



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 115582834 B

(45) 授权公告日 2024.06.04

(21) 申请号 202211243883.X

CN 115657465 A, 2023.01.31

(22) 申请日 2022.10.11

US 2013119916 A1, 2013.05.16

(65) 同一申请的已公布的文献号

US 2014277788 A1, 2014.09.18

申请公布号 CN 115582834 A

US 2022066456 A1, 2022.03.03

(43) 申请公布日 2023.01.10

WO 2020227429 A1, 2020.11.12

(73) 专利权人 重庆大学

WO 2021106977 A1, 2021.06.03

地址 400044 重庆市沙坪坝区沙正街174号

吴勇强,唐先智,宋伟,江沛,周进,陈元杰.
工业机器人功率等效模型与参数辨识.《重庆大学学报》.2021,第44卷(第10期),全文.

(72) 发明人 江沛 王作学 王斐 曹华军

兰运坤.基于时间缩放的工业机器人能耗优化方法研究.万方数据知识服务平台.2023,

李孝斌

Xiaobin Li;Yunkun Lan;Pei Jiang;
Huajun Cao;Jin Zhou.An Efficient

(74) 专利代理机构 重庆航图知识产权代理事务

所(普通合伙) 50247

Computation for Energy Optimization of
Robot Trajectory.《IEEE Transactions on
Industrial Electronics》.2021,第69卷(第11
期),全文. (续)

专利代理师 胡小龙

(51) Int.Cl.

B25J 9/16 (2006.01)

(56) 对比文件

CN 103747925 A, 2014.04.23

CN 109002006 A, 2018.12.14

CN 111158313 A, 2020.05.15

CN 111615674 A, 2020.09.01

CN 111948942 A, 2020.11.17

CN 114720991 A, 2022.07.08

权利要求书5页 说明书21页 附图2页

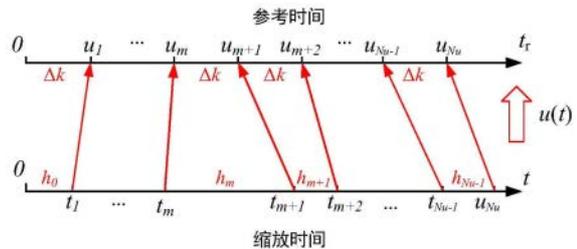
(54) 发明名称

机器人能耗模型构建方法及并行双向动态
能耗优化方法

(57) 摘要

本发明公开了一种机器人能耗模型构建方
法,包括如下步骤:步骤一:获取目标机器人的预
设关节轨迹 $q_r(u)$,并将 $q_r(u)$ 在时域上均分为 N_u
个控制段;步骤二:对控制段 $[u_m, u_{m+1}]$ 上的关
节轨迹 $q_r(u)$ 进行变时间尺度缩放,得到时间缩
放状态空间表达式;步骤三:将控制段 $[u_m, u_{m+1}]$
均分为 k 个采样段,得到第 m 个控制段 $[u_m, u_{m+1}]$
的机器人能耗模型;步骤四:辨识能耗特征参数,构
建得到机器人能耗模型。本发明还公开了一种机
器人能耗模型的机器人并行双向动态能耗优化方
法,包括如下步骤:S1:结合时间缩放状态空间表

达式建立时间缩放三维离散网格,对缩放参数
 \dot{u}_i 、 \dot{u}_{i+1} 进行搜索;S2:基于机器人能耗模型以
及状态转移方程对关节轨迹能耗进行迭代计算,
得到满足指定约束的能耗最优缩放轨迹及最优
能耗值。



CN 115582834 B

[接上页]

(56) 对比文件

Oskar Wigström;Bengt
Lennartson.Energy optimization of

trajectories for high level scheduling.
《2011 IEEE International Conference on
Automation Science and Engineering》.2011,
全文.

1. 一种机器人能耗模型构建方法,其特征在于:包括如下步骤:

步骤一:获取目标机器人的预设关节轨迹 $q_r(u)$,并将 $q_r(u)$ 在时域上均分为 N_u 个控制段, $\Delta = u_{m+1} - u_m, m \in \{0, \dots, N_u - 1\}$, Δ 为常数, u 为预设关节轨迹执行时间变量; u_m 和 u_{m+1} 分别表示第 m 个和第 $m+1$ 个控制段的关节轨迹执行时间节点;

步骤二:对控制段 $[u_m, u_{m+1}]$ 上的关节轨迹 $q_r(u)$ 进行变时间尺度缩放:

$$q_{m,s}(t) = q_{m,r}(u), 1 \leq m \leq k$$

其中, $q_s(t)$ 为变时间尺度缩放后的关节轨迹; $q_{m,s}(t)$ 为变时间尺度缩放后在控制段 $[u_m, u_{m+1}]$ 上的关节轨迹; $q_{m,r}(u)$ 为机器人在控制段 $[u_m, u_{m+1}]$ 上的预设关节轨迹; t 为变时间尺度缩放后关节轨迹执行时间变量;

令 \ddot{u}_m 在第 m 个控制段 $[u_m, u_{m+1}]$ 内为常数,得到时间缩放状态空间表达式:

$$\begin{bmatrix} t_{m+1} \\ \dot{u}_{m+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t_m \\ \dot{u}_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} t_{m+1} - t_m \\ 2\Delta \\ t_{m+1} - t_m \end{bmatrix}$$

其中, t_m 和 t_{m+1} 分别表示变时间尺度缩放后第 m 个和第 $m+1$ 个控制段的关节轨迹执行时间节点; \dot{u}_m 和 \dot{u}_{m+1} 分别表示 u 在 u_m 点和 u_{m+1} 点处的一阶导数; \ddot{u}_m 为 u 在 u_m 点处的二阶导数;

步骤三:将控制段 $[u_m, u_{m+1}]$ 均分为 k 个采样段,得到第 m 个控制段 $[u_m, u_{m+1}]$ 的机器人能耗模型可表示为:

$$E_m = \sum_{i=0}^{k-1} E_{m,i}$$

$$E_{m,i} = b_{i,1} \dot{u}_m^3 + b_{i,2} \dot{u}_m^2 + b_{i,3} \dot{u}_m + b_{i,4} + b_{i,5} \dot{u}_m \alpha^2 + b_{i,6} \dot{u}_m \alpha \gamma + b_{i,7} \alpha + b_{i,8} \alpha^2 \gamma + b_{i,9} \alpha \gamma + \frac{(b_{i,10} + b_{i,11} \alpha \gamma + b_{i,12} \alpha^2 \gamma^2)}{\varepsilon_i}$$

$$\varepsilon_i = \begin{cases} \frac{i \cdot \dot{u}_{m+1} + (k-i) \dot{u}_m}{k}, & u \in [\beta_i, \beta_{i+1}) \text{ and } i \in \{0, \dots, k-1\} \\ \frac{(k-1) \dot{u}_{m+1} + \dot{u}_m}{k}, & \text{others} \end{cases}$$

$$\beta_i = \frac{i \cdot u_{m+1} + (k-i) u_m}{k} \quad i \in \{0, \dots, k\}$$

$$\alpha = \dot{u}_{m+1} - \dot{u}_m, \quad \gamma = \dot{u}_{m+1} + \dot{u}_m$$

其中, $E_{m,i}$ 表示机器人在第 m 个控制段中的第 i 个采样段的能耗; $b_{i,1}$ 至 $b_{i,12}$ 为与预设轨迹及机器人自身特性相关的能耗特征参数,其在采样段区间 $[\beta_i, \beta_{i+1}]$ 上均为常数;

步骤四:辨识能耗特征参数 $b_{i,1}$ 至 $b_{i,12}$,构建得到机器人能耗模型;

所述步骤四中,为了辨识能耗特征参数 $b_{i,1}$ 至 $b_{i,12}$,需找到 n 条缩放轨迹并采集机器人在相应采样段的能耗数据,此时 n 条缩放轨迹满足:

$$AB=C$$

其中: $A=[A_1 \ A_2]$, $B=[B_1 \ B_2]^T$,且:

$$A_1 = \begin{bmatrix} \dot{u}_{m,1}^3 & \dot{u}_{m,1}^2 & \dot{u}_{m,1} & 1 & \frac{1}{\varepsilon_{i,1}} \\ \dot{u}_{m,2}^3 & \dot{u}_{m,2}^2 & \dot{u}_{m,2} & 1 & \frac{1}{\varepsilon_{i,2}} \\ & & \dots & & \\ \dot{u}_{m,n}^3 & \dot{u}_{m,n}^2 & \dot{u}_{m,n} & 1 & \frac{1}{\varepsilon_{i,n}} \end{bmatrix}$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} \dot{u}_{m,1}\alpha_1^2 & \dot{u}_{m,1}\alpha_1\gamma_1 & \alpha_1 & \alpha_1^2\gamma_1 & \alpha_1\gamma_1 & \frac{\alpha_1\gamma_1}{\varepsilon_{i,1}} & \frac{\alpha_1^2\gamma_1^2}{\varepsilon_{i,1}} \\ \dot{u}_{m,2}\alpha_2^2 & \dot{u}_{m,2}\alpha_2\gamma_2 & \alpha_2 & \alpha_2^2\gamma_2 & \alpha_2\gamma_2 & \frac{\alpha_2\gamma_2}{\varepsilon_{i,2}} & \frac{\alpha_2^2\gamma_2^2}{\varepsilon_{i,2}} \\ & & \dots & & & & \\ \dot{u}_{m,n}\alpha_n^2 & \dot{u}_{m,n}\alpha_n\gamma_n & \alpha_n & \alpha_n^2\gamma_n & \alpha_n\gamma_n & \frac{\alpha_n\gamma_n}{\varepsilon_{i,n}} & \frac{\alpha_n^2\gamma_n^2}{\varepsilon_{i,n}} \end{bmatrix}$$

$$\varepsilon_{i,n} = \frac{(k-i)\dot{u}_{m,n} + i\dot{u}_{m+1,n}}{k}$$

$$B_1 = [b_{i,1} \ b_{i,2} \ b_{i,3} \ b_{i,4} \ b_{i,10}]$$

$$B_2 = [b_{i,5} \ b_{i,6} \ b_{i,7} \ b_{i,8} \ b_{i,9} \ b_{i,11} \ b_{i,12}]$$

$$C = [E_{m,i,1} \ E_{m,i,2} \ \dots \ E_{m,i,n}]^T$$

其中, $\dot{u}_{m,j}$ 表示第 j 条缩放轨迹中 u 在 u_m 点处的一阶导数; $E_{m,i,j}$ 表示 $E_{m,i}$ 在第 j 条缩放轨迹的能耗值;

因此, 当 A 列满秩时, $B = (A^T A)^{-1} A^T C$; 可实现对能耗特征参数 $b_{i,1}$ 至 $b_{i,12}$ 的辨识; 能耗特征参数 $b_{i,1}$ 至 $b_{i,12}$ 的辨识方法如下:

41) 在控制段 $[u_m, u_{m+1}]$ 上令 $\ddot{u}_m = 0$, 则有 $\dot{u}_m = \dot{u}_{m+1}$, 变时间尺度缩放退化为线性时间尺度缩放; A_2 恒为零; $B = (A^T A)^{-1} A^T C$ 化为: $B_1^T = (A_1^T A_1)^{-1} A_1^T C$;

令 $n=5$, 选择满足式 $\det(A_1) = \frac{\prod_{5 \geq p > q \geq 1} (\dot{u}_{m,q} - \dot{u}_{m,p})}{\dot{u}_{m,1}\dot{u}_{m,2}\dot{u}_{m,3}\dot{u}_{m,4}\dot{u}_{m,5}} \neq 0$ 的 $\dot{u}_{m,1}$ 、 $\dot{u}_{m,2}$ 、 $\dot{u}_{m,3}$ 、 $\dot{u}_{m,4}$ 和 $\dot{u}_{m,5}$, 使

$\text{rank}(A_1) = 5$, 并由式 $B_1^T = A_1^{-1} C$ 完成对 $b_{i,1}$, $b_{i,2}$, $b_{i,3}$, $b_{i,4}$, $b_{i,10}$ 的辨识;

其中, $\dot{u}_{m,1}$ 、 $\dot{u}_{m,2}$ 、 $\dot{u}_{m,3}$ 、 $\dot{u}_{m,4}$ 和 $\dot{u}_{m,5}$ 均表示缩放参数;

42) 将式 $AB=C$ 转化为: $A_2 B_2^T = C - A_1 B_1^T$;

令所有的缩放轨迹满足约束 $\alpha_n = \dot{u}_{m+1,n} - \dot{u}_{m,n} = \Lambda$, Λ 为不等零的常数; 并记 $\bar{C} = C - A_1 B_1^T$; 又有:

$$\Lambda^2 \dot{u}_{m,n} = \frac{\Lambda^2}{2} ((\Lambda + 2\dot{u}_{m,1}) - \Lambda)$$

$$\frac{k\Lambda^2(\Lambda + 2\dot{u}_{m,1})^2}{i\Lambda + k\dot{u}_{m,1}} = \left(1 - \frac{2i}{k}\right)\Lambda^2\left(\frac{k\Lambda(\Lambda + 2\dot{u}_{m,1})}{i\Lambda + k\dot{u}_{m,1}}\right) + 2\Lambda^2(\Lambda + 2\dot{u}_{m,1})$$

则: $A_2B_2^T = C - A_1B_1^T$ 可转换为:

$$\begin{bmatrix} \Lambda\dot{u}_{m,1}(\Lambda + 2\dot{u}_{m,1}) & \Lambda & (\Lambda + 2\dot{u}_{m,1}) & \frac{k\Lambda(\Lambda + 2\dot{u}_{m,1})}{i\Lambda + k\dot{u}_{m,1}} \\ \Lambda\dot{u}_{m,2}(\Lambda + 2\dot{u}_{m,2}) & \Lambda & (\Lambda + 2\dot{u}_{m,2}) & \frac{k\Lambda(\Lambda + 2\dot{u}_{m,2})}{i\Lambda + k\dot{u}_{m,2}} \\ & \dots & & \\ \Lambda\dot{u}_{m,n}(\Lambda + 2\dot{u}_{m,n}) & \Lambda & (\Lambda + 2\dot{u}_{m,n}) & \frac{k\Lambda(\Lambda + 2\dot{u}_{m,n})}{i\Lambda + k\dot{u}_{m,n}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_{i,6} \\ b_{i,7} - \frac{\Lambda^2}{2}b_{i,5} \\ \Lambda^2b_{i,8} + \Lambda b_{i,9} + \frac{\Lambda^2}{2}b_{i,5} + 2\Lambda^2b_{i,12} \\ b_{i,11} + \left(1 - \frac{2i}{k}\right)\Lambda^2b_{i,12} \end{bmatrix} = \bar{C}$$

令 $n=4$, 选择放缩参数 $\dot{u}_{m,5} - \dot{u}_{m,8}$ 满足:

$$\det \begin{bmatrix} \Lambda\dot{u}_{m,5}(\Lambda + 2\dot{u}_{m,5}) & \Lambda & (\Lambda + 2\dot{u}_{m,5}) & \frac{k\Lambda(\Lambda + 2\dot{u}_{m,5})}{i\Lambda + k\dot{u}_{m,5}} \\ \Lambda\dot{u}_{m,6}(\Lambda + 2\dot{u}_{m,6}) & \Lambda & (\Lambda + 2\dot{u}_{m,6}) & \frac{k\Lambda(\Lambda + 2\dot{u}_{m,6})}{i\Lambda + k\dot{u}_{m,6}} \\ & \dots & & \\ \Lambda\dot{u}_{m,8}(\Lambda + 2\dot{u}_{m,8}) & \Lambda & (\Lambda + 2\dot{u}_{m,8}) & \frac{k\Lambda(\Lambda + 2\dot{u}_{m,8})}{i\Lambda + k\dot{u}_{m,8}} \end{bmatrix} = \frac{4(2i-k)k^3\Lambda^4 \prod_{8 \geq p > q \geq 5} (\dot{u}_{m,q} - \dot{u}_{m,p})}{\prod_{8 \geq l \geq 5} (i\Lambda + k\dot{u}_{m,l})} \neq 0$$

可识别第一组参数式:

$$b_{i,6}$$

$$b_{i,7} - \frac{\Lambda^2}{2}b_{i,5}$$

$$\Lambda^2b_{i,8} + \Lambda b_{i,9} + \frac{\Lambda^2}{2}b_{i,5} + 2\Lambda^2b_{i,12}$$

$$b_{i,11} + \left(1 - \frac{2i}{k}\right)\Lambda^2b_{i,12}$$

43) 令所有的缩放轨迹满足约束 $\gamma_n = \dot{u}_{m+1,n} + \dot{u}_{m,n} = \Gamma$, Γ 为大于零的常数; 记:

$$\hat{C} = C - A_1B_1^T - \begin{bmatrix} \dot{u}_{m,1}\alpha_1\gamma_1 \\ \dot{u}_{m,2}\alpha_2\gamma_2 \\ \dots \\ \dot{u}_{m,n}\alpha_n\gamma_n \end{bmatrix} b_{i,6}$$

由于 $b_{i,6}$ 已完成辨识, 且:

$$\frac{k\Gamma^2(\Gamma - 2\dot{u}_{m,n})^2}{i\Gamma + (k-2i)\dot{u}_{m,n}} = \frac{k\Gamma^2}{k-2i} \left(\frac{k\Gamma(\Gamma - 2\dot{u}_{m,n})}{i\Gamma + (k-2i)\dot{u}_{m,n}} \right) - \frac{2k\Gamma}{k-2i}(\Gamma - 2\dot{u}_{m,n})$$

故将 $A_2B_2^T = C - A_1B_1^T$ 转换为:

$$\begin{bmatrix} (\Gamma - 2\dot{u}_{m,1})^2 \dot{u}_{m,1} & \Gamma - 2\dot{u}_{m,1} & \Gamma(\Gamma - 2\dot{u}_{m,1})^2 & \frac{k\Gamma(\Gamma - 2\dot{u}_{m,1})}{i\Gamma + (k-2i)\dot{u}_{m,1}} \\ (\Gamma - 2\dot{u}_{m,2})^2 \dot{u}_{m,2} & \Gamma - 2\dot{u}_{m,2} & \Gamma(\Gamma - 2\dot{u}_{m,2})^2 & \frac{k\Gamma(\Gamma - 2\dot{u}_{m,2})}{i\Gamma + (k-2i)\dot{u}_{m,2}} \\ & & \dots & \\ (\Gamma - 2\dot{u}_{m,n})^2 \dot{u}_{m,n} & \Gamma - 2\dot{u}_{m,n} & \Gamma(\Gamma - 2\dot{u}_{m,n})^2 & \frac{k\Gamma(\Gamma - 2\dot{u}_{m,n})}{i\Gamma + (k-2i)\dot{u}_{m,n}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_{i,5} \\ b_{i,7} + \Gamma b_{i,9} - \frac{2k\Gamma}{k-2i} b_{i,12} \\ b_{i,8} \\ b_{i,11} + \frac{k\Gamma^2}{k-2i} b_{i,12} \end{bmatrix} = \hat{C}$$

令 $n=4$, 选择放缩参数 $\dot{u}_{m,9} - \dot{u}_{m,12}$ 满足:

$$\det \left(\begin{bmatrix} (\Gamma - 2\dot{u}_{m,9})^2 \dot{u}_{m,9} & \Gamma - 2\dot{u}_{m,9} & \Gamma(\Gamma - 2\dot{u}_{m,9})^2 & \frac{k\Gamma(\Gamma - 2\dot{u}_{m,9})}{i\Gamma + (k-2i)\dot{u}_{m,9}} \\ (\Gamma - 2\dot{u}_{m,10})^2 \dot{u}_{m,10} & \Gamma - 2\dot{u}_{m,10} & \Gamma(\Gamma - 2\dot{u}_{m,10})^2 & \frac{k\Gamma(\Gamma - 2\dot{u}_{m,10})}{i\Gamma + (k-2i)\dot{u}_{m,10}} \\ & & \dots & \\ (\Gamma - 2\dot{u}_{m,12})^2 \dot{u}_{m,12} & \Gamma - 2\dot{u}_{m,12} & \Gamma(\Gamma - 2\dot{u}_{m,12})^2 & \frac{k\Gamma(\Gamma - 2\dot{u}_{m,12})}{i\Gamma + (k-2i)\dot{u}_{m,12}} \end{bmatrix} \right) \\ = \frac{4k(2i-k)^3 \Gamma^2 \prod_{12 \geq l \geq 9} (\Gamma - 2\dot{u}_{m,l}) \prod_{12 \geq p > q \geq 9} (\dot{u}_{m,q} - \dot{u}_{m,p})}{\prod_{12 \geq l \geq 9} (i\Gamma + (k-2i)\dot{u}_{m,l})} \neq 0$$

可识别第二组参数式:

$$b_{i,5}$$

$$b_{i,7} + \Gamma b_{i,9} - \frac{2k\Gamma}{k-2i} b_{i,12}$$

$$b_{i,8}$$

$$b_{i,11} + \frac{k\Gamma^2}{k-2i} b_{i,12}$$

联立第一参数式和第二参数式, 由于 Λ 、 Γ 已知, 且选择 $\Gamma \neq 1$, 识别得到 $b_{i,5}$, $b_{i,6}$, $b_{i,7}$, $b_{i,8}$, $b_{i,9}$, $b_{i,11}$ 和 $b_{i,12}$, 即识别得到所有的能耗特征参数, 构建得到机器人能耗模型。

2. 一种采用如权利要求1所述方法构建得到的机器人能耗模型的机器人并行双向动态能耗优化方法, 其特征在于: 包括如下步骤:

S1: 结合时间缩放状态空间表达式建立时间缩放三维离散网格, 对缩放参数 \dot{u}_i 、 \dot{u}_{i+1} 进行搜索;

S2: 基于机器人能耗模型以及状态转移方程对关节轨迹能耗进行迭代计算, 得到满足指定约束的能耗最优缩放轨迹及最优能耗值。

3. 根据权利要求2所述的机器人并行双向动态能耗优化方法, 其特征在于: 指定约束为机器人在指定时间段上的位置约束、速度约束、加速度约束以及缩放后的整段轨迹执行时间。

4. 根据权利要求2所述的机器人并行双向动态能耗优化方法, 其特征在于: 状态转移方

程为:

$$L_{m+1}(t_{m+1}, \dot{u}_{m+1}) = \min [E_m(\dot{u}_{m+1}, t_{m+1}, \dot{u}_m, t_m) + L_m(t_m, \dot{u}_m)]$$

$$L_{N_u-m-1}(t_{N_u-m-1}, \dot{u}_{N_u-m-1}) = \min [E_{N_u-m}(\dot{u}_{N_u-m-1}, t_{N_u-m-1}, \dot{u}_{N_u-m}, t_{N_u-m}) + L_{N_u-m}(t_{N_u-m}, \dot{u}_{N_u-m})]$$

其中,状态变量 \dot{u}_{m+1} , \dot{u}_m , t_{m+1} , t_m 是在对应配置层上任意可能的状态, L_m 表示前向动态规划在第m层上的最低能量损耗, (t_m, \dot{u}_m) 表示在第m层上达到最低能量损耗时所对应的状态, E_m 表示从状态 (t_m, \dot{u}_m) 转移到 (t_{m+1}, \dot{u}_{m+1}) 时所需要的能量;

L_{N_u-m} 表示后向动态规划在第 N_u-m 层上的最低能量损耗, E_{N_u-m} 表示从状态 $(\dot{u}_{N_u-m}, t_{N_u-m})$ 转移到 $(\dot{u}_{N_u-m-1}, t_{N_u-m-1})$ 时所需要的能量。

机器人能耗模型构建方法及并行双向动态能耗优化方法

技术领域

[0001] 本发明属于机器人技术领域,具体的为一种机器人能耗模型构建方法及并行双向动态能耗优化方法。

背景技术

[0002] 现有技术中,机器人的能耗计算需要依靠其驱动系统的详细技术参数,包括永磁同步伺服电机、变频器以及整流器等的技术参数。但是机器人用户往往无法获取相应的参数,且机器人的技术参数会随着工况的变化而变化。同时,同一工作任务,采用不同进给速率,机器人能耗也存在较大的差异。因此,实现机器人能耗地高效、准确地计算,得到机器人能耗的最优轨迹函数,具有较大的难度及实际意义。

发明内容

[0003] 有鉴于此,本发明的目的在于提供一种机器人能耗模型构建方法及并行双向动态能耗优化方法,其中,机器人能耗模型构建方法可在不需要机器人驱动系统技术参数的条件下构建能耗模型;双向动态能耗优化方法可实现在指定条件下机器人关节轨迹函数的最优缩放及能耗优化。

[0004] 为达到上述目的,本发明提供如下技术方案:

[0005] 本发明首先提出了一种机器人能耗模型构建方法,包括如下步骤:

[0006] 步骤一:获取目标机器人的预设关节轨迹 $q_r(u)$,并将 $q_r(u)$ 在时域上均分为 N_u 个控制段, $\Delta = u_{m+1} - u_m, m \in \{0, \dots, N_u - 1\}$, Δ 为常数, u 为预设关节轨迹执行时间变量; u_m 和 u_{m+1} 分别表示第 m 个和第 $m+1$ 个控制段的关节轨迹执行时间节点;

[0007] 步骤二:对控制段 $[u_m, u_{m+1}]$ 上的关节轨迹 $q_r(u)$ 进行变时间尺度缩放:

[0008] $q_{m,s}(t) = q_{m,r}(u), 1 \leq m \leq k$

[0009] 其中, $q_s(t)$ 为变时间尺度缩放后的关节轨迹; $q_{m,s}(t)$ 为变时间尺度缩放后在控制段 $[u_m, u_{m+1}]$ 上的关节轨迹; $q_{m,r}(u)$ 为机器人在控制段 $[u_m, u_{m+1}]$ 上的预设关节轨迹; t 为变时间尺度缩放后关节轨迹执行时间变量;

[0010] 令 \ddot{u}_m 在第 m 个控制段 $[u_m, u_{m+1}]$ 内为常数,得到时间缩放状态空间表达式:

$$[0011] \quad \begin{bmatrix} t_{m+1} \\ \dot{u}_{m+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t_m \\ \dot{u}_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} t_{m+1} - t_m \\ \frac{2\Delta}{t_{m+1} - t_m} \end{bmatrix}$$

[0012] 其中, t_m 和 t_{m+1} 分别表示变时间尺度缩放后第 m 个和第 $m+1$ 个控制段的关节轨迹执行时间节点; \dot{u}_m 和 \dot{u}_{m+1} 分别表示 u 在 u_m 点和 u_{m+1} 点处的一阶导数; \ddot{u}_m 为 u 在 u_m 点处的二阶导数;

[0013] 步骤三:将控制段 $[u_m, u_{m+1}]$ 均分为 k 个采样段,得到第 m 个控制段 $[u_m, u_{m+1}]$ 的机器人能耗模型可表示为:

$$[0014] \quad E_m = \sum_{i=0}^{k-1} E_{m,i}$$

$$[0015] \quad E_{m,i} = b_{i,1}\dot{u}_m^3 + b_{i,2}\dot{u}_m^2 + b_{i,3}\dot{u}_m + b_{i,4} + b_{i,5}\dot{u}_m\alpha^2 + b_{i,6}\dot{u}_m\alpha\gamma + b_{i,7}\alpha + b_{i,8}\alpha^2\gamma + b_{i,9}\alpha\gamma + \frac{(b_{i,10} + b_{i,11}\alpha\gamma + b_{i,12}\alpha^2\gamma^2)}{\varepsilon_i}$$

$$[0016] \quad \varepsilon_i = \begin{cases} \frac{i \cdot \dot{u}_{m+1} + (k-i)\dot{u}_m}{k}, & u \in [\beta_i, \beta_{i+1}) \text{ and } i \in \{0, \dots, k-1\} \\ \frac{(k-1)\dot{u}_{m+1} + \dot{u}_m}{k}, & \text{others} \end{cases}$$

$$[0017] \quad \beta_i = \frac{i \cdot u_{m+1} + (k-i)u_m}{k} \quad i \in \{0, \dots, k\}$$

$$[0018] \quad \alpha = \dot{u}_{m+1} - \dot{u}_m, \quad \gamma = \dot{u}_{m+1} + \dot{u}_m$$

[0019] 其中, $E_{m,i}$ 表示机器人在第 m 个控制段中的第 i 个采样段的能耗; $b_{i,1}$ 至 $b_{i,12}$ 为与预设轨迹及机器人自身特性相关的能耗特征参数, 其在采样段区间 $[\beta_i, \beta_{i+1}]$ 上均为常数;

[0020] 步骤四: 辨识能耗特征参数 $b_{i,1}$ 至 $b_{i,12}$, 构建得到机器人能耗模型。

[0021] 进一步, 所述步骤四中, 为了辨识能耗特征参数 $b_{i,1}$ 至 $b_{i,12}$, 需找到 n 条缩放轨迹并采集机器人在相应采样段的能耗数据, 此时 n 条缩放轨迹满足:

$$[0022] \quad AB = C$$

[0023] 其中: $A = [A_1 \ A_2]$, $B = [B_1 \ B_2]^T$, 且:

$$[0024] \quad A_1 = \begin{bmatrix} \dot{u}_{m,1}^3 & \dot{u}_{m,1}^2 & \dot{u}_{m,1} & 1 & \frac{1}{\varepsilon_{i,1}} \\ \dot{u}_{m,2}^3 & \dot{u}_{m,2}^2 & \dot{u}_{m,2} & 1 & \frac{1}{\varepsilon_{i,2}} \\ & & \dots & & \\ \dot{u}_{m,n}^3 & \dot{u}_{m,n}^2 & \dot{u}_{m,n} & 1 & \frac{1}{\varepsilon_{i,n}} \end{bmatrix}$$

$$[0025] \quad A_2 = \begin{bmatrix} \dot{u}_{m,1}\alpha_1^2 & \dot{u}_{m,1}\alpha_1\gamma_1 & \alpha_1 & \alpha_1^2\gamma_1 & \alpha_1\gamma_1 & \frac{\alpha_1\gamma_1}{\varepsilon_{i,1}} & \frac{\alpha_1^2\gamma_1^2}{\varepsilon_{i,1}} \\ \dot{u}_{m,2}\alpha_2^2 & \dot{u}_{m,2}\alpha_2\gamma_2 & \alpha_2 & \alpha_2^2\gamma_2 & \alpha_2\gamma_2 & \frac{\alpha_2\gamma_2}{\varepsilon_{i,2}} & \frac{\alpha_2^2\gamma_2^2}{\varepsilon_{i,2}} \\ & & \dots & & & & \\ \dot{u}_{m,n}\alpha_n^2 & \dot{u}_{m,n}\alpha_n\gamma_n & \alpha_n & \alpha_n^2\gamma_n & \alpha_n\gamma_n & \frac{\alpha_n\gamma_n}{\varepsilon_{i,n}} & \frac{\alpha_n^2\gamma_n^2}{\varepsilon_{i,n}} \end{bmatrix}$$

$$[0026] \quad \varepsilon_{i,n} = \frac{(k-i)\dot{u}_{m,n} + \dot{u}_{m+1,n}}{k}$$

$$[0027] \quad B_1 = [b_{i,1} \ b_{i,2} \ b_{i,3} \ b_{i,4} \ b_{i,10}]$$

$$[0028] \quad B_2 = [b_{i,5} \ b_{i,6} \ b_{i,7} \ b_{i,8} \ b_{i,9} \ b_{i,11} \ b_{i,12}]$$

$$[0029] \quad C = [E_{m,i,1} \ E_{m,i,2} \ \dots \ E_{m,i,n}]^T$$

[0030] 其中, $\dot{u}_{m,j}$ 表示第 j 条缩放轨迹中 u 在 u_m 点处的一阶导数; $E_{m,i,j}$ 表示 $E_{m,i}$ 在第 j 条缩放

轨迹的能耗值;

[0031] 因此,当A列满秩时, $B = (A^T A)^{-1} A^T C$;可实现对能耗特征参数 $b_{i,1}$ 至 $b_{i,12}$ 的辨识。

[0032] 进一步,能耗特征参数 $b_{i,1}$ 至 $b_{i,12}$ 的辨识方法如下:

[0033] 41) 在控制段 $[u_m, u_{m+1}]$ 上令 $\ddot{u}_m = 0$,则有 $\dot{u}_m = \dot{u}_{m+1}$,变时间尺度缩放退化为线性时间尺度缩放; A_2 恒为零; $B = (A^T A)^{-1} A^T C$ 化为: $B_1^T = (A_1^T A_1)^{-1} A_1^T C$;

[0034] 令 $n = 5$,选择满足式 $\det(A_1) = \frac{\prod_{5 \geq p > q \geq 1} (\dot{u}_{m,q} - \dot{u}_{m,p})}{\dot{u}_{m,1} \dot{u}_{m,2} \dot{u}_{m,3} \dot{u}_{m,4} \dot{u}_{m,5}} \neq 0$ 的 $\dot{u}_{m,1}$ 、 $\dot{u}_{m,2}$ 、 $\dot{u}_{m,3}$ 、 $\dot{u}_{m,4}$ 和

$\dot{u}_{m,5}$,使 $\text{rank}(A_1) = 5$,并由式 $B_1^T = A_1^{-1} C$ 完成对 $b_{i,1}$ 、 $b_{i,2}$ 、 $b_{i,3}$ 、 $b_{i,4}$ 、 $b_{i,10}$ 的辨识;

[0035] 其中, $\dot{u}_{m,1}$ 、 $\dot{u}_{m,2}$ 、 $\dot{u}_{m,3}$ 、 $\dot{u}_{m,4}$ 和 $\dot{u}_{m,5}$ 均表示缩放参数;

[0036] 42) 将式 $AB = C$ 转化为: $A_2 B_2^T = C - A_1 B_1^T$;

[0037] 令所有的缩放轨迹满足约束 $\alpha_n = \dot{u}_{m+1,n} - \dot{u}_{m,n} = \Lambda$, Λ 为不等零的常数;并记 $\bar{C} = C - A_1 B_1^T$;又有:

$$[0038] \quad \Lambda^2 \dot{u}_{m,n} = \frac{\Lambda^2}{2} ((\Lambda + 2\dot{u}_{m,1}) - \Lambda)$$

$$[0039] \quad \frac{k\Lambda^2 (\Lambda + 2\dot{u}_{m,1})^2}{i\Lambda + k\dot{u}_{m,1}} = (1 - \frac{2i}{k}) \Lambda^2 \left(\frac{k\Lambda (\Lambda + 2\dot{u}_{m,1})}{i\Lambda + k\dot{u}_{m,1}} \right) + 2\Lambda^2 (\Lambda + 2\dot{u}_{m,1})$$

[0040] 则: $A_2 B_2^T = C - A_1 B_1^T$ 可转换为:

$$[0041] \quad \begin{bmatrix} \Lambda \dot{u}_{m,1} (\Lambda + 2\dot{u}_{m,1}) & \Lambda & (\Lambda + 2\dot{u}_{m,1}) & \frac{k\Lambda (\Lambda + 2\dot{u}_{m,1})}{i\Lambda + k\dot{u}_{m,1}} \\ \Lambda \dot{u}_{m,2} (\Lambda + 2\dot{u}_{m,2}) & \Lambda & (\Lambda + 2\dot{u}_{m,2}) & \frac{k\Lambda (\Lambda + 2\dot{u}_{m,2})}{i\Lambda + k\dot{u}_{m,2}} \\ & \dots & & \\ \Lambda \dot{u}_{m,n} (\Lambda + 2\dot{u}_{m,n}) & \Lambda & (\Lambda + 2\dot{u}_{m,n}) & \frac{k\Lambda (\Lambda + 2\dot{u}_{m,n})}{i\Lambda + k\dot{u}_{m,n}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_{i,6} \\ b_{i,7} - \frac{\Lambda^2}{2} b_{i,5} \\ \Lambda^2 b_{i,8} + \Lambda b_{i,9} + \frac{\Lambda^2}{2} b_{i,5} + 2\Lambda^2 b_{i,12} \\ b_{i,11} + (1 - \frac{2i}{k}) \Lambda^2 b_{i,12} \end{bmatrix} = \bar{C}$$

[0042] 令 $n = 4$,选择放缩参数 $\dot{u}_{m,5} - \dot{u}_{m,8}$ 满足:

$$[0043] \quad \det \left(\begin{bmatrix} \Lambda \dot{u}_{m,5} (\Lambda + 2\dot{u}_{m,5}) & \Lambda & (\Lambda + 2\dot{u}_{m,5}) & \frac{k\Lambda (\Lambda + 2\dot{u}_{m,5})}{i\Lambda + k\dot{u}_{m,5}} \\ \Lambda \dot{u}_{m,6} (\Lambda + 2\dot{u}_{m,6}) & \Lambda & (\Lambda + 2\dot{u}_{m,6}) & \frac{k\Lambda (\Lambda + 2\dot{u}_{m,6})}{i\Lambda + k\dot{u}_{m,6}} \\ & \dots & & \\ \Lambda \dot{u}_{m,8} (\Lambda + 2\dot{u}_{m,8}) & \Lambda & (\Lambda + 2\dot{u}_{m,8}) & \frac{k\Lambda (\Lambda + 2\dot{u}_{m,8})}{i\Lambda + k\dot{u}_{m,8}} \end{bmatrix} \right) = \frac{4(2i-k)k^3 \Lambda^4 \prod_{8 \geq p > q \geq 5} (\dot{u}_{m,q} - \dot{u}_{m,p})}{\prod_{8 \geq l \geq 5} (i\Lambda + k\dot{u}_{m,l})} \neq 0$$

[0044] 可识别第一组参数式:

[0045] $b_{i,6}$

$$[0046] \quad b_{i,7} - \frac{\Lambda^2}{2} b_{i,5}$$

$$[0047] \quad \Lambda^2 b_{i,8} + \Lambda b_{i,9} + \frac{\Lambda^2}{2} b_{i,5} + 2\Lambda^2 b_{i,12}$$

$$[0048] \quad b_{i,11} + (1 - \frac{2i}{k}) \Lambda^2 b_{i,12}$$

[0049] 43) 令所有的缩放轨迹满足约束 $\gamma_n = \dot{u}_{m+1,n} + \dot{u}_{m,n} = \Gamma$, Γ 为大于零的常数;记:

$$[0050] \quad \hat{C} = C - A_1 B_1^T - \begin{bmatrix} \dot{u}_{m,1} \alpha_1 \gamma_1 \\ \dot{u}_{m,2} \alpha_2 \gamma_2 \\ \dots \\ \dot{u}_{m,n} \alpha_n \gamma_n \end{bmatrix} b_{i,6}$$

[0051] 由于 $b_{i,6}$ 已完成辨识,且:

$$[0052] \quad \frac{k\Gamma^2(\Gamma - 2\dot{u}_{m,n})^2}{i\Gamma + (k-2i)\dot{u}_{m,n}} = \frac{k\Gamma^2}{k-2i} \left(\frac{k\Gamma(\Gamma - 2\dot{u}_{m,n})}{i\Gamma + (k-2i)\dot{u}_{m,n}} \right) - \frac{2k\Gamma}{k-2i} (\Gamma - 2\dot{u}_{m,n})$$

[0053] 故将 $A_2 B_2^T = C - A_1 B_1^T$ 转换为:

$$[0054] \quad \begin{bmatrix} (\Gamma - 2\dot{u}_{m,1})^2 \dot{u}_{m,1} & \Gamma - 2\dot{u}_{m,1} & \Gamma(\Gamma - 2\dot{u}_{m,1})^2 & \frac{k\Gamma(\Gamma - 2\dot{u}_{m,1})}{i\Gamma + (k-2i)\dot{u}_{m,1}} \\ (\Gamma - 2\dot{u}_{m,2})^2 \dot{u}_{m,2} & \Gamma - 2\dot{u}_{m,2} & \Gamma(\Gamma - 2\dot{u}_{m,2})^2 & \frac{k\Gamma(\Gamma - 2\dot{u}_{m,2})}{i\Gamma + (k-2i)\dot{u}_{m,2}} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ (\Gamma - 2\dot{u}_{m,n})^2 \dot{u}_{m,n} & \Gamma - 2\dot{u}_{m,n} & \Gamma(\Gamma - 2\dot{u}_{m,n})^2 & \frac{k\Gamma(\Gamma - 2\dot{u}_{m,n})}{i\Gamma + (k-2i)\dot{u}_{m,n}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_{i,5} \\ b_{i,7} + \Gamma b_{i,9} - \frac{2k\Gamma}{k-2i} b_{i,12} \\ b_{i,8} \\ b_{i,11} + \frac{k\Gamma^2}{k-2i} b_{i,12} \end{bmatrix} = \hat{C}$$

[0055] 令 $n=4$, 选择放缩参数 $\dot{u}_{m,9} - \dot{u}_{m,12}$ 满足:

$$[0056] \quad \det \left(\begin{bmatrix} (\Gamma - 2\dot{u}_{m,9})^2 \dot{u}_{m,9} & \Gamma - 2\dot{u}_{m,9} & \Gamma(\Gamma - 2\dot{u}_{m,9})^2 & \frac{k\Gamma(\Gamma - 2\dot{u}_{m,9})}{i\Gamma + (k-2i)\dot{u}_{m,9}} \\ (\Gamma - 2\dot{u}_{m,10})^2 \dot{u}_{m,10} & \Gamma - 2\dot{u}_{m,10} & \Gamma(\Gamma - 2\dot{u}_{m,10})^2 & \frac{k\Gamma(\Gamma - 2\dot{u}_{m,10})}{i\Gamma + (k-2i)\dot{u}_{m,10}} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ (\Gamma - 2\dot{u}_{m,12})^2 \dot{u}_{m,12} & \Gamma - 2\dot{u}_{m,12} & \Gamma(\Gamma - 2\dot{u}_{m,12})^2 & \frac{k\Gamma(\Gamma - 2\dot{u}_{m,12})}{i\Gamma + (k-2i)\dot{u}_{m,12}} \end{bmatrix} \right)$$

$$= \frac{4k(2i-k)^3 \Gamma^2 \prod_{12 \geq l \geq 9} (\Gamma - 2\dot{u}_{m,l}) \prod_{12 \geq p > q \geq 9} (\dot{u}_{m,q} - \dot{u}_{m,p})}{\prod_{12 \geq l \geq 9} (i\Gamma + (k-2i)\dot{u}_{m,l})} \neq 0$$

[0057] 可识别第二组参数式:

$$[0058] \quad b_{i,5}$$

$$[0059] \quad b_{i,7} + \Gamma b_{i,9} - \frac{2k\Gamma}{k-2i} b_{i,12}$$

$$[0060] \quad b_{i,8}$$

$$[0061] \quad b_{i,11} + \frac{k\Gamma^2}{k-2i} b_{i,12}$$

[0062] 联立第一参数式和第二参数式,由于 Λ 、 Γ 已知,且选择 $\Gamma \neq 1$,识别得到 $b_{i,5}$ 、 $b_{i,6}$ 、 $b_{i,7}$ 、 $b_{i,8}$ 、 $b_{i,9}$ 、 $b_{i,11}$ 和 $b_{i,12}$,即识别得到所有的能耗特征参数,构建得到机器人能耗模型。

[0063] 本发明还提出了一种采用如上所述方法构建得到的机器人能耗模型的机器人并行双向动态能耗优化方法,包括如下步骤:

[0064] S1:结合时间缩放状态空间表达式建立时间缩放三维离散网格,对缩放参数 \dot{u}_i 、 \dot{u}_{i+1} 进行搜索;

[0065] S2:基于机器人能耗模型以及状态转移方程对关节轨迹能耗进行迭代计算,得到满足指定约束的能耗最优缩放轨迹及最优能耗值。

[0066] 进一步,指定约束为机器人在指定时间段上的位置约束、速度约束、加速度约束以及缩放后的整段轨迹执行时间。

[0067] 进一步,状态转移方程为:

$$[0068] \quad L_{m+1}(t_{m+1}, \dot{u}_{m+1}) = \min[E_m(\dot{u}_{m+1}, t_{m+1}, \dot{u}_m, t_m) + L_m(t_m, \dot{u}_m)]$$

$$[0069] \quad L_{N_u-m-1}(t_{N_u-m-1}, \dot{u}_{N_u-m-1}) = \min[E_{N_u-m}(\dot{u}_{N_u-m}, t_{N_u-m}, \dot{u}_{N_u-m-1}, t_{N_u-m-1}) + L_{N_u-m}(t_{N_u-m}, \dot{u}_{N_u-m})]$$

[0070] 其中,状态变量 \dot{u}_{m+1} 、 \dot{u}_m 、 t_{m+1} 、 t_m 是在对应配置层上任意可能的状态, L_m 表示前向动态规划在第 m 层上的最低能量损耗, (t_m, \dot{u}_m) 表示在第 m 层上达到最低能量损耗时所对应的状态, E_m 表示从状态 (t_m, \dot{u}_m) 转移到 (t_{m+1}, \dot{u}_{m+1}) 时所需要的能量;

[0071] L_{N_u-m-1} 表示后向动态规划在第 N_u-m 层上的最低能量损耗, E_{N_u-m} 表示从状态 $(\dot{u}_{N_u-m}, t_{N_u-m})$ 转移到 $(\dot{u}_{N_u-m-1}, t_{N_u-m-1})$ 时所需要的能量。

[0072] 本发明的有益效果在于:

[0073] 本发明的机器人能耗模型构建方法,将目标机器人的预设关节轨迹在时域上划分为 N_u 个控制段,使预设关节轨迹执行时间变量在每一个控制段内的二阶导数为常数,从而构建得到每一个控制段内的机器人能耗模型,为了求解机器人能耗模型中的能耗特征参数,将每一个控制段均分为 k 个采样段,在每个采样段内,使能耗特征参数为常数,从而实现在每一个采样段内对能耗特征参数的辨识,累加每个采样段的能耗即可得到每个控制段的能耗,累加每个控制段的能耗即可得到机器人在执行预设关节轨迹时的能耗,即在不需要机器人驱动系统技术参数的条件下构建能耗模型构建得到机器人能耗模型。

附图说明

[0074] 为了使本发明的目的、技术方案和有益效果更加清楚,本发明提供如下附图进行说明:

[0075] 图1为参考时间与缩放时间之间的非线性映射图;

[0076] 图2为三维离散网格的示意图;

[0077] 图3为 \dot{u} 的两种近似方法示意图；虚线为线性近似；实线为分段近似。

具体实施方式

[0078] 下面结合附图和具体实施例对本发明作进一步说明,以使本领域的技术人员可以更好的理解本发明并能予以实施,但所举实施例不作为对本发明的限定。

[0079] 本实施例的机器人能耗模型构建方法,包括如下步骤。

[0080] 步骤一:获取目标机器人的预设关节轨迹 $q_r(u)$,并将 $q_r(u)$ 在时域上均分为 N_u 个控制段, $\Delta = u_{m+1} - u_m, m \in \{0, \dots, N_u - 1\}$, Δ 为常数, u 为预设关节轨迹执行时间变量; u_m 和 u_{m+1} 分别表示第 m 个和第 $m+1$ 个控制段的关节轨迹执行时间节点;

[0081] 步骤二:如图1所示,对控制段 $[u_m, u_{m+1}]$ 上的关节轨迹 $q_r(u)$ 进行变时间尺度缩放:

$$[0082] \quad q_{m,s}(t) = q_{m,r}(u), 1 \leq m \leq k$$

[0083] 其中, $q_s(t)$ 为变时间尺度缩放后的关节轨迹, $q_{m,s}(t)$ 为变时间尺度缩放后在控制段 $[u_m, u_{m+1}]$ 上的关节轨迹; $q_{m,r}(u)$ 为机器人在控制段 $[u_m, u_{m+1}]$ 上的预设关节轨迹; t 为变时间尺度缩放后关节轨迹执行时间变量;

[0084] 令 \ddot{u}_m 在第 m 个控制段 $[u_m, u_{m+1}]$ 内为常数,得到时间缩放状态空间表达式:

$$[0085] \quad \begin{bmatrix} t_{m+1} \\ \dot{u}_{m+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t_m \\ \dot{u}_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} t_{m+1} - t_m \\ \frac{2\Delta}{t_{m+1} - t_m} \end{bmatrix}$$

[0086] 其中, t_m 和 t_{m+1} 分别表示变时间尺度缩放后第 m 个和第 $m+1$ 个控制段的关节轨迹执行时间节点; \dot{u}_m 和 \dot{u}_{m+1} 分别表示 u 在 u_m 点和 u_{m+1} 点处的一阶导数; \ddot{u}_m 为 u 在 u_m 点处的二阶导数;

[0087] 步骤三:将控制段 $[u_m, u_{m+1}]$ 均分为 k 个采样段,得到第 m 个控制段 $[u_m, u_{m+1}]$ 的机器人能耗模型可表示为:

$$[0088] \quad E_m = \sum_{i=0}^{k-1} E_{m,i}$$

$$[0089] \quad E_{m,i} = b_{i,1} \dot{u}_m^3 + b_{i,2} \dot{u}_m^2 + b_{i,3} \dot{u}_m + b_{i,4} + b_{i,5} \dot{u}_m \alpha^2 + b_{i,6} \dot{u}_m \alpha \gamma + b_{i,7} \alpha + b_{i,8} \alpha^2 \gamma + b_{i,9} \alpha \gamma + \frac{(b_{i,10} + b_{i,11} \alpha \gamma + b_{i,12} \alpha^2 \gamma^2)}{\varepsilon_i}$$

$$[0090] \quad \varepsilon_i = \begin{cases} \frac{i \cdot \dot{u}_{m+1} + (k-i) \dot{u}_m}{k}, & u \in [\beta_i, \beta_{i+1}) \text{ and } i \in \{0, \dots, k-1\} \\ \frac{(k-1) \dot{u}_{m+1} + \dot{u}_m}{k}, & \text{others} \end{cases}$$

$$[0091] \quad \beta_i = \frac{i \cdot u_{m+1} + (k-i) u_m}{k} \quad i \in \{0, \dots, k\}$$

$$[0092] \quad \alpha = \dot{u}_{m+1} - \dot{u}_m, \quad \gamma = \dot{u}_{m+1} + \dot{u}_m$$

[0093] 其中, $E_{m,i}$ 表示机器人在第 m 个控制段中的第 i 个采样段的能耗; $b_{i,1}$ 至 $b_{i,12}$ 为与预设轨迹及机器人自身特性相关的能耗特征参数,其在采样段区间 $[\beta_i, \beta_{i+1}]$ 上均为常数;

[0094] 步骤四:辨识能耗特征参数 $b_{i,1}$ 至 $b_{i,12}$,构建得到机器人能耗模型。

[0095] 具体的,为了辨识能耗特征参数 $b_{i,1}$ 至 $b_{i,12}$,需找到 n 条缩放轨迹并采集机器人在

相应采样段的能耗数据,此时n条缩放轨迹满足:

[0096] $AB=C$

[0097] 其中: $A=[A_1 A_2]$, $B=[B_1 B_2]^T$,且:

[0098]
$$A_1 = \begin{bmatrix} \dot{u}_{m,1}^3 & \dot{u}_{m,1}^2 & \dot{u}_{m,1} & 1 & \frac{1}{\varepsilon_{i,1}} \\ \dot{u}_{m,2}^3 & \dot{u}_{m,2}^2 & \dot{u}_{m,2} & 1 & \frac{1}{\varepsilon_{i,2}} \\ & & \dots & & \\ \dot{u}_{m,n}^3 & \dot{u}_{m,n}^2 & \dot{u}_{m,n} & 1 & \frac{1}{\varepsilon_{i,n}} \end{bmatrix}$$

[0099]
$$A_2 = \begin{bmatrix} \dot{u}_{m,1}\alpha_1^2 & \dot{u}_{m,1}\alpha_1\gamma_1 & \alpha_1 & \alpha_1^2\gamma_1 & \alpha_1\gamma_1 & \frac{\alpha_1\gamma_1}{\varepsilon_{i,1}} & \frac{\alpha_1^2\gamma_1^2}{\varepsilon_{i,1}} \\ \dot{u}_{m,2}\alpha_2^2 & \dot{u}_{m,2}\alpha_2\gamma_2 & \alpha_2 & \alpha_2^2\gamma_2 & \alpha_2\gamma_2 & \frac{\alpha_2\gamma_2}{\varepsilon_{i,2}} & \frac{\alpha_2^2\gamma_2^2}{\varepsilon_{i,2}} \\ & & \dots & & & & \\ \dot{u}_{m,n}\alpha_n^2 & \dot{u}_{m,n}\alpha_n\gamma_n & \alpha_n & \alpha_n^2\gamma_n & \alpha_n\gamma_n & \frac{\alpha_n\gamma_n}{\varepsilon_{i,n}} & \frac{\alpha_n^2\gamma_n^2}{\varepsilon_{i,n}} \end{bmatrix}$$

[0100]
$$\varepsilon_{i,n} = \frac{(k-i)\dot{u}_{m,n} + i\dot{u}_{m+1,n}}{k}$$

[0101] $B_1 = [b_{i,1} \ b_{i,2} \ b_{i,3} \ b_{i,4} \ b_{i,10}]$

[0102] $B_2 = [b_{i,5} \ b_{i,6} \ b_{i,7} \ b_{i,8} \ b_{i,9} \ b_{i,11} \ b_{i,12}]$

[0103] $C = [E_{m,i,1} \ E_{m,i,2} \ \dots \ E_{m,i,n}]^T$

[0104] 其中, $\dot{u}_{m,j}$ 表示第j条缩放轨迹中u在 u_m 点处的一阶导数; $E_{m,i,j}$ 表示 $E_{m,i}$ 在第j条缩放轨迹的能耗值;

[0105] 因此,当A列满秩时, $B=(A^T A)^{-1} A^T C$;可实现对能耗特征参数 $b_{i,1}$ 至 $b_{i,12}$ 的辨识。

[0106] 进一步,能耗特征参数 $b_{i,1}$ 至 $b_{i,12}$ 的辨识方法如下:

[0107] 41) 在控制段 $[u_m, u_{m+1}]$ 上令 $\ddot{u}_m=0$,则有 $\dot{u}_m=\dot{u}_{m+1}$,变时间尺度缩放退化为线性时间尺度缩放; A_2 恒为零; $B=(A^T A)^{-1} A^T C$ 化为: $B_1^T=(A_1^T A_1)^{-1} A_1^T C$;

[0108] 令 $n=5$,选择满足式 $\det(A_1) = \frac{\prod_{5 \geq p > q \geq 1} (\dot{u}_{m,q} - \dot{u}_{m,p})}{\dot{u}_{m,1}\dot{u}_{m,2}\dot{u}_{m,3}\dot{u}_{m,4}\dot{u}_{m,5}} \neq 0$ 的 $\dot{u}_{m,1}$ 、 $\dot{u}_{m,2}$ 、 $\dot{u}_{m,3}$ 、 $\dot{u}_{m,4}$ 和

$\dot{u}_{m,5}$,使 $\text{rank}(A_1)=5$,并由式 $B_1^T=A_1^{-1}C$ 完成对 $b_{i,1}, b_{i,2}, b_{i,3}, b_{i,4}, b_{i,10}$ 的辨识;

[0109] 其中, $\dot{u}_{m,1}$ 、 $\dot{u}_{m,2}$ 、 $\dot{u}_{m,3}$ 、 $\dot{u}_{m,4}$ 和 $\dot{u}_{m,5}$ 均表示缩放参数;

[0110] 42) 将式 $AB=C$ 转化为: $A_2 B_2^T = C - A_1 B_1^T$;

[0111] 令所有的缩放轨迹满足约束 $\alpha_n = \dot{u}_{m+1,n} - \dot{u}_{m,n} = \Lambda$, Λ 为不等零的常数;并记 $\bar{C} = C - A_1 B_1^T$;又有:

$$[0112] \quad \Lambda^2 \dot{u}_{m,n} = \frac{\Lambda^2}{2} ((\Lambda + 2\dot{u}_{m,1}) - \Lambda)$$

$$[0113] \quad \frac{k\Lambda^2(\Lambda + 2\dot{u}_{m,1})^2}{i\Lambda + k\dot{u}_{m,1}} = (1 - \frac{2i}{k})\Lambda^2 \left(\frac{k\Lambda(\Lambda + 2\dot{u}_{m,1})}{i\Lambda + k\dot{u}_{m,1}} \right) + 2\Lambda^2(\Lambda + 2\dot{u}_{m,1})$$

[0114] 则: $A_2 B_2^T = C - A_1 B_1^T$ 可转换为:

$$[0115] \quad \begin{bmatrix} \Lambda \dot{u}_{m,1}(\Lambda + 2\dot{u}_{m,1}) & \Lambda & (\Lambda + 2\dot{u}_{m,1}) & \frac{k\Lambda(\Lambda + 2\dot{u}_{m,1})}{i\Lambda + k\dot{u}_{m,1}} \\ \Lambda \dot{u}_{m,2}(\Lambda + 2\dot{u}_{m,2}) & \Lambda & (\Lambda + 2\dot{u}_{m,2}) & \frac{k\Lambda(\Lambda + 2\dot{u}_{m,2})}{i\Lambda + k\dot{u}_{m,2}} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \Lambda \dot{u}_{m,n}(\Lambda + 2\dot{u}_{m,n}) & \Lambda & (\Lambda + 2\dot{u}_{m,n}) & \frac{k\Lambda(\Lambda + 2\dot{u}_{m,n})}{i\Lambda + k\dot{u}_{m,n}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_{i,6} \\ b_{i,7} - \frac{\Lambda^2}{2} b_{i,5} \\ \Lambda^2 b_{i,8} + \Lambda b_{i,9} + \frac{\Lambda^2}{2} b_{i,5} + 2\Lambda^2 b_{i,12} \\ b_{i,11} + (1 - \frac{2i}{k})\Lambda^2 b_{i,12} \end{bmatrix} = \bar{C}$$

[0116] 令 $n=4$, 选择放缩参数 $\dot{u}_{m,5} - \dot{u}_{m,8}$ 满足:

$$[0117] \quad \det \begin{bmatrix} \Lambda \dot{u}_{m,5}(\Lambda + 2\dot{u}_{m,5}) & \Lambda & (\Lambda + 2\dot{u}_{m,5}) & \frac{k\Lambda(\Lambda + 2\dot{u}_{m,5})}{i\Lambda + k\dot{u}_{m,5}} \\ \Lambda \dot{u}_{m,6}(\Lambda + 2\dot{u}_{m,6}) & \Lambda & (\Lambda + 2\dot{u}_{m,6}) & \frac{k\Lambda(\Lambda + 2\dot{u}_{m,6})}{i\Lambda + k\dot{u}_{m,6}} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \Lambda \dot{u}_{m,8}(\Lambda + 2\dot{u}_{m,8}) & \Lambda & (\Lambda + 2\dot{u}_{m,8}) & \frac{k\Lambda(\Lambda + 2\dot{u}_{m,8})}{i\Lambda + k\dot{u}_{m,8}} \end{bmatrix} = \frac{4(2i-k)k^3\Lambda^4 \prod_{8 \geq p > q \geq 5} (\dot{u}_{m,q} - \dot{u}_{m,p})}{\prod_{8 \geq l \geq 5} (i\Lambda + k\dot{u}_{m,l})} \neq 0$$

[0118] 可识别第一组参数式:

$$[0119] \quad b_{i,6}$$

$$[0120] \quad b_{i,7} - \frac{\Lambda^2}{2} b_{i,5}$$

$$[0121] \quad \Lambda^2 b_{i,8} + \Lambda b_{i,9} + \frac{\Lambda^2}{2} b_{i,5} + 2\Lambda^2 b_{i,12}$$

$$[0122] \quad b_{i,11} + (1 - \frac{2i}{k})\Lambda^2 b_{i,12}$$

[0123] 43) 令所有的缩放轨迹满足约束 $\gamma_n = \dot{u}_{m+1,n} + \dot{u}_{m,n} = \Gamma$, Γ 为大于零的常数; 记:

$$[0124] \quad \hat{C} = C - A_1 B_1^T - \begin{bmatrix} \dot{u}_{m,1} \alpha_1 \gamma_1 \\ \dot{u}_{m,2} \alpha_2 \gamma_2 \\ \dots \\ \dot{u}_{m,n} \alpha_n \gamma_n \end{bmatrix} b_{i,6}$$

[0125] 由于 $b_{i,6}$ 已完成辨识, 且:

$$[0126] \quad \frac{k\Gamma^2(\Gamma - 2\dot{u}_{m,n})^2}{i\Gamma + (k-2i)\dot{u}_{m,n}} = \frac{k\Gamma^2}{k-2i} \left(\frac{k\Gamma(\Gamma - 2\dot{u}_{m,n})}{i\Gamma + (k-2i)\dot{u}_{m,n}} \right) - \frac{2k\Gamma}{k-2i}(\Gamma - 2\dot{u}_{m,n})$$

[0127] 故将 $A_2 B_2^T = C - A_1 B_1^T$ 转换为:

$$[0128] \begin{bmatrix} (\Gamma - 2\dot{u}_{m,1})^2 \dot{u}_{m,1} & \Gamma - 2\dot{u}_{m,1} & \Gamma(\Gamma - 2\dot{u}_{m,1})^2 & \frac{k\Gamma(\Gamma - 2\dot{u}_{m,1})}{i\Gamma + (k - 2i)\dot{u}_{m,1}} \\ (\Gamma - 2\dot{u}_{m,2})^2 \dot{u}_{m,2} & \Gamma - 2\dot{u}_{m,2} & \Gamma(\Gamma - 2\dot{u}_{m,2})^2 & \frac{k\Gamma(\Gamma - 2\dot{u}_{m,2})}{i\Gamma + (k - 2i)\dot{u}_{m,2}} \\ & & \dots & \\ (\Gamma - 2\dot{u}_{m,n})^2 \dot{u}_{m,n} & \Gamma - 2\dot{u}_{m,n} & \Gamma(\Gamma - 2\dot{u}_{m,n})^2 & \frac{k\Gamma(\Gamma - 2\dot{u}_{m,n})}{i\Gamma + (k - 2i)\dot{u}_{m,n}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_{i,5} \\ b_{i,7} + \Gamma b_{i,9} - \frac{2k\Gamma}{k - 2i} b_{i,12} \\ b_{i,8} \\ b_{i,11} + \frac{k\Gamma^2}{k - 2i} b_{i,12} \end{bmatrix} = \hat{C}$$

[0129] 令 $n=4$, 选择放缩参数 $\dot{u}_{m,9} - \dot{u}_{m,12}$ 满足:

$$[0130] \det \begin{bmatrix} (\Gamma - 2\dot{u}_{m,9})^2 \dot{u}_{m,9} & \Gamma - 2\dot{u}_{m,9} & \Gamma(\Gamma - 2\dot{u}_{m,9})^2 & \frac{k\Gamma(\Gamma - 2\dot{u}_{m,9})}{i\Gamma + (k - 2i)\dot{u}_{m,9}} \\ (\Gamma - 2\dot{u}_{m,10})^2 \dot{u}_{m,10} & \Gamma - 2\dot{u}_{m,10} & \Gamma(\Gamma - 2\dot{u}_{m,10})^2 & \frac{k\Gamma(\Gamma - 2\dot{u}_{m,10})}{i\Gamma + (k - 2i)\dot{u}_{m,10}} \\ & & \dots & \\ (\Gamma - 2\dot{u}_{m,12})^2 \dot{u}_{m,12} & \Gamma - 2\dot{u}_{m,12} & \Gamma(\Gamma - 2\dot{u}_{m,12})^2 & \frac{k\Gamma(\Gamma - 2\dot{u}_{m,12})}{i\Gamma + (k - 2i)\dot{u}_{m,12}} \end{bmatrix} \\ = \frac{4k(2i - k)^3 \Gamma^2 \prod_{12 \geq l \geq 9} (\Gamma - 2\dot{u}_{m,l}) \prod_{12 \geq p > q \geq 9} (\dot{u}_{m,q} - \dot{u}_{m,p})}{\prod_{12 \geq l \geq 9} (i\Gamma + (k - 2i)\dot{u}_{m,l})} \neq 0$$

[0131] 可识别第二组参数式:

$$[0132] b_{i,5}$$

$$[0133] b_{i,7} + \Gamma b_{i,9} - \frac{2k\Gamma}{k - 2i} b_{i,12}$$

$$[0134] b_{i,8}$$

$$[0135] b_{i,11} + \frac{k\Gamma^2}{k - 2i} b_{i,12}$$

[0136] 联立第一参数式和第二参数式, 由于 Λ 、 Γ 已知, 且选择 $\Gamma \neq 1$, 识别得到 $b_{i,5}$, $b_{i,6}$, $b_{i,7}$, $b_{i,8}$, $b_{i,9}$, $b_{i,11}$ 和 $b_{i,12}$, 即识别得到所有的能耗特征参数, 构建得到机器人能耗模型。

[0137] 本实施例的机器人并行双向动态能耗优化方法, 包括如下步骤:

[0138] S1: 结合时间缩放状态空间表达式建立时间缩放三维离散网格, 对缩放参数 \dot{u}_i 、 \dot{u}_{i+1} 进行搜索, 如图2所示;

[0139] S2: 基于机器人能耗模型以及状态转移方程对关节轨迹能耗进行迭代计算, 得到满足指定约束的能耗最优缩放轨迹及最优能耗值, 其中:

[0140] 指定约束为机器人在指定时间段上的位置约束、速度约束、加速度约束以及缩放后的整段轨迹执行时间;

[0141] 状态转移方程为:

$$[0142] \quad L_{m+1}(t_{m+1}, \dot{u}_{m+1}) = \min[E_m(\dot{u}_{m+1}, t_{m+1}, \dot{u}_m, t_m) + L_m(t_m, \dot{u}_m)]$$

$$[0143] \quad L_{N_u-m-1}(t_{N_u-m-1}, \dot{u}_{N_u-m-1}) = \min[E_{N_u-m}(\dot{u}_{N_u-m}, t_{N_u-m}, \dot{u}_{N_u-m-1}, t_{N_u-m-1}) + L_{N_u-m}(t_{N_u-m}, \dot{u}_{N_u-m})]$$

[0144] 其中, 状态变量 \dot{u}_{m+1} , \dot{u}_m , t_{m+1} , t_m 是在对应配置层上任意可能的状态, L_m 表示前向动态规划在第 m 层上的最低能量损耗, (t_m, \dot{u}_m) 表示在第 m 层上达到最低能量损耗时所对应的状态, E_m 表示从状态 (t_m, \dot{u}_m) 转移到 (t_{m+1}, \dot{u}_{m+1}) 时所需要的能量;

[0145] L_{N_u-m} 表示后向动态规划在第 $N_u - m$ 层上的最低能量损耗, E_{N_u-m} 表示从状态 $(\dot{u}_{N_u-m}, t_{N_u-m})$ 转移到 $(\dot{u}_{N_u-m-1}, t_{N_u-m-1})$ 时所需要的能量。

[0146] 下面结合机器人动力学对本发明机器人能耗模型构建方法及并行双向动态能耗优化方法的具体实施方式进行详细说明。

[0147] 1、机器人动力学方程

[0148] n 个永磁同步电机驱动的工业机器人动力学方程可表示为:

$$[0149] \quad \tau = M(q)\ddot{q} + (I_n \otimes \dot{q}^T) \begin{bmatrix} C_1(q) \\ \vdots \\ C_n(q) \end{bmatrix} \dot{q} + (F_c \operatorname{sgn}(\dot{q}) + F_v \dot{q}) + \frac{\partial H(q)}{\partial q} + J^T(q) \left(\begin{bmatrix} m\ddot{x} \\ \Gamma\dot{\omega} + \omega \times \Gamma\omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} mg \\ O \end{bmatrix} \right) \quad (1)$$

[0150] 其中, $\tau \in \mathbb{R}^n$ 为关节力矩; $q \in \mathbb{R}^n$, $\dot{q} \in \mathbb{R}^n$, $\ddot{q} \in \mathbb{R}^n$ 分别为关节位置、速度、加速度; $M \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 为正定惯性矩阵; $I_n \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 表示单位矩阵; \otimes 为克罗内克积; $C_i \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $(i = 1, \dots, n)$ 为第 i 个关节上的科式力和离心力系数矩阵; $F_c \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 和 $F_v \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 是对角矩阵, 其对角元素分别代表对应关节的库仑摩擦系数和粘性阻尼系数; $\operatorname{sgn}(\cdot)$ 为符号函数; H 表示机器人的重力势能; $J = [J_1^T \quad J_2^T]^T \in \mathbb{R}^{6 \times n}$, $J_1 \in \mathbb{R}^{3 \times n}$, $J_2 \in \mathbb{R}^{3 \times n}$ 为机器人速度雅可比矩阵; $m \in \mathbb{R}$, $\Gamma \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ 分别为负载的质量和惯性矩阵; $\dot{x} \in \mathbb{R}$, $\omega \in \mathbb{R}^3$ 分别为负载相对于全局坐标系的线速度、角速度; $g \in \mathbb{R}^3$ 为重力加速度; $O \in \mathbb{R}^3$ 为零向量。

[0151] 2、永磁同步电机功率

[0152] 工业机器人永磁同步电机输入功率可表示为:

$$[0153] \quad P_{PMSM} = \tau^T S_1 \tau + \tau^T S_2 \dot{q} \quad (2)$$

[0154] S_1 和 S_2 的定义如下:

$$[0155] \quad S_1 = R(K_R K_T)^{-2} \quad (3)$$

$$[0156] \quad S_2 = K_T^{-1} K_V \quad (4)$$

[0157] 其中 $R \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $K_V \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $K_R \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $K_T \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 为对角阵, 分别为定子电阻、传动比、电机转矩常数。

[0158] 由于工业机器人其他部件能耗功率近似为常数, 故工业机器人总能耗可表示为:

$$[0159] \quad E(t) = \int_0^t (P_{PMSM} + P_{other}) dt \quad (5)$$

[0160] 3、动态时间缩放技术

[0161] 动态时间尺度缩放方法是采用关于时间的非线性函数作为时间缩放因子,对机器人参考机器人轨迹 $q_r(t_r)$ 的运行时间进行缩放,其表达式为:

$$[0162] \quad t_r = u(t) \quad (6)$$

[0163] 其中, t_r 表示机器人预定义的任务执行时间, t 表示缩放后的任务执行时间, $u(t) > 0$ 且单调递增。

[0164] 将 $u(t)$ 表示为 u ,则缩放后机器人的关节位置、速度、加速度为:

$$[0165] \quad q_s(t) = q_r(u) \quad (7)$$

$$[0166] \quad \dot{q}_s(t) = \frac{dq_r(u)}{du} \frac{du}{dt} = \dot{u} \frac{dq_r(u)}{du} \quad (8)$$

$$[0167] \quad \ddot{q}_s(t) = \frac{d\dot{u}}{dt} \frac{dq_r(u)}{du} + \dot{u} \frac{d\left(\frac{dq_r(u)}{du}\right)}{dt} = \ddot{u} \frac{dq_r(u)}{du} + \dot{u}^2 \frac{d^2q_r(u)}{du^2} \quad (9)$$

[0168] 其中 $\frac{dq_r(u)}{du}$, $\frac{d^2q_r(u)}{du^2}$ 是参考轨迹 q_r 关于参考时间 t_r 的一阶导数和二阶导数, \dot{u} 和 \ddot{u}

分别是 u 关于 t 的一阶导数和二阶导数。为了简化公式,将 $q_r(u)$, $\frac{dq_r(u)}{du}$, $\frac{d^2q_r(u)}{du^2}$ 表示为 q_r ,

\dot{q}_r , \ddot{q}_r ,分别代表参考轨迹的关节位置,速度和加速度。

[0169] 将(7)(8)(9)代入(1)可得:

$$[0170] \quad \begin{aligned} \tau_s = & M(q_r)(\ddot{u}\dot{q}_r + \dot{u}^2\ddot{q}_r) + \dot{u}^2(I_n \otimes \dot{q}_r^T) \begin{bmatrix} C_1(q_r) \\ \vdots \\ C_n(q_r) \end{bmatrix} \dot{q}_r + (F_c \text{sgn}(\dot{q}) + \dot{u}F_v \dot{q}_r) \\ & + \frac{\partial H(q_r)}{\partial q_r} + J^T(q_r) \left(\begin{bmatrix} m\ddot{x}_s \\ \Gamma\dot{\omega}_s + \omega_s \times \Gamma\omega_s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} mg \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \right) \end{aligned} \quad (10)$$

[0171] 其中:

$$[0172] \quad \begin{aligned} \ddot{x}_s = & J_1(q_r)(\ddot{u}\dot{q}_r + \dot{u}^2\ddot{q}_r) + \dot{J}_1(q_r)\dot{u}^2\dot{q}_r \\ \omega_s = & \dot{u}J_2(q_r)\dot{q}_r \end{aligned} \quad (11)$$

$$\dot{\omega}_s = J_2(q_r)(\ddot{u}\dot{q}_r + \dot{u}^2\ddot{q}_r) + \dot{J}_2(q_r)\dot{u}^2\dot{q}_r$$

[0173] 将(10)进行参数分离得:

$$[0174] \quad \tau_s = \dot{u}^2 k_1 + \dot{u} k_2 + k_3 + \dot{u} k_4 \quad (12)$$

[0175] 其中:

$$\begin{aligned}
\mathbf{k}_1 &= \mathbf{M}(\mathbf{q}_r)\ddot{\mathbf{q}}_r + (\mathbf{I}_n \otimes \dot{\mathbf{q}}_r^T) \begin{bmatrix} \mathbf{C}_1(\mathbf{q}_r) \\ \vdots \\ \mathbf{C}_n(\mathbf{q}_r) \end{bmatrix} \dot{\mathbf{q}}_r \\
&+ \mathbf{J}^T(\mathbf{q}_r) \begin{bmatrix} m\mathbf{J}_1(\mathbf{q}_r)\ddot{\mathbf{q}}_r + m\dot{\mathbf{J}}_1(\mathbf{q}_r)\dot{\mathbf{q}}_r \\ \boldsymbol{\Gamma}\mathbf{J}_2(\mathbf{q}_r)\ddot{\mathbf{q}}_r + \boldsymbol{\Gamma}\dot{\mathbf{J}}_2(\mathbf{q}_r)\dot{\mathbf{q}}_r + \mathbf{J}_2(\mathbf{q}_r)\dot{\mathbf{q}}_r \times \boldsymbol{\Gamma}\mathbf{J}_2(\mathbf{q}_r)\dot{\mathbf{q}}_r \end{bmatrix} \\
\mathbf{k}_2 &= \mathbf{F}_v\dot{\mathbf{q}}_r \\
\mathbf{k}_3 &= \mathbf{F}_c \operatorname{sgn}(\dot{\mathbf{q}}) + \frac{\partial H(\mathbf{q}_r)}{\partial \mathbf{q}_r} + \mathbf{J}^T(\mathbf{q}_r) \begin{bmatrix} m\mathbf{g} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \\
\mathbf{k}_4 &= \mathbf{M}(\mathbf{q}_r)\dot{\mathbf{q}}_r + \mathbf{J}^T(\mathbf{q}_r) \begin{bmatrix} m\mathbf{J}_1(\mathbf{q}_r)\dot{\mathbf{q}}_r \\ \boldsymbol{\Gamma}\mathbf{J}_2(\mathbf{q}_r)\dot{\mathbf{q}}_r \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{13}$$

[0177] 将(12)代入(2),并进行参数分离,得动态时间尺度缩放后的工业机器人总功率为:

$$\begin{aligned}
P &= \boldsymbol{\tau}_s^T \mathbf{S}_1 \boldsymbol{\tau}_s + \dot{\mathbf{u}} \boldsymbol{\tau}_s^T \mathbf{S}_2 \dot{\mathbf{q}}_r + P_{other} \\
&= a_1 \dot{\mathbf{u}}^4 + a_2 \dot{\mathbf{u}}^3 + (a_{31} + a_{32} \ddot{\mathbf{u}}) \dot{\mathbf{u}}^2 + (a_{41} + a_{42} \ddot{\mathbf{u}}) \dot{\mathbf{u}} + (a_{51} + a_{52} \ddot{\mathbf{u}}^2 + a_{53} \ddot{\mathbf{u}})
\end{aligned} \tag{14}$$

[0179] 其中:

$$\begin{aligned}
a_1 &= \mathbf{k}_1^T \mathbf{S}_1 \mathbf{k}_1 \\
a_2 &= \mathbf{k}_1^T \mathbf{S}_1 \mathbf{k}_2 + \mathbf{k}_2^T \mathbf{S}_1 \mathbf{k}_1 + \mathbf{k}_1^T \mathbf{S}_2 \dot{\mathbf{q}}_r \\
a_{31} &= \mathbf{k}_1^T \mathbf{S}_1 \mathbf{k}_3 + \mathbf{k}_2^T \mathbf{S}_1 \mathbf{k}_2 + \mathbf{k}_3^T \mathbf{S}_1 \mathbf{k}_1 + \mathbf{k}_2^T \mathbf{S}_2 \dot{\mathbf{q}}_r \\
a_{32} &= \mathbf{k}_1^T \mathbf{S}_1 \mathbf{k}_4 + \mathbf{k}_4^T \mathbf{S}_1 \mathbf{k}_1 \\
a_{41} &= \mathbf{k}_2^T \mathbf{S}_1 \mathbf{k}_3 + \mathbf{k}_3^T \mathbf{S}_1 \mathbf{k}_2 + \mathbf{k}_3^T \mathbf{S}_2 \dot{\mathbf{q}}_r \\
a_{42} &= \mathbf{k}_2^T \mathbf{S}_1 \mathbf{k}_4 + \mathbf{k}_4^T \mathbf{S}_1 \mathbf{k}_2 + \mathbf{k}_4^T \mathbf{S}_2 \dot{\mathbf{q}}_r \\
a_{51} &= \mathbf{k}_3^T \mathbf{S}_1 \mathbf{k}_3 + P_{add, const} \\
a_{52} &= \mathbf{k}_4^T \mathbf{S}_1 \mathbf{k}_4 \\
a_{53} &= \mathbf{k}_4^T \mathbf{S}_1 \mathbf{k}_3 + \mathbf{k}_3^T \mathbf{S}_1 \mathbf{k}_4
\end{aligned} \tag{15}$$

[0181] 4、机器人能耗模型

[0182] 将机器人预设运动轨迹 \mathbf{q}_r 在时域上均匀地划分为 N_u 个控制段, $m \in \{0, \dots, N_u - 1\}$, 并假设 $\ddot{\mathbf{u}}$ 在每个控制段为常量,则由(14)得控制段 $[u_m, u_{m+1}]$ 上的能耗可表示为:

$$\begin{aligned}
E_m &= \int_{t_m}^{t_{m+1}} P dt = \int_{u_m}^{u_{m+1}} \frac{P}{\dot{\mathbf{u}}} d\mathbf{u} \\
&= \int_{u_m}^{u_{m+1}} (\dot{\mathbf{u}}^2 a_2 + a_{41} + a_{42} \ddot{\mathbf{u}}) d\mathbf{u} + \int_{u_m}^{u_{m+1}} (\dot{\mathbf{u}}^3 a_1 + \dot{\mathbf{u}}(a_{31} + a_{32} \ddot{\mathbf{u}})) d\mathbf{u} \\
&\quad + \int_{u_m}^{u_{m+1}} (a_{51} + a_{52} \ddot{\mathbf{u}}^2 + a_{53} \ddot{\mathbf{u}}) \dot{\mathbf{u}}^{-1} d\mathbf{u}.
\end{aligned} \tag{16}$$

[0184] 又在 $[u_m, u_{m+1}]$ 上 u , $\dot{\mathbf{u}}$ 和 $\ddot{\mathbf{u}}$ 可以表示为:

$$u = u_m + \dot{u}_m(t - t_m) + \frac{1}{2}\ddot{u}_m(t - t_m)^2$$

$$[0185] \quad \dot{u} = \dot{u}_m + \ddot{u}_m(t - t_m) \quad (17)$$

$$\ddot{u} = \ddot{u}_m = \frac{\dot{u}_{m+1} - \dot{u}_m}{t_{m+1} - t_m}$$

[0186] 其中, $t \in [t_m, t_{m+1}]$ 。

[0187] 由于(16)式积分变量为 u ,为了消除参数 t , \dot{u} 可以改写为:

$$[0188] \quad \dot{u} = \sqrt{2\ddot{u}_m(u - u_m) + \dot{u}_m^2}, u \in [u_m, u_{m+1}] \quad (18)$$

[0189] 为消除(16)式 \dot{u} 一次项及三次项,将 \dot{u} 进行线性近似得:

$$[0190] \quad \dot{u} = \dot{u}_m + \frac{\dot{u}_{m+1} - \dot{u}_m}{u_{m+1} - u_m}(u - u_m), u \in [u_m, u_{m+1}] \quad (19)$$

[0191] 为消除(16)式 \dot{u} 负一次项,将每个控制段 $[u_m, u_{m+1}]$ 均匀地分为 k 个采样段,如图3所示, $i \in \{0, \dots, k-1\}$,将 \dot{u} 进行阶梯近似得:

$$[0192] \quad \dot{u} = \varepsilon_i = \begin{cases} \frac{i \cdot \dot{u}_{m+1} + (k-i)\dot{u}_m}{k} & u \in [\beta_i, \beta_{i+1}) \text{ and} \\ & i \in \{0, \dots, k-1\} \\ \frac{(k-1)\dot{u}_{m+1} + \dot{u}_m}{k} & \text{others} \end{cases} \quad (20)$$

[0193] 其中, β_i 的定义为:

$$[0194] \quad \beta_i = \frac{i \cdot u_{m+1} + (k-i)u_m}{k} \quad i \in \{0, \dots, k\} \quad (21)$$

[0195] 将(18) (19) (20)代入(16),同时又 \dot{u}_m , \dot{u}_{m+1} , t_m , t_{m+1} 和 \ddot{u}_m 在区间 $[u_m, u_{m+1}]$ 均为常数,则:

$$[0196] \quad \begin{aligned} E_m = & \ddot{u}_m \int_{u_m}^{u_{m+1}} (2(u - u_m)a_2 + a_{42})du + \dot{u}_m^2 \int_{u_m}^{u_{m+1}} a_2 du \\ & + \int_{u_m}^{u_{m+1}} a_{41} du + \dot{u}_m^3 \int_{u_m}^{u_{m+1}} a_1 du + \frac{3\alpha \dot{u}_m^2}{\Delta} \int_{u_m}^{u_{m+1}} (u - u_m)a_1 du \\ & + \frac{3\alpha^2 \dot{u}_m}{\Delta^2} \int_{u_m}^{u_{m+1}} (u - u_m)^2 a_1 du + \frac{\alpha^3}{\Delta^3} \int_{u_m}^{u_{m+1}} (u - u_m)^3 a_1 du \\ & + \dot{u}_m \int_{u_m}^{u_{m+1}} a_{31} du + \ddot{u}_m \dot{u}_m \int_{u_m}^{u_{m+1}} a_{32} du + \frac{\alpha}{\Delta} \int_{u_m}^{u_{m+1}} (u - u_m)a_{31} du \\ & + \frac{\alpha \ddot{u}_m}{\Delta} \int_{u_m}^{u_{m+1}} (u - u_m)a_{32} du + \sum_{i=0}^{k-1} \frac{k}{(k-i)\dot{u}_m + i\dot{u}_{m+1}} \\ & \cdot \left(\int_{\beta_i}^{\beta_{i+1}} a_{51} du + \dot{u}_m^2 \int_{\beta_i}^{\beta_{i+1}} a_{52} du + \ddot{u}_m \int_{\beta_i}^{\beta_{i+1}} a_{53} du \right) \end{aligned} \quad (22)$$

[0197] 其中 $\alpha = \dot{u}_{m+1} - \dot{u}_m$ 。

[0198] 令 $\gamma = \dot{u}_{m+1} + \dot{u}_m$,则 $\ddot{u}_m = \alpha \gamma / 2 \Delta$ 。又因:

$$[0199] \quad \frac{3\alpha\dot{u}_m^2}{\Delta} = 3\ddot{u}_m\dot{u}_m - \frac{3}{2\Delta}\alpha^2\dot{u}_m \quad (23)$$

$$\frac{\alpha^3}{\Delta^3} = \frac{2}{\Delta} \left(\frac{\alpha\ddot{u}_m}{\Delta} - \frac{\alpha^2\dot{u}_m}{\Delta^2} \right)$$

[0200] 故可将(22)式化为:

$$[0201] \quad \begin{aligned} E_m &= E_m(\dot{u}_{m+1}, t_{m+1}, \dot{u}_m, t_m) \\ &= b_1\dot{u}_m^3 + b_2\dot{u}_m^2 + b_3\dot{u}_m + b_4 \\ &\quad + b_5\dot{u}_m\alpha^2 + b_6\dot{u}_m\alpha\gamma + b_7\alpha + b_8\alpha^2\gamma + b_9\alpha\gamma \\ &\quad + \sum_{i=0}^{k-1} \frac{b_{i,10} + b_{i,11}\alpha\gamma + b_{i,12}\alpha^2\gamma^2}{\varepsilon_i} \end{aligned} \quad (24)$$

[0202] 其中, $b_j, j \in \{1, \dots, 9\}$ 及 $b_{i,10}, b_{i,11}, b_{i,12}, i \in \{0, \dots, k-1\}$ 是能耗特征参数, 在区间 $[u_m, u_{m+1}]$ 上均为常数, 其表达式如下:

$$[0203] \quad \begin{aligned} b_1 &= \int_{u_m}^{u_{m+1}} a_1 du & b_2 &= \int_{u_m}^{u_{m+1}} a_2 du \\ b_3 &= \int_{u_m}^{u_{m+1}} a_{31} du & b_4 &= \int_{u_m}^{u_{m+1}} a_{41} du \\ b_5 &= \frac{3}{\Delta^2} \int_{u_m}^{u_{m+1}} (u-u_m)^2 a_1 du - \frac{3}{2\Delta} \int_{u_m}^{u_{m+1}} (u-u_m) a_1 du - \frac{2}{\Delta^3} \int_{u_m}^{u_{m+1}} (u-u_m)^3 a_1 du \\ b_6 &= \frac{1}{2\Delta} \int_{u_m}^{u_{m+1}} a_{32} du + \frac{3}{2\Delta} \int_{u_m}^{u_{m+1}} (u-u_m) a_1 du \\ b_7 &= \frac{1}{\Delta} \int_{u_m}^{u_{m+1}} (u-u_m) a_{31} du \\ b_8 &= \frac{1}{2\Delta^2} \int_{u_m}^{u_{m+1}} (u-u_m) a_{32} du + \frac{1}{\Delta^3} \int_{u_m}^{u_{m+1}} (u-u_m)^3 a_1 du \\ b_9 &= \frac{1}{2\Delta} \int_{u_m}^{u_{m+1}} (2(u-u_m)a_2 + a_{42}) du \\ b_{i,10} &= \int_{\beta_i}^{\beta_{i+1}} a_{51} du & b_{i,11} &= \frac{1}{2\Delta} \int_{\beta_i}^{\beta_{i+1}} a_{52} du \\ b_{i,12} &= \frac{1}{4\Delta^2} \int_{\beta_i}^{\beta_{i+1}} a_{53} du \end{aligned} \quad (25)$$

[0204] 因此 E_m 是关于 $\dot{u}_{m+1}, \dot{u}_m, t_{m+1}, t_m$ 四个参数的函数, 故通过将 $\dot{u}_{m+1}, \dot{u}_m, t_{m+1}, t_m$ 替换为对应的状态变量, 就可以得到对应配置层之间任意状态转换的能量代价, 进而求得工业机器人运行过程最佳能耗值及最佳缩放轨迹。

[0205] 5、能耗特征参数辨识

[0206] 能耗特征参数 $b_1 - b_{i,12}$ 仅与预设轨迹及机器人自身特性相关, 而与缩放参数无关。因此通过寻找合适的 n 条缩放轨迹并采集机器人在相应采样段的能耗数据, 完成对能耗特

征参数的辨识,从而在无需预知任何机器人自身特性的情况下完成机器人能耗特征方程建模及最优能耗轨迹规划,具有重要意义。

[0207] 但由于(24)式能耗特征参数个数过多,且数量随信号采集装置及希望达到的计算精度决定,故可由下式将积分 $b_j, j \in \{1, \dots, 9\}$ 进行分解:

$$[0208] \quad \int_{u_m}^{u_{m+1}} du = \sum_{i=0}^{k-1} \int_{\beta_i}^{\beta_{i+1}} du \quad (26)$$

[0209] 故将 E_m 可改写为:

$$[0210] \quad E_m = \sum_{i=0}^{k-1} E_{m,i} \quad (27)$$

[0211] 其中, $E_{m,i}$ 为第 m 个控制段的第 i 个采样段的能耗特征方程:

$$[0212] \quad \begin{aligned} E_{m,i} = & b_{i,1} \dot{u}_m^3 + b_{i,2} \dot{u}_m^2 + b_{i,3} \dot{u}_m + b_{i,4} \\ & + b_{i,5} \dot{u}_m \alpha^2 + b_{i,6} \dot{u}_m \alpha \gamma + b_{i,7} \alpha + b_{i,8} \alpha^2 \gamma + b_{i,9} \alpha \gamma \\ & + \frac{(b_{i,10} + b_{i,11} \alpha \gamma + b_{i,12} \alpha^2 \gamma^2)}{\varepsilon_i} \end{aligned} \quad (28)$$

[0213] 其中, $b_{i,1} - b_{i,9}$ 为将 $b_1 - b_9$ 按式(26)进行分解后的能耗特征参数。

[0214] 此时从采样点角度出发, $[\beta_i, \beta_{i+1}]$ 间能耗特征参数个数固定为12,且为常数。

[0215] 由式(28)可知, n 条缩放轨迹在第 m 个控制段第 i 个采样段上满足如下方程组:

$$[0216] \quad AB = C \quad (29)$$

[0217] 其中:

$$[0218] \quad A = [A_1 \ A_2] \quad (30)$$

$$[0219] \quad A_1 = \begin{bmatrix} \dot{u}_{m,1}^3 & \dot{u}_{m,1}^2 & \dot{u}_{m,1} & 1 & \frac{1}{\varepsilon_{i,1}} \\ \dot{u}_{m,2}^3 & \dot{u}_{m,2}^2 & \dot{u}_{m,2} & 1 & \frac{1}{\varepsilon_{i,2}} \\ & & \dots & & \\ \dot{u}_{m,n}^3 & \dot{u}_{m,n}^2 & \dot{u}_{m,n} & 1 & \frac{1}{\varepsilon_{i,n}} \end{bmatrix} \quad (31)$$

$$[0220] \quad A_2 = \begin{bmatrix} \dot{u}_{m,1} \alpha_1^2 & \dot{u}_{m,1} \alpha_1 \gamma_1 & \alpha_1 & \alpha_1^2 \gamma_1 & \alpha_1 \gamma_1 & \frac{\alpha_1 \gamma_1}{\varepsilon_{i,1}} & \frac{\alpha_1^2 \gamma_1^2}{\varepsilon_{i,1}} \\ \dot{u}_{m,2} \alpha_2^2 & \dot{u}_{m,2} \alpha_2 \gamma_2 & \alpha_2 & \alpha_2^2 \gamma_2 & \alpha_2 \gamma_2 & \frac{\alpha_2 \gamma_2}{\varepsilon_{i,2}} & \frac{\alpha_2^2 \gamma_2^2}{\varepsilon_{i,2}} \\ & & \dots & & & & \\ \dot{u}_{m,n} \alpha_n^2 & \dot{u}_{m,n} \alpha_n \gamma_n & \alpha_n & \alpha_n^2 \gamma_n & \alpha_n \gamma_n & \frac{\alpha_n \gamma_n}{\varepsilon_{i,n}} & \frac{\alpha_n^2 \gamma_n^2}{\varepsilon_{i,n}} \end{bmatrix} \quad (32)$$

$$[0221] \quad \varepsilon_{i,n} = \frac{(k-i)\dot{u}_{m,n} + i\dot{u}_{m+1,n}}{k} \quad (33)$$

[0222] $B = [B_1 \ B_2]^T \quad (34)$

[0223] $B_1 = [b_{i,1} \ b_{i,2} \ b_{i,3} \ b_{i,4} \ b_{i,10}] \quad (35)$

[0224] $B_2 = [b_{i,5} \ b_{i,6} \ b_{i,7} \ b_{i,8} \ b_{i,9} \ b_{i,11} \ b_{i,12}] \quad (36)$

[0225] $C = [E_{m,i,1} \ E_{m,i,2} \ \cdots \ E_{m,i,n}]^T \quad (37)$

[0226] 故当A列满秩时,可得超定方程组的极小最小二乘解:

[0227] $B = (A^T A)^{-1} A^T C \quad (38)$

[0228] 但由于A矩阵阶数过高,导致(38)式在实际应用到实际生产中时必须采集足够多的缩放轨迹,这势必增加时间成本与人工成本等。

[0229] 为此本实施例给出三步辨识法理论推导过程,仅需13条缩放轨迹,即完成辨识。

[0230] 第一步:线性化缩放部分能耗特征参数辨识

[0231] 当第m个控制段 $[u_m, u_{m+1}]$ 上 $\ddot{u}_m = 0$ 时, A_2 恒为零,此时 $\dot{u}_m = \dot{u}_{m+1}$,式(29)退化为线性时间缩放下的超定方程组,此时式(38)化为:

[0232] $B_1^T = A_1^{-1} C \quad (39)$

[0233] 此时取 $n=5$,并使 $\dot{u}_{m,1}, \dot{u}_{m,2}, \dot{u}_{m,3}, \dot{u}_{m,4}, \dot{u}_{m,5}$ 满足:

[0234] $\det(A_1) = \frac{\prod_{5 \geq p > q \geq 1} (\dot{u}_{m,q} - \dot{u}_{m,p})}{\prod_{5 \geq l \geq 1} (\dot{u}_{m,l})} \neq 0 \quad (40)$

[0235] 即可使 $\text{rank}(A_1) = 5$,并由式 $B_1^T = A_1^{-1} C$ 完成对 $b_{i,1}, b_{i,2}, b_{i,3}, b_{i,4}, b_{i,10}$ 的辨识。

[0236] 第二步:非线性缩放部分能耗特征参数辨识

[0237] 完成对 $b_{i,1}, b_{i,2}, b_{i,3}, b_{i,4}, b_{i,10}$ 的辨识后,式(29)可变化为:

[0238] $A_2 B_2^T = C - A_1 B_1^T \quad (41)$

[0239] 此时 A_2 仍然阶数较高,难以直接确定完成对 B_2 参数的辨识所需的最小缩放轨迹个数。

[0240] 因此采用分治策略(分治法),降低 A_2 阶数,分离 B_2 参数,以完成对 B_2 参数的辨识,具体步骤为,当 $\ddot{u}_m \neq 0$:

[0241] 步骤1,令所有的缩放轨迹满足约束 $\alpha_n = \dot{u}_{m+1,n} - \dot{u}_{m,n} = \Lambda$, Λ 为不等零的常数。

[0242] 此时,记:

[0243] $\bar{C} = C - A_1 B_1^T \quad (42)$

[0244] 则因:

[0245] $\Lambda^2 \dot{u}_{m,n} = \frac{\Lambda^2}{2} ((\Lambda + 2\dot{u}_{m,n}) - \Lambda)$
 $\frac{k\Lambda^2 (\Lambda + 2\dot{u}_{m,n})^2}{i\Lambda + k\dot{u}_{m,n}} = (1 - \frac{2i}{k}) \Lambda^2 (\frac{k\Lambda (\Lambda + 2\dot{u}_{m,n})}{i\Lambda + k\dot{u}_{m,n}}) + 2\Lambda^2 (\Lambda + 2\dot{u}_{m,n}) \quad (43)$

[0246] 故式(42)可化为:

$$[0247] \quad \begin{bmatrix} \Lambda \dot{u}_{m,1}(\Lambda + 2\dot{u}_{m,1}) & \Lambda & (\Lambda + 2\dot{u}_{m,1}) & \frac{k\Lambda(\Lambda + 2\dot{u}_{m,1})}{i\Lambda + k\dot{u}_{m,1}} \\ \Lambda \dot{u}_{m,2}(\Lambda + 2\dot{u}_{m,2}) & \Lambda & (\Lambda + 2\dot{u}_{m,2}) & \frac{k\Lambda(\Lambda + 2\dot{u}_{m,2})}{i\Lambda + k\dot{u}_{m,2}} \\ & \dots & & \\ \Lambda \dot{u}_{m,n}(\Lambda + 2\dot{u}_{m,n}) & \Lambda & (\Lambda + 2\dot{u}_{m,n}) & \frac{k\Lambda(\Lambda + 2\dot{u}_{m,n})}{i\Lambda + k\dot{u}_{m,n}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_{i,6} \\ b_{i,7} - \frac{\Lambda^2}{2} b_{i,5} \\ \Lambda^2 b_{i,8} + \Lambda b_{i,9} + \frac{\Lambda^2}{2} b_{i,5} + 2\Lambda^2 b_{i,12} \\ b_{i,11} + (1 - \frac{2i}{k}) \Lambda^2 b_{i,12} \end{bmatrix} = \bar{C} \quad (44)$$

[0248] 则此时取 $n=4$,同时当 $\dot{u}_{m,5} - \dot{u}_{m,8}$ 满足:

$$[0249] \quad \det \left(\begin{bmatrix} \Lambda \dot{u}_{m,5}(\Lambda + 2\dot{u}_{m,5}) & \Lambda & (\Lambda + 2\dot{u}_{m,5}) & \frac{k\Lambda(\Lambda + 2\dot{u}_{m,5})}{i\Lambda + k\dot{u}_{m,5}} \\ \Lambda \dot{u}_{m,6}(\Lambda + 2\dot{u}_{m,6}) & \Lambda & (\Lambda + 2\dot{u}_{m,6}) & \frac{k\Lambda(\Lambda + 2\dot{u}_{m,6})}{i\Lambda + k\dot{u}_{m,6}} \\ & \dots & & \\ \Lambda \dot{u}_{m,8}(\Lambda + 2\dot{u}_{m,8}) & \Lambda & (\Lambda + 2\dot{u}_{m,8}) & \frac{k\Lambda(\Lambda + 2\dot{u}_{m,8})}{i\Lambda + k\dot{u}_{m,8}} \end{bmatrix} \right) \quad (45)$$

$$= \frac{4(2i-k)k^3\Lambda^4 \prod_{8 \geq p > q \geq 5} (\dot{u}_{m,q} - \dot{u}_{m,p})}{\prod_{8 \geq l \geq 5} (i\Lambda + k\dot{u}_{m,l})} \neq 0$$

[0250] 此时,可完成对下列能耗特征参数的辨识:

$$[0251] \quad \begin{bmatrix} b_{i,6} \\ b_{i,7} - \frac{\Lambda^2}{2} b_{i,5} \\ \Lambda^2 b_{i,8} + \Lambda b_{i,9} + \frac{\Lambda^2}{2} b_{i,5} + 2\Lambda^2 b_{i,12} \\ b_{i,11} + (1 - \frac{2i}{k}) \Lambda^2 b_{i,12} \end{bmatrix} \quad (46)$$

[0252] 步骤二:令所有的缩放轨迹满足约束 $\gamma_n = \dot{u}_{m+1,n} + \dot{u}_{m,n} = \Gamma$, Γ 为大于零的常数。

[0253] 此时,记:

$$[0254] \quad \hat{C} = C - A_1 B_1^T - \begin{bmatrix} \dot{u}_{m,1} \alpha_1 \gamma_1 \\ \dot{u}_{m,2} \alpha_2 \gamma_2 \\ \dots \\ \dot{u}_{m,n} \alpha_n \gamma_n \end{bmatrix} b_{i,6} \quad (47)$$

[0255] 由于 $b_{i,6}$ 已完成辨识,又:

$$[0256] \quad \frac{k\Gamma^2(\Gamma - 2\dot{u}_{m,n})^2}{i\Gamma + (k-2i)\dot{u}_{m,n}} = \frac{k\Gamma^2}{k-2i} \left(\frac{k\Gamma(\Gamma - 2\dot{u}_{m,n})}{i\Gamma + (k-2i)\dot{u}_{m,n}} \right) - \frac{2k\Gamma}{k-2i} (\Gamma - 2\dot{u}_{m,n}) \quad (48)$$

[0257] 故(47)式可化为:

$$[0258] \begin{bmatrix} (\Gamma - 2\dot{u}_{m,1})^2 \dot{u}_{m,1} & \Gamma - 2\dot{u}_{m,1} & \Gamma(\Gamma - 2\dot{u}_{m,1})^2 & \frac{k\Gamma(\Gamma - 2\dot{u}_{m,1})}{i\Gamma + (k - 2i)\dot{u}_{m,1}} \\ (\Gamma - 2\dot{u}_{m,2})^2 \dot{u}_{m,2} & \Gamma - 2\dot{u}_{m,2} & \Gamma(\Gamma - 2\dot{u}_{m,2})^2 & \frac{k\Gamma(\Gamma - 2\dot{u}_{m,2})}{i\Gamma + (k - 2i)\dot{u}_{m,2}} \\ & & \dots & \\ (\Gamma - 2\dot{u}_{m,n})^2 \dot{u}_{m,n} & \Gamma - 2\dot{u}_{m,n} & \Gamma(\Gamma - 2\dot{u}_{m,n})^2 & \frac{k\Gamma(\Gamma - 2\dot{u}_{m,n})}{i\Gamma + (k - 2i)\dot{u}_{m,n}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_{i,5} \\ b_{i,7} + \Gamma b_{i,9} - \frac{2k\Gamma}{k - 2i} b_{i,12} \\ b_{i,8} \\ b_{i,11} + \frac{k\Gamma^2}{k - 2i} b_{i,12} \end{bmatrix} = \hat{C} \quad (49)$$

[0259] 则此时取 $n=4$,同时当 $\dot{u}_{m,9} - \dot{u}_{m,12}$ 满足:

$$[0260] \det \begin{pmatrix} (\Gamma - 2\dot{u}_{m,9})^2 \dot{u}_{m,9} & \Gamma - 2\dot{u}_{m,9} & \Gamma(\Gamma - 2\dot{u}_{m,9})^2 & \frac{k\Gamma(\Gamma - 2\dot{u}_{m,9})}{i\Gamma + (k - 2i)\dot{u}_{m,9}} \\ (\Gamma - 2\dot{u}_{m,10})^2 \dot{u}_{m,10} & \Gamma - 2\dot{u}_{m,10} & \Gamma(\Gamma - 2\dot{u}_{m,10})^2 & \frac{k\Gamma(\Gamma - 2\dot{u}_{m,10})}{i\Gamma + (k - 2i)\dot{u}_{m,10}} \\ & & \dots & \\ (\Gamma - 2\dot{u}_{m,12})^2 \dot{u}_{m,12} & \Gamma - 2\dot{u}_{m,12} & \Gamma(\Gamma - 2\dot{u}_{m,12})^2 & \frac{k\Gamma(\Gamma - 2\dot{u}_{m,12})}{i\Gamma + (k - 2i)\dot{u}_{m,12}} \end{pmatrix} \quad (50)$$

$$= \frac{4k(2i - k)^3 \Gamma^2 \prod_{12 \geq l \geq 9} (\Gamma - 2\dot{u}_{m,l}) \prod_{12 \geq p > q \geq 9} (\dot{u}_{m,q} - \dot{u}_{m,p})}{\prod_{12 \geq l \geq 9} (i\Gamma + (k - 2i)\dot{u}_{m,l})} \neq 0$$

[0261] 此时,可完成对下列能耗特征参数的辨识:

$$[0262] \begin{matrix} b_{i,5} \\ b_{i,7} + \Gamma b_{i,9} - \frac{2k\Gamma}{k - 2i} b_{i,12} \\ b_{i,8} \\ b_{i,11} + \frac{k\Gamma^2}{k - 2i} b_{i,12} \end{matrix} \quad (51)$$

[0263] 结合式(46),即可完成对 $b_{i,5}, b_{i,8}, b_{i,7}$ 的辨识。

[0264] 另外,通过联立 $\Lambda b_{i,9} + 2\Lambda^2 b_{i,12}, \Gamma b_{i,9} - \frac{2k\Gamma}{k - 2i} b_{i,12}, b_{i,11} + (1 - \frac{2i}{k})\Lambda^2 b_{i,12}, b_{i,11} + \frac{k\Gamma^2}{k - 2i} b_{i,12}$,

即求得 $b_{i,9}, b_{i,11}, b_{i,12}$ 的极小最小二乘解。

[0265] 此时需矩阵(52)列满秩:

$$[0266] \begin{bmatrix} \Lambda & 0 & 2\Lambda^2 \\ \Gamma & 0 & -\frac{2k\Gamma}{k - 2i} \\ 0 & 1 & (1 - \frac{2i}{k})\Lambda^2 \\ 0 & 1 & \frac{k\Gamma^2}{k - 2i} \end{bmatrix} \quad (52)$$

[0267] 即:

$$\begin{aligned}
& \frac{2\Lambda\Gamma(k-2i\Lambda+k\Lambda)}{k-2i} \neq 0, \\
[0268] \quad & \frac{\Lambda(k\Gamma+2i\Lambda-k\Lambda)(k\Gamma-2i\Lambda+k\Lambda)}{k(k-2i)} \neq 0, \\
& \frac{\Gamma(k\Gamma+2i\Lambda-k\Lambda)(k\Gamma-2i\Lambda+k\Lambda)}{k(k-2i)} \neq 0
\end{aligned} \tag{53}$$

[0269] 条件 (53) 可简化为:

$$[0270] \quad \Gamma \neq 1 \tag{54}$$

[0271] 此方法共需线性缩放轨迹5条,变时间尺度缩放轨迹8条,需满足条件 (40) (45) (50) (54),即可完成对所有能耗特征参数的辨识。

[0272] 6、机器人并行双向动态能耗优化方法

[0273] 采用并行双向动态规划算法,结合时间缩放状态空间表达式建立时间缩放三维离散网格,对缩放参数 \dot{u}_i 、 \dot{u}_{i+1} 进行搜索,并基于能耗优化计算模型及状态转移方程对关节轨迹能耗进行迭代计算,最终得到满足指定约束的能耗最优缩放轨迹及最优能耗值;其中:指定约束为机器人在指定时间段上的位置约束、速度约束、加速度约束以及缩放后整段轨迹执行时间。

[0274] 由于参考时间控制段参数 $m \in \{0, \dots, N_u - 1\}$,故时间缩放三维离散网格层数为 $N_u + 1$ 。将每层离散网格 t 、 \dot{u} 变量个数划分为 N_t 、 N_v 个,其中 $0 \leq u \leq u_f$ (单调递增)、 $0 \leq t \leq t_f$ (单调递增)、 $0 \leq \dot{u} \leq \dot{u}_{\max}$; u_f 表示预设轨迹总执行时间; t_f 表示经变时间尺度缩放后的机器人轨迹总执行时间。

[0275] 变时间尺度缩放方法的能耗优化模型可以表示为:

$$\begin{aligned}
[0276] \quad & \text{Min} \quad E = \sum_{m=0}^{N_u-1} E_m \\
& \text{s.t.} \quad -\dot{q}_{\max}^i \leq \dot{q}^i(t) \leq \dot{q}_{\max}^i \\
& \quad \quad -\ddot{q}_{\max}^i \leq \ddot{q}^i(t) \leq \ddot{q}_{\max}^i \\
& \quad \quad t \leq t_{\max}
\end{aligned} \tag{55}$$

[0277] 其中, \dot{q}_{\max}^i 及 \ddot{q}_{\max}^i 分别表示机器人第 i 个关节最大允许角速度及角加速度; t_{\max} 表示任务最大允许运行时间。

[0278] 为使机器人平滑启动及停止,三维离散网格初始状态及末状态可表示为:

$$\begin{aligned}
[0279] \quad & \dot{u}_0 = 0, u_0 = 0, t_0 = 0 \\
& \dot{u}_{N_u} = 0, u_{N_u} = u_f, t_{N_u} = t_f
\end{aligned} \tag{56}$$

[0280] 其中, u_0 、 \dot{u}_0 、 u_{N_u} 及 \dot{u}_{N_u} 分别表示初始控制点及末端控制点处的参考时间值及其一阶导数; t_0 及 t_{N_u} 表示经过变时间尺度缩放后初始控制点及末端控制点处的时间值;。

[0281] 求解具有初始条件 (56) 的能耗优化问题即为找到 $\{\dot{u}_m\}$ 、 $\{t_m\}$, $m \in [1, N_u - 1]$ 的最优序列,该问题是满足最优性原理的多段决策优化问题。

[0282] 由于首末状态确定,因此前向、后向、双向动态规划均可使用。且当使用双向动态规划时可以并行化方式运行。

[0283] 本实施例根据能量特征参数模型建立双向动态规划法的状态转移方程:

$$[0284] \quad L_{m+1}(t_{m+1}, \dot{u}_{m+1}) = \min[E_m(\dot{u}_{m+1}, t_{m+1}, \dot{u}_m, t_m) + L_m(t_m, \dot{u}_m)]$$

$$[0285] \quad L_{N_u-m-1}(t_{N_u-m-1}, \dot{u}_{N_u-m-1}) = \min[E_{N_u-m}(\dot{u}_{N_u-m}, t_{N_u-m}, \dot{u}_{N_u-m-1}, t_{N_u-m-1}) + L_{N_u-m}(t_{N_u-m}, \dot{u}_{N_u-m})] \quad (57)$$

[0286] 其中, 状态变量 \dot{u}_{m+1} , \dot{u}_m , t_{m+1} , t_m 是在对应配置层上任意可能的状态, L_m 表示前向动态规划在第 m 层上的最低能量损耗, (t_m, \dot{u}_m) 表示在第 m 层上达到最低能量损耗时所对应的状态, E_m 表示从状态 (t_m, \dot{u}_m) 转移到 (t_{m+1}, \dot{u}_{m+1}) 时所需要的能量。

[0287] L_{N_u-m} 表示后向动态规划在第 $N_u - m$ 层上的最低能量损耗, E_{N_u-m} 表示从状态 $(\dot{u}_{N_u-m}, t_{N_u-m})$ 转移到 $(\dot{u}_{N_u-m-1}, t_{N_u-m-1})$ 时所需要的能量。

[0288] 因此并行双向动态规划算法可表示为:

算法1	并行双向动态规划算法
	$F_0(1:N_t, 1:N_v) \leftarrow NaN, F_f(1:N_t, 1:N_v) \leftarrow NaN;$
1: 初始化:	$G_0(1:N_u-1, 1:N_t, 1:N_v) \leftarrow 0, G_f(1:N_u-1, 1:N_t, 1:N_v) \leftarrow 0;$ $J(0:N_u, 1:N_t, 1:N_v) \leftarrow NaN, J(0, :, :) \leftarrow 0, J(N_u, :, :) \leftarrow 0;$ $m = 0, w = N_u;$
[0289] 2:	while $m \neq w$ do in parallel
3:	$m, G_0(m+1, :, :), J(m+1, :, :) \leftarrow \text{FOptimalCost}(m, F_0, G_0(m, :, :), J(m, :, :))$
4:	$w, G_f(w-1, :, :), J(w-1, :, :) \leftarrow \text{BOptimalCost}(w, F_f, G_f(w, :, :), J(w, :, :))$
5:	end while
6:	$\{\dot{u}_m\}, \{t_m\}, \{E_m\}, m \in [1, N_u-1] \leftarrow \text{GetOptimalSequence}(G_0, G_f, J)$
7:	Return $\{\dot{u}_m\}, \{t_m\}, \{E_m\}, m \in [1, N_u-1], E = \sum_{m=0}^{N_u-1} E_m$

[0290] 算法1中 F_0 是一个二维数组, 其元素 $F_0(j, i)$ 用于存储前向动态规划状态点 (m, k_s, h_s) 到达状态点 $(m+1, k_e, h_e)$ 的最小能量成本; 其中, k_s 和 k_e 是 t 方向上的状态空间点的位置索引变量, h_s 和 h_e 是 \dot{u} 方向上的状态空间点的位置索引变量。 F_f 与 F_0 定义类似, 为后向动态规划最小能量成本二维数组。 G_0 是一个三维数组, 其元素 $B(m+1, k_e, h_e)$ 用于记录在第 m 层状态点达到 $(m+1, k_e, h_e)$ 时得到的最低能量损耗所对应的状态点的位置索引。 G_f 与 G_0 定义类似, 为后向动态规划最小能量成本二维数组。 J 是一个三维数组, 其元素 $J(m+1, k_e, h_e)$ 用于储存到达状态点 $(m+1, k_e, h_e)$ 的最小能量成本, u, \dot{u} 和 t 的值域分别划分为 N_u, N_v 和 N_t 段, m, w 是 u 方向上的状态空间点的位置索引变量。因为时间 t 是单调递增的, 所以索引 k_s 的值总是小于 k_e 。 $\text{FOptimalCost}()$ 与 $\text{BOptimalCost}()$ 分别为前向动态规划能量成本计算函数与后向动态规划能量成本计算函数。当 $m \neq w$ 时, 二者同时进行并行化计算。算法2给出 $\text{ForwardCost}()$ 的伪代码, $\text{BOptimalCost}()$ 可参照算法2写出, 由于篇幅有限, 不再给出。 $\text{GetOptimalSequence}()$ 为在双向动态规划算法执行完毕后对前向最优能耗、索引及后向最优能耗、索引进行整合, 以得到最优序列 $\{\dot{u}_m\}, \{t_m\}, \{E_m\}, m \in [1, N_u-1]$ 的函数, 同时可得

$$\text{最优能耗 } E = \sum_{m=0}^{N_u-1} E_m。$$

算法 2 前向最优成本算法

```

1: procedure FOptimalCost( $m, F_0, G_0(m, :, :), J(m, :, :)$ )
2:   for  $k_e = 2 : N_t$ 
3:     for  $h_e = 1 : N_v$ 
4:        $(\dot{u}_{m+1}, t_{m+1}) \leftarrow \text{GetGridPoint}(m+1, k_e, h_e)$ 
5:       for  $k_s = 1 : k_e - 1$ 
6:         for  $h_s = 1 : N_v$ 
7:            $(\dot{u}_m, t_m) \leftarrow \text{GetGridPoint}(m, k_s, h_s)$ 
8:           计算关节速度  $\dot{q}_r(u_m)$  和关节加速度  $\ddot{q}_r(u_m)$ 
[0291] 9:           if  $\dot{q}_r(u_m)$  和  $\ddot{q}_r(u_m)$  不满足约束条件(55) then
10:            Break
11:           else
12:             $V_m \leftarrow \text{CostFunction}(m, \dot{u}_{m+1}, t_{m+1}, \dot{u}_m, t_m)$ 
13:             $F_0(k_s, h_s) \leftarrow V_m + J(m, k_s, h_s)$ 
14:           end if
15:         end for
16:       end for
17:        $G_0(m+1, k_e, h_e) \leftarrow \text{find}(\min(\min(F_0)))$ 
18:        $J(m+1, k_e, h_e) \leftarrow \min(\min(F_0))$ 

```

算法 2 前向最优成本算法

```

19:   end for
[0292] 20: end for
21: Return  $m+1, G_0(m+1, :, :), J(m+1, :, :)$ 
22:end procedure

```

[0293] 算法2中GetGridPoint()为获取对应状态点的函数。CostFunction()为基于能量特征参数模型计算机器人能量损耗的函数。

[0294] 根据算法1可以得到,计算状态转换的能量成本的核心函数执行了 $(N_u - 1)(N_t - 1)N_t N_v^2 / 2$ 次。 N_u 可以认为是一个常数,假设 $N_t = N_v = n$,则时间复杂度为 $O(n^4)$ 。但由于本实施例提出的能耗特征参数模型参数已经过辨识,在每个控制段仅需对 $\dot{u}_{m+1}, \dot{u}_m, t_{m+1}, t_m$ 进行简单数值迭代即可,同时本实施例采用并行双向动态规划算法,充分利用了计算机硬件资源,这将大大减少算法的执行时间。

[0295] 以上所述实施例仅是为充分说明本发明而所举的较佳的实施例,本发明的保护范围不限于此。本技术领域的技术人员在本发明基础上所作的等同替代或变换,均在本发明的保护范围之内。本发明的保护范围以权利要求书为准。

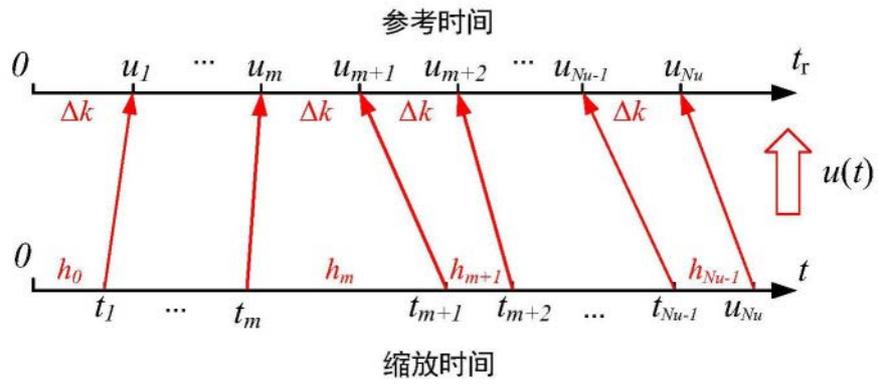


图1

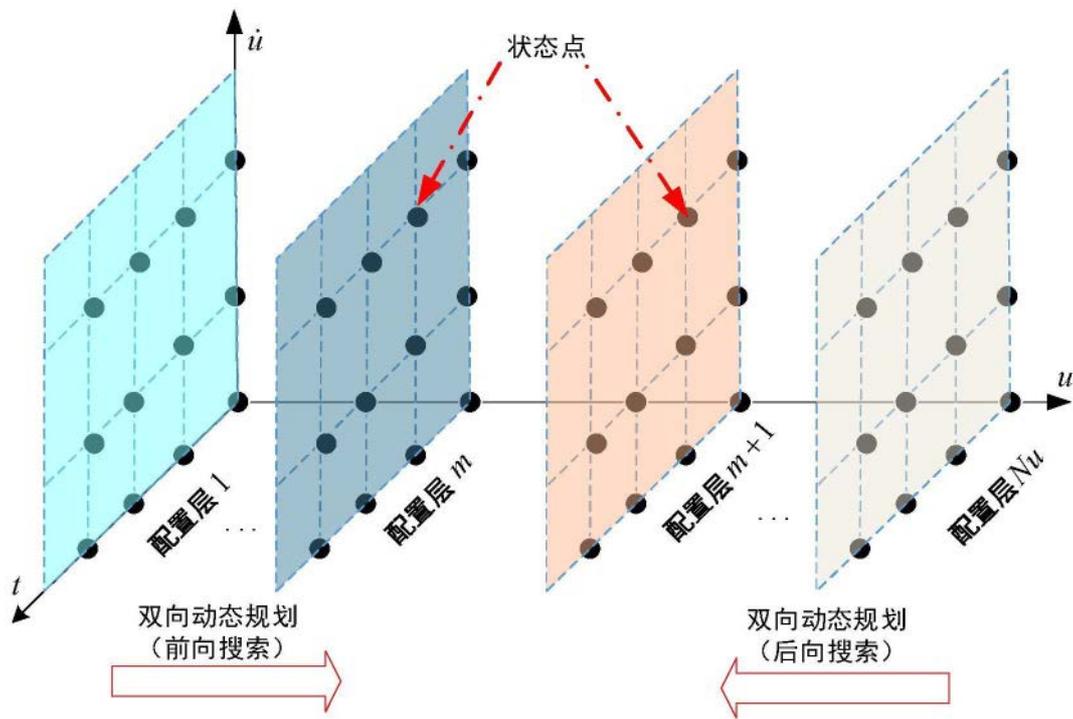


图2

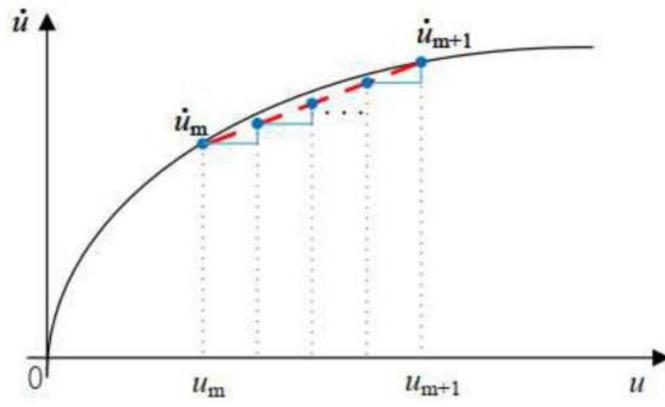


图3