

基于极限状态法的钢桁梁公铁斜拉桥结构分析*

王 颀¹, 瞿伟廉²

(1. 武汉理工大学土木工程与建筑学院, 湖北 武汉 430070;
2. 武汉理工大学道路桥梁与结构省重点实验室, 湖北 武汉 430070)

摘 要: 以某钢桁梁公铁斜拉桥为研究对象, 采用空间有限元方法, 计入几何非线性影响, 进行基于极限状态法的斜拉索初应力计算及桥梁结构特性的数值分析。提出基于极限状态法的计入主梁恒载增大系数的斜拉索初应力计算方法, 计算了两组斜拉索初应力: 不考虑恒载增大系数和考虑恒载增大系数。进行该斜拉桥自振特性分析, 以及两种极限状态下的静力特性分析: 承载能力极限状态和正常使用极限状态。讨论以极限状态法为基础的分析方法的有效性。研究结果表明: 斜拉索初应力大小对钢桁梁斜拉桥主塔和主梁构件静力响应的影响显著; 以极限状态法为基础的考虑提高系数计算出的斜拉索初应力能使斜拉桥在外荷载作用下具有更加良好的结构性能; 按照承载能力极限状态法来进行大跨度钢桁梁公铁斜拉桥的设计和分析更经济合理。

关键词: 桥梁工程; 钢桁梁公铁斜拉桥; 极限状态; 斜拉索初应力; 动力特性

中图分类号: U448.27 **文献标识码:** A **文章编号:** 0529-6579(2009)03-0016-06

Analysis of Property of Ultimate States of Steel Truss Road and Rail Cable-Stayed Bridges

WANG Wei¹, QU Weilian²

(1. School of Civil Engineering & Architecture, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;
2. Hubei Key Laboratory of Roadway Bridge & Structure Engineering,
Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: Take a long span truss rail and road cable-stayed bridge as the example, using nonlinear finite element method, properties of the truss rail and road cable stayed bridge under load ultimate limit state and serviceability limit state are studied. Two different methods to calculate the initial stress of the cable were adopted: one is concerned with safety factor and partial load factors and the other is unconcerned with these factors. Dynamic characteristics of the truss rail and road cable-stayed bridge were studied and static responses of the bridge under basic loads combination and long-term effect loads combination were calculated respectively. Based on comparative study, the initial cable stress had great effect on vertical members and cables. In addition, the influence of the initial cable stress on dynamic properties of cable-stayed bridges was little and can be neglected. The result showed that truss rail and road cable-stayed bridges having the initial cable stress which was calculated by considering the safety and partial loads factors had more reasonable statuses and better mechanical behaviours.

Key words: bridge engineering; truss road and rail cable-stayed bridge; ultimate states; initial cable stress; dynamic property

* 收稿日期: 2008-07-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50708086)

作者简介: 王颀(1977年生), 女, 讲师; E-mail: wangweiye_china@yahoo.com.cn

大跨度钢桁梁公铁斜拉桥结构特殊, 样本少, 研究有限, 因此, 有必要开展相关研究, 推动和促进该桥型的建设和发展。

目前铁路斜拉桥的设计参考的是公路斜拉桥的设计规范, 但即便是大跨度公路斜拉桥, 国内外研究人员在设计计算中采用的荷载组合也不尽相同, 对各种荷载和荷载系数尚未取用统一规定; 此外, 在计算合理成桥索力的时候, 都是基于容许应力法进行的^[1-2]。本文尝试参照新规范^[3]中的基于极限状态法的荷载组合来进行钢桁梁公铁斜拉桥的受力分析; 并且, 在进行斜拉索初应力的计算时, 尝试与极限状态法统一, 引入荷载系数, 并与常规方法做比较, 对比分析本文方法的适用性和优越性。

本文以武汉天兴洲钢桁梁公铁斜拉桥为研究对象, 建立结构空间模型, 计入几何非线性影响, 进行数值分析。计算了考虑自重增大系数和不考虑自重增大系数两组斜拉索初应力, 以这两组斜拉索初应力为基础, 分别进行该斜拉桥的动力分析以及承载能力极限状态和正常使用极限状态下的静力分析。

1 分析方法

1.1 极限状态下的荷载组合

极限状态法与以往的结构设计方法相比, 不仅考虑了结构重要性系数, 并根据结构计算状态确定作用效应分项系数和频遇值、准永久值系数, 使结构的设计更符合实际、更经济。

本文参照相关规范^[3-5]的规定, 根据桥梁结构实际受力情况, 确定了两组具有代表性的荷载组合:

组合 1: 承载能力极限状态

$$S_1 = \gamma_1 S_{G1k} + \gamma_0 \left(\sum_{i=2}^m \gamma_{Gi} S_{Gik} + \gamma_{Q1} S_{Q1k} + \psi_c \sum_{j=2}^n \gamma_{Qj} S_{Qjk} \right) \quad (1)$$

组合 2: 正常使用极限状态

$$S_2 = \gamma_2 S_{G1k} + \sum_{i=2}^m S_{Gik} + \sum_{j=1}^n \psi_{2j} S_{Qjk} \quad (2)$$

式 (1) 中的 γ_1 为承载能力极限状态基本组合下结构自重作用效应提高系数, $\gamma_1 = \gamma_0 \gamma_{G1}$, 其中 γ_{G1} 为结构自重作用效应的分项系数, γ_0 为结构安全系数; 式 (2) 中的 γ_2 为正常使用极限状态长期效应组合下结构自重作用效应提高系数; 其它参数的定义和取值参见规范^[3]。

1.2 斜拉索初应力计算

通过调整斜拉索初应力能实现合理成桥状态。对大跨度密索体系斜拉桥, 索力调整过程颇为复杂, 耗时较长。本文采用自编程序, 通过循环迭代, 由程序自动完成搜索合理斜拉索初应力的过程。提高索力调整的准确性和速度。

本文引入主梁自重作用效应提高系数的概念, 先计算出一组用于循环迭代的斜拉索应力 (图 1), 然后以此为循环迭代的斜拉索初始应力, 在确定的目标函数下进行索力迭代调整, 直至求得合理的斜拉索初应力。在考虑非线性效应的时候, 采用适合于大跨度斜拉桥的可以即时调整的修正欧拉公式:

$$E_{i+1} = E_i / (1 + (mL)^2 (1/\sigma_i^3 + 1/\sigma_{i+1}^3) E_i / 24), \quad (i = 1, 2, \dots)$$

其中, E_i 和 E_{i+1} 分别为第 i 步迭代过程中所使用的索的弹性模量和迭代完成后得到的经过修正的弹性模量, 并且 $E_1 = E_e$; σ_i 和 σ_{i+1} 分别为为第 i 步迭代中所使用的拉索应力和迭代完成后得到的拉索应力; m 和 L 分别为拉索的密度和拉索水平投影长度。

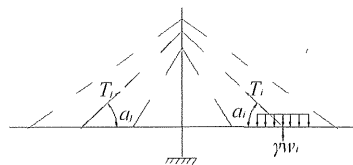


图 1 斜拉索应力初拟计算图示

Fig. 1 Preliminary calculation model of cable stresses

用于循环计算的拉索应力初拟计算过程如下:

(1) 忽略主梁抗弯刚度的影响, 第 i 号斜拉索索力采用 $\sigma_i = (\gamma \cdot W_i) / (A_i \cdot \sin \alpha_i)$ 计算。其中, σ_i 、 A_i 和 α_i 分别为第 i 号斜拉索在外力作用下所具有的应力、斜拉索截面积以及斜拉索与主梁之间的水平夹角; W_i 为第 i 号斜拉索所对应的主梁自重; γ 为主梁自重作用效应提高系数, 以极限状态法为基础, 承载能力极限状态下 $\gamma = \gamma_1$, 正常使用极限状态下 $\gamma = \gamma_2$, 其中 γ_1 和 γ_2 由极限状态法来确定。

(2) 忽略塔的抗弯刚度, 根据主塔两侧同一锚固点的斜拉索的水平分力相等, 得到第 j 号斜拉索应力 $\sigma_j = (\sigma_i \cdot A_i \cdot \cos \alpha_i) / (A_j \cdot \cos \alpha_j)$ 。其中, σ_j 、 A_j 和 α_j 分别为第 j 号斜拉索在外力作用下所具有的应力、斜拉索截面积以及斜拉索与主梁之间的水平夹角。

斜拉索初应力计算程序流程如图 2。

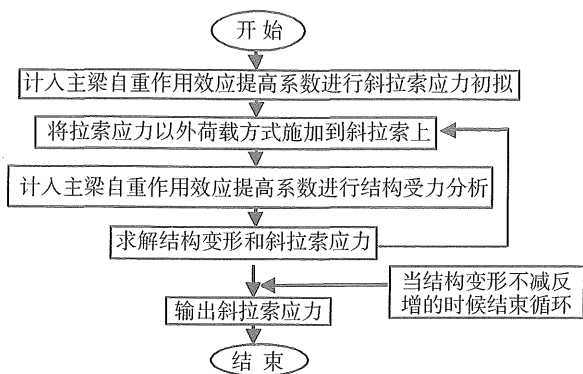


图 2 斜拉索初应力计算流程

Fig. 2 Flow chart for calculation of initial cable stress

2 分析模型

天兴洲钢桁梁公铁斜拉桥为双塔三索面斜拉桥 (见图 3)。左右边跨各设置一个辅助墩。斜拉索为扇形三索面布置, 全桥共 192 根斜拉索。主梁采用钢桁架, 由三片 N 字形主桁组成。公路桥面处设置有公路纵梁和横梁, 铁路部分设置铁路横梁、纵梁和平联。

在确定模型钢桁斜拉桥斜拉索初应力的时候, 本文采用两个主梁自重提高系数计算了两组斜拉索初应力。

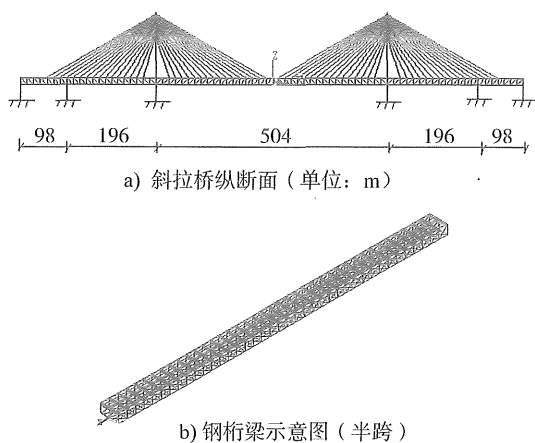


图 3 钢桁梁公铁斜拉桥分析模型

Fig. 3 Analysis model of the truss cable-stayed bridge

系数 1: $\gamma = \gamma_1 = \gamma_0 \gamma_{G1} = 1.1 \times 1.2 = 1.32$

系数 2: $\gamma = \gamma_2 = 1$

采用系数 1 的分析方法, 对应结构承载能力极限状态下的荷载组合方式; 采用系数 2 的分析方法, 对应结构正常使用极限状态下的荷载组合方式。表 1 列出了模型钢桁斜拉桥采用的两组斜拉索 (半跨中索面的 32 根拉索) 的初应力值。可以看

出, 采用不同的提高系数计算出的结果有较大差距。用系数 1 计算出的斜拉索初应力较系数 2 计算出的斜拉索应力平均增加 0.42 倍。

表 1 钢桁斜拉桥拉索初始应力
(半跨中索面)¹⁾

Table 1 Calculation and comparison of initial cable stresses (the middle cable plane for half span) MPa

拉索编号	1#	2#	拉索编号	1#	2#
1	743.2	514.6	17	246.3	183.1
2	722.1	504.3	18	460.8	350.6
3	682.4	477.7	19	565.2	422.3
4	655.7	459.2	20	613.1	449.0
5	666.2	469.5	21	632.8	455.1
6	675.1	475.6	22	648.6	453.1
7	672.9	469.5	23	660.3	451.0
8	659.0	453.1	24	674.6	455.1
9	647.5	440.8	25	688.5	463.3
10	638.5	430.5	26	701.0	473.6
11	630.5	426.4	27	707.4	481.8
12	615.3	416.2	28	703.9	485.9
13	586.8	405.9	29	687.0	483.8
14	521.9	364.9	30	655.0	473.6
15	395.9	274.7	31	609.2	453.1
16	163.5	110.9	32	550.1	424.4

1): 斜拉索编号从边跨往跨中依次增大; 1#表示采用系数 1 计算出的拉索应力; 2#表示采用系数 2 计算出的拉索应力。

3 钢桁公铁斜拉桥自振特性分析

本文基于钢桁斜拉桥自振特征, 分析钢桁斜拉桥的结构特点, 并探讨不同的拉索初应力对斜拉桥自振特性的影响。本节采用了两个钢桁斜拉桥模型, 一个斜拉桥模型的拉索初应力采用由系数 1 计算得到的拉索应力, 另一个斜拉桥模型的拉索初应力采用由系数 2 计算得到的拉索应力。

由于大跨度斜拉桥的模态比一般结构要密集, 在一个较窄的频率范围内, 多个振型都有可能被激励振动, 所以对大跨度斜拉桥的振型分析一般不小于 10 阶。表 2 列出了两个钢桁斜拉桥模型前十阶的自振频率, 图 4 列出了模型 1 前十阶的振型。经分析表明, 模型 1 和模型 2 的各阶振型几乎没有区别。经过分析得到钢桁斜拉桥的一些结构特点:

(1) 该斜拉桥表现出大跨度柔性漂浮体系的特点。其动力特性具有面内、面外和扭转耦合的特性, 例如该斜拉桥第六阶至第八阶的振型均为弯

表2 钢桁梁斜拉桥前十阶自振频率¹⁾

Table 2 Dynamic property of the truss cable-stayed bridge

阶数	模型1	模型2	阶数	模型1	模型2
1	0.086 8	0.086 7	6	0.676 0	0.674 6
2	0.218 2	0.218 2	7	0.687 7	0.687 6
3	0.353 9	0.346 0	8	0.717 4	0.716 4
4	0.555 5	0.548 4	9	0.723 0	0.721 6
5	0.562 1	0.561 8	10	0.727 7	0.722 5

1): 单位: Hz, 模型1采用由系数1计算得的拉索初应力; 模型2采用由系数2计算得的拉索初应力。

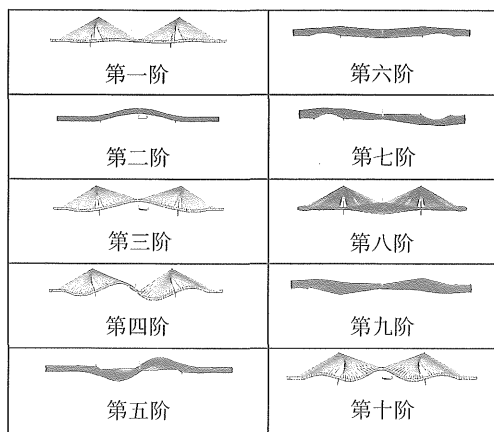


图4 斜拉桥振型示意图

Fig. 4 Vibration shapes of the truss cable-stayed bridge

扭耦合振型。此外, 结构第一阶为纵向飘移, 基频为 0.087 Hz, 远小于表征结构横向刚度的第二阶频率 0.218 Hz。

(2) 该斜拉桥表现出较好公铁两用桥的特点, 满足铁路列车运行对刚度的要求。例如结构竖向基频为 0.35 Hz, 横向基频为 0.22 Hz, 公路桥面板参与了钢桁梁上弦杆和公路纵梁的共同受力, 增大了主梁竖向截面的惯性矩和刚度; 此外结构扭频出现较晚, 为 0.67 Hz, 公路桥面板加强了上主桁的横向联系, 同时由于采用了三索面斜拉索, 提高了结构的扭转刚度。

通过比较两个模型的计算结果可以发现, 尽管斜拉索初应力相差较大, 但两组计算结果的平均差值仅 0.2%, 可以认为不同的主梁自重提高系数对斜拉桥基于自振频率的动力特性没有影响。

4 钢桁公铁斜拉桥静力特性分析

4.1 计算工况

本文按照规范^[3-7]施加 4 线中 - 活载和 6 车道公路 - I 级。经分析比较, 选取的车辆布置方式为主跨满布且同向并头行驶, 采用的组合方式如下:

荷载组合 1: 1.32 恒载 + 1.232 × 列车竖向静活载动力系数 × 四线中 - 活载 + 0.635 25 × 汽车竖向静活载动力系数 × 六线公路 - I 级

荷载组合 2: 恒载 + 0.32 × 四线中 - 活载 + 0.165 × 六线公路 - I 级

组合 1 为结构承载能力极限状态下的荷载组合方式; 组合 2 为结构正常使用极限状态下的荷载组合方式。本文对第 3 小节中的两个斜拉桥模型分别施加以上两组荷载。

本文选用的工况具体为:

工况 1: 模型 1 + 荷载组合 1;

工况 2: 模型 2 + 荷载组合 2;

工况 3: 模型 1 + 荷载组合 2;

工况 4: 模型 2 + 荷载组合 1。

其中工况 1 实际为按承载能力极限状态方法进行的计算, 工况 2 则为按正常使用极限状态方法进行的计算; 后两组计算工况为的是研究斜拉索初应力对斜拉桥结构在极限状态下应力分布的影响。

4.2 计算结果及分析

4.2.1 主梁计算结果及分析 表 3 列出了不同工况下主梁主要构件: 主桁竖杆和斜杆、铁路纵梁和平联以及公路纵梁的最大拉压应力及平均应力水平。分析表 3 的计算结果发现, 工况 1 和工况 4 下构件的应力水平偏高, 表明按荷载组合 1 计算得到的结构偏不安全, 也即按承载能力极限状态进行荷载组合有利于设计出更安全的结构。此外, 钢桁架竖杆为钢桁斜拉桥的重要构件, 其在各工况下, 无论是拉应力还是压应力的平均应力水平都最高, 工况 4 下其拉应力水平高达 66% (钢桁杆的屈服拉应力为 340 MPa)。

图 5 为承载能力极限状态下主梁主要构件应力大小沿主梁纵向的分布示意图。综合分析主梁主要构件的应力对比结果, 可以发现, 就主梁构件而言, 斜拉索初应力大小的影响趋势并不一致, 从平均水平来看, 影响因子为 0.25。以平均应力水平最大的主梁竖杆为分析对象, 见图 5 (a) 计算结果, 可以发现, 工况 4 下的构件应力略高于工况 1 下构件的应力。

4.2.2 主塔计算结果及分析 表 4 列出了主塔在不同工况下的最大弯矩值。分析表 4 中主塔的计算结果, 可以得到与上一小结类似的结论, 四个工况中, 工况 1 和工况 4 下主塔的最大弯矩较大。此外, 工况 4 下的计算结果大于工况 1 计算结果 1.29 倍, 表明斜拉索初应力的大小对主塔受力的影响较为明显。

表 3 不同工况主梁主要构件最大应力及应力水平¹⁾

Table 3 The maximum stress of members of main girder in different working conditions MPa

构件	最大拉/压应力 (绝对值)				平均应力水平/%
	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4	
钢桁架竖杆	213/165	168/132	156/122	226/175	56/44
钢桁架斜杆	116/96	97/76	65/70	160/103	32/25
铁路纵梁	88/13	71/12	78/8	111/17	26/4
公路纵梁	123/11	73/(无)	106/21	86/9	29/3
上弦杆	114/(无)	77/2	106/23	81/1	28/2
铁路平联	51/43	43/35	41/31	72/48	15/12

1) 构件拉压屈服强度取为 340 MPa

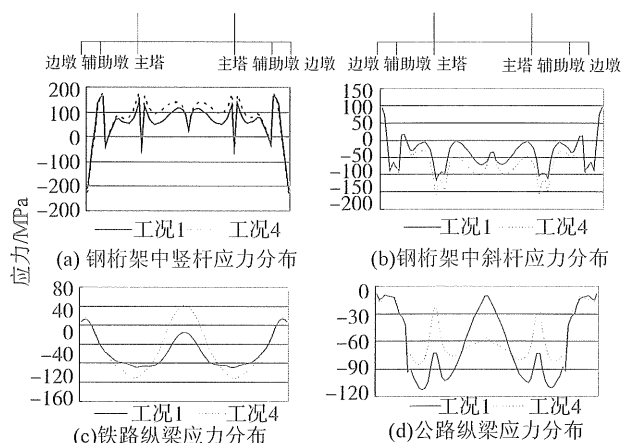


图 5 承载能力极限状态下主梁主要构件应力分布图

Fig. 5 Schematic diagram of differentiation of stress distribution of main girder under load ultimate limit state

表 4 不同工况下主塔最大弯矩

Table 4 Maximum bending moment of the tower in different working conditions kN · m

	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4
最大弯矩	303 020	267 230	56 718	662 910

4.2.3 斜拉索计算结果及分析 图 6 为斜拉索在不同工况下的应力分布, 图中仅列出了半跨斜拉桥中索面 32 根斜拉索的应力分布, 其中索的编号与表 1 相同。分析图 6, 可以得到与以上两个小结类似的结论, 四个工况中, 工况 1 和工况 4 下斜拉索的应力较大。工况 4 下的计算结果略高于工况 1 的计算结果。

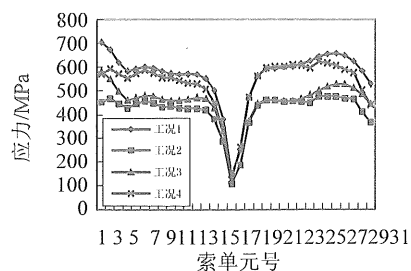


图 6 斜拉索在不同工况下应力分布图

Fig. 6 Schematic diagram of differentiation of stress distribution of Cables in different Working Conditions

5 结 论

将本文的计算分析结果总结如下:

(1) 通过自振特性分析, 该桥的动力特性符合大跨度钢桁梁斜拉桥的受力特点, 具有明显的面内、外及扭转耦合, 同时结构具有良好的竖向、横向和扭转刚度。证明了本文所建立的斜拉桥分析模型是正确的。

(2) 斜拉索初应力大小对钢桁梁斜拉桥静力特性的影响显著。对主塔的静力响应影响最为明显, 对主梁的静力响应也有较大影响, 并且外荷载越大影响越大。所以采用恰当的方法计算斜拉索初应力对优化结构设计非常重要, 而本文提出以极限状态法为基础的考虑主梁自重提高系数的斜拉索初应力计算方法比以往的未考虑提高系数的方法更为合理, 能使斜拉桥在外荷载作用下具有更加良好的结构静力性能。

(3) 承载能力极限状态分析方法更符合结构实际受力情况, 用此方法来进行大跨度钢桁梁公铁斜拉桥的分析研究会更加合理、经济。

参考文献:

- [1] 张建民, 肖汝诚. 千米级斜拉桥空间非线性两阶段索力优化[J]. 中国公路学报, 2006, 19(3): 34 - 40.
ZHANG Jianmin, XIAO Rucheng. Spatial nonlinear cable force optimum in two stages for thousand-meter scale cable-stayed bridge [J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19(3): 34 - 40.
- [2] 肖汝诚, 项海帆. 斜拉桥索力优化及其工程应用[J]. 计算力学学报, 1998, 15(1): 118 - 126.
XIAO Rucheng, XIANG Haifan. Optimization method of cable prestresses of cable-stayed bridges and it engineering applications [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 1998, 15(1): 118 - 126.
- [3] 中交公路规划设计院. JTG D60 - 2004 公路桥涵设计

- 通用规范[S]. 北京:人民交通出版社, 2004.
- JTG D60 - 2004. General Code for Design of Highway Bridges and Culverts[S]. 2004.
- [4] 中华人民共和国建设部. GB50216 - 94. 铁路工程结构可靠度设计统一标准[S]. 北京:中国计划出版社, 1994.
- GB 50216 - 1994 Unified design standard for reliability of railway engineering structures[S]. 1994.
- [5] 交通部公路规划设计院. GB/T 50283 - 1999 公路工程结构可靠度设计统一标准[S]. 北京:中国计划出版社, 1999.
- GB/T 50283 - 1999 Unified standard for reliability design of highway engineering structures[S]. 1999.
- [6] 铁道部. TB10002. 2—2005 铁路桥梁钢结构设计规范[S]. 北京:中国铁道出版社, 2005.
- TB10002. 2—2005. Code for the Designs of the Steel Structures in the Railway Bridges[S]. 2005.
- [7] 铁道部. TB10002. 1 - 2005 铁路桥涵设计基本规范[S]. 北京:中国铁道出版社, 2005.
- TB10002. 1 - 2005. Basic code for the designs of the railway bridges and culverts[S]. 2005.

~~~~~  
(上接第12页)

- [4] GOSHTASBY A. 2 - D and 3 - D Image Registration: For Medical, Remote Sensing, and Industrial Applications [M]. New York: Wiley-Interscience ch. 5, Transformation Functions, 2005.
- [5] RUECKERT D, SONODA L I, HAYES C, et al. Nonrigid registration using free-form deformations: application to breast MR images [J]. IEEE Trans, on Medical Imaging, 1999, 18(8): 712 - 721.
- [6] KYBIC J. Fast parametric elastic image registration [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2003, 12(11): 1427 - 1442.
- [7] 彭晓明, 陈武凡, 马茜. 基于 B 样条的快速弹性图像配准方法 [J]. 计算机工程与应用, 2006, 11: 186 - 189.
- PENG Xiaoming, CHEN Wufan, MA Qian. Fast elastic image registration method based on B-splines [J]. Computer Engineering and Applications, 2006, 11: 186 - 189.
- [8] SHI Z J. Convergence of line search methods for unconstrained optimization[J]. Appl Math Comput, 2004, 157: 393 - 405.
- [9] HAGER W W, ZHANG H C. A nonmonotone line search technique and its application to unconstrained optimization [J]. SIAM J Optim, 2004, 14: 1043 - 1056.
- [10] SHI Z J, SHEN J. Convergence of nonmonotone line search method [J]. J Comput and Appl Math, 2006, 193: 397 - 412.
- [11] GRIPPO L, LAMPARIELLO F, LICIDI S. A nonmonotone line search technique for Newton's method [J]. SIAM J Optim, 1986, 7: 26 - 33.