

载体干扰磁场补偿方法*

李季, 张琦, 潘孟春, 罗飞路

(国防科技大学 机电工程与自动化学院, 湖南 长沙 410073)

摘要:获得载体航行路径上各点地磁场的精确测量值是地磁匹配导航的前提,而载体上各种干扰磁场的存在会引起磁力仪输出的偏差,影响匹配的精度,因此必须对载体干扰磁场进行补偿。在分析载体干扰磁场特性的基础上,提出利用矢量测量值对地磁场总场值进行补偿的方法。该方法首先根据矢量磁力仪的测量模型得到关于载体磁场参数的非线性方程,然后采用非线性参数估计方法估计出精确的载体干扰磁场系数,最后再利用估计结果对测量值进行补偿。通过仿真对该方法的有效性进行研究,并设计了半实物实验对其实用性进行验证。结果表明采用本文提出的方法补偿后地磁场总场值的测量误差在20nT以内,而且该方法参数估计精度高,应用方便,可以有效地对导航载体干扰磁场进行补偿。

关键词:地磁导航;载体干扰磁场;补偿;非线性估计

中图分类号:TP391 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2013)03-0007-05

The vehicle interferential magnetic field compensation method

LI Ji, ZHANG Qi, PAN Mengchun, LUO Feilu

(College of Mechatronics Engineering and Automation, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Getting accurate geomagnetic field measurements on the route of the vehicle is the precondition for geomagnetic navigation. The interferential magnetic field of the vehicle would distort the outputs of the magnetometer and influence the matching precision, so it must be compensated. Based on the analysis of the characteristics of the vehicle magnetic field, a method to compensate the geomagnetic magnitude, using vector measurements, is presented. A formulation was derived according to the measurement model of vectorial magnetometer, a nonlinear evaluation method was adopted to evaluate the vehicle interferential fields parameters, and then the evaluated results were used to compensate the real-time measurements. A simulation was conducted to test the effect of the method and an experiment was performed to validate its practicability. The results show that after compensating with the presented method, the measurement error of geomagnetic field magnitude is less than 20nT, indicating that the method has high compensating precision, good convenience in use, and can compensate the interferential magnetic field of the navigation vehicle effectively.

Key words: geomagnetic navigation; vehicle interferential magnetic field; compensation; non-linear estimation

利用地磁场进行导航因为具有无源、隐蔽性好等优点而日益成为导航领域研究的热点。在地磁导航技术中,获得导航区域内地磁场的精确测量值是进行地磁匹配的前提,也是决定导航精度的关键因素^[1-3]。

安装于载体内部的矢量磁力仪,导致其输出误差的因素主要有磁力仪自身的误差以及环境磁场的干扰。磁力仪自身的误差主要包括在制造过程中的零偏、非正交性误差、刻度因子误差等^[4],由它们所引起的误差可以通过对磁力仪进行使用前的校正加以消除。而环境磁场的干扰主要是来自导航载体上的各种铁磁性物质和电子设备所产生的磁场,这些磁场的来源复杂,其特性与导航载

体密切相关,还将随着载体的工作状态、姿态等的变化而变化,由它们所引起的干扰远大于磁力仪自身的因素所造成的测量误差。因此载体干扰磁场的补偿是地磁导航技术应用中必须解决的关键问题之一。

目前常用的载体磁场补偿方法主要有航磁补偿法、两步估计法、椭圆拟合法和无迹 Kalman 滤波(UKF)法。航磁补偿法^[5-6]是基于 Tolles-Lawson 方程的方法,该方法是将地磁场测量值的三分量都投影到地磁场方向上,由于忽略了地磁场真实方向与测量方向之间的误差,因此该方法只在干扰场较小的情况下适用。两步估计法^[7-8]算法简单,但由于其引入了中间变量,各变量之间

* 收稿日期:2012-07-16

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51175507)

作者简介:李季(1979—),女,河南南阳人,讲师,博士生,E-mail: hndgyjh@126.com;

罗飞路(通信作者),男,教授,博士,博士生导师,E-mail: fl@nudt.edu.cn

的相关性可能造成系数矩阵奇异,无法得到正确的参数估计值。椭圆拟合法^[9-10]则是通过利用测量值拟合出一个椭圆,根据椭圆参数(中心点、长轴、短轴)与载体磁场系数之间的关系来获得载体磁场各参数。这种方法要求所采集的数据必须能够拟合出一个椭圆,算法复杂,在实际中的应用受到限制。UKF 法^[11-12]可以对载体磁场进行实时补偿,但这种方法对初始参数的选择很敏感,参数选取不当则有可能导致滤波发散。

本文在研究载体干扰磁场特性的基础上,根据地磁场总量匹配的要求,推导得到利用地磁场矢量测量值和真实总场值估计载体干扰场系数的数学模型,并采用信赖域法对模型的参数进行估计,进而对测量值进行补偿。通过仿真对该方法的补偿效果进行研究,最后通过设计的实验对该方法的实际效果进行了验证。

1 载体磁场特性分析

在导航载体中,能够产生磁场的干扰源有很多,这些干扰场按照其特性可以分为固定磁场、感应磁场、随机磁场等^[5]。固定磁场主要是由载体上铁磁性物质的剩磁所产生,这些剩磁所产生的磁场在短时间内不随时间的变化而变化。安装于载体内部的磁力仪,令载体坐标系与磁力仪坐标系重合,固定磁场在载体坐标系下可以看成是一个常量,用 H_p 来表示:

$$H_p = [H_{px} \quad H_{py} \quad H_{pz}]' \quad (1)$$

其中 H_{px} 、 H_{py} 、 H_{pz} 分别表示固定磁场在载体坐标系三个坐标轴上的投影。

感应磁场主要是由载体上的软磁性材料在地磁场中被磁化而产生的,该磁场的大小与引起它的外加磁场成正比,因此在载体坐标系下,感应磁场的大小与方向将随着载体的姿态变化而变化,用 H_i 来表示:

$$H_i = DH_e = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} \end{bmatrix} H_e \quad (2)$$

其中 $H_i = [H_{ix} \quad H_{iy} \quad H_{iz}]'$, $H_e = [H_{ex} \quad H_{ey} \quad H_{ez}]'$ 为地磁场真实值矢量, $D_{3 \times 3}$ 为感应磁场系数矩阵,当载体一定时,该矩阵中的各元素为常数,且可认为 $d_{ij} = d_{ji}$, $i, j = 1, 2, 3$ ^[5]。

随机磁场 H_r 主要是由载体上的各种电子设备、供电系统的电流变化等所引起的无规则变化的磁场,该磁场主要为一些高频成分,而地球磁场是一个极缓慢变化的磁场,频率通常在 1Hz 以

内,因此随机磁场在频率上与地磁场相区别,可以通过对测量数据进行滤波、对干扰源进行屏蔽等方法加以消除。所以在实际中考虑载体干扰场主要由固定磁场和感应磁场两部分组成,在一次测量中矢量传感器的输出值 H_m 可以表示为

$$H_m = H_e + H_p + H_i = (I + D)H_e + H_p \quad (3)$$

其中 $H_m = [H_{mx} \quad H_{my} \quad H_{mz}]'$, I 为 3×3 的单位矩阵。对于某一确定载体而言,固定磁场各分量与感应磁场系数矩阵均为常数,不随载体的姿态与空间位置的变化而变化。

2 载体干扰磁场补偿方法

由(3)式可得

$$H_e = (I + D)^{-1}(H_m - H_p) = (I + B)(H_m - H_p) \quad (4)$$

其中 $B = (I + D)^{-1} - I$ 。因此只要知道了固定磁场和感应磁场系数,就可以根据(4)式求出补偿后的地磁场测量值。

对地球上某一点而言,其地磁场的总场值为一个定值,而矢量磁力仪的测量值则随磁力仪的姿态变化而变化。将(4)式两边同时乘以 H_e' , 可以得到

$$\begin{aligned} \|H_e\|^2 = H_e' H_e = & \|H_m\|^2 - 2H_p' H_m + \|H_p\|^2 \\ & + (H_m - H_p)'(B + B' + B'B)(H_m - H_p) \end{aligned} \quad (5)$$

进一步可得

$$\begin{aligned} f = \|H_m\|^2 - \|H_e\|^2 = & 2H_p' H_m - \|H_p\|^2 \\ & - (H_m - H_p)'(B + B' + B'B)(H_m - H_p) \end{aligned} \quad (6)$$

(6)式中的 f 代表磁力仪测量值与地磁场真实值的强度之差。在理想情况下其值应该为零,但由于载体磁场的存在,使得对每一次测量而言,其值均不为零,而且大小与载体固定磁场和感应磁场系数有关,因此(6)式可以看成是一个关于地磁场测量值的非线性方程,各未知量的系数为固定磁场和感应磁场参数,当已获得一组测量值后,可以根据(6)式估计出固定磁场和感应磁场系数。因此载体干扰磁场补偿的过程就是:选定一块磁场变化很小的区域,测量出该区域的磁场强度,然后使载体进行不断变换姿态的机动,获得一组测量值后,根据(6)式估计出载体固定磁场和感应磁场的参数,最后再利用(5)式对实际的测量值进行补偿,就可以得到补偿后的地磁场总场值。

3 参数估计方法

利用(6)式估计固定磁场和感应磁场系数的

问题可以看成是求下面的非线性优化问题:

$$\min_x g(x) = \min_x \sum_{i=1}^N \|F_i - f_i(x)\|^2 \quad (7)$$

其中 $x = [H_{px} \ H_{py} \ H_{pz} \ d_{11} \ d_{22} \ d_{33} \ d_{12} \ d_{13} \ d_{23}]'$ 表示待估计的参数向量, N 为采样点数。

F_i 代表由测量值产生的观测向量,在这里等于标定区域内磁力仪测得的地磁场总场值与该区域真实地磁场强度之差; $f_i(x)$ 代表由(6)式右边的表达式得到的理论值。非线性模型参数估计问题常采用迭代的方法求解,常用的迭代算法有高斯-牛顿法和信赖域法^[13]。高斯-牛顿法对于初始参数的依赖性比较强,初始点选取不合适可能导致迭代发散而无法得到正确的估计值,因此这里选取信赖域法进行参数估计。信赖域法^[14-15]是一种非常有效的优化方法,它的基本思想是通过将试探步长 d_k 限制在一个可“信赖”的区域内来保证算法的全局收敛性,具体求解过程为^[16]

(1) 假定初始点 x_0 以及各参数的初始值:初始信赖域半径 r_0 以及参数 $0 < \mu < \eta < 1, \varepsilon > 0$;

(2) 计算 $\frac{\partial g(x)}{\partial x}$ 在 x_k 处的值,若 $\left\| \frac{\partial g(x_k)}{\partial x} \right\| \leq \varepsilon$, 则 $x^* = x_k$, 迭代终止; 否则转(3);

(3) 求解下述子问题:

$$\min q(d_k) = \frac{1}{2} d_k^T \frac{\partial^2 g(x^k)}{\partial x^2} d_k + \frac{\partial g(x^k)}{\partial x} d_k$$

约束条件: $\|d_k\| \leq r_k$ 。假定其最优解为 d^* ,

令 $\rho = \frac{g(x_k) - g(x_k + d^*)}{g(x_k) - q(d^*)}$, 若 $\rho \leq \mu$, 则 $x_{k+1} = x_k + d^*$,

反之 $x_{k+1} = x_k + d^*$;

(4) 确定 r_{k+1} :

$$r_{k+1} = \begin{cases} 0.5r_k, & \rho \leq \mu \\ r_k, & \mu < \rho < \eta \\ 2r_k, & \rho \geq \eta \end{cases}$$

(5) 令 $k = k + 1$, 返回(2)。

4 仿真与结果分析

为了验证本文提出方法的有效性,首先进行了仿真。仿真中设定的地磁场真实值为 50000nT, 固定磁场和感应磁场参数分别为

$$H_p = [4000 \ 2500 \ 1800]'$$

$$D = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.02 & 0.03 \\ 0.02 & 0.1 & 0.005 \\ 0.03 & 0.005 & 0.2 \end{bmatrix}$$

磁力仪的量测噪声假定为均值为 0、方差为 2nT 的高斯白噪声。各参数的初始值均为 0。令载体绕三个坐标轴均转动一圈, 矢量磁力仪测量值如图 1 所示, 测得的磁场总场值以及真实值如图 2 所示。从图 2 可以看出, 补偿前载体干扰磁场非常大, 最大强度值(总场测量值与真实值之差)达到约为 29000nT。

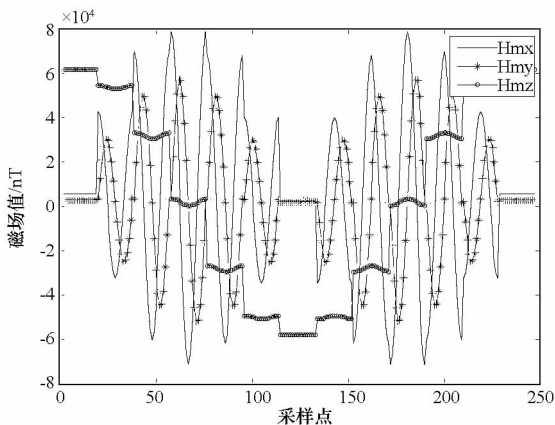


图1 仿真产生的磁力仪测量值三分量

Fig. 1 Simulation data of vector magnetometer measurements

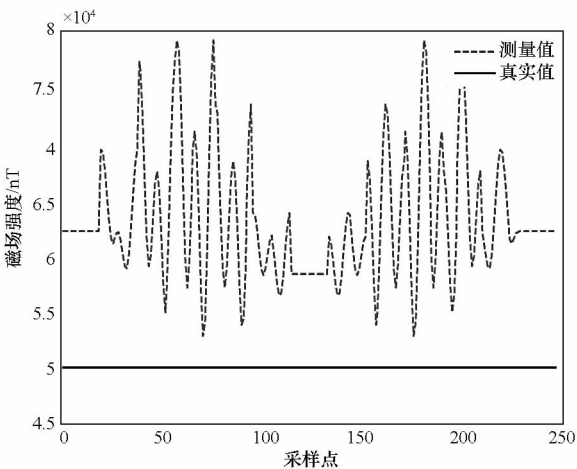


图2 仿真中磁力仪测得的磁场总场值及真实值

Fig. 2 Magnitude of the geomagnetic field and its truth in the simulation

利用本文提出的方法所得到的参数估计的结果如表 1 所示。为了说明非线性补偿方法的效果, 表中还给出了利用 UKF 法所得到的参数估计结果。

表 1 参数估计结果

Tab. 1 Results of the parameters estimated by the presented method and UKF

方法 \ 参数	UKF	信赖域法
H_{px}	4011.4	4000.1
H_{py}	2520.7	2500.1
H_{pz}	1823.0	1799.9
d_{11}	0.5001	0.4999
d_{22}	0.1001	0.09998
d_{33}	0.2008	0.1999
d_{12}	0.0201	0.02000
d_{13}	0.0302	0.02999
d_{23}	0.0054	0.0050

根据表 1 对比两种方法所得到的载体磁场参数估计值可以看到,利用信赖域法可以得到非常准确的参数估计值,最大误差在 0.1% 以内;而使用 UKF 所得到的参数的误差较大,最大误差达到 1.3%。

利用表 1 中的载体干扰磁场参数,根据(5)式对测量值进行补偿,补偿后地磁总场的剩余误差如图 3 所示。

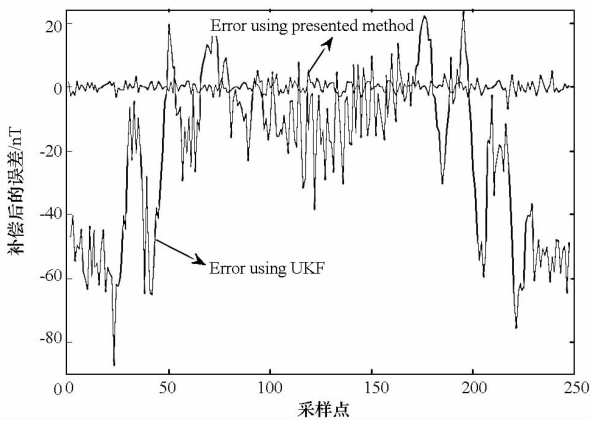


图 3 地磁场总场补偿误差

Fig. 3 Compensation error of the geomagnetic magnitude

从图 3 可以看出,利用本文提出的非线性补偿方法处理后,载体干扰磁场的剩余误差基本上在 10nT 以内,与补偿前相比,约减小到载体干扰磁场的 0.04%。经计算可知补偿误差的均值为 -0.003nT,标准差为 3.79nT。而利用 UKF 法进行补偿以后载体干扰磁场的剩余误差约为 80nT,误差的均值为 -20.3nT,标准差为 24.6nT。因此本文提出的非线性补偿法参数估计精度更高,可以更有效地对载体的干扰磁场进行补偿。

5 实验与结果

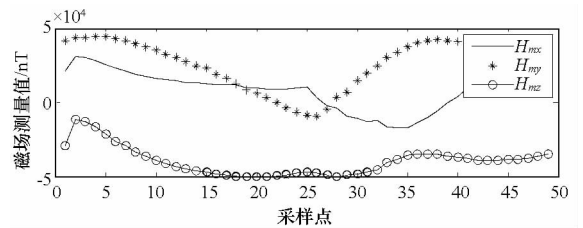
载体磁场补偿方法在实际中应用的效果需要

通过实验来验证。由于在实际载体上进行实验受到时间、实验场地、实验条件等的限制,因此我们利用三轴无磁转台设计了一次半实物模拟实验。所用实验装置如图 4 所示,将铁磁性物质以及三轴传感器固定在铝板上,并将铝板固定在无磁转台上。整个实验选在一块磁场均匀、周围无磁性物质干扰的区域内进行。在实验中,通过转动转台获得磁力仪在不同姿态下的测量值。三轴磁力仪的采样率为 20Hz,实验场地的地磁场真实值约为 48186nT。实验时转动无磁转台,使磁力仪处于不同的姿态下,并记录在不同姿态时磁力仪输出的磁场值。在每一个位置上取磁力仪测量值的平均值为该位置的磁场测量值。实验中磁力仪测量值的三分量以及总场值分别如图 5(a)和(b)所示。分别利用本文提出的方法以及基于 UKF 的方法对测量数据进行补偿,经过补偿后的总场测量误差如图 6 所示。

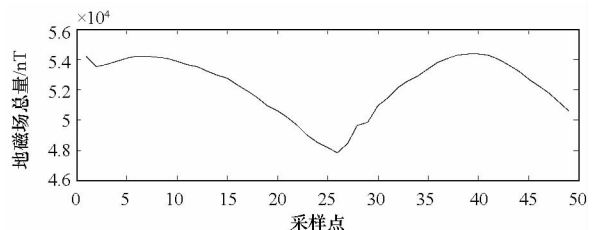


图 4 实验装置

Fig. 4 Experimental equipments



(a)地磁场三分量测量值



(b)地磁场总场测量值

图 5 实验中所得到的磁场测量值

Fig. 5 Measurements in the experiment

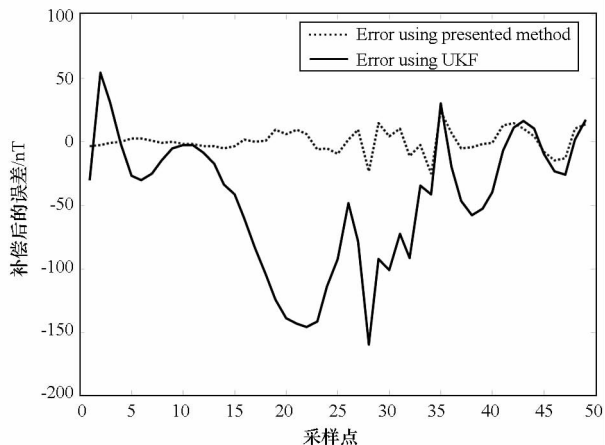


图6 补偿后的总场误差

Fig. 6 Compensation error in the experiment

从图5(b)可以看出,补偿前载体干扰磁场总场的最大值约为7000nT;而图6则表明经过所提出的方法补偿以后,载体干扰磁场大大减小,补偿后剩余误差约为20nT,误差的均值为-0.004nT,方差为9.3nT。而利用UKF方法进行补偿后的误差明显增大,达到了150nT,误差的均值为45.7nT,方差为52.4nT,而且非线性补偿后误差的波动明显小于UKF。

6 结论

针对安装于载体内的磁力仪易受到载体磁场干扰的问题,本文提出一种非线性补偿方法。该方法通过采集矢量磁力仪在不同姿态下的测量值和地磁场真实总场值,使用信赖域法对载体磁场参数进行估计,进而对测量值进行补偿。仿真和实验的结果表明,该方法具有参数估计精度高、方法简单、补偿效果好的特点,能够用来对载体的固定磁场和感应磁场进行补偿。

参考文献(References)

[1] 周军,葛致磊,等. 地磁导航发展与关键技术[J]. 宇航学报,2008,29(5):1467-1472.
ZHOU Jun, GE Zhilei, et al. Key technique and development for geomagnetic navigation[J]. Journal of Astronautics, 2008, 29(5):1467-1472. (in Chinese)

[2] Goldenberg F. Geomagnetic navigation beyond the magnetic compass[C]//Proceedings of the International Symposium on Position, Location and Navigation, 2006:684-694.

[3] Zhang X M, Zhao Y. Analysis of key technologies in geomagnetic navigation[C]//Proceeding of SPIE, 2009, Vol. 7128, 71282J-4.

[4] Gebre-Egziabher D, Elkaim G H, Powell J D, et al.

Calibration of strapdown magnetometers in the magnetic field domain[J]. Journal of Aerospace Engineer, 2006(19):87-102.

[5] Bickel S H. Small signal compensation of magnetic fields resulting from aircraft maneuvers[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronics Systems, Vol. Aes-15, No. 4, July 1979.

[6] 庞学亮,林春生,张宁. 飞机磁场模型系数的截断奇异值解法估计[J]. 探测与控制学报,2009,31(5):48-51.
PANG Xueliang, LIN Chunsheng, ZHANG Ning. Parameter estimation of airplane magnetic model based on TSVD[J]. Journal of Detection & Control, 2009, 31(5):48-51. (in Chinese)

[7] 吴永亮,王田苗,梁建宏. 微小型无人机三轴磁强计现场误差校正方法[J]. 航空学报,2011,32(2):330-336.
WU Yongliang, WANG Tianmiao, LIANG Jianhong. In-suit error calibration of three-axis magnetometer for unmanned aerial vehicle[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2011,32(2):330-336. (in Chinese)

[8] Gebre-Egziabher D, Elkaim G H, Powell J D, et al. A non-linear two-step estimation algorithm for calibration solid-state strapdown magnetometer[C]//Proceedings of 8th International St. Petersburg Conference on Navigation Systems,2001.

[9] 张晓明,赵剡. 基于椭圆约束的新型载体磁场标定及补偿技术[J]. 仪器仪表学报,2009,30(11):2438-2443.
ZHANG Xiaoming, ZHAO Yan. New auto-calibration and compensation method for vehicle magnetic field based on ellipse restriction[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2009, 30(11):2438-2443. (in Chinese)

[10] Qingde L, John G G. Least squares ellipsoid specific fitting [C]//Proceedings of geometric modeling and processing, 2004:335-340.

[11] Li J, Pan M C, Luo F L, et al. Vehicle magnetic field compensation method using UKF[C]//Proceedings of 10th International Conference on Electronic Measurement & Instruments, 2011, Vol. IV:25-28.

[12] Crassidis J L, Lai K, Harman R R. Real-time attitude-independent three-axis magnetometer calibration[J]. Journal of Guidance, Control and Dynamics, 2005, 28(1):115-120.

[13] 王新洲. 非线性模型参数估计理论与应用[M]. 武汉:武汉大学出版社,2002.
WANG Xinzhou. Theory and application of nonlinear model parameter estimation[M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2001. (in Chinese)

[14] Yuan Y X. A review of trust region algorithms for optimization [C]//Proceedings of the Fourth International Congress on Industrial & Applied Mathematics, 2000.

[15] 庞善民,陈兰平. 一类新的非单调信赖域算法[J]. 数学的实践与认识,2011,41(10):211-218.
PANG Shanmin, CHEN Lanping. A new family of nonmonotone trust region algorithm [J]. Mathematics in Practice and Theory, 2011, 41(10):211-218. (in Chinese)

[16] Coleman T F, Li Y. An interior, trust region approach for nonlinear minimization subject to bounds[J]. SIAM Journal on Optimization, 1996, 6:418-445.