

实践十号返回卫星时间同步系统设计与验证

王文平, 元勇, 王颖, 赵会光

(北京空间飞行器总体设计部, 北京 100094)

摘要: 根据返回式卫星的特点, 卫星在轨飞行包括两个阶段的时间同步工作模式: 1) “返回舱和仪器舱在轨段组合体”时间模式; 2) 两舱分离后, “仪器舱留轨段”时间模式; 因此, 如何设计返回式卫星的时间系统, 并进行优化使其在不同阶段完成不同任务, 是返回式卫星时间系统设计的关键点; 返回式卫星时间包括时间产生、时间维护、时间发布及时间传输; 返回式卫星时间系统设计就是为了满足时间用户对时间同步精度的需求, 通过特定方法和必要手段对星上时间产生、维护和发布机制进行相应的系统设计; 针对实践十号返回式科学实验卫星时间同步需求、时间管理模型、时间系统架构以及时间系统的设计进行了说明, 并对卫星在整星电测以及在轨运行的验证情况进行说明。

关键词: 返回卫星; 时间系统; 设计与验证

Design and Verification of Time Synchronization System of SJ-10 Reentry Satellite

Wang Wenping, Yuan Yong, Wang Ying, Zhao Huiguang

(Beijing Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing 100094, China)

Abstract: Based on the characteristics of reentry satellite, there are two kind of time synchronization mode across the flight time. First, the combination of reentry capsule and apparatus capsule time mode. Second, apparatus capsule time mode. As a result, the key point is how to design the time system of the reentry satellite, and how to meet all the goals of the two time mode. The time system of reentry satellite includes time generation, time calibration, time broadcasting and time transmission. The design of time system aims at meeting the demand of time synchronization for the time users. This paper mainly discusses time synchronization demand, time-management model, time system architecture, the design of time system and the test verification of time system for the satellite.

Keywords: reentry satellite; time system; design and verification

0 引言

实践十号卫星于2016年4月6日在酒泉卫星发射中心发射, 并于2016年4月18日在内蒙古四子王旗回收场安全回收。卫星为多舱段结构, 分为仪器舱和返回舱两个舱段, 其中仪器舱包括服务舱和密封舱, 返回舱包括回收舱和制动舱。卫星在轨运行期间是以返回舱和仪器舱组合体的模式飞行, 在轨运行一段时间后返回舱独立返回地面, 仪器舱继续进行留轨段飞行任务。时间同步就是为分布式系统提供一个共同的时间基准, 卫星需要具备两种独立的时间工作模式: 1) 在轨运行段, 返回舱和仪器舱以组合体的时间同步模式; 2) 留轨飞行段, 仪器舱独立时间同步模式。

针对实践十号返回式卫星分离组合体的特点, 提出了一种返回式卫星分离组合体的时间系统设计方法, 使得返回式卫星在不同阶段完成不同的时间任务, 并兼顾了卫星数管时间基准(在轨飞行段使用回收舱管理单元 Reentry Management Unit (RMU) 时间、留轨段使用中央处理单元 Central Terminal Unit (CTU) 时间) 的变化, 能够满足卫星各时间用户的星时需求。本方法在满足返回式卫星任务的同时, 有效地降低了卫星

研制成本。

1 时间系统架构

1.1 时间管理模型

为了满足用户对时间精度和同步精度的需求, 通过特定方法和必要手段对卫星的星上时间产生、维护和发布机制进行相应的约束和规定, 并实现用户对时间要求的完整过程称为卫星时间管理^[1]。依据时间管理的定义, 可建立卫星星上时间管理模型, 并将其分为4个组成部分, 如图1所示。

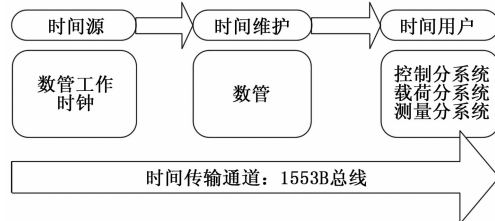


图1 时间管理模型图

实践十号卫星时间管理模型由时间源、时间维护、时间用户及时间传输通道组成。其中, 时间源、时间维护和时间用户为逻辑关系层面, 它涵盖了星上时间同步的基本流程, 并直接揭示了卫星时间系统的功能实质; 时间传输通道则承载了逻辑关系的传递。

1) 时间源用于星上时间的产生并提供时间基准^[2], 它的执行设备为数据管理系统工作时钟; 卫星时间包括 CTU 时间和 RMU 时间。

2) 时间维护提供了时间修正的手段与方法, 包括集中校

收稿日期: 2017-02-28; 修回日期: 2017-03-13。

基金项目: 中国科学院空间科学战略性先导科技项目 (XDA04020200)。

作者简介: 王文平(1984-), 男, 山西朔州人, 硕士, 工程师, 主要从事航天器空间数据系统总体设计方向的研究。

赵会光(1972-), 男, 博士, 研究员, 主要从事航天总体设计方向的研究。

时、均匀校时^[3]，它的执行设备为数据管理系统 CTU 和 RMU，并以 CTU 广播方式实现时间发布；

3) 时间用户则是时间维护和时间发布的对象，整个系统的最终目标即是为用户提供能够满足任务需求的星上时间，控制分系统、载荷、工程测量分系统均可认为是时间用户，它们是时间管理的受益者；

4) 时间传输通道提供时间信息流的传输路径，它的执行设备为串行 1553B 总线通道。

1.2 运行机制

实践十号卫星将数管晶振产生的工作时钟作为星上时间源。卫星时间包括 CTU 时间和 RMU 时间。

卫星时间维护方法具体分类方法如图 2 所示。

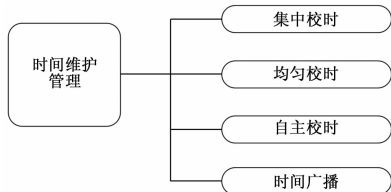


图 2 时间维护方法分类

当存在较大星地时差时，卫星采用 CTU、RMU 集中校时方式分别进行星上 CTU 和 RMU 时间维护。即按地面校时指令要求，在卫星当前星上时间的基础上，将星上时间增减一个要求的值，以校正星地时间的较小绝对误差。

卫星在轨运行段，以 RMU 时间为整星时间，星时稳定度为 $\pm 5 \times 10^{-6}$ s/d，每天的最大偏差为 ± 0.432 s，地面通过 RMU 集中校时实现星地时间同步，星地时差超过 1 s 后，地面进行校时；通过 RMU 自主校时，实现 CTU 与 RMU 时间的同步，CTU 时间与 RMU 时间差绝对值小于 1 ms；再通过 CTU 广播的方式，实现各分系统与 CTU 时间的同步。

卫星留轨运行段，以 CTU 时间为整星时间，星时稳定度为 $\pm 1 \times 10^{-5}$ s/d，每天的最大偏差为 ± 0.864 s，地面通过 CTU 集中校时实现星地时间同步，星地时差超过 1 s 后，地面进行校时；通过 CTU 广播的方式，实现各分系统与 CTU 时间的同步。

1.3 在轨段组合体工作模式

- 1) 地面站测量卫星 RMU 时间与地面时间的时差 Δ ；
- 2) 当星地时差 Δ 大于地面设定的阈值后，地面通过上注遥控指令，通过 RMU 集中校时方法对 RMU 进行校时，校时

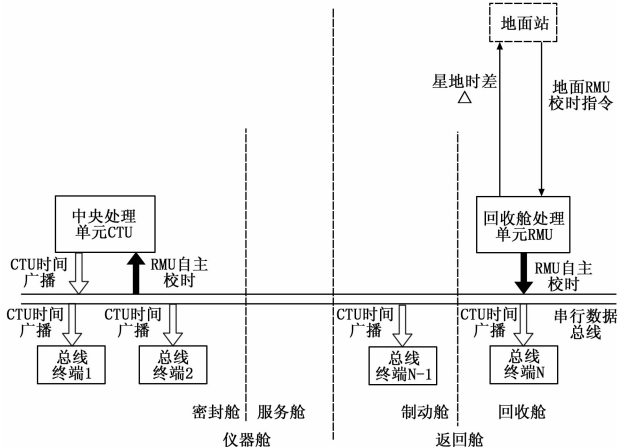


图 3 在轨段组合体时间工作模式

量为 Δ ，使 RMU 时间与地面时间保持一致；

3) 卫星 RMU 每分钟自主对 CTU 进行一次校时，使 CTU 时间与 RMU 时间保持一致；

4) 卫星 CTU 通过串行数据总线，使用广播的方法，将 CTU 时间发布到各个总线终端设备（见图 3）。

1.4 留轨段仪器舱工作模式

1) 地面站测量卫星 CTU 时间与地面时间的时差 Δ ；

2) 当星地时差 Δ 大于地面设定的阈值后，地面通过上注遥控指令，通过 CTU 集中校时方法对 CTU 进行校时，校时量为 Δ ，使 CTU 时间与地面时间保持一致；

3) 卫星 CTU 通过串行数据总线，使用广播的方法，将 CTU 时间发布到各个总线终端设备（见图 4）。

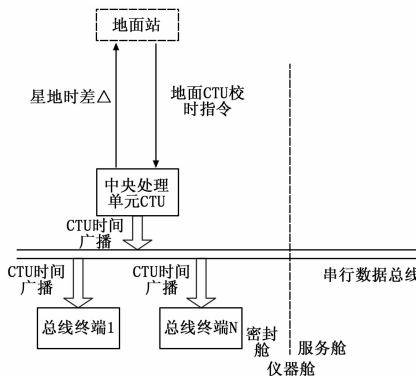


图 4 留轨段仪器舱时间工作模式

2 时间系统详细设计

2.1 初始时间

2.1.1 CTU 时间初始化策略

数管 CTU 加电、软件复位或切机时，CTU 时间为默认初始值 0，立即执行 CTU 时间恢复程序。

数管 CTU 时间恢复时，首先从 AOCC 中恢复；如果失败，则从 RMU 中恢复；如果再次失败，则恢复为默认初始值 0。

2.1.2 CTU 时间初始化方法

当 CTU 初始上电、软件复位或者切机时，通过总线从姿态和轨道控制计算机 Attitude and Orbit Control Computer (AOCC) 和 RMU 恢复重要数据和卫星时间。具体步骤如下：

1) CTU 通过总线给 AOCC 发送用于计算时间差 Δ ($|AOCC - CTU|$) 的 CTU 时间码。

2) CTU 等待 1 s (± 125 ms) 后，通过总线从 AOCC 获取时差 Δ ($|AOCC - CTU|$)，CTU 将时差增加到当前卫星时间上作为恢复后的 CTU 卫星时间。

3) 如果从 AOCC 恢复卫星时间成功，那么本次恢复 CTU 卫星时间的操作过程结束；如果从 AOCC 恢复卫星时间失败，则转步骤 4)，继续从 RMU 恢复卫星时间。

4) CTU 通过总线给 RMU 发送用于计算时间差 Δ ($|RMU - CTU|$) 的 CTU 时间码。

5) CTU 等待 1 s (± 125 ms) 后，通过总线从 RMU 获取时差 Δ ($|RMU - CTU|$)，CTU 将时差增加到当前卫星时间上作为恢复后的 CTU 卫星时间。

6) 如果从 RMU 恢复卫星时间成功，那么本次恢复 CTU 卫星时间的操作过程结束；如果从 RMU 恢复卫星时间失败，星上时间恢复失败，则 CTU 卫星时间从零开始计时。

2.1.3 RMU 时间初始化策略

数管 RMU 加电复位时, RMU 时间为默认初始值 0, 立即执行 RMU 时间恢复程序。数管 RMU 时间恢复时, 首先给 CTU 提服务请求, 请求恢复 RMU 重要数据和 CTU 时间; CTU 查询到 RMU 服务请求后, 将 RMU 重要数据以及 CTU 时间反馈给 RMU; RMU 从 CTU 接收 RMU 重要数据, 根据重要数据中的 CTU 时间来恢复 RMU 时间; 如果恢复失败, 则根据 CTU 广播的 CTU 时间来恢复 RMU 时间。

2.1.4 RMU 时间初始化方法

当 RMU 初始上电、软件复位或者切机时, 通过总线从 CTU 恢复重要数据和星时。具体步骤如下:

1) RMU 从 CTU 恢复重要数据时需要提出服务请求 (该服务请求同时也是恢复星时的服务请求)。

2) 如果 CTU 响应了 RMU 的服务请求, 即 RMU 在总线中断中检测到接收 RMU 重要数据指针复位同步字, 则 RMU 立即清除该服务请求。

3) 如果时间超过 3 个时间片 (100 ms/时间片), CTU 仍未响应该服务请求, 则 RMU 终止从服务舱 CTU 恢复重要数据, 表明从 CTU 恢复重要数据失败, 则 RMU 时间从零开始计时。

4) 如果在 3 个时间片内, CTU 响应了服务请求, RMU 从总线相应子地址取得重要数据, 对重要数据的数据头和数据尾进行校验。

2.2 在轨段组合体工作模式

2.2.1 时间产生

返回式卫星将数管晶振产生的工作时钟作为星上时间源, 包括 CTU 时间和 RMU 时间。返回式卫星从发射到在轨运行段, 数管 CTU 和 RMU 的工作时钟都可以作为星上时间源, 但由于 RMU 晶振稳定性优于 CTU, 因此在轨运行段使用 RMU 内部时钟作为整星时间基准, 星时稳定度为 $\pm 5 \times 10^{-6}$ s/d, 每天的最大偏差为 ± 0.432 s。

2.2.2 时间维护

2.2.2.1 RMU 自主校时

返回式卫星的时间由数管 CTU 进行统一管理。卫星在轨运行段, 设计了 RMU 自主校时方法, 实现 RMU 对 CTU 的周期性校时。RMU 自主校时实现星上 CTU 时间与 RMU 时间的同步。当自主校时使能时, 数管 CTU 周期性 (1 分钟 1 次) 向 RMU 发送 CTU 时间, 发送结束 1 s 之后从 RMU 获取时间差, 将差值和 CTU 时间做加法运算, 结果作为新的 CTU 时间。每完成一次 RMU 自主校时后, CTU 时间与 RMU 时间差绝对值小于 1 ms。

地面可以根据需要上注数管 CTU 内务指令, 设置 RMU 自主校时使能禁止状态。初始为禁止状态。

2.2.2.2 RMU 集中校时和均匀校时

当存在星地时差时, 返回式卫星采用集中校时、均匀校时的方式进行星上时间维护。即按地面校时指令要求, 在卫星当前星上时间的基础上, 将星上时间增减一个要求的值, 以校正星地时间的绝对误差。

1) 返回式卫星在轨运行段, 当星地时差绝对值为 ΔT 秒时, 可以通过地面上注指令对 RMU 集中校时进行时差修正, 实现星上 RMU 时间与地面 UTC 时间的同步, 集中校时随机误差为微秒量级。在进行集中校时时差修正过程中, 还要考虑

星地链路时延。

2) 当星地时差由于 RMU 时间晶振偏移导致周期性出现累计值 $\Delta T1$ 毫秒时, 可以通过地面上注指令对 RMU 均匀校时进行时差修正。RMU 在一定的时间间隔 $\Delta T2$ 秒内, 周期性地对 RMU 时间增加或减少一个最小时间间隔 $\Delta T3$ 毫秒, 达到提高星上时间累计准确计时目的。

2.2.3 时间发布

通过 CTU 广播的方式, 实现各分系统与 CTU 时间的同步。CTU 将时间码发送到总线的软件时延以及总线传输时延进行补偿; 时间用户对取到时间码后的软件时延进行时间补偿。CTU 通过总线向远程终端设备广播 CTU 时间, 每秒一次, A/B 总线交替。

2.3 留轨段仪器舱工作模式

2.3.1 时间产生

返回式卫星将数管晶振产生的工作时钟作为星上时间源, 包括 CTU 时间和 RMU 时间。返回式卫星留轨运行段, 由于 RMU 已随返回舱着陆地面, 因此卫星留轨段只能使用数管 CTU 内部时钟作为整星时间基准, 星时稳定度为 $\pm 1 \times 10^{-5}$ s/d, 每天的最大偏差为 ± 0.864 s。

2.3.2 时间维护

卫星留轨段时间维护方式为 CTU 集中校时和均匀校时。当存在星地时差时, 返回式卫星采用集中校时、均匀校时的方式进行星上时间维护。即按地面校时指令要求, 在卫星当前星上时间的基础上, 将星上时间增减一个要求的值, 以校正星地时间的绝对误差。

1) 返回式卫星留轨运行段, 当星地时差绝对值为 ΔT 秒时, 可以通过地面上注指令对 CTU 集中校时进行时差修正, 实现星上 CTU 时间与地面 UTC 时间的同步, 集中校时随机误差为微秒量级。在进行时差修正过程中, 还要考虑星地链路时延。

2) 当星地时差由于 CTU 时间晶振偏移导致周期性出现累计值 $\Delta T1$ 毫秒时, 可以通过地面上注指令对 CTU 均匀校时进行时差修正。CTU 在一定的时间间隔 $\Delta T2$ s 内, 周期性地对 CTU 时间增加或减少一个最小时间间隔 $\Delta T3$ ms, 达到提高星上时间累计准确计时目的。

2.3.3 时间发布

通过 CTU 广播的方式, 实现各分系统与 CTU 时间的同步。CTU 将时间码发送到总线的软件时延以及总线传输时延进行补偿; 时间用户对取到时间码后的软件时延进行时间补偿。CTU 通过总线向远程终端设备广播 CTU 时间, 每秒一次, A/B 总线交替。

3 在轨运行验证情况

实践十号卫星在轨飞行期间, 时间同步系统工作稳定, 星地时差变化情况如图 5 所示。

3.1 在轨运行段

卫星在轨运行段, 即卫星从发射后飞行至 190 圈期间, 以在轨段组合体的工作模式进行时间同步, 卫星入轨至两舱一次分离, 卫星使用 RMU 时间, 在此期间共进行了 1 次集中校时 (127 圈 RMU 集中校时)。根据星地时差测量情况可知, RMU 实际晶振漂移为 39 ms/d, 远优于稳定度指标 $\pm 5 \times 10^{-6}$ s/d (0.43 s/d), 地面通过对卫星进行 RMU 集中校时, 使得星地时差始终控制在 ± 1 s 以内。

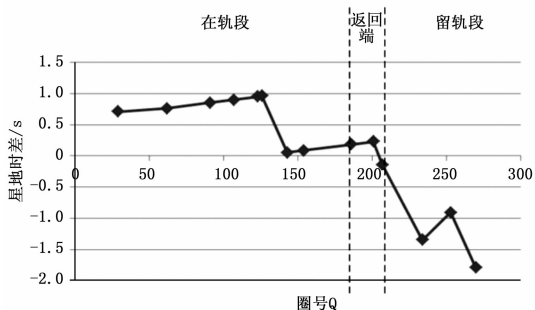


图 5 飞行阶段星地时差变化情况

有效载荷分系统与整星时间保持高度同步，所有在轨科学实验都按计划、按步骤圆满完成，取得了预期效果。卫星承载了 19 项微重力科学和空间生命科学实验项目，并按时序支持开展在轨实验，成为国内支持实验载荷数量最多的卫星，多个项目获得了具有突破性价值的科学实验结果。

3.2 返回段

卫星返回段，即卫星从 191~204 圈期间，通过返回前对卫星实施的精确 RMU 校时，使得星地时差始终控制在 ±0.5 秒以内。返回卫星首次成功实现长航程、弹道式安全返回四子王旗落区。突破了返回窗口精确控制、再入过程无控飞行的自稳定、长航程多参数影响的落点散步控制等技术难题，返回平台能力实现新跨越。

3.3 留轨运行段

卫星留轨运行段，即卫星从返回舱分离后 205 圈至飞行寿命结束，以留轨段仪器舱的工作模式进行时间同步，两舱一次

(上接第 236 页)

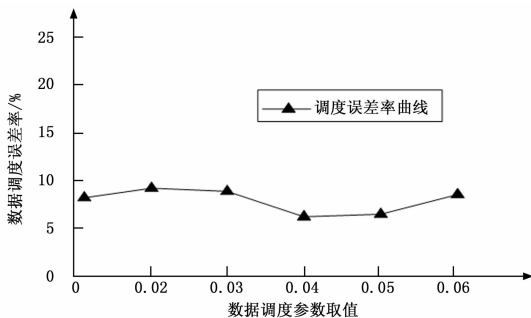


图 2 数据调度参数取值范围对数据调度误差率影响

影响，尤其在 0.04—0.05 时调度误差率最小。证明了本文所提方法的可实现性。

仿真实验证明，所提方法可以高精度地对多核环境下内存数据进行并发调度，减少了数据的操作时间，增加了内存数据库的存储容量，提高了数据运行的安全性和兼容性，降低了内存数据并发调度的误差率，对该领域的研究发展有着重要的借鉴意义。

3 结束语

采用当前方法对多核环境下内存数据进行并发调度时，无法对内存数据进行低误差率、高效、全面、安全地调度，存在内存数据调度时数据丢失严重，相似数据重复调动，不同类型数据调度精度低等问题。本文提出一种基于 Linux 的多核环境

分离后卫星使用 CTU 时间，期间共进行了 1 次集中校时 (234 圈 CTU 集中校时)，根据留轨段星地时差测量情况可知，CTU 实际晶振漂移为 743 ms/d，优于稳定度指标 $\pm 1 \times 10^{-5}$ s/d (0.86 s/d)，留轨段星地时差始终控制在 ±2 s 以内。卫星所有留轨段载荷试验均按计划圆满完成。

4 结论

返回卫星时间基准的建设方案，在轨段以 RMU 作为主时钟源，CTU 作为辅助时钟源；留轨段以 CTU 作为主时钟源；为卫星不同任务阶段提供了所需要的时钟源。根据返回卫星任务的不同阶段，分别应用不同模式的星地时间同步系统，解决了返回卫星组合舱间的星地时间同步问题，减少了星地时间同步偏差，为有效载荷星地协调动作提供较为准确的时间基准。实践十号卫星的星地校时方法是一种低成本、高可靠、精度符合要求并且运行稳定的方法^[4]，满足返回式卫星分离组合体时间系统对于时间同步的要求，具有很好的应用价值，后续返回式卫星时间系统设计时可以充分借鉴。

参考文献:

[1] 田贺祥, 王同桓, 李 璇, 等. 遥感卫星星上时间管理方法 [J]. 传感器与微系统, 2013, 32 (4): 80-82.

[2] 黄 飞, 明德祥, 乔纯捷, 等. 时间统一系统中多基准时间源的设计 [J]. 兵工学报, 2008, 29 (11): 1330-1334.

[3] 高建军, 兰 天, 王 斌. 一种高可靠的星载软件时间管理方法 [J]. 计算机测量与控制, 2013, 21 (3): 806-808.

[4] 杨天社, 李怀祖. 在轨卫星与地面时钟精确同步方法研究 [J]. 系统工程与电子技术, 2002, 24 (5): 102-105.

下内存数据并发调度方法。并通过仿真实验证明，所提方法可以高精度地对多核环境下内存数据进行并发调度，可实践性较高，为该领域的专家学者在数据并发调度研究，提供了强有力的依据，为互联网的后续发展做出了杰出的贡献。

参考文献:

[1] 庞明宝, 陈茂林, 张 宁. 基于 MAST 的智慧公交优化调度研究 [J]. 交通运输系统工程与信息, 2017, 17 (1): 143-149.

[2] 乔 梁, 付正鑫, 许 懿, 等. 梯级水电站联合优化调度系统的开发与应用 [J]. 水利水电技术, 2014, 45 (10): 97-100.

[3] 王志淋, 李新明. 跟踪与数据中继卫星系统资源调度优化问题 [J]. 中国空间科学技术, 2015, 35 (1): 36-42.

[4] 徐迭石, 刘胜辉, 马 超, 等. 大数据环境下 MES 作业计划与调度能力云服务化研究 [J]. 计算机工程与科学, 2016, 38 (4): 624-633.

[5] 丁盛舟, 李永光, 杜 鹏, 等. 基于 CIM/E 的电网调度系统数据质量优化方法 [J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44 (3): 129-134.

[6] 郝 亮, 崔 刚, 曲明成, 等. 成本约束下的云计算能耗资源调度优化算法 [J]. 高技术通讯, 2014, 24 (5): 458-464.

[7] 刘明周, 张 玺, 刘从虎, 等. 不确定环境下再制造加工车间生产调度优化方法 [J]. 机械工程学报, 2014, 50 (10): 206-212.

[8] 余东平, 张剑峰, 王 聪, 等. 多路并发传输中数据调度算法的优化 [J]. 计算机应用, 2014, 34 (5): 1227-1231.

[9] 徐奕奕, 唐培和, 陈 阳. 一种基于节点博弈的分层式数据网格资源调度优化策略 [J]. 控制工程, 2014, 21 (6): 925-929.

[10] 战 非. 高校云数据中心基于蚁群算法的资源调度研究 [J]. 电子设计工程, 2016, 24 (16): 18-21.