

SEM
译丛

Wiley 系统工程与管理系列精选译丛

丛书主编 胡保生



A. Dubi

蒙特卡洛方法

在系统工程中的应用

Monte Carlo Applications in Systems Engineering

〔以〕 A·杜比 著

卫军胡 译

$$P = \sum_{k=0}^{\infty} \sum_{\bar{B}_0} \sum_{\bar{B}_1} \sum_{\bar{B}_2} \sum_{\bar{B}_3} \cdots \sum_{\bar{B}_k} \sum_{t_0} \sum_{t_1} \cdots \sum_{t_k}$$
$$\bar{B}_0 \rightarrow \bar{B}_1 \left[\frac{F_s(\bar{B}_1, t_1, T)}{P_1^*} \right] P_1^* \frac{T(\bar{B}_1, t_1 \rightarrow t_2)}{F_s(\bar{B}_1, t_1, T)} C(t_2; \bar{B}_1 -$$
$$\left[\frac{F_s(\bar{B}_{k-1}, t_{k-1}, T)}{P_{k-1}^*} \right] P_{k-1}^* \frac{T(\bar{B}_{k-1}, t_{k-1} \rightarrow t_k)}{F_s(\bar{B}_{k-1}, t_{k-1}, T)} C(t_k; \bar{B}_{k-1} -$$



西安交通大学出版社
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY PRESS

0242. 2/2

2007

SEM Wiley 系统工程与管理系列精选译丛
译丛 丛书主编 胡保生

Monte Carlo Applications in Systems Engineering

蒙特卡洛方法 在系统工程中的应用

〔以〕 A. Dubi 著
A·杜比

Ben Gurion University of the Negev,
Beer-Sheva, Israel

卫军胡 译

西安交通大学出版社
Xi'an Jiaotong University Press

Monte Carlo Applications in Systems Engineering
Copyright ©2000 by John Wiley & Sons, Inc.

No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system or transmitted in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording, scanning or otherwise, except as permitted under Section 107 or 108 of the 1976 United States Copyright Act, without either the prior written permission of the Publisher, or authorization through payment of the appropriate per-copy fee to the Copyright Clearance Center, 222 Rosewood Drive, Danvers, Ma 01923, (508) 750-8400 fax (508) 750-4744. Requests to the Publisher for permission should be addressed to the Permissions Department, John Wiley & Sons, Inc., 605 Third Avenue, New York, NY 10158-0012, (212) 850-6011, fax (212) 850-6008, E-mail: PERMREQ @ WILEY. COM.

All rights reserved. This translation published under license.

陕西省版权局著作权合同登记号:25-2005-083

图书在版编目(CIP)数据

蒙特卡洛方法在系统工程中的应用 / (以)杜比(Dubi, A.)著;
卫军胡译. — 西安:西安交通大学出版社, 2007. 8
书名原文: Monte Carlo Applications in Systems Engineering
ISBN 978-7-5605-2526-6

I. 蒙… II. ①杜…②卫… III. 蒙特卡洛法-应用-系
统工程 IV. 0242.2 N94

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 121143 号

书 名:蒙特卡洛方法在系统工程中的应用
著 者:(以)A·杜比
译 者:卫军胡
出版发行:西安交通大学出版社
地 址:西安市兴庆南路 10 号 西安交通大学出版大厦(邮编:710049)
电 话:(029)82668357 82667874(发行部)
(029)82668315 82669096(总编办)
电子邮件:xjtupress@163.com
印 刷:西安交通大学印刷厂
字 数:299 千字
开 本:687mm×1012mm 1/16
印 张:21
印 次:2007 年 9 月第 1 版 2007 年 9 月第 1 次印刷
印 数:0001~3000
书 号:ISBN 978-7-5605-2526-6/N·9
定 价:36.00 元

版权所有 侵权必究

谨以此书献给那些呕心沥血、坚持不懈追求真理的人们，
献给倾注一生给予我关怀和鼓励的妻子 Nehama

——“你要把什么奉献给音乐？”

她问。

——“我的一生。是的，我要奉献我的一生！”

——“那么，作为回报，音乐将会给你带来什么？”

——“我的生命！”

——摘自以色列历史上最伟大的诗人

Natan Altermann

“云彩中微小的电子、一个美丽的方程、一缕真理，
就像音乐一样美妙”

——A. Dubi

译者的话

本书是美国 John Wiley & Sons 出版公司出版的“系统工程与管理丛书”中的一本重要著作,主要探讨系统工程领域中的一种重要方法——蒙特卡洛方法及其在工业工程中的应用。

系统工程是一门预测系统未来状态的学科。在工业工程领域,系统工程涉及系统的可用性、可靠性、故障、备件、维护与维修、系统性能、成本等复杂问题。通常,预测是建立在真实系统的模型之上的,模型和真实系统之间不可避免地存在差距。蒙特卡洛方法是解决这类复杂问题的一种非常有效的方法,它不必为了对问题进行简化而做出各种不切实际的假设,因此可以有效地减小这种差距并得到更加精确的解。

蒙特卡洛方法最早出现于 40 年代早期,在设计核反应堆和其它核设备的防护设施时需要求解六维积分方程,该方法是求解该方程的唯一方法。在以后的 30 多年时间里,该方法一直广泛地应用于核技术领域。这些年来,随着计算技术的迅速发展,蒙特卡洛方法越来越可行,在比核技术领域更加复杂的系统工程领域有着广阔的应用前景。作者在本书中的研究表明,这种方法既能显著降低系统的生命周期成本,提供更好的设计方案,还可以更加广泛、更加深入地探索工业系统。

蒙特卡洛方法所针对的是复杂空间上的多维平均的估值问题,因此它为建立和分析复杂模型提供了一种潜在的 and 可行的工具。简单地说,这是一种计算随机变量的函数的均值的方法。进一步扩展,均值可以是定义在多个随机变量上的多维概率密度函数的某个特定的平均值,而且任何一个量都可以表示为一个或者多个随机变量的函数的均值,因此蒙特卡洛方法具有很强的适用

性。我们知道,维数在系统工程领域中起着很重要的作用,“维数魔咒”限制了很多解析方法的应用,而蒙特卡洛的最大优点是,其计算的收敛速度和误差的大小与问题的复杂度或相空间的维数无关,这一性质使得它在科学和工程的许多领域都获得了重要应用。本书对蒙特卡洛方法进行了全面深入的探讨和研究,相信本书对于系统工程领域的学者、教师、研究生和工程技术人员,具有重要的参考和学习价值。

本书涉及系统工程、蒙特卡洛方法和工业工程的有关知识,需要许多复杂的推导和证明,内容比较深奥难懂。为了帮助读者掌握本书的基础理论和基本方法,并熟练地应用于实际问题,本书以实际应用为背景,给出了多达 49 个例子。这些例子是工业工程问题中的典型案例,能够反映系统工程的本质,真实、生动、有趣。

在本书的翻译过程中,得到了西安交通大学系统工程研究所胡保生教授和孙国基教授的指导和支持,译者的 4 位硕士研究生——苏琴、刘力、陶维丽、李鹏等同学在翻译、校对、试读、公式编辑等方面给予了很大的帮助。西安交通大学出版社赵丽萍编审和宗立文编审对译文进行了反复地阅读和认真地修改,在此对他们的努力和付出表示衷心的感谢!

翻译尽量忠实于原文,虽竭尽全力,但由于译者水平所限,译文中尚有不当之处,敬请读者批评指正。

译 者

2007 年 8 月 8 日

于西安交通大学

前 言

本书主要探讨数学方法在工业工程中的应用,特别是在系统工程领域如何利用蒙特卡洛(Monte Carlo)方法对系统的性能进行改进。本书对这一主题及相关问题进行了深入的数学分析和理论研究,以便更深入地理解系统的深层结构。书中讨论的很多方法和例题都附有计算机程序,这些程序可以从如下站点下载:<ftp://ftp.wiley.co.uk/pub/books/dubi/>。

多年以前,作者曾参加了一次会议,讨论一个系统设计的改进方案,问题是有两台并行运行的计算机用于传输数据,其中计算机 A 是主系统,其性能较好但价格较高,而计算机 B 用作备用设备。一旦 A 发生故障,B 被激活并代替 A 工作;激活计算机 B 需要经过一段时间的延迟。计算机 A 和 B 的维修均需要在外地进行,维修过程将耗时一个月。目前 A 和 B 使用时间已久,发生故障的频率随着服役时间的增加而逐渐增加,而且系统性能已经无法达到设计要求。问题是,如何才能改善该系统的性能呢?

经过激烈的讨论,大家提出了许多方案,希望通过最佳的途径提高系统的性能。其中包括:

- 设备 B 一直保持运行状态以消除切换延迟;
- 用一台新的设备 A 代替 B,因为 A 更加可靠;
- 在现场增加一台设备 A 作为备用;
- 在现场增加一台设备 B 作为备用;
- 用相同的系统完全取代现有系统;
- 增加另一台设备 B 并使其一直处于运行状态。

每个与会者都提出了许多充足的论据来证明自己的观点。他们根据经验、直觉和对工程技术的深入了解来判断这些方案在不

同指标上对系统性能可能产生的影响。然而这次讨论最终以失败告终。失败的真正原因是,这个问题不应该成为一场讨论的主题,而是应该通过计算和数值评估的方法加以解决。经过这次讨论,第一种方法最终被采纳,但是可以证明,这实际上可能是最差的一种方案,其系统性能甚至比以前更差。其实只需经过简单的计算就可以找到最佳的方案。

1990年,南半球某公用事业公司建造了一个专用变电站,为一个大型化工企业提供电力。变电站通常是由母线、电路断路器和变压器构成的一个复杂系统,把电力从高压线路输送到生产现场的低压线路上。为了保证不间断的能源供应,系统配置了大量的冗余设备,但是这些冗余设备反而大大增加了发生严重连锁故障的风险,可能给下游的客户和上游的发电机组造成损害。事实上,该变电站在建成之后远远没有达到预期的性能。客户提起诉讼,要求赔偿高达1.5亿美元的经济损失。其后,为了改进该系统,一场没完没了的讨论展开了。有人提出了试错法,这意味着首先要讨论并确定哪一种方法才是能够明显改进系统性能的最好方法(可以推测没有人真正知道什么是最好的方法,否则这个问题就不会成为问题了),然后对系统做相应的改变,这种方法将耗费数百万美元的资金并经历漫长的“等待,观察,期望”的过程,是客户无法接受的。最后应用蒙特卡洛方法对系统的性能进行计算,确定了最佳设计方案,使得这个变电系统从此正常运转。

在欧洲的一家大型垃圾焚烧场,由于焚烧容器中的废弃物具有严重的腐蚀作用,致使故障频繁发生而不得不长期关闭,为此支付了巨额的维修费用。于是人们考虑采用预防性检修的方法来减少恶性事故发生的概率,但是,由于检修本身就意味着要暂时关闭工厂,并且需要投入资金,因此无法准确判断什么才是最优的维修方法,甚至不知道检修是否能够改善目前的整体状况。可以想象,讨论,研究,试验,改进等过程将耗费大量时间和金钱。与上面的例子一样,实践证明,用数学方法计算出检修对系统性能的改进作用,才是最廉价和最有效的途径。

上面的例子是笔者过去15年里遇到的大量工业问题中的一些典型的系统工程案例,它们刻画了系统工程的本质。系统工程

(Systems Engineering)是一门**预测系统未来状态**的学科。当我们设计一个新的系统或对现有系统进行改造时,总希望在投入运行之前可以预测该系统的行为。从理论上讲,这种预测能够解决任何可能出现的问题,例如:

- 系统的有效性(Availability)随时间怎样变化?
- 可能发生多少和哪些类型的故障?
- 需要多少备件?
- 何时进行何种预防性检修?
- 系统的性能如何(产量、是否完成既定任务以及其它性能指标)?
- 系统运行的预计成本是多少?
- 需要安排多少维修组?
- 采用哪种类型的后勤保障? 如何发现故障并加以处理?

本书力求完整地阐述蒙特卡洛方法及其解决这类问题的能力。

能否准确预测工业系统的未来行为?

每个学科都涉及用于预测的规则和方法。在这点上,我们可以考虑两个极端情况:自然科学是一个方面,而社会科学和政治学则是另一个方面,它们是否代表了可预测性的两个极端还在讨论之中。物理学中科学计算的高准确性通常得到人们的认可。海森堡测不准原理(Heisenberg Uncertainty Principle)的准确性达到了 10^{-34} 数量级。与此同时,在社会科学领域,即使对一个人的未来进行预测,而不考虑他和团体或组织的关系,就已经超出了任何学科的能力范围。心理历史学(Psycho - History)是已故大师 I. Asimov 开创的用于预测和控制人类历史的科学,至今仍然被认为是科幻而非科学。

物理学具有令人惊奇的能力,可以准确地预测氢原子的能级(Energy Levels),微中子(Neutrino Particle)的存在及其性质,原子的热运动(Thermal Motion)及其与温度的关系。虽然物理学家们做出了一定的贡献,但是这些成就并非他们的智慧带来的结果,而是由于这些物理学中的问题本身就非常简单。自然界中几乎没有

什么比氢原子中单个质子和电子在静电作用下的运动更简单了,而且量子物理中的很多内容就是针对这类问题。我们知道,在生物体中每立方厘米包含了大约 10^{23} 个原子,还包括各种各样的大分子、DNA、细胞、组织、大脑、本能与欲望、意志甚至灵魂等,其中大多数我们目前还很难定义和理解。工业系统和人造系统位于物理学和社会科学两极中间的某个位置。系统通常按照一定的规律运行,这些规律可以是物理学规律,也可以是人为制定的规则。系统大多不是在实验室那样稳定的环境中运行,而是受到各种内部的和外部的随机事件的影响,系统之间的交互、环境变化、人为失误、机器老化以及其它不确定因素都会给系统造成影响。因此系统的行为必然是随机的,即使两个完全相同的系统也会有不同的“历史”和不同的事件。图1是物理学到社会科学之间的可预测性示意图,在预测中使用数学方法,特别是蒙特卡洛方法可使系统工程的可预测性显著地向左移动。

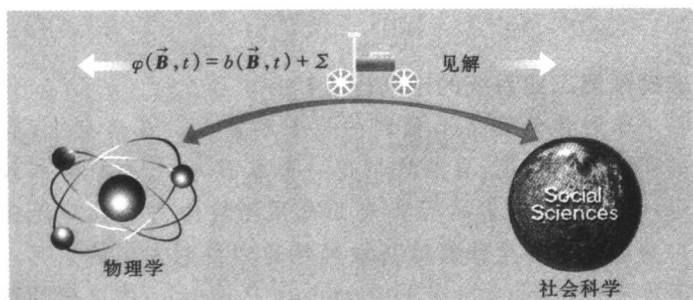


图1 可预测性示意图

有趣的是,虽然我们都认为准确的预测可以更好地改善系统工程中的各个方面,但是经验证明这并不是任何时候都成立的。没有人会怀疑万有引力定律,也很难听见有人说“我认为光的折射率是多少多少”。人们不会对那些已经过准确计算、预测和测量的事情持有异议,可是,每个人对于社会或政治的问题都有各自不同的看法。由此我们可以发现一个有意思的现象,“问题越复杂,对其拥有自己的观点所需要的知识反而越少”,也就是说,可预测性在一定程度上剥夺了人们拥有自己的看法的权利。

在系统工程中最重要的元素之一就是资源。它是除系统自身以外所有用来支持系统运转的元素,包括诊断设备、维修人员、维修设备、备件、检查和维护等。很明显,这些资源所需的费用是不容忽视的,在这上面的投入通常相当于系统本身,有时甚至高于系统本身。

下面讨论备件(Spare Parts)的问题,其中最常见也是最重要的问题是,我们到底需要多少备件?

以下是关于备件问题的一些简单的看法和常见的现象。“备件问题”的最终答案必须是一个确定的数字,类似于购买什么,买多少,何时买这类问题。任何问题,只要它所要求的答案是数字,它必定是一个数学问题。而要正确地求解一个数学问题,首先要正确地描述该问题。与系统中的任何资源一样,总体上讲,人们购买并使用备件的唯一目的就是保证系统的正常运转。因此,如果在定义备件问题时没有将其与系统性能紧密联系在一起,没有明确地建立备件问题与系统性能之间关系,那么这种定义必然是不恰当的。

由此可知,需要首先确定系统的目标性能,才能计算出达到并保证该性能所需要的备件和其它资源的数量(见图2)。定义系统的性能要求通常不是一个简单的事情,而且需要在考虑其它问题之前加以解决,否则就缺乏建立该系统的明确的目标。例如,可以

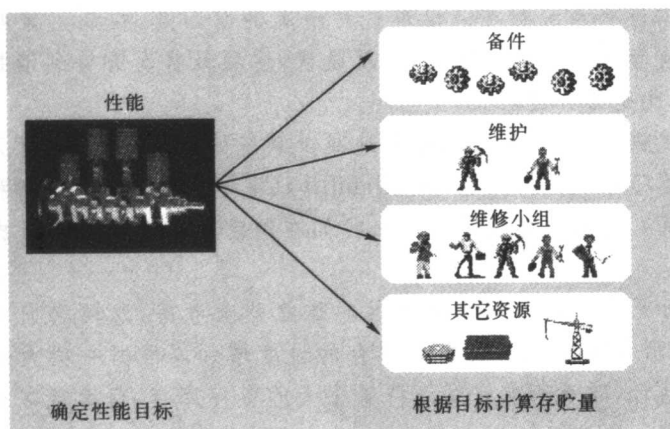


图2 资源用于支持系统最重要的因素:系统性能

给一条生产线制定一个目标:全年至少有 85% 的时间是满负荷生产;也可以要求一个飞行中队以不低于 98% 的概率确保在任何时间都有 90% 以上的飞机可以正常飞行。很多系统的性能要求是多指标或复合型的,比如要求燃气轮机的平均半年产量不低于 $170 \times 10^{15} \text{ W}$, 同时每个月份平均产量低于 $150 \times 10^{15} \text{ W}$ 的概率低于 0.5%。有一点需要非常清楚,我们购买、设计和使用一个系统的目的,就是为了达到某种性能。

到目前为止,工业系统中的绝大多数问题几乎不是以这种形式定义的,因此有必要强调这一点。人们习惯把所需的备件数量和系统故障率联系在一起,听起来这种方法似乎是合理的和可行的。但是,由于故障率、备件和系统性能三者之间的关系实际上并不简单,这种方式可能会造成一种误导。

有一次,某大型医疗设备企业的客户服务部经理在一份有关企业策略的文件中写到:“客服部门的目标就是减少公司产品的故障次数。”——这句话听起来似是而非。针对这样的描述,只要认真思考就会发现,有两种非常廉价的解决方案可以迅速达到这个目标。一种方法是不去维修任何一个出故障的系统,显然每个系统只会出现一次故障。另一种方案更加简单:如果从来不使用或不出售系统,则能够达到最低的故障次数,即零故障,这已经是最低的故障率了。很明显,这两种方案都比较极端,存在先天不足,即根本没有系统存在。出现这种情况的原因是,在制定策略时完全没有考虑系统及其性能,也就是说,这项策略没有得到清楚的描述,因此是不合适的。

更进一步,如果可以显著地减少系统的故障次数,同时又轻微地影响了系统的可用性(Availability)(比如由于增加了诊断和维护的时间),这可以接受吗?——我们在制定策略时仍然要考虑系统性能。

如果我们把资源和系统性能孤立开来考虑,忽视它们之间的联系,那么往往会造成备件库存的过度增加。根据一项大致而保守的估计,欧洲所有空军维持着庞大的备件库存,而消耗在那些从未使用过的备件上的金额高达 100~200 亿美元。这笔额外资金养活了一大批备件制造商,也使负责这些备件的管理机构得以生存。

值得注意的是,在大多数组织中,备件管理部门是独立于系统及其性能的,只有当系统需要备件时两者才发生联系。显然,只要备件充足,就不会招致抱怨,也不会引发问题,管理部门就能正常运转。因此,保留大量的备件符合这些机构的自身利益。备件上的消耗除了购买费用以外,还包括对备件库存进行存储、分类和维护的整个机构的维持费用。很快,备件管理部门就会成长为整个机构内一个富有活力的实体。过多的库存、大量的维护(汽车每 1000 km 更换一次机油不会带来什么损害,但增加了开支并使检修时间轻微增加)和频繁的检查几乎都为资源管理机构带来了可观的利益。事实上,总有人要为过多的费用埋单,通常,要么是普通的顾客通过缴纳电费,要么是纳税人缴纳税金,要么是最终用户以支付货款等形式直接或间接地为此埋单,而这些人往往不大可能知道他们的钱财被浪费在过多的备件上。

如果在考虑资源需求时能够明确和合理地制定系统的性能目标,并据此确定资源需求,那么上面这些问题就能迎刃而解了。

目前,在工业界存在一种非常普遍的现象:备件部门、维护部门、后勤部门、研究部门、检查部门和生产等部门之间相互独立而且缺乏必要的沟通和交流,它们没有认识到系统性能才是唯一要考虑的因素。实际上系统性能才是问题的出发点,其它一切都是为这一目标服务的。这些部门独自运作,各自为政,几乎很少进行信息的交流,这是造成这一问题的主要原因。反过来看,系统性能与系统资源之间存在关系是显而易见的,这一观点看似简单,但是很少有人重视;实现这种联系涉及非常复杂的数学问题,有些时候甚至非常困难。蒙特卡洛方法正好可以很好地解决这类问题。

从下面的分析可以看出,对备件问题进行模拟所呈现的系统行为和物质中的中性粒子的行为总体上呈现许多相似之处。从时间轴上观察,中子在介质中的行为所遵循的基本方程与决定系统行为的基本方程非常相似。人们自然会问:“中子在核反应堆中到底发生了什么复杂的变化?”这一严肃的问题需要使用大型计算机和复杂的数学方法,值得科学家、核工程师进行深入的研究。事实上,这是一个典型的问题,人们为了解决这一问题投入了大量的资金,研究了各种方法,编写了大量的计算机程序。与中子的运动问

题相比,备件问题显得微不足道,不足以引起科研人员的广泛关注,这是什么原因呢?

从纯数学的角度来看,备件问题更为复杂。尽管两者所遵循的方程具有基本相同的形式,但是以下三个原因决定了备件问题的复杂性:首先,中子问题是个六维问题(空间位置、方向及能量);而备件问题通常是多维的,它的维数取决于系统中的部件数目。其次,中子行为所要遵循的规律是通用的而且数量有限。比如,中子能够发生弹性或非弹性散射,能够被吸收而产生其它粒子等等。这些变化规律是确定无疑、永远成立的。它们是物质固有的,而非人为确定。因此,就可以测量和计算每一种反应的概率,并把这些数据供他人使用。而对于系统而言,其中的变化非常不同,而且复杂得多。我们可以把系统状态的某种变化定义为一个事件,那么,决定这个事件是否发生的规则就是人为制定的。举个例子,灯的寿命历程是由物理学规律所决定的,但是在灯的使用过程中的各种事件则取决于人的设计和决策。灯泡是否需要更换?怎么确定灯泡已经失效而不能继续使用?是否备有可用的灯泡?还有很多类似的问题。这些规则仅仅是事件的一部分。实际上仅用有限的、封闭的几个规则,甚至一组数量有限的规则集还不足以完全描述系统中所有的可能事件和各种意外事件。最后,与中子不同,系统中的部件不可避免地存在老化问题。中子的特性与时间无关,而系统中部件的特性则随着时间而改变,尤其是故障出现的趋势会随着时间的推移而上升。在研究系统的性能时,考虑系统演化过程中的老化现象对系统性能的影响,在数学模型中应该如何加入这一因素等问题,并不是一件容易的事情,这一现象使备件问题的复杂性大大增加。

从经济学的角度来说,备件问题和资源问题的重要性不比中子问题小,甚至重要得多,那么,为什么备件问题没有被当作一个重要而严肃的科学问题来研究呢?

前面已经提到,当问题的复杂性超过一定程度后,任何人对其都会有自己的看法。中子问题在日常生活中很少涉及,研究它们是科学家的事情,而备件问题则恰恰相反,在生活中很常见,每个技工都可能与备件打交道。这就好像一个人去买鸡蛋,实际上他

在与备件(鸡蛋)打交道。可见,这不是仅有科研人员才会涉足的问题。生活中没有人会为了决定买3个鸡蛋还是20个鸡蛋而去求解一个高阶的积分方程,多数时候购买自己所需的数目即可。这主要是因为决策失误的代价很低,买多买少对日常生活的影响很小,而且也很容易改正。鸡蛋的消耗很频繁也很有规律,即使在一周中的每一天或者一年中每个阶段鸡蛋的消耗数量有所变化,人们仍然可以很快统计出消费的数量。简单地以反复试验的方法就足以解决鸡蛋的库存问题。然而,如果鸡蛋的数量不足将带来极其严重的后果,例如会威胁到某些家庭成员的生命,问题就不这么简单了,试错法也不再适用了。这种情况下,人们通常最有可能购买过多的鸡蛋。但是,如果要买的除了鸡蛋以外,还要购买黄油和面包等,而资金又不足以多买这些东西时,问题就又产生了。

备件就和鸡蛋类似,如果错误的代价很低,错误容易纠正,而且消耗有规律可循,那么不需要特别的数学手段就可以计算出所需的数目,采用试错法或日常经验就可以了。如果备件问题不是这样,出现错误的代价很高,消耗量又没有呈现简单的规律,那么,这个问题就需要认真对待了,它的解决意味着在全国范围内节约大量的资源。

前面已经提到公司内部各部门之间自成体系、各自为政的问题,这种现象就是实际问题的数学复杂性导致的直接结果。可以把实际性能的预测值看作各种资源的一个复杂函数,通常在解决一个三维问题时,变量的分解是一种常用而非常有效的手段。比如,不用三元函数 $f(x, y, z)$ 的形式来表示一个微分方程的解,而是假定这个函数可以写成三个一元函数的乘积的形式,即 $f(x, y, z) = f_x(x) f_y(y) f_z(z)$ 。将该公式替换到微分方程,原来的三元微分方程就会分解为三个一元的微分方程。这样的分解方法使问题大大简化,也是非常合理的。同时由唯一性定理可以证明,该求解过程可以保证一旦找到一个解,它必然是正确的解。在一些实际的工业系统中采用类似的分解方法,却不具备合理性。系统的总体性能被看作一组函数的“乘积”,包括设计、备件、维护、检测、维修设备、测试设备、规划等项目,同时建立相应的部门以实现上述每项的职能。实际上这种分解没有任何合理性可言,只会使问

题更加困难而根本无法工作。很容易看出,把预防性维护和备件割裂的方法肯定是不正确的。维护的最终目的就是降低系统的故障次数,从而减少所需的备件数量,这两个部门显然是紧密联系、不可分割的。同样,系统的设计和备件之间也是相互联系的。在系统设计中包含适当的冗余可以提高系统对故障的容错能力,也就是说,即使某些部件发生故障,系统依然能够正常工作,这就降低了对备件需求的紧迫性。在备件到达之前,还可以坚持更长的时间。系统的各个部分都是紧密联系的,简单地将其拆分为独立的单元虽然降低了问题的难度,却得不到最优解。因此,这不是一种好的方法,说明我们对系统的本质缺乏足够的认识。

很多例子可以说明这种分解可能带来的后果。有一个大型的与国防有关的系统,它必须严格依照要求正常运行。从系统的框图(图3)可以看出,它包含一个主控制单元(Main Control Unit)和两个分支,每个分支包含一个执行/控制单元(LC),它后面与四个子单元相连。对一个请求进行响应需要一个或多个子单元,这些子单元之间可以相互替代。响应的成功率取决于动用的子单元数。动用的子单元数越多,响应的成功率也越高。但是,如果为一个请求而使用的子单元数太多,那么,当请求到达的速度比子单元重新投入的速度快的时候,剩下的可用单元数就会急剧下降,系统可能无法正常处理后续到达的请求。这是一个典型的优化问题,需要规划部门加以解决。规划部门在求解该问题时,综合考虑了

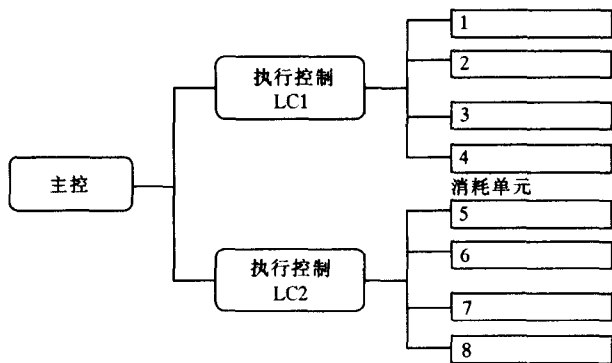


图3 请求驱动系统的结构图