

基于免疫系统优化算法、模型

及其应用研究

郑士芹 □ 著



 **知识产权出版社**
全国百佳图书出版单位

基于免疫系统优化算法、模型

及其应用研究

郑士芹 回著



 知识产权出版社
全国百佳图书出版单位

内容提要

人工免疫系统是一门基于生物免疫学、计算机科学的交叉学科,是计算智能领域一个新的研究热点。本书在人工免疫算法、免疫系统模型及应用方面做了一些研究工作,主要创新点是:1. 受生物免疫系统的“针对一种抗原免疫系统能通过克隆选择产生多种抗体”机制的启发,提出了两种适用于多模态函数优化的免疫算法:小生境克隆选择算法(NCSA)和基于聚类的小生境克隆选择算法(C-NCSA);2. 在免疫系统模型研究方面,对利用“复杂网络”理论建立免疫系统模型进行了探讨,为免疫系统的不同机制建立了相应的复杂网络模型:(1)基于BA网络的克隆选择模型;(2)基于ER模型的独特型网络模型;(3)基于“种群”的免疫系统模型;3. 将多模态免疫算法应用到入侵检测系统,提出了一种基于模糊规则自动发现的模糊网络入侵检测系统。

责任编辑:杜丽丽

图书在版编目(CIP)数据

基于免疫系统的优化算法、模型及其应用研究/郑士芹著.

—北京:知识产权出版社,2012.6

ISBN 978-7-5130-1295-9

I. ①基… II. ①郑… III. ①免疫学—模函数—研究
②免疫学—系统模型—研究 IV. ①Q939.91

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第080492号

基于免疫系统的优化算法、模型及其应用研究

JIYU MIANYIXITONG DE YOUHUA SUANFA MOXING JIQI YINGYONG YANJIU

郑士芹 著

出版发行:知识产权出版社

社址:北京市海淀区马甸南村1号

邮编:100088

网址:<http://www.ipph.cn>

邮箱:bjb@cnipr.com

发行电话:010-82000893 82000860 转 8101

传真:010-82000893

责编电话:010-82000860 转 8128

责编邮箱:duhh@cnipr.com

印刷:知识产权出版社电子制印中心

经销:新华书店及相关销售网点

开本:787 mm×1092 mm 1/16

印张:9 25

版次:2012年6月第1版

印次:2012年6月第1次印刷

字数:150千字

定价:36.00元

ISBN 978-7-5130-1295-9/Q·019(4177)

出版权专有 侵权必究

如有印装质量问题,本社负责调换。

摘 要

人工免疫系统是一门基于生物免疫学、计算机科学的交叉学科,是计算智能领域一个新的研究热点。本书在人工免疫算法、免疫系统模型及应用方面做了一些研究工作,主要创新可归纳为以下几个方面:

1. 受生物免疫系统的“针对一种抗原免疫系统能通过克隆选择产生多种抗体”机制的启发,提出了两种适用于多模态函数优化的免疫算法:小生境克隆选择算法(NCSA)和基于聚类的小生境克隆选择算法(C-NCSA)。

(1)小生境克隆选择算法是利用小生境技术、记忆算子、梯度算子、抑制算子对经典的克隆选择算法改进而形成的一种智能算法。从理论上证明了该算法具有完全收敛性。同时,通过与 CLONALG 算法进行大量仿真对比进一步表明,NCSA 不仅具有完全收敛性,并且具有搜索效率高、稳定性好等优点。

(2)基于聚类的小生境克隆选择算法是针对小生境克隆选择算法计算复杂、参数设置困难等缺点而提出的。新算法删除了计算复杂度较大的抑制算子,引入聚类算子,并对算法的部分流程进行了调整。新算法不仅计算复杂度降低,而且无须预知峰的个数等先验知识,仅根据样本数据即可找到全部峰值点。仿真实验验证了 C-NCSA 的完全收敛性,并且通过与小生境克隆选择算法的对比实验证明:在相同的实验条件下,C-NCSA 的执行时间比 NSCA 明显降低。

2. 在免疫系统模型研究方面,对利用“复杂网络”理论建立免疫系统模型进行了探讨,为免疫系统的不同机制建立了相应的复杂网络模型。模型为研究生物免疫系统提供了理论工具,为人工免疫系统学科提供了新的研究方

法。文中给出了三个相关模型。

(1) 基于 BA 网络的克隆选择模型:它是克隆选择学说的复杂网络模型。它描述了免疫系统在面临抗原入侵时抗体细胞的变化规律。

(2) 基于 ER 模型的独特型网络模型:它是独特型网络学说的复杂网络模型。该模型描述了在没有外部抗原入侵时免疫细胞内部的调节机制。

(3) 基于“种群”的免疫系统模型:它是免疫系统的复杂网络模型。该模型有两层:第一层是“种群层”,该层采用 ER 模型的运算规则,对应着“独特型网络学说”;第二层是普通节点层,该层采用 BA 网络的运算规则,对应着“克隆选择学说”。模型描述了“当有抗原入侵时,抗体细胞进行克隆选择,产生高亲和度的抗体并杀灭抗原;当抗原消除后,免疫系统内部进行自我调整,消除过度繁殖的抗体细胞,使免疫系统中各类细胞数量保持一定的比例,以维持免疫系统的平衡”的运行机制。

(4) 利用“均场理论”,对基于种群的免疫系统模型的度进行理论计算,得出了该模型的度分布函数。同时对该模型的仿真实验表明:经过多代的进化,在种群内部节点的度分布集中于少量节点,符合克隆选择学说;种群之间的度比较均匀,符合独特型网络学说,因此该模型能很好地模拟免疫系统的实际运行特点。

3. 将多模态免疫算法应用到入侵检测系统,提出了一种基于模糊规则自动发现的模糊网络入侵检测系统。

(1) 提出一套利用小生境克隆选择算法发现模糊规则的方法。该方法的一个特点是对规则的评价函数不仅包含规则本身的置信度和蕴涵隶属度等特性,而且也包含表明该规则对规则集整体性能影响程度的量化特性,即一致性贡献和完备性贡献。该方法不需要预先确定规则数目,便可自动搜索出一组合理的模糊规则,具有收敛速度快、需要先验知识少、规则集完备性、一致性好等特点。将该方法用在股票价格的中期预测上收到了较好的效果。

(2) 提出了一种基于网络的模糊入侵检测系统(FNIDS)。该系统中的模糊规则生成是利用小生境克隆算法学习发现。仿真实验采用 1999 年

DARPA 的入侵检测评估数据,作为 FNIDS 的训练和测试数据。仿真实验的结果表明:对 DOS 和探测攻击的两种攻击而言,在相同虚警条件下 FNIDS 的对旧攻击的检测率高于 DARPA 的最好检测结果,同时 FNIDS 对新的 DOS 攻击有一定的检测能力。

目 录

第1章 绪论	(1)
1.1 引言	(1)
1.2 生物免疫系统简介	(5)
1.2.1 相关免疫学术语	(6)
1.2.2 免疫系统的生理结构	(7)
1.2.3 多层免疫体系	(8)
1.2.4 基本免疫识别和作用机理	(11)
1.2.5 生物免疫系统的特点	(12)
1.3 人工免疫系统研究综述	(14)
1.3.1 人工免疫系统概念	(14)
1.3.2 免疫算法	(15)
1.3.3 人工免疫网络模型和算法	(20)
1.3.4 人工免疫系统模型	(34)
1.3.5 人工免疫系统设计指导	(42)
1.3.6 人工免疫系统研究所面临的困难	(43)
1.4 研究内容和结构安排	(44)
第2章 面向多模态函数优化的免疫算法	(48)
2.1 引言	(48)
2.2 小生境克隆选择算法	(50)

2.2.1	克隆选择算法介绍	(51)
2.2.2	算法的不足与改进	(52)
2.2.3	小生境克隆选择算法	(54)
2.2.4	算法收敛性分析	(57)
2.2.5	仿真实验	(59)
2.2.6	结论	(61)
2.3	基于聚类的小生境克隆选择算法	(62)
2.3.1	小生境克隆选择算法存在的问题	(62)
2.3.2	小生境克隆选择算法的改进	(63)
2.3.3	基于聚类的小生境克隆选择算法	(65)
2.3.4	C-NCSA 算法的特性分析	(67)
2.3.5	仿真实验	(68)
2.3.6	结论	(70)
2.4	本章小结	(71)
第 3 章	基于复杂网络的免疫系统模型研究	(72)
3.1	免疫系统模型研究简介	(72)
3.2	克隆选择学说的复杂网络模型	(74)
3.2.1	克隆选择学说简介	(74)
3.2.2	基于 BA 模型的克隆选择学说模型	(75)
3.2.3	模型度分布特性	(76)
3.2.4	模型分析	(79)
3.3	独特型网络学说的复杂网络模型	(80)
3.3.1	独特型网络(idiotypes network)理论	(80)
3.3.2	基于 ER 模型的独特型网络模型	(81)
3.3.3	模型分析	(83)
3.4	免疫系统的复杂网络模型	(84)

3.4.1	基于种群的免疫系统模型	(84)
3.4.2	模型的免疫学意义	(86)
3.4.3	模型度分布计算	(87)
3.4.4	模型的仿真实验	(89)
3.4.5	模型分析	(90)
3.5	本章小结	(91)
第4章	小生境克隆选择算法在入侵检测中的应用	(93)
4.1	引言	(93)
4.2	利用小生境克隆选择算法发现模糊规则	(95)
4.2.1	基本原理	(96)
4.2.2	模糊规则的编码	(96)
4.2.3	评价函数	(97)
4.2.4	算法流程描述	(99)
4.2.5	实验验证	(100)
4.2.6	小结	(103)
4.3	基于模糊规则自动生成的模糊网络入侵检测系统	(104)
4.3.1	FNIDS 的系统功能	(105)
4.3.2	FNIDS 的系统结构	(107)
4.3.3	实验验证	(115)
4.4	小结	(122)
第5章	结 论	(123)
	参考文献	(127)

第1章 绪 论

1.1 引言

计算智能^①(computational intelligence)是借助现代计算工具模拟人的智能机制、生命演化过程和人的智能行为而进行信息获取、处理、利用的理论和方法。它是以模型(数学模型、计算模型)为基础,以分布、并行、仿生计算为特征,包含数据、算法和实现的信息系统。它强调系统的自组织、自学习和自适应。计算智能在利用计算科学与技术模拟人的智能和行为时,通常基于不同的观点和原理,由此产生了不同的技术。到目前为止,已经形成人工神经网络(artificial neural networks)、模糊系统(fuzzy systems)、遗传算法(evolutional algorithm)等多个典型技术分支。

现代生物学研究认为:生物系统中具有信息处理能力的部分包括神经系统、遗传系统、免疫系统和内分泌系统。生物免疫系统是一个复杂自适应系统,能有效地抵御各种外部病原体入侵,维持免疫系统内部平衡。从计算智能的角度来看,该系统具有多样性、耐受性、记忆性、分布式并行处理、自组织、自学习、自适应和鲁棒性等优良的特性^②,从而引起广大研究人员的关

① 褚蕾蕾,陈绥阳,周梦. 计算智能的数学基础[M]. 北京:科学出版社,2002:4~5.

② 李涛. 计算机免疫学[M]. 北京:电子工业出版社,2004:34~39.



注,成为继人工神经网络、进化系统、模糊系统之后计算智能领域中又一个研究热点。

人工免疫系统(Artificial Immune System, AIS)^①是一门生物免疫学和计算机科学的交叉学科。它主要是利用最新的计算机技术,研究有关生物免疫的理论、规则、算法、模型等,并将此应用到具体的系统中、解决实际应用课题的一门科学。人工免疫系统已被广泛应用于模式识别^{②③④⑤⑥⑦⑧⑨⑩}、计算机安全^{⑪⑫⑬}、异常检测^{⑭⑮⑯}、优化^⑰、机器学习^{⑱⑲⑳㉑㉒}、自动控制^㉓、机器人^㉔、故障诊断^{㉕㉖}、调度^㉗等各个方面。

(注文转下页)

- ① Leandro N. de Castro, Jonathan Timmis. Artificial immune systems: a new computational intelligence approach[M]. Great Britain: Springer, 2002: 9 ~ 18.
- ② J. H. Carter. The immune system as a model for pattern recognition and classification[J]. Journal of the American Medical Informatics Association, 2000,7(1):28 ~ 41.
- ③ S. Forrest, B. Javornik, R. E. Smith, et al. Using genetic algorithms to explore pattern recognition in the immune system[J]. Evolutionary Computation, 1993,1(3):191 ~ 211.
- ④ D. Dasgupta, Y. Cao et al. An immunogenetic approach to spectra recognition. In: Wolfgang, Banzhaf, et al. eds. Proceedings of the International Conference Genetic and Evolutionary Computation[C]. Orlando: Morgan Kaufmann, 1999:149 ~ 155.
- ⑤ D. Dasgupta, F. Nino. A comparison of negative and positive selection algorithms in novel pattern detection. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics (SMC) [C]. Nashville, TN, USA, 2000:125 ~ 130.
- ⑥ Tarakanov A. , Dasgupta D. A formal modal of an artificial immune system[J]. BioSystems, 2000,55(1-3):151 ~ 158.
- ⑦ S. Sathyanath, F. Sahin. An AIS approach to a color image classification problem in a real time industrial application. In : Proceedings of the IEEE Systems, Man and Cybernetics Conference[C]. Tucson, Arizona, USA, 2001:2285 ~ 2290.
- ⑧ L N de Castro, J Timmis. Artificial immune systems: a novel approach to pattern recognition. In: LAlonso, JCorchado, C Fyfe, eds. Proceedings of Artificial Neural Networks in Pattern Recognition[C]. Scotland: University of Paisley, 2002:67 ~ 84.
- ⑨ A. Tarakanov, V. Skormin. Pattern recognition by immunocomputing. In: Proceedings of the Special Sessions on Artificial Immune Systems in Congress on Evolutionary Computation, IEEE World Congress on Computational Intelligence[C].e. Honolulu, Hawaii, USA, 2002:938 ~ 943.
- ⑩ Jennifer A. White, Simon M. Garrett. Improved pattern recognition with artificial clonal selection. In: Jon Timmis, Peter Bently, Emma Hart eds. Proceeding of Second International Conference on Artificial Immune

- Systems (ICARIS) [C]. Germany: Springer, 2003:181 ~ 193.
- ⑪ S. Hofmeyr. An immunological model of distributed detection and its application to computer security: [D]. Albuquerque, NM: University of New Mexico, 1999.
 - ⑫ D Dasgupta, F Gonzalez. An immunity-based technique to characterize intrusions in computer networks[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002,3: 281 ~ 291.
 - ⑬ Jungwon Kim, Peter J. Bentley. Immune memory in the dynamic clonal selection algorithm. In: Proceedings of the First International Conference on Artificial Immune Systems (ICARIS) [C]. University of Kent, Canterbury, UK, 2002:57 ~ 65.
 - ⑭ Ishida Y. Fully distributed diagnosis by PDP learning algorithm: towards immune network PDP model. In: Proceedings of the International Joint Conference on Neural Networks [C]. San Diego, California, USA, 1990:777 ~ 782.
 - ⑮ Xanthakis S, Karapoulios S, Pajot R, et al. Immune system and fault tolerant computing [C]. Lecture Notes in Computer Science, 1995,1063:181 ~ 197.
 - ⑯ Dasgupta D., Forrest S. Anomaly detection algorithm inspired by the immune system. In: Artificial immune system and their application. [M] UK: Springer-Verlag, 262 ~ 277.
 - ⑰ Endoh S., Toma N., Yamada K. Immune algorithm for n-TSP. In: Proceedings of the IEEE System Man and Cybernetics Conference [J]. San Diego, CA USA, 1998:3844 ~ 3849.
 - ⑱ L. N. De Castro, F. J. Von Zuben. An evolutionary immune network for data clustering. In: Proceedings of the IEEE SBRN '00 (Brazilian Symposium on Artificial Neural Networks) [C]. Rio de Janeiro, Brazil, 2000:84 ~ 89.
 - ⑲ Perelson A. S., Hightower R., Forrest S. Evolution and somatic learning in V-Region Genes [J]. Research in Immunology, 1996,147: 202 ~ 208.
 - ⑳ Timmis J. Artificial immune system: a novel data analysis technique inspired by the immune network theory: [D]. UK: University of Wales, 2000.
 - ㉑ Andrew B., Watkins. AIRS: A resource limited artificial immune classifier: [D]. USA: Mississippi State University, 2001.
 - ㉒ Timmis J, Neal M, Hunt J. Data analysis with artificial immune systems and cluster analysis and kohonen networks: some comparisons. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Systems and Man and Cybernetics (SMC) [C]. Tokyo, Japan, 1999:922 ~ 927.
 - ㉓ H. Bersini. Reinforcement and recruitment learning for adaptive process control. In: Proceedings of the 1992 IFAC/IFIP/IMACS on Artificial Intelligence in Real Time Control. Delft [C]. The Netherlands, 1992: 331 ~ 337.
 - ㉔ Krishna Kumar. K, Neidhoefer J. Immunized adaptive critics for level 2 intelligent control. In: Proceedings of the IEEE Systems, Man and Cybernetics [C]. Orlando, FL, USA, 1997, 1:856 ~ 861.
 - ㉕ Krishna Kumar, K. Satyadas, A Neidhoefer J. An immune system framework for integrating computational intelligence paradigms with applications to adaptive control. Computational Intelligence A Dynamic System Perspective [C]. USA: IEEE Press, 1995.
 - ㉖ A. Ishiguro, Y. Watanabe, T. Kondo, et al. Immunoid: A robot with a decentralized behavior arbitration mechanisms based on the immune system. In: Proceedings of the 4th International Conference on Automatic,



- Robotics and Vision (ICARCV'96)[C]. Singapore, 1996,2:1600 ~ 1605.
- ⑳ A. Ishiguro, Y. Watanabe, T. Kondo, et al. A robot with a decentralized consensus-making mechanism based on the immune system. In: Proceedings of 3rd International Symposium on Autonomous Decentralized Systems (ISADS'97). [C] Berlin, Germany, 1997:231 ~ 237.
 - ㉑ Ishida Y. Fully distributed diagnosis by PDP learning algorithm; towards immune network PDP model. In: Proceedings of International Joint Conference on neural networks[C]. San Diego, California, USA, 1990: 777 ~ 782.
 - ㉒ Xanthakis S, Karapoulos S, Pajot R, et al. Immune system and fault tolerant computing[J]. Lecture Notes in Computer Science. 1996, 1063:181 ~ 197.
 - ㉓ D. Bradley, A. Tyrrell. Immunotronics: hardware fault tolerance inspired by the immune system. In: Proceedings 3rd International Conference on Evolvable Systems [C]. Germany: Springer-Verlag. 2000, 1801:11 ~ 20.
 - ㉔ Mori M., Abe K., Tsukiyama M, et al. Artificial immune system based on petri nets and its application to production management systems. In: Proceedings of the IEEE Genetic and Evolutionary Computational Conference[C]. Las Vegas, Nevada, USA, 2000:51 ~ 53.
 - ㉕ Cui X, Li M. Study of population diversity of multi-objective evolutionary algorithm based on immune and entropy principles. In: Proceedings of the IEEE Congress on Evolutionary Computation[C]. Seoul, Korea. 2001,2:1316 ~ 1321.

人工免疫系统的主要研究内容包括:人工免疫算法、免疫系统模型和工程应用等。该学科的研究始于1980年^①中期,但直到1994年Forrest发表了重要论文^②才引起人们的广泛关注。虽然人工免疫系统已经发展了10余年,取得了许多成果,但仍然面临着以下几个比较突出的问题:

①现有的免疫算法大都是针对某一具体问题而提出的,应用形式比较简单,并且缺乏深入的理论分析,因此需要改进现有算法、提出新算法,并加强算法的理论研究;②目前人工免疫系统领域还没有统一的数学理论基础,理论研究大多借鉴于遗传算法、细胞自动机和人工神经网络等相关领域。因此迫切需要建立人工免疫系统自己的理论体系;③应用是检验理论成熟与否的

① Hoffmann, G. W. A neural network model based on the analogy with the immune system[J]. Journal of Theoretical Biology, 1986, 122: 33 ~ 67.

② Forrest S., A. Perelson, Allen, et al. Self-Nonself discrimination in a Computer. In: Proceedings of the IEEE Symposium on Research in Security and Privacy [C]. Washington, DC, USA: IEEE Computer Society, 1994:202 ~ 212.



一个标准。虽然人工免疫系统的应用领域不断扩大,但还不能像其他计算智能理论,如模糊系统、神经网络等为各领域广泛地认可和应用。因此,需要进一步的应用研究。

针对以上的问题,本书在人工免疫系统的研究方面作了如下几点尝试。

一、在算法方面:为了突出免疫算法在解决多模态优化问题方面的优势,文中对经典的克隆选择算法进行了改进,提出了两种用于多模态函数优化的免疫算法,并对其收敛性进行了理论证明和仿真实验验证。

二、在理论研究方面:本书利用复杂网络理论建立了免疫系统模型。该模型具有结构简单、参数较少且调整灵活等特点,有很强的实用性,为人工免疫系统的深入研究奠定了理论基础。

三、在应用方面:对人工免疫系统在网络安全方面的应用进行了深入的研究。本书将小生境克隆选择算法应用在入侵检测技术中,提出了一种基于模糊规则自动生成的模糊网络入侵检测系统。

下面首先简单介绍生物免疫系统;其次介绍人工免疫系统的研究综述;最后介绍本书的主要研究成果和内容安排。

1.2 生物免疫系统简介

免疫系统(immune system)^①是指生物有机体(特别是脊椎动物和人类)保护自身不受外来细菌攻击的系统(本书特指人类的免疫系统)。免疫系统是由分布在全身的免疫器官组成。这些免疫器官构成一个多层次的防御体系,从不同的层次对人体进行保护。下面首先介绍一些基本的免疫学术语,之后分别介绍免疫系统的生理结构、多层防御体系及基本的免疫机制,并从

^① Forrest S., A. Perelson, Allen, et al. Self-Nonself discrimination in a Computer. In: Proceedings of the IEEE Symposium on Research in Security and Privacy [C]. Washington, DC, USA: IEEE Computer Society, 1994:202 ~ 212.



计算智能的角度来分析免疫系统的特性。

1.2.1 相关免疫学术语^①

抗原 (antigen, Ag) :在适当的环境下,能够刺激特异性免疫应答的免疫原性物质,并能与特异性抗体或与该反应性有关的细胞起反应。

抗体 (antibody, Ab) :由于对抗原刺激的应答,而产生的特异性免疫球蛋白,并具有与该种抗原特异性结合的能力,是由 B 淋巴细胞分化的浆细胞合成的。

免疫应答 (immune response) :免疫细胞识别抗原分子后,自身活化、增生和分化以及产生免疫效应的全过程称作免疫应答。

亲和度 (affinity) :表示抗原与抗体结合能力的大小。亲和度越高的抗体消灭抗原的能力越大,反之越小。

克隆 (clone) :单一祖先无性繁殖的单个个体,并发育成遗传构造相似的一簇细胞或微生物。

亲和度成熟 (affinity mature) :是指通过变异和选择对抗体进化,使抗体与抗原亲和度逐渐达到较高的水平。

淋巴细胞 (lymphocyte) :在淋巴样组织中产生的细胞,也存在于淋巴与血液中。

T 细胞 (T lymphocyte, T cell) :在胸腺中成熟的一种参与免疫应答的淋巴细胞。

B 细胞 (B lymphocyte, B cell) :抗体形成浆细胞的前驱;这些细胞表面携带免疫球蛋白(抗体)和 MHC 类(主要组织相容性复合体)抗原。

自身 (self) :指体内的细胞或无害的体外细胞。

非自身 (non-self) :指体外的有害细胞,即病原体。

^① 林学颜,张玲.现代细胞与分子免疫学[M].北京:科学出版,1999:537~570.

1.2.2 免疫系统的生理结构

免疫系统由分布在全身的免疫器官构成。按其功能不同,分为初级淋巴器官(primary lymphoid organs)和次级淋巴器官(secondary lymphoid organs)^①。初级淋巴器官是免疫细胞发生、分化和成熟的场所,包括骨髓(bone marrow)、胸腺(thymus)。次级淋巴器官包括淋巴结(lymph nodes)、脾脏(spleen)及其他淋巴组织。次级淋巴器官不仅是成熟淋巴细胞定居的场所,而且是这些细胞受抗原刺激后,发生免疫应答的场所,图 1.1 给出了免疫器官的示意图。

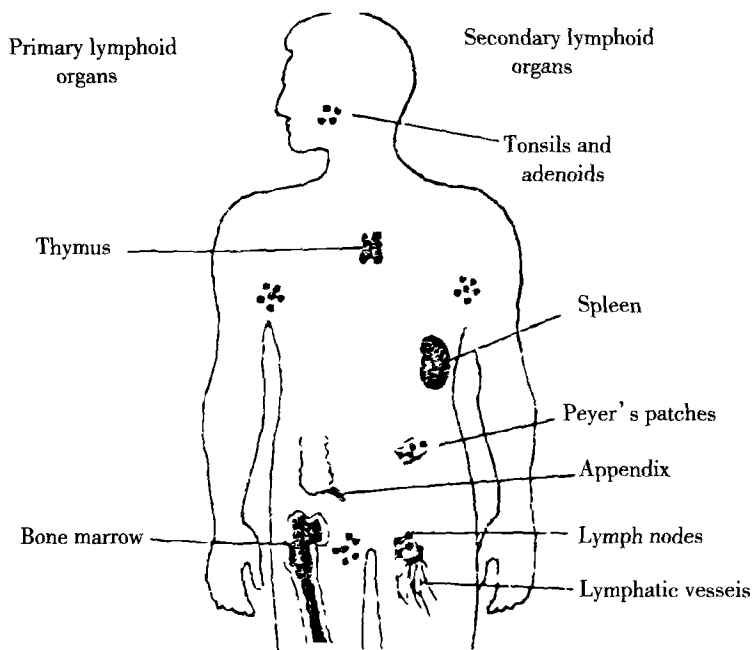


图 1.1 免疫器官

^① 莫宏伟. 人工免疫系统原理与应用[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2002.



骨髓是各种免疫细胞发生和分化的场所。骨髓中产生的多能干细胞可增殖分化成为淋巴系干细胞。淋巴系干细胞在胸腺中再分化为 T 细胞,在骨髓中再分化为 B 细胞。成熟后的 T 细胞和 B 细胞最后定位于次级淋巴器官。

胸腺的主要成分是淋巴细胞,其绝大部分是未成熟的前体 T 细胞。胸腺是 T 淋巴细胞发育、分化、成熟的场所。

全身淋巴结的主要免疫功能是过滤和清除异物,同时它也是针对来自淋巴液中抗原而产生免疫应答的重要场所。

脾脏是人体最大的免疫器官。脾脏白髓中的淋巴小结即为初级淋巴滤泡,是 B 细胞的居留地;脾的小动脉周围的淋巴鞘是 T 细胞的居留地。

除淋巴结和脾脏外,淋巴细胞分散在或成群地存在于许多组织中,如小肠固有层中的集合淋巴结、阑尾(appendix)中的淋巴滤泡、咽部的扁桃体(tonsils and adenoids)及上呼吸道和气管粘膜下的淋巴滤泡,也属于次级淋巴器官。

1.2.3 多层免疫体系

免疫系统是生物体用来消除外来细菌的快速、有效的防御体系。它可划分为物理屏障(physical barriers)、生物化学屏障(biochemical barriers)、固有免疫系统(innate immune system)和自适应免疫系统(adaptive immune system)^①等几层。如图 1.2 所示,下面分别介绍。

物理屏障:皮肤就是一个天然的保护层,其表面有一层厚实、致密的角化层可以抵挡病原体的入侵。呼吸系统也有助于防止潜在的病毒入侵,其机制包括通过鼻子的茸毛和黏液捕获刺激物,通过茸毛的上下移动运输黏液,通过咳嗽和打喷嚏排除细菌。

① 莫宏伟. 人工免疫系统原理与应用[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2002.