基于混合系统模型的非线性系统最大可控不变集求解

李坚强[1,2] 房 敏[3] 裴海龙[2] 尹剑飞[1]

(深圳大学信息工程学院 深圳 518060)[1] (华南理工大学自动化科学与工程学院 广州 510641)[2]

(华南理工大学计算机科学与工程学院 广州 510641)[3]

摘 要 针对非线性系统线性化在状态约束下最优鲁棒控制求解问题,提出了一种基于混合系统的分段仿射系统(PWA)建模,通过多次优化迭代的方法求解系统的最大鲁棒控制不变集的方法,并求得不变集内的最优控制器,解决系统的状态约束问题。通过一个非线性系统实例进行建模、仿真,证明了本方法的可行性。

关键词 混合系统,最大鲁棒控制不变集,分段仿射系统

中图法分类号 TP27 **文献标识码** A

Maximal Robust Controlled Invariant Set of Nonlinear System Based on Hybrid Systems Model

LI Jian-qiang[1,2] FANG Min[3] PEI Hai-long[2] YIN Jian-fei[1]

(School of Information Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China)[1]

(Department of Automation, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)[2]

(Department of Computer, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)[3]

Abstract *To solve the robust control optimization problem of nonlinear system by states constraint, this paper pro*posed a method that obtains a maximal robust controlled invariant sets by optimal iteration method based on a piecewise affine system model (PWA). The optimization controller was computed to solve the problem of constraints. A nonlinear system example was modled and simulated, the result proves the validity of the method.

Keywords Hybrid systems, Maximal robust controlled invariant sets, Piecewise affine system

1 引言

混合系统研究是当今计算机领域与控制领域研究的一大热点。对于一些实际的如智能机器人的非线性系统,由于其复杂性,如十几阶的多阶强耦合系统[17],对其进行建模和求解,计算量将非常大,求解也非常困难,很难满足系统的实时性等要求。而基于多模型的混合系统分析设计是一种简洁有效的方法,考虑在不同的状态下对系统模型进行配平、简化和解耦,分别设计控制器,之后在各子系统之间设计优化切换策略。

混合系统是由连续变量动态系统 CVDS(Continuous Variable Dynamic Systems)和离散动态系统 DEDS(Discrete Event Dynamic Systems)相互混合、相互作用而形成的一类动态系统,广泛存在于工程实践中,如计算机控制系统、制造工业、机器人系统、现代飞行控制系统、汽车引擎系统等。由于混合系统的实用性,其近年来受到了控制和计算机领域学者的广泛关注,并取得了大量成果。John Lygeros 对混合系统的混合自动机建模、混合系统的分析与综合、可达集等几个方面进行了较为全面与基本的论述[1];Pei Hai-long 对于一类含过渡状态混合系统的稳定区域进行了研究[2]。

不变集理论主要是分析系统的状态是否满足状态的区域限制,能很好地分析与求解具有限制条件的控制系统,如分析一个闭环系统的状态轨迹在给定初始值时是否与限制条件相冲突。F. Blanchini 对于不变集的求解,椭圆体、多面体的不变集近似,系统不变集的可控性与控制量的求解做了较好的论述[3];而对于一种混合系统——分段仿射系统,Mats Jirstrand 对于不变集的计算[4],Li 对于混合系统的有效切换保证不变集的存在进行了研究[5];对于含有边界干扰的分段仿射系统,S. V. Rakovic 等人对系统的控制量进行了求解,同时对于系统的最大可控不变集进行了迭代算法的计算[6,8,9];通过模型预测控制的方法,使有限制条件的系统进入一个不变集,D. Q. Mayne, Albert Bemporad 等人对此进行了研究[7,10];Arthur Richards 则应用模型预测控制、不变集理论在飞行区域限制、路径规划上进行了研究。

在文献[22]方法的基础上,本文通过研究将非线性系统转换后的混合系统 PWA 模型,通过凸多面体的划分与优化迭代,求得有效的切换与控制量的设定,得到该类系统初始区域内的最大鲁棒可控不变集。

到稿日期:208-02-28 本文受国家自然科学基金(60374036)(60574004)(60736024),高校博士点基金(20040561031),广东省自然科学基金(7301315,7301329)资助。

李坚强(1980—),男,讲师,博士,主要研究方向为混合系统、嵌入式系统等,E-mail:lijq@szu.edu.cn;**房 敏**(1982—),女,硕士,主要研究方向为系统结构等;**裴海龙**(1965—),男,教授,博士生导师,主要研究方向为混合系统、嵌入式系统等;**尹剑飞**(1974—),男,副教授,博士,主要研究方向为软件工程。

2 非线性系统的混合系统 PWA 模型

考虑如下离散非线性系统，其一般形式可写为：

$$\begin{cases} x(k+1)=f(x,u,w) \\ y(k+1)=g(x(k),u(k),w) \end{cases} \tag{1}$$

其中，$x\in\mathbb{R}^n$，$u\in\mathbb{R}^m$，$y(k)\in\mathbb{R}^t$ 分别为状态变量、控制输入变量和输出向量，$w\in W$ 为有界的干扰。如同文献[22]中的方法，通过雅可比线性化，在平衡点处展开成泰勒级数，可得到混合系统的 PWA 模型，如式(2)所示：

$$\begin{aligned} x(k+1)&=A_i x(k)+B_i u(k)+f_i+w \\ y(k)&=C_i x(k)+D_i u(k)+g_i+w \end{aligned} \tag{2}$$

混合系统式(2)中，

$$\{i\,|\,i\in s\},\ s\triangleq\{0,1\cdots s-1\}, \tag{3}$$

i 为有限子系统数。式(2)满足 $x(t)\in\Omega_i$，$u\in U$，$w\in W$。非线性系统的在一定范围可以用混合系统式(2)的子系统来描述，而模型之间的切换条件则可以根据生产的工艺条件、系统需求等来确定。定义 M 为凸多面体的并集，如式(4)所示：

$$M=\bigcup_{i\in s}\Omega_i \tag{4}$$

其中，Ω_i 为凸多面体。

3 最大鲁棒可控不变集

3.1 不变集的定义

给定了一个集合 $M\subset Q\times X$ 和初始状态$(q_0,x_0)\in M$，对于系统(1)，尽管扰动的存在，寻求一种控制规律使得系统的轨迹都在集合 M 中。

定义 1(鲁棒不变集) 一个动态系统的鲁棒不变集 M 就是在存在有界干扰的情况下，一旦其状态进入状态区间 M 后将会永远留在该区间，满足 $x(0)\in M\rightarrow x(t)\in M, t>0$，$x(t)$ 是动态系统在时间 t 的子集，而 M 是状态空间的子集。

定义 2(鲁棒控制不变集) 一个动态系统的鲁棒控制不变集 M 就是系统仅当存在反馈控制 $u=h(x)$ 使得其状态进入该状态区间后会永远留在该区间，一个集合 M 为鲁棒控制不变集，如下成立：

$$x(0)\in M\rightarrow\exists u\in U: x(t)\in M, \forall w\in W$$

定义 2 对鲁棒控制不变集进行了定义，如果存在两个不变集，从定义 2 可以得出推论 1。

推论 1 两个鲁棒控制不变集的并集为鲁棒控制不变集。

要注意的是对于两个鲁棒控制不变集的交集不能做出相同的结论，即使是在不存在干扰的情况下。对于一个给定的动态系统，一个集合 M 是否为鲁棒控制不变集，可以通过一个著名的几何条件判定方法进行判断。

定理 1(不变集的几何判定) 一个集合 M 为鲁棒控制不变集的充要条件为 $M\subseteq\mathrm{Pre}(M)$，$\mathrm{Pre}(M)$ 为 M 的前向一步集合：

$$\mathrm{Pre}(M)\triangleq\{x_k\in R\,|\,\exists u_k\in U: x_{k+1}=f(x_k,u_k,w_k)\in M, \forall w_k\in W\} \tag{5}$$

证明：充分性证明，假设 $M\not\subseteq Pre(M)$，则在 M 中存在 x_k，而 x_k 不在 $\mathrm{Pre}(M)$ 中，$x_k\in M\backslash\mathrm{Pre}(M)$，因而 M 不是鲁棒控制不变集。

必要性证明，假设 M 不是鲁棒控制不变集，存在 $x_k\in M$，而得不到 $u_k\in U$ 使得 $x_{k+1}\in M$，则有 $x_k\in M$ 不是 $\mathrm{Pre}(M)$ 的元素。

从定理 1，一个集合是否为鲁棒控制不变集的判定可以总结如下：

1)计算 M 前向一步集合 $\mathrm{Pre}(M)$；

2)检测 $M\subseteq\mathrm{Pre}(M)$ 是否成立；

3)如果 $M\subseteq\mathrm{Pre}(M)$，则 M 为鲁棒控制不变集，如果 $M\not\subseteq\mathrm{Pre}(M)$，则 M 为非鲁棒控制不变集。

一般情况下，一个给定的集合 M 为非鲁棒控制不变集，因而就需要去寻找 M 中最大鲁棒控制不变集。

3.2 最大鲁棒可控不变集

定义 3(最大鲁棒控制不变集) 一个如式(1)所示的动态系统，集合 $M_\infty(X)$ 为集合 X 的最大鲁棒控制不变集的充要条件为：集合 $M_\infty(X)$ 为鲁棒控制不变集，$M_\infty(X)$ 包含了集合 X 中所有的鲁棒控制不变集。

由以上定义我们可以知道，如果集合 Φ 为 X 内的鲁棒控制不变集，则有以下关系：

$$\Phi\subset M_\infty(X)\subset X \tag{6}$$

从定义 3 可知，最大鲁棒控制不变集 $M_\infty(X)$ 是在存在边界限制干扰的情况下，包含了所有的鲁棒控制不变集，因而 $M_\infty(X)$ 的求解可以通过如下迭代算法来实现：

算法 1(最大鲁棒控制不变集的计算)

1)初始化：迭代步 $k=0$，不变集 $M_0=X_0$，X_0 为给定的初始域。

2)迭代计算：

$M_{k+1}=\Theta(M_k)$，

$\Theta(M_k)\triangleq\{x\in X\,|\,\exists u\in U$

$s.t.\ f(x,u,w)\in M_k, \forall w\in W\}$。

3)如果 $M_{k+1}=M_k$，则返回 $M_\infty(X)=M_k$；否则令 $k=k+1$，返回 2)步。

从算法 1，可以产生集合序列 M_k 满足 $M_{k+1}\subseteq M_k$，即满足了鲁棒控制不变集的判定条件，最终如果得到 $M_{k+1}=M_k$，算法停止于 k 步并得到 M_k 为最大鲁棒控制不变集；然而如果 k 步迭代后，如果 $M_k=\varnothing$，即可得到 $M_\infty(X)=\varnothing$。

4 混合系统最大鲁棒可控不变集

本小节将研究 PWA 模型混合系统(2)的最大鲁棒可控不变集求解问题，本文对最大鲁棒可控不变集的求解基于前向一步集的计算，并结合了混合系统的不变集求解的子系统区域分析，提出了含限定干扰的混合系统鲁棒最大可控不变集求解方法。

定理 2 如果给定混合系统(2)和 M 为凸多面体的并集，则式(5)描述的 $\mathrm{Pre}(M)$ 也为凸多面体的并集，得到式(7)：

$$\mathrm{Pre}(M)=\bigcup_{i\in s}\mathrm{Pre}(\Omega_i) \tag{7}$$

证明：

1)假设

$$x(k)\in\mathrm{Pre}(M)\Rightarrow\{\exists u_k\in U: x(k+1)\in M\}\Rightarrow\{x(k+1)\in\Omega_i, i\in s\}\Rightarrow\{\mathrm{Pre}(M)\subseteq\bigcup_{i\in s}\mathrm{Pre}(\Omega_i)\}。$$

2)假设

$$x(k)\in\bigcup_{i\in s}\mathrm{Pre}(\Omega_i)\Rightarrow\{\exists u_k\in U: x(k+1)\in\Omega_i, i\in s\}\xRightarrow{\Omega_i\subseteq M}\{x(k+1)\in M\}\Rightarrow\{x(k)\in\mathrm{Pre}(M)\}\Rightarrow\{\mathrm{Pre}(M)\supseteq\bigcup_{i\in s}\mathrm{Pre}(\Omega_i)\}$$

由 1、2，定理 2 得证。$M\sim W$ 经过庞特里亚金差值法

(Pontryagin difference)计算,$M\sim W$ 为凸多面体的并集,如式(8)所示:

$$M\sim W \triangleq \bigcup_{j=1}^{L} Z_j \tag{8}$$

由定理 2 可得,式(8)可转化为:

$$\mathrm{Pre}(M\sim W)=\bigcup_{j=1}^{L}\mathrm{Pre}(Z_j) \tag{9}$$

考虑 PWA 的各子系统区域$\{\{\Omega_i\}_{i=0}^{s-1}\}$,可得到:

$$\mathrm{Pre}(M\sim W)=\bigcup_{j=1}^{L}\bigcup_{i=0}^{s-1}\mathrm{Pre}_i(Z_j) \tag{10}$$

其中,$\mathrm{Pre}_i(Z_j)$如式(11)所示:

$$\mathrm{Pre}_i(Z_j)\triangleq\{x(k)\in\mathbb{R}^n \mid \exists u_k\in U, x(k+1)\in Z_j : x_k\in\Omega_i, x(k+1)=A_i x(k)+B_i x(k)\} \tag{11}$$

从式(8)至式(10)可知,每一步将需要计算 $s\times L$ 次前向一步集,引入鲁棒允许集概念。

定义 4[20](鲁棒允许集) 给定的集合 M 内的 k 步鲁棒允许集,为该集合内的状态在允许的干扰下,存在一定的控制规律在 k 步仍然保留在 M 内,式(3-10)成立:

$$C_{k+1}(M)\triangleq\{x\in\mathbb{R}^n \mid \exists u\in U=h_k(x_k),$$
$$s.t.\ f(x,u,w)\in C_k(M), \forall w\in W\}\cap C_k(M) \tag{12}$$

可得到:

$$C_k(M\sim W)=\bigcup_{j=1}^{L}\mathrm{Pre}(Z_j) \tag{13}$$

$$C_{k+1}(M)=\mathrm{Pre}(C_k(M))\cap C_{k+1}(M)$$
$$=\bigcup_{j=1}^{L}\bigcup_{i=0}^{s-1}\mathrm{Pre}_i(Z_j)\cap C_k(M) \tag{14}$$

从式(14)可计算出 k 步的鲁棒允许集 $C_k(M)$,$C_k(M)$可能为非凸集,也是凸多面体的并集。基于式(11-14)的推导,含有有界干扰的混合系统最大鲁棒可控不变集的计算归纳如算法 2。

算法 2(混合系统最大鲁棒可控不变集的计算)

1. 初始化:给出一个初始集合 $M,W,k=0$。

$$C_0(M)=\mathrm{Pre}_0(M)=M\sim W \tag{15}$$

2. 对 $C_i(M)$进行凸多面体划分:

$$C_k(M)\triangleq\bigcup_{j=1}^{L} Z_j \tag{16}$$

3. 迭代计算:

$$C_{k+1}(M)=\bigcup_{j=1}^{L}\bigcup_{i=0}^{s-1}\mathrm{Pre}_i(Z_j)\cap C_k(M) \tag{17}$$

4. 如果 $C_{k+1}=C_k$,则返回 $C_\infty(M)=C_k$;否则令 $k=k+1$,$C_k=C_k\sim W$ 返回步骤 2。

在算法 2,集合 C_k 一般情况下是凸多面体的集合表示,如果 $C_k=\emptyset$,即可得到 $C_\infty(M)=\emptyset$。根据算法 2,可以推出定理 3。

定理 3 假设 $C_0=M\sim W$,存在 $C_{k^*+1}=C_{k^*}$,$k^*\in\mathbb{N}$;则算法 2 停止且 $C_\infty(M)=C_k$。

对于一般混合系统,最大鲁棒可控不变集并非都是能够有限步计算得到,由子系统为线性时不变系统构成的混合系统或者边界限定的有限状态混合系统,算法的停止可以保证。

5 数值仿真

考虑如下非线性系统,其模型如下:

$$x_1(k+1)=-0.25x_2(k)+w$$
$$x_2(k+1)=x_1^2(k)+1.3x_2(k)+u(k)+w \tag{18}$$
$$y(k)=x_1(k)$$

系统的干扰 w 为有界干扰:

$$w=\{w \mid \|w\|_\infty\leqslant 0.1\} \tag{19}$$

系统的初始约束区域为 $x(k)\in[-3,3]\times[-12,12]$,且 $-1\leqslant u\leqslant 1$。在输出空间 $y=0,y=1$ 处可得到 2 个线性化模型:

$$\sigma_0: A_0=\begin{bmatrix}0 & -0.25\\ 0 & 1.3\end{bmatrix}, B_0=\begin{bmatrix}0\\1\end{bmatrix}, x_c=0, y\leqslant 0.5$$

$$\sigma_1: A_1=\begin{bmatrix}0 & -0.25\\ 2 & 1.3\end{bmatrix}, B_1=\begin{bmatrix}0\\1\end{bmatrix}, x_c=1, y\geqslant 0.5$$

对于由分段线性系统组成的 PWA 模型混合系统,使用算法 2 计算系统在区域内的最大可控不变集,设置最优控制参数 $Q=I,R=1$,到每个子系统最优控制的输入 $u_i=k_i x$,k_i 为 Riccati LQR 反馈控制器。通过 MPT 工具箱进行求解,在 181 秒迭代后,得到该系统的 416 个控制区域,如图 1 所示。

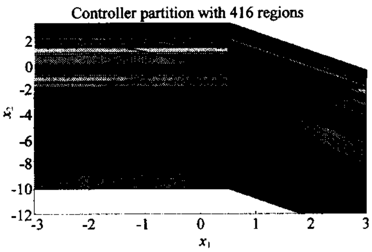

图 1 系统鲁棒控制器分区

从图 1 中可以看出,通过对非线性系统进行混合系统 PWA 建模后,通过混合整数规划方法可以有效地求出系统的最大鲁棒控制不变集,并得到最优控制器。

结束语 本文提出了一种基于混合系统模型的非线性系统最大鲁棒控制不变集的求法。首先利用了非线性系统进行混合系统 PWA 模型建模,通过多次优化迭代求出不变集,并求出了最优的控制输入与控制区域。从本文的仿真实例看,用本文的方法能够很好地求出一类非线性系统的最大可控不变集,并得到该区域的优化控制。

参考文献

[1] Lygeros J. Lecture Notes on Hybrid Systems[R]. Dept. of Electrical and Computer Engineering, University of Patras, 2-6/2/2004

[2] Pei Hai-Long, Krogh B H. Stability Regions for Systems with Mode Transition [A]//Proc. of ACC01[C]. 2001

[3] Blanchini F. Set Invariance in Control[J]. Automatica, 1999, 35: 1747-1767

[4] Jirstrand M. Invariant Sets for a Class of Hybrid Systems [A]//. IEEE, CDC98[C]. 1998

[5] Li Jianqiang, Pei Hai-Long. Efficient Transition for Invariant Set in a Class of Hybrid Systems [A]// The 6th International Conference on Control and Automation (ICCA2007)[C]. 2007

[6] Rakovic S V, Grieder P, Kvasnica M, et al. Computation of Invariant Sets for Piecewise Affine Discrete Time Systems Subject to Bounded Disturbances [A]// 43rd IEEE Conference on Decision and Control[C]. 2004

[7] Mayne D Q, Rawling J B, Rao C V, et al. Constrained Model Predictive Control: Stability and Optimality [J]. Automatica, 2000, 36: 789-814

[8] Rakovic S V, Kerrigan E C, Kouramas K I, et al. Invariant Approximations of the Minimal Robust Positively Invariant Set

[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2005, 50(3): 406-410

[9] Lin Hai, Antsaklis P J. Robust Invariant Control Synthesis for Discrete-Time Polytopic Uncertain Linear Hybrid Systems[A]//Proc. of ACC03[C]. 2003

[10] Bemporad A, Morari M. Control of Systems Integrating Logic, Dynamic, and Constraints [J]. Automatica, 1999, 35(3): 407-427

[11] 张聚. 混杂系统理论及在非线性系统中的应用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2005. 2

[12] Richards A, How J. Mixed-integer Programming for Control [A]//ACC[C]. 2005

[13] Bemporad A. Hrid Toolbox For Real-Time Applications. October 2006

[14] Grieder P, Kvasnica M, Baotic M, et al. Low complexity control of piecewise affine systems with stability guarantee. ACC. 2004

[15] Fletcher R, Leyffer S. Numerical Experience With Lower Bounds for MIQP Brand-and-Bound[R]. Dept. of Mathematics, University of Dundee, Scotland, U. K. SIAM J. Optim., submitted, 1995

[16] Torrisi F D, Bemporad A. HYSDEL 2.0-User Manual, 2002

[17] Wonham W M. Linear Multivariable Control: a Geometric Approach[M]. New York: Springer Verlag, 1985

[18] 胡一凡. 飞行机器人的建模和控制[D]. 广州: 华南理工大学, 2004

[19] 席裕庚, 王凡. 非线性系统预测控制的多模型方法[J]. 自动化学报, 1996, 22(4): 456-461

[20] Rakovic S, Grider P, Kvasnica M, et al. Computation of Invariant Sets for Piecewise Affine Discrete Systems Subjects to Bounded Disturbances[C]//CDC. 2004

[21] Bertsekas D P. Infinite-time Reachability of State-Space Regions by Using Feedback Control[J]. IEEE Transaction on Automatic Control, 1972, 17(5): 604-613

[22] 李坚强, 裴海龙. 一类非线性系统最大可控不变集求解[J]. 控制工程, 2009(2)

(上接第 150 页)

```
            connector tellerLoginConn  {top TLogin ;bottom TellerArt ;}
            connector customerLoginConn  {top CLogin ;bottom CustomerArt ;}
            connector managerLoginConn  { top Mlogin ;bottom ManagerArt ;}
            connector tellerTkConn {top TellerArt ;bottom TellerTk ;}
            connector customerTkConn {top CustomerArt ;bottom CustomerTk ;}
            connector managerTkConn { top ManagerArt; bottom managerTk ; }
            connector dispatchConn  {top BM ; bottom TM ;}
        }
      }
    }
```

图 20 银行客户业务管理系统的体系结构的 C2SADEL 描述

结束语 本文的主要贡献在于建立了体系结构元信息模型 MIM4RSA,系统地定义了支持重用的体系结构元信息。该模型也是一个具有良好的可扩展性的信息模型框架,我们可以针对不同的 ADL,来对该模型框架中的组成成分进行修改,以建立适应不同 ADL 的元信息模型。同时更重要的是,我们可以利用 MetaADL 将体系结构元信息描述出来,使得计算机可以处理这些元信息,为实现体系结构设计人员通过使用体系结构元信息,高效地重用软件体系结构奠定了良好的基础。

作为今后的工作,我们将不断完善 MIM4RSA 模型和 MetaADL,具体来说就是针对除了 C2SADEL 之外的其它 ADL,在元信息模型 MIMSA 中定义与这些 ADL 相关的体系结构元信息,相应地在 MetaADL 中定义支持描述这些元信息的语法成分;我们还需要开发一个工具,以支持体系结构设计人员通过操作元信息来实现软件体系结构重用。

参考文献

[1] Shaw M, Garlan D. Software Architecture: Perspectives on an Emerging Discipline[M]. Prentice Hall, 1996

[2] Mili H, Mili A, Yacoub S. Reuse-based Software Engineering: Techniques, Organization, and Controls. New York: Jonh Wiley & Sons, 2002

[3] Keller R K, Schauer R. Design Components: Towards Software Composition at the Design Level[C]//Proceedings of the 20th International Conference on Software Engineering (ICSE'98). New York: ACM Press, 1998: 302-311

[4] Mili H, Mili A, Yacoub S. Reuse-based Software Engineering: Techniques, Organization, and Controls. Jonh Wiley & Sons Ltd., 2001

[5] Medvidovic N, Taylor R N. A Classification and Comparison Framework for Software Architecture Description Languages [J]. IEEE Transactions on Software Engineering, 2000, 26(1): 70-93

[6] Maes P. Concepts and Experiments in Computational Reflection [C]//Proceedings of OOPSLA87, ACM SIGPLAN Notices. New York: ACM Press, 1987: 147-155

[7] Cazzola W, Savigni A, Sosio A, et al. Architectural reflection: Concepts, design, and evaluation[R]. RI-DSI 234-99. DSI, University degli Studi di Milano, May 1999

[8] Cazzola W, Savigni A, Sosio A, et al. Explicit Architecture and Architectural Reflection[C]//Proceedings of the 2nd International Workshop on Engineering Distributed Objects (EDO 2000), LNCS. Springer-Verlag, 2000

[9] Oreizy P, Medvidovic N, Taylor R N. Architecture-Based Runtime Software Evolution[C]//Proceedings of the 20th International Conference on Software Engineering (ICSE'98). New York: ACM Press, 1998: 177-186

[10] Dowling J, Cahill V. The K-Component Architecture Meta-Model for Self-Adaptive Software[C]//Proceedings of the Third International Conference on Metalevel Architectures and Separation of Crosscutting Concerns, Lecture Notes In Computer Science. Vol. 2192. London: Springer-Verlag, 2001: 81-88