Vol.45 No.6 June, 2019



doi: 10.11857/j.issn.1674-5124.2019030131

机器人精密减速器单工位测试流程优化方法

林志宇1, 刘桂雄1, 汤少敏1, 李小兵2

(1. 华南理工大学机械与汽车工程学院, 广东广州 510640; 2. 工业和信息化部第五研究所, 广东广州 510610)

摘 要:为提高精密减速器性能测试效率,提出一种单工位测试流程优化方法。基于测试项目序列描述定义,构建测 试流程网络,将流程转化为起点与终点固定的最短路径的旅行商问题(travelling salesman problem, TSP)模型进行优 化求解,通过最优解改进找到最优测试路径。该方法能够通过测试项目的序列描述,发掘出不同项目之间优化合并 空间,最优解改进克服一般 TSP 模型仅对相邻项目间优化的问题。应用结果表明,该方法对精密减速器动态测试项 目进行优化,可以缩短 16.17% 测试时间。

关键词: 精密减速器; 性能测试; 优化调度; 路径规划 中图分类号: TH132.46 文献标志码: A

文章编号:1674-5124(2019)06-0019-05

Single-station test process optimization method for robot precision reducer

LIN Zhiyu¹, LIU Guixiong¹, TANG Shaomin¹, LI Xiaobing²

 School of Mechanical and Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China; 2. CEPREI, Guangzhou 510610, China)

Abstract: In order to improve the efficiency of precision reducer performance test, a single-station test process optimization method is proposed. Based on the definition of the test project sequence description, the test process network is constructed, and the process is transformed into the shortest path travelling salesman problem (TSP) model with fixed starting point and end point to optimize the solution, and the optimal test path is found through the optimal solution improvement. The method can uncover the optimized merge space between different projects through the sequence description of the test project, and the optimal solution improvement overcomes the problem that the general TSP model only optimizes between adjacent projects. The results show that the application of this method to optimize the dynamic test project of the precision reducer can shorten the test time by 16.17%.

Keywords: precision reducer; performance test; optimal scheduling; path planning

收稿日期: 2019-03-25; 收到修改稿日期: 2019-04-27

基金项目:广东省科技计划项目(2017B090914003)

作者简介:林志宇(1996-),男,广东潮州市人,硕士研究生,专业方向为精密检测与仪器仪表。

通信作者:刘桂雄(1968-),男,广东揭阳市人,教授,博导,主要从事测试计量与仪器研究。

0 引 言

精密减速器是工业机器人核心部件之一,其质 量直接影响着工业机器人的精度与寿命[1-2],如何准 确、快速、可靠地对精密减速器性能进行测试具有 重要意义。国标 GB/T 30819-2014《机器人用精密 减速器》测试项目主要包括空载实验、负载实验、 超载实验、传动效率、启动转矩、扭转刚度、空程与 背隙、传动误差、温升实验、寿命实验等10种四,由 于测试项目较多、工序繁琐,使得测试过程需要频 繁切换被测件测试环境,测试时间较长,效率较 低。为解决这一问题,目前许多研究提出了多种集 成化测试装备方案,根据测试项目的不同精度要 求、测试方法加以分类,设计出可进行一类或多类 测试项目的测试平台[47]。测试装备集成化通过缩短 测试项目间切换工位、重新装夹等操作时间提高检 测效率。若能在测试中通过调度优化测试流程,调 整相关测试项目顺序,则可达到最优化减少测试时 间,进一步提高测试效率。这种优化思路在国内外 其他领域也有相关研究: Kuo 等题通过优化计算机 中数据节点序列分布提高任务执行效率: PR Srivatsava 等¹⁹ 采用萤火虫算法优化软件测试序列, 产生最佳测试路径; I Pomeranz¹⁰提出集合覆盖的 概念,指出优化测试序列以减少功能测试序列的可 行性。基于这一优化思想,本文提出精密减速器单 工位测试过程优化模型,旨在缩短精密减速器测试 时间,提高测试效率。

1 减速器测试过程优化模型

1.1 测试项目序列描述定义

前面提到精密减速器测试项目繁多,测试过程 复杂,但对比各项目测试流程,某些测试项目之间 具有相同的部分执行动作。如传动精度测试中,标 准要求减速器在空载下按额定转速正转运行1h, 测量其传动误差变化情况;空载实验则要求减速器 在空载下按额定转速正反转各运行2h,两者之间 有共同测试部分"空载下按额定转速正转运行"。

为方便测试项目表示,定义执行元 X 为测试过 程中各个执行动作的最小执行单位,用 x,表示测试 中 m 类执行元的第 i 类执行元,有:

 $X = \{x_i | x_i = (x_{si}, x_{li}, x_{di}, x_{ti}), i \in (1, m)\}$ (1)

式中: x_s——测试实际转速与被测件额定转速的比 值, 如上述测试"空载下按额定转速运行", 其 测试转速为额定转速, 则 x_s 值为 1; x₁₁——测试负载与被测件额定负载的比值,如超载实验中,测试要求负载为额定负载的
4倍,则x₁₁值为4;

*x*_d——测试中实际输入转向数值,正转为 1,反 转为-1;

x_u——执行元的测试时间,其应为所有项目中 包含该测试动作的测试时间的最大公约数 (单位为 min),如空载测试与传动精度测试中 共同测试动作"空载下按额定转速正转运 行",其中空载测试时长为 120 min,传动精度 测试时长为 60 min,则 x_u值为两者最大公约 数 60 min。

用 Y 表示测试过程中的测试项目,则 Y 中任意 的项目序列 y_i 由 X 中元素所组成,如: $y_1 = x_4 x_2 x_3 x_8$, $t(y_j)$ 表示项目序列所需测试时间,令 k_i 为序列 y_i 中 包含 x_i 元素的数量,则有:

$$t(y_j) = \sum_{i=1}^m k_i x_{ii}$$
(2)

1.2 测试流程网络模型

由于不同测试项目之间可能具有部分相同的测 试内容,即测试序列中存在部分相同序列,故可通 过重新排列 Y实现压缩总执行元序列长度,缩短测 试时间。

不同测试项目之间执行元序列之间的交与并关 系用 $y_i \cap y_j, y_i \cup y_j$ 表示,其中 $y_i \cap y_j$ 表示 y_i 序列与 y_i 序列的最长共有连续序列,且该序列起始段为 y_i 的起始段,结尾段为 y_i 或 y_i 的结尾段,否则即为 $\emptyset; y_i \cup y_j$ 表示同时包含 y_i 和 y_i 的最短连续序列,且 该序列起始段为 y_i 的起始段,结尾段为 y_i 或 y_i 的结 尾段。

图 1 为测试流程网络模型, y₀ 为一空测试项 目,可作为网络模型中优化的起点与终点。其中 y_i 指向 y_i 的路径表示执行项目 y_i 后再执行项目 y_i 所需要的时间, y_i 到 y_k 的单向路径表示测试中项 目 y_k 需要紧接在项目 y_i 之后执行。

令 c_{ij} 为执行 y_i 后 y_j 的执行时间, $r(y_i \rightarrow y_j)$ 为 y_i 指向 y_i 的路径值, 则有:

$$c_{ij} = r(y_i \to y_j) = t(y_j) - t(y_i \cap y_j)$$
(3)

至此,优化问题转化为在网络模型中,以 y_0 为起点,求遍历所有节点最后返回 y_0 的最短路径的旅行商问题 (travelling salesman problem, TSP)^[11]。



图1 测试流程网络模型

2 减速器测试过程最优路径求解与改进

在实际测试过程优化操作中,由于存在部分测 试项目本身具有测试相对独立性,其测试序列无法 与其他测试序列压缩结合,故上述模型往往具有多 个最优解;且测试中项目虽然较多,但对于 TSP 问 题求解而言,节点个数仍是较为有限。为能全面地 求出所有最优路径,便于后续改进等操作,可采用 动态规划对模型进行求解。

2.1 基于动态规划的最优路径

用 (y_i, Y_k) 表示当前状态, 此刻所处节点为 y_i , 未 经过点集合为 Y_{ko} 在状态 (y_i, Y_k) 的决策集合中, 取 决策 $y_j \in Y_k$, 得到利益 (测试时间) 即为 c_{ij} , 转入下一 个 状态 $(y_i, Y_k)\{y_j\}$)。采用函数空间迭代法, $f_k(y_i, Y_k)$ 表示当前状态所对应的最优解, 即从 y_i 点 出发, 经过 Y_k 中点各一次最终到达 y_0 点的最短路 径, 求解的迭代公式为:

$$\begin{cases} f_k(y_i, Y_k) = \min_{v_j \in V} \left\{ c_{ij} + f_{k-1}(y_j, Y_k \setminus \{y_j\}) \right\} \\ f_0(y_i, \emptyset) = c_{i0} \end{cases}$$
(4)

其中, *k*=1, 2, 3,…, *n*; *V*当前节点为所有可行路径 *v*₁的集合, 在第 *k* 阶段其节点数为 *k*。

在迭代过程中,记录各节点进入集合 Y_k的顺 序,最后所得最优解*f_n*(y₀, Y_n)对应解序列 Y_{n+1}即为 所求最优序列。

2.2 最优路径的改进

在测试模型网络构建的过程中,路径值 $c_{ij} = r(y_i \rightarrow y_j)$ 的物理意义为"执行测试 y_i 后执行测 试 y_i 所需测试时间",即与执行序列 y_i 压缩后序列 y_i 的时间长度,其值在网络模型中体现为只与 y_i 的 前一个执行项目 y_i 有关,而实际上为了达到最优的 压缩效果,其应与 y_i 的前k个执行项目均有关(k由 各项目的执行元序列长度决定),故需对解得的最优 解进行修正。设 Y_{r+1} 为解序列 Y_{r+1} 第z个单元,则 第k次迭代改进过程为:

$$r^{(k)}\left(Y_n^{z-1} \to Y_n^z\right) = t\left(Y_n^z\right) - t\left(\left(\bigcup_{i=1}^k Y_n^{z-k-1+i}\right) \cap Y_n^z\right)$$
(5)

对应的测试时间为:

$$t^{(k)}(Y_n) = \sum_{i=0}^n r^{(k)} \left(Y^i \to Y^{i+1} \right)$$
(6)

改进时,若 k 值选取较大,则执行序列中距离 较远的两个项目可能发生干涉,为避免出现这种情况,k 值应取较小值,一般取 2~4。

上述函数空间迭代算法求出最优解,再选定 *k* 值对最优解进行多步改进。

3 减速器动态测试项目优化实例

精密减速器动态测试项目包括空载实验、负载 实验、超载实验、传动效率和传动精度等 5 项,其测 试时间长、测试内容重复率高,具有较大的优化空 间和意义。表1为动态测试项目测试执行流程。

根据表1执行内容,可解析出执行元*X*,减速器 动态测试执行元内容如表2所示。进一步可得出测 试项目 *Y*,表3 为动态测试各项目对应测试序列。

构建测试流程网络模型并根据式 (3) 计算网络 中路径值,得到如图 2 所示的模型。

按式 (4) 对网络进行迭代计算, 可得出迭代过

表1 动态测试项目测试执行流程

.

项目	执行内容
空载实验	加载电机停机、驱动电机加速到被试件额定转速,运行2h;驱动电机反转,加速到被试件额定转速,运行2h
负载实验	负载电机加载到被试件额定转矩25%,驱动电机加速到被试件额定转速,运行20 min;负载电机加载到被试件额定转矩 50%,运行20 min;负载电机加载到被试件额定转矩75%,运行20 min;负载电机加载到被试件额定转矩100%,运行2 h; 反向执行以上操作
超载实验	负载实验后,在额定转速下,负载电机在30 s内将加载提高到被试件额定转矩的4倍,运行2 min;负载电机输出恢复到被 试件额定转矩,运行20 min
传动效率	负载电机加载到被试件额定转矩,驱动电机加速到被试件额定转速,运转1h
传动精度	负载电机停机,驱动电机加速到被试件额定转速,运行1h

表 2 减速器动态测试执行元内容				
i	x_{si}	x_{li}	$x_{\scriptscriptstyle \mathrm{d}i}$	x_{ti}/min
1	1	0	1	60
2	1	0	-1	120
3	1	0.25	1	20
4	1	0.25	-1	20
5	1	0.5	1	20
6	1	0.5	-1	20
7	1	0.75	1	20
8	1	0.75	-1	20
9	1	1	1	20
10	1	1	-1	120
11	1	4	1	2

表 3 动态测试各项目对应测试序列

节点	项目名称	对应序列
y_1	空载实验	$x_1x_1x_2$
y_2	负载实验	X ₃ X ₅ X ₇ X ₉ X ₉ X ₉ X ₉ X ₉ X ₉ X ₄ X ₆ X ₈ X ₁₀
\mathcal{Y}_3	超载实验	$x_{11}x_{9}$
\mathcal{Y}_4	传动效率	X ₉ X ₉ X ₉
<i>Y</i> 5	传动精度	<i>x</i> ₁



图 2 精密减速器动态测试流程网络模型

程及结果,表4为动态测试最优路径迭代结果。

得最优解值t(Yn+1)=682 min, 对应有 12 组最优 序列 Y_{n+1}, 取修正系数 k=2, 对上述 12 组 Y_{n+1} 进行改 进,表5为最优解t(Y_{n+1})改进结果。

由表 5 可以看出, 改进后t(Y_{n+1})=622 min, 对应 有4组最优序列 Y_{n+1}, 取解序列Y_{n+1}= {y₀y₁y₅y₂y₃y₄y₀},

表 4 最优路径迭代结果					
i	f_5 /min	f_4 /min	<i>f</i> ₃/min	f_2 /min	f_1 /min
1	<u>682</u>	442	442	60	0
2	<u>682</u>	322	240	60	0
3	x	500	300	120	60
4	<u>682</u>	622	442	240	60
5	<u>682</u>	622	442	240	60

表 5 最优解序列及其改进结果

改进序列	时间/min	改进序列	时间/min
Y0Y1Y5Y2Y3Y4Y0	<u>622</u>	Y0Y4Y1Y5Y2Y3Y0	682
Y0Y1Y5Y4Y2Y3Y0	682	Y0Y4Y5Y1Y2Y3Y0	682
Y0Y2Y3Y1Y5Y4Y0	682	Y0Y4Y2Y3Y1Y5Y0	682
Y0Y2Y3Y5Y1Y4Y0	682	Y0Y4Y2Y3Y5Y1Y0	682
Y0Y2Y3Y4Y1Y5Y0	<u>622</u>	Y ₀ Y ₅ Y ₁ Y ₂ Y ₃ Y ₄ Y ₀	<u>622</u>
Y0Y2Y3Y4Y5Y1Y0	<u>622</u>	Y0Y5Y1Y4Y2Y3Y0	682

可得到:r₁=0,即传动精度测试 y₂与空载测试 y₁并 列进行,减少两个实验中的重复冗余部分;r₄⁽¹⁾=60, r₄⁽²⁾=0,即传动效率测试 y₄与负载实验 y₂并列进行, 减少两个实验中的重复冗余部分。根据其修正后路 径值还原为测试流程,图3为最优测试流程示意图。



优化后 $t(Y_{n+1})=622$ min,相较优化前 $t(Y_{n+1})=$ 742 min 减少了 120 min, 缩短了 16.17%。

4 结束语

1)论文通过对减速器单工位测试过程建模,构 建测试流程的 TSP 网络模型, 求解其最优路径以实 现减速器测试流程优化。计算表明,本方法在减速 器动态测试项目优化中缩短测试时间,有效提高了 其测试效率。

2) 机器人精密减速器单工位测试流程优化算 法具有通用性,可推广到其他相关产品测试过程优 化,如伺服电机性能测试等。

3)在特定测试情况下,所需测试项目会根据外 界要求变化,而不同测试项目组合有不同最优解, 将需调整算法,使其可根据实际需求对测试序列进 行在线优化调整,这些是后续需要研究的内容。

参考文献

- MOUSAVI A, AKBARZADEH A, SHARIATEE M, et al. Repeatability analysis of a SCARA robot with planetary gearbox[C]// Rsi International Conference on Robotics and Mechatronics. IEEE, 2016.
- [2] JUNG B J, KIM B, KOO J C, et al. Joint torque sensor embedded in harmonic drive using order tracking method for robotic application[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2017, 22(4): 1594-1599.
- [3] 机器人用谐波齿轮减速器:GB/T 30819-2014[S].北京:中国 质检出版社, 2014.
- [4] 陈李果, 彭鹏, 汪久根, 等. RV 减速器试验装置研制及测试 分析 [J]. 机械传动, 2017(11): 92-96.
- [5] 赵海鸣, 李豪武, 朱加云, 等. RV 减速器回差及刚度测试系 统研究 [J]. 机械传动, 2017(10): 152-155.
- [6] 崔玉明, 史旭东, 周好, 等. 高精度机器人减速器静态性能测

试试验研究 [J]. 制造技术与机床, 2017(1): 77-81.

- [7] 仉喜洋, 谌志新, 徐志强. RV 减速器综合参数测量方法研究 [J]. 机械传动, 2018(5): 53-56.
- [8] KUO J J, YANG H H, TSAI M J. Optimal approximation algorithm of virtual machine placement for data latency minimization in cloud systems[C]//Proceedings-IEEE INFOCOM, 2014.
- [9] SRIVATSAVAA P R, MALLIKARJUN B, YANG X S. Optimal test sequence generation using firefly algorithm[J]. Swarm & Evolutionary Computation, 2013, 8: 44-53.
- [10] POMERANZ I. Restoration-based procedures with set covering heuristics for static test compaction of functional test sequences[J]. IEEE Transactions on Very Large Scale Integration Systems, 2014, 22(4): 779-791.
- [11] 孟亚峰, 韩春辉, 李丹阳, 等. 基于蚁群算法的多值属性系统 测试序列优化 [J]. 中国测试, 2013, 39(6): 110-113.

(编辑:李刚)

(上接第5页)

历各个相位差,避免了随机相移导致的应用局限, 实现了核电领域环境中的微弱信号高精度检测。同 时利用主动激励信号使扬声器发声,通过检测扬声 器是否正常发声判断其状态情况,应用时不需要完 全恢复待测激励信号,仅分离和提取激励信号信息 从而判断检测结果,实现了扬声器工作状态的精准 监测。

参考文献

- [1] 冯晨, 秦工, 詹昊思, 等. 互相关检测法在微弱信号检测中的 应用 [J]. 理论与算法, 2016(17): 65-66.
- [2] WANG G, REBOUL S, CHOQUEL J B, et al. Circular regression in a dual-phase lock-in amplifier for coherent detection of weak signal [J]. Sensors, 2017, 17(11): 2615.
- [3] 张林, 董浩斌, 宋恒力. 基于正交锁相放大器的交流电法接 收机设计 [J]. 中国测试, 2015, 41(9): 60-65.
- [4] ZHANG G, WANG Y. Research on weak signal detection in time domain based on phase locked loop and duffing oscillator[J]. Science Technology & Engineering, 2014, 14(6): 13-19.
- [5] LIU H F, LI B, HE Q X, et al. Development of a digital orthogonal lock-in amplifier and its application in methane

detection [J]. Acta Photonica Sinica, 2016, 45(4): 18-23.

- [6] QI C, HUANG Y, ZHANG W, et al. Design of dual-phase lock-in amplifier used for weak signal detection[C]// Industrial Electronics Society, IECON 2016, Conference of the IEEE. IEEE, 2016: 883-888.
- [7] TANG C, ZHANG M Y, CAO G H, et al. Study of crosscorrelation algorithm-based weak signal extraction method for laser alignment of large unit[J]. Acta Armamentarii, 2017, 38(10): 2048-2054.
- [8] WANG Q, ZENG Q N, ZHENG Z H. Research of speech endpoint detection in low SNR environment[J]. Science Technology & Engineering, 2017, 17(21): 50-56.
- [9] DU T, GUAN B, WU A, et al. Dual-band bandpass filter based on quadruple-mode open stub loaded square ring resonator[C]// IEEE International Conference on Signal Processing, Communications and Computing. 2018: 1-4.
- [10] 李志军,曾以成. 多功能 AB 类四象限模拟乘法器 [J]. 电子 学报, 2011, 39(11): 2696-2700.
- [11] ZHANG Z, CHENG X, YU Y, et al. A fast-transition overthermal protection circuit[J]. Semiconductor Technology, 2016(1): 22-26.
- [12] MIAO C Z, LIN B Y, DANG J M, et al. Lock-in amplifier for pulse-driven quantum cascade lasers gas detection system[J]. Acta Photonica Sinica, 2016, 45(8): 87-92.

(编辑:刘杨)