

用于控制系统计算机辅助设计的 专家系统

熊光楞
(清华大学)

杨泰澄
(同济大学)

摘 要

本文对用于控制系统计算机辅助设计的专家系统的发展作了简要的综述,并给出了作者对有关的问题的一些看法.

一、引 言

近年来,在控制系统计算机辅助设计(CACSD, Computer-Aided Control System Design)领域内,国外的研究重点已从编制具有各种复杂计算功能的软件包转向创建一个功能全面的、为进行控制系统分析、综合与设计的环境^[1,2].例如,英国 UMIST 控制系统中心 1986 年开始的一个研究计划中的 CACSD Environment^[1]除了包括主要的数值计算的仿真工具、线性系统设计工具、非线性系统设计工具、辨识工具、最优化程序以及综合工具之外,还包含了人-机接口、文件组织、数据库管理、文档系统以及正文和图形输入/输出等非数值计算的部分.此外,一个比 CACSD 更广泛的概念 CACE (Computer-Aided Control Engineering)^[2]也被引用,以更好地说明 CACSD 的历史和发展.根据 Taylor 和 Frederick^[2]的定义,计算机辅助设计需要解决的控制工程任务包含以下几个方面:

- (1) 建立被控对象的模型,
- (2) 确定被控对象模型的特征,
- (3) 为使被控对象更便于控制要对它作某些修正,例如增加传感器,
- (4) 对设计问题中的各子问题进行形式化,
- (5) 检查这些设计问题是否提得适当,特别是要确定对已知的控制对象设计要求是否能实现,有哪些限制条件,
- (6) 执行合适的设计程序,
- (7) 如果必要的话,要预先形成设计的折衷方案,
- (8) 对设计进行验证,
- (9) 对最终设计提供一份完整的设计文档,
- (10) 实现最终设计.

根据 CACE 的要求, CACSD 的发展可分为三个阶段,第一阶段是从六十年代到七十年代初由单一或几个计算程序组成的 CAD 软件,从七十年代开始至今的第二阶段以功能齐全的软件包为其特征. 近年来, CACSD 的发展又进入了第三阶段,具有智能性质的专家系统被应用于 CACSD. 本文第二部分对用于 CACSD 的专家系统的发展进行简要的综述,第三部分将讨论用于 CACSD 的专家系统的功能及结构,第四部分给出一个实例.

二、用于 CACSD 的专家系统的发展历史

1. 问题的提出

在使用和发展第二代 CACSD 软件包的同时,人们逐渐发现一些问题,例如:

(1) 当一位工程师面临一个实际的控制工程问题时,他不仅需要能进行各种数值计算的软件包,还需要知识和经验,以完成上面所列的各项任务.

(2) 在仅考虑上面所列第六项任务——控制器的理论设计的情况下,由于控制理论已经提供了并正在不断提供各种各样的设计方法,正确地选择合适的设计方法也需要知识和经验.

(3) 即使在使用某一特定的设计方法时,也需要知识和经验来执行某种试凑过程. 在使用奈魁斯特阵列^[3]方法时,获得对角优势 (Diagonal dominance) 的过程就是一个很好的例子.

(4) 控制理论及其应用是一个很广泛的领域,即使是一个在这个领域工作多年的理论工作者或从事实际工作的工程师,也不可能具备控制工程所需的全面的知识和经验. 对于一个初学者,更需要知识和经验的引导.

(5) 虽然软件包都设计得尽可能方便用户,但熟悉特定格式的指令,输入输出格式以及很好地运用特定的软件包仍需一定的学习时间.

为了解决上述问题并提供出一个更进一步的 CACE 环境,除了需要能进行数值计算的软件外,还需要能提供知识和经验并帮助进行推理的软件. 虽然在目前的软件包中可添加一些文字内容给使用者,在提供知识和经验方面给以某种帮助,但是,为了更好地组织这些知识和经验,使之容易修改、添加及应用,并能提供某种程度的智能,专家系统被引入 CACE 环境.

2. CACSD 专家系统的研究情况及发展历史

CACSD 专家系统是八十年代初才提出的一个研究课题. 它几乎同时在 CACSD 的各个领域如建模,仿真,设计及实现等方面开展起来,并吸引了大量的研究人员. 在建模与仿真领域,1983年 H. de Swaan Arons 首先在“Mathematics and Computers in Simulation”发表了“在仿真领域中的专家系统”^[4]. 论文介绍了如何利用专家系统进行模型结构特征化的工作,并给出了一个应用专家系统建立弹簧振动系统模型的实例. 继而在1984年, Aström 指导他的学生进行了有关专家系统用于系统辨识方面的研究^[5,6]. 该项工作是在由 Aström 领导的研究小组完成的辨识软件包 IDPAC 基础上加入专家系统,以便指导用户进行实验设计及模型阶次的确定. 此后 Kerckhoffs, E. J. H., Vans-

teenkiste, G. C., Shannon, R. E., O'Keefe. R. 等^[7,8,9,10]相继发表了关于专家系统与仿真的论文,阐述了专家系统与仿真的关系,仿真专家系统的分类及实现。到目前为止,已出现了不少辅助建模与仿真的专家系统,如辅助用户建立工业过程模型的知识库接口,辅助用户选择仿真方法的专家系统等等。

在设计领域, Taylor, J. H., Frederick, D. K., James, J. R., Aström, K. J., Birdwell, J. D. 先后(1983年—1984年)发表了关于在控制系统辅助设计软件包中加入专家系统的论文。1984年, Taylor (美国通用电气公司)及 Frederick (美国 Rensselaer Polytechnic 学院)发表了“An Expert System Architecture for Computer-Aided Control Engineering”一文^[2]。该文详尽的论述了 CACE 的概念,论证了专家系统用于 CACSD 的必要性及发展这样的专家系统的基本构想并提出了用于控制系统设计的专家系统的体系结构。稍后,主要由 Frederick 指导的一位博士研究生 James, J. R. 做出了一个用于超前-滞后网络设计的专家系统^[11,12]。1985年 Tennessee 大学的 Birdwell 等人研究了在 CACSD 软件包中应用专家系统的技术问题及使用环境,并研制成了具有专家系统支持的 LQG 软件包^[13]。

1985年, Trankle 等人研究了用于多变量自适应控制的实时专家系统^[14]。稍后,他们又发表了关于 CACSD 专家系统的结构的论文^[15]。他们建议采用二级结构,上面一级处理系统设计的总策略,并给出许多由下一级处理的具体的设计目标,这些目标由下一级去完成。

另外, Aström 及 Jones 等人最近还研究了发展专家系统来指导控制器的物理实现,特别是在工业界广泛应用的 PID 调节器的现场整定问题^[16,17]。

还有一些类似及有关的研究工作不在此一一列举,在此特别值得提出的是英国剑桥大学以 MacFarlane 为首的小组所做的工作。以 MacFarlane 为主在七十年代发展起来的 characteristic locus^[18] 设计方法实质上是一种带有试凑性质的频率域设计方法。近年来,他们在此基础上又提出了一些新的设计方法^[19],并提出了多变量控制系统的系统化设计方法,以最大限度地减少设计过程中的试凑因素。为了更好地将专家的经验计算机化,用专家系统的形式反映出来,他们在人与计算机的关系方面作了很多基础性的研究工作^[20]。在此基础上,他们发展了用于多变量系统的系统化设计的专家系统,并有一本专著即将出版^[21]。

另外,英国 UMIST 控制系统中心也于 1986 年制定了一个发展用于 CACSD 的专家系统的研究计划,它包括:

(1) 针对一个功能较为齐全的多变量系统设计软件包 CSS, 发展一个专家系统以帮助用户更好地使用 CSS 软件包,并提供一些设计指导。

(2) 类似于前述的剑桥的工作,但主要基于逆奈魁斯特阵列设计方法,发展一套系统化的多变量系统设计方法及相应的专家系统。

(3) 发展一个提供知识和经验的大的专家系统与“超级”软件包计划^[4]配套以提供一个先进的 CACSD 环境。

在我国,由国家自然科学基金资助,自从 1984 年开始,组织了全国十四个高等院校及研究所进行 CACSD 软件包的研制。该软件包由 18 个功能子包组成,包括: 系统辨识、

时间序列分析建模,多变量多项式矩阵分析与综合, LQG 控制,多变量频域法及状态空间法设计,系统仿真及模型处理等. 整个软件包的设计采用了模块化层次结构. 各子包既可独立安装运行,又可合成为一个完整的软件包联合运行,各子包之间的数据通讯利用数据文件实现. 该软件包已于 1986 年通过国家鉴定,它属于第二代 CACSD 软件包,但在个别子包中已尝试开发了方法选择专家系统^[22]. 1987 年,国家自然科学基金再次资助这一课题,其中,研制一套 CACSD 专家系统也已列入研究计划.

三、用于 CACSD 的专家系统的功能及结构

1. 用于 CACSD 的专家系统的功能

专家系统是一种软件系统,它用来辅助人们解决要求高水平的经验、推理及启发性的问题. 这类问题通常比较复杂,范围较宽,控制系统设计就属于这一类问题.

一个完整的 CACSD 专家系统应具备以下功能:

- (1) 辅助设计者建立控制对象的数学模型,并将它转换成设计时所要求的形式;
- (2) 辅助设计者确定设计指标和设计时的限制条件;
- (3) 辅助设计者根据对象模型及设计要求,选择合适的设计方法(包括确定控制器的结构、形式及设计算法);
- (4) 进行设计;
- (5) 辅助设计者对设计结果进行分析,确定是否要选用其它设计方法或修改指标及限制条件;
- (6) 向用户提交完整的设计文档;
- (7) 辅助设计者用硬件或软件来实现已设计好的控制器,并进行检验.

由于 CACSD 专家系统目前尚处于研究阶段,大部分已研制成功的 CACSD 专家系统仅具有其中的某些功能,如: 辅助建模专家系统,辅助选择设计方法并进行具体设计的专家系统,辅助选择仿真方法并进行仿真实验的专家系统等.

2. 用于 CACSD 的专家系统分析

专家系统是求解问题的计算机系统,在特定问题范围内,它能达到与人类专家相当的水平. 专家系统与传统程序在结构上和研究过程方面有不少区别,传统程序强调程序指令,而专家系统则强调如何查询和组织知识. 研制专家系统的一个主要问题就是如何描述和使用专家知识. 一个典型的专家系统主要由三部分组成: 知识库、推理机及用户接口,如图 1 所示.

知识库将存放一系列陈述性知识(如解决问题的特殊事实和事件的当前状态等)及领域知识(系统要解决的特殊问题的专门知识). 推理机则是一套应用知识从而做出决策的控制程序. 用户接口完成与用户的交互,包括用户向系统输入信息,系统向用户提问或进行解释等.

有许多种知识表示的方法,如: 逻辑的知识表示方法,过程表示法,语义网知识表示法,产生式规则及框架的知识表示等. 在用于 CACSD 的专家系统中,使用较为广泛的知识表示方法是: 用产生式规则及过程形式来描述领域知识,而以框架形式来描述陈述性

知识。由于产生式是以规则形式出现的,所以由它们构成的知识集合常为规则集,而陈述性知识一般用来描述事实,因此,由它组成的集合常称为综合数据库或事实库。

推理是由一个或多个互有联系的判断合乎逻辑地推出另一个新的判断。在控制策略的控制下,依据推理网络,采用相应的推理方式,运用综合数据库中的事实和规则集中的规则,得出相应的各种结论。对一个专家系统来讲,其执行的结果如何,主要取决于该系统所具备的知识数量及其构造,而不是所采用的推理机制。但是好的推理机制却可以大大缩短推理的过程与时间。一般来讲,选择什么样的推理方法和系统中知识的表示方法及推理目标有直接关系。

有以下几种常用的推理方法

- 前向链

如果解是从初始数据和条件向目标或结论驱动,这种推理方法就称为前向推理,或称为前向链(有时也称数据驱动法或条件驱动法)。

在这种推理过程中,控制程序重复地检查规则的前提是否在数据库中;如果一个规则被检验适用,则会产生新的事实,由此可能会引起其它紧跟着的或已通过的规则的应用。

- 后向链

如果需要的结论或目标状态已知,但导向结论的路径未知,那么就需用后向链,或称为结论驱动或目标驱动。其具体推理过程是:首先将有结论证明的假设加以形式化,然后找出其结论与假设相匹配的所有规则。如果控制程序能在综合数据库中找到这些规则的前提,那么就可以直接产生所需要的事件(即假设被证明是真);如果假设不能直接得到证明,那么控制程序将把不在事实库中的前提变成欲证明的新假设。重复上述步骤,直到它被证明为止。

- 问题化简法

通常,一个复杂的问题可分解为若干个可独立求解的子问题,将各个子问题的解组合起来,有时就提供了整个问题的解。这一特点常常促使我们采用一些启发式的规则将问题化简,即使探索空间缩小。一般来讲,这种方法适用于几个互不相关的问题解决后,便能达到目标的那些问题,而且它常常和前向链或后向链结合起来使用。

在用于 CACSD 的专家系统中,上述三种方法都会用到。比如,辅助建模一般采用后向链,即从一组候选模型中利用目标匹配的方法来获得一个参数化模型^[4];设计方法选择则一般采用前向链,即根据设计要求,利用前提匹配,获得一个可用的设计方法序列,而具体设计过程则常用后向链。

3. 用于 CACSD 的专家系统的结构

从已发表的论文来看,CACSD 专家系统就其结构来讲大致有三种类型:

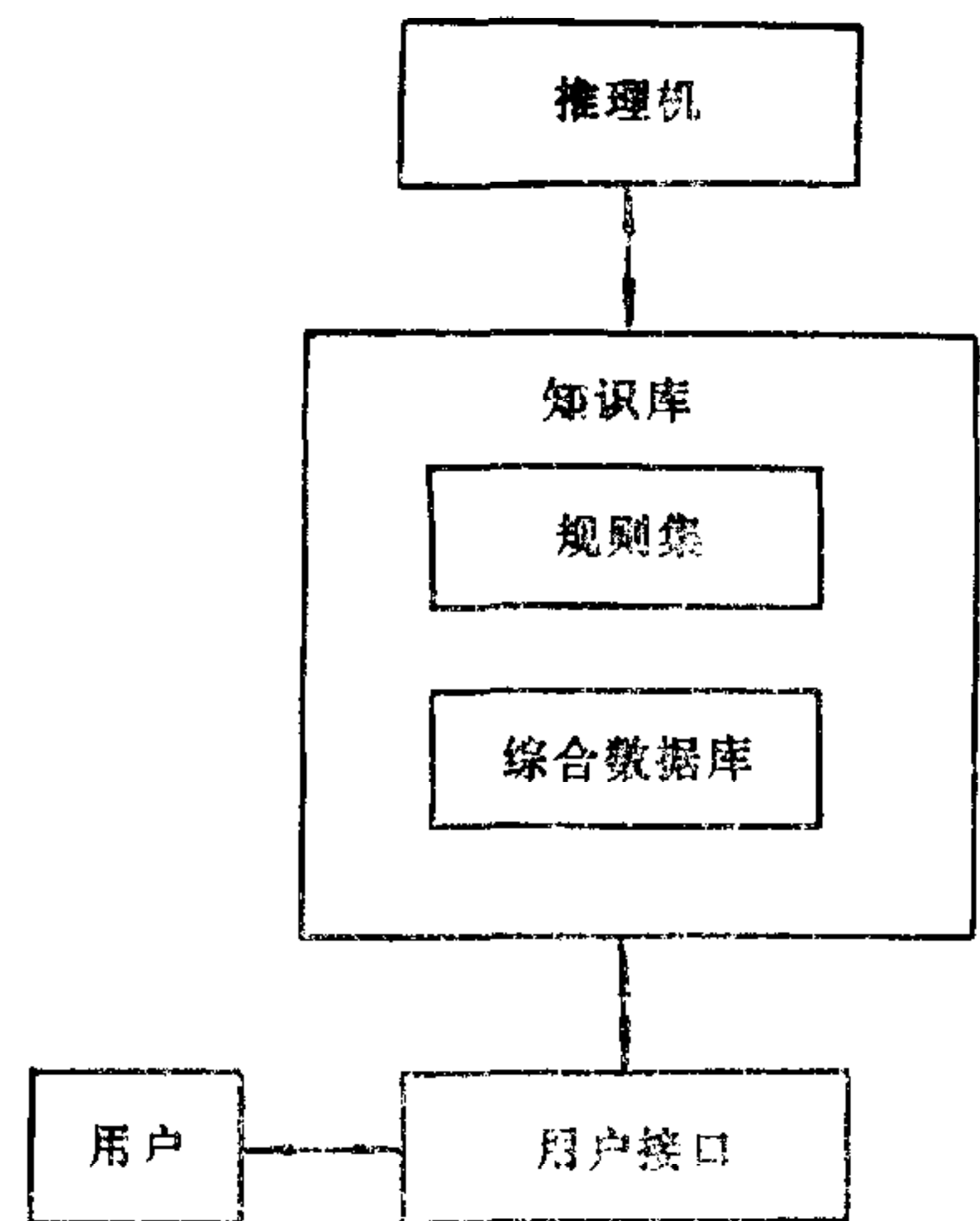


图1 专家系统的一般构成

(1) 智能前端

如图 2 所示, 用户不直接与主要用于数值计算的 CACSD 软件包发生联系。用户只要将数学模型、性能指标等输入给专家系统, 专家系统自行用合适的指令启动并运行 CACSD 软件包, 然后从 CACSD 软件包接收运算结果, 并作必要的试凑, 最后将结果告诉用户, 同时提供一份完整的设计报告。

(2) 咨询式系统

另一种 CACSD 专家系统的基本结构可用图 3 表示。

由图可知, 在这种系统中, CACSD 软件包主要是由用户进行操作。用户将设计要求告诉专家系统, 专家系统则帮助用户“出主意”, 告诉用户应选择什么样的模型结构, 正确的设计步骤, 为什么要这样做, 应该用哪个软件包, 哪条指令(选择什么方法)。然后, 由用户去操作 CACSD 软件包, CACSD 软件包的设计结果一般只与用户交互, 必要时才输入给专家系统, 最后专家系统将提供一份完整的设计报告。图中, 用虚线表示了专家系统与 CACSD 软件包之间的关系。它表明, 在这种系统中, 只有在一定特殊情况, 专家系统才直接去操作 CACSD 软件包。

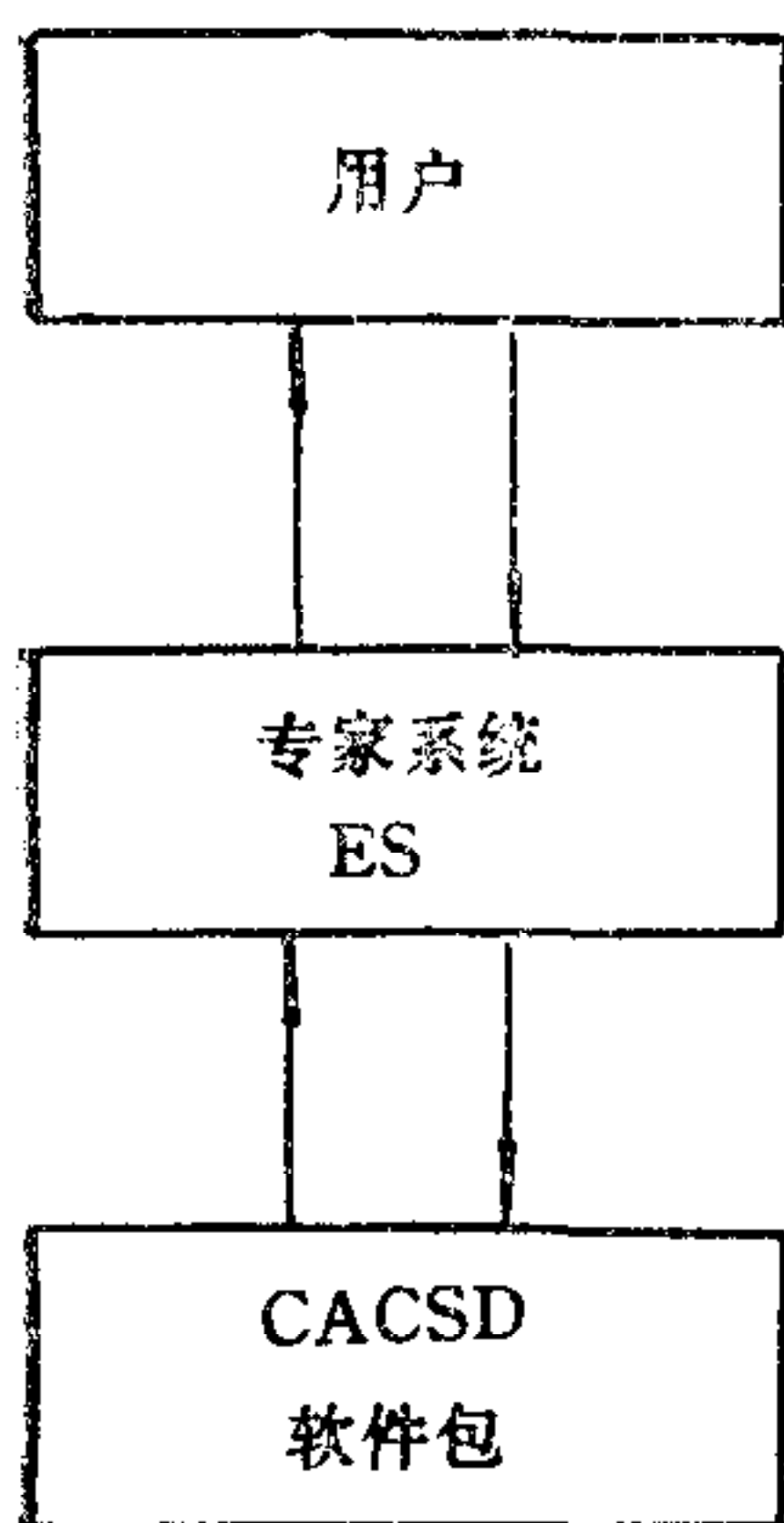


图 2 智能前端

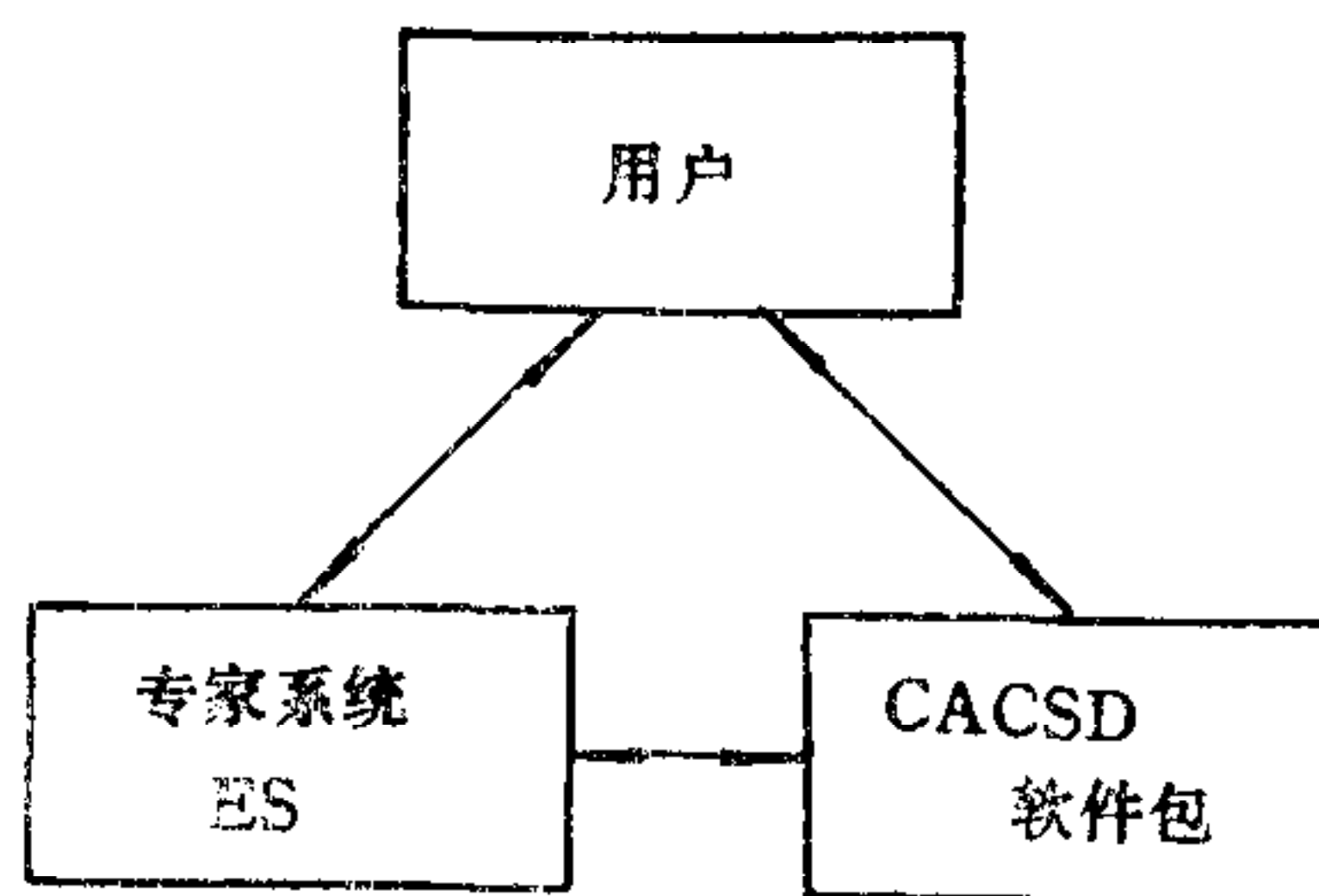


图 3 咨询式系统

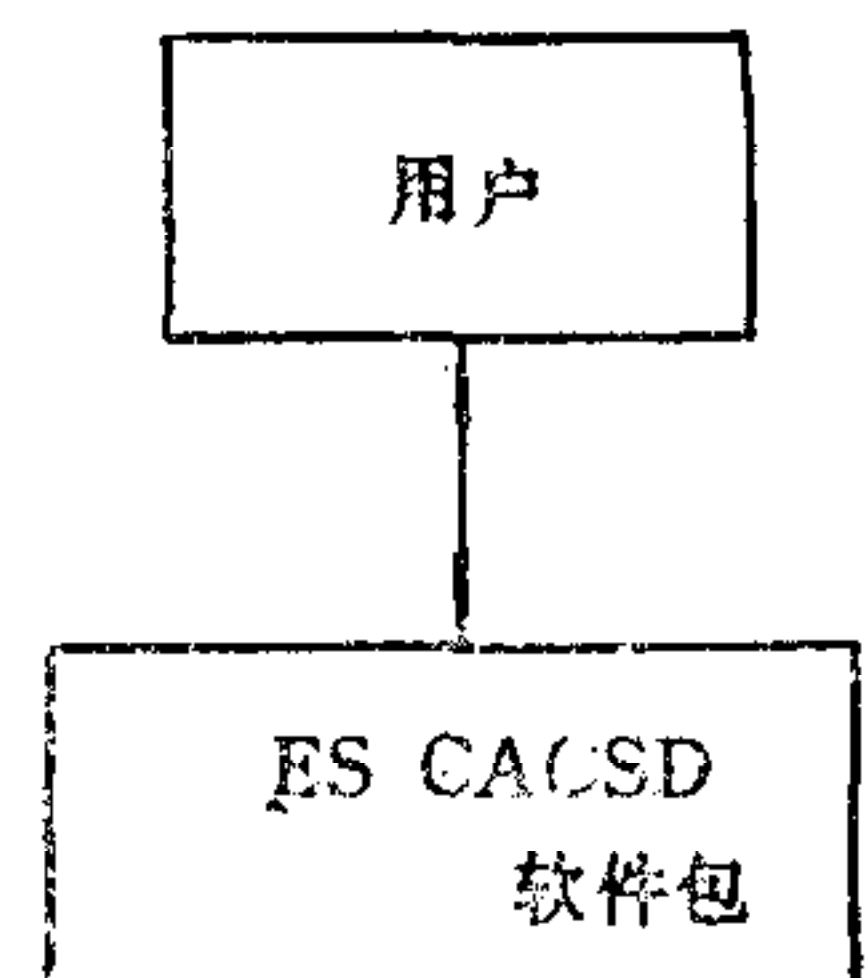


图 4 紧密结合的结构形式

由于发展图 2 所示之专家系统所需的工作量较大, 因此对于比较大的 CACSD 软件包, 普遍采用图 3 所示的结构形式(没有虚线部分)。由于控制理论及设计方法的不断发展, CACSD 软件包及专家系统都需要不断地更新, 添加新的内容, 在这一点上图 3 的结构形式也比图 2 之形式优越。

(3) 紧密结合的结构形式

除掉图 2 及图 3 所表示之结构形式外, 还有一种结构形式, 如图 4 所示。在这种结构中, 专家系统与 CACSD 软件包紧密结合, 专家系统被嵌入到 CACSD 软件包中, 甚至已成为 CACSD 软件包的一部分, 比如文(22)介绍的仿真方法选择的专家系统就属于这种结构。

以上讨论的三种结构, 除掉应用场合不同外, 还与实现 CACSD 专家系统之途径有很密切的关系。通常, 主要完成数值计算的 CACSD 软件包是利用数值计算的程序设计语言, 如 FORTRAN、C、Pascal 等来编制的; 而专家系统, 由于主要是完成符号处理, 则

常利用 LISP 或者 Prolog 等语言来编程。在一般的计算机上执行 LISP 或 Prolog 语言编写的程序通常比较慢。两种语言(指 LISP 或 Prolog 与 FORTRAN 或 C)之间的数据交换一般只能通过数据文件来实现。如果 LISP 或 Prolog 语言是解释型的,则当从专家系统转向数值计算软件包时,要首先退回到操作系统,再运行数值计算软件包,这些都会降低处理速度。因此,如果采用图 3 所示之结构,由于专家系统与 CACSD 软件包之间交互较少,则上述影响较小。有时为了提高处理速度,可以将专家系统与 CACSD 软件包分别在两台计算机上运行。其中一台为符号处理机,比如 Symbolics LISP 机,它可以快速进行符号处理,因此可以将专家系统安装在这台机器上;而另一台为普通的计算机, CACSD 软件包就运行在这台机器上。当所设计的系统要求专家推理与数值计算之间频繁交互时,就应考虑选择第三种结构——紧密结合。这时为加快处理速度,专家系统也常用 FORTRAN 或 C 语言来编写。

四、实例简介

为了进一步说明用于 CACSD 的专家系统,本节介绍由 Taylor 及 Frederick 提出的 CACSD 专家系统的体系结构^[2]。整个系统如图 5 所示。

由图可知,该系统从结构上看属于第一类:智能前端。用户与专家系统交互,然后由专家系统调用 CACSD 软件包中的分析程序及设计程序,最后获得最终设计。该系统的知识库由两部分组成:

- (1) 六个规则集 RB1—RB6,
- (2) 综合数据库(问题框及解框)。

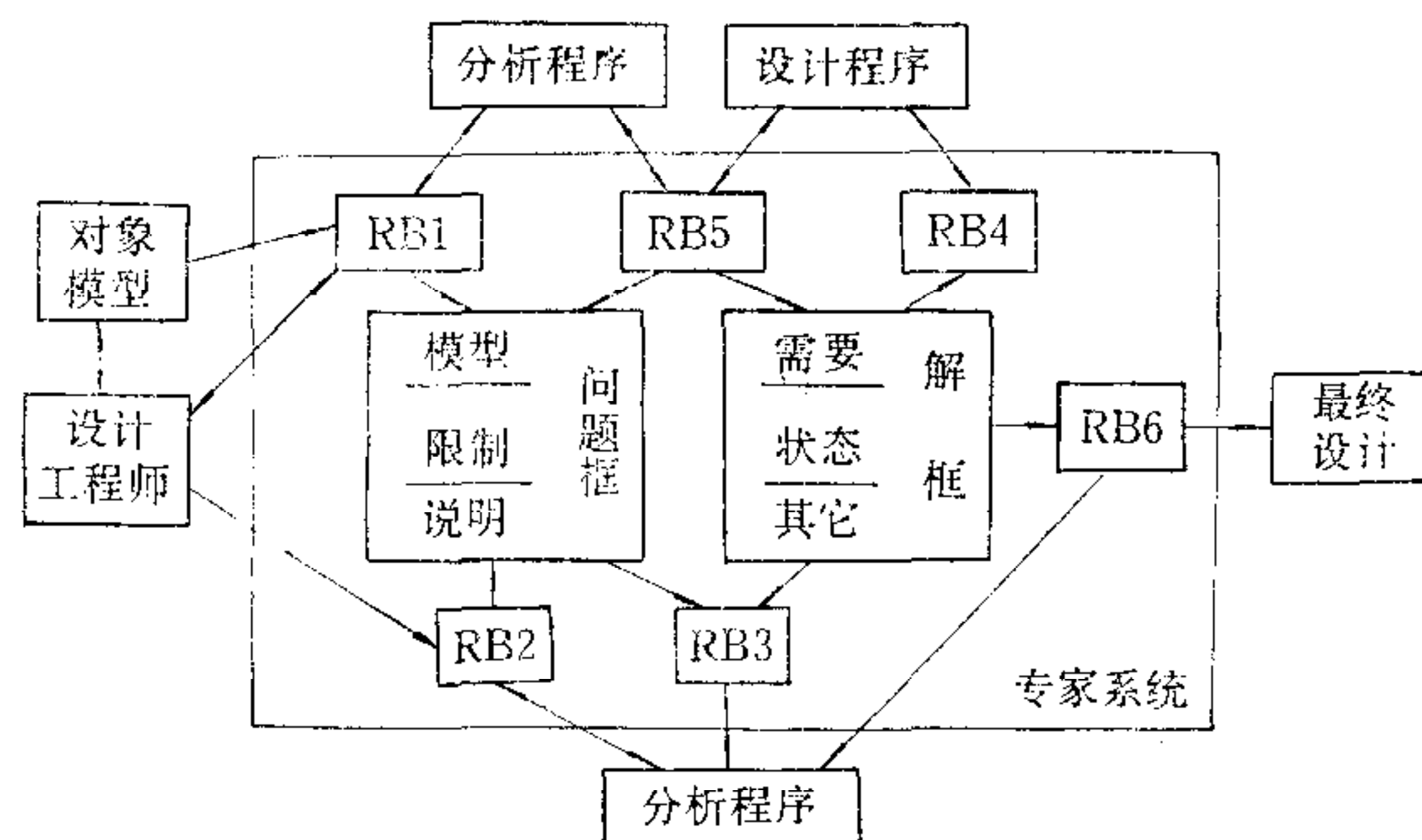


图 5 用于 CACSD 的专家系统的体系结构

1. 问题框

它是用来描述要设计的问题,包括:控制对象的模型特征(线性、非线性,什么非线性?能线性化吗?稳定、不稳定等),限制条件(控制器实现的限制,阶次,集中,分散等),设计要求详细说明(频带,超调量,上升时间,极点位置等)。

问题框是通过 RB1 及 RB2 来形成的,并在设计过程中通过 RB5 来进行修改。其中 RB1 用来建立问题框中有关模型及限制条件的内容,而 RB2 则用来建立问题框中的详细说明部分。在形成框架过程中除询问用户外,常要求调用分析程序(如计算零极点,

线性化,计算根轨迹等)。

2. 解框

它是用来描述要进行那些设计及怎样进行设计,即如何得到所要求的解。包括: 设计需要(低频增益,增益储备,相位储备等),状态(频带是否满足,静态误差是否满足等)及其它(设计方法等)。

首先通过 RB3 实现问题框与解框之间的交互,比如: 问题框给定一个稳态误差说明, RB3 首先估计低频增益,然后决定是否要增加开环增益。若要增加,则通过 RB4 启动一个设计程序。每次执行设计程序,解框中的事实将通过 RB5 进行刷新。如果原定要求不能满足,则可能要求修改问题框,这时 RB5 将调用分析程序对问题框进行修改。

当设计要求全部满足后,系统通过 RB6 对它进行全面的检验并完成物理实现,由此获得最终设计。这个过程也会要求调用分析程序。

五、结 论

(1) 在使用与发展第二代 CACSD 软件包的过程中,人们逐渐发现为使 CACSD 软件包被广大工程技术人员所掌握,推广其应用。除了需要能进行数值计算的软件外,还需要能提供知识和经验,并帮助推理的软件。因此提出了研制第三代 CACSD 软件包的要求,它的主要特征是使将专家系统用于 CACSD 软件包。

(2) 从八十年代初开始,国外在系统建模与仿真,控制器设计及实现等方面均开展了大量有关建立专家系统的研究,并开发出了一些原型,但还没有软件商品出售。国外(如英国剑桥大学及 UMIST 控制系统中心)的一些研究计划值得引起国内控制界的注意。

(3) 关于编写专家系统的语言,目前普遍采用 LISP 或 Prolog;但是在某些场合,比如紧密结合的结构,仍然可考虑采用 Fortran、Pascal 或 C 语言来编写。

(4) 用于 CACSD 的专家系统中的知识表示,目前主要采用产生式,过程形式及框架形式,其推理方式则是前向链与后向链结合使用;在体系上则采用多规则集及多框架结构,如图 5 所示。

参 考 文 献

- [1] Munro, N., Edmunds, J. M., Environment for Control System Theory Analysis and Synthesis, U. M. I. S. T SERC sponsord project report, 1986.
- [2] Taylor, J. H., Frederick, D. K., An Expert System Architecture for Computer-Aided Control Engineering, *IEEE Proc.*, 72, 1984.
- [3] Rosenbrock, H. H., Computer-Aided Control System Design, Academic Press, London, 1974.
- [4] De Swaan Arons, H., Expert Systems in the Simulation Domain, Mathematics and Computers in Simulation XXV (1983).
- [5] Larsson, J. E., An Expert System Interface for IDPAC, Master Thesis, Lund Institute of Technology, Sweden, 1984.
- [6] Åström, K. J., et al., An Expert System Interface for IDPAC, Proc. of 2nd IEEE Control System Society Symposium on CACSD, 1985.
- [7] Kerckhoffs, E. J. H., Vansteenkiste, G. C., The Impact of Advanced Information Processing on Simulation —An Illustrative Review, *Simulation*, January, 1986.
- [8] Kerckhoffs, E. J. H., Vansteenkiste, G. C., AI-Aided Simulation, JSST International Conference, Tokyo,

- Japan, July, 1986.
- [9] O'Keefe, R., Simulation and Expert Systems—A Taxonomy and Some Examples, *Simulation*, January, 1986.
- [10] Shannon, R. E., Expert Systems and Simulation, *Simulation*, June, 1985.
- [11] James, J. R., Frederick, D. K., and Taylor, J. H., *The Use of Expert System Programming Techniques for The Design of Lead-Lag*, Cambridge, England, 1985.
- [12] James, J. R., Frederick, D. K., Taylor, J. H., An Expert System Architecture for Coping with Complexity in Computer-Aided Control Engineering, Proc. of 3rd IFAC/IFIP International Symposium on CADCE, Lengby, Denmark, 1985.
- [13] Birdwell, J. D., et al., Expert System Techniques in a Computer-Based Control System Analysis and Design Environment, *ibid*.
- [14] Trankle, T. L., Markosian, L. Z., An Expert System for Control System Design, IEE Conference, Control 85, Cambridge, England, 1985.
- [15] Trankle, T. L., et al., Expert System Architecture for Control System Design, Proc. of American Control Conference, Seattle, USA, 1986.
- [16] Åström, K. T., et al., Expert Control, *Automatica*, Vol. 22, No. 3, 1986.
- [17] Jones, A. H., Procter, B., Expert Systems for Tuning PID Controllers, Colloquium on The Use of Expert Systems in Control Engineering, London, March, 1987.
- [18] MacFarlane, A. G. J., Belletrutti, J. J., The Characteristic Locus Design Method, *Automatica*, Vol. 9, 575—588, 1973.
- [19] MacFarlane, A. G. J., Future Environments for Control Engineering, 10th IFAC World Conference, Munich, West Germany, July, 1987.
- [20] Boyle, J. M., Design Support Systems (Version 1), Cambridge Univ. Report, No. CVED/F-CAMS/TR 268, Dec. 1986.
- [21] Pang, G. K. H., MacFarlane, A. G. J., *An Expert Systems Approach to Computer-Aided Design of Multivariable Systems*, Springer-Verlag, 1987.
- [22] Xiong, G., Song, A., An Expert System for Dynamic System Simulation, *AI Applied To Simulation, Simulation Series*, Vol. 18, No. 1, 1986.

THE DEVELOPMENT OF EXPERT SYSTEMS FOR THE COMPUTER-AIDED CONTROL SYSTEM DESIGN

XIONG GUANGLING
(Tsinghua University)

YANG TAICHENG
(Tongji University)

ABSTRACT

This paper presents a brief survey with comments on the relevant issues. It is related to the development of expert systems for the computer-aided control system design.