电力电子与电机控制 RTDS 仿真

DIANLI DIANZI YU
DIANJI KONGZHI RTDS FANGZHEN

刘广忱　田桂珍　编著
王　毅　主审

“十三五”普通高等教育本科规划教材

中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



“十三五”普通高等教育本科规划教材

电力电子与电机控制 RTDS 仿真

DIANLI DIANZI YU
DIANJI KONGZHI RTDS FANGZHEN

刘广忱　田桂珍　编著
王　毅　主审

中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书在介绍RTDS硬件、软件及RTDS小步长仿真的基础上，以具体仿真算例介绍了电力电子、电机控制的RTDS建模及仿真分析，主要包括DC/DC、DC/AC、AC/DC、AC/AC四种变换中常用的几种电路拓扑、直流电机控制系统、交流电机控制系统。风力发电是电力电子、电机控制的主要应用领域之一，本书还介绍了利用STATCOM改善笼型风力发电机组性能和采用超级电容实现永磁同步风电机组高电压穿越的RTDS仿真。

本书可用作高等院校电气工程及其自动化、自动化及相关专业的选修课教材，也可供研究生和专业技术人员参考和使用。

图书在版编目（CIP）数据

电力电子与电机控制RTDS仿真/刘广忱，田桂珍编著．—北京：中国电力出版社，2019.5
“十三五”普通高等教育本科规划教材
ISBN 978-7-5198-2758-8

Ⅰ.①电… Ⅱ.①刘… ②田… Ⅲ.①电力电子学—计算机仿真—高等学校—教材 ②电机—控制系统—计算机仿真—高等学校—教材 Ⅳ.①TM1-39②TM301.2-39

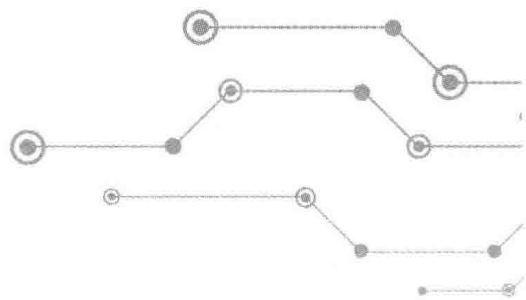
中国版本图书馆CIP数据核字（2018）第294347号

出版发行：中国电力出版社
地　　址：北京市东城区北京站西街19号（邮政编码100005）
网　　址：http://www.cepp.sgcc.com.cn
责任编辑：牛梦洁（mengjie-niu@sgcc.com.cn）
责任校对：黄　蓓　闫秀英
装帧设计：赵丽媛
责任印制：钱兴根

印　　刷：三河市航远印刷有限公司
版　　次：2019年5月第一版
印　　次：2019年5月北京第一次印刷
开　　本：710毫米×1000毫米　16开本
印　　张：15
字　　数：304千字
定　　价：48.00元

版 权 专 有　侵 权 必 究
本书如有印装质量问题，我社营销中心负责退换

前　言



电力电子技术、电机控制系统涉及电路原理、电子技术、自动控制理论、信号处理、电力拖动等应用广泛，实践性很强。采用实时数字仿真器（Real Time Digital Simulators，RTDS）对电力电子电路、电机控制系统进行仿真分析，具有实时、经济、安全、快捷等优点，可有效促进人们对相关理论的理解与掌握，为分析、设计实际应用系统奠定基础。在参考国内外大量文献及RTDS用户手册的基础上，结合多年的教学经验和科研积累，编著了本书。本书在分析电力电子、电机控制基本原理的基础上，着重介绍电力电子变换电路及电机控制系统的RTDS建模及仿真，希望能对读者在学习、应用电力电子和电机控制相关知识过程中有所帮助。

本书共分6章。第1章为RTDS™仿真系统概述，主要介绍最新两代RTDS—PB5和NovaCor的主要硬件、RTDS软件—RSCAD及书中后续用到的RTDS模型库—电力系统库和控制系统库。第2章为RTDS小步长仿真，主要介绍RTDS小步长仿真的基本原理、RTDS小步长库、大小步长仿真及小步长与实际硬件的混合仿真，并给出了一个小步长仿真实例—简化的STATCOM。第3章为基于RTDS的电力电子电路仿真，在分析DC/DC、DC/AC、AC/DC、AC/AC四种变换中常用的几种电路拓扑工作原理的基础上，对部分电路进行了建模及仿真，用以验证其工作原理。第4章为基于RTDS的直流电机控制系统仿真，主要介绍晶闸管-直流电动机开环调速系统，转速反馈控制直流调速系统，转速、电流反馈控制直流调速系统，PWM可逆直流调速系统的设计、建模及仿真分析。第5章为基于RTDS的交流电机控制系统仿真，主要介绍异步电动机恒压频比控制、转差频率控制、转子磁链定向矢量控制的系统原理、建模及仿真分析。第6章为RTDS在风力发电仿真分析中的应用，主要介绍利用STATCOM改善笼型风力发电机组性能和采用超级电容实现永磁同步风力发电机组高电压穿越的原理及仿真分析。

本书由内蒙古工业大学刘广忱、田桂珍编著，刘广忱编写了第1、2、5章

及 6.2 节并统稿，田桂珍编写了第 3、4 章及 6.1 节。本书由华北电力大学王毅教授主审，RTDS 公司梁玥峰博士在编写本书的过程中提出了很多建设性意见。同时在本书编写过程中，还得到了英国思克莱德大学（University of Strathclyde）Lie Xu 教授，RTDS 公司工程师毛青、王海悦，内蒙古电子信息职业技术学院王生铁教授，内蒙古工业大学王志和教授、王林教授、锁连博士的帮助；内蒙古工业大学硕士研究生胡剑文、李敏学、张志壮、邸丽娟参与了部分仿真工作，谨在此表示衷心的感谢。在编写本书过程中还参阅了国内部分兄弟院校的教材及国内外文献资料，在此对相关著者一并致谢。

本书得到中国国家留学基金、国家自然科学基金、内蒙古自治区科技计划项目、内蒙古自然科学基金委、RTDS 公司资助出版。

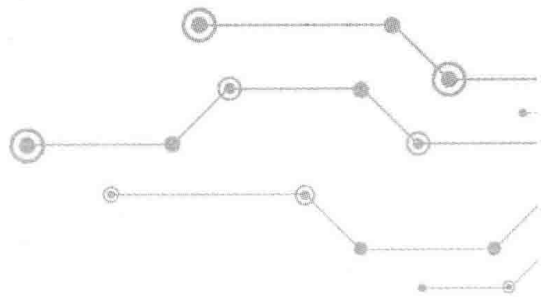
为了避免内容过于烦琐，书中略去了仿真建模中的一些相似过程及模块，可能会给仅关注某一算例的读者带来不便。鉴于此，如有读者需要某一具体算例模型，可发邮件索取，联系邮箱 liugc@imut. edu. cn。

限编著者水平，书中难免存在一些缺点和错误，殷切希望广大读者及同行批评指正。

编著者.

2018 年 12 月

目　录



前言

1 RTDS™仿真系统概述 …… 1

1.1 RTDS的硬件系统构成 …… 2
1.2 RTDS的软件平台—RSCAD简介 …… 15
1.3 RTDS模型库 …… 31

2 RTDS小步长仿真 …… 43

2.1 小步长仿真基本原理 …… 44
2.2 小步长库（Small_dt） …… 47
2.3 小步长仿真实例—简化的STATCOM …… 66
2.4 大、小步长仿真接口 …… 84
2.5 小步长与实际硬件混合仿真接口 …… 88

3 基于RTDS的电力电子电路仿真 …… 96

3.1 DC/DC变换电路及其仿真 …… 96
3.2 DC/AC变换电路及其仿真 …… 114
3.3 AC/DC变换电路及其仿真 …… 119
3.4 AC/AC变换电路 …… 139

4 基于RTDS的直流电机控制系统仿真 …… 148

4.1 晶闸管-直流电动机开环调速系统及其仿真 …… 148
4.2 转速反馈控制直流调速系统及其仿真 …… 154
4.3 转速、电流反馈控制直流调速系统及其仿真 …… 161
4.4 PWM可逆直流调速系统及其仿真 …… 170

5 基于 RTDS 的交流电机控制系统仿真 …… 176
5.1 异步电动机调速系统类型 …… 176
5.2 异步电动机恒压频比控制及仿真 …… 177
5.3 异步电动机转差频率控制及仿真 …… 184
5.4 异步电动机矢量控制系统及仿真 …… 190
6 RTDS 在风力发电仿真分析中的应用 …… 204
6.1 STATCOM 改善笼型风力发电机组性能的 RTDS 仿真 …… 204
6.2 采用超级电容的永磁同步风力发电机组高电压穿越控制仿真 …… 217
参考文献 …… 231

1 RTDS™仿真系统概述

仿真是进行科学研究的一项有效办法，是在模型上（物理的或数学的）进行系统性能分析与研究，用以帮助理解需要解决的实际问题，并对实际问题的解决提供参考。它所遵循的基本原则是相似原理。

根据所采用的模型可将仿真分为物理仿真和数学仿真两大类。物理仿真是采用物理模型（即不以人的意志为转移的客观存在的实体）进行仿真分析。例如，人们研究大型并网风力发电系统电机控制策略时，会在实验室中搭建小容量机组，利用电动机作为原动机模拟各种工况进行实验分析。物理仿真的优点是由于有实物介入，因此效果逼真，实时性好；缺点是系统构造复杂，或造价较高，或耗时较长。数学仿真是采用数学模型（即从一定的功能或结构上进行相似，用数学的方法来再现原型的功能或结构特征）进行仿真分析。例如，同样研究风力发电系统电机控制策略，将电机用微分方程表示建立其数学模型，利用计算机分析其控制策略及系统性能。数学仿真多采用计算机进行计算分析，因此具备经济、安全、快捷、方便、精度较高等优点；缺点是多为离线计算，实时性差。

实时数字仿真器（Real Time Digital Simulators，RTDS）作为一种数学仿真方法，采用与电磁暂态程序（Electro - Magnetic Transient Program，EMTP）相同的算法，即采用梯形积分规则，用伴随模型作为动态元件，用节点法建立方程，用稀疏矩阵和 LU 因式分解法来解代数方程。但由于其硬件计算能力较强（最新一代 RTDS NovaCor 采用 IBM POWER8 处理器，运行频率 3.5GHz），而且采用多处理器并行计算，因此可以实现实时仿真。下面就采用 RTDS 对电力电子、电机控制仿真所用到的相关软、硬件和 RTDS 模型库等基本知识做简要介绍。

RTDS 由定制硬件（称为 Rack，用于实时计算）及软件（RSCAD，运行于工作站，用来建立仿真模型，进行编译，分配到 Rack 进行仿真，并对仿真进行实时控制及接收仿真结果）组成，专为电磁暂态（Electromagnetic Transient，EMT）实时仿真而设计。

扩展阅读



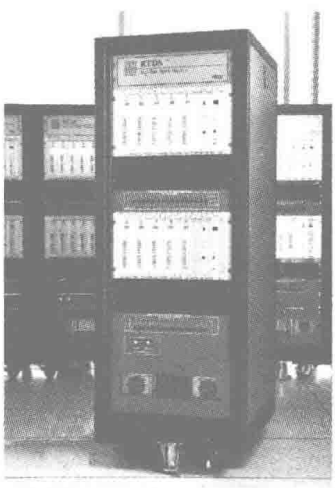
1.1 RTDS的硬件系统构成

RTDS全数字并行处理硬件可采用典型的仿真步长模拟复杂电力系统网络。仿真器还可采用小步长子网来模拟快速电力电子器件的开关动作（如采用PWM控制的电压源型变换器）。硬件的模块化设计允许用户根据需要自由扩展仿真器的计算能力。

RTDS通过处理器卡的并行计算来实现实时仿真。根据所采用的处理器卡可以将RTDS分为六代产品，分别是TPC、3PC、RPC、GPC、PB5和NovaCor。处理器卡安装在机柜中的卡箱（Rack）里。而最新一代NovaCor已经不再是处理器卡形式，而是装在机箱内的一体化仿真器，为了方便起见，称之为NovaCor机箱。每个NovaCor机箱（10核均开通的情况下）具有一个满载PB5卡的Rack 2～3倍的仿真能力。PB5卡之间的通信是采用背板通信方式，而NovaCor机箱是核与核之间直接通信，因此速度更快。

NovaCor机箱可以单独使用，也可以与安装处理器卡的Rack一样，安装在机柜中。当仿真需求增加时，可以在Rack中增加处理器卡或开通更多NovaCor处理器核，也可以增加Rack或NovaCor机箱数量，或增加机柜的数量。多个Rack或NovaCor机箱之间可以通过互联来完成更复杂的电力系统仿真。

RTDS机柜（如图1-1所示）配有标准DIN卡轨，用以安装I/O卡和其他组件。I/O卡实现仿真器与外部设备（如继电保护设备、电力电子变换器的控制单元等）的连接。



(a)



(b)

扫码观看彩图

图1-1 RTDS机柜

(a) 装有2个Rack的中型机柜；(b) 装有2个NovaCor机箱的机柜

安装 PB5 卡的 Rack 的 RTDS 机柜有三种不同尺寸可供选择，用以满足不同用户的需求。最多可装 3 个 Rack 的全尺寸机柜，尺寸约为 610mm×740mm×2090mm，质量约为 372kg（3 个 Rack，且含 seismic kit）；最多可装 2 个 Rack 的中型机柜，尺寸约为 610mm×740mm×1720mm；装 1 个 Rack 的小型机柜，尺寸约为 610mm×435mm×940mm。每个 Rack 所需供电功率为 700～800W。

安装 NovaCor 机箱的 RTDS 机柜只有一种规格，其尺寸约为 683mm×794mm×1895mm。每个 NovaCor 机箱所需最大供电功率约为 450W。

下面对 RTDS 仿真器的主要硬件设备做简要说明。

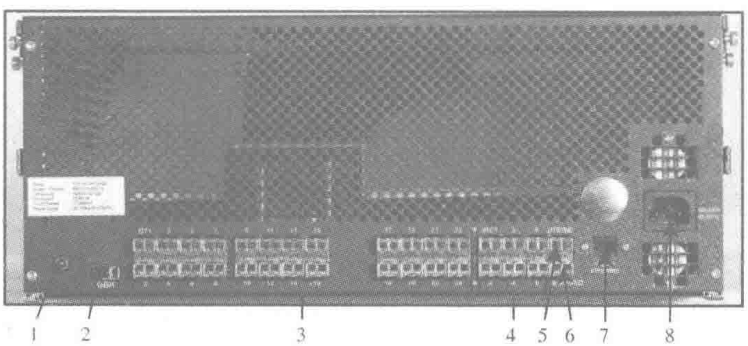
1.1.1 NovaCor

NovaCor 机箱的前、后面板分别如图 1-2 和图 1-3 所示。



扫码观看彩图

图 1-2 NovaCor 机箱前面板



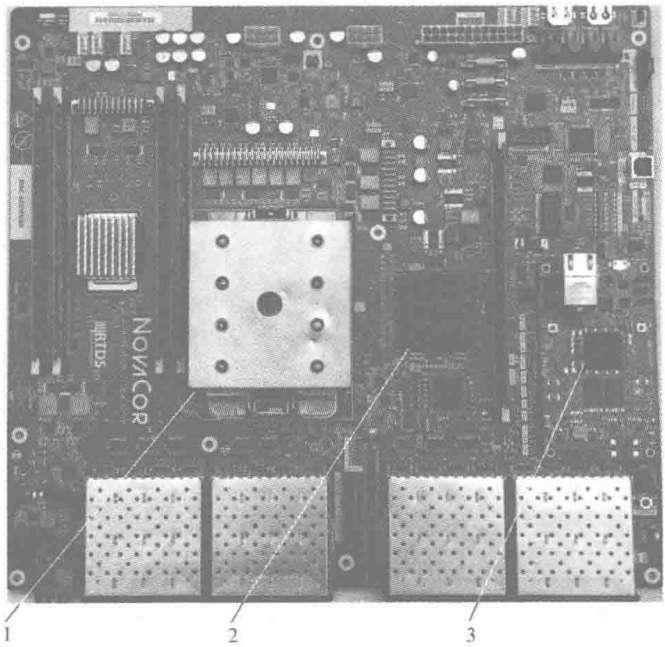
扫码观看彩图

图 1-3 NovaCor 机箱后面板

1—触摸屏电源输入；2—GBH 连接端口；3—光纤通信通道（×24）；4—GTIRC 光纤通信通道（×6）；5—GTSYNC 光纤通信通道；6—预留通道；7—以太网接口；8—交流电源输入

每个 NovaCor 机箱（后面简称 NovaCor）均由 10 核 IBM Power8 处理器、工作站界面（WIF）、通信端口和模拟输出通道构成，完成电力系统、控制系统的实时仿真。

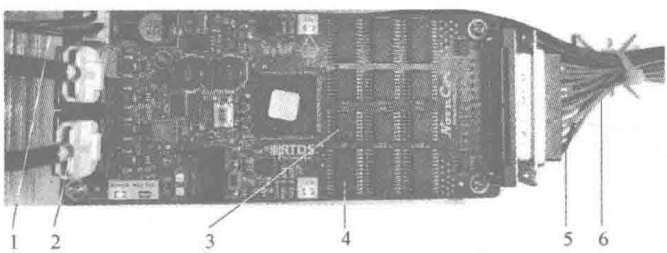
NovaCor 中的处理器电路板和前面板 I/O 电路板分别如图 1-4 和图 1-5 所示。



扫码观看彩图

图 1-4　处理器电路板

1—10 核 IBM Power8 处理器；2—FPGA，用于实时功能，与其他 NovaCor 机箱、PB5 Rack 及 I/O 卡通信等；3—FPGA，用于非实时功能，与用户工作站通信



扫码观看彩图

图 1-5　前面板 I/O 电路板

1—电源线；2—光缆，连接处理器板；3—运算放大器，OP470G；4—D/A 转换器，DAC7802；5—前面板接地端连接线；6—前面板模拟输出端连接线

当仿真器需要扩容时，NovaCor 之间可采用三种不同的连接方式，分别是：①采用光纤经 NovaCor 上的 GBH 端口、GTIRC 端口点对点直接连接

(用于 2 个 NovaCor)；②采用光纤经全局总线集线器（GBH）、NovaCor 上的 GTIRC 端口实现互连（用于 3～7 个 NovaCor)；③采用光纤经全局总线集线器（GBH）、NovaCor 上的 GTIRC 端口及 GTIRC 交换机实现互连（用于 7 个以上 NovaCor)。

NovaCor 向下兼容基于 PB5/GPC 卡的仿真器，同样有三种不同的连接方式：①经 GTWIF 点对点连接；②经 GTWIF、GBH 连接；③经 GTWIF、GBH 和 GTIRC 交换机连接。仿真步长取决于前一代仿真器。需要注意的是，在 NovaCor 和 PB5/GPC 之间不可以由小步长（相关概念见第 2 章）子网连接。

1.1.2 全局总线集线器 GBH

全局总线集线器（GBH）是用于协调由 3 个或 3 个以上 NovaCor 或 PB5/GPC Rack 组成的实时仿真系统。它通过专用光纤（长度不超过 30m）将每个 NovaCor 或 PB5/GPC Rack 连接到一个 GBH 上。GBH 前面板如图 1-6 所示。

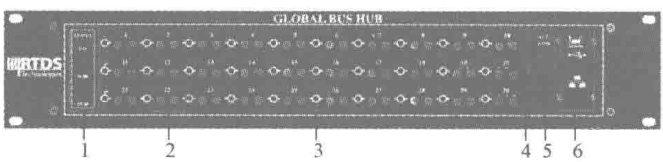




图 1-6 GBH 前面板（电源接口在机箱背面）

1—Hub 板状态指示灯；2—光纤接口；3—通道状态指示灯；4—通信状态指示灯；5—USB 接口；6—LAN 接口

每个 GBH 机箱最多可以安装三块集线器卡，每块集线器卡最多可以连接 10 个 NovaCor 或 PB5/GPC Rack。也就是说，一个 GBH 最多可以连接 30 个 NovaCor 或 Rack。当仿真系统多于 30 个 NovaCor 或 PB5/GPC Rack 时，可以将 2 个 GBH 机箱连起来使用。这样可以支持最多 60 个 NovaCor 或 PB5/GPC Rack。

GBH 允许对运行一个仿真算例的所有 NovaCor 或 Rack 分配共同的仿真步长。该步长由多 NovaCor/Rack 仿真算例中的第一个 NovaCor 或 Rack（称为主机，其他称为从机）定义。GBH 确保用于同一仿真算例的所有 NovaCor 或 Rack 采用相同的步长。当仿真开始运行，GBH 将运行该算例的 NovaCor 或 Rack 隔离开来。例如，用户在 8 个 NovaCor/Rack 的仿真器上运行一个需要 3 个 NovaCor/Rack 的仿真算例，该仿真算例可以分配给 8 个 NovaCor/Rack 中任意连续的 3 个，其他 5 个 NovaCor/Rack 可用于其他仿真。

1.1.3 GTIRC 交换机

GTIRC 交换机（简称 IRCSW，如图 1-7 所示）用于多 NovaCor/Rack 之间的高速通信。当 8 个或更多 NovaCor 或 NovaCor/Rack 构成 RTDS 实时仿真系统时，如果所有 NovaCor/Rack 均有互连需求，可以采用 IRCSW。每个 NovaCor 可以通过其 GTIRC 端口经光纤与 IRCSW 相连。IRCSW 将来自每个 NovaCor 的数据传递到需要特定数据的其他 NovaCor。IRCSW 采用可扩展的架构，一个机箱最多可安装 5 个 IRCSW 卡，每个卡具有 12 个端口，因此最多可有 60 个 NovaCor/Rack 互连。

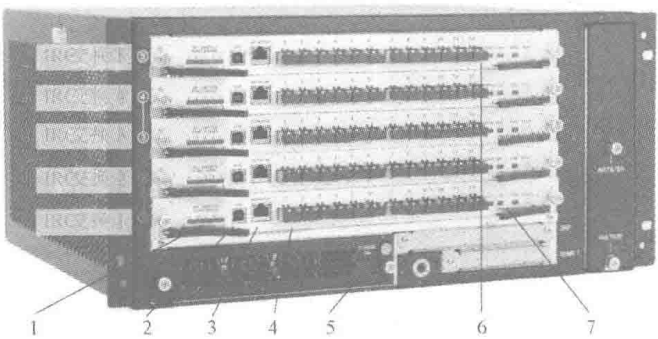




图 1-7 GTIRC 交换机（电源接口在背面）

1—IRC 交换卡编号指示；2—USB 接口（仅卡 1 上的有效）；
3—以太网接口（仅卡 1 上的有效）；4—1＃IRC 端口；
5—电源指示；6—60＃IRC 端口；7—状态指示灯

1.1.4 处理器卡 PB5

PB5 卡（如图 1-8 所示）是 RTDS 进行建模与仿真的第五代处理器卡，每个 Rack 可包含 2～6 个 PB5 卡。每个 PB5 卡采用 2 个飞思卡尔第四代微处理器 MPC7448 作为计算核心。

PB5 卡的主要功能如下：

（1）给出电力系统网络解决方案。在仿真过程中，PB5 卡上的微处理器可以用来做网络解，如计算节点电压、无源支路等。在基于 GTWIF 的系统中，一个 PB5 上的微处理器可处理 72 个节点和 100 个单相断路器。用户可以指定两个微处理器来做网络解，那么可处理多达 144 个节点和 200 个单相断路器。如果采用增强的背板连接，那么一个微处理器可以求解 90 个节点，两个微处理器可以求解 180 个节点。

（2）处理电力系统元件。即处理仿真过程中涉及的各种电力系统元件，如电机、传输线、变压器等。

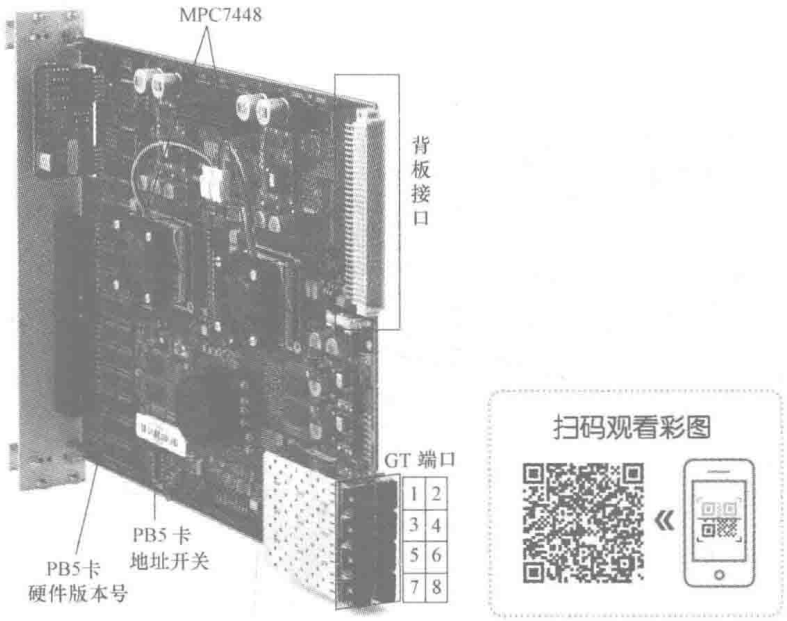


图 1-8 PB5 卡

(3) 处理控制系统元件。仿真过程中可能会用到大量的控制元件，通常会将控制元件分配给某个 PB5 卡中的一个处理器处理，有时甚至可能不只一个处理器。与 PB5 卡通过光纤连接的 GT I/O 卡也通过控制元件交换数据。

(4) 仿真小步长的电力电子电路。利用小步长（1.4～2.5μs）进行电力电子电路仿真。

(5) 连接 GT I/O 卡。通过 PB5 上的光纤接口可以连接各种 I/O 卡，如模拟量输出卡 GTAO、模拟量输入卡 GTAI、数字量输出卡 GTDO、数字量输入卡 GTDI、前面板接口卡 GTFPI、网络接口卡 GTNET 等。

1.1.5 工作站界面卡 GTWIF

每个 Rack 都包含一个 GTWIF 卡（如图 1-9 所示），通常装在最右侧，占据两个卡槽。

GTWIF 卡的主要功能如下：

(1) RTDS Rack 可与运行 RSCAD 软件的工作站进行通信。这种通信通过基于以太网的局域网实现。GTWIF 卡的实时操作系统可以与 RSCAD/Runtime 软件收发数据以更新绘图及用户设置的事件（如利用滑块 Slider、开关 Switch 及其他 Runtime 元件来改变设置的参考值）。GTWIF 卡也可用于与工作站进行数据通信，以载入新的仿真、开始或停止仿真等。

(2) 当进行多 Rack 仿真时，确保各 Rack 同步。每一仿真步长及步长内的通信间隔由主 Rack（分配给仿真模型的第一个 Rack）上安装的 GTWIF 卡

进行同步。

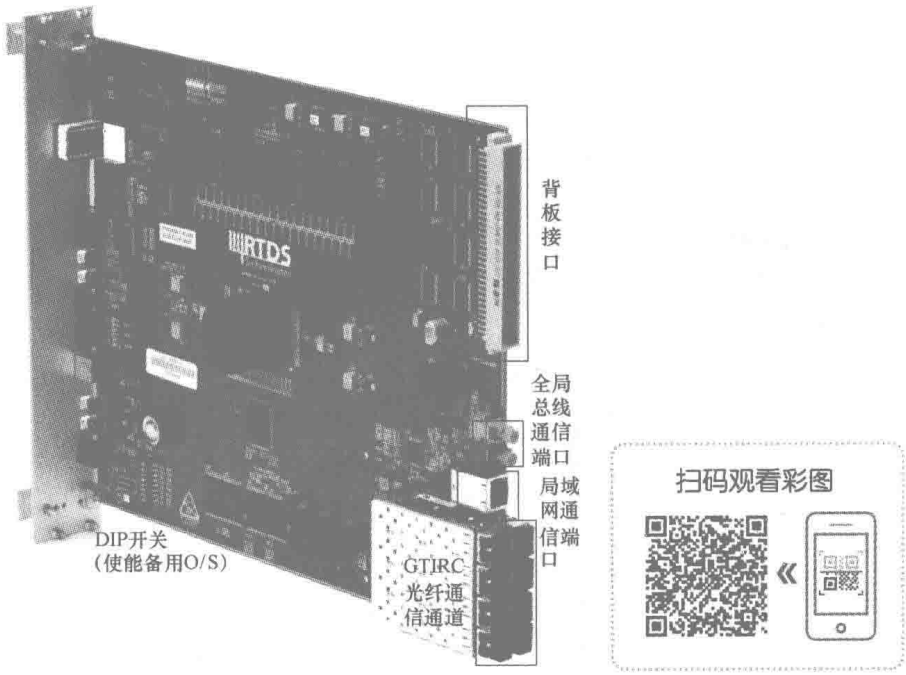


图 1-9　GTWIF 卡

(3) 当进行多 Rack 仿真时与其他 Rack 通信。当运行多 Rack 仿真模型时，每个 GTWIF 卡可以通过其内置通信通道与最多 6 个 Rack 交换数据。

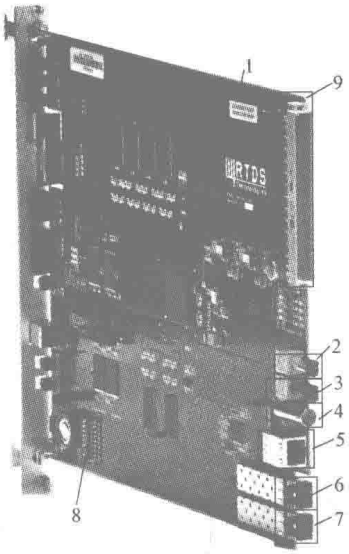
(4) 协调同一 Rack 背板上的各处理器之间的数据通信。

(5) 性能自检及在安装于同一 Rack 的其他卡上运行诊断程序。诊断程序上电时自动运行，也可以由用户设置。诊断结果可通过 RSCAD 查看。

1.1.6　网络接口卡 GTNET

GTNET 卡（如图 1-10 所示）是 RTDS 上不同网络协议的接口。GTNET 卡支持的协议有：GSE（IEC 61850 GOOSE/GSSE）、SV（如 IEC 61850-9-2）、DNP3（Distributed Network Protocol）、PLAYBACK（Playback of Large Data Sets）、PMU（IEEE C37.118）、104（IEC 60870-5-104）、Socket（TCP 或 UDP）。

GTNET 卡的升级版 GTNET×2 卡除了支持以上所述的协议外，还支持 MODBUS 协议。GTNET×2 卡可以采用与 GTNET 卡同样的背板连接方式安装在 Rack 中，也可以安装在 NovaCor 机柜的专用 GTNET 中，一个机箱可以安装 3 个 GTNET×2 卡。GTNET×2 卡通过光纤与 NovaCor 连接，通过以太网电缆与以太网交换机相连。



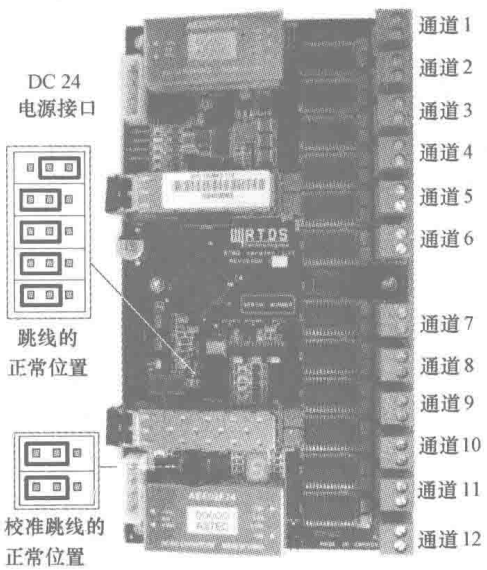
扫码观看彩图

图 1-10 GTNET 卡

1—本卡 MAC 地址；2，3—100BaseFX（光纤），
（其中 2 为 1PPS 时钟 Tx 端口，3 为 Rx 端口）；
4—1PPS 时钟输入或输出（BNC 接头）；5—100BaseTX 局域网接口；
6，7—GTIIO 口；8—DIP 开关；9—背板接口

1.1.7 模拟量输出卡 GTAO

GTAO 卡（如图 1-11 所示）是 RTDS 输出模拟量至外部设备（简称外设）的接口。它具有 12 路 16 位的模拟量输出通道，输出范围是 ±10V。GTAO 可以设置 1μs 采样时间进行过采样，而且所有输出通道同步更新。



扫码观看彩图

图 1-11 GTAO 卡

需要注意的是，由于GTAO卡上含有高频DC/DC变换器，在测量其输出时如果不注意会测量到高频噪声。例如，用示波器观察输出信号时，建议使用带有RF接地适配器的探头。

1.1.8 模拟量输入卡GTAI

GTAI卡（如图1-12所示）是外设传输模拟量至RTDS的接口。它具有12路16位的模拟量输入通道，输入范围是±10V。所有通道可以同步采用，每6μs向PB5卡发送一次数据。

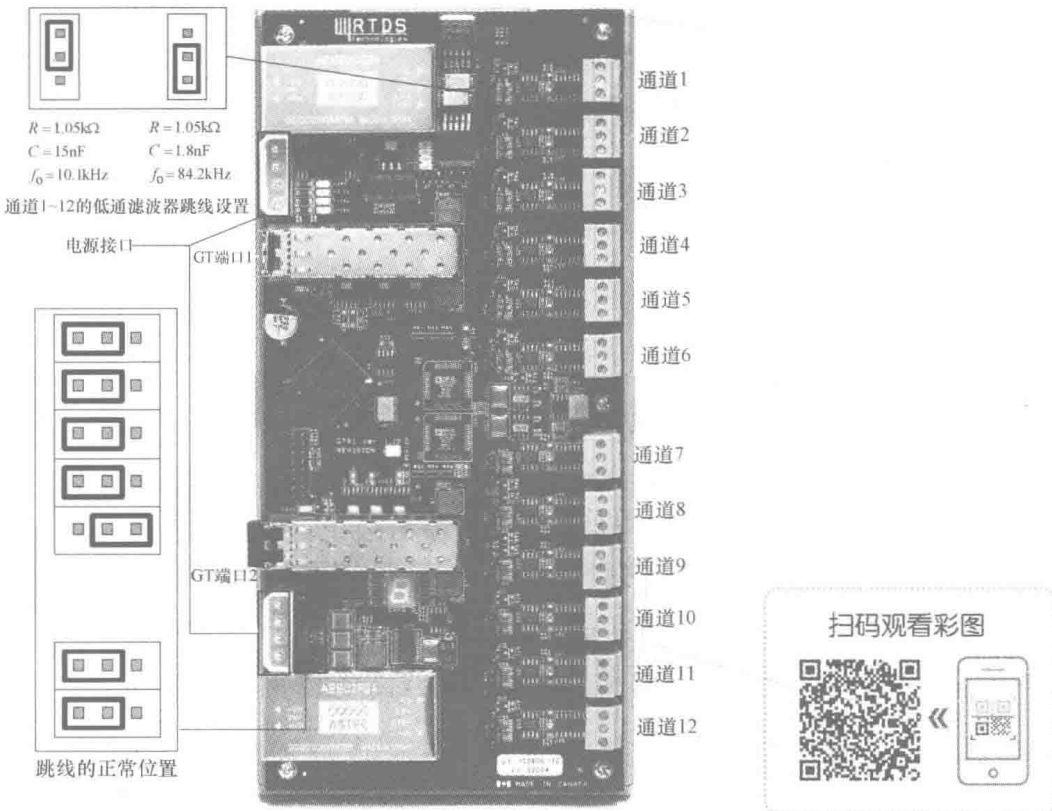


图1-12 GTAI卡

为了降低共模噪声，消除RTDS和外设之间的直流偏移，GTAI的输入信号应该采用差分信号，即每个通道三个连接：+信号、-信号和参考地。图1-13给出了当外设输出信号（即GTAI的输入信号）形式不同时与GTAI的连接方式。

GTAI V2卡是GTAI卡的升级版，与GTAI卡的功能相同，但可以每1μs向NovaCor发送一次数据。GTAI V2卡与外设的单端输出信号相连时，须注意和GTAI卡的连接方式略有不同，需按图1-14所示方式连接。