

多机器人协调操作系统实现飞机大型部件 对接的轨迹规划

Trajectory Planning of Large Part Merging With a Multi-Robot Coordinated Manipulation System

北京航空制造工程研究所 杜兆才 邹方

[摘要] 研究多机器人协调操作系统在飞机大型部件对接中的应用,提出了基于多个三坐标直角机器人协调操作的大型部件找正、对接系统的轨迹规划方法。根据大型部件对接的工艺特点,建立了对接部件和机器人个体之间的坐标转换关系。在机器人系统的运动学模型以及逆运动学算法的基础上,利用多机器人协调操作系统的冗余驱动特性,综合考虑载荷约束、驱动力约束和驱动速度约束等因素,制定大型部件找正、对接过程中的机器人的轨迹规划策略。

关键词: 大部件对接 轨迹规划 多机器人 协调操作 冗余

[ABSTRACT] The application of multi-robot coordination in a merging system for posture alignment of huge and heavy parts is studied. The trajectory planning method of posture aligning and merging system for large parts with multiple 3-DOF robots is proposed. The coordinates transformation relationship between merging part and single robot is established on the basis of large parts merging technology. By using the redundancy of multi-robot coordinated manipulation system and considering the constraints of payload, driving force and driving velocity, the trajectory planning strategy of robot in posture aligning and merging system for large parts is achieved on the basis of kinematic model and inverse kinematic algorithm.

Keywords: Large parts merging Trajectory planning Multi-robot Coordinated manipulation Redundancy

大型飞机的尺寸、质量较大,通常采用模块化分段制造方式,在各分段制造完毕后,再拼装对接。对接工作不仅要求各分段之间的位置到位,还需要姿态一致。部件在空间中的位置和姿态变化有6个自由度,即沿着空间 Cartesian 坐标系的3个坐标轴的平移以及绕3个

坐标轴的旋转,所以,如果要实现对接部件的位置、姿态一致,必须能够精确地调整对接部件的6个自由度的运动。传统的对接拼装工作平台通常只能实现行走和升降等位置调整功能,难以精确地调整姿态,往往需要人推索拉等人工方式精调各分段的姿态,难以保证对接质量,无法满足任务需求。

部件的位姿调整功能可以借助于目前蓬勃发展的机器人技术来实现^[1-2],通常可采用一个6自由度工业机器人来调整尺寸不大、质量不大的部件的位姿,但对于尺寸和质量均较大的大型部件来说,由于成本和性能指标等因素的制约,还不太可能采用单个机器人来调整大型部件的位置和姿态,必须将大型部件的质量和位姿调整需求分配给多个机器人,由多个机器人协调操作,共同承担位姿调整工作。而且,结构简单的多个机器人比应用于具体任务的功能强大的单机器人更容易设计和制造,经济性好,且在容错性和设备柔性等方面具有优越性。20世纪80年代开始发展的多机器人协调操作技术充分利用多个机器人的内在分布特性,通过共享资源、协调操作弥补单个机器人能力的不足^[3],拓宽了机器人的应用范围。多个机器人协调操作系统比较适合于大型部件的找正、对接工作,已成功地应用于大型舰艇制造等领域。

制定多机器人的运动控制方案时,必须首先考虑机器人各关节运动的轨迹规划,较好的运动轨迹不仅能使大型部件的运动满足基本的对接需求,还能使部件的内力、机器人的关节驱动力等性能指标得到优化。张彬^[4]考虑了工程实践中的关节驱动力约束和驱动速度约束,提出一种最优时间轨迹规划算法。MIKHAIL^[5]以关节加速度变化或关节广义驱动力变化对时间的积分最小为目标进行轨迹规划,以获得关节广义驱动力较小的平稳运动,从而提高轨迹的跟踪控制精度。张秋毫^[6]采用分离影响系数法分离各个分支机器人的 Jacobi 矩阵和惯性矩阵,建立了三支机器人系统的运动学和动力学

方程,应用乘子罚函数方法,优化设计了机器人的关节驱动力。DEVENDRA^[7]将模拟退火算法和遗传算法用于轨迹规划,以关节驱动力对时间的积分最小为优化目标,对2台双连杆机构组成的多机器人系统进行了轨迹规划。胡斌梁^[8]通过坐标变换将三维空间内的边缘跟踪问题转化到二维平面,在边缘所在平面内描述和规划双机器人协调跟踪边缘任务,提出了基于边缘极值的分段跟踪算法。孟传伟^[9]分析了跟踪误差与控制器输出力的关系,提出了根据控制误差对关节力矩进行模糊加权的二次规划方案。多机器人协调操作系统的冗余驱动引入了驱动力的分配问题,尚伟伟^[10]研究了平面2自由度冗余驱动并联机构在考虑驱动速度和加速度限制时的速度规划问题,利用矩阵范数的性质将关节空间的约束转换成末端执行器的速度约束和加速度约束,从而规划出末端执行器的S形运动轨迹。

针对多机器人协调操作系统完成大型部件对接任务时需要解决的问题,借鉴相关研究成果,本课题首先建立了多机器人协调操作系统的运动学模型,并将工程中的物理条件提炼为载荷约束^[11]、驱动力约束和驱动速度约束等,提出了一种大型部件找正、对接过程中的机器人各关节运动的轨迹规划算法。该方法考虑的因素较多,计算量小,能够用于协调操作的机器人关节运动轨迹的实时规划。

1 多机器人协调操作系统的运动学模型

通常,用3个机器人即可支撑并确定一个部件的空间位姿,为了提高安全性和可靠性,本课题采用4个机器人支撑、调整大型部件的位姿,见图1。

每个机器人均具有x、y和z轴方向的3个移动自由度,靠伺服电动机驱动。机器人通过球关节形式的工艺接头与大型部件连接。4个机器人共提供了12个驱动,因此,整个多机器人协调操作系统是一个冗余驱动系统,6个冗余的自由度导致系统的控制难度增大,但也为综合考虑其他因素规划部件的运动轨迹提供了可能。部件的初始位姿是最初的摆放位姿,部件的目标位姿是对接时与基准部件的对接面恰好吻合的位姿,初始位姿和目标位姿均已知,部件在找正、对接过程中的运动轨迹不确定,如何规划和控制机器人各驱动关节的运动,使大型部件在满足各方面约束条件的前提下,从初始位姿运动到目标位姿需要通过轨迹规划来解决。

首先,需要针对多机器人协调操作系统的运动学特点,建立整个系统的运动学模型。系统的全局坐标系Oxyz的坐标轴方向与机器人的三维移动方向一致,以大

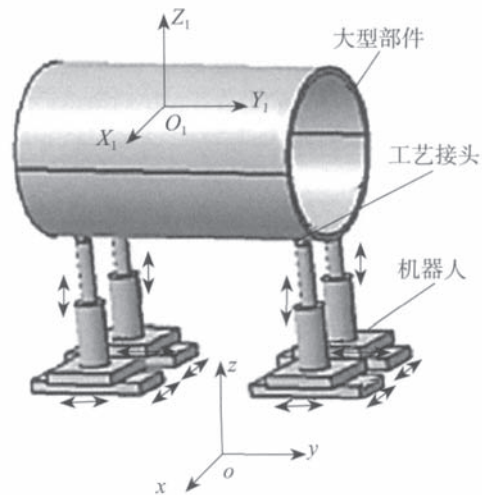


图1 多机器人协调操作调姿系统示意图

Fig.1 Multi-robot coordinated manipulation system

型部件的惯性主轴坐标系 $O_1x_1y_1z_1$ 为局部坐标系,局部坐标系固结在大型部件上。

部件的位姿用矢量 $S = \{p_x, p_y, p_z, \psi, \theta, \phi\}^T$ 表示,其中, p_x 、 p_y 和 p_z 表示局部坐标系 $O_1x_1y_1z_1$ 的原点 O_1 在全局坐标系 $Oxyz$ 中的坐标位置,采用ZXZ形欧拉角 (ψ, θ, ϕ) 来描述局部坐标系 $O_1x_1y_1z_1$ 在全局坐标系 $Oxyz$ 中的姿态, ψ 为进动角,表示局部坐标系的偏转方向; θ 为章动角,表示局部坐标系朝着进动角所指方向偏转的角度; ϕ 为自旋角,与进动角共同描述局部坐标系绕其自转轴的转动角度。

机器人 i ($i=1, \dots, 4$)顶端的工艺接头是球关节,球心在全局坐标系 $Oxyz$ 和局部坐标系 $O_1x_1y_1z_1$ 中的位置矢量分别为 $q_i = \{q_{ix}, q_{iy}, q_{iz}\}^T$ 和 $r_i = \{r_{ix}, r_{iy}, r_{iz}\}^T$ 。由于机器人的三维移动方向分别平行于全局坐标系的x轴、y轴和z轴,因此,位置分量 q_{ix} 、 q_{iy} 和 q_{iz} 的变化量也分别代表了机器人的三维移动量。位置矢量 q_i 和 r_i 之间存在如下关系

$$q_i = R \cdot r_i + S_p, \quad (1)$$

式中, R 为局部坐标系与全局坐标系之间的坐标转换矩阵, S_p 为局部坐标系 $O_1x_1y_1z_1$ 的原点 O_1 在全局坐标系 $Oxyz$ 中的位置矢量, $S_p = \{p_x, p_y, p_z\}^T$ 。

对式(1)求导,可求出第 i 个机器人的关节速度矢量 \dot{q}_i

$$\dot{q}_i = \dot{R} \cdot r_i + \dot{S}_p. \quad (2)$$

整理式(2),可得到部件的运动速度矢量 \dot{S} 与各个机器人的关节速度矢量 \dot{q} 之间的关系

$$\dot{S} = J \cdot \dot{q}, \quad (3)$$

式中, $\dot{\mathbf{q}} = \{\dot{q}_1^T \dot{q}_2^T \dot{q}_3^T \dot{q}_4^T\}^T$; 系数矩阵 \mathbf{J} 为系统的一阶影响系数矩阵, 也是系统的 Jacobi 矩阵, 体现了操作空间的广义速度 $\dot{\mathbf{S}}$ 与关节空间运动速度 $\dot{\mathbf{q}}$ 的关系。

对式(3)求导, 可求出部件的加速度矢量 $\ddot{\mathbf{S}}$

$$\ddot{\mathbf{S}} = \dot{\mathbf{q}}^T \cdot \mathbf{H} \cdot \dot{\mathbf{q}} + \mathbf{J} \cdot \ddot{\mathbf{q}}, \quad (4)$$

式中, $\ddot{\mathbf{q}}$ 是关节的加速度矢量, 且有 $\ddot{\mathbf{q}} = \{\ddot{q}_1^T \ddot{q}_2^T \ddot{q}_3^T \ddot{q}_4^T\}^T$; 系数矩阵 \mathbf{H} 为系统的二阶影响系数矩阵, 也是系统的 Hessian 矩阵。

对式(2)进一步求导, 可得到关节加速度矢量 $\ddot{\mathbf{q}}$

$$\ddot{\mathbf{q}}_i = \ddot{\mathbf{R}} \cdot \mathbf{r}_i + \ddot{\mathbf{S}}_p. \quad (5)$$

当部件的运动轨迹 \mathbf{S} 已知时, 通过式(1)、(2) 和(5) 可计算出机器人的位移、速度和加速度。

2 多机器人协调操作系统的动力学模型

设第 i 个机器人对部件的作用力矢量为 \mathbf{N}_i , 部件的质量矩阵为 \mathbf{m}_p , 部件在局部坐标系中的惯量矩阵为 \mathbf{I}_p , 部件的角速度矢量、角加速度矢量分别为 $\boldsymbol{\omega}_p$ 、 $\boldsymbol{\varepsilon}_p$, 根据 Newton-Euler 方程, 列部件的力、力矩平衡方程

$$\mathbf{m}_p \cdot \mathbf{I}_3 \cdot \ddot{\mathbf{S}}_p - \mathbf{m}_p \cdot \mathbf{g} = \sum_{i=1}^4 \mathbf{R}_i \cdot \mathbf{N}_i, \quad (6)$$

$$\mathbf{I}_p \cdot \boldsymbol{\varepsilon}_p + \tilde{\boldsymbol{\omega}}_p \cdot \mathbf{I}_p \cdot \boldsymbol{\omega}_p = \sum_{i=1}^4 \tilde{\mathbf{r}}_i \cdot \mathbf{N}_i, \quad (7)$$

式中, \mathbf{I}_3 为 3×3 的单位矩阵, \mathbf{g} 为重力加速度矢量, $\tilde{\boldsymbol{\omega}}_p$ 和 $\tilde{\mathbf{r}}_i$ 分别是 $\boldsymbol{\omega}_p$ 和 \mathbf{r}_i 的反斜对称矩阵。

第 i 个机器人的关节驱动力矢量为 $\mathbf{F}_i = \{F_{ix} F_{iy} F_{iz}\}^T$, 机器人的 x 、 y 和 z 向的滑块质量分别为 m_{ix} 、 m_{iy} 和 m_{iz} , 不考虑摩擦力和外界的干扰等因素, 则第 i 个机器人的动力学方程为

$$\mathbf{F}_i = \mathbf{m}_i \cdot \ddot{\mathbf{q}}_i + \mathbf{R}_i \cdot \mathbf{N}_i - \mathbf{m}_{iz} \mathbf{g}, \quad (8)$$

$$\text{式中, } \mathbf{m}_i = \begin{bmatrix} m_{ix} + m_{iy} + m_{iz} & 0 & 0 \\ 0 & m_{iy} + m_{iz} & 0 \\ 0 & 0 & m_{iz} \end{bmatrix}.$$

将各个机器人($i=1, \dots, 4$) 的动力学方程式(8) 和部件的动力学方程式(6)、(7) 联立, 得到了整个多机器人协调操作系统的动力学方程

$$\mathbf{P} = \mathbf{W} \cdot \mathbf{F}, \quad (9)$$

$$\text{式中, } \mathbf{F} = \left\{ \begin{matrix} \mathbf{F}_1^T & \mathbf{F}_2^T & \mathbf{F}_3^T & \mathbf{F}_4^T \end{matrix} \right\}^T,$$

$$\mathbf{P} = \left\{ \begin{matrix} \mathbf{m}_p \cdot \mathbf{I}_3 \ddot{\mathbf{S}}_p - \mathbf{m}_p \cdot \mathbf{g} + \sum_{i=1}^4 (\mathbf{m}_i \cdot \ddot{\mathbf{q}}_i - \mathbf{m}_{iz} \mathbf{g}) \\ \mathbf{I}_p \cdot \boldsymbol{\varepsilon}_p + \tilde{\boldsymbol{\omega}}_p \cdot \mathbf{I}_p \cdot \boldsymbol{\omega}_p + \sum_{i=1}^4 \tilde{\mathbf{r}}_i \cdot \mathbf{R}_i^{-1} (\mathbf{m}_i \cdot \ddot{\mathbf{q}}_i - \mathbf{m}_{iz} \mathbf{g}) \end{matrix} \right\}.$$

$$\mathbf{W} = \left\{ \begin{matrix} \mathbf{I}_3 & \mathbf{I}_3 & \mathbf{I}_3 & \mathbf{I}_3 \\ \tilde{\mathbf{r}}_1 \cdot \mathbf{R}^{-1} & \tilde{\mathbf{r}}_2 \cdot \mathbf{R}^{-1} & \tilde{\mathbf{r}}_3 \cdot \mathbf{R}^{-1} & \tilde{\mathbf{r}}_4 \cdot \mathbf{R}^{-1} \end{matrix} \right\}.$$

多机器人协调操作系统存在冗余的驱动, 式(9) 中的驱动力矢量 \mathbf{F} 有 12 个分量, 方程的个数是 6 个, 因此, 式(9) 有无穷个解, 用 Moore-Penrose 广义逆求解式(9), 得到解的一般形式

$$\mathbf{F} = \mathbf{W}^+ \mathbf{P} + (\mathbf{I}_{12} - \mathbf{W}^+ \cdot \mathbf{W}) \boldsymbol{\varepsilon}, \quad (10)$$

式中, $\mathbf{W}^+ = (\mathbf{W}^T \cdot \mathbf{W})^{-1} \cdot \mathbf{W}^T$ 是 \mathbf{W} 的 Moore-Penrose 广义逆, \mathbf{I}_{12} 是 12×12 的单位矩阵, $\boldsymbol{\varepsilon}$ 是任选的 12×1 的矢量, 它决定了驱动力 \mathbf{F} 的解。当 $\boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{0}$ 时, 可得到驱动力的最小 2 范数解 $\mathbf{F}_{\|2\|}$ 。

$$\mathbf{F}_{\|2\|} = \mathbf{W}^+ \mathbf{P}. \quad (11)$$

3 轨迹规划

轨迹规划的最终目的是获得满足预定要求的机器人各个关节的运动轨迹。式(1)~(5) 建立了机器人各关节与部件之间的运动学关系, 可将部件的轨迹问题转化为机器人的关节轨迹规划问题。

机器人的载荷、关节广义驱动力等指标与关节轨迹相互联系, 而且, 多机器人协调操作系统中存在冗余的自由度, 因此, 可以适当地选择目标函数和设计变量, 将载荷或关节广义驱动力优化分配等优化设计问题与轨迹规划结合起来, 从而实现最优载荷分配和(或) 最小关节广义驱动力等条件下的轨迹规划。

3.1 基于最小载荷分配的关节轨迹规划

为了实现基于最小载荷分配且关节广义驱动力最小的轨迹规划, 优化问题的数学模型为:

(1) 目标函数。

$$\min Z = C_1 \mathbf{F}^T \cdot \mathbf{F} + C_2 \dot{\mathbf{q}}^T \cdot \dot{\mathbf{q}}, \quad (12)$$

式中, Z 表示优化设计目标, 是关节驱动力和关节加速度的加权函数; C_1 和 C_2 为目标函数的加权系数, 当 $C_1=0$ 时, 可获得最小关节广义加速度。

(2) 约束。

将式(4) 作为运动约束, 即

$$\dot{\mathbf{q}}^T \cdot \mathbf{H} \cdot \dot{\mathbf{q}} + \mathbf{J} \cdot \ddot{\mathbf{q}} - \ddot{\mathbf{S}} = \mathbf{0}. \quad (13)$$

引入 Lagrangian 乘子 $\boldsymbol{\lambda} = \{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{12}\}^T \in \mathbf{R}^{12 \times 1}$, 优化问题转化为

$$\min Z' = C_1 \mathbf{F}^T \cdot \mathbf{F} + C_2 \dot{\mathbf{q}}^T \cdot \dot{\mathbf{q}} + \boldsymbol{\lambda}^T (\dot{\mathbf{q}}^T \cdot \mathbf{H} \cdot \dot{\mathbf{q}} + \mathbf{J} \cdot \ddot{\mathbf{q}} - \ddot{\mathbf{S}}). \quad (14)$$

为了使 Z' 极小, 必须满足 $\frac{\partial Z'}{\partial \dot{\mathbf{q}}} = \mathbf{0}$ 和 $\frac{\partial Z'}{\partial \boldsymbol{\lambda}} = \mathbf{0}$ 。

3.2 基于最小关节广义驱动力的关节轨迹规划

为了获得基于最小关节广义驱动力的关节轨迹规划,取关节广义加速度和载荷作为设计变量。

(1) 目标函数。

$$\min Z = F^T \cdot F \quad (15)$$

(2) 约束。

$$\dot{q}^T \cdot H \cdot \dot{q} + J \cdot \ddot{q} - \ddot{S} = 0 \quad (16)$$

$$P - W \cdot F = 0 \quad (17)$$

引入乘子 $\beta = [\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_{12}]^T \in R^{12 \times 1}$ 和 $\gamma = [\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_{12}]^T \in R^{6 \times 1}$, 将优化问题转化为

$$\min Z' = F^T \cdot F + \beta^T \cdot (\dot{q}^T \cdot H \cdot \dot{q} + J \cdot \ddot{q} - \ddot{S}) + \gamma^T \cdot (P - W \cdot F) \quad (18)$$

为了使 Z' 极小, 必须满足 $\frac{\partial Z'}{\partial F} = 0$ 、 $\frac{\partial Z'}{\partial \dot{q}} = 0$

$$\frac{\partial Z'}{\partial \beta} = 0 \text{ 和 } \frac{\partial Z'}{\partial \lambda} = 0。$$

在这种情况下, 虽然可以获得最小关节广义驱动力, 但可能产生较大的关节广义加速度, 增大了广义惯性力。

3.3 最优时间轨迹规划

对于多机器人协调操作系统而言, 运动学逆解比正解简单, 因此, 可以利用这个优点, 在操作空间内规划部件的轨迹, 然后利用系统的运动学方程通过逆解求出机器人的关节运动轨迹。

为了保证找正、对接过程运动平稳, 部件的轨迹必须是光滑连续的, 且满足如下边界约束条件:

(1) 位姿约束。

$$U(0) = U_0, U(t_{\text{end}}) = U_{\text{end}},$$

式中, t_{end} 是调整姿态的时间, U_0, U_{end} 分别是部件在初始时刻和最终时刻的位姿。

(2) 速度约束。

$$\dot{U}(0) = 0, \dot{U}(t_{\text{end}}) = 0。$$

(3) 加速度约束。

$$\ddot{U}(0) = 0, \ddot{U}(t_{\text{end}}) = 0。$$

根据上述 6 个约束方程, 可采用常用的多项式拟合方法得到轨迹方程

$$U(t) = \frac{6(U_{\text{end}} - U_0)}{t_{\text{end}}^5} t^5 - \frac{15(U_{\text{end}} - U_0)}{t_{\text{end}}^4} t^4 + \frac{10(U_{\text{end}} - U_0)}{t_{\text{end}}^3} t^3 + U_0, \quad (19)$$

式中, $U(t)$ 是时间 t 的函数, 还取决于姿态调整时间 t_{end} 。

此外, 驱动器的性能和物理系统的动态特性决定了

可将驱动器的输出转速和输出力矩等作为轨迹规划时的约束条件, 即

$$|\dot{q}_{ix}(t)| \leq v_{ix \max}, |\dot{q}_{iy}(t)| \leq v_{iy \max}, |\dot{q}_{iz}(t)| \leq v_{iz \max};$$

$$|F_{ix}(t)| \leq F_{ix \max}, |F_{iy}(t)| \leq F_{iy \max}, |F_{iz}(t)| \leq F_{iz \max}。$$

对于这种最优化求解问题, 可以采用二分法求解, 计算过程简单且便于计算机实现。

4 结束语

本课题提出的轨迹规划算法考虑了机器人的载荷分配和关节广义驱动力、部件的最优时间轨迹等最优化设计问题, 有利于提高多机器人协调操作系统的运动学和动力学性能。该方法具有物理意义明确、计算简单、便于计算机实现等优点, 对于机器人的实时规划具有重要意义, 适合工程实际应用, 使找正、对接系统具有较好的柔性和适应能力, 显示出多机器人协调操作系统的优越性。

参 考 文 献

- [1] 景奉水, 谭民, 侯增广, 等. 船体分段位姿找正对接系统——一个多机器人协调操作系统的实现. 自动化学报, 2002, 28(5): 708-714.
- [2] 景奉水, 谭民, 侯增广, 等. 基于多机器人协调的船体分段对接系统的运动学及对接精度研究. 机器人, 2002, 24(4): 324-328.
- [3] 王跃, 谭民, 景奉水. 多机器人协调操作大型物体的运动学分析及应用. 机器人, 2002, 24(5): 451-455.
- [4] 张彬, 方强, 柯映林. 大型刚体调姿系统最优时间轨迹规划. 机械工程学报, 2008, 44(8): 248-252.
- [5] MIKHAIL S, IGOR G, LUO Zhiwei, et al. Reaching movements in dynamic environments: how do we move flexible objects. IEEE Transaction on Robotics, 2006, 22(4): 724-739.
- [6] 张秋毫, 孙汉旭. 三支机器人协调操作及关节力矩优化. 机器人, 2004, 26(6): 502-505.
- [7] DEVENDRA P G, MANISH K. Optimization techniques applied to multiple manipulators for path planning and torque minimization. Engineering Application of Artificial Intelligence, 2002, 15: 241-252.
- [8] 胡斌梁, 陈国良. 一种双机器人跟踪复杂边缘的协调规划方法. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2006, 21(2): 48-51.
- [9] 孟传伟, 蒋平. 一种考虑控制精度的机器人最优轨迹规划方案. 机器人, 2000, 22(3): 211-216.
- [10] 尚伟伟, 丛爽. 提高控制精度的并联机构速度规划算法. 中国科技大学学报, 2006, 36(8): 822-827.
- [11] 陈安军, 刘道华. 双臂机器人协调运动的关节轨迹规划. 信阳师范学院学报, 2001, 14(1): 58-61.

(责编 金卯)