



中华人民共和国国家标准

GB/T 40576—2021

工业机器人运行效率评价方法

Evaluation methodology for operation efficiency of industrial robots

2021-10-11 发布

2022-05-01 实施

国家市场监督管理总局
国家标准化管理委员会 发布

目 次

前言	III
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 运行效率评价流程	2
5 标准循环运行测试方法	3
6 实际工况运行测试方法	4
7 运行效率评价指标	6
8 评价报告的编写	8
附录 A (资料性附录) 工业机器人运行效率优化方法	9
附录 B (资料性附录) 工业机器人运行效率评价示例	10

前 言

本标准按照 GB/T 1.1—2009 给出的规则起草。

本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别这些专利的责任。

本标准由中国机械工业联合会提出。

本标准由全国自动化系统与集成标准化技术委员会(SAC/TC 159)归口。

本标准起草单位:中机生产力促进中心、重庆大学、苏州苏相机器人智能装备有限公司、北京机械工业自动化研究所有限公司、苏州傲特敏机器人技术服务有限公司、重庆华数机器人有限公司、苏州大学、常州铭赛机器人科技股份有限公司、南京熊猫电子装备有限公司、江苏汇博机器人技术股份有限公司、中国科学院沈阳自动化研究所、福州广泰机械设备有限公司、国机智能技术研究院有限公司、上海沃迪智能装备股份有限公司。

本标准主要起草人:曹华军、孙婷婷、江沛、孙立宁、瞿卫新、尹作重、杨品、宁国松、高宏伟、辛明哲、夏亮、陈国栋、陈彬、秦修功、任建勋、李长峰、王富林、王振华、李志海、吴晓岚、贾建民、童上高、陆小军、王呈栋。

工业机器人运行效率评价方法

1 范围

本标准规定了工业机器人在制造环境中运行能耗测试及运行效率评价方法。

本标准适用于机器人使用者对工业机器人运行过程效率评价,以实现工业机器人运行过程中的能耗管控。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件,仅注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件,其最新版本(包括所有的修改单)适用于本文件。

GB/T 12643—2013 机器人与机器人装备 词汇

GB/T 40575 工业机器人能效评估导则

3 术语和定义

GB/T 12643—2013、GB/T 40575 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

工步 step

在加工表面(或装配时的连接表面、搬运时的工件)和加工(或装配、搬运)工具不变的情况下,连续完成的那一部分工序。

注:改写 GB/T 4863—2008,定义 3.4.3。

3.2

工业机器人任务 task of an industrial robot

工业机器人完成特定操作过程中,一系列工步的动作总和。

3.3

标准循环 standard cycle

标准工况下,工业机器人完成一个合格任务的过程。

3.4

辅助能耗 assistant energy consumption

工业机器人运行过程中,辅助时间内消耗的能量。

3.5

异常能耗 fault status energy consumption

工业机器人运行过程中,在异常状态下消耗的能量。

3.6

运行能耗标称值 nominal energy consumption in operation

重复完成多次标准循环所消耗能量的平均值。

3.7

运行能量效率系数 energy efficiency ratio in operation

完成一个合格任务,能耗标称值与实际运行能耗平均值的比值。

3.8

辅助能量比例系数 assistant energy consumption ratio in operation

辅助能耗与总能耗的比值。

3.9

异常能量比例系数 fault status energy consumption ratio in operation

异常能耗与总能耗的比值。

4 运行效率评价流程

工业机器人运行效率评价流程如图 1 所示:

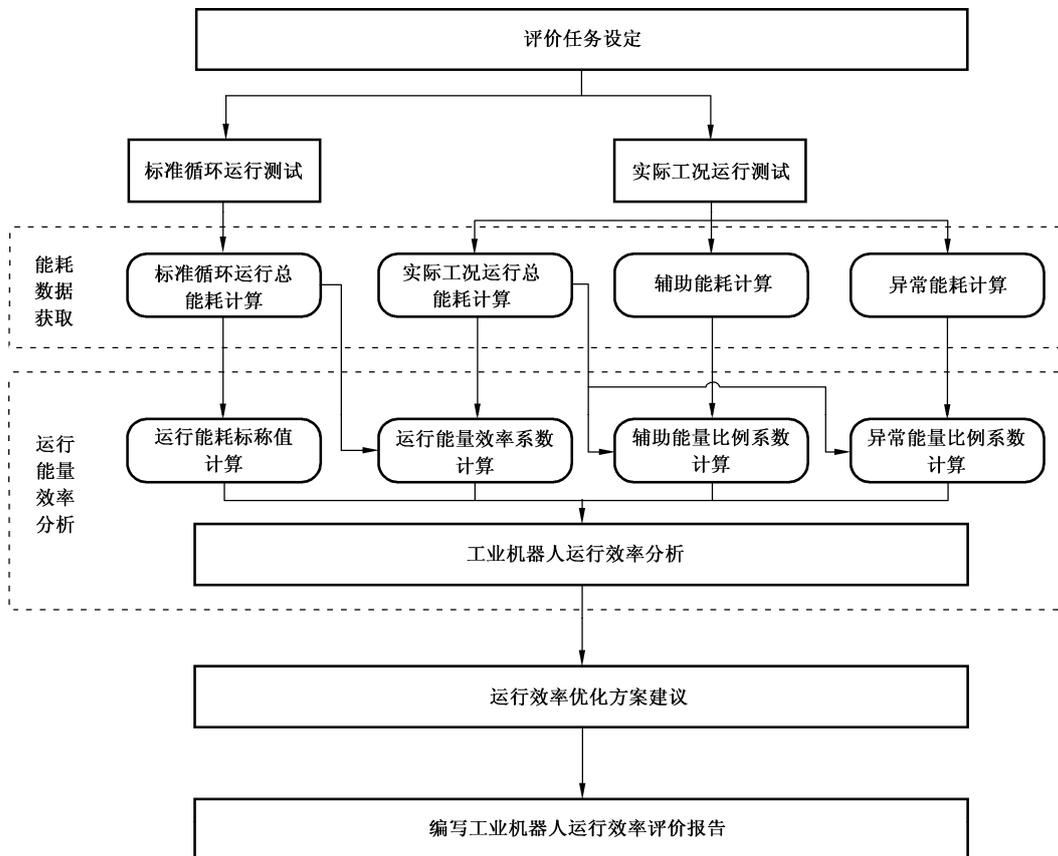


图 1 运行效率评价流程

工业机器人运行效率评价具体步骤如下：

- a) 确定工业机器人运行任务、工艺方案,并编写工业机器人运行程序；
- b) 按照第 5 章要求进行标准循环运行测试,获得标准循环运行测试功率曲线；
- c) 按照第 6 章要求实际工况运行测试,获得实际工况运行测试功率曲线；
- d) 按照式(1)~式(4)分别进行计算标准循环运行总能耗、实际工况运行总能耗、辅助能耗和异常能耗等数据；
- e) 在能耗数据的基础上,再按照式(5)~式(8)分别进行计算运行能耗标称值、辅助能量比例系数、异常能量比例系数和运行能量效率系数等评价指标,分析工业机器人运行效率水平；
- f) 提出工业机器人运行效率优化建议,优化方法参见附录 A；
- g) 编写工业机器人运行效率评价报告。

工业机器人运行效率评价示例参见附录 B。

5 标准循环运行测试方法

5.1 测试要求

测试涉及的功率检测设备、测试温度、操作条件及热机要求应符合 GB/T ×××× 中第 5 章的规定。

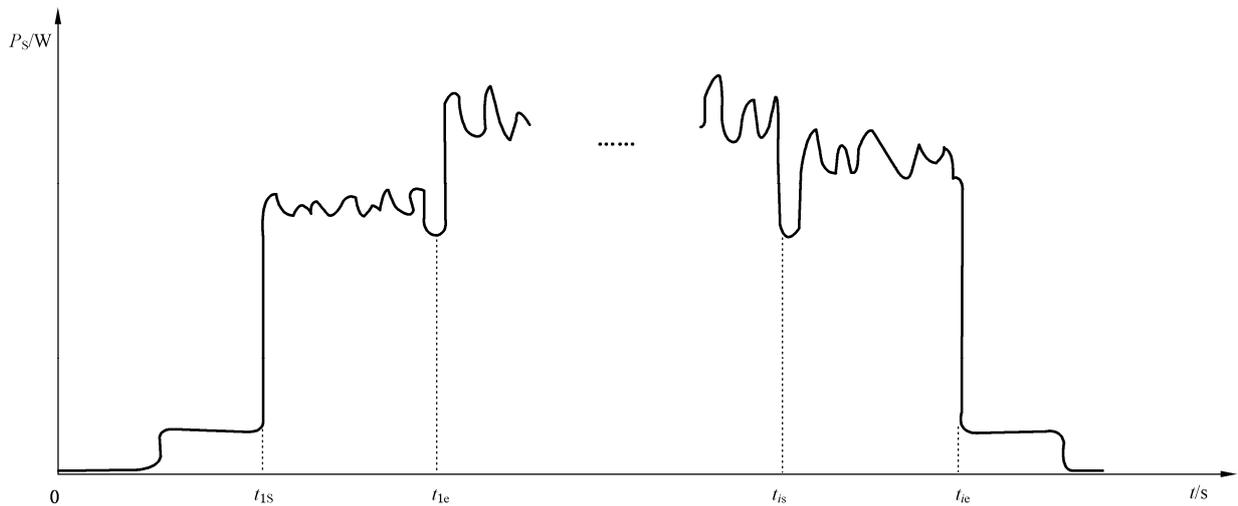
5.2 测试步骤

通过以下步骤进行工业机器人标准循环运行测试：

- a) 安装工业机器人末端执行器,设定标准生产工况；
- b) 对工业机器人进行热机操作；
- c) 将功率检测设备接入工业机器人主电源；
- d) 打开工业机器人主电源,使能工业机器人各电机；
- e) 执行工业机器人运行程序；
- f) 将工业机器人各电机取消使能,关闭工业机器人主电源。

5.3 结果记录

通过功率检测设备测量标准循环运行测试过程中工业机器人功率随时间变化情况,并通过标准循环运行测试功率曲线记录测试结果。图 2 为标准循环运行测试结果记录示例。



说明：

- P_s ——工业机器人瞬时功率；
- t ——时间；
- t_{1s} ——第 1 个工步开始时刻；
- t_{1e} ——第 1 个工步结束时刻；
- t_{is} ——第 i 个工步开始时刻；
- t_{ie} ——第 i 个工步结束时刻。

图 2 标准循环运行测试功率曲线示意图

5.4 能耗数据计算

在标准循环运行测试中，工业机器人标准循环运行总能耗通过式(1)计算：

$$E_s = \sum_{i=1}^n \int_{t_{is}}^{t_{ie}} P_s dt \quad \dots\dots\dots (1)$$

式中：

- E_s ——工业机器人标准循环运行总能耗，单位为焦耳(J)；
- P_s ——工业机器人的瞬时功率，单位为瓦特(W)；
- n ——标准循环包含工步个数；
- t_{is} ——第 i 个工步起始时刻，单位为秒(s)；
- t_{ie} ——第 i 个工步结束时刻，单位为秒(s)。

6 实际工况运行测试方法

6.1 测试要求

测试涉及的功率检测设备、操作条件应符合 GB/T ×××× 中第 5 章的规定。

6.2 测试步骤

通过以下步骤进行工业机器人实际工况下运行测试：

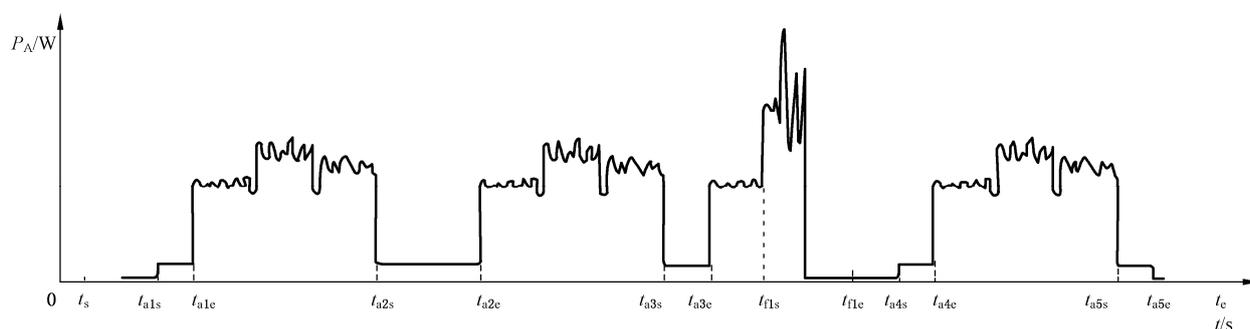
- a) 选定测试的制度工时或班次；

- b) 将工业机器人接入运行工位；
- c) 安装工业机器人末端执行器；
- d) 将功率检测设备接入工业机器人主电源；
- e) 打开工业机器人主电源,使能工业机器人各电机；
- f) 执行工业机器人运行程序；
- g) 将工业机器人各电机取消使能,关闭工业机器人主电源。

实际工况运行测试中的工业机器人运行程序相同应和标准循环运行测试中的工业机器人运行程序相同。

6.3 结果记录

通过功率检测设备测量实际工况运行测试过程中工业机器人功率随时间变化情况,并通过实际工况测试功率曲线记录测试结果。图3为实际工况运行测试结果记录示例。



说明:

P_A ——工业机器人瞬时功率;

t ——时间;

t_s ——实际工况运行测试开始时刻;

t_e ——实际工况运行测试停止时刻;

t_{a1s} ——第1个辅助时间段起始时刻;

t_{a1e} ——第1个辅助时间段结束时刻;

t_{a2s} ——第2个辅助时间段起始时刻;

t_{a2e} ——第2个辅助时间段结束时刻;

t_{a3s} ——第3个辅助时间段起始时刻;

t_{a3e} ——第3个辅助时间段结束时刻;

t_{f1s} ——第1个异常时间段起始时刻;

t_{f1e} ——第1个异常时间段结束时刻;

t_{a4s} ——第4个辅助时间段起始时刻;

t_{a4e} ——第4个辅助时间段结束时刻;

t_{a5s} ——第5个辅助时间段起始时刻;

t_{a5e} ——第5个辅助时间段结束时刻。

图3 实际工况运行测试功率曲线示意图

6.4 能耗数据计算

6.4.1 实际工况运行总能耗

在实际工况运行测试中,工业机器人实际工况运行总能耗通过式(2)计算:

$$E_T = \int_{t_s}^{t_e} P_A dt \quad \dots\dots\dots(2)$$

式中:

E_T ——工业机器人实际工况运行总能耗,单位为焦耳(J);

P_A ——工业机器人的瞬时功率,单位为瓦特(W);

t_s ——实际工况运行测试的起始时刻,单位为秒(s);

t_e ——实际工况运行测试的停止时刻,单位为秒(s)。

6.4.2 辅助能耗

实际工况测试中,工业机器人实际工况辅助能耗通过式(3)计算:

$$E_A = \sum_{i=1}^{n_a} \int_{t_{ais}}^{t_{aie}} P_A dt \quad \dots\dots\dots(3)$$

式中:

E_A ——工业机器人辅助能耗,单位为焦耳(J);

n_a ——实际工况运行测试包含辅助时间段个数;

t_{ais} ——第 i 个辅助时间段起始时刻,单位为秒(s);

t_{aie} ——第 i 个辅助时间段结束时刻,单位为秒(s)。

6.4.3 异常能耗

实际工况测试中,可能出现工业机器人功能异常、末端执行器损坏、辅助装置故障等异常状态,工业机器人实际工况异常能耗通过式(4)计算:

$$E_F = \sum_{i=1}^{n_f} \int_{t_{fis}}^{t_{fie}} P_A dt \quad \dots\dots\dots(4)$$

式中:

E_F ——工业机器人异常能耗,单位为焦耳(J);

n_f ——实际工况运行测试包含异常时间段个数;

t_{fis} ——第 i 个异常时间段起始时刻,单位为秒(s);

t_{fie} ——第 i 个异常时间段结束时刻,单位为秒(s)。

7 运行效率评价指标

7.1 评价指标构成

运行效率评价指标包括运行能耗标称值、辅助能量比例系数、异常能量比例系数和运行能量效率系数。

7.2 评价指标计算

7.2.1 运行能耗标称值

进行十次标准循环运行测试,通过式(1)计算每次标准循环运行测试中工业机器人的总能耗,运行

能耗标称值通过式(5)计算:

$$E_N = \frac{\sum_{i=1}^{10} E_{Si}}{10} \dots\dots\dots (5)$$

式中:

E_N ——运行能耗标称值,单位为焦耳(J);

E_{Si} ——第 i 次标准循环运行测试中工业机器人的总能耗,单位为焦耳(J)。

7.2.2 辅助能量比例系数

辅助能量比例系数通过式(6)计算:

$$\Delta_A = \frac{E_A}{E_T} \dots\dots\dots (6)$$

式中:

Δ_A ——辅助能量比例系数。

7.2.3 异常能量比例系数

异常能量比例系数通过式(7)计算:

$$\Delta_F = \frac{E_F}{E_T} \dots\dots\dots (7)$$

式中:

Δ_F ——异常能量比例系数。

7.2.4 运行能量效率系数

运行能量效率系数通过式(8)计算

$$\Delta = \frac{E_N \times n_T \times \eta}{E_T} \dots\dots\dots (8)$$

式中:

Δ ——运行能量效率系数,运行能量效率系数 $0 \leq \Delta \leq 1$;

n_T ——实际工况运行测试中,工业机器人完成任务次数;

η ——实际工况运行测试中,工业机器人任务的合格率。

7.3 评价指标分析

运行效率评价指标反映工业机器人完成特定任务过程中能量利用效率,通过各评价指标可对工业机器人的运行过程中能量效率水平进行分析:

- 运行能耗标称值:反映工业机器人选型、工艺对工业机器人完成任务运行能耗的影响。运行能耗标称值越小,工业机器人在标准循环运行测试能耗越低。
- 辅助能量比例系数:反映工业机器人运行过程中辅助时间对运行效率的影响。辅助能量比例系数越小,工业机器人运行效率越高。
- 异常能量比例系数:反映工业机器人运行过程中工业机器人功能异常、末端执行器损坏、辅助装置故障等异常状态对运行效率的影响。异常能量比例系数越小,工业机器人运行效率越高。
- 运行能量效率系数:反映工业机器人运行过程中,工况、加工质量等因素对工业机器人运行效率的影响。相同运行能耗标称值情况下,运行能量效率系数越大,工业机器人具有更高运行效率。

8 评价报告的编写

工业机器人运行效率评价报告应包含如下内容：

- 用户、运行任务及工艺类型；
- 工业机器人的制造商、型号、制造时间及软件版本号；
- 末端执行器的制造商、型号、制造时间；
- 运行效率评价责任者、任务轨迹及编程方法；
- 功率检测设备的类型、型号、制造商及精度；
- 标准循环运行测试的测试时间、测试场所、环境温度、热机时间、标准循环运行测试功率曲线；
- 实际工况运行测试的测试开始时间、测试结束时间、测试场所、环境温度、实际工况运行总能耗、辅助能耗、异常能耗、任务完成次数、合格率、实际工况运行测试功率曲线；
- 运行能耗标称值、运行能量效率系数、辅助能量比例系数和异常能量比例系数；
- 运行效率优化建议。

附录 A

(资料性附录)

工业机器人运行效率优化方法

A.1 工艺方案优化

工艺方案影响运行能耗标称值,进而影响工业机器人运行效率。当运行能耗标称值较大时,根据实际情况宜采用以下优化方法,或采用下述方法组合、集成的方法:

- a) 运行轨迹优化:对工业机器人的运行轨迹进行优化,合理规划其运动路径和运行速度。选择恰当的空间运动曲线,避免过于频繁的加减速,增强轨迹的平滑性,降低机器人运行能耗标称值,提升运行效率。
- b) 匹配性优化:工业机器人处于额定负载时,不仅能够充分满足性能要求,而且电机容量的利用率很高,此时机器人能量利用率较高,应避免大负载机器人应用于轻量型场合。
- c) 工艺参数优化:工艺参数影响工业机器人负载情况,并进一步影响工业机器人运行能耗,通过工艺参数优化提升工业机器人运行效率。

A.2 工况及质量优化

工业机器人运行工况及加工质量将影响运行能量效率系数,进而影响工业机器人运行效率。当运行能量效率系数较小时,根据实际情况宜采用以下优化方法,或采用下述方法组合、集成的方法:

- a) 辅助时间优化:当辅助能量比例系数较大时,缩短工业机器人运行过程中装夹、检测等环节的辅助时间,降低辅助能耗,实现运行能量效率提升;
- b) 可靠性优化:当异常能量比例系数较大时,宜通过提升设备可靠性,减少工业机器人、末端执行器及辅助装置故障率,降低工业机器人在异常能耗,实现运行能量效率提升;
- c) 质量优化:合格率决定实际运行过程中,工业机器人有效能耗,宜通过质量优化提高成品的合格率,提升能量效率系数,实现运行能量效率提升。

附 录 B
(资料性附录)
工业机器人运行效率评价示例

本附录以某型号工业机器人打磨箱体任务为实例,说明工业机器人运行效率评价方法。

1. 评价任务设定

根据箱体打磨产品要求,确定工业机器人的打磨任务、工艺方案;确定打磨工艺参数及工艺路线,通过示教编程方法编写工业机器人运行程序。

2. 标准循环运行测试

测定环境温度,安装工业机器人末端执行器,设定标准生产工况,并进行热机操作。选取功率分析仪,并根据功率分析仪产品说明书,按照三相四线制模式将功率分析仪接入工业机器人主电源。打开工业机器人主电源,使能工业机器人各电机,执行工业机器人打磨程序,程序运行完成后将工业机器人各电机取消使能,关闭工业机器人主电源。记录工业机器人标准循环运行测试功率曲线。并重复标准循环运行测试十次。

3. 实际工况运行测试

选定一个班次,将工业机器人接入制造系统,并根据功率分析仪产品说明书,按照三相四线制模式将功率分析仪接入工业机器人主电源,执行工业机器人打磨程序,程序运行完成后将工业机器人各电机取消使能,关闭工业机器人主电源。测量工业机器人在一个班次时段的实际工况运行测试功率曲线。在该班次内工业机器人共完成 188 次箱体打磨任务,其中 173 件箱体的打磨工序质量合格,任务质量合格率为 92.02%。

4. 能耗数据获

分别计算实际工况运行总能耗 $E_T = 10\ 565\ 332\ \text{J}$,辅助能耗 $E_A = 1\ 475\ 326\ \text{J}$,异常能耗 $E_F = 0\ \text{J}$ 。

5. 运行效率分析

首先计算运行能耗标称值 $E_N = 52\ 189\ \text{J}$,然后分别计算辅助能量比例系数 $\Delta_A = 0.139\ 6$,异常能量比例系数 $\Delta_F = 0$,最后计算运行能量效率系数 $\Delta = 0.854\ 5$ 。

6. 运行效率优化建议

根据运行能耗标称值、辅助能量比例系数、异常能量比例系数、运行能量效率系数,从工艺方案、工况及质量优化方面提出工业机器人运行效率优化方案。

7. 编写工业机器人评价报告

根据测试及计算结果编写运行效率评价报告,工业机器人运行效率评价报告如下:

工业机器人运行效率评价报告

1) 工业机器人使用信息

用户: _____ 运行任务: _____

工艺类型: _____

2) 工业机器人

制造商: _____ 型号: _____

制造时间: _____ 软件版本号: _____

备注: _____

3) 末端执行器

制造商: _____ 型号: _____

制造时间: _____

备注: _____

4) 评价责任人及测试程序编程方式

运行效率评价责任者: _____ 任务轨迹: _____

编程方式: _____

备注: _____

5) 功率检测设备

类型: _____ 制造商: _____

型号: _____ 精度: _____

备注: _____

6) 标准循环运行测试

测试时间: _____ 测定场所: _____

环境温度: _____ 热机时间: _____

测试数据: _____

(标准循环运行测试功率曲线)

7) 实际工况运行测试

测试开始时间: _____ 测试结束时间: _____

测试场所：_____ 环境温度：_____

实际工况运行总能耗(J)：_____ 辅助能耗(J)：_____

异常能耗(J)：_____ 任务完成次数：_____

合格率(%)：_____

测试数据：

(实际工况运行测试功率曲线)

8) 评价指标

运行效率评价指标表

指标名称	测试值
运行能耗标称值 E_N (J)	
运行能量效率系数 Δ	
辅助能量比例系数 Δ_F	
异常能量比例系数 Δ_A	

9) 运行效率优化方案
