

# 机加零件螺纹过程质量控制方法研究

时晓铭, 卢一玮, 摄如彬, 时晓钊, 李 建, 谯 丽, 刘志亮\*

四川航天川南火工技术有限公司, 四川 泸州

收稿日期: 2025年12月22日; 录用日期: 2026年1月30日; 发布日期: 2026年2月6日

## 摘 要

本文对螺纹加工过程中采用螺纹量规进行质量控制, 导致环规不能旋合到位出现误判的现象进行分析, 利用 $C_p$ 和 $CPK$ 过程能力指数来对螺纹加工过程能力进行评价, 在加工过程中使用螺纹千分尺对螺纹中径进行定量检测, 并将其控制在公差带下限的30%附近, 通过该措施使外螺纹加工过程能力 $C_p > 1.67$ 、 $1.0 < CPK < 2.0$ , 螺纹中径值的加工质量达到 $6\sigma$ 水平, 降低螺纹中径值在制造过程的误差的波动范围, 提升过程控制能力。

## 关键词

外螺纹, 定量检测, 中径控制, 过程能力

# Research on the Quality Control Method of Thread Machining Process

Xiaoming Shi, Yiwei Lu, Rubin She, Xiaozhao Shi, Jian Li, Li Qiao, Zhiliang Liu\*

Sichuan Aerospace Chuannan Pyrotechnic Technology Co., Ltd., Luzhou Sichuan

Received: December 22, 2025; accepted: January 30, 2026; published: February 6, 2026

## Abstract

This paper analyzes the misjudgment phenomenon that occurs when thread ring gauges fail to be screwed into place due to the application of thread gauges for quality control during the thread machining process. It uses the process capability indices  $C_p$  and  $CPK$  to evaluate the thread machining process capability. In the machining process, a thread micrometer is adopted for quantitative detection of the thread pitch diameter, which is controlled at around 30% of the lower limit of the tolerance zone. Through this measure, the process capability of external thread machining is optimized to meet the criteria of  $C_p > 1.67$  and  $1.0 < CPK < 2.0$ . The machining quality of the thread pitch

\*通讯作者。

文章引用: 时晓铭, 卢一玮, 摄如彬, 时晓钊, 李建, 谯丽, 刘志亮. 机加零件螺纹过程质量控制方法研究[J]. 国际航空航天科学, 2026, 14(1): 1-7. DOI: 10.12677/jast.2026.141001

diameter is improved to a qualified level, the fluctuation range of errors in the thread pitch diameter during the manufacturing process is reduced, and the process control capability is enhanced.

## Keywords

External Thread, Quantitative Inspection, Diameter Control, Process Capability

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

在螺纹加工、验收过程中,行业普遍采用螺纹量规进行质量控制,它的特点是操作简单、易学,易于操作者使用,通过简单的操作即可定性的判断产品螺纹加工的质量是否合格,适合批量生产使用,由于螺纹量规在制造过程中受到螺纹半角误差、螺距累积误差和螺纹中径误差的影响,外螺纹中径值偏上限会引起工件外螺纹公差带与环规公差带发生干涉,导致环规不能旋合到位的情况,出现误判现象,因此生产过程中操作者会同时借 3 副以上的螺纹量规用于螺纹生产中的质量控制,以防某一量规检不过时及时更换,该方式为定性检测,不能提供检测值,操作者无法判断螺纹关键参数的实际控制水平[1] [2]。

为提高零件螺纹生产过程质量控制水平,本文采用一种定量检测的方式对螺纹加工的质量水平进行控制,提高螺纹加工质量的一致性,让操作者了解每个螺纹的加工具体质量水平,降低零件螺纹在检验过程出现误判现象的发生。

## 2. 螺纹检测误判与加工过程能力评价

### 2.1. 螺纹检测误判现象分析

由于螺距误差和牙侧角误差,外螺纹不能与同样中径大小的理想内螺纹旋合,而只能与一个中径较大的内螺纹旋合,外螺纹作用中径  $d_{2m}$  等于外螺纹上的实际中径  $d_2$  (单一中径)与螺距误差的中径当量  $f_p$  和牙侧角误差的中径当量  $f_a$  之和[3],即:

$$d_{2m} = d_2 + (f_p + f_a)$$

作用中径是说明实际螺纹能否起旋作用的中径,使在规定的旋合长度内,恰好包容实际螺纹的一个假想螺纹的中径,这个假想螺纹具有基本的牙型的螺距、牙侧角和牙型高度,并在牙顶和牙地之间里也有间隙,以保证不与实际螺纹的大小径发生干涉,要保证内外螺纹互相旋合,必须保证内螺纹的作用中径大于外螺纹的作用中径,螺纹量规即是对作用中径进行检测。

由于螺纹量规在制造过程中受到螺纹半角误差、螺距累积误差和螺纹中径误差的影响,外螺纹中径值偏上限会引起工件外螺纹公差带与环规公差带发生干涉,导致环规不能旋合到位的情况,出现误判现象。因此生产过程中操作者会同时借 3 副以上的螺纹量规用于螺纹生产中的质量控制,以防某一量规检不过时及时更换。

### 2.2. 加工过程能力评价方法

利用  $C_p$  和  $CPK$  过程能力指数来对螺纹加工过程能力进行评价[4]。 $C_p$  是双侧公差情况下的过程能力指数,计算公式如下:

$$C_p = \frac{T}{6\sigma} = \frac{T_u - T_l}{6\sigma}$$

其中  $T$  代表公差幅度，反应对产品的技术要求， $T_u$ 、 $T_l$  分别表示公差的上、下限， $\sigma$  代表质量特性值分布的总体标准差，反应加工过程的一致性。根据  $T$  与  $6\sigma$  的相对大小可以得到过程能力指数， $C_p$  值越大，表明加工质量越高，也表明制造过程的精密度越高[5]。

$CPK$  是在过程有偏移情况下的过程能力指数，使用前提是需要过程稳定且数据为正态分布，且只考虑过程受普通原因的影响。 $CPK$  通过  $CPU$ (过程能力指数上限)或  $CPL$ (过程能力指数下限)的最小值来计算[6]，其计算公式如下：

$$CPU = \frac{USL - \mu}{3\sigma}$$

$$CPL = \frac{\mu - LSL}{3\sigma}$$

其中  $USL$  代表规格上限， $LSL$  代表规格下限， $\mu$  代表过程均值。过程能力指数的评判标准见表 1、表 2。

**Table 1.**  $C_p$  process capability index evaluation table  
**表 1.**  $C_p$  过程能力指数评价表

界限	判断	应采取措施
$C_p \geq 1.67$	过程能力特强	降低对原材料和设备的要求，放宽检查，设法降低成本。
$1.33 < C_p \leq 1.67$	过程能力充足	1. 采用控制图控制工序，使其处于稳定状态，并保持过程能力不变； 2. 适当简化产品检验工序，节约管理费用。
$1 < C_p \leq 1.33$	有过程能力	1. 利用过程能力指数监视工序状态变化，确保产品质量稳定； 2. 调整机械性能，确认机械能力充足，再过渡到工序管理。
$0.67 < C_p \leq 1$	过程能力不足	1. 分层调查过程能力的主要原因，采取相应措施，使其恢复正常； 2. 对产品进行全数检查，进行分级筛选。
$C_p \leq 0.67$	无过程能力	1. 不能生产，必须改造，的确认过程能力充足后在进行生产； 2. 对已生产的产品进行全数检验。

**Table 2.**  $CPK$  process capability index evaluation table  
**表 2.**  $CPK$  过程能力指数评价表

级数	$CPK$ 值范围	判断标准
A++:	$CPK \geq 2.0$	特优，可以考虑降低成本
A+	$1.67 \leq CPK < 2.0$	优，应继续保持
A	$1.33 \leq CPK < 1.67$	能力良好、状态稳定，但应尽力提升 A+级
B	$1.0 \leq CPK < 1.33$	状态一般，过程因素稍有变异即产生不良的危险，应利用各种资源及方法将其提升至 A 级
C	$0.67 \leq CPK < 1.0$	差，过程的不良品较多，必须提升其能力
D	$CPK < 0.67$	不可接受，过程能力太差，应考虑重新整改设计制造过程

2.3. 外螺纹加工过程能力分析

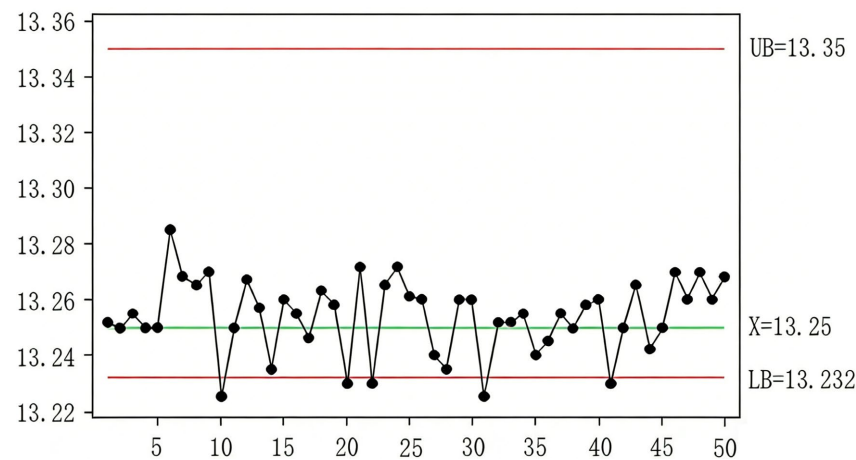
选取某外协厂为公司生产的零件进行分析，该外协单位进行机加零件的精加工，加工设备为精密数

控车床, 加工外螺纹所用刀具也与我单位相同, 所用螺纹量规也由我单位提供, 该批次外螺纹规格为 M14 × 1-6h, 中径大小为 13.350 (0, -0.118), 利用三针法对其单一中径进行检测, 检测结果如表 3 所示。

**Table 3.** Results of the M14 × 1-6h external thread pitch diameter inspection  
**表 3.** M14 × 1-6h 外螺纹中径检测结果

序号	中径值(mm)	序号	中径值(mm)	序号	中径值(mm)	序号	中径值(mm)	序号	中径值(mm)
1	13.252	11	13.250	21	13.272	31	13.225	41	13.230
2	13.250	12	13.267	22	13.230	32	13.252	42	13.250
3	13.255	13	13.257	23	13.265	33	13.252	43	13.265
4	13.250	14	13.235	24	13.272	34	13.255	44	13.242
5	13.250	15	13.260	25	13.261	35	13.240	45	13.250
6	13.285	16	13.255	26	13.260	36	13.245	46	13.270
7	13.268	17	13.246	27	13.240	37	13.255	47	13.260
8	13.265	18	13.263	28	13.235	38	13.250	48	13.270
9	13.270	19	13.258	29	13.260	39	13.258	49	13.260
10	13.225	20	13.230	30	13.260	40	13.260	50	13.268

对以上数据进行处理, 对外螺纹中径值变化(如图 1)、过程控制能力(如图 2)进行分析可知, 本批零件 M14 × 1-6h 外螺纹加工的中径值的分布很不理想, 过程能力指数  $C_p = 1.02$ , 小于 1.33,  $CPK = 0.31$ , 小于 1, 由此可知本批零件 M14 × 1-6h 外螺纹的加工过程能力完全不满足零件螺纹的质量要求, 必须对交付回公司的零件螺纹进行全数检验。



**Figure 1.** Analysis of the change in the diameter of the external thread  
**图 1.** 外螺纹中径变化分析

该批零件外螺纹在外协检验进行入厂验收时, 发现有 M14 × 1-6h 止端环规检不合格 1 件; 同时, 检验在验收本批零件外螺纹的过程出现有的环规能轻松旋合到位, 有的旋合紧过的现象, 导致检验效率不高, 检验结果验证了我们分析结果的正确性。因此在外螺纹加工过程如只采用 GB3934 中规定的质量控制方法有重大缺陷, 生产过程质量控制能力水平明显偏低, 对加工的外螺纹采取全数检验措施是必要的,

但这样就极大浪费了公司有限检验资源，而且不能消除不同量规之间出现的检验结果歧义，应制定提高外协加工外螺纹加工质量的方法。

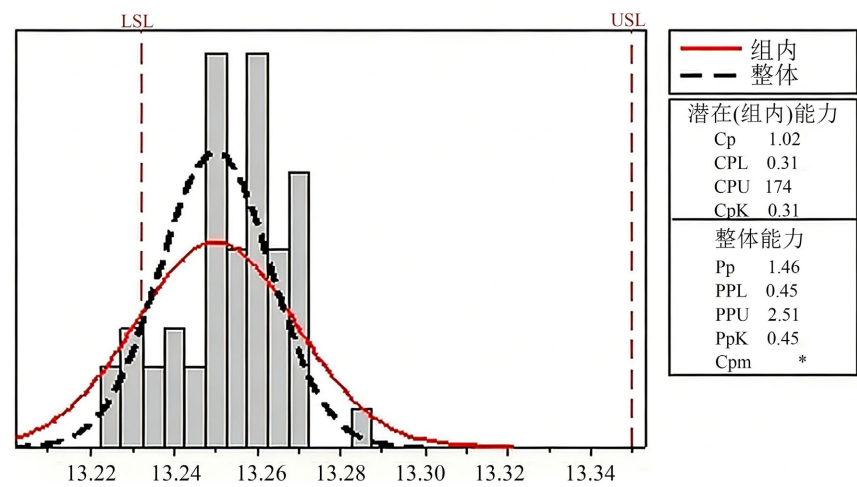


Figure 2. Analysis of quality control of the pitch diameter of external threads  
图 2. 外螺纹中径值质量控制分析

3. 提升外螺纹加工过程能力

针对对外螺纹加工过程能力指数偏低的原因分析，制作以下改进措施：(1) 增加在加工过程中使用定量检测方法对外螺纹的中径值进行控制并记录；(2) 确定外螺纹加工时的最优中值，降低螺纹中径值在制造过程的误差的波动范围，提升过程能力。

3.1. 外螺纹中径值定量检测方法

目前可对外螺纹参数进行定量检测的方法有三针法、螺纹千分尺、专用检测设备[7]，三针法是目前普遍使用的方法，优点测量准确度高，但是需要使用者熟练掌握使用三针的技巧，不适应生产现场的大规模使用；专用检测设备主要采用探针扫描和光学影像检测，检测精度高，但检测速度慢、价格高无法实现在机检测[8]；螺纹千分尺可以直接测出外螺纹中径值，但测量精度通常为 $\pm 0.015$  mm 左右；与前两种方法相比要低，但是整体测量精度满足零件外螺纹中径值的检测要求。随机选择某批次一发产品利用螺纹千分尺对中径进行测试，验证螺纹千分尺的测量重复性，所选外螺纹规格为 M14  $\times$  1-6h，中径大小为 13.350 (0, -0.118)，同时利用三针法对其单一中径进行检测，检测结果如表 4 所示。

Table 4. Repeatability verification of thread micrometer  
表 4. 螺纹千分尺重复性验证

测量次数	螺纹千分尺检验员 1 (mm)	螺纹千分尺检验员 2 (mm)	螺纹千分尺检验员 3 (mm)	三针法测量 (mm)
1	13.252	13.253	13.253	13.250
2	13.253	13.250	13.252	13.251
3	13.250	13.252	13.252	13.251
4	13.251	13.252	13.253	13.250
5	13.252	13.253	13.254	13.251

由表 4 测试结果可知,不同人员利用螺纹千分尺进行多次测试,测量结果波动误差在 0.005 mm 内,与三针法测量结果相近,由此说明螺纹千分尺测量系统重复性良好。因此在外螺纹生产过程中保留螺纹环规检测的基础上,增加螺纹千分尺对外螺纹中径值实测控制手段,通过量化检测外螺纹中径值,严格控制加工过程中出现的随机误差。

3.2. 确定外螺纹加工过程单一中径值最佳值

根据外螺纹作用中径公式可知,螺距误差和半角误差属于量规制造过程中存在的系统误差,无法进行改善[9]。只有通过改善制造过程中外螺纹单一中径值的控制水平,将其控制在下限范围,提高零件螺纹的容错性,才能达到提高外螺纹加工质量的目的[10]。通过对工件外螺纹控制范围与螺纹环规公差关系图分析,进行多批次测试分析后,在进行加工时选择按照公差带下限约 30%左右进行控制(如图 3)。

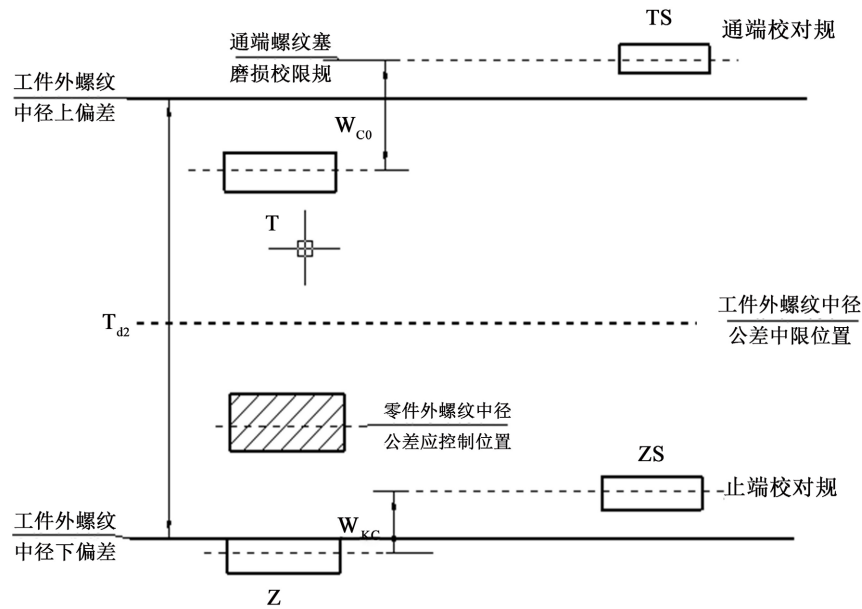


Figure 3. The relationship between the range of external thread control and ring gauge tolerance  
图 3. 外螺纹控制范围与环规公差关系

3.3. 改进后结果验证

利用改进后的措施对外螺纹加工过程进行控制,选取 10 批任务进行统计分析,结果如表 5 所示,改进后外协厂家外螺纹加工的过程能力指数( $C_p$  值)比改进前有了明显的提高,10 批产品外螺纹中径值过程能力指数  $C_p$  值均大于 1.67,达到特优水平,说明外螺纹中径值在生产过程中高度受控,最大限度消除了人为因素和量具自身误差的影响,CPK 值处于 1.0 到 2.0 之间,说明生产过程中实现对外螺纹中径值公差位置的有效控制,保证螺纹中径值控制在了下限范围。

Table 5. Summary table of the machining quality of the pitch diameter of the external thread  
表 5. 外螺纹中径值加工质量汇总表

名称	外螺纹规格	数量	CP 值	CPK 值	一次交检合格率	验收耗时	量规检定结果
任务 1	M10 × 1-6 h	1111	2.35	1.28	100%	24 H	合格
任务 2	M14 × 1.5-6 h	450	2.51	1.98	100%	4 H	合格



续表

任务 3	M16 × 1-6 h	1895	2.91	1.69	100%	16 H	合格
任务 4	M14 × 1-6 h	670	2.51	1.79	100%	6 H	合格
任务 5	M8 × 0.5-6 f	900	1.77	1.54	100%	6 H	合格
任务 6	M20 × 1-6 h 7 h	650	2.0	1.93	100%	8 H	合格
任务 7	M14 × 1-6 h	1071	2.36	1.03	100%	12 H	合格
任务 8	M12 × 1-6 h	1071	2.96	1.32	100%	12 H	合格
任务 9	M20 × 1.5-6 e	790	2.33	1.57	100%	8 H	合格
任务 10	M6 × 0.75-6 h	6600	1.87	1.50	100%	32 H	合格

在外螺纹生产过程中增加了定量检测措施后, 操作人员可以随时掌控外螺纹中径公差的波动范围, 实时监控外螺纹的中径值的变化, 及时调整相应的操作进行程序刀补或更换刀具, 达到了产品质量在生产过程的精细化控制的目标。检验人员在检验外螺纹过程更加流畅, 不必多借螺纹量规, 降低了外螺纹返修频次, 改进外螺纹的加工质量控制方法后, 零件外螺纹的一次交检合格率达到 100%, 过程能力指数有了明显的改善。

#### 4. 总结

本文通过对 GB3934 中规定的螺纹传统检测方法进行分析, 发现了该方法在生产制造过程检测中存在的缺陷, 通过在螺纹生产过程中使用螺纹千分尺对中径进行定量检测, 控制中径在其公差带下限约 30% 左右进行加工, 实现对螺纹生产过程中质量的细微变化进行有效控制, 使外螺纹加工过程能力  $C_p > 1.67$ 、 $1.0 < CPK < 2.0$ , 螺纹中径值的加工质量达到  $6\sigma$  水平; 螺纹量规的平均使用寿命, 大大降低了螺纹加工质量控制成本。

#### 参考文献

- [1] 欧协峰. 螺纹检测技术的发展趋势[J]. 中国计量, 2014(1): 68-70.
- [2] 孙玉玖, 唐英娜, 钱丰, 等. 螺纹的综合测量和单项测量[J]. 计测技术, 2007, 27(3): 28-30.
- [3] 佟岩, 李琳, 唐江涛, 等. 螺纹多参数检测的发展方向[J]. 红外与激光工程, 2008(S1): 231-233.
- [4] 陈常云, 孙茂军, 候亚林. 六西格玛在粉末冶金发动机油泵转子压溃力改进中的应用[J]. 汽车工艺与材料, 2019(6): 5-8.
- [5] 王贝, 曾磊. 基于六西格玛的汽车塑料件涂装合格率的改善[J]. 汽车实用技术, 2018, 44(10): 120-123.
- [6] 何桢. 六西格玛管理[M]. 第 3 版. 北京: 中国人民大学出版社, 2014.
- [7] 冯高头. 影响螺纹联接的可旋合性与可靠性误差分析[J]. 汽车工艺师, 2005(Z1): 124-128.
- [8] 位恒政, 裴丽梅, 崔剑秋, 等. 轮廓扫描法与双球法测量螺纹中径的差异分析[J]. 计量科学与技术, 2023, 67(6): 49-53.
- [9] 顾宏杰. 螺纹配合误差分析及解决方法[J]. 中国机械, 2015(5): 155-156.
- [10] 常加海. 普通车工车削螺纹常见故障及解决策略[J]. 造纸装备及材料, 2023, 52(10): 124-126.