 xì系 tǒng统 ， jí即 M A T L A B zhōng中 de的 S i m u l i n k hé和 zhí直 liú流 diàn电 jī机 xì系 tǒng统 děng等 gōng工 yè业 xì系 tǒng统 ， yàn验 zhèng证 le了 qí其 zhèng正 què确 xìng性 。

To estimate the control performance of the system by data driven method, the coprime factorization, and subspace projection methods would be used to achieve data-driven SIR/SKR of system.

* 通过开发的容错控制算法，通过仿真模型和工厂的实际控制系统，即MATLAB中的Simulink和直流电机系统等工业系统，验证其正确性。
* 通过数据驱动方法估计系统的控制性能，采用互质分解和子空间投影方法实现系统的数据驱动SIR/SKR。
* 为实现实时控制性能优化，可采用实时递归数据驱动方法和自适应控制方法。
* 为了优化非线性或复杂的工业系统，可采用强化学习和深度学习的方法。

所需时间：

1. 学成回国后的工作/学习计划

申请人将带着在国外所学得的理论基础与实践经验回到我国工作，继续在工业大数据领域进行研究，并与国内学者一起将我国在这一领域的研究推向更高的水平。

在当今竞争激烈的商业环境中，大数据的有效处理对于生产力的提高起着越来越重要的作用，但同时也面临着巨大的挑战。由于缺乏适当的数据驱动设计工具，许多制造系统还没有管理大数据的能力。德国正在基于大数据和智能制造技术的应用，引领着向第四代工业革命（工业4.0）的转型。随着越来越多的数据驱动技术和嵌入式智能集成到工业产品和系统中，工业生产方式将发生重大变化。 然而，近三十年来，工厂自动化程度的不断提高也带来了严峻的挑战，子系统的一个异常可能导致整个工厂的崩溃，造成巨大的经济损失和重大的工业事故。基于以上背景，数据驱动技术因其诸多优点在故障检测与隔离（FDI）、容错控制（FTC）等领域得到了广泛的应用。与基于模型的方法相比，数据驱动技术一方面节省了建模过程的时间，另一方面也可以直接从过程数据中提取系统动态特征，节省了大量的工程工作量，从而有利于开发智能控制算法。

在安全性和生产率要求的驱动下，对复杂过程工业系统中的故障检测、隔离和识别做了大量的工作。一些经典的理论工作已经很好地建立起来，见[1-3]。在丁教授的基于模型的故障诊断技术（设计方案、算法和工具）中，基于模型的故障检测（FD）方案通常被认为是软件冗余或分析冗余的方法。基于分析冗余的方法将昂贵的硬件冗余组件替换为与流程并行运行的软件冗余组件。因此，可以通过检查实际输出和模型输出之间的差异（剩余信号）来执行故障检测。

与基于模型的方法相比，数据驱动过程监测方法因其工程量小而广泛应用于工业过程。此外，它很容易收集全球信息来实现智能决策。一些常用的多元统计分析方法，如主成分分析（PCA）、偏最小二乘（PLS）、费希尔判别分析（FDA）、支持向量机（SVM），在许多复杂工业系统中得到了很好的研究和应用。相应的参考文献见[4-8]。更直接的方法是利用过程历史数据进行模型识别，并在此基础上，利用成熟的基于模型的技术进行过程监控和故障检测，参见子空间识别方法（SIM）辅助过程监控系统。相关参考见[9-11]。