

用改进单纯形法优化钢的硬度与强度换算公式*

缪宗华 李正红

(福建农林大学交通工程系, 南平 353001)

摘 要 运用改进单纯形法, 通过调整有关参数, 对钢的硬度与强度换算公式进行优化设计, 得到换算精度更高的换算公式:
 $\sigma_b = 208.96 + 43.48\text{HRC} - 1.18\text{HRC}^2 + \text{HRC}^3 / 54.53$, 式中 HRC 为洛氏 C 级硬度值。

关键词 换算公式, 改进单纯形法, 优化设计

中图分类号 TG113.251

文献标识码 A

文章编号 0412-1961(2001)05-0543-04

OPTIMIZING OF THE CONVERSION FORMULA BETWEEN HARDNESS AND STRENGTH OF STEELS BY MODIFIED SIMPLEX METHOD

MIAO Zonghua, LI Zhenghong

Department of Traffic Engineering of Fujian Agriculture and Forestry University, Nanping 353001

Correspondent: MIAO Zonghua, professor, Tel: (0599)8502113, Fax: (0599)8508150,

E-mail: ffcy5@public.npptt.fj.cn

Manuscript received 2000-09-19, in revised form 2001-01-08

ABSTRACT Through optimizing the related parameters by modified simplex method, an optimizing conversion formula between hardness and strength for steels has been obtained, and the accurate conversion formula can be described as: $\sigma_b = 208.96 + 43.48\text{HRC} - 1.18\text{HRC}^2 + \text{HRC}^3 / 54.53$, in which HRC is hardness value of Rockwell in grade C.

KEY WORDS conversion formula, modified simplex method, optimal design

在金属学研究领域以及机械零件设计、制造中经常遇到硬度值与强度值的换算。由于它们之间并无理论上的严格关系, 只能根据大量试验获得的实验测定值进行对照。钢的硬度与强度换算已有一些经验公式, 但是精度不够。探求尽可能精确的硬度与强度值换算公式, 不仅在研究金属材料力学性能以及其他定量金属学问题上颇有价值, 而且在实际应用中也为人们提供了方便。

1 钢的硬度与强度值换算公式的误差和优化设计方法的提出

为了利于优化设计结果的实际应用, 也为了便于讨论, 现以我国国家标准 (GB1172-74) 给出的钢的硬度与强度实验对照值为对照标准, 以余柏海先生提出的一般钢种硬度 (HRC) 与强度极限 (σ_b) 换算公式为比较对象, 讨论钢的硬度与强度值换算公式的误差和优化设计方法。这一公式^[1-4]的表达式为

$$\sigma_b = a_0 + a_1\text{HRC} + a_2\text{HRC}^2 + a_3\text{HRC}^3 \quad (1)$$

式中, HRC 表示洛氏 C 级硬度值, σ_b 表示强度极限, 单位 MPa; 各次项系数: $a_0=200.00$, $a_1=41.20$, $a_2=-1.00$, $a_3=1/64$ 。该式虽然已是目前较为精确的换算公式, 但是其计算值同国家标准测定值还有一定误差 (见表 1 和表 2)^[5]: 按式 (1) 计算所得强度极限换算值 σ_{b1} , 与国家标准测定值 σ_b 比较, 最大相对误差达 4.30%, 平均相对误差达 1.09%。本文运用数理统计专家新近推出的、优化非线性方程能力很强的一种优化设计方法——改进单纯形法 (modified simplex method, 简称 MSM) 原理^[2], 对式 (1) 进行优化设计, 使其换算误差减少, 换算精度提高, 得到较为满意的结果。

2 改进单纯形法概述

改进单纯形法是一种参数优化搜索算法。它所借用的“单纯形”是一个几何图形, 由 m 维空间的 $m+1$ 个点 P_1, P_2, \dots, P_{m+1} 构成, 且各点之间线性无关。因此, 在二维空间, 单纯形是一个三角形, 在三维空间是一个四面体, 在高维空间则是一个多面体。这些几何图形的每个顶

* 收到初稿日期: 2000-09-19, 收到修改稿日期: 2001-01-08

作者简介: 缪宗华, 男, 1942 年生, 教授

表 1 钢的硬度与强度换算数据比较

Table 1 Comparison of data about the hardness and strength of steels in conversion for two methods

Hardness (HRC)	Strength, MPa			Relative error, %	
	σ_b	σ_{b1}	σ_{b2}	Δ_1	Δ_2
60	2557	2447	2534	4.30	0.91
59	2448	2359	2436	3.64	0.50
58	2345	2274	2342	3.02	0.13
57	2249	2193	2252	2.48	0.14
56	2158	2115	2166	1.98	0.38
55	2074	2041	2084	1.61	0.49
54	1995	1969	2006	1.29	0.55
53	1919	1901	1931	0.95	0.63
52	1849	1835	1860	0.73	0.58
51	1782	1773	1792	0.51	0.55
50	1719	1713	1727	0.34	0.48
49	1659	1656	1666	0.17	0.40
48	1603	1602	1607	0.08	0.26
47	1550	1550	1551	0.02	0.10
46	1499	1500	1499	0.07	0.01
45	1451	1453	1449	0.13	0.16
44	1406	1408	1401	0.13	0.34
43	1362	1365	1356	0.21	0.42
42	1321	1324	1314	0.23	0.56
41	1282	1285	1273	0.24	0.68
40	1243	1248	1235	0.40	0.64
39	1208	1213	1199	0.39	0.75
38	1174	1179	1165	0.42	0.79
37	1141	1147	1132	0.51	0.76
36	1109	1116	1101	0.64	0.67
35	1079	1087	1072	0.73	0.59
34	1049	1059	1045	0.94	0.39
33	1022	1032	1019	0.99	0.33
32	995	1006	994	1.15	0.13
31	970	982	970	1.20	0.01
30	945	958	947	1.36	0.23
29	922	935	925	1.39	0.37
28	899	913	904	1.51	0.60
27	878	891	884	1.47	0.71
26	857	870	865	1.50	0.89
25	837	849	845	1.45	1.01
24	819	829	827	1.20	0.95
23	800	809	808	1.10	1.04
22	784	789	790	0.61	0.77
21	767	769	772	0.25	0.63
20	752	749	754	0.40	0.21
19	737	729	735	1.09	0.25
18	723	709	716	1.97	0.90
17	710	688	697	3.01	1.77

Notes: HRC, σ_b are experimental value provided values by "GB1172-74"; σ_{b1} and σ_{b2} are calculated by Yu's formula (1) and the optimized conversion formula (2) respectively; $\Delta_1 = |\sigma_{b1} - \sigma_b| / \sigma_b$, $\Delta_2 = |\sigma_{b2} - \sigma_b| / \sigma_b$.

点相当于各个实验点, 其坐标值就是每个实验点相应的各个实验参数的值. 改进单纯形法的运算步骤可归纳为如下三步:

第一, 在 m 维空间选择初始点, 确定步长, 用 Long

系数表或其他方法构造初始单纯形.

第二, 求出单纯形各顶点的响应值, 加以比较, 确定最好点 P_b , 次好点 P_n , 最差点 P_w , 并去掉最差点 P_w , 求出 P_w 的反射点 P_r (对于一个任意维的单纯形, 假如其顶

表 2 参数比较和结果评估
Table 2 Comparison of parameters and evaluation for results

	Parameters for formula				Evaluation for parameters		
	a_0	a_1	a_2	a_3	$\bar{\Delta}$	Q	r
Before optimizing	200.00	41.20	-1.00	1/64	1.09%	35118	0.9985
After optimizing	208.96	43.48	-1.18	1/54.53	0.54%	2741	0.9999

Notes: a_0 、 a_1 、 a_2 、 a_3 are parameters in formula (1), $\bar{\Delta}$ is mean relative error, Q is sum of squares deviations, r is correlation coefficient

点用坐标矢量 $P_1, P_2, \dots, P_w, \dots, P_m, P_{m+1}$ 来表示, 放弃 P_w , 剩余点 $P_1, P_2, \dots, P_{w-1}, P_{w+1}, \dots, P_{m+1}$ 的形心 $P_c = (P_1 + P_2 + \dots + P_{w-1} + P_{w+1} + \dots + P_m + P_{m+1})/m$, 则 P_w 关于 P_c 的反射点 $P_r = (2P_c - P_w)$.

改进单纯形法在基本单纯形法的基础上增加了“扩张”和“压缩”两个功能, 以加速单纯形的推进运动. 设最好、次好、最差点的坐标矢量 P_b, P_n 和 P_w 的响应值分别为 f_b, f_n 和 f_w , 反射点 P_r 的响应值为 f_r . 那么

(1) 若 $f_r > f_b$, 说明反射方向正确, 求扩张点 $P_e. P_e = P_c + \gamma(P_c - P_w)$, 一般取 $\gamma=2$; 若 $f_e > f_b$, 则用 P_e 代替 P_r , 否则保留 P_r .

(2) 若 $f_n < f_r < f_b$, 应该不扩张也不收缩.

(3) 若 $f_r < f_w$, 求收缩点 $P_t. P_t = P_c - \beta(P_c - P_w)$, $0 < \beta < 1$ (一般取 $\beta=0.5$). 用 P_t 代替 P_r .

(4) 若 $f_w < f_r < f_n$, 求收缩点 $P_u. P_u = P_c + \beta(P_c - P_w)$, $0 < \beta < 1$ (一般取 $\beta=0.5$). 用 P_u 代替 P_r .

第三, 按 P_r 计算结果, 构造新的单纯形, 每得到新单纯形后, 作收敛性检验, 如果满足收敛性指标, 则单纯形停止推进, 此时单纯形中的最好点 P_b 即为所要寻求的最佳点.

3 运用改进单纯形法原理优化设计式 (1)

运用改进单纯形法原理优化设计式 (1), 就是通过动态估计公式中各次项系数 a_0, a_1, a_2 和 a_3 的值, 寻求优化的 σ_{b2} 数据, 使之与作为对照标准的对照值数据 σ_b 的剩余离差平方和 Q 值最小, 相关系数 r 值最大, 从而实现优化设计, 获得优化后精度更高的换算公式. 具体做法是

首先, 选用我国国家标准 (GB1172-74) 给出的一般钢种洛氏 C 级硬度与强度极限实验对照值 (即表 1 中的 HRC 和 σ_b 值), 作为实施改进单纯形法的对照标准 [3,5].

其次, 根据改进单纯形法原理和方法, 用 C 语言编制式 (1) 待优参数 a_0, a_1, a_2 和 a_3 最优拟合计算机程序 (程序略). 其中: a_0, a_1, a_2 和 a_3 初始值取式 (1) 原值; 计算机运行程序中各参数优选步长均为 0.001; 在 AST/586 微机上通过运行. 具体运行过程是: 根据已知数据确定初始单纯形, 对初始单纯形各有关点进行评估和

筛选, 使单纯形不断推进. 运行收敛后即得到优化后的各次项系数 (见表 2).

最后, 将优化得到的各次项系数代入式 (1), 获得优化设计新公式

$$\sigma_b = 208.96 + 43.48\text{HRC} - 1.18\text{HRC}^2 + \text{HRC}^3/54.53 \quad (2)$$

分析和评估优化设计结果得出

(1) 按优化前后所得换算公式 (1) 和 (2), 分别计算强度值数据 σ_{b1} 和 σ_{b2} , 以及它们与标准值 σ_b 的相对误差 Δ_1 和 Δ_2 , 并分别计算其平均相对误差 $\bar{\Delta}$. 优化后所得强度换算值 σ_{b2} 不仅最大相对误差减小至 1.77% (见表 1), 而且平均相对误差减小至 0.54% (见表 2), 均明显小于优化前.

(2) 根据优化前后所得的 σ_{b1} 和 σ_{b2} 数据, 分别计算它们对于标准值 σ_b 数据的剩余平方和 Q 以及相关系数 r (见表 2). Q 值由 35118 减小至 2741, 优化后远小于优化前; r 值由 0.9985 增加至 0.9999, 比优化前更趋近于 1, 说明优化效果显著.

4 结论

(1) 用改进单纯形法原理对一般钢种洛氏硬度与强度极限换算公式进行优化设计, 优化后换算公式计算的换算值更逼近作为对照标准的实验对照值, 进一步提高了已经比较精确的非线性换算公式的精度.

(2) 改进单纯形法搜索空间大、速度快、精度高、操作简单. 这一方法对于不能从理论上直接推导或只能借助近似计算公式表达的变量关系 (尤其是非线性变量关系), 可以依据实测数据进行最优化拟合, 获得更为精确的数学表达式. 这一方法同样适用于有实验换算数据的各种金属材料以及其它材料硬度与强度值的换算.

感谢吴承瑛副教授在数据处理过程中给予的大力支持.

参考文献

- [1] Editorial Board of Handbook of Mechanical Engineering. *Handbook of Mechanical Engineering(3)*. 2nd ed, Beijing: Machinery Industry Press, 1996: 4

- (机械工程手册编委会. 机械工程手册 (3). 第 2 版. 北京: 机械工业出版社, 1996: 4)
- [2] He Z M, Hong W. *Sci Sinica*, 1993; 29: 558
(何宗明, 洪伟. 林业科学, 1993; 29: 558)
- [3] Editorial Board of Handbook of Heat Treatment. *Handbook of Heat Treatment(4)*. Beijing: Machinery Industry Press, 1978: 141
(热处理手册编委会. 热处理手册 (4). 北京: 机械工业出版社, 1978: 141)
- [4] Yu B H. *Computer Design for Steels*. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1996: 10
(余柏海. 钢的计算机设计, 北京: 冶金工业出版社, 1996: 10)
- [5] Zhu X Q. *Handbook of Practical Metal Material*. Vol.1, Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1993: 45
(祝燮权. 实用金属材料手册. 第 1 卷, 上海: 上海科技出版社, 1993: 45)