

灰色预测控制在 CO₂ 激光器自动控制系统中的应用

鲁 岚 陈清明

(华中理工大学激光技术国家重点实验室, 武汉, 430074)

摘要: 以灰色系统理论为基础, 用灰色预测算法对 CO₂ 激光器输出功率进行预测以便提前控制。算法采用 C 语言实现, 通过研华工控机对放电激励 2kW CO₂ 横流激光器进行控制。

关键词: 灰色系统 预测控制 CO₂ 激光器

Application of grey prediction control in automatic control of CO₂ laser

Lu Lan, Chen Qingming

(National Laboratory of Laser Technology, HUST, Wuhan, 430074)

Abstract: The paper proposed a method to forecast the output power of CO₂ laser through the grey prediction arithmetic based on the theory of grey system, in order to control the output power in advance, which is realized by C program with Yan Hua industry control computer to control confined discharge excited 2kW transvers-flow CO₂ laser.

Key words: grey system prediction control CO₂ laser

引 言

高功率 CO₂ 激光器在材料焊接与切割、金属表面热处理等工业加工领域被广泛应用, 有着很好的发展前景。实际应用中, 对 CO₂ 激光器的输出功率稳定性要求较高, 但 CO₂ 激光器运行过程中, 随着 CO₂ 分解, 气体温度升高等各种现象出现, 输出功率会明显地下降^[1]。一般情况下, 除了不断排出废气、补充新鲜气体外, 还要采取调整光腔及改变电压的方式稳定输出功率。如何能及时准确地进行功率调节是 CO₂ 激光器的自控系统中要解决的问题之一, 我们所做的系统是对放电激励 2kW CO₂ 基模激光器进行自动控制, 功率调整是其中重要的一环, 要求在正常运行后输出功率的波动范围的 ±3% 以内。

一般说来, 预先估计下一时刻的输出功率值并提前控制比已经超过范围再进行事后控制要及时、准确, 但激光器系统中与输出功率有关的因素太多, 如气压、气体成分、温度、光腔等等, 而且有些因素还很难随时测量, 不太可能建立起精确的数学模型^[1], 传统的预测控制方法并不适用, 我们现在应用灰色系统理论尝试对激光器输出功率进行测算^[2]。

1 灰色预测算法

灰色系统指的是部分信息已知、部分信息未知的系统, 难以建立精确数学模型的系统均可看成灰色系统, 激光器系统可以看作一个灰色系统。对于这样的系统, 要想知道某个参量的发展趋势, 不需考虑影响它的各个因素与它的具体对应, 这一参量本身的数据序列(即其行为模

型)就包含了系统的各种信息,对数据序列进行适当的生成数处理后,建立灰微分方程,就能找出其中的规律,并由此建立该参量的灰色模型(GM)以求达到预测的目的^[2]。我们针对输出功率建立 GM(1, 1)模型^[4],即一阶单变量的灰色预测模型。设每隔固定时间采样,测得输出功率值 n 个,记为数列 $x_0 = \{x_0(0), x_0(1), \dots, x_0(n-1)\}$

求其累加数列:

$$x_1(k) = \sum_{i=0}^k x_0(i) \quad (k = 1, 2, \dots, n-1) \quad (1)$$

式中, $x_1(0) = x_0(0)$, 可建立关于 x_1 的白化形式的方程: $dx_1/dt + ax_1 = u$ (2)

式中, a, u 为待定参数。

用最小二乘法解此方程可得到 a, u 的值 \hat{a}, \hat{u} , 并有:

$$\hat{x}_1(k) = \{x_0(0) - \hat{u}/\hat{a}\}e^{-\hat{a}k} + \hat{u}/\hat{a} \quad (k \geq 1) \quad (3)$$

式中, $\hat{x}_1(0) = x_0(0)$, \wedge 表示估计值。

将(3)式进行还原处理: $\hat{x}_0(k) = \hat{x}_1(k) - \hat{x}_1(k-1)$ (4)

当 $k \geq n$ 时,由(3)式和(4)式所得 $\hat{x}_0(k)$ 即为利用前 n 个采样数据所求得第 k 时刻的预测值。

2 灰色建模用于输出功率预测

在编程建立预测功率的 GM(1, 1)模型时^[6],采用了等维新息模型,即每次用于预测的采样点个数不变^[2]。下一次预测开始前去掉最老的信息,补充一个最新的信息。比如 $x_0 = \{x_0(0), x_0(1), \dots, x_0(n-1)\}$ 作等维处理可得: $x_0 = \{x_0(1), \dots, x_0(n-1), x_0(n)\}$ 。灰色建模时有各种不同的信息模型,考虑到输出功率涉及的各个因素在不断变化中,所以,选择等维新息模型。此外,对于 n 值的选取,经过对多组实验数据的反复预测比较,发现 5 个采样点时效果较好,因此选定 $n = 5$ 。

我们选用 2kW 无氦运行 CO₂ 横流激光器的多组实验记录数据来试验该 GM(1, 1)模型的可靠性及精确度。每一组实验数据记录了激光器在一次长时间稳定运行中各种参数在不同时间的值,包括注入电压、注入电流、输出功率、温度、气体压力。对十几组数据进行了预测并分析预测结果,平均精度基本上都能达到 1%。尤其是激光器经过启动时的功率上升期进入正常运行后平均精度可达 0.5% 左右。而我们进行功率调整正是要对正常运行中的波动进行修正,上升期勿需考虑,所以这个效果是非常好的。表 1 是对其中一组实验数据的预测结果,这组数据最完备,正常运行时间长,比较有代表性。

表 1 共有 8 列,从左至右分别是记录的次数 i 、记录数据的时刻 time、激光器的注入电压 voltage、注入电流 current、光腔内的混合气体总气压 pressure、实际输出功率值 actual power、功率预测值 prediction、预测值与实际值之间的相对误差 error 以及备注;前面 6 列数据为激光器运行实验数据的记录,第 7 列就是利用灰色预测算法所预测的输出功率值,第 8 列相对误差项由每一时刻的功率预测值减去实际值再除以实际功率值得到,并在表下面注明了激光器运行过程中所进行的特殊操作。由于每次利用前 5 个时刻的实际功率值预测下一时刻的功率,所以第 7 列和第 8 列直到 $i = 5$ 时才有数据。

从表 1 中可以看到,这次实验从 8:50 至 17:20,运行达 8.5h。从 9:05 开始采样记录,激光器启动上升期,大约每 5min 采样一次,进入正常运行后,每 20min 采样一次。从我们对输出功率的预测结果可见,全程内绝对误差平均为 2.488% 左右,这一精度并不高,但从 $i = 14$ (即

11: 20) 开始的预测值均是依据较正常运行后的采样值, 而从 $i = 14$ 至 $i = 32$ 的 19 组预测值平均绝对误差大约为 0.599%, 这一结果是令人满意的。

Table 1 The prediction of the 1st running data of CO₂ laser

| i | time | voltage (V) | current (A) | pressure (Pa) | actual power (W) | prediction (W) | error |
|------|--------|----------------|----------------|------------------|---------------------|-------------------|------------------|
| 0 | 9: 05 | 2850 | 1.20 | 7398 | 1.500000e+ 02 | | |
| 1 | 9: 10 | 2980 | 1.80 | 7425 | 3.900000e+ 02 | | |
| 2 | 9: 11 | 3020 | 2.00 | 7438 | 5.000000e+ 02 | | |
| 3 | 9: 20 | 3000 | 2.00 | 7185 | 5.000000e+ 02 | | |
| 4 | 9: 25 | 3100 | 2.40 | 7198 | 7.500000e+ 02 | | |
| 5 | 9: 30 | 3170 | 2.60 | 7212 | 9.000000e+ 02 | 8.752769e+ 02 | - 2.747006e- 02 |
| 6 | 9: 35 | 3250 | 3.00 | 7252 | 1.140000e+ 03 | 1.119892e+ 03 | - 1.763862 e- 02 |
| 7 | 9: 40 | 3320 | 3.20 | 7278 | 1.270000e+ 03 | 1.435556 e+ 03 | 1.539812 e- 01 |
| 8 | 9: 50 | 3380 | 3.60 | 7332 | 1.500000e+ 03 | 1.539808 e+ 03 | 2.653900 e- 02 |
| 9 | 9: 55 | 3410 | 3.80 | 7358 | 1.560000e+ 03 | 1.759334 e+ 03 | 1.277784 e- 01 |
| 10 | 10: 00 | 3510 | 4.10 | 7398 | 1.780000e+ 03 | 1.774878 e+ 03 | - 2.877499 e- 03 |
| 11 | 10: 20 | 3520 | 4.15 | 7451 | 1.800000e+ 03 | 1.964698 e+ 03 | 9.149883 e- 02 |
| 12 | 10: 40 | 3530 | 4.20 | 7518 | 1.820000e+ 03 | 1.956751 e+ 03 | 7.513803 e- 02 |
| 13 | 11: 00 | 3540 | 4.20 | 7558 | 1.820000e+ 03 | 1.944126 e+ 03 | 6.820089 e- 02 |
| 14 | 11: 20 | 3560 | 4.21 | 7598 | 1.845000e+ 03 | 1.840184 e+ 03 | - 2.610194 e- 03 |
| 15 | 11: 40 | 3680 | 4.25 | 7638 | 1.843000e+ 03 | 1.855261 e+ 03 | 6.652630 e- 03 |
| 16 | 12: 00 | 3700 | 4.30 | 7665 | 1.850000e+ 03 | 1.855611 e+ 03 | 3.033164 e- 03 |
| 17 | 12: 25 | 3600 | 4.40 | 7705 | 1.830000e+ 03 | 1.861559 e+ 03 | 1.724509 e- 02 |
| 18 | 12: 40 | 3600 | 4.40 | 7731 | 1.820000e+ 03 | 1.832537 e+ 03 | 6.888694 e- 03 |
| 19 | 13: 00 | 3620 | 4.40 | 7751 | 1.810000e+ 03 | 1.813645 e+ 03 | 2.013899 e- 03 |
| 20 | 13: 20 | 3630 | 4.50 | 7771 | 1.820000e+ 03 | 1.795188 e+ 03 | - 1.363290 e- 02 |
| 21 | 13: 40 | 3630 | 4.50 | 7785 | 1.810000e+ 03 | 1.809999 e+ 03 | - 3.834787 e- 07 |
| 22 | 14: 00 | 3650 | 4.55 | 7811 | 1.810000e+ 03 | 1.810005 e+ 03 | 2.941639 e- 06 |
| 23 | 14: 20 | 3660 | 4.60 | 7838 | 1.820000e+ 03 | 1.810004 e+ 03 | - 5.492259 e- 03 |
| 24 | 14: 40 | 3650 | 4.55 | 7851 | 1.800000e+ 03 | 1.816000 e+ 03 | 8.888889 e- 03 |
| 25 | 15: 00 | 3680 | 4.55 | 7878 | 1.810000e+ 03 | 1.805016 e+ 03 | - 2.753395 e- 03 |
| 26* | 15: 20 | 3690 | 4.50 | 7891 | 1.800000e+ 03 | 1.805005 e+ 03 | 2.780748 e- 03 |
| 27 | 15: 40 | 3690 | 4.50 | 7905 | 1.816000e+ 03 | 1.795020 e+ 03 | - 1.155307 e- 02 |
| 28 | 16: 00 | 3700 | 4.50 | 7905 | 1.813000e+ 03 | 1.816026 e+ 03 | 1.668869 e- 03 |
| 29** | 16: 20 | 3700 | 4.30 | 7918 | 1.804000e+ 03 | 1.816013 e+ 03 | 6.659195 e- 03 |
| 30 | 16: 40 | 3680 | 4.50 | 7665 | 1.822000e+ 03 | 1.810495 e+ 03 | - 6.314562 e- 03 |
| 31 | 17: 00 | 3680 | 4.20 | 7705 | 1.811000e+ 03 | 1.816006 e+ 03 | 2.764385 e- 03 |
| 32 | 17: 20 | 3680 | 4.30 | 7731 | 1.824000e+ 03 | 1.815501 e+ 03 | - 4.659400 e- 03 |

$$\text{average error} = \frac{1}{28} \sum_{i=5}^{32} |\text{error}[i]| = 2.488347e- 02$$

* —adjust instrument in 15: 20~ 15: 40; ** —scavenge 160Pa in 16: 20~ 16: 40

此外, 我们也注意到在 $i = 14$ 至 $i = 32$ 的 19 组值中, 有个别预测值精度较低, 略高于 1% 或预测趋势与原数列相反。例如 $i = 29$ 至 $i = 30$ 时, 实际功率从 1804W 增大到 1822W, 但预测值从 1816W 减至 1810W, 这是由于在 16: 20 至 16: 40 之间抽气 160Pa, 降低气压及激光器跳

高压保护后再继续运行, 我们的预测值依据于 16: 20 之前的数据, 所以并不矛盾, 在自动控制时对控制结果并无影响; 又如 $i = 27$ 时精度较差为 1.155%, 此时, 进行了调整仪表满刻度的操作; 在 $i = 16$ 和 17 时, 实际值从 1850W 降至 1830W, 而预测值由 1855.6W 升至 1861.6W, 我们注意到此时电压变化很大, 由 3700V 变为 3600V, 正是电压下降导致功率反常下降, 那么在这种情况下要提高预测精度并能及时补救, 应减少采样时间间隔。激光器是缓变系统, 电压下降有一定过程, 只要采样时间间隔足够小, 就可以减小甚至避免这种误差。

在我们所做的激光器自控系统中, 功率调整是整个大系统的一部分, 在循检程序中进行, 从各方面综合考虑, 每 1min 至 2min 采样一次比较合适。

3 预测控制

由时间 $k+1$ 之前若干采样点预测到 $k+1$ 时刻的输出功率值后, 就可以根据预测值与标准输出值之间误差值 $\hat{e}(k)$ 进行提前控制^[3]。假设 k 时刻实际误差值为 $e(k)$, 那么进行调整

的误差项 $\tilde{e}(k)$ 可如下求得:

$$\tilde{e}(k) = \begin{cases} \hat{e}(k) & \hat{e}(k) \cdot e(k) \geq 0 \\ [e(k) + \hat{e}(k)]/2 & \hat{e}(k) \cdot e(k) < 0 \end{cases}$$

如果 $\hat{e}(k) \cdot e(k) < 0$, 说明输出功率的波动在标准值上下浮动, 调整电压幅度必须慎重; 而 $\hat{e}(k) \cdot e(k) \geq 0$, 说明功率在标准值同一方向波动, 则电压调整幅度可适当加大。目前, 我们进行功率控制的程序流程如图 1 所示。根据 $\tilde{e}(k)$ 进行光腔和电压调节时, 可考虑 PID 算法^[5]。由于不能建立激光器系统的准确数学模型, 我们下一步要用人工神经网络学习模拟影响输出功率的各主要因素与输出功率之间的非线性的对应关系并与传统的 PID 算法相结合, 目前已在进行这方面的研究。

4 结 论

用灰色理论作指导, 研究高功率 CO₂ 激光器输出稳定性的控制系统可能是一个很有意义的课题。

参 考 文 献

- 1 丘军林. 气体放电与气体激光. 武汉: 华中理工大学出版社, 1995
- 2 邓聚龙. 灰色系统理论教程. 武汉: 华中理工大学出版社, 1992
- 3 邓聚龙. 灰色控制系统. 武汉: 华中理工大学出版社, 1993
- 4 邓聚龙. 灰色系统基本方法. 武汉: 华中理工大学出版社, 1996
- 5 李友善. 自动控制原理. 北京: 国防工业出版社, 1990
- 6 李文兵. C 应用程序设计技术. 北京: 清华大学出版社, 1993

* * *

作者简介: 鲁 岚, 女, 1972 年 11 月出生。硕士。从事 CO₂ 激光器自动控制方面的研究。

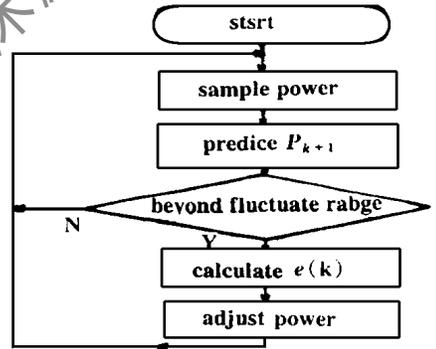


Fig. 1 The flow chart of adjusting power