

# 关于控制系统计算机辅助设计的研究进展

张红卫 叶庆凯

(北京大学力学与工程科学系·北京,100871)

**摘要:** 本文概括综述了控制系统计算机辅助设计 CACSD 的形成及研究进展情况,介绍了在国际和国内控制领域具有影响的一些 CACSD 软件,它们被分成 MATLAB-Based 和 non-MATLAB 两大类型,分析了 CACSD 的发展趋势——面向对象设计和开放系统。

**关键词:** 控制系统计算机辅助设计; 面向对象程序开发技术; 软件重用; 图形用户界面

## 1 引言

控制系统计算机辅助设计(Computer Aided Control System Design,简称 CACSD),是最近二十几年随着计算机技术的发展而发展起来的一个新学科.CACSD 专用于研究控制系统的建模、分析、设计与仿真.CACSD 因其与控制理论、控制系统紧密相连,利用不断吸取的计算机技术的新成果,加速设计过程、优化设计结果,在控制理论的研究和教学、控制系统工程设计中发挥着着重大的作用,占据着举足轻重的地位,愈来愈显示其强大的生命力,已成为控制理论研究必不可少的工具.CACSD 已引起世界各国控制界的普遍重视,开展了一系列专门的研究,取得了卓著的成效,北美西欧各大学都在使用 CACSD 软件进行教学和科研.CACSD 学术组织陆续成立,CACSD 学术会议不断开展,如国际自动控制联盟(IFAC)自 1979 年开始每三年举行一次 CACSD 专题学术大会<sup>[1-6]</sup>,为 CACSD 设立了交流与探讨的论坛,并成立 IFAC Working Group on CACSD Software;IEEE 也成立了专门的组织(IEEE Control Systems Society Technical Committee on CACSD),并从 1982 年开始每两年召开一次 CACSD 学术会议<sup>[7]</sup>,以加强 CACSD 的交流。

CACSD 的主要应用场合为:理论研究(Research)、教学(Education)、工业生产(Industry)<sup>[8]</sup>.科研用 CACSD 软件侧重各种数学过程,提供各种数学分析结果以便进行理论上的分析验证和推论;教学 CACSD 软件重点在于控制原理的直观示意与演示,控制问题的解题示范、指导、与检验;工程设计用 CACSD 软件则除包括各种数学过程外,还强调工程可实现性、计算机与外界控制机构的接口能力以及控制信号的数值准确性和时间准确性。

CACSD(见图 1)与通常所说的广泛应用于其它各个领域的计算机辅助设计(Computer Aided Design, CAD)有本质的区别.CAD 主要用于需要大量数学计算和强大绘图能力的设计过程,如日常所熟知的机械零部件设计、建筑、服装设计等.相比之下,CACSD 虽也强调数学计算能力与绘图能力,但是与 CAD 的内容不

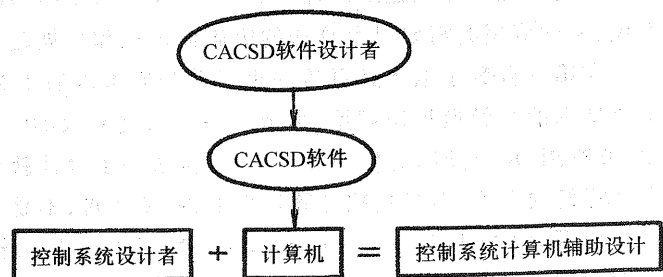


图 1 CACSD 示意图

同,有其自身独有的特点:

A) 控制系统的分析设计过程所涉及的大量数学计算远比其它 CAD 复杂深奥,比如几乎涉及线性代数全部内容,不仅需要吸取应用数学的成果,还需要对算法进行专门的研究。

B) CACSD 在绘图方面,并不如其它领域 CAD 那样追求物体内外结构轮廓上的尺寸与光影效果上的逼真模拟,而是强调工程数据的可视化,即通过各种曲线、色彩明度提供数据场信息,以供控制系统的分析、设计使用。

C) 控制理论相对其它学科发展较快,新思想新理论新方法层出不穷,CACSD 的扩充与更新应能与之相适应,同步发展,否则会延误新理论的诞生、传授和推广应用。

对 CACSD 的研究主要集中在以下几个方面:

算法(Algorithms)	环境(Environments)
计算机技术(Computer Technology)	人工智能(Artificial Intelligence)
绘图(Graphics)	相关课题(Related Topics)
软件包(Packages)	

经过研究与实践,控制理论工作者总结出评价一个 CACSD 软件包的三条基本标准<sup>[9,10]</sup>:

i) 是否具有良好的人机界面。

人机界面是计算机进行通讯的媒介,关系到人如何命令系统、输入数据,系统又如何向操作者提交信息、输出数据,良好的人机界面,是一个功能全面、易扩展、算法有效的 CACSD 软件最终能为人所接受的必要前提,它能保证使人愿意使用甚至乐于使用。

ii) 功能是否全面、是否易于扩展。

一个 CACSD 软件的功能应尽量全面,否则,为完成一项特定的设计可能会被迫选择几种具有不同功能的软件联合使用,因不同的软件往往具有不同的人机界面、不同的功能、不同的数据管理方式等,无法保证使用上的连续性,而给分析设计设置了重重障碍,带来设计上的效率低下,甚至使设计终止。另一方面,对于功能不全面的软件,如果易于对其进行扩展,就可以避免以上功能不全而导致的使用不便,使无法进行的设计成为可能:由于使用场合的灵活性、复杂性、以及经济上的原因,CACSD 软件的可扩展性成为至关重要的问题。

iii) 算法是否有效。

算法的有效性指的是问题良态、算法数值稳定且收敛,甚至还有算法实现程序占用内存数和执行的速度<sup>[11]</sup>。算法是设计正确性、有效性的保证。

## 2 CACSD 形成的历史背景

控制系统计算机辅助设计形成于 60 年代末 70 年代初,是伴随着计算机技术、控制理论的发展、实际应用的需要以及算法的突破而形成和发展起来的。

在第一台数字电子计算机问世以前和问世以后不久,控制系统的建模、分析、设计、仿真,主要依据的是经典控制理论,形成了一套行之有效的工程化设计方法,如根轨迹图、奈魁斯特图、波特图、尼克斯图的使用等,只靠试探法手工设计就可以满足控制系统分析设计的需要,无需计算机的介入,而且初期计算机性能差,编程难,不易交互,只用来处理数值计算问题,比如,数字仿真,CSMP(Continuous Systems Modeling Program)是最早的仿真软件之一<sup>[12]</sup>。50 年代中期,航天技术导致了称为现代控制理论的状态空间法的产生和发展,它不仅特别适于各种空间问题,更重要的是现代控制理论是以线性空间和矩阵理论为基础对控制系统进行的定量分析与设计,能够借助计算机进行必要的运算,空间问题中分析设计的计算量很大,且随着系统的阶数呈几何级数上升,有了计算机的参与,才使人工难以完成的运算得以进行<sup>[13]</sup>。60 年代

大型机批处理运作方式使如频率响应、时间响应、根轨迹、仿真等运算成为可能,世界各地各院所都有自己编写的各种各样的运算程序<sup>[14]</sup>。欧美逐渐形成可联合使用的各种算法子程序库如 IBM'S Scientific Subroutine Package, SSP, 它们几乎没有软件可移植性、可兼容性及可重用性,数据难以通用,这时也没有任何商用软件。70 年代中期, LINPACK 与 EISPACK 从所有算法子程序库中脱颖而出,其算法可靠,成为其它数值求解的基础程序,也用作控制问题计算机数值求解子程序库。Swiss Federal Institute of Technology 在 Cellier 及 Rinvall 带领下专门成立了 Program Information Center (PIC), 他们在子程序库的基础上,加以有交互能力的人机界面,使庞大的子程序库的使用者不必了解子程序是如何编写如何调用的就可以有效地工作,开发了早期的 CACSD 软件 INTOPS<sup>[15]</sup>, INTOPS 在教学中取得了显著的效果。Rosenbrock H. H. 于 1974 年在他的著作《Computer-Aided Control System Design》中明确提出了 CACSD 的概念。

70 年代随着主机(Mainframe)终端访问的实现,开始出现各种交互综合功能软件用于一次完成控制系统分析设计和仿真等不同任务,专用于控制问题的商用软件大量涌现,这些软件一般规模很大,难以修改和扩充,控制系统设计者不得不亲自编写自己需要的专用软件,而软件的编写是件艰巨的工作。

### 3 CACSD 软件国内外发展概况

70 年代后期出现的交互 CACSD 软件比当时流行的子程序库显示出不可比拟的优越性,但由于种种原因,它们并未得到控制理论工作者的普遍使用<sup>[16]</sup>,更不能为工业生产服务,这些原因包括<sup>[17]</sup>:

- A) 它们大多数是为范围极为有限的少数用户所使用的并为特殊用途而设计。
  - B) 这些软件的用户界面(即人机界面)非常原始,基本为问答式或菜单式,使用效率低。问题格式难以格式化。
  - C) 对软件的使用者而言,这些软件自成体系,几乎没有任何支持软件扩展的机制。
  - D) 软件潜在的数值算法存在问题不可靠。
  - E) 绘图软件十分依赖计算机硬件,缺乏可移植性。
- 算法子程序库一经编写成功, CACSD 的重点就成为如何有效的使用这些算法子程序库,即如何编写用户界面。

1980 年, Moler 于 LUND Institute of Technology 召开的关于控制系统数值计算的学术会议上正式公开宣布了矩阵数值计算软件 MATLAB<sup>[18]</sup>的开发成功,它由 FORTRAN 语言编制。MATLAB 的问世在控制界产生了巨大的影响。Moler 称它为 Software Laboratory for Matrix Analysis, 专用于矩阵线性代数,它完全类似于 IBM 的 APL 语言,却较之简单明了,使设计者不必使用 FORTRAN 就可以编写具有与 MATLAB 相同界面、相同算法子程序库的 CACSD 软件, MATLAB 的算法子程序库来源于 LINPACK<sup>[19]</sup>和 EISPACK<sup>[20]</sup>。许多 CACSD 软件正是利用这两个算法子程序库建立起来的,所以 MATLAB 立刻被许多大学所采用,在控制界被当作 CACSD 软件的基石,用于开发各种 CACSD 软件,五年间就开发了几种 CACSD 软件包<sup>[21~24]</sup>(见表 1)和语言<sup>[25,26]</sup>,它们统称为 MATLAB-Based 的软件,如 CTRL-C, MATRIXx, PRO-MATLAB。PRO-MATLAB 还第一次引入了 Toolbox 的概念。这些 MATLAB-Based 软件易读、易懂、易升级、易维护,它们通常除了扩充 MATLAB 原有同类命令以外,还增加一些控制系统设计和绘图所需要的函数和命令。

表 1 部分 Matlab-Driven 控制系统计算机辅助设计软件系统

软件名称	开发地点、时间	开发者
MATRIX <sub>x</sub>	Integrated Systems, Inc., USA, 1984	Shah, S. et al.
CTRL-C	Systems Control, Inc., USA, 1984	Little, J. N. et al.
IMPACT	SWISS Federal Institute of Tech., 1983	Rimvall, M. et al.
CONTROL. lab	University of New Mexico, USA, 1985	Jamshidi, M. et al.
PRO-MATLAB	Math Works, Inc., USA., 1985	Little J. N. et al.
MATLAB-SC	Philips Research Lab. Germany, 1985	Vanbegin, M.

一般认为 MATRIX<sub>x</sub> 是第一个 MATLAB-Based 商用软件; CONTROL. lab 在估计和滤波方面最具优势; PC-MATLAB 为 MATLAB 的 PC 升级版本, 用 C 语言编写。

MATLAB 的成功在于其开放性, 它宛如提供了直观的矩阵线性代数算法子程序的语言模块库, 使设计者可以任意组合拼接成自己专用的程序。它的主要问题如 Rimvall 所述: 数据结构单一(复矩阵), 不适合处理频域问题和非线性问题。

与此同时, 许多不使用 MATLAB 编写的(non-MATLAB)CACSD 软件包相继研制成功, 其中比较有影响的几个如表 2 所列, 还有很多优秀的 CACSD 软件包在各地使用, 只是没有公开, 它们基本上是用 FORTRAN 或 C 编制的, 具有一定界面、一定扩展能力的多功能组合 CACSD 软件包, 如中国的 CADCS。

表 2 部分 non-Matlab 控制系统计算机辅助设计软件系统

软件名称	开发地点、时间	开发者
KEDDC	University of Bochum, Germany, 1979	Unbehauen, H. and Schmid, Chr.
LUND	LUND Inst. Technology, Sweden, 1978	Astrom, K. J. and Elmqvist, H.
L-A-S	University of Illinois, USA, 1980	Bingulac, S. et al.
TIMDOM	University of New Mexico, 1983	Jamshidi, M. et al.
CC	California Inst. Technology, USA, 1984	Thompson, P. M.
TRIP	Delft University of Technology, the Netherlands, 1985	P. P. J. Van den Bosch
WCDS	University of Waterloo, Canada, 1986	Aplevich, J. D.
CATPAC	Philips Laboratories, Germany, 1986	Buenz, D.
CADCS	中国, 1991	国家自然科学基金赞助

国内 CACSD 领域的工作开展较西方晚了近十年, 许多院所建立了自己特殊用途的 CACSD 软件<sup>[9]</sup>并经受了理论和实践的考验, 在 1983 年~1988 年和 1988 年~1991 年先后两次联手开发了两个版本的大型多功能 CACSD 软件: CCSCAD (China Control System Computer-Aided Design) (第一版) 与 CADCS (Computer-Aided Design in Control System of China) (第二版)。CADCS 软件系统为用 C 语言开发的多功能 CACSD 软件包, 按设计功能共分为 16 个子系统, 全部 16 个子系统具有统一的界面, 统一的管理方式, 统一的子程序库, 可在选单、友好选单、命令、宏四种模式下工作<sup>[27]</sup>, 并可随时扩展增加新的子系统, 算法可靠。

80 年代中期, 专家系统的加入使 CACSD 有了新的发展, Taylor, Frederick, MacFarlane 是最早提出将专家系统用于 CACSD 的<sup>[28~30]</sup>, 目的是在软件既有功能的前提下, 使用户免除记忆命令和命令格式、寻找设计路径、评估设计结果和记录设计过程的麻烦, 根据与用户的交互, 指导用户输入数据、导引设计路径、输出设计结果、分析评价设计结果、提交设计文档。

CACSD 的直观和快捷使很多大学都使用了 CACSD 软件进行教学和科学研究, 成为控制系统研究不可缺少的工具。

## 4 目前 CACSD 软件尚存在的问题

如上所述,目前 CACSD 软件基本上可划分为两大类:MATLAB-Based(如 MATRIX<sub>x</sub>)和 non-MATLAB(如 CADSC). 这些 CACSD 软件的软件构思都局限于其开发时计算机技术、控制理论和算法的发展的平均水平,特别是计算机技术,而更新改造一个 CACSD 软件的低效率一直是困扰 CACSD 软件开发者的一个最突出的问题,这也是所有学科计算机软件所面临的一个问题,它严重影响了 CACSD 软件的发展进程,导致软件界面的落后、控制系统设计功能的落后,跟不上控制理论和算法的发展. 造成这种局面的原因是软件设计一直沿用的是面向过程的方法,面向过程设计不支持软件修改和插入,它是一种围绕软件功能展开的链式软件结构,是一种自上而下的瀑布式设计方法,软件的更新改造往往只意味着软件全盘推倒重来,旧有软件几乎无法继承和利用,需要投入大量的人力、物力,一个大型多功能 CACSD 软件甚至需要上百人工作几年才能最后完成. CACSD 的另一个难以解决的问题是判定一个算法有效性的充要条件是什么.

## 5 CACSD 的发展趋势

CACSD 的发展经历了从算法子程序到独立的多功能应用程序的过程,现在的发展趋势为:从独立的多功能应用程序过渡到设计编程语言、集成设计环境. 过去使用的名词 CACSD 也逐渐为 CACSE(Computer-Aided Control Systems Engineering)所代替<sup>[16]</sup>.

CACSD 软件结构的发展方向为开放系统(Open System)和面向对象方法(Object-Oriented Methods)<sup>[31]</sup>. MATLAB 成为专用编程语言(专用于矩阵线性代数)的典范,它的语言使它具有开放性,用户可以方便地编制自己的软件工具箱(ToolBoxes),但其语言集合本身、数据结构是难以改变的. 面向对象方法能够解决软件继承的难题,面向对象<sup>[32]</sup>程序模块能使 CACSD 软件成为本质上的开放系统(设计者可以定制系统——根据自己的需要方便地修改扩充已有的软件).

在 CACSD 软件用户界面方面,可视化图形界面(Visual Graphic User Interface)代表着发展的方向<sup>[33]</sup>,Microsoft Windows 是目前最有影响的可视化环境. 图形界面使输入输出更加多样化、形象化. 使输入简化为:将呈现在用户眼前绝大多数可用的选项功能中进行简单的选取,就像在可见工具库中选择工具,用户不必懂得很复杂的计算机技术,也无需记住繁多的关键字,只要简单地从显示器上选择工具并开始工作即可,图形界面能最大限度地满足计算机永无止境的高适用性工具库的要求;图形界面使输出的各种形式同时分别在各个窗口中同步显示,不断满足各种各样的需要. 总之,输入输出的操作会越来越简化,而输入输出的信息量却会成千上万倍的剧增.

## 6 结束语

展望未来,面向对象方法可望使一种专用于 CACSD 的语言问世,它能像 MATLAB 一样方便地编写各种矩阵线性代数软件,方便的编写各种 CACSD 软件,而不必要求一语言的使用者具有计算机专业知识,同时,软件设计者又能方便地不断更新改造这一语言及其环境,使之满足对 CACSD 不断增长的各方面的需要.

## 参 考 文 献

1. Cuenod, M.. Computer design of control systems. 1st IFAC Symposium on Computer Aided Control System Design, Zurich, 1979

- 2 Leininger, G. G. . Computer aided design of multivariable technological systems. 2nd IFAC Symposium on Computer Aided Control System Design, West Lafayette, USA, 1982
- 3 Hansen, N. E. and Larsen, M. . Computer aided design control and engineering systems. 3rd IFAC Symposium on Computer Aided Control System Design, Lyngby, Denmark, 1985
- 4 Computer aided design in control systems. 4th IFAC Symposium on Computer Aided Control System Design, Beijing, China, 1988
- 5 Computer aided design in control systems. 5th IFAC Symposium on Computer Aided Control System Design, Swansea, UK, 1991
- 6 Mattsson, Sven Erik (Ed. ) Gray, John O. (Ed. ), Cellier, Francois E. (Ed. ). Proceedings of the IEEE/IFAC Joint Symposium on Computer-Aided Control System Design, Tucson, AZ, USA, 1994
- 7 Proceedings of the IEEE Control System Society 3rd Symposium on Computer-Aided Control System Design(CACSD). Arlington, VA, September, 1986
- 8 Rosenbrock, H. H. . Computer-aided control system design. New York: Academic Press, 1974
- 9 熊光楞, 戴冠中, 韩京清. 控制系统计算机辅助设计软件. 信息与控制, 1982, 11(6): 3-10
- 10 Barker, H. A. et al. . The making of EXCES-A software engineering perspective. IFAC Symposium on Computer Aided in Control Systems, Swansea, UK, 1991
- 11 叶庆凯. 控制系统计算机辅助设计. 北京: 北京大学出版社, 1990, 21-32
- 12 Cellier, F. E. and Rinvall, C. M. . Computer-aided control system design: techniques and tools, in systems modeling and computer simulation. Kheir, N. A. , ed. , New York: Marcel and Dekker, 1988
- 13 庞国仲等. 多变量控制系统实践. 合肥: 中国科技大学出版社, 1990, 292-332
- 14 Melsa, J. L. and Jones, S. K. . Computer program for computational assistance in the study of linear control theory. New York: McGraw Hill, 1973
- 15 Agathoklis, P. and Cellier, F. E. et al. . INTOPS, Educational aspects of using computer-aided design in automatic control. Proceedings of the IFAC Symposium on Computer-Aided Design, Zurich, Switzerland, 1979
- 16 Cellier, F. E. , Schooley, L. C. , Sundareshan, M. K. and Zeigler, B. P. . Computer-aided design of intelligent controllers: challenge of the nineties, in computer-aided control systems engineering. Jamshidi, M. , Herget, C. J. (eds. ), 1992
- 17 Rinvall, M. . Interactive environments for CACSD software. IFAC Symposium on CACSD, Beijing, 1988
- 18 Moler, C. B. . MATLAB users' guide. Dept. of Electr. & Comp. Engr. , University of New Mexico, Albuquerque, 1980
- 19 Dongarra, J. J. , Moler, C. B. , Bunch, J. R. and Stewart, G. W. . LINPACK-Users' Guide. SIAM, Philadelphia, 1979
- 20 Smith, B. T. et al. . Matrix eigensystem routines-Eispack guide. 2nd ed. , Lecture Notes in Computer Science, Vol. 6, New York: Springer-Verlag, 1976
- 21 Systems Control Technology, Inc. . CTRL-C, a language for the computer-aided desing of multivariable control systems. User's Guide, Palo Alto, Calif. , 1985
- 22 Integrated Systems, Inc. . MATRIX<sub>x</sub> User's Guide, MATRIX<sub>x</sub> Reference Guide, MATRIX<sub>x</sub> Training Guide, Command Summary and On-Line Help. Santa, Clara, Calif. , 1984
- 23 Mathworks, Inc. . The student edition of MATLAB for MS-DOS or Macintosh computers. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N. J. , 1992
- 24 Vanbegin, M. and Dooren, P. Van. MATLEB-SC, Technical Note N168. Philips Research Laboratories, Bosvoorde, Belgium, 1985
- 25 Rinvall, C. M. . Man-Machine Interfaces and Implementational Issues in Computer-Aided Control System Design. Ph. D. Dissertation, Diss. ETH No 8200, Swiss Federal Institute of Technology, ETH Zurich, Switzerland, 1986
- 26 Gavel, D. T. and Herget, C. J. . The M Language—an interactive tool for manipulating matrices and matrix ordinary differential equations. Internal Report, Signal and Image Processing Research Group, Lawrence Livermore National Laboratory, University of California, Livermore, Calif. , 1984
- 27 CADSC 软件系统用户手册. 1991
- 28 Taylor, J. H. , Frederick, D. K. and MacFarlane. A. G. J. . A second-generation software plan for CACSD. Abstr, IEEE Control System Society Symp. On CACSD, MA, USA, 1983

- 29 Taylor, J. H. and Frederick, D. K. . An expert system architecture for computer aided control engineering. Proceedings of the IEEE, December, 1984
- 30 Grantham K. H. Pang. Knowledge-based control system design. Jamshidi, M. and Herget, C. J. (eds. ), Recent Advances in Computer-Aided Control Systems Engineering, ELSEVIER, 1992
- 31 Barker, H. A. . Open environments and object-oriented methods for computer-aided control system design. Control Engineering Practice, 1995, 3(3): 347—356
- 32 Booch, G. . Object-oriented design with applications. Benjamin/Cummings, Redwood City, Calif. , 1991
- 33 Proc. Graphics Interface '92. Vancouver, Ganada, May, 1992

## On Advances of Computer Aided Control System Design

ZHANG Hongwei and YE Qingkai

(Mechanic and Engineering Science Department, Peking University • Beijing, 100871, PRC)

**Abstract:** In the paper, an overview of development of CACSD is presented. Several CACSD packages is briefly described, MATLAB-Based and non-MATLAB, and trend towards the application of object-oriented method and developing open systems is pointed out.

**Key words:** computer aided control system design; object-oriented developing; software reuse; graphic user interface

### 本文作者简介

**张红卫** 女, 1963年生. 北京大学力学与工程科学系博士生. 研究方向为控制系统计算机辅助设计, 1988年于哈尔滨工业大学精密仪器系取得硕士学位, 致力于工业自动控制系统与装置的理论及其相关技术的研究, 研究兴趣涉及鲁棒控制, 模糊控制, 智能控制等.

**叶庆凯** 1942年生. 北京大学力学与工程科学系教授、博士生导师. 曾赴 UMIST 做研究工作, 从事优化、控制系统计算机辅助设计的研究与其软件的开发, 并参加了 CAD/CSC 的开发工作, 研究兴趣涉及鲁棒控制, 模糊控制和智能控制等等.