

# 集散系统控制器参数计算机辅助设计软件包 (DCSCAD)

张国强 曹曙光 朱虹 常江 吴立格 程昌晋  
(陕西机械学院自动控制室·西安,710048) (西北电力试验研究所·西安,710054)

**摘要:** 本文论述了集散系统控制器参数计算机辅助设计软件包(DCSCAD)的设计思想;提出了新的数据结构——回路结构;并以梯度系统这一概念有效地处理了闭环辨识与控制器参数优化这两大课题,从而形成了本包的一系列新算法。

本包在秦岭电厂20万千瓦机组上投运后,一年左右的控制效果明显地优于人工仔细整定的效果。

**关键词:** 集散系统;回路结构;梯度系统;优化控制

## 1 前言

现代工业过程对自动控制系统的要求日益增高,不仅要求子系统满足总目标最佳的要求,而且希望实现包括控制和管理一体化的综合最优系统,集散系统的问世,向该目标迈进了一大步。

集散系统有一系列优点,在我国工业过程控制中的应用也在迅猛发展,然而必须看到:一、它毕竟造价昂贵,许多急需技术改造的用户却用不起。二、国内已经用了集散系统的用户,因种种原因还用不好,很多潜力急待发掘。我们便是从这两个角度着眼,从抓住关键性物理参数的自控效果和集散系统控制器参数在线优化等方面着手,提出并研制了控制器参数计算机辅助设计软件包。本包兼顾集散系统与非集散系统,就称之为《集散系统控制器参数计算机辅助设计软件包》,简称(DCSCAD)。

## 2 软件包的设计思想与数据结构

综观大多数机辅控制系统设计(CACSD)软件包,严格讲,其实质上只是一些分析工具而非设计工具,因为它们要求给定对象模型和设计参数,却没有给设计者提供如何修改设计参数的信息,所以设计过程基本上是试凑法。另外,对控制器结构的选择,也难于提供必要的信息。我们考虑了控制系统CAD的发展趋势,提出了(DCSCAD)的设计思想。

### 2.1 本包的设计思想

考虑控制系统CAD的发展趋势,采纳并开拓了MATLAB的设计思想,提出了如下的软件包设计思想:1)本包具有统一的数据结构和语言,有一系列作为内部命令的算法,使各类用户能方便地实现控制器设计而无需给定设计参数,只要给出性能指标与工程约束,算法将给出控制器结构和参数。2)本包不是给用户一个封闭的刚性设计环境,而是提供一个交互设计工具(环境),用户不仅可以用之去分析或设计控制系统,而且还可以用本包

的内部命令去开发其特需的设计算法。

### 2.2 本包的数据结构

为实现上述设计思想,我们为本包设计了新的数据结构,设计数据结构的指导思想是:

第一、应有利于在计算机中形成工业过程现场的映象,使算法对映象的操作结果仍不失现场的拓扑特征。

第二、各子块应能灵活组态,以适应工业现场的千变万化和复杂的系统联接。

第三、工业过程控制中应用得最成功最受工程师们欢迎且具有一定程度的鲁棒性的算法是 PID、串级、前馈、微分导前等等算法,正是集散系统处理现场控制器的基本算法。这意味着这时控制器基本结构已大体确定,需要优化其参数,数据结构应有利于这种控制器参数优化算法的实现。

第四、应有利于在线建模。

本着上述原则,本包定义的新的数据结构——回路(Loop),它具有图 1 的多输入单输出模式。

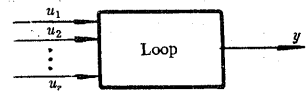


图 1 回路

输出  $y$  为 
$$y = L(u_1(t), \dots, u_r(t)). \quad (2.1)$$

系统  $s$  由回路联接而成,联接方式用系统联接矩阵  $q$  来描述,系统描述则用系统结构矩阵  $h$  来表达,因而有

$$s = (h, q). \quad (2.2)$$

下面用一实例来做进一步的说明。

例 锅炉主蒸汽温度控制系统的结构图如图 2 所示。

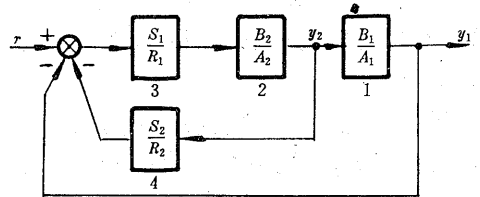


图 2 主汽温控制系统

它采用微分导前方案,回路 1,2 分别为喷淋和过热部分。在 DCSCAD 中,本系统共有 4 个回路,其中  $q, h$  阵如下:

$$q = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 0 \\ 2 & 3 & 0 \\ 3 & -1 & -4 \\ 4 & 2 & 0 \end{bmatrix} \begin{array}{l} \text{第 1 回路输入是第 2 回路的输出,} \\ \text{第 2 回路输入是第 3 回路的输出,} \\ \text{第 3 回路输入是第 1、第 4 回路的输出的反号,} \\ \text{第 4 回路输入是第 2 回路的输出;} \end{array} \quad (2.3)$$

$$h = \begin{bmatrix} 4 \\ 3 \\ 1 \\ n_{a1} & n_{b1} & K_1 \\ A_1 \\ B_1 \\ \vdots \\ n_{a4} & n_{b4} & K_4 \\ A_4 \\ B_4 \end{bmatrix} \begin{array}{l} \text{表示共有 4 个回路,} \\ \text{第 3 回路为系统输入回路,} \\ \text{第 1 回路为系统输出回路,} \\ \text{第 1 回路的阶数与滞后,} \\ \text{第 1 回路的 } a_i \text{ 参数,} \\ \text{第 1 回路的 } b_i \text{ 参数,} \\ \vdots \\ \text{第 4 回路的阶数与滞后,} \\ \text{第 4 回路的 } a_i \text{ 参数,} \\ \text{第 4 回路的 } b_i \text{ 参数.} \end{array} \quad (2.4)$$

对非线性或线性时变系统,则要复杂一些。

可见 DCSCAD 的数据结构反映了实际系统的拓扑特征,而又可以灵活组态.本包在 MATLAB 的基础上,我们研究设计了一系列针对回路结构操作的新算法,它们都以内装命令的形式提供给用户.

$$\text{例} \quad [h, q, iu, iy] = \text{loopdef} \quad (2.5)$$

便可通过人机交互方式形成系统的回路结构  $s = (h, q)$ . 再用

$$y = \text{steplp}(s, u, t) \quad (2.6)$$

求得系统  $s$  对输入序列  $u$  的响应  $y$ . 而

$$\text{pid} = \text{pidlp} * (s, c, \text{ch}) \quad (2.7)$$

就能以多种方式对规定的控制器结构  $c$  和要求的性能指标以及工程约束条件  $\text{ch}$  求得  $s$  的各个控制回路的最优参数…….

我们的神经网络学习与分类算法,将在线实时判断工况,并给出相应的最佳控制器结构与参数,实现实时在线优化控制.

### 3 梯度系统的概念与应用

在线建模或参数优化,因系统闭环,输出与感兴趣的参数之间为复杂的非线性关系,梯度算法将成为算法实现的关键.加上灵活组态的要求,梯度算法还必须对任意组态通用,下面我们来解决这一关键问题.

$$\text{设给定系统} \quad s = (h, q) \quad (3.1)$$

为闭环结构,当考虑扰动时,每个回路的动态模型为

$$A_i(q^{-1})y_i(t) = B_i(q^{-1})u_i(t) + C_i(q^{-1})v_i(t), \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (3.2)$$

其中  $y_i(t), u_i(t)$  为第  $i$  个回路的输出输入,  $v_i(t)$  为随机扰动.

其预报方程为

$$\hat{A}_i(q^{-1})y_i(t) = \hat{B}_i(q^{-1})u_i(t) + \hat{C}_i(q^{-1})\hat{v}_i(t), \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (3.3)$$

闭环辨识或者控制器参数优化,虽然两者感兴趣的输出量和参数不一定相同,但处理方法一致.把感兴趣的回路输出取为  $z_i(t)$ , 欲求的参数记为  $\hat{\theta}_s$ , 目标则取下述加权二次性能指标

$$J = \sum_{i=1}^q \sum_{t=1}^N (z_i(t) - \hat{z}_i(t, \hat{\theta}_s, \hat{v}_i(t)))^2 w_i(t). \quad (3.4)$$

其中  $w_i(t)$  为权因子,  $\hat{v}_i(t)$  为未知扰动的估值. 用非线性规划算法,先假定  $\hat{v}(t)$  已知,  $\hat{\theta}_s$  递推式为

$$\hat{\theta}_s(t+1) = \hat{\theta}_s(t) - \lambda(t)P(t) \frac{\partial J}{\partial \theta}. \quad (3.5)$$

这里  $\lambda(t)$  为修正步长,由一维搜索法得出

$$P(t) = \left( \frac{\partial z}{\partial \theta(t)} \left( \frac{\partial z}{\partial \theta(t)} \right)^T \right)^{-1} \quad (3.6)$$

这便是非线性最小二乘法.它在极值点附近收敛快,但为了克服其计算中求逆阵的缺点,采用了 DFP 算法,即用  $B(t)$  来近似  $P(t)$ .  $B(t)$  的修正算式为

$$\begin{cases} B(t+1) = B(t) + \frac{r(t)r^T(t)}{\delta^T(t)r(t)} - \frac{B(t)\delta(t)\delta^T(t)B(t)}{\delta^T(t)B(t)\delta(t)}, \\ \delta(t) = \hat{\theta}_s(t+1) - \hat{\theta}_s(t), \end{cases}$$

$$\begin{cases} r(t) = g(t+1) - g(t), \\ g(t) = \frac{\partial J}{\partial \hat{\theta}_s(t)}. \end{cases} \quad (3.7)$$

为了进一步提高计算的数值稳定性,采用了 BFGS 算法,  $B(t)$  的修正算式为

$$B(t+1) = B(t) + \frac{1}{r^T(t)\delta(t)} \left[ \left( 1 + \frac{\delta^T(t)B(t)\delta(t)}{r^T(t)\delta(t)} \right) r(t)r^T(t) - r(t)\delta^T(t)B(t) - B(t)\delta(t)r^T(t) \right]. \quad (3.8)$$

软件中可以把 DFP 法与 BFGS 法结合成开关算法,并设计有跳出局部极值点的功能.

无论哪种算法,关键都在求  $z(t)$  对  $\hat{\theta}_s$  的梯度.为此,先建立梯度系统的概念.

式(3.3)对  $\hat{A}_i$  部分参数求导有

$$\hat{A}_i(q^{-1}) \frac{\partial y_i(t)}{\partial \hat{a}_{ij}} = \hat{B}_i(q^{-1}) \frac{\partial u_i(t)}{\partial \hat{a}_{ij}} - y_i(t-j). \quad (3.9)$$

因参数向量  $\hat{A}_i, \hat{B}_i$  与扰动  $v_i(t)$  无关,所以有  $\frac{\partial v_i(t)}{\partial \hat{a}_{ij}} = 0$ . 式(3.9)对应的状态空间描述为

$$\mu_i(t+1) = A_i \mu_i(t) + B_i \eta_i(t), \quad (3.10a)$$

$$\lambda_i(t) = C_i \mu_i(t) + D_i \eta_i(t) - \bar{y}_i(t-j), \quad (3.10b)$$

$$\bar{y}_i(t-j) = y_i(t-j) / \hat{A}_i(q^{-1}). \quad (3.10c)$$

其中 
$$\lambda_i(t) = \frac{\partial y_i(t)}{\partial \hat{a}_{ij}}, \quad (3.10d)$$

$$\eta_i(t) = \frac{\partial u_i(t)}{\partial \hat{a}_{ij}}. \quad (3.10e)$$

把各回路所对应的状态空间描述联合写成分块对角形式,则有

$$\mu(t+1) = a\mu(t) + b\eta(t), \quad (3.11a)$$

$$\lambda(t) = c\mu(t) + d\eta(t) - F\bar{y}(t-j), \quad (3.11b)$$

$$\eta(t) = K\lambda(t). \quad (3.11c)$$

其中  $F$  阵由“0”,“1”组成,那些回路有  $\bar{y}(t-j)$ ,则相应位置为 1. 式(3.11)称为原系统的梯度系统.与原系统当输入为

$$\mu(t) = Ky(t) + r \quad (3.12)$$

时的闭环分块形式的状态模型相比便知:它实际上是由原系统令  $r=0$ ,并在第  $i$  个回路施以输入  $\bar{y}(t-j)$  而得出,其它联接形式不变.因此,梯度系统的闭环状态方程为

$$\mu(t+1) = \bar{A}\mu(t) + \bar{B}\bar{y}(t-j), \quad (3.13a)$$

$$\lambda(t) = \bar{C}\mu(t) + \bar{D}\bar{y}(t-j). \quad (3.13b)$$

其中 
$$\bar{A} = a + bK(I - dK)^{-1}c, \quad (3.13c)$$

$$\bar{B} = bK(I - dK)^{-1}F, \quad (3.13d)$$

$$\bar{C} = (I - dK)^{-1}c, \quad (3.13e)$$

$$\bar{D} = (I - dK)^{-1}F. \quad (3.13f)$$

可见原系统与其相应的梯度系统有相同的闭环结构,求梯度的算法问题演变为以  $\bar{y}(t-j)$  为参考输入,求相应梯度系统闭环输出的仿真问题了.

同理,可以求  $\frac{\partial y_i(t)}{\partial b_{ij}}$  和  $\frac{\partial y_i(t)}{\partial c_{ij}}$ .

在 DCSCAD 中,梯度算法程序为:

- step 1 tf2ss; 化传递函数为状态方程.
- step 2 blkbuild; 把各状态方程联成分块对角形式.
- step 3 connect; 把分块对角形式变成闭环状态空间形式.
- step 4 dlsim; 仿真(求梯度).

#### 4 DCSCAD 的算法

本包在 MATLAB 全部算法的基础上,又针对回路结构研究设计了一系列新算法,它们包括:

##### 4.1 控制系统分析与仿真算法

包括线性系统时域、频域响应;非线性系统对任意输入的响应;闭环系统仿真等.

##### 4.2 动态系统建模

包括激励信号,各种开环递推多变量模型辨识算法;连续辨识算法;闭环辨识算法;非线性辨识算法和神经网络的各种学习算法;各种模型校核算法等,供用户在各种情况下选用.

##### 4.3 控制器最佳参数设计算法

在处理控制器参数优化算法方面有两个观点是值得指出的,即

第一、工业过程很难精确建模,所以目标函数是以期望的控制效果为基准,考虑工程约束去实现控制器参数优化设计.

第二、设计出的最佳控制器参数与工业现场拓扑结构相对应,以方便于实用.

DCSCAD 软件包对控制器参数优化设计提供了三类优化算法,每一类算法都基于一个四元组,即控制器参数  $\theta_0$  可以表示为

$$\theta_0 = f(h, q, c, ch). \quad (4.1)$$

其中  $h, q, c, ch$  的含义见式(2.7). 算法示意如下:

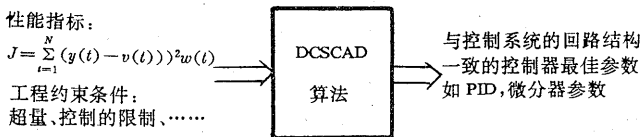


图 3 控制器最佳参数设计示意图

三类算法是:

##### 4.3.1 Q 参数法

算法的核心是将控制器重新参数化为  $Q$ , 使性能指标只是  $Q$  的二次函数, 约束条件只是  $Q$  的线性函数, 便可用约束最小二乘法一步得出  $Q$  最佳参数. 在不等式约束时, 用二次规划算法求出  $Q$ . 最后经参数转换算法, 从  $Q$  得出最佳控制器参数. 该法无需迭代, 无需参数初值, 又具全局最优的品质, 可供作初值算法.

##### 4.3.2 直接搜索法

包括单纯形法和 Powell 共轭梯度法, 它们在有约束条件下修改为罚函数法. 主要用于参数个数少或要求更精确参数的情况.

### 4.3.3 新的梯度算法

梯度系统的概念已如前述. 有了梯度求法之后, 非线性优化的许多强有力算法, 如变尺度算法, 共轭梯度法和序列二次规划算法等便可直接应用, 从而形成了 DCSCAD 的一系列强有力的控制器参数优化算法.

利用本包对秦岭电厂 3#20 万千瓦机组的主汽压、主汽温和汽包水位等三个主要系统进行了控制器参数优化, 经一年左右的投控效果表明: 性能优于人工仔细整定结果. 从前每班 5~6 次波动超标, 优化后, 从 1991 年 9 月 10 日任采的一段记录来看, 参数整定时间也大为缩短, 经济效益十分可观.

## 5 结束语

DCSCAD 在发电厂的成功运行表明了本包设计思想与算法设计的正确性和在工业过程控制中的实用性. 配合神经网络工况判决部分, 本包将使集散系统实现在线优化控制, 并对老控制设备的改造做出贡献. 本包 1991 年 11 月通过了陕西省教委组织的技术鉴定.

致谢 感谢西北电管局和秦岭电厂领导及师傅们的支持与合作.

## 参 考 文 献

- [1] Pang, G. K. H. et. Development of a New Generation of Interactive CACSD Environment. IEEE Contr. Syst. Mag., 1990, 10(5):40-44
- [2] Boyd, S. P. et. A New CAD Method and Associated Architectures for Linear Control. IEEE Automat. Contr., 1988, AC-33(3):268-283
- [3] 曹曙光, 张国强等. 集散控制系统计算机辅助设计软件包. 全国集散控制系统及其应用学术会议论文集, 1991
- [4] 孙德敏, 冼辉等. 20T/H 工业锅炉主汽压回路参数寻优自适应 PID 控制. 自动化学报, 1991, 17(5):624-631
- [5] 曹曙光, 张国强, 朱虹. 集散控制系统控制器 Q 参数设计法. 陕西机械学院自控教研室教材, 1990

## CAD Software Package of Controller Parameters of Distributed Control System (DCSCAD)

ZHANG Guoqiang, CAO Shuguang and ZHU Hong

(Department of Automatic Control, Shanxi Institute of Mechanical Engineering · Xi'an, 710048)

CHANG Jiang, WU Lige and CHENG Changjin

(North-West China Electronic Power Testing & Research Institute · Xi'an, 710054)

**Abstract:** The paper discusses the design idea of the CAD software package of controller parameters of Distributed control system (DCSCAD), presents a new data-structure (loop-structure) and by using the concept of the gradient system deals successfully with two important problems: closed-loop system identification and controller parameters optimization. That results in a series of new algorithms.

The package has been applied to the 200MW power generator for one year and the controlled results are much better than that of the traditional tuning methods.

**Key words:** distributed system; loop-structure; gradient system; optimizing control

### 本文作者简介

**张国强** 1935年生. 1958年毕业于北京工业学院雷达专业. 现任陕西机械学院自动化系副教授. 研究兴趣为系统辨识和工业过程优化控制等领域, 目前正在从事典型工业过程优化控制的研究.

**曹曙光** 1952年生. 1986年获电力传动及其自动化学科硕士, 现任陕西机械学院自动化系副教授. 研究兴趣为非线性系统理论及过程控制等领域, 目前正在从事集散系统及典型工业过程优化控制等的研究.

**朱虹女** 1963年生. 1984年毕业于厦门大学控制理论专业. 现任陕西机械学院自动化系讲师. 目前正在从事工业过程优化控制的研究.

**常江** 1963年生. 1989年获应用电子学科硕士, 现在西北电力试验研究所工作, 从事电厂的现场过程监测及控制研究.

**吴立格** 1963年生. 1986年获兰州大学无线电物理专业学士. 现在西北电力试验研究所工作, 从事过程监测, 控制及自动化仪表的开发研究.

**程昌晋** 1968年生. 1988年获西安交通大学半导体物理专业学士, 现在西北电力试验研究所工作. 从事过程控制及信息管理系统的研究.

## 第一届全球华人智能控制与智能自动化大会 征文通知

第一届全球华人智能控制与智能自动化大会将于1993年8月26~30日在北京召开. 大会由清华大学、中国自动化学会和中国人工智能学会等单位主办. 会议的主题为智能控制与智能自动化的理论、方法和应用. 现将有关征文事宜通知如下:

### 一、征文范围:

1、智能系统; 2、控制·变结构控制·模糊控制·自适应控制·学习控制·专家控制·递阶控制·集散控制·集成智能控制·其他形式的控制; 3、控制理论和系统理论; 4、自治控制系统和容错控制系统; 5、故障检测、分离和诊断; 6、实时控制中的人工智能; 7、神经网络在建模、辨识和控制中的应用; 8、机器人控制; 9、制造系统; 10、信息处理和信息系统; 11、调度、规划、管理和决策系统; 12、计算机辅助分析和CAD; 13、智能控制器, 传感器和执行机构; 14、智能元件和仪表; 15、实现技术和应用; 16、其他有关课题.

凡属上述主题范围的研究成果, 并且尚未在其他学术会议或学术刊物发表过, 同时也未投交其他学术会议或刊物评审的论文, 均可投交本届大会.

二、大会语言: 中文(主), 英文(辅).

三、投稿截止日期: 1993年3月22日寄到.

四、发出通知日期: 1993年4月20日前发出.

五、大会秘书处地址: 北京清华大学自动化系CWCICIA'93秘书处 邮政编码: 100084 电话: (86) 1-2552451-2421 传真: (86) 1-2568184.

北京清华大学自动化系CWCICIA'93秘书处