

文章编号: 0258-7025(2007)06-0786-05

多阶级联拉曼光纤激光器的理论分析与优化设计

秦祖军¹, 周晓军¹, 李发丹¹, 伍浩成², 邹自立²

(¹ 电子科技大学光电信息学院, 四川 成都 610054; ² 桂林激光通信研究所, 广西 桂林 541004)

摘要 由稳态条件下描述光纤中受激拉曼散射(SRS)效应的光功率耦合方程出发,采用解析方法对多阶级联拉曼光纤激光器(CRFLs)进行了理论分析。根据拉曼光纤激光器级联阶数的奇偶性分别推导出了多阶级联拉曼光纤激光器的输出功率、光-光转换效率最大时的拉曼光纤长度和输出耦合器反射率。通过忽略反射回谐振腔输入端的剩余抽运光功率,计算了 5 阶级联拉曼光纤激光器的输出特性和光-光转换效率随光纤长度和输出耦合器反射率的变化。利用已有的 5 阶级联掺镱拉曼光纤激光器输出特性实验数据与理论分析结果进行了对比。

关键词 激光技术;受激拉曼散射;级联拉曼光纤激光器;优化设计

中图分类号 TN 248.1;O 437.3 **文献标识码** A

Theoretical Analysis and Optimized Design of Multi-Order Cascaded Raman Fiber Lasers

QIN Zu-jun¹, ZHOU Xiao-jun¹, LI Fa-dan¹, WU Hao-cheng², ZHOU Zi-li²

¹*Institute of Optoelectronic Information,
University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 610054, China*
²*Guilin Institute of Optical Communications, Guilin, Guangxi 541004, China*

Abstract Multi-order cascaded Raman fiber lasers (CRFLs) are analyzed by an analytical method from optical power coupling equation under steady states used to describe stimulated Raman scattering (SRS). According to the parity of cascaded number, the output power is deduced, and the optimal length of Raman fiber and reflectivity of output-coupler are also obtained when the maximum pump-to-Stokes conversion efficiency is reached. The output characteristics and conversion efficiency as a function of Raman fiber length and output-coupler reflectivity of a 5th-order Ge-doped CRFL have been calculated with the residual pump power reflected into the input-end of resonant cavity being ignored. The comparison of calculated results and the experimental data for the 5th-order CRFL has been made.

Key words laser technique; stimulated Raman scattering; cascaded Raman fiber lasers; optimized design

1 引言

拉曼光纤激光器是一种基于光纤中的受激拉曼散射(SRS)非线性效应的新型激光器件。采用全光纤结构设计的级联拉曼光纤激光器结构简洁、输出光束质量好,是一种极为有效的拉曼光纤放大器(RFA)和远程抽运掺铒光纤放大器(EDFA)的抽运

源^[1]。全光纤级联拉曼光纤激光器采用掺磷或掺镱光纤作为增益介质,多对光纤布拉格光栅(FBG)构成嵌套的级联谐振腔。在这样的多阶级联的拉曼光纤激光器中抽运光可获得多次拉曼频移并在斯托克斯频率上产生受激辐射。如波长为1064 nm的抽运光在掺镱光纤中经过 6 次拉曼频移可以得到

收稿日期:2006-09-26;收到修改稿日期:2006-12-07

作者简介:秦祖军(1978—),男,广西人,博士研究生,主要从事光纤激光器和放大器的研究。

E-mail:junqinz@uestc.edu.cn

导师简介:周晓军(1955—),女,浙江人,教授,博士生导师,研究方向为光纤传感、光纤技术与光纤通信等。

E-mail:xjzhou@uestc.edu.cn

1480 nm波长的激光输出。分析多阶级联拉曼光纤激光器需要求解多个耦合的非线性微分方程,一般采用龙格-库塔(Runge-Kutta)法、打靶法等数值法求解^[2~7]。对 n 阶级联拉曼光纤激光器,用打靶法需要设置 n 个初始值。由于级联谐振腔中的各阶斯托克斯光是相互耦合的,任意设置的初始值不一定满足方程组的收敛性,有时得不到方程的解。因此一些学者提出了有解析解的理论模型^[8~10],其中文献^[9,10]的理论模型用较少的近似条件分析了 n 阶级联拉曼光纤激光器,但是得到的计算结果与实验数据仍然有明显的差异,这是因为作者假设所有光纤中的斯托克斯光均具有相同的有效纤芯面积。根据稳态条件下描述光纤中受激拉曼散射效应的光功率耦合方程,本文提出了一种更为完善的多阶级联拉曼光纤激光器解析模型。利用该模型分析了 5 阶级联拉曼光纤激光器^[5],所得计算结果与实验数据的对比显示两者基本吻合。

2 级联拉曼光纤激光器模型

2.1 级联拉曼光纤激光器满足的耦合方程

级联拉曼光纤激光器如图 1 所示,多对光纤布拉格光栅构成级联的多阶斯托克斯光谱谐振腔,各对光纤布拉格光栅中心波长分别与相应的各阶斯托克斯光对应。除了作为输出耦合器的光纤布拉格光栅以外,其余内谐振腔光纤布拉格光栅均为高反射率光纤光栅。采用双通结构提高抽运光的吸收效率,即输出端加了一个中心波长与抽运光对应的光纤布拉格光栅,将输出端未完全吸收的抽运光反射回谐振腔内。拉曼光纤可用掺锗光纤或掺磷光纤,对应的拉曼频移分别为 440 cm^{-1} 和 1330 cm^{-1} 。

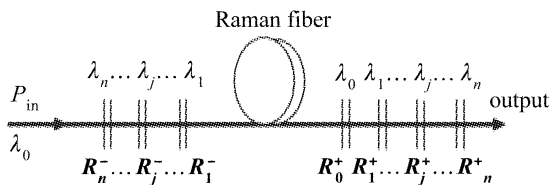


图 1 n 阶级联拉曼光纤激光器

Fig. 1 An n th-order cascaded Raman fiber laser

在强抽运情况下,拉曼光纤中的自发拉曼散射效应(ASE)通常非常弱,可以忽略其影响。达到稳态条件时, n 阶级联拉曼光纤激光器光纤中传输的抽运光和各阶斯托克斯光功率满足一阶微分方程组^[2,3]

$$\frac{1}{P_0^F} \frac{dP_0^F}{dz} = -\frac{1}{P_0^B} \frac{dP_0^B}{dz} = -\alpha_0 - g_1 \frac{\nu_0}{\nu_1} (P_1^F + P_1^B), \quad (1)$$

$$\frac{1}{P_j^F} \frac{dP_j^F}{dz} = -\frac{1}{P_j^B} \frac{dP_j^B}{dz} = -\alpha_j - g_{j+1} \frac{\nu_j}{\nu_{j+1}} (P_{j+1}^F + P_{j+1}^B) + g_j (P_{j-1}^F + P_{j-1}^B), \quad (2)$$

$$\frac{1}{P_n^F} \frac{dP_n^F}{dz} = -\frac{1}{P_n^B} \frac{dP_n^B}{dz} = -\alpha_n + g_n (P_{n-1}^F + P_{n-1}^B), \quad (3)$$

式中 P_0 表示抽运光功率, P_j, ν_j 分别为第 j 阶斯托克斯光的功率和频率,上标 F 和 B 分别表示光的传播方向为前向和后向, α (1/m) 为拉曼光纤的损耗, g_j (1/(W · m)) 为光纤的拉曼增益系数, $g_j = \nu_{j-1} G_R(\nu_{\text{ref}}, \nu_{\text{ref}} - \Delta\nu) / [\nu_{\text{ref}} A_{\text{eff}}(\nu_{j-1}, \nu_j)]$,其中 G_R (m/W) 为光纤材料的拉曼增益, $\Delta\nu = \nu_{j-1} - \nu_j$, ν_{ref} 为测量 G_R 所用的抽运光频率, $A_{\text{eff}}(\nu_{j-1}, \nu_j)$ 为光纤纤芯有效面积^[11~13]。

在输入端($z = 0$ 处)和输出端($z = L$ 处),方程(1)~(3)应满足边界条件

$$\begin{aligned} P_0^F(0) &= P_{\text{in}} & P_0^B(L) &= R_0^+ P_0^F(L) \\ P_j^F(0) &= R_j^- P_j^B(0) & P_j^B(L) &= R_j^+ P_j^F(L) \end{aligned}, \quad (4)$$

式中 P_{in} 为抽运功率, R_j^\pm 表示光纤布拉格光栅对第 j 阶斯托克斯光的有效反射率。

2.2 方程的解析解

由(1)~(3)式的性质可知微分方程的解满足 $P_j^F(z)P_j^B(z) = C_j^2$ ($0 \leq j \leq n$), C_j 为常数。则根据边界条件(4)式,激光器第 n 阶斯托克斯光输出功率为

$$P_n = (1 - R_n^+) P_n^F(L) = (1 - R_n^+) C_n / \sqrt{R_n^+}, \quad (5)$$

设方程的解为 $P_j^{F/B}(z) = C_j \exp[\pm \theta_j(z)]$, θ 为无量纲增益系数。与此相应的边界条件写为

$$\begin{aligned} \theta_0(0) &= \ln\left(\frac{P_{\text{in}}}{C_0}\right), & \theta_0(L) &= -\ln \sqrt{R_0^+} \\ \theta_j(0) &= \ln \sqrt{R_j^-}, & \theta_j(L) &= -\ln \sqrt{R_j^+}, \\ & & (1 \leq j \leq n). & \end{aligned} \quad (6)$$

考虑到由低损耗拉曼光纤、高反射率光纤布拉格光栅构成的级联谐振腔中,各阶斯托克斯光的损耗很低,可设内谐振腔(输出级除外)中各阶斯托克斯光前、后向传输的功率之和为常数,即 $P_j^F(z) + P_j^B(z) \approx 2C_j$ ($1 \leq j \leq n-1$)。则由(5)式以及拉曼光纤激光器级联阶数 n 的奇偶性可推导出:

1) n 为奇数

第 n 阶斯托克斯光输出功率为

$$P_n = f(R_n^+) \left[\frac{\xi(P_{in} - P_r)}{4g_1 L \left(A_o + \frac{B_o}{L} - \frac{\ln R_n^+ R_n^-}{4g_n \psi L} \right)} - \frac{\alpha_o}{2g_1} \xi - \left(A_e + \frac{B_e}{L} \right) \right], \quad (7)$$

由(7)式可求出光-光转换效率为最大($\eta_{max} = (P_n/P_{in})_{max}$)时的拉曼光纤长度及输出耦合器的反射率

$$L_{opt} = \sqrt{\frac{B_o B_e}{A_o \left(A_e + \frac{\alpha_o}{2g_1} \xi \right)}}, \quad (8)$$

$$R_{opt} = \frac{1}{R_n^-} \exp \left\{ -4g_n \psi \sqrt{\frac{B_o}{A_e + \frac{\alpha_o}{2g_1} \xi}} \left[\sqrt{\frac{\xi P_{in}}{4g_1}} - \sqrt{A_o B_e} - \sqrt{\left(A_e + \frac{\alpha_o}{2g_1} \xi \right) B_o} \right] \right\}, \quad (9)$$

式中参量 $f(R_n^+)$, ξ , ψ , A_e , A_o , B_e , B_o 见附录 1, 2。

2) n 为偶数

第 n 阶斯托克斯光输出功率为

$$P_n = f(R_n^+) \left[\frac{\varphi(P_{in} - P_r)}{4g_1 L \left(C_e + \frac{D_e}{L} - \frac{\ln R_n^+ R_n^-}{4g_n \kappa L} \right)} - \left(C_o + \frac{D_o}{L} \right) \right], \quad (10)$$

最大光-光转换效率对应的拉曼光纤长度及输出耦合器反射率为

$$L_{opt} = \sqrt{\frac{D_o D_e}{C_o C_e}}, \quad (11)$$

$$R_{opt} = \frac{1}{R_n^-} \exp \left[-4g_n \kappa \sqrt{\frac{D_e}{C_o}} \left(\sqrt{\frac{\varphi P_{in}}{4g_1}} - \sqrt{C_e D_o} - \sqrt{C_o D_e} \right) \right], \quad (12)$$

式中参量 $f(R_n^+)$, κ , φ , C_e , C_o , D_e , D_o 见附录 1, 3。
(7) 和(10) 式中的 $P_r = C_o^2/P_{in}$ 均为反射回输入端 ($z = 0$ 处) 的剩余抽运功率。

需要说明的是在推导最佳拉曼光纤长度和输出耦合器反射率时用到了近似 $R_n^- \approx 1$ 和 $P_r \approx 0$, 剩余抽运功率 P_r 对拉曼激光器的影响将在下面进行详细讨论。从(8), (11) 式可以看出最佳光纤长度与抽运功率大小无关。

3 实验对比

为了验证上述理论结果的正确性, 将理论计算结果与文献[5]中的 5 阶级联掺锗拉曼光纤激光器实验结果进行了比较。拉曼光纤的增益和损耗参数如表 1 所示, 设光纤布拉格光栅背景损耗为 0.07 dB, A, B 点的熔接损耗均为 0.05 dB, 拉曼光纤长度为 600 m, 输出耦合器反射率 30%。图 2 为(7)式理论计算结果与实验数据的比较, 同时还与采用 Burgoyne 方法获得的结果进行了比较^[9,10]。可以看出(7)式很好地预测了该激光器的输出特性, 而采用 Burgoyne 方法获得的结果与实验值相差较大, 主要原因是他们假设所有斯托克斯光均具有相

同的有效纤芯面积。在抽运功率比较高时, 由于斯托克斯光谱变宽引起的光-光转换效率自优化效应^[14], 使得计算结果稍低于实验值。

表 1 计算所用拉曼光纤参数

Table 1 Parameters of Raman fiber used in calculation

Wavelength λ / nm	Gain $/(W \cdot km)^{-1}$	Attenuation $/(dB/km)$
1100	—	1.20
1156	5.15	1.01
1218	4.63	0.81
1288	4.22	0.66
1366	3.83	0.56
1455	3.07	0.43

4 计算结果与讨论

4.1 剩余抽运功率 P_r 对计算结果的影响

图 2 是在假设 $P_r = 0$ 的情况下得到的结果, 即抽运光已经被完全耗尽。为了研究剩余抽运功率 P_r 对计算结果的影响, 图 3 给出了在不同输入抽运功率、输出耦合器反射率情况下 P_r 随拉曼光纤长度的变化。在抽运功率为 4 W, 输出耦合器反射率为

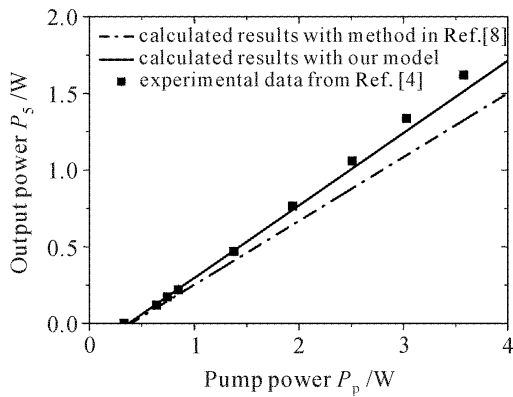


图 2 5 阶级联拉曼光纤激光器输出特性

Fig. 2 Output characteristics of a 5th-order cascaded Raman fiber laser

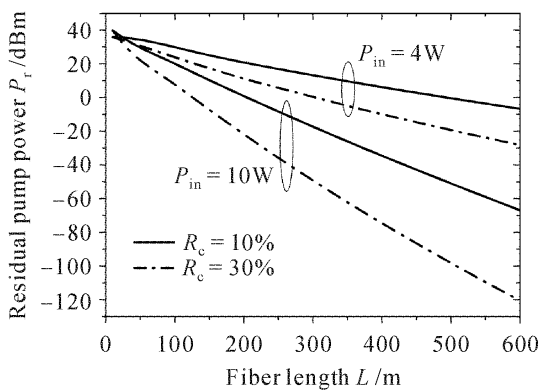


图 3 剩余抽运功率随拉曼光纤长度的变化

Fig. 3 Residual pump power as a function of Raman fiber length

30%, 拉曼光纤长度为 600 m 的情况下, P_r 约为 -28 dBm, 可见忽略 P_r 对图 2 结果几乎不会产生影响。即使对于抽运功率为 4 W, 输出耦合器反射率仅为 10% 的情况, 当拉曼光纤长度大于 200 m 时, 也仅有不大于 2.5% 的剩余抽运功率。

4.2 拉曼光纤长度和输出耦合器反射率对光-光转换效率的影响

在级联拉曼光纤激光器系统中, 为了获得最佳性能, 通常要选择适当拉曼光纤长度和输出耦合器反射率。图 4 显示了这两个参数对 5 阶级联拉曼光纤激光器转换效率的共同影响。从图 4(b) 中可以看出, 随着输入抽运功率的增加, 由于受激拉曼散射作用增强使得低阶斯托克斯光向高阶转换加强, 从而提高了光-光转换效率。当抽运功率为 4 W 时, 由图 4(a) 或者 (8), (9) 式计算的最佳化拉曼光纤长度及输出耦合器反射率分别为 340 m, 11%, 此时的转换效率约为 50%。

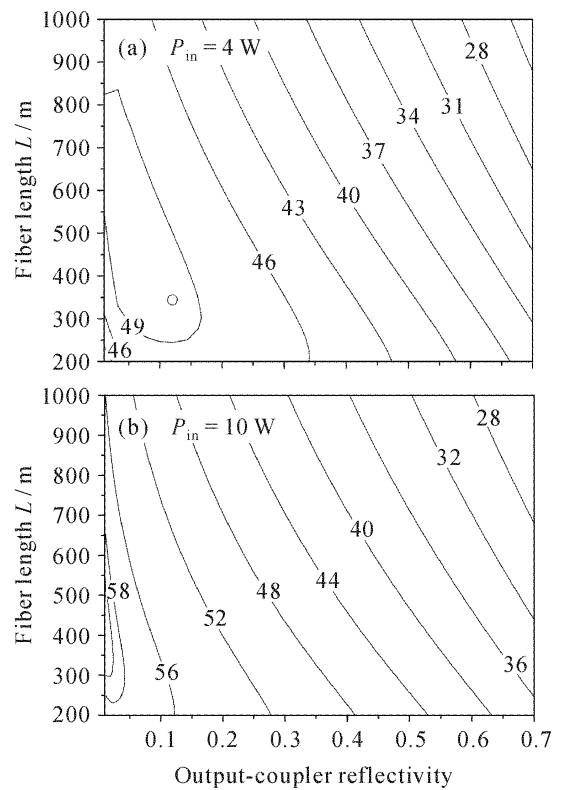


图 4 光-光转换效率随拉曼光纤长度和输出耦合器反射率的变化

Fig. 4 Pump-to-Stokes conversion efficiency as a function of Raman fiber length and output coupler reflectivity

5 结 论

由于拉曼光纤纤芯有效面积随斯托克斯光波长变化, 按照稳态条件下工作的拉曼光纤激光器级联阶数的奇偶性分别推导出了第 n 阶输出斯托克斯光功率以及最佳拉曼光纤长度和输出耦合器反射率的解析表达式。应用该结果, 理论分析了 5 阶级联掺铯拉曼光纤激光器, 并与相关实验结果作了比较。优化设计表明可以得到光-光转换效率约为 50%, 相应的光纤长度与输出耦合器反射率分别为 340 m 和 11%。这种理论模型可以很方便地用于理论分析和优化设计单波长输出的多阶级联拉曼光纤激光器。

参 考 文 献

- 1 Zhang Minming, Liu Deming, Wang Ying *et al.*. Single-stage fiber Raman lasers for pumping fiber Raman amplifier [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(12):1634~1638
张敏明, 刘德明, 王英等. 用于光纤拉曼放大器抽运源的单级光纤拉曼激光器[J]. *光学学报*, 2005, **25**(12):1634~1638
- 2 Matleo Rini, Iliaria Cristiani, Vittorio Degiorgio. Numerical modeling and optimization of cascaded CW Raman fiber lasers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2000, **36**(10):1117~1122
- 3 Stuart D. Jackson, Paul H. Muir. Theory and numerical simulation of n th-order cascaded Raman fiber lasers [J]. *J.*

- Opt. Soc. Am. B*, 2001, **18**(9):1297~1306
- 4 Chi Ronghua, Yun Peng, Shu Hongxin *et al.*. Numerical simulation and analysis of two cascaded Raman fiber lasers [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(9):773~776
迟荣华, 运鹏, 苏红新等. 两级串级拉曼全光纤激光器的数值模拟及分析[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(9):773~776
- 5 Yong Wang, Hong Po. Characteristics of fibre Bragg gratings and influences on high-power Raman fibre lasers [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 2003, **14**(6):883~891
- 6 Liu Honglin, Zhang Zaixuan, Zhuang Songlin. Solving the propagation equation of bi-direction pumped fiber Raman amplifier with shooting method [J]. *Opto-Electron. Eng.*, 2004, **31**(12):46~49
刘红林, 张在宣, 庄松林. 用打靶法求解双向泵浦的拉曼放大器传输方程[J]. *光电工程*, 2004, **31**(12):46~49
- 7 Junhe Zhou, Jianping Chen, Xinwan Li *et al.*. A novel algorithm for a multi-cavity Raman fiber laser [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(8):3427~3432
- 8 S. A. Babin, D. V. Churkin, E. V. Podivilov. Analytical model of a two-stage Raman fiber laser considering intensity interactions in cascades [C]. *SPIE*, 2004, **5480**:55~63
- 9 Bryan Burgoyne, Nicolas Godbout, Suzanne Lacroix. Theoretical analysis of n th-order cascaded continuous-wave Raman fiber lasers. I. Model and resolution [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2005, **22**(4):764~771
- 10 Bryan Burgoyne, Nicolas Godbout, Suzanne Lacroix. Theoretical analysis of n th-order cascaded continuous-wave Raman fiber lasers. II. Optimization and design rules [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2005, **22**(4):772~776
- 11 Florence Leplingard, Catherine Martinelli, Sophie Borne *et al.*. Modeling of multiwavelength Raman fiber lasers using a new and fast algorithm [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, **16**(12):2601~2603
- 12 W. P. Urquhart, P. J. Laybourn. Effective core area for stimulated Raman scattering in single-mode optical fibres [C]. *IEE Proc.*, 1985, **132**(4):201~204
- 13 Du Geguo. Modification of coupled equations for cascaded CW Raman fiber lasers [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(9):1281~1284
杜戈果. 连续级联喇曼光纤激光器耦合波方程的修正[J]. *光子学报*, 2006, **35**(9):1281~1284
- 14 Pierre Suret, Stephane Randoux. Influence of spectral broadening on steady characteristics of Raman fiber lasers; from experiments to questions about validity of usual models [J]. *Opt. Commun.*, 2004, **237**(1-3):201~212

附录 1

$$f(R_n^+) = \frac{(1 - R_n^+)}{\sqrt{R_n^+}} \times \frac{\ln \sqrt{R_n^+ R_n^-}}{\sinh(\ln \sqrt{R_n^+}) + \sinh(\ln \sqrt{R_n^-})}, \quad (\text{附 1-1})$$

$$H_j = \frac{\nu_{j+1} g_j}{\nu_j g_{j+1}}, \quad (\text{附 1-2})$$

$$\rho_j = \frac{\alpha_j}{2g_j} - \frac{\ln \sqrt{R_j^+ R_j^-}}{2g_j L}. \quad (\text{附 1-3})$$

附录 2

$$\xi = \frac{\nu_1}{\nu_0} \prod_{i=2}^{n-1} H_i, \quad (\text{附 2-1})$$

$$\psi = \prod_{i=1}^{n-2} H_i, \quad (\text{附 2-2})$$

$$A_e = \sum_{j=2}^{n-1} \left(\frac{\alpha_j}{2g_j} \prod_{i=j}^{n-1} H_i \right), \quad (\text{附 2-3})$$

$$A_o = \frac{1}{\psi} \left[\sum_{j=3}^{n-2} \left(\frac{\alpha_j}{2g_j} \prod_{i=j}^{n-2} H_i \right) + \frac{\alpha_n}{2g_n} \right] + \frac{\alpha_1}{2g_1}, \quad (\text{附 2-4})$$

$$B_e = - \sum_{j=2}^{n-1} \left(\frac{\ln \sqrt{R_j^+ R_j^-}}{2g_j} \prod_{i=j}^{n-1} H_i \right), \quad (\text{附 2-5})$$

$$B_o = - \frac{1}{\psi} \sum_{j=3}^{n-2} \left(\frac{\ln \sqrt{R_j^+ R_j^-}}{2g_j} \prod_{i=j}^{n-2} H_i \right) - \frac{\ln \sqrt{R_1^+ R_1^-}}{2g_1}, \quad (\text{附 2-6})$$

附录 3

$$\kappa = \frac{\nu_1}{\nu_0} \prod_{i=2}^{n-2} H_i, \quad (\text{附 3-1})$$

$$\varphi = \prod_{i=1}^{n-1} H_i, \quad (\text{附 3-2})$$

$$C_e = \frac{1}{\kappa} \left[\sum_{j=2}^{n-2} \left(\frac{\alpha_j}{2g_j} \prod_{i=j}^{n-2} H_i \right) + \frac{\alpha_n}{2g_n} \right] + \frac{\alpha_0}{2g_1}, \quad (\text{附 3-3})$$

$$C_o = \sum_{j=1}^{n-1} \left(\frac{\alpha_j}{2g_j} \prod_{i=j}^{n-1} H_i \right), \quad (\text{附 3-4})$$

$$D_e = - \frac{1}{\kappa} \sum_{j=2}^{n-2} \left(\frac{\ln \sqrt{R_j^+ R_j^-}}{2g_j} \prod_{i=j}^{n-2} H_i \right), \quad (\text{附 3-5})$$

$$D_o = - \sum_{j=1}^{n-1} \left(\frac{\ln \sqrt{R_j^+ R_j^-}}{2g_j} \prod_{i=j}^{n-1} H_i \right), \quad (\text{附 3-6})$$