+

+

[1]

[2,3]

ISSN 1000-9825, CODEN RUXUEW

E-mail: jos@iscas.ac.cn

*Journal of Software* , Vol.19, No.6, June 2008, pp.1328 −1339 <http://www.jos.org.cn>

DOI: 10.3724/SP.J.1001.2008.01328

© 2008 by *Journal of Software*. All rights reserved.

Tel/Fax: +86-10-62562563

软 件体系结构评估技术 张 莉 , 高 晖, 王守信

∗

( 北 京 航 空 航 天 大 学 软 件 工 程 研 究 所 , 北 京

100083)

**Software Architecture Evaluation**

ZHANG Li , GAO Hui, WANG Shou-Xin

(Software Engineering Institute, BeiHang University, Beijing 100083, China)

+ Corresponding author: E-mail: lily@buaa.edu.cn

**Zhang L, Gao H, Wang SX. Software architecture evaluation. *Journal of Software* , 2008,19(6):1328** −**1339.** <http://www.jos.org.cn/1000-9825/19/1328.htm>

**Abstract** : Software architecture evaluation is an important technology used to assure the quality of software products early in the software lifecycle. This paper classifies three types of software architecture evaluation methods: scenario-based, metric and prediction based, and ADL-based. Software architecture evaluation method characteristics (such as method goal, quality attribute, key technique) are then combined with these classifications to produce a comparison framework. This paper utilizes this framework to analyze various existing software architecture evaluation methods and point out problems which need to be resolved. Finally, potential research directions of software architecture evaluation methods are discussed.

**Key words**: software architecture; software architecture evaluation; software quality

摘

要:

作为在软件生命周期早期保障软件质量的重要手段之一, 软件体系结构评估技术是软件体系结构研究中

的一个重要组成部分.将现有的软件体系结构评估方法划分为 3 类:基于场景的评估方法、基于度量和预测的评估 方 法 以 及 特 定 软 件 体 系 结 构 描 述 语 言 的 评 估 方 法 . 按 照 软 件 体 系 结 构 评 估 技 术 的 评 价 框 架 , 分 别 从 评 估 方 法 的 目 标、质量属性、关键技术等方面对这 3 类方法的特点进行介绍和对比.最后分析了现有研究中存在的不足并进一步 探讨了软件体系结构评估技术的研究趋势.

关键词:

软件体系结构;软件体系结构评估;软件质量

中 图 法 分 类 号 : TP311

文 献 标 识 码 : A

软 件 体 系 结 构 本 质 上 并 不 是 一 个 全 新 的 概 念 , 早 在 20 世 纪 六 七 十 年 代 , Dijkstra 和 Parnas 等 人 对 软 件 设 计 基 本 原 则 的 研 究 就 是 对 软 件 体 系 结 构 的 最 初 认 识 . 自 20 世 纪 90 年 代 , Perry & Wolf 和 Garlan & Shaw 分 别 提 出 了 软 件 体 系 结 构 的 概 念 以 来 , 软 件 体 系 结 构 得 到 了 学 术 界 和 工 业 界 的 广 泛 重 视 . 虽 然 10 多 年 来 出 现 了 上 百 个 关 于 软 件 体 系 结 构 的 定 义 ( 详 见 CMU-SEI 网 站 的 收 集 ) , 但 是 在 以 下 方 面 的 认 识 是 一 致 的 : 1) 软 件 体 系 结 构 是 软 件 系 统 的 结 构 ( 或 组 织 ), 包 括 构 件 ( 组 成 元 素 ) 、构 件 的 外 显 特 性 和 构 件 之 间 的 关 系 ; 2) 软 件 体 系 结 构 是 软 件

∗

Supported by the Program for New Century Excellent Talents in University of China ( 新 世 纪 优 秀 人 才 支 持 计 划 ) ; the National

Basic Research Program of China under Grant No.2007CB310803 ( 国 家 重 点 基 础 研 究 发 展 计 划 ( 973)) Received 2006-10-02; Accepted 2007-06-29

[4]

[4]

[5]

[6] [7,8]

[9,10]

[11,12] [13,14]

[15]

[16,17]

张莉 等:软件体系结构评估技术

开 发 过 程 早 期 的 一 项 软 件 制 品 , 是 一 组 使 系 统 满 足 系 统 涉 众 ( stakeholder)功 能 和 非 功 能 需 求 的 设 计 决 策 .

1329

Pressman 在 他 的 书 中 这 样 写 道 “ 软 件 工 程 方 法 的 唯 一 目 标 是 : 生 产 高 质 量 的 软 件 ” . 软 件 质 量 从 软 件 工 程 的 诞 生 起 就 一 直 得 到 广 泛 关 注 , 但 是 人 们 对 软 件 质 量 的 认 识 却 在 发 生 变 化 , 其 内 涵 愈 加 丰 富 , 从 功 能 属 性 、 性 能 属 性 , 到 可 移 植 、 可 扩 展 、 易 用 、 易 维 护 、 安 全 、 可 靠 等 诸 多 非 功 能 质 量 属 性 ; 从 满 足 用 户 需 求 到 满 足 系 统 涉 众 的 需 求 . 如 何 在 一 个 系 统 中 平 衡 诸 多 属 性 ( 这 里 , 将 系 统 对 需 求 的 满 足 也 作 为 系 统 可 表 征 的 属 性 ) , 给 系 统 开 发 方 提 出 了 挑 战 . “ 缺 陷 放 大 模 型 ” 以 及 业 界 大 量 的 统 计 数 据 表 明 : 修 正 软 件 缺 陷 的 成 本 随 着 发 现 该 缺 陷 的 时 间 推 迟 而 增 长 , 而 且 50%~75% 的 缺 陷 是 设 计 阶 段 注 入 . 软 件 体 系 结 构 评 估 的 目 的 就 是 为 了 在 开 发 过 程 的 早 期 , 通 过 分 析 系 统 的 质 量 需 求 是 否 在 软 件 体 系 结 构 中 得 到 体 现 , 识 别 软 件 体 系 结 构 设 计 中 的 潜 在 风 险 , 预 测 系 统 质 量 属 性 , 并 辅 助 软 件 体 系 结 构 决 策 的 制 定 .

20 世 纪 90 年 代 以 来 , 软 件 体 系 结 构 的 评 估 技 术 一 直 是 研 究 的 热 点 问 题 . 软 件 体 系 结 构 的 评 估 技 术 不 断 出 现 , 一 些 方 法 已 经 比 较 成 熟 并 得 到 了 应 用 和 验 证 , 如 基 于 场 景 的 软 件 体 系 结 构 分 析 方 法 — — SAAM 、软 件 体 系 结 构 折 中 分 析 方 法 — — ATAM 、 利 用 软 件 性 能 工 程 SPE 对 软 件 体 系 结 构 进 行 评 估 的 PASA 方 法 、 软 件 体 系 结 构 层 次 可 维 护 性 预 测 方 法 — — ALMA 等 . 近 年 来 , 随 着 技 术 和 应 用 经 验 的 积 累 , 一 些 新 的 评 估 方 法 也 逐 渐 出 现 , 比 如 基 于 贝 叶 斯 信 念 网 的 软 件 体 系 结 构 评 估 方 法 、 软 件 体 系 结 构 度 量 方 法 等 .

本 文 的 主 要 目 的 就 是 系 统 和 全 面 地 分 析 软 件 体 系 结 构 评 估 方 面 的 研 究 , 并 分 析 其 发 展 趋 势 . 为 了 便 于 分 析 和 比 较 各 种 评 估 技 术 , 第 1 节 首 先 给 出 软 件 体 系 结 构 评 估 技 术 评 价 框 架 . 第 2 节 根 据 比 较 框 架 的 内 容 分 析 各 种 软 件 体 系 结 构 评 估 技 术 . 第 3 节 总 结 各 种 评 估 技 术 的 研 究 思 路 以 及 存 在 的 局 限 性 , 并 指 出 评 估 技 术 的 发 展 方 向 .

**1**

评 价 框 架简 介

为 了 系 统 地 对 各 种 软 件 体 系 结 构 评 估 技 术 进 行 说 明 和 比 较 , 需 要 一 个 可 操 作 、 全 面 的 评 价 框 架 . 在 对 软 件

体 系 结 构 评 估 技 术 的 分 析 和 调 查 方 面 , 下 面 两 个 工 作 是 非 常 重 要 并 且 具 有 参 考 价 值 的 : (1) Dobrica 和 Niemela 于 2002 年 首 次 提 出 了 对 软 件 体 系 结 构 分 析 方 法 进 行 刻 画 和 比 较 的 框 架 , 并 利 用 该 框 架 对 当 时 的 各 种 软 件 体 系 结 构 的 评 估 方 法 进 行 分 析 ; (2) Babar 等 人 于 2004 年 扩 展 和 细 化 了 Dobrica 的 框 架 , 详 细 描 述 了 框 架 中 各 个 元 素 , 使 分 析 更 加 具 有 可 操 作 性 , 并 在 此 基 础 上 分 析 和 比 较 了 各 种 基 于 场 景 的 评 估 方 法 . AliBarba 框 架 包 括 了 Dobrica 框 架 中 的 所 有 评 价 项 , 如 图 1 所 示 . 详 细 说 明 见 文 献 [ 15,16].

AliBarba framework

Maturity stage,

Definition of SA,

Process support,

Applicable project stage,

Support for non-technical

issues,

Tool support,

Resources required

Dobrica framework

Specific method’s goal, Evaluation techniques, Quality attributed, Resuability of an existent knowledge base, SA description, Stakholders ’ involvement, Method ’s activities, Method validation

Fig.1 The AliBarba ’s and Dobirca ’s software architecture comparing framework

图 1 AliBarba 框 架 与 Dobrica 框 架 的 比 较

随 着 软 件 体 系 结 构 评 估 技 术 的 发 展 , 除 了 基 于 场 景 的 评 估 方 法 , 还 出 现 了 基 于 度 量 - 预 测 的 评 估 方 法 和 基 于 某 种 特 定 软 件 体 系 结 构 描 述 语 言 ( ADL) 的 分 析 方 法 . 为 了 更 好 地 比 较 和 分 析 不 同 的 软 件 体 系 结 构 评 估 技 术 , 本 文 对 Dobrica 和 AliBarba 两 种 评 价 框 架 中 的 评 价 项 进 行 了 适 当 的 调 整 和 扩 充 . 表 1 给 出 了 本 文 使 用 的 评 价 框 架 以 及 对 各 评 价 项 的 简 要 说 明 .

[6]

[6]

[ 5 ]

[18] [19] [6]

[ 2 0 ] [ 6 ]

[9,10] [21] [22]

[23]

[24]

1330 *Journal of Software* 软件学报 Vol.19, No.6, June 2008

**Table 1** The Comparing framework for the software architecture evaluation methods

表 **1**

软 件 体 系 结 构 评 估 方 法 的 评 价 框 架

Evaluation item Description

SA description What is the SA description requirement of the evaluation method? Evaluation goal The goal achieved or the output of the evaluation method

Quality attribute What extent does the evaluation method support attributes?

Key technologies The primary technologies or the theoretic model of the evaluation method Experience repository Does evaluation method recommend any experience repository?

support

Process support

What is the level of reuse of the knowledge and the experience?

Does the evaluation method support the development or evaluation of the process which include evaluation activities, the role of the participant involving the process?

Maturity stage What is the level of maturity.

Applicable project stage Which is the most appropriate development phase to apply the method? Tool support Does the method provide or recommend any tool for all or some of the tasks?

Resources required

Resources required by the evaluation method, including human-resource, time, and the quality of the participant

**2**

软 件 体 系结 构 评 估技术概 览

在 文 献 [ 15,17]中 , 研 究 人 员 已 经 对 一 些 重 要 的 软 件 体 系 结 构 评 估 技 术 进 行 了 分 析 和 说 明 . 随 着 时 间 的 推 移 ,

新 的 软 件 体 系 结 构 评 估 技 术 不 断 涌 现 . 本 文 根 据 各 种 评 估 技 术 的 主 要 特 点 , 将 评 估 技 术 分 为 3 类 : 基 于 场 景 的 评 估 方 法 、 基 于 度 量 - 预 测 的 评 估 方 法 和 基 于 特 定 软 件 体 系 结 构 描 述 语 言 的 分 析 方 法 . 本 节 分 别 对 这 3 类 方 法 的 特 点 进 行 分 析 和 说 明 .

**2.1** 基 于 场 景 的 评 估 方 法

该 类 评 估 方 法 的 基 本 观 点 是 , 大 多 数 软 件 质 量 属 性 极 为 复 杂 , 根 本 无 法 用 一 个 简 单 的 尺 度 来 衡 量 . 同 时 , 质 量 属 性 并 不 是 处 于 隔 离 状 态 , 只 有 在 一 定 的 上 下 文 环 境 中 才 能 做 出 关 于 质 量 属 性 的 有 意 义 的 评 判 . 利 用 场 景 技 术 则 可 以 具 体 化 评 估 的 目 标 , 代 替 对 质 量 属 性 ( 可 维 护 性 、可 修 改 性 、健 壮 性 、灵 活 性 等 ) 的 空 洞 表 述 , 使 对 软 件 体 系 结 构 的 测 试 成 为 可 能 . 所 以 , 场 景 对 于 评 估 具 有 非 常 关 键 的 作 用 , 整 个 评 估 过 程 就 是 论 证 软 件 体 系 结 构 对 关 键 场 景 的 支 持 程 度 . 通 过 对 多 种 基 于 场 景 的 评 估 方 法 的 分 析 , 我 们 认 为 该 类 方 法 具 有 以 下 重 要 的 特 征 : (1) 场 景 是 这 类 评 估 方 法 中 不 可 缺 少 的 输 入 信 息 , 场 景 的 设 计 和 选 择 是 评 估 成 功 与 否 的 关 键 因 素 ; (2) 这 类 评 估 是 人 工 智 力 密 集 型 劳 动 , 评 估 质 量 在 很 大 程 度 上 取 决 于 人 的 经 验 和 技 术 .

基 于 场 景 的 评 估 方 法 是 研 究 最 广 泛 , 应 用 最 成 熟 , 数 量 最 多 的 一 类 软 件 体 系 结 构 评 估 方 法 . 本 文 调 查 了 9 种 基 于 场 景 的 评 估 方 法 , 分 别 是 基 于 场 景 的 软 件 体 系 结 构 分 析 方 法 ( S A A M) 、 基 于 复 杂 场 景 的 S A A M (SAAMCS) 、 基 于 领 域 的 SAAM(ESAAMI) 、 软 件 体 系 结 构 折 中 分 析 方 法 ( ATAM) 、 针 对 演 化 和 重 用 的 SAAM(SAAMER) 、 设 计 中 间 产 品 积 极 评 审 方 法 ( ARID) 、 软 件 体 系 结 构 层 次 的 可 更 改 性 分 析 方 法 (ALMA) 、 基 于 模 式 软 件 体 系 结 构 评 估 方 法 ( PSAEM) 、 基 于 方 面 的 SAAM(ASAAM) 、 软 件 体 系 结 构 层 次 的 可 用 性 分 析 方 法 ( SALUTA) . 利 用 第 1 节 中 的 评 价 框 架 , 针 对 基 于 场 景 的 评 估 方 法 的 特 点 , 本 文 从 软 件 体 系 结 构 描 述 、 评 估 目 标 、 质 量 属 性 、 关 键 技 术 、 过 程 支 持 、 资 源 需 求 等 几 个 方 面 对 这 类 方 法 进 行 分 析 和 阐 述 .

2.1.1

软 件 体 系 结 构 描 述

软 件 体 系 结 构 描 述 是 软 件 体 系 结 构 评 估 的 前 提 和 基 础 . 基 于 场 景 的 评 估 方 法 对 软 件 体 系 结 构 的 具 体 表 现

形 式 没 有 严 格 的 限 制 , 不 依 赖 于 特 定 的 软 件 体 系 结 构 描 述 语 言 , 但 是 , 利 用 软 件 体 系 结 构 描 述 语 言 建 立 的 软 件 体 系 结 构 模 型 应 该 为 评 估 提 供 完 备 和 准 确 的 信 息 , 以 保 证 评 估 师 能 够 准 确 理 解 设 计 师 的 设 计 策 略 . 利 用 易 于 理 解 、 标 准 的 描 述 方 法 ( 比 如 UML 等 标 准 建 模 语 言 ) 可 以 促 进 设 计 师 和 评 估 师 之 间 的 交 流 .

2.1.2

评 估 目 标

基 于 场 景 的 评 估 方 法 主 要 有 以 下 几 种 目 标 : (1) 评 估 软 件 体 系 结 构 是 否 满 足 各 种 质 量 属 性 的 要 求 ; (2) 比 较

不 同 的 软 件 体 系 结 构 方 案 ; (3) 进 行 风 险 评 估 .

[7,8]

[6]

张莉 等:软件体系结构评估技术

1331

该 类 方 法 的 评 估 结 果 大 多 以 评 估 报 告 的 形 式 给 出 , 根 据 评 估 目 标 的 不 同 , 不 同 的 评 估 方 法 给 出 的 报 告 内 容 各 异 . 一 般 的 评 估 报 告 包 括 软 件 体 系 结 构 模 型 对 所 评 估 质 量 属 性 的 满 足 程 度 , 更 进 一 步 地 , 通 过 专 家 的 分 析 , 在 报 告 中 还 可 以 给 出 软 件 开 发 中 可 能 存 在 的 风 险 , 有 时 甚 至 包 括 软 件 体 系 结 构 设 计 的 改 进 建 议 等 .

2.1.3

质 量 属 性

适 用 于 各 种 质 量 属 性 的 评 估 是 一 种 通 用 的 评 估 方 法 . 在 理 论 上 , 只 要 能 提 供 适 当 的 场 景 描 述 , 该 类 方 法 就 可

以 评 估 软 件 的 大 部 分 质 量 属 性 . 因 此 , 场 景 的 选 择 和 分 析 成 为 各 类 质 量 属 性 评 估 的 关 键 因 素 .

2.1.4

关 键 技 术

场 景 获 取 技 术 和 场 景 分 析 技 术 是 基 于 场 景 的 评 估 方 法 中 最 为 关 键 的 两 项 技 术 . 下 面 分 别 对 其 进 行 分 析 和

说 明 .

• 场 景 获 取 技 术

在 基 于 场 景 的 评 估 方 法 中 , 利 用 场 景 来 具 体 化 评 估 目 标 , 因 此 , 场 景 获 取 是 明 确 评 估 目 标 的 重 要 环 节 . 场 景 获 取 最 基 本 的 方 法 就 是 让 在 项 目 涉 众 进 行 头 脑 风 暴 , 如 在 SAAM 和 ATAM 方 法 中 利 用 问 题 清 单 等 方 式 启 发 评 估 人 员 获 取 场 景 . 在 头 脑 风 暴 的 基 础 上 , 为 了 对 场 景 进 行 积 累 和 重 用 , ESAAMI 方 法 强 调 了 场 景 的 领 域 特 性 , 通 过 领 域 分 析 增 加 领 域 知 识 , 积 累 分 析 模 板 , 提 高 在 领 域 内 对 场 景 的 重 用 和 获 取 . PSAEM 方 法 则 从 系 统 设 计 的 角 度 提 出 了 一 种 基 于 模 式 的 场 景 提 取 技 术 , 将 软 件 体 系 结 构 模 式 和 设 计 模 式 中 包 含 的 通 用 行 为 作 为 评 估 的 场 景 , 从 而 得 到 了 通 用 的 场 景 模 式 , 可 以 在 不 同 项 目 评 估 中 得 到 重 用 .

为 了 尽 可 能 地 平 衡 候 选 场 景 的 完 整 性 和 关 键 性 , 研 究 人 员 提 出 了 场 景 的 等 价 类 选 择 技 术 , 该 技 术 将 所 有 场 景 划 分 为 等 价 的 组 , 然 后 从 每 组 中 抽 取 一 个 场 景 进 行 评 估 , 从 而 避 免 重 复 评 估 类 似 的 场 景 , 减 少 评 估 成 本 . ALMA 首 次 提 出 并 应 用 了 该 技 术 .

另 外 , 针 对 各 种 质 量 属 性 的 不 同 特 点 , 也 提 出 了 具 有 一 定 针 对 性 的 场 景 获 取 技 术 . 比 如 : ASAAM 方 法 借 用 面 向 方 面 编 程 技 术 中 的 “ 方 面 ( aspect) ” 概 念 定 义 了 “ 方 面 场 景 ” , 用 于 说 明 对 系 统 中 的 很 多 构 件 产 生 “ 横 切 ” 影 响 的 场 景 , 如 在 窗 口 管 理 系 统 中 “ 将 系 统 移 植 到 其 他 操 作 系 统 ” 的 场 景 就 是 一 个 典 型 的 关 于 “ 操 作 系 统 ” 方 面 场 景 . 为 了 对 这 种 方 面 场 景 进 行 提 取 , ASAAM 中 提 供 了 一 套 启 发 式 规 则 在 普 通 场 景 集 中 提 取 “ 方 面 场 景 ” .SAAMCS 中 , 则 利 用 软 件 变 化 类 型 ( 需 求 变 化 、 质 量 要 求 变 化 、 构 件 变 化 、 技 术 环 境 变 化 ) 以 及 场 景 对 软 件 的 影 响 程 度 ( 无 影 响 、 影 响 一 个 构 件 、 影 响 多 个 构 件 、 影 响 软 件 体 系 结 构 ) 来 指 导 场 景 的 选 择 .

• 场 景 分 析 技 术

采 用 评 审 会 议 的 方 法 进 行 场 景 分 析 是 最 基 本 的 分 析 方 法 , 利 用 该 方 法 评 估 人 员 可 以 得 到 软 件 体 系 结 构 对 各 场 景 的 满 足 程 度 , 可 以 比 较 多 个 软 件 体 系 结 构 方 案 . SAAM,ATAM 等 方 法 都 基 于 这 种 人 工 评 审 的 技 术 . 这 种 技 术 是 基 于 场 景 评 估 方 法 中 的 主 流 技 术 . 但 人 工 评 审 从 效 率 和 精 确 性 上 都 有 一 定 的 欠 缺 , 所 以 研 究 人 员 也 在 利 用 一 些 自 动 分 析 的 方 法 , 对 场 景 进 行 模 拟 执 行 , 通 过 模 拟 数 据 来 说 明 软 件 体 系 结 构 是 否 满 足 场 景 的 要 求 .

在 场 景 分 析 中 , 对 于 不 同 质 量 属 性 的 综 合 分 析 也 是 一 项 非 常 重 要 的 技 术 , 其 中 最 有 影 响 的 研 究 是 ATAM 方 法 中 引 入 效 用 树 技 术 来 支 持 对 多 属 性 进 行 折 中 分 析 的 能 力 . 效 用 树 描 述 了 质 量 需 求 与 设 计 之 间 的 关 系 以 及 质 量 需 求 之 间 的 优 先 关 系 , 可 用 于 划 分 和 组 织 场 景 .

2.1.5

评 估 过 程 支 持

基 于 场 景 的 评 估 方 法 都 定 义 了 评 估 的 步 骤 . 其 中 两 个 最 重 要 的 步 骤 是 : 开 发 场 景 和 评 估 场 景 . 开 发 场 景 包 括

场 景 的 收 集 和 选 择 , 其 目 的 是 为 了 根 据 不 同 的 评 估 目 标 选 择 出 能 够 体 现 相 应 软 件 质 量 属 性 的 关 键 场 景 ; 评 估 场 景 则 是 评 价 软 件 体 系 结 构 是 否 能 够 直 接 或 间 接 的 支 持 场 景 所 体 现 的 质 量 属 性 . 但 严 格 地 说 , 评 估 步 骤 的 定 义 还 不 足 以 说 明 评 估 过 程 的 支 持 . 完 整 的 过 程 定 义 应 该 不 仅 对 评 估 步 骤 , 而 且 对 各 个 步 骤 的 参 与 者 、 输 入 输 出 制 品 进 行 定 义 . 目 前 , ATAM 方 法 对 评 估 过 程 的 描 述 最 为 完 整 , 其 评 估 过 程 定 义 为 4 个 阶 段 , 共 9 个 活 动 , 并 详 细 定 义 了 各 个 活 动 的 参 与 者 与 各 个 活 动 需 要 的 和 产 生 的 各 种 软 件 制 品 .

2.1.6

资 源 需 求

基 于 场 景 的 评 估 方 法 在 评 估 期 间 对 人 力 资 源 的 要 求 相 对 较 高 . 根 据 CMU-SEI 的 数 据 , 采 用 ATAM 进 行 中

[25]

[15]

[7,8] [11,12] [13]

[14] [26]

[27]

[17]

[28]

[29]

1332 *Journal of Software* 软件学报 Vol.19, No.6, June 2008

等 规 模 评 估 的 粗 略 成 本 是 70 人 天 , 进 行 小 规 模 评 估 的 粗 略 成 本 也 需 要 32 人 天 . 该 类 评 估 涉 及 的 人 员 包 括 : 用 户 、 软 件 设 计 开 发 者 、 软 件 测 试 者 等 , 几 乎 软 件 开 发 过 程 中 涉 及 到 的 各 种 角 色 都 会 参 与 评 估 , 所 以 , 组 织 和 协 调 这 样 的 评 估 会 议 的 代 价 也 是 比 较 高 的 . 另 外 , 基 于 场 景 的 评 估 要 求 参 与 人 员 , 特 别 是 评 估 师 具 有 较 高 的 专 业 素 质 .

2.1.7

其 他 方 面

被 调 查 的 基 于 场 景 的 评 估 方 法 都 是 依 靠 相 关 领 域 的 专 家 完 成 场 景 抽 取 、 软 件 体 系 结 构 分 析 等 关 键 步 骤 ,

所 以 评 估 结 果 主 要 依 赖 于 评 估 专 家 的 实 践 经 验 和 分 析 经 验 , 这 些 方 法 的 执 行 并 不 依 赖 于 计 算 机 辅 助 工 具 ( 虽 然 SAAM 提 供 了 一 种 SAAMTOOL 对 评 估 过 程 进 行 支 持 ) . 该 类 方 法 可 以 应 用 在 软 件 体 系 结 构 设 计 中 的 各 个 阶 段 , 只 要 该 阶 段 能 够 提 供 评 估 所 需 的 信 息 ( 主 要 是 场 景 和 软 件 体 系 结 构 模 型 ) . 另 外 , 根 据 成 熟 度 , 这 些 方 法 可 以 分 为 两 大 类 : 第 1 类 方 法 已 经 基 本 成 熟 , 包 括 ATAM,SAAM,SAAMER 等 , 这 些 方 法 都 已 经 过 多 年 的 应 用 验 证 ; 第 2 类 是 一 些 新 出 现 的 方 法 , 包 括 PSAEM,ASAAM,SALUTA.这 些 方 法 出 现 在 近 两 年 的 文 献 中 , 在 有 效 性 、实 用 性 方 面 还 需 要 进 一 步 地 检 验 和 加 强 .

**2.2** 基 于 度 量 和 预 测 的 评 估 方 法

测 量 对 于 所 有 科 学 领 域 的 进 步 都 是 至 关 重 要 的 . 在 软 件 工 程 领 域 中 , 软 件 的 度 量 和 预 测 技 术 是 保 证 软 件 质 量 的 重 要 技 术 之 一 . 软 件 体 系 结 构 作 为 软 件 开 发 过 程 中 一 个 早 期 的 设 计 模 型 , 如 果 能 够 度 量 并 预 测 未 来 软 件 产 品 的 质 量 , 那 么 其 预 测 的 结 果 可 以 及 时 给 出 设 计 缺 陷 , 这 对 于 减 少 开 发 风 险 和 提 高 软 件 质 量 是 非 常 重 要 的 . 根 据 这 一 思 路 , 出 现 了 一 类 基 于 度 量 和 预 测 的 评 估 方 法 .

软 件 体 系 结 构 的 度 量 是 对 软 件 中 间 产 品 的 度 量 , 可 以 更 加 精 确 地 描 述 软 件 体 系 结 构 的 各 种 特 征 ; 并 通 过 预 测 去 发 现 软 件 设 计 中 存 在 的 问 题 . 通 过 对 多 种 基 于 度 量 和 预 测 评 估 方 法 的 分 析 和 比 较 , 我 们 认 为 , 该 类 方 法 具 有 以 下 的 重 要 特 征 : (1) 这 些 方 法 的 基 本 思 路 是 将 传 统 的 度 量 和 预 测 技 术 应 用 在 软 件 体 系 结 构 层 次 ; (2) 度 量 技 术 需 要 软 件 体 系 结 构 提 供 比 较 细 粒 度 的 信 息 , 对 模 型 的 要 求 比 较 严 格 ; (3) 利 用 度 量 技 术 对 软 件 体 系 结 构 模 型 的 内 部 特 征 ( 如 复 杂 性 、内 聚 度 、耦 合 性 等 ) 进 行 测 量 ; (4) 利 用 这 些 度 量 作 为 预 测 指 标 , 对 某 些 软 件 的 外 部 质 量 ( 如 可 维 护 性 、 可 演 化 性 、 可 靠 性 等 ) 进 行 预 测 , 但 由 于 预 测 模 型 构 造 的 困 难 , 所 以 这 些 预 测 一 般 只 作 为 一 种 辅 助 评 估 的 手 段 .

本 文 重 点 调 查 了 7 种 基 于 度 量 和 预 测 的 评 估 方 法 , 分 别 是 软 件 体 系 结 构 评 估 模 型 ( SAEM) 、 软 件 体 系 结 构 性 能 评 估 方 法 ( PASA) 、 基 于 贝 叶 斯 网 的 软 件 体 系 评 估 方 法 ( SAABNet) 、 软 件 体 系 结 构 度 量 过 程 、 软 件 体 系 结 构 变 化 的 度 量 方 法 (SACMM) 、 软 件 体 系 结 构 静 态 评 估 方 法 ( SASAM) 、 软 件 体 系 结 构 层 次 可 靠 性 风 险 分 析 方 法 ( ALRRA) ( 注 : 由 于 PASA 中 也 利 用 了 场 景 技 术 , 所 以 有 些 研 究 人 员 将 这 种 方 法 作 为 基 于 场 景 的 方 法 进 行 分 析 ). 利 用 第 1 节 中 的 评 价 框 架 , 针 对 基 于 度 量 和 预 测 评 估 方 法 的 特 点 , 本 文 从 软 件 体 系 结 构 描 述 、 评 估 目 标 、 关 键 技 术 、 工 具 支 持 、 资 源 需 求 这 几 个 方 面 对 这 类 方 法 进 行 了 分 析 和 比 较 .

2.2.1

软 件 体 系 结 构 描 述

基 于 度 量 和 预 测 的 评 估 方 法 需 要 软 件 体 系 结 构 模 型 提 供 的 信 息 是 完 整 、无二 义 和 一 致 的 . 完 整 性 是 指 针 对

不 同 的 度 量 和 预 测 技 术 , 软 件 体 系 结 构 模 型 提 供 的 信 息 应 该 能 够 保 证 度 量 的 计 算 , 也 就 是 说 , 信 息 是 足 够 的 ; 无 二 义 性 是 指 对 软 件 体 系 结 构 模 型 的 语 义 是 清 晰 的 , 不 存 在 不 同 的 理 解 ; 一 致 性 是 指 对 于 不 同 视 图 中 的 相 同 模 型 元 素 应 该 具 有 相 同 的 性 质 . 根 据 这 些 要 求 , 软 件 体 系 结 构 描 述 语 言 最 好 采 用 形 式 化 语 言 或 由 半 形 式 化 的 UML 语 言 扩 展 得 到 . 在 本 文 调 查 的 方 法 中 , 大 部 分 方 法 使 用 了 UML 语 言 并 对 其 进 行 了 扩 展 . 如 : PASA 要 求 利 用 Kruchten 提 出 的 “ 4+1 ” 视 图 模 型 对 软 件 体 系 结 构 进 行 描 述 , 并 对 UML 元 模 型 进 行 扩 展 以 适 应 性 能 评 估 的 要 求 . 其 中 , 利 用 消 息 顺 序 图 ( 扩 展 的 顺 序 图 ) 对 性 能 场 景 进 行 描 述 ; 利 用 扩 展 的 部 署 图 来 描 述 运 行 环 境 的 特 征 . ALRRA 明 确 提 出 软 件 体 系 结 构 描 述 语 言 必 须 能 够 描 述 构 件 间 交 互 关 系 和 独 立 构 件 的 行 为 特 征 , ALRRA 中 采 用 了 扩 展 UML 得 到 的 ROOM(实 时 面 向 对 象 建 模 语 言 ) 中 的 顺 序 图 和 状 态 图 对 系 统 的 动 态 行 为 进 行 描 述 , 并 且 , ROOM 模 型 可 以 模 拟 执 行 . SACMM 则 使 用 了 形 式 化 的 方 式 定 义 了 带 标 签 的 图 结 构 , 并 利 用 这 种 结 构 给 出 软 件 体 系 结 构 , 然 后 可 以 计 算 出 变 化 的 大 小 .

值 得 注 意 的 是 , 虽 然 度 量 和 预 测 技 术 本 身 是 不 依 赖 于 语 言 的 , 只 需 要 有 合 适 的 语 言 就 能 够 给 出 完 整 、 无 二

[30]

[31]

[32]

张莉 等:软件体系结构评估技术

义 、 一 致 的 模 型 , 但 该 类 方 法 大 多 有 自 动 化 工 具 支 持 , 而 工 具 的 实 现 则 是 需 要 依 赖 于 某 种 具 体 语 言 的 .

1333

2.2.2

评 估 目 标

基 于 度 量 的 评 估 方 法 主 要 有 以 下 几 种 目 标 : (1) 通 过 精 确 的 度 量 , 可 以 评 估 软 件 体 系 结 构 层 次 上 的 内 部 质

量 特 征 ; (2) 利 用 预 测 模 型 可 以 评 估 软 件 的 外 部 特 征 ; (3) 可 以 进 行 风 险 评 估 .

2.2.3

关 键 技 术

在 基 于 度 量 和 预 测 的 评 估 方 法 中 , 度 量 技 术 解 决 的 是 各 种 因 素 的 可 测 量 问 题 , 而 预 测 技 术 解 决 的 是 各 种 因

素 之 间 的 相 关 性 问 题 , 这 两 项 技 术 都 是 评 估 的 基 础 问 题 .

• 度 量 技 术

根 据 度 量 对 象 的 不 同 , 度 量 技 术 可 以 分 为 两 类 : 第 1 类 是 软 件 体 系 结 构 模 型 的 度 量 技 术 ; 第 2 类 是 对 各 种 质 量 属 性 在 软 件 体 系 结 构 层 次 的 度 量 技 术 .

首 先 , 软 件 体 系 结 构 模 型 的 度 量 技 术 主 要 是 对 软 件 体 系 结 构 模 型 的 结 构 特 征 和 行 为 特 征 进 行 度 量 , 如 : 结 构 复 杂 度 、结 构 形 态 、行 为 复 杂 度 等 . 如 ALRRA 方 法 为 了 进 行 可 靠 性 分 析 , 提 出 了 包 括 构 件 操 作 复 杂 度 、连 接 件 输 出 耦 合 度 等 一 组 软 件 体 系 结 构 模 型 的 度 量 技 术 .

另 外 一 种 度 量 技 术 则 是 对 性 能 、可 靠 性 、可 维 护 性 等 质 量 属 性 在 软 件 体 系 结 构 层 次 的 量 化 形 式 进 行 研 究 . 如 PASA 方 法 就 定 义 了 计 算 机 资 源 需 求 、作 业 驻 留 时 间 、利 用 率 、吞 吐 量 、队 列 长 度 等 度 量 , 对 性 能 进 行 量 化 的 表 示 ; SACMM 方 法 为 了 对 软 件 可 更 改 性 及 软 件 体 系 结 构 的 演 化 性 进 行 评 估 , 利 用 graph kernel 函 数 定 义 距 离 度 量 对 软 件 体 系 结 构 的 相 似 性 进 行 量 化 ; ALRRA 方 法 提 出 与 故 障 相 关 的 一 组 度 量 , 包 括 构 件 和 连 接 件 的 故 障 模 式 、 故 障 严 重 性 级 别 . 通 过 复 杂 性 度 量 和 故 障 严 重 性 级 别 , 可 以 计 算 可 靠 性 风 险 因 子 . SACMM 方 法 利 用 距 离 和 相 对 距 离 度 量 , 建 立 软 件 体 系 结 构 转 换 模 型 , 该 模 型 表 示 了 软 件 开 发 过 程 不 同 软 件 体 系 结 构 的 差 异 , 具 有 计 算 效 率 高 、 简 单 易 用 的 特 征 .

• 预 测 技 术

预 测 技 术 是 在 度 量 技 术 的 基 础 上 进 一 步 研 究 在 软 件 体 系 结 构 层 次 上 各 种 因 素 之 间 的 关 系 . 利 用 这 些 经 验 关 系 , 可 以 通 过 一 些 在 软 件 体 系 结 构 层 次 上 的 特 性 ( 如 结 构 和 行 为 特 性 等 ) 来 预 测 未 知 的 软 件 质 量 特 性 ( 如 可 靠 性 、可 维 护 性 等 ) . 预 测 技 术 的 研 究 需 要 比 较 深 入 的 理 论 知 识 , 需 要 积 累 大 量 的 经 验 数 据 , 这 些 都 是 软 件 工 程 研 究 中 的 难 点 问 题 , 但 如 果 该 技 术 得 到 突 破 , 将 对 评 估 技 术 自 动 化 方 面 的 研 究 产 生 重 要 的 影 响 .

目 前 , 该 技 术 已 经 取 得 了 一 些 成 果 , 如 在 ALRRA 方 法 中 , 利 用 复 杂 性 度 量 和 故 障 严 重 性 级 别 , 建 立 了 基 于 构 件 依 赖 图 ( CDG) 的 模 型 , 并 利 用 风 险 分 析 算 法 对 CDG 模 型 进 行 计 算 , 可 以 评 估 软 件 体 系 结 构 的 可 靠 性 风 险 ; SAABNet 方 法 则 利 用 贝 叶 斯 信 念 网 构 造 了 软 件 体 系 结 构 策 略 到 软 件 质 量 的 因 果 关 系 模 型 , 可 以 通 过 设 计 策 略 对 各 种 质 量 属 性 进 行 预 测 .

2.2.4

工 具 支 持

这 类 方 法 大 多 数 都 提 供 了 相 应 的 工 具 , 这 些 工 具 的 主 要 功 能 有 两 点 : 通 过 软 件 模 型 得 到 相 关 的 度 量 值 , 利 用

相 关 算 法 计 算 软 件 特 性 的 预 测 值 . 在 我 们 调 研 的 方 法 中 , 有 PASA 方 法 提 供 的 性 能 评 估 工 具 SPE.ED , 它 将 关 键 场 景 转 化 为 SPE 模 型 , 工 具 SPE.ED 读 入 SPE 模 型 , 并 通 过 分 析 和 模 拟 发 现 性 能 问 题 . PASA 综 合 利 用 了 场 景 、 模 拟 和 分 析 的 技 术 , 对 性 能 进 行 评 估 , 是 一 种 半 自 动 化 的 评 估 方 法 . SACMM 则 实 现 了 Kernel 计 算 模 块 和 体 系 结 构 抽 取 模 块 . ALRRA 方 法 利 用 Objectime 工 具 对 软 件 体 系 结 构 模 型 进 行 模 拟 , 实 现 对 动 态 复 杂 性 的 度 量 . SAABNet 利 用 通 用 的 贝 叶 斯 网 工 具 Hugin 对 因 果 关 系 模 型 进 行 推 理 计 算 得 到 预 测 结 果 . 没 有 工 具 的 支 持 , 度 量 的 工 作 量 是 非 常 大 的 . 工 具 的 应 用 使 这 类 方 法 评 估 效 率 大 大 提 高 , 并 且 得 到 精 确 的 评 估 结 果 .

2.2.5

资 源 需 求

这 类 方 法 一 般 都 有 工 具 的 支 持 , 所 以 在 评 估 时 可 以 利 用 工 具 自 动 获 取 评 估 结 果 , 因 此 , 评 估 时 的 人 力 成 本 主

要 是 将 软 件 体 系 结 构 模 型 数 据 输 入 到 相 应 的 工 具 中 , 实 现 自 动 化 评 估 . 如 果 能 将 设 计 时 的 模 型 直 接 导 入 评 估 工 具 , 则 人 力 成 本 更 低 . 这 类 方 法 实 现 评 估 时 的 低 成 本 需 要 一 个 基 本 条 件 就 是 已 经 开 发 或 购 买 了 相 关 的 评 估 工 具 , 但 现 时 的 实 际 情 况 是 , 评 估 工 具 并 不 通 用 , 所 以 在 选 择 这 类 方 法 时 常 常 还 需 要 一 定 的 开 发 成 本 . 这 就 带 来 了 较 大

[33,34] [35]

[36]

1334 *Journal of Software* 软件学报 Vol.19, No.6, June 2008

的 间 接 成 本 .

2.2.6

其 他 方 面

这 类 方 法 在 工 具 支 持 下 对 资 源 的 需 求 是 较 低 的 . 这 类 方 法 试 图 将 专 家 的 经 验 都 形 式 化 为 数 学 模 型 , 评 估 实

施 人 员 只 需 收 集 数 据 , 再 利 用 自 动 化 工 具 就 可 以 得 到 评 估 结 果 . 该 类 方 法 一 般 要 求 软 件 体 系 结 构 模 型 能 够 提 供 较 多 的 信 息 , 所 以 该 类 方 法 一 般 应 用 于 软 件 体 系 结 构 设 计 的 后 期 . 在 成 熟 度 方 法 , PASA 是 比 较 成 熟 的 一 种 方 法 , 在 实 时 、Web 、分 布 式 应 用 系 统 中 都 得 到 应 用 和 验 证 ; 而 其 他 方 法 则 还 处 于 研 究 阶 段 , 其 度 量 指 标 和 预 测 模 型 都 需 要 随 着 应 用 得 到 验 证 和 调 整 .

**2.3** 基 于 特 定 软 件 体 系 结 构 描 述 语 言 的 评 估 方 法

基 于 特 定 软 件 体 系 结 构 描 述 语 言 ( ADL) 的 评 估 方 法 是 一 类 比 较 特 殊 的 方 法 , 这 类 方 法 依 赖 于 某 种 具 体 的 软 件 体 系 结 构 描 述 语 言 , 一 般 是 软 件 体 系 结 构 语 言 研 究 的 附 属 品 . 通 过 对 多 种 基 于 特 定 软 件 体 系 结 构 描 述 语 言 的 评 估 方 法 的 分 析 和 比 较 , 我 们 认 为 该 类 方 法 具 有 以 下 的 重 要 特 征 : (1) 评 估 技 术 与 特 定 软 件 体 系 结 构 描 述 语 言 的 定 义 机 制 和 理 论 基 础 密 切 相 关 ; (2) 软 件 体 系 结 构 描 述 语 言 的 定 义 非 常 严 格 , 通 常 是 形 式 化 或 半 形 式 化 的 描 述 语 言 .

本 文 调 查 了 3 种 这 类 方 法 , 分 别 是 特 定 领 域 软 件 体 系 结 构 分 析 方 法 ( DSSA) ,Rapide 方 法 , 以 及 基 于 UML 逆 向 工 程 的 软 件 体 系 结 构 分 析 方 法 . 利 用 第 1 节 中 的 评 价 框 架 , 针 对 基 于 特 定 软 件 体 系 结 构 描 述 语 言 评 估 方 法 的 特 点 , 本 文 从 软 件 体 系 结 构 描 述 、质 量 属 性 、关 键 技 术 、工 具 支 持 、资 源 需 求 这 几 个 方 面 对 这 类 方 法 进 行 分 析 和 比 较 . 其 余 的 评 价 项 在 “ 其 他 方 面 ” 中 进 行 简 单 说 明 .

2.3.1

软 件 体 系 结 构 描 述

基 于 特 定 ADL 的 评 估 方 法 使 用 的 软 件 体 系 结 构 描 述 语 言 通 常 是 具 有 形 式 化 基 础 的 语 言 或 半 形 式 化 的 描

述 语 言 . 所 以 , 这 类 语 言 具 有 可 执 行 、可 自 动 分 析 的 能 力 , 这 就 为 软 件 体 系 结 构 的 评 估 奠 定 了 基 础 . 在 我 们 调 研 的 方 法 中 , DSSA 方 法 使 用 了 Meta-H 语 言 描 述 软 件 体 系 结 构 模 型 . Meta-H 是 由 Honeywell 公 司 定 义 的 , 支 持 对 可 靠 性 和 安 全 性 要 求 较 高 的 多 处 理 器 实 时 嵌 入 式 系 统 的 创 建 、 分 析 和 验 证 , 主 要 适 用 于 航 空 电 子 控 制 软 件 系 统 . Rapide 是 由 美 国 Stanford 大 学 的 Luckham 等 人 定 义 的 一 种 可 执 行 的 软 件 构 架 定 义 语 言 , 主 要 适 用 于 对 基 于 事 件 的 、复 杂 、并 发 、分 布 式 系 统 的 构 架 进 行 描 述 . 在 基 于 UML 逆 向 工 程 的 软 件 体 系 结 构 分 析 方 法 中 , 利 用 UML 外 廓 机 制 定 义 特 定 领 域 的 软 件 体 系 结 构 概 念 模 型 和 约 束 模 型 .

2.3.2

质 量 属 性

在 基 于 特 定 ADL 的 评 估 方 法 中 , 可 以 评 估 的 质 量 属 性 是 受 到 其 语 言 特 征 和 形 式 化 理 论 基 础 的 限 制 的 . 一

般 , 该 类 方 法 用 于 评 估 特 定 领 域 软 件 系 统 的 性 能 、 可 靠 性 、 安 全 性 、 事 务 性 等 质 量 属 性 .

2.3.3

关 键 技 术

各 种 特 定 的 ADL 语 言 具 有 不 同 的 形 式 化 理 论 基 础 , 其 评 估 技 术 依 赖 于 所 采 用 的 理 论 模 型 . 比 如 , DSSA 中 的

MetaH 语 言 的 语 义 主 要 基 于 形 式 化 调 度 和 数 据 流 模 型 , 所 以 可 以 通 过 对 软 件 体 系 结 构 的 模 拟 执 行 , 得 到 以 下 分 析 结 果 : (1) 时 间 性 能 : 主 要 分 析 进 程 时 间 的 限 制 、各子系 统 执 行 时 间 统 计 和 交 互 次 数 等 ; (2) 可 靠 性 : 通 过 生 成 马 尔 可 夫 可 靠 性 模 型 对 缺 陷 发 生 和 传 播 进 行 分 析 ; (3) 安 全 性 . 通 过 这 3 种 分 析 , 可 以 评 估 系 统 稳 定 性 、性 能 、鲁 棒 性 、可 靠 性 、安 全 性 等 质 量 属 性 . Rapide 中 构 件 的 计 算 和 交 互 语 义 通 过 偏 序 事 件 集 ( 称 为 posets) 定 义 , 通 过 抽 象 状 态 和 状 态 转 移 规 则 来 定 义 该 类 构 件 的 行 为 约 束 , 所 以 通 过 模 型 执 行 和 形 式 化 检 查 的 方 法 检 测 体 系 结 构 参 考 模 型 的 动 态 结 构 . 可 以 分 析 软 件 体 系 结 构 的 一 致 性 , 检 查 事 务 的 原 子 性 、 一 致 性 、 隔 离 性 、 持 久 性 ( ACID).

另 外 , 在 基 于 UML 逆 向 工 程 的 软 件 体 系 结 构 分 析 方 法 中 , 通 过 一 种 结 合 自 顶 向 下 ( 已 知 的 软 件 体 系 结 构 ) 和 自 底 向 上 方 法 的 逆 向 工 程 构 造 软 件 实 现 模 型 与 软 件 体 系 结 构 模 型 之 间 的 关 系 ; 利 用 概 念 模 型 和 约 束 模 型 进 行 软 件 体 系 结 构 的 结 构 分 析 , 首 先 根 据 约 束 模 型 对 软 件 体 系 结 构 模 型 进 行 验 证 , 然 后 , 利 用 原 子 操 作 ( 增 加 、删 除 和 合 并 等 ) 对 不 同 的 软 件 体 系 结 构 模 型 进 行 比 较 . 可 以 对 软 件 的 可 维 护 性 进 行 评 估 .

2.3.4

工 具 支 持

这 3 种 方 法 都 有 工 具 的 支 持 : 由 Honeywell 公 司 开 发 的 工 具 可 以 支 持 DSSA 中 时 间 性 能 分 析 、可靠性 分 析 、

[37,38]

张莉 等:软件体系结构评估技术

1335

安 全 性 分 析 ; Rapide 项 目 中 的 工 具 可 以 支 持 模 型 的 执 行 和 分 析 ; 基 于 UML 逆 向 工 程 的 软 件 体 系 结 构 分 析 方 法 提 供 的 artDECO 是 一 种 基 于 UML 外 廓 的 软 件 体 系 结 构 验 证 工 具 .

2.3.5

资 源 需 求

这 类 方 法 比 较 特 殊 , 相 应 的 方 法 一 般 都 有 工 具 支 持 , 所 以 在 评 估 时 成 本 是 很 低 的 . 但 由 于 这 些 工 具 都 没 有 商

业 化 , 还 只 是 实 验 室 产 品 , 所 以 一 般 很 难 得 到 .

2.3.6

其 他 方 面

这 些 方 法 成 熟 性 较 低 , 都 只 在 较 小 范 围 内 进 行 验 证 . DSSA 由 商 业 机 构 开 发 , 主 要 用 在 航 空 电 子 控 制 软 件 系

统 , 所 以 其 带 有 很 强 的 领 域 性 ; 而 Rapide 方 法 和 基 于 UML 逆 向 工 程 的 软 件 体 系 结 构 分 析 方 法 都 没 有 经 过 大 规 模 应 用 的 验 证 . 该 类 方 法 的 软 件 体 系 结 构 模 型 由 特 定 的 语 言 描 述 , 所 以 只 要 能 够 建 立 模 型 即 可 进 行 评 估 .

**3**

研 究 总 结

**3.1** 软 件 体 系 结 构 评 估 方 法 的 技 术 特 点 比 较

软 件 体 系 结 构 评 估 技 术 是 为 了 在 软 件 设 计 的 初 期 发 现 与 软 件 质 量 相 关 的 问 题 . 自 从 1993 年 Carnegie Mellon 大 学 软 件 工 程 研 究 所 提 出 基 于 场 景 软 件 体 系 结 构 分 析 方 法 以 来 , 从 学 术 界 和 商 业 界 涌 现 了 很 多 软 件 体 系 结 构 评 估 技 术 . 从 第 2 节 的 分 析 中 可 以 看 出 , 不 同 类 型 评 估 方 法 呈 现 出 不 同 的 技 术 特 点 . 下 面 从 评 估 方 法 的 研 究 思 路 、主 要 研 究 内 容 、适 用 环 境 、典 型 代 表 这 几 方 面 对 本 文 中 的 3 类 评 估 方 法 在 其 技 术 特 点 方 面 进 行 比 较 , 见 表 2.

**Table 2** Comparison of different types of software architecture evaluation methods

表 **2**

不 同 类 型 软 件 体 系 结 构 评 估 方 法 技 术 特 点 比 较

Comparison

item

Research

approach

Primary

research

content

Applied

context

Scenario-Based

evaluation method

Enable users gain the evaluation goal through the following approach:

1. Improve or enable the operational ability by the way by the aid of scenario description.
2. Standardize the evaluation process and implement step.

1. Technologies of achieving scenario 2. Definition of evaluation process

and implement step

3. Technologies of evaluating and analysis of cost-benefit

1. These methods are suitable to many kinds of project, some of them already have been applied abroad.
2. One of the key factor of these methods is the aidance of experien-tial people.

Measurement-Based and

forecast-based evaluation method Research the characteristic of SA or the intrinsic relationship between SA and software quality in order to enabling users predict the software quality based on the experience data or knowledge

1. SA quality model
2. Architecture-Level

measurement method

3. Architecture-Level quality

predict-tion method

4. Automatic tool support

1. The kind of methods have been applied in the domain of research due to the low level of maturity of methods
2. Requiring evaluating engineering

possessing well theoretic knowledge 3. Requiring supporting of the

automatic tool

Evaluation method of specific

ADL based on Restricted analysis of SA with formal technology through the

deeply research of ADL

1. The formal base of SA
2. The formal analysis

technology

1. These method are restricted to specific project modeled with certain ADL and are applied in the specific domain.
2. Requiring evaluating

engineering possessing well

theoretic know-ledge

3. Requiring supporting of the

automatic tool

SA assessment method based on

Representational

example

ATAM, SAAM, etc

Bayesian Network

Software architecture-level reliabili-ty

DSSA, Rapid, etc

anal analyse method

**3.2** 软 件 体 系 结 构 评 估 技 术 研 究 中 存 在 的 不 足

软 件 体 系 结 构 是 软 件 工 程 中 比 较 新 的 一 个 领 域 , 对 其 定 义 、描述 方 法 等 方 面 的 研 究 都 还 处 于 不 断 发 展 的 过 程 中 . 虽 然 软 件 体 系 结 构 评 估 技 术 在 十 几 年 的 发 展 中 取 得 了 较 大 的 进 步 , 但 现 有 的 软 件 体 系 结 构 评 估 技 术 仍 然 存 在 一 些 局 限 性 .

[21]

[39,40]

[12]

1336 *Journal of Software* 软件学报 Vol.19, No.6, June 2008

3.2.1

基 于 场 景 评 估 的 方 法 的 不 足

• 评 估 的 效 果 对 评 估 师 经 验 的 依 赖 程 度 较 高

这 类 方 法 的 基 础 建 立 在 人 的 智 力 水 平 上 , 其 效 果 主 要 取 决 于 评 估 师 的 经 验 和 知 识 . 在 ATAM,SAAM 及 其 扩

展 方 法 中 , 无 论 从 场 景 的 选 取 、 软 件 体 系 结 构 的 分 析 、 评 估 的 组 织 和 控 制 都 需 要 评 估 师 发 挥 重 要 的 作 用 . 在 评 估 过 程 中 , 评 估 师 的 经 验 对 评 估 的 效 果 至 关 重 要 . 一 个 好 的 评 估 师 可 以 准 确 地 发 现 软 件 体 系 结 构 设 计 中 存 在 问 题 ; 而 当 评 估 师 经 验 不 足 时 , 评 估 则 很 难 发 挥 其 应 有 的 作 用 . 所 以 , 评 估 的 效 果 取 决 于 评 估 师 的 经 验 .

• “ 重 量 级 ” 的 评 估 技 术 , 成 本 较 高

基 于 场 景 的 评 估 方 法 规 定 的 步 骤 比 较 复 杂 , 参 与 人 员 较 多 , 需 要 组 织 专 门 评 估 会 议 . 在 较 大 规 模 的 软 件 项 目 中 是 比 较 适 用 的 , 但 需 要 的 成 本 也 较 高 . 如 : 采 用 ATAM 进 行 中 等 规 模 评 估 的 粗 略 成 本 是 70 人 天 ; 进 行 小 规 模 评 估 的 粗 略 成 本 也 需 要 32 人 天 . 然 而 , 对 于 中 小 规 模 的 软 件 项 目 , 由 于 预 算 和 时 间 的 限 制 很 难 按 照 这 些 “ 重 量 级 ” 的 评 估 方 法 进 行 实 施 . 因 此 , 有 必 要 研 究 适 合 中 小 规 模 软 件 项 目 的 “ 轻 量 级 ” 评 估 技 术 .

• 没 有 考 虑 知 识 的 积 累 和 应 用 问 题 , 造 成 资 源 的 浪 费

在 软 件 工 程 研 究 中 , 知 识 的 积 累 和 应 用 是 一 个 非 常 值 得 注 意 的 问 题 . 知 识 的 积 累 和 应 用 为 软 件 技 术 的 发 展 起 着 极 大 的 推 动 作 用 . 在 经 过 一 次 又 一 次 的 软 件 体 系 结 构 评 估 后 , 是 否 能 够 积 累 足 够 的 知 识 并 让 这 些 知 识 可 以 被 重 复 利 用 是 一 个 非 常 重 要 的 问 题 . 在 基 于 场 景 的 评 估 方 法 中 , 对 知 识 积 累 问 题 考 虑 不 足 . 已 有 研 究 表 明 , 有 一 些 研 究 人 员 已 注 意 到 这 个 问 题 , 如 PSAEM 方 法 等 . 但 在 软 件 体 系 结 构 评 估 的 知 识 积 累 和 应 用 方 面 还 没 有 形 成 比 较 系 统 的 研 究 成 果 .

• 缺 乏 实 用 的 评 估 信 息 管 理 工 具

利 用 信 息 管 理 系 统 可 以 管 理 评 估 相 关 的 各 种 信 息 , 可 以 对 评 估 过 程 进 行 控 制 和 跟 踪 . 工 具 还 可 以 帮 助 评 估 人 员 提 高 评 估 效 率 , 进 一 步 规 范 评 估 过 程 的 实 施 , 提 高 评 估 的 实 施 效 果 , 并 有 利 于 积 累 评 估 的 各 种 信 息 . 现 在 仅 有 SAAM 提 供 了 SAAMTool 对 评 估 过 程 进 行 支 持 , 而 该 工 具 目 前 只 是 实 验 室 产 品 , 还 没 有 出 现 真 正 的 商 业 化 和 实 用 化 的 评 估 信 息 管 理 工 具 .

3.2.2

基 于 度 量 和 预 测 的 评 估 方 法 的 不 足

• 度 量 技 术 和 预 测 模 型 还 不 够 成 熟

在 软 件 体 系 结 构 评 估 中 , 采 用 的 度 量 技 术 和 预 测 模 型 多 数 还 来 自 于 传 统 的 软 件 度 量 和 预 测 方 法 . 由 于 这 些

技 术 在 软 件 体 系 结 构 层 面 的 应 用 还 没 有 经 过 充 分 的 验 证 , 所 以 , 这 些 方 法 和 模 型 是 否 符 合 软 件 体 系 结 构 层 次 的 评 估 还 有 待 进 一 步 研 究 . 另 外 , 基 于 贝 叶 斯 网 的 评 估 ( 预 测 方 法 ) 在 软 件 工 程 中 的 应 用 最 早 由 Fenton 提 出 , 用 于 代 替 传 统 的 回 归 模 型 解 决 缺 陷 预 测 问 题 . Fenton 从 理 论 上 比 较 了 因 果 关 系 模 型 ( 可 以 贝 叶 斯 网 表 示 ) 与 传 统 预 测 模 型 之 间 的 优 劣 , 说 明 了 因 果 关 系 模 型 在 软 件 度 量 和 预 测 技 术 研 究 中 的 作 用 . 但 现 在 的 评 估 技 术 研 究 中 对 这 一 新 的 研 究 成 果 关 注 不 够 . 在 我 们 的 调 研 中 , 只 有 B os c h 提 出 了 基 于 贝 叶 斯 网 的 软 件 体 系 评 估 方 法 (SAABNet) , 该 研 究 通 过 专 家 的 经 验 , 人 工 构 造 了 一 个 表 明 设 计 策 略 与 质 量 特 征 之 间 关 系 的 模 型 , 没 有 真 正 揭 示 各 种 软 件 体 系 结 构 的 特 征 与 软 件 质 量 特 征 之 间 的 关 系 , 也 没 有 解 决 贝 叶 斯 网 应 用 中 最 困 难 和 重 要 的 问 题 — — 如 何 获 取 经 验 数 据 并 且 利 用 数 据 构 造 贝 叶 斯 模 型 .

• 实 用 化 程 度 低

实 用 化 程 度 低 表 现 在 3 个 方 面 : (1) 对 软 件 体 系 结 构 描 述 各 不 相 同 , 如 果 要 利 用 不 同 的 方 法 对 软 件 体 系 结 构 进 行 评 估 , 则 需 要 根 据 不 同 评 估 方 法 的 要 求 构 造 多 个 不 同 的 模 型 . 既 浪 费 资 源 , 还 可 能 出 现 模 型 不 一 致 的 情 况 ; (2) 虽 然 大 多 数 方 法 都 说 明 有 工 具 支 持 , 但 这 些 工 具 都 只 是 实 验 室 产 品 , 很 难 在 实 际 评 估 中 使 用 ;(3) 要 求 评 估 人 员 具 备 较 高 的 理 论 水 平 .

3.2.3

基 于 特 定 ADL 的 评 估 方 法 的 不 足

• 领 域 限 制 和 实 用 化 程 度 低

该 方 法 是 ADL 研 究 的 进 一 步 成 果 . 由 于 目 前 大 多 数 ADL 都 是 面 向 某 个 特 定 领 域 的 , 加 入 了 很 多 领 域 特 征 ,

应 用 范 围 比 较 窄 ; 同 时 , 基 本 上 都 采 用 了 形 式 化 的 描 述 方 式 , 对 用 户 要 求 较 高 , 目 前 实 用 化 程 度 还 较 低 .

[11,12,39,40]

张莉 等:软件体系结构评估技术

**3.3** 软 件 体 系 结 构 评 估 技 术 研 究 的 趋 势 分 析

1337

通 过 对 现 有 软 件 体 系 结 构 评 估 技 术 的 调 研 , 我 们 发 现 不 同 类 型 的 软 件 体 系 结 构 评 估 技 术 虽 然 有 不 同 的 研 究 思 路 和 研 究 内 容 , 但 这 些 技 术 之 间 却 并 不 矛 盾 , 甚 至 存 在 着 互 补 关 系 , 如 度 量 技 术 在 基 于 场 景 的 评 估 方 法 中 可 以 作 为 评 估 手 段 来 使 用 . 在 进 行 软 件 体 系 结 构 的 行 为 度 量 时 , 场 景 技 术 则 可 以 为 度 量 提 供 信 息 .

对 于 体 系 结 构 评 估 技 术 , 本 文 认 为 无 论 哪 种 方 法 都 应 该 重 视 基 础 研 究 和 应 用 研 究 . 基 础 研 究 揭 示 规 律 , 应 用 研 究 促 进 技 术 的 推 广 和 应 用 .

• 基 础 研 究 部 分

基 础 研 究 的 目 标 是 揭 示 软 件 体 系 结 构 模 型 的 特 征 与 软 件 质 量 因 素 之 间 的 关 系 . 从 软 件 体 系 结 构 评 估 的 目 标 而 言 , 各 种 评 估 技 术 , 无 论 是 利 用 人 的 经 验 还 是 自 动 化 的 预 测 , 都 需 要 通 过 在 软 件 体 系 结 构 层 次 上 可 以 观 测 到 的 现 象 或 特 征 来 预 测 未 来 软 件 产 品 的 质 量 特 征 , 如 通 过 软 件 体 系 结 构 模 型 的 结 构 特 征 ( 结 构 复 杂 性 、 结 构 形 态 与 结 构 耦 合 度 等 ) 来 预 测 软 件 系 统 的 适 应 性 . 因 此 , 软 件 体 系 结 构 模 型 的 特 征 和 软 件 质 量 因 素 之 间 的 关 系 是 所 有 软 件 体 系 结 构 评 估 技 术 的 基 础 .

基 础 研 究 的 研 究 思 路 是 利 用 度 量 技 术 对 各 种 特 征 和 因 素 进 行 量 化 , 然 后 选 择 合 适 的 理 论 模 型 建 立 软 件 体 系 结 构 模 型 的 特 征 与 软 件 质 量 因 素 之 间 的 关 联 模 型 , 研 究 内 容 包 括 关 联 模 型 的 表 示 、关 联 模 型 的 构 造 、基 于 关 联 模 型 的 推 理 . 从 当 前 软 件 工 程 领 域 的 研 究 看 , 可 选 择 的 理 论 模 型 有 表 示 不 确 定 性 因 果 关 系 的 贝 叶 斯 网 络 、 回 归 模 型 等 . 应 该 注 意 到 , 贝 叶 斯 网 络 作 为 一 种 新 的 工 具 , 在 软 件 工 程 中 以 及 其 他 领 域 的 应 用 都 显 示 出 了 其 相 应 的 优 点 . 对 关 联 模 型 进 行 研 究 , 需 要 分 析 大 量 的 数 据 , 而 数 据 收 集 是 软 件 工 程 研 究 领 域 一 个 公 认 的 难 题 . 本 文 认 为 , 现 在 越 来 越 多 的 开 源 项 目 以 及 软 件 体 系 结 构 模 式 的 提 出 , 为 数 据 收 集 提 供 了 一 条 可 行 的 途 径 .

从 现 在 的 研 究 来 看 , 基 础 研 究 还 比 较 薄 弱 , 所 以 , 本 文 认 为 应 该 加 强 该 部 分 的 研 究 , 研 究 的 重 点 是 量 化 体 系 结 构 特 征 , 建 立 软 件 体 系 结 构 特 征 和 软 件 质 量 之 间 的 关 联 模 型 , 为 其 他 部 分 研 究 奠 定 基 础 .

• 应 用 研 究 部 分

应 用 研 究 部 分 的 研 究 目 标 是 提 供 适 合 人 们 使 用 的 软 件 体 系 结 构 评 估 方 法 及 支 持 工 具 . 应 用 研 究 应 该 从 软 件 体 系 结 构 评 估 实 施 的 角 度 出 发 , 研 究 在 实 施 过 程 中 的 各 种 问 题 , 包 括 评 估 过 程 、 评 估 资 源 需 求 、 评 估 技 巧 及 工 具 支 持 等 .

应 用 研 究 的 研 究 思 路 是 现 有 研 究 成 果 的 实 用 化 研 究 , 并 在 评 估 过 程 中 积 极 地 利 用 基 础 研 究 部 分 的 研 究 成 果 , 即 软 件 体 系 结 构 的 特 征 与 软 件 质 量 因 素 之 间 的 关 联 模 型 . 这 既 能 减 少 评 估 对 专 家 经 验 的 依 赖 , 又 有 利 于 继 续 将 评 估 的 经 验 转 化 为 知 识 积 累 到 关 联 模 型 中 . 应 用 研 究 部 分 的 另 一 个 重 点 就 是 工 具 支 持 问 题 . 软 件 工 程 的 经 验 已 经 证 明 辅 助 工 具 可 以 提 高 工 作 效 率 、规 范 工 作 方 式 、提 高 工 作 质 量 , 评 估 工 具 的 研 究 将 推 动 评 估 技 术 的 进 一 步 发 展 .

从 现 在 的 研 究 来 看 , 应 用 研 究 已 经 取 得 了 较 丰 富 的 研 究 成 果 , 而 且 也 已 经 有 部 分 成 果 得 到 推 广 和 应 用 . 但 本 文 认 为 还 应 该 加 强 :

1. 基 础 研 究 与 应 用 研 究 的 结 合 研 究 , 减 少 对 评 估 师 经 验 的 依 赖 , 提 高 评 估 结 果 的 准 确 性 ;
2. 在 成 熟 的 评 估 过 程 基 础 上 , 构 造 商 业 化 的 软 件 体 系 结 构 评 估 支 撑 系 统 , 减 少 评 估 成 本 ;
3. 评 估 技 术 的 标 准 化 研 究 , 比 如 CSE-CMU 在 质 量 属 性 方 面 和 软 件 推 理 框 架 进 行 的 标 准 化 研 究 . **References**:

[1] Bass L, Clements P, Kazman R. Software Architecture in Practice. 2nd ed., Boston: Addison Wesley Professinal, 2003.

[2] Perry DE, Wolf AL. Foundations for the study of software architecture. ACM SIGSOFT Software Engineering Notes, 1992,17(4): 40 −52.

[3] Garlan D, Shaw M. An introduction to software architecture. In: Ambriola V, Tortora G, eds. Advances in Software Engineering and Knowledge Engineering. World Scientific Publishing Co., 1993.

[4] Pressman RS. Software Engineering, A Practitioner ’s Approach. 4th ed., McGraw-Hill, 1997.

1338 *Journal of Software* 软件学报 Vol.19, No.6, June 2008

[5] Kazman R, Bass L, Abowd G, Webb M. SAAM: A Method for Analyzing the Properties of Software Architecture. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 1994. 81 −90.

[6] Clements P, Kazman R, Klein M. Evaluating Software Architecture. 2nd ed., Addison Wesley, 2002.

[7] Williams LG, Smith CU. PASA

SM

: A method for the performance assessment of software architectures. In: Proc. of the 3rd Int ’l

Workshop on Software and Performance. New York: ACM Press, 2002. 179−189.

[8] Williams LG, Smith CU. Performance evaluation of software architectures. In: Proc. of the 1st Int ’l Workshop on Software and Performance. New York: ACM Press, 1998. 164−177.

[9] Bengtsson P, Lassing N, Bosch J, Vliet H. Architecture-Level modifiability analysis (ALMA). The Journal of Systems and Software, 2004,69(1-2):129 −147.

[10] Bengtsson P, Bosch J. Architecture level prediction of software maintenance. In: Proc. of the 3rd EuroMicro Conf. on Maintenance and Reengineering (ICSE’99). Amsterdam: IEEE, 1999. 139 −147. <http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?&arnumber=756691>

[11] Van Gurp J, Bosch J. Automating software architecture assessment. In: Proc. of the 9th Nordic Workshop on Programming and Software Development Environment Research. Lillchammer, 2000. <http://www.jillesvangurp.com/static/nwper2000_final_version.>pdf

[12] Van Gurp J, Bosch J. SAABNet: Managing qualitative knowledge in software architecture assessment. In: Proc. of the 2000 IEEE Conf. on Engineering of Computer Based Systems. 2000. 45 −53. <http://www.jillesvangurp.com/static/nwper2000_final_version.pdf>

[13] Tvedt RT, Lindvall M, Costa P. A process for software architecture evaluation using metrics. In: Proc. of the 27th Annual NASA Goddard/IEEE Software Engineering Workshop (SEW-27 2002). 2002. 191 −196. <http://ieeexplore.ieee.org/iel5/8545/27004/>01199475.pdf?tp=&arnumber=1199475&isnumber=27004

[14] Nakamura T, Basili VR. Metrics of software architecture changes based on structural distance. In: Proc. of the 11th IEEE Int’l Software Metrics Symp. (METRICS 2005). 2005. 8 −17. <http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=1509286>

[15] Dobrica L, Niemela E. A survey on software architecture analysis methods. IEEE Trans. on Software Engineering, 2002,28(7): 638−653.

[16] Babar MA, Zhu L, Jeffery R. A framework for classifying and comparing software architecture evaluation methods. In: Proc. of the 2004 Australian Software Engineering Conf. 2004. 309−318. <http://ieeexplore.ieee.org/iel5/9061/28748/01290484.pdf?tp=&>arnumber=1290484&isnumber=28748

[17] Babar MA, Gorton I. Comparison of scenario-based software architecture evaluation methods. In: Proc. of the 11th Asia-Pacific Software Engineering Conf. 2004. 600 −607. <http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=1371976>

[18] Lassing N, Rijsenbrij D, van Vliet H. On software architecture analysis of flexibility complexity of changes: Size isn’t everything. In: Proc. of the 2nd Nordic Software Architecture Workshop (NOSA ’99). 1999. 1103−1581. <http://www.cs.vu.nl/~hans/>publications/y1999/NOSA99.arch.pdf

[19] Molter G. Integrating SAAM in domain-centric and reuse-based development processes. In: Proc. of the 2nd Nordic Workshop on Software Architecture. 1999. 1103 −1581. <http://www.cs.vu.nl/~hans/publications/y1999/NOSA99.arch.pdf>

[20] Lung CH, Bot S, Kalaichelvan K, Kazman R. An approach to software architecture analysis for evolution and reusability. In: Proc. of the 1997 Conf. of the Centre for Advanced Studies on Collaborative Research. IBM Press, 1997. 1 −11. <http://portal.acm.org/>citation.cfm?id=782010.782025

[21] Zhu LM, Ali Babar M, Jeffery R. Mining patterns to support software architecture evaluation. In: Proc. of the 4th Working IEEE/IFIP Conf. on Software Architecture (WICSA 2004). 2004. 25 −34. <http://ieeexplore.ieee.org/iel5/9167/29100/01310687.pdf?>tp=&arnumber=1310687&isnumber=29100

[22] Tekinerdogan B. ASAAM: Aspectual software architecture analysis method. In: Proc. of the 4th Working IEEE/IFIP Conf. on Software Architecture (WICSA 2004). IEEE, 2004. 5 −14. <http://ieeexplore.ieee.org/iel5/9167/29100/01310685.pdf?tp=&arnumber>=1310685&isnumber=29100

[23] Folmer E, Bosch J. Case studies on analyzing software architectures for usability. In: Proc. of the 31st EUROMICRO Conf. on Software Engineering and Advanced Applications (EUROMICRO-SEAA 2005). IEEE, 2005. 206−213. <http://ieeexplore.ieee.org/>iel5/10177/32500/01517744.pdf?tp=&arnumber=1517744&isnumber=32500

[24] OMG. UML 2.0 superstructure specification. <http://www.omg.org/cgi-bin/doc?ptc/2004-10-02,2004-10-02/2005-03-20>



张莉 等:软件体系结构评估技术

1339

[25] Kazman R. Tool support for architecture analysis and design. In: Proc. of the 2nd Int ’l Software Architecture Workshop. New York: ACM Press, 1996. 94 −97. <ftp://ftp.sei.cmu.edu/pub/sati/Papers_and_Abstracts/ISAW-2.ps>

[26] Knodel J, Lindvall M, Muthig D, Naab M. Static evaluation of software architecture. In: Proc. of the Conf. on Software Maintenance and Reengineering (CSMR 2006). IEEE Computer Society, 2006. <http://ieeexplore.ieee.org/iel5/10671/33675/>01602379.pdf?tp=&arnumber=1602379&isnumber=33675

[27] Yacoub SM, Ammar HH. A methodology for architecture-level reliability risk analysis. IEEE Trans. on Software Engineering, 2002,28(6):529 −547.

[28] Kruchten P, Wrote; Zhou BS, Wu CY, Wang JL, Trans. The Rational Unified Process: An introduction. Beijing: China Machine Press/ Addison Wesley, 2002 (in Chinese).

[29] Selic B, Gullekson G, Ward P. Real-Time Object Oriented Modeling. New York: John Wiley and Sons, 1994.

[30] Smith CU, Williams LG. Performance engineering evaluation of object-oriented system with SPE.ED. Computer Performance Evaluation: Modelling Techniques and Tools. LNCS 1245, 1997. 135−l54. <http://www.perfeng.com/~cusmith>

[31] Lyons A. Developing and debugging real-time software with objecttime developer. 1999. 17 −24. <http://www.realtime->info.com [32] HUGIN Expert Brochure. Hugin expert A/S. Aalborg, 1998. <http://www.hugin.dk>

[33] Honeywell Company. Domain-Specific software architectures for GN&C (DSSA). 1993. <http://www.htc.honeywell.com/projects/>dssa/

[34] Honeywell Technology Center. MetaH user ’s manual version 1.27. 1998.

[35] Kenney JJ, Luckham DC. Specifyng and testing conformance to reference architectures. 1993. <http://pavg.stanford.edu/rapide/>rapide-pubs.html

[36] Riva C, Selonen P, Systa T, Xu J. UML-Based reverse engineering and model analysis approaches for software architecture maintenance. In: Proc. of the 20th IEEE Int ’l Conf. on Software Maintenance (ICSM 2004). IEEE Computer Society, 2004. 50 −59.

[37] Selenen P, Xu J. Validating UML models against architectural profiles. In: Proc. of the ESEC 2003. New York: ACM Press, 2003. 58 −67. <http://portal.acm.org/citation.cfm?id=940081>

[38] Peltonen J, Selenen P. An approach and platform for building UML model processing tools. In: Proc. of the ICSE 2004 Workshop WoDiSEE2004. 2004. 51 −57. <http://practise.cs.tut.fi/files/publications/inari/WoDiSee04_Peltonen.pdf>

[39] Fenton N, Neil M. Software metrics: Successes, failures and new directions. The Journal of Systems and Software, 1998,47: 149−157.

[40] Fenton N, Neil M. A critique of software defect prediction models. IEEE Trans. on Software Engineering, 1999,25(5):675 −689.

附 中 文 参 考 文 献 :

[28] Kruchten P,著 ; 周 伯 生 , 吴 超 英 , 王 佳 丽 , 译 . Rational 统 一 过 程 引 论 . 北 京 : 机 械 工 业 出 版 社 / Addison-Wesley,2002.

张 莉 ( 1968 － ), 女 , 北 京 人 , 博 士 , 教 授 , 博 士 生 导 师 , CCF 高 级 会 员 , 主 要 研 究 领 域 为 软 件 工 程 , 需 求 工 程 , 软 件 体 系 结 构 , 过 程 建 模 和 优 化 .

高 晖 ( 1977 － ), 男 , 博 士 生 , 主 要 研 究 领 域 为 软 件 体 系 结 构 , UML 相 关 技 术 .

王 守 信 ( 1979 － ), 男 , 博 士 生 , 主 要 研 究 领 域 为 需 求 工 程 , 软 件 体 系 结 构 , M D A 相 关 技 术 .