

DOI: 10.3901/JME.2022.17.026

智重装备的结构与控制多学科一体化优化设计方法^{*}

宋学官 张天赐 付涛 郭东明

(大连理工大学机械工程学院 大连 116024)

摘要: 智能化重大装备(以下简称“智重装备”)的设计与优化是装备全生命周期中的重要环节,对于装备质量与系统性能提升具有重要意义。由于智重装备物理结构与控制系统间复杂的耦合关系,传统先结构设计再控制设计的串行顺序优化设计方法难以获得全局最优值。为此,本文提出一种结构与控制并行的多学科一体化优化设计方法来获取最优匹配的结构与控制参数。对智重装备的结构与控制一体化优化现状做出归纳总结。分别利用 KKT 条件与极小值原理证明了传统串行优化的不足以及多学科并行一体化设计方法的最优性,并给出常用的模型求解方法。以无人矿用挖掘机与无人堆取料机为对象,给出了结构与控制一体化优化方法在智重装备设计中具体应用方式。计算结果表明,提出的一体化优化方法比传统串行优化方法具有明显的优势,能够进一步提升智重装备的关键性能。

关键词: 智重装备; 一体化优化; KKT 条件; 极小值原理

中图分类号: TP202

Multidisciplinary Co-design Optimization of Structural and Control Parameters for Intelligent Large-scale Equipments

SONG Xueguan ZHANG Tianci FU Tao GUO Dongming

(School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024)

Abstract: The design and optimization of the intelligent large-scale equipments are foundations in the whole life cycle of equipments, which is of great significance to the improvement of product quality and system performance. Due to the complex coupling relationship between physical structure and control system of intelligent large-scale equipments, it is difficult to obtain the optimal solution by traditional sequential optimization design methods. Therefore, a multidisciplinary co-design optimization method is proposed to obtain the optimal matching relationship between structure and control parameters. The traditional sequential design method and co-design optimization method of structure and control parameters are introduced. The optimality of the co-design method is proved by using KKT condition and minimum principle, and typical computational methods are presented for co-design optimization model. A paradigm of applying co-design method in the intelligent large-scale equipment is presented and demonstrated by two engineering examples of design optimization about unmanned cable shovel and unmanned bucket wheel reclaimer. The results show that the proposed co-design optimization method is superior to the traditional sequential design method, and can further improve the key performance of the intelligent large-scale equipments.

Key words: intelligent large-scale equipments; multidisciplinary co-design optimization; KKT condition; minimum principle

0 前言

重大装备是装备制造业中技术先进、研制难度大、成套性强的大型、高端机电装备统称,比如大

型矿用挖掘机、隧道掘进机、堆取料机等,其对国民经济建设、国家能源与安全保障等具有重大影响。随着信息化技术、传感技术、人工智能技术等的高速发展,重大装备的智能化改造、升级,实现从单一硬件的“重大”到软硬俱优的“智重”蝶变已经迫在眉睫。在市场明确需求以及“中国制造 2025”、“十四五”规划等政策的部署与引导下,近年来重大

^{*} 国家自然科学基金(52075068)和国家重点研发计划(2018YFB1700704)资助项目。20210819 收到初稿,20211203 收到修改稿

装备与数字化、信息化技术加速融合,逐步朝智能化与无人化迈进,涌现出无人矿用挖掘机^[1]、无人堆取料机^[2]、智能起重机^[3]和智能隧道掘进机^[4]等智能装备。在其研发的各项关键性、基础性使能技术中,系统优化设计是智能装备全生命周期中的基础环节,决定了装备的关键性能指标以及实际运行的可靠性等。

智重装备的优化设计,不同于传统的面向重大装备的机械结构设计再智能控制设计,是一类典型的跨学科多系统的设计问题^[5]。具体来说,智重装备的优化设计主要包括本体结构与智能控制系统设计。在结构设计优化方面,主要针对结构的轻量化^[6-7]、可靠性^[8-9]等方面优化提升产品性能。在控制系统设计方面,最优控制理论^[10]、进化计算^[11]等方法常被用于设计系统的最优控制参数,进而实现最优作业规划和操作。由于传统的结构优化与控制系统设计分属不同阶段与领域,目前主要通过串行方式递进,即先结构本体优化、再控制系统优化的顺序优化设计^[12]。这种方法流程简洁、边界清晰,易于实现不同部门、系统之间的串联递进式作业。但是,由于结构与智能控制的目标与变量大相径庭,导致人为割裂了结构参数与控制参数、参数与结构性能与使役性能之间的耦合作用。比如,在对结构设计时通常以结构尺寸为设计参数,以轻量化、可靠性等为性能目标;而对控制系统优化时多以作业速度、轨迹为控制参数,能量、效率为性能目标。在结构设计阶段,没有考虑作业路径轨迹等影响,而控制设计时,只能在已有结构体上进行最优规划。很明显,忽视了物理结构与控制系统之间的耦合作用,极大地减少了寻优的可行域,只能达到在已有结构本体上的局部优化提升,无法达到应有的物理结构和控制系统相互匹配的全局最优^[13]。因此,为满足智重装备高性能、高可靠性及快速响应设计需求,亟需开展结构和控制跨学科的整机协同优化设计方法研究。

广义的多学科优化设计(Multidisciplinary design optimization, MDO)思想和理论由来已久^[14],在国外最早由 SOBIESKI^[15]提出,是以并行协同的思想为基础,从流体和固体相互耦合作用的角度出发,优化设计飞行器结构,提高其综合性能,后来逐渐扩展到汽车、船舶、风电等行业和领域。国内,主要由钟掘院士^[16]率先提出,主要是协同匹配附在系统的机械、电气、液压等多学科与多系统要求,达到整体的最优输出。MDO 发展至今,已涌现出多种类型的框架与求解策略,如多学科可行法^[17],并

行子空间优化^[18],一体化分析和设计^[19]等,同时在飞机、汽车等领域获得了成功应用^[20-23]。近年来,MDO 方法在隧道掘进机、矿用大型挖掘机等重大装备领域也进行了一定的推广与应用,孙伟等^[24]提出一种 MDO 方法应用于隧道掘进机系统的优化,得到了使工期、成本、能耗最小化并且与地质条件相匹配的隧道掘进机结构与控制参数。宋学官等^[25]建立了矿用挖掘机运动学与动力学模型,利用多学科一体化优化方法对矿用挖掘机结构参数与速度控制参数进行协同优化。相较于顺序设计,一体化优化方法进一步降低了挖掘能耗,提升了挖掘效率,并且使前端工作装置的振幅更小。YUAN 等^[26]提出了一种堆取料机最小能耗下结构与控制参数一体化优化设计方法,在降低取料能耗的同时有效减少了振动。

智重装备的结构与控制一体化优化方法具有鲜明特色,将机、电、液的范畴拓展到智能决策与控制领域,所以涉及系统和学科更为宽泛,流程链条更长,难度也更大。目前,针对智重装备多学科协同与一体化的研究尚处于起步阶段,缺乏较为深入的研究与论述。为此,本文对智重装备的结构与控制一体化优化方法做出系统性总结与最优性证明,介绍相应解算方法,并给出该方法在智重装备优化设计中的应用范例。本文内容安排如下:首先,对结构与控制一体化优化方法给出基本介绍。接着,对智重装备优化中的不同待优化参数类型分情况讨论,分别采用 Karush-Kuhn-Tucker(KKT)条件与极小值原理从理论上证明了传统串行优化与并行一体化优化设计的最优性。然后介绍了常用的优化模型求解方法,为智重装备的结构与控制一体化设计提供理论支撑。最后以无人矿用挖掘机和无人堆取料机两个典型智重装备为对象,验证了结构和控制一体化优化方法的可行性与有效性。

1 顺序优化设计与一体化优化设计

顺序优化设计方法在处理智重装备结构与控制参数的优化问题时,首先进行结构设计优化,然后在已有的最优结构的基础上完成最优控制参数的优化,设计过程如图 1a 所示。顺序方法看似递进自然,却忽略了各部分参数之间的相关作用,往往获得次优的结果^[27]。结构与控制一体化优化设计如图 1b 所示,对结构与控制参数不加以区分的进行一体化建模并同时寻优。虽然一定程度上增加了建模难度与计算负担,却能有效消除结构设计与控制系统设

设计的界限, 实现结构参数与控制参数的最优组合。

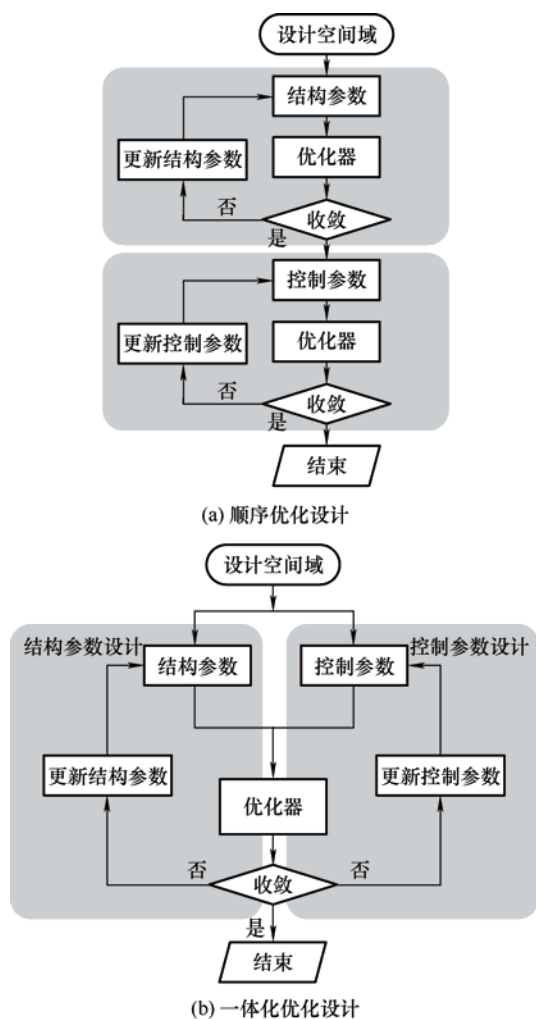


图1 顺序设计与一体化优化框架

2 一体化优化设计方法最优性

在智能装备结构与控制一体化优化中, 需要兼顾结构参数与控制参数。对于结构参数, 通常为时不变的空间尺寸, 因此视为静态参数进行优化。对于控制参数如速度、力矩等控制量, 既存在需要视作静态参数优化的情景, 也存在视作时变参数优化的情景。因此下面分两种情况讨论, 对结构与控制一体化优化的最优性进行证明。

2.1 静态类控制参数

对于智能装备结构设计的优化问题, 可以表示为如下形式

$$\begin{aligned} & \text{find } \mathbf{x}_s \\ & \min J = f(\mathbf{x}_s, \mathbf{x}_c) \\ & \text{s.t. } g_i(\mathbf{x}_s, \mathbf{x}_c) \leq 0 \quad (i=1, 2, \dots, n) \\ & \quad h_j(\mathbf{x}_s, \mathbf{x}_c) = 0 \quad (j=1, 2, \dots, m) \end{aligned} \quad (1)$$

式中, \mathbf{x}_s 和 \mathbf{x}_c 分别为结构与控制设计变量组成的矢量, \mathbf{g} 和 \mathbf{h} 分别是结构优化设计需满足的不等式约束与等式约束。结构设计的全局最优性需要满足一阶必要条件, 即 KKT 条件

$$\begin{cases} \mathbf{g}(\mathbf{x}_s, \mathbf{x}_c) \leq 0, \mathbf{h}(\mathbf{x}_s, \mathbf{x}_c) = 0, \boldsymbol{\beta}_s^T \mathbf{g}(\mathbf{x}_s, \mathbf{x}_c) = 0 \\ \frac{\partial f}{\partial \mathbf{x}_s} + \sum_{j=1}^m \left(\frac{\partial h_j}{\partial \mathbf{x}_s} \right) \boldsymbol{\alpha}_s + \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial g_i}{\partial \mathbf{x}_s} \right) \boldsymbol{\beta}_s = 0, \boldsymbol{\beta}_s^T \geq 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中, $\boldsymbol{\alpha}_s$ 和 $\boldsymbol{\beta}_s$ 为拉格朗日乘子。

对于控制参数的最优化问题, 可以表示为

$$\begin{aligned} & \text{find } \mathbf{x}_c \\ & \min J = f(\mathbf{x}_s, \mathbf{x}_c) \\ & \text{s.t. } g_i(\mathbf{x}_s, \mathbf{x}_c) \leq 0 \quad (i=1, 2, \dots, n) \\ & \quad h_j(\mathbf{x}_s, \mathbf{x}_c) = 0 \quad (j=1, 2, \dots, m) \end{aligned} \quad (3)$$

该优化问题最优解的 KKT 条件为

$$\begin{cases} \mathbf{g}(\mathbf{x}_s, \mathbf{x}_c) \leq 0, \mathbf{h}(\mathbf{x}_s, \mathbf{x}_c) = 0, \boldsymbol{\beta}_c^T \mathbf{g}(\mathbf{x}_s, \mathbf{x}_c) = 0 \\ \frac{\partial f}{\partial \mathbf{x}_c} + \sum_{j=1}^m \left(\frac{\partial h_j}{\partial \mathbf{x}_c} \right) \boldsymbol{\alpha}_c + \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial g_i}{\partial \mathbf{x}_c} \right) \boldsymbol{\beta}_c = 0, \boldsymbol{\beta}_c^T \geq 0 \end{cases} \quad (4)$$

因此, 先结构后控制的顺序优化设计的 KKT 条件可以归纳为

$$\begin{cases} \mathbf{g}(\mathbf{x}_s, \mathbf{x}_c) \leq 0, \mathbf{h}(\mathbf{x}_s, \mathbf{x}_c) = 0 \\ \boldsymbol{\beta}_s^T \mathbf{g}(\mathbf{x}_s, \mathbf{x}_c) \neq 0, \boldsymbol{\beta}_s^T \geq 0, \boldsymbol{\beta}_c^T \mathbf{g}(\mathbf{x}_s, \mathbf{x}_c) \neq 0, \boldsymbol{\beta}_c^T \geq 0 \\ \frac{\partial f}{\partial \mathbf{x}_s} + \sum_{j=1}^m \left(\frac{\partial h_j}{\partial \mathbf{x}_s} \right) \boldsymbol{\alpha}_s + \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial g_i}{\partial \mathbf{x}_s} \right) \boldsymbol{\beta}_s = 0 \\ \frac{\partial f}{\partial \mathbf{x}_c} + \sum_{j=1}^m \left(\frac{\partial h_j}{\partial \mathbf{x}_c} \right) \boldsymbol{\alpha}_c + \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial g_i}{\partial \mathbf{x}_c} \right) \boldsymbol{\beta}_c = 0 \end{cases} \quad (5)$$

如果采用结构与控制一体化优化, 优化变量由装备的结构参数与控制参数共同组成, 其优化的列式可以表示为

$$\begin{aligned} & \text{find } \mathbf{x}_s, \mathbf{x}_c \\ & \min J = f(\mathbf{x}_s, \mathbf{x}_c) \\ & \text{s.t. } g_i(\mathbf{x}_s, \mathbf{x}_c) \leq 0 \quad (i=1, 2, \dots, n) \\ & \quad h_j(\mathbf{x}_s, \mathbf{x}_c) = 0 \quad (j=1, 2, \dots, m) \end{aligned} \quad (6)$$

同理可得, 一体化优化的最优解需要满足的 KKT 条件为

$$\begin{cases} \mathbf{g}(\mathbf{x}_s, \mathbf{x}_c) \leq 0, \mathbf{h}(\mathbf{x}_s, \mathbf{x}_c) = 0 \\ \boldsymbol{\alpha}^T \mathbf{g}(\mathbf{x}_s, \mathbf{x}_c) \neq 0, \boldsymbol{\alpha}^T \geq 0 \\ \frac{\partial f}{\partial \mathbf{x}_s} + \sum_{j=1}^m \left(\frac{\partial h_j}{\partial \mathbf{x}_s} \right) \boldsymbol{\alpha} + \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial g_i}{\partial \mathbf{x}_s} \right) \boldsymbol{\beta} = 0 \\ \frac{\partial f}{\partial \mathbf{x}_c} + \sum_{j=1}^m \left(\frac{\partial h_j}{\partial \mathbf{x}_c} \right) \boldsymbol{\alpha} + \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial g_i}{\partial \mathbf{x}_c} \right) \boldsymbol{\beta} = 0 \end{cases} \quad (7)$$

式中, α 和 β 为一体化优化中拉格朗日乘子, 由于对结构与控制设计变量同步优化, 因此式(7)中对两个变量求偏导的乘子是等同的。同时, 可知满足式(7)的 KKT 条件得到的解有可能为全局最优解。当优化问题为凸问题时, KKT 条件也是全局最优的充分条件, 亦即优化解一定为全局最优解。

比较式(5)和(7)可得, 传统的顺序设计优化过程中, 一般来说设计变量 $\mathbf{x}_s, \mathbf{s}_c$ 所对应的两组拉格朗日乘子 (α_s, β_s) 和 (α_c, β_c) 不相同, 即 $\alpha_s \neq \alpha_c, \beta_s \neq \beta_c$ 。因此顺序设计中得到的优化解无法满足式(7)的 KKT 条件。综上可知, 顺序设计即使找到最优解, 也只是局部最优解, 而不可能为全局最优解。与此相反, 结构与控制一体优化设计可以获得最优解, 天然就是系统全局最优解。

2.2 时变类控制参数

在对系统结构与控制参数优化设计中, 更为常见的一种情形是结构参数为静态参数, 控制参数为时变参数。对于此类情况, 系统的结构参数优化列式仍如式(2)所示, 不同之处在于对控制参数的优化设计。对于时变类的控制参数优化, 本质上可将其归结为动态系统的最优控制问题

$$\begin{aligned} & \text{find } \xi(t), \mathbf{u}(t), t_f \\ & \min J = \Phi(\xi(t_f), t_f) + \int_{t_0}^{t_f} G(\xi(t), \mathbf{u}(t), t) dt \\ & \text{s.t. } \dot{\xi}(t) = f(\xi(t), \mathbf{u}(t), t) \\ & \quad \eta(\mathbf{u}(t), t) \leq 0 \\ & \quad \xi(t_0) = \xi_0, \psi(\xi(t_f), t_f) = 0 \end{aligned} \quad (8)$$

式中, $\xi(t)$ 为系统状态变量, $\mathbf{u}(t)$ 为系统控制变量, t_f 为末端时刻, 这里, 三者均被视为系统控制参数并同时进行优化。 t 为系统运行时间, $\Phi(\cdot)$ 为 Mayer 型性能指标, $\int_{t_0}^{t_f} G(\xi(t), \mathbf{u}(t), t) dt$ 为 Lagrange 型性能指标, $\psi(\cdot)$ 为末端时刻边界约束, $\eta(\cdot)$ 为路径约束。该控制参数优化问题的最优性需要满足对应的一阶必要条件, 即庞特里亚金极小值原理。定义哈密顿函数

$$H = G(\xi(t), \mathbf{u}(t), t) + \lambda^T(t) f(\xi(t), \mathbf{u}(t), t) \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \delta L_{aug} = & \left[\omega_s \left(\frac{\partial f_s}{\partial \mathbf{x}_s} + \alpha^T \frac{\partial \mathbf{g}}{\partial \mathbf{x}_s} + \beta^T \frac{\partial \mathbf{h}}{\partial \mathbf{x}_s} \right) + \omega_c \int_0^{t_f} \left(\frac{\partial H}{\partial \mathbf{x}_s} + \mu^T \frac{\partial \eta}{\partial \mathbf{x}_s} \right) \delta \mathbf{x}_s + \right. \\ & \omega_c \left(\frac{\partial \Phi}{\partial \xi(t_f)} + \mathbf{v}^T \frac{\partial \psi}{\partial \xi(t_f)} - \lambda \right) \delta \xi(t_f) + \omega_c \left(\frac{\partial \Phi}{\partial t_f} + \mathbf{v}^T \frac{\partial \psi}{\partial \xi(t_f)} + H \right) \delta t_f + \\ & \left. \omega_c \int_0^{t_f} \left[\left(\frac{\partial H}{\partial \xi} + \dot{\lambda} \right) \delta \xi + \left(\frac{\partial H}{\partial \mathbf{u}} + \mu^T \frac{\partial \eta}{\partial \mathbf{u}} \right) \delta \mu + \left(\frac{\partial H}{\partial \lambda} + \dot{\xi} \right) \delta \lambda \right] dt \right] \end{aligned} \quad (13)$$

根据泛函存在极值的必要性条件可知, 需满足

式中, λ 为伴随状态。则 J 取极小值的必要条件为

$$\begin{cases} \dot{\xi}(t) = f(\xi(t), \mathbf{u}(t), t), \eta(\mathbf{u}(t), t) \leq 0 \\ \frac{\partial H}{\partial \mathbf{u}} + \mu^T \frac{\partial \eta}{\partial \mathbf{u}} = 0, \dot{\lambda} = \frac{\partial H}{\partial \xi} \\ H(t_f) = -\frac{\partial \Phi}{\partial t_f} - \mathbf{v}^T \frac{\partial \psi}{\partial \xi(t_f)} \\ \lambda^T(t_f) = \frac{\partial \Phi}{\partial \xi(t_f)} + \mathbf{v}^T \frac{\partial \psi}{\partial \xi(t_f)} \\ \xi(t_0) = \xi_0, \psi(\xi(t_f), t_f) = 0 \end{cases} \quad (10)$$

式中, \mathbf{v} 为拉格朗日乘子。因此先结构后控制的顺序优化的最优性条件可以由式(2)与(10)共同决定。

若采用结构与控制一体化优化, 则优化列式可以表示为

$$\begin{aligned} & \text{find } \mathbf{x}_s, \xi(t), \mathbf{u}(t), t_f \\ & \min J = \omega_s f_s(\mathbf{x}_s) + \\ & \quad \omega_c \left(\Phi(\mathbf{x}_s, \xi(t_f), t_f) + \int_{t_0}^{t_f} G(\xi(t), \mathbf{u}(t), t) dt \right) \\ & \text{s.t. } \dot{\xi}(t) = f(\mathbf{x}_s, \xi(t), \mathbf{u}(t), t) \\ & \quad g_i(\mathbf{x}_s) \leq 0 \quad (i=1, 2, \dots, m) \\ & \quad h_j(\mathbf{x}_s) = 0 \quad (j=1, 2, \dots, n) \\ & \quad \eta(\mathbf{u}(t), t) \leq 0 \\ & \quad \xi(t_0) = \xi_0, \psi(\xi(t_f), t_f) = 0 \end{aligned} \quad (11)$$

式中, ω_s 和 ω_c 分别表示对应的权重。利用拉格朗日乘子法定义增广泛函

$$\begin{aligned} L_{aug} = & \omega_s \left(f_s(\mathbf{x}_s) + \alpha^T \mathbf{g}(\mathbf{x}_s) + \beta^T \mathbf{h}(\mathbf{x}_s) \right) + \\ & \omega_c \left(\Phi(\xi(t_f), t_f) + \mathbf{v}^T \psi(\xi(t_f), t_f) + \right. \\ & \left. \int_0^{t_f} (G(\mathbf{x}_s, \xi(t), \mathbf{u}(t), t) + \mu^T(t) \eta(\mathbf{u}(t), t, \mathbf{x}_s) + \right. \\ & \left. \lambda^T(t) (f(\mathbf{x}_s, \xi(t), \mathbf{u}(t), t) - \dot{\xi}(t))) dt \right) \end{aligned} \quad (12)$$

将式(9)代入式(12)中, 整理可得 L_{aug} 的变分如下

δL_{aug} 等于 0。由于各变量变分之间互相独立, 因此

必须满足各项均为0。因此可得

$$\begin{cases} \left(\frac{\partial f_s}{\partial \mathbf{x}_s} + \boldsymbol{\alpha}^T \frac{\partial \mathbf{g}}{\partial \mathbf{x}_s} + \boldsymbol{\beta}^T \frac{\partial \mathbf{h}}{\partial \mathbf{x}_s} \right) + \frac{\omega_c}{\omega_s} \int_0^{t_f} \left(\frac{\partial H}{\partial \mathbf{x}_s} + \boldsymbol{\mu}^T \frac{\partial \boldsymbol{\eta}}{\partial \mathbf{x}_s} \right) = 0 \\ \boldsymbol{\lambda}^T(t_f) = \frac{\partial \Phi}{\partial \boldsymbol{\xi}(t_f)} + \mathbf{v}^T \frac{\partial \Psi}{\partial \boldsymbol{\xi}(t_f)} \\ H(t_f) = -\frac{\partial \Phi}{\partial t_f} - \mathbf{v}^T \frac{\partial \Psi}{\partial \boldsymbol{\xi}(t_f)} \\ \dot{\boldsymbol{\lambda}} = \frac{\partial H}{\partial \boldsymbol{\xi}}, \quad \frac{\partial H}{\partial \mathbf{u}} + \boldsymbol{\mu}^T \frac{\partial \boldsymbol{\eta}}{\partial \mathbf{u}} = 0, \quad \dot{\boldsymbol{\xi}} = -\frac{\partial H}{\partial \boldsymbol{\lambda}} \end{cases} \quad (14)$$

同时,应满足边界条件与不等式约束

$$\begin{cases} \boldsymbol{\xi}(t_0) = \boldsymbol{\xi}_0, \quad \Psi(\boldsymbol{\xi}(t_f), t_f) = 0 \\ \mathbf{g}(\mathbf{x}_s, \boldsymbol{\xi}(t), \mathbf{u}(t), t_f) \leq 0, \quad \mathbf{h}(\mathbf{x}_s, \boldsymbol{\xi}(t), \mathbf{u}(t), t_f) = 0 \end{cases} \quad (15)$$

式(14)和(15)构成了 J 取极小值的必要条件。在智重装备设计中,可以得知使得该性能指标最小的最优结构与控制参数的解一定存在。若利用式(14)与式(15)求得的解唯一,所得的结构与控制参数一定为最优解。与传统串行顺序优化的极小值必要条件式(2)和(10)相比,可以发现二者不同之处在于一体化优化的必要性条件中,多出一项

$$\Gamma = \frac{\omega_c}{\omega_s} \int_0^{t_f} \left(\frac{\partial H}{\partial \mathbf{x}_s} + \boldsymbol{\mu}^T \frac{\partial \boldsymbol{\eta}}{\partial \mathbf{x}_s} \right) \quad (16)$$

此项亦定量描述了结构参数与控制参数的耦合程度。通过对比顺序优化必要性条件式(10)与一体化优化的必要性条件式(14),可知顺序优化必要性条件式(10)无法满足式(14),因此采用顺序优化得到的结构与控制参数必不为最优解。因此可以得出结论,采用先结构后控制的优化设计得到的结果割裂了结构与控制参数之间的协调关系,无法获得二者相互匹配的全局最优。由此可见,为保证智能装备拥有最优性能,需要在统一的优化流程中实现不同尺度空间下的优化设计,即结构与控制的一体化优化设计,从而达到结构系统和控制系统相互匹配的全局最优。

3 一体化优化设计求解方法

为实现结构和控制一体化优化的高效求解,本节分别介绍两类不同参数的求解方式。

3.1 静态类控制参数优化模型求解

式(6)表示的结构与控制一体化优化模型为典型的多约束非线性规划问题。针对此问题,多种多学科设计优化计算框架已被提出。当结构与控制参

数设计变量规模较少,可以采用同步分析与设计方法^[28]便可以直接获得结构与控制参数最优解。当结构与控制参数优化规模较大,且量级之间存在巨大差异,需采用多级求解策略,如两级集成系统合成^[29],协同优化^[30],分级目标传递^[31]等计算框架。在具体求解算法的选择上,序列二次规划^[32],遗传算法^[33]等常用优化方法均可应用于该问题求解。

3.2 时变类控制参数优化模型求解

在时变类控制参数一体化优化模型式(11)的求解中,由于控制参数 $\boldsymbol{\xi}(t)$ 和 $\mathbf{u}(t)$ 均为时间域内连续变化参数,与静态类结构参数存在类型不一致的问题,无法直接求解。对此,针对控制参数的处理,目前常见的方法主要为控制参数离散化^[34],解析函数法^[25],近似模型^[26]等方法。

控制参数离散化是对控制参数在整个时间域内离散化,如采用直接转录法^[35],伪谱法^[36],时间谱元法^[37]等,将最优控制转化为非线性规划问题。随后便可利用序列二次规划,遗传算法等优化方法完成结构与控制参数的同时求解,如图2所示。

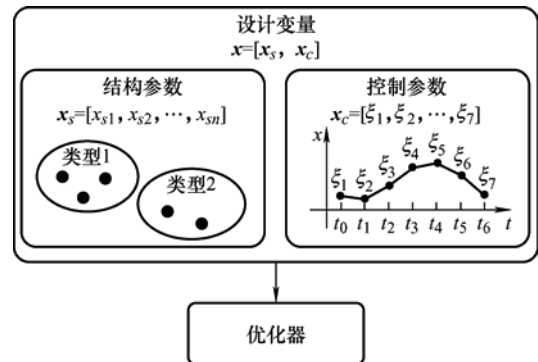


图2 控制参数离散化方法

由于离散化的方法需要将控制参数在每个时间步上进行离散与求解。当时间步划分较为精细,会造成优化参数过多,计算效率低下等缺陷。解析函数法通过引入解析的函数式如高阶多项式^[25](图3), S 曲线^[34]等拟合时间域内的控制参数 $\boldsymbol{\xi}(t)$, 通过若干函数参数便可以获取整个时间域内轨迹。随后通过对解析的函数参数与结构参数同时优化便可以获取系统控制参数与结构的最优值。

此外,近似模型综合了控制参数离散化的与解析函数法,通过在时间域内选取若干离散点,与结构参数同时参与优化。当得到控制参数离散点后便可以利用近似模型如 RBF^[26], Kriging^[38]等插值得到整个时间域内控制参数。从而完成结构与控制参数的求解。

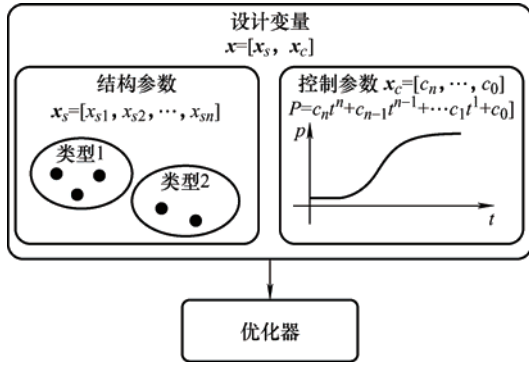


图3 高阶多项式拟合控制参数

以上三种求解方法在一体化优化问题的求解中均有广泛应用,可以根据系统的类型、控制要求等挑选合适的求解方法。一般而言,当智能装备实时性要求不高,且运动轨迹较为精细时,可采用控制参数离散化方法。若已知运动轨迹较为简单,且存在较高实时性要求时,可以采用解析的函数式方法事先将轨迹拟合,从而将整个离散时间域内各时间步参数转换为函数参数求解,从而有效减少运算负担,提高系统实时性。近似模型方法对于模型求解的精细度与效率介于二者之间,适用于对计算精度与实时性均有一定要求,且运动轨迹具有一定复杂性的系统。

4 工程案例 1——无人矿用挖掘机一体化优化设计

本节以无人矿用挖掘机为工程应用对象,通过数值仿真验证了结构与控制一体化优化方法的有效性与优越性。

4.1 矿用挖掘机简介

矿用挖掘机作为一种大型的矿山机械常被用于露天矿的开采之中。前端工作装置具有 2 个自由度,分别通过推压与提升机构共同驱动铲斗完成挖掘。由于矿用挖掘机自重较大,挖掘环境随机,操作员视距受限等因素,传统的人工操作挖掘导致挖掘效率偏低,挖掘能耗高等问题。随着智慧矿山建设的推进,矿用挖掘机也在逐步朝智能化与无人化发展。

无人挖掘机整体结构如图 4 所示。利用激光雷达扫描物料面,感知物料信息。并通过 IMU、GNSS 等传感器获取自身位置和姿态。基于上述多元传感信息,计算最优挖掘轨迹与控制参数。最后利用计算得到的最优控制参数控制相应电机完成挖掘。在整个无人挖掘流程中,挖掘机自身结构参数与控制参数均对挖掘效率、能耗、满斗率等性能指标有着重要影响。因此,通过对无人矿用挖掘机结构与控

制的一体化优化设计,可有效降低自主挖掘时的能耗,提高作业效率。

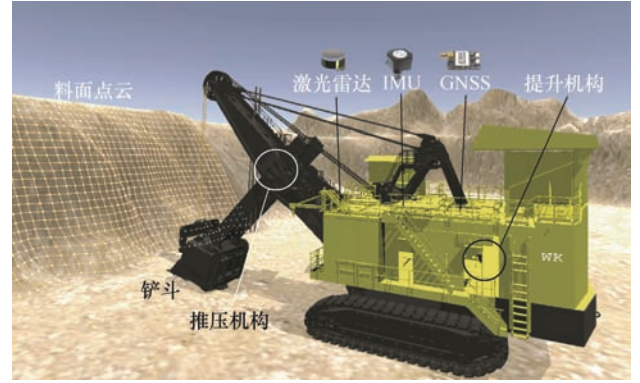


图4 无人矿用挖掘机结构示意图

4.2 无人矿用挖掘机结构与控制一体化优化模型

4.2.1 挖掘轨迹描述

矿用挖掘机作业过程中推压和提升电机共同驱动铲斗完成挖掘。因此,可以采用两个不同方向的高阶多项式来描述挖掘轨迹^[11]

$$\begin{cases} p_x(t) = c_{x_n} t^n + c_{x_{n-1}} t^{n-1} + \dots + c_{x_2} t^2 + c_{x_1} t + c_{x_0} \\ p_y(t) = c_{y_n} t^n + c_{y_{n-1}} t^{n-1} + \dots + c_{y_2} t^2 + c_{y_1} t + c_{y_0} \end{cases} \quad (17)$$

式中, p_x 和 p_y 分别表示铲齿沿着 x 和 y 轴方向的坐标, c 表示多项式系数。为保证挖掘初始时刻和结束时刻的平稳性,令对应的速度与加速度均为 0,即

$$\begin{cases} v_x(t_0) = p'_x(t_0) = 0, & a_x(t_0) = p''_x(t_0) = 0 \\ v_y(t_f) = p'_y(t_f) = 0, & a_y(t_f) = p''_y(t_f) = 0 \end{cases} \quad (18)$$

因此可以计算出多项式各系数为

$$\begin{cases} c_0 = 0, c_1 = 0, c_2 = 0 \\ c_3 = \frac{10p(t_f)}{t_f^3} - t_f^3 c_6 - 3t_f^4 c_7 - 6t_f^5 c_8 - 10t_f^6 c_9 - \dots \\ c_4 = -\frac{15p(t_f)}{t_f^4} + 3t_f^2 c_6 + 8t_f^3 c_7 + 15t_f^4 c_8 + 24t_f^5 c_9 + \dots \\ c_5 = \frac{6p(t_f)}{t_f^5} - 3t_f c_6 - 6t_f^2 c_7 - 10t_f^3 c_8 - 15t_f^4 c_9 - \dots \end{cases} \quad (19)$$

式中, $c_1 \sim c_5$ 由上式计算, c_6 及以上通过代入优化模型中进一步优化得到。当多项式系数确定后,便可以确定挖掘轨迹并进一步得到控制参数。

4.2.2 动力学建模

为保证优化结果满足挖掘动力学特性,需要建立挖掘机前端工作装置动力学模型。这里采用拉格朗日方程,对前端工作装置建模。由于推压和提升机构协同驱动铲斗完成挖掘,因此这里将斗杆伸长量 r 和斗杆与竖直方向夹角 θ 作为广义坐标,如图 5 所

示, 可得动力学方程为

$$\begin{cases} [m_b(r^2 - L_b r + \frac{1}{3}L_b^2) + m_d(r^2 + L_d r + \frac{1}{3}L_d^2)]\ddot{\theta} + \\ [2(m_b + m_d) \cdot r - (m_b L_b - m_d L_d)]\dot{\theta} \cdot \dot{r} + \\ [m_b g \sin \theta(r - \frac{L_b}{2}) + m_d g \sin \theta(r + \frac{L_d}{2})] = \\ F_r \cdot r \cdot \sin \vartheta - F_t \cdot (L_d + r) \\ (m_b + m_d)\ddot{r} - [(m_b + m_d) \cdot r - \frac{1}{2}(m_b L_b - m_d L_d)]\dot{\theta}^2 = \\ F_h - F_n - F_r \cdot \cos \vartheta + (m_b + m_d)g \cos \theta \end{cases} \quad (20)$$

式中, L_b 为斗杆长度, L_d 为铲斗长度, F_r 为提升力, F_h 为推压力, F_n 为挖掘径向阻力, F_t 为挖掘切向阻力, 有关挖掘阻力的具体计算见文献^[11]。 ϑ 为提升绳与推压杆之间的夹角, m_b 为斗杆质量, m_d 为铲斗质量, 包括自身质量 m_0 与物料质量 m_t ($m_d = m_0 + m_t$)。其中物料质量在挖掘过程中不断变化, 采用积分法可得

$$m_t(x) = \rho \cdot \omega \cdot \int_{x_0}^x (y^s(x) - y^r(x)) dx \quad (21)$$

式中, ω 为铲斗宽度, ρ 为物料密度, x_0 为铲齿初始水平位置, $y^s(x)$ 为物料面, $y^r(x)$ 为挖掘轨迹。挖掘机相关重要参数如表 1 所示。

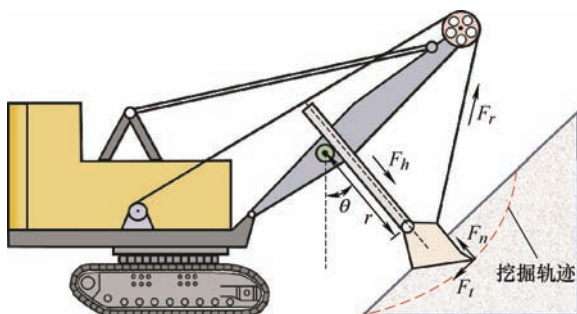


图 5 动力学建模广义坐标与受力分析图

表 1 挖掘机相关重要参数取值

参数	数值
斗杆长度 L_b /m	11.50
铲斗长度 L_d /m	4.78
铲斗质量 m_0 /kg	80 000
斗杆质量 m_b /kg	39 000
铲斗宽度 ω /m	4.00

4.2.3 目标函数

在挖掘过程中, 挖掘效率与能耗是两个重要的追求目标, 因此这里将二者作为一体化优化的目标。挖掘效率可以通过单词作业循环中挖掘时间 t_f 定量描述

$$J_1 = t_f \quad (22)$$

能耗可以通过单位挖掘能耗来描述

$$J_2 = \frac{2E_r + E_h}{V} \quad (23)$$

式中, E_r 和 E_h 分别为提升和推压机构能耗, 每个机构能耗为

$$E_r = \int_0^{t_f} F_r(t) v_r(t) dt \quad (24)$$

$$E_h = \int_0^{t_f} F_h(t) \dot{r}(t) dt \quad (25)$$

式中, $v_r(t)$ 为绳速。因此目标函数可以写成子目标加权求和的形式

$$J = \omega_1 J_1 + \omega_2 J_2 \quad (26)$$

式中, ω_1 和 ω_2 为各子目标对应权重。

4.2.4 约束分析

为保证一体化设计结果满足实际工程应用, 因此在优化设计过程中需添加一些约束。本文将优化设计中的约束分为两类: 几何约束与性能约束。对于几何约束有以下几点。

(1) 为了确保挖掘过程中铲斗底部不与地面发生干涉, 铲斗底部距离地面竖直高度应不小于 0

$$C_1 = -h_{b\min} \leq 0 \quad (27)$$

(2) 为保证挖掘后卸料动作, 挖掘轨迹末端位置竖直高度应高于物料面

$$C_2 = h_{m_f} - p_y(t_f) + h_e \leq 0 \quad (28)$$

式中, h_{m_f} 为轨迹末端点对应的物料面高度, h_e 为设置的余量。

(3) 在挖掘过程中, 斗杆的最大伸长量应小于允许的最大长度 r_a

$$C_3 = r_{\min} - r_a \leq 0 \quad (29)$$

(4) 对于性能约束, 应满足: 为避免挖掘机在工作过程中发生欠载或过载的情况发生, 要设定满斗率上下限, 这里设为理论装载体积的 90% 到 110%

$$\begin{cases} C_4 = 0.9V_n - V \leq 0 \\ C_5 = V - 1.1V_n \leq 0 \end{cases} \quad (30)$$

(5) 考虑到提升/推压电机的转速限制, 挖掘过程中的最大提升与推压速度应小于等于最大允许值

$$\begin{cases} C_6 = v_{r\max} - v_a \leq 0 \\ C_7 = \dot{r}_{\max} - v_g \leq 0 \end{cases} \quad (31)$$

式中, v_a 和 v_g 为挖掘过程中允许的最大绳速和杆速。

(6) 为保证挖掘过程的平稳性, 最小的绳速与杆速不能小于 0

$$\begin{cases} C_8 = v_{r \min} \leq 0 \\ C_9 = \dot{r}_{\min} \leq 0 \end{cases} \quad (32)$$

(7) 考虑到提升/推压电机特性, 挖掘过程中提升/推压机构的力和功率均不能超过允许的最大值

$$\begin{cases} C_{10} = F_{r \max} - F_{ra} \leq 0 \\ C_{11} = F_{h \max} - F_{ha} \leq 0 \\ C_{12} = P_{r \max} - P_{ra} \leq 0 \\ C_{13} = P_{h \max} - P_{ha} \leq 0 \end{cases} \quad (33)$$

式中, F_{ra} , F_{ha} , P_{ra} 和 P_{ha} 分别为提升/推压机构所能提供的最大力与功率。各约束相关取值如表 2 所示。

表 2 挖掘相关约束取值

约束值	数值
高度余量 h_e/m	2.50
理论装载体积 V_n/m^3	55.00
最大允许伸长量 r_a/m	10.50
最大允许绳速 $v_a/(m/s)$	1.58
最大允许杆速 $v_g/(m/s)$	0.75
最大提升力 F_{ra}/kN	2 890.00
最大推压力 F_{ha}/kN	1 127.00
最大提升功率 P_{ra}/kW	1 115.00
最大推压功率 P_{ha}/kW	930.00

4.2.5 优化模型建立与求解

通过以上分析可知, 在对无人挖掘机优化建模过程中涉及刚体动力学、运动学、岩土力学、结构、控制、电机等多学科交叉。参考文献[34]可知, 结构参数如大臂前端长度 Lb_i 和大臂倾角 α 对目标函数能耗指标有较大影响。通过分析目标函数式(26)可知, 控制参数中多项式系数 c_{x6} , c_{y6} , 初始角度 θ_0 , 轨迹末端点 $[p_x(t_f), p_y(t_f)]$, 挖掘时间 t_f 均对目标函数有直接或间接影响。此外, 结构参数与部分控制参数之间也存在关联与耦合。具体表现为: 结构参数 Lb_i 与 α 决定了挖掘轨迹与堆料的相对位置, 对挖掘轨迹存在影响。通过分析动力学方程式(20), Lb_i 与 α 进一步影响挖掘推压力与提升力, 从中可以发现结构与控制参数存在单向耦合。

综上可知, 为获取最优挖掘性能, 需将结构参数与控制参数同时考虑为设计变量, 从而计算得到最优参数组合。通过查阅挖掘机中对工作性能的主要影响的结构与控制参数^[34], 将设计变量设置为

$$\mathbf{x} = [\mathbf{x}_s, \mathbf{x}_c] = [[Lb_i, \alpha], [c_{x6}, c_{y6}, \theta_0, p_x(t_f), p_y(t_f), t_f]] \quad (34)$$

因此, 无人矿用挖掘机结构与控制一体化优化模型可以归纳为

$$\begin{aligned} & \text{find } \mathbf{x} = [\mathbf{x}_s, \mathbf{x}_c] \\ & \min J = \omega_1 J_1 + \omega_2 J_2 \\ & \text{s.t. } C_i \leq 0 \quad (i=1, 2, \dots, 13) \end{aligned} \quad (35)$$

本文采用遗传算法来求解该优化模型。优化器在每次迭代中接收输出的约束和目标函数值, 直到通过最小化目标函数和满足约束找到最终的结构参数与控制参数的最优值。

4.3 优化结果

本节通过仿真来验证结构与控制一体化设计的性能。仿真环境采用 Matlab, 挖掘环境设置为 40° 典型的堆料面, 遗传算法中种群数量与迭代次数分别设定为 100 和 200。仿真中设计变量的上下限取值见表 3。由于目标函数中子目标 J_1 和 J_2 量纲不同, 这里采用最大最小归一化将其无量纲化, 即

$$J_{norm} = \frac{J - J_{\min}}{J_{\max} - J_{\min}} \quad (36)$$

式中, J_{\max} 和 J_{\min} 分别为子目标函数的上界与下界。仿真中 J_1 和 J_2 的上下限分别设为: 11 和 16、0.06 和 0.2, 权重 ω_1 和 ω_2 设为 0.5。为了防止单次运算结果带来的随机差异, 进行 10 次独立优化选取其中的最优解。

表 3 设计变量上下限取值

设计变量	下界	上界
大臂前端长度 Lb_i/m	12.00	17.00
大臂倾角 $\alpha/(^\circ)$	40.00	50.00
水平方向 6 次项系数 c_{x6}	-Inf	Inf
竖直方向 6 次项系数 c_{y6}	-Inf	Inf
初始极角 $\theta_0/(^\circ)$	15.00	30.00
末端时刻齿尖水平位置 $p_x(t_f)/m$	8.00	11.00
末端时刻齿尖竖直位置 $p_y(t_f)/m$	10.00	14.00
挖掘时间 t_f/s	11.00	16.00

图 6 展示了一体化优化方法与传统顺序设计迭代过程的收敛曲线。这里顺序设计方式为在 WK55 矿用挖掘机所设计的结构参数基础上进一步进行控制轨迹优化设计。从图中可以看出, 一体化优化方法优化结果优于顺序设计, 最优值为 0.42, 相比于顺序优化方法的目标函数 0.50, 整体性能提升了 16.00%。

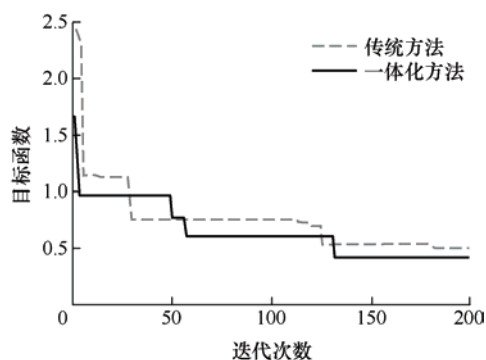


图 6 传统方法与一体化方法收敛对比图

表 4 给出了一体化优化与传统方法子目标性能比较, 相比于传统顺序设计方法, 一体化优化方法得到的挖掘时间缩短了 2.80%, 单位体积能耗降低了 7.69%, 体现了该方法的优越性。

表 4 一体化优化与传统方法子目标性能比较

子目标性能	传统方法	一体化方法	提升百分比
挖掘时间 J_1 /s	13.56	13.18	2.80%
单位体积挖掘能耗 J_2 /(kWh/m ³)	0.13	0.12	7.69%

图 7 为分别利用两种方法得到的结构与挖掘轨迹对比图。可以看出, 应用一体化优化设计方法得到的取料机结构大臂与地面倾角更小, 前端工作装置距离料面更近, 使挖掘初始极径与极角更小, 在相同伸出斗柄长度下更容易挖到更多的物料, 从而保证了挖掘满斗率。同时, 一体化方法优化得到的挖掘轨迹相比传统方法更加狭长, 且高度更低。从而使在挖掘过程中受到的挖掘阻力更小, 并减少了挖掘中能量消耗。

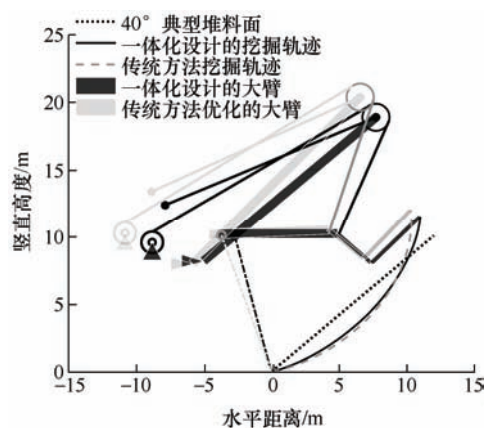
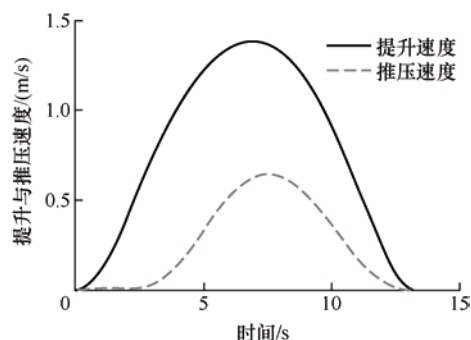


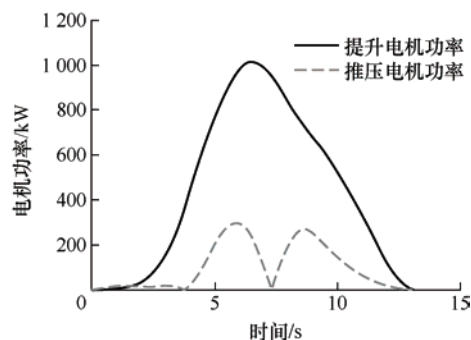
图 7 传统方法与一体化方法结构与轨迹优化对比图

图 8 为利用结构与控制一体化设计优化方法得到的挖掘过程中提升机构和推压机构速度和对应的电机输出功率。从图 8a 可以看出, 优化得到的推压和提升速度曲线较为平滑, 且初始时刻与末端时刻

变化较为缓和, 可以有效减少启停及挖掘过程中的冲击。从图 8b 可以看出提升和推压电机挖掘过程中最大功率分别为 1015.1 kW 和 296.3 kW, 均满足约束要求。



(a) 提升速度与推压速度



(b) 提升电机功率与推压电机功率

图 8 一体化方法得到的控制速度与电机功率

5 工程案例 2——无人堆取料机一体化优化设计

本节以无人化堆取料机为应用对象, 通过数值仿真验证了结构与控制一体化优化方法的有效性。

5.1 堆取料机简介

堆取料机作为一种大型复杂装卸机械, 主要用于散货专业码头、钢铁厂、大型火力发电厂和矿山等的散料堆场装卸。其主要组成部件包括斗轮、悬臂、行走机构、回转机构、俯仰机构、配重等。在取料过程中, 首先取料机行走至取料工位, 在俯仰机构的作用下将悬臂调至合适高度, 然后回转电机驱动悬臂和斗轮旋转至物料堆边缘。在回转机构的作用下, 斗轮取料机做回转运动, 逐步完成一层的取料。最后在行走装置的驱动下, 整机返回至起点位置, 并通过俯仰机构调整斗轮机构的高度, 开始重复上述工作, 依次循环直至完成整个取料任务。

目前, 随着各种工业功能的提升以及料场的工作需求, 需要堆取料机具备智能化无人运行以适应物流快速发展的需要^[39-40]。如图 9 所示, 通过在斗

杆前端装设的激光雷达获取料堆空间位置信息，GNSS 与电机编码器传感器记录堆取料机自身位置与姿态，利用多传感器信息便可以进一步计算出合适的取料轨迹，实现无人取料作业。



图9 无人堆取料机

在无人化堆取料机的开发与设计中，通过结构与控制一体化优化，可以有效降低取料过程中挖掘能耗与振动，提升无人作业性能。

5.2 无人堆取料机结构与控制一体化优化模型

5.2.1 取料轨迹描述

堆取料机可以被简化为一个四自由度机械臂模型，如图9所示。其中，行走机构为平动，其余回转、俯仰斗轮机构为转动。在取料中，主要通过悬臂的回转完成取料。

在取料过程中，关节1和3相对不变，通过关节2带动大臂的回转来逐步完成分层取料。回转过程主要包括启停、加减速等运动。考虑到大臂回转速度对取料过程与取料质量有着决定性影响。这里采用径向基函数来描述

$$S(x) = \sum_{i=1}^N a_i \Phi(\|x - x_i\|) \quad x \in \mathbf{R}^d \quad (37)$$

式中， a_i 为基函数权重， Φ 为基函数，这里取高斯函数。 $\|x - x_i\|$ 表示 x 和 x_i 之间的欧氏距离， $x_i (i=1,2,\dots,N)$ 为基函数中心。通过调整插值点的数目和位置，可以间接地获得电机的转速曲线

$$\begin{aligned} v_c &= f(x_c) \\ x_c &= [v_1, v_2, \dots, v_n] \end{aligned} \quad (38)$$

式中， v_c 表示电机速度， v_c 表示第 i 个位置处的电机速度， n 代表插值点， x_c 为离散化后的速度集合， $f(x_c)$ 为经 RBF 插值后的速度曲线。

5.2.2 取料轨迹描述

斗轮取料机结构复杂，各零部件尺度大。由于机身由多板件进行焊接而成，因此取料机可以简化为空间刚架结构。在建立取料机等效模型时，考虑

到取料机的焊接工艺和后续结构优化的复杂度，在进行等效建模时对于等间距不同位置的板件尺寸，选取不同设计变量进行描述。根据组成堆取料机杆件的尺寸和结构参数类型，本文共选取取料机的结构参数变量共计 27 个，具体如图 10 所示。

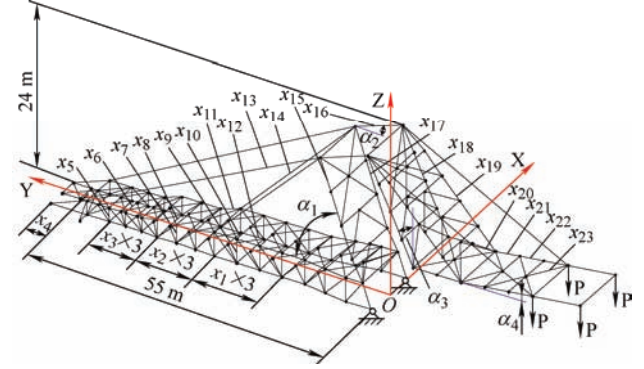


图10 堆取料机简化结构图

5.2.3 取料机振动

取料机在工作过程中由于负载的剧烈变化，电机频繁加减速等原因，导致机体剧烈的振动，甚至零部件疲劳损坏。因此，在一体化优化中须考虑振动的影响并加以约束。对于堆取料机系统，其动力学方程为

$$M\ddot{\delta} + C\dot{\delta} + K\delta = F \quad (39)$$

式中， M, K, C 分别表示系统的质量矩阵、刚度矩阵以及阻尼矩阵， F 为系统节点外载荷矢量， $\ddot{\delta}, \dot{\delta}$ 和 δ 分别为系统加速度，速度和位移矢量。当外力为零时，取料机从初始到开始振动过程微分方程为

$$M\ddot{\delta} + C\dot{\delta} + K\delta = 0 \quad (40)$$

忽略系统中未建模阻力，则该方程特解为：

$$\delta = \delta_r \sin(\omega t + \theta) \quad (41)$$

式中， δ_r 为特征矢量，将上式代入零阻尼微分方程中可得

$$(K - \bar{f}^2 M)\delta = 0 \quad (42)$$

由于斗轮取料机存在非零解，因此可知工作装置的特征矩阵为 $\bar{B} = K - \bar{f}^2 M$ 。根据线性代数原理可知式(41)为齐次线性方程组，且有

$$\begin{aligned} \bar{B} &= \begin{bmatrix} K_{11} - \bar{f}^2 M_{11} & K_{12} - \bar{f}^2 M_{12} & \cdots & K_{1n} - \bar{f}^2 M_{1n} \\ K_{21} - \bar{f}^2 M_{21} & K_{22} - \bar{f}^2 M_{22} & \cdots & K_{2n} - \bar{f}^2 M_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ K_{n1} - \bar{f}^2 M_{n1} & K_{n2} - \bar{f}^2 M_{n2} & \cdots & K_{nn} - \bar{f}^2 M_{nn} \end{bmatrix} \\ &= 0 \end{aligned} \quad (43)$$

化简工作装置的特征矩阵行列式为零的方程, 可得取料机的特征方程

$$\bar{f}^{2n} + a_1 \bar{f}^{2n-2} + \cdots + a_{n-1} \bar{f}^2 + a_n = 0 \quad (44)$$

求解方程可以得到第 i 阶固有振动频率 \bar{f}_i , 然后将各阶的固有频率代入到取料机系统方程, 可得各阶特征方程的解和对应的特征矢量。

5.2.4 约束分析

为保证结构与控制一体化设计优化结果满足实际工程应用, 应在优化过程中考虑运动参数、结构频率、结构强度和电机参数等。因此, 根据不同学科划分, 考虑一体化优化中添加的不等式约束如下。

(1) 为保证取料过程的平稳性, 大臂转动角速度应在一定范围内

$$\begin{cases} C_1 = \omega_{\min} - \omega \leq 0 \\ C_2 = \omega - \omega_{\max} \leq 0 \end{cases} \quad (45)$$

式中, ω 为回转角速度, ω_{\min} 和 ω_{\max} 分别表示最大和最小允许角速度。

(2) 为保证优化所得取料机空间结构的合理性, 各杆件应力均应不大于材料允许的最大应力

$$\begin{cases} C_3 = \sigma_{\min} - \sigma_i \leq 0 \\ C_4 = \sigma_i - \sigma_{\max} \leq 0 \end{cases} \quad (46)$$

式中, $\sigma_i (i=1, 2, \cdots, 23)$ 表示第 i 根杆件的应力, σ_{\max} 和 σ_{\min} 分别表示最大和最小允许应力。

(3) 为避免堆取料机工作过程中产生共振, 需要使优化后的取料机结构的固有频率能够避开斗轮机构的固有频率

$$\begin{cases} C_5 = \bar{f}_q^{\min} / \bar{f}_q - 1 \leq 0 \\ C_6 = \bar{f}_r / \bar{f}_r^{\max} - 1 \leq 0 \end{cases} \quad (47)$$

式中, \bar{f}_q 和 \bar{f}_q^{\min} 分别表示第 q 阶固有频率和最小要求频率, \bar{f}_r 和 \bar{f}_r^{\max} 分别表示第 r 阶固有频率和最大要求频率。

(4) 取料过程中电机功率与转矩均不能超过允许的最大值

$$\begin{cases} C_7 = T - T_{\max} \leq 0 \\ C_8 = P - P_{\max} \leq 0 \end{cases} \quad (48)$$

式中, T_{\max} 和 P_{\max} 分别表示回转电机所能提供的最大转矩与功率。各约束相关取值如表 5 所示。

表 5 取料相关约束取值

约束	数值
最小允许角速度 ω_{\min} / (rad/s)	0.00
最大允许角速度 ω_{\max} / (rad/s)	0.09
最小允许应力 σ_{\min} / MPa	10.00
最大允许应力 σ_{\max} / MPa	130.00
最大转矩 T_{\max} / (kN·m)	12.10
最大功率 P_{\max} / kW	700.00

5.2.5 一体化优化模型建立与求解

堆取料机存在自重, 惯量大, 取料过程高能耗等问题。为降低取料机能耗达到节能减排目的, 这里以最小单位质量能耗为目标建立结构与控制一体化优化模型, 由于取料机能耗主要产生于回转取料过程中, 因此目标函数可以表示为

$$J = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{m_E} \cdot I \cdot \omega^2 \quad (49)$$

式中, m_E 为取料质量, I 为取料机转动惯量, ω 为取料过程中回转角速度。在目标函数中, 转动惯量 I 由自身结构参数 \mathbf{x}_s 决定, 回转角速度 ω 由控制参数 \mathbf{x}_c 决定。因此, 将设计变量设为

$$\mathbf{x} = [\mathbf{x}_s, \mathbf{x}_c] = [x_1, x_2, \cdots, x_{23}, \alpha_1, \cdots, \alpha_4, \omega_1, \omega_2, \cdots, \omega_n] \quad (50)$$

式中, $x_1 \sim x_{23}$ 为各杆件长度, $\alpha_1 \sim \alpha_4$ 为相关角度 (见图 10), $\omega_1 \sim \omega_n$ 为回转取料过程角速度值。综上, 堆取料机结构与控制一体化优化模型可以归纳为

$$\begin{aligned} & \text{find } \mathbf{x} = [\mathbf{x}_s, \mathbf{x}_c] \\ & \min J = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{m_E} \cdot I \cdot \omega^2 \\ & \text{s.t. } C_i \leq 0 \quad (i=1, 2, \cdots, 8) \end{aligned} \quad (51)$$

这里参考文献[41], 采用蜻蜓算法求解该优化模型。通过优化器迭代寻优, 逐步逼近约束范围内的最优解。

5.3 仿真结果分析

在仿真中, RBF 速度插值点的数目设为 10 个, 其中起始点与末端点速度设为 0。优化算法中种群数量与迭代次数分别设定为 100 和 200。

为了防止单次运算结果带来的随机差异, 进行 10 次独立仿真以获得取料机结构参数与速度参数的最优解, 仿真中设计变量的上下限取值如表 6 所示。优化迭代过程的收敛曲线如图 11 所示。从图中可知, 一体化优化方法第 86 次迭代得到稳定解, 最优值为 57.72 kJ/kg, 相比于顺序优化方法的 61.86 kJ/kg, 提升了 6.69%。造成这种差异的主要原

因是顺序策略忽略了结构参数与控制参数间的耦合作用，从而得到了次优解。

表 6 设计变量上下界取值

设计变量	下界	上界
杆长 $x_1 \sim x_{23}/\text{m}$	12.00	17.00
空间夹角 1 $\alpha_1/(\circ)$	60.00	75.00
空间夹角 2 $\alpha_2/(\circ)$	5.00	10.00
空间夹角 3 $\alpha_3/(\circ)$	15.00	30.00
空间夹角 4 $\alpha_4/(\circ)$	5.00	10.00
插值点角速度 $\omega_1 \sim \omega_8/(\text{rad/s})$	0.00	0.09

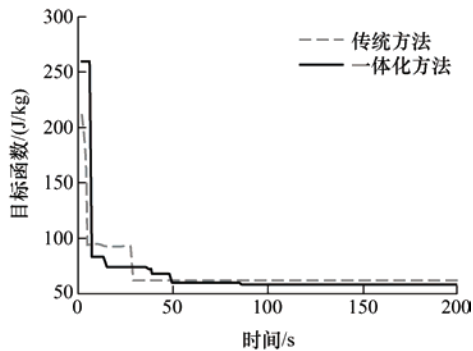
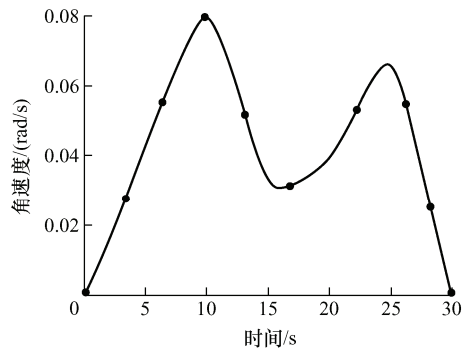
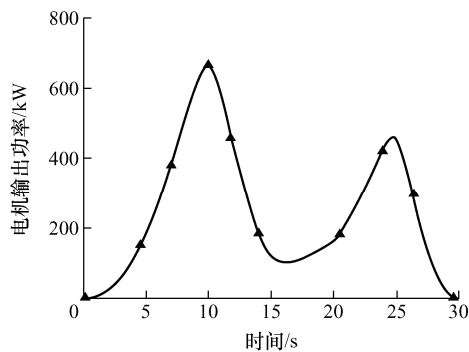


图 11 传统方法与一体化方法收敛对比图

运用一体化优化后的悬臂长度，与传统顺序设计方法相比减少了 1.02 m，从而使得到的取料机结构更加紧凑。通过对取料机结构的轻量化设计间接的减少了挖掘能耗。图 12 为利用一体化设计优化方



(a) 回转角速度曲线



(b) 回转电机输出功率曲线

图 12 一体化方法获取的电机转速与功率曲线

法得到的回转取料过程中电机速度控制曲线和输出功率。图中实心点为优化得到的 RBF 插值点。由图 12a 可以看出，取料过程角速度呈现出“双峰”形状，这由于料堆为梯形截面形状，为保证等体积取料，斗轮在切入和切出料堆时导致悬臂的转速较大。回转系统电机的最大角速度约为 0.08 rad/s，小于额定转速 0.09 rad/s，满足约束的要求。由图 12b 可以看出，电机的最大输出功率几乎接近额定输出功率的极限。可以有效的提高电机的效率，从而保证取料机运行过程中良好的性能。

图 13 为斗轮取料机在两种不同方法下的动力学响应，其中灰色虚线表示传统方法得到斗轮取料机的振动响应值，黑色实线则表示一体化方法的振动响应值。显然可知，一体化方法的结果明显优于传统方法，原因主要是结构尺寸和布局不同引起系统刚度不同。对比图中数据可得，一体化方法得到斗轮取料机振动响应的最大与最小振动差值 12.38 mm 以内，相比传统优化减少了 5.33 mm。由此可知，应用一体化优化设计得到的取料机结构不仅更加轻量，还能有效降低斗轮取料机的振动。

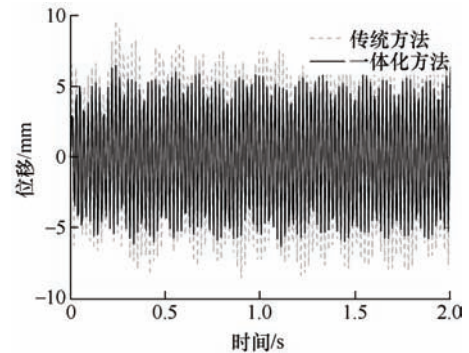


图 13 传统方法与一体化方法动力学响应对比

6 结论

随着重大装备智能化的不断升级，装备设计方法与理论同样需要与时俱进、不断革新。本文针对先结构后控制的串行顺序优化设计方法，首次证明了其在智重装备优化中无法获取全局最优解，导致系统性能提升捉襟见肘。结合智重装备的特点，提出一种考虑装备结构与控制的一体化优化设计方法。文章首先分别利用 KKT 条件与极小值原理，证明了一体化优化设计方法的全局最优性。然后分别以无人矿用挖掘机与无人堆取料机两个典型的智重装备为例，通过建立一体化优化模型对其结构与控制参数同步优化，获取结构与控制参数的全局最优参数。计算结果表明，相较于传统顺序优化设计方

法,一体化优化后结果明显目标函数更小,装备性能更为优良。从而验证了所提出的一体化设计方法的可行性和有效性,为大型智能装备的结构与控制系统设计提供了全新的思路。该方法不但可以应用于智能无人化的挖掘机、取料机、隧道掘进机等智重装备的系统设计中,同样可以应用到下一代高速列车、风力发电机、飞机等的系统优化设计,从而进一步提升装备的综合或关键性能。同时,该方法也是对传统多学科优化设计理论的补充与拓展,将传统的机、电、液等多学科优化,延伸到后端的智能控制、智能决策领域,为未来智重装备的全生命周期系统设计与性能大幅提升提供了新的思路与方法途径。

参 考 文 献

- [1] 孙伟,李二洋,王晓邦,等. 面向智能挖掘机的最优挖掘轨迹规划[J]. 大连理工大学学报, 2018, 58(3): 246-253.
SUN Wei, LI Eryang, WANG Xiaobang, et al. Optimal mining trajectory planning for intelligent cable shovel[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2018, 58(3): 246-253.
- [2] 林锡奎,白玉峰,江永,等. 基于 LiDAR 技术的圆形堆取料机智能化控制系统研发与应用[J]. 热力发电, 2019, 48(9): 129-133.
LIN Xikui, BAI Yufeng, JIANG Yong, et al. Development and application of intelligent control system in stacker-reclaimer with circular coal storage based on LiDAR technology[J]. Thermal Power Generation, 2019, 48(9): 129-133.
- [3] 李国杰. 智能起重机的关键特征和控制系统总体架构[J]. 机械工程学报, 2020, 56(24): 254-268.
LI Guojie. Key characteristics and general framework of control system for intelligent crane[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(24): 254-268.
- [4] 刘宣宇,邵诚. 盾构机自动控制技术现状与展望[J]. 机械工程学报, 2010, 46(20): 152-160.
LIU Xuanyu, SHAO Cheng. Present status and prospect of shield machine automatic control technology[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(20): 152-160.
- [5] 林京. 机器信息学: 机械产品智能化的学科支撑[J]. 机械工程学报, 2021, 57(2): 11-20.
LIN Jing. Machinery informatics: A fundamental discipline to intelligent machinery[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(2): 11-20.
- [6] SUN W, PENG X, WANG L, et al. Reliability-based weight reduction optimization of forearm of bucket-wheel stacker reclaimer considering multiple uncertainties[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2020, 62(5): 2765-2782.
- [7] GASKA D, HANISZEWSKI T. Modelling studies on the use of aluminium alloys in lightweight load-carrying crane structures[J]. Transport Problems, 2016, 11(3): 13-20.
- [8] FRIMPONG S, LI Y. Stress loading of the cable shovel boom under in-situ digging conditions[J]. Engineering Failure Analysis, 2007, 14(4): 702-715.
- [9] BAK M K, HANSEN M R. Model based design optimization of operational reliability in offshore boom cranes[J]. International Journal of Fluid Power, 2013, 14(3): 53-65.
- [10] DE MOURA J P, REGO P H M, DA FONSECA NETO J V. Online discrete-time LQR controller design with integral action for bulk bucket wheel reclaimer operational processes via action-dependent heuristic dynamic programming[J]. ISA Transactions, 2019, 90(1): 294-310.
- [11] WANG X, SUN W, LI E, et al. Energy-minimum optimization of the intelligent excavating process for large cable shovel through trajectory planning[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2018, 58(5): 2219-2237.
- [12] PETERS D L, PAPALAMBROS P Y, ULSOY A G. Control proxy functions for sequential design and control optimization[J]. Journal of Mechanical Design, 2011, 133(9): 1-11.
- [13] ALAVI A, DOLATABADI M, MASHHADI J, et al. Simultaneous optimization approach for combined control-structural design versus the conventional sequential optimization method[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2021, 63(3): 1367-1383.
- [14] KROO I, ALTUS S, BRAUN R, et al. Multidisciplinary optimization methods for aircraft preliminary design[C]// 5th symposium on multidisciplinary analysis and optimization, Panama City: AIAA, 1994: 697-707.
- [15] SOBIESZCZANSKI-SOBIESKI J, HAFTKA R T. Multidisciplinary aerospace design optimization: Survey of recent developments[J]. Structural optimization, 1997, 14(1): 1-23.
- [16] 李旭宇,钟掘. 基于多学科设计的复杂机电系统并行设计方法研究[J]. 机械与电子, 2002(6): 29-31.
LI XuYu, ZHONG Jue. Research of the concurrent design

- technique for complex mechatronic system using multidisciplinary design optimization[J]. *Machinery and Electronics*, 2002(6): 29-31.
- [17] BATALEBLU A A, ROSHANIAN J, EBRAHIMI M. Hybrid search multi-discipline feasible design optimization of a typical space launch vehicle[C]// 2015 7th International Conference on Recent Advances in Space Technologies (RAST). Istanbul: IEEE, 2015: 455-460.
- [18] FAN H, LI W. An efficient method for reliability-based multidisciplinary design optimization[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2008, 21(4): 335-340.
- [19] SALAMA M, GARBA J, DEMSETZ L, et al. Simultaneous optimization of controlled structures[J]. *Computational Mechanics*, 1988, 3(4): 275-282.
- [20] KODIYALAM S, YANG R J, GU L, et al. Multidisciplinary design optimization of a vehicle system in a scalable, high performance computing environment[J]. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2004, 26(3): 256-263.
- [21] 陈小前. 飞行器总体优化设计理论与应用研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2001.
- CHEN Xiaoqian. Study and application of theories of optimization in the intergrated design of flying vehicles[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2001.
- [22] DIEZ M, PERI D, FASANO G, et al. Hydroelastic optimization of a keel fin of a sailing boat: a multidisciplinary robust formulation for ship design[J]. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2012, 46(4): 613-625.
- [23] CERUTI A, VOLOSHIN V, MARZOCCA P. Heuristic algorithms applied to multidisciplinary design optimization of unconventional airship configuration[J]. *Journal of Aircraft*, 2014, 51(6): 1758-1772.
- [24] SUN W, WANG X, WANG L, et al. Multidisciplinary design optimization of tunnel boring machine considering both structure and control parameters under complex geological conditions[J]. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2016, 54(4): 1073-1092.
- [25] SONG X, ZHANG T, YUAN Y, et al. Multidisciplinary co-design optimization of the structure and control systems for large cable shovel considering cross-disciplinary interaction[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 2020, 234(22): 4353-4365.
- [26] YUAN Y, LÜ L, WANG S, et al. Multidisciplinary co-design optimization of structural and control parameters for bucket wheel reclaimer[J]. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 2020, 15(3): 406-416.
- [27] PATIL R, FILIPI Z, FATHY H. Computationally efficient combined plant design and controller optimization using a coupling measure[J]. *Journal of Mechanical Design*, 2012, 134(7): 1-8.
- [28] 姜武华. 多学科优化方法在汽车底盘设计中的应用研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2014.
- JIANG Wuhua. Application of multi-discipline design optimization in automotive chassis[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2014.
- [29] BROWN N F, OLDS J R. Evaluation of multidisciplinary optimization techniques applied to a reusable launch vehicle[J]. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 2006, 43(6): 1289-1300.
- [30] WANG S, YANG M, NIU W, et al. Multidisciplinary design optimization of underwater glider for improving endurance[J]. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2021, 63(6): 2835-2851.
- [31] KANG N, KOKKOLARAS M, PAPALAMBROS P Y. Solving multiobjective optimization problems using quasi-separable MDO formulations and analytical target cascading[J]. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2014, 50(5): 849-859.
- [32] ADAMI A, MORTAZAVI M, NOSRATOLLAHI M. Multidisciplinary design optimization of hydrogen peroxide monopropellant propulsion system using GA and SQP[J]. *International Journal of Computer Applications*, 2015, 113(9): 14-21.
- [33] WANG P, WU G. Multidisciplinary design optimization of vehicle instrument panel based on multi-objective genetic algorithm[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2013, 26(2): 304-312.
- [34] 王晓邦. 面向智能化矿用电铲的挖掘轨迹优化设计方法[D]. 大连: 大连理工大学, 2019.
- WANG Xiaobang. Optimization design methods of the excavating trajectory for intelligent electric shovels[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019.
- [35] ALLISON J, HERBER D R. Multidisciplinary design optimization of dynamic engineering systems[C]// 54th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, Boston: AIAA, 2013: 1462-1491.

- [36] XU S, LI S, DENG K, et al. A unified pseudospectral computational framework for optimal control of road vehicles[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2014, 20(4): 1499-1510.
- [37] KURDI M H, BERAN P S. Optimization of dynamic response using a monolithic-time formulation[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2009, 39(1): 83-104.
- [38] SHOKRY A, ESPUNA A. Sequential dynamic optimization of complex nonlinear processes based on kriging surrogate models[J]. Procedia Technology, 2014, 15(15): 376-387.
- [39] BILLAH M, FARRELL J A. Bucket wheel reclaimer calibration[C]// 2019 American Control Conference (ACC), Denver: IEEE, 2019: 3149-3154.
- [40] ZHAO S, LU T F, KOCH B, et al. Automatic quality estimation in blending using a 3D stockpile management model[J]. Advanced Engineering Informatics, 2015, 29(3): 680-695.
- [41] 原永亮, 郭正刚, 王鹏, 等. 基于改进蜻蜓算法的斗轮取料机多目标优化[J]. 机械工程学报, 2021, 57(6): 211-223.
- YUAN Yongliang, GUO Zhenggang, WANG Peng, et al. Multi-objective optimization of bucket wheel reclaimer based on improved dragonfly algorithm[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(6): 211-223.
-
- 作者简介: 宋学官(通信作者), 男, 1982 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为多学科耦合建模与协同优化、代理模型技术、工业大数据挖掘、数字孪生与装备智能化等。
E-mail: sxg@dlut.edu.cn