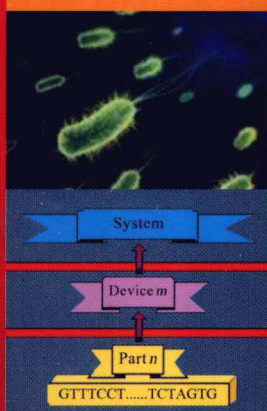




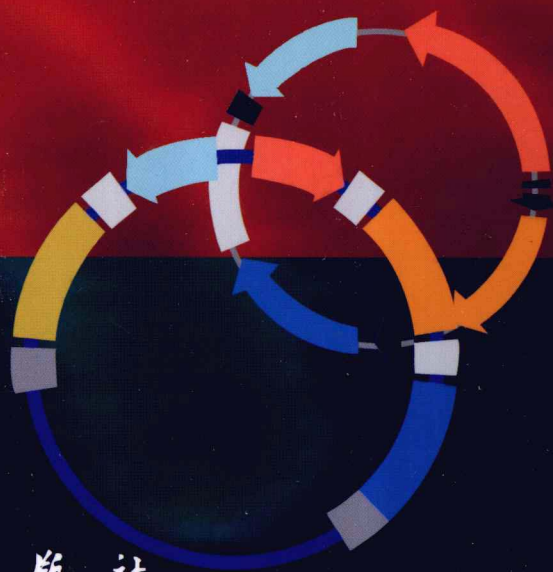
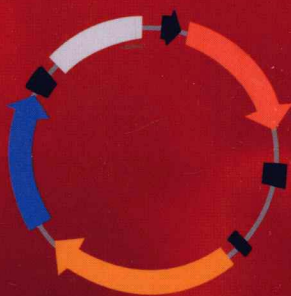
# 合成生物学导论

Introduction To Synthetic Biology



宋 凯 / 编著

黄熙泰 / 主审



科学出版社  
[www.sciencep.com](http://www.sciencep.com)



# 合成生物学导论

Introduction to Synthetic Biology

王德成 主编

王德成 王德成



清华大学出版社  
Tsinghua University Press

-09

# 合成生物学导论

宋 凯 编著

黄熙泰 主审

天津市科协自然科学学术专著基金资助出版

科学出版社

北 京

Q5  
S767

## 内 容 简 介

合成生物学是 21 世纪的新兴交叉科学, 强调“设计”和“重设计”, 其目的是通过人工设计和构建自然界中不存在的生物系统来解决能源、材料、健康和环保等问题。合成生物学的发展要以生物学、化学、物理学、数学、信息科学、工程科学、计算机科学等相关学科的发展为基础。

本书共分 5 章。第 1 章介绍合成生物学的基本概念和内容, 使读者对合成生物学有一个全面的了解。第 2 章和第 3 章介绍合成生物学设计和分析的基本方法、合成生物学的层次化结构和概念及合成生物学中的常用算法。第 4 章和第 5 章介绍合成生物学在基础和实际应用方面的研究内容、成果和进展, 包括经典的双稳态开关、大肠杆菌成像系统、微生物计算机、合成青蒿酸的微生物工厂等。

本书可作为具有一定生物学基础的本科生和研究生教材, 也可作为相关领域的学者和研究人员的参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

合成生物学导论/宋凯编著. —北京: 科学出版社, 2010

ISBN 978-7-03-026731-3

I. ①合… II. ①宋… III. ①生物合成 IV. ①Q5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 019670 号

责任编辑: 单冉东 / 责任校对: 李奕萱

责任印制: 张克忠 / 封面设计: 耕者设计工作室

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>

北京天时彩色印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2010年2月第 1 版 开本: 787×1092 1/16

2010年2月第一次印刷 印张: 12

印数: 1—3 000 字数: 282 000

定价: 36.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

# 序 一

合成生物学是 21 世纪初出现的一门新兴交叉学科，在这里，生物学、工程学和数学紧密地结合在一起。合成生物学的出现是分子生物学经历了半个多世纪的发展，特别是人类基因组和模式生物基因组计划实施以来，伴随着生物信息学和系统生物学迅速发展一个合乎逻辑的结果。在人类深入认识生命现象的基础上，合成生物学旨在设计和构建工程化的生物系统，使其能够处理信息、操作化合物、制造材料、生产能源、提供食物、保持和增强人类的健康和改善我们的环境。因此，合成生物学既是一门科学，也是一门技术，它是继遗传工程之后出现的新一代生物技术，代表了生物技术发展的一个新的制高点。2004 年美国麻省理工学院主办的世界著名科技杂志 *Technology Review* 曾将合成生物学列为将改变世界的十大新出现技术之一。在 2008 年以合成生物学为主题的第 322 次香山科学会议上，与会专家一致肯定了合成生物学对我国未来国民经济发展的重大意义。

无论是我国制定的中长期科技发展规划，或者是国务院颁发的《促进生物产业加快发展的若干政策》，都对生物技术给予极为充分的重视。在中国科学院最近出版的《创新 2050：科学技术与中国的未来》系列丛书之一——《科技革命与中国的现代化——关于中国面向 2050 年科技发展战略的思考》一书中，将人造生命和合成生物学列为 22 个战略性科技问题之一；同时又将人造生命和合成生物学预测为“可能出现革命性突破的 4 个基本科学问题”之一。在该丛书的另一分册——《中国至 2050 年人口健康科技发展路线图》中，将系统生物学和合成生物学技术列为 2030 年前后若干年间生物医学创新体系中的关键技术。鉴于合成生物学在生物科学技术中的重要地位，在大学生特别是工科大学生中普及合成生物学知识就有十分积极的意义。天津大学是一所以工程学科为主的综合性大学，从 2008 年开始，我们就给本科生开设了一门“合成生物学导论”的创新课程，共有 150 名各种专业的大学生听课，反映良好。同学们普遍感到开阔了视野，增长了合成生物学方面的新知识，感受到了最新的科技发展。2009 年选修这门课程的大学生已经达到 264 人。经批准，这门课在天津大学将长期开下去。当前，我国大学课程存在着内容相对陈旧、不能及时反映最新科技发展的缺点，这门课程的开设是我们为改变这一状况所做的一次尝试。

为了适应教学的需要，编写一门合成生物学教材就变得十分必要了。天津大学化工学院宋凯副教授勇于承担了这项任务，经过艰苦的努力，终于撰写了这本《合成生物学导论》教材。全书由南开大学分子生物学家黄熙泰教授认真审阅、订正。就当前版本来看，还存在着篇幅过少、内容不够丰富等缺点，这也与这门学科刚刚兴起有关。我深信，随着合成生物学的迅速发展，在该书的新版本中这些问题将会逐步得到解决。最后

我要指出，由于该书内容涉及分子生物学、控制工程和数学等多门学科，而一个人的知识毕竟是有限的，书中错误之处恐怕在所难免，我衷心盼望有关专家学者不吝批评指正，帮助编著者在该书再版时加以改进。



(中国科学院院士)

2009年8月1日

## 序 二

该书是国内外第一部较为完整地描述有关“合成生物学”的书籍。

由于基因组测序及 DNA 合成技术与工具的突破性进展，催生了“组装细胞基因”的“合成生物学”的出现。最近几年合成生物学在生物科学知识产生，生物零件、装置及系统的建造，以及药物、能源、酶的生产等研究领域取得了重要进展，成为生物科学和生物经济中最前沿的学科。“合成生物学”于 2004 年被 *Technology Review* 评为将改变世界的十大新出现的技术之一 (10 Emerging Technologies That Will Change Your World)，短短几年的实践已证明该预见的正确性。中国在相关技术方面已经有了许多积累，在合成生物学领域与发达国家处在同一起跑线，及时的投入可以使我们在该领域得到与发达国家同样的发展。

长期以来，我们对细胞的改造大多集中在化学物理诱变、一个到几个基因改变的基因工程或代谢路径改变的代谢工程上，这里面也包括个别基因的分子进化改造、点突变改造甚至基因片段的改造等。这些工作的进行，使我们对基因调节细胞代谢路径及代谢产物有了越来越多的认识。例如，我们可以把几个相关基因组合起来，构建一条合成某个产物的代谢路径，可以把组成这条代谢路径的基因当做一个部件，组装到同一个或另一个新的细胞中进行表达。又如，我们可以把细菌合成生物塑料聚羟基脂肪酸酯 (polyhydroxy alkanooates, PHA) 的三个合成基因 *phaCAB* 操纵子作为一个生物零件，组装到其他不能合成 PHA 的细胞中，从而使之也能产生 PHA 的合成。事实上，基因的调控很像电回路，比如，乳糖操纵子中，通常一个称为阻遏子 (repressor) 的基因处于“开”的状态，使乳糖的利用途径关闭；当只有乳糖作为唯一碳源的时候，细菌把阻遏子的基因“关”掉，这时细菌就能利用乳糖了。类似的例子在该书中都有很好的描述，相信对读者会很有启发。

把具有某个功能的几个基因（或叫操纵子）作为一个生物零件，把完成某个任务所需要的生物零件组装起来，构建一个新的细胞，就是“合成生物学”。合成生物学包括两条路线：①新的生物零件、组件和系统的设计与建造；②对现有的、天然的生物系统的重新设计。这两条路线的目的都是为了造福人类社会。近几年来，作为合成生物学技术基础的基因组测序技术及 DNA 合成技术正以指数速率增长，这正如大规模集成电路与计算机技术的发展一样。有理由认为合成生物学将会像信息技术一样得到迅速发展，并将在能源、化学品、材料、疫苗等医药领域得到广泛应用，具有巨大的社会效益及经济效益。同时，合成生物学将对人类认识生命、揭示生命的奥秘、重新设计及改造生命等方面产生重大的科学意义。在美国能源部资助下，美国生物经济研究协会 (<http://www.bio-era.net>) 于 2007 年发表了题为“基因组合成和设计未来：对美国的影响”的研究报告，分析了合成生物学及基因组工程支撑技术的迅速发展，从技术的发

明、创造、结合、重组、传播、推广的角度，分析了生物工程革命的经济影响范围及大小，展望了合成生物学与基因组工程的应用前景，认为在未来几年，合成生物学技术将会比重组 DNA 技术发展更快。报告预计合成生物学将在生产化学品、能源、疫苗及医药等方面有极为重要的应用前景，具有重大的经济意义及社会意义。

该书较为完整地讨论了合成生物学的诞生、定义、研究内容、意义、工程本质、合成生物学与相关生物学科的关系等内容，概要介绍了合成生物学国际会议、国际遗传机器设计大赛等背景信息，为读者全面了解合成生物学提供了较为完整的信息。

该书还描述了合成生物学的道德规范、创造人工生命所带来的问题、究竟该如何应对伦理，详细地介绍了合成生物系统的设计、数学模拟、性能分析，以及合成生物学的基础研究和应用研究等，是很值得一读的首部“合成生物学”书籍。



(陈国强，清华大学生命科学学院教授)

2009年10月31日



## 前 言

合成生物学是 21 世纪初刚刚兴起的一门交叉学科，其工程化的理念、标准化的生物工具和大胆新颖的设计思路，一经兴起便引起了世界范围的广泛关注。诸如 J. D. Keasling 课题组合成青蒿酸的微生物工厂、C. A. Voigt 课题组的大肠杆菌成像系统等合成生物学研究和应用方面的重大突破更是增加了世人的信心。合成生物学的发展受到多个国家政府和研究团体的高度重视，美、欧等国均投入大量资本支持合成生物学的研究与工业化。2009 年，由中国科学院 300 多位专家经过一年多研究发布的《创新 2050：科学技术与中国的未来》战略研究系列报告指出：“合成生物学是可能出现革命性突破的 4 个基本科学问题之一”。由此可见，合成生物学的发展必将会在未来的将来给国民经济带来巨大推动。高等学校的教育必须引领科学的发展，编写一本好的合成生物学专业教材，对学生系统进行培养，无论是对于学科的发展还是对于科研的发展都至关重要。

为推动合成生物学的迅速发展，2003 年，美国麻省理工学院发起了一项以本科生为主要参赛对象的国际遗传机器大赛（international Genetically Engineered Machine Competition，简称 iGEM）。两年后，也就是 2005 年，这个最开始仅仅是麻省理工学院校内规模的比赛，迅速升级为世界范围的国际比赛。越来越多世人谙熟的著名大学——哈佛大学、剑桥大学、加州大学伯克利分校和普林斯顿大学等无不对此表现出极大的热情。2006 年有 32 个参赛队；2007 年参赛队迅速增加至 54 个；2008 年参赛队增至 84 个；2009 年参赛队更是多达 111 个，包括来自欧洲、亚洲、南美洲、北美洲数十个国家数千名参赛队员，参赛项目覆盖环境、能源、健康等方方面面。

在合成生物学方兴之时，天津大学化工学院抓住机遇，与合成生物学创始人及其他著名学者多次探讨合成生物学的发展态势。2006 年，天津大学对合成生物学有兴趣的老师和同学经常在一起研讨，自然形成了一个合成生物学兴趣小组，开始筹备 iGEM2007 竞赛的参赛事宜，着手进行师生培训。小组成员包括张春霆、元英进、赵学明、宋凯、王庆昭、程景胜、马平生、黄鹤、班睿等指导老师和来自不同专业、不同年级的学生。2007 年 4 月和 6 月天津大学化工学院承办了 iGEM 在亚洲区的两次研讨会，特别邀请了合成生物学专家、iGEM 大赛创始人 D. Endy、T. Knight、R. Rettberg、C. D. Smolke，以及 Davison 学院的 K. A. Haynes 作报告。包括澳大利亚墨尔本大学、日本千叶大学、北京大学、清华大学、中国科学技术大学在内的多所大学的教师和学生在这两次研讨会上共同学习和分享，成功促进了 iGEM 和合成生物学在亚澳地区的普及和推广。同年，天津大学作为中国内地首批参赛的四所高校之一，取得了金牌的优异成绩，并在 2008 年的 iGEM 竞赛中再获佳绩。

作为兴趣小组的指导教师之一，作者既被合成生物学深深吸引，也被学生的热情和

投入所感动。在两年的 iGEM 竞赛训练过程中，作者深感学习资料匮乏，深深体会到了撰写一本适合我国高校师生和研究人员使用的合成生物学参考资料的必要性。2008 年，天津大学批准开设了“合成生物学导论”创新课程，在课程的准备和讲授的过程中，作者更加感觉到编写一本合成生物学教材的迫切性。为此，作者将“合成生物学导论”的讲义编撰成书，力图将合成生物学的基本理念、研究内容和经典实例介绍给读者，为合成生物学的推广和发展略尽绵力。

本书主要分为 5 章：第 1 章介绍合成生物学的兴起、特点和研究内容，并对合成生物学所引发的道德思考进行初步探讨，使读者对合成生物学有一个全面了解；第 2 章介绍合成生物学的层次化结构和概念，包括 BioBrick 等基本概念和合成生物系统设计中的基本逻辑拓扑结构；第 3 章介绍合成生物学中常用的建模、模式识别算法，以及生物系统的主要性能和基本分析方法；第 4 章介绍合成生物学在基础研究方面取得的研究成果和经典实例，包括基因开关、细胞群体系统脉冲发生器、细胞群体图案系统、人工转录级联线路、工程化的支架蛋白和重构 T7 噬菌体基因组等内容；第 5 章介绍合成生物学在应用方面的研究内容和成果，包括著名的合成青蒿酸的微生物工厂、大肠杆菌成像系统等。

全书由宋凯副教授主笔和定稿，由南开大学生命科学院黄熙泰教授主审。书中实例均引自期刊文献，力求内容的新颖性与准确性。部分模拟和实验结果图在原文基础上略有修改，读者可参考原始文献阅读使用。

桃李不言，下自成蹊。值本书出版之际，特对以下老师、同行的支持与帮助表示感谢：张春霆院士提出了许多宝贵的建议和修改意见；元英进教授从策划、内容安排到成书的全过程一直给予鼎力支持；赵学明教授在参与“合成生物学导论”讲授的同时给予诸多指导；此外，邹瑞阳、杨梦、陈林、李炳志、李晓倩、朱曼丽、杜瑾、侯男、张蔚然、刘夺、袁芳等在资料整理等方面也提供了许多帮助。

本书出版得到天津市科协自然科学学术专著基金、高等学校博士学科点专项科研基金新教师基金（200800561005）资助，在此一并表示感谢！

由于作者水平和研究兴趣所限，书中的缺点和不足之处在所难免，热忱欢迎广大读者批评指正。本书只是一块引“玉”的“砖”，相信随着合成生物学的发展，会有越来越多的有识之士投入其中，会有越来越完善的资料和书籍不断出现。



2009 年 12 月

## 专有名词英汉对照表

英文名称 (缩写)	中文名称
synthetic biology	合成生物学
genetic circuit	遗传线路
gene circuit	基因线路
elementary gene circuit	基础基因线路
genetic device	遗传装置
chaperone	伴侣蛋白
essential gene	必需基因
pleiotropic	多效性
module	模块
robustness	鲁棒性
motif	模体/基元
<i>de novo</i> DNA synthesis	DNA 从头合成
grey goo	灰色黏质
stem-loop	茎环
hairpin structure	发夹结构
inverted repeat sequence	反向重复序列
ultrasensitivity	超敏感性
quorum sensing (QS)	群体感应
standardization	标准化
decoupling	解耦
abstraction	抽提
isopentyl pyrophosphate (IPP)	焦磷酸异戊酯
mevalonate isoprenoid (MEV)	甲羟戊酸类异戊二烯
amorpho-4, 11-diene synthase (ADS)	紫穗槐-4, 11-二烯合成酶
toggle switch	双稳态开关/拨动开关
international Genetically Engineered Machine competition (iGEM)	国际遗传机器大赛
BioBrick	生物积块
cohesion	内聚
coupling	耦合
Part	生物组件
Device	生物装置
System	生物系统
cascade	级联线路
[RNA] polymerase per second (PoPS)	RNA 聚合酶每秒
inverter	转换器
<i>N</i> -acyl-homoserine lactone (AHL)	<i>N</i> -乙酰基高丝氨酸内酯

- dense overlapping regulon (DOR)  
 incoherent feedforward  
 coherent feedforward  
 sign-sensitive delay  
 elementary reaction  
 tree-augmented Bayesian classifier (TAN)  
 scale-free networks  
 biphasic switch  
 aptamer  
 linear-loop interaction  
 programmed cell death (PCD)  
 apoptosis  
 leucine zipper  
 modulator  
 recruitment  
 decoy-zipper  
 refactoring  
 chloroquine  
 artemisinin  
 artemisinic acid  
 dimethylallyl pyrophosphate (DMAPP)  
 farnesyl pyrophosphate (FPP)  
 deoxyxylulose 5-phosphate (DXP)  
 artemisia annua  
 biosensor  
 phytochrome  
 chromophore  
 two-component system  
 apoprotein  
 phycocyanobilin (PCB)  
 the burnt pancake problem (BPP)  
 syntenic genome  
 B cell antigen receptor (BCR)  
 immunoreceptor tyrosine-based activation motif (ITAM)  
 agammaglobulinemia  
 ethionamide (ETH)  
 biofilm  
 theophylline  
 transactivator  
 enterocyte  
 hypoxia  
 recombinational enhancer (RE)  
 recombinant DNA
- 密集交盖调节网  
 非一致前馈  
 一致前馈  
 信号敏感性延迟  
 元反应  
 树扩张型朴素贝叶斯分类方法  
 无标度网络  
 双相开关  
 适配体  
 线性-环相互作用  
 程序性细胞死亡  
 凋亡  
 亮氨酸拉链  
 调控蛋白  
 募集  
 诱捕拉链  
 重构  
 氯喹  
 青蒿素  
 青蒿酸  
 二甲(基)丙烯焦磷酸酯  
 法尼基焦磷酸酯  
 脱氧-5-磷酸木酮糖  
 青蒿  
 生物传感器  
 光敏色素/感光蛋白  
 生色团  
 双组分系统  
 脱辅基蛋白  
 藻胆青素  
 烧焦烧饼问题  
 同线基因组  
 B细胞抗原受体  
 酪氨酸活化模体  
 丙种球蛋白血症  
 乙硫异烟胺  
 生物膜  
 茶碱  
 转录反激活因子  
 肠吸收细胞  
 缺氧/低氧  
 重组增强子  
 DNA 重组

## 《合成生物学导论》读者反馈表

欢迎广大专家、教师、读者与我们联系，提供宝贵意见与建议！凡使用本书作为教材的单位，可获赠教学课件一份；课件数量有限，赠完为止。本活动解释权在科学出版社。

姓名：	职称：	职务：
电话：	电邮：	
单位名称：		
通信地址：	邮编：	
主要研究方向：		
所授课程（一）：		人数：
课程对象： <input type="checkbox"/> 研究生 <input type="checkbox"/> 本科（____ 年级） <input type="checkbox"/> 其他_____		授课专业：
使用教材名称 / 作者 / 出版社：		
所授课程（二）：		人数：
课程对象： <input type="checkbox"/> 研究生 <input type="checkbox"/> 本科（____ 年级） <input type="checkbox"/> 其他_____		授课专业：
使用教材名称 / 作者 / 出版社：		
您对《合成生物学导论》的评价及修订意见：		
本书获知方式： <input type="checkbox"/> _____ 书店 <input type="checkbox"/> _____ 网络 <input type="checkbox"/> 他人推荐 <input type="checkbox"/> 其他_____		
贵单位（院系、研究所等）开设的相关课程有哪些？使用的教材名称/作者出版社？		
科研、教学需求的图书：		
意向写作计划：		
其他建议或意见：		教学使用证明 (签章)

回执地址：北京市东黄城根北街 16 号 科学出版社高等教育出版中心（邮编 100717）

联系人：单冉东      咨询电话：010-64030233      传真：010-64034871

电子邮箱：biology@mail.sciencep.com

# 目 录

序一

序二

前言

专有名词英汉对照表 ..... xi

**第 1 章 绪论** ..... 1

第一部分 合成生物学概述 ..... 1

1.1 合成生物学的诞生 ..... 2

1.2 合成生物学的定义 ..... 4

1.3 合成生物学的研究内容 ..... 4

1.3.1 生物大分子的合成与模块化 ..... 5

1.3.2 生物基因组的合成、简化与重构 ..... 7

1.3.3 合成代谢网络 ..... 8

1.3.4 遗传/基因线路的设计与构建 ..... 8

1.3.5 细胞群体系统及多细胞系统研究 ..... 9

1.3.6 数学模拟和功能预测 ..... 9

1.4 合成生物学的意义 ..... 10

1.4.1 加速合成生物系统工程化的进程 ..... 10

1.4.2 验证和深化对于生物现象的理解 ..... 10

1.5 合成生物学的工程本质 ..... 11

1.6 合成生物学与相关生物学科 ..... 13

1.6.1 与遗传工程的关系 ..... 13

1.6.2 与分子生物学和细胞生物学的关系 ..... 14

1.6.3 与系统生物学和功能基因组学的关系 ..... 14

1.6.4 与生物信息学的关系 ..... 15

1.7 合成生物学国际会议及国际遗传机器大赛 ..... 16

1.7.1 合成生物学国际会议 (Synthetic Biology *x.0*) ..... 16

1.7.2 国际遗传机器大赛 ..... 16

第二部分 合成生物学引发的思考 ..... 17

1.8 人类  $\neq$  造物主 ..... 17

1.8.1 道德规范 ..... 17

1.8.2 对环境无控制地排放 ..... 18

1.8.3 生物武器的滥用 ..... 19

1.8.4	对生物的专利与垄断	20
1.8.5	创造人工生命?	21
1.8.6	究竟该如何应对?	22
<b>第2章</b>	<b>合成生物系统的设计</b>	25
第一部分	合成生物系统的模块化与层次化结构	25
2.1	合成生物学的模块化设计	26
2.1.1	模块设计的三个特征因素	26
2.1.2	细胞本底环境对模块化设计的影响	27
2.1.3	无细胞合成生物系统	28
2.2	标准化生物模块——生物积块	28
2.2.1	BioBrick 命名规则	29
2.2.2	BioBrick 的连接	30
2.3	标准定量机制	33
2.3.1	PoPS	33
2.3.2	RIPS	34
2.4	生物系统的层次化结构	34
2.4.1	生物部件“Part”	34
2.4.2	生物装置“Device”	36
2.4.3	生物系统“System”	36
2.4.4	细胞群体系统及多细胞系统	37
第二部分	合成生物系统的逻辑拓扑结构	39
2.5	串联	39
2.6	单输入	40
2.7	多输入	41
2.8	反馈	42
2.9	前馈	44
<b>第3章</b>	<b>合成生物系统的数学模拟与性能分析</b>	49
第一部分	生物系统的数学模拟	49
3.1	常微分方程	49
3.1.1	质量作用定律	50
3.1.2	米氏方程	51
3.1.3	希尔方程	52
3.2	Logistic 模型	53
3.2.1	单种群细胞自由生长的 Logistic 模型	53
3.2.2	两种细胞自由生长的 Logistic 模型	54
3.3	主方程	56

3.4	随机微分方程	57
3.5	模式识别	57
3.5.1	聚类分析	58
3.5.2	分类分析	60
3.6	小结	64
<b>第二部分 合成生物系统性能分析</b>		64
3.7	常用性能指标	65
3.7.1	稳定性	65
3.7.2	鲁棒性	65
3.7.3	响应快速性	65
3.8	稳定性分析	65
3.9	鲁棒性分析/敏感性分析	66
3.10	提高系统稳定性和鲁棒性的机制	67
3.10.1	冗余	68
3.10.2	反馈控制	68
3.10.3	特异性和保真度	68
<b>第4章 合成生物学的基础研究</b>		71
<b>第一部分 模拟逻辑功能的基础研究</b>		71
4.1	逻辑门功能遗传线路	72
4.2	基因调控开关	74
4.2.1	转换开关	74
4.2.2	双相开关	75
4.2.3	Riboswitch	75
4.2.4	双稳态开关	77
4.3	Repressilator	83
4.4	细胞群体系统脉冲发生器	88
<b>第二部分 其他方面的合成生物学基础研究</b>		92
4.5	控制群体数量的基因线路	92
4.6	人工细胞群体图案系统	95
4.7	人工转录级联线路	99
4.8	工程化的支架蛋白	100
4.9	重构 T7 噬菌体基因组	105
<b>第5章 合成生物学的应用研究</b>		111
5.1	合成生物学应用于维护人类健康	111
5.1.1	环境控制的大肠杆菌对癌细胞的侵入系统	113
5.1.2	合成青蒿素的微生物工厂	117



5.2 合成生物学应用于生产生物能源 .....	121
利用工程化的大肠杆菌非发酵代谢途径生物合成高级醇.....	123
5.3 合成生物学应用于环境治理 .....	126
砷离子的检测.....	126
5.4 合成生物学应用于其他方面 .....	128
5.4.1 大肠杆菌成像系统 .....	128
5.4.2 微生物计算系统 .....	131
<b>参考文献</b> .....	137
<b>主要网站</b> .....	148
<b>附录 A 名词解释</b> .....	150
<b>附录 B iGEM 参赛项目选介</b> .....	157
1. 幽门螺杆菌疫苗 .....	157
2. 艾滋病的治疗 .....	161
3. 芳香烃类污染物的检测 .....	164
4. 丁醇的生物合成 .....	165
5. 基因反馈调节治疗脓毒症 .....	167
6. 大肠杆菌香味剂 .....	169
<b>名词索引</b> .....	171
<b>人名索引</b> .....	173