

现代列车牵引控制技术

冯江华 郭其一 刘可安 著
周桂法 姚晓阳 杨卫峰



科学出版社

现代列车牵引控制技术

冯江华 郭其一 刘可安 著
周桂法 姚晓阳 杨卫峰

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书介绍了铁路牵引动力的发展历程、现代列车牵引传动系统的工作原理和控制特点及技术体系;讨论了列车传动系统的网侧控制、电机控制和黏着控制等控制技术;介绍了重载列车同步控制、现代列车通信网络、列车牵引控制系统平台等;还介绍了与测试认证技术相关联的环境试验等型式试验测试技术、电磁兼容性测试技术、可靠性测试技术以及通信网络的一致性测试技术等;附录给出了两个列车牵引控制系统实例,是在轨道交通车辆技术领域的实践探索和技术应用。

本书适合于高等院校交通、铁路及轨道控制等专业的高年级本科生和研究生阅读,也可以供从事研究设计、生产制造、技术诊断、维护保养以及质量管理体系管理的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

现代列车牵引控制技术/冯江华等著. —北京:科学出版社,2017. 11
ISBN 978-7-03-055153-5

I. ①现… II. ①冯… III. ①列车-牵引系统-控制系统-研究
IV. ①U260. 13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 269238 号

责任编辑:张海娜 姚庆爽 / 责任校对:桂伟利

责任印制:张 伟 / 封面设计:蓝正设计

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京九州迅驰传媒文化有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017 年 11 月第 一 版 开本:720×1000 B5

2017 年 11 月第一次印刷 印张:33

字数:660 000

定价:180.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

序

由于铁路运输高效、安全,我国的主要货物运输和人员运输是以铁路作为主要的运输工具。同样,城市轨道列车(包括地铁、轻轨以及其他形式的有轨车辆)由于具有高效、高速、正点与安全等特征,目前成为各个特大型城市以及部分大中型城市解决地面交通压力的主要选择。

列车(含机车、高速动车组)和城市轨道列车的共同特点是由轨道线路系统、轨道车辆系统、轨道供电系统(包括电气化铁路供电系统和地铁的牵引供电系统)、信号控制系统(又称为列车控制系统)和行车调度系统以及其他各类辅助系统组成。而其中的轨道车辆系统是轨道交通实现人员运输和货物运输的唯一载体。

轨道车辆系统是一个结构非常复杂的大系统,它包括车体、走向机构(转向架)、车钩、牵引与制动控制系统、故障诊断系统和旅客信息系统等。而其中的牵引与制动控制系统是实现列车运行速度控制、安全控制以及舒适性控制等的技术核心,故障诊断系统是保障列车安全运行的重要技术辅助控制之一。随着现代微电子技术、电力电子技术、计算机技术、网络通信技术、现代传感器技术、现代信号处理技术和现代数学以及控制理论的发展,现代列车牵引与制动控制系统和故障诊断系统建立在这些理论与技术之上,成为数字化、智能化与网络化的电子电气系统。

由冯江华等撰写的系列专著包括《现代列车牵引控制技术》和《可靠性工程与故障诊断技术》,两册书的内容有所区别,但是立足点都是列车状态检测控制技术与应用系统的论述,相互补充,构成现代列车检测、控制、诊断、测试认证等完整的技术体系。《现代列车牵引控制技术》的主要内容包括列车状态信息检测与控制的理论基础和技术实践,交流传动理论和现代列车车载通信网络技术、工程应用以及测试认证技术等。而《可靠性工程与故障诊断技术》的主要内容是故障诊断的基础理论体系与实现方法,可靠性工程、故障诊断的实践应用和实验测试结果等。

该系列的第一个特点是吸收和汇集了现代列车检测、控制、诊断与测试领域近年来的丰富研究成果。列车(机车)车载电传动控制系统从初期的变压器级间调压到相控整流输出的直流电机调速技术,发展到目前建立在直接转矩控制或者旋转磁场控制理论基础之上,普遍采用以绝缘栅双极型晶体管(IGBT)构成的变流器系统可控变频变压输出的三相交流异步电机速度与力矩控制技术。从以变流器为核心的速度调节技术,到目前的以车载计算机控制网络为基础的分布式控制系统,不仅实现速度控制,还实现安全控制和充分利用黏着的力矩控制与防滑控制,从常规的普通列车控制到高速列车控制、重载重联列车同步控制。以现代传感技术和信

号处理技术为基础的故障诊断技术不断完善并且实用化,成为保障列车安全运行的重要技术基础之一。列车(机车、动车组)的RAMS(可靠性、可用性、维护性和安全性)体系构建、实践和实现不断进步,并且贯穿列车设计、制造、运营、管理和处置的整个生命过程,因此现代列车的技术性能与功能、可靠性、安全性不断提高,一个往返运行交路从以前的一二百里到目前的一千多公里。整个列车(机车)牵引控制理论和控制实现技术发生了重大的变化,并且还在不断进步之中。该系列就是将这些崭新的理论与技术形成完整的体系。

该系列的第二个特点是以基本理论为基础,以应用实践为目的展开讨论和叙述。列车控制从检测技术、控制理论、车载网络到交流传动控制技术形成体系,列车诊断是从RAMS体系的建立,引出故障诊断的信息获取与检测控制理论、信号处理、可诊断性理论、故障可分离性理论到部件诊断和系统诊断等构成完整的体系。该系列贯穿的思想是建立理论基础,并且由理论指导实践,为实践服务。

该系列的第三个特点是对系统的测试、认证和一致性检测技术与系统设计实现作为一个整体进行介绍。由于列车是一个非常特殊的运行环境,其海拔、粉尘、盐雾、温度、冲击振动、电磁兼容性等均随地面环境不同相差非常大,所有的车载设备必须适应恶劣的运行环境才能够稳定正常地工作。牵引控制系统和故障诊断系统作为电子电气设备必须通过相关的国际标准或者国家标准、行业标准的测试认证,才能够成为合格的车载设备。因此,测试认证技术应当成为控制理论与技术的一部分。作为牵引控制系统与故障诊断系统核心的车载网络系统,必须与所有与之相连接的设备实现无缝的互联互通,而网络的一致性检测测试技术就是保障其可靠安全运行的基础。因此,网络的一致性检测认证技术也同样必须成为该系列的组成部分。这样的体系构成也就成为该系列的重要特点。

该书作者一直从事电力牵引与传动控制领域的教学、研究、技术开发和工程实践工作,理论扎实,经验丰富。该书的内容是他们几十年工作的积累和总结,也是对牵引控制和诊断应用行业的一份贡献与一种新的探索。该书取材广泛、内容丰富、见解独特,可以成为该领域工作者的指导与引领。特此作序。



中国工程院院士

2017年4月于湖南株洲

前 言

随着计算机控制技术、列车车载通信网络、大功率电力电子器件与现代微电子技术、现代传感器技术和检测测量技术,以及列车控制理论的不断发展和完善和相互融合,现代列车逐步形成了以交流传动为基本传动方式,以车载列车通信网络为平台和以计算机数字化检测控制为核心的现代列车检测、控制与诊断技术体系。

随着现代交流拖动与控制理论体系的建立和不断深化,电气化机车(电动车组)从以变压器级间调压和以可控硅为核心的相控调压实现的直流拖动电传动系统,发展成为现代的以绝缘栅双极型晶体管(IGBT)为主的大功率电力电子器件构成的变流器机组与交流传动体系。

20 世纪 80 年代,西门子、ABB、三菱、东芝等列车车载设备生产企业相继研发了列车计算机检测控制系统,并且实现工程化和产业化。由此机车车辆的控制从以模拟电子技术为主的检测控制体系向以微型计算机为核心的数字化、智能化和网络化检测控制体系发展,不仅实现了检测控制的自动化,而且还形成了基本完整的故障诊断体系。

20 世纪 90 年代,西门子、庞巴迪(包括原 ABB 的 Aditrans)等企业提出了基于现代网络技术的列车通信网络技术标准 TCN(IEC61375),由此列车检测控制走向网络化,并且该标准成为目前国际上广泛采用的车载通信网络标准。更重要的是,原来以变流器为核心的列车牵引控制系统,发展成为以列车通信网络为基础平台和核心的分布式牵引控制体系,所有的检测控制系统或装置就成为现代车载通信网络上的一个节点或者接口装置。

牵引电机技术也从直流电机发展成为可靠性更高的异步交流电机,目前各个大型生产企业开始建立生产永磁同步直驱电机拖动系统体系。同时,交流拖动的理论体系也不断发展完善,从早期的滑差控制到目前的旋转磁场矢量控制和直接转矩控制技术,以及基于状态估计理论的无速度传感器控制技术,都非常成熟完善,并且实现了工程化和产品化。

目前,列车控制诊断技术的发展是以安全为主题,以节能、高效和高可靠性为发展方向,干线铁路列车控制技术以安全、重载和高速为主要内容,而高速电动车组与城市轨道列车控制向更安全、更智能化、节能以及舒适性服务等方向发展,而控制检测系统向平台化、智能化方向发展。

我们将多年成果归纳整观,形成两本书出版:《现代列车牵引控制技术》的主要内容包括检测与控制理论基础、交流传动理论与技术、列车通信网络技术、工程应

用以及测试认证技术等;而《可靠性工程与故障诊断技术》的主要内容是可靠性工程的理论与实践、安全与安全完整性问题分析、故障诊断技术的基础理论与方法、故障诊断的实践应用和实验测试结果等。两书的内容有所区别,并且互为补充,其立足点都是列车检测控制技术与应用。

本书的作者几十年来一直从事轨道交通牵引装备的技术研究,尤其在列车RAMS体系研究与实践、状态检测技术、牵引控制理论与技术实践、交流传动系统研究设计应用以及状态诊断等领域有着多年的研究探索和积累。而作者所在单位中车株洲电力机车研究所有限公司以及下属的株洲中车时代电气股份有限公司是我国在该领域的最大研发基地和产品生产供应商;同济大学在我国的轨道交通基础理论和技术研究领域取得诸多的成绩,几十年来为我国的轨道交通现代化做出了自己的贡献,为本书的成稿积累了丰富的素材。

另外,在本书的准备与完成过程中,株洲中车时代电气股份公司的刘军、韩露、王益民、刘群欣、吕杰、杨四清、杨卫峰、刘智聪、倪大成、刘琳、潘燕等,同济大学黄世泽、陈聪、舒露丝、徐秋勇、诸葛暄雨、余亮亮等做了大量的实验准备、试验认证和文字工作,在此对他们所付出的辛勤劳动表示衷心的感谢。本书引用了大量公开刊物上发表的、在该领域从事基础研究与应用技术等工作的科研技术人员的成果以及文献,在此向他们表示深深的谢意!

本书的出版得到国家 863 项目(2009AA11Z217)的支持和资助,深表谢意!

由于作者的理论水平有限,而且长期在单一的领域内从事研究开发工作,书中难免存在不妥之处,恳请广大读者批评指正。

作 者

2017 年 4 月

目 录

序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 铁路牵引动力的发展	1
1.1.1 世界铁路牵引的技术历程	1
1.1.2 我国铁路电力牵引技术的发展历程	2
1.2 现代列车牵引传动系统原理及其控制特点	5
1.2.1 列车牵引动力单元牵引传动系统	6
1.2.2 列车多动力单元牵引控制	14
1.2.3 列车故障诊断	17
1.3 现代列车牵引控制系统的技术体系	18
1.3.1 交流传动牵引控制策略与控制技术	19
1.3.2 列车通信网络技术体系	24
1.3.3 现代列车控制系统保障技术	26
1.4 列车牵引控制技术的发展趋势	29
1.4.1 目前主要的发展现状	29
1.4.2 牵引控制技术的体系思想发展	30
1.5 本书的安排	31
参考文献	32
第 2 章 信号检测与处理基础	33
2.1 引言	33
2.2 列车状态信息检测原理	33
2.2.1 电压信号检测原理	33
2.2.2 电流信号检测原理	34
2.2.3 速度信号检测原理	35
2.2.4 压力信号检测原理	36
2.2.5 温度信号检测原理	37
2.2.6 振动信号与加速度检测原理	38
2.3 传感信号预处理技术	41
2.3.1 信号变换	41

2.3.2 信号放大	45
2.3.3 滤波降噪	46
2.3.4 模/数转换	51
2.4 数字信号预处理技术	54
2.4.1 常用数字滤波算法	54
2.4.2 数字信号滤波	56
2.4.3 卡尔曼滤波的应用举例——速度信号去噪	58
2.5 列车状态信息的融合	59
2.5.1 概述	59
2.5.2 信息融合的分类	60
2.5.3 信息融合的主要算法	63
2.5.4 列车状态信息的融合	65
2.6 小结	67
参考文献	68
第3章 列车控制理论基础	69
3.1 引言	69
3.2 列车动力学模型	69
3.3 异步电动机数学模型	70
3.3.1 三相异步电动机的多变量非线性数学模型	70
3.3.2 坐标变换	74
3.3.3 异步电动机在两相坐标系上的数学模型	76
3.4 牵引变流器电路拓扑及其 PWM 调制	80
3.4.1 两电平牵引变流器主电路	80
3.4.2 三电平牵引变流器主电路	81
3.4.3 两电平逆变器调制	81
3.4.4 三电平变流器调制	84
3.5 经典控制理论	87
3.5.1 经典控制概述	87
3.5.2 PID 控制及常用算法	88
3.5.3 控制系统的稳定性分析	92
3.6 现代控制理论	94
3.6.1 状态空间描述	94
3.6.2 状态观测器	95
3.6.3 模型参考自适应控制	96
3.6.4 滑模变结构控制	99

3.6.5 最优控制	102
3.7 智能控制	108
3.7.1 智能控制概述	108
3.7.2 模糊控制	108
3.7.3 神经网络控制	111
3.8 小结	114
参考文献	114
第4章 列车传动系统网侧变流器控制	115
4.1 引言	115
4.2 网侧变流器拓扑及原理	117
4.2.1 PWM变流器分类及拓扑	117
4.2.2 网侧变流器基本原理	119
4.2.3 网侧变流器交流侧电感设计	122
4.3 网侧变流器的控制	125
4.3.1 网侧变流器的控制策略	125
4.3.2 多重化载波移相调制	130
4.3.3 锁相环控制	133
4.4 网侧变流器发展趋势	140
4.4.1 PWM变流器中信息融合的应用	140
4.4.2 基于信息融合的多目标协调优化控制	142
4.5 小结	143
参考文献	143
第5章 列车传动系统交流牵引电机控制技术	145
5.1 引言	145
5.2 交流异步电机变压变频控制特性	146
5.3 异步电机转差频率控制技术	147
5.4 异步电机矢量控制技术	149
5.4.1 转子磁场定向(M-T)坐标系中交流异步电机的数学模型	149
5.4.2 磁场定向矢量控制规律分析	151
5.4.3 典型的交流异步电机矢量控制系统	152
5.5 异步电机直接转矩控制技术	154
5.5.1 异步电机基本数学模型	154
5.5.2 直接自控制技术	156
5.5.3 间接定子量控制技术	159
5.6 电机状态观测器	161

5.6.1 U-I 模型	161
5.6.2 I-N 模型	162
5.6.3 U-N 模型	163
5.6.4 全阶状态观测器	166
5.6.5 扩展卡尔曼滤波器法	167
5.7 基于 Fibonacci 的效率自寻优控制策略	169
5.7.1 电机的效率模型	169
5.7.2 基于 Fibonacci 自寻优效率优化控制策略	169
5.8 基于状态观测器的变流器协同自适应控制策略	171
5.8.1 状态观测器	171
5.8.2 基于状态观测器的变流器协同自适应控制策略	172
5.9 无速度传感器控制技术	173
5.9.1 无速度传感器技术在轨道交通的应用特点	174
5.9.2 无速度传感器控制技术策略	175
5.10 小结	178
参考文献	178
第 6 章 永磁同步牵引电机控制技术	180
6.1 引言	180
6.2 永磁同步电机的数学模型	180
6.2.1 永磁同步电机在三相静止坐标系下的数学模型	181
6.2.2 永磁同步电机在两相旋转坐标系下的数学模型	182
6.3 基于转子磁场定向的永磁同步电机控制系统	184
6.4 永磁同步电机电流控制策略	189
6.4.1 $i_d=0$ 控制	189
6.4.2 最大转矩/电流比控制	189
6.4.3 考虑饱和效应的永磁同步电机最大转矩/电流比控制策略	192
6.5 弱磁控制策略	195
6.6 基于内模校正永磁同步电机 DeadBeat 直接转矩控制	199
6.6.1 无差拍直接转矩控制原理	199
6.6.2 限定条件下的无差拍直接转矩控制	201
6.6.3 控制系统稳定性分析	202
6.6.4 内模反馈校正	203
6.7 小结	204
参考文献	205

第7章 列车黏着利用控制	206
7.1 引言	206
7.2 列车黏着基本概念及特性	207
7.2.1 黏着基本概念	207
7.2.2 黏着特性	208
7.2.3 影响列车可用黏着系数的因素	209
7.2.4 影响列车黏着利用率的因素	209
7.2.5 轮对的空转与滑行	210
7.3 提高列车黏着性能的措施	211
7.3.1 提高可用黏着系数的方法	211
7.3.2 提高黏着利用率的方法	211
7.4 列车黏着利用控制方法	212
7.4.1 再黏着控制方法	212
7.4.2 优化黏着控制方法	213
7.5 黏着利用控制的新策略与新技术	217
7.5.1 舒适度提升型控制策略	218
7.5.2 基于模糊逻辑的黏着控制技术	220
7.5.3 基于状态观测器的黏着控制技术	221
7.6 小结	223
参考文献	223
第8章 重载列车同步控制	224
8.1 引言	224
8.2 重载列车同步控制的数学基础	226
8.2.1 重载列车纵向力的数学模型	226
8.2.2 重载列车纵向力计算	227
8.2.3 列车纵向力仿真模型构建方法	231
8.2.4 基于马尔可夫决策的同步指令传输技术	234
8.2.5 制动同步控制技术	236
8.3 分布动力无线重联同步控制系统的组成	241
8.4 分布动力无线重联通信系统组成	243
8.5 分布动力无线重联控制与安全策略	243
8.6 小结	245
参考文献	246
第9章 列车通信网络基础理论	248
9.1 引言	248

9.2 列车通信网络的基本框架	249
9.2.1 列车通信网络的组成	249
9.2.2 列车通信网络的通信模式	253
9.2.3 列车通信网络的拓扑	253
9.2.4 列车通信网络的 OSI 模型	255
9.2.5 列车通信网络的性能评估指标	257
9.3 列车通信网络技术的发展	259
9.3.1 基于现场总线的列车通信网络	259
9.3.2 基于以太网的列车通信网络	262
9.4 列车通信网络的关键技术	263
9.4.1 实时性保障技术	263
9.4.2 可靠性保障技术	264
9.4.3 列车重构技术	264
9.5 小结	268
参考文献	268
第 10 章 列车通信网络技术 (WTB/MVB)	270
10.1 引言	270
10.2 WTB/MVB 实时性保障技术	271
10.2.1 概述	271
10.2.2 WTB/MVB 实时数据传输协议	271
10.3 WTB/MVB 可靠性保障技术	277
10.3.1 信号编码及差错控制	277
10.3.2 冗余技术	282
10.3.3 物理层防护与隔离	285
10.4 WTB 网络自动重构技术	286
10.4.1 WTB 端节点和末端节点	286
10.4.2 初运行过程	287
10.5 WTB/MVB 网络管理	289
10.5.1 概述	289
10.5.2 监视功能	289
10.5.3 配置功能	289
10.5.4 维护功能	289
10.6 小结	290
参考文献	290

第 11 章 列车通信网络技术(ECN/ETB)	292
11.1 引言	292
11.2 实时性保障技术	293
11.2.1 概述	293
11.2.2 列车实时数据协议	294
11.2.3 服务质量保障	298
11.2.4 组播技术	300
11.3 车载实时以太网可靠性保证技术	302
11.3.1 车载实时以太网的系统架构	302
11.3.2 列车骨干网冗余	307
11.4 列车重构技术	309
11.4.1 网络初运行	309
11.4.2 跨编组通信物理寻址与功能寻址	314
11.5 车载实时以太网的安全保障技术	317
11.5.1 VLAN 技术	317
11.5.2 数据安全	320
11.5.3 安全通信	321
11.6 网络管理技术	325
11.7 小结	326
参考文献	326
第 12 章 列车牵引控制系统平台	328
12.1 引言	328
12.2 列车网络控制系统平台	329
12.2.1 列车网络控制系统平台概述	329
12.2.2 列车网络控制系统功能单元	330
12.2.3 列车网络控制系统软件平台	338
12.2.4 列车网络控制系统工具平台	339
12.3 列车牵引变流控制平台	347
12.3.1 列车牵引变流控制平台概述	347
12.3.2 列车牵引变流控制硬件平台	351
12.3.3 列车牵引变流控制软件平台	357
12.3.4 列车牵引变流控制工具软件平台	361
12.4 小结	365
第 13 章 列车控制系统集成技术	366
13.1 概述	366

13.2	控制系统集成的概念	366
13.2.1	系统集成的基本原则	366
13.2.2	控制系统数据交换与集成	367
13.3	列车控制系统集成的一般过程	367
13.3.1	系统功能分解	368
13.3.2	接口定义	378
13.4	列车控制系统的可靠性预计	383
13.4.1	复杂系统可靠性预计的基本概念	384
13.4.2	系统可靠性预计理论及常用方法	384
13.4.3	可靠性预计应用实例	388
13.5	小结	390
第14章	环境与组合试验	391
14.1	引言	391
14.2	型式试验	391
14.2.1	型式试验的定义	391
14.2.2	型式试验的目的	392
14.2.3	型式试验要求	392
14.2.4	试验项目	392
14.3	标准对比分析	406
14.4	组合试验	407
14.4.1	组合试验的概念	407
14.4.2	组合试验的目的	407
14.4.3	组合试验的技术方案	408
14.5	牵引系统组合试验	409
14.5.1	概述	409
14.5.2	牵引系统组合试验的范围	409
14.5.3	牵引系统组合试验需求	410
14.5.4	牵引系统组合试验系统设计	413
14.6	小结	418
第15章	电磁兼容性测试	419
15.1	引言	419
15.2	引用文件	419
15.3	试验项目列表	420
15.4	试验端口列表	420
15.5	试验	421

15.5.1 试验条件	421
15.5.2 试验用仪器仪表及设备	422
15.5.3 性能评定	422
15.5.4 试验要求	423
15.5.5 性能验证	430
15.6 小结	431
第 16 章 可靠性试验	432
16.1 引言	432
16.1.1 可靠性试验的目的	432
16.1.2 可靠性试验分类	433
16.2 高加速寿命试验	436
16.2.1 目的	436
16.2.2 试验项目	436
16.2.3 试验后分析	443
16.3 环境应力筛选试验	443
16.3.1 目的	443
16.3.2 试验项目	443
16.3.3 试验后检测	445
16.4 小结	445
第 17 章 列车通信网络一致性测试	446
17.1 引言	446
17.2 TCN 网络一致性测试	447
17.2.1 概述	447
17.2.2 TCN 网络一致性测试的目的	447
17.2.3 TCN 网络一致性测试的技术方案	447
17.2.4 TCN 网络一致性测试的测试方法	450
17.2.5 TCN 网络一致性测试系统主要参数	463
17.2.6 关键指标	464
17.3 无线通信设备的一致性测试	464
17.3.1 测试类型	464
17.3.2 测试标准	464
17.3.3 测试设备	465
17.3.4 测试项目	466
17.4 小结	475

附录 A 高速动车组牵引控制系统实例	477
A.1 项目背景	477
A.2 某型高速动车组试验车的总体概述	477
A.3 牵引控制系统	478
A.3.1 牵引传动系统	478
A.3.2 网络控制系统	481
A.4 系统功能	485
A.4.1 系统级控制	485
A.4.2 系统监视	487
A.4.3 系统诊断	487
A.4.4 系统检修	487
A.4.5 传动级控制	488
A.5 应用概况	492
A.5.1 总体应用环境	492
A.5.2 试验项目	492
A.5.3 平台应用	493
附录 B 重载重联列车牵引控制系统实例	494
B.1 项目背景	494
B.2 应用实例情况介绍	494
B.2.1 重联机车概述	494
B.2.2 机车主电路概览	496
B.2.3 牵引变流器	497
B.2.4 机车网络控制系统	498
B.3 机车无线重联同步控制系统方案	500
B.3.1 硬件配置与功能	503
B.3.2 系统功能及性能指标	508