

第5章

基于交互的数字孪生复杂 系统管理

本章的主要内容是探讨基于交互的数字孪生如何管理复杂系统这一问题。要解决这个问题,首先要建立一个复杂系统,它在结构和功能上都由相对独立的多个元素组成,也可称为多结构系统。此外,系统中的每一个元素也都可以作为另一个多结构系统的组成部分,用于解决其他问题。

本章介绍了多结构系统的组成架构,如何实施多结构系统及其管理原则。在系统的运行细节上,介绍了信息流的组织方式以及如何在多结构系统中进行处理,多结构系统中的数字化对象及其生成原则,以及多结构系统中目标树和多结构系统建设中的计量学知识。同时,本章介绍了多结构系统中数字孪生的作用以及如何使用数字孪生实现元素间的互动。此外,本章还提出了多结构系统的评价体系,为决策者提供评价系统状态的标准。

融合了数字孪生的多结构系统,为之后智能信息系统的建立提供了基础。智能信息系统的典型特征包括智能数据处理、功能易扩展、自动迭代以及能够进行高质量决策。在本章中,智能信息系统分为三类:保证过程稳定的信息系统,触发控制的信息系统,基于检索过程的信息系统。第一类智能信息系统通常由算法模型来决策,第二类智能信息系统通常使用反射性行为模型,第三类智能信息系统综合使用上述两种模型。若信息系统模型中包含行为属性,则其系统核心是数字孪生,它负责数据处理,并在此基础上做出管理决策。

对于系统中包含的数学知识,本章使用数字化对象、信息对象、目标树和谓词微积分语言来交叉表示,用于描述业务逻辑和对数字化对象的控制。



5.1 数字孪生系统与生产

5.1.1 数字孪生出现的先决条件

社会的文明发展总是依赖于新的解决方案，这些解决方案来自于科学与技术的进步。如今，电子计算机的应用和信息处理的方式极大地影响了社会的发展方向。信息技术如今已经成为一种工具，通过自动化将人们从痛苦的体力劳动中解放出来，并使人们将更多的精力放在各种决策上。

如今，国家和企业的发展重点，以及大量财政资源的投资都是用于传统行业的数字化，这也是人类社会未来信息化的方向之一。可以预见的是，在不久的将来，信息技术和相关行业将会深入各个领域并逐渐标准化。

目前信息技术的特点是存在大量的可编程系统，包括多样的编程语言与编译器、数据存储系统、数据检索系统及可视化系统。这一事实表明，信息技术正在过渡到一个新的阶段，新的编程技术将会大大降低开发信息系统的劳动成本。当前正在进行的数字化进程将大部分精力集中在组织管理、进程控制和管理方面。随着新的数据检索和处理方法的出现，数字化系统的管理可能会出现重大变化，关键问题是如何在数字化过程中将不同领域的、不同行业的工作迅速整合到一个项目中，并选择合适的方式来管理系统。

信息技术在最初诞生时，主要是为了用于商业领域的计算。但是在最初的信息系统中，大部分工作还是由人来完成的。在信息技术之后的发展过程中，信息系统变得越来越自动化。最突出的例子就是计算机集成制造技术(Computer Integrated Manufacturing, CIM)，CIM的主要思想是为生产系统建立一个统一的信息空间，为之后信息系统的建立提供了一套完整的标准。

综上，信息技术发展的下一个阶段可以看作对组织和管理活动的改进，以及对简单和重复问题的自动决策。随着大数据积累和其存储及处理技术的发展，如人工神经网络、遗传算法等，信息化进程有了质的飞跃。

在上述过程进行的同时，信息收集和处理设备也在不断发展，传感器的体积越来越小，传输设备的数据传输速度越来越快。因此，许多电子和机械设备开始配备数据收集器、微处理器和控制器，小到照明灯具和插座，大到高精度机器、运输工具和飞机等，现如今获取信息的成本已经大大降低。通过传感器获取的大量数据融入复杂的系统当中，给数据的处理和组织带来了很大的压力。

媒体、出版社和银行系统是数字化的先锋队，信息技术的应用对于这些依赖数



据带来营收的行业能够提供巨大的帮助。在媒体行业,为用户提供的主要产品就是信息,书籍和报纸只是存储和传输信息的媒介。得益于信息技术的发展,当前的信息媒介也越来越信息化,例如,二维码和条形码。信息化作为一种基于先进信息技术应用的过程,目前有以下两种发展方向。

(1) 创建一种新的信息系统,其中流通的信息可以立即从源头获得。

(2) 建立一种独特的信息环境,将有形物体和信息系统在其中结合。

如今,有许多信息系统使用传感器接收来自物理世界的信息。但是,有些信息仍然没有办法使用传感器获取,例如,粗糙度、气味、味道等信息。

实现数字化的关键是构建数字化对象。通过数字化对象将物理系统的元素转换为信息系统的元素,主要过程如下。

(1) 物理系统中存在机械组件,并能获取其状态。

(2) 使用传感器收集有关物理系统状态的数据并将其传输到信息系统。

(3) 允许使用控制设备对物理系统做出反应。

数字化对象和有形物体之间有很大的差别。首先,就结构而言,数字化对象能够直接接收和传输对象状态。有形物体需要传感器来收集数据,或者由人手动收集设备的状态。其次,数字化对象具备一定的“智能行为”,能够进行自我控制。

下面介绍一下网络物理系统。网络物理系统有许多定义,从其字面来看意为物理系统的智能管理。科学技术未来专家组(The Science and Technology Future Experts Groups)将网络物理系统定义为能够控制物理对象的整合,包括人工智能(Artificial Intelligence, AI)、物联网(Internet of Things, IoT)、仿生机器人和任何能够连接到信息网络的设备或机器。工业 4.0 专家将网络物理系统定义为相互连接的物理和信息元素,如配备传感器和处理器的通信设备以及其他硬件和软件,系统根据特定的算法交换信息和传输控制信号。美国国家标准与技术研究所(National Institute of Standards and Technology, NIST)从智能系统的角度考虑网络物理系统,认为其应该包括物理对象和通信设备。本书认为,当一个系统能够将网络、物理机械和生产环境整合到一个系统中时,就可以称之为网络物理系统,它能够在没有人干预的情况下实现自我管理。

网络物理系统正在推动众多行业的创新和发展,包括农业、航空、建筑设计、个性化医疗、智能制造等。网络物理系统的数据越来越丰富,自动化程度也更高。此外,网络物理系统研究中的一些传统理念由于人工智能和机器学习中出现的新概念而受到挑战。随着人工智能与网络物理系统的结合,诞生了许多新的研究方向。数字化对象是网络物理系统的一个基本元素,其结构包含如表 5.1 和图 5.1 所示的元素。

表 5.1 数字化对象的结构

元素名称	元素存在的目的
传感器	用于获取物理对象的状态及其外部环境信息
数据库	存储中间数据
数据处理工具	软件或硬件/软件模块,执行初始数据处理、阈值监测
控制物体及其外部环境状态的控制器	根据选定的行为模式,向功能部件传送控制行动
网络物理系统的其他元素集成的工具	一套通信服务,使数字化的物体和物理系统的其他元素之间能够进行数据交换

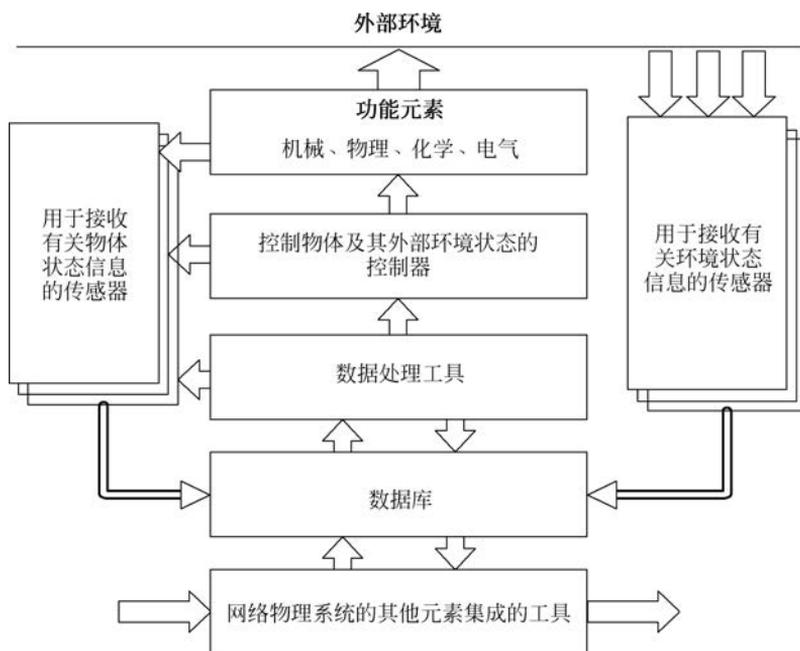


图 5.1 数字化对象的结构

其中,加粗箭头表示系统对外部环境的影响,未加粗箭头表示数字化对象各组成部分之间的数据和指令传输。

数字化意味着物理系统及其中各个元素都拥有很高的自主性,在计算机普及的早期阶段,相对复杂的管理功能是由人完成的。另一方面,数字化意味着人类从繁杂的系统管理中脱离出来。与信息系统相比,人的优势是能够应对各种情况下的突发行为。但同时,人也会受到情绪的影响,做出错误的判断。所以在信息系统中加入行为模型,做出合理的管理决策,已经成为数字化进程的一个重要组成部



分。因此,网络物理系统的管理需要转换为自动模式,数字孪生的加入最容易达成此目标。

在网络物理系统的控制中,应用数字孪生的基本思想是在物理对象和其数字对象之间建立反馈。传统的控制系统可以通过扩展物理设备和虚拟设备之间的交互渠道,并利用智能电子设备的高速计算能力,进而转变为网络物理系统。

5.1.2 影响数字孪生有效性的互动对象参数

本节讲述的参数指的是物理设备与其虚拟对象之间进行互动所必需的数据。参数的数量及颗粒度会直接影响数字孪生在系统中的有效性,并对实际生产造成负面影响。

表 5.2 总结了数字孪生设计环境中用于有效控制和管理生产过程的主要参数及定义。

表 5.2 主要参数及定义

参 数	定 义
形状	对象的几何结构
功能性	对象所做行为的目的
健康	一个对象的当前状态与它理想状态的关系
地点	对象的地理位置
过程	对象所参与的活动
时间	完成行动所需的时间和行动的实施日期/时间
状态	所有对象和环境参数的当前状态
业绩	当前工厂生产力与其最佳值的比值
环境	对象所处的物理和虚拟环境
定性指标	定性的信息,因此通常不能用传统的传感器来测量

网络物理系统的一个先决条件是物理对象和其虚拟对象之间存在物理-虚拟连接。物理-虚拟连接是物理对象的状态被传输到虚拟环境并进行分析的必然过程,只有虚拟对象被更新,才能反映物理对象的当前状态。常用技术手段包括物联网、5G 和云计算等。

如果没有物理对象和虚拟对象之间的互动,不可能正确描述一个数字孪生。实现一个连接通常包含两个阶段,首先要捕获物理对象的状态,并使用计量学进行估计;其次是实施阶段,计算出物理对象和虚拟对象之间存在的误差。具体过程如图 5.2 所示。

例如,通过温度传感器获得发动机的温度,温度测量结果通过网络传输到虚拟

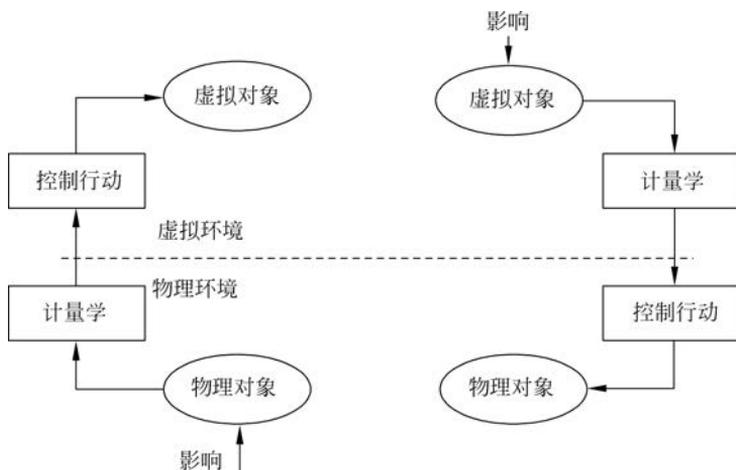


图 5.2 物理对象和虚拟对象之间的双向互动过程

环境。在虚拟环境中测量物理和虚拟发动机之间的温度差，然后更新虚拟发动机，使两个发动机的温度相等。

物理对象与虚拟对象之间的这种相互关联的关系是区分数字孪生与传统设计方法的标志之一。在传统设计方法中，以离线的方式分析物理环境。数字孪生提出的物理/虚拟耦合架构能够快速观察到物理与虚拟环境之间的状态变化。例如，如果由于温度的变化，对发动机的转速产生了影响，那么使用物理/虚拟耦合架构的系统将评估这种干扰对系统的影响。

虚拟对象与物理对象之间的联系表现为信息在两者之间的流动。也就是说，数字孪生可以通过虚拟对象来控制物理对象。例如，在实践中，可以通过虚拟对象来控制可编程逻辑控制器(Programmable Logic Controller, PLC)、机器参数、生产过程等。虚拟-物理通信也要经历如图 5.2 所示的两个阶段。

虚拟对象和物理对象之间的双向关系赋予了数字孪生更加广泛的适用性以及实施的灵活性。在实际的生产过程中，可以先在虚拟世界中提出假设，并做出初步的推断，然后在物理世界中执行、验证和纠正假设，这一过程可随着生产的部署循环执行。

5.1.3 数字孪生概念中的物理和虚拟生产过程

物理生产过程指的是一个物理对象在物理环境中进行的活动。在物理生产过程中，如果物理对象的参数发生变化，这些状态变化将会被记录下来并传输到虚拟对象中。

虚拟生产过程是指在虚拟环境中利用虚拟对象进行的活动。虚拟生产过程绝大多数涉及建模、模型优化以及健康监测、诊断和预测。这些过程会导致虚拟对象的参数发生变化,然后便可以对其状态进行分析,并在物理对象中实施。

图 5.3 说明了将数字孪生的概念应用于生产系统中,从而实现物理和虚拟对象参数双向同步的过程。

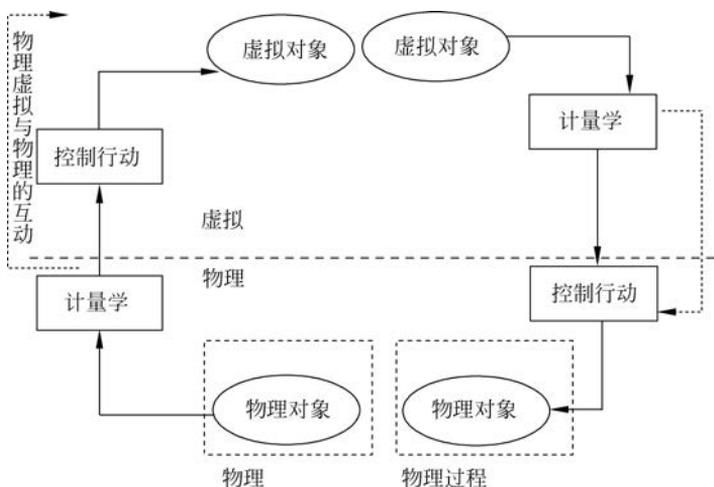


图 5.3 物理对象和虚拟对象的双向同步

图 5.3 显示了物理和虚拟生产过程如何作用于相应的物理和虚拟对象,并执行一系列动作的过程。使用通信技术获取状态的变化,通过物理-虚拟和虚拟-物理连接传输数据,并在同步所有参数后在另一个环境中实施。

与使用硬件方法来控制系统的机电系统相比,网络物理系统的设计采用了面向软件的方法,其本质是生产系统除硬件方面的功能集成。

数字孪生为分析生产过程提供了新的功能,并带来了许多好处,包括:

- (1) 降低生产成本、风险和设计时间。
- (2) 减少系统重新配置的复杂性和时间。
- (3) 改善售后服务。
- (4) 提高决策效率。
- (5) 提高生产管理的安全性和可靠性。
- (6) 提高生产系统的灵活性和竞争力。
- (7) 促进生产创新。



5.2 数字孪生多结构系统

5.2.1 描述多结构系统的方法学基础

多结构系统的理论最适合用包含数字孪生的网络物理系统来讲述，因为它包含可扩展性强、灵活性高和可随时间动态改变系统组件等特点。

多结构系统是一个复杂的动态系统，由许多不同的元素组成，每个元素具有不同的物理特性、功能和复杂性，也具有不同的控制模型，但从系统的角度来看，它们拥有一个相同的目标。

多结构的每个元素都有自己的组织基础，能够使用流程管理和功能管理，或者两种管理方法组合使用。一个多结构的系统还可以通过一个度量系统来整合其各个元素的计算结果。这里需要注意的是，每个元素都可以有自己的特点、指标体系和实现目标的行为模式。

任何动态变化的系统都应该是开放的，能够与其他系统互动。系统及其组成元素之间的互动都受制于一些规则，这些规则由系统或多个系统组成的超系统的目标决定。

多结构系统的特殊性在于它是由多个元素（独立系统或独立系统的片段）组成的，这些元素的结构是独立的、自给自足的，并可以实现特定的过程和功能。一个多结构系统的每个元素都可以作为另一个多结构系统的元素来解决另一类任务。

虽然不同的多结构系统存在结构上的差异，但都具有以下特性。

(1) 它是开放的，动态变化的新元素可以被添加到系统中，同时系统中的元素可以被删除，或者在一定时期内变为不可见的。

(2) 受辩证法的制约（例如，对立统一规律、量变与质变规律、否定之否定规律）。

(3) 在各元素的相互作用中形成协同效应。

(4) 存在一套规则和一种用于元素间互动的语言。

(5) 可以表示成一个由对象、过程和它们之间的联系组成的系统。

(6) 多结构系统的目标不等于其组成元素的目标之和，多结构系统的目标对改变或调整其他元素的目标有反作用。

(7) 多结构系统的每个元素都有自己的目标树和指标系统，用来评估其对象的状态，这些目标和指标可能包括在多结构系统的目标树和指标系统中，也可能不被考虑。



假设一个对象包含多结构的一系列指标,形成多结构系统的协同效应,就将其称为多结构系统的主体。

多结构系统主体最主要的功能是确保多结构系统的所有元素进行信息互动,协调它们的目标,以实现整个多结构系统的目标。同时,对多结构系统元素的管理方式有如下两种。

(1) 在多结构系统要素的目标基准框架内,对其内部流程和功能进行管理。

(2) 建立多结构系统元素的新目标值,协调公共资源分配规则,以实现多结构系统的目标。

图 5.4 是一个多结构系统的架构图,其中:

1 代表多结构系统。

2 代表多结构系统的元素。

3 代表多结构系统的主体(主体系统)。

4 代表主体和多结构系统的元素之间的联系。

5 代表多结构系统主体的外层部分,包含多结构系统元素的原型、多结构系统元素的目标树、多结构系统元素的指标集、多结构系统元素指标与多结构主体指标的规则和协议。

6 代表多结构系统的内部整合层。

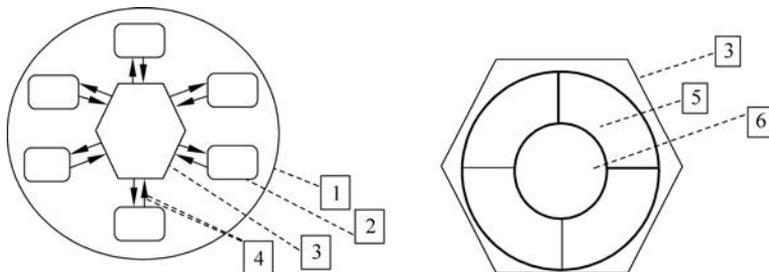


图 5.4 一个多结构系统的架构图

5.2.2 多结构系统的基本要素

多结构系统的基本要素包含特定领域中对象的相互关系,称为主题领域。主题领域中的每个对象以一组属性的方式来描述,也称为信息对象(Information Objects, IO)。

信息对象一般来说是动态的,即在特定的时间节点,信息对象的状态也不同。若一个信息对象中的属性对系统来说是必需的,则该信息对象处于活动状态,其他



信息对象处于潜伏状态。当处于活动状态的信息对象不断增加时，系统的结构也会越来越完整。

根据信息对象在多结构系统生命周期中的作用，可以将信息对象分为以下四组。

1. 描述主题领域的对象

描述主题领域的对象是构成多结构系统元素主题领域的基本要素。根据系统的复杂程度和组成来确定这些对象的属性。例如，企业产品及特点、用于生产的设备和技术、生产材料的组成等。

控制对象是多结构系统主题领域的主要部分，具有一组可测量的特征。例如，车辆控制面板（如速度传感器、油位传感器、里程传感器等）。控制对象由控制对象结构、控制对象特征、控制对象的功能从属、控制对象所包含的技术链、控制对象状态的指标值等组成。

2. 负责决策管理的对象

负责决策管理的对象可以是被赋予系统管理权的人，也可以是具备智能行为的硬件和软件集合。目前可以将数字孪生作为决策管理对象。

决策管理对象包含如下内容。

- (1) 用于评估一个过程绩效的指标。
- (2) 用于评估控制对象的一个属性的状态的指标。
- (3) 用于决策的分析性指标。
- (4) 对象指标。

其中，对象指标是控制对象能够单独识别的属性，它能够被测量、比较和计算。每个指标由一组特征来描述，包括：指标的标准值、对象实际值、实际值与标准值的偏差、偏差系数。例如，人体体温、高血压、低血压、脉搏、血糖百分比等。

3. 用于多结构系统元素目标设定的对象

用于多结构系统元素目标设定的对象主要以目标树的方式实现。目标树是控制对象特征集合（规范值、实际值、绝对和相对偏差值）的树状结构，它确定了控制对象目标的评价指标。

4. 用于测量和评估主题领域内对象状态变化的对象

用于测量和评估主题领域内对象状态变化的对象包括如下内容。

1) IO 简单对象

IO 简单对象的基本属性和指标之间的关系，一般是一对一关系。

2) IO 复合对象

基本属性和复合属性以及信息对象的索引之间的连接，对于信息对象的基本



属性来说,相当于线性的“一对一”连接,而对于信息对象的复合属性来说,则是分层的“一对一”或线性的“一对多”连接。前提条件是复合属性和信息对象的索引之间至少存在一个线性一对多关系。

3) IO 控制对象

IO 控制对象是多结构系统的主题领域的一部分,包含以下数据。

- (1) 控制对象的结构。
- (2) 控制对象的特征。
- (3) 控制对象的功能归属。
- (4) 附属关系。

4) IO 控制目标

IO 控制目标是多结构系统的主题领域的一部分。IO 控制目标包含以下数据。

- (1) 控制对象的结构。
- (2) 受控对象在受控系统结构中的结构。
- (3) 可观测属性值,例如,受控对象的状态。

5) IO 控制对象指标

IO 控制对象指标是为 IO 控制对象单独分配的对象,用于评估 IO 控制对象,包含以下数据。

- (1) IO 控制对象的规范值。
- (2) 在开始、结束、执行等关键点,IO 控制对象的实际值。
- (3) 实际值与标准值的绝对偏差。
- (4) 偏差系数。

6) IO 过程评估指标

IO 过程评估指标用于 IO 执行过程的评估,例如,过程执行时间、执行时的资源包是否符合规范、执行结果评估(是否会在后续的步骤中出现错误)等,包含以下数据。

- (1) 指标的规范值。
- (2) 执行过程相应指标的实际值。
- (3) 实际值与规范值的偏差。
- (4) 偏差系数。

7) IO 分析决策指标

IO 分析决策指标是 IO 过程评估指标和 IO 控制对象指标的汇总。

8) IO 目标树

IO 目标树是一个数据集,包括以下内容。



(1) IO 目标与 IO 问题的连接结构。

(2) IO 目标中相应指标的规范值。

IO 目标树是一个树状结构,由以下部分组成。

(1) 一组连接 IO 目标与 IO 目标指标的组织。

(2) 标准值。

(3) 实际值。

(4) 标准值与实际值的偏差。

9) IO 资源包

IO 资源包是 IO 运行时使用资源的集合,包括以下内容。

(1) IO 资源列表。

(2) 资源使用的日志记录。

(3) 资源数量。

其中每个资源的特征,由以下参数描述。

(1) 时间信息。

(2) 资源规范描述。

(3) 资源状态。

10) IO 资源

IO 资源是关于描述所使用的资源,包括以下内容。

(1) 资源 ID。

(2) 资源状况。

(3) 资源优先级。

(4) 资源供应端。

(5) 资源可用性。

(6) 资源稀缺性。

5.2.3 多结构系统的功能管理

对系统进行管理的基础在于信息的处理,这种决策方式一般以信息流为基本单位。在多结构系统中需要同时考虑功能和过程两种信息流,传统的多结构系统中采用端到端的形式来组织信息流,称为基于信息流的组织。这样能够很好地把握信息流的数量和不同功能执行的频率,并且能够实现将某一个进程的信息流传输到其他进程。

然而,基于信息流的组织方式也存在一些不足,例如,需要考虑数据的同步,以及数据流传输过程中重复数据的堆积,还需要确定正在进行的数据流传输两个进

程之间的依赖关系,来判断两个进程是否会造成影响。此外,目前常用的数据收集和处理方法经常会受到管理组织的限制,在系统目标改变时需要耗费大量时间调整信息流的组织方式。

所以,如果要将基于信息流的组织应用于多结构系统的管理时,最好的方式是先在虚拟环境中构建数字孪生系统,在虚拟环境中测试完毕后,再在实际系统中进行部署。并且,数字孪生模型具有动态时间变化的特征,能够非常方便地展示复杂对象的活动过程。

为了在虚拟环境中描述信息流交互系统,提出了功能、功能组、过程、过程组、过程阶段等概念。在功能管理模型中,不同的功能之间可以互相转换,一个功能可以激活另一个功能或功能组,图 5.5 就描述了控制功能与数据传输功能间的转换。激活通过命令的方式来实现。

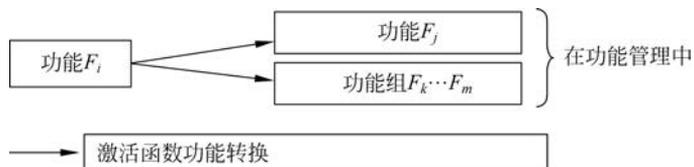


图 5.5 控制功能与数据传输功能间的转换

在虚拟环境下的功能管理模型中,数据传输过程如图 5.6 所示,描述了一个功能在激活或指示另一个过程或过程组的过程中,数据如何传输。

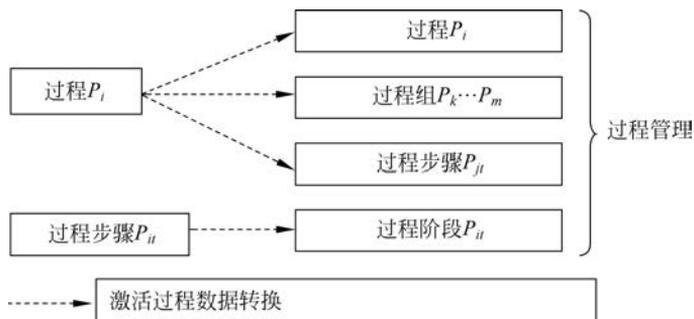


图 5.6 功能管理模型中的数据传输过程

在多结构系统中,过程指的是其在一定时期内执行的一组动作,能够通过一个或多个状态对象改变主题领域的状态,代表信息系统的输入。过程组是多个过程的集合。过程步骤由多个过程阶段组成,能够将生产资源转化为产品。

本章对单阶段和多阶段过程进行了区分,每个过程都可以按照预先确定的条件进行循环。单阶段过程包括一个对象的动作或几个对象相似动作的集合。多阶



段过程是指在几个连续或平行活动中进行的过程。多阶段过程可分为如下几类。

(1) 直接多阶段过程——包含若干连续或平行过程。

(2) 分支多阶段过程,按条件分支——设定一个条件,按照不同情景进行执行的过程;根据从一个阶段过渡到另一个阶段的设定条件,按照不同的情景执行过程。

(3) 有条件收敛的分支多阶段过程——在初始阶段的几个分支中实施的过程,并在指定条件下收敛到过程的单一阶段。

(4) 级联式多步骤流程——流程具有层次结构,在其结构的每一级都有规范。向较低或较高层次的过渡是由一个给定的条件进行的。

(5) 多阶段过程的集合——具有网络过程结构的过程,有条件地切换到相互关联的过程及其阶段的网络的不同部分。

(6) 为了进行过程数据转换,有必要设置连接过程、数据转移点(数据被转移到的过程阶段)、数据转移条件和规定、转移数据的结构和格式。

连接过程的内容如下。

(1) 数据传输的过程。

(2) 数据确认的过程。

(3) 当某些条件满足时,将数据从一个对象转移到另一个对象的过程。

流程功能管理的实施涉及功能管理数据流、流程控制以及流程和功能之间的管理转换和数据传输机制的使用(见图 5.7)。

5.2.4 多结构系统的信息流组织

为了有效管理多结构系统,必须要解决数据的收集、存储和信息流的转换问题,以及如何在项目中使用物联网、分布式数据存储技术(如“雾存储”“云存储”)等。

在面向功能的系统管理中,信息流的形成受到多系统元素管理系统的层次结构、实现的功能、多结构系统中不同元素包含的资源 and 执行时间等多方面的影响。多结构系统中的每个元素都应有单独的评估系统,用于性能的评估,评估系统应该包括以下内容。

(1) 评估函数及其参数。

(2) 功能之间的纵向和横向联系。

(3) 一组与性能相关的指标,用于性能评估。

(4) 执行结果的目标值及允许的偏差区间。

(5) 所获数据的来源和可靠程度。

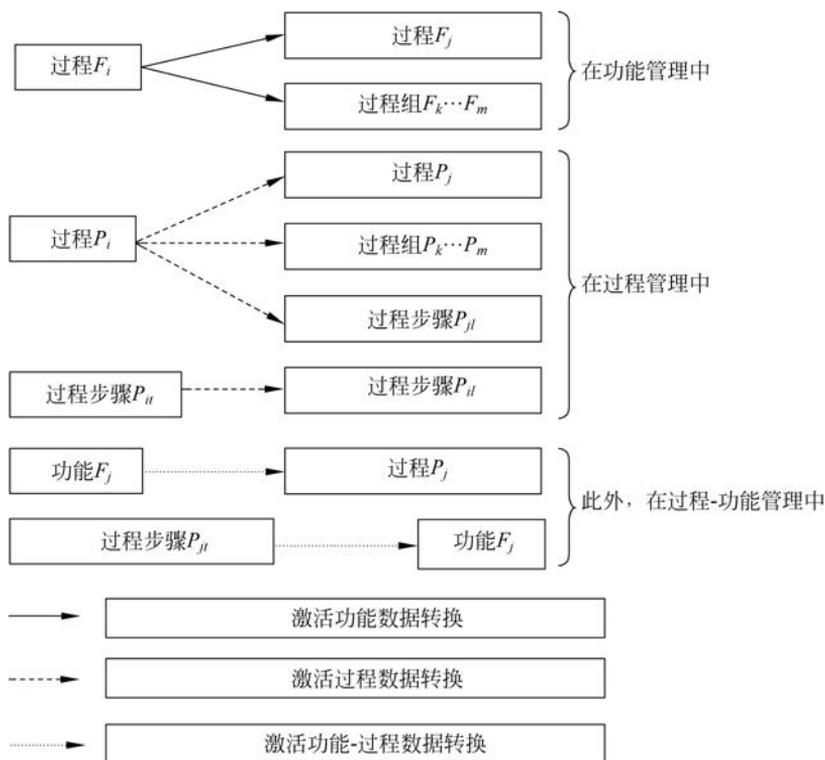


图 5.7 功能、流程、流程-功能和流程-功能的管理和数据转换

- (6) 数据的格式和获取时间。
- (7) 用于处理所接收信息的规则。
- (8) 需要数据流做出决策的管理人名单。

在面向过程的系统管理中,信息流是在多结构系统元素的端到端活动的数据库基础上形成的,包括以下内容。

- (1) 一组由一个或多个步骤组成的活动。
- (2) 活动之间的联系。
- (3) 步骤之间的联系。
- (4) 活动之间的联系条件。
- (5) 步骤之间的联系条件。
- (6) 用于评估某个互动或步骤的指标。
- (7) 活动要达成的目标。
- (8) 目标的规范值及允许的偏差区间。



- (9) 所获数据的来源和可靠程度。
- (10) 数据的格式和获取时间。
- (11) 用于数据处理的条件和规则。
- (12) 需要数据流做出决策的管理人名单。

以上两种系统管理方法都存在一些缺点。

面向功能的系统管理的缺点如下。

- (1) 数字化对象直接互相隔离,不存在交互。
- (2) 过于关注功能单元的目标,容易忽视多结构系统的目标。
- (3) 缺乏对多结构系统元件产品的外部消费者的定位。
- (4) 容易出现不同功能组件对资源的竞争。
- (5) 存在跨职能部门的竞争,以确定要解决的任务的优先次序。
- (6) 主要在职能决策层面对活动进行优化。

(7) 由于多结构系统元素分级管理结构的变化,或目标树的变化而导致的信息数据流结构重新安排复杂化。

面向过程的系统管理的缺点如下。

- (1) 系统结果高度依赖于执行过程。
- (2) 管理不同领域的流程直接的交互非常复杂。
- (3) 在过程和步骤之间的转换中,很容易出现错误。
- (4) 不同过程之间也存在对资源(如材料、资金、劳动力、时间)的竞争。

(5) 如果某一过程发生改变,就会导致整个系统的信息流产生变化,需要重新组织信息流。

为了消除上述缺点,在实际项目管理中常常结合两种方式共同管理系统。在系统中设置多个结点,用于系统中的数据交互。由于结点能够访问基于过程和基于功能的两种数据流,在结点内能够比较全面地了解系统运行的细节,比较适合进行决策。根据一个结点的重要程度,其包含的信息量也不同。结点在多结构系统中形成树状结构,叶子结点代表过程流的数据,分支代表不同功能的指标。

在两种结合的管理模式下,每个过程包含一组指标,用于描述管理对象的状态变化、涉及资源、运行结果、与目标结果的偏差等。对已执行完毕的过程进行结构化处理,然后按照完成时间、目标实现、管理对象、使用资源、偏差值等进行汇总,并将汇总后的数据转换为符合系统规则的格式,转换后的信息将被传送到结点当中。

结点提供不同信息流的访问切换,满足不同的需求。例如,如果需要考虑导致系统故障引发的系列事件,则需要访问过程数据流。如果需要分析生产过程中的单个流程,则需要访问功能数据流。在多结构系统中加入结点,能够在不改变原有

信息查询系统的情况下实现同时访问过程和功能信息,从而快速做出决策。

图 5.8 就展示了一个企业的流程到功能的管理系统。

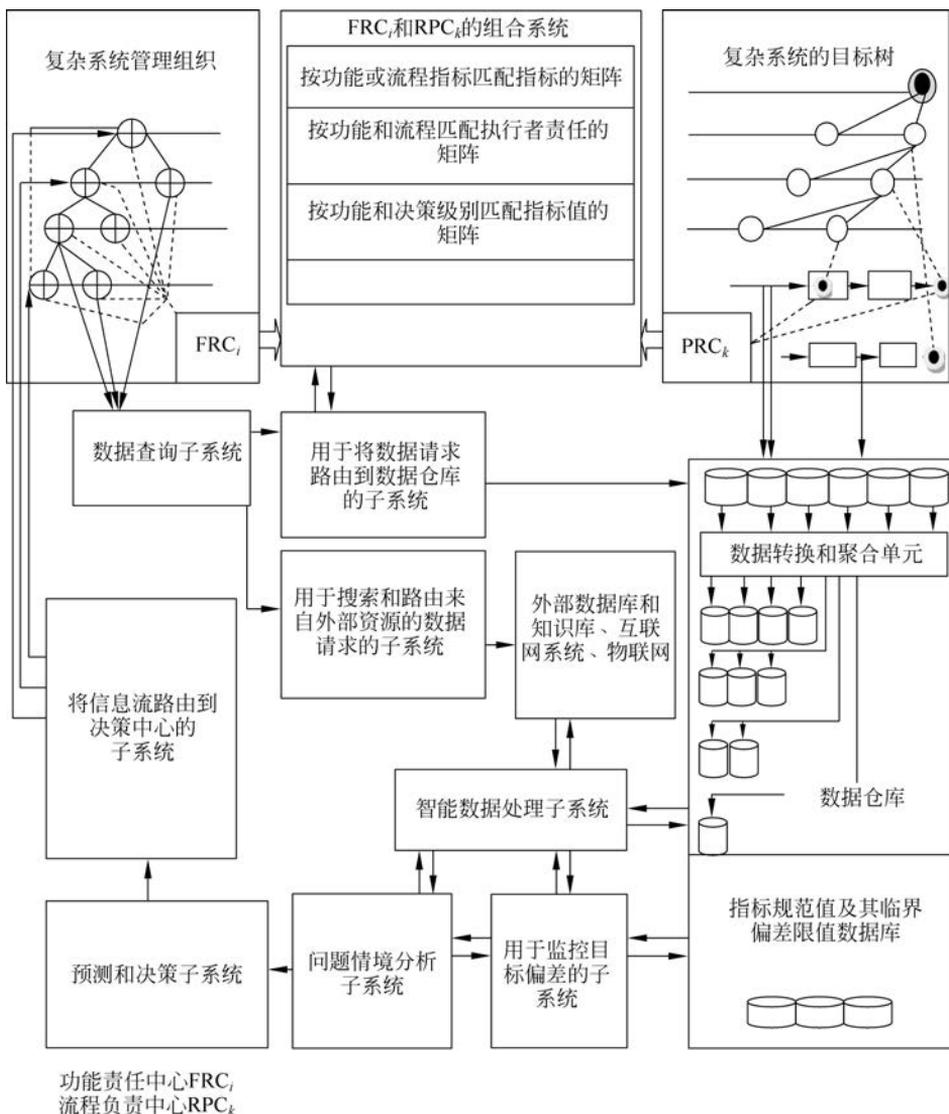


图 5.8 一个企业的流程到功能管理系统的概括图

5.2.5 多结构系统的组织和架构

对多结构系统进行管理意味着要将多结构系统作为一个整体,以协调其各个

组件。动态变化的外部环境、为实现既定目标分配和获取必要数量的资源等因素增加了多结构系统管理的复杂性,并且降低了管理效率。

多结构系统由多结构体(EPS)、多结构系统的第 i 个元素(EPS_i)和多结构系统元素之间的连接组成。多结构系统及多结构系统的元素之间会产生如下多种组合方式。

(1) 由单个元素组成的多结构系统,可以使用单个度量系统来评估其结果。

(2) 多元素的多结构系统,系统中每个元素与另一个多结构系统独立或弱相关。

(3) 多元素的多结构系统,系统中的一些元素是一个或多个多结构系统的代理。

(4) 多元素的多结构系统,系统中的一些元素可以形成独立的多结构系统或充当另一个多结构系统的元素,也可以是一个或多个多结构系统的代理。

多结构体是一个信息空间,分为内层和外层两个部分,其结构如图 5.9 所示,其中:

- 1 代表多结构体的内部集成层。
- 2 代表 EPS_i 原型。
- 3 代表 EPS_i 的元模型。
- 4 代表 EPS_i 目标树。
- 5 代表 EPS_i 指标集。
- 6 代表 EPS_i 指标与多结构体指标的一套规则和协议。
- 7 代表 EPS_i 多结构体外层的部分。

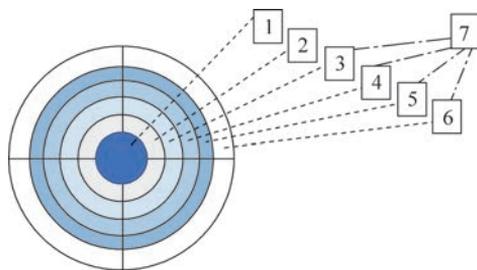


图 5.9 多结构体的结构

多结构体的外层包括以下部分。

(1) 多结构系统元素的原型,即主题领域的基本类。

(2) 多结构系统元素的元模型,包含一组信息对象和一组描述多结构系统元素主题领域的信息对象之间的关系组合。



- (3) 多结构系统元素的目标树。
- (4) 多结构系统元素的指标。
- (5) 多结构体的组成规则和协议。

多结构体的内层包括以下部分。

- (1) 多结构系统信息对象的属性列表。
- (2) 已建立的信息对象与多结构系统信息对象属性之间的关系列表。
- (3) 一组共线结构和共线关系,用于表示多结构体内层信息对象与外层信息对象的关系,并在逻辑上连接外层信息对象与多结构体的目标树。

- (4) 多结构体的目标树。
- (5) 多结构体的指标。

多结构体的协议和规则提供以下内容。

- (1) 信息流的形成方法。
- (2) 数据清理和验证方法。
- (3) 根据多结构系统元素的目标树,使用数据形成多结构体指标的方法。
- (4) 修改多结构体目标树中叶子结点的默认值的接口,用于控制多结构系统的运行。

多结构系统的信息流组织原理图如图 5.10 所示,其中:

- 1 代表多结构体中负责数据的采集、处理、存储和传输的结构。
 - 2 代表多结构体。
 - 3 代表过滤器,用于过滤来自多结构系统元素的数据,并根据数据类型进行分组和转换,方便在多结构体中执行操作。
 - 4 代表多结构系统元素中负责数据收集、处理、存储和传输的数据处理模块。
 - 5 代表多结构系统元素。
 - 6 代表多结构系统。
 - 7 代表多结构系统元素的数据流通道。
 - 8 代表双向信息连接。
 - 9 代表多结构系统的目标树和多结构系统元素的目标树之间的数据流通道。
- 将多结构体的目标树与多结构系统元素的目标树相连接,设置规范性指标,就能够评估多结构系统的有效性和多结构系统元素之间的连贯性。图 5.11 展示了多结构体的目标树和多结构系统元素的目标树之间的数据交互过程,其中:
- 7 代表多结构系统元素 GT_EPS_i 的目标树。
 - 8 代表多结构系统主体 GT_BPS 的目标树。
 - 9 代表多结构系统的目标树和多结构系统元素的目标树之间的数据流通道。

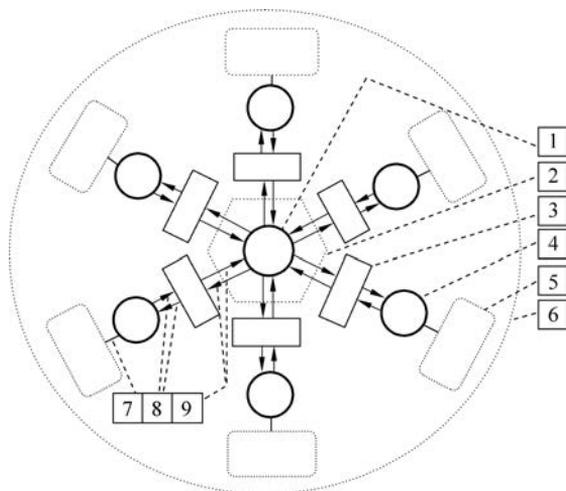


图 5.10 多结构系统的信息流组织原理结构图

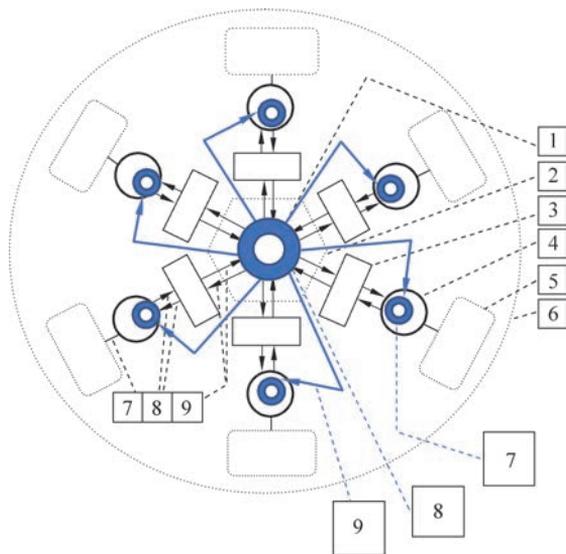


图 5.11 多结构体的目标树与多结构系统元素的目标树之间的信息交互

接下来,将介绍多结构体的目标树与多结构系统的元素、多结构体的度量系统和多结构系统的元素之间的信息交互,如图 5.12 所示,其中:

1 代表多结构系统元素 GT_EPS_i 的目标树。

2 代表多结构系统 MS_EPS_i 元素中负责数据收集、处理、存储和传输的数据处理模块。



3 代表多结构系统 V_EPS_i 元素中负责数据过滤、分组和转换的验证器。

4 代表多结构体 DT_EPS 的目标树。

5 代表多结构体 MS_EPS_i 中负责数据收集、处理、存储和传输的数据处理模块。

6 代表 DC_TCPP 多结构体的目标树和 MC_TCP 多结构体的数据处理模块的协调模块。

7 代表 DT_TC 多结构体的目标树和 DC_EPS_i 多结构系统元素的目标树的协调模块。

8 代表 MC_TCP 多结构体中负责数据收集、处理、存储和传输的数据处理模块与 MC_EPS_i 多结构体系元素中负责数据收集、处理、存储和传输的数据处理模块之间的双向数据连接。

9 代表从 DC_TCPS 多结构体的目标树到 DC_EPS_i 多结构系统的元素的目标树,以及从它们到 MC_EPS_i 多结构系统元素中负责数据收集、处理、存储和传输的数据处理模块的单向数据连接。

10 代表从 DT_EPS 主体的目标树到 MC_EPS 主体中负责数据收集、处理、存储和传输的数据处理模块的单向数据连接。

11 代表从 DC_TCPP 多结构体的目标树到 DC_EPS_i 多结构体元素的目标树的单向数据连接。

12 代表从多结构体系统到多结构体目标协调块 DC_EPS ,再到多结构体目标树 DC_EPS 的单向数据连接。

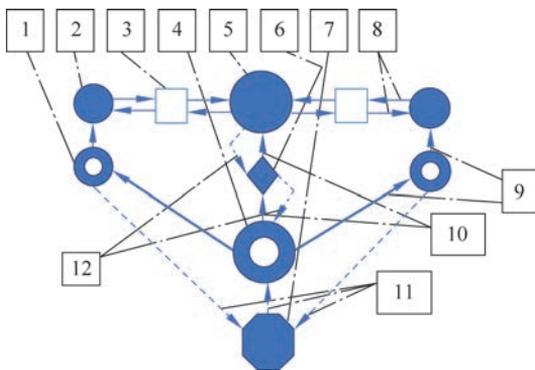


图 5.12 多结构体的目标树与多结构系统的元素、多结构体的度量系统和多结构系统的元素之间的信息交互示意图

整体流程主要是使用多结构体 MC_TC 的协调模块,连接 DC_TC 的目标树、



DC_TC 的目标树，并使用基于智能数据的处理方法对传入的数据进行分析处理，计算出理想状态下的目标值，并赋给目标树中的叶子结点。

接下来，将使用基于交互的数字孪生来管理多结构系统。

在这种情况下，多结构体(PBS)和多结构系统(EPS_i)的任何元素之间进行数据传输的方式如图 5.13 所示。为了方便之后叙述，多结构系统元素的数据使用 CD_EPS_i 表示，多结构系统元素的数字孪生使用 DT_EPS_i 表示，多结构体的数据使用 CD_TPS 表示，多结构体的数字孪生使用 DT_TPS 表示，多结构系统元素的度量标准使用 MS_EPS_i 表示，多结构系统元素的度量系统使用 MS_TCS 表示。

每个多结构系统的元素通过 CD_EPS_i 与 DT_TPS_i 进行连接。

根据多结构系统的目标和多结构系统的元素列表，形成多结构体的目标树。在多结构系统中，多结构体目标树的叶子结点能够映射到元素目标树的叶子结点。通过 MS_TCS 配置块和 MS_EPS 验证器，配置 MS_TCS 和 MS_EPS 之间的双向数据传输。使用 SCC 度量系统连接 SCC 数据仓库并进行数据分析。

接下来介绍如何建立多结构体的目标树和多结构系统元素的目标树。在设置多结构系统目标树(DC_PTS)的过程中，需要划分多结构系统的目标和子目标的层次结构以及它们之间的联系，并设置多结构体目标树叶子结点的规范值。该过程由以下几个模块组成。

- (1) 用于构建目标树并定义和分解规则和条件的模块。
- (2) 用规范值填充目标树叶子结点的模块。
- (3) 用于协调目标树叶子结点上的规范值的模块，确保所有叶子结点的值对系统来说是最优的。
- (4) 生成目标树及其版本库的模块。
- (5) 为 SCC 目标树的叶子结点建立方法库的模块。
- (6) 设置目标树加载到多结构体中的规则和条件的模块。

SST 树是根据多结构系统的总体目标构建的。系统的目标可能随时间变化，并取决于多结构系统所在的环境，例如，系统的可用资源。

将 SPS 目标树叶子的规范值加载到 SPS 度量系统中，分析对象状态指标和过程阶段参数的实际值的偏差的绝对值和相对值，并在 SPS 中进行决策，以确保多结构系统功能的有效性。

SCC 目标树的每个叶子对应于 SCC 度量系统的一个指标。目标设置块的 SPS 树是与多结构系统元素目标树设置块相关的设置块。

SST 目标树叶子的结构与目标树叶子的 SST 树的结构和值的匹配过程按照规定的方法进行，匹配的范围取决于：要匹配的对象复杂程度、要实现的值同步

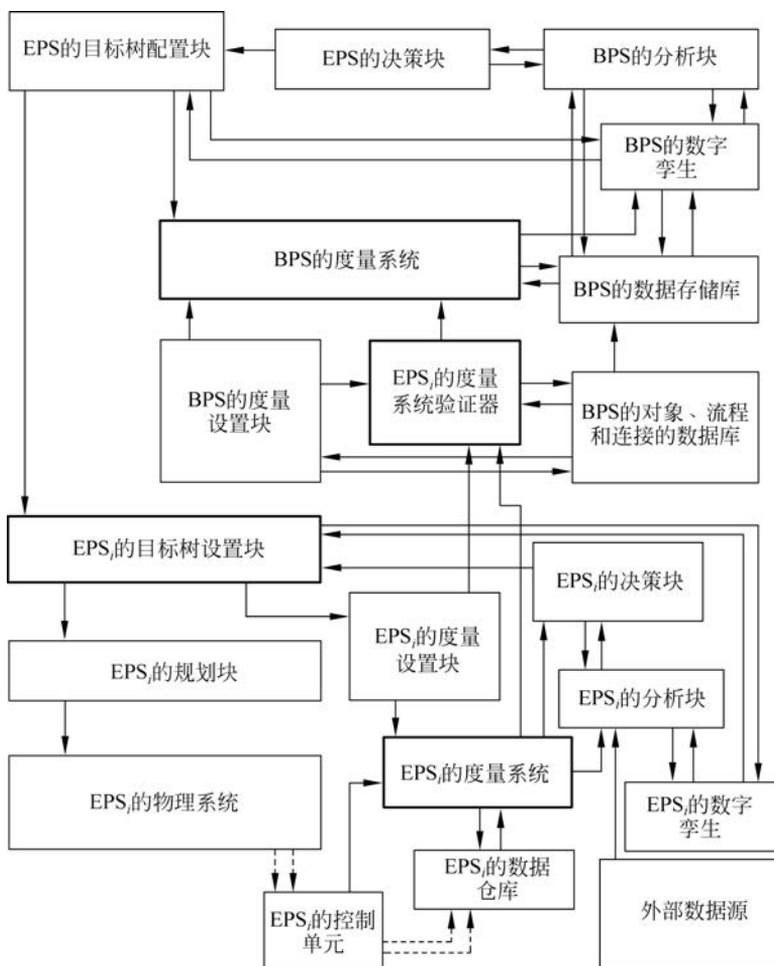


图 5.13 带数字孪生的多结构体与多结构系统元素直接的数据交互

的重要性、产生误差的影响。例如,可以根据商定的结果判断分配规范值;在计算的基础上,根据以往经验取得的成果进行统计;或者在应用遗传算法方法、遗传编程等方法的基础上形成。

在 TPS 的数字孪生执行的计算过程中,对 TPS 和 EPS 目标树的叶子的设定规范值的最佳值进行评估。

多结构系统的目标树设置块具有与 SCC 目标树设置块相似的结构和功能。多结构系统元素的目标树包含与多结构系统元素(EPS_i)对象的功能相对应的分支,在一个或多个进程执行过程中,其叶子结点的值代表属性的规范值。可以使用

这些规范值与实际值进行比较,得到误差。多结构系统中的每个对象可以对应目标树中的一个或多个叶子结点,即可以通过一个或多个指标来评估每个对象的状态。

目标树可由如下数据结构表示。

$$GP = (P, T), \text{其中}, P = \{P_0, P_1, \dots, P_{k-1}\}$$

其中:

P_k 代表元组的 EPS_i 指标(Name, NP_k)。

Name 是 FTE_i 指标的名称。

NP_k 代表 SPS_i 指标的规范值。

k 代表目标树叶数, $k = 1, \dots, m$ 。

m 代表目标树中的目标数量。

T 代表 SPS_i 指标之间的连接。

SPS 目标树不是一成不变的结构,可以随着多结构系统的目标及系统中各个元素的变化定期重组。

SPS 目标树(SO_TPS)和 EPS 目标树(SO_EPS)之间存在以下三种不同程度的关联。

(1) 完全关联。EPS 目标树是 SST 目标树的一个分支并且它是 SST 目标树的组成部分(见图 5.14)。

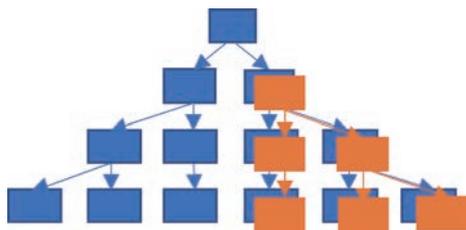


图 5.14 EPS 和 SSP 完全关联

(2) 部分关联。部分 EPS 目标树分支是 SST 目标树的一部分(见图 5.15)。

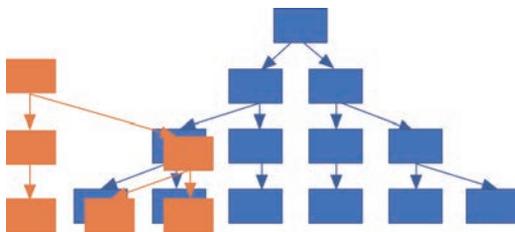


图 5.15 EPS 和 SST 部分关联

(3) 松散耦合。EPS 目标树的单个叶子节点是 SST 目标树的一部分(见图 5.16)。

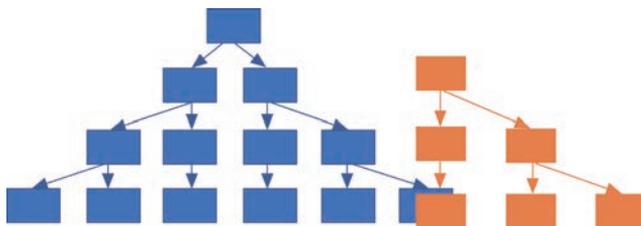


图 5.16 EPS 和 SST 松散耦合

(4) 无关联。EPS 目标树和 SST 目标树相互独立(见图 5.17)。

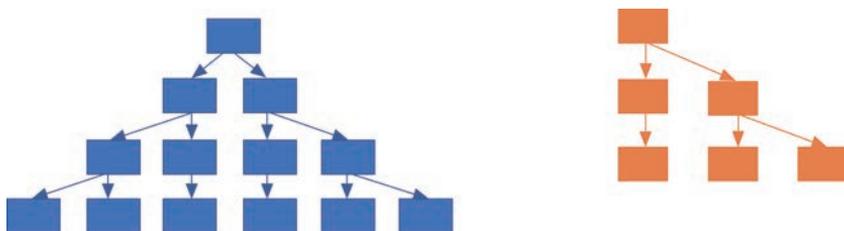


图 5.17 EPS 和 SST 无关联

5.2.6 多结构体度量系统和多结构系统元素

多结构体度量系统(MS_TCS)是负责数据提取、转换和传输的模块。度量系统包含各种聚合和转换的指标,能够反映多结构系统对象执行的状态,并依照多结构体的目标树管理对象。

度量系统的目的是形成度量来组织信号传输到对受控系统对象的属性变化有积极影响的点,以有效地实现其目标。度量由系统对象的一个或一组属性的状态的指标构成,这些指标影响受管控系统目标的实现,以及多结构体目标树的聚合和转换值。

根据自动执行的计划事实分析(指标的实际值和标准值的相关性)以及根据情景中心(为受控数据传输分配条件和路径的嵌入式模块)设置的条件进行过滤,利用在度量系统中产生的偏差值执行适当的决策。传输数据流的路由、信息呈现格式的选择、决策中心层次结构的级别(操作、战术、战略)以及控制测量的频率和详细程度均由 MS 块和 SCC 决策块之间的相互作用的规则确定。

根据 MS_TCS 的预定义规则,从场景数据库中选择传输规则,或者根据积累的经验 and 备选方案进行比较分析,由多结构体的数字孪生生成最优解。



TPS 度量系统包含以下模块。

1. 输入数据验证模块

表示从目标树向对象传输数据的过程，其中涉及实际值与规范值的比较方法，来计算它们的绝对和相对偏差。

度量系统包含的偏差类型包括以下内容。

- (1) 运行区域的偏差。
- (2) 决策区域的偏差。
- (3) 全局区域的偏差。

运行、决策和全局区域的偏差范围是依据控制对象设置的，用于评估对象属性的变化。根据消除偏差或纠正指标值的间隔值决定的级别（运行、决策或全局）来设置偏差的一致性规则。例如，如果指标值的偏差在操作控制区域的临界偏差范围内，则已发生偏差的信息将被传送到操作回路的各个中心，以用于对目标或控制主体进行决策并制定控制行动。

度量系统的指标在活跃和潜在两个状态切换。处于活跃状态的指标可以收集系统对象的数据并为系统决策提供依据，处于潜在状态的指标只收集数据并不影响系统决策。

2. 指标数据生成模块

在该模块中，使用指定的数据转换和聚合方法生成指标值。指标值是系统做出决策的重要依据。采集的实际值和指标值之间的关系如下。

- (1) 实际值等于指标值。
- (2) 实际值是一个或多个指标值的线性函数。
- (3) 实际值是一个或多个指标值的非线性函数。
- (4) 实际值是考虑到时间因素的指标值的聚合函数。

3. 指标值排序模块

根据指标值对系统的影响程度进行排序。首先将指标值进行汇总，按照偏差类型对指标值进行分类，再根据指标值对多结构系统目标的影响进行排序。

4. 数据传输规则及其应用条件模块

使用数据验证器建立 SCC 度量系统与其元素的度量系统之间的连接。数据验证器也可用于 MS_TCS 与其元素的每个 MC 之间的通信。

MS_TCS 中算法的执行过程如下。

- (1) 确定多结构系统管理的目标（例如，对于企业来说，通常包括减少生产成本、扩大市场占有率等）。
- (2) 确定处理对象的方法。



- (3) 设定指标并标明来源。
- (4) 确定指标与决策中心,即决策执行者。
- (5) 明确向指标与决策中心传输数据的条件和规则。
- (6) 建立运行、决策、全局控制区的指标规范值和临界偏差范围。
- (7) 制定规则来监督多结构系统目标的实现情况。

多结构体的目标树与多结构系统元素的目标树相关联,通过设置规范性指标控制多结构系统的元素,评估多结构系统的有效性 & 多结构系统元素的一致性。

5.2.7 多结构系统的管理系统

构建多结构系统管理系统的难点在于信息流的构建,使信息流在多结构体层面具有统一的结构和处理标准。

多结构系统的元素都有自己的一套评价标准和生命周期。在使用多个元素来衡量系统时,很可能出现评价同一个指标的属性名称不同、时间维度不同等问题。为了管理多结构体系统,需要制定统一的度量体系,保证数据的一致性,并采用统一的时间尺度。

系统规定每个指标在时间 t (其中, $t = 0, \dots, 1$) 被分解为以下 4 个部分。

- (1) 指标 FP_{tk} 的实际值。
- (2) 一组依赖于管理目标 NP_k 的规范值。
- (3) 指标的绝对偏差值 $AP_{tk} = NP_k - FP_{tk}$ 。
- (4) 指标的相对偏差值 $OR_{tk} = NP_k / FP_{tk}$ 。

除了对象的状态,其余每个指标都由以下特征描述。

- (1) 名称。
- (2) 计量单位。
- (3) 数据类型。

可以为指标分配辅助特征,对数据进行进一步的分析,例如:

- (1) 指标值的收敛方向,指示指标值向最佳结果靠近。
- (2) 属性(包括主属性、可分配属性、可计算属性)。

主属性表示另一个过程的指标值,可分配属性由决策的执行者分配。

可计算属性由公式或算法经过计算得到,可计算属性可能包含的内容如下。

- (1) 财务、客户、人员、技术、环境、社会经济等指标。
- (2) 指标的状态(活动的、潜在的)。
- (3) 指标的方向。
- (4) 数据生成时间。



- (5) 数据进入 MS_TCS 的时间。
- (6) 数据生成地点(地理坐标)。
- (7) 数据生成源。
- (8) 数据的准确性/可靠程度。

每个指标都有自己的度量系统,来估计多维空间中物体投影的参数(属性、属性值、属性值的变化对各种因素的依赖性)。度量系统允许两个对象直接关联,借此评估系统中各个元素之间的关系。

使用度量可以定性或定量地评估对象,以不同的视角查看对象的结构特征。

在对象的状态和时间的多维空间中定义对象的基本度量,是由描述产品生命周期轨迹的向量表示的。

因此,在空间的不同点上,物体的属性状态在某些度量上有投影。每个度量都以一组单位为特征。随着对象状态的变化,状态向量的每个值都将对应于它自己的一组投影。

度量可以是相关的,也可以是不相关的。一组相关度量由度量之间的关系定义。该组度量和相应的度量尺度产生了对象的投影,投影可以对应于对象的状态函数。

每个度量都有自己的单位系统。例如,长度可以按微米(μm)、毫米(mm)、厘米(cm)、分米(dm)、米(m)、千米(km)等尺度进行测量。

方法是对对象间转换、展示对象间属性之间关系的过程,包括达成目标的方法、细化对象的方法、识别对象属性的方法、评估对象的方法、指标测量方法等。

以上各个度量系统组件之间的关系如图 5.18 所示。每项指标都附属一个或多个责任中心。

为了较为清晰地识别数据之间(多结构系统的元素之间)的隐藏模式,可能要调查和分析信息对象的结构之间的关系,以便更为详细地描述对象。这也有助于捕获对象的变化以及系统管理目标的变化(目标树结构的变化,多结构系统元素目标的规范值和容忍范围的变化)。

由于信息物理系统管理的主要趋势是无人化管理及其数字孪生的功能化,因此推动了更多自动控制的元素及其在多结构系统中的应用。

5.2.8 多结构系统自动控制原理与技术

多结构系统可能包含以下行为:算法行为、反射行为、智能行为。如果不使用数字化对象或整个系统的数字孪生,就无法实现这些行为。

根据智能控制的行为模型类别,可以将控制机制分为以下三类。

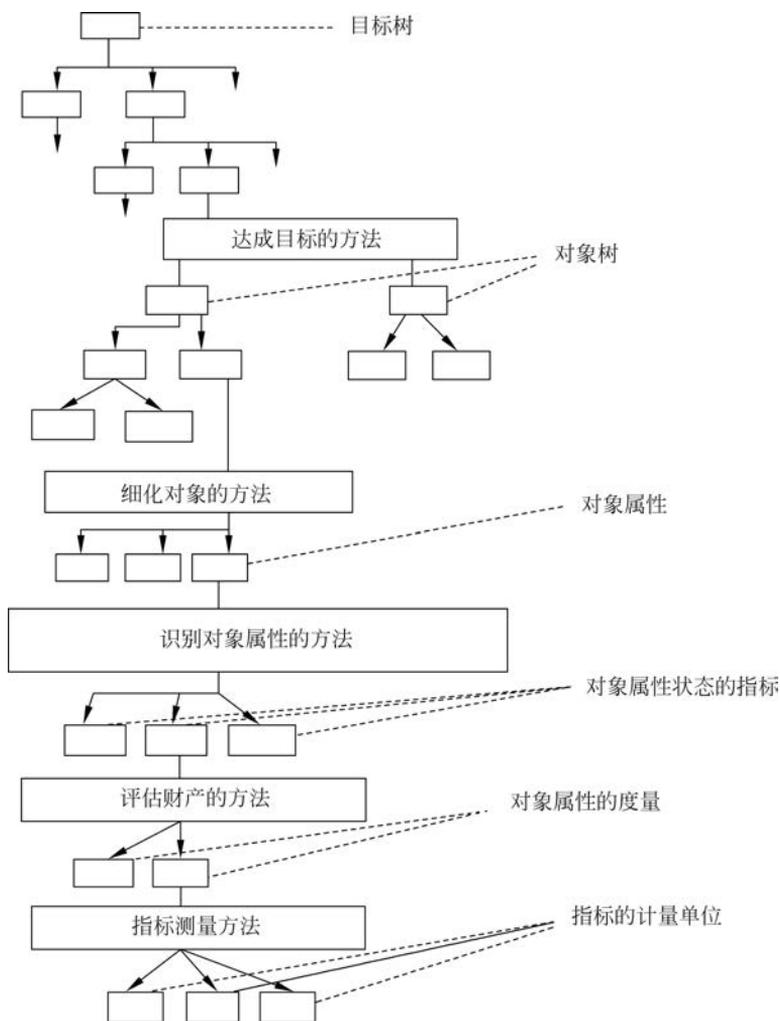


图 5.18 目标树、对象树、对象属性和指标之间的关系结构

- (1) 多结构系统元素的静止控制。
- (2) 多结构系统元素的触发控制。
- (3) 基于搜索过程的控制。

第一类系统控制方式通常是由固定的算法实现的。在系统中预先制定了许多用于解决特定问题的算法。

第二类系统控制方式利用算法和反射。反射指的是可以根据具体的情况来改变算法的执行结果。系统中也预设了许多算法,系统根据实际情况调整算法的条



件,让执行过程更加符合实际情况。第二类控制系统具有自动模式。

在第二类系统控制方式中,若要考虑多个对象之间的相互关系,还需要添加触发控制。对象之间的交互由业务逻辑定义,系统的行为是根据对象及其功能共同描述的。使用触发控制确保对象的运行结果与目标树上的值相同。

第三类系统控制方式综合上述两类控制方式,包含以下功能。

- (1) 对物理环境的状态进行评估。
- (2) 确定在当前条件下实现目标所需的属性。
- (3) 选择需要执行的进程,以确保系统具有所需的属性。
- (4) 执行选定的功能。
- (5) 选择影响数字化对象的方式并改变对象状态。
- (6) 寻找系统异常的解决方案,这样控制系统就可以在自动模式下运行。

多结构系统的自动控制系统必须具有以下特性:广泛的通信能力、解决复杂问题的能力、自学习能力等。这些能力是通过各种智能数据处理方法实现的,这些方法分为以下几类:关系、分类和编码、聚类、预测、一致模型、决策树等。表 5.3 展示了这些智能数据处理方法的行为,并进行评估。

在考虑智能控制系统时,需要区分以下组件:用户界面、数据库的接口、数据库、业务逻辑实现模块,它们可以基于不同类型的架构相互交互。

例如,认知图形系统作为一种智能系统,使用智能数据处理技术分析出关键数据,以便人类在准备管理决策时能快速捕获关键信息。管理决策就是该系统所包含的行为。在这样的系统中,只有用户界面具有智能行为,信息系统的其他组件可能不具备智能行为。

表 5.3 智能数据处理方法

行为模式	智能数据处理方法					
	关系	分类和编码	聚类	预测	一致模型	决策树
算法行为	—	3	34	24	24	24
反射性行为	124	124	12	124	124	124
智能行为	1234	1234	1234	234	1234	1234

其中:

- 1-具有良好的沟通技巧。
- 2-解决复杂的、形式化不佳的任务。
- 3-自学习。
- 4-适应性。

智能控制系统应该包含合适的信息处理软件,如数字孪生系统。这样的数字



孪生系统应该包含以下内容。

- (1) 系统的数字模型。
- (2) 从物联网、传感器、控制器、信息系统等收集数据。
- (3) 原始数据处理的验证器。目的是重新分配信息流,随后根据特定要求过滤数据,并将其传输到度量系统进行评估。
- (4) 智能数据处理模块。
- (5) 决策模块。基于先前积累的数据进行决策。
- (6) 搜索对系统影响较大的模块。

数字孪生的控制行为可能会影响目标的实现,所以必须在多维状态空间和多结构系统中考虑一组相互关联的对象。在这个过程中,可能会出现难以预先定义或难以使用数学模型描述的非线性过程。智能搜索可以通过基于多结构系统整体及系统中单个元素的振荡过程来执行。

5.2.9 信息物理系统的数学建模及其对数字孪生的管理

为了对信息物理系统进行建模,需要使用对象过程数据模型。该模型的特点是将系统表示为一组相互关联的对象,可以在各种过程中使用。模型的组成包括系统对象的元模型和对象之间关系的元模型。这些元模型反映了系统的各种操作。系统的动态模型利用系统运行中产生的数据流来建立。

网络物理系统的数字孪生包含以下三个层次。

第一个层次是系统对象和过程的元建模。

第二个层次是以目标树的形式对系统的目标进行建模,并形成一個结构模型,在对象和过程之间建立联系。

第三个层次是建立数字模型与物理信息系统的连接。通过物理信息系统到数字模型的双向数据传输,实现对系统的有效管理。

物理信息系统建立了目标树中的对象和指标之间的联系。物理信息系统中的数据来自物联网、控制器、传感器。考虑到目标树的结构,传入的数据将在数据库或数据仓库中存储。

数字孪生的信息组织结构如图 5.19 所示。

为了描述对象和过程的结构,下面将使用集合论和图论的方法,并对语义(谓词演算语言)进行建模。

信息物理系统对象的元模型将以代数系统的形式表示: $A = \langle \Theta, \Sigma_F, \Sigma_p \rangle$, 包括集合 Θ , 定义在集合 Θ 上的一组操作(函数) Σ_F 。

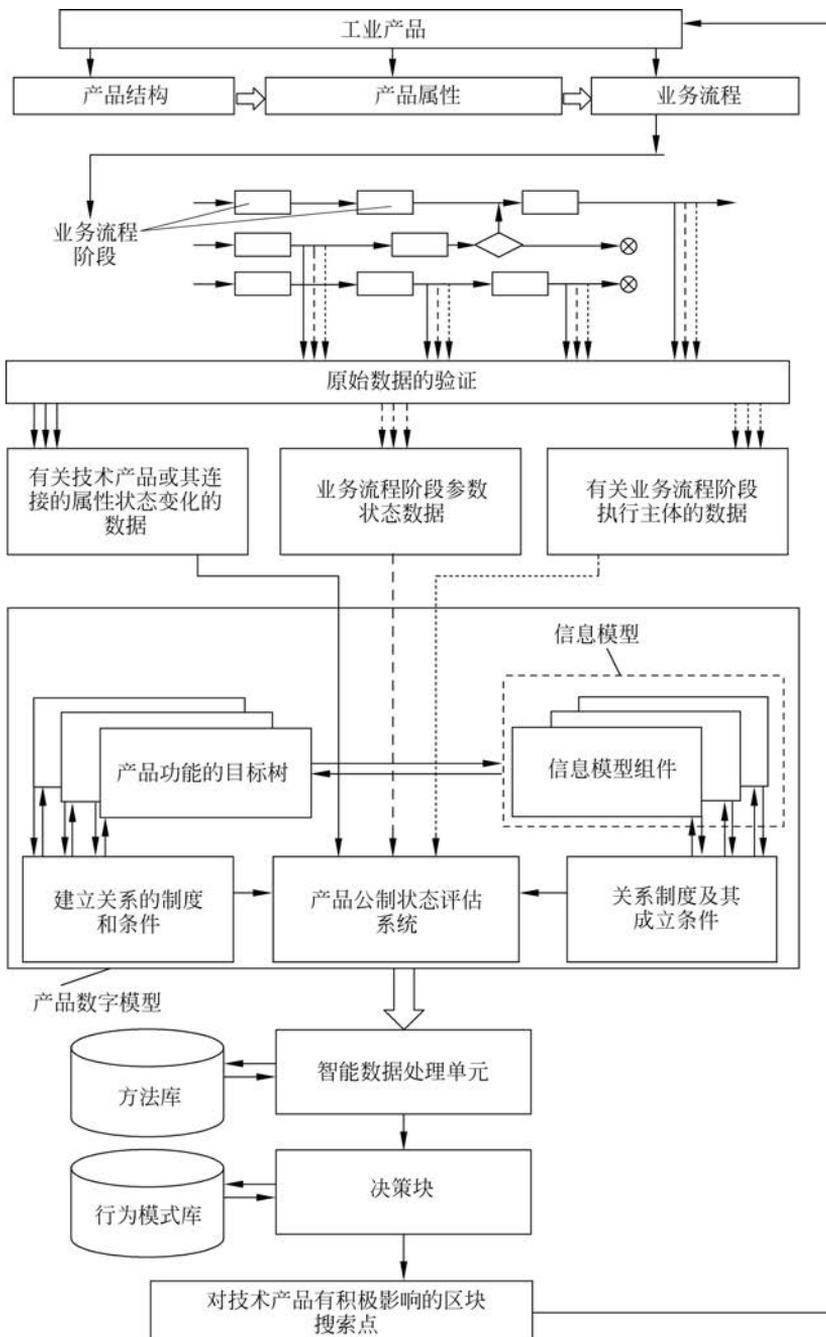


图 5.19 数字孪生的信息组织结构



$O = \{o_1, o_2, \dots, o_q\}$ 表示系统的对象集合, 其中, i 为对象的编号, $i = \overline{1, q}$, q 表示对象的数量。

$H = \{h_1, h_2, h_3, \dots, h_m\}$ 表示系统的基本属性集, 其中, h_j 表示属性的编码; $j = \overline{1, m}$, 其中, m 表示对象属性的数量。

$K = \{k_1, k_2, \dots, k_{15}\}$ 表示一组有限的对象类型, 其中, k_p 表示对象类型。

对象的属性列表如下。

- (1) 对象说明。
- (2) 控制对象。
- (3) 控制目标。
- (4) 控制对象属性状态的指示器。
- (5) 工艺/工艺阶段绩效指标。
- (6) 决策分析指标。
- (7) 目标实现指标(标准)。
- (8) 目标。
- (9) 目标树。
- (10) 工艺步骤的资源包。
- (11) 资源。
- (12) 决策中心树。
- (13) 职能责任中心。
- (14) 过程责任中心。

“线性列表”对象的定义如下。

$$O_i \subset \bigoplus \{H_m : m \in M, m_k = 1\}$$

其他类型的对象可能包括其他对象, 定义如下。

$$O_i \subset \bigoplus \{O_i, H_m : i \in Q, m \in M, m_k > 1\}$$

目标树由如下的图表示。

$$\bar{G}_A = (A, T), \quad A = \{A^0, A^1, \dots, A^{P-1}\},$$

其中, A^i 表示指标, 定义如下。

$$A^i \in A, \text{ and } A \subset O$$

$$A \subset \bigoplus \{O_i, H_m : i \in Q, m \in M, m_k \in [5, 6, 7, 8]\}$$

A^i 是一个元组, 结构为 (ID, Name, Type, O , H , NV, R), 其中:

ID 表示指标的标识符。

Name 表示指标名称。



Type 表示指标类型。

O 表示来自数字化结构的信息对象，包含两种类型：控制对象或控制目标。

H 表示信息对象(控制或管理对象)的属性。

NV 表示指标的规范值。

R 表示被影响对象。

T 表示指标和被影响对象之间的一组联系。

每个关系决定了指标的聚合方法，提供了指标价值和数字化对象目标的实现方式。

网络物理系统中出现的进程定义如下。

$\bar{G}_D = (D, Y)$ ，其中， $D = \{D^0, D^1, \dots, D^{P-1}\}$ ， D 是进程集， Y 是进程之间的链接集。

每个 D^i 过程，由一个图表示：

$G_R = (R, L)$ ，其中， $R = \{R^0, R^1, \dots, R^N\}$ 。

R 代表被影响对象的集合。

L 代表过程的被影响对象之间的一组链接。

被影响对象收集数据并通过物联网工具对其进行初始处理。

被影响对象由以下元组表示。

$R_j = (P_j, C_j, H, A)$ ，其中：

P_j 表示执行者。

C_j 表示信息对象。

H 表示在所描述的过程中处理信息对象的一组方法。

A 表示一组表征被影响对象工作特征的指标。在责任中心形成的指标由度量系统处理，度量系统将对象的状态传递给控制系统。每个指标都是一个信息对象，定义为：

$$A^i \in A, \quad \text{and } A \subset O$$

$$A \subset \bigoplus \{O_i, H_m : i \in Q, m \in M, m_k \in [5, 6, 7, 8]\}$$

数字化对象元建模最重要的阶段是建立目标树中的对象、流程和指标之间的连接，连接决定了数据库和数据仓库中数据流的来源。

数字化对象元建模的最终目标是建立一个数字模型的存储库，可以通过唯一标识符获得指定数字化对象的指标和关联对象。

过程 L_i 表示了不同阶段对象之间的连接，由以下元组表示。

$$L_i = (V_n, E_k, V_j, V_m, t, r)$$

其中：



V_n 代表对象标识符。

E_k 代表对象的属性标识符。

V_j 代表接收对象标识符。

V_m 代表接收对象属性标识符。

t 代表通信的时间间隔。

r 代表连接类型。

连接类型包括：对象-对象连接、对象-属性连接、属性-属性连接。本章使用一个机械元件来展示它们的功能(参见图 5.20)。

第一种连接发生在对象之间,例如,轴与轴承、外壳与轴承。

第二种连接发生在一个对象和另一个对象的属性之间,例如,轴承与轴承状态。

第三种连接发生在不同对象的属性之间,例如,轴承的内径与轴柱的直径。

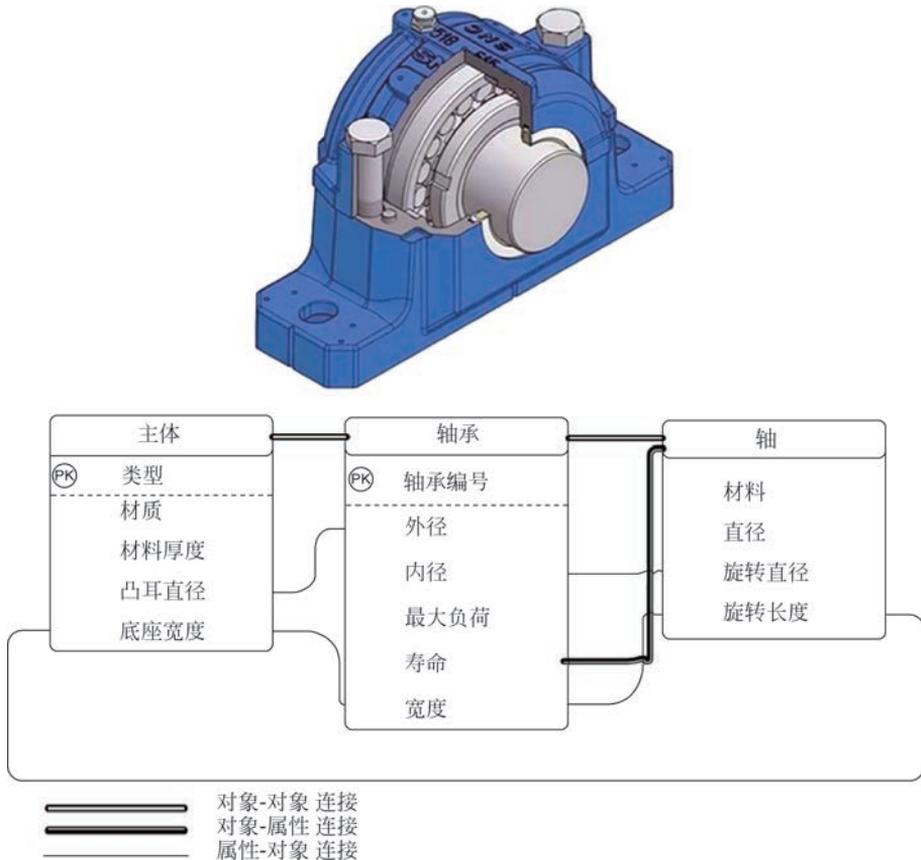


图 5.20 机械元件中的不同连接



随着控制系统的发展,系统中的信息对象能够得到越来越多的信息。信息对象能够根据不同的信息改变自身结构,信息对象结构的每一次变化会产生一个新版本,在不影响先前版本的情况下添加新的属性。信息对象的数据通常来自于物联网。

物联网包含传感器和控制器两种类型的设备。传感器可以读取数字化对象的参数并将数据传输到信息系统。控制器可以控制数字化对象的动作。来自物联网的数据通过联机分析处理(OLAP)的方式进行处理。

使用物联网为数字化对象赋值,就能使用数字化对象监视和控制物联网中的设备。可以通过数字孪生的软件平台实现这一过程。

数字孪生的软件平台必须包含的功能如下。

- (1) 提供物理对象的数字化对象。
- (2) 使用传感器跟踪物理对象的数据。
- (3) 根据用户需求优化物理对象的性能。

互联网架构委员会(IAB)发布了 RFC 7452,提出了四种用于物联网对象之间通信的模型。

(1) 对象到对象的通信。构建两个对象之间的无线通信,信息通过 ZigBee 或蓝牙等无线通信技术进行传输。

(2) 对象到云的通信。将云平台作为传感器和应用程序的中介。

(3) 对象到网关的通信。传感器收集的数据通过网络发送到服务平台。

(4) 内部数据共享对象。该模型的目的是实现用户与服务提供商之间的数据共享。服务供应商提供 API,允许其他用户访问。

IEEE 标准协会(IEEE-SA)提出了物联网对象交互的三层模型。

第 1 层,应用程序:提供应用程序和服务。

第 2 层,云计算:处理数据的服务平台。构建传感器、平台网络和数据处理软件之间的通信。

第 3 层,传感器网络:存储传感器以及它们之间生成的数据,并提供数据连接服务。

表 5.4 显示了当前数字孪生设计领域比较热门的软件解决方案,介绍了它们的用途和应用领域。

表 5.4 数字孪生的现代软件平台、其目的和应用范围

序号	平台名称	平台任务	应用领域
1	Predix(USA 美国)	工业物联网操作系统	工业企业
2	IoTIFY (Switzerland 瑞士)	物联网虚拟化平台,用于建设智能家居、智能邻里、智慧城市	通用(用于创建数字孪生的基本功能)



续表

序号	平台名称	平台任务	应用领域
3	Oracle IoT Production Monitoring Cloud (USA 美国)	该软件用于收集生产设备过程中的数据,并根据生产线和工厂定义,提供整体视图	工业企业
4	AKSELOS(UK 英国)	该平台旨在使用下一代建模技术保护关键基础设施	通用
5	ANSYS Twin Builder (USA 美国)	该软件旨在改善预测性维护的效果,以节省设备的维护成本,优化产品性能	通用
6	Autodesk Digital Twin (USA 美国)	该软件旨在创建物理资产的智能数字原型,并为其产品和现实世界中存在或将存在的对象提供大量数据	通用
7	Bosch IoT Suite(Germany 德国)	提供可靠、安全、经济高效和可扩展的互联网连接	通用
8	Cohesion(USA 美国)	楼宇管理应用程序,为物业提供智能管理并提供分析业务	通用
9	CONTACT Elements for IoT(USA 美国)	将物理设备连接到数字世界,为关键任务提供高质量以及可靠的服务	通用
10	Flutura Decision Science (USA 美国)	物联网软件平台,旨在为工程和能源领域实施新的工作模式	能源与机械工程
11	iLens(India 印度)	该软件专为工业物联网而设计,通过接口连接、外围计算、监控和预测分析等功能满足工业 4.0 的要求	能源和公用事业
12	Iotics(USA 美国)	通过做出最明智的决策来管理企业。Iotics 是唯一一个为整个企业环境提供决策的数据平台	通用
13	MachStatz(India 印度)	使用人工智能算法和机器学习提供工业问题解决方案。主要数据是从 LoRa、NB-IoT 和其他无线技术的智能设备收集的。能够提高生产效率并减少工业设备的停机时间	工业企业
14	nDimensional (USA 美国)	该软件是一个全周期的应用程序开发平台,使公司能够快速设计、开发和部署	业务流程
15	SAP Leonardo Internet of Things (Germany 德国)	将物联网设备嵌入公司核心业务的软件	业务流程

续表

序号	平台名称	平台任务	应用领域
16	ScaleOut Digital Twin Builder(USA 美国)	一个数字孪生平台,可跟踪每个数据源的动态信息并在服务器上处理,从而能够预测物理对象的未来行为	通用
17	Seebo(Israel 以色列)	将物联网建模、执行和行为分析工具整合到现有业务中	商业领域
18	ThingWorx Operator Advisor(USA 美国)	该平台通过为运营商提供来自智能设备的统一数据,帮助制造商提高运营效率。它可以连接到各种制造系统,包括 ERP、MES、PLM 和 CMMS	生产系统
19	XMPPro(USA 美国)	XMPRO 应用程序平台允许工程师和核心开发人员结合事件来检测、分析复杂应用程序。该平台结合了数字孪生技术、事件分析应用程序,为中小企业提供了解决实时业务问题所需的数字工具	通用
20	Tekvel Park (Russia 俄罗斯)	数字化发电站的生命周期管理系统,在项目的不同阶段(从设计到运营)为工程师提供支持	能源领域
21	AWS IoT Core(USA 美国)	一种托管云服务,允许连接的设备与云应用程序和其他设备简单安全地交互。该平台允许创建应用程序来收集、处理和分析连接设备生成的数据,并根据数据执行操作,无须管理任何基础设施	通用

5.2.10 数字化对象的数字孪生及其在多元结构系统中的实现

当数字孪生应用于多元结构系统的管理时,通常包含度量系统、智能数据处理模块和控制系统,用于收集、处理和组织系统中的数据。为了方便读者理解,本章将大量使用谓词演算语言。

度量系统在分析系统状态时,会根据公式处理初始数据,这些公式在指标偏离其标准值时取“真”值,同时添加以下附加属性集。

(1) IT,代表数据提供者,形式如下。

$$IT = \{IT^1, IT^2, IT^3, \dots, IT^n\}, \text{其中}, IT^i = (ID, Name, O, H, A), \text{其中:}$$

ID,代表物联网标识符。



Name,代表物联网名称。

O,代表数字化对象。

H,代表数字化对象的属性。

A,代表目标树的值。

(2) $DV = \{dv_1, dv_2, \dots, dv_d\}$,代表给定精度的日期与时间格式的日期集,其中, dv_i 是特定的时间点, $i = \overline{1, d}$,其中, d 代表给定时段内的秒数。该集合在受控对象生命周期的所有阶段都要存在。

(3) RD 代表物理系统的实际状态的数据集合,形式如下。

$RD = \{RD^1, RD^2, RD^3, \dots, RD^n\}$,

$RD^i = \{A, NV, PV, IT, DV, FP, AP, OP\}$,其中,A 表示指标,NV 表示标准值,PV 表示预测值,IT 表示数据源,DV 表示时间,FP 表示实际值,AP 表示绝对偏差($AP = NV - FP$),OP 表示偏差系数($OP = NV / FP$)。

指标的实际值会根据 DV 确定物理对象在给定时间点的状态而改变。

指标的预测值是根据物理系统的数字模型计算的。物理系统的数字模型建立在分析系统当中,该系统采用领域结构、人工神经网络和其他物理对象建模方法进行构建。

根据预测值和实际值的比较结果,从预定义的集合中获得决策。通过实际值和预测值的比较可以评估网络物理系统参数模型的准确性,并确定是否有必要对模型进行调整。例如,重新训练人工神经网络、改进物理对象的三维模型。

对象特征集合 Σ 的谓词表现形式如下。

$Pred = \{obj_type^{(2)}, prop_type^{(2)}, prop_name^{(2)}, obj_name^{(2)}, version^{(2)}, s_prop^{*(3)}, inserted_sd^{(4)}, inserted_cd^{(4)}, struct_oc^{(4)}, struct_om^{(4)}, uiio^{(5)}, struct_SBP^{(n1)}, step_SBP^{(n2)}\}$ 。

描述信息对象唯一标识符的谓词表现形式如下。

$uiio(O, N, H, O, Y, DT)$,其中, $Y \subset N$,表示包含在信息对象的唯一标识符中的属性的编号。

谓词是在以下集合上定义的。

$M^u = O \times N \times H \times O \times Y \times DT = \{(o_i, n, h_j, o_\varphi, y_\mu, dt) \mid o_i \in$

$O: (\exists b_w \in B, obj_name(o_i, b_i)),$

$n \in N, version(o_i, n), y_\mu \in N, h_j \in H: [(s_prop^*(o_i, n, h_j) \rightarrow \varphi = i) \vee$

$\vee \exists \overline{o_r} \in S^i: s_prop^*(o_r, n, h_j)]\}$

在定义了信息对象和指标后,接下来应该讨论这些对象在度量系统中为实现



目标的相互作用。

指定数据提供者的指标 a_j 的谓词形式为： $\text{Fact}(IT, A, O, H)$ ，其真值的谓词形式如下。

$$M^{\text{fact}} = A \times IT \times IT' \times \cdots \times IT' \times O \times H \supset \{(a_j, it_1, it_2, \dots, it_i, o, p) \mid a_j \in A, it_i \in IT, o \in O, h \in H\}$$

为了找到索引值 a_j 在时间 dv 的偏差，定义了一个谓词 $\text{dif}(A, IT, O, RD, DV)$ ，其真值的形式如下。

$$M^{\text{dif}} = A \times IT \times O \times RD \times DV \supset \{(a_j, it, o, fp, nv, dv) \mid a_j \in A, it \in IT, o \in O, fp \in RD, nv \in NV, fp \neq nv, dv \in DV\}$$

根据偏差的类型，控制系统将决策分为三个层面：操作、决策、全局。

在操作层面，对象和过程的结构不会改变，需要从已知集合中寻找偏差的原因，并选择行为模型，使系统恢复到稳定状态。

恢复系统稳定的方式主要有三种：维持平衡、触发、搜索。

在第一种方式下，多元结构体不会改变指标体系。

在第二种方式下，多元结构体的指标会随着业务流程的执行发生变化，由触发器进行控制。

在第三种方式下，通过调整多元结构体的目标树，建立新的多元结构体指标体系。

行为模型的选择取决于数字化对象的目标。当需要消除单个对象中单个指标的偏差时，使用算法行为模型。当指标包含多个数字化对象的属性，并且目标函数被定义为优化问题时，应用自反行为模型。

$UV = \{uv_1, uv_2, \dots, uv_v\}$ 表示管理影响的变量的集合，其中， uv_i 代表特定管理影响的变量， $i = \overline{1, v}$ ， v 代表管理影响的不同变量的数量。

$DQ = \{dq_1, dq_2, \dots, dq_q\}$ 表示偏差范围集，其中， dq_i 代表偏差的范围， $i = \overline{1, q}$ ， q 代表偏差范围的数量。

综上，过程监控可以通过集合 $\Theta = O \cup B \cup D \cup V$ 和 Σ 的代数系统 $A = \langle \Theta, \Sigma \rangle$ 来描述，其中： $O = TO + SZ + AR + ON + OK + OU + UV + DO$ 。

对系统行为建模的函数为： $T = f(A, \text{Cond}, D, Q)$ ，其中：

$A = \{A_k\}$ 代表目标树中的指标集。

$\text{Cond} = \{\text{Cond}_k\}$ 代表来自度量系统的指标。

$D = \{D_p\}$ 代表实现目标所需的过程集合。

$Q = \{0, 1\}$ 代表必要性系数。



不匹配参数集被定义为： $\text{Cond}(A, \text{RD}, \text{Dev})$ ，其中：

A 代表指标集。

RD 代表实际值集。

Dev 代表偏差集。

不匹配参数集将目标树中的指标集与度量系统中的实际值进行匹配。

集合 M 的定义如下。

$$M = A \times \text{PR} \times \text{Dev} \supset \{a_i, \text{pr}_j\} \mid \text{pr}_j \in \text{PR}, a_i \in A, \text{Dev} \neq \emptyset$$

可能的必要操作集定义如下。

$$\text{Act}(A, D, \text{RD}, \text{Dev})$$

必要操作集将过程集和责任中心分配给指标集，在这个过程中，责任中心中的指标会发生变化并出现偏差。

M 真值集的定义如下。

$$M = A \times \text{Dev} \times D \times R \supset \{a_i, d_j, r_k\} \mid a_i \in A, \text{Dev} \neq \emptyset, d_j \in D, r_k \in R$$

如果在操作层面无法做出决策，即任何管理决策都导致情况恶化，那么问题解决就转移到战术层面。在战术层面添加数字对象的新流程或功能尝试做出决策，物理对象的结构不变。如果无法在战术层面上做出决策，则制定管理决策的任务将转移到战略层面。如果未定义目标函数，则执行震荡算法(通过遍历目标树的活动影响点，搜索影响数字化对象的指标)来寻找解决方案。

震荡算法应该选择能够解决系统问题的指标。如果震荡算法搜索失败，目标树的任何一级都没有足够的数据来解决问题，则需要扩展对象的结构，引入新的属性并确定新的数据提供者。对象结构发生扩展的情况包括：设置新任务、正在进行的任务没有解决方案、解决方案不够有效。

搜索方法采用智能搜索算法，例如，多目标遗传算法，步骤如下。

第一步：定义问题。每个个体都是网络物理系统的虚拟模型。目标函数是实现目标树中指标的给定值。群体表示具有不同实际指标值的网络物理系统的虚拟模型集合。

第二步：形成初始群体。

$$\text{TW}(0) = \{\text{KPS}01, \text{KPS}02, \dots, \text{KPS}0N\}, \quad t = 0$$

第三步：按顺序执行循环步骤。

步骤 3.1 根据标准 $A = 1, \dots, k$ 计算每个个体的适合值。

步骤 3.2 对于 j 从 1 到 N/k ，从群体中选择一个个体进入中间群体。

步骤 3.3 如果 $l < k$ ，返回步骤 3.1。

第四步：从给定的 $N/2$ 对集合中随机形成适用于每一对集合以及其他遗传



算子的群体。例如，形成新的群体 $TW(t+1)$ 。

第五步： $t=t+1$ ，返回第三步。

在信息对象的生命周期中，其结构随着版本的变化而变得复杂。同时，这种变化不会干扰现有的业务逻辑流程。详细的目标树可以更准确地识别指标对系统目标实现的影响，并改进业务逻辑。

5.3 智慧能源多结构系统示例

目前，许多能源公司期望使用数字技术实现数字化转型。能源领域的数字化转型需要实施的内容如下。

- (1) 能源生产、运输和分配的自动管理。
- (2) 在能源生产过程中引入智能电子设备(IED)和信息系统。
- (3) 企业业务的数字化管理。
- (4) 为客户提供 IT 服务。
- (5) 保证网络安全。
- (6) 能够分析和整合公司的信息，并管理公司的智能系统。

能源领域的数字化转型技术可分为以下两类。

- (1) 经典数字化转型技术。
- (2) 工业 4.0 技术。

智能能源系统(IES)是能源领域应用较多的系统，包括如下几种。

- (1) 数字发电站，采用开放的自动化协议，无需操作人员即可自动运行。
- (2) 智能计量和能源监测系统。在能源设施中引入自动化业务的计量系统，减少能源损失，提高自动化水平。
- (3) 能够在应急线路上安装分布式设备，消除电缆网络可能产生的事故的系统，例如，无人机和便携式智能设备、综合管理信息系统。

在 IES 中应用的工业 4.0 技术包括：数字孪生、大数据、机器学习和区块链。

在能源领域实施 IED 可以实时控制和管理发电机组的状态、高压电网中的电力流动和配电网的能源损耗。能源领域中存在着许多电力设备，需要在 IED 中实现设备直接的信息交互，方便分析系统的协同效应。

智慧能源系统组件的管理系统确保系统各个组件可以在能源生产、运输、分配和消费等阶段协调工作，以较低的能源消耗实现目标。现有能源系统的缺点是网络采用分层控制结构，这可能会导致系统在生产、运输和分配能源的过程中产生冲突。

5.3.1 智能能源系统的组件

图 5.21 展示了 IES 组件之间信息的交互结构。

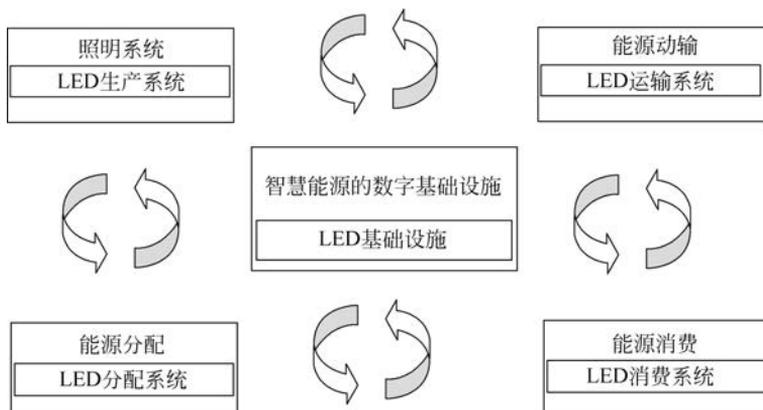


图 5.21 IES 组件之间信息的交互结构

IES 的组成及其信息交互如表 5.5 所示。

表 5.5 IES 的组成及其信息交互

IES 组件和它的目的	IEDs 组件	信息交互
能源生产系统 根据消费计划产生能量	测量涡轮部件和环境温度的数字传感器；空气湿度数字传感器；涡轮机运行数字传感器；监视和管理涡轮机运行的控制器	IES 软件和硬件综合管理系统之间的交互,以及数字基础设施与能源运输系统之间的交互
能源运输系统 通过高压输电线和供热网输送能量	检测结冰、输电线下垂、绝缘体击穿的数字传感器；无人机监测和网络状况诊断；数字视觉系统	能源运输系统中包含的 IES 软件和硬件管理系统之间的信息交互,以及数字基础设施与能源运输系统之间的交互
能源分配系统 用于城市或农村地区的电能和热能分配	自动化配电设备,用于检测结冰、输电线下垂、绝缘体击穿、管道破裂的数字传感器	能源分配系统中包含的 IES 软件和硬件控制综合体层面之间的交互,以及数字基础设施与能源运输系统之间的交互



续表

IES 组件和它的目的	IEDs 组件	信息交互
用户供电系统 用于人类居住场所以及社会和文化设施、工业厂房的供电和供热	用于监测网络开关设备触点的电压、短路、过热、管道压力的数字传感器；电表、热表、煤气表	提取有关系统状态、可用性和可控性的操作信息，以及预测短期、中期和长期的紧急情况
管理和通信系统 基础设施系统，旨在组织 IES 组件之间的信息交互，控制其操作模式	通信设备，包括主被动网络设备、有线和无线通信通道；管理能源生产、运输、分配和消费的软件和硬件系统	为 IES 组件的控制和管理提供信息交互服务
安全系统 基础设施系统，通过监测关键基础设施的状况，确保 IES 组件无事故运行	安全和火灾报警系统，自动灭火系统，烟雾/火灾探测器，玻璃破碎探测器，运动探测器，视频监控，软件信息安全系统	提供与关键基础设施和 IES 组件安全的信息交互

IES 的独特之处在于，它的基础设施由许多独立的组件组成，这些组件各司其职，但它们都专注于实现一个共同的目标，即为用户提供能源。系统组件对能源系统的运行效率和目标指标的实现有不同的影响。每个组件都有自己的业务流程、技术设备、设备的生命周期。因此，将 IES 建模为统一的系统是一项极其复杂和艰巨的任务。

任何复杂系统的包含特征之一为完整性，具体表现为系统的开放性。在扩展其功能或将其元素连接到新的数据流，可以提高实现目标的准确性并减少其资源消耗的规模。就 IES 而言，系统的目标旨在降低事故率、网络能源短缺和能源损失，以及提高用户能源供应的可靠性、连续性和安全性。

IES 由软件和硬件两个部分组成，能够收集、传输、处理和存储供电对象的信息。然而，如果将来自不同 IES 的数据整合到一个信息系统中，会出现系统运行不协调、网络流量过大、缺乏统一的信息交互标准等问题。

IES 中不允许组件之间产生竞争，这就导致每个组件会优先实现自己的目标，而不考虑系统总体的目标。为了防止这种情况发生，需要在系统中创立一个组织，定义每个组件的角色、通信渠道和权限，协调各个组件的运行，保证组件的运行结果向系统目标靠近。因此，建议将 IES 建模为一个多结构系统，系统中组件之间的交互是在考虑到能源的生产、运输、分配和消费等一系列过程中进行的。

5.3.2 IES 多结构系统

IES 多结构系统中的结构是根据许多功能组合成的对象，可以相互关联、相互



作用。它们之间的关系在各种外部和内部因素的影响下随时间动态变化。IES 多结构系统是开放的,具有与其他能源系统相互作用的特性。系统及其构成要素之间的相互作用类型取决于能源综合设备的技术和运作规则,而这些规则又由其系统目标决定。

多结构系统各要素指标的集合称为多结构指标体系,这也是度量系统的核心。度量系统的作用主要是对输入数据进行清理,使数据符合数字孪生系统中的格式。同时,建立多结构系统元素之间的双向连接,进行数据传输。

在 IES 多结构系统中,从物理环境中获取的数据通过通信信道传输到数字环境中。IES 的数字环境是对物理环境的模拟,通过分析、合成和处理真实对象和环境状态的数据,进行预测和建模。

在建立 IES 组件的数字模型时,通常使用分解法。因此,IES 多结构系统将由一组不同的数字模型组成,并由信息中心负责这些组件之间的信息流交互。

IES 的基本组件主要包括如下六类。

- (1) 能源生产子系统,根据能源市场需求生产能源。
- (2) 能源运输子系统,负责能源从发电设施到配电点的可靠传输。
- (3) 能源分配子系统,确保用户不间断和有保障的电力供应。
- (4) 能源消费子系统,为人类生活系统提供电力支持。
- (5) 安全和监测子系统,保障供电设施能安全运行。
- (6) 控制和通信子系统,组织所有 IES 组件之间的通信,以便在紧急情况下协调各组件运行。

图 5.22 展示了物理环境中 IES 多结构系统的组件和它们在数字环境中的数字孪生系统之间的交互过程。

IES 多结构系统中的交互过程能够解决系统中的不协调和冲突问题。在 IES 多结构系统中,能源的生产、运输、分配和消费过程具有较高的可观测性、可靠性和可控性。

IES 多结构系统中的相互作用是基于一种不同于分层系统中消除其组件之间不协调和冲突行为的方法,这使得能源的生产、运输、分配和消费具有更高水平的可观测性、可靠性和可控性。

5.3.3 IES 网络结构的管理

在能源公司的经营过程中,消费者能源供应的可靠性取决于能源生产和运输技术过程各个阶段的可观察性和可控性。IED 在运行中各组件之间缺乏交互,需要借鉴 IES 组件的管理观念。

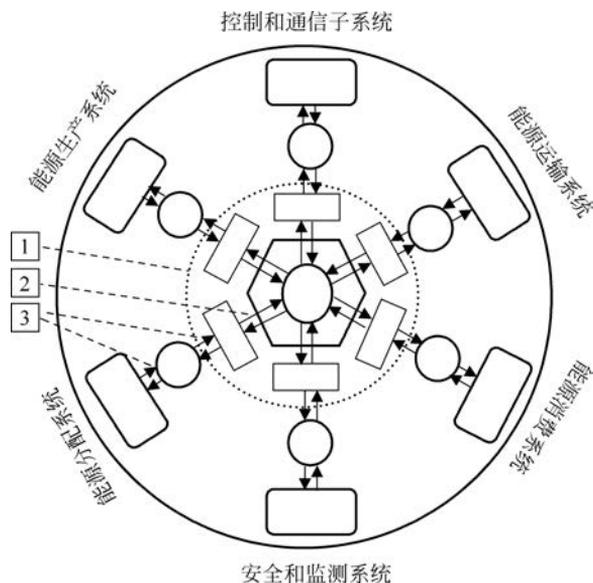


图 5.22 物理环境中 IES 多结构系统的组件和它们在数字环境中的数字孪生系统的交互过程
注：1 代表多结构系统物理和数字环境的区分边界；2、3 代表 IES 组件的双向连接

5.3.2 节介绍了基于 IES 多结构系统中的信息交互方法。IES 有一个协调中心来协调其各个子系统，并监测和分配资源，评估子系统间的协同效应。在介绍多结构 IES 组织方法之前，先介绍 IES 在能源生产、运输、分配和消耗过程中的管理理念。

图 5.23 显示了 IES 组件数字孪生的形成顺序，以及物理环境的真实对象与其在数字环境中的虚拟对象之间建立双向连接的顺序。

为了组织一个先进的 IES 管理系统，必须尽可能多地获得组件状态及其运行参数的原始信息。这些信息在能源的产生、运输、分配和消耗的过程中产生。同时，在 IES 的所有阶段，都有单独的 IED 过程，其中包含与系统其他组件进行信息交互所需的数据。为了分析来自 IED 的主要信息并实施分布式控制，需要将物理对象的数据转换到多结构系统的数字环境中。物理到虚拟世界的交互采用双向通信管理。

双向通信管理的特点是信号经过一个环形的结构，起点即是终点。多结构 IES 的通信管理是由多个组件组成的通信环结构。在这种情况下，迭代过程将持续进行，直到物理环境与虚拟环境中的参数达成一致，确保系统的正常运行。IES 数字孪生的数据交互过程如图 5.24 所示。

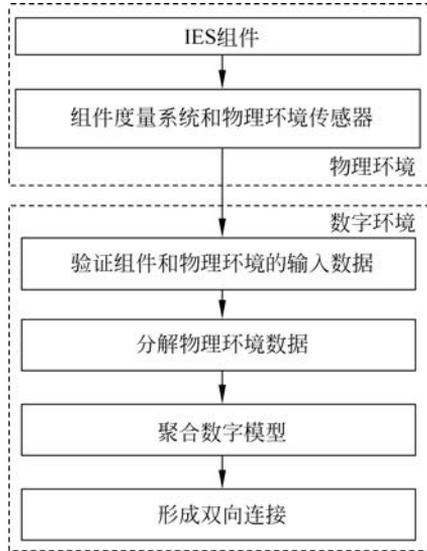


图 5.23 IES 组件数字孪生的形成顺序以及在真实和虚拟对象之间建立连接的顺序

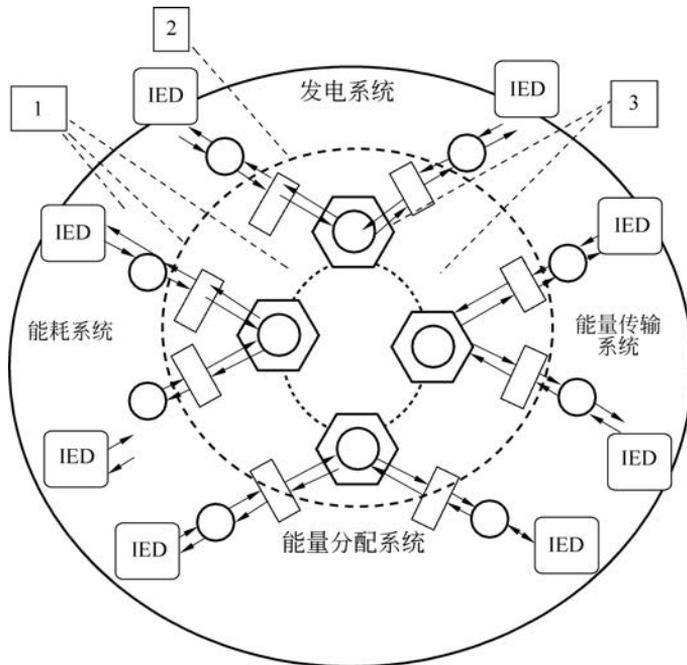


图 5.24 IES 数字孪生的数据交互过程

注：1 代表双向信息连接；2 代表多结构物理和数字环境的区分边界；3 代表多结构 IES 的主体

智能设备网络结构的管理是通过 IES 组件的数字孪生实现的。获得最优决策的过程是一个持续的过程，直到系统处于平衡状态。IES 的数字孪生是一个复杂的信息系统，它是结合人工智能、机器学习、大数据集群形成的数字模型。图 5.25 展示了物理环境中 IES 的组件与其在数字环境中的数字组件之间的交互顺序。

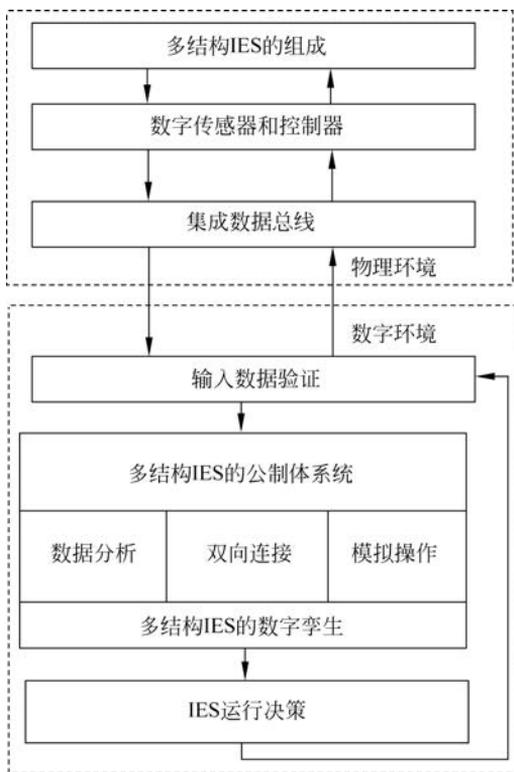


图 5.25 物理环境的 IES 组件与其在数字环境中的数字孪生的交互顺序

IES 使用集成总线从 IED 中收集数据，并在总线中进行信息整合。原始数据从物理环境到达数字环境之前，需要经过验证程序、消除噪声和异常数据。在数字环境中处理和分析数据。之后由数字孪生输出管理决策，并预测系统之后的运行状态。

5.4 智能家居多结构系统实例

智能家居包含多方面的内容，由许多不同物理特性、功能的组件构成。智能家居技术不仅可以让日常生活变得更轻松，还可以实现资源的最佳分配，减少能源

消耗。本节将智能家居视为一个多结构系统,作为多结构体系统实现的另一个案例。

5.4.1 智能家居的组成部分及其相互作用

智能家居包括高科技硬件和软件、系统组件的控制系统和数据安全系统。在设计初始阶段,智能家居多结构系统看起来很简单,但随着组件的增加,出现了许多来自自动化应用程序的复杂任务,对多结构系统的可靠性提出了额外的要求。

智能家居通常是指将以下组件集成到楼宇管理系统中的系统。

- (1) 建筑物的智能供电系统,提供不间断电源,能够自动切换到替代电源。
- (2) 使用自然光提供最低能源消耗的照明系统。
- (3) 保证室内温度和湿度恒定的气候系统。
- (4) 安全和监控系统,监控关键基础设施确保组件的无故障运行。
- (5) 管理和通信系统,负责管理所有电器、机械设备,组织信息交互网络。

智能家居各组件之间信息交互的结构如图 5.26 所示。

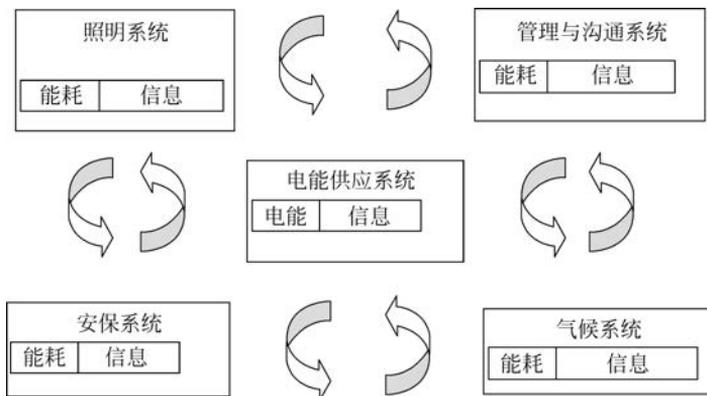


图 5.26 智能家居组件交互方案

每个组件都具有一定的属性(物理特性、能耗等)、功能用途(照明、供暖等)、能源消耗指标、管理效率等。为了管理这些组件,需要系统提供组件之间的信息交互方式。多结构内部各组件之间的信息交互以“能量与能量”“信息与信息”“能量与信息”和“信息与能量”的形式进行。智能家居的组件构成,以及能量与信息交互过程如表 5.6 所示。

表 5.6 智能家居的构成以及它们之间的信息交互

智能家居中的各个模块及其用途	组件中包含的设备	信息交互及功能
能源供应系统 为消费者提供可靠的电力供应	电源柜、备用电源、整流器、逆变器、电池、柴油发电机、电缆、电流和电压感知器、电表	为其他组件供电,以确保不间断供电 与能源系统交互能源的设备:热水锅炉、供水泵、火灾警报、通信、视频监控系统
照明系统 需要有效管理生活空间的照明	照明设备、运动传感器、光传感器、开关、调光器	使用集成在照明设备中的无线通信模块与监控和安全系统的组件进行信息交互
气候系统 需要在智能家居的房间内保持稳定气候	空调系统、送排风系统、电或水加热散热器、温度传感器、湿度传感器、漏水传感器、管道压力传感器、控制阀、水/气/热量表	与供电系统中的能源互动,用于中央供水供暖,自主供热 通过内置的无线通信模块和采暖通风空调技术设备的信息端口与监控和安全系统进行信息交互
安全和监控系统 需要确保智能家居各个组件无故障运行	安全和火灾报警系统、自动灭火系统、烟雾/火灾/气体探测器、开门器、玻璃破碎器、运动探测器、视频监控、服务器设备、数据集中器	与中央和自主供电系统进行能源交互 与多结构的所有组件进行信息交互,以整合有关系统状态、可用性和可控性的信息
管理和通信系统 提供智能家居设备的可控性,组织智能家居内外组件之间的信息交换	交换机、路由器、Wi-Fi 路由器、ZigBee 和 LoraWan 调制解调器、执行器、服务器设备	与中央和自主供电系统进行能源交互 与具有有线和无线通信模块的多结构所有组件进行信息交互,整合有关系统状态、可用性和可控性的信息

能源供应系统是智能家居中最主要的系统。该系统的关键特性是安全性、容错性、经济性和可控性。智能家居多结构的所有组件都包含电源开关,例如,安全和火灾警报、通信和视频监控系统以及技术设备。智能家居中的电线与一般电线的不同之处在于,其拥有额外的控制和管理电路,方便系统控制智能家居中的设备。

图 5.27 显示了物理环境中智能家居多结构组件与其在数字环境中的数字孪生之间的交互方案。方案中的智能家居多结构组件在能源和信息上相互连接,并与供电系统相连,可以通过有组织的通信渠道及时交换信息,生成对组件的控制信号。

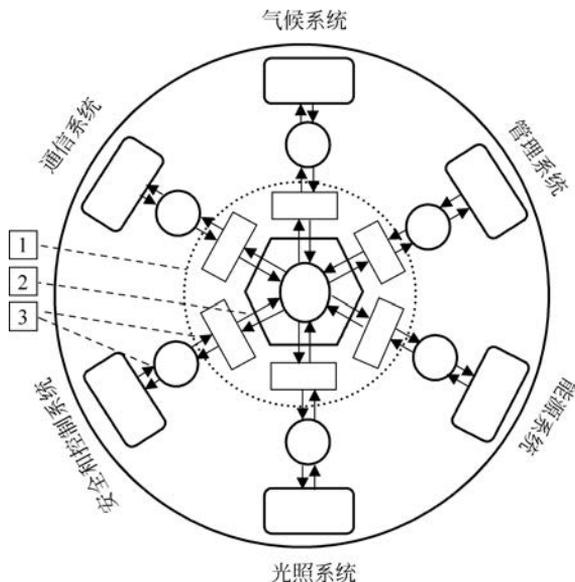


图 5.27 物理环境中智能家居多结构组件与其在数字环境中的数字孪生之间的交互方案

注: 1 代表多结构物理和数字环境的分离边界; 2、3 代表 IES 组件的双向连接信息交互

5.4.2 构建智能家居多结构的数字孪生

本章介绍创建智能家居多结构数字孪生的过程。图 5.28 展示了智能家居多结构系统数字孪生的数据流产生过程。

从图 5.28 可以看出,智能家居的数字孪生具有信息对象结构,这取决于其组件的分解方法,并在其系统的组合阶段确定。使用各种分解方法产生的多结构组件的信息对象在图 5.28 中标记为智能家居多结构数字孪生的投影。

多结构组件的一种分解方法可以形成数字孪生的多个投影。每个投影都描述了多结构组件的状态及其在物理环境交互期间对其他组件的影响。多结构的数字模型允许考虑多结构组件的相互影响。在多结构数字孪生的投影之间建立双向连接的过程称为模型版本的聚合,由此产生的信息模型称为具有双向连接的数字模型。

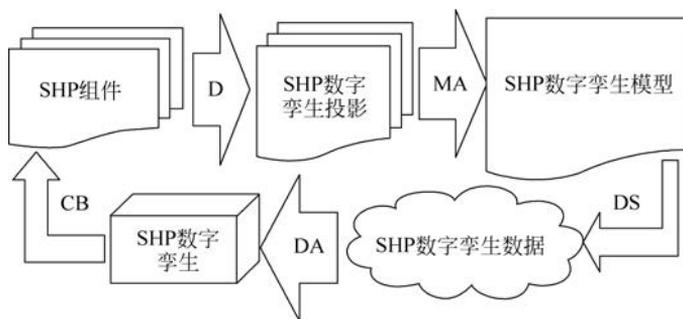


图 5.28 智能家居多结构系统数字孪生的数据流产生过程

智能家居多结构的数字化投影是在双向连接的多结构数字模型的基础上,通过填充一定的数据内容得到的,如组件的设计、功能的描述和交互模型等。用数据填充多结构的数字投影的特点是存在多结构的物理模型和功能模型的数据的集成。

智能家居的数字孪生是一个开放的动态系统,允许扩展智能家居的功能,并建立智能家居中组件与现实世界其他对象的连接。

图 5.29 展示了数字孪生的形成顺序以及物理环境的真实对象与数字环境中组件的数字孪生之间建立双向连接的顺序。

5.4.3 基于交互数字孪生的智能家居多结构管理系统

数字孪生在智能家居多结构管理系统中应用的特殊性在于它允许新的组件加入到系统当中。基于数字孪生的智能家居多结构管理系统的功能包括以下内容。

- (1) 验证来自多结构组件的信息数据流。
- (2) 合并通过不同分解方法获得的多结构数字孪生。
- (3) 实现智能家居组件的数字孪生之间的双向信息交互。
- (4) 多结构数字孪生的数据合成。
- (5) 聚合多结构数字孪生的数据模型。
- (6) 对多结构组件的操作模式进行模拟建模。
- (7) 分析智能家居组件的能源和信息连接。
- (8) 制定多结构组件的管理决策。

基于数字孪生的智能家居多结构管理功能图如图 5.30 所示。

在图 5.30 中,可以区分管理系统中包含的几个功能模块:输入数据的配置验

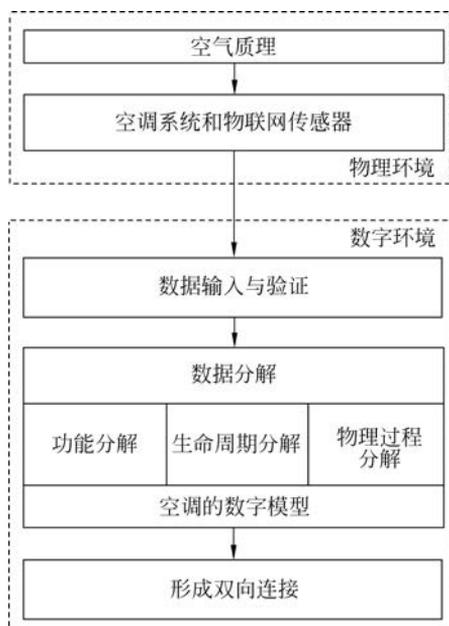


图 5.29 数字孪生的形成顺序以及真实和虚拟对象之间双向连接的建立

证模块、数据整合模块、信息互连模块、模拟模块、分析模块和决策模块。

智能家居多结构的数字孪生可用于多结构组件生命周期的所有阶段。例如，在设计阶段，可以创建所用组件的数字孪生模型，使用解决方案进行评估和选择，选择最合适的方案。

5.4.4 基于数字孪生技术的智能家居气候管理系统的实施

本节将以大学里的一个教室作为例子，在其中实施智能家居的气候管理系统。该教室能够容纳 30 名学生和教职员工，由多功能教室、更衣室、餐厅和心理疏导室组成。房间平面图如图 5.31 所示。

教室配备了现代空调、通风和暖气设备。在设计教室的气候系统时，计算了房间内的空气交换量、工程系统的热负荷，考虑了节能、噪声控制和防火措施。在对空调、通风和供暖设备进行调整时，并没有考虑设备间的影响。这是因为不同时间可能会有不同数量的学生、运行的设备（计算机、显示器等），无法确定一个固定的参数。表 5.7 列出了教室的气候系统中包含的设备及其参数。

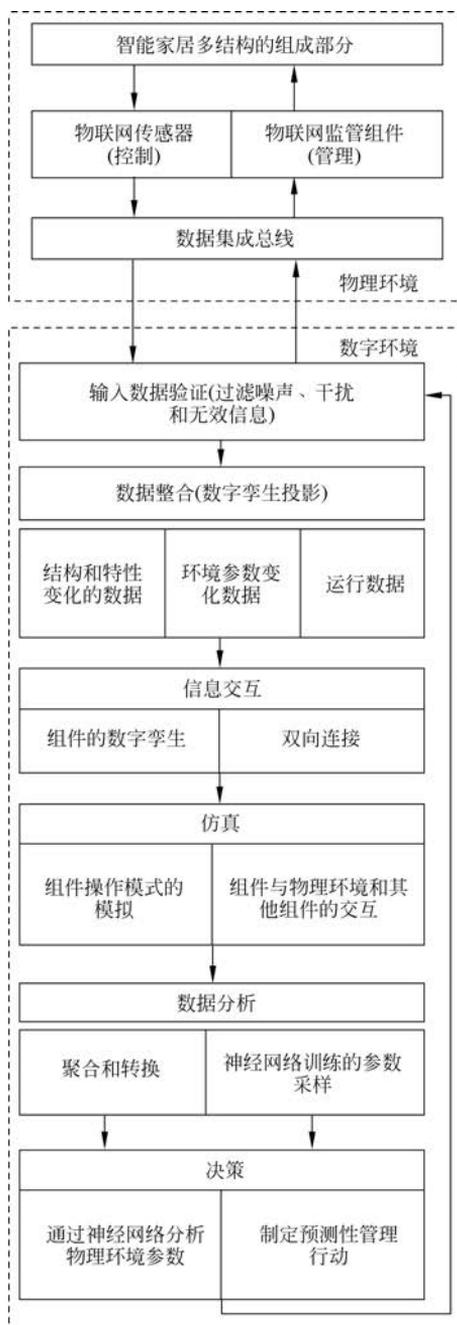


图 5.30 基于数字孪生的智能家居多结构管理功能图



续表

智能家居系统的名称及其用途	智能家居子系统名称及用途	智能家居设备名称及参数
		通风系统配置能够调节空气温度、湿度和空气质量参数,例如,气流速率、空气中的 O ₂ /CO ₂ 浓度。系统重点关注空气流量 (m ³ · h ⁻¹) 以及功率输出(kW)。 ③ 双管水加热系统,由 32 个恒温阀和双金属散热器组成。 配备供暖系统,可调节教室的温度和湿度,一般在冬季使用。系统将关注其功率输出(kW)。

智能家居的气候系统中的设备可以调节温度、湿度、气流速率和空气中 CO₂ 浓度。然而,由于缺乏协调中心,无法从全局调整室内气候,可能导致设备运行不协调,增加能源消耗。为了避免这种情况,在设备部署完毕后,还需要执行以下步骤。

- (1) 分析和构建当前房间的环境指标。
- (2) 根据指标对室内气候的影响程度对指标进行排名。
- (3) 制定一套解决问题的备选方案。

(4) 选择管理系统的软件和技术方法,以便对物理环境进行监测,并对控制设备执行操作。

为了评估智能家居气候系统的管理效果,需要对其功能进行评估。首先收集智能家居气候系统在运行时各个设备产生的数据,送入系统的目标树进行评估,目标树的结构如图 5.32 所示。目标树的第一层是维持房间舒适。目标树的第二层由三个分支组成,包括维持温度、湿度以及室内空气中的 CO₂ 浓度。目标树的第三层为系统输入属性的指标,包含规范(NL)、警告(WL)和紧急(EL)三个级别。

为了衡量来自物联网设备和远程传感器的数据,需要建立度量系统。系统必须能够接收、处理和存储信息,以做出决策。度量系统的结果与形成的目标树相对应。度量系统的功能包括以下内容。

- (1) 通过有线和无线通信渠道接收房间空气中的温度、湿度和 CO₂ 浓度信息。
- (2) 清除不可靠数据和冗余数据。
- (3) 监测当前环境状态是否符合要求。
- (4) 存储环境状态的信息。

为了构建智能家居气候系统的预测系统,通常会用到人工神经网络。预测系

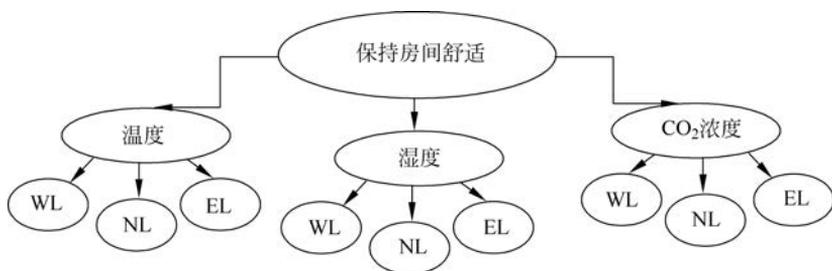


图 5.32 智能家居气候系统的目标树

注: WL 为警告级别, NL 为规范级别, EL 为紧急级别

统在神经网络训练阶段适应系统数据,提高了控制过程的准确性。

本章收集了设备运行中产生的 500 条数据作为训练样本,选取了空气中温度、湿度和 CO_2 浓度作为训练特征,特征的取值范围为:温度 $18\sim 29^\circ\text{C}$,湿度 $20\%\sim 80\%$, CO_2 浓度 $0.01\%\sim 3\%$ 。网络训练完成后,随机抽取训练样本中 15% 的数据作为测试样本,来验证网络的预测精度。

另外,实验使用 FuzzyLogica 工具包对神经网络结构进行了可视化展示,如图 5.33 所示。网络使用一阶 Sugeno 算法,采用多层感知器处理房间空气中的温度、湿度和 CO_2 浓度,规则由线性依赖关系描述。

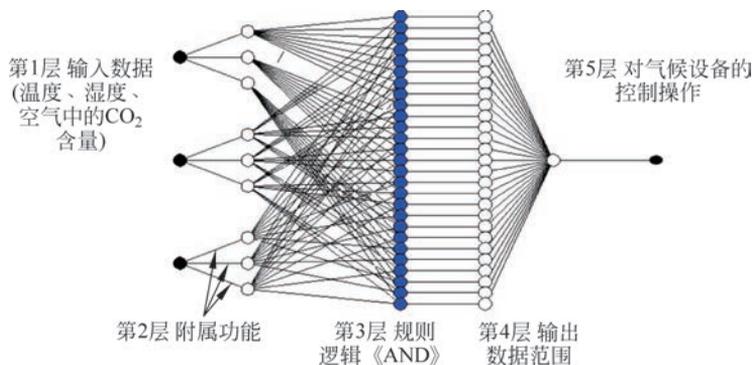


图 5.33 用于室内气候预测的神经网络结构

从图 5.33 可以看出,神经网络由 5 层组成,每层解决一个具体问题。第一层负责网络的输入,在本案例中输入参数是房间空气中的温度、湿度和 CO_2 浓度。第二层为附属功能,本案例中用于构建输入参数的模糊集。第三层根据逻辑“与”的规则,将模糊数据分配到位于第四层的 27 组输出参数中。第四层包括所有样本的输出数据,根据神经网络的输出条件对结果进行处理。结果汇总到第五层输出。

下面来具体讲述每一层的任务和运行结果。

第一层接收空气中的温度、湿度和 CO₂ 浓度数据，这些数据是从房间的传感器得到的。在网络的训练过程中，训练样本取自原始数据，从中提取训练网络所需要的特征(温度、湿度和 CO₂ 浓度)。

第二层使用成员函数，将输入特征划分到不同的模糊集中。输入数据和模糊集之间的匹配过程如图 5.34 所示。

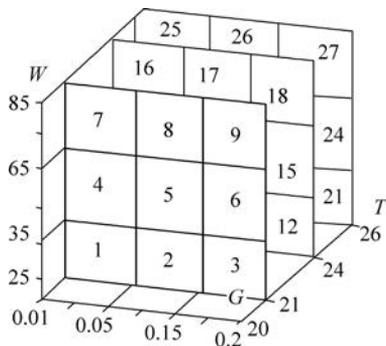


图 5.34 输入数据和模糊集之间的匹配过程

温度和湿度的模糊集定义如图 5.35 和图 5.36 所示。

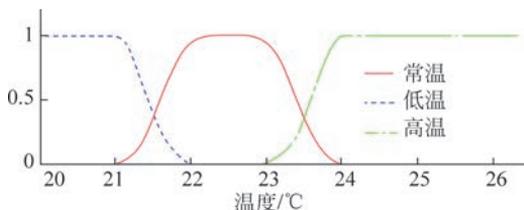


图 5.35 室内温度模糊集定义

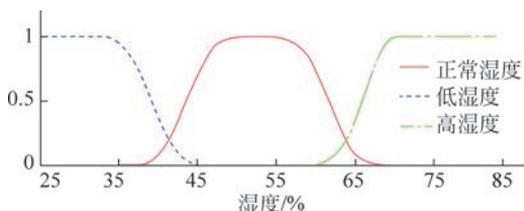


图 5.36 室内湿度模糊集定义

根据图 5.35 和图 5.36 中的模糊集定义，温度和湿度的计算公式如式(5.1)~式(5.6)所示。



$$\mu_{t1}(T) = \begin{cases} e^{-(T-22.5)^4}, & 21 < T < 24 \\ 0, & T \leq 21, T \geq 24 \end{cases} \quad (\text{常温}) \quad (5.1)$$

$$\mu_{t2}(T) = \begin{cases} 1, & 18 \leq T \leq 21 \\ e^{-\left(\frac{T-21}{0.5}\right)^2}, & 21 < T < 22 \\ 0, & T \geq 22 \end{cases} \quad (\text{低温}) \quad (5.2)$$

$$\mu_{t3}(T) = \begin{cases} 1, & T > 24 \\ e^{-\left(\frac{T-24}{0.5}\right)^2}, & 23 < T < 24 \\ 0, & T < 23 \end{cases} \quad (\text{高温}) \quad (5.3)$$

$$\mu_{w1}(W) = \begin{cases} e^{-(W-22.5)^4}, & 35 < W < 70 \\ 0, & W \leq 35, W \geq 70 \end{cases} \quad (\text{正常湿度}) \quad (5.4)$$

$$\mu_{w2}(W) = \begin{cases} 1, & W \leq 35 \\ e^{-\left(\frac{W-35}{2}\right)^4}, & 35 < W < 45 \\ 0, & W \geq 45 \end{cases} \quad (\text{低湿度}) \quad (5.5)$$

$$\mu_{w3}(W) = \begin{cases} 1, & W > 70 \\ e^{-(W-70)^2}, & 60 < W < 70 \\ 0, & W \leq 60 \end{cases} \quad (\text{高湿度}) \quad (5.6)$$

CO₂ 浓度的模糊集定义如图 5.37 所示。

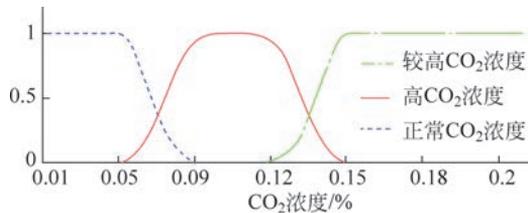


图 5.37 CO₂ 浓度模糊集定义

CO₂ 浓度的计算公式如式(5.7)~式(5.9)所示。

$$\mu_{c1}(C) = \begin{cases} e^{-\left(\frac{C-0.105}{2}\right)^4}, & 0.05 < C < 0.15 \\ 0, & C \leq 0.05, C \geq 0.15 \end{cases} \quad (\text{较高 CO}_2 \text{ 浓度}) \quad (5.7)$$

$$\mu_{c2}(C) = \begin{cases} 1, & C \leq 0.05 \\ e^{-\left(\frac{C-0.05}{2}\right)^4}, & 0.05 < C < 0.09 \quad (\text{高 CO}_2 \text{ 浓度}) \\ 0, & C \geq 0.09 \end{cases} \quad (5.8)$$

$$\mu_{c3}(C) = \begin{cases} 1, & C > 0.15 \\ e^{-(C-0.15)^2}, & 0.12 < C < 0.15 \quad (\text{正常 CO}_2 \text{ 浓度}) \\ 0, & C \leq 0.12 \end{cases} \quad (5.9)$$

神经网络使用高斯函数作为成员函数，其中心和变化 σ 的计算公式如式(5.10)所示。

$$\mu(x) = \exp\left[-\left(\frac{x-c}{\sigma}\right)^{2b}\right] \quad (5.10)$$

由温度、湿度和 CO₂ 浓度组成的参数集被分为 27 组，并为每组输入模糊集设定输出参数的变化范围。

第三层首先建立一个训练集。在建立输入与输出的匹配规则之前，需要先考虑控制设备运行模式之间的联系；如输出功率、空气流速与房间空气中的温度、湿度和 CO₂ 浓度等参数之间的联系。这就需要收集设备正常运行时的数据范围，以便在保持空气质量的同时维持房间的正常温度。

表 5.8 总结了在温度、湿度和 CO₂ 浓度特征在空调不同的运行模式中的推荐值。接下来，将以空调作为主体对神经网络进行描述。

表 5.8 房间的环境参数对空调运行模式的建议

编号	房间的环境参数			空调运行模式(建议值)		
	温度 T	湿度 W	CO ₂ 浓度 G	输出功率 (夏季)/kW	输出功率 (冬季)/kW	气流速度 /m ³ · h ⁻¹
1	T_1	W_1	G_1	0.5~1	7~8	1900~2150
2	T_1	W_1	G_2	1~1.5	8~9	2150~2350
3	T_1	W_1	G_3	1.5~2	9~10	2350~2650
4	T_1	W_2	G_1	2.5~3.5	9.5~11	2150~2350
5	T_1	W_2	G_2	3.5~4	11~12	2350~2650
6	T_1	W_2	G_3	4~5	12~13	2650~2900
7	T_1	W_3	G_1	1~1.5	10.5~12	2350~2650
8	T_1	W_3	G_2	1.5~2	12~13	2650~2900
9	T_1	W_3	G_3	2~2.5	13~14	2900~3100
10	T_2	W_1	G_1	2~4	1~3	1600~1800
11	T_2	W_1	G_2	4~6.5	3~5	1800~2000



续表

编号	房间的环境参数			空调运行模式(建议值)		
	温度 T	湿度 W	CO ₂ 浓度 G	输出功率 (夏季)/kW	输出功率 (冬季)/kW	气流速度 /m ³ ·h ⁻¹
12	T_2	W_1	G_3	6.5~8	5~8	2000~2200
13	T_2	W_2	G_1	2~4	2~4	1800~2000
14	T_2	W_2	G_2	4~6	4~6	2000~2200
15	T_2	W_2	G_3	6~9	6~9	2200~2400
16	T_2	W_3	G_1	3~5	3~5	2300~2500
17	T_2	W_3	G_2	5~8	5~8	2500~2700
18	T_2	W_3	G_3	8~11	8~11	2700~2900
19	T_3	W_1	G_1	7~8	0.5~1	1700~1800
20	T_3	W_1	G_2	8~9	1~1.5	1800~1900
21	T_3	W_1	G_3	9~10	1.5~2	1900~2000
22	T_3	W_2	G_1	9.5~11	2.5~3.5	1800~1900
23	T_3	W_2	G_2	11~12	3.5~4	1900~2000
24	T_3	W_2	G_3	12~13	4~5	2000~2100
25	T_3	W_3	G_1	10.5~12	1~1.5	1500~1600
26	T_3	W_3	G_2	12~13	1.5~2	1600~1700
27	T_3	W_3	G_3	13~14	2~2.5	1700~1800

在逻辑规则的帮助下,房间环境的输入特征和输出特征之间的对应关系如式(5.11)所示。

$$\text{if } T \in T_i, W \in W_j \text{ and } G \in G_z, \text{ then } P \text{ is } P_s, Q \text{ is } Q_r \quad (5.11)$$

T_i 代表温度参数的模糊集。

W_j 代表湿度参数的模糊集。

G_z 代表对 CO₂ 浓度参数的模糊集。

P_s 代表对输出功率参数的模糊集。

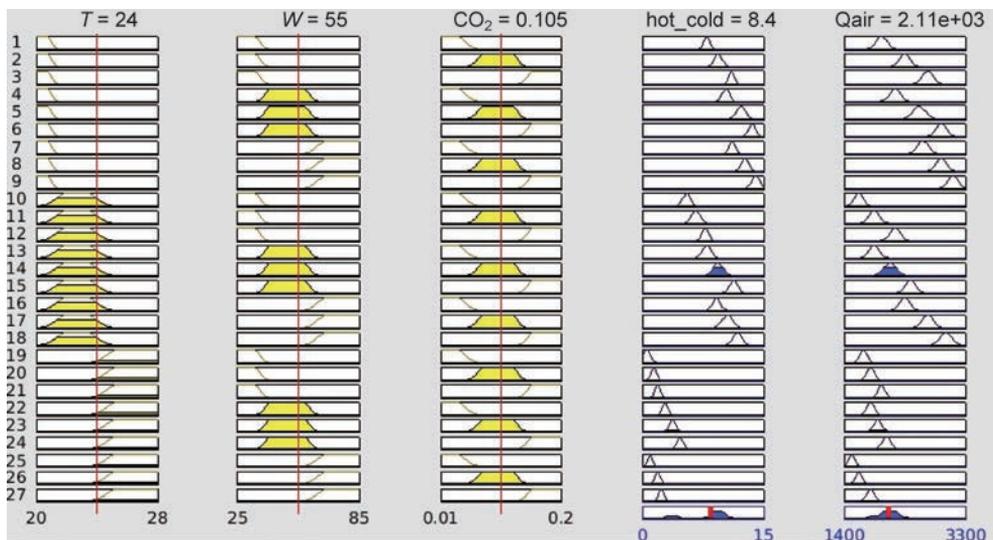
Q_r 代表空气流量参数的模糊集。

T 、 W 、 G 、 P 、 Q 分别代表温度、湿度、CO₂ 浓度、输出功率和空气流量的值。

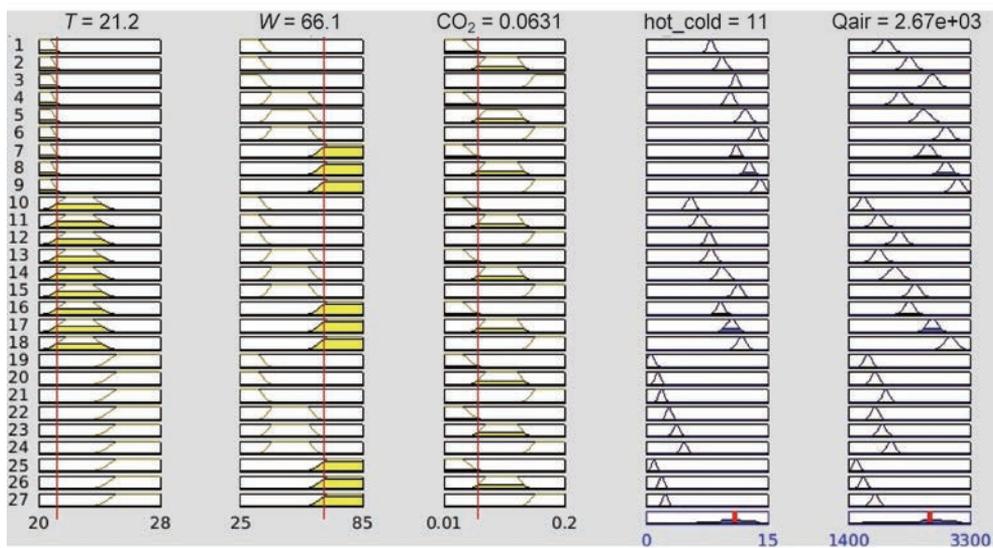
神经网络的运行结果如图 5.38 所示。从图 5.38 可以看出,每次测量环境的状态时,其温度、湿度和 CO₂ 浓度都是不确定的,根据成员函数将参数分配到 27 个组中的一个,然后分配到逻辑上对应的输出参数组中。

因此,对于一定范围的物理环境参数,构建了输入参数的范围(见图 5.39)。

第四层建立了环境参数与设备操纵之间的对应关系,即将输入与设备需要执



(a) 输入参数 $T=24^{\circ}\text{C}$, $W=55\%$, $G=0.105\%$ 的结果



(b) 输入参数 $T=21.2^{\circ}\text{C}$, $W=66.1\%$, $G=0.063\%$ 的结果

图 5.38 神经网络的运行结果

行的操作进行关联。

使用测试样本对网络性能进行了评估。测试样本包括 150 条数据,是训练样本的 30%。神经网络获得的结果与实际结果的比较如图 5.40 所示。

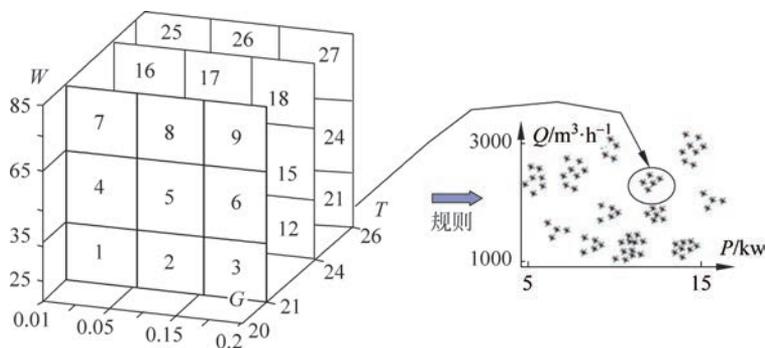
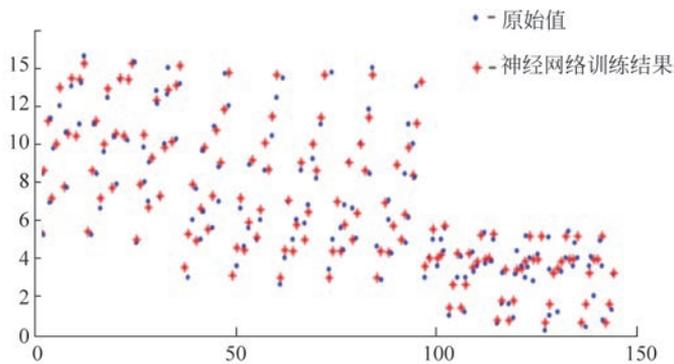
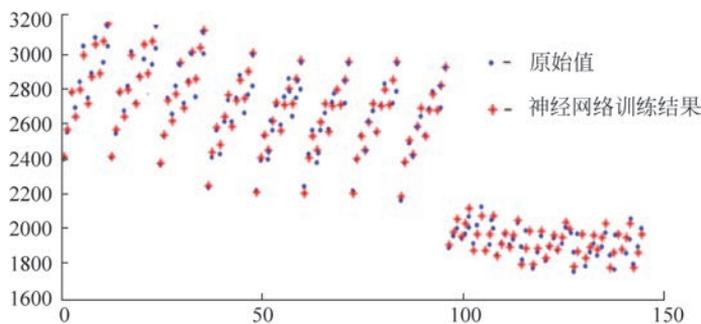


图 5.39 神经网络参数范围的形成



(a) 输出功率



(b) 空气流速

图 5.40 环境测试结果

从网络测试的结果可以看出,它们与真实的数据有偏差,但是差距很小。空气流量的绝对值偏差不超过 3m/h ,输出功率的偏差不超过 0.5kW 。因此,该网络的可靠性为 $95\%\sim 96\%$ 。实验表明,与经典的神经网络结构相比,使用混合神经网络

络更具优势。混合网络在执行过程中激活一个局部神经网络，解决一个单一的任务，而经典网络则激活整个网络。因此，与经典网络相比，混合网络的运行速度明显较快，但网络的准确性并无明显差异。混合网络的另一个优势是灵活的再训练系统。当重新训练一个网络时，只需调整一个或多个局部神经网络的操作，而对于经典网络来说，必须重建整个架构。

此外，使用可视化工具展示了温度、湿度和 CO_2 浓度三个特征对室内环境的影响，如图 5.41~图 5.43 所示。

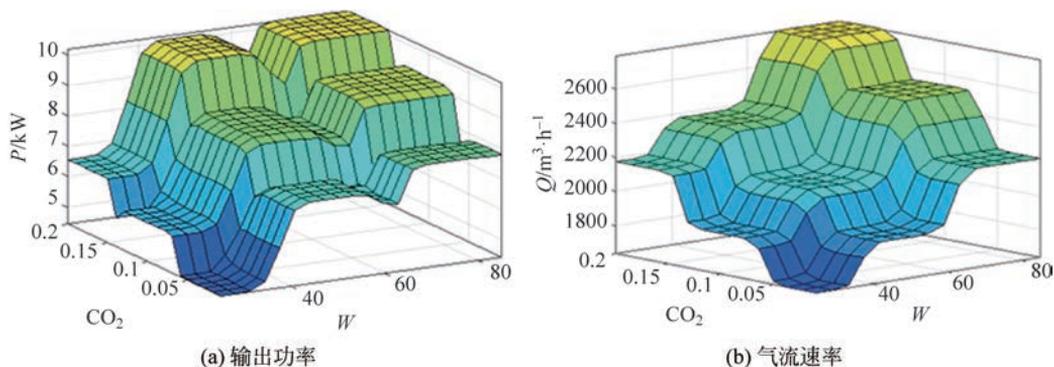


图 5.41 温度对室内环境的影响

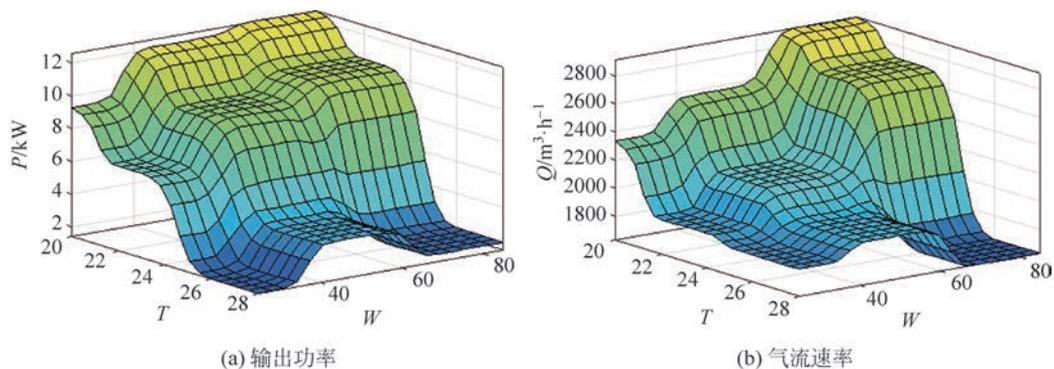
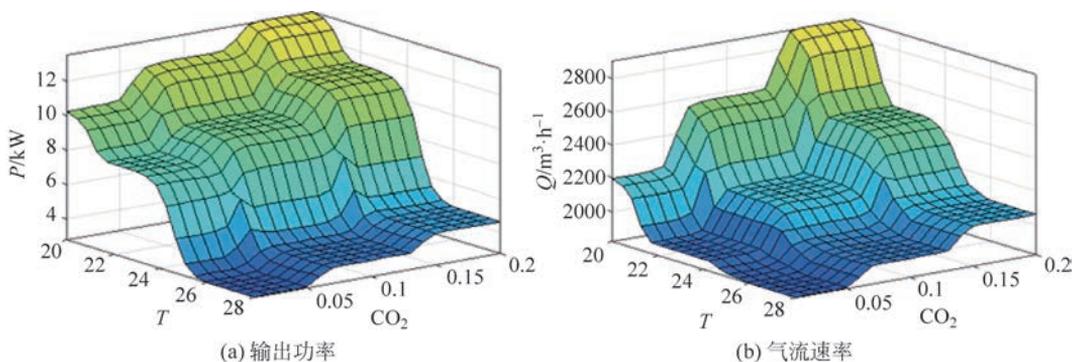


图 5.42 湿度对室内环境的影响

当物理环境为低温、高湿度和高 CO_2 浓度时，应使用设备的最大功率运行模式。而在正常的温度和湿度条件下，以及 CO_2 浓度较低时，可以使用设备的节能模式。基于模糊逻辑的神经网络实现了控制设备的平稳变化，比使用阶梯式调节要好得多。神经网络能够根据环境特点，使用不同的气候控制设备，以保持室内环境的舒适，并使能耗最少。

图 5.43 CO₂ 浓度对室内环境的影响

5.4.5 神经网络在智能家居气候管理中的应用

本节先探讨大学教室的环境在使用期间的环境变化。温度、湿度和 CO₂ 浓度等参数由物联网传感器测量,使用期间的环境参数的变化如图 5.44 所示。

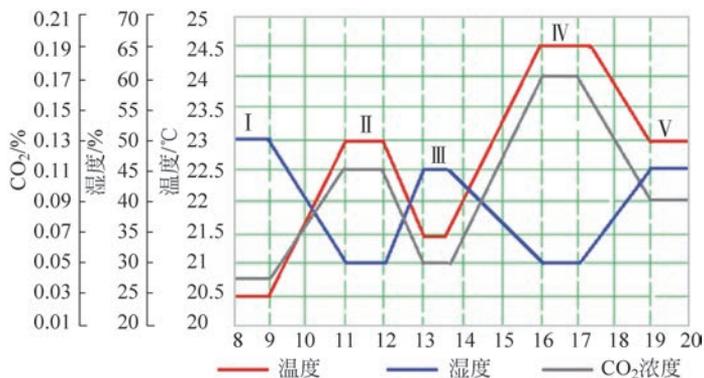


图 5.44 房间内物理环境参数变化

在得到的图表中,可以将 8~20 小时中的数据分为五个部分。接下来以第 II 部分为例,计算其输出功率和空气流速。

在第 II 部分,房间的温度为 23℃,湿度为 30%,CO₂ 浓度为 0.11%。通过分析物理环境的输入值,系统将其状态按温度分类到了第二类。而按湿度归入第一类,将 CO₂ 浓度归入第二类。温度、湿度和 CO₂ 浓度的值在描述温度的第二类、湿度的第一类和 CO₂ 浓度的第二类的模糊集中有一个逻辑单元。耗电量的逻辑规则矩阵如式(5.12)所示。



$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \rightarrow 1 \times 6.5 = 6.5 \text{ kW} \quad (5.12)$$

对室内空气流速进行同样的计算，如式(5.13)所示。

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \rightarrow 1 \times 1880 = 1880 \text{ m}^3/\text{h} \quad (5.13)$$

因此，若房间处于第Ⅱ部分，即温度 23℃、湿度 30%和 CO₂ 浓度 0.11%，空调的推荐运行模式将处于：输出功率 6.5kW，空气流速 1880m³/h。

对五个时间阶段分别进行计算，得到不同时间段内空调的推荐运行模式结果(见表 5.9)。

表 5.9 混合神经网络的计算结果

ID	房间的物理环境参数			普遍推荐的空调运行模式		
	温度 <i>T</i>	湿度 <i>W</i>	CO ₂ 浓度 <i>G</i>	输出功率 (夏季)/kW	输出功率 (冬季)/kW	空气流速 /m ³ · h ⁻¹
I	20.5	50	0.04	2.5	9.9	2160
II	23	30	0.11	6.5	6.5	1880
III	21.5	45	0.05	8.25	8.25	1930
IV	24.5	30	0.17	4.37	3.8	2100
V	23	45	0.09	9.35	9.35	2120

智能家居气候系统的每个设备都有对应的数字模型,用于在真实物体、物理环境、物联网设备及其虚拟模拟之间建立联系。系统为每个虚拟设备开发了一个神经网络,以便监测物理环境参数,调节设备的执行。真实设备、数字模型、控制系统的互动是通过一个协调中心实现的。

在实际实施时,管理系统由实时测量空气中温度、湿度和 CO_2 浓度的工业物联网传感器组成。例如,SCG100 是空气中 CO_2 浓度的工业传感器,SHT100 是湿度和空气温度的工业传感器(见图 5.45)。获得的信息被记录在控制器的神经网络中,控制器将控制命令传送到控制设备或物联网控制器的数模转换器,改变工作模式。



图 5.45 传感器示意图

本章提出的智能家居气候管理系统有很多技术优势。首先,统一的数字环境可以解决智能家居组件因数据格式不同而无法正常工作的问题。其次,统一的协调中心提供了多结构系统各组件之间的信息交互,也通过搜索组件之间的双向联系解决了在数据之间建立隐性连接的问题。

基于交互式数字孪生的管理系统的技术优势节省了操作时间,降低了管理服务器的负载,从而降低了实施该系统的成本。此外,双向连接还避免了多结构的组件在一起工作时的过度能量消耗。数字环境为管理系统的神经网络生成的训练和测试集。最终实现基于交互式数字孪生的管理系统,并节省能耗。

小 结

数字孪生技术是复杂系统控制组织中的关键技术。虽然数字孪生最初用于科学密集型系统,但现在各个领域的自动控制中都广泛应用数字孪生。本章提出的



多结构系统可以作为交互式数字孪生及其组件控制系统的初始版本。

新理论的提出需要有足够高的抽象水平，能够在各个领域中的应用。本章提出的系统理论的主要优点在于管理系统是开放的，意味着可以对其进行改进、扩展其功能并与其他系统互动。

为了让读者更好地理解理论材料，本章将多结构系统理论知识与实际应用结合，介绍了如何将互动式数字孪生应用于能源行业。同时，以教室为例子，讲述了如何构建智能家居的气候管理系统。希望读者们在实践活动中能够开发出属于自己的多结构系统，并将其作为改善生活的工具，将人们从繁杂重复的操作中解放出来。希望在不久的将来，数字孪生会像使用计算机那样普遍。