

机械工程前沿著作系列 HEP
HEP Series in Mechanical Engineering Frontiers MEF

生物机械电子工程

Bio-mechatronics Engineering

王宏 李春胜 刘冲 编著

高等教育出版社

机械工程前沿著作系列 HEP
HEP Series in Mechanical Engineering Frontiers MEF

生物机械电子工程

Bio-mechatronics Engineering

王 宏 李春胜 刘 冲 编著

SHENGWU JIXIE
DIANZI GONGCHENG

高等教育出版社·北京

内容简介

本书根据目前生物机械电子工程领域国际上的研究热点,由浅入深、详细地介绍了生物机械电子系统(简称生机电系统)的原理、方法以及一些最新研究成果的典型应用。本书分为三篇。第一篇为生机电系统,包含第1~6章,介绍典型生机电硬件系统的构成和基本原理;第二篇为生物信号检测,包含第7~13章,介绍生物组织的电、磁特性及检测技术;第三篇为生物电信号处理及模式识别,包含第14~20章,介绍生物电信号的分析处理和模式识别方法。

本书可供从事生物机械电子工程及相关领域的研究人员使用,也可作为本科生和研究生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

生物机械电子工程/王宏,李春胜,刘冲编著. —北京:高等教育出版社,2014.8

(机械工程前沿著作系列)

ISBN 978 - 7 - 04 - 040622 - 1

I. ①生… II. ①王…②李…③刘… III. ①生物工程 - 机械工程 - 电子系统 IV. ①Q81②TH③TN103

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 151982 号

策划编辑	刘占伟	责任编辑	刘占伟	特约编辑	陈 静	封面设计	杨立新
版式设计	王 莹	插图绘制	尹文军	责任校对	刘丽嫒	责任印制	张福涛

出版发行	高等教育出版社	咨询电话	400 - 810 - 0598
社 址	北京市西城区德外大街 4 号	网 址	http://www.hep.edu.cn
邮政编码	100120		http://www.hep.com.cn
印 刷	北京市白帆印务有限公司	网上订购	http://www.landaco.com
开 本	787mm × 1092mm 1/16		http://www.landaco.com.cn
印 张	14.5	版 次	2014 年 8 月第 1 版
字 数	290 千字	印 次	2014 年 8 月第 1 次印刷
购书热线	010 - 58581118	定 价	49.00 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换
版权所有 侵权必究
物 料 号 40622 - 00

前 言

生物机械电子工程是生命科学、电子工程、机械工程三学科相交叉的新型学科,涉及的领域非常广泛,如具有人类思维功能的仿人机器人、仿生制造、脑机一体化以及将人类感官机能与电子机械结合而成的半机械人等。

近年来,国家重点基础研究发展计划(973计划)连续提出重点资助生机电融合和脑机一体化新技术的研究。973计划是以国家重大需求为导向,对我国未来发展和科学技术进步具有战略性、前瞻性、全局性和带动性的基础研究发展计划。为了适应国家发展的需求,作者编著了本书。本书的出版旨在带动我国生机电一体化领域的发展,增强我国在该领域的国际竞争力。

本书作者多年从事生物机械电子工程领域的研究,近年来先后承担了国家自然科学基金重大国际合作项目、国家自然科学基金重点项目和面上项目等,研制了具有自主知识产权的“无线通信模式下人脑-机械手接口系统”的样机和“经颅磁刺激装置”,开发了肌电信号控制的智能轮椅等。

本书分为三篇,其中,第一篇为生机电系统,第二篇为生物信号检测,第三篇为生物电信号处理及模式识别。生机电系统篇包含6章,介绍了典型生机电硬件系统的构成和基本原理;生物信号检测篇包含7章,介绍了生物组织的电、磁特性和检测技术;生物电信号处理及模式识别篇包含7章,介绍了对生物电信号的分析处理和模式识别方法。本书可供从事生物机械电子工程及相关领域的研究人员使用,也可作为本科生和研究生课程的参考书。

全书由王宏负责规划,第一篇由李春胜编写,第二篇由王宏编写,第三篇由刘冲编写。王琳、付荣荣、陈洁、陈真、张驰、张宁宁、化成城、史添玮、王旭东等为本书的编写做了大量的工作。本书的出版得到了“985工程”的资助,编写过程中还得到了国家自然科学基金(61071057)、中央高校基本科研业务费项目(N110303005)以及教育部“长江学者和创新团队发展计划”(IRT0816)的资助,在此表示深深的感谢。

由于作者学术水平有限,书中的不妥和疏漏之处在所难免,诚恳地希望各位读者批评指教。

编 者

2014年1月

郑重声明

高等教育出版社依法对本书享有专有出版权。任何未经许可的复制、销售行为均违反《中华人民共和国著作权法》，其行为人将承担相应的民事责任和行政责任；构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。为了维护市场秩序，保护读者的合法权益，避免读者误用盗版书造成不良后果，我社将配合行政执法部门和司法机关对违法犯罪的单位和个人进行严厉打击。社会各界人士如发现上述侵权行为，希望及时举报，本社将奖励举报有功人员。

反盗版举报电话 (010) 58581897 58582371 58581879

反盗版举报传真 (010) 82086060

反盗版举报邮箱 dd@hep.com.cn

通信地址 北京市西城区德外大街4号 高等教育出版社法务部

邮政编码 100120

目 录

第一篇 生机电系统

第 1 章 人脑 – 机器人接口系统	3
1.1 人脑 – 机器人接口系统概述	3
1.2 人脑 – 机器人接口系统结构	5
1.2.1 信号采集	5
1.2.2 信号处理	6
1.2.3 命令执行	6
1.2.4 反馈	6
1.3 脑 – 机信息交互	6
1.3.1 P300	7
1.3.2 视觉诱发电位	8
1.3.3 慢皮层电位	9
1.3.4 μ 节律与 β 节律	10
1.3.5 ERD/ERS	11
1.4 NEUBCI-II 脑 – 机接口系统	12
1.4.1 前级测量	13
1.4.2 噪声处理	13
1.4.3 安全性设计	13
1.4.4 数据采集	14
1.4.5 软件设计	14
思考题	15
第 2 章 肌电假肢	17
2.1 肌电假肢系统结构	17
2.2 信号处理与反馈	20
2.3 膝上假肢设计	22

2.4 仿人型假手机构设计	24
2.4.1 手指结构	24
2.4.2 驱动和传动设计	25
2.4.3 整体结构	26
思考题	28
第 3 章 电子机器人系统	29
3.1 人 - 机器人系统	29
3.2 电子人系统	31
3.3 电子舌	33
思考题	35
第 4 章 康复机器人	37
4.1 康复机器人的发展概况	37
4.2 康复机器人系统结构	40
4.2.1 训练目标与场景	41
4.2.2 机械支撑系统	41
4.2.3 驱动、控制与反馈	42
4.2.4 训练与评价模式	43
4.3 骑马机设计	44
思考题	46
第 5 章 手术机器人	47
5.1 手术机器人的发展概况	47
5.2 手术机器人系统结构	50
5.3 手术机器人手臂	53
5.3.1 机械臂分类	53
5.3.2 远端运动中心点	54
5.4 手术机器人触觉	55
5.5 激光手术机器人	57
思考题	58

第 6 章 体内机器人	59
6.1 体内机器人系统概述	59
6.2 体内机器人的运动原理	61
6.3 内窥镜胶囊	65
6.4 无线体域网	67
思考题	68

第二篇 生物信号检测

第 7 章 细胞的电活动	71
7.1 细胞的离子迁移	71
7.2 细胞膜的电特性	72
7.2.1 膜电位	72
7.2.2 动作电位	73
7.2.3 细胞膜的等效电路	75
7.3 Hodgkin-Huxley 模型	76
7.4 生物电信号的采集	77
思考题	78
第 8 章 脑电信号检测	79
8.1 脑及其功能	79
8.2 脑电图	81
8.3 自发脑电位和诱发脑电位	83
8.3.1 自发脑电位	83
8.3.2 诱发脑电位	84
8.4 脑电信号的异常节律	86
8.5 疲劳驾驶与脑电信号	88
思考题	91
第 9 章 肌电信号检测	93
9.1 肌肉	93

9.2 肌电图	95
9.3 肌电信号与神经肌肉疾病	97
思考题	98
第 10 章 心电信号检测	99
10.1 心脏的构造与功能	99
10.1.1 心脏的基本构造	99
10.1.2 心肌	100
10.1.3 心脏的兴奋过程	100
10.2 心电图	102
10.2.1 心电信号	102
10.2.2 电极导联	103
10.2.3 心电向量	105
10.2.4 心率	108
10.2.5 心电信号特征提取	108
10.3 异常心电图	109
思考题	111
第 11 章 生物磁信号检测	113
11.1 生物磁场	113
11.2 脑磁图	114
11.3 心磁图	116
思考题	118
第 12 章 其他生物医学信号检测	119
12.1 血压和血流	119
12.1.1 血压	119
12.1.2 血流	120
12.2 眼电信号	122
12.3 皮肤电反应	123
12.4 电阻抗图	125
12.5 磁共振成像	127
12.5.1 基本原理	127
12.5.2 核磁共振	128

思考题	130
第 13 章 生物组织的电刺激和磁刺激	131
13.1 功能性电刺激	131
13.1.1 有髓神经纤维电刺激	131
13.1.2 神经肌肉电刺激	133
13.1.3 电极与组织的相互作用	134
13.2 经颅磁刺激	135
13.2.1 经颅磁刺激的基本原理	135
13.2.2 经颅磁刺激诱发脑神经反应	137
13.3 心脏起搏	138
13.3.1 电刺激模式	138
13.3.2 起搏器供电	139
思考题	140

第三篇 生物电信号处理及模式识别

第 14 章 生物电信号概述	143
14.1 生物电信号的特点	143
14.2 生物电信号的分析方法	144
思考题	145
第 15 章 生物电信号的预处理方法	147
15.1 信号的重采样	147
15.2 信号的数字滤波	148
15.2.1 FIR 滤波器	149
15.2.2 IIR 滤波器	149
15.3 信号的空间滤波	150
15.3.1 CAR 滤波	150
15.3.2 Laplacian 滤波	150
15.3.3 共空间模式	151

15.4 主成分分析	152
15.5 独立分量分析	154
思考题	156
第 16 章 生物电信号的谱分析	157
16.1 信号之间的相关分析	158
16.1.1 相关系数	158
16.1.2 相关函数	159
16.2 傅里叶分析	159
16.2.1 连续傅里叶变换	159
16.2.2 离散傅里叶变换	160
16.3 经典功率谱分析	161
16.4 基于参数模型的谱估计	162
思考题	165
第 17 章 生物电信号的时频分析	167
17.1 短时傅里叶变换	167
17.2 Wigner-Ville 分布	168
17.3 Choi-Williams 分布	170
思考题	171
第 18 章 生物电信号的小波分析	173
18.1 连续小波变换	173
18.2 离散小波变换	175
18.3 小波能量	177
18.4 小波熵	178
思考题	178
第 19 章 生物电信号的非线性分析	179
19.1 相空间重构	179
19.1.1 嵌入维数的选择	180
19.1.2 延迟时间的选择	181

19.2 李亚普诺夫指数	182
19.3 关联维数	183
19.4 熵	184
19.4.1 近似熵	185
19.4.2 样本熵	185
19.5 混沌与分形	185
19.5.1 混沌	185
19.5.2 分形	186
思考题	187
第 20 章 生物电信号的特征分类	189
20.1 Fisher 线性判别分析	190
20.2 k -最近邻分类法	193
20.3 概率神经网络分类法	194
20.4 支持向量机分类法	197
20.5 结合特征选择方法的分类器设计	200
20.5.1 Fisher 准则	201
20.5.2 L0 优化	201
20.5.3 基于支持向量机的特征回归消除	202
思考题	206
附录 A	207
附录 B	209
参考文献	211

第一篇

生机电系统

第 1 章 人脑 – 机器人接口系统

1.1 人脑 – 机器人接口系统概述

人脑 – 机器人接口系统是在人脑 – 计算机接口技术 (brain-computer interface, BCI) 的基础上, 将人脑与机器人相连接, 实现人脑对机器人的直接控制。人直接通过大脑来表达自己的想法, 借助计算机等设备的分析来操纵机器人。BCI 是指在人脑和计算机或其他电子设备之间建立的直接交流和控制的通道, 它不依赖于脑的正常生理输出通路。通过这种通道, 人们可以直接通过大脑来表达想法或控制设备, 而不需要通过语言或肢体的动作^[1]。BCI 是一种全新的大脑对外信息交流和控制方式。

BCI 并不试图解释自发的脑电信号, 而是设法让人产生具有特定类别的容易识别的脑电信号, 只有能够被准确识别的脑电信号才能用于 BCI 系统。在目前的技术条件下, 通过脑电来阅读人的思想是不可能的, 但对某些脑功能的种类进行区分是可行的。解读大脑活动信息的方法很多, 包括脑电图 (electroencephalogram, EEG)、脑磁图 (magnetoencephalogram, MEG)、正电子发射断层成像 (positron emission tomography, PET)、功能性磁共振成像 (functional magnetic resonance imaging, FMRI) 等, 但 MEG、PET 和 FMRI 对检测技术要求比较高, 仪器非常昂贵, 系统的体积也比较大, 不太适合直接用于 BCI 系统。比较有直接应用前景的方法还是采用非植入电极从头皮采集 EEG 信号。

自 20 世纪 60 年代以来, 认知心理学和神经科学的研究成果, 特别是对人脑在各种状态下所产生的特定脑电信号的研究, 显示出不同的心理任务以不同的程度激活局部大脑皮层, 例如运动想象、视觉刺激等, 这为 BCI 的研究提供了理论依据。20 世纪 90 年代中期, 随着信号处理和机器学习等研究技术的发展, BCI 的研究逐渐成为热点。2002 年美国国防部高级研究计划署出于军事目的资助了 BCI 研究, 从而兴

起了 BCI 研究的热潮。在 1999 年、2002 年、2005 年和 2009 年召开了 4 次 BCI 国际会议, 为 BCI 的深入研究提供了方向上的指导。目前, 人们已在虚拟环境控制、机器人控制等方面开展了大量的 BCI 技术研究和应用。

2008 年, Moritz 等人的研究表明, 猴子可以学习控制运动皮层神经元的活动来刺激瘫痪手臂的肌肉, 从而恢复手臂的运动, 如图 1.1 所示。该研究对治疗脊髓损伤导致的瘫痪有重要的意义, 被 *Nature* 杂志评为 2008 年度最佳论文, 对当前 BCI 技术的发展具有重大的影响^[2]。

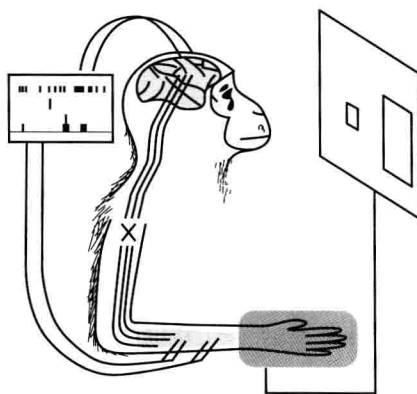


图 1.1 猴子控制瘫痪手臂运动^[2]

2009 年, 日本本田公司研制了新型的人脑 - 机器人交互头盔, 通过测量被试者的脑电图和脑血流信息的变化, 控制机器人 ASIMO 的动作。据报道, ASIMO 机器人能够以 90% 的准确率完成被试者意识表达的动作^[3], 如图 1.2 所示。

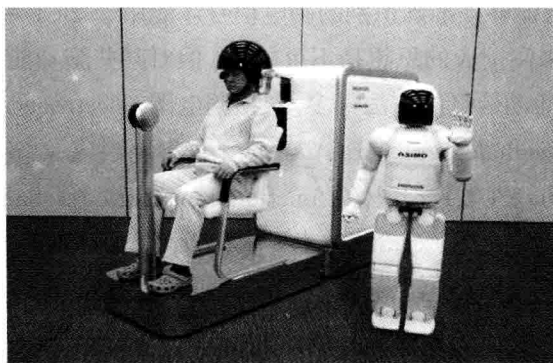


图 1.2 人脑直接控制 ASIMO 机器人^[3]

2010 年, Ianez 等人采用小波变换和线性判别分析方法对 16 通道表面脑电信号进行处理和分类, 控制 FANUC LR Mate 200iB 机械手臂绘制路径, 被试者可通过视频反馈动态地改变绘制方向^[4], 如图 1.3 所示。

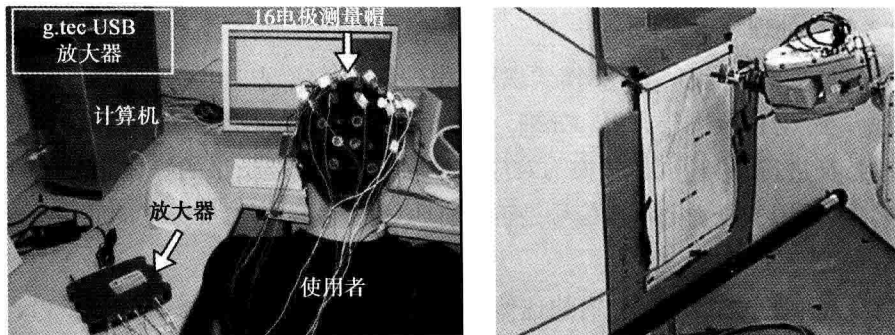


图 1.3 脑电控制机械手臂描绘路径^[4]

1.2 人脑 - 机器人接口系统结构

人脑 - 机器人接口系统是人和机器人共同构成的一个闭环系统。通过人脑的思维活动过程提取出特征信号, 转化为控制机器人运动的命令, 从而达到人脑对机器人的直接控制。人可通过视觉等途径获得机器人活动的反馈信息, 以便进一步对其进行控制。系统结构通常包括 4 个部分: 信号采集、信号处理、命令执行及反馈, 如图 1.4 所示。

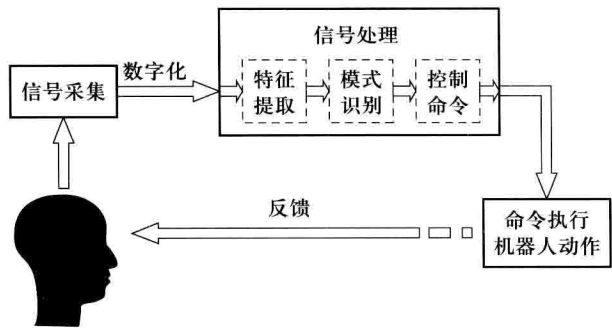


图 1.4 人脑 - 机器人接口系统结构

1.2.1 信号采集

信号采集是获取大脑信息的重要环节。基于脑电的脑 - 机接口须采集生物的大脑电信号, 这可通过采用头皮电极和植入式电极两种方式进行。脑电信号是很微弱的生物电信号, 通常需要进行放大、滤波等处理, 放大后的脑电信号还需借助 A/D 转换器进行数字化, 转换为计算机能够处理的数字信号, 以便对脑电信号做进一步的特征提取、分类识别等工作。