

高等学校城市轨道交通系列教材

城市轨道交通卓越工程师教育培养计划系列教材

城市轨道交通



列车网络控制技术

■ 主 编：郑树彬

■ 副主编：朱文良 柴晓冬

中国铁道出版社
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

高等学校城市轨道交通系列教材

城市轨道交通卓越工程师

教育培养计划系列教材

城市轨道交通 列车网络控制技术

主 编 郑树彬

副主编 朱文良 柴晓冬

中 国 铁 道 出 版 社

2017年·北京

图书在版编目(CIP)数据

城市轨道交通列车网络控制技术/郑树彬主编. —北京:
中国铁道出版社, 2017. 6
高等学校城市轨道交通系列教材
ISBN 978-7-113-22938-2

I. ①城… II. ①郑… III. ①城市铁路—轨道交通—
列车—计算机网络—控制系统—高等学校—教材 IV. ①U284.48

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 057389 号

高等学校城市轨道交通系列教材
书 名:城市轨道交通卓越工程师教育培养计划系列教材
城市轨道交通列车网络控制技术
作 者:郑树彬 主编

策 划:徐 清 崔忠文
责任编辑:徐 清 编辑部电话:010-51873147 电子信箱:357716058@qq.com
封面设计:陈东山 崔丽芳
责任校对:孙 政
责任印制:高春晓

出版发行:中国铁道出版社(100054,北京市西城区右安门西街8号)
网 址:<http://www.tdpress.com>
印 刷:三河市宏盛印务有限公司
版 次:2017年6月第1版 2017年6月第1次印刷
开 本:787 mm×960 mm 1/16 印张:18 字数:319 千
书 号:ISBN 978-7-113-22938-2
定 价:46.00 元

版权所有 侵权必究

凡购买铁道版图书,如有印制质量问题,请与本社读者服务部联系调换。电话:(010)51873174(发行部)
打击盗版举报电话:市电(010)51873659,路电(021)73659,传真(010)63549480

前 言

为了缓解城市日益严重的交通问题,地铁、轻轨等城市轨道交通设施开始在我国的大中城市兴建及扩建,目前已有四十多个城市在建和规划建设城市轨道交通。地铁、轻轨、城市快速铁路等城轨交通车辆的制造与大量运用,需要大批具有扎实理论基础、较强实践能力的技术应用技能型人才。为了满足社会、企业和学校大量的城市轨道交通专业人员的培养和培训需求,上海工程技术大学城市轨道交通学院组织编写“城市轨道交通卓越工程师教育培养计划”系列教材,《城市轨道交通列车网络控制技术》就是其中之一。

列车网络控制技术涉及列车设备的实时信息交换、设备控制、管理等方面,它是车辆、列车各设备能否相互协调正常运行的保障。采用微机和网络实现智能化控制已成为城市轨道交通列车控制技术发展的方向,是城市轨道交通车辆的关键核心技术之一。本书主要以当前国内地铁列车主流车型的列车网络控制系统为对象,梳理列车、车辆总线、网络控制相关技术,以求能满足学生和相关从业人员对列车网络总线及控制技术全面了解和较为深入地学习。本书将对列车网络控制工作原理进行较深入解析,深浅适宜,图文并茂,使学生能尽快掌握理论知识和相关技术。

本书在计算机网络技术和控制系统的基础上,主要介绍了列车通信网络和城轨列车运行控制技术的基本原理和基础知识。全书共六章。第1章主要介绍列车网络控制相关的网络控制系统和技术的发展及特点。第2章讲述网络通信的基本概念、系统构成以及数据通信技术和计算机控制系统的基础知识。第3章详细介绍用于高速铁路和城轨列车的通信网络技术,包括TCN列车通信标准, LonWorks、ARCNET、WorldFIP、CAN等现场总线标准以及工业以太网技术等,选取较具代表性的城轨列车通信网络应用情况进行分析。第4章重点阐述典型的列车微机控制系统、列车网络控制系统(TCMS)和列车通信控制系统(TCC)的结构和功能。第5章介绍列车运行控制系统的主要技术和方法,主要包括列车自动控制系统(ATC)、列车自动保护系统(ATP)、列车自动驾驶系统(ATO)、列车自动监控系统(ATS)以及基于通信的列车控制系统(CBTC)的应用。第6章主要针对目前基于网络化发展的车辆、列车的故障诊断方法和技术进行相关应用方面的介绍和分析。

本书由上海工程技术大学郑树彬、朱文良和柴晓冬完成编写。衷心感谢方宇老师、师蔚老师,上海申通地铁集团有限公司杜晓红、王方程、余强、王建兵等在本书的编写过程中给予的支持和帮助。感谢刘新厂、蒋啟臻、许晓伟、陆海燕、孙炎、范丹、陈丽君等同学在本书编写过程中在图表制作和文字录入、校核方面的细心工作。另外,本书参考了一些国内外发表的文章、资料,编者在此对他们表示诚挚的谢意。

本书的出版得到上海工程技术大学“卓越工程师教育培养计划”城市轨道交通车辆工程专业建设项目和上海市教育委员会第五期重点学科建设项目(J51401)的资助,在此表示感谢!

由于编者水平有限,收集资料欠全面,书中难免有纰漏和不妥之处,恳请各位读者批评指正,盼赐教至 zhengshubin @126.com,以期再版时修改。

编 者

2017 年 1 月

目 录

第 1 章 绪 论	1
1.1 网络化控制系统	1
1.2 列车网络控制系统概述	8
1.3 列车通信网络 (TCN)	12
复习思考题	14
第 2 章 网络通信与计算机控制基础	15
2.1 网络通信基础	15
2.2 计算机网络拓扑结构	39
2.3 网络传输硬件设备	42
2.4 介质访问控制方式与网络互联参考模型	46
2.5 计算机控制系统	61
复习思考题	73
第 3 章 列车通信网络类型	74
3.1 列车通信网络概述	74
3.2 列车通信网络	75
3.3 LonWorks 网络	94
3.4 ARCNET 网络	104
3.5 WorldFIP 现场总线	115
3.6 CAN 总线	123
3.7 工业以太网	147
复习思考题	161
第 4 章 列车网络控制系统	162
4.1 列车网络控制系统概述	162

4.2 列车微机控制系统	163
4.3 列车网络控制管理系统(TCMS)	175
4.4 列车通信控制(TCC)系统	192
复习思考题.....	207
第5章 列车运行控制系统	208
5.1 列车运行控制系统概述	208
5.2 列车运行自动控制系统	217
5.3 基于通信的列车控制系统(CBTC)	238
复习思考题.....	247
第6章 网络化列车故障诊断系统	248
6.1 检测与诊断技术	248
6.2 地铁车辆故障诊断及其信息管理系统	253
6.3 基于CAN的磁浮车载网络监控与诊断系统	259
6.4 基于TCN的铁路列车故障诊断系统	266
复习思考题.....	272
参考文献	273
附录 名词术语英(缩略语)中对照表	274

第 1 章 绪 论

1.1 网络化控制系统

随着计算机技术、通信技术与控制技术的不断发展和融合,控制系统逐渐向网络化、集成化、分布化、节点智能化的方向发展,网络化控制系统在各个领域得到了广泛的应用,成为控制界研究的一个热点。分布控制系统(DCS)、现场总线控制系统(Fieldbus Control System, FCS)以及基于工业以太网控制系统从某种意义上都可以划入网络化控制系统的范畴。

网络化控制系统也称为网络控制系统(Networked Control System, NCS),是指在网络环境下实现的控制系统,是现场总线控制网络技术在控制领域中的成功应用。下面从分析控制系统结构的发展历程看网络控制系统发展的必然趋势。

1.1.1 控制系统的发展历程

一般把 20 世纪 50 年代以前的气动控制系统(Pneumatic Control System, PCS)称为第一代控制系统,4~20 mA 等模拟信号控制系统称为第二代控制系统,数字计算机集中式控制系统称为第三代控制系统,20 世纪 70 年代中期以来的集散式控制系统 DCS 称为第四代控制系统,现场总线系统称为第五代控制系统,也称为现场总线控制系统(FCS)。FCS 作为新一代控制系统,一方面突破了 DCS 系统采用通信专用网络的限制,采用了基于公开化、标准化的解决方案,克服了封闭系统所造成的缺陷;另一方面把 DCS 集中与分散相结合的集散系统结构,变成了新型全分布式结构,把控制系统彻底下放到现场。可以说,开放性、分散性与数字通信是新一代控制系统最显著的特征,下面主要介绍几种典型的控制系统。

1. 操作指导控制系统

操作指导控制系统(Operational Information System, OIS)框图如图 1.1 所示,该系统不仅可以对生产过程中的大量参数作巡回采集、处理、分析、记录和超限报警,还可以通过对大量参数的积累和实时分析,实现对生产过程的各种趋势分析,为操作人员提供参考;或者计算出可供操作人员选择的最优操作条件及操作方案,操作人员则根据计算机输出的信息去改变调节器的给定值或直接操作执行机构。

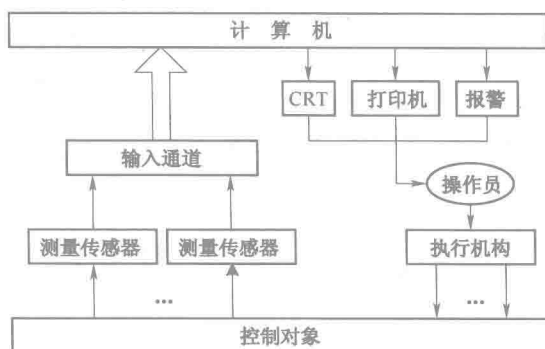


图 1.1 操作指导控制系统框图

2. 直接数字控制系统

直接数字控制(Direct Digital Control, DDC)系统框图如图 1.2 所示。在计算机控制系统中,DDC 系统是计算机用于工业生产过程控制的一种典型系统。在 DDC 系统中,使用计算机作为数字控制器,计算机除通过输入通道对多个工业过程参数进行巡回检测、采集外,还可按预定的调节规则进行控制计算,然后将运算结果通过输出通道提供给执行机构,使各个被控量达到预定的控制要求。

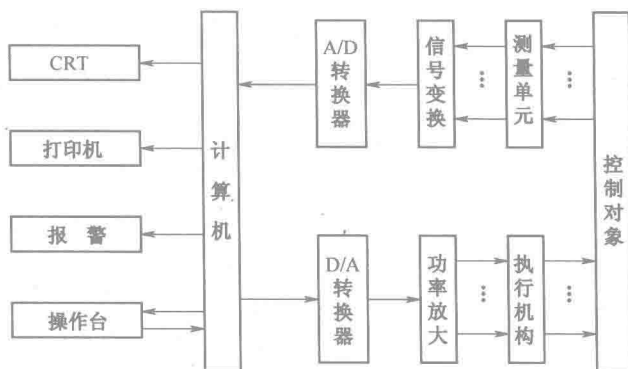


图 1.2 直接数字控制系统框图

DDC 系统中的计算机参与闭环控制过程,它不仅能完全取代模拟调节器、实现回路的调节,而且不需改变硬件,只通过改变程序就能有效地实现复杂的控制。由于 DDC 系统中的计算机直接承担控制任务,所以要求计算机的实时性好、可靠性高和适应性强。为充分发挥计算机的利用率,一台计算机通常要控制几个至几十个控制回路。

3. 监督计算机控制系统

监督计算机控制(Supervisory Computer Control, SCC)系统是在直接数字控

制系统上添加一级监督计算机而实现的。在此类系统中,生产过程的闭环自动调节依靠 DDC 系统或模拟调节器来完成,监督计算机的输出作为 DDC 系统或模拟调节器的设定值,这一设定值将根据生产工艺信息及采集到的现场信息,按照预定的数学模型或其他方法所确定的规律进行自动修改,使生产过程始终处于最优的工况(如保持高质量、高效率、低消耗、低成本等)。

监督计算机控制系统框图如图 1.3 所示。这实际上是一个二级计算机控制系统,一级为 SCC 监控级,另一级为 DDC 控制级。SCC 的作用与 SCC+模拟调节器系统中的 SCC 一样,给出最佳给定值,送给 DDC 级计算机,直接控制生产过程。两级计算机之间通过通信接口进行信息联系,当 SCC 级计算机出现故障时,可由 DDC 级计算机代替,因此大大提高了系统的可靠性,一台 SCC 计算机可监督控制多台 DDC 系统。在早期,SCC 与 DDC 通信一般采用 RS232 或 RS485 等通信方式。

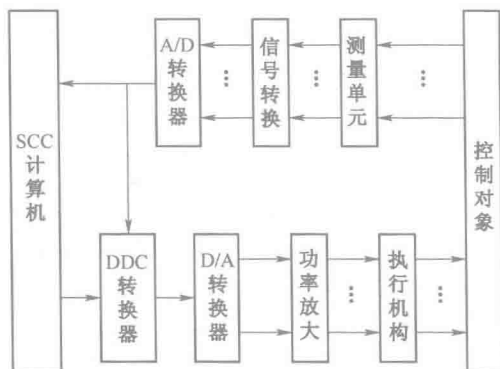


图 1.3 SCC + DDC 控制系统框图

4. 集散控制系统

集散控制系统(Distributed Control System, DCS)的核心思想是集中管理、分散控制,即管理与控制相分离。上位机(工程师站或操作员站)用于实现集中监视管理功能,若干台下位机(现场控制站)下放分散到现场实现控制,各上、下位机之间用控制网络互联以实现相互之间的信息传递。集散控制系统结构示意图如图 1.4 所示。

这种分级式的控制系统体系结构有力地克服了集中式数字控制系统中对控制器处理能力和可靠性要求高的缺陷,既实现了地理上和功能上的控制分散,又可以通过高速数据通道对各个分散点的信息集中监视和操作,并实现高级复杂规律的控制。另外,还留有和企业信息管理系统接口。

各种型号的 DCS 尽管型号不同、功能各异,然而它们的基本结构模式都为“操

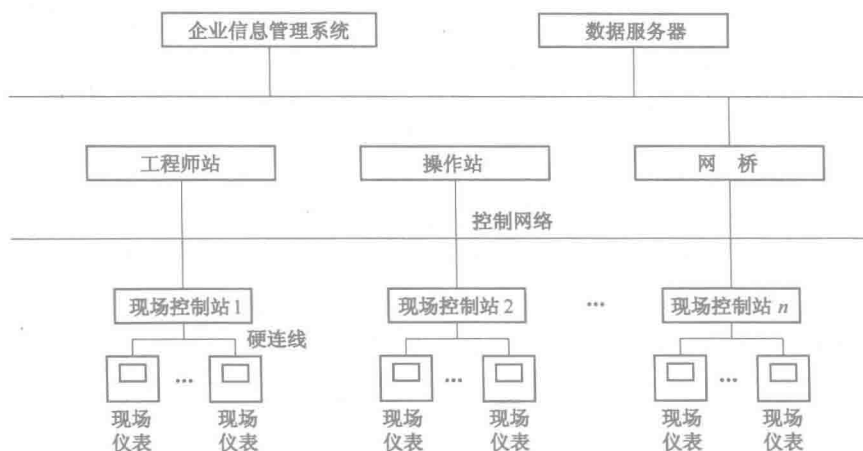


图 1.4 集散控制系统结构示意图

作站—控制站—现场仪表(含传感器和执行器)”三层结构,操作站和控制站之间主要通过专用网络进行数据通信,控制站和现场仪表之间主要采用硬件连线(如4~20 mA 的模拟信号)进行互联。

集散控制主要适合于大系统或复杂生产过程的控制,比较容易实现复杂的控制规律,系统是积木式结构,结构灵活、可大可小、易于扩展;系统可靠性高;采用 CRT 显示技术和智能操作,操作、监视十分方便。控制站与现场仪表之间大部分传输的仍然是 4~20 mA 的模拟信号。

在集散控制系统中,分级式控制思想的实现正是得益于网络技术的发展和应。但是,不同的 DCS 厂家为达到垄断经营的目的而对其控制通信网络采用各自专用的封闭形式,不同厂家的 DCS 系统之间以及 DCS 与上层 Intranet、Internet 信息网络之间难以实现网络互联和信息共享,因此集散控制系统从该角度而言实质是一种封闭专用的、不具互操作性的分布式控制系统,且 DCS 造价昂贵。在这种情况下,用户对网络控制系统提出了开放化和降低成本的迫切要求。

5. 现场总线控制系统

现场总线控制系统(Fieldbus Control System, FCS)是新一代分布式控制系统,现场总线通过一对传输线,可挂接多个设备,实现多个数字信号的双向传输,数字信号完全取代 4~20 mA 的模拟信号,实现全数字通信。和 DCS 不同,FCS 结构模式为“操作控制站—现场总线智能仪表”二层结构,因此可以降低成本,另外操作控制站 A 和 B 可以相互备份,提高可靠性。现场总线控制系统结构示意图如图 1.5 所示。

由于现场总线是用于现场仪表与控制系统之间的一种开放、全数字化、双向、

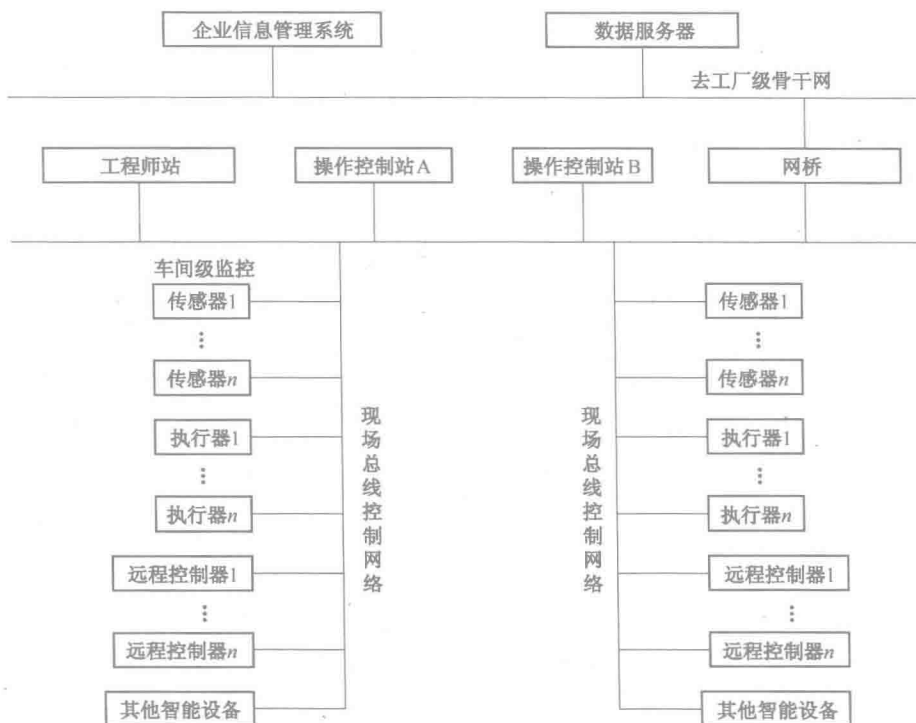


图 1.5 现场总线控制系统结构示意图

多站的通信系统,因此现场总线控制系统具有良好的开放性、互操作性和互用性。

现场总线控制系统融合了智能化仪表、计算机网络和开放式系统互联(OSI)等技术的精髓,最初设计构想是形成一种开放的、互操作性的、彻底分散的分布式控制系统,目标是要成为21世纪控制系统的主流产品。但由于目前现场总线标准和产品的多样性,因此无法发挥FCS的可互操作性优势。

6. 以太网控制系统

为了克服现场总线控制系统的总线种类多的不足,基于工业以太网的网络化控制系统应运而生并迅速发展。基于工业以太网的多总线控制系统示意如图1.6所示。

工业以太网的控制系统不仅具有现场总线控制系统的特点,还具有其他网络无法比拟的优势,主要体现在:

- (1)开放性:采用公开的标准和协议。
- (2)平台无关性:可以选择不同厂家、不同类型的设备和服务。
- (3)提供多种信息服务:提供E-mail、WWW、FTP等多种信息服务。
- (4)图形用户界面:统一、友好、规范化的图形界面,操作简单,易学易用。

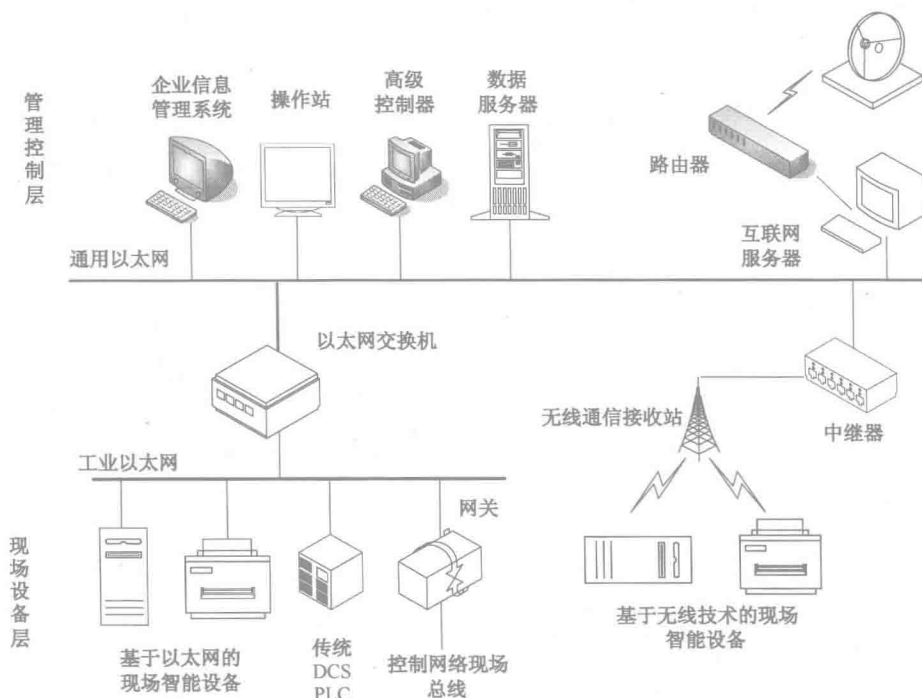


图 1.6 基于工业以太网的多总线控制系统示意图

(5)信息传递:快速、准确。

(6)易于实现多现场总线的集成:相互包容,多种现场总线集成起来协同完成测控任务。

(7)易于实现多系统集成:现场总线控制系统与传统控制系统的集成;各种现场总线控制系统之间的集成;以太控制网络与信息网络的集成。集成主要体现在现场通信协议的相容、不同系统数据的交换以及组态、监控、操作界面的统一。

(8)易于实现多技术集成:设备互操作性技术、OPC[Object Linking and Embedding(OLE)for Process Control]技术、TCP/IP 技术、现场总线设备管理技术和无线通信技术的集成。

1.1.2 网络化控制系统的结构

网络化控制系统这个词于1998年出现在马里兰大学 Gregory C. Walsh 等人的论著中,但并没有给出确切的定义,只是用图说明了网络控制系统的结构是指在网络环境下实现的控制系统,FCS是NCS的一种。

从如图1.7所示NCS的一般结构图可以看到,在网络控制系统中,分布在不

同区域的各系统部件(如监视计算机、控制器、智能传感器、执行器)之间都通过共用的通信网络实现信息交换和控制信号的传递,整个系统通过通信网络实现闭环控制。

上一节谈到 DCS 尽管还不具备开放性,控制功能也相对集中,但适应了现场控制的需要,表现出网络化的结构特性,因此可以归为 NCS 的范畴。可以说 DCS 是一种松散连接的网络控制系统,对网络特性的要求不高。

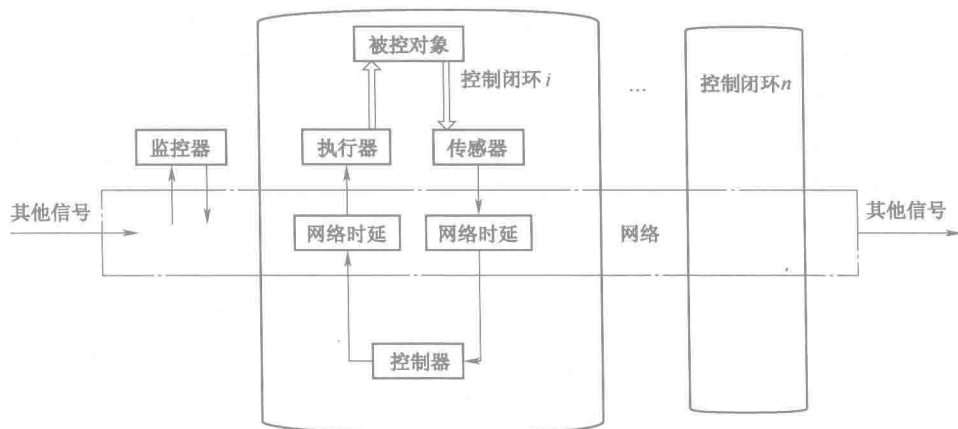


图 1.7 网络化控制系统结构

目前,真正意义上的网络化控制系统和通信网络是基于现场总线和工业以太网技术的。高速以太网和现场总线技术的发展和成熟,解决了网络化控制系统自身的可靠性和开放性,实现了现场智能设备控制真正意义上的分布化和网络化。

工业以太网技术是当前 NCS 实现技术的研究热点之一。以太网是一种成熟、快速、开放互联的网络协议,标准带宽为 10 Mbit/s。近期发展的快速以太网(100 Mbit/s)以及千兆以太网能够胜任整个企业范围的主干网络,分散的控制数据是增加带宽的要求之一。但是,以太网技术要真正运用到现场级,除需改进以太网的通信协议外,还需要解决网络的传输效率、本安防爆、总线供电等技术问题。只有解决这些问题,工业以太网才会成为 NCS 的主角。目前来看,基于现场总线技术的 NCS 仍然是主流,这也是本书讨论的重点。

1.1.3 网络化控制系统的特点

基于现场设备智能化和现场总线技术的网络化控制系统的主要技术特点如下。

1. 结构网络化

网络控制系统最显著的特点体现在网络化体系结构上,支持总线型、星形、树形等拓扑结构,与分层控制系统的递阶结构相比,显得更加扁平 and 稳定。

2. 节点智能化

带有 CPU 的智能化节点之间通过网络实现信息传输和功能协调,每个节点都是组成网络控制系统的一个细胞,且具有各自相对独立的功能。系统将传感测量、补偿计算、工程量处理与控制等功能分散到智能化节点中完成,仅靠智能化节点即可完成自动控制的基本功能,并可随时诊断设备的运行状态。

3. 控制现场化和功能分散化

由于现场设备本身已可完成自动控制的基本功能,使得原先由中央控制器实现的任务下放到智能化现场设备上执行,这使危险因素得到分散,从而提高了系统的可靠性和安全性。

4. 系统开放化和产品集成化

网络控制系统是在遵循一定标准的公开通信协议的基础上进行开发的,是一个开放性(开放是指对相关标准的一致性、公开性,强调对标准的共识和遵从)的系统,它可以与任何遵守相同标准的其他设备或系统相连。只要不同厂商根据统一标准开发自己的产品,这些产品之间便能实现互操作和集成。

5. 对现场环境的适应性

工作在现场设备前端,作为工厂网络底层的现场总线,是专为在现场环境工作而设计的,可支持双绞线、同轴电缆、光缆、射频、红外线、电力线等,具有较强的抗干扰能力,能采用二线制实现送电与通信,并可满足本质安全防爆要求等。

与传统意义上的控制系统相比,由于采用了现场总线技术,系统结构得以简化,这使得控制系统从设计到投入正常生产运行及其检修维护,都呈现出很多优点。例如,节省硬件数量与投资,节省安装费用,用户具有高度的系统集成主动权,提高了系统的准确性与可靠性。此外,由于设备标准化和功能模块化,因而还具有设计简单、易于重构等优点。由此可见,网络控制系统与传统的控制系统相比,大大减少了系统布线,简化了控制系统的物理结构,使系统资源共享,增强了系统的灵活性和扩展性,减轻了安装和维护的工作量。

1.2 列车网络控制系统概述

1.2.1 列车网络控制系统的结构和功能

列车通信网络是用于列车这一流动性大、环境恶劣、可靠性要求高、实时性强、

与控制系统紧密相关的特殊环境的计算机局域网,属于控制网络的范畴。

列车网络控制系统是列车的核心部件,包括以实现各种控制功能为目标的单元控制器、实现车辆控制的车辆控制器和实现信息交换的通信网络,其结构如图 1.8 所示。

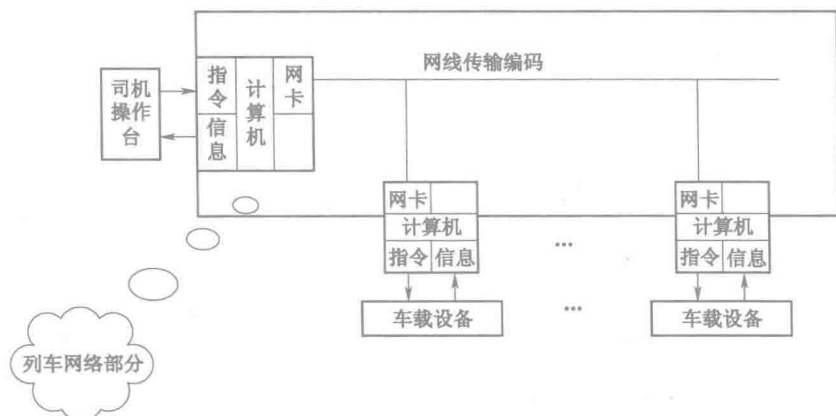


图 1.8 列车网络控制系统结构示意图

其功能主要包括以下方面:

- (1) 实现牵引控制,即牵引特性曲线的实现和牵引功能的优化。
- (2) 实现列车牵引的黏着控制,即列车在各种运用条件下,都能保持轮轨间的牵引力,并尽可能地使机车运用在轮轨间的牵引力实现最大化。
- (3) 实现列车运用过程中各种可能需要的功能关联和电路连接,即逻辑控制功能。
- (4) 实现列车运用过程中的故障信息处理,即进行故障信息的采集、处理、传输、显示和记录,并为列车乘务员提供故障的现场处理和排除的信息提示。
- (5) 提供列车运行的状态信息。

1.2.2 列车网络控制技术的发展

计算机在轨道交通工具上的应用随着 20 世纪 70 年代后期微处理器技术的普及而迅速发展。微处理器开始主要应用于机车车辆单个设备的控制,如西门子、BBC(英国广播公司)于 20 世纪 80 年代初将 8086 微处理器应用于机车或动车的传动控制。

随着计算机技术的发展,机车车辆上微机控制的服务对象逐渐增多,如牵引、供电、制动等系统都广泛使用到了计算机技术。因此,列车控制系统引入了层次划分的思想,产生了基于串行通信的、用于较为独立的控制设备或层次间信息交换的

总线与企业标准,如 BBC 的连接机车控制层与传动控制层的串行控制总线,该总线后来发展成为用于连接机车内的所有智能设备的 MICAS 车辆总线,简称 MVB。

初期的列车通信网络与列车控制系统相对独立。列车通信网络的任务主要是收集全列车各部件的状态、数据,以便进行监视和诊断;列车控制系统主要通过硬连线把命令传送到各节车厢,从而实现全车的重联控制。列车控制的命令不经网络传送,因此在列车可靠性上还远未达到可信赖的程度。此时的列车通信网络在列车控制系统中并不是必不可少的,它属于锦上添花。日本 300 系电动车组就是如此,装有车辆情报管理系统 TIS,该系统所提供的情报用于帮助乘务员采取对策,便于维修;控制的级位和命令采用硬连线直接传送,因此贯通全列车的硬连线比较多。

随着列车通信网络技术的发展,其可靠程度不断提高,功能也在不断增强。它已不再局限于监视、诊断所需要的情报收集,同时还传递控制所必需的信息,如各种控制命令都可通过网络传送到各车的各个部件,执行的结果也通过网络返回给司机。采用列车网络控制技术不仅可省去大量的重连线,而且可使全车各部件控制更加协调、精确和合理,从整体上提高了控制的技术水平。监控与监视、诊断合在一起,使信息更加丰富,也避免了重取信号,提高了监视和诊断的水平。20 世纪 90 年代初,产生了列车总线以满足机车和动车组重联控制的需要,如德国西门子的 DIN43322 列车总线,美国 Echelon 的 LonWorks 总线,法国 WorldFIP 组织的 WorldFIP 总线,日本的 ARCNET 网络等。至此,一些大的铁路电气设备公司以牵引控制系统为基础、以列车通信系统为纽带、以新器件和新工艺为载体,相继推出了广泛覆盖牵引、制动、辅助系统、旅客舒适设备控制和显示、诊断等方面的列车通信与控制系统,在欧洲一般简称为 TCC。在北美,类似的系统被称为基于通信的列车控制系统,简称为 CBTC。

如今,列车网络技术已经逐步走向成熟。西欧一些技术发展处于前列的公司,如瑞士的 ADtranz 公司、德国的西门子公司、意大利的 ANSALDO 公司等,都在致力于将自己公司的企业标准推向国际标准,逐步形成列车网络控制系统标准化、模块化的硬件系列和全方位开发、调试、维护 and 管理的软件工具。如 IEC TC9 第 22 工作组制定的“列车通信网络(简称 TCN)”标准已于 1999 年成为正式的国际标准,IEC61375 规定的 TCN 和 78 kbit/s 数据速率的 LonWorks。

但是,随着控制网络的应用范围不断扩大,用户对网络的开放性、性价比、开发和应用的多样性和灵活性等方面都提出了更高要求,而各种控制网络都有其优缺点,使得目前还没有一种控制网络能很好地满足铁路用户的所有应用需求。因此,列车网络技术标准 and IEC61158 工业现场总线标准一样,将不再是仅包含一种技