

适应法光学自动设计程序中的病态处理

王永伸

(应用物理系)

摘要 有效的病态处理是适应法光学自动设计程序的关键。本文旨在突破传统的处理格局,推出“三链节-可循环”处理新方法。这种处理方法包括缩减迭代步长、调整增量之比例和释放受控象差,它比传统的处理方法更好。

关键词 释放,适应法,病态,步长,增量

分类号 O439

适应法作为一种广泛流行的优化方法已有近30年的发展历史。但无须讳言,国内外现行程序对病态的识别处理这个关键技术还不够完善,国外此类文献几乎全都局限于介绍和讨论单一的传统处理模式——不断释放受控象差,即:当优化过程陷入病态时,便释放一种象差,对其余象差继续进行校正,待此步校正完成后再将前面释放的象差恢复控制。研究表明:以这种单一方式来处理不同机制的病态有两大缺点:1) 迫使迭代过程无谓重复;2) 有解过程误判为无解。这两个缺点已严重阻碍了程序自动优化技术的发展。

1 “三链节—可循环”处理技术

适应法优化过程的病态不外以下两种情况:

- (1) 最大因子持续上升或振荡;
- (2) 矩阵 (AA^T) 奇异(A 是象差线性方程组的系数矩阵即象差有限差分矩阵)。

两种情况表现形式不同,其产生机理自然可能不尽一样。

对第一种情况,采取的处理途径是:

在第 $N(N \geq 2)$ 次建立系数矩阵后,将首次求解象差方程组得到的最大因子 $X_{\max N}$ 与第 $(N-1)$ 次建立系数矩阵后的首次最大因子 $X_{\max(N-1)}$ 相比较。若 $X_{\max N} \geq X_{\max(N-1)}$,则将迭代步长减半;若不能阻止这种发散,则再将迭代步长减半;仍不能奏效时即转入第二环节进行处理——调整结构参数自变量所取的增量之比例。

另外,对程序的处理环节进行改编时,要考虑以下两点:其一,在自动设计中结构参数自变量主要是曲率和厚度间隔两大类。故增量比例的调整主要着眼于它们;其二,在考虑增量比例的调整幅度时要防止实际增量过大或过小的情况。基于此,作者把程序的第二个病态处理环节改编为:先将曲率增量 δc_0 缩小为 $0.707\delta c_0$,其余各类增量都扩大为原增量的 1.414 倍;如未能摆脱病态,即舍弃刚才的处理结果,并进行“逆处理”,将曲率增量扩大为 $1.414\delta c_0$,其余各类增量都缩小为原增量的 0.707 倍;重新建立系数矩阵求解。

如果上述两个环节的处理都不能摆脱病态,便转入第三环节做释放象差的处理。若释放象差后又出现最大因子上升的情况,则又重新进入第一环节做缩减迭代步长的处理,以后的处理过程又如同上述,因而是一个闭环三链节的可循环处理过程。

对于第二种病态情况,程序便越过第一环节,直接以第二环节为入口进行处理和判断,其判据和处理过程与上面相同。

程序中整个病态处理构思可以用图 1 来示意。

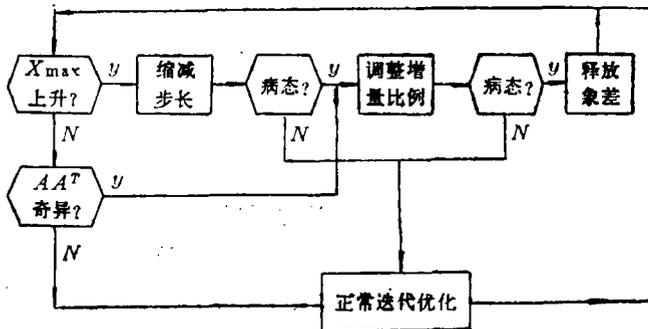


图 1

2 实例与分析

在决定革新传统的单纯释放象差方式之前,作者曾对各个病态实例分别按人机对话方式考察上述三个链节的处理功能。下举二个实例。

例 1 设计[1]的双高斯物镜。取 $c_1 \sim c_5$ 、 $c_7 \sim c_{11}$ 、 d_3 、 d_5 、 d_6 、 d_8 为自变量,增量为 $\delta c = 0.00025$, $\delta d = 0.02$ 。优化边缘象差时即发现第三次矩阵求解的首次最大因子 $X_{\max 3} = 20.647 > X_{\max 2} = 14.597$ 。令机挂停,将步长减半后再运行,则只经过 6 次内循环就进入稳定的收敛,不用释放象差就能迅速完成校正,时间数以秒计。若不改变步长,单靠释放象差,则此例要多花 43 分钟。因为释放的象差在重新受控时,校正又要重新开始。这已说明加进缩减步长的环节确有优越性。

例 2 设计[1]的三片型物镜。取 $c_1 \sim c_6$ 、 d_2 、 d_4 为自变量,增量 $\delta c_0 = 0.0005$, $\delta d_0 = 0.03$ 。校正边缘象差时自第 5 次建立系数矩阵开始, X_{\max} 持续上升,如 $28.210 \rightarrow 29.816 \rightarrow 42.767 \rightarrow 163.978 \dots$,令机挂停,取用病态出现时的结构,手工修改增量为 $\delta c = 0.0002$, $\delta d = 0.05$,再启动运行,则优化能顺利进行,只建三次矩阵就完成校正,

也无须释放象差。 X_{\max} 的收敛如: $159.828 \rightarrow 83.820 \rightarrow 66.866 \rightarrow 0.457$ 。若单靠释放象差, 程序会先将球差 $\delta L'_m$ 释放而校正其余, 尔后将 $\delta L'_m$ 复控, 再进行迭代优化。这样完成校正要多31分钟。它表明, 若程序中加进调整增量比例的环节以处理病态, 必比单纯释放象差方式优越。

基于对多个实例的对比试验及其优化过程的分析, 可认为, 以最大因子上升为表现的病态, 并非全因优化方向不适, 其中有些是因当前状况下受控指标与结构参数自变量之间出现了严重的非线性关系, 致使现取的迭代步长都太大, 因而超出了近似线性假设能够成立的范围。只要进一步压缩步长, 就能保证线性逼近真正奏效, 从而可免于对优化方向的调整。换言之, 这种处理方式的基点, 是认为现行优化方向基本正确, 只是在某一局部由于严重的非线性关系作梗造成了发散。因为压缩迭代步长比调整优化方向简单得多, 人们自然尽量优先采用前者。

上面实例中, 为何自变量增量之比例的调整也能摆脱病态呢? 这是因为准确地求解象差线性方程组是适应法程序的基础, 且象差线性方程组的解是由系数矩阵决定的; 而系数矩阵则由各受控象差对诸结构参数自变量的有限差分所构成。换言之, 与所取自变量增量对应的象差有限差分决定着求解方向。因此, 自变量增量大小的更迭便直接影响着优化方向。这里需要进一步重申, 本文所强调的是各类自变量增量之间比例关系的调整, 而不单纯是各自变量增量大小的变化。如果各类自变量增量大小都已变更, 但仍维持着原来的比例关系, 这是无济于事的。因为这种变化只相当于在原有系数矩阵前面乘了一个常因子, 求解方向不会变化。为了明显改变求解方向, 同时要考虑不使自变量增量本身数值动荡过大, 所取的办法是将 δc 缩小, 而其余的扩大; 或者反过来。显然, 这种调整完全改变了系数矩阵诸元素之间原有的比例关系, 因而从数学意义上明显调整了象差线性方程组的求解方向即系统的优化方向。从光学自动设计的角度来说, 自变量增量之间比例关系的这种调整还隐含着深刻的内在含义: 它调整了各结构参数自变量校正象差、优化系统的功能的强弱, 标志着在发挥各类自变量的优化作用时又有新的权重——曲率增量取得比原来大, 而其余增量却取得比原来小, 则后续优化过程必然更多地发挥曲率变量的作用而抑制其余, 反之亦然。这种过程自然也是对优化方向的调整。从前面所举的三片型照相物镜出现病态的实例可知, 增量比例调整前后的最大因子并非简单地按增量比例的反比关系而变化 ($28.210:159.828 \approx 0.0002:0.0005$), 这已能说明优化方向确实得到了调整; 何况本例中取得最大因子的变量由原来的 C_0 更迭为 C_2 , 则更是优化方向改变的突出标志。

正是基于各实例的试验事实和上面的理论分析, 我们把原来由手工实施的缩减步长和调整增量比例两种方式改由程序自动进行, 并串接在释放象差方式之前, 成为释放象差这一环节之前的两个相贯环节, 于是组成了程序中闭环三链节可循环的处理方式。

3 程序实用效果

实践证明, 上述闭环三链节可循环的处理方式是对传统的单纯释放象差方式的改进与发展。它扩充了程序处理病态的能力, 把传统的处理方式改成能在不同程度上区别情况进行循序渐进处理的方式; 不仅增加了两个处理环节, 而且可以循环, 从而使释放象

差的机会大大减少。这样既可节省机时，又符合用户的愿望。程序运行的实际表明，现行程序输出半途中止的中间结果的机会明显减少。过去那些需要反复释放象差才能完成的校正过程，现在已不用释放象差或至多释放一次象差就能完成。

例3 上面所述三片型物镜，原来需要释放 $\delta L'_m$ ，现在由程序自动处理 X_{max} 持续上升的病态情况。开始由第一环节作压缩步长处理，但经三次压缩均未奏效。其间， X_{max} 的变化如：28.210 → 31.966 → 46.695 → 75.353。于是进入第二环节调整增量比例：先取 $\delta c_1 = 0.707\delta c_0 = 0.0003535$ ， $\delta d_1 = 1.414\delta d_0 = 0.04242$ 。试解，结果不行，程序报“AA^T奇异”。于是进一步作“逆处理”，取 $\delta c_2 = 1.414\delta c_0 = 0.000707$ ， $\delta d_2 = 0.707\delta d_0 = 0.02121$ ，重新求解迭代，结果顺利完成校正，途中没有释放象差。 X_{max} 的收敛过程如表1。

表 1

X_{max}	605.001	→	101.922	→	60.142	→	29.522	→	10.546	→	1.953	→	0.100
对应变量	d_4	→	c_3	→	c_3	→	c_2	→	d_2	→	d_4	→	d_4

输出结构参数为：（其余参数同[1]）

r	d
12.51766	
-67.86426	2.5
-13.48554	1.61227
12.60747 (光阑)	1
88.11854	1.66621
-11.97996	2.5

所有受控指标都达到各自的目标值。再经过一次对剩余象差的收缩，即完成设计过程，得到：

r	d
14.76114	
-40.05925	2.5
-11.13841	1.62269
16.83019 (光阑)	1
-104.77749	1.31847
-9.81148	2.5

$$f' = 30.00 \quad L_F = -25.03 \quad L'_F = 26.92 \quad y'_0 = 13.99$$

象差结果如表2。

表 2

象差 h,w	$\delta L'$	sc'	$\Delta L'_{FC}$	x'_l	x'_s	$\delta L'_T$	K'_T	$\Delta y'_2$	$\Delta y'_{FC}$
1	0.211	0.00092	0.071	-0.60	-0.60	1.6	0.02	0.177	0
0.707	-0.01	0.00039	0	-0.18	-0.43	1.2	-0.03	0.045	-0.003

剩余象差如表3。

表3

$\delta L'_{sn}$	$\delta L'_{Ty}$	K'_{Tsnh}	K'_{Tsnv}	x'_{sn}	x'_{ssn}	$\delta L'_{FC}$	$\delta y'_{FC}$
-0.12	1.39	0.005	-0.05	0.11	-0.13	0.11	-0.0029

例4 以双球面反射镜为基础,设计含非球面的反射系统。要求: $f'=475$, $D_{入瞳}=63$, $w=0.96^\circ$, 轴上点严格校正球差, 轴外点光线弥散 ≤ 0.04 , 后工作距离 $L'_F=184$ 。先作外形尺寸计算得到如下双球面反射系统:

$$\begin{array}{cc} r & d \\ -400 & -122 \\ -265 & \end{array}$$

由于没有考虑象差, 故象差较大。如: $\delta L'_m = -1.993$, $\delta L'_{0.707} = -0.995$; 视场边缘光线弥散 $D_m = 0.18$; $f' = 486.24$, $L'_F = 189.63$ 也不符合要求。本文以 c_1 、 c_2 、 d 和离心率 e_1 为自变量, 控制 f' 、 L'_F/f' 、 $\delta L'_m$ 、 D_m 四项指标, 自变量增量取作: $\delta c = 0.0006$, $\delta d = 0.05$, $\delta e = 0.0005$ 。由于初始结构较差, 优化中反复出现 (AA^T) 奇异情况。在程序只有释放象差这一种处理手段时, 曾先后五次上机都只得到没有全部达到要求的中间结构。后在程序中采用了上述闭环三链节可循环的病态处理方式, 一次上机就完成校正。中途只是在开始收缩象差过程中释放过一次 D_m 。虽然全部优化过程曾先后五次出现 (AA^T) 奇异, 其中四次都在第二环节得到了恰当处理。这里只列其中一次(发生在首次收缩时)的过程。当时 $X_{max} = 465.479$, 且机器报 (AA^T) 奇异; 于是程序自动修改增量为: $\delta c = 0.000424$, $\delta d = 0.0707$, $\delta e = 0.000707$ 。再优化时又极 (AA^T) 奇异; 程序转而又作“逆处理”, 取 $\delta c = 0.000848$, $\delta d = 0.03535$, $\delta e = 0.0003535$, 继续优化, 就摆脱了病态。 X_{max} 的收敛如: $189.603 \rightarrow 102.132 \rightarrow 52.732 \rightarrow 16.427 \rightarrow 10.539 \rightarrow 8.975 \rightarrow 7.993$ (本程序只准建七次矩阵)。后面又进行了三次收缩, 最后全部达到设计要求, 结果为: $f' = 475.04$, $L'_F = 183.92$, 轴上点弥散 $D_o \leq 0.0058$, 轴外点弥散 $D_m \leq 0.039$ 。

以上可见, 本文提出的“三链节-可循环”处理技术比传统的释放象差方式优越。

参 考 文 献

- [1] 袁旭沧. 光学设计. 科学出版社, 1983: 583~598
 [2] 王永仲. 光学设计与微型计算机. 国防科技大学出版社, 1983

The Treatment of the 'Ill-State' of the Optimization Process for the Program of Adaptive Optical Automatic Design

Wang Yongzhong

(Department of Applied Physics)

Abstract

The effective treatment of the 'ill-state' is a key to the design of the program of adaptive optical automatic design. The paper proposes a new idea and method about it. The so-called 'three link-closed chain-circulating treating method' has been put forward here. The treating method consists of reducing iteration step, regulating the rate between the increments of variables, and releasing controlled aberration. This is much better than the traditional treatment setup.

Key words: release, adaptive method, ill-state, step, increment