

基于数字孪生技术的电梯机电系统设计与安全性评价

王毅

(北京市昌平区特种设备检测所 北京 102200)

摘要: 智能化时代背景下, 电梯产业模式逐渐由传统的驱动向用户需求驱动方向转变。本文基于用户实际需求, 在数字孪生技术支持下对电梯机电系统展开设计, 利用 MCD 和 TIA 软件对电梯机电系统的虚拟模型进行构建, 通过调试验证设计的正确性, 并利用信号采集模块实现物理实体和虚拟模型之间的数据传输, 以实现远程遥控。最后通过安全性评价分析, 验证所设计的电梯机电系统。验证结果表明, 设计的电梯机电系统故障率较低, 满足电梯安全运行的需求。

关键词: 数字孪生技术; 电梯机电系统; 系统设计; 安全性评价

0 引言

现代建筑中电梯作为至关重要的运输工具, 在城市化建设进程的深入下, 其数量也在持续增加。在《中国制造 2025》的推动下, 智能化、个性化电梯已经成为电梯产品转型的主要方向。“十四五”报告中明确指出要加强“探索数字孪生城市建设”, 并对数字孪生技术在促进社会各领域高质量发展中的运用作出相应的战略部署^[1]。数字孪生技术可以实现对现实场景的数字化表达, 并通过对场景要素的感知分析和模型构建, 实现物理实体与虚拟模型之间的双向实时映射, 在仿真验证手段的支持下有助于对现实场景变化趋势进行推演, 还在机电设备远程监视、状态监测和控制优化等方面表现出巨大的应用优势。本文基于数字孪生技术, 提出电梯机电系统设计, 并对其进行安全性评价分析。

1 基于数字孪生技术的电梯五维模型

在数字孪生五维结构模型基础上, 构建如图 1 所示的电梯五维模型, 以此作为电梯机电系统设计的基石。模型主要包括物理实体、虚拟模型、服务系统、数据、连接这五个维度^[2]。

2 基于 MCD 仿真平台的机电系统设计

2.1 设计思路

MCD (Mechatronics Concept Designer) 仿真平台是数字孪生技术常用的虚拟模型构建软件, 可自定义设计目的和流程。采用 MCD 仿真平台对照电梯机电系统物理对象构建虚拟模型, 主要涉及机电系

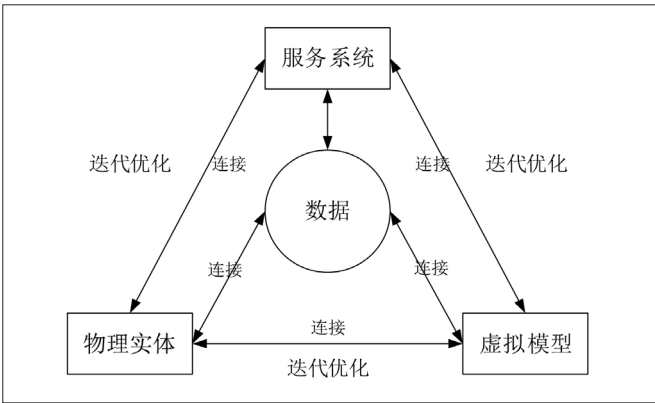


图 1 电梯五维模型

统中机械和电气控制两部分。而 TIA Portal 全集成自动化软件适用性较高, 可以实现对自动化系统的快速开发和调试。采用 TIA 软件对电梯机电系统 PLC 程序下的行程闭环反馈软件进行编写, 以供进行虚拟调试^[3]。由此, 面向数字孪生技术的电梯机电系统设计思路如图 2 所示。

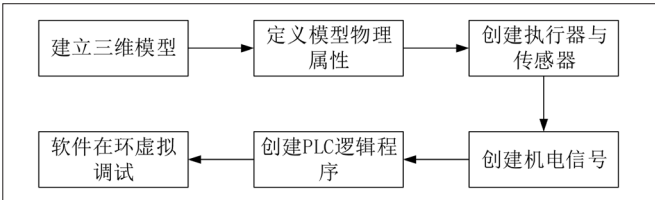


图 2 电梯机电系统设计思路

2.2 三维电梯模型的构建

考虑同类型电梯在结构设计方面具有较高的相似性, 选择 NX 二次开发来构建电梯机械结构的模型。利用 NX 软件与 C++ 编程语言对电梯结构的三维模型进行二次开发, 从而获取到关键结构部位的参数

化模型,便于后续对模型的更改与调整。首先对电梯轿厢的三维模型进行构建,并在此基础上完成对电梯整体三维模型的构建。

2.3 定义模型物理属性

在三维虚拟模型中,物理属性主要是指模型需要具备的物理特性、运动属性及限制属性。电梯机电系统三维模型物理属性的定义流程如下:

首先,定义电梯机电系统各部件的刚体属性。刚体属性是各零部件质量和力学特征的表现,是后续仿真过程中建立运动和力学作用等操作的基础。

其次,完成刚体属性定义后,需要对各零部件之间的运动副进行构建,从而确保虚拟模型中零部件的运动方式同物理实体保持一致。

最后,考虑轿厢的运动过程是借助曳引机带动钢丝绳完成的,对于这种驱动方式而言,倘若采用单一的运动副很难实现。因此需要在上述构建运动副的基础上,对曳引轮及齿轮齿条耦合副的构建完成虚拟模型中对曳引轮带动钢丝绳运动的模拟。

2.4 创建执行器

上述对运动副的创建主要面向的是虚拟模型中的物体的运动方向和方式,但针对运动速度和距离等参数并无法确定,需通过执行器的创建来限制物体的位置与速度。首先对电梯各零部件添加位置控制,再选择具体项,对其位置目标、速度和名称进行调整^[4]。

2.5 创建机电信号

在数字孪生体系中,物理实体和虚拟模型之间需要建立实时数据连接来保证通信。由此,在电梯机电系统 MCD 虚拟模型中,应根据物理实体建立相应的机电信号,并借助信号映射手段实现二者间的数据传递;可以依照电梯的实际运动特性,主要对电梯门、轿厢等运动部件创建机电信号,赋予其初始值。

2.6 创建 PLC 逻辑程序和在线虚拟调试

待完成机电信号创建操作后,即可创建 PLC 逻辑程序用以驱动。对于虚拟模型中的 PLC 而言,硬件选择为 S7-PLCSIM Advanced,并将 MCD 中的机电信号连接 TIA 软件中的 PLC 控制程序,借助两个软件的数据互联完成虚拟调试工作。

由 TIA 软件负责对 HMI 人机交互界面进行创建,在此界面中模拟出现实环境下轿厢的操作按钮,并对乘客可能发出的操作指令进行模拟。通过将位移、速度、加速度等轿厢关键运动数据的输入,由操作

人员利用观察器对轿厢的运动参数进行实时观测。

软件在环虚拟调试主要是通过对 PLC 运行状态以及虚拟模型运动参数变化情况的观察,实现对机电系统是否依照预设程序运行的检测,并判断运行中的参数是否准确,以及是否存在其他错误情况,从而实现对 MCD 虚拟模型物理属性定义和 PLC 程序驱动是否正确的验证。依托虚拟 PLC 程序对电梯机电设备工作状态进行模拟,并将真实运行环境迁移至虚拟模型之中,从而实现对部件模型与电梯控制程序设计过程中可能出现偏差情况的控制。此外,虚拟调试工作也能在一定程度上解决现实中调试成本高、周期长、安全性不足等问题。

3 基于数字孪生技术的数据传输和远程监控

3.1 数据传输

基于数字孪生技术构建的电梯物理实体和虚拟模型之间进行数据传输的方式主要有两种:传感器数据传输和物联网数据传输。其中,传感器数据传输存在误报情况多、数据传输失准、传感器安装复杂、设备和维护成本高等问题,因此,选择物联网数据传输方式进行数字孪生的数据传递,物联网数据传输方式在传输效率和稳定性方面均有不错的表现。物联网数据传输方式主要有蓝牙、RFID、5G 和 Zigbee 等,本文选择 5G 技术作为电梯数据传输的主要方式。基于此,构建三层级的数据传输结构,包括感知层、网络层和应用层。

(1) 感知层。感知层负责信息采集,是数据传输的核心结构。在提出的电梯虚拟模型中,采用 WL415-DB 模块实现对控制器的信号采集,WL415-DB 模块不仅具有数据透明无线传输和加密无线传输的功能,且能在停止供电后,自动上报停电事件至服务器。

(2) 网络层。网络层主要包括局域网和物联网平台两个模块,具有数据传递和解析、协议转换和终端上网等功能。采用 WL415-DB 模块借助 RS485 通信读取控制器端发出信号。同时,为便于后续电梯机电系统的维修处理以及平台的持续发展性,采用 5G 通讯方式将感知层采集到的信息传递给基站,便于后续物联网平台的集中管理。

(3) 应用层。应用层主要负责利用物联网应用平台对接收到的控制器数据进行汇总与管理,可以通过底层代码判断子端的输入输出状态数据,以此

实现电梯机电系统运行状态检测和故障报警。同时，可借助终端或 APP 即时查看电梯的故障发生情况、开关门信息以及实时运行状态等^[5]。

3.2 远程监控

待实现数字孪生数据传输后，即可借助信号映射实现物理实体和虚拟模型之间的在环远程监控。由物联网采集模块提供的 IP 和 MCD 之间构建 TCP 通讯，在 MCD 机电信号和电梯控制器信号之间实现映射，从而实现对电梯各种运行状态的远程监控。

虽然通过对电梯远程数据的采集可对电梯机电系统故障进行实时监测，但无法对机械故障和具体的事故状态进行有效判断。远程监控的根本意义在于能够即时了解电梯的运行状态、方向和相关信息，便于管理者监控电梯运行，一旦电梯出现事故，管理者可及时发出警报并采取针对性的措施，以保证乘客的安全；同样也实现了对电梯运行信息的分类汇总，建立电梯安全大数据库，为后续的维修工作提供事实数据依据。

4 电梯机电系统安全性评价

基于安全性评价准则，将电梯机电系统的安全性由高到低划分为 5 个等级，分别是 I、II、III、IV、V，对应的故障发生概率在 3%、7%、20%、30%、40%。

之后构建电梯安全性评价体系，共分为机械结构、电气控制、制造条件和使用条件四大部分，详细情况如表 1 所示。

针对电梯故障的安全评价而言，电梯事故多是在系统中的综合因素影响下导致的。在实际评价过程中需要结合实际情况，综合考虑多个相互关联且存在一定制约性的因素。据此，基于上述构建的电梯机电系统安全性评价体系，可以采用模糊综合分析法对电梯系统中存在相互关联影响的因素进行综合评价。流程如下：

- (1) 确定安全性评价因素集 U。
- (2) 构建待评价因素的评价结果集 V, 可以将 I、II、III、IV、V 级作为评价等级。
- (3) 建立单因素评价模糊矩阵。对单因素进行计算时，依照单因素各级对应的评价对应相应程度得到最终评价价值。采用基于加权平均的多因素综合评分法对权重向量进行计算，求出各因素的权重。之后根据因素等级向量公式计算出的结果，准确得到

表 1 电梯安全性评价体系

一级指标	二级指标	三级指标
机械结构	曳引系统	曳引机
		悬挂装置
		制动器
	门系统	轿门结构
		层门结构
	重量平衡系统	平衡系数
	安全保护系统	超速保护装置
		安全钳
电气控制	门的电气系统	门系统旁路
		回路检测
	制动器检测	制动力检测
		制动器故障检测
制造条件	设计制造条件	制造水平
		设计水平
	安装条件	安装水平
使用条件	使用环境	额定运行速度
		使用频率
		载重量
	运行年限	

- 权重集 A 与等级评价矩阵的数值。
- (4) 采用层次分析法对评价系统中剩余影响因素的权重进行计算。依照因素集 U，计算多位专家对各因子的评分值与总分值，从而得到各因子的权重。
- (5) 展开综合模糊评价。针对三级指标的评价而言，应基于综合模糊因子，根据各待评事件的综合模糊评价指标数值，对各单因素评分值进行计算，并将此作为各待评事件得到的最终得分，经综合模糊评价变换后即可得到上层因子评价向量。
- (6) 依照领域最大隶属度法则，对得到的上层因子评价向量矩阵进行评估，从而得出各故障的发生概率情况。

在安全评估过程中，考虑不同因素的权重差异，在评价对象隶属度方面也会有所差异。因此在计算出各故障具体发生概率之后，需要结合实际需求对各因素的权重进行调整，完成最终对因素等级向量的评估，得到安全等级评价矩阵。结合对电梯故障类型的分类以及对故障次数的统计，对四个一级指标进行模糊评价计算，展开定量分析，得到的结果如表 2 所示。

由此可见，通过安全性评价可知，基于数字孪生技术的电梯机电系统设计整体故障率较低，安全性评价

表 2 电梯安全性评价结果

指标	机械结构	电气控制	制造条件	使用条件
安全性等级	Ⅱ	Ⅲ	Ⅱ	Ⅲ

等级均在Ⅲ之上，符合安全性要求。但在四个一级指标中，电气控制和使用条件两个指标的安全性等级为Ⅲ级，处在中等水平。在电梯的后期投入使用过程中，应加强对电气控制系统的日常保养工作，针对电气控制系统中的各部件制定定期维护方案。

5 结语

本文基于数字孪生技术支持，借助 MCD 和 TIA 软件构建电梯机电系统虚拟模型，首先通过虚拟机电模型和 PLC 控制程序之间的信号映射实现在环虚拟调试，从而将现实电梯机电系统的运行流程迁移至虚拟环境。并依托物联网和 5G 技术实现物理实体和虚拟模型之间的数据传输和远程监控。最后构建安全性评价指标体系，对机电系统设计方案进行安

全性评价，四个一级指标的安全性评价等级均在Ⅲ之上，故障发生概率较小，符合安全性要求。

参考文献：

[1] 张玉梅，王瑞．基于 PLC 的 4 层电梯的控制系统仿真设计[J]．科技与创新，2023(12):85-87.

[2] 鲁军．电梯检测控制系统安全问题与防护策略研究[J]．产品可靠性报告，2023(05):146-148.

[3] 吴桐，闫军，李炳震．采用直线电机的电梯系统机电动力学模型构建与分析[J]．机械设计与研究，2022, 38(06):66-69.

[4] 任玲玲，李浪，闫庚龙，等．一种基于 PLC 的电梯智能控制与监控系统设计[J]．中国科技信息，2022(16):60-64.

[5] 鞠天慧．电梯机电设备安全运行维护探究[J]．科技资讯，2022, 20(12):38-40+104.

作者简介：王毅（1986.01-），男，汉族，山东济南人，本科，工程师，研究方向：机械设备运行维修。

