基于多目标的消磁绕组优化调整方法

朱显桥 刘大明 杨明明

(海军工程大学 电气与信息学院, 武汉 430033)

摘 要: 针对目前舰船消磁绕组优化调整方法中只考虑舰艇磁场信号幅值而较少考虑磁场梯度信号幅值的不足,提出同时以磁场幅值和磁场梯度幅值削减为目标的优化调整方法. 为此,首先以线圈等效电流值为优化对象,磁场和梯度峰值为优化目标,建立了消磁绕组优化调整的多目标数学模型;随后采用多目标微粒群算法求解得到了该优化问题的 Pareto 解集;最后通过一个计算实例验证了方法的有效性. 实例结果表明该方法能够同时处理磁场和磁场梯度幅值,并能给出多种不同等效电流组合以供选择使用.

关 键 词: 消磁绕组; 磁场; 磁场梯度; 多目标微粒群算法

中图分类号: TM 153

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2012)11-1507-05

Degaussing coils optimal calibration method based on multi-objectives

Zhu Xianqiao Liu Daming Yang Mingming

(College of Electrical and Information Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: The current method of ship degaussing coils optimal calibration has a shortage that it only takes the ship's magnetic field crest value into account while pay less attention to its magnetic gradient crest value. Considering the current method's shortage, a kind of calibration method with the purpose to reduce the crest value of both the magnetic field and gradient was proposed. Therefore, a multi-objective optimization model of the coils optimal calibration was built firstly with the coils' equivalent currents as the optimized parameters and peak of both ship's magnetic field and its gradient as optimized target. Then the Pareto solution set of the optimization problem was obtained by a kind of multi-objective particle swarm optimization (MOPSO). Last, the method's effectiveness was verified by a certain example. The results show that the method can deal with both the magnetic field and gradient at the same time, and it can provide a set of different currents for the engineer's choices.

Key words: degaussing coils; magnetic field; magnetic gradient; multi-objective particle swarm optimization

消磁绕组为一组安装在舰艇内部的线圈,适当调整该组线圈的匝数和电流使之在舰艇外部产生与舰艇磁场信号形状相同、幅值相等、方向相反的磁场来抵消舰艇磁场,以提高舰艇磁防护能力[1]. 若线圈匝数或电流设置不当以及舰艇磁场发生变化,应当及时进行消磁绕组优化调整. 在过去 30 年内,人们对消磁绕组的优化调整进行了广泛地研究. 文献[2-3]采用最小二乘法来调整绕组,使得补偿后的舰船磁场信号均方根最小;文献[4]提出了适用于遗传算法的绕组调整适应度函数,使得补偿后的磁场信号峰值和方差均优于以均方根为目标函数的方法;文献[5]研究了基于随机微粒群算法的绕组优化调整方法,该方法在削减磁场信号的均方根和峰值两方面均明显优于

收稿日期: 2012-04-25; **网络出版时间**: 2012-11-26 11:39

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20121126.1139.016.html

作者简介: 朱显桥(1982-),男,湖北咸宁人,博士生,zhuxianqiao@yahoo.com.cn.

文献[3-4];文献[6-7]将多种群微粒群算法(也称压缩空间微粒群算法)用于消磁绕组优化,收敛速度和优化结果优于文献[5].

随着磁探测技术的发展,磁场梯度成为定位和识别目标的重要物理量[8],然而目前常用的调整方法一般只考虑了磁场信号,而较少考虑磁场梯度信号[2-7].舰船磁信号补偿时,发现对于磁信号曲线多次过零点的情况,单从峰值较小进行补偿,对方差并没有什么改善.为提高舰艇磁隐身性能,应当使经消磁绕组补偿后的舰船磁场信号具有峰值较小(磁场幅值削减)和方差较小(梯度幅值削减)的特征,由此绕组优化调整问题应归结为多目标优化问题(MOP, Multi-Objective Problem).基于以上分析,本文首先建立了绕组优化调整的多目标数学模型,随后采用基于 Pareto 支配关系的多目标微粒群优化(MOPSO, Multi-Objective Particle Swarm Optimization)对模型进行求解,最后给出了某典型消磁系统[5-7]的计算结果.实例结果表明:该方法能够同时处理磁场和磁场梯度,并能给出多种不同调整方案以供选择使用.

1 优化调整的多目标数学模型

消磁绕组的优化调整包括调整线圈匝数和流过线圈的电流.由线圈匝数和电流与磁场之间的对应关系,可以认为:对线圈匝数和电流的调整相当于调整单匝线圈的电流(称为等效电流).假设某船的消磁绕组共有 p 个线圈,且每个线圈的等效电流在其允许的范围内任意可调;在舰船龙骨下一定深度上共设置 k 个测量点(通常取评估舰船磁场的考核点为测量点).由文献[5-7]可知,消磁绕组优化调整问题可用式(1)表示:

$$\boldsymbol{AI} = -\boldsymbol{B} \tag{1}$$

其中,$\boldsymbol{A}=(a_{ij})_{n\times p}$ 为联系磁场测量值与等效电流的观测矩阵,a_{ij} 表示第 j 个线圈在第 i 个测量点处的磁场效率(单匝线圈流过单位电流时线圈产生的磁场[1]);$\boldsymbol{I}=(I_1, I_2, \cdots, I_p)^{\mathrm{T}}$ 为等效电流最优值;$\boldsymbol{B}=(b_1, b_2, \cdots, b_n)^{\mathrm{T}}$ 为舰船磁场测量值.

选取合适的目标函数后,求解式(1)就可以得到较优的等效电流值.常用的目标函数主要有均方根误差(RMS)最小[2-3]和峰值误差(PM)最小[5-7]等,两者的表达式分别为

$$f_{\mathrm{RMS}}(\boldsymbol{I}) = \frac{1}{\sqrt{N}} \| \boldsymbol{AI} + \boldsymbol{B} \|_2 \tag{2}$$

$$f_{\mathrm{PM}}(\boldsymbol{I}) = \| \boldsymbol{AI} + \boldsymbol{B} \|_\infty \tag{3}$$

RMS 反映着全部位置的总体补偿效果,而 PM 代表着某些位置补偿效果的极差情况.

上述两种目标函数都只考虑了磁场峰值,却忽略了磁场梯度,也就是说由式(2)或式(3)确定的等效电流能够保证消磁后的舰船磁场最优,却无法保证磁场梯度也是最优的.对一些低磁类舰船(如扫雷舰等),其磁场本身较小,此时磁场梯度对自身目标安全的影响作用大大加强.因此为提高舰船的磁性防护能力,处于良好工作状态的舰船消磁系统不但应当使得磁场信号的峰值较小,还要使得磁场梯度峰值较小,即

$$\left.\begin{aligned} f_{\mathrm{PM}} &= \| \boldsymbol{AI} + \boldsymbol{B} \|_\infty \\ f_{\mathrm{GM}} &= \| \boldsymbol{A}_{\mathrm{G}} \boldsymbol{I} + \boldsymbol{G} \|_\infty \end{aligned}\right\} \tag{4}$$

其中,$\boldsymbol{G}$ 和 $\boldsymbol{A}_{\mathrm{G}}$ 分别表示舰船磁场梯度测量值和线圈的梯度效率矩阵;f_{GM} 为所有测量点中梯度的最大值.

式(4)中 f_{GM} 可以等效于下式:

$$f'_{\mathrm{GM}} = \frac{1}{N} \left\| \frac{\boldsymbol{AI} + \boldsymbol{B} - (\boldsymbol{A}_1 \boldsymbol{I} + \boldsymbol{B}_1)}{\Delta x} \right\|_2 \tag{5}$$

其中 $\boldsymbol{A}_1$ 和 $\boldsymbol{B}_1$ 分别表示舰船移动 Δx 位置时线圈的效率矩阵和舰船磁场测量值;f'_{GM} 为所有测量点梯度和的均方根.

式(5)中为 $\Delta x \cdot N$ 为常量,令 $\boldsymbol{B}_2 = \boldsymbol{A}_1 \boldsymbol{I} + \boldsymbol{B}_1$,表示舰船移动 Δx 后,线圈磁场和舰船磁场在各点处的误差矢量,故确定如下的目标函数:

$$\left.\begin{aligned} f_{\mathrm{PM}} &= \| \boldsymbol{AI} + \boldsymbol{B} \|_\infty \\ f_\sigma &= \| \boldsymbol{AI} + \boldsymbol{B} - \boldsymbol{B}_2 \|_2 \end{aligned}\right\} \tag{6}$$

为简化测量和计算,取移动前各点误差均值作为 $\boldsymbol{B}_2$ 的各个分量,即向量 $\boldsymbol{B}_2$ 中的每个分量都为 $\boldsymbol{AI}+\boldsymbol{B}$ 均值,f_σ 为磁场信号在各点处偏离均值程度的累积,它反映着磁场随测量位置的变化程度.若 f_σ 较大则说明在绝大部分测量位置的磁场变化剧烈,整个磁场曲线光滑度较差,磁场梯度较大;反之则说明磁场变化较小,曲线光滑度较好,磁场梯度较小.

各线圈的匝数和最大电流在舰船设计时已确定,因此每个线圈的等效电流都具有一定范围,即

$$| I_i | \leqslant I_i^{\max} \qquad 1 \leqslant i \leqslant p \tag{7}$$

其中 $I_i^{\max}$ 表示第 i 个线圈最大等效电流值.

从上面的分析可知,式(6)和式(7)确定了一个以消磁线圈等效电流为变量,以舰船磁场峰值和磁场梯度峰值为优化目标的消磁绕组优化调整多目标数学模型.消磁绕组优化调整就是要在满足约束条件式(7)的条件下求解式(6).

2 多目标微粒群算法

多目标优化问题的难点在于:一般无法获得

使其全部目标函数都达到最优的解,而需要在各分目标之间进行折中,以尽可能使所有的目标函数达到最优. 多目标优化问题一般不存在唯一的全局最优解,而是存在多个最优解的集合,多目标问题最优解集中的元素就全体目标而言是不可比较的,因此多目标优化问题的最优解构成一个集合,称成 Pareto 解集. 目前使用较广泛的多目标算法主要有统一目标法和进化多目标优化算法[9-10].

统一目标法是处理多目标优化问题最常用的方法,主要思路为:采用适当方式将问题的多个目标函数转换成一个总体目标函数,在此基础上求解该单目标问题即得原问题的解[9]. 使用较为广泛的转换方法为加权系数法[11-12],该方法一般需要预知各分目标的最优值来规范各自目标且需要了解各分目标的重要程度以决定各自权重. 而由于磁场的复杂性,在绕组优化调整的实际工作中一般较难确定 f_{PM} 和 f_{σ} 的合适权重.

进化多目标算法将经济学中的 Pareto 占优理论与各种进化算法(如遗传算法、微分进化算法、免疫算法和微粒群算法等)结合来求解多目标优化问题. 在众多的进化多目标优化算法中,多目标微粒群算法由于搜索能力强,算法直观简单,是近几年来进化多目标优化领域的研究热点[9-10,13-14].

文献[15]提出的基于 Pareto 占优理论的 MOPSO 是目前使用较为广泛的多目标微粒群算法,该算法奠定了多目标微粒算法的基本框架. 其核心步骤[14]如下:

1) 采用一个外部存档种群(archive)来存储迭代过程中发现的非劣解,采用自适应网格机制来维护存档种群.

2) 由子代和父代的支配关系来更新个体最优值. 若当前粒子位置与其个体最优值存在支配关系,则选择非支配方作为新的个体最优值;若两者之间不存在支配关系,则从中随机选择一个为新的个体最优值.

3) 对存档种群中非支配解目标空间,采用自适应网格法将其分割成多个格子(形成超立方体),并根据粒子的目标向量确定该粒子在超立方体中的位置(格子). 采用轮盘赌方法选择某个格子,并从该格子中随机选择一个个体为全局最优粒子.

4) 对粒子的位置和搜索范围进行变异以增强最终解的多样性,且变异概率随着进化代数的增加而逐渐减小.

3　典型算例分析

3.1　实验参数

本文采用文献[5-7]中典型舰船消磁绕组优化调整问题来验证方法的有效性,该消磁系统和多目标算法的主要参数见表 1.

表 1　消磁系统和算法的主要参数

绕组参数	参数值	算法参数	参数值
线圈个数	7	粒子维数	7
测量点数	101	粒子种群规模	100
等效电流最大值/kA	8	外部存档规模	100
		网格数	10
		最大迭代次数	120
		最大允许速度	2

舰船磁场测量值和各线圈的消磁效率见图 1,其中 M1 表示第 1 个线圈,其余依此类推. 为了绘图清晰,每个线圈的效率人为间隔 2 μT,即线圈效率的图示值为 $a_{ij}+(8-j)\times 2$,其中 $1\leqslant i\leqslant 101$, $1\leqslant j\leqslant 7$.

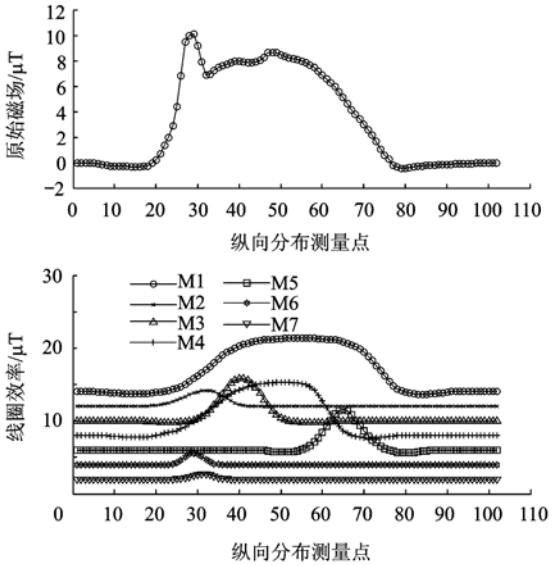

图 1　舰船磁场测量值和各线圈的效率

3.2　实验结果分析

对上述消磁系统的优化调整结果见图 2,从图中可以看出:①在 *DE* 段,随着等效电流的不断变化,补偿后的舰船相对补偿前磁信号的峰值增加缓慢(56.2 nT, 7.6%),而磁场信号曲线方差(反映着磁场梯度的大小)的降低却相对剧烈(-109.1 nT, 29.6%);说明在这个区间内,适当选择不同的电流组合,就能同时实现磁场信号和磁场梯度的较大程度上的削减;②在 *EF* 段,随着等效电流的不断变化,补偿后的舰船磁信号的峰值增加剧烈(155.4 nT, 19.6%),而磁场曲线方差的降低却相对缓慢(-5.4 nT, 2.1%);说明在

这个区间内,无法通过选择不同的电流组合来同时实现磁场信号和磁场梯度的有效削减;③两者权衡之下,选择 E 点对应的等效电流是比较合适的,E 点可以采取极小化式(8)中的 f 来确定:

$$f = f^i_{\mathrm{PM}}/(f^D_{\mathrm{PM}}) + f^i_\sigma/(f^F_\sigma) \tag{8}$$

其中,f^i_{PM}和f^i_σ分别表示图 2 中第 i 点的 PM 值和 σ 值;f^D_{PM}和f^F_σ分别表示 D 点的 PM 值和 F 点的 σ 值.

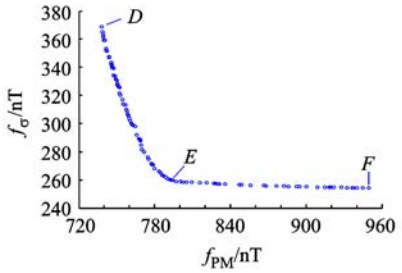

图 2 某消磁系统的优化调整结果

表 2 给出了在 D,E,F 3 点对应的等效电流值和相应的f_{PM}和f_σ 值. 图 3 给出了 D,E,F 处的等效电流对舰船磁场的补偿效果($\boldsymbol{AI}+\boldsymbol{B}$)的对比曲线,从图中可以看出 E 点的补偿效果同时兼顾了信号峰值和信号曲线的光滑性.

表 2 D,E,F 点对应的等效电流值

等效电流	位置		
	D	E	F
I_1/kA	0.1797	0.4305	0.4313
I_2/kA	2.7280	2.4664	2.4443
I_3/kA	-0.0922	-0.0032	0.0085
I_4/kA	0.9529	0.7127	0.7086
I_5/kA	0.6808	0.2967	0.3019
I_6/kA	4.6243	4.9516	4.8325
I_7/kA	-7.9930	-8.0000	-8.0000
f_{PM}/nT	738.1	794.3	949.7
f_σ/nT	368.9	259.8	254.4

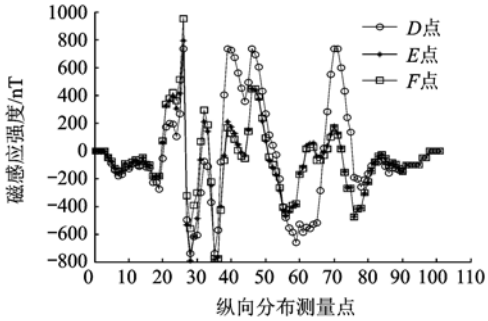

图 3 D 点、E 点和 F 点的补偿效果比较图

图 4 给出了 E 点补偿效果与文献[5]中随机微粒群优化(SPSO,Stochastic Particle Swarm Optimization)方法和文献[6-7]中多种群微粒群优化(M-PSO,Multi-population Particle Swarm Optimization)方法补偿效果的对比曲线. 可见,在绝大部分测量位置舰船磁场信号的幅值和整个曲线的波动程度均得到明显改善.

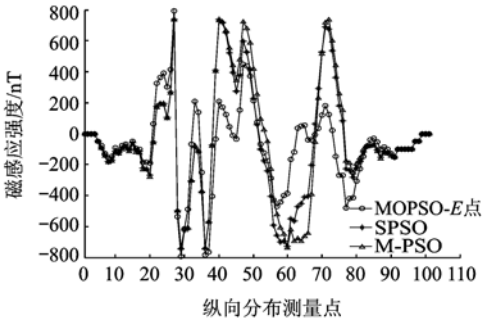

图 4 MOPSO,SPSO 和 M-PSO 补偿效果比较图

4 结束语

本文提出了一种基于多目标微粒群的消磁绕组优化调整方法. 与以往的方法相比,该方法同时考虑舰船磁场信号和梯度信号的削减. 实例结果表明该方法能够同时处理磁场和梯度,并能给出多种有效电流组合供消磁工程师选择. 该方法对于舰船磁性处理工程具有一定实际意义.

参考文献(References)

[1] 杨明明,刘大明,刘胜道,等. 消磁绕组磁感应强度的延拓方法研究[J]. 电波科学学报,2010,25(6):1102-1108
Yang Mingming, Liu Daming, Liu Shengdao, et al. Extrapolation method study of onboard degaussing coils' magnetic field[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2010, 25(6): 1102-1108 (in Chinese)

[2] 朱文普,李琥. 计算补偿舰船磁场的一种方法[J]. 舰船科学技术,1979,1(5):70-72
Zhu Wenpu, Li Hu. A calculating method for the ship magnetic field compensation[J]. Ship Science and Technology, 1979, 1(5): 70-72 (in Chinese)

[3] Kim E R, Kim G C, Son W D, et al. Optimal degaussing techniques and magnetic measurement system[C]//Proceedings of the 1997 International Conference on Marine Electromagnetic. London: IET, 1997

[4] Antonio V M, Alejandro A M. Using genetic algorithms for compensating the local magnetic perturbation of a ship in the earth's magnetic field[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2005, 47(3): 281-287

[5] 郭成豹,张晓锋,肖昌汉,等. 采用随机微粒群算法的舰船消磁系统优化调整[J]. 哈尔滨工程大学学报,2005,26(5):565-569
Guo Chengbao, Zhang Xiaofeng, Xiao Changhan, et al. Optimal calibration of ship degaussing system using stochastic particle swarm optimization[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2005, 26(5): 565-569 (in Chinese)

[6] 刘宏达,李殿璞,马忠丽. 基于多种群搜索策略粒子群算法的舰船消磁优化[J]. 仪器仪表学报,2006,27(6):861-863
Liu Hongda, Li Dianpu, Ma Zhongli. Optimization of ship de-

gaussing system based on multi-population PSO[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument,2006,27(6):861-863(in Chinese)

[7] 刘宏达. 粒子群算法的研究及其在船舶工程中的应用[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学自动化学院,2008:115-121
Liu Hongda. Research of particle swarm optimization algorithm and its application in ship engineering[D]. Harbin: College of Automation, Harbin Engineering University, 2008: 115-121 (in Chinese)

[8] 张朝阳,肖昌汉,阎辉. 磁性目标的单点磁梯度张量定位方法[J]. 探测与控制学报,2009,31(4):44-48
Zhang Chaoyang, Xiao Changhan, Yan Hui. Localization of a magnetic objective based on magnetic gradient tensor at a single point[J]. Journal of Defection and Control,2009,31(4):44-48 (in Chinese)

[9] 公茂果,焦李成,杨咚咚,等. 进化多目标算法[J]. 软件学报,2009,20(2): 271-289
Gong Maoguo, Jiao Licheng, Yang Dongdong, et al. Evolutionary multi-objective optimization algorithms[J]. Journal of Software, 2009,20(2):271-289(in Chinese)

[10] 雷德明,严新平. 多目标智能优化算法及其应用[M]. 北京:科学出版社,2009:31-33
Lei Deming, Yan Xinping. Multi-objective intelligence algorithm and its application[M]. Beijing: Science Press, 2009: 31-33 (in Chinese)

[11] 雷震,蒋全兴. 基于遗传算法的转移阻抗测试装置优化设计[J]. 电波科学学报,2007,22(1): 69-72
Lei Zhen, Jiang Quanxing. Optimization design of transfer impedance testing device based on genetic algorithm[J]. Chinese Journal of Radio Science,2007,22(1):69-72(in Chinese)

[12] 马洪波,段宝岩,王从思. 随机参数反射面天线机电集成稳健优化设计[J]. 电波科学学报,2009,24(6):1065-1070
Ma Hongbo, Duan Baoyan, Wang Congsi. Deformed reflector antenna with random factors and integrated design with mechanical and electronic syntheses[J]. Chinese Journal of Radio Science,2009,24(6):1065-1070(in Chinese)

[13] Nikhil Padhye. Comparison of archiving methods in multi-objective particle swarm optimization[C]//Proceedings of the 11th Annual Conference on Genetic and Evolutionary Computation. NY: ACM, 2009

[14] Zheng Xiangwei, Liu Hongda. A hybrid vertical mutation and self-adaption based mopso[C]//International Conference on Computers & Mathematics With Applications. Tarrytown, NY: Pergamon Press Inc, 2009: 2030-2038

[15] Coello C A, Pulido G T. Multiobjective optimization using a micro-genetic algorithm[C]//Proc of Genetic and Evolutionary Computation Conference. San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers, 2001: 274-282

(编　辑:文丽芳)

(上接第 1506 页)

参考文献(References)

[1] Flynn H. Machine learning applied to object recognition in robot search and rescue systems [D]. Oxford, England: University of Oxford, 2009

[2] 黄荣瑛. 机器人视觉系统模糊识别抓取物算法[J]. 北京航空航天大学学报,2009,35(2):197-200
Huang Rongying. Fuzzy recognition and object-capture algorithm for robot vision systems [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2009, 35(2): 197-200 (in Chinese)

[3] Tkach I, Bechar A, Edan Y. Switching between collaboration levels in a human-robot target recognition system [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews, 2011, 41(6): 955-967

[4] 韩崇昭,朱洪艳,段战胜,等. 多源信息融合[M]. 北京:清华大学出版社,2006:1-13
Han Chongzhao, Zhu Hongyan, Duan Zhansheng, et al. Multi-source information fusion [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006: 1-13 (in Chinese)

[5] Chella A, Frixione M, Gaglio S. Conceptual spaces for computer vision representations [J]. Artificial Intelligence Review, 2001, 16(2): 137-152

[6] Kira Z. Inter-robot transfer learning for perceptual classification [C]// van der Hoek, Kaminka, Lespérance, Luck and Sen. Proc of 9th Int Conf on Autonomous Agents and Multiagent Systems. Toronto: IFAAMAS, 2010: 13-20

[7] Gärdenfors P. Conceptual spaces: the geometry of thought [M]. Cambridge: MIT Press, 2000

[8] 陈鹏,符德江. 物体识别中的视点问题[J]. 心理科学进展,2006,14(1):12-17
Chen Peng, Fu Dejiang. The viewpoint debates in object recognition [J]. Advances in Psychological Science, 2006, 14(1): 12-17 (in Chinese)

[9] Felzenszwalb P F, Huttenlocher D P. Efficient graph-based image segmentation [J]. International Journal of Computer Vision, 2004, 59(2): 167-181

[10] Bishop C M. Pattern recognition and machine learning [M]. Singapore: Springer, 2006

[11] Chang C C, Lin C J. LIBSVM: a library for support vector machines [J]. ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology, 2011, 2(3): 1-27

(编　辑:刘登敏)