

工业机器人电动机及减速机选型校核技术分析

朱家荣

(贵州航天林泉电机有限公司 贵州 贵阳 550000)

摘要: 本文以某工业机器人为例, 对其电动机及减速机的选型校核技术进行分析, 包括工业机器人项目概况、工业机器人电动机与减速机选型校核技术的主要应用意义、动力学研究及其实际应用分析。希望本次分析, 可以为工业机器人具体应用中的电动机与减速机选型校核策略、方法应用及其选型校核质量提升提供一定参考。

关键词: 工业机器人; 电动机与减速机; 选型校核技术

0 引言

在工业机器人的具体应用中, 电动机与减速机的合理选型及校核至关重要。在工业机器人设计时, 技术人员首先需要明确工业机器人的项目概况和具体使用要求, 再以此为依据, 对其电动机与减速机选型与校核技术加以合理应用, 优化设计参数, 从而使设计的工业机器人更符合实际应用需求。

1 工业机器人项目概况

本文选择目前常用的六自由度工业机器人, 其负载为 12kg, 旋转关节共有 6 个, 每一个旋转关节都有一个自由度。其末端执行器的具体位置由前三个旋转关节确定, 后三个旋转关节可对该执行器的具体姿态进行确定。同时, 后三个旋转关节的轴线会在同一点相交, 这是六自由度工业机器人的一种经典分配方式。运动时, 该机器人的第二、第三、第五和第六旋转关节会受到重力矩的作用, 而电动机及减速机的主要作用是为其提供平衡和驱动力矩; 而第一和第四旋转关节的电动机及减速机不需提供平衡重力矩。经实践应用发现, 该机器人的第二、第三和第五关节所受重力矩作用最大, 因此本文仅对第二、第三和第五这 3 个旋转关节进行电动机与减速机选型校核计算分析。该工业机器人应用 KEBA 型控制系统, 其运动加速度接近正弦平方形式。基于此, 本次对其电动机及减速机进行选型校核的过程中, 主要应用正弦平方加速度。

2 工业机器人电动机与减速机选型校核技术的主要应用意义

对于工业机器人而言, 了解其运动过程中各个

关节重力矩及动力矩是电动机与减速机合理选型校核的基础。将工业机器人实际运动过程中的重力矩及动力矩进行叠加耦合, 并以此为依据, 与其电动机及减速机所具有的力矩特征进行比对, 再根据实际情况与实际运行需求来校核电动机及减速机的具体力矩特性。这样便可有效满足工业机器人的实际运动需求, 使其运动时间、运动速度及运动加速度等各项参数得到合理分配^[1]。这样便可使其电动机及减速机的应用性能得到最大化发挥, 避免因选型过小导致工业机器人不能满足工作需要, 或因选型过大而引发的能量浪费等情况, 在满足工业机器人实际应用需求的同时, 实现能源和成本的最大化节约。

3 工业机器人动力学研究分析

工业机器人动力学主要研究其各个关节运动及其外力、驱动力之间的关系。在工业机器人的选型及其校核研究中, 动力学研究是一个基础部分, 同时也可以为其提供核心技术支撑。工业机器人本身就属于一个复杂程度很高的动力学系统, 其主要组成部分包括多个关节和连杆, 且具有诸多的非线性特征; 其输入和输出模式有很多, 且输入与输出之间的耦合关系比较复杂。基于此, 在对工业机器人进行动力学特征分析的过程中, 涉及的分析方法也有很多。其中最常用的方法有拉格朗日分析法、牛顿-欧拉分析法、凯恩分析法等。除此之外, 高斯分析法、旋量分析法及罗伯逊-魏登堡分析法也是比较常用的分析方法。由于拉格朗日分析法在动力学系统复杂方程的求解中, 具有最为简单的形式, 且具有更加明确的物理概念及运算步骤, 所以在目前的工业机

机器人动力学分析中,大多数研究者都会选择拉格朗日分析法进行分析。

对工业机器人进行动力学研究的主要目的是,对工业机器人各个关节实际运动过程中的动力矩及其重力矩产生情况进行全面了解,将每一个关节动力矩及其重力矩的叠加耦合情况,与其减速机及电动机所具有的力矩特征进行对比;再以此为依据,对工业机器人电动机及减速机进行校核,使其充分满足工业机器人最低运动特征条件下的实际运动需求。其次是将工业机器人最低运动特征作为基础,对其加速时间、加速度及速度等各项运动参数加以科学调整,使其电动机与减速机的性能都能得到最大限度的发挥,避免出现电动机、减速机选型太大所导致的浪费情况,或选型太小所导致的参数失调情况。这样才可以使工业机器人在运行过程中具有良好的可靠性、经济性和安全性。

具体分析中,首先需要根据实际情况,对工业机器人的模型及其连杆参数进行科学设置;然后以此为依据,建立工业机器人的拉格朗日方程;最后结合以上的模型与计算结果,进行工业机器人系统的动力学优化。这样才可以明确工业机器人的电动机及减速机情况,为电动机与减速机的合理选型提供参考依据。

4 工业机器人电动机与减速机选型校核技术实际应用分析

基于以上的方法分析,结合工业机器人电动机及减速器的实际选型需求,本次研究以拉格朗日分析法为依据,对其电动机和减速机选型校核技术进行应用分析,包括选型校核策略分析、选型校核方法分析、选型校核效果及其优化分析等。

4.1 选型校核策略

在对工业机器人的电动机及减速机进行选型校核的过程中,首先需要明确工业机器人的主要运行参数需求,包括机器人旋转关节的最大运动速度、本体与负载的实际转动惯量、运动中的加速时间、传动效率、减速比、电动机中的转子惯量、转动和负载关节质量、负载质心与旋转中心之间的距离、电动机连续和瞬时工作曲线、减速机具体启停转矩等。在此过程中,最值得重点关注的一项指标是电动机转子在转动过程中的惯量比,即电动机自身的负载惯量与其转子惯量的比值。如果惯量比在 10 以下,

其自身便会存在较大的动能消耗,且会对电动机运动参数的调配产生较大影响^[2]。基于此,具体选型校核中,应特别重视惯量比,以免电动机运行参数调配和设计参数之间产生过大偏差,从而使工业机器人的应用性能无法达到预期效果。

4.2 选型校核方法

通过本次项目中的工业机器人实际运动分析可知,其第二、第三和第五旋转关节运动时的重力矩会对其电动机及减速机的选型产生较大影响,且其选型过程中的影响因素也比较多,如果选型不当,便会对该工业机器人的应用性能产生较大幅度的不良影响^[3]。基于此,在本次工业机器人电动机及减速机选型校核研究中,主要对其第二、第三和第五旋转关节进行分析。根据该工业机器人的实际应用需求,电动机选择凯邦电动机;第一、第二、第三和第四旋转关节中的减速机选择 RV 系列减速机,其具有较高的传动效率,平均传动效率可达 0.8;第五和第六旋转关节中的减速机选择谐波减速机,相较 RV 系列减速机而言,其传递效率略低一些,平均传动效率可以达到 0.75 左右。

本次选型校核以拉格朗日法为依据,为该工业机器人系统建立动力学方程。首先是建立拉格朗日方程:将工业机器人中的 6 个旋转关节转角变量设为 $\theta=[\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6]$,将每一个旋转关节运动中的驱动力矩变量设为 $T=[T_1, T_2, T_3, T_4, T_5, T_6]$;该工业机器人运动过程中的连杆动能 K_i 为:

$$K_i = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^i \sum_{k=1}^i \text{Trace}(U_{ij} J_i U_{ik}^T) \dot{\theta}_j \dot{\theta}_k + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n I_i \dot{\theta}_i^2 \quad (1)$$

式中: n — 工业机器人中的旋转关节数量;

U_{ij} 、 U_{ik} — 变换矩阵中关于该工业机器人第 j 个和第 k 个关节运动转角的导数;

$\dot{\theta}_i \dot{\theta}_j \dot{\theta}_k$ — 工业机器人第 i 个,第 j 个、第 k 个运动关节转角平均值;

J_i — 伪惯量矩阵中的转动惯量;

I_i — 驱动器工作中的转动惯量^[4]。

设 P 为该工业机器人各个旋转关节的综合势能,则其计算公式为:

$$P = \sum_{i=1}^n P_i = \sum_{i=1}^n \left[-m_i g^T \cdot 0_{r_i} \bar{r}_i \right] \quad (2)$$

式中: g^T — 重力矩阵,且 $g^T=[g_x, g_y, g_z, 0]$;

m_i — 旋转关节质量;

0_{T_i} — 坐标系 i 中的连杆位置；

$\bar{r}_i$ — 坐标系 i 中的连杆质心位置。

根据公式 (1) 和 (2)，可建立以下的拉格朗日方程：

$$\begin{aligned} L &= K_i - P \\ &= \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^i \sum_{k=1}^i \text{Trace}(U_{ij} J_i U_{ik}^T) \dot{\theta}_j \dot{\theta}_k \\ &\quad + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n I_i \dot{\theta}_i^2 - \sum_{i=1}^n \left[-m_i g^T \cdot (0_{T_i} \bar{r}_i) \right] \end{aligned} \quad (3)$$

相比较其他形式的机械设备而言，工业机器人具有更加复杂的空间结构。在具体分析过程中，技术人员可将其看作旋转关节连接而成的一个空间结构系。在对拉格朗日函数进行求导之后，可以将其带入到以下公式中：

$$T_i = \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} \right) - \frac{\partial L}{\partial \theta} \quad (4)$$

这样便可获得工业机器人运动过程中的动力学方程：

$$\begin{aligned} T_i &= \frac{\partial L}{\partial t} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} \right) - \frac{\partial L}{\partial \theta} \\ &= \sum_{j=1}^n D_{ij} \ddot{q}_j + I_i \ddot{q}_i + \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n D_{ijk} \dot{q}_j \dot{q}_k + D_i \end{aligned} \quad (5)$$

式中： $\sum_{j=1}^n D_{ij} \ddot{q}_j$ — 广义加速度所形成的惯性力在工业机器人动力系统中产生的影响；

$I_i \ddot{q}_i$ — 工业机器人中的电动机等各项驱动装置在运行中形成的惯量项；

$D_{ijk} \dot{q}_j \dot{q}_k$ — 科氏力及向心力；

D_i — 重力在工业机器人旋转关节转矩中产生的影响^[5]。

且本次计算中有：

$$D_{ij} = \sum_{p=\max(i,j)}^6 \text{Trace}(U_{pj} J_p U_{pi}^T) \quad (6)$$

$$D_{ijk} = \sum_{p=\max(i,j,k)}^6 \text{Trace}(U_{pj} J_p U_{pi}^T) \quad (7)$$

$$D_i = \sum_{p=i}^6 \left(-m_p g^T U_{pi} \bar{r}_p \right) \quad (8)$$

这样便可为工业机器人的电动机及减速机建立一个科学的选型校核系统。

根据上述选型校核方法，在本次工业机器人的电动机及减速机选型校核中，主要系统参数输入情况

见表 1。

4.3 选型校核效果及其优化分析

通过上述方法对本次项目中的工业机器人电动机及减速机进行选型校核之后，其电动机及减速机的实际选型都比较符合其正常工作状态下的运动参数。在运动参数的选配过程中，电动机实际的输出转矩并未超出其允许范围；减速机实际输出转矩也并未超出其允许的启停转矩范围。由此可见，在正常工况下，该工业机器人并不会出现电动机参数超出调试范围及减速机严重损坏等情况，其使用寿命可以得到良好保障。但是通过选型校核系统中提供的选型校核曲线分析发现，在通过上述方法进行选型校核后，该工业机器人中的第二旋转关节整体电动机性能远超出了实际应用需求，从而产生了性能浪费问题。经进一步分析发现，之所以会出现这样的情况，主要是因为该工业机器人中的减速机具有较大减速比，即使电动机处于高速运转状态下，机器人旋转关节的实际运动速度也比较小，其最大运动速度仅仅可以达到 $130^\circ/\text{s}$ 。这个旋转关节中应用的减速机是 RV-42N 系列减速机，其减速比是 164.07。

从实际情况与工业机器人的实际运行需求来看，第二旋转关节中的减速机依然具有较大的优化空间。经过各方面因素的综合考虑，本次优化决定采用型号相同但减速比为 105 的 RV 系列减速机来替换原来的 RV-42N 减速机。表 2 是本次项目中的工业机器人第二旋转关节选型校核优化后的主要系统输入参数情况。

优化之后，经试运行发现，该工业机器人第二旋转关节在正常工作条件下的运动速度提高了 15.4%，其加速性能提高了 30%。由此可见，在该工业机器人电动机及减速机选型校核优化之后，其运行效果与应用性能都实现了显著提升。

从该工业机器人中的第三和第五旋转关节减速机的实际选型校核情况来看，第三旋转关节中减速机的最大输出转矩是 602.8Nm，而其启停转矩的最大允许值是 612Nm，余量为 1.5%；第五旋转关节减速机的最大输出转矩是 55.7Nm，而其启停转矩的最大允许值是 57Nm，余量为 2.3%。由此可见，该工业机器人第三和第五旋转关节减速机运行中的转矩所剩余量都比较小。这样虽然可以满足该工业机器人的实际运行需求，但是在具体应用时，其并不具备足够优越的超载性能。基于此，为避免其实际应用中使用寿命受到影响，

表 1 本次工业机器人电动机及其减速机选型校核中的主要系统参数输入情况

序号	项目	输入值		
		第二旋转关节	第三旋转关节	第五旋转关节
1	最大运动速度 / (°/s)	130	180	260
2	加速运动时间 /s	0.5	0.3	0.28
3	加速度最大值占比	0	0	0
4	加速度最大值 / (°/s²)	520	1200	1857.143
5	负载转动惯量 / (kg·m²)	68	17	1
6	电动机中的转子惯量 / (kg·m²)	7.3 × 10 ⁻⁴	1.3 × 10 ⁻⁴	0.36 × 10 ⁻⁴
7	减速比	164.07	126	100
8	传动效率	0.8	0.8	0.75
9	负载质量 /kg	80	70	17
10	负载质心距旋转中心 /mm	630	360	140
11	减速机启停转矩 /Nm	1150	612	57
12	重力矩 /Nm	493.92	246.96	23.324
13	减速机最大驱动力矩 /Nm	1110.76	602.827	55.7208
14	电动机最大驱动力矩 /Nm	9.54897	6.32331	0.85957
15	惯量比	3.460411	8.236913	2.777778
16	电动机正常运行速度 / (r/min)	3354.85	3780	4333.333
17	减速机正常运行速度 / (r/min)	21.66667	30	43.33333

表 2 主要系统输入参数情况

序号	项目	输入值
1	加速运动时间 / (°/s)	150
2	加速运动时间 /s	0.35
3	加速度最大值占比	0
4	加速度最大值 / (°/s²)	520
5	负载转动惯量 / (kg·m²)	68
6	电动机中的转子惯量 / (kg·m²)	7.3 × 10 ⁻⁴
7	减速比	164
8	传动效率	0.8
9	负载质量 /kg	80
10	负载质心距旋转中心 /mm	630
11	减速机启停转矩 /Nm	1550
12	重力矩 /Nm	493.92
13	减速机最大驱动力矩 /Nm	1110.76
14	电动机最大驱动力矩 /Nm	9.55212
15	惯量比	3.463366
16	电动机正常运行速度 / (r/min)	3553.333
17	减速机正常运行速度 / (r/min)	21.66667

应尽量避免其在满负载状态下长时间运行，同时也应尽量避免其超负载运行^[6]。若因实际工作要求而必须要长时间维持在满负载运行状态下，或者需要超负载运行，技术人员就需要根据实际应用需求来合理优化

其减速机的选型。这样才可以充分满足工业机器人的实际应用需求，并使其质量、性能得到良好保障，从而最大限度确保其使用寿命，避免因工业机器人使用寿命缩短而影响企业的经济效益。

5 结语

综上所述，随着智能化生产技术的应用和发展，工业机器人已经在工业生产企业中得到了越来越广泛的应用。而在工业机器人的实际应用中，电动机及减速机的合理选型至关重要。基于此，技术人员一定要特别重视其电动机选型和减速机选型，结合工业机器人的实际应用需求，采取合理的方法进行电动机和减速机的选型校核；并根据实际情况合理优化电动机与减速机的

选型，或根据电动机和减速机的实际选型情况，规范工业机器人的具体应用策略。这样才可以使工业机器人的应用质量及其性能得到良好保障，满足现代工业机器人的实际应用需求。

参考文献：

[1] 张飞阳，闫鑫，陈帮军，等．工业机器人关节的永磁直流力矩电机设计 [J]．内燃机与配件，2022 (19) : 43-45.

[2] 曾哲．工业机器人柔性关节自抗扰控制策略研究 [D]．杭州：浙江大学，2022.

[3] 周琪钧．工业机器人轨迹规划及其控制系统研究 [D]．天津：天津理工大学，2022.

[4] 卢志远．工业机器人关节伺服负载抗扰策略研究 [D]．芜湖：安徽工程大学，2022.

[5] 吴震宇，袁惠群，罗宝佳，等．关节型工业机器人扭转振动的伺服补偿技术研究 [J]．振动与冲击，2020 (09) : 132-137.

[6] 周政道．工业机器人用 2K-V 型减速机的传动精度分析与实验研究 [D]．天津：天津职业技术师范大学，2019.

作者简介: 朱家荣 (1989.09-)，男，汉族，云南昭通人，本科，工程师，研究方向：减速器、电机组件和传动结构设计。