

# 信息系统硬件资源需求测算方法

胡俊扬<sup>1</sup>, 易勇强<sup>1</sup>, 王涛<sup>2</sup>

(1. 中国南方电网有限责任公司, 广州 510530; 2. 南京南瑞集团公司信息系统集成分公司, 南京 210000)

**摘要:** 信息系统硬件资源作为支撑企业信息业务的基础设施, 其容量的准确测算对于信息系统的建设、运行以及扩容具有重要意义; 目前信息系统硬件资源容量测算方法主要有 TPC, SPEC, SAP 基准测试, Linpack 以及 RPE2 等; 研究表明, 这些方法有一定的通用性, 但在反映系统运行的实际性能指标等方面仍有不足, 导致企业在信息系统建设过程中普遍缺乏合适的硬件资源容量评估与配置方法, 造成信息化建设成本增高或资源浪费; 为解决这一问题, 通过对实际信息系统进行性能测试, 基于实测数据, 运用拟合方法和灰色关联方法对系统的硬件资源容量的关键参数进行分析, 建立硬件资源容量评估与测算模型, 从而对资源需求和性能指标进行较为准确的量化测算; 算例表明, 所建立的模型正确有效, 具有一定的工程应用价值; 运用该方法结合企业信息系统实际, 建立适合企业自身特点的测算标准, 帮助企业在硬件资源配置中明确需求, 确定选型, 降低采购成本, 达到避免浪费的同时满足业务需求的目标。

**关键词:** 信息系统; 硬件资源; 容量测算; 灰色关联分析; 拟合方法

## Estimation Method for Information System Hardware Resource Requirement

Hu Junyang<sup>1</sup>, Yi Yongqiang<sup>1</sup>, Wang Tao<sup>2</sup>

(1. China Southern Power Grid Company Limited, Guangzhou 510530, China;

2. IT system integration company, Nari Group Cooperation, Nanjing 210000, China)

**Abstract:** As the supporting infrastructure of company information business, accurate estimation of information system hardware resources has very important significances for construction, operation and expansion of information system. At present, the major method of measuring the hardware resource capacity of information system includes TPC, SPEC, SAP benchmark, Linpack, RPE2, etc.. Our research shows that these methods have certain generality, but in response to the actual performance index system and other aspects exist some deficiencies, leading enterprises generally lack of suitable capacity of the hardware resource assessment and allocation method in the process of the construction of information system, resulting in information construction cost increase or waste of resources. To solve this problem, through the performance test of the actual information system, based on the measured data, the analysis of the key parameters by fitting method and grey correlation method on the hardware resources of the system capacity, capacity building hardware resources evaluation and calculation model to quantify the measurement more accurate demand for resources and performance index. In this way, the modeling is obtained. The example shows that the model is correct and effective and it has a certain value in engineering. Using the method combined with the actual situation of enterprise information system, to establish the standard for the enterprise's own characteristics. Help enterprises to determine the selection of hardware procurement, reduce procurement costs; that is not wasted and can meet business needs.

**Keywords:** information system; hardware resources; capacity measure; gray correlation method; fitting method

## 0 引言

信息系统是保障企业生产、经营管理等业务正常运转的重要支撑, 承载它的基础硬件资源就显得十分重要。这些硬件资源主要包括服务器与存储。随着企业信息系统不断升级完善, 已有硬件资源需要扩容, 此时需要对其容量进行测算<sup>[1]</sup>。容量是对信息系统所需硬件资源进行的量化。服务器资源的量化指标包括服务器 CPU 核数、服务器内存大小等; 存储资源的量化指标包括存储空间、IOPS 等。与信息系统实际需求相比, 硬件资源容量的测算结果偏小则不能满足运行要求, 阻碍企业业务开展; 测算结果偏大则造成硬件资源整体使用率低, 导致设备成本的浪费。因此, 硬件资源容量的测算结果是否准确十分重要。企业有必要对硬件资源进行容量管理, 为信息系统所需的资源进行准确的量化与评估。良好的容量管理可以帮助企业进行精细化采购, 降低采购成本。容量管理工作的重点在容

量的评估、改进和预控, 通过建模、服务监视、性能管理、需求管理、负载分析、趋势分析、优化等过程实现对资源、服务性能等级的准确管理, 以符合当前和预期的业务需求。

目前, 对于信息系统硬件资源容量的常用测算方法仍存在一定的不足。很多企业采用的容量计算模型大多是以 TPC-C 为参照<sup>[2-3]</sup>, 但其中参数的选值具有很大的主观性, 并且各个硬件供应商公布的 TPC-C 数据往往只体现了极端配置的情况, 和企业典型配置之间没有直接对应关系。

针对上述问题, 以参照实际信息系统所搭建的测试环境为基础, 结合以往实践经验, 对系统实测运行数据进行整理分析, 使用灰色关联分析法<sup>[4-6]</sup>对各硬件设备的相关指标进行了定量的关联分析, 然后对关键指标与各运行数据进行建模, 从而得出硬件资源容量的测算方法。算例表明, 使用所建模型的计算结果与实际要求相符。

## 1 数据准备

以典型信息系统作为研究对象, 对其相关硬件设备容量参数进行采集、存储、分析, 并作为测算的输入。

收稿日期: 2017-03-20; 修回日期: 2017-04-16。

作者简介: 胡俊扬(1984-), 男, 贵州贵阳人, 硕士, 工程师, 主要从事电力信息化规划与计划管理方向的研究。

## 2 硬件资源测算方法构建

根据企业信息系统业务特点及需求, 硬件资源可分为存储硬件资源, 数据库服务器硬件资源, 应用服务器硬件资源。对这 3 种硬件资源分别进行分析建模。

### 2.1 存储硬件资源测算

对于存储硬件资源, 重点关注数据容量以及数据传输能力, 因此在进行容量测算时, 对数据存储空间与 IOPS 这两个关键指标进行建模计算。数据存储空间是指存储器可以容纳的二进制信息量, 用存储器中存储地址寄存器 MAR 的编址数与存储字位数的乘积表示, 是存储产品最为关键的参数, 类似磁盘的空间大小; IOPS (Input/Output Operations Per Second), 即每秒进行读写 (I/O) 操作的次数, 指存储每秒可接受多少次主机发出的访问。

总用户表大小 TotalTable 的算法: 通过前期调研获取新建或扩容系统的核心业务数据占总用户表大小的比例, 用核心业务数据量除以比例值计算出得出。核心业务数据是由所涉及的表大小、索引大小累加之和得出, 即由单表的行数、平均行长度、索引数量等参数计算出单表的大小以及对应索引的大小, 并将各表、索引大小累加得出。计算步骤如下:

Step1: 计算单个用户数据表大小

$$TableSize = LineSize * AvgLineLength * 1.3 \quad (1)$$

根据行业经验, 用户数据表通常大于单行大小与平均行大小的乘积, 根据测算结果与实际对比考量, 选取系数 1.3。

Step2: 计算用户索引表大小

$$IndexSize = IndexNum * TableSize * 0.2 \quad (2)$$

根据行业经验, 索引通常占自身表大小的 20%, 根据测算结果与实际对比考量, 选取系数 0.2。

Step3: 计算总用户表大小

$$TotalTable = \Sigma(TableSize + IndexSize) / LoadRate \quad (3)$$

Step4: 计算总数据存储空间大小

$$TotalCapacity = TotalTable + SysDbSize + TmpDbSize + UndoDbSize \quad (4)$$

其中: TableSize 为单个表大小, LineSize 为单个表行数, AvgLineLength 为单个表平均行长度, IndexSize 为索引大小, IndexNum 为索引数量, TotalTable 为总用户表大小, LoadRate 为核心业务量所占总业务量的比重 (%), TotalCapacity 为总数据存储空间大小, SysDbSize 为归档空间大小, TmpDbSize 为临时表空间大小, UndoDbSize 为 Undo 表空间大小。

IOPS 的计算主要根据用户表数据增长量以及用户表的计算模型中读/写比例, 推算出用户表在业务高峰期产生的总 I/O 量, 并通过这些核心数据产生的 I/O 占整个系统的比例, 推算整个系统在业务高峰期的 IOPS 指标。将 IOPS 分为三部分: 索引 IOPS, redo IOPS, 写操作 IOPS, 对其分别计算。

索引 IOPS:

Step1: 获取每个块写入的行数

$$Rows(i) = BlockSize * BlockFull / RowLength(i) \quad (5)$$

Step2: 获取每行写执行的时间

$$RowsPerSec(i) = DayInc(i) / 24 / 3600 * (24 * BusyRate) \quad (6)$$

Step3: 获取索引需要的 IOPS

$$IOPSIndex(i) = IndexReadCount * IndexCount *$$

$$RowsPerSec(i) * (1 - HitRate) \quad (7)$$

redo IOPS:

Step4: 生成 redo 需要的 IOPS

$$IOPSRedo(i) = RowsPerSec(i) / CommitCount(i) * RedoAddon \quad (8)$$

写操作 IOPS:

Step5: 获取写操作需要的 IOPS

$$IOPSInsert(i) = RowsPerSec(i) / Rows(i) * 2 * (1 + UpdateAddon(i)) \quad (9)$$

Step6: 累加各个核心业务获取系统总共需要的 IOPS

$$IOPS = AdjRate * \Sigma(IOPSInsert(i) + IOPSIndex(i) + IOPSRedo(i)) / \Sigma(LoadRate(i)) / LoadHite / RWRate \quad (10)$$

其中: Rows(i) 为每块写入行数, BlockSize 为数据库数据块大小 (byte), BlockFull 为块填充率, RowLength(i) 为数据库表行长度, RowsPerSec(i) 为每行写执行的时间, DayInc(i) 为每日增长记录数, BusyRate 为忙时集中系数, IndexReadCount 为每个索引操作的逻辑读数量, IndexCount 为表的索引数量, HitRate 为数据库 cache 命中率, CommitCount(i) 为批量提交数量, RedoAddon 为系统 redo 附加开销, IOPSInsert 为写操作 IOPS, UpdateAddon(i) 为更新所占写操作开销, AdjRate 为业务复杂度调整因子 (业务复杂度调整因子, 本次测试数据以某系统作为基准, 选取典型综合场景进行测试, 后期在使用方法进行测试时需要考虑新建系统与该系统相比的业务复杂程度, 可通过经验数据确定也可通过并发数比例, 数据量比例、峰值交易量比例, 综合考虑调整因子的范围, 选取范围建议为: 1~2), LoadRate(i) 为核心用户表所占总业务量的比重 (%), LoadHite 为系统允许的最高负载, RWRate 为系统中的写操作占总操作的比例。

### 2.2 数据库硬件资源测算

服务器 CPU 决定了数据库服务器的运行速度, 是衡量服务器性能的首要指标。服务器的内存主要是用来存储临时数据, 起到缓存作用。一般而言, 内存越大, 可以将更多的临时数据存放到内存里, 也就越有利于数据库运行<sup>[7]</sup>。因此, 将数据库服务器的内存和 CPU 核数作为测算数据库硬件资源容量的指标。

内存主要分为 3 个部分: 会话内存、PGA、SGA。

会话内存: 数据库发起一个请求连接所占用的内存。

PGA: Program Global Area, 每个服务进程、后台进程专有区。

SGA: system global area, 全局共享区。

PGA 与 SGA 配置标准是根据业界各类信息系统的数据库型配置管理经验总结得出。

表 1 典型 PGA 内存配置表

系统规模	PGA 大小设置/G
小型系统	3
中型系统	5
大型系统	10
超大型系统	20

表 2 典型 SGA 内存配置表

系统规模	SGA 大小设置/G
小型系统	10
中型系统	20
大型系统	40
超大型系统	80

表 3 业务系统级别定义

系统业务级别	定义
小型系统	<10 并发量,100G
中型系统	<50 并发量,200G
大型系统	<100 并发量,500G
超大型系统	<500 并发量,1T

内存测算公式如下:

Step 1: 获取单节点数据库会话数

$$SessionCount = CurrUsers / NoteCount + SysseesCount \quad (11)$$

Step 2: 获取所需内存

$$TotalMem = (SessionCount * SinglesesMem + PGA + SGA) / 0.8 \quad (12)$$

其中: *SessionCount* 为单节点数据库会话数, *CurrUsers* 为最大并发用户量, *NoteCount* 为数据库节点数, *SysseesCount* 为数据库系统会话连接数, *TotalMem* 为总内存, *SinglesesMem* 为单空载 session 内存消耗, *PGA* 为根据系统规模确定的 PGA 池大小, *SGA* 为根据系统规模确定的 SGA 池大小。PGA 大小、SGA 大小、会话数空载消耗内存大小这 3 个部分的内存相加得出的结果应占总内存的 80%。(根据业界的 2/8 原则, 操作系统预占内存的 20%, 数据库预占内存的 80%)

CPU 核数消耗与并发用户量、数据量(所操作的数据库表和索引的大小, 即热数据)有关。在系统运行过程中, 若两个因素变化的趋势具有一致性, 即同步变化程度较高, 可谓二者关联程度较高; 反之, 则二者关联程度较低。灰色关联分析方法可以根据因素之间发展趋势的相似或相异程度, 对其随时间或不同对象而变化的关联性进行量度<sup>[8]</sup>。

以某系统为业务测试对象, 运用灰色关联分析法分析 CPU 核数与并发用户量、数据量的关系, 步骤如下<sup>[9-10]</sup>:

Step 1: 确定分析数列

反映系统行为特征的数据序列, 称为参考数列, 这里参考数列为 CPU 核数, 记为  $y(k)$ 。影响系统行为的因素组成的数据序列, 称比较数列, 这里为用户并发量与数据量, 记为  $x_i(k)$ ,  $i$  表示比较数列类别。

Step 2: 计算关联系数

$x_0(k)$  与  $x_i(k)$  的关联系数记  $\Delta_i(k) = |y(k) - x_i(k)|$ , 则关联系数计算公式为:

$$r(x_0(k), x_i(k)) = \left( \frac{\min_i \min_k \Delta_i(k) + \rho \max_i \max_k \Delta_{0i}(k)}{\Delta_{0i}(k) + \rho \max_i \max_k \Delta_{0i}(k)} \right) |\Delta_{0i}(k)| \quad (13)$$

$\rho \in (0, 1)$ , 称为分辨系数。 $\rho$  越小, 分辨力越大, 通常取  $\rho = 0.5$ 。

Step 3: 计算关联度

关联度  $r_i$  公式如下:

$$r_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \xi_i(k), k = 1, 2, \dots, n \quad (14)$$

灰色关联度计算结果如下(几组结果求均值): 0.7157  
同理, 可以得数据量关联度: 0.5753

表 4 测试数据

$X_0$	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$X_6$	$X_7$	$X_8$	$X_9$
300	0.26964	0.386056875	0.4995875	0.610231875	0.71799	0.822861875	0.9248475	1.023946875	1.12016
800	0.12794	0.362831875	0.5948375	0.823956875	1.05019	1.273536875	1.4939975	1.711571875	1.92626
1000	0.2989	0.581181875	0.8605775	1.137086875	1.41071	1.681446875	1.9492975	2.214261875	2.47634

$X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_6$ , 分别代表并发用户数: 0、25、50、75、100、125、150、175、200。 $X_0$  列表示: 数据量 (GB)

表 5 计算  $X_0 - X_i$

$X_0 - X_1$	$X_0 - X_2$	$X_0 - X_3$	$X_0 - X_4$	$X_0 - X_5$	$X_0 - X_6$	$X_0 - X_7$	$X_0 - X_8$	$X_0 - X_9$
299.73036	299.6139431	299.5004125	299.3897681	299.28201	299.1771381	299.0751525	298.9760531	298.87984
799.87206	799.6371681	799.4051625	799.1760431	798.94981	798.7264631	798.5060025	798.2884281	798.07374
999.7011	999.4188181	999.1394225	998.8629131	998.58929	998.3185531	998.0507025	997.7857381	997.52366

min min

$$|X_0 - X_i| = |299.73036, 299.6139431, 299.5004125, 299.3897681, 299.28201, 299.1771381, 299.0751525, 298.9760531, 298.87984| = 298.87984$$

max max

$$|X_0 - X_i| = |999.7011, 999.4188181, 999.1394225, 998.8629131, 998.58929, 998.3185531, 998.0507025, 997.7857381, 997.52366| = 999.7011$$

代入公式后:

$$r(X_0, X_i) = \frac{298.61 + 0.5 * 999.74}{|X_0 - X_i(k)| + 0.5 * 999.74}$$

表 6 灰色关联度计算结果

	CPU 核数	用户并发量	数据量
关联度	1	0.7157	0.5753

由上表可知 CPU 核数与用户并发量、数据量的关联度。对三者的关系做进一步分析, 将 CPU 核数与用户并发量、数据量在三维图上表示, 运用曲面拟合算法拟合, 结果如图 2 所示。

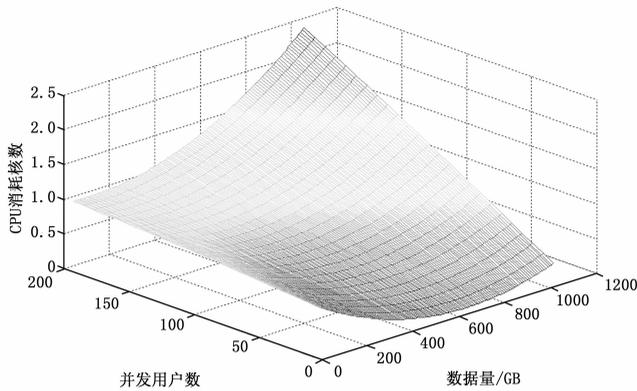


图 2 CPU 核数与用户并发量、数据量的关系

其中:  $x$  代表数据量,  $y$  代表并发用户量。

通过 Matlab 进行计算得出 CPU 核数与用户并发量、数据量的曲面拟合公式:

$$f(x, y) = 0.7449 - 0.002072 * x + 0.001871 * y + (1.626e - 06) * x^2 + (9.478e - 06) * x * y - (2.309e - 06) * y^2$$

当数据量一定时, CPU 核数与并发用户量之间变化关系如下:

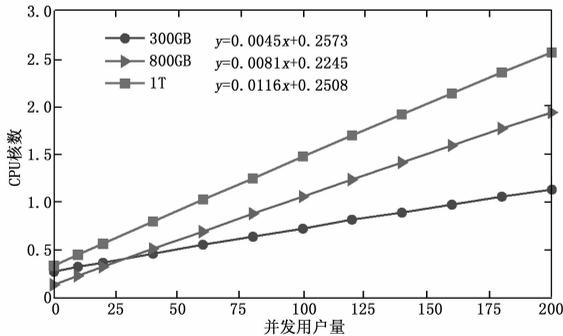


图 3 数据量一定时 CPU 核数与并发用户量的关系

基于上述拟合公式, CPU 核数计算方法为:

1) 获取套用测试模型的基准 CPU 核数 (本例是以 IBM P750 硬件作为测试基准, 基准 CPU 即指该款服务器的 CPU)

$$CoreCount1 = (0.7449 - 0.002072 * x + 0.001871 * y + (1.626e - 06) * x^2 + (9.478e - 06) * x * y - (2.309e - 06) * y^2) * TestCpuRate \quad (15)$$

2) 获取代入业务模型的基准 CPU 核数 (业务系统计算所需的 CPU)

$$CoreCount2 = CoreCount1 * AdjRate * NoteCount /$$

$$(1 - lusterLoad) / LoadHite \quad (16)$$

3) 获取目标机型 CPU 核数 (目标机型 CPU 是最终选型的服务器 CPU)

$$CoreCount = CoreCount2 / CoreRate \quad (17)$$

其中:  $CoreCount1$  为套用测试模型的基准 CPU 核数,  $y$  为最大并发用户量,  $x$  为数据量 (初始数据量与年增长数据量的总和),  $TestCpuRate$  为测试模型 CPU 的性能比值,  $CoreCount2$  为代入业务模型的基准 CPU 核数,  $AdjRate$  为调整因子 (根据业务复杂度取值, 选取范围建议为: 1-2),  $NoteCount$  为数据库节点数,  $ClusterLoad$  为 RAC 集群消耗的额外资源比例,  $LoadHite$  为系统负载率,  $CoreRate$  为目标机型 CPU 与基准 CPU 性能的比值。(以 IBM P750 单核 CPU 做基准, 通过压力测试, 记录下 TPS 值:  $TPS_1$ 。TPS=并发数/平均响应时间; 计算出被测服务器单核 CPU 下的 TPS 值:  $TPS_2$ ; 用  $TPS_2$  值除以  $TPS_1$  得到与基准 CPU 性能比值:  $k = TPM_2 / TPM_1$ ; IBM Power 750 配置参数, CPU 型号: POWER7; CPU 主频: 3.5 GHz; 单路 CPU 核数: 8; CPU 路数: 4。)

### 2.3 应用服务器硬件资源测算

通过对应用系统实际运行环境中上配置不同核数及内存数进行最大并发用户的压力承载能力测试, 给出推荐的应用服务器配置如表 7 所示。

表 7 应用服务器配置推荐表

最大支持并发用户数	虚拟机最小配置 (服务器)	系统规模
150	2 核 4GB	小型系统
300	4 核 8GB	中型系统
600	8 核 16GB	大型系统
1100	16 核 32GB	超大型系统

应用服务器硬件资源测算主要依据最大并发用户量, 结合典型系统的业务复杂度调整因子, 确定最终的并发数量, 根据应用虚拟机的典型配置通过查询表 4 获取所需的单个服务器配置, 从而推算总资源数量。

下面计算并发量:

$$SupCurrUsers = CurrUsers(i) * AdjRate \quad (18)$$

其中:  $SupCurrUsers$  为最大支持并发用户量,  $CurrUsers$  为最大并发用户量,  $AdjRate$  为业务复杂度调整因子。

## 3 算例及分析

选取某已部署上线的系统的硬件资源使用情况进行验证分析, 初始最大并发用户数为 300, 初始化数据量为 110 GB。

1) 存储硬件资源测算:

$$IOPS = (5.55 * (400 * (1 + 0.05)^3 + 67.28) * 1.5 / 0.7 = 5601.55$$

$$\text{数据存储空间} = 800 + 100 * 3 = 1100G$$

生产环境实际存储配置为 18T 的中低端日立存储:

系统名称	IOPS	3 年数据量	推算存储需求	生产环境
某系统	5601.55	1100G	低端存储	日立存储 (中低端)18T

存储评估结论:

该系统的存储设备与经测算相差较大, 实际生产环境所使

用的存储设备容量高于测算结果，了解实际情况，主要原因是存储设备是公用存储，导致设备使用率过低。

2) 数据库服务器硬件资源:

将采集数据代入公式 (11) ~ (12)，得出内存消耗 = 25.76G。

将采集数据代入公式 (15) ~ (17)，得出数据库基准 CPU 消耗 = 39。

建议配置如下:

根据 2 节点 rac 配置，单节点核数消耗是 20。2 路 PC 每台消耗 4 个核数 (最大支持 12 核数); 低端小机每台消耗 3 个核数 (最大支持 8 核数)，每台机器负载率不高于 70%。

生产环境配置:

生产环境使用 IBM p6 550 搭建 2 节点 rac 每台服务器 8 核，高峰期系统 CPU 开销为 35%。

数据库评估结论: 实际生产环境所使用的存储设备和测算结果基本吻合。

3) 应用服务器硬件资源:

$$\text{最大并发用户数} = 300 * (1 + 0.1)^3 * 1.2 = 480$$

2 路 PC 按最优 (2 核 4G 支持 160 并发)，160 \* 4 个服务器 = 640 并发用户

考虑到系统重要性按照 N-1 模式配置，即配置 2 台 2 路 PC，总共 8 台服务器。

生产环境配置: 生产环境使用 2 台 8C 虚机，高峰期系统 CPU 平均开销为 10%，每台机器分配一个服务器共 2 个，每个服务器分配 1 G 内存。

应用服务器评估结论: 该系统生产环境应用服务器硬件配置与测算值较为相符，但是生产环境中服务器内存分配较少，容易导致高峰期时期系统延时等问题，可进一步完善。

(上接第 140 页)

由电源模块到任务。不同电源模块能够满足不同任务。比如本文的仿真结果，当帆板面积为 4.003 m<sup>2</sup> 时，能够提供的供电功率为 376.506 w。所以，我们可以结合我国当前形势，对可能发生的典型任务进行分析，计算出对应的电源模块参数，然后进行生产制造，一旦需要就可以直接应用。同时我们也可以有规律的改变模型初始条件进行仿真，得到满足不同任务需求的系列化电源模块，之后对系列化电源模块进行优化分析，目的是设计出合理的系列化数量，使其能够最大程度地满足所有任务。最后要对确定好的电源模块系列进行生产，仓储。

其优点为: 1) 快速，当有突发任务时，可直接从仓储的系列化模块中选择应用，节省了仿真计算和生产研制的时间; 2) 经济，经过优化分析的电源模块能够以最少的系列数最大程度的满足不同任务需要，所以我们不必生产各种型号的电源模块，故减少了模块的仓储数量，同时也减少与之相关的财力，物力，实现效益最大化。

### 4 结束语

本文基于模块化航天器快速集成测试，对模块化航天器进行建模仿真研究。以电源模块为例，对其数学模型及 Simulink 模型详细描述，并对仿真结果进行分析，同时与快速响应理念相结合，研究电源模块快响应应用模式，这种全新的理念势必会增强我国应对突发航天任务的能力。

### 4 结论

将信息系统硬件资源分解为存储硬件、数据库服务器硬件、应用服务器硬件等 3 个部分，对每部分容量的关键指标进行了定性分析以及灰色关联度的定量分析，基于实测数据通过数据拟合的方式建立模型。仿真算例说明所建模型的计算结果与实际环境较为相符，表明模型的正确性与有效性。

#### 参考文献:

- [1] 袁小凯. 信息化硬件测试标准与方法研究 [J]. 网络安全技术与应用, 2014 (9): 79-79.
- [2] 明 媚, 焦丽梅. 面向应用的数据库服务器性能优化方法研究 [J]. 计算机工程与应用, 2004, 40 (34): 179-182.
- [3] 丁玉伟, 田渊文, 王海滨. 结合统计学方法的银行 IT 系统性能预测模型研究 [J]. 中国金融电脑, 2015 (10): 42-47.
- [4] 谭学瑞, 邓聚龙. 灰色关联分析: 多因素统计分析新方法 [J]. 统计研究, 1995 (3): 46-48.
- [5] 邓 莉, 冉光和. 重庆农村金融发展与农村经济增长的灰色关联分析 [J]. 中国农村经济, 2005 (8): 52-57.
- [6] 曹树刚, 徐阿猛, 刘延保, 等. 基于灰色关联分析的煤矿安全综合评价 [J]. 采矿与安全工程学报, 2007, 24 (2): 141-145.
- [7] 赵 琛. Oracle 服务器性能影响因素分析与优化 [J]. 电脑编程技巧与维护, 2011 (20): 73-74.
- [8] 吕干云, 程浩忠, 翟海保, 等. 基于改进灰色关联分析的变压器故障识别 [J]. 中国电机工程学报, 2004, 24 (10): 121-126.
- [9] 赵万里, 王智冬, 刘连光, 等. 基于灰色关联分析的输电网规划方案模糊综合评价 [J]. 电测与仪表, 2014 (6): 24-27.
- [10] 齐亚伟, 刘 丹. 信息产业发展促进区域产业结构合理化的灰色关联分析 [J]. 经济经纬, 2014, 31 (4): 74-79.

#### 参考文献:

- [1] 李 晶. 快速响应空间研究现状 [J]. 宇航动力学学报, 2011 (1): 103-105.
- [2] 赵良玉, 贺 亮. 天基快速响应体系 [J]. 航天器工程, 2013 (4): 21-26.
- [3] 赵丽娜. 运载火箭快速响应技术发展研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013: 32-33.
- [4] 陈小前, 袁建平, 姚 雯, 等. 航天器在轨服务技术 [M]. 北京: 中国宇航出版社, 2009.
- [5] 李新洪, 张永乐, 姜 南. 模块化航天器应用需求及应用体系 [J]. 装备学院学报, 2014 (8): 70-74.
- [6] 张科科, 朱振才, 夏 磊. 小卫星模块化设计技术分析 [J]. 航天器工程, 2015, 24 (6): 107-115.
- [7] 田爱平, 宝音贺西, 李俊峰. 组合式航天器概念及构型变换最优脉冲控制 [J]. 航天控制, 2013, 31 (2): 62-68.
- [8] 徐 明, 王金龙. 分离模块化航天器系统评估和优化设计研究 [J]. 上海航天, 2015, 32 (6): 8-16.
- [9] 沈怀荣, 等. 航天任务分析与设计基础 [M]. 北京: 科学出版社, 2015.
- [10] 毛 悦, 宋小勇, 贾小林, 等. 北斗导航卫星地影状态分析 [J]. 测绘学报, 2014 (4): 353-359.
- [11] 贾向华, 徐 明, 陈罗婧. 近地轨道卫星的地影预报算法 [J]. 宇航学报, 2016 (1): 39-47.
- [12] 马世俊. 卫星电源技术 [M]. 北京: 中国宇航出版社, 2001.